

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

Выступающий:

А. Е. Аксентьев

Руководитель:

д-р. физ.-мат. наук, проф.

Ю. В. Сеничев

канд. физ-мат. наук, доц.

С. М. Полозов

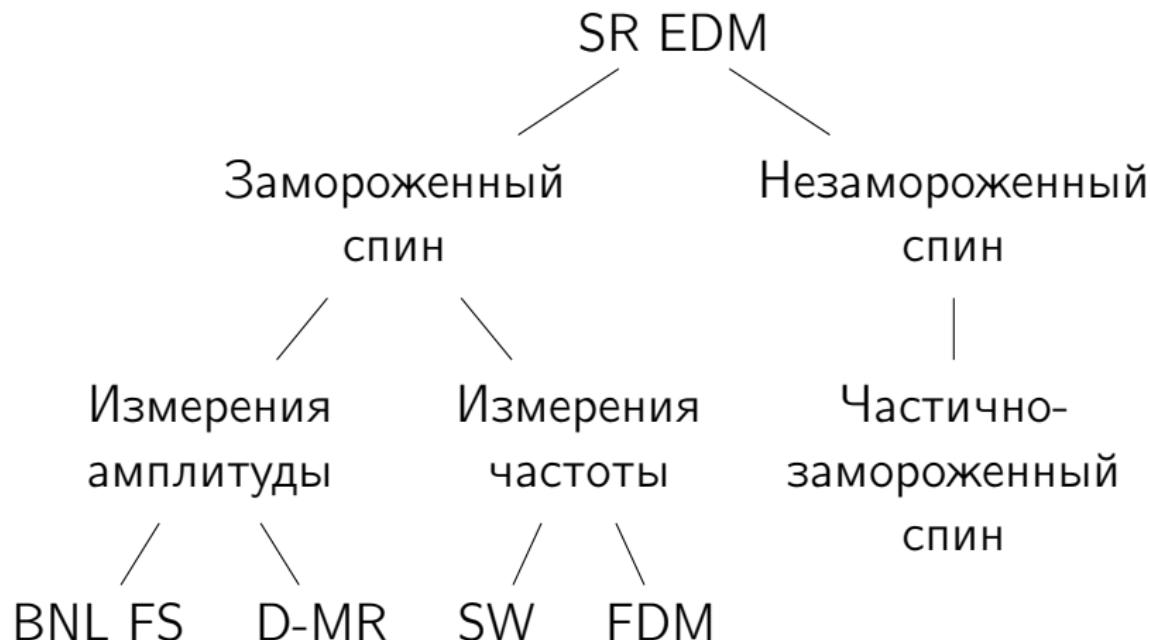
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
“МИФИ”
(НИЯУ МИФИ)

Москва, 2019

Цели и задачи

- **Предмет исследования:** Метод детектирования электрического дипольного момента дейтрана посредством измерения частоты прецессии спина
- **Исследуемые характеристики:**
 - ▶ устойчивость к систематическим ошибкам
 - ▶ статистическая точность
- **Цель исследования:** оценка возможности детектирования ЭДМ дейтрана 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 \bar{n}

Частное решение

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

План работ

➊ Возмущения спиновой динамики

План работ

❶ Возмущения спиновой динамики

- ▶ Ошибка спецификации регрессионной модели, связанная с бетатронными колебаниями

План работ

❶ Возмущения спиновой динамики

- ▶ Ошибка спецификации регрессионной модели, связанная с бетатронными колебаниями

❷ Декогеренция спинов

План работ

1 Возмущения спиновой динамики

- ▶ Ошибка спецификации регрессионной модели, связанная с бетатронными колебаниями

2 Декогеренция спинов

- ▶ Симуляция подавления декогеренции в идеальном ускорителе

План работ

❶ Возмущения спиновой динамики

- ▶ Ошибка спецификации регрессионной модели, связанная с бетатронными колебаниями

❷ Декогеренция спинов

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

План работ

❶ Возмущения спиновой динамики

- ▶ Ошибка спецификации регрессионной модели, связанная с бетатронными колебаниями

❷ Декогеренция спинов

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

3

Поля неидеальности ускорителя

3

Поля неидеальности ускорителя

- ▶ Исследование зависимости от распределения неидеальностей вдоль кольца

Поля неидеальности ускорителя

- ▶ Исследование зависимости от распределения неидеальностей вдоль кольца
- ▶ Сравнение систематической ошибки при движении пучка в прямом и обратном направлениях в кольце

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

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

- ▶ Показать, что секступольное подавление декогеренции работает без изменений для обоих направлений движения пучка

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

- ▶ Показать, что секступольное подавление декогеренции работает без изменений для обоих направлений движения пучка
- ▶ И что частота прецессии спина референсной частицы одинакова в обоих случаях

5 Спин-тюн эквивалентность частиц с
одинаковыми эффективными
Лоренц-факторами

- ▶ Формулировка А
- ▶ Формулировка В

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

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

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

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

Возмущения спиновой динамики

Постановка проблемы

- Решение Т-БМТ уравнения для вертикальной компоненты спина

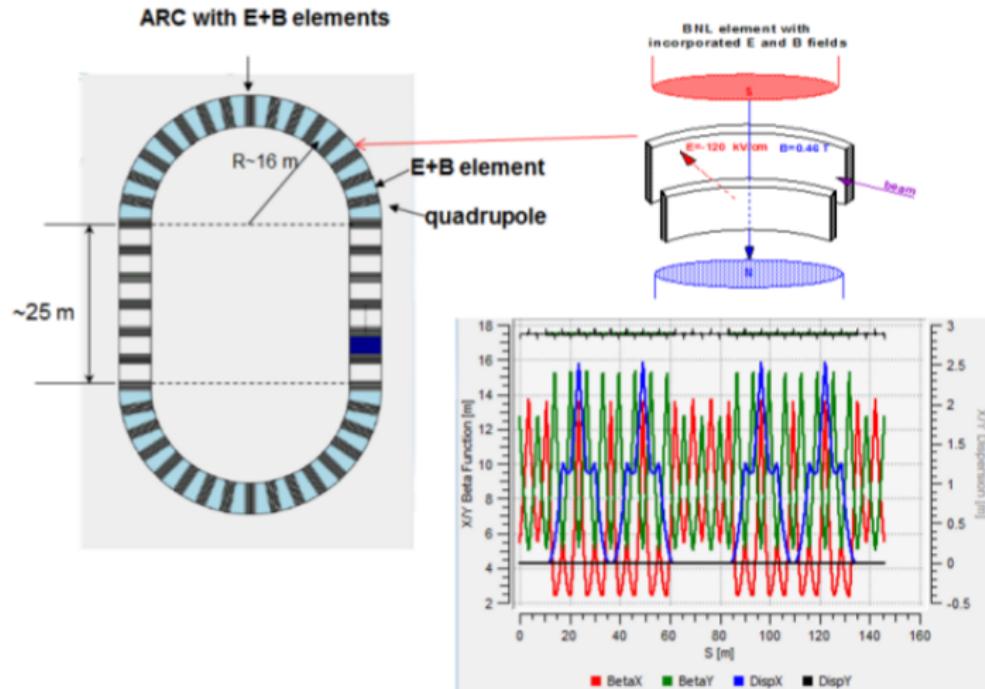
$$s_y(n_{turn}) = \sqrt{(\bar{n}_y \bar{n}_z)^2 + \bar{n}_x^2} \cdot \sin(2\pi\nu_s \cdot n_{turn} + \delta).$$

- Данные фитируются функцией

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

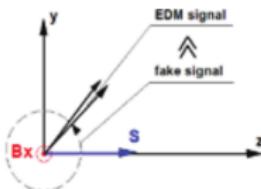
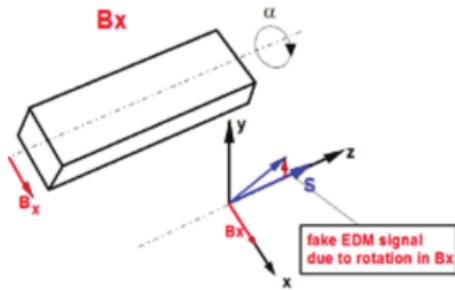
- При значительной вариации ν_s , \bar{n} — ошибка спецификации уравнения регрессии

Симуляция



Симуляция

Неидеальности машины



Частицы

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

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

Анализ

Данные

TRK данные трекера TR

COSY Infinity

GEN вычислены по
формуле, \bar{n} , ν_s

вычислены на данном
обороте

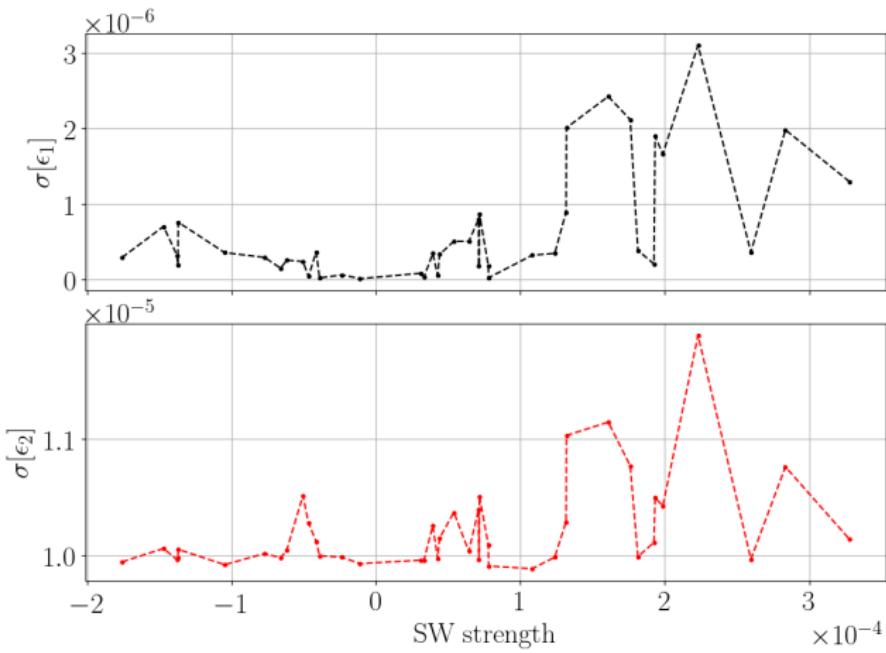
IDL как в GEN, но $\bar{n} = \langle \bar{n} \rangle$,
 $\nu_s = \langle \nu_s \rangle$

Сравнительные статистики

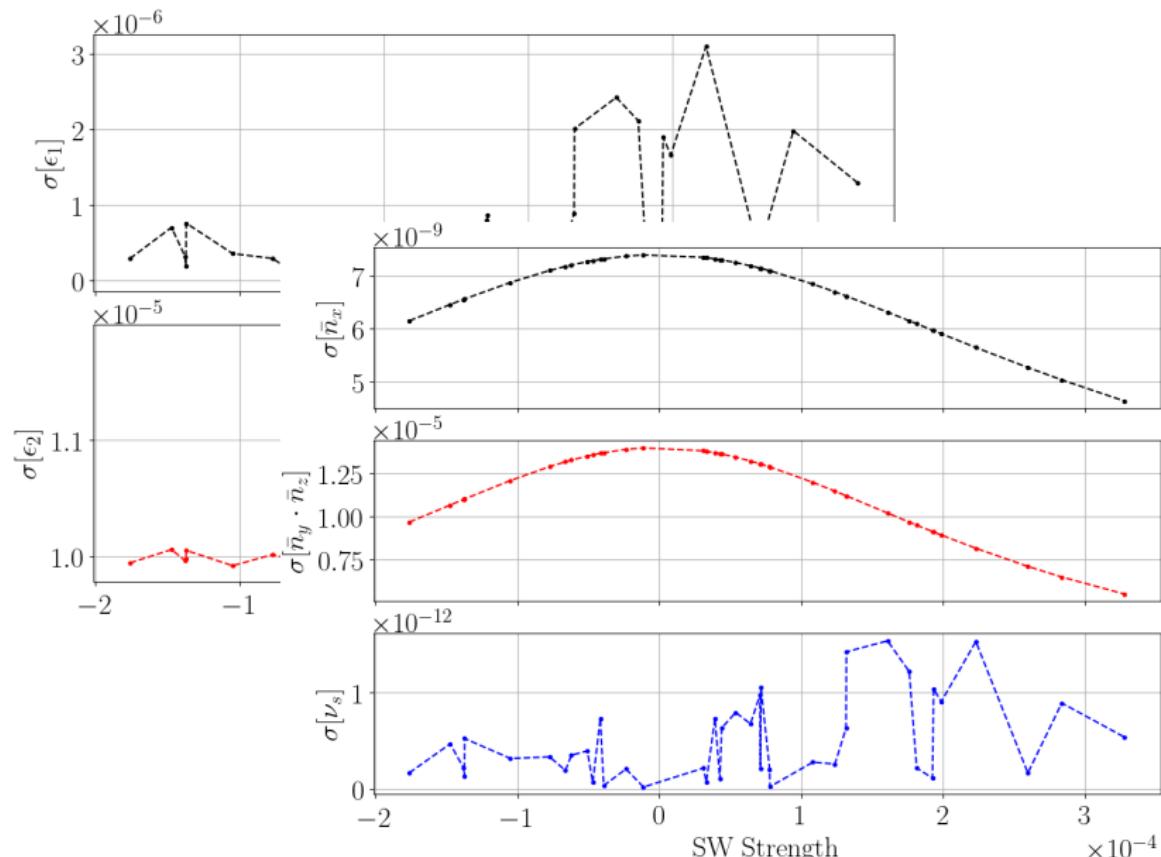
$$\epsilon_1(t) = s_y^{gen}(t) - s_y^{idl}(t)$$

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

Результаты



Результаты



Выводы

- ➊ Влияние вариации \bar{n} на дисперсию невязки между идеальными данными, и трекерными, незначительно, по сравнению с вариацией ν_s

Выводы

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

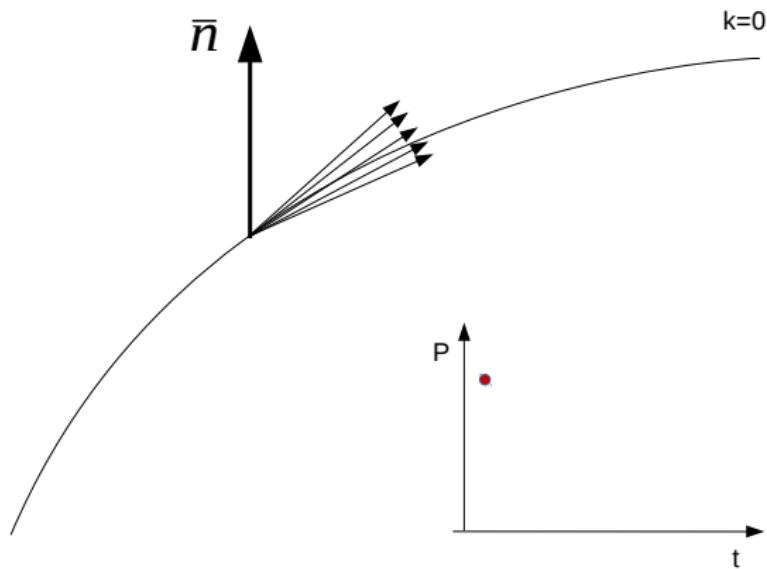
Выводы

- ③ $\sigma[\hat{a}, \hat{b}] < 10\%$, значит даже если вариация \bar{b} будет достаточной, чтобы повлиять на \hat{a} , её эффект на \hat{b} будет уменьшен как минимум в 10 раз

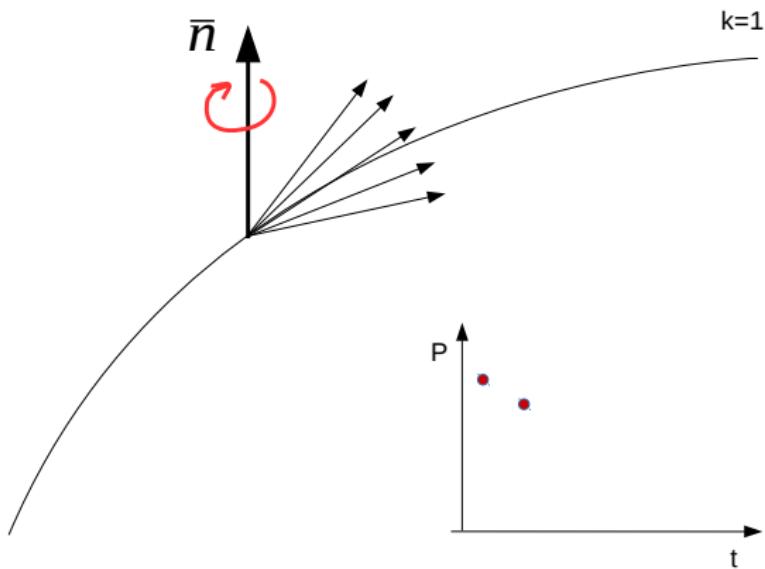
Выводы

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

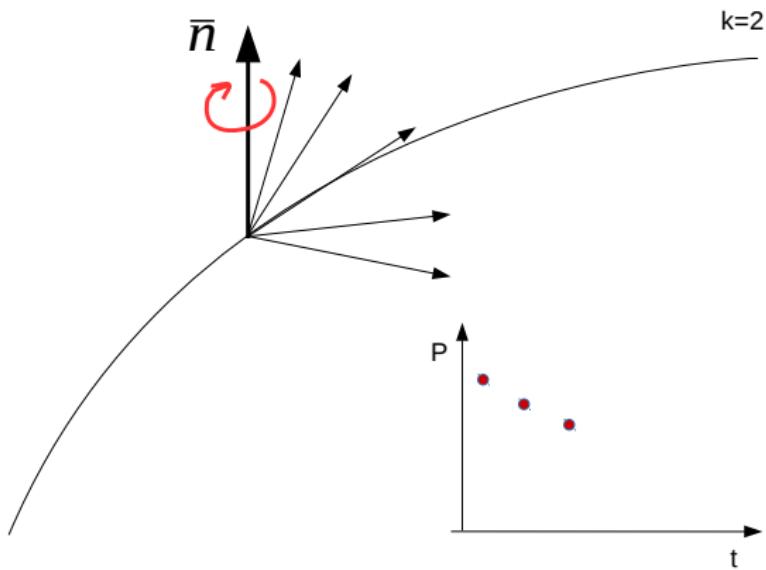
Декогеренция спинов



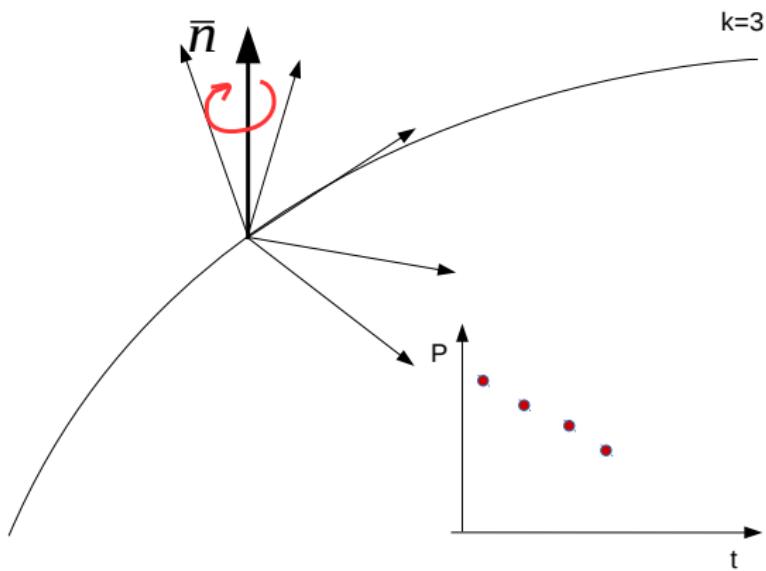
Декогеренция спинов



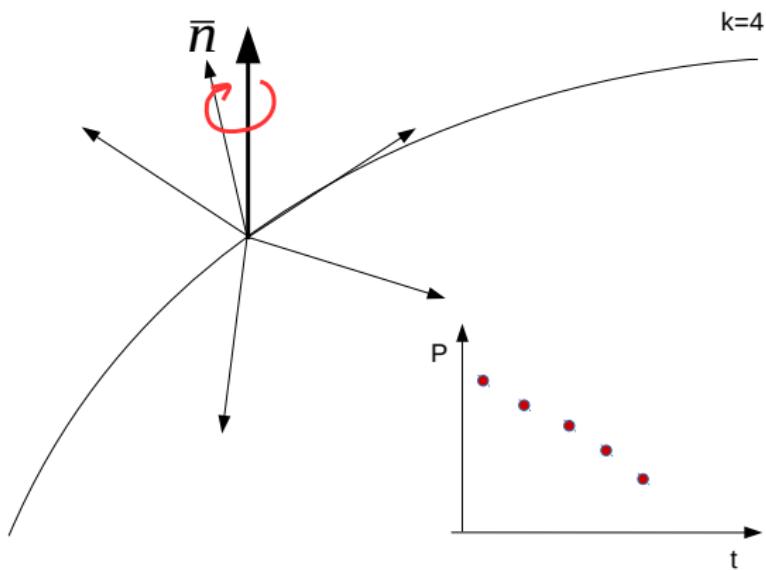
Декогеренция спинов



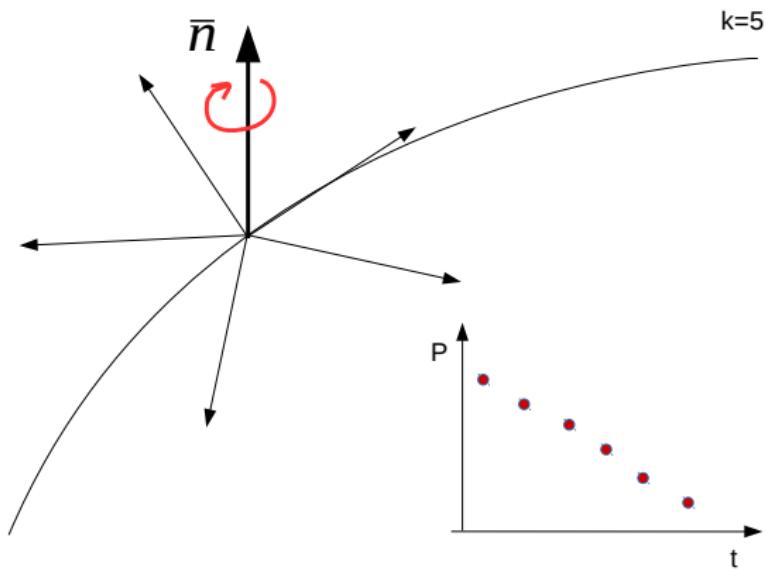
Декогеренция спинов



Декогеренция спинов

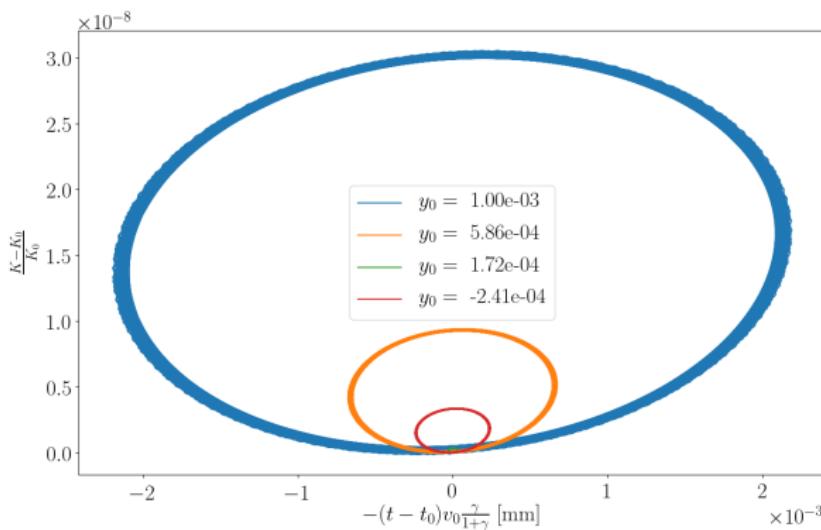


Декогеренция спинов



Декогеренция спинов

Причины



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

Декогеренция спинов

Подавление сектупольными полями

Сдвиг равновесного уровня импульса

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

Эффекты сектупольных полей

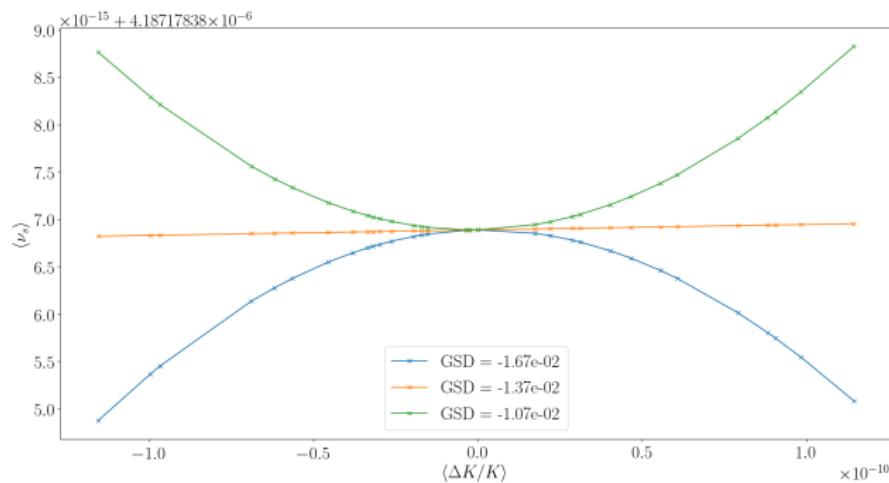
$$S_{sext} = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2}$$

$\Delta\alpha_{1,sext} = -\frac{S_{sext} D_0^3}{L}$

$\left(\frac{\Delta L}{L} \right)_{sext} = \mp \frac{S_{sext} D_0 \beta_{x,y} \varepsilon_{x,y}}{L}$

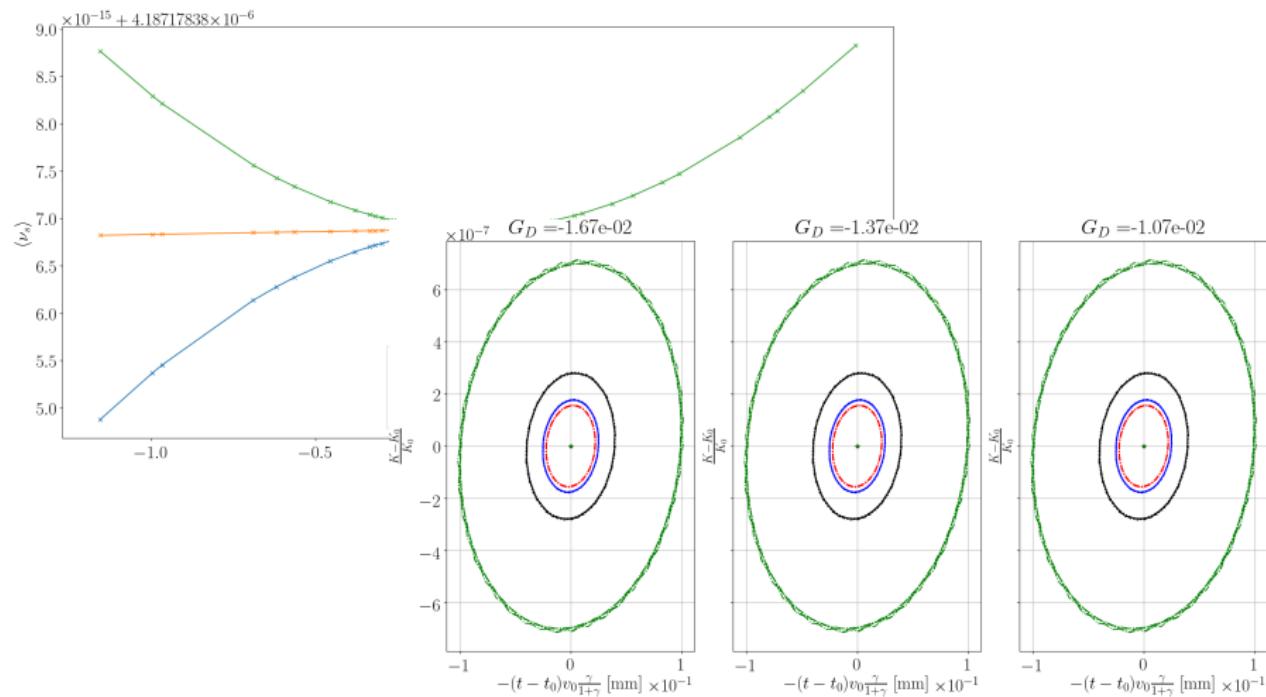
Эффект секступольных полей

Коэффициент сжатия орбиты



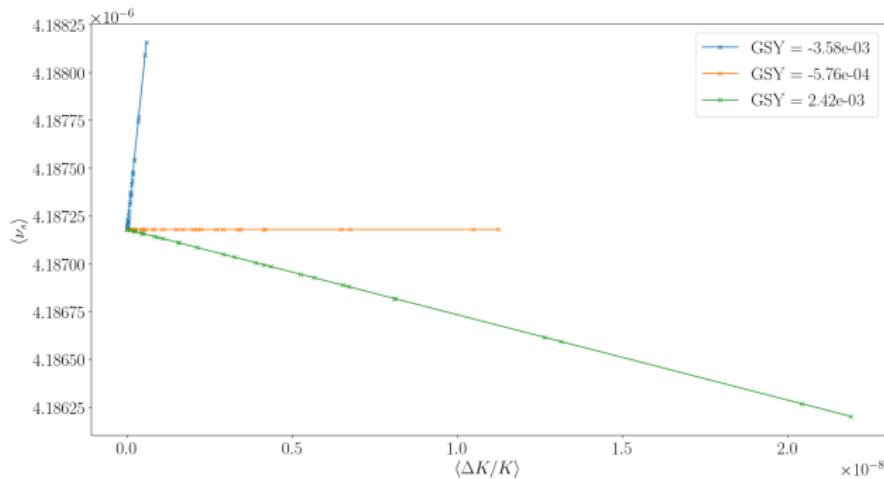
Эффект секступольных полей

Коэффициент сжатия орбиты



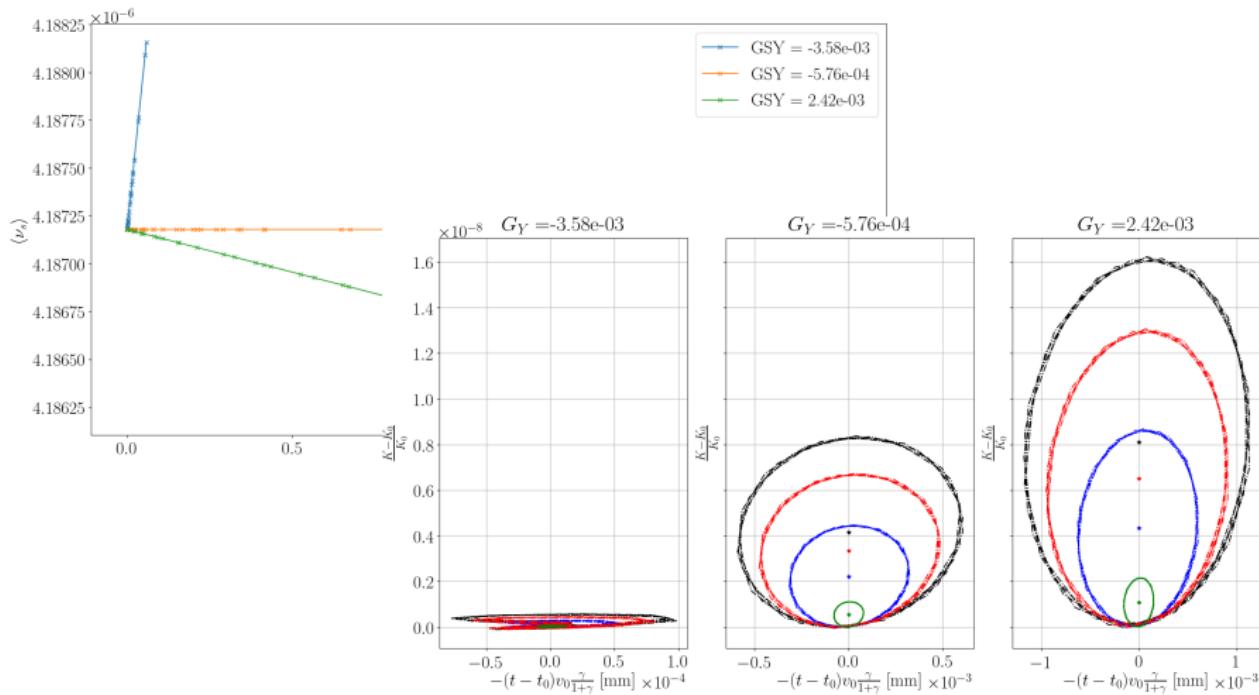
Эффект секступольных полей

Длина орбиты



Эффект секступольных полей

Длина орбиты



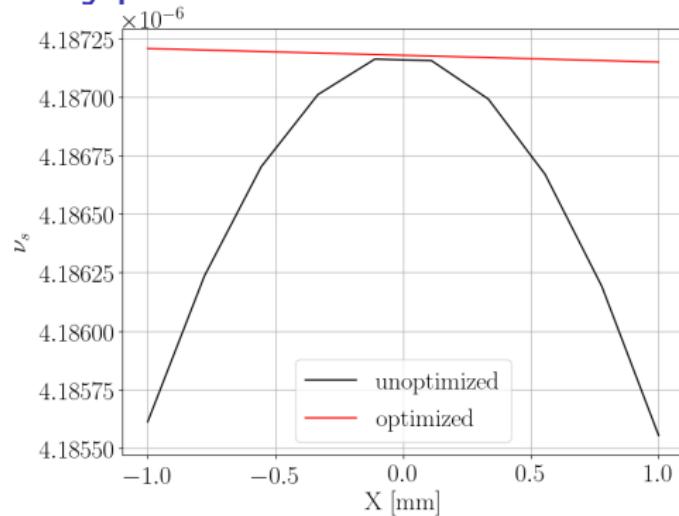
Выводы

- 1 Сигнатура эффекта сектупольных полей на коэффициент сжатия орбиты — изменение функциональной зависимости $\langle \nu_s \rangle (\langle \Delta K / K \rangle)$

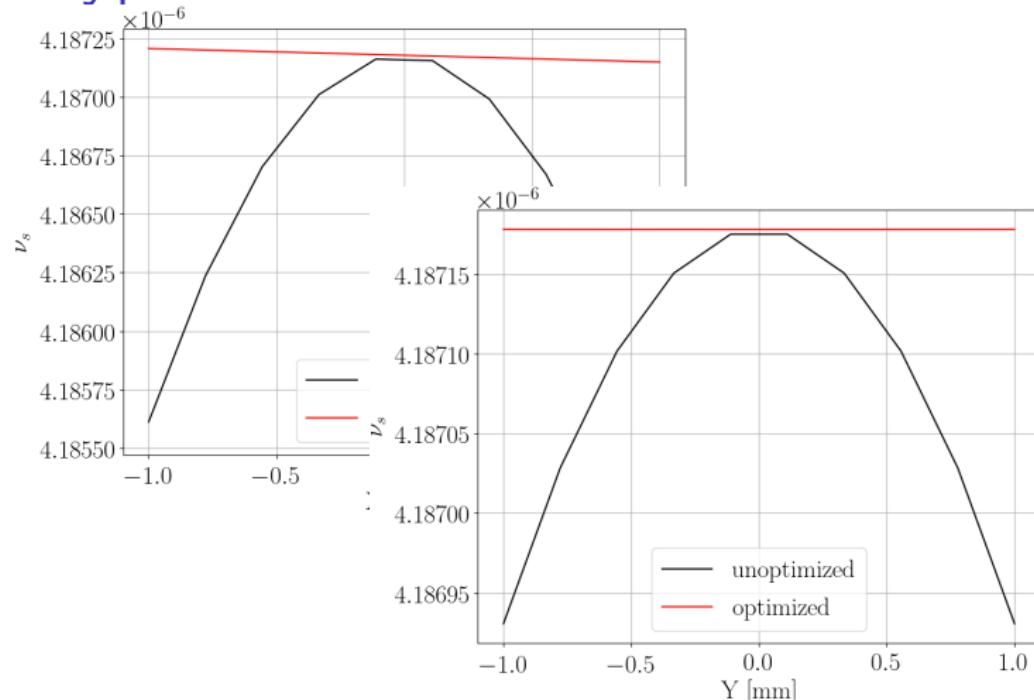
Выводы

- ➊ Сигнатура эффекта сектупольных полей на коэффициент сжатия орбиты — изменение функциональной зависимости $\langle \nu_s \rangle (\langle \Delta K / K \rangle)$
- ➋ ... на длины орбит частиц бенча — уменьшение дисперсии $\langle \Delta K / K \rangle$

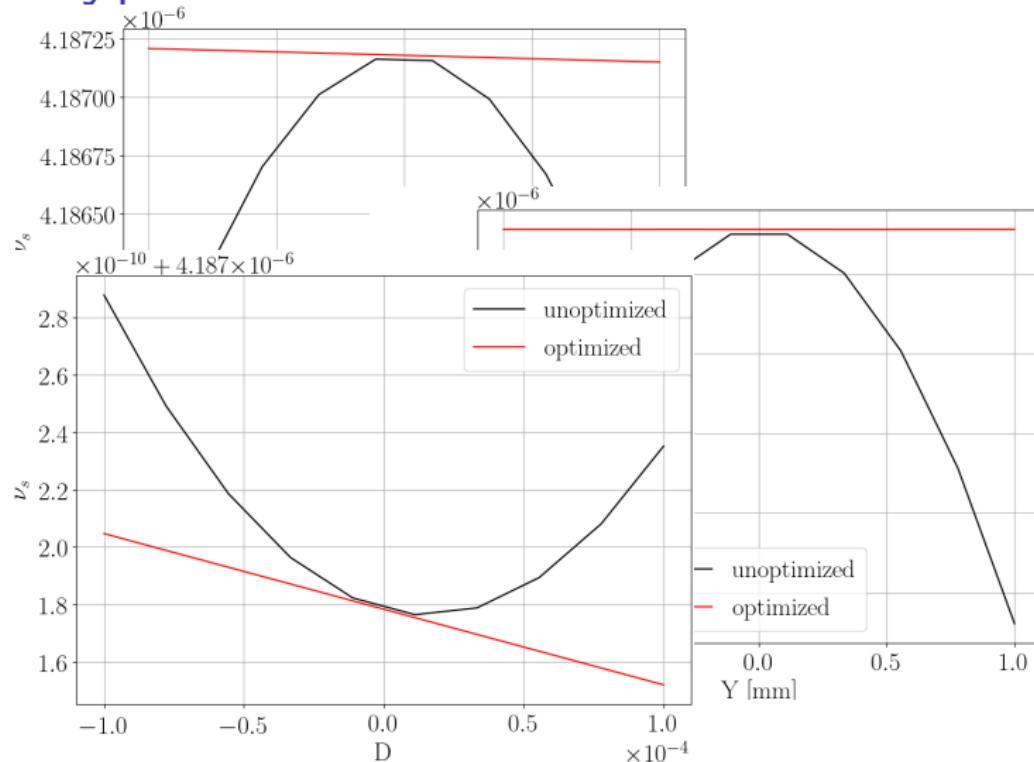
Подавление декогеренции в идеальной структуре



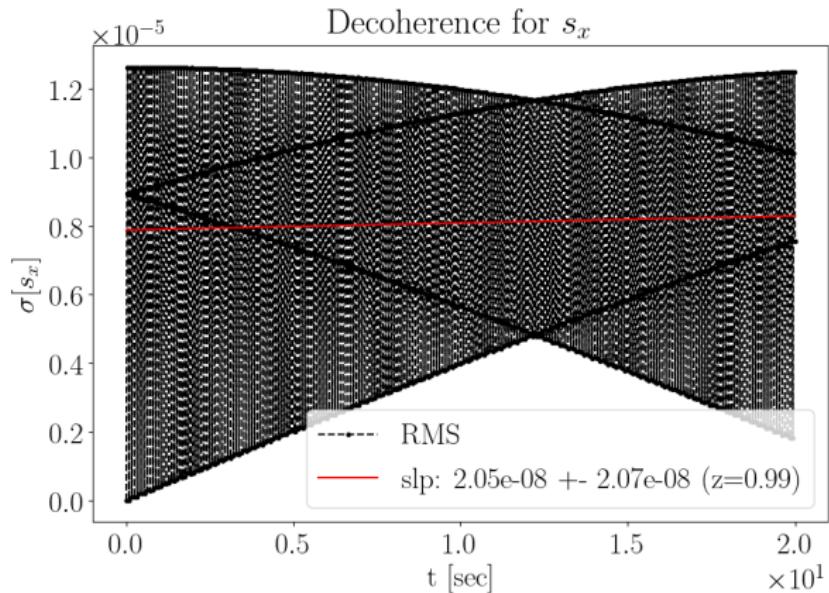
Подавление декогеренции в идеальной структуре



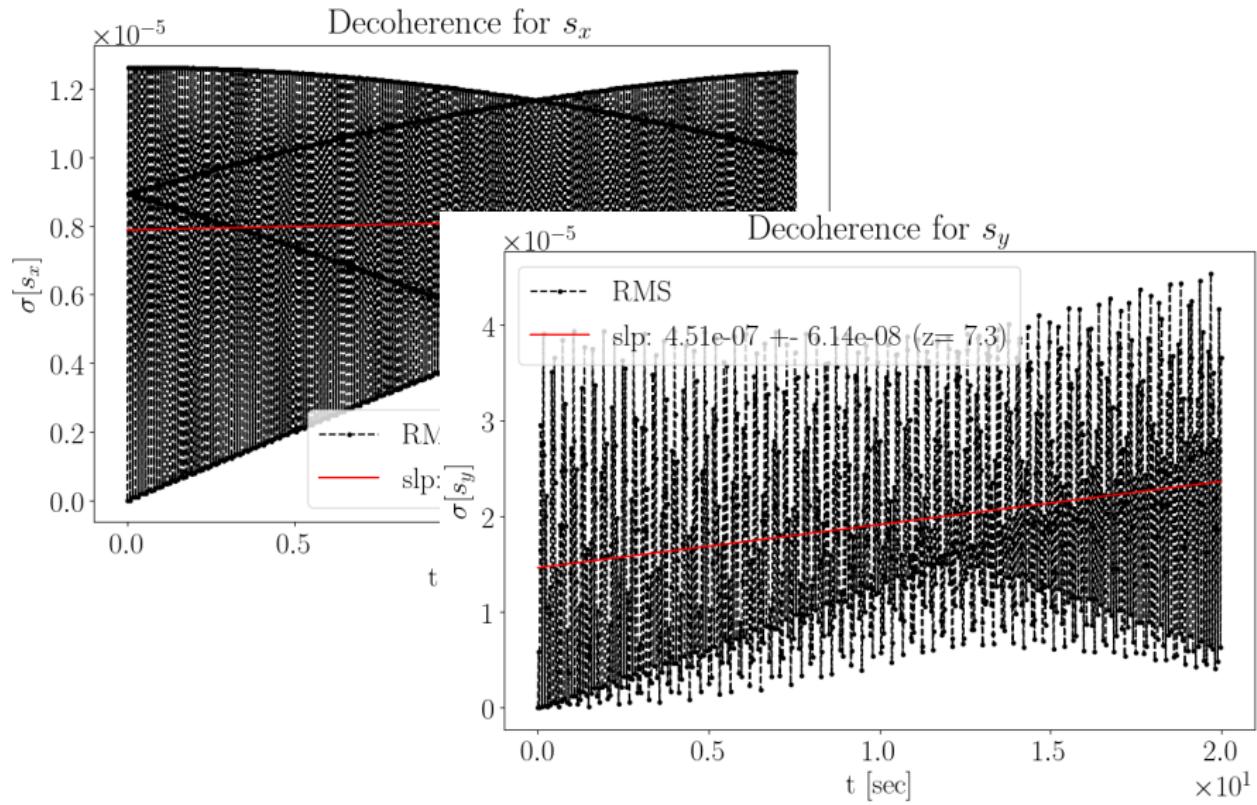
Подавление декогеренции в идеальной структуре



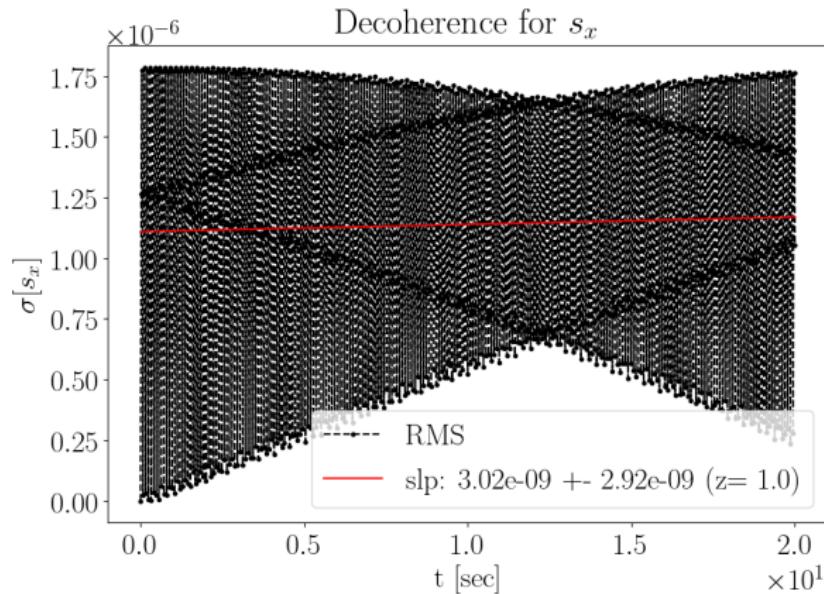
Декогеренция в неидеальной структуре



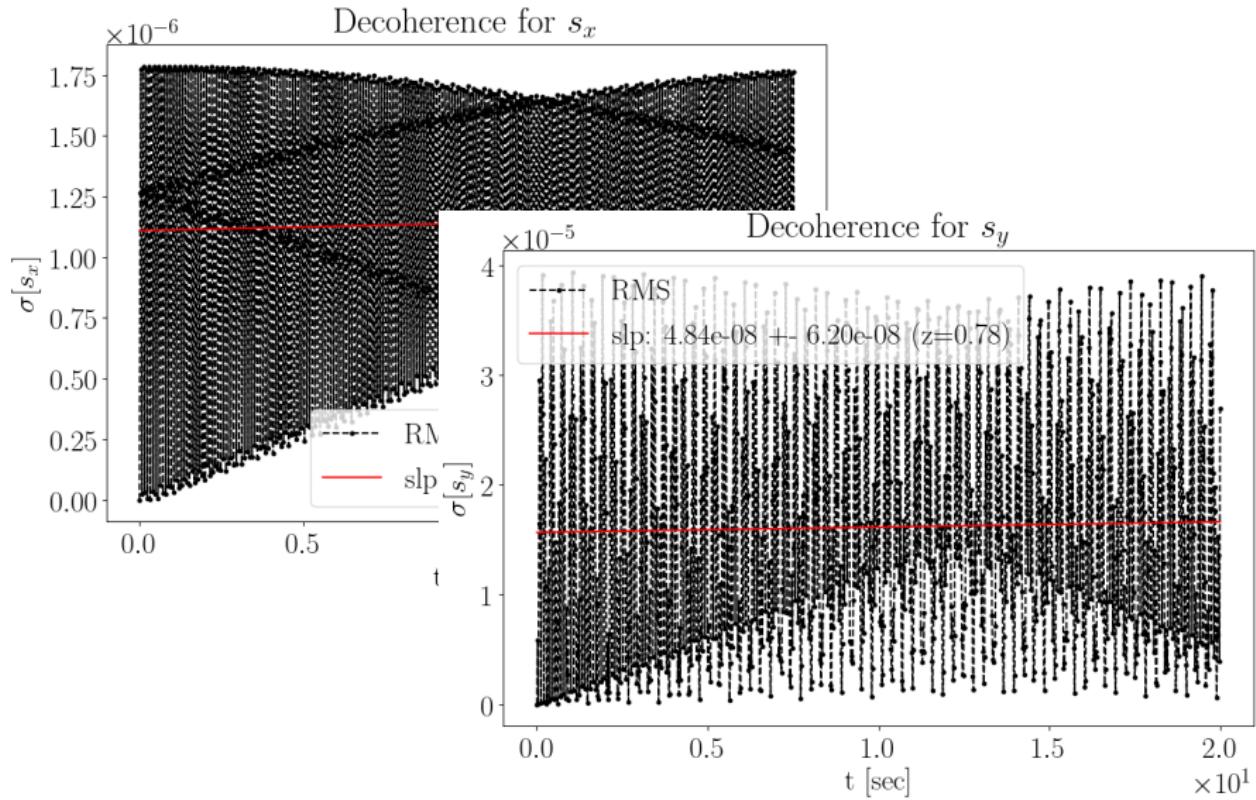
Декогеренция в неидеальной структуре



Включаем секступоли



Включаем секступоли



МДМ фальш-сигнал

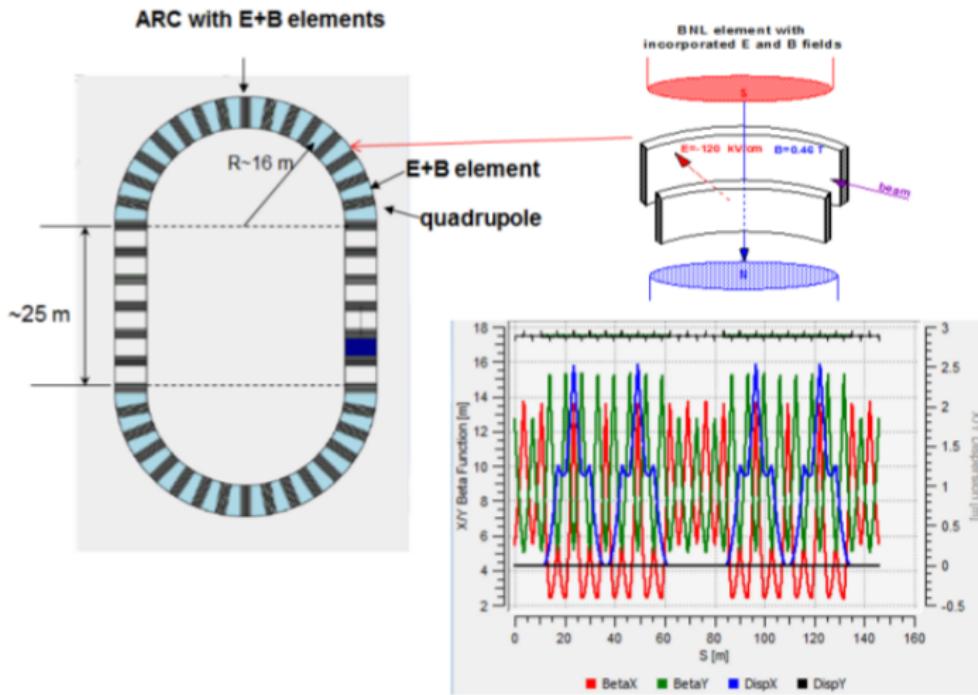
Величина

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

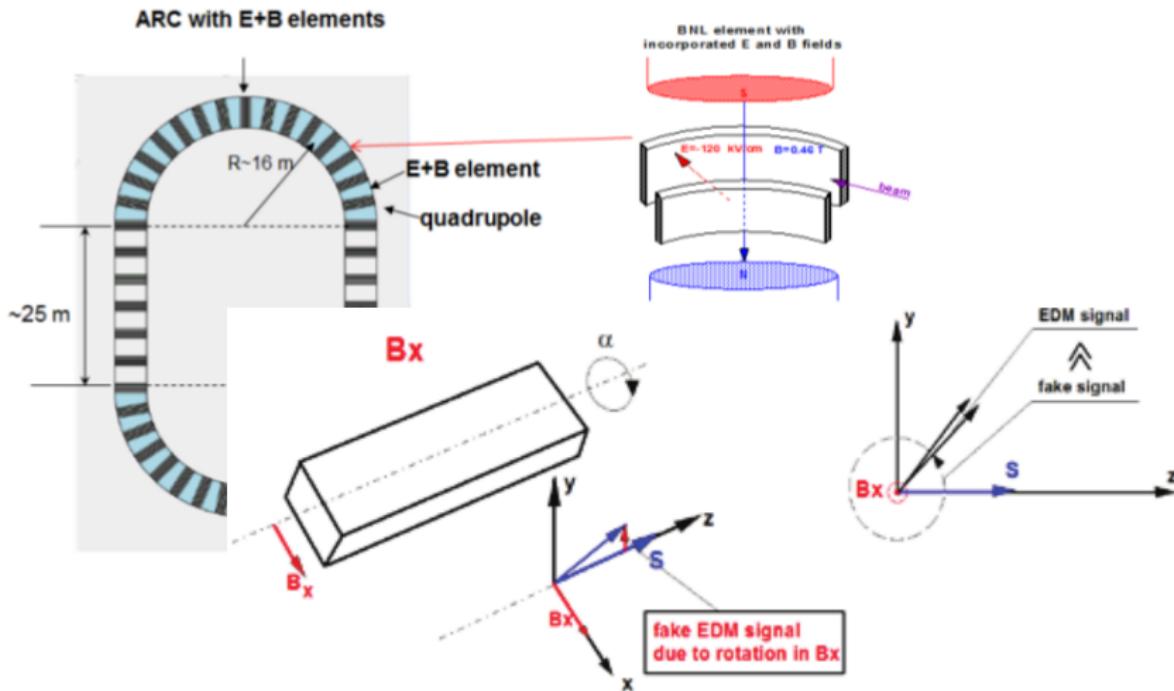
Вопросы, требующие рассмотрения

- 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



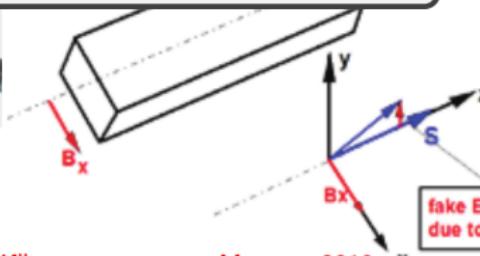
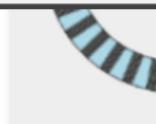
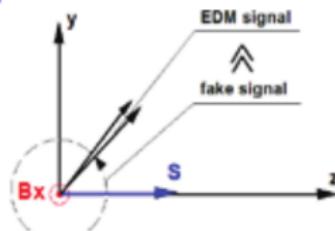
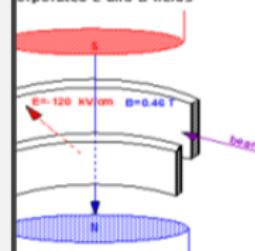
Рассматриваемая структура



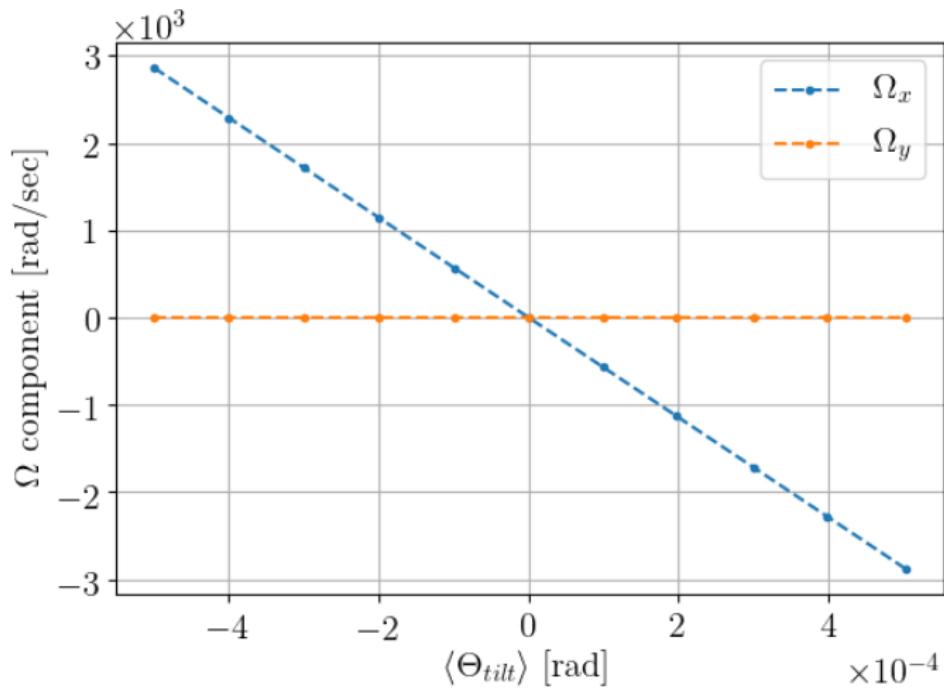
Рассматриваемая структура

- 11 симуляций
- наколнял 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}

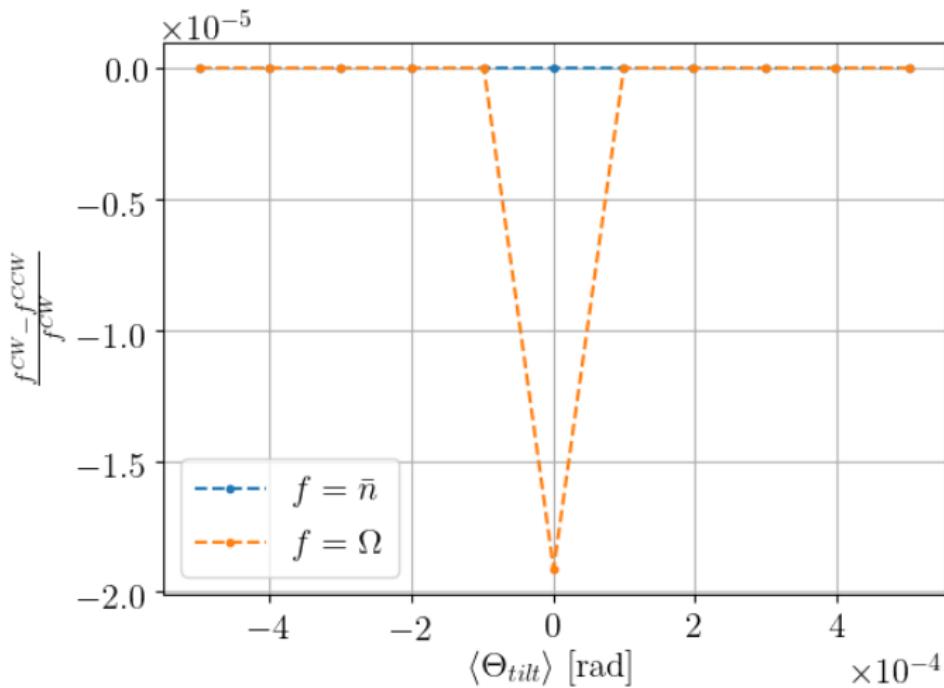
BNL element with incorporated E and B fields



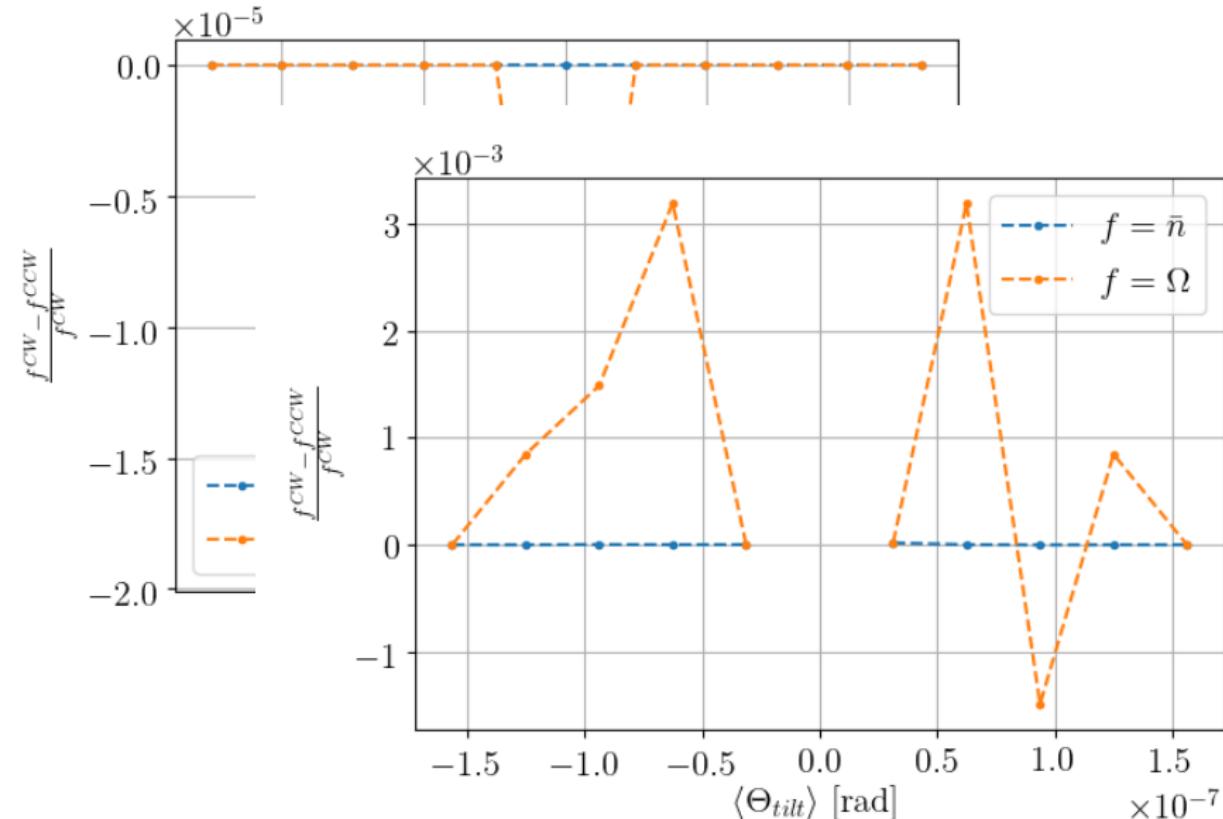
Линейность



Симметричность



Симметричность



Выводы

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

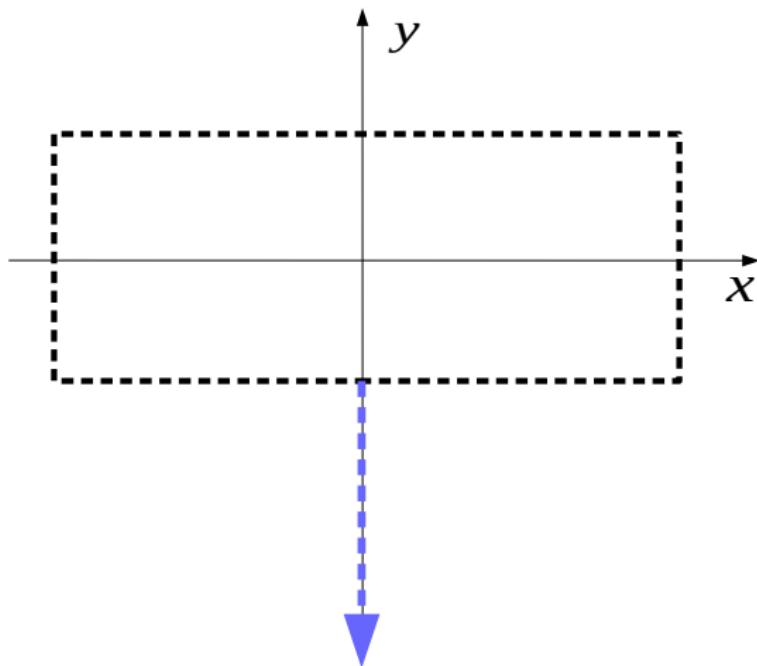
| ω^{max} [рад/сек] | $P(\Omega_x^{MDM} < \omega^{max})$ |
|--------------------------|------------------------------------|
| 50 | 67% |
| 100 | 95% |

Свойства

- ➊ Линейность
- ➋ Асимметричность, вероятно связанная с различием референсных орбит CW и CCW пучков
- ➌ Асимметричность меньше при больших скоростях SW

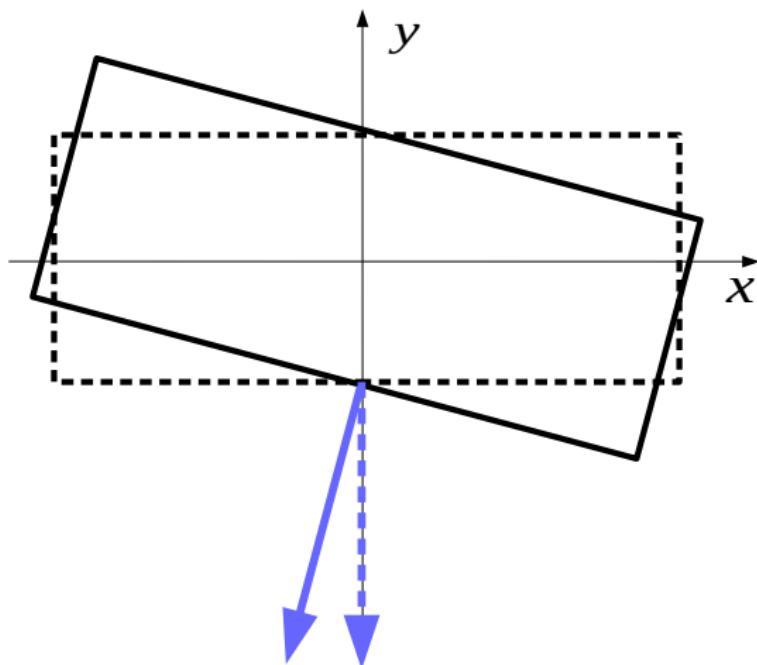
Смена полярности ведущего поля

Зачем?



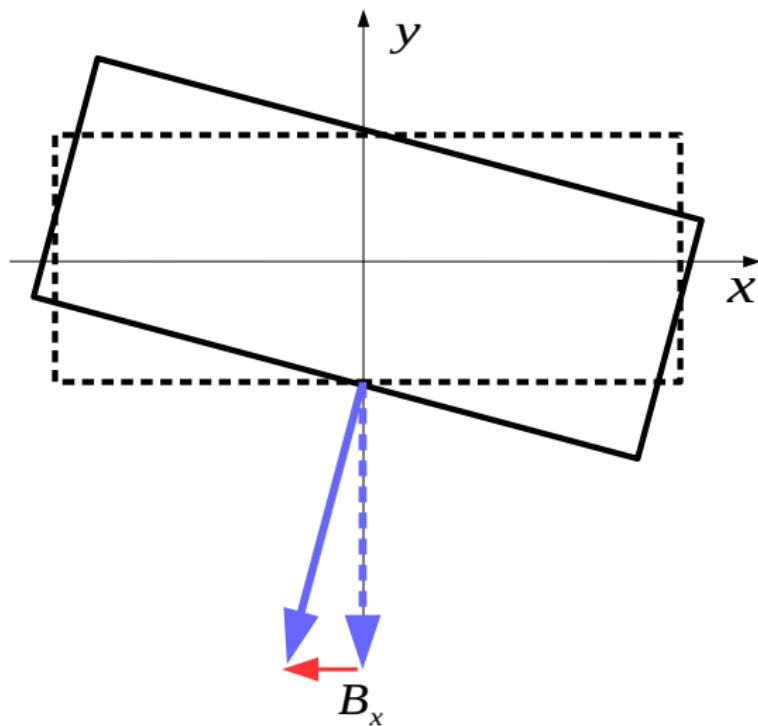
Смена полярности ведущего поля

Зачем?



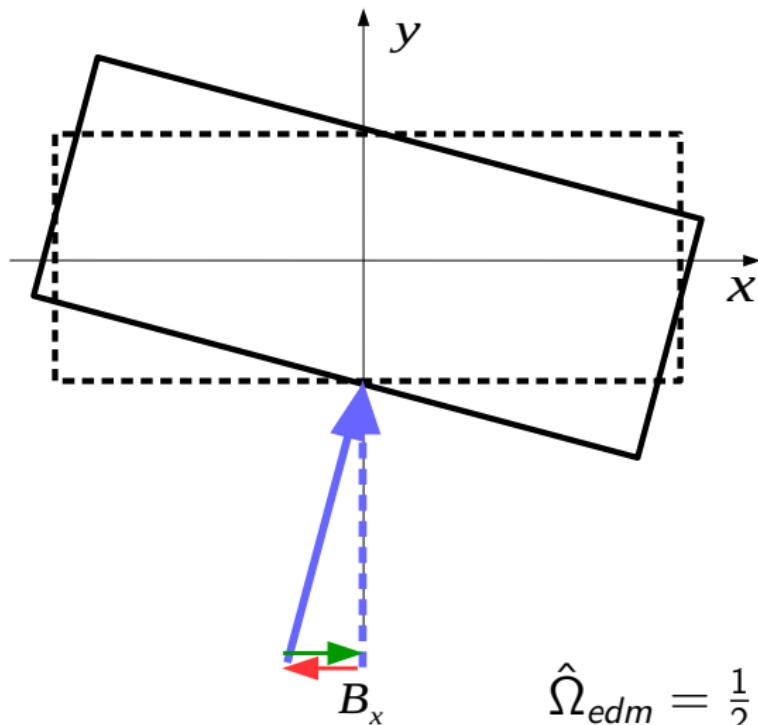
Смена полярности ведущего поля

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
- Востановление $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$ не достаточно, т.к. точка инжекции 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
- Востановление $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$ 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)

В чём проблема?

- $\Omega_x^{MDM} = \frac{q}{m} GB_x$
 - На самом деле, нужно восстановить Ω_x^{MDM} , а не B_x
 - Востановление $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$ 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
 $\Omega_y(\gamma_{\text{eff}}^1) = \Omega_y(\gamma_{\text{eff}}^2) \rightarrow \gamma_{\text{eff}}^1 = \gamma_{\text{eff}}^2$

Калибровка эффективного Л-фактора

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

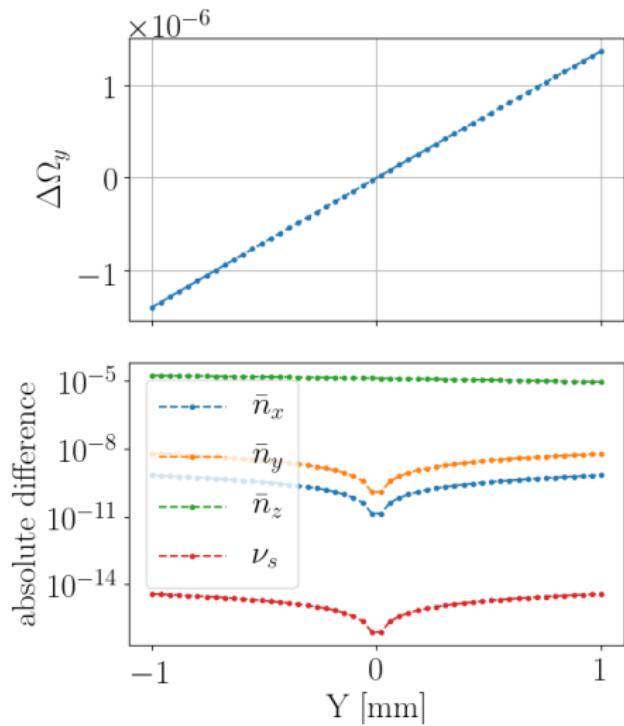
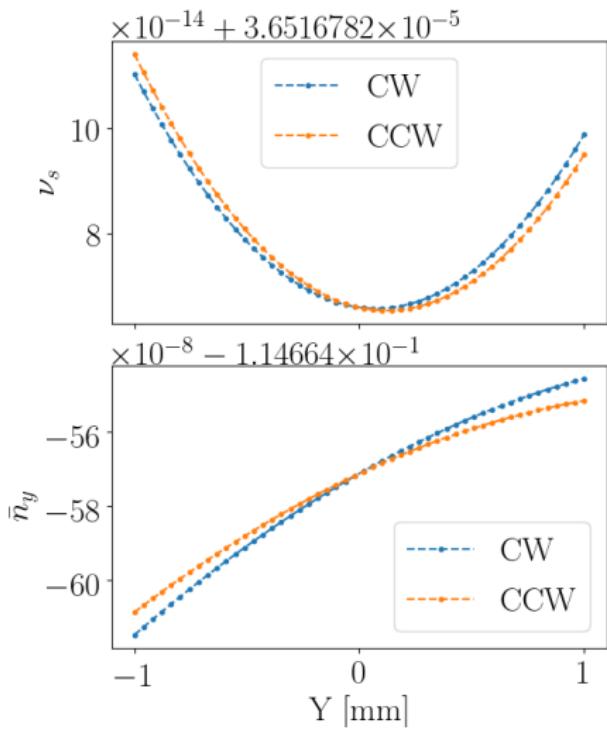
Калибровка эффективного Л-фактора

- 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 $[\gamma_{eff}]$
- $\Rightarrow \exists! \gamma_{eff}^0: [\gamma_{eff}^0] = [\Omega_y = 0]$

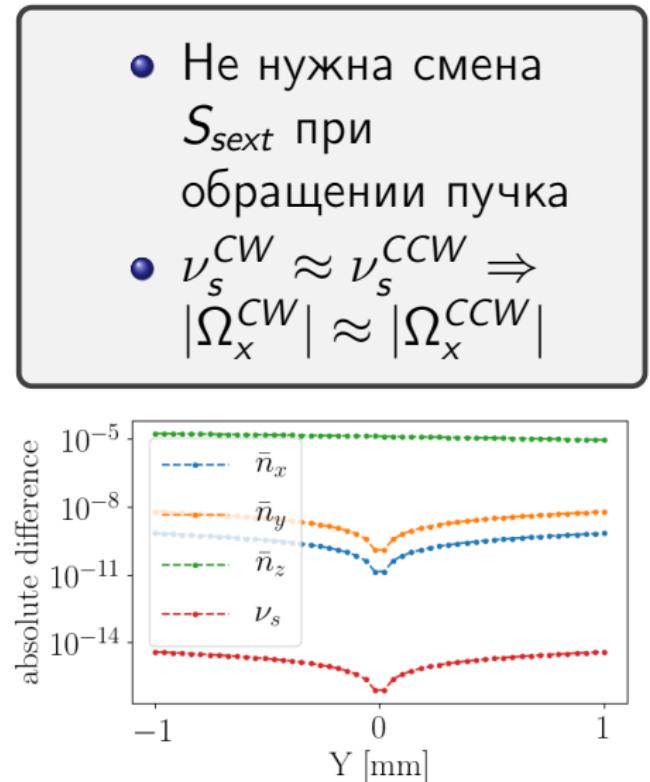
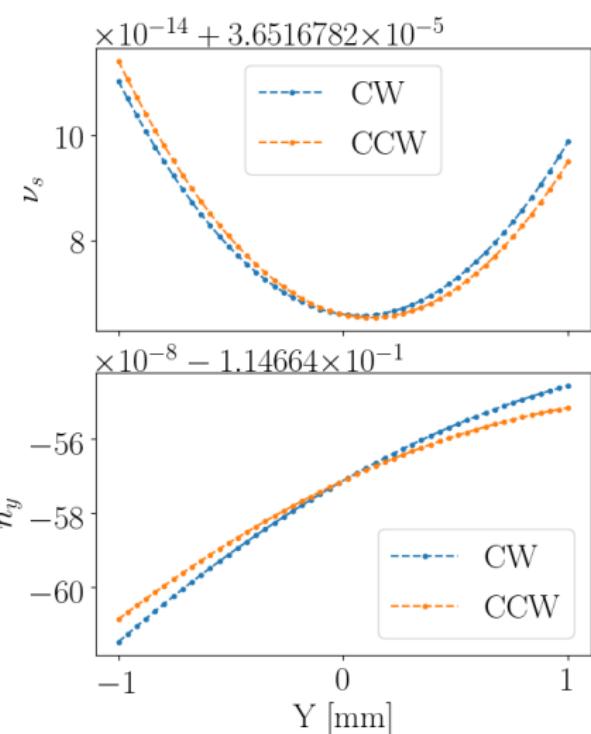
Калибровка эффективного Л-фактора

- 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

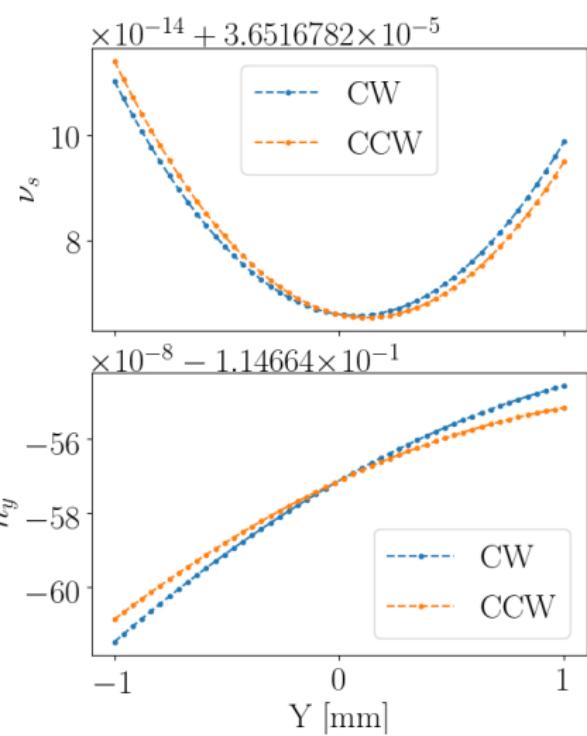


Симуляция

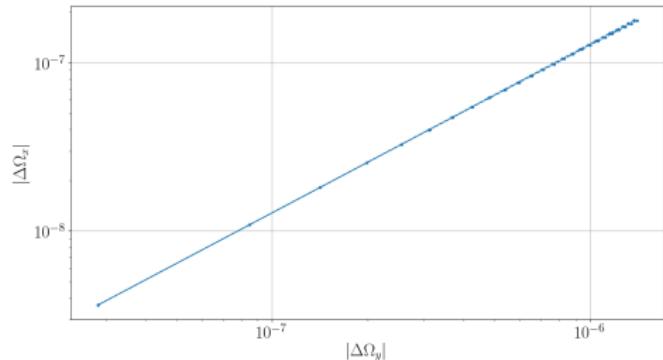


- Не нужна смена S_{sext} при обращении пучка
- $\nu_s^{CW} \approx \nu_s^{CCW} \Rightarrow |\Omega_x^{CW}| \approx |\Omega_x^{CCW}|$

Симуляция



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



Спин-тюн эквивалентность траекторий частиц

Утверждение 1

Частицы с одинаковым значением эффективного Лоренц-фактора имеют одинаковый спин-тюн, т.е. эквивалентны с точки зрения спиновой динамики.

Спин-тюн эквивалентность траекторий частиц

Утверждение 1

Частицы с одинаковым значением эффективного Лоренц-фактора имеют одинаковый спин-тюн, т.е. эквивалентны с точки зрения спиновой динамики.

Это следствие уравнения

$$\nu_s = G\gamma$$

Две формулировки утверждения 1

A

$$\gamma_{\text{eff}} \equiv \langle \Delta K / K \rangle$$

Две формулировки утверждения 1

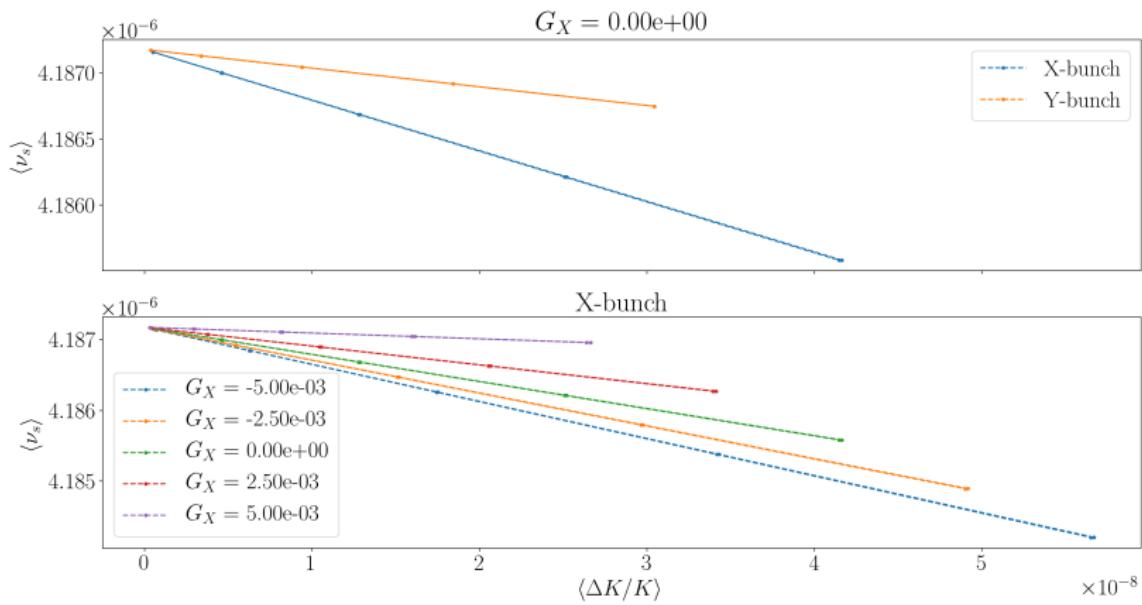
A

$$\gamma_{\text{eff}} \equiv \langle \Delta K / K \rangle$$

B

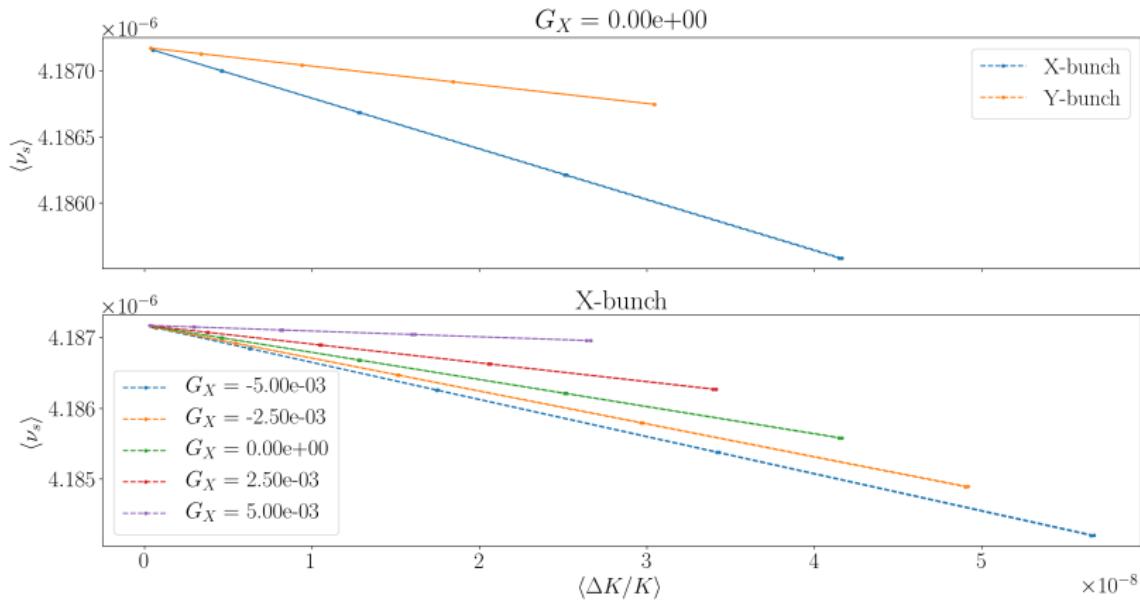
$$\nu_s(x, a, y, b, \ell, \delta) \equiv \nu_s(\gamma_{\text{eff}})$$

A



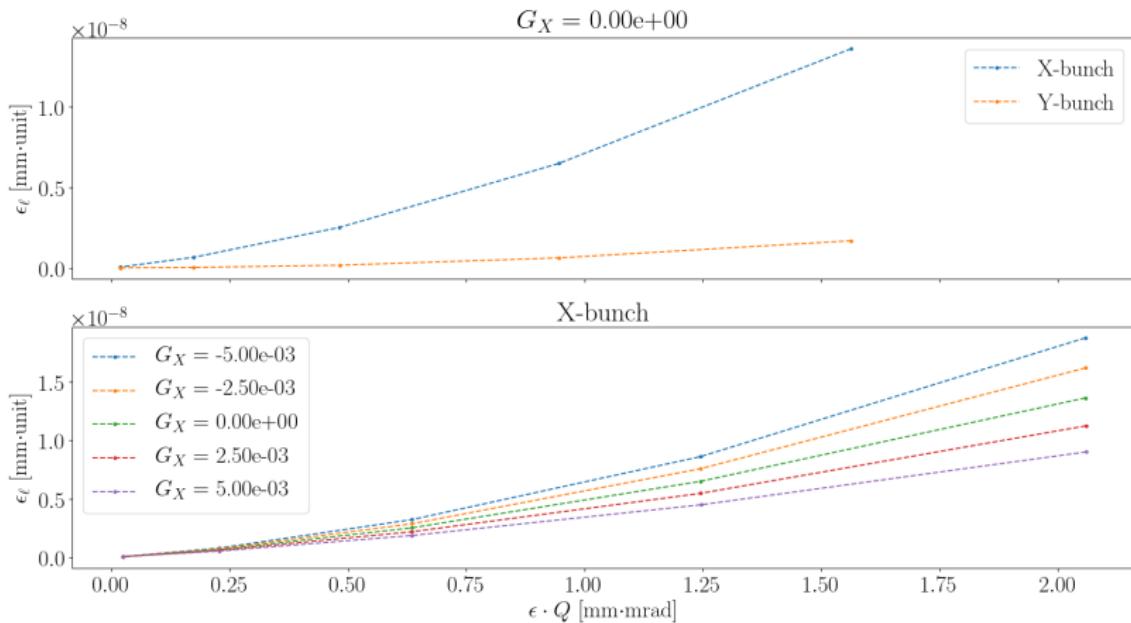
A

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



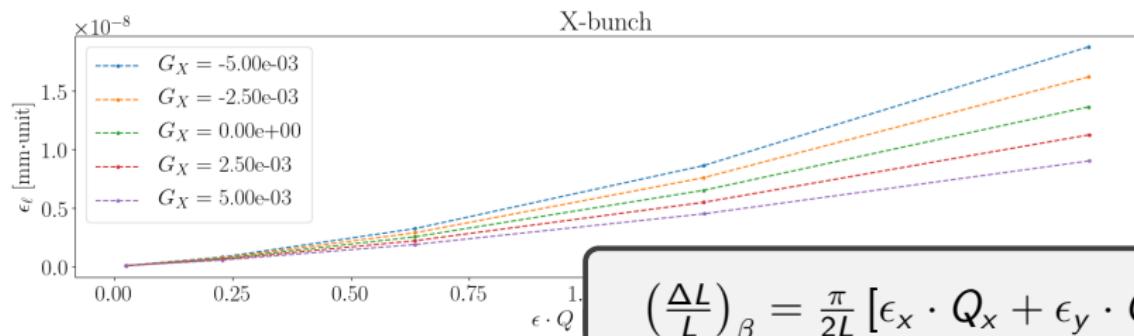
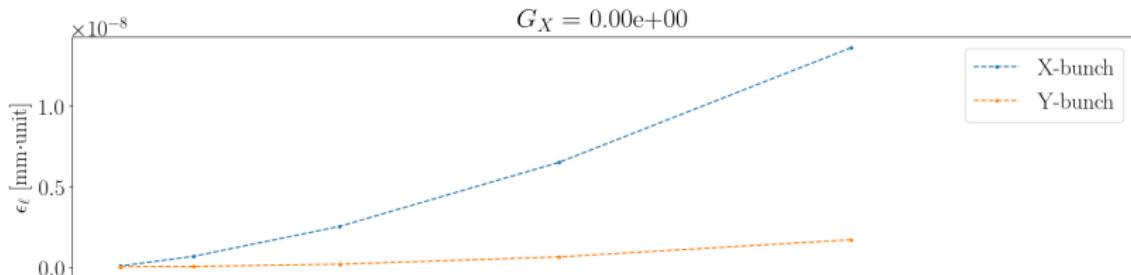
A

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



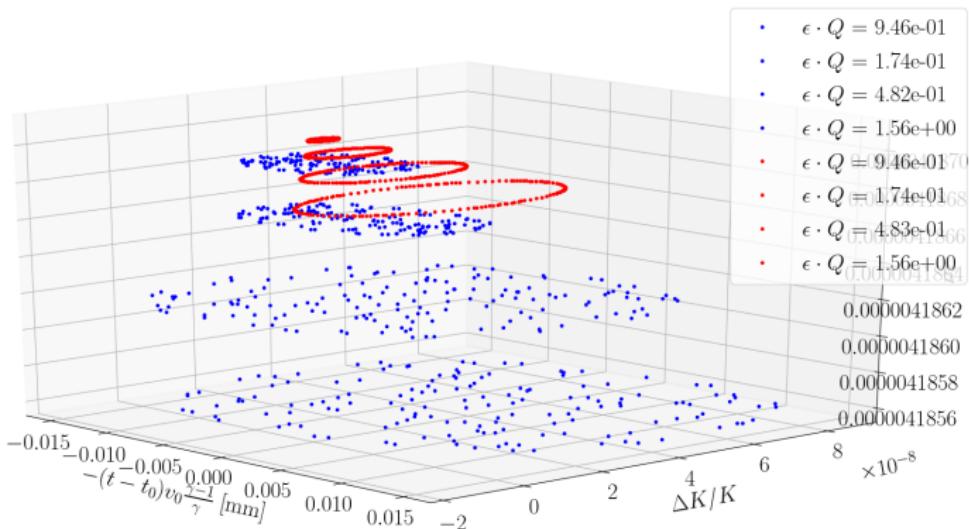
A

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

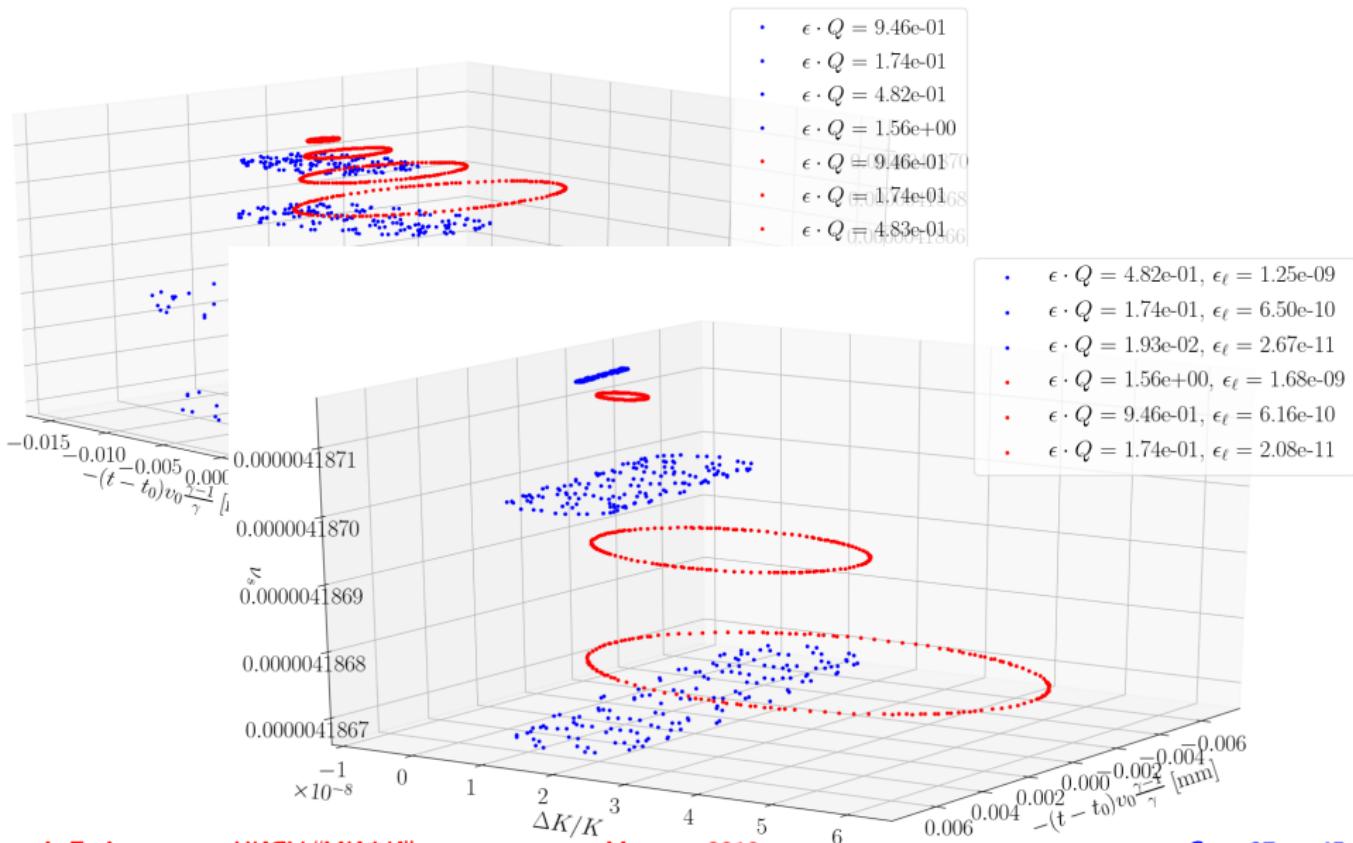


$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_\beta = \frac{\pi}{2L} [\epsilon_x \cdot Q_x + \epsilon_y \cdot Q_y]$$

B



B



Выводы

Вывод 1

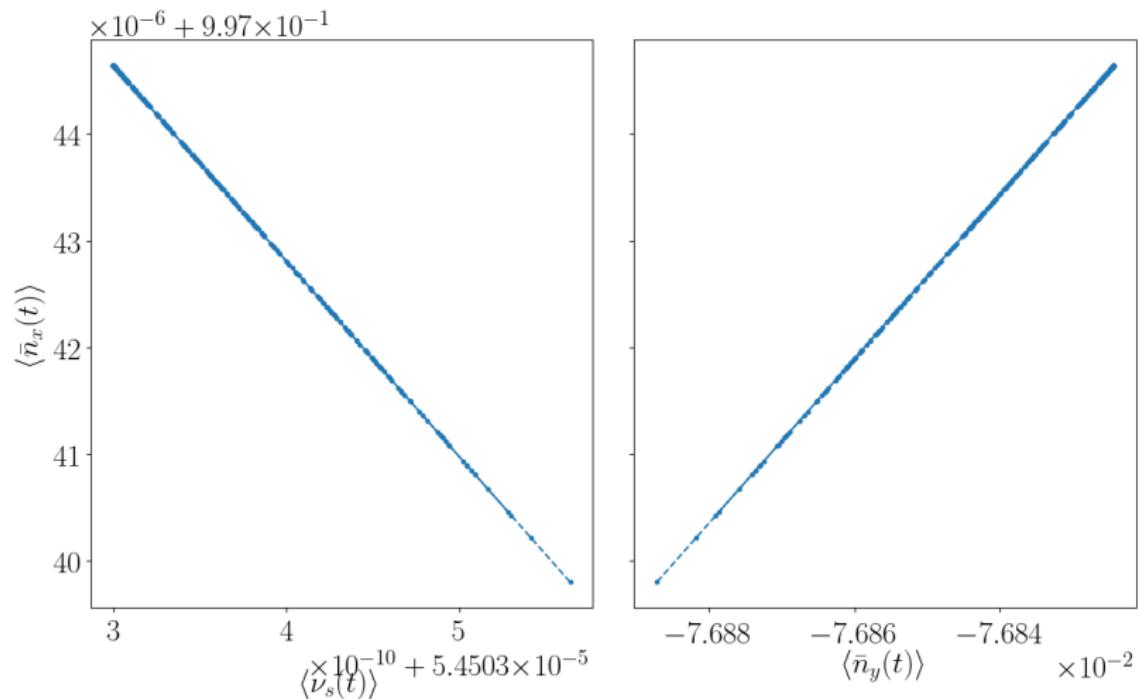
- Формулировка В верна

Выводы

Вывод 1

- Формулировка В верна
- Эффективный Лоренц-фактор отражает величину продольного эмиттанса частицы

Выводы



Выводы

Вывод 2

Спиновая динамика частиц с одинаковым значением
 γ_{eff} эквивалентна в общем смысле (ν_s , \bar{n})

Выводы

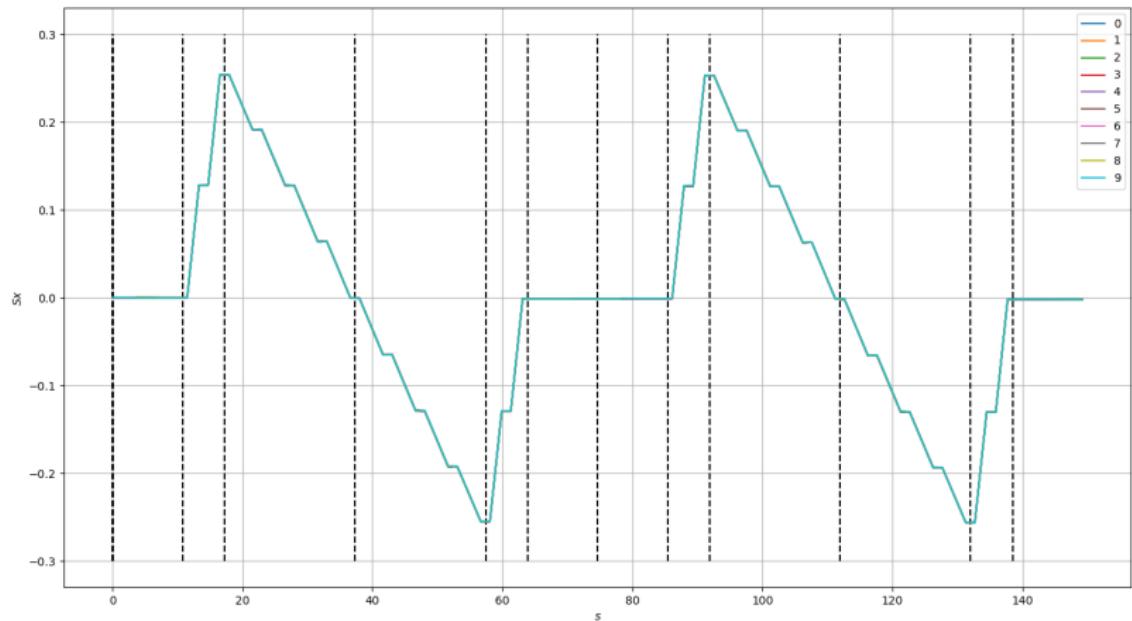
Вывод 2

Спиновая динамика частиц с одинаковым значением
 γ_{eff} эквивалентна в общем смысле (ν_s , \bar{n})

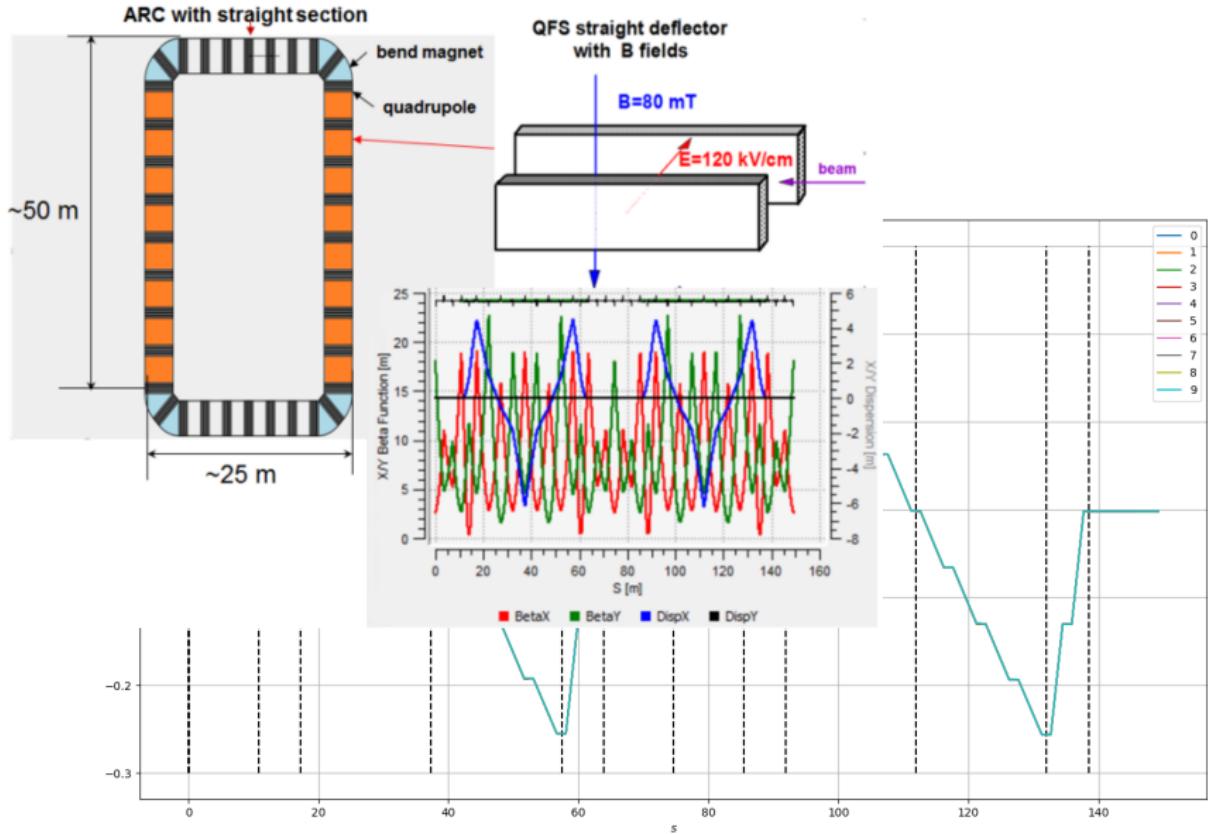
Дисклеймер

По крайней мере в случае накопительного кольца,
работающего в состоянии нулевого спин-резонанса

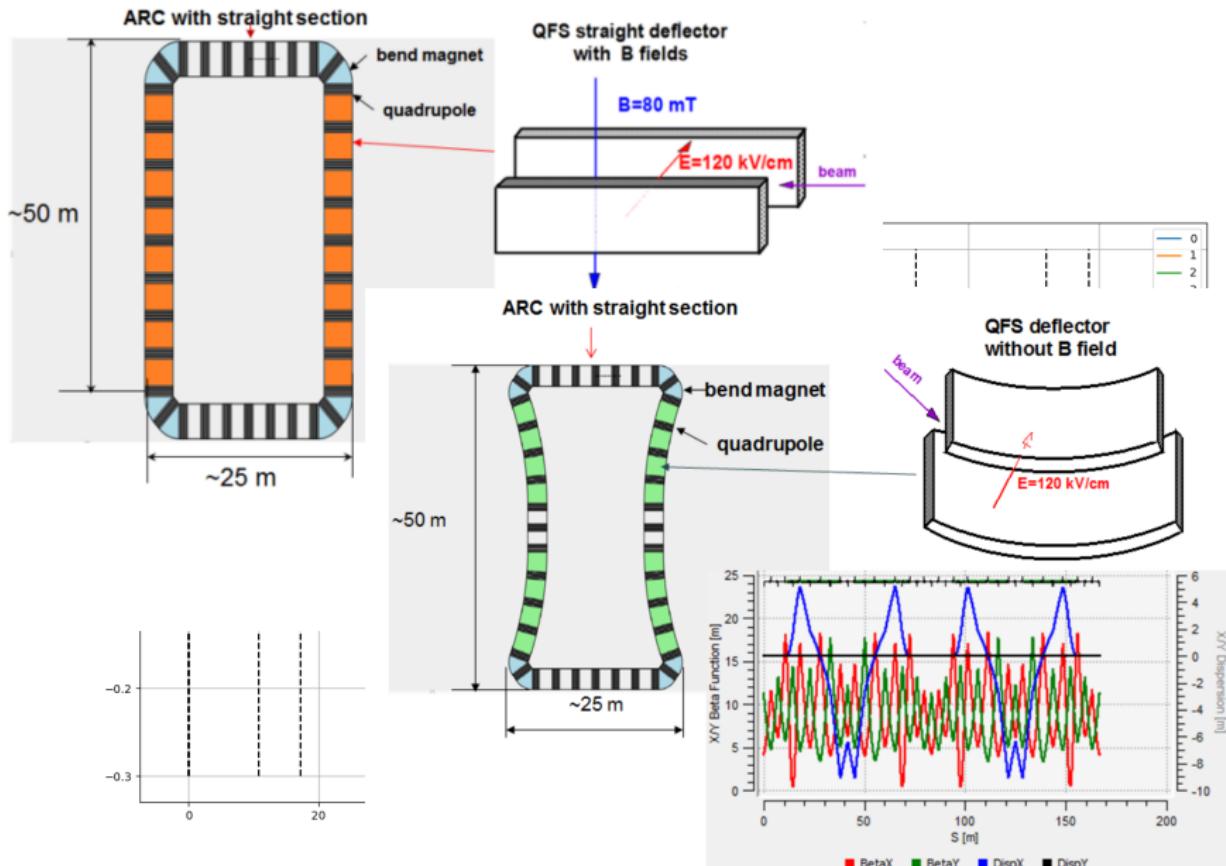
QFS-структуры



QFS-структуры



QFS-структуры



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!