

# 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

# Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной

# Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
- Ответ: нарушение CP-симметрии, как одно из условий бариогенеза

# Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
- Ответ: нарушение СР-симметрии, как одно из условий бариогенеза
- Существование перманентного ЭДМ нарушает СР-симметрию

# Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

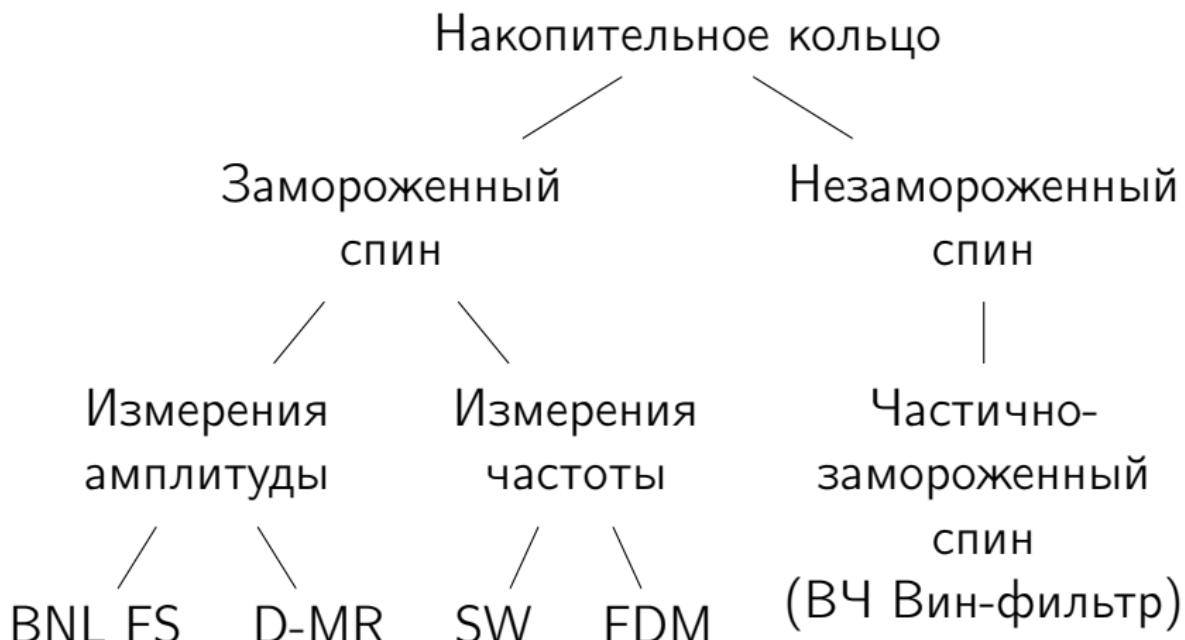
- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
- Ответ: нарушение СР-симметрии, как одно из условий бариогенеза
- Существование перманентного ЭДМ нарушает СР-симметрию
- Стандартная Модель предсказывает ЭДМ  
 $< 10^{-31} \text{ e} \cdot \text{cm}$

# Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
  - Ответ: нарушение СР-симметрии, как одно из условий бариогенеза
  - Существование перманентного ЭДМ нарушает СР-симметрию
  - Стандартная Модель предсказывает ЭДМ  $< 10^{-31} e \cdot cm$
- ⇒ Обнаружение большего ЭДМ — свидетельство физики за гранью СМ

# Методы поиска ЭДМ



# Кольцо с замороженным спином

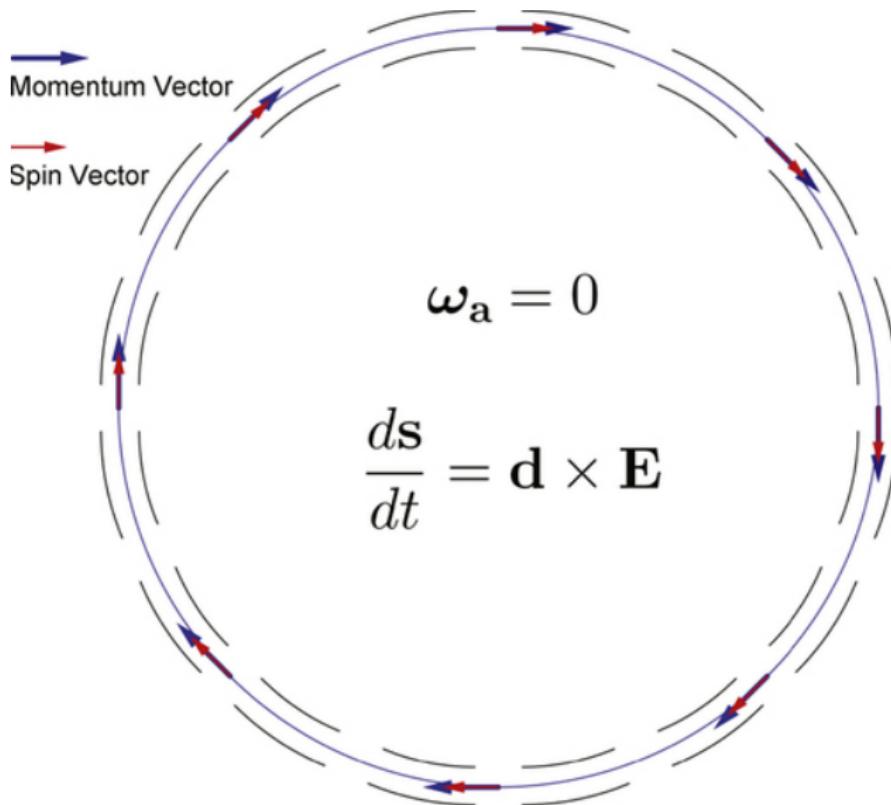
## Томас-БМТ

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

## Замороженный спин

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

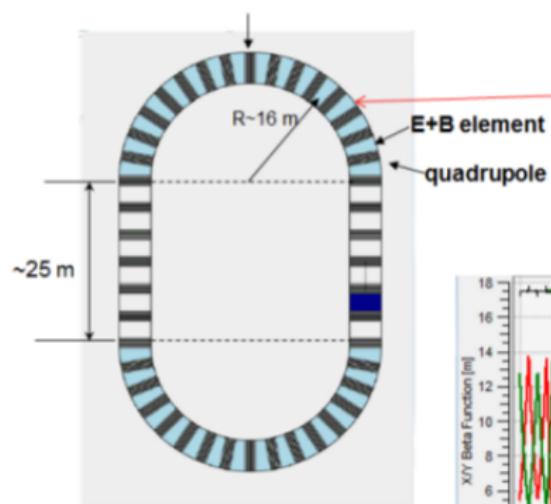
Выглядит это так



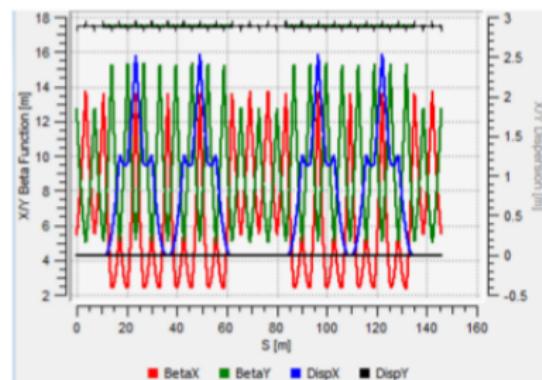
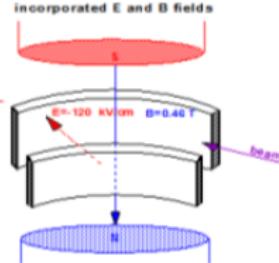
# Варианты структур

## Истинно-замороженный спин

ARC with E+B elements

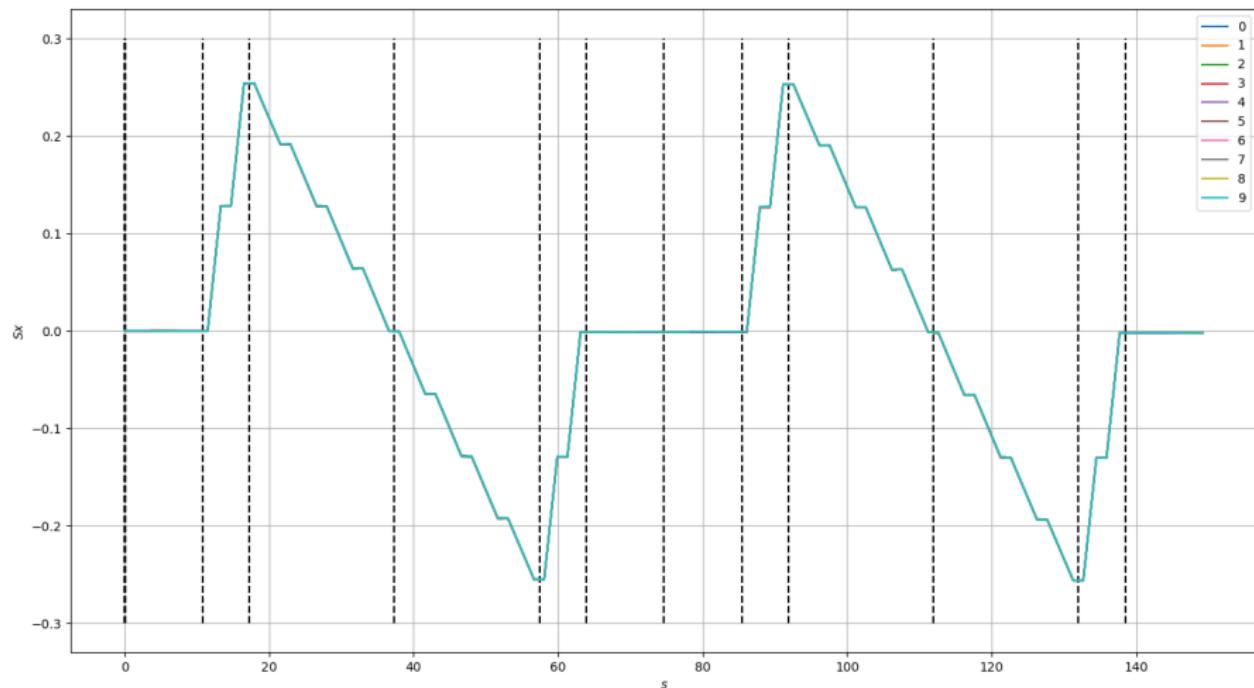


BNL element with incorporated E and B fields



# Варианты структур

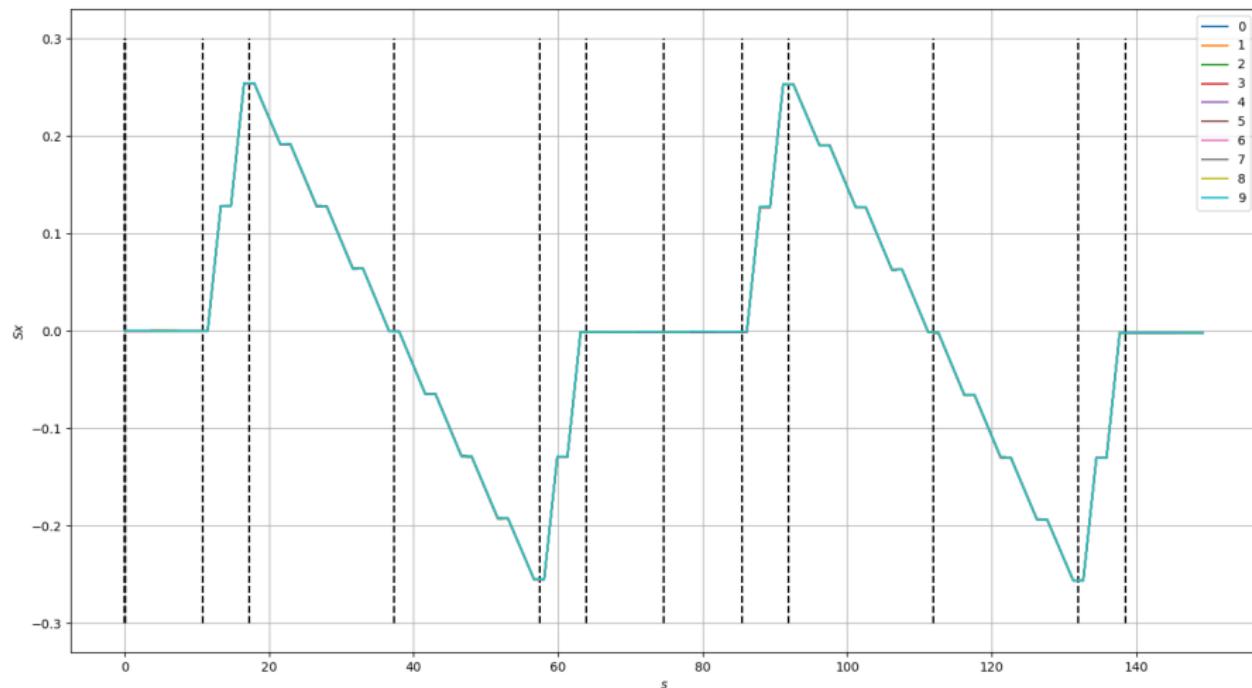
## Квази-замороженный спин



# Варианты структур

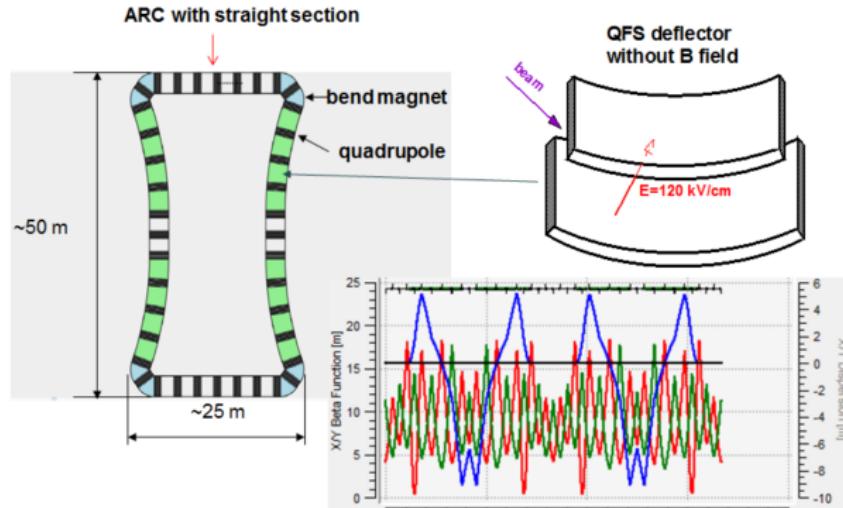
## Квази-замороженный спин

$$J_0(\Phi_s) \approx 1 - \frac{\Phi_s^2}{4}$$

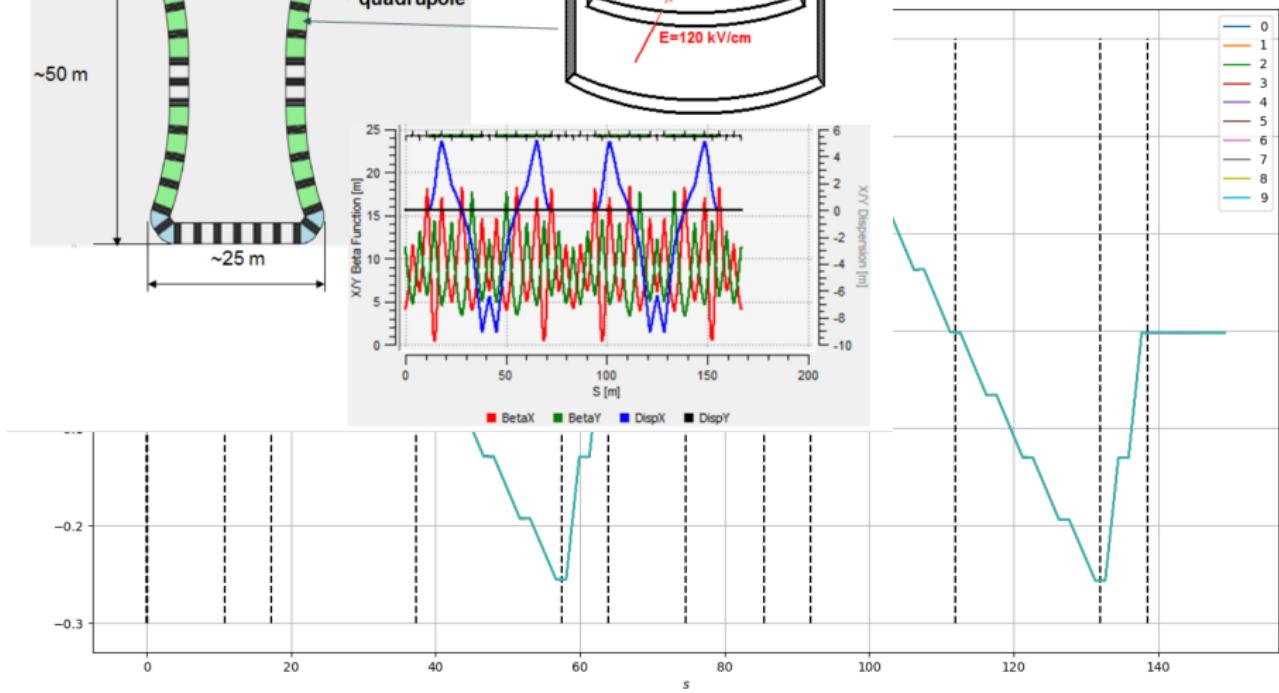


# Варианты структур

## Квази-замороженный спин

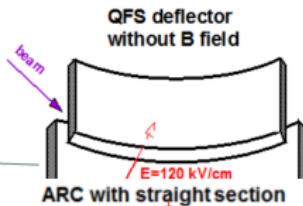
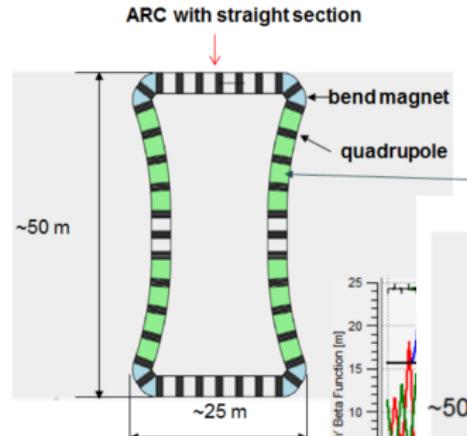


$$J_0(\Phi_s) \approx 1 - \frac{\Phi_s^2}{4}$$

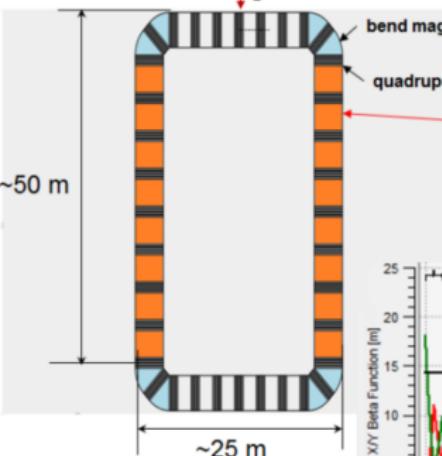
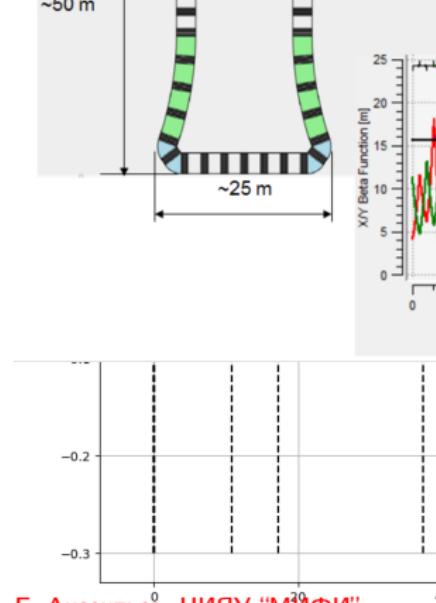


# Варианты структур

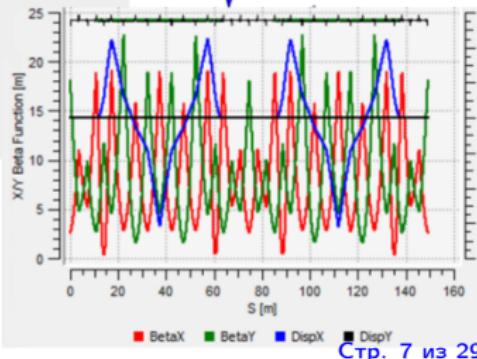
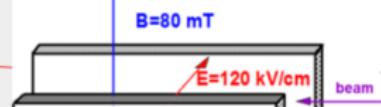
## Квази-замороженный спин



$$J_0(\Phi_s) \approx 1 - \frac{\Phi_s^2}{4}$$



QFS straight deflector with B fields



# Измерение амплитуды vs частоты

$$P_y = A \cdot \sin \left[ \underbrace{\sqrt{(\omega_{edm} + \omega_{imp})^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \cdot t + \delta}}_{\Omega} \right]$$

- **Амплитуда:**

- ▶ Останавливаем МДМ-прецессию и в горизонтальной, и в вертикальной плоскости
- ▶ Наблюдаем за изменением пространственной ориентации вектора поляризации пучка

- **Частота:**

- ▶ Останавливаем МДМ-прецессию **только** в горизонтальной плоскости
- ▶ Наблюдаем за изменением в **угловой скорости** прецессии поляризации в вертикальной плоскости

# Достоинства частотного метода

- Менее жёсткие условия на точность установки элементов (не нужно исключать МДМ-вращение в вертикальной плоскости)
- Устойчивое состояние **двумерно**-замороженного спина (решает проблему геометрической фазы)
- Проще в отношении поляриметрии

# Цель и задачи исследования

**Цель:** Оценка возможности детектирования ЭДМ на уровне  $10^{-29}$  е·см частотным методом

## Задачи:

- влияние бетатронных колебаний на валидность ЭДМ-статистики
- спин-декогеренция вблизи нулевого резонанса
- свойства МДМ-прецессии, связанной с неидеальностью машины (фэйк-сигнал)
- её калибровка и исключение из ЭДМ-статистики
- оценка статистической точности

# Синхротрон COSY

content...

# Код COSY Infinity

content...

# Спиновая динамика в COSY Infinity

content...

# Эффект бетатронных колебаний

## ЭДМ-статистика

$$\hat{\omega}_{edm} = \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-), \text{ где } \omega_x^\pm = \omega_{edm} \pm \omega_{mdm}$$

# Эффект бетатронных колебаний

ЭДМ-статистика

$$\hat{\omega}_{edm} = \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-), \text{ где } \omega_x^\pm = \omega_{edm} \pm \omega_{mdm}$$

Частота оценивается путём фитирования

$$f(t) = a \cdot \sin(\omega_x \cdot t + \delta) \mapsto \hat{\omega}_x, \text{ где } (a, \omega, \delta) = \text{const}$$

# Эффект бетатронных колебаний

ЭДМ-статистика

$$\hat{\omega}_{edm} = \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-), \text{ где } \omega_x^\pm = \omega_{edm} \pm \omega_{mdm}$$

Частота оценивается путём фитирования

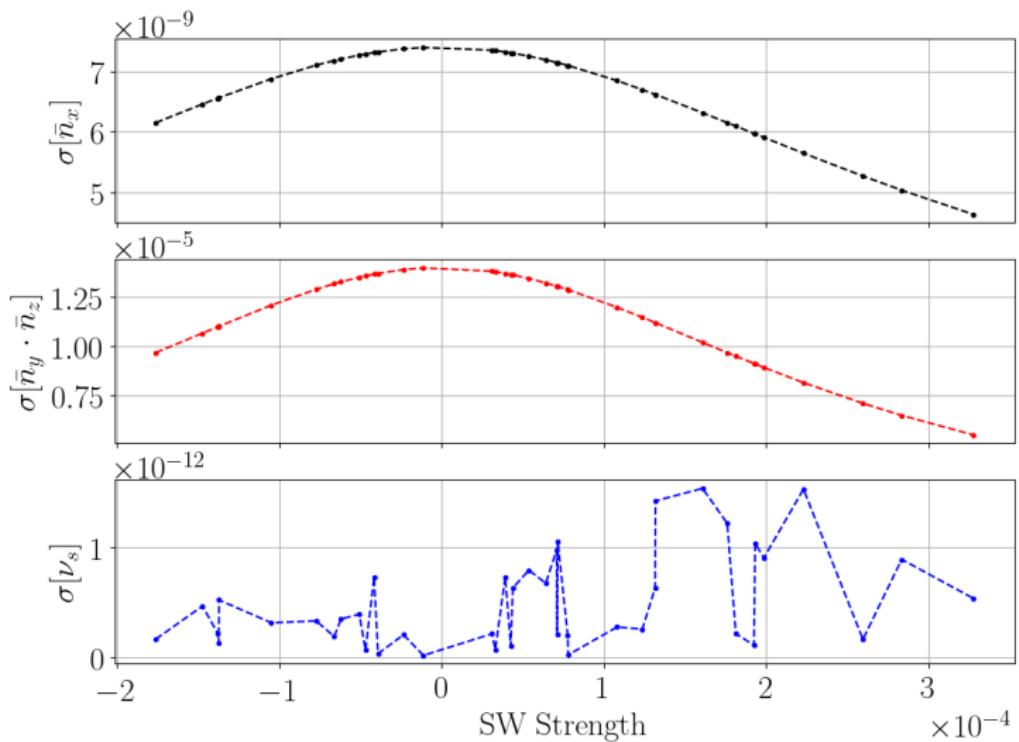
$$f(t) = a \cdot \sin(\omega_x \cdot t + \delta) \mapsto \hat{\omega}_x, \text{ где } (a, \omega, \delta) = \text{const}$$

Решение Т-БМТ уравнения даёт

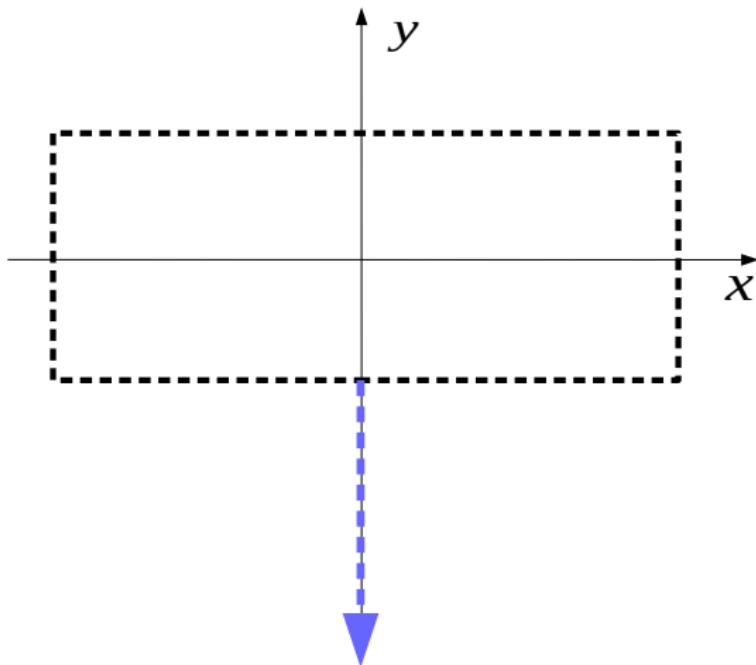
$$a = \sqrt{\bar{n}_x^2 + (\bar{n}_y \cdot \bar{n}_z)^2}, \text{ где } \bar{n} = g(E, B)$$

# Выводы

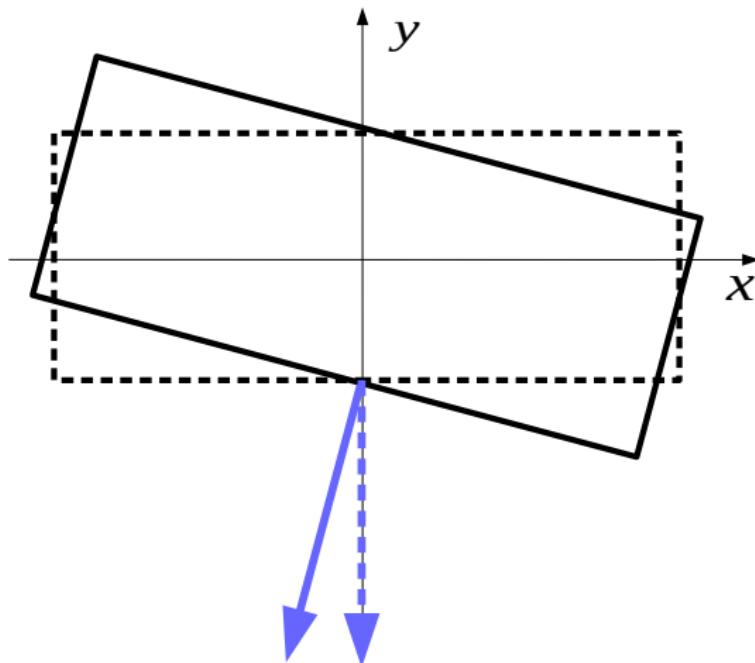
- ➊ Осцилляции амплитуды сигнала пренебрежимо малы
- ➋ Коэффициент корреляции  $\sigma[\hat{a}, \hat{\omega}] < 10\%$
- ➌ Эффект поддаётся контролю (при использовании частотного метода)



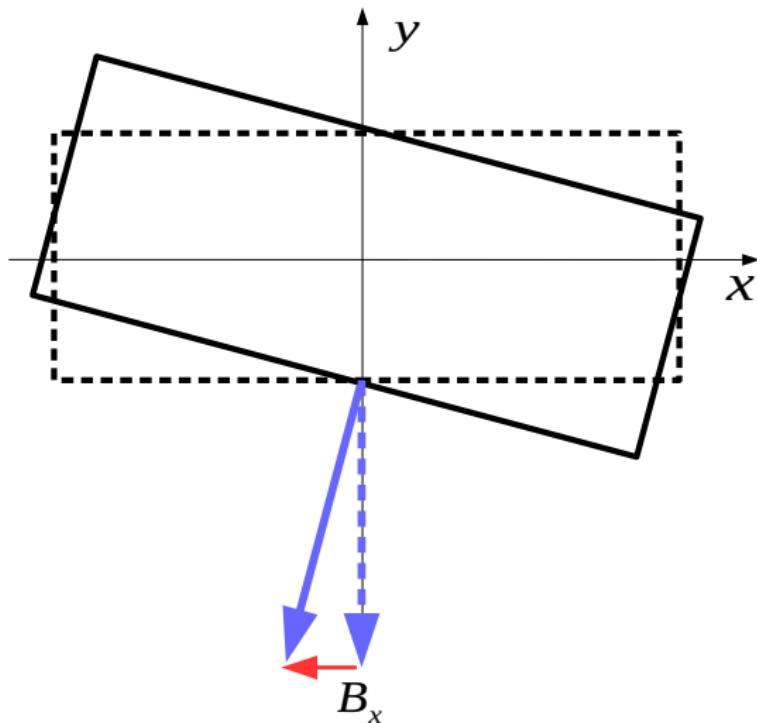
# Эффект неидеальности ускорителя



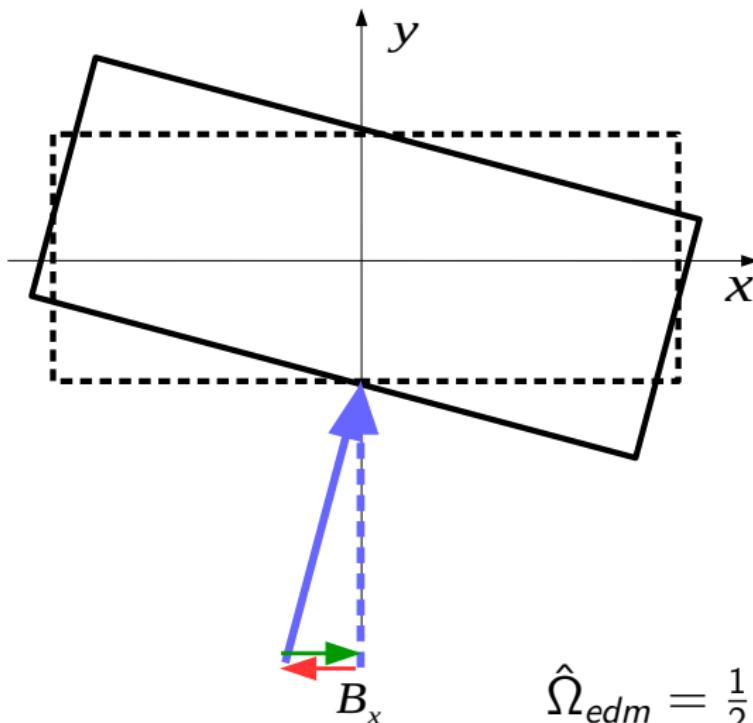
# Эффект неидеальности ускорителя



# Эффект неидеальности ускорителя



# Эффект неидеальности ускорителя



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

# Калибровка МДМ-сигнала

- 1 Подавляем спин-прецессию в вертикальной плоскости с помощью специального спин-ротатора (Вин-фильтра)

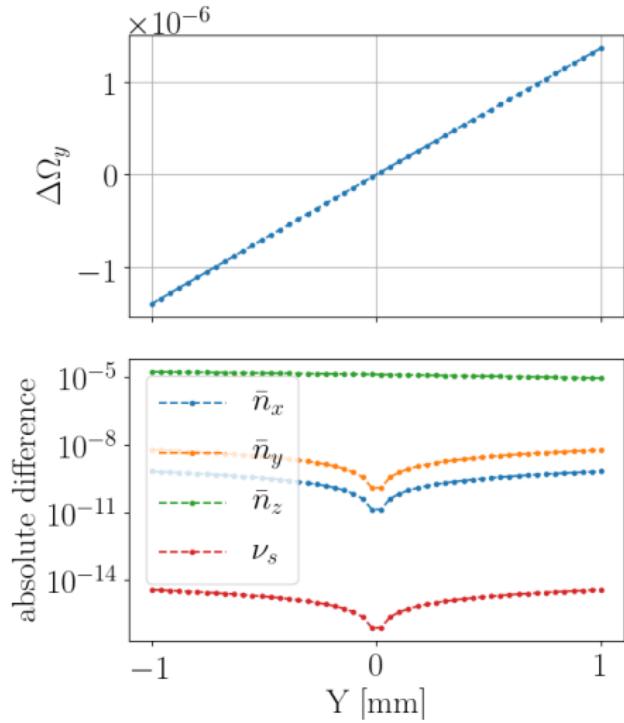
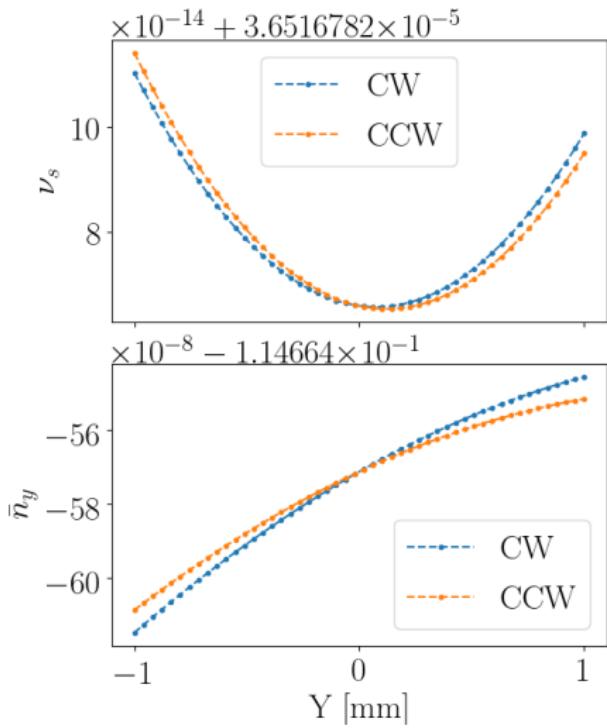
# Калибровка МДМ-сигнала

- 1 Подавляем спин-прецессию в вертикальной плоскости с помощью специального спин-ротатора (Вин-фильтра)
- 2 Подстраиваем ведущее поле так, чтобы получить замороженный спин для данного пучка

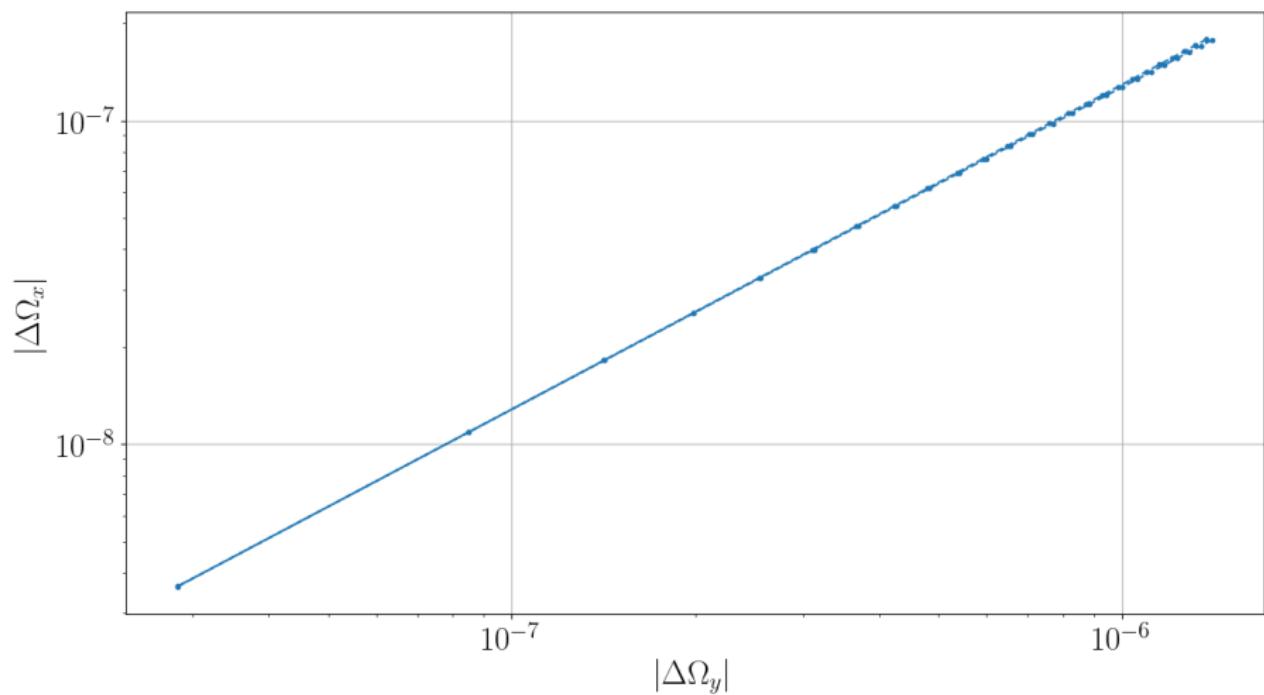
# Калибровка МДМ-сигнала

- ➊ Подавляем спин-прецессию в вертикальной плоскости с помощью специального спин-ротатора (Вин-фильтра)
- ➋ Подстраиваем ведущее поле так, чтобы получить замороженный спин для данного пучка
- ➌ Выключаем спин-ротатор; мы восстановили  $\Omega_x^{mdm}$

# Результаты симуляции

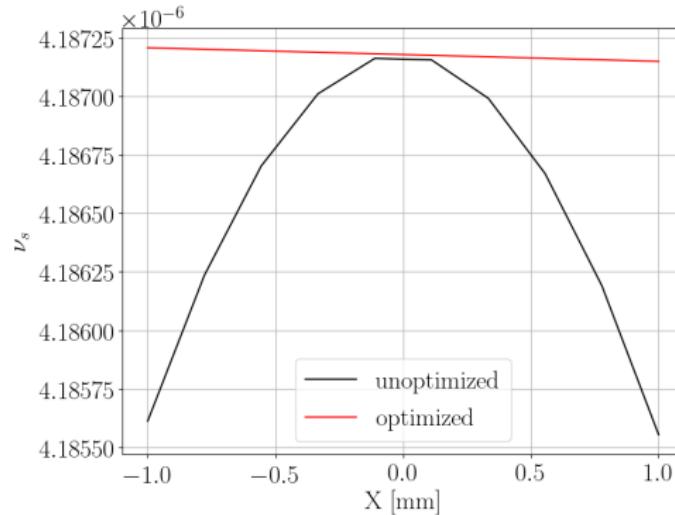


# Результаты симуляции



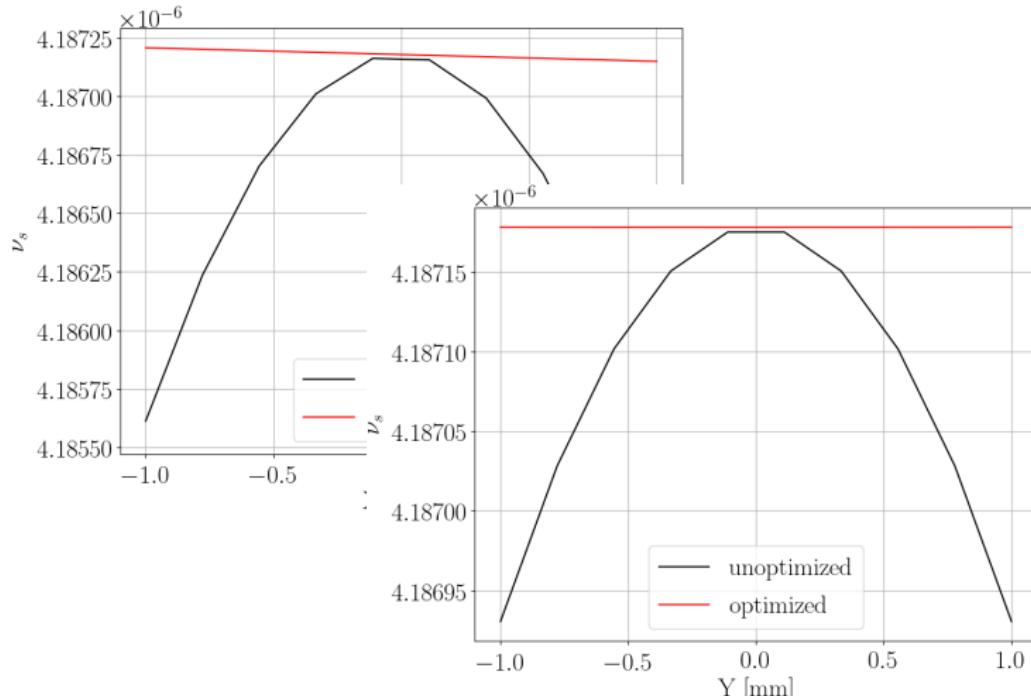
# Подавление спин-декогеренции

## Идеальная структура



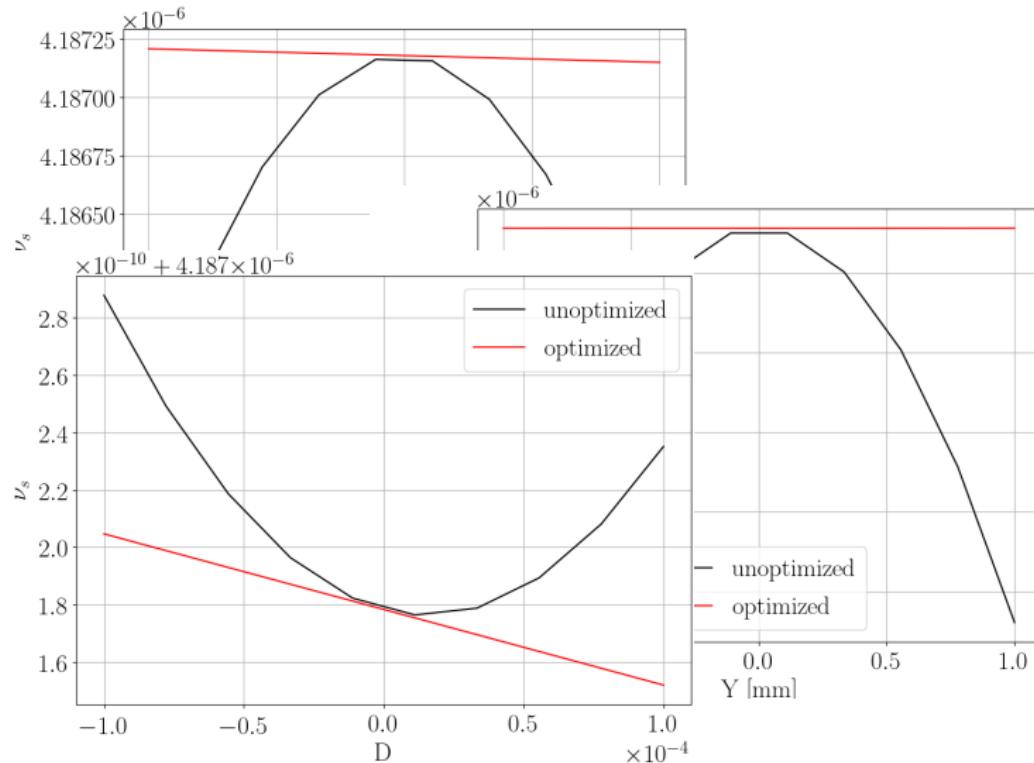
# Подавление спин-декогеренции

## Идеальная структура

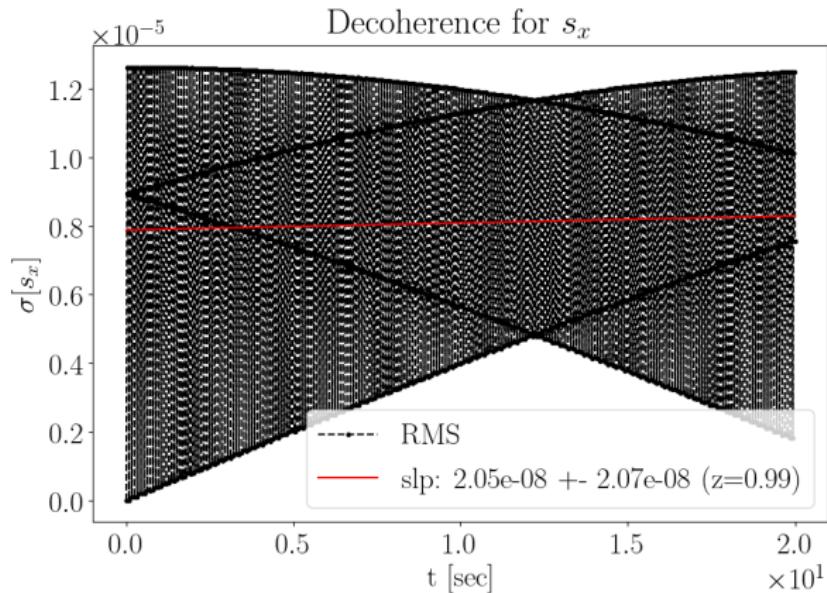


# Подавление спин-декогеренции

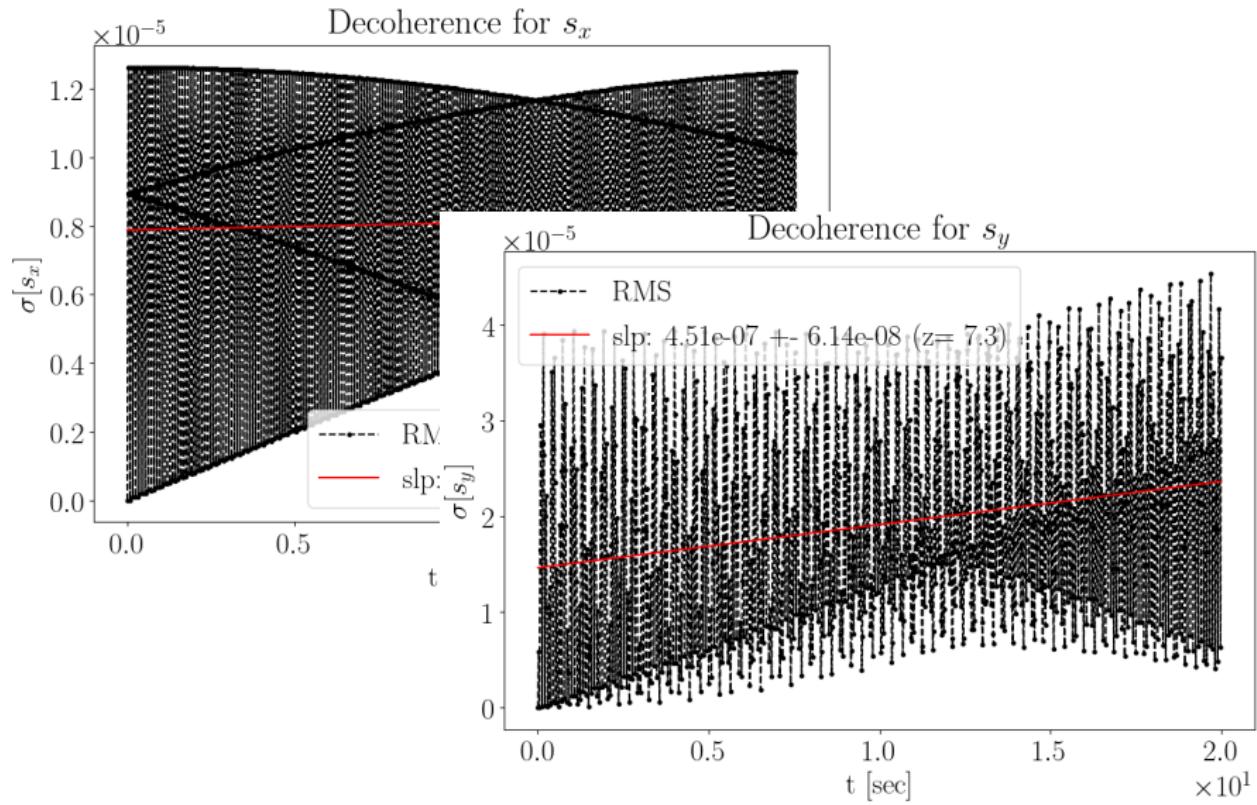
## Идеальная структура



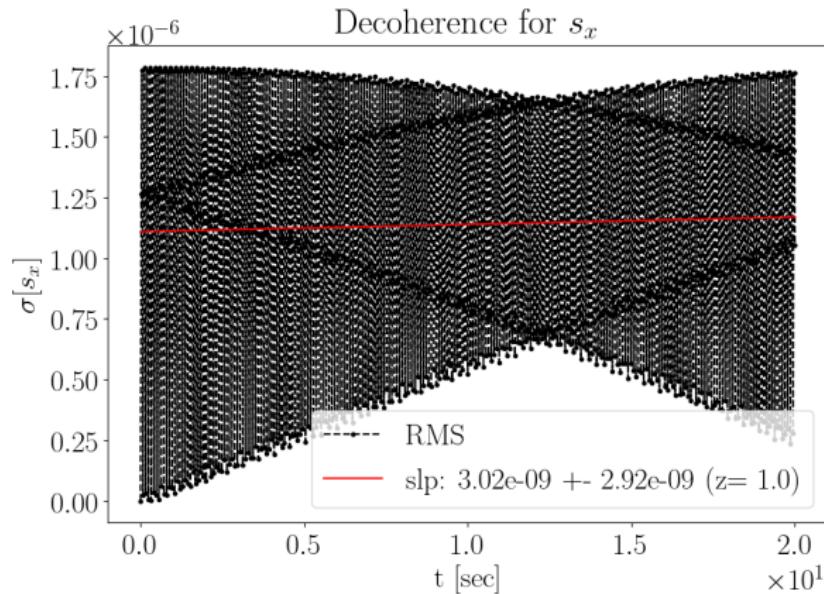
# Декогеренция в неидеальной структуре



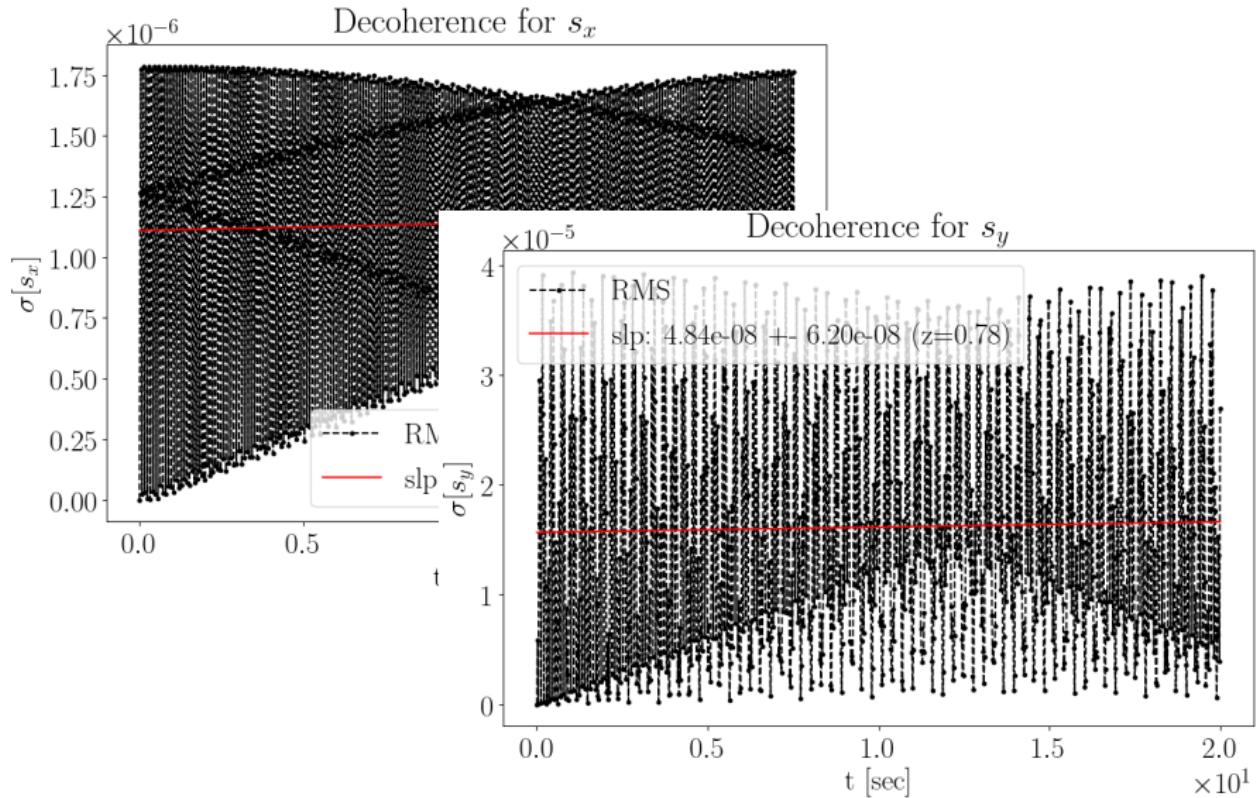
# Декогеренция в неидеальной структуре



# Включаем секступоли

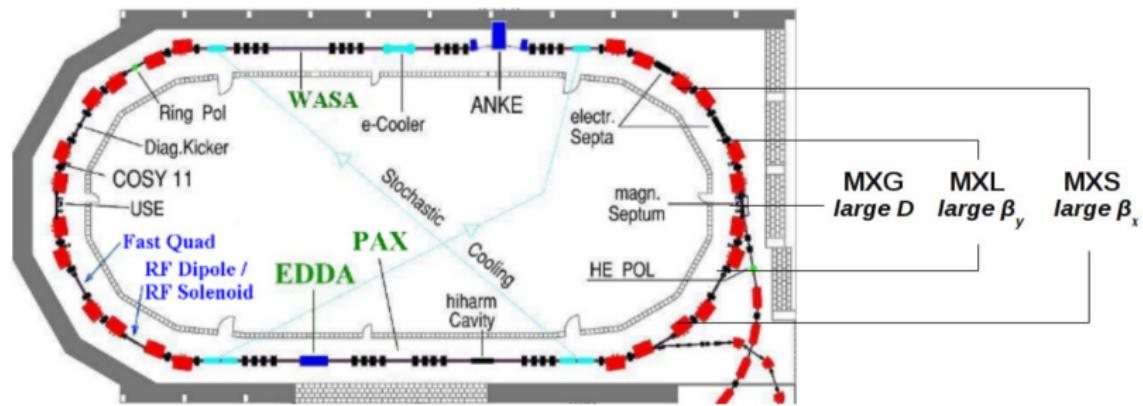


# Включаем секступоли



# Исследования на COSY

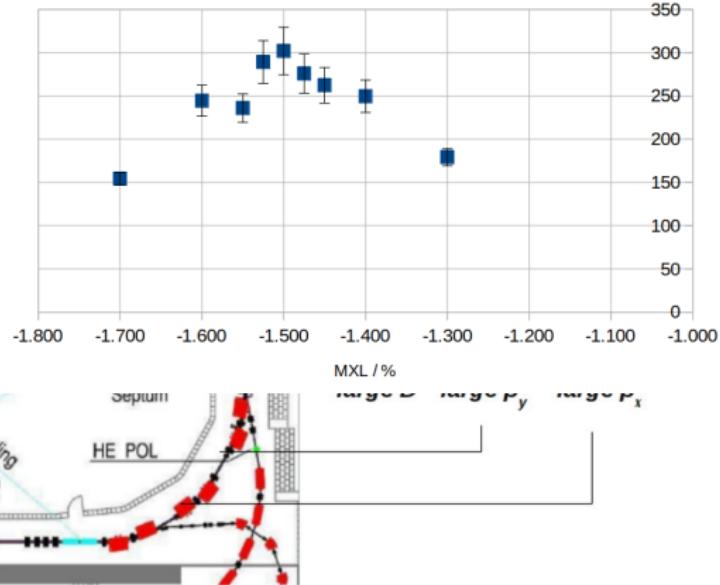
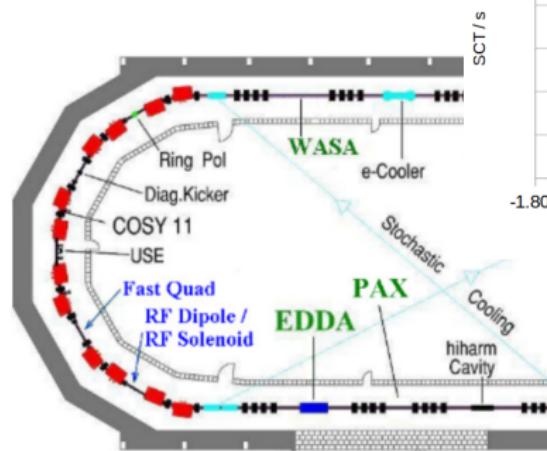
## Спин-декогеренция



# Исследования на COSY

## Спин-декогеренция

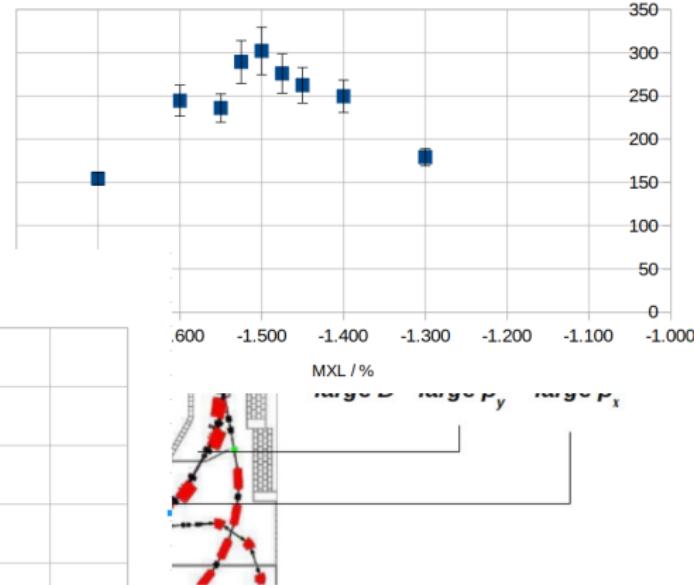
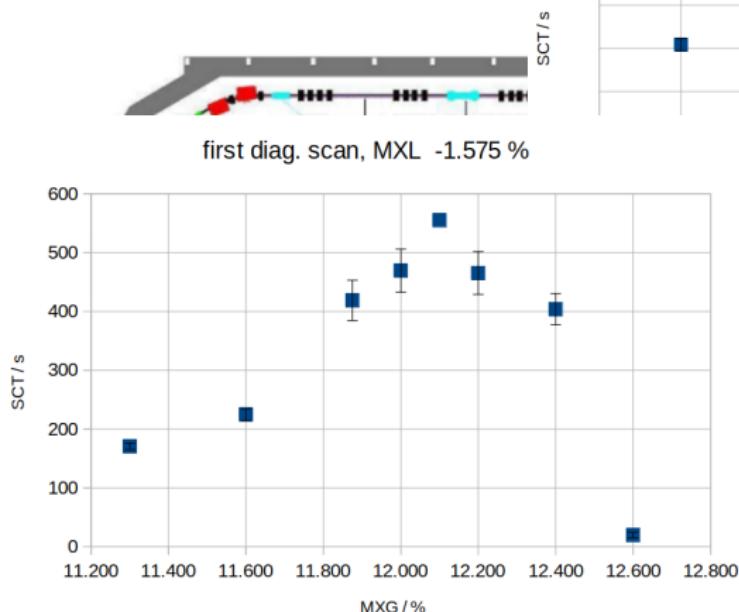
MXL scan at MXG= %, MXS= %



# Исследования на COSY

## Спин-декогеренция

MXL scan at MXG= %, MXS= %



# Научная новизна

① Конкретно моего исследования:

# Научная новизна

- ➊ Конкретно моего исследования:
  - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний

# Научная новизна

- ➊ Конкретно моего исследования:
  - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
  - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии

# Научная новизна

- ➊ Конкретно моего исследования:
  - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
  - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- ➋ Вообще поиска ЭДМ (на COSY):

# Научная новизна

- ➊ Конкретно моего исследования:
  - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
  - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- ➋ Вообще поиска ЭДМ (на COSY):
  - ▶ научились держать поляризацию продольно-поляризованного пучка в течении 1000 секунд

# Научная новизна

- ➊ Конкретно моего исследования:
  - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
  - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- ➋ Вообще поиска ЭДМ (на COSY):
  - ▶ научились держать поляризацию продольно-поляризованного пучка в течении 1000 секунд
  - ▶ научились измерять (относительную) частоту прецессии спина (спин-тюн) с точностью  $10^{-10}$

# Научная новизна

- ➊ Конкретно моего исследования:
  - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
  - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- ➋ Вообще поиска ЭДМ (на COSY):
  - ▶ научились держать поляризацию продольно-поляризованного пучка в течении 1000 секунд
  - ▶ научились измерять (относительную) частоту прецессии спина (спин-тюн) с точностью  $10^{-10}$
  - ▶ научились юстировать квадрупольи при помощи самого пучка (Beam Based Alignment)

# Практическая значимость

По результатам моего исследования

- сформулированы аргументы в пользу частотного подхода к поиску ЭДМ в накопительном кольце
- исследованы систематические эффекты работы с поляризацией пучка в режиме нулевого спинового резонанса
- проведена оценка статистической точности (и оптимальных параметров) предполагаемого эксперимента

# Апробация

- На COSY проводились исследования оптимизации времени когерентности спина при помощи сектупольных полей
- Результаты моего исследования пошли в подготавливаемый коллаборацией JEDI для CERN отчёта, под названием “Feasibility study for an EDM Storage Ring”

# Результаты работы

- ➊ Изучены эффекты спиновой динамики вблизи нулевого спинового резонанса
- ➋ Описаны и численно промоделированы средства борьбы с этими эффектами
- ➌ Сформулирован аргумент в пользу частотного метода измерений ЭДМ в накопительном кольце с замороженным спином

# Положения выносимые на защиту

- ЭДМ-статистика частотного метода измерения не чувствительна к возмущениям со стороны бетатронного движения частиц
- Возможно достичь времени жизни поляризации пучка на уровне 1000 секунд
- Свойства угловой скорости МДМ-прецессии
  - ▶ вынуждают использование частотных методов измерения ЭДМ
  - ▶ оставляют возможность исключения этой систематической ошибки из конечной статистики

- Зависимость частоты прецессии спина частицы может быть выражена как функция одной переменной, называемой эффективным Лоренц-фактором, и отражающей величину продольного эмиттанса частицы
- Эффективный Лоренц-фактор поддаётся калибровке
- Возможно достичь величины стандартной ошибки среднего значения ЭДМ-статистики на уровне  $10^{-29}$  e·см за год измерений