

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский ядерный университет
“МИФИ”»
(НИЯУ МИФИ)

ОТЧЕТ О НАУЧНОЙ ПРАКТИКЕ,
ПРОВОДИМОЙ В РАМКАХ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

«Исследование магнитооптических структур со свойствами замороженного и
квази-замороженного спина для поиска электрического дипольного момента
дейтрона в накопительном кольце»

4 КУРС

Аспирант	А.Е. Аксентьев
Направление	03.06.01 Физика и астрономия
Научная специальность	01.04.20 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Научный руководитель	
Должность, степень, звание	С.М. Полозов, к.ф.-м.н, доц. Ю.В. Сеничев, д.ф-м.н., проф.

Дата защиты:
Результат защиты:

Москва 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1	Теоретическая основа экспериментов по поиску Электронного Дипольного Момент элементарных частиц	2
1.1	Барионная Асимметрия	2
1.2	Симметрии в природе	3
1.3	Электрический Дипольный Момент (ЭДМ)	3
2	Описание эксперимента	5
2.1	Концепция “Замороженного Спина”	5
2.1.1	Уравнение Т-БМТ	5
2.1.2	Достоинства состояния замороженного спина	6
2.1.3	Реализация условия замороженности спина в накопительном кольце	7
2.2	Конечная статистика Frequency Domain метода	7
2.3	Смена полярности ведущего магнитного поля	8
2.4	Применение секступольных полей для подавления спиновой декогеренции пучка	9
3	Ожидаемые результаты эксперимента	11
3.1	Время жизни поляризации	11
3.2	Статистическая точность оценки частоты прецессии спина за цикл	13
3.3	Угловая скорость паразитной МДМ прецессии	16
4	Заключения и выводы	17

Глава 1

Теоретическая основа экспериментов по поиску Электронного Дипольного Моментa элементарных частиц

1.1 Барионная Асимметрия

В соответствии с теорией Большого Взрыва, при рождении Вселенной, материя и антиматерия должны были быть произведены в равных количествах: на каждый кварк – антикварк, на каждый электрон – позитрон и т.д., что является следствием симметричности физических законов данной теории.

Тем не менее, вся наблюдаемая вселенная состоит исключительно из материи; антиматерия может быть получена в ускорителе заряженных частиц, но в количествах, пренебрежимо малых по сравнению с материей.

Решением этого парадокса может быть асимметрия физических законов в сторону производства материи, что в Стандартной Модели (СМ) элементар-

ных частиц может быть выражено нарушением фундаментальных симметрий. В 1967 году, академик АН СССР Андрей Сахаров сформулировал три условия бариогенеза: [1]

1. В начале эволюции вселенной, должен был существовать по крайней мере один процесс, нарушающий сохранение числа барионов,
2. необходимо нарушение C - и CP -симметрий,
3. генерация барионов должна была происходить при нарушении температурного равновесия.

1.2 Симметрии в природе

В Стандартной Модели элементарных частиц рассматриваются три типа фундаментальных симметрий: [2]

1. C -симметрия (зарядовая): уравнения физических процессов не меняются при смене знаков зарядов на противоположные;
2. P -симметрия (чётность): инвариантность уравнений относительно смены знаков координат всех частиц на противоположные;
3. T -симметрия (время): инвариантность уравнений относительно замены времени с $+t$ на $-t$.

В 1954 году, Г. Людерс и В. Паули, независимо друг от друга, доказали СРТ-теорему: во всех процессах квантовой теории поля сохраняется СРТ-симметрия. Следствием этого является то, что нарушение CP -симметрии влечёт за собой нарушение T -симметрии, и наоборот. [3], [4]

1.3 Электрический Дипольный Момент (ЭДМ)

Электрическим диполем называют систему из двух противоположных зарядов $\pm q$, разделённых расстоянием d . Электрический дипольный момент (ЭДМ) двух точечных зарядов определяется выражением $p = qd$.

ЭДМ заряда, распределённого с плотностью $\rho(\mathbf{r})$ в объёме V , равен

$$p(\mathbf{r}) = \int_V \rho(\mathbf{r}_0)(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r})d^3\mathbf{r}.$$

Если полный заряд Q в объёме V равен нулю, ЭДМ $p(\mathbf{r})$ не зависит от точки отсчёта. Для заряженных частиц, $Q \neq 0$, и ЭДМ определяется в системе их центра масс. [5, стр. 2]

Существование ненулевого ЭДМ фундаментальной частицы нарушает и С- и СР- симметрии, [6] а значит свидетельствует в пользу условий бариогенеза Сахарова. До настоящего времени, ЭДМ элементарных частиц не наблюдался экспериментально. Порядок ЭДМ нейтрона, совместимый с СМ, находится на уровне $10^{-32} < |d_n| < 10^{-31} \text{ e} \cdot \text{cm}$. [7] В то же время, теории за пределами СМ, такие как SUSY, предсказывают существование ЭДМ нейтрона в пределах $10^{-29} < |d_n| < 10^{-24} \text{ e} \cdot \text{cm}$. [8]

Глава 2

Описание эксперимента

Методология Frequency Domain была предложена в рамках коллаборации JEDI Исследовательского центра “Юлих” проф. Ю. Сеничевым. Она предполагает инжекцию продольно-поляризованного пучка в состоянии “замороженного спина” в комбинированное накопительное кольцо, и измерение частоты прецессии его поляризации в вертикальной плоскости. Измерение частоты производится при движении пучка по часовой стрелке, а затем против часовой. Измеренные частоты содержат в себе вклады (с одним знаком) от ЭДМ, а также от МДМ (с противоположными знаками); при их сложении МДМ эффект сокращается, и мы имеем чистый ЭДМ сигнал.

2.1 Концепция “Замороженного Спина”

2.1.1 Уравнение Т-БМТ

Уравнение Томаса-БМТ описывает динамику спин-вектора \mathbf{s} в магнитном поле \mathbf{B} и электростатическом поле \mathbf{E} . Его обобщённая версия, включающая влияние ЭДМ, может быть записана (в системе центра масс пучка) как: [5, стр. 6]

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = \mathbf{s} \times (\boldsymbol{\Omega}_{MDM} + \boldsymbol{\Omega}_{EDM}), \quad (2.1a)$$

где МДМ и ЭДМ угловые скорости Ω_{MDM} и Ω_{EDM}

$$\Omega_{MDM} = \frac{q}{m} \left[G\mathbf{B} - \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\mathbf{E} \times \boldsymbol{\beta}}{c} \right], \quad (2.1b)$$

$$\Omega_{EDM} = \frac{q}{m} \frac{\eta}{2} \left[\frac{\mathbf{E}}{c} + \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} \right]. \quad (2.1c)$$

В уравнениях выше, m , q , $G = (g - 2)/2$ есть, соответственно, масса, заряд, и магнитная аномалия частицы; $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}_0/c$, нормализованная скорость частицы; γ её Лоренц-фактор. ЭДМ множитель η определяется уравнением $d = \eta \frac{q}{2mc} s$, где d — ЭДМ частицы, а s её спин.

2.1.2 Достоинства состояния замороженного спина

Из уравнения (2.1b) можно видеть, что, в отсутствии ЭДМ, направление вектора спина частицы пучка может быть зафиксировано относительно её вектора импульса: $\Omega_{MDM} = \mathbf{0}$; иными словами, можно реализовать условие замороженности спина (Frozen Spin condition).

Достоинством налагания FS-условия на пучок в накопительном кольце следующее: в соответствии с уравнениями equations (2.1a–2.1c), векторы МДМ и ЭДМ угловых скоростей ортогональны, а потому в общей скорости прецессии они складываются квадратично, в связи с чем сдвиг частоты прецессии, связанный с ЭДМ, становится эффектом второго порядка величины: [9, стр. 5]

$$\omega \propto \sqrt{\Omega_{MDM}^2 + \Omega_{EDM}^2} \approx \Omega_{MDM} + \frac{\Omega_{EDM}^2}{2\Omega_{MDM}}.$$

Это обстоятельство значительно ухудшает чувствительность эксперимента.

Однако, заморозив спин в горизонтальной плоскости, единственная осаждающаяся МДМ компонента угловой скорости сонаправлена с ЭДМ компонентой, а значит складывается с ней линейно. Таким образом, чувствительность значительно улучшается.

2.1.3 Реализация условия замороженности спина в накопительном кольце

Накопительные кольца могут быть классифицированы в три группы:

1. чисто магнитные (как COSY, NICA, etc),
2. чисто электростатические (Brookhaven AGS Analog Ring),
3. комбинированные.

Ввиду уравнения (2.1b), условие FS не может быть выполнено в чисто магнитном кольце.

Для некоторого числа частиц, таких как протон, чья $G > 0$, чисто электростатическое кольцо может быть использовано в рамках FS методологии ЭДМ эксперимента с пучком на так называемой “магической” энергии, определяемой как $\gamma_{mag} = \sqrt{(1 + G)/G}$.

Для частиц с $G < 0$ (таких как дейтрон), это невозможно, и необходимо использовать комбинированное кольцо. Для того, чтобы реализовать FS условие в комбинированном кольце, вводится [10] радиальное электрическое поле величины

$$E_r = \frac{GB_y c \beta \gamma^2}{1 - G \beta^2 \gamma^2}. \quad (2.2)$$

2.2 Конечная статистика Frequency Domain метода

Методология Frequency Domain (далее FDM) [11] была разработана специально для решения проблемы неточности установки магнитов, и возникающего в связи с этим паразитного МДМ вращения спина. При реалистичной (на уровне 10^{-4} радиан) ошибке установки оптических элементов ускорителя, частота вращения спина в вертикальной плоскости связанная с магнитным дипольным моментом находится на уровне 8–16 Гц, что делает невозможным наблюдение медленного нарастания вертикальной компоненты поляризации,

связанное с наличием у частицы одного лишь электрического дипольного момента, как предполагается оригинальным BNL FS методом [10]. В FDM, ЭДМ-эффект вычисляется путём сравнения комбинированной (МДМ + ЭДМ) частоты прецессии, наблюдаемой при циркуляции пучка в прямом и обратном направлениях. Поскольку при смене полярности ведущего поля $\mathbf{B} \mapsto -\mathbf{B}$, $\beta \mapsto -\beta$, и $\mathbf{E} \mapsto \mathbf{E}$:

$$\omega_x^{CW/CCW} = \omega_x^{MDM,CW/CCW} + \omega_x^{EDM,CW/CCW}, \quad (2.3a)$$

$$\omega_x^{MDM,CW} = -\omega_x^{MDM,CCW} \equiv \omega_x^{MDM}, \quad (2.3b)$$

$$\omega_x^{EDM,CW} = \omega_x^{EDM,CCW} \equiv \omega_x^{EDM}, \quad (2.3c)$$

поэтому, ЭДМ эстиматор

$$\hat{\omega}_x^{EDM} := \frac{1}{2} (\omega_x^{CW} + \omega_x^{CCW}) \quad (2.3d)$$

$$= \omega_x^{EDM} + \underbrace{\frac{1}{2} (\omega_x^{MDM,CW} + \omega_x^{MDM,CCW})}_{\varepsilon \rightarrow 0}. \quad (2.3e)$$

Для того, чтобы гарантировать малость ε по сравнению с требуемой точностью измерений, т.е., что уравнение (2.3b) выполняется достаточно точно, была разработана специальная процедура смены полярности ведущего поля, описанная в разделе 2.3.

2.3 Смена полярности ведущего магнитного поля

Как было описано в разделе 2.2, для того, чтобы исключить МДМ-эффект из конечной статистики эксперимента, построенного на основе Frequency Domain методологии в комбинированном накопительном кольце, необходимо произвести смену полярности ведущего магнитного поля. Электростатическое поле $E_r = \frac{GB_y c \beta \gamma^2}{1 - G \beta^2 \gamma^2}$ (см. раздел 2.1.3) при этом фиксировано.

Частоты прецессии спинов частиц пучка определяются по формуле [12,

стр. 4]

$$(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = 2\pi \cdot f_{rev} \cdot \nu_s \cdot \bar{n},$$

где f_{rev} есть циклотронная частота частицы, а ν_s и \bar{n} — её спин-тюн и ось стабильного спина, соответственно. При использовании секступольных полей выравниваются не только спин-тюны частиц, но и направления их осей стабильного спина, в связи с чем в дальнейшем рассмотрении мы будем предполагать что спин-векторы всех частиц в пучке вращаются вокруг \bar{n}^{CO} , определённой на референсной орбите. Таким образом, при смене полярности ведущего поля достаточно восстановить эффективный Лоренц-фактор пучка (γ_{eff}) [13, р. 2581], для того, чтобы восстановить величину угловой скорости паразитной МДМ прецессии.

Калибровка γ_{eff} выполняется напрямую, через восстановление угловой скорости прецессии спина в горизонтальной плоскости: В начальном состоянии, $\Omega_x \gg \Omega_y, \Omega_z$, и $\bar{n}^{CO} \approx \hat{x}$. Используя спин-суппрессор (Вин-фильтр), мы подавляем прецессию вокруг вектора \hat{x} ; одновременно с этим, мы отходим от “замороженного” значения энергии (это делается для того, чтобы избежать неустойчивого состояния “заморозки” спина во всех плоскостях). При изменении энергии пучка, меняется также и величина ведущего поля, затем, чтобы сохранить референсную орбиту. Горизонтальная прецессия становится доминантной, и $\bar{n}^{CO} \approx \hat{y}$. После смены полярности ведущего поля, мы опять подстраиваем его величину таким образом, чтобы восстановить условие заморозки спина в горизонтальной плоскости. Тогда, при выключении спин-суппрессора, и возвращении энергии пучка на изначальный уровень, мы получаем $\bar{n}^{CO} \approx -\hat{x}$, $\gamma_{eff}^{CCW} = \gamma_{eff}^{CW}$, то есть, МДМ прецессия происходит с той же угловой скоростью, но в обратном направлении.

2.4 Применение секступольных полей для подавления спиновой декогеренции пучка

Чтобы минимизировать декогеренцию спина, связанную с бетатронным движением и отклонением импульса, могут быть использованы секступольные

(или октупольные) поля [5, стр. 212]

Секступоль силы

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

где $B\rho$ магнитная жёсткость, влияет на коэффициент сжатия орбиты первого порядка как [13, стр. 2581]

$$\Delta\alpha_{1,sext} = -\frac{S_{sext}D_0^3}{L}, \quad (2.4)$$

и одновременно на длину орбиты как

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{sext} = \mp \frac{S_{sext}D_0\beta_{x,y}W_{x,y}}{L}, \quad (2.5)$$

где $D(s, \delta) = D_0(s) + D_1(s)\delta$ обозначает функцию дисперсии.

Мы будем называть декогеренцию, связанную с горизонтальными/вертикальными бетатронными, и синхротронными колебаниями соответственно X-/Y-, и D-декогеренцией.

Из уравнений equations (2.4, 2.5) можно видеть, что для подавления декогеренции необходимы три семейства секступолей, помещённых в максимумы функций: β_x, β_y для подавления X-, Y-декогеренции, и D_0 для D-декогеренции.

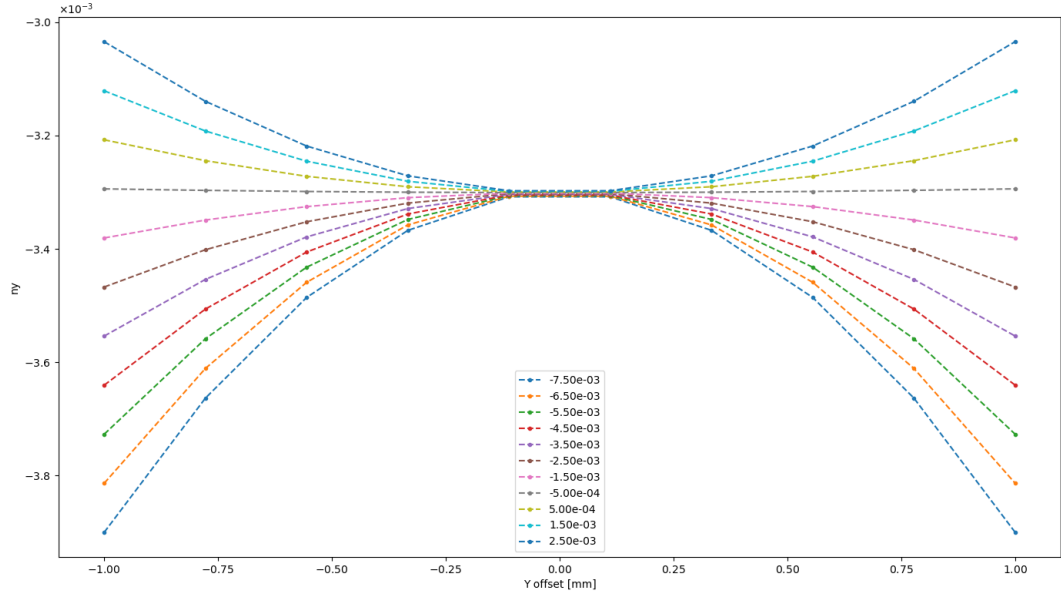
Глава 3

Ожидаемые результаты эксперимента

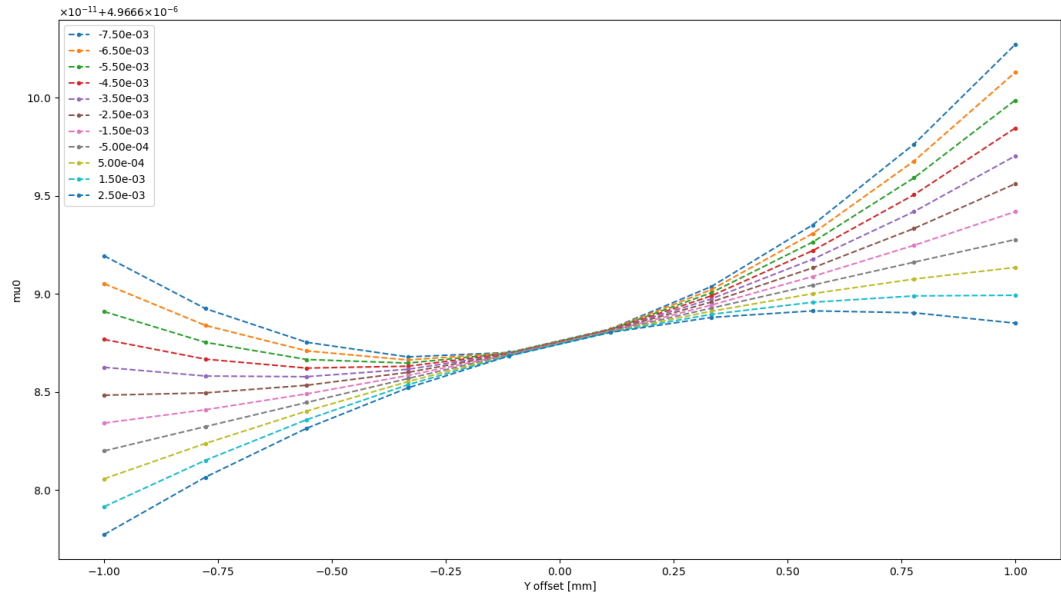
3.1 Время жизни поляризации

После применения секступолей, время жизни поляризации, связанное с эффектом декогеренции, ожидается на уровне 500 секунд.

На рисунке 3.1 представлена зависимость спин-тюна и одной из компонент оси стабильного спина в зависимости от вертикального смещения и градиента Y-секступоля для плоского, Гауссовского пучка, лежащего в вертикальной плоскости. Как видно из рисунка, секступольное подавление параболического эффекта смещения работает как ожидалось.



(а) Вертикальная компонента оси прецессии спина \bar{n}_y в зависимости от вертикального смещения центра пучка.



(b) Спин-тюн ν_s .

Рис. 3.1: Данные по МДМ частоте прецессии спина, построенные для каждого значения градиента GSY в зависимости от вертикального оффсета пучка.

3.2 Статистическая точность оценки частоты прецессии спина за цикл

Ожидаемая точность оценки частоты колебаний вертикальной компоненты поляризации (асимметрии сечения правого-левого детекторов) за один цикл в 1,000 секунд равна 10^{-7} рад/сек, что даёт необходимую точность оценки ЭДМ на уровне $10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm}$ за год при 70% временной загрузке ускорителя.

Фитируемая модель частоты событий детектора:

$$N(t) = N_0(t) \cdot \left(1 + P \cdot e^{-t/\tau_d} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)\right).$$

Таблица 3.1: Параметры модели часто-Таблица 3.2: Результаты фитирования ты событий детекторов

				Оценка	Ст. Ошибка	Единицы
Левый Правый				$\mathcal{A}(0)$	0.400	$9.03 \cdot 10^{-5}$
ϕ	$-\pi/2$	$+\pi/2$	рад	λ_d	-0.001	$7.86 \cdot 10^{-7}$ 1/сек
ω	3		рад/сек	ω	3.000	$7.55 \cdot 10^{-7}$ рад/сек
P	0.4			ϕ	-1.571	$2.25 \cdot 10^{-2}$ рад
τ_d	721		сек			
	721		сек			
$N_0(0)$	6730					

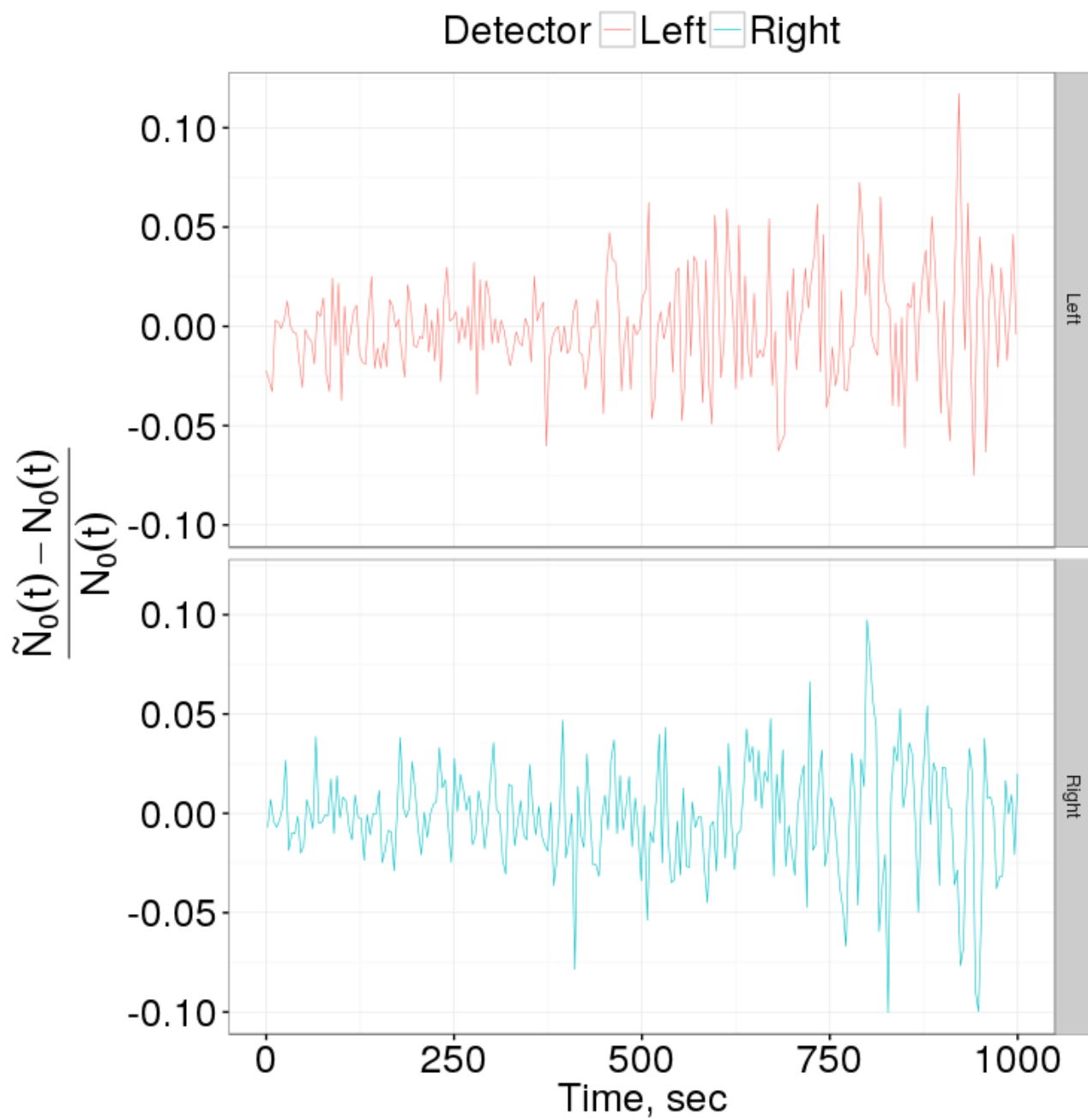


Рис. 3.2: Относительная ошибка измерения частоты событий на правом и левом детекторах как функция времени.

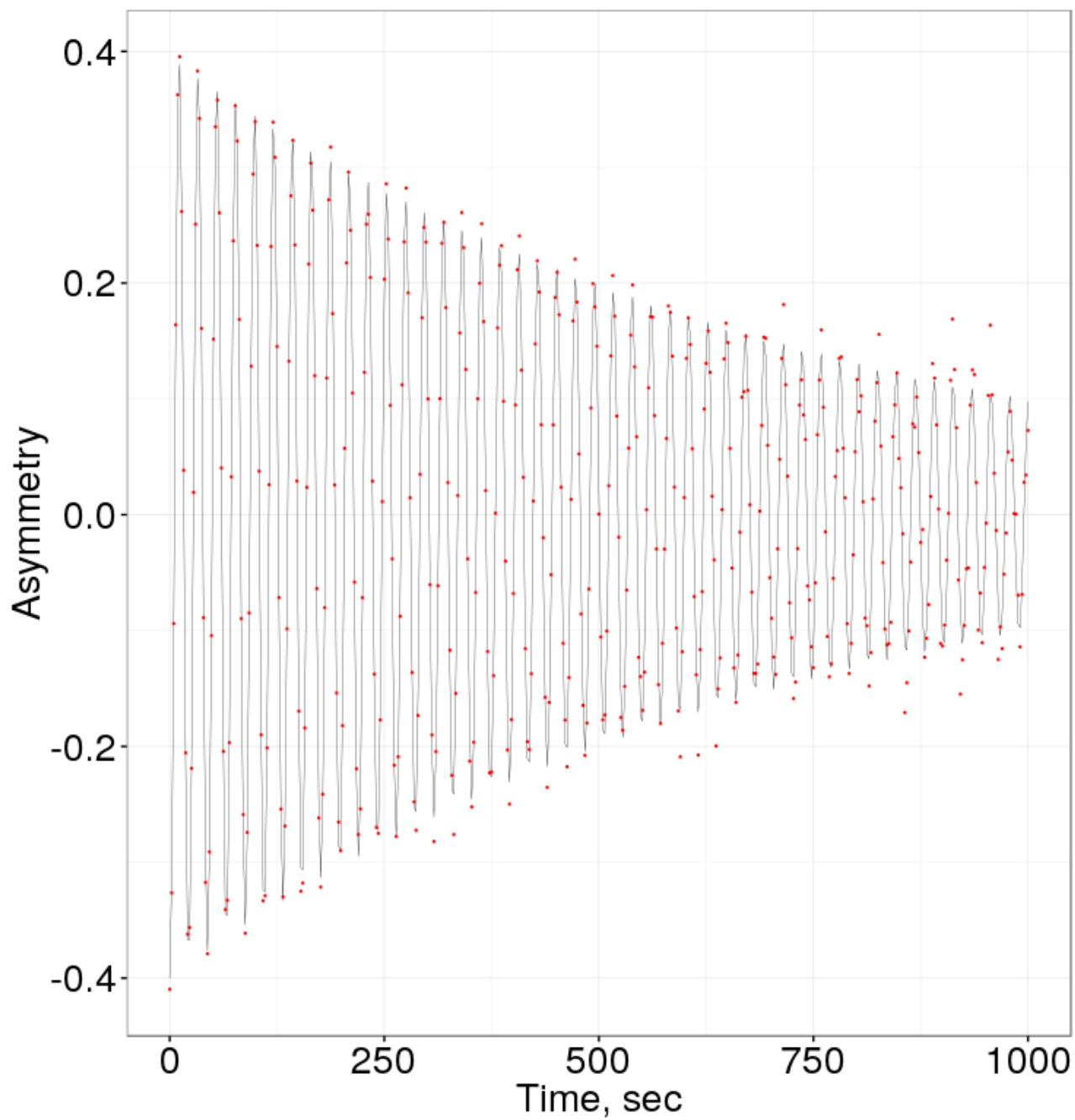


Рис. 3.3: Ожидание (чёрная линия) и измерения (красные точки) асимметрии сечения.

3.3 Угловая скорость паразитной МДМ прецессии

На Рисунке 3.4 представлена ожидаемая частота прецессии поляризации пучка (засчёт МДМ) в зависимости от среднего угла наклона спин-ротаторов. Ожидаемая дисперсия углов наклонов элементов находится в районе 10^{-4} радиан. Как видно из рисунка, при величина угловой скорости МДМ прецессии при этом слишком велика, чтобы наблюдать медленное ЭДМ-нарастание вертикальной компоненты поляризации, как предложено в [10].

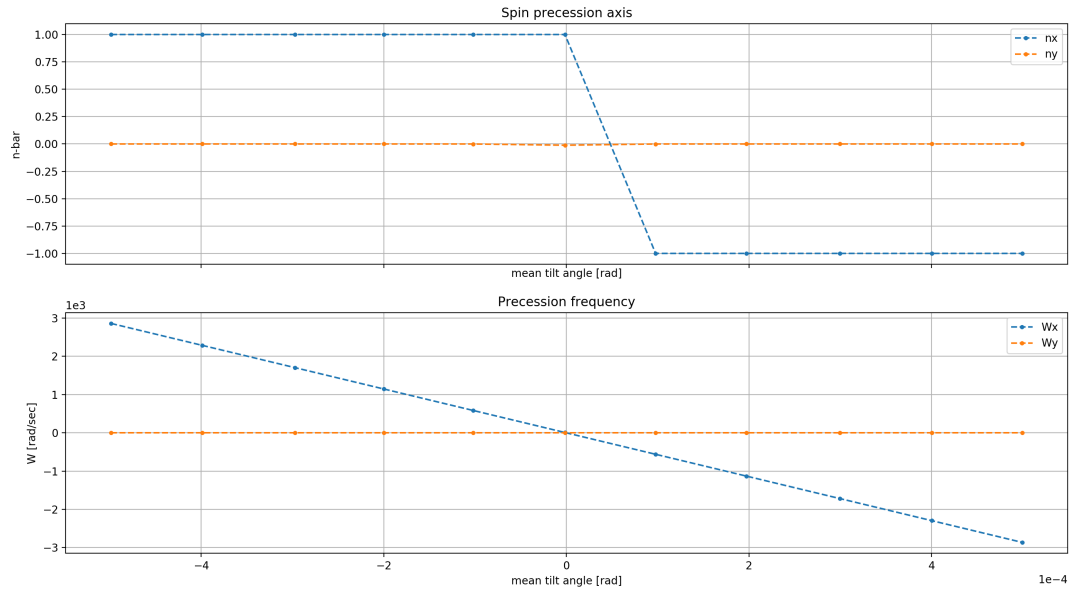


Рис. 3.4: Ось прецессии спина и частоты прецессии для неидеальной FS структуры, при наклонах E+V элементов.

Глава 4

Заключения и выводы

По результатам проверки теоретической возможности проведения эксперимента по поиску ЭДМ дейтрона методом Frequency Domain, были сделаны следующие наблюдения:

1. обоснованная длительность цикла измерений находится в диапазоне от двух до трёх постоянных времени жизни поляризации τ_d ;
2. при этом, статистически нет препятствий получению верхнего предела оценки ЭДМ дейтрона на уровне $10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm}$ за полное время измерений в один год;
3. скорость паразитного МДМ вращения линейно зависит от среднего угла наклона спин-ротаторов, и не зависит от конкретной реализации распределения наклонов;
4. при этом, величина этой скорости достаточно велика, чтобы сделать непрактичным оригинальный FS метод измерения ЭДМ;
5. возможно использование секступольных полей для подавления декогеренции спина и, соответственно, увеличения времени жизни поляризации τ_d ;
6. использование секступольных полей одновременно выравнивает как скорости вращения спин-векторов частиц вокруг их собственных осей прецессии спина, так и направления самих этих осей, в некоторой области вокруг референсной орбиты;

7. *среднее* (по времени) направление оси прецессии спина частицы зависит от *амплитуды* бетатронных колебаний, но не от конкретного положения частицы в поперечной плоскости вакуумной камеры.

А также выводы:

1. Показана возможность улучшения оценки частоты прецессии спина за счёт применения модулированной схемы измерения поляризации.
2. Показана невозможность использования оригинального BNL FS метода измерения ЭДМ дейтрона в накопительном кольце с реалистичной (ожидание среднего угла наклона элементов на уровне 10^{-4} радиан) ошибкой установки элементов в связи с величиной угловой скорости МДМ прецессии (см. Рисунок 3.4).
3. Показана возможность подавления параболической зависимости спин-тюна (и компонент оси прецессии спина) от смещения частицы от референсной орбиты (см. Рисунок 3.1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Perepelitsa DV. Sakharov Conditions for Baryogenesis. 2008 Nov;p. 3. Available from: <http://phys.columbia.edu/~dvp/dvp-sakharov.pdf>.
- [2] Sozzi M. Discrete Symmetries and CP Violation: From Experiment to Theory. Oxford University Press; 2007. Available from: <http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780199296668.001.0001/acprof-9780199296668>.
- [3] Luders G. On the Equivalence of Invariance under Time Reversal and under Particle-Antiparticle Conjugation for Relativistic Field Theories. Kong Dan Vid Sel Mat Fys Med. 1954;28N5(5):1–17.
- [4] Pauli W. Exclusion principle, Lorentz group and reflexion of space-time and charge. In: Niels Bohr and the Development of Physics; 1955. p. 30. Available from: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1955nbdp.book...30P>.
- [5] Eremey Valetov. FIELD MODELING, SYMPLECTIC TRACKING, AND SPIN DECOHERENCE FOR EDM AND MUON G-2 LATTICES. Michigan State University. Michigan, USA;. Available from: http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/public_files/theses/valetovphd.pdf.
- [6] Norman F Ramsey. Electric-dipole moments of elementary particles. Reports on Progress in Physics. 1982;45:19. Available from: http://puhep1.princeton.edu/~kirkmcd/examples/EP/ramsey_rpp_45_95_82.pdf.

- [7] Khriplovich IB. Nuclear electric dipole moments at ion storage rings. *Hyperfine Interactions*. 2000 Aug;127(1):365–371. Available from: <https://doi.org/10.1023/A:1012697113139>.
- [8] JEDI Collaboration;. Available from: <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/about/introduction.shtml>.
- [9] S R Mane. Spin Wheel. arXiv:150901167 [physics]. 2015 Sep;ArXiv: 1509.01167. Available from: <http://arxiv.org/abs/1509.01167>.
- [10] D Anastassopoulos, V Anastassopoulos, D Babusci. AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the 10²⁹ e · cm level. BNL; 2008. Available from: https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf.
- [11] Senichev Y, Aksentev A, Ivanov A, Valetov E. Frequency domain method of the search for the deuteron electric dipole moment in a storage ring with imperfections. arXiv:171106512 [physics]. 2017 Nov;ArXiv: 1711.06512. Available from: <http://arxiv.org/abs/1711.06512>.
- [12] Saleev A, Nikolaev NN, Rathmann F, Augustyniak W, Bagdasarian Z, Bai M, et al. Spin tune mapping as a novel tool to probe the spin dynamics in storage rings. *Physical Review Accelerators and Beams*. 2017 Jul;20(7). ArXiv: 1703.01295. Available from: <http://arxiv.org/abs/1703.01295>.
- [13] Senichev Y, Zyuzin D. SPIN TUNE DECOHERENCE EFFECTS IN ELECTRO- AND MAGNETOSTATIC STRUCTURES. In: *Beam Dynamics and Electromagnetic Fields*. vol. 5. Shanghai, China: JACoW; 2013. p. 2579–2581. OCLC: 868251790. Available from: <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/wepea036.pdf>.