

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

Выступающий:

А. Е. Аксентьев

Руководитель:

д-р. физ.-мат. наук, проф.  
канд. физ-мат. наук, доц.

Ю. В. Сеничев  
С. М. Полозов

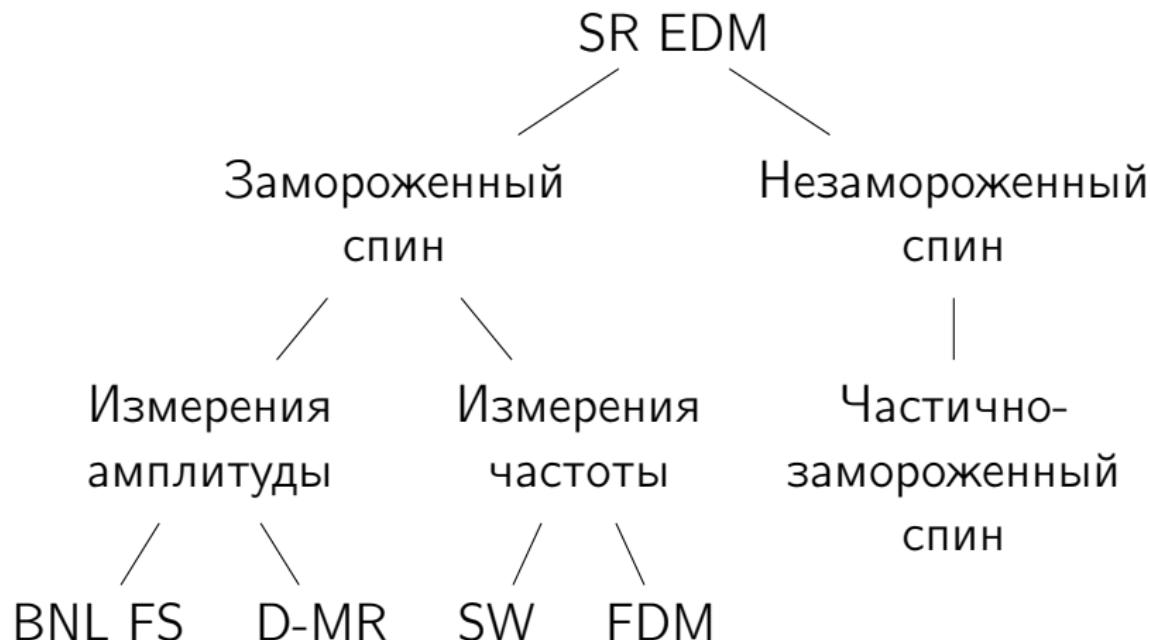
Национальный Исследовательский Ядерный Университет  
“МИФИ”  
(НИЯУ МИФИ)

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
- 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

## Неидеальности ускорителя

3

## Неидеальности ускорителя

- ▶ Исследование зависимости наклона оси прецессии спина от распределения неидеальностей вдоль кольца

3

## Неидеальности ускорителя

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

### ③ Неидеальности ускорителя

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

### ④ Смена полярности ведущего поля

### ③ Неидеальности ускорителя

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

### ④ Смена полярности ведущего поля

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

### ③ Неидеальности ускорителя

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

### ④ Смена полярности ведущего поля

- ▶ Показать, что сектупольное 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

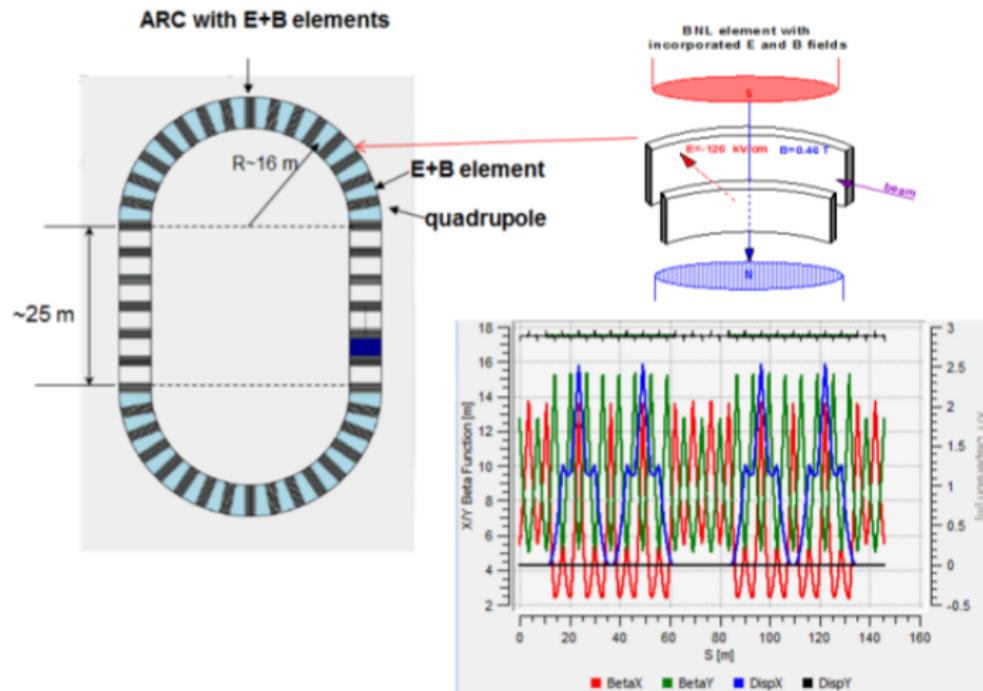
$$s_y(n_{turn}) = \sqrt{(\bar{n}_y \bar{n}_z)^2 + \bar{n}_x^2} \cdot \sin(2\pi\nu_s \cdot n_{turn} + \delta).$$

- Данные фитируются функцией

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

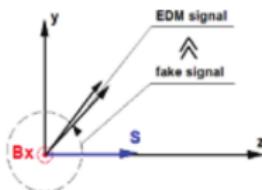
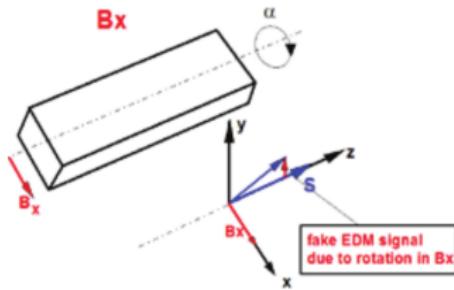
- При значительной вариации  $\nu_s$ ,  $\bar{n}$  — ошибка спецификации уравнения регрессии

# 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

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

# Анализ

## Данные

TRK данные трекера TR

COSY Infinity

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

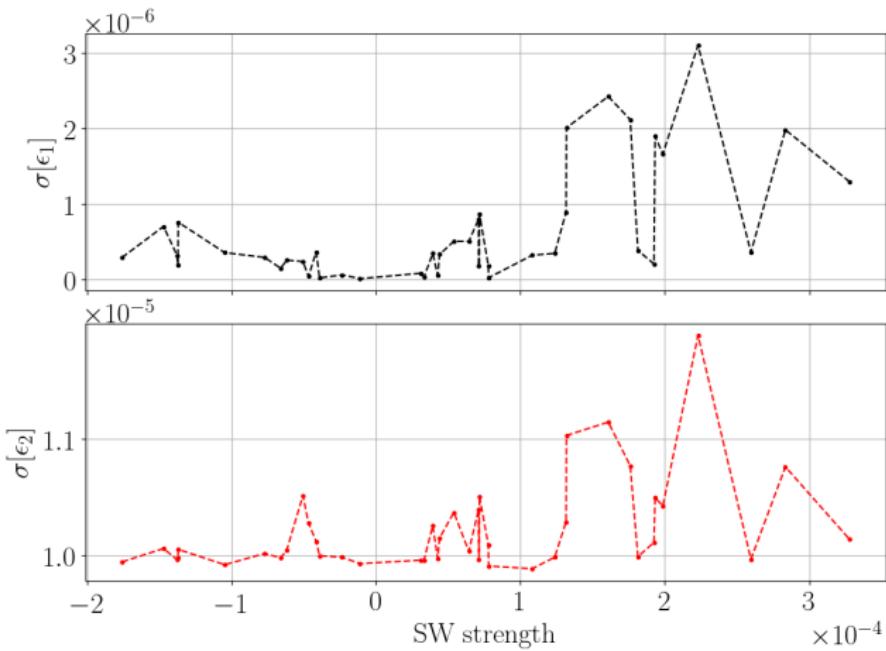
IDL как в GEN, но  $\bar{n} = \langle \bar{n} \rangle$ ,  
 $\nu_s = \langle \nu_s \rangle$

## Сравнительные статистики

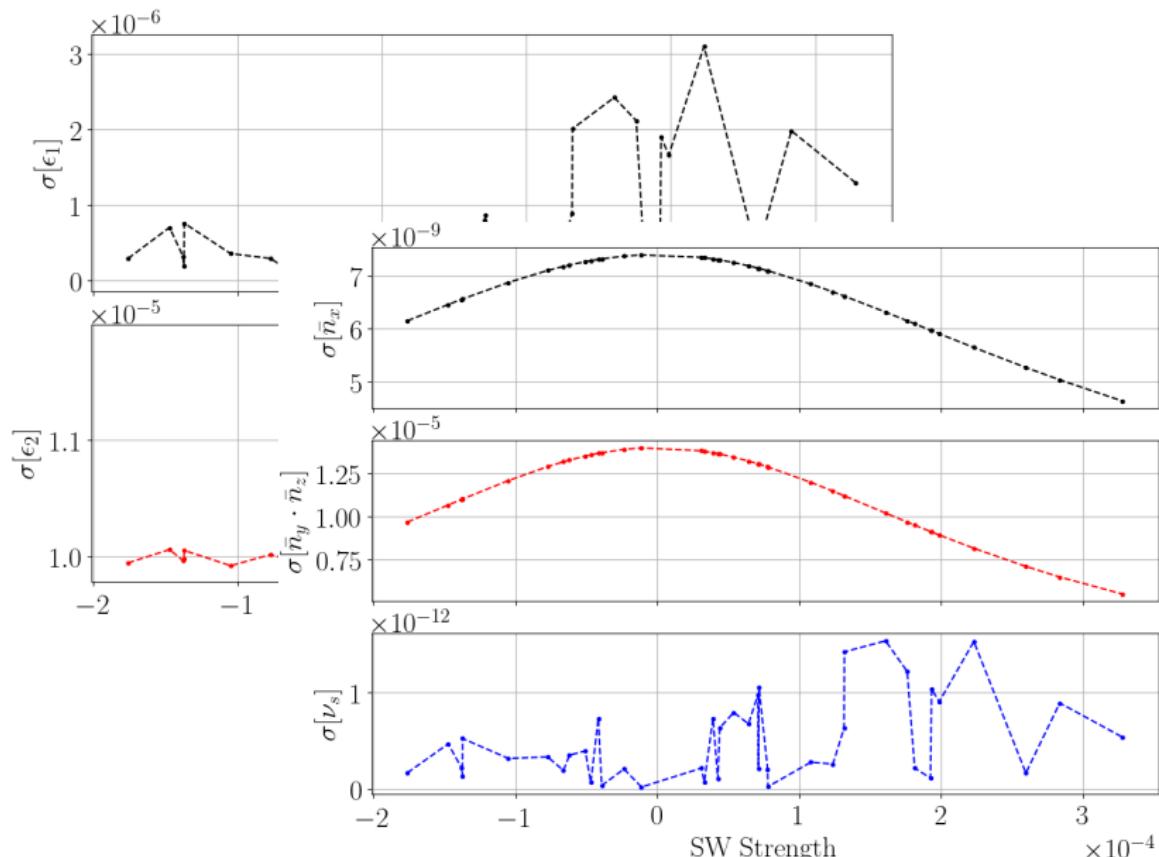
$$\epsilon_1(t) = s_y^{gen}(t) - s_y^{idl}(t)$$

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

# Результаты



# Результаты



# Выводы

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

# Выводы

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

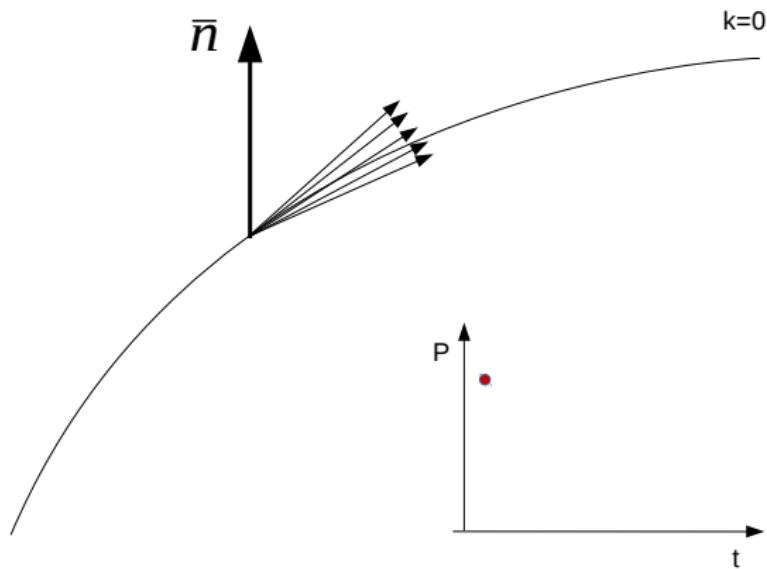
# Выводы

- 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

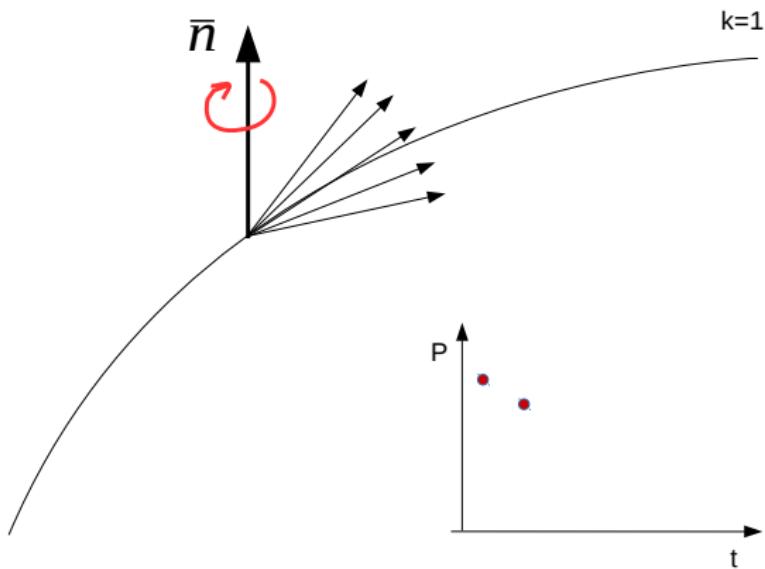
# Выводы

- 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  $\bar{b}$

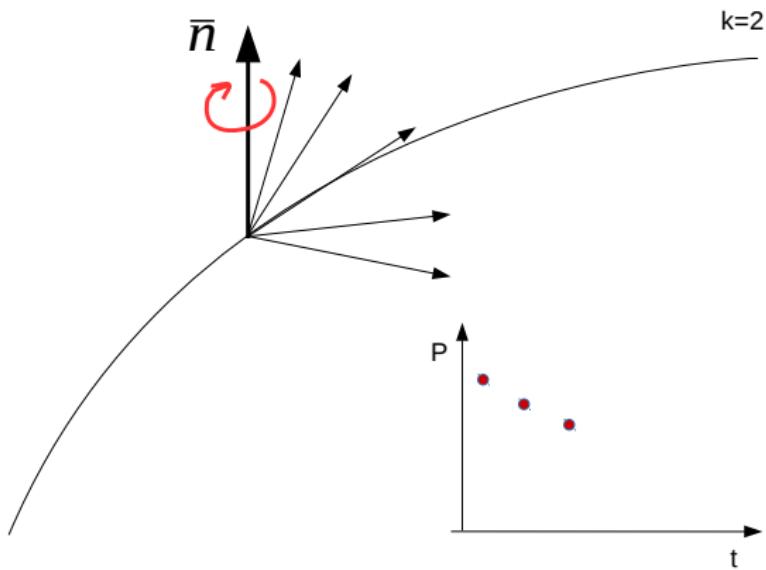
# Декогеренция спинов



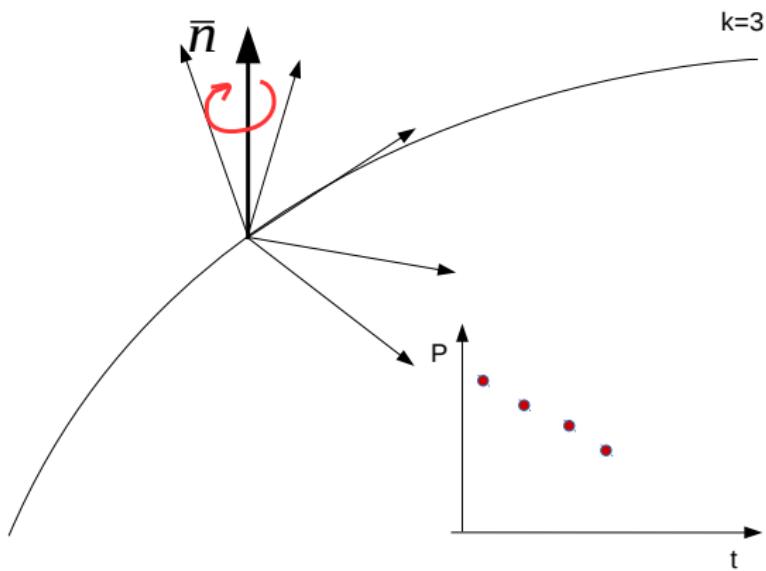
# Декогеренция спинов



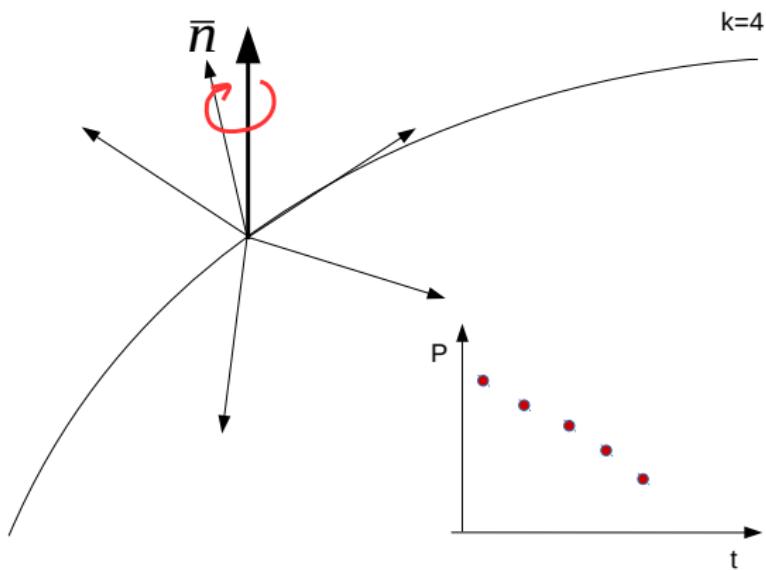
# Декогеренция спинов



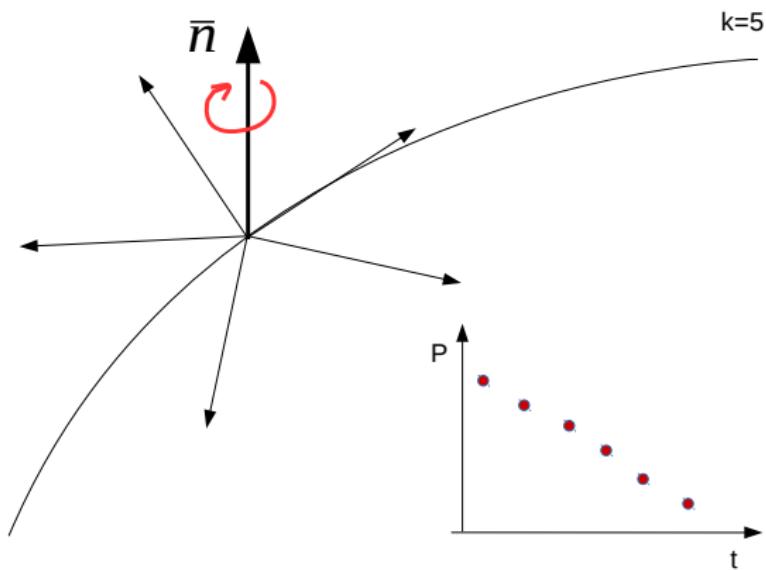
# Декогеренция спинов



# Декогеренция спинов

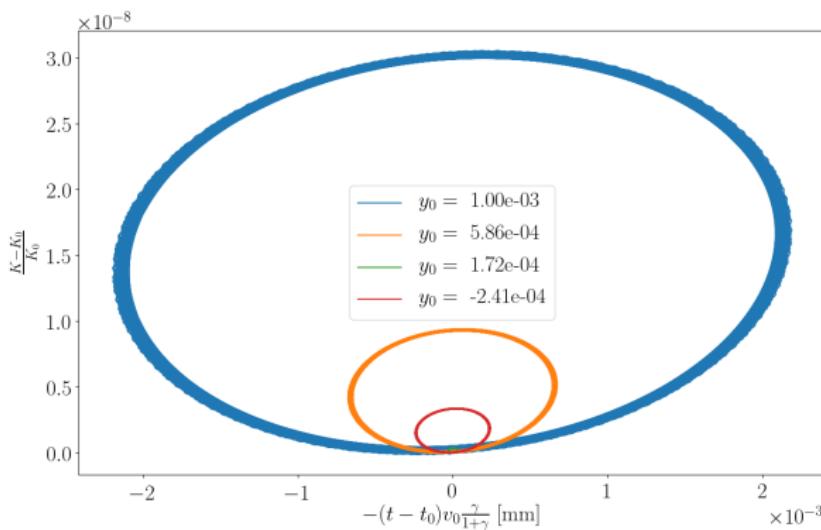


# Декогеренция спинов



# Декогеренция спинов

## Причины



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

# 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

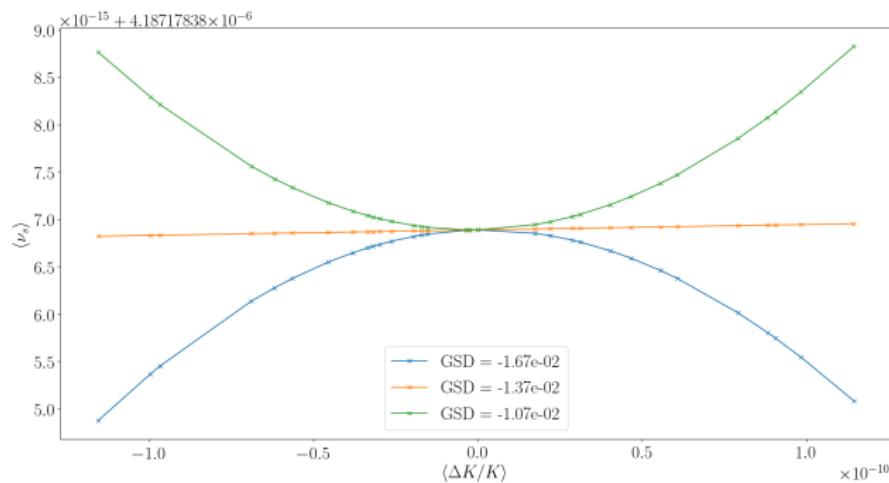
$$S_{sext} = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2}$$

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

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

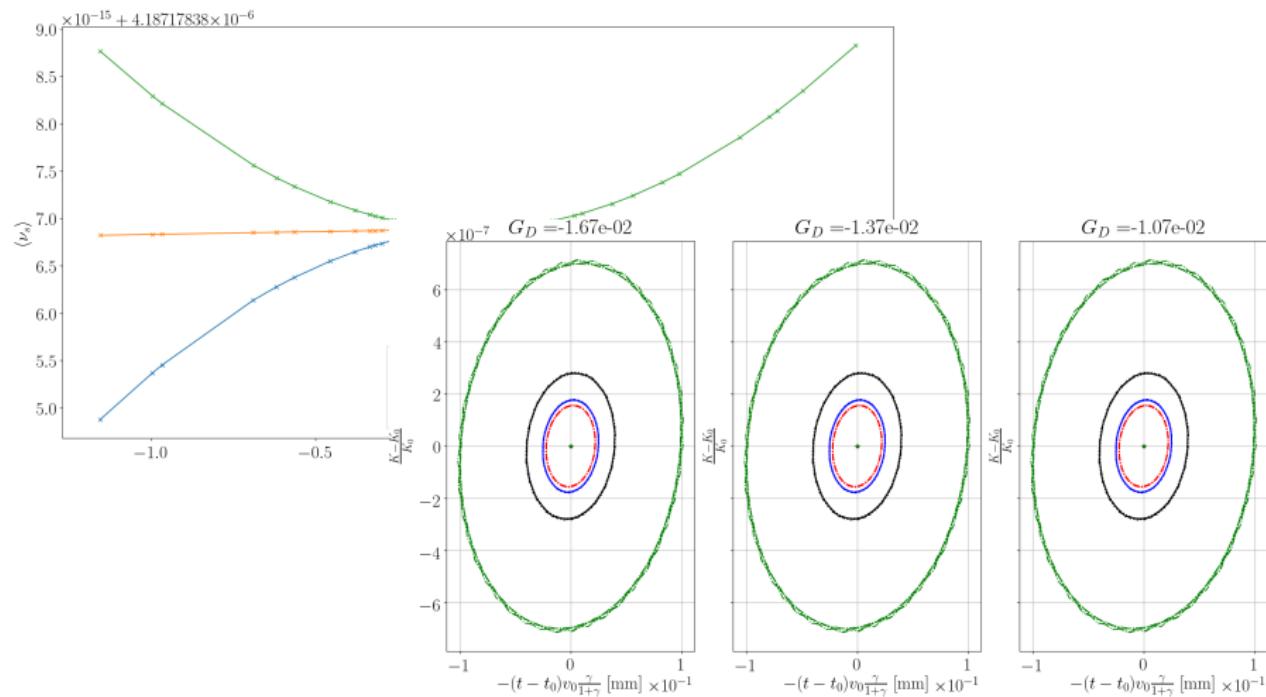
# Эффект секступольных полей

## Коэффициент сжатия орбиты



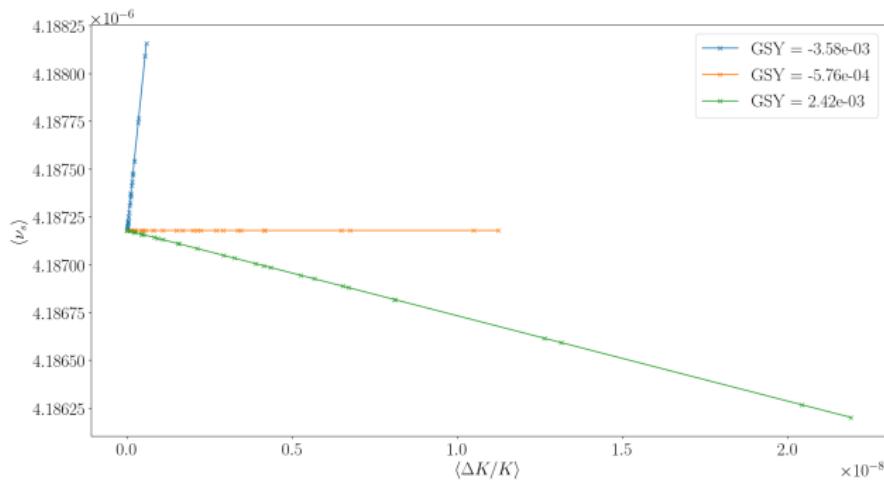
# Эффект секступольных полей

## Коэффициент сжатия орбиты



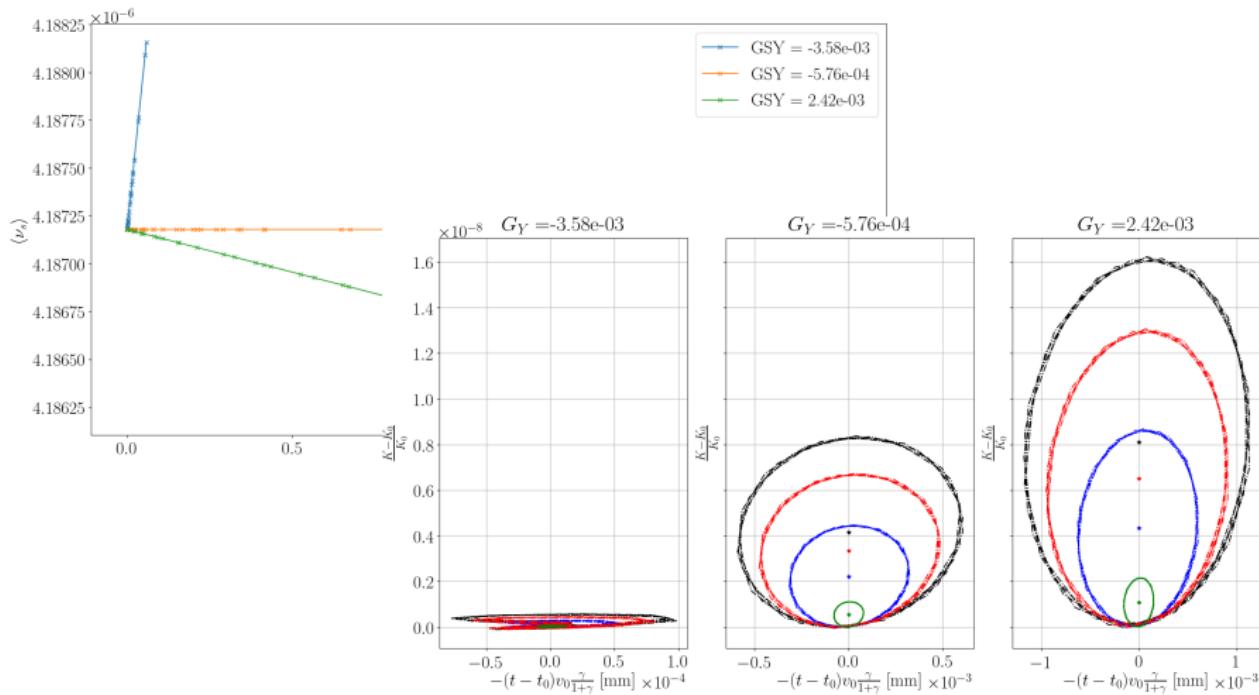
# Эффект секступольных полей

## Длина орбиты



# Эффект секступольных полей

## Длина орбиты



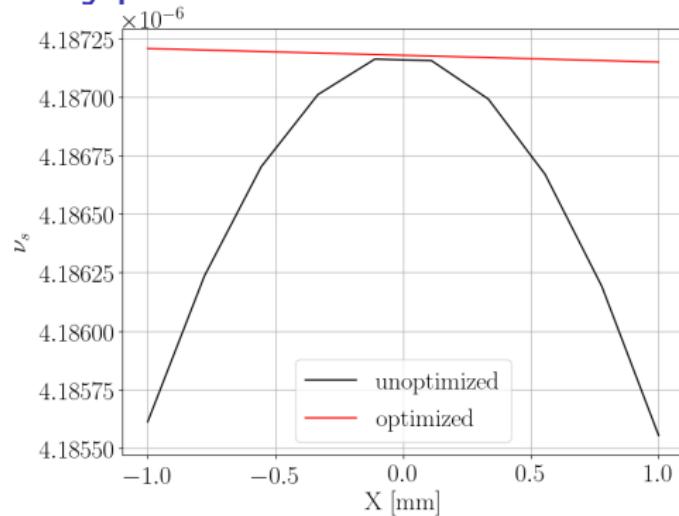
# Выводы

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

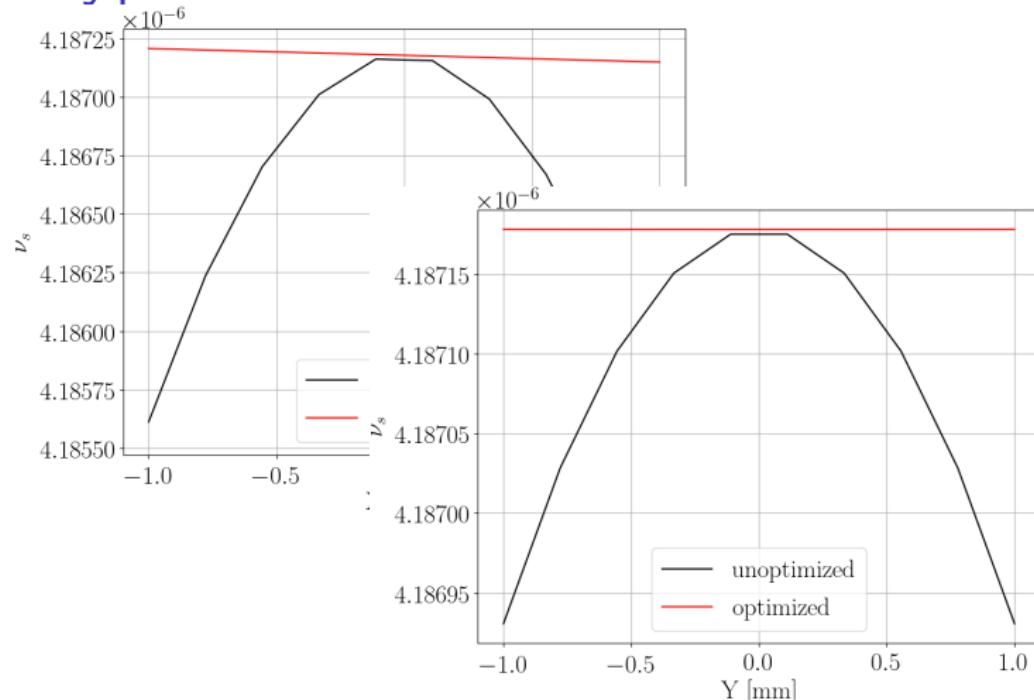
# Выводы

- 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  $\langle \Delta K / K \rangle$

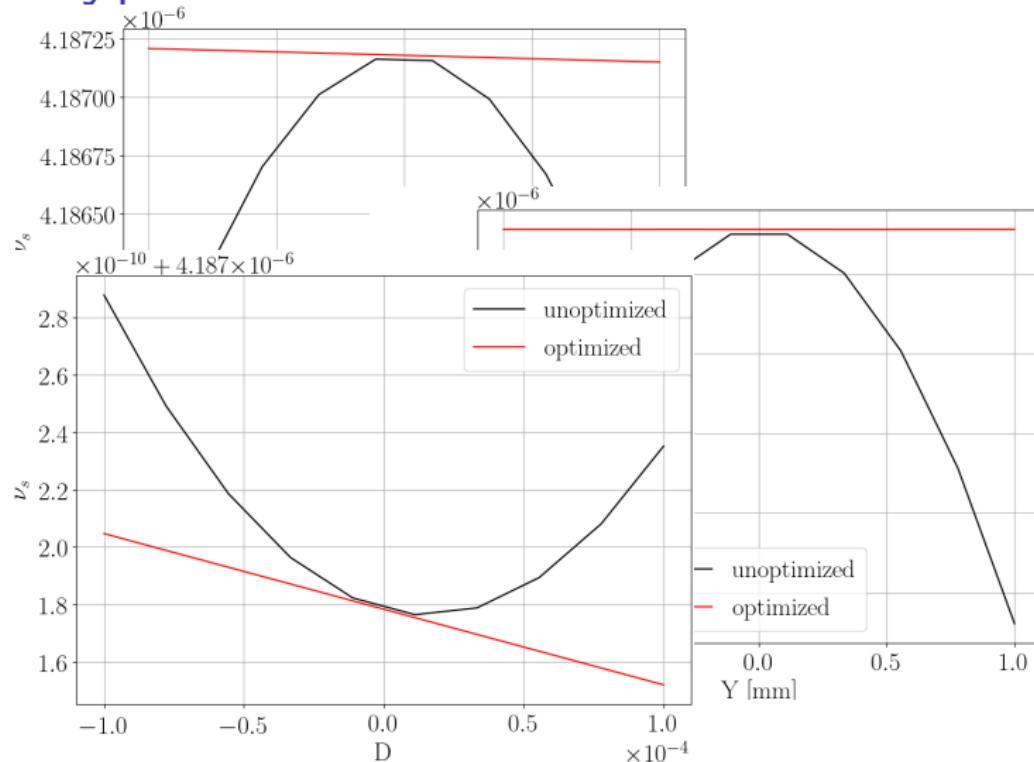
# Подавление декогеренции в идеальной структуре



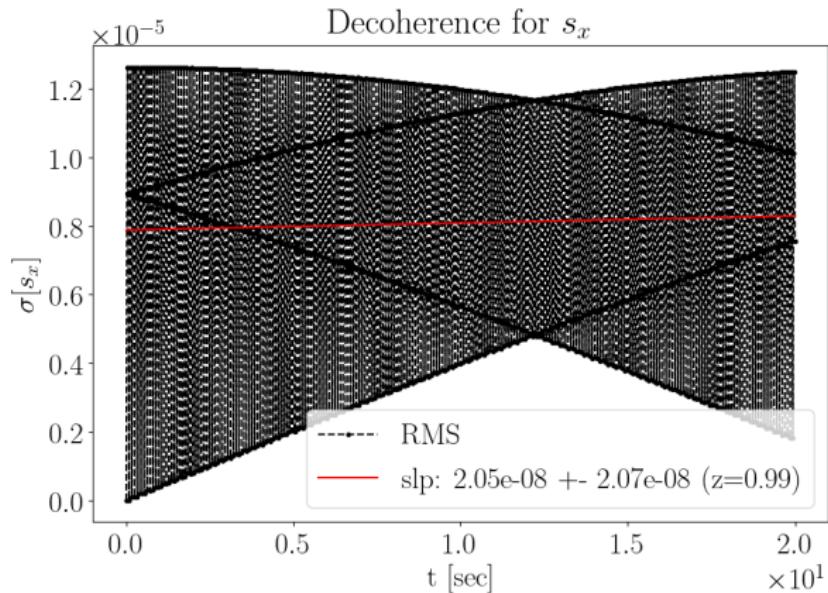
# Подавление декогеренции в идеальной структуре



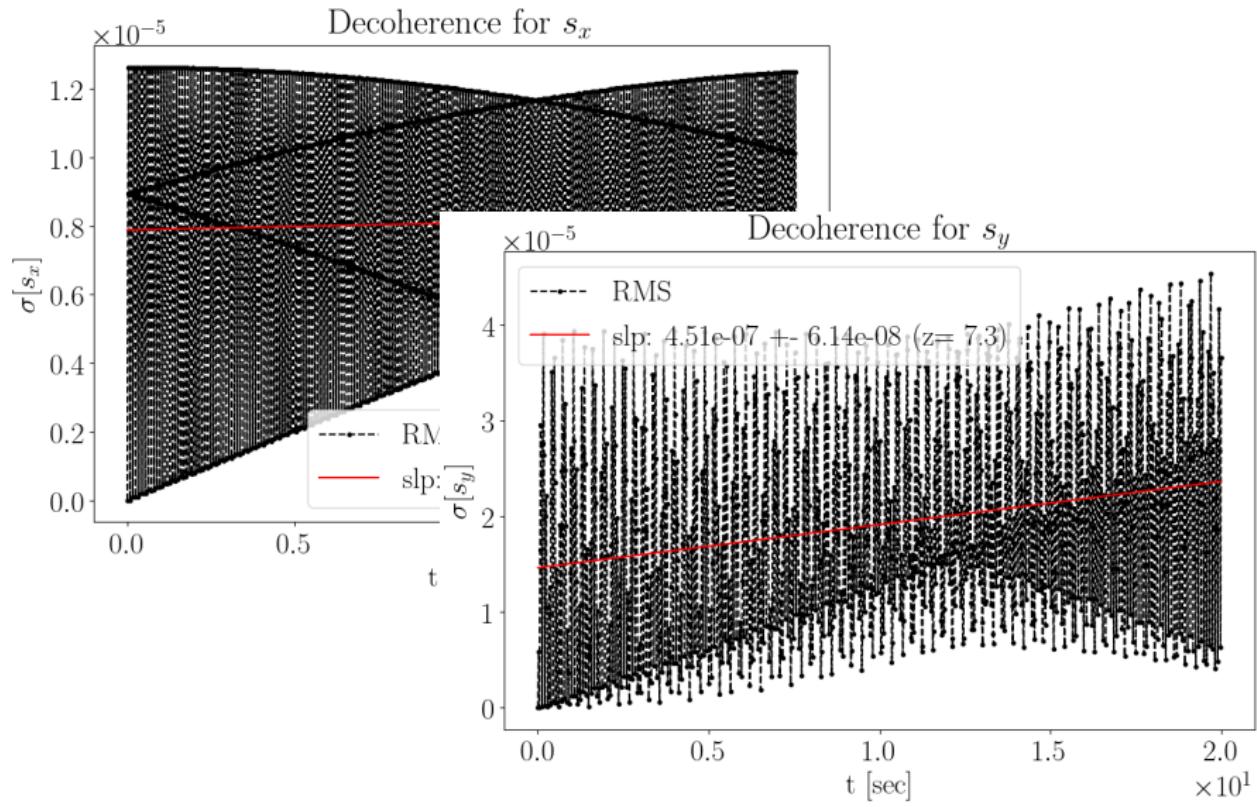
# Подавление декогеренции в идеальной структуре



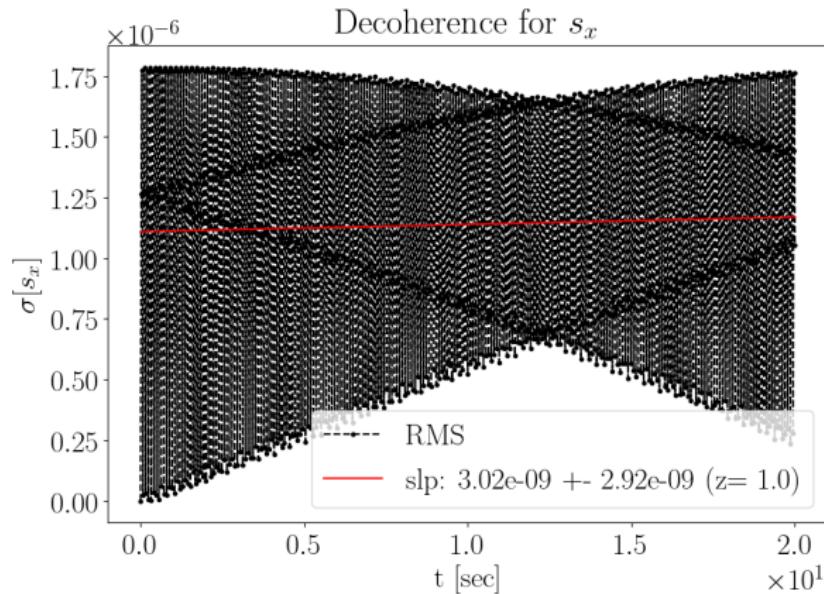
# Декогеренция в неидеальной структуре



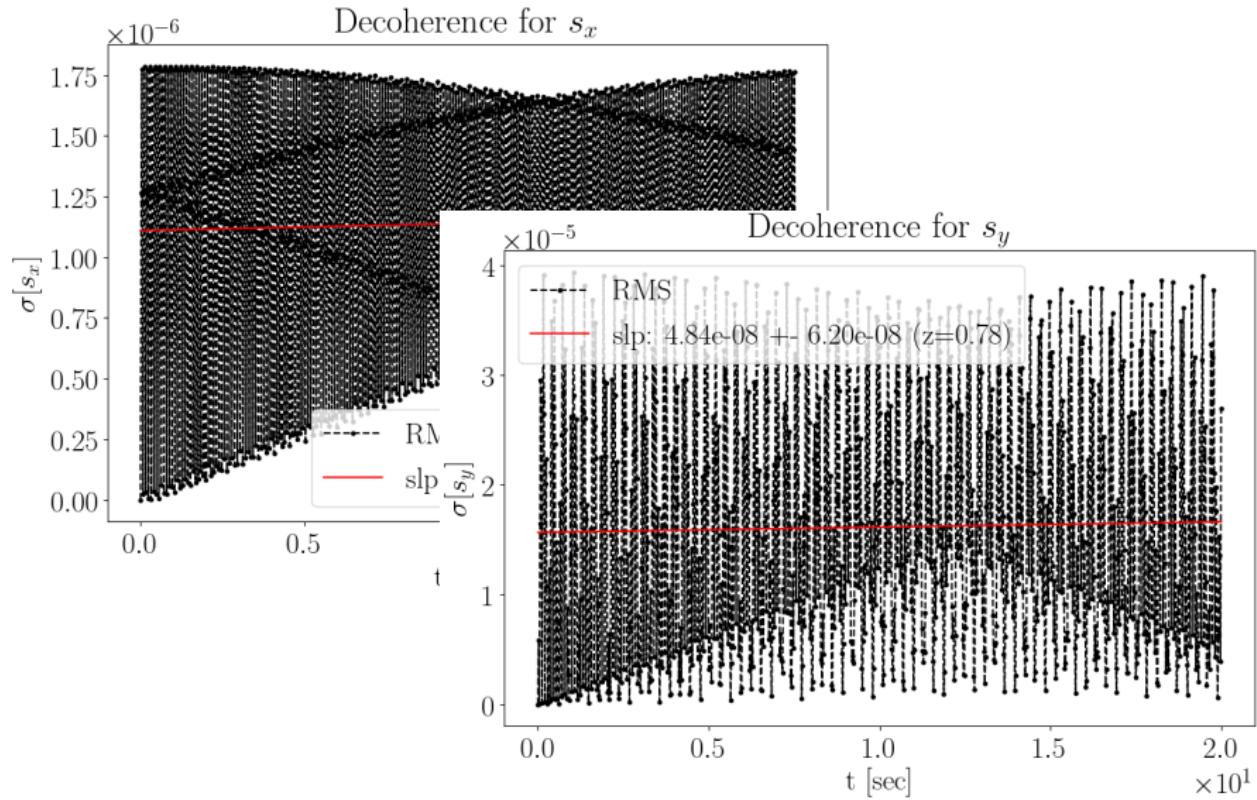
# Декогеренция в неидеальной структуре



# Включаем секступоли



# Включаем секступоли



# МДМ фальш-сигнал

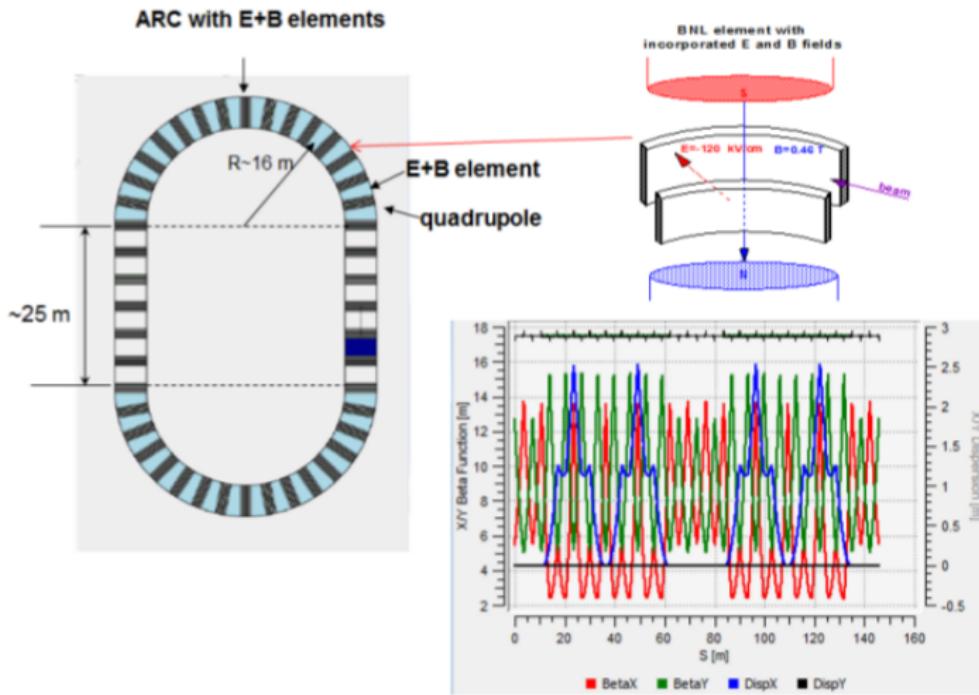
## Величина

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

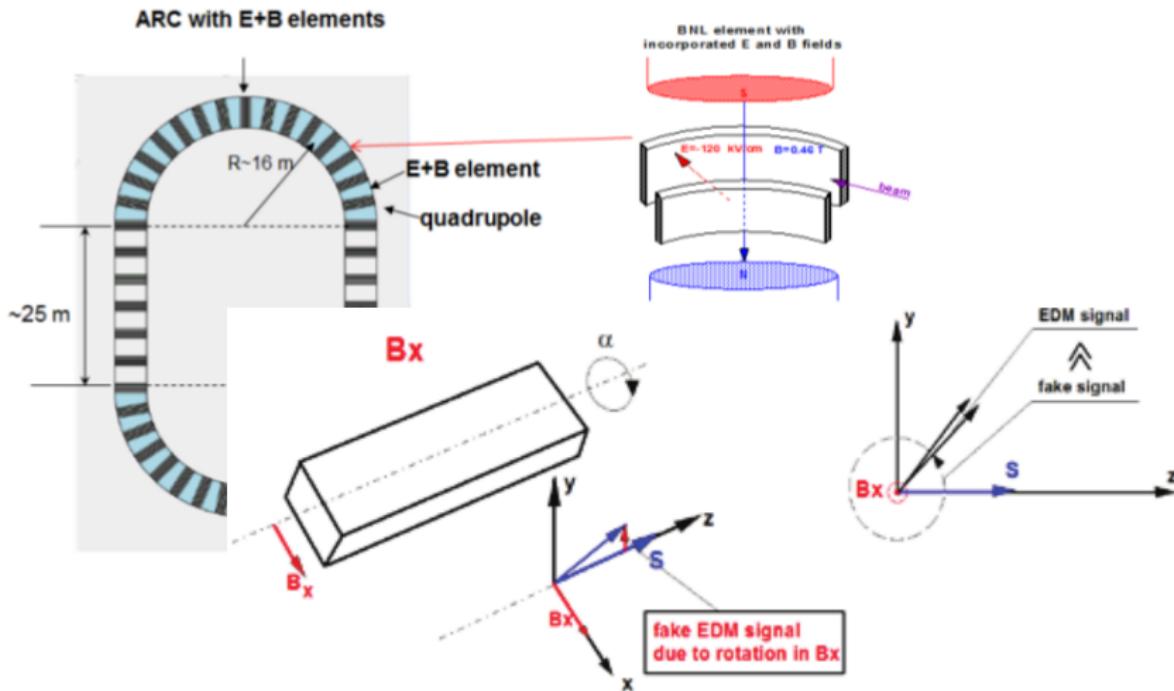
## Вопросы, требующие рассмотрения

- 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

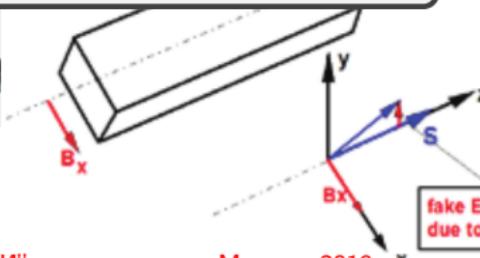
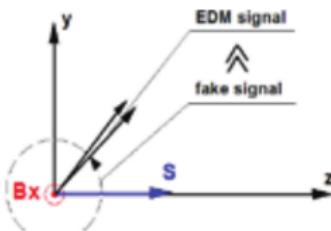
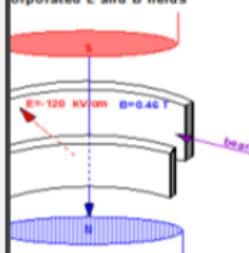


# Рассматриваемая структура



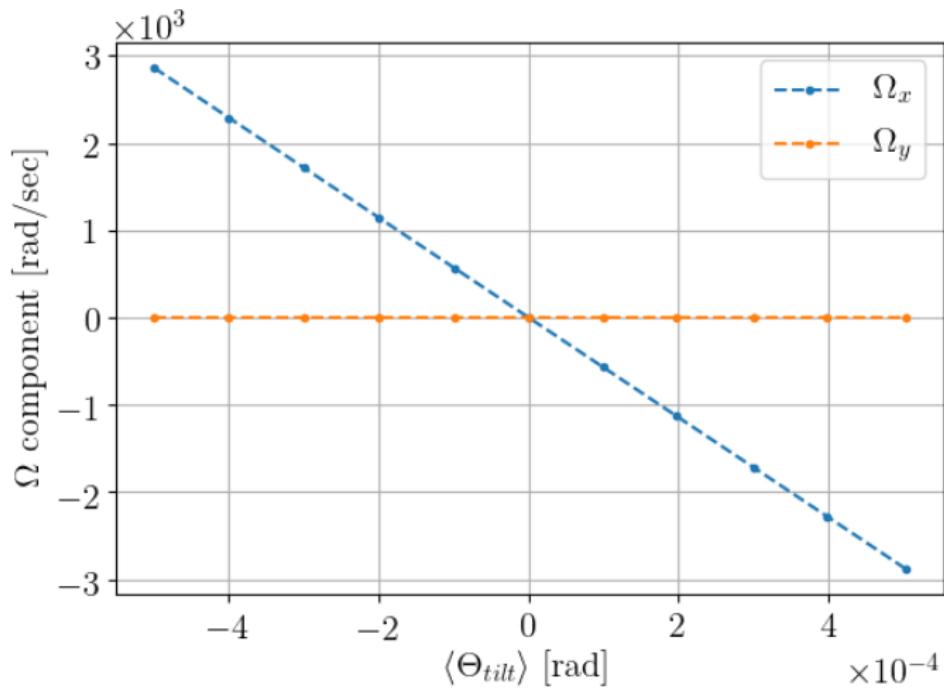
## Рассматриваемая структура

- 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  $\Omega_x^{CO}$

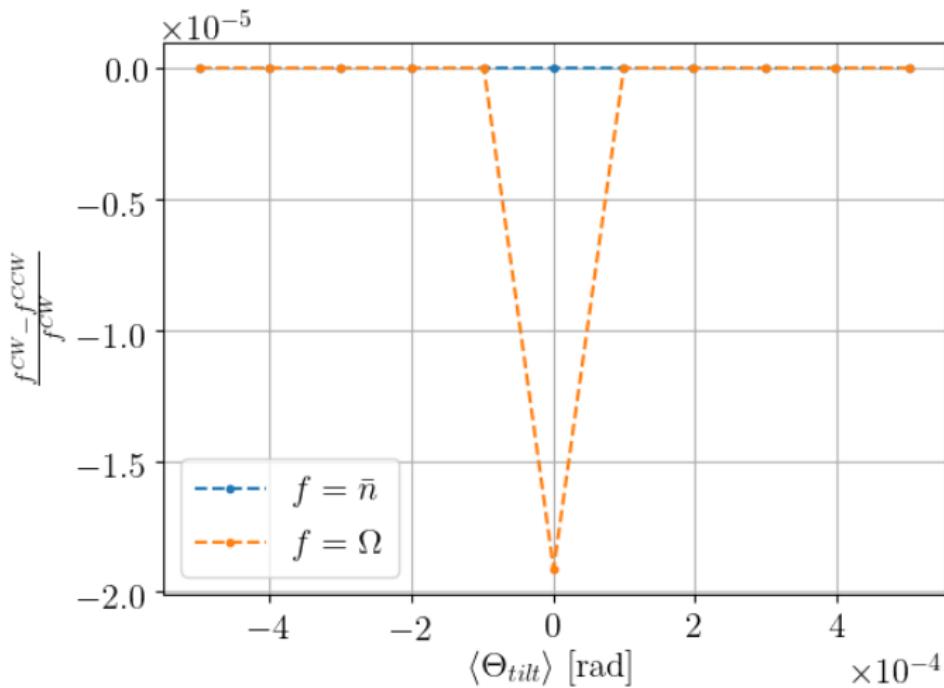


fake EDM signal  
due to rotation in Bx

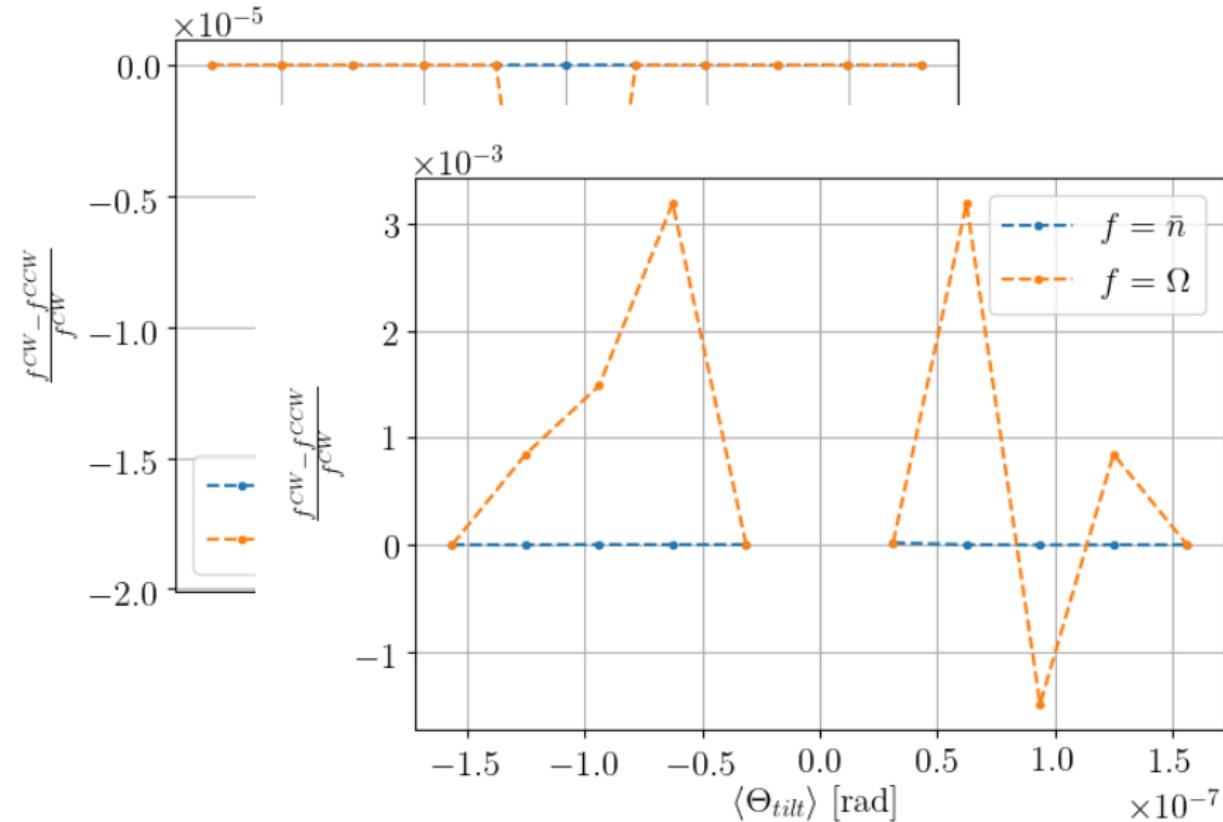
# Линейность



# Симметричность



# Симметричность



# Выводы

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

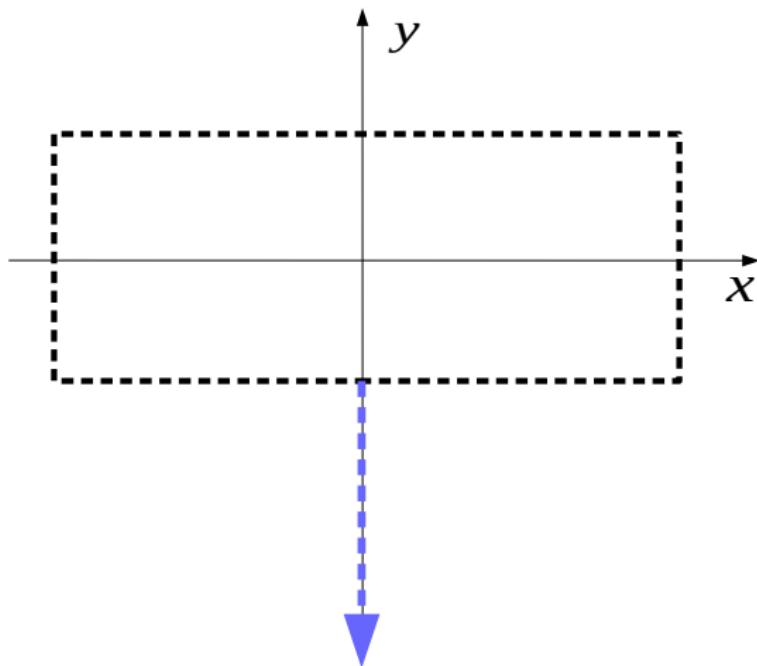
$\omega^{max}$ [рад/сек]	$P(\Omega_x^{MDM} < \omega^{max})$
50	67%
100	95%

## Свойства

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

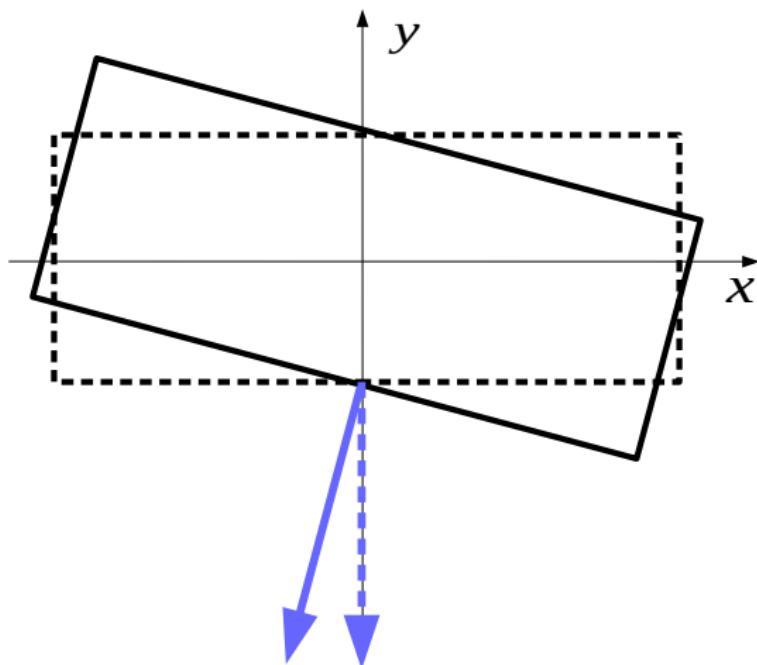
# Смена полярности ведущего поля

Зачем?



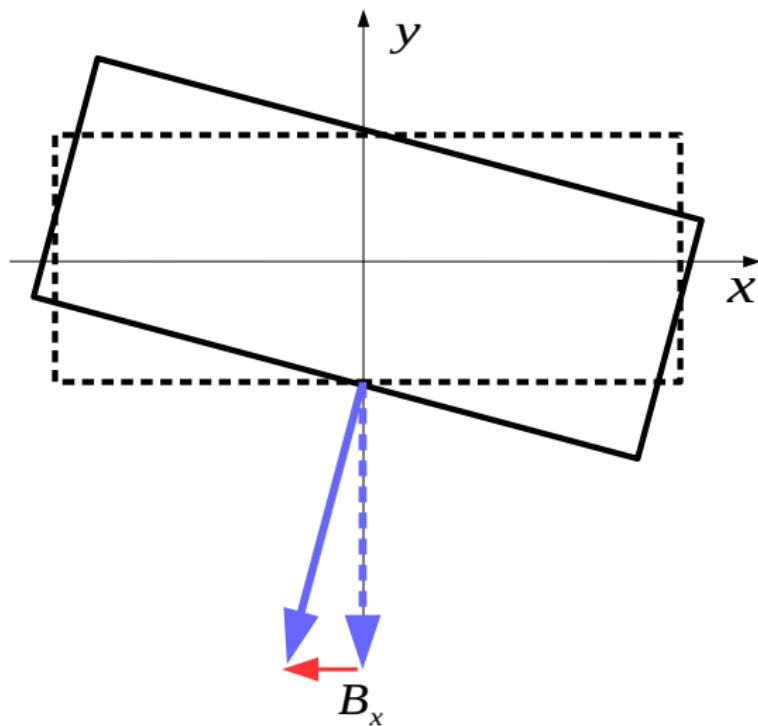
# Смена полярности ведущего поля

Зачем?



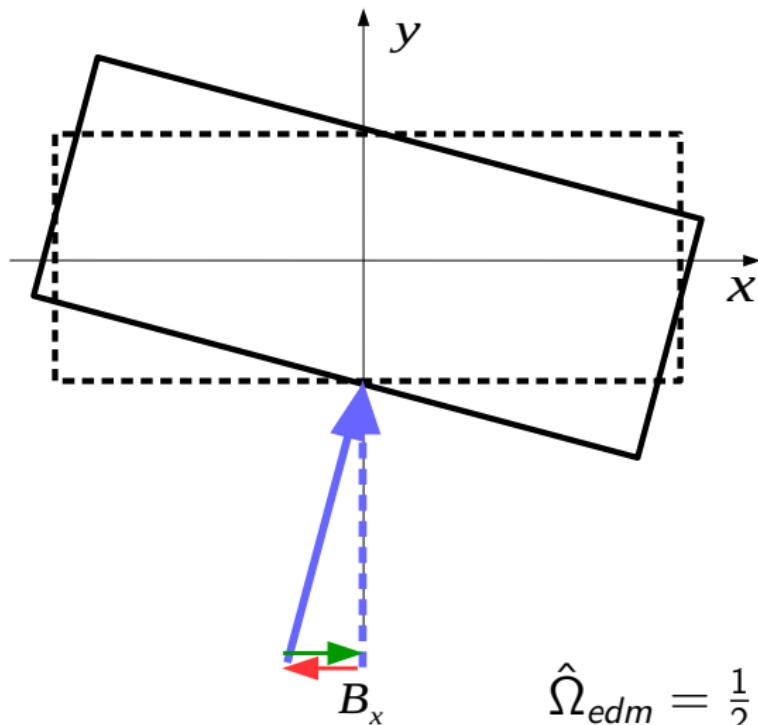
# Смена полярности ведущего поля

Зачем?



# Смена полярности ведущего поля

Зачем?



# 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  $\Omega_x^{MDM}$ , а не  $B_x$

# В чём проблема?

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

# В чём проблема?

- $\Omega_x^{MDM} = \frac{q}{m} GB_x$
- На самом деле, нужно восстановить  $\Omega_x^{MDM}$ , а не  $B_x$
- Востановление  $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$  не достаточно, т.к. точка инжекции и  $\nu_s$  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  $\Omega_x^{MDM}$ , а не  $B_x$
  - Востановление  $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$  не достаточно, т.к. точка инжекции и  $\nu_s$  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

- $\nu_s$  — инъективная функция  $\gamma_{\text{eff}}$ , 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

- $\nu_s$  — инъективная функция  $\gamma_{\text{eff}}$ , 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  $[\gamma_{\text{eff}}]$

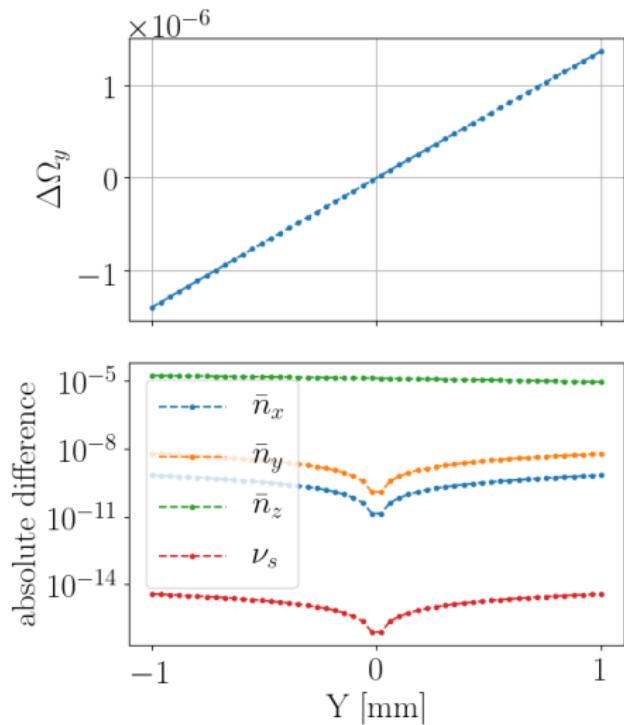
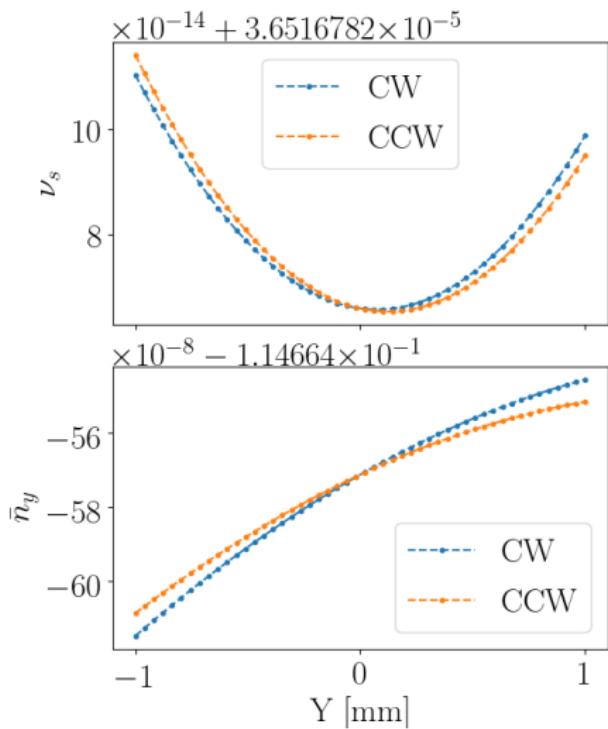
# Калибровка эффективного Л-фактора

- $\nu_s$  — инъективная функция  $\gamma_{eff}$ , 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  $[\gamma_{eff}]$   
 $\Rightarrow \exists! \gamma_{eff}^0: [\gamma_{eff}^0] = [\Omega_y = 0]$

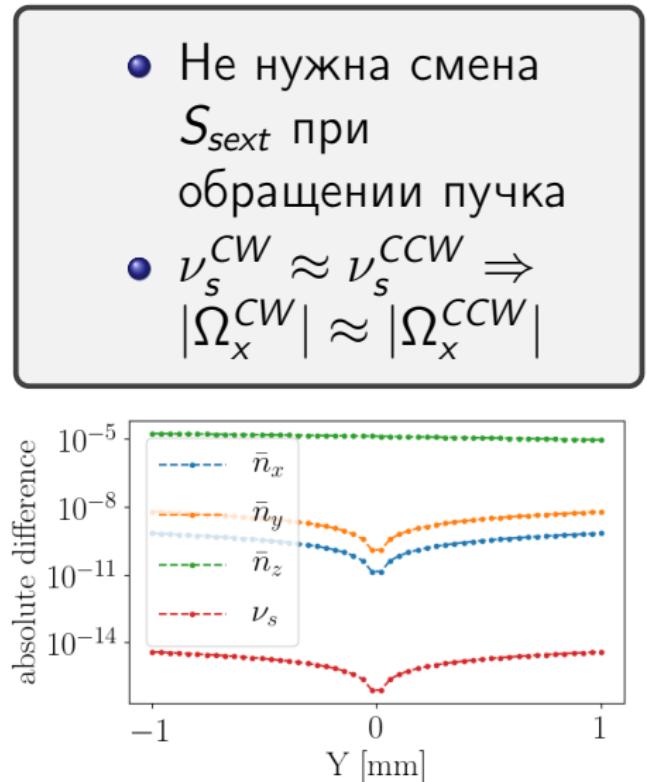
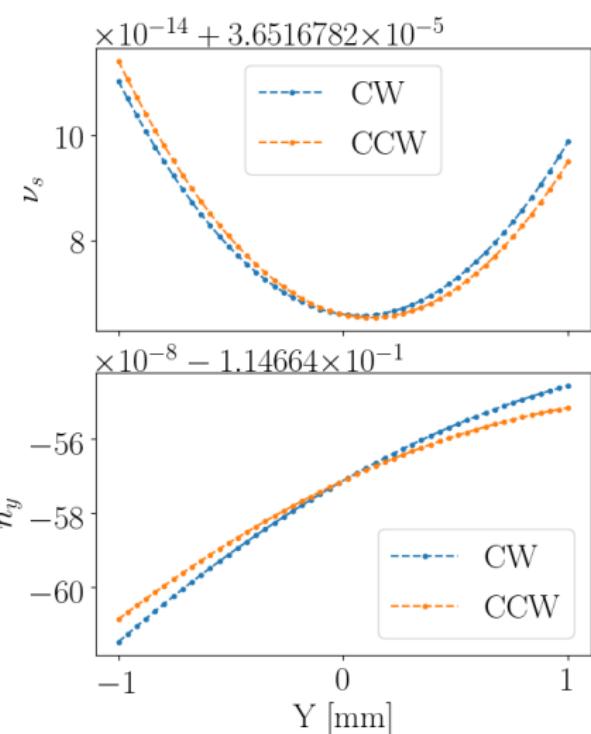
# Калибровка эффективного Л-фактора

- $\nu_s$  — инъективная функция  $\gamma_{\text{eff}}$ , 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  $[\gamma_{\text{eff}}]$ 
  - $\Rightarrow \exists! \gamma_{\text{eff}}^0: [\gamma_{\text{eff}}^0] = [\Omega_y = 0]$
  - $\Rightarrow$  если CW, CCW пучки оба заморожены в горизонтальной плоскости, то их  $\gamma_{\text{eff}}$  равны

# Симуляция

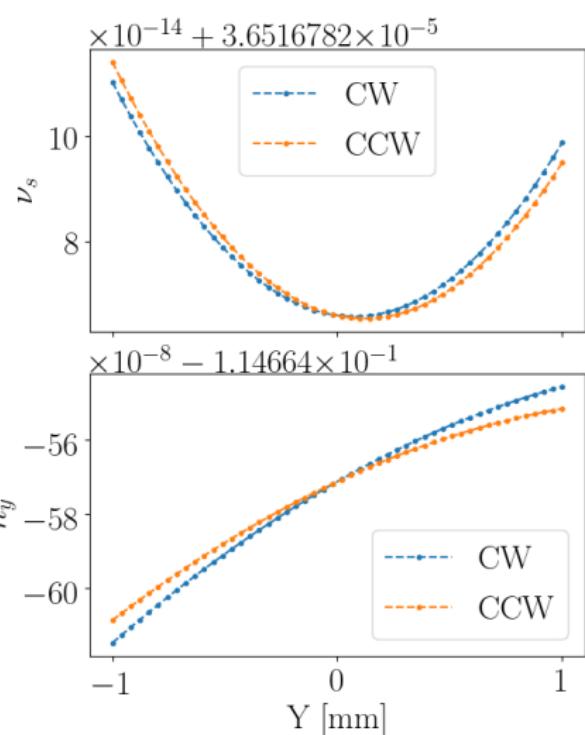


# Симуляция

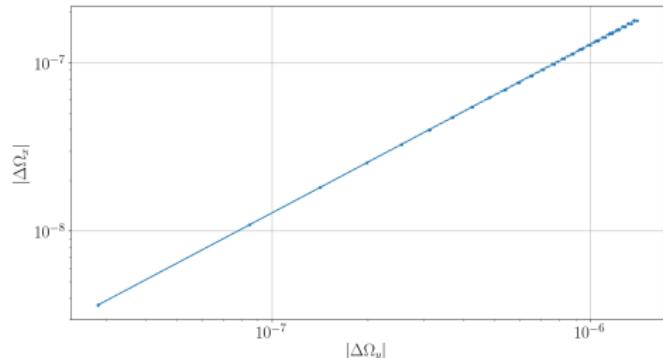


- Не нужна смена  $S_{sext}$  при обращении пучка
- $\nu_s^{CW} \approx \nu_s^{CCW} \Rightarrow |\Omega_x^{CW}| \approx |\Omega_x^{CCW}|$

# 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

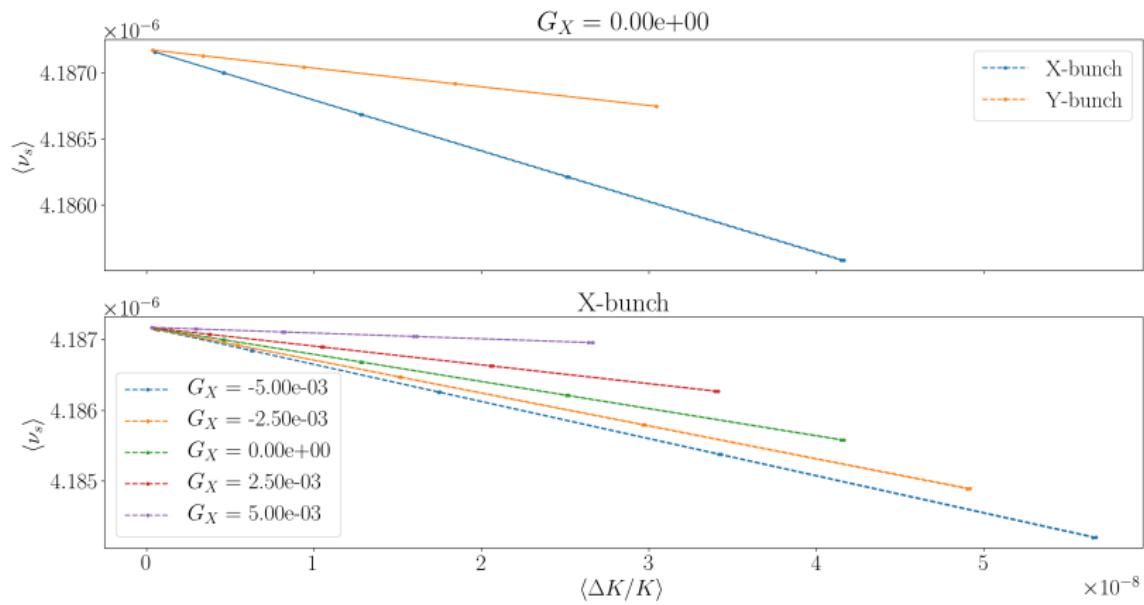
A

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

B

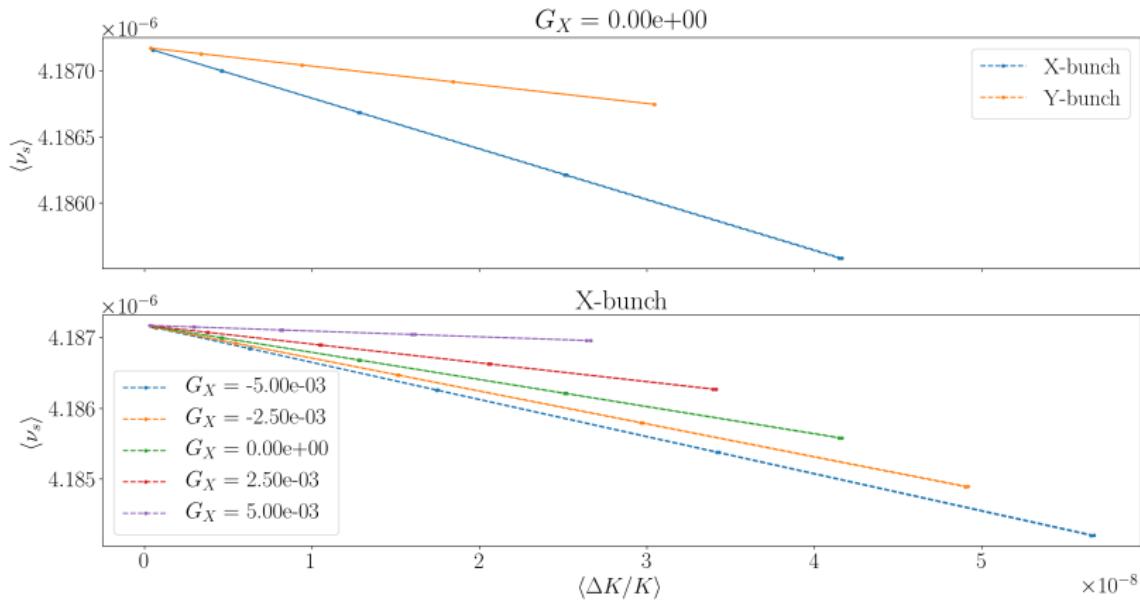
$$\nu_s(x, a, y, b, \ell, \delta) \equiv \nu_s(\gamma_{\text{eff}})$$

A



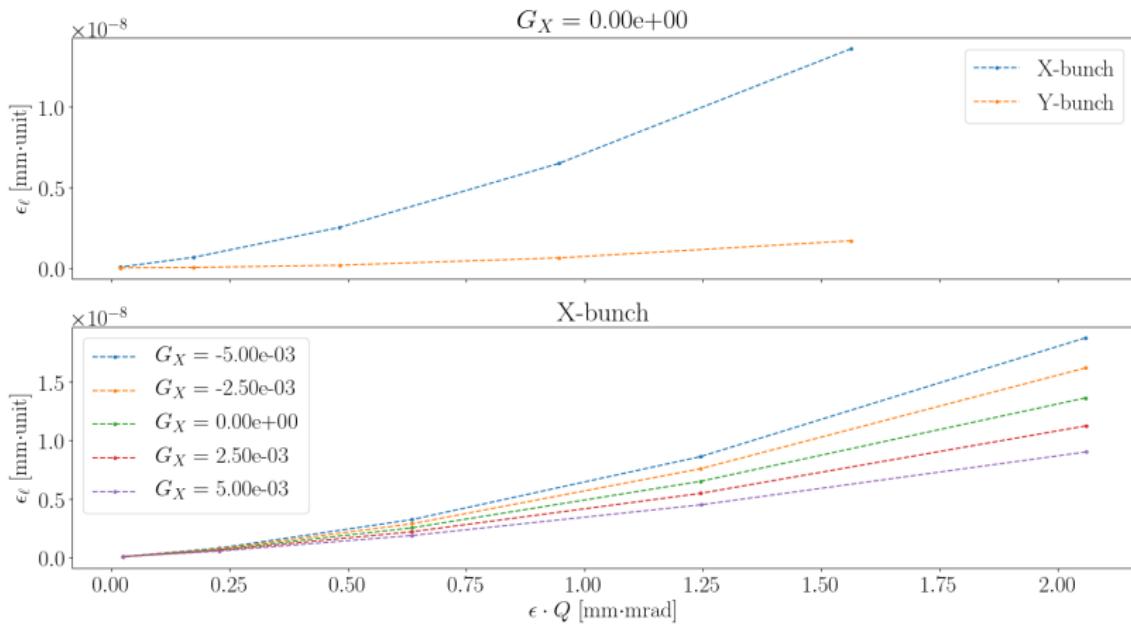
A

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



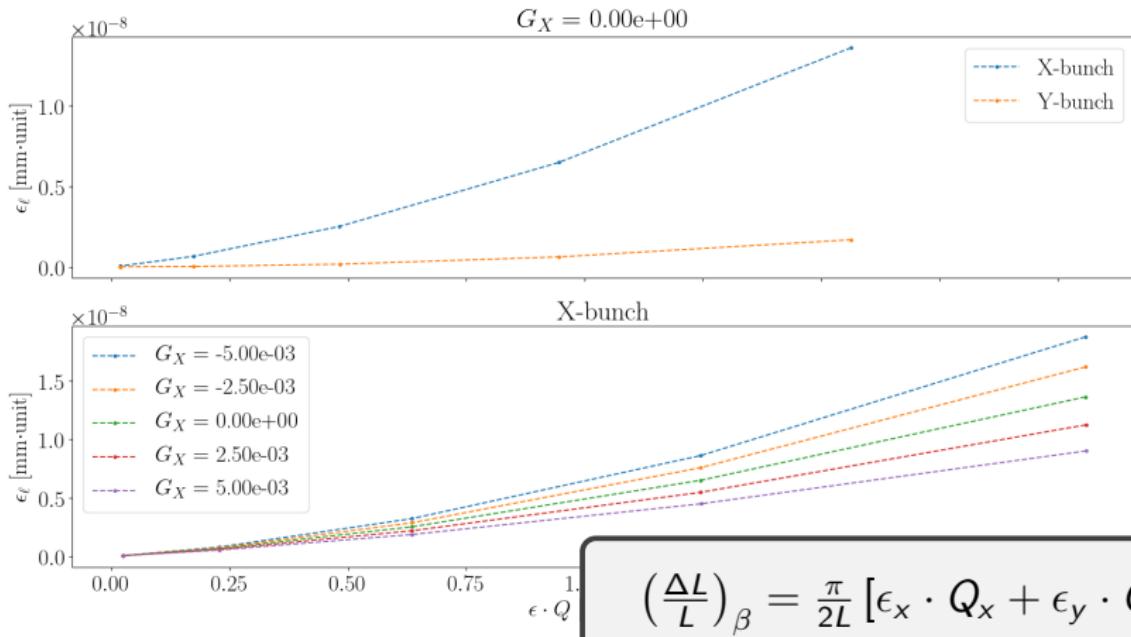
A

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

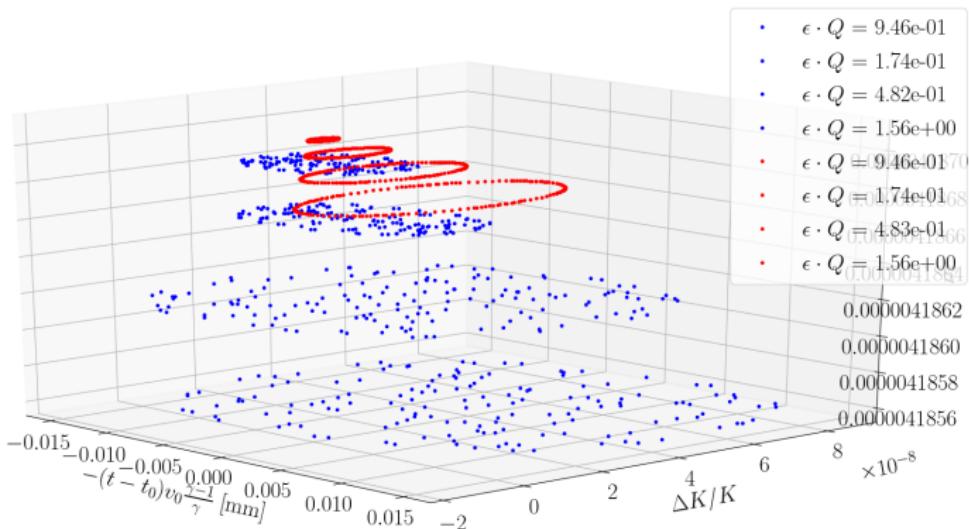


A

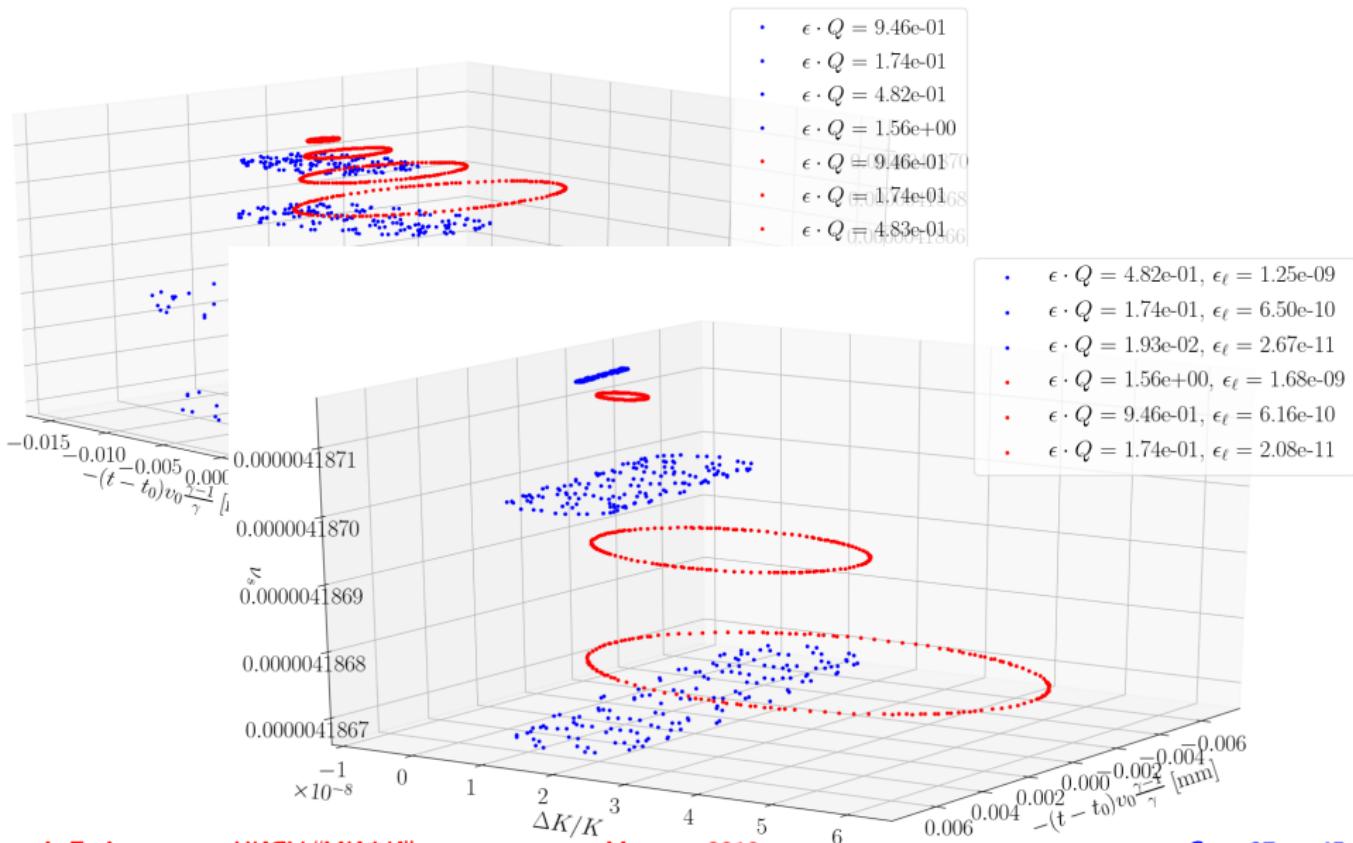
$$\Delta\delta_{eq} = \frac{\gamma_0^2}{\gamma_0^2\alpha_0 - 1} \left[ \frac{\delta_m^2}{2} (\alpha_1 - \alpha_0\gamma^{-2} + \gamma_0^{-4}) + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_\beta \right]$$



B



B



# Выводы

## Вывод 1

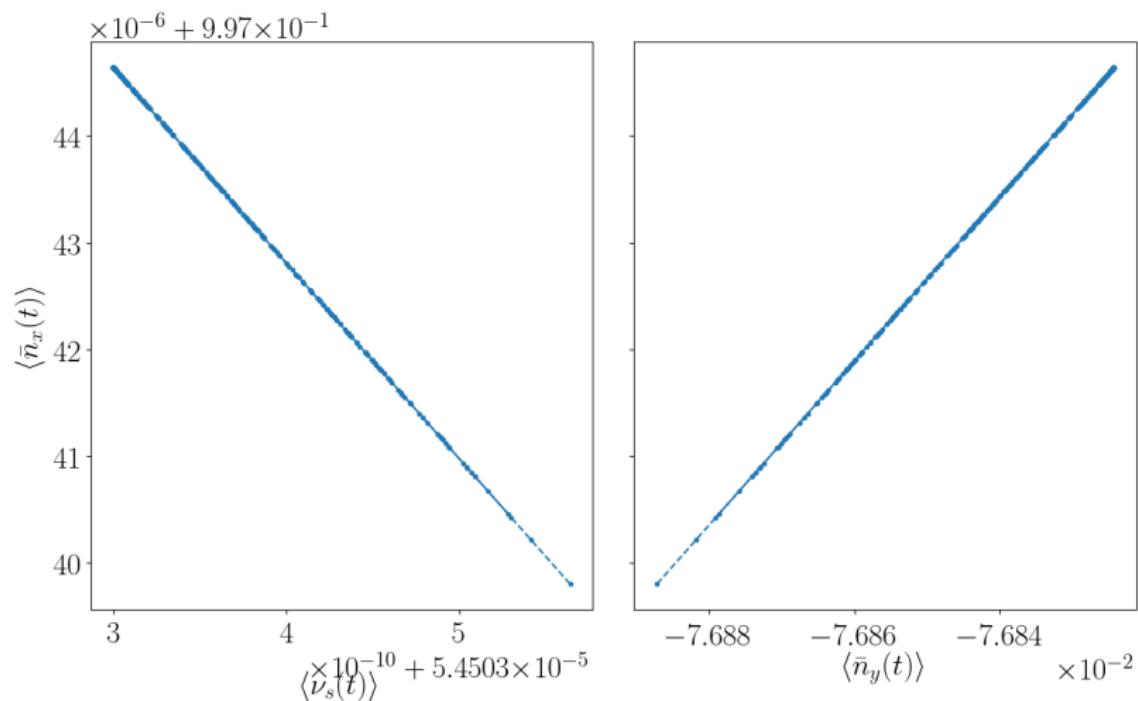
- Формулировка В верна

# Выводы

## Вывод 1

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

# Выводы



# Выводы

## Вывод 2

Спиновая динамика частиц с одинаковым значением  
 $\gamma_{eff}$  эквивалентна в общем смысле ( $\nu_s$ ,  $\bar{n}$ )

# Выводы

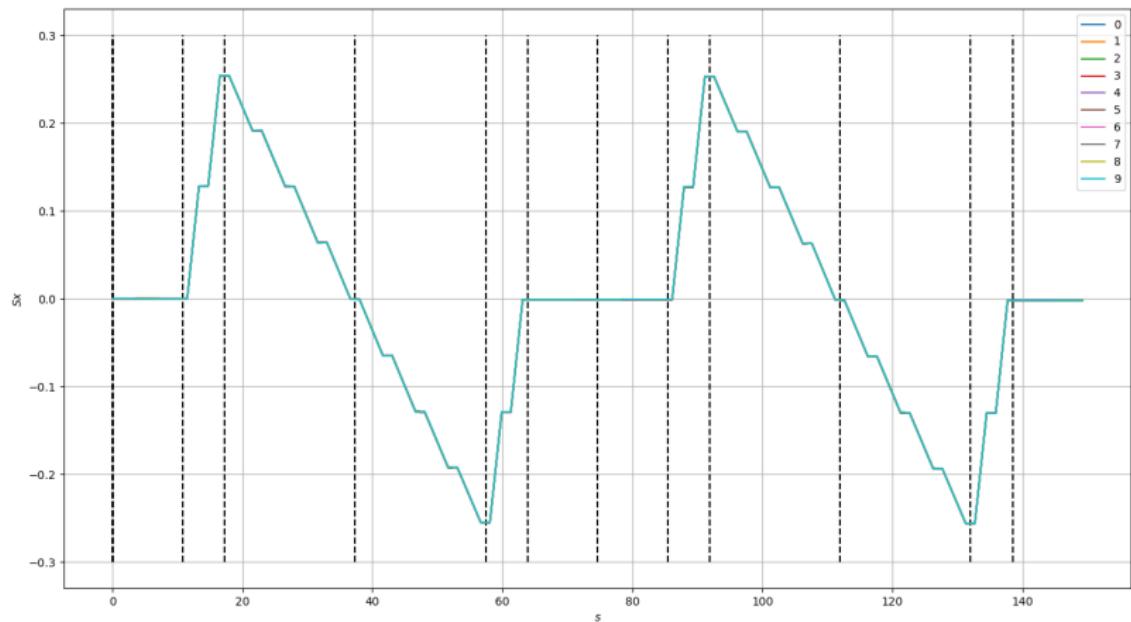
## Вывод 2

Спиновая динамика частиц с одинаковым значением  
 $\gamma_{eff}$  эквивалентна в общем смысле ( $\nu_s$ ,  $\bar{n}$ )

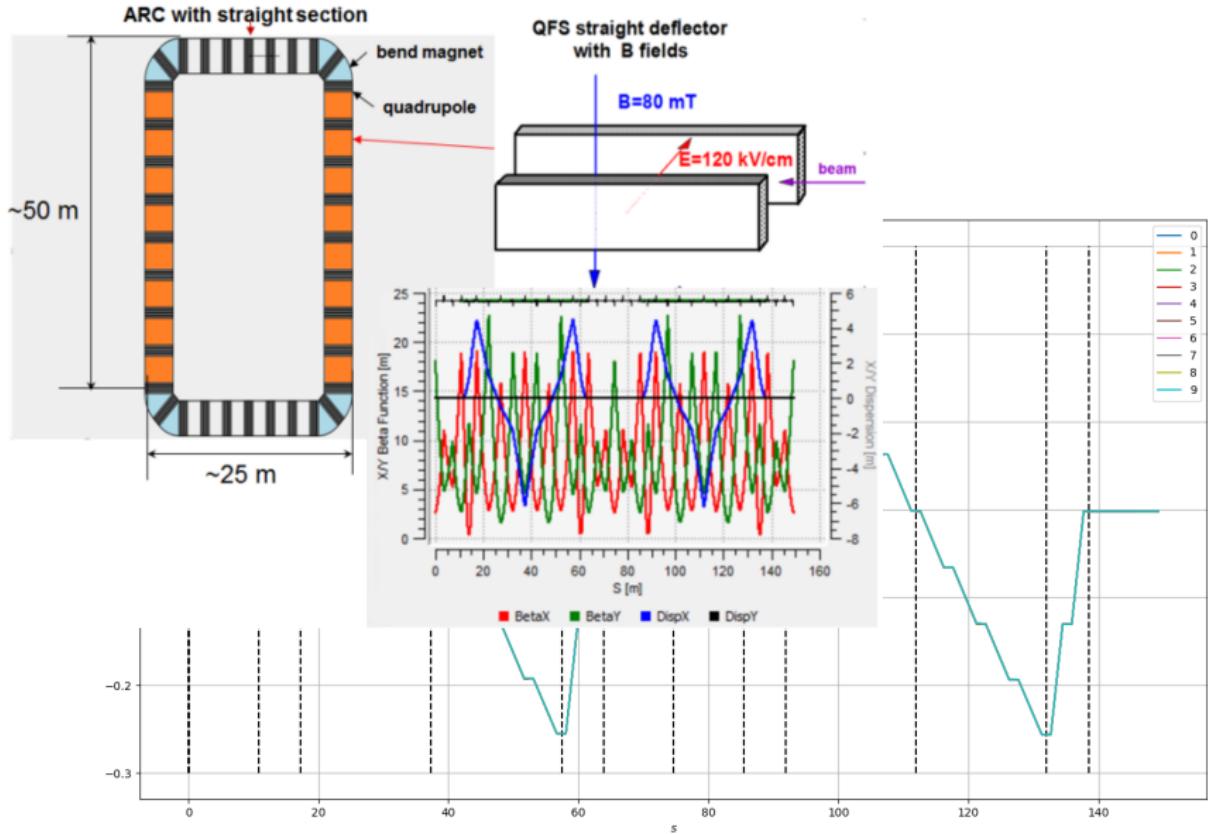
## Дисклеймер

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

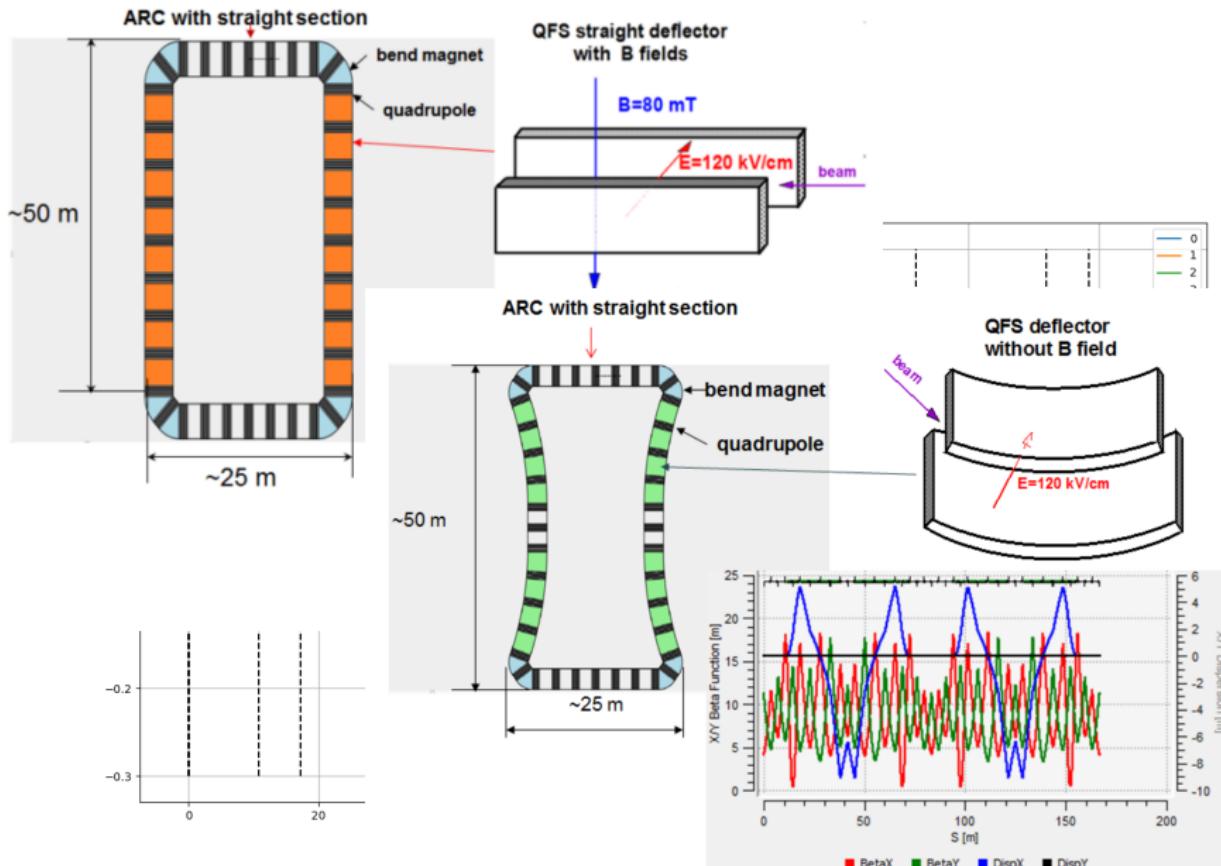
## QFS-структуры



# 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!