

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

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 CP -симметрии, как одно из условий бариогенеза
- Существование перманентного ЭДМ нарушает CP -симметрию

Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

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

Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

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

Цель и задачи исследования

Цель: Оценка возможности детектирования ЭДМ на уровне 10^{-29} е·см предложенным 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

Научная новизна

- 1 Конкретно моего исследования:

Научная новизна

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

Научная новизна

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

Научная новизна

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

Научная новизна

- 1 Конкретно моего исследования:
 - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
 - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- 2 Вообще поиска ЭДМ (на COSY):
 - ▶ научились держать поляризацию продольно-поляризованного пучка в течении 1,000 секунд

Научная новизна

- 1 Конкретно моего исследования:
 - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
 - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- 2 Вообще поиска ЭДМ (на COSY):
 - ▶ научились держать поляризацию продольно-поляризованного пучка в течении 1,000 секунд
 - ▶ научились измерять (относительную) частоту прецессии спина (спин-тюн) с точностью 10^{-10}

Научная новизна

- 1 Конкретно моего исследования:
 - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
 - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- 2 Вообще поиска ЭДМ (на COSY):
 - ▶ научились держать поляризацию продольно-поляризованного пучка в течении 1,000 секунд
 - ▶ научились измерять (относительную) частоту прецессии спина (спин-тюн) с точностью 10^{-10}
 - ▶ научились юстировать квадруполь 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

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 1,000 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 Лорнец-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} е·см за год измерений

Апробация

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

Поиск ЭДМ в накопительном кольце

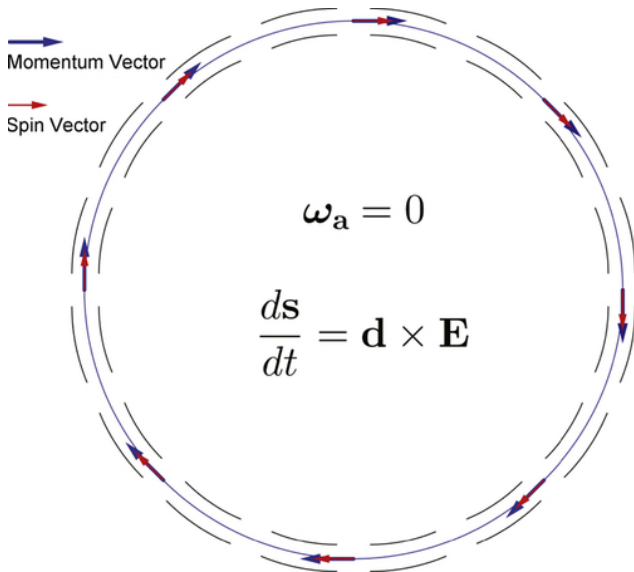
Томас-БМТ

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

Замороженный спин

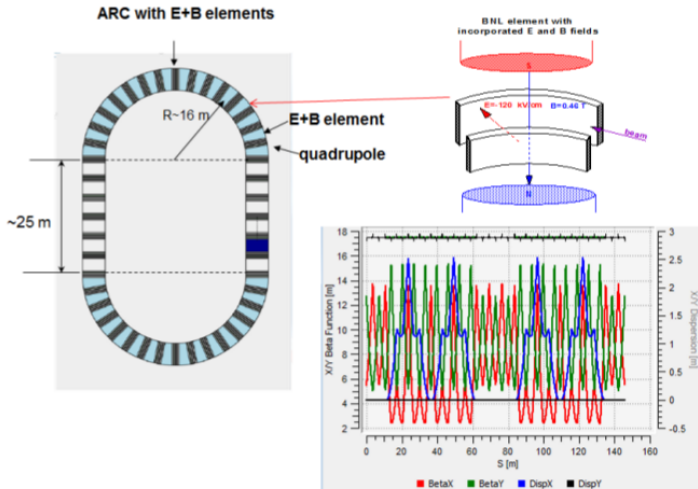
$$\Omega_y^{mdm} = 0$$

Выглядит это так



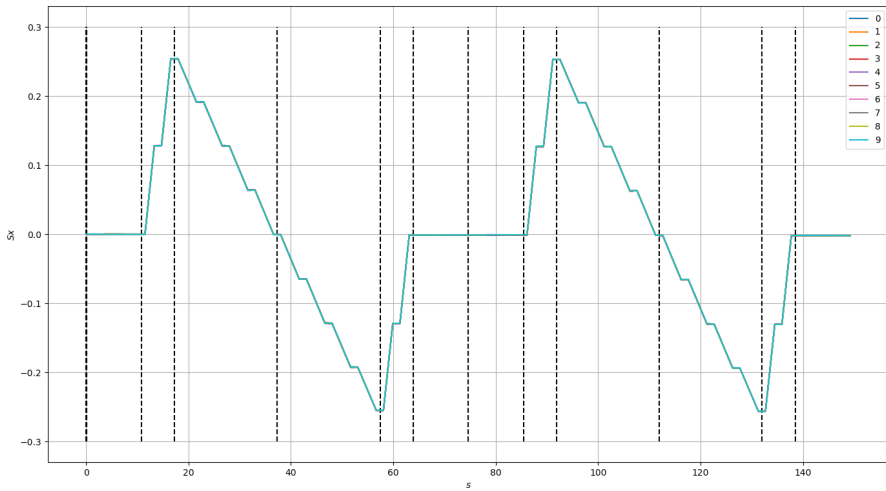
Варианты структур

Истинно-замороженный спин



Варианты структур

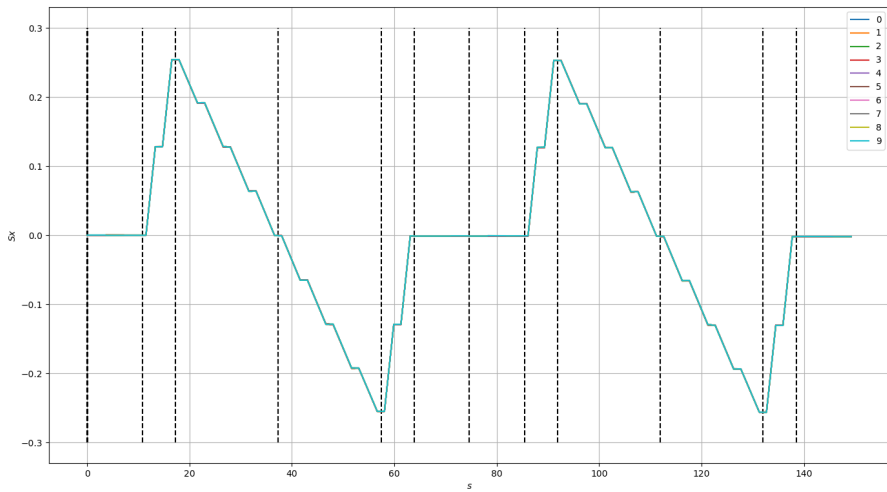
Квази-замороженный спин



Варианты структур

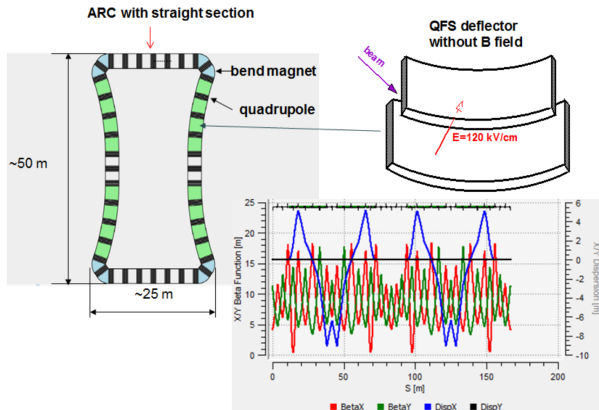
Квази-замороженный спин

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

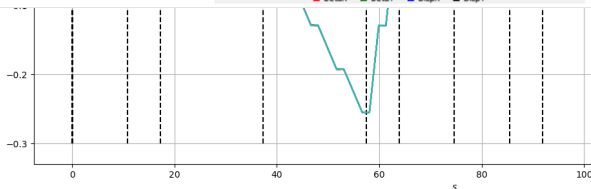
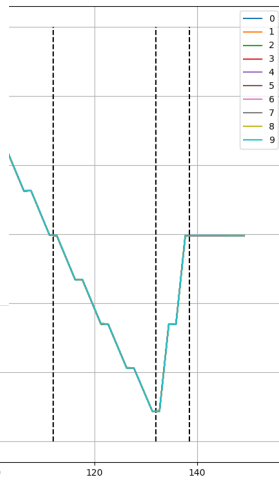


Варианты структур

Квази-замороженный спин

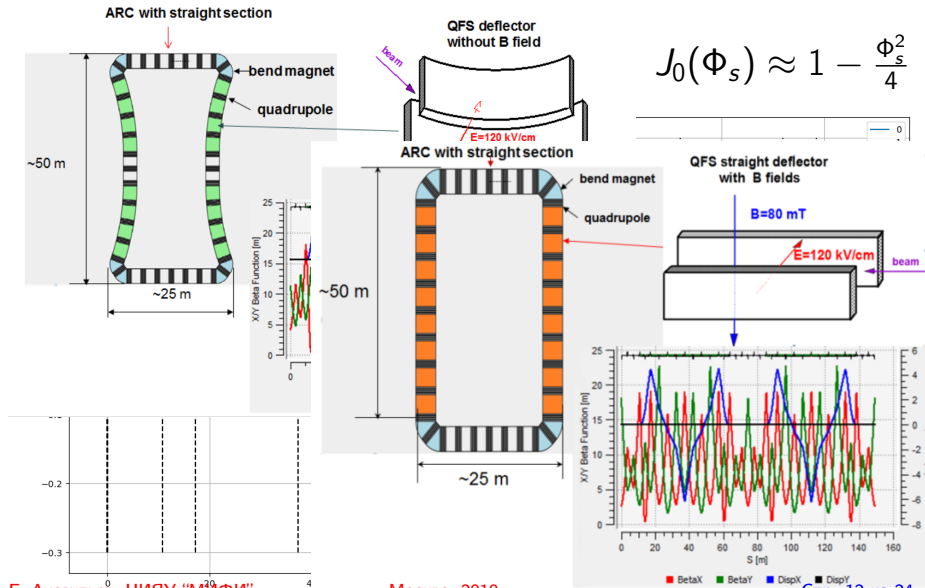


$$J_0(\Phi_s) \approx 1 - \frac{\Phi_s^2}{4}$$



Варианты структур

Квази-замороженный спин



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

Измерение амплитуды vs частоты

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

- **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

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

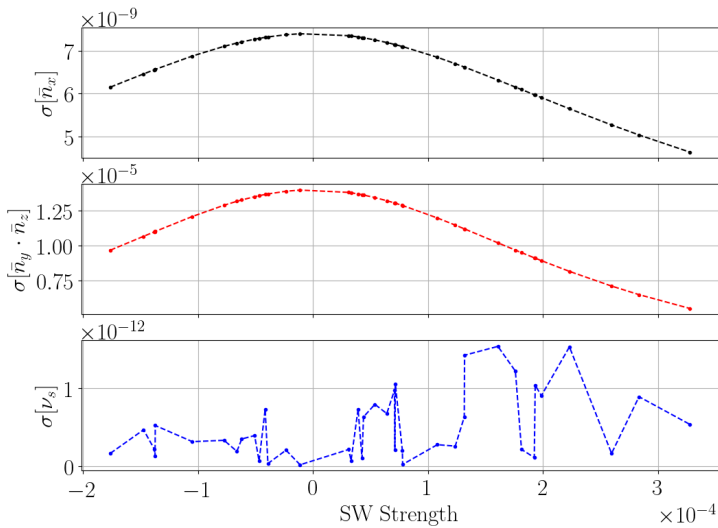
$$f(t) = a \cdot \sin(\omega_x \cdot t + \delta) \mapsto \hat{\omega}_x, \text{ где } (a, \omega, \delta) = \text{const}$$

Решение Т-БМТ уравнения даёт

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

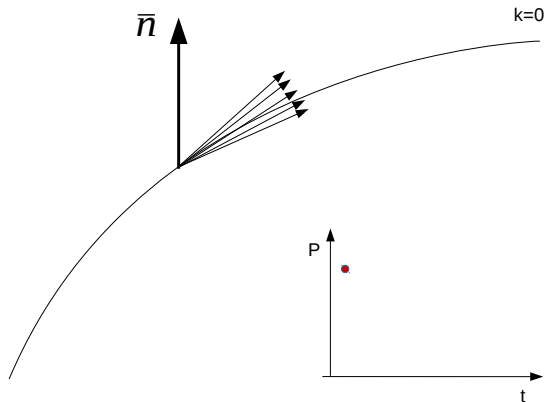
Выводы

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



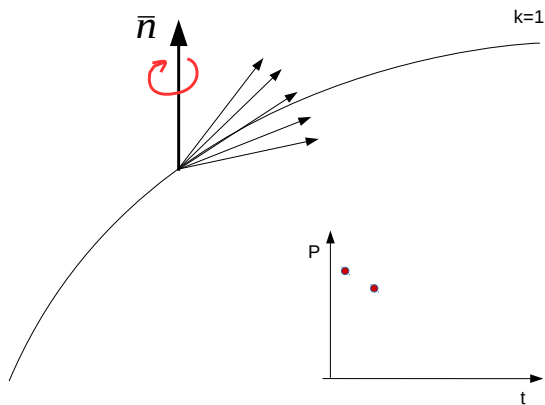
Спин-декогеренция

Введение



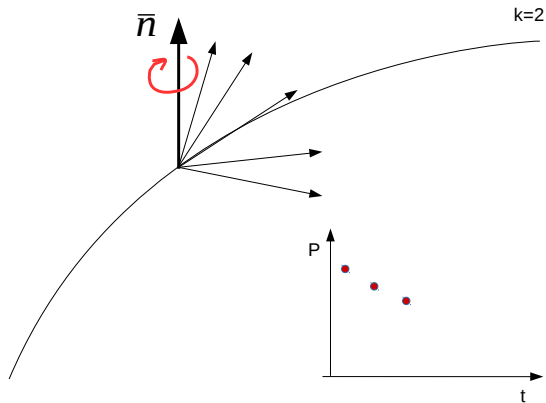
Спин-декогеренция

Введение



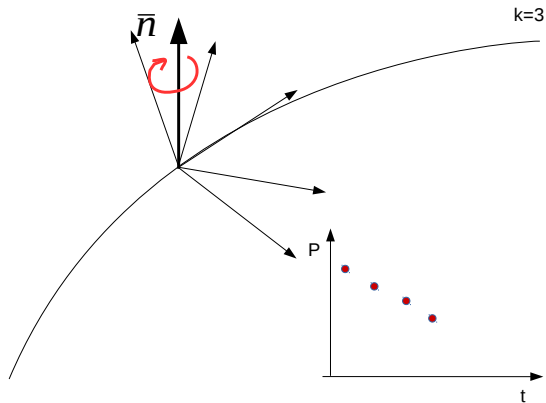
Спин-декогеренция

Введение



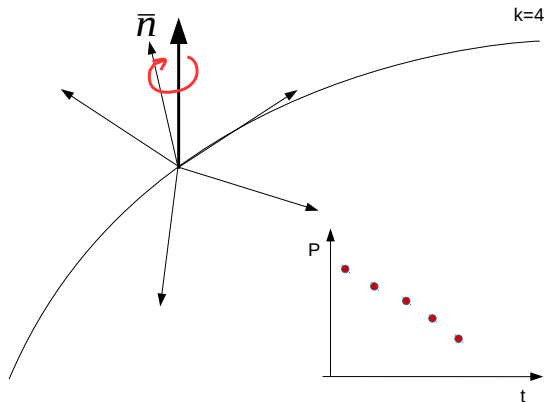
Спин-декогеренция

Введение



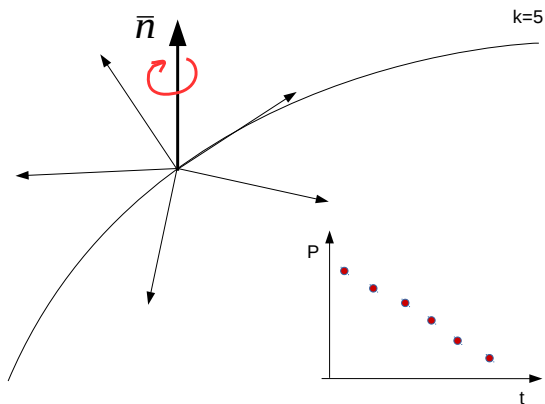
Спин-декогеренция

Введение



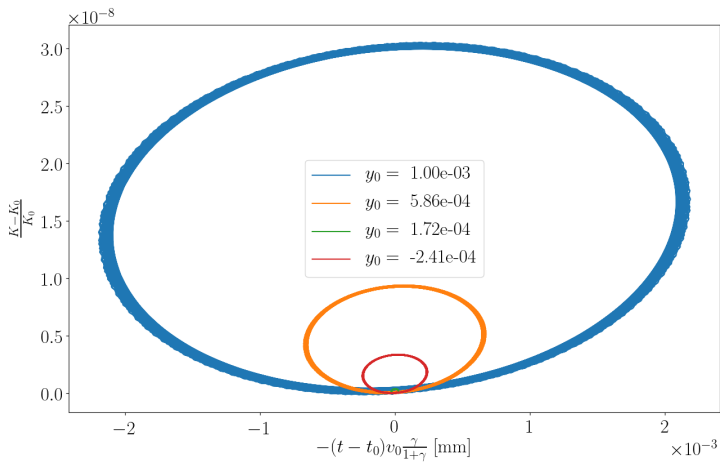
Спин-декогеренция

Введение



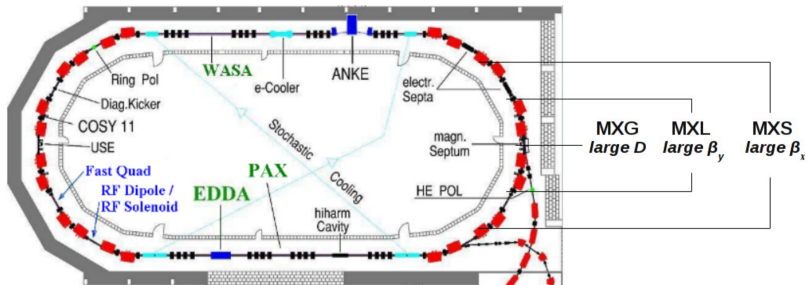
Спин-декогеренция

Теория



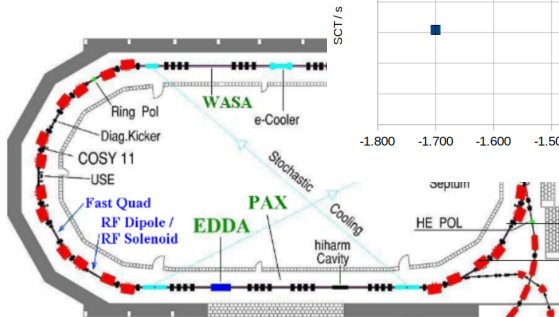
Спин-декогеренция

Исследования на COSY

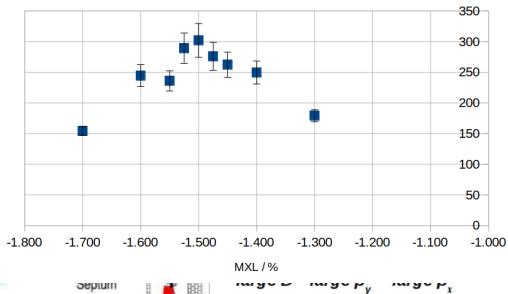


Спин-декогеренция

Исследования на COSY

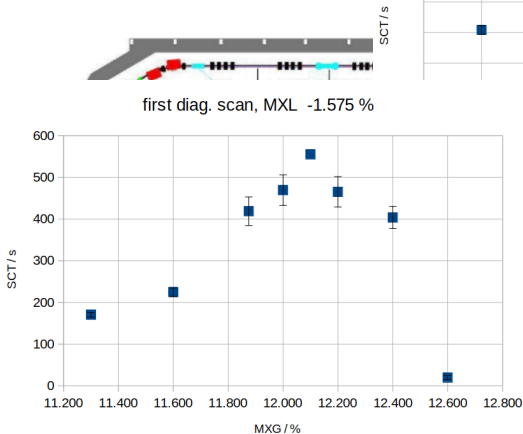


MXL scan at MXG= %, MXS= %

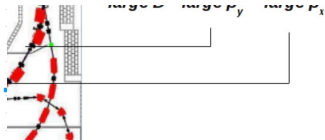
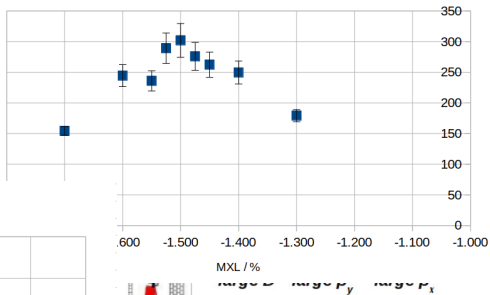


Спин-декогеренция

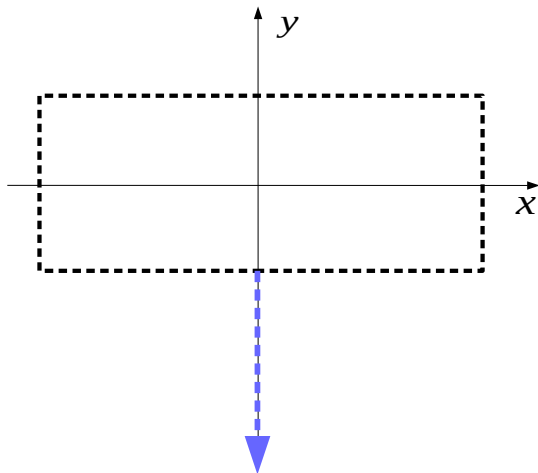
Исследования на COSY



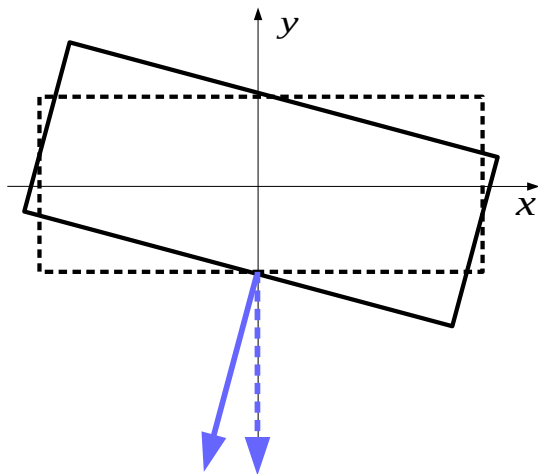
MXL scan at MXG= %, MXS= %



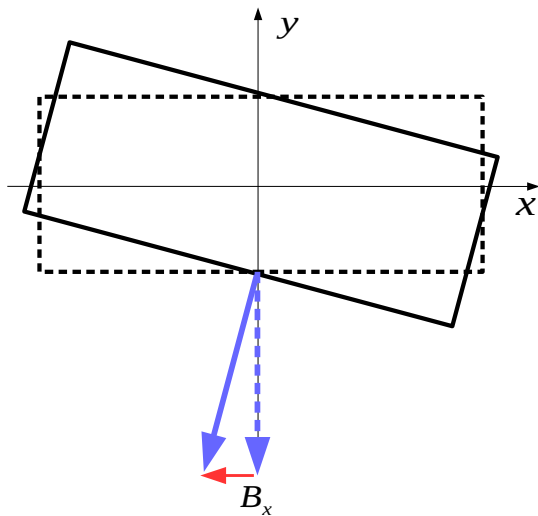
Эффект неидеальности ускорителя



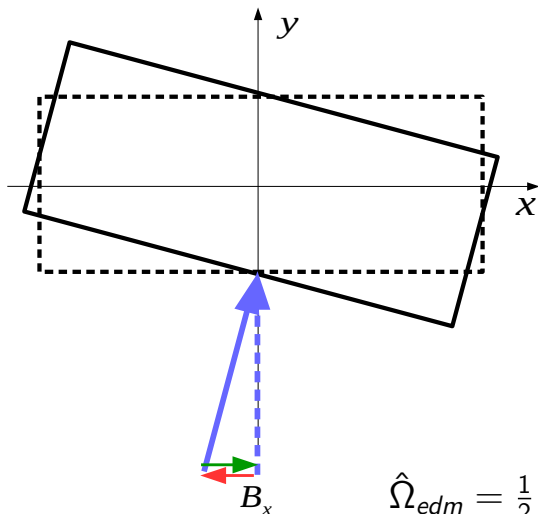
Эффект неидеальности ускорителя



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)

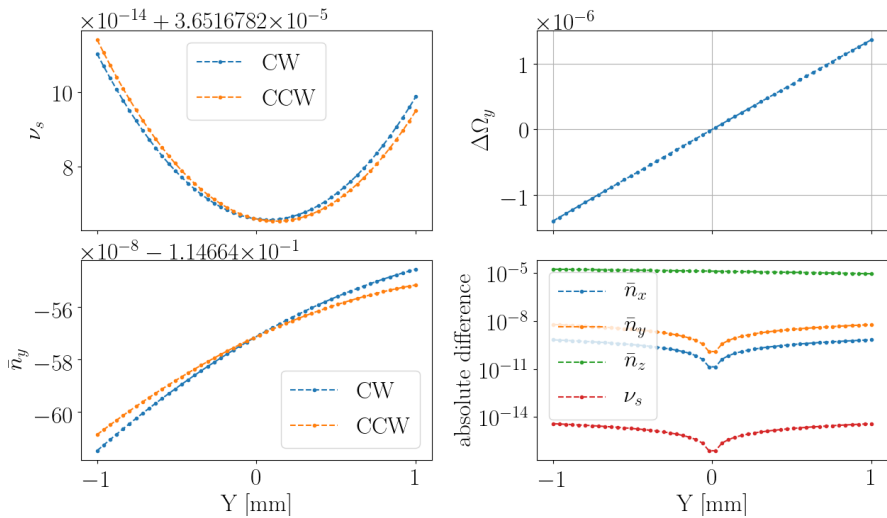
Калибровка МДМ-сигнала

- 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

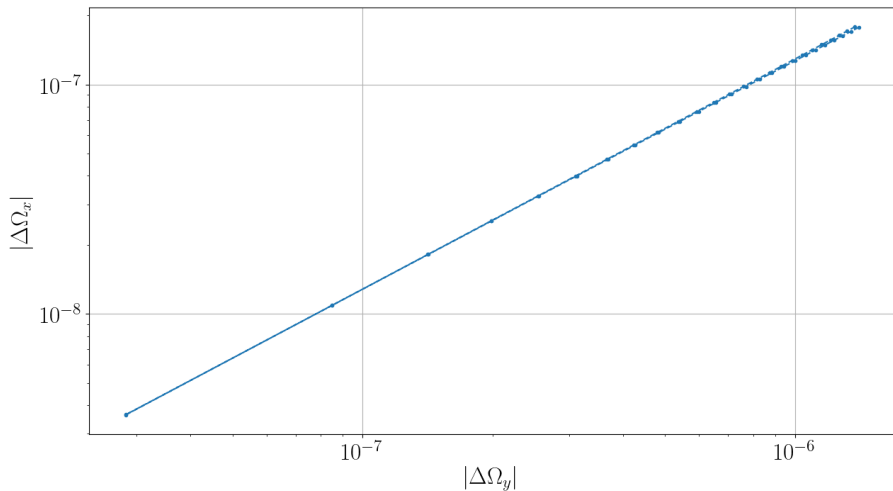
Калибровка МДМ-сигнала

- 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
- 3 Выключаем спин-ротатор; мы восстановили Ω_x^{mdm}

Результаты симуляции



Результаты симуляции



Результаты работы

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