

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
1.2.1	С-симметрия	3
1.2.2	Р-симметрия	4
1.2.3	Т-симметрия	5
1.2.4	СРТ-симметрия	5
1.3	Аномальный Магнитный Дипольный Момент (МДМ)	6
1.4	Электрический Дипольный Момент (ЭДМ)	6
1.5	Существование ЭДМ как свидетельство нарушения симметрии .	6
2	Описание эксперимента	7
2.1	Концепция “Замороженного Спина”	7
2.1.1	Уравнение Т-БМТ	7
2.1.2	Достоинства состояния замороженного спина	8
2.1.3	Реализация условия замороженности спина в накопительном кольце	9
2.2	Конечная статистика Frequency Domain метода	9
2.3	Смена полярности ведущего магнитного поля	10
2.4	Применение секступольных полей для подавления спиновой декогеренции пучка	12
3	Ожидаемые результаты эксперимента	13
3.1	Время жизни поляризации	13
3.2	Статистическая точность оценки частоты прецессии спина за цикл	15
3.3	Угловая скорость паразитной МДМ прецессии	18
4	Заключения и выводы	19

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 элементарных

частиц может быть выражено нарушением фундаментальных симметрий.

1.2 Симметрии в природе

Все симметрии в природе ассоциированы с преобразованиями системы: если найдётся преобразование после которого система не отличима от своего изначального состояния, говорится что она обладает симметрией.

Таким образом, если преобразование U – симметрия, то оно коммутирует с Гамильтонианом H системы

$$[U, H] = 0.$$

Физика микромира описывается с помощью амплитуд вероятности, которые, при проведении экспериментов по рассеиванию, связаны между собой через матрицу рассеяния

$$\mathcal{S}_{fi} \equiv \langle f_{(out)} | i_{(in)} \rangle,$$

где $|i_{(in)}\rangle$ обозначает i -ое входное состояние, $|f_{(out)}\rangle$ – f -ое выходное.

Матрица рассеяния также выражается (линейно) через матрицу перехода

$$\mathcal{T}_{fi} = \langle f | H_{int} | i_{(in)} \rangle = \langle f_{(out)} | H_{int} | i \rangle,$$

где H_{int} обозначает Гамильтониан взаимодействия.

О симметриях теории можно говорить как о симметриях матрицы перехода (или рассеяния) под воздействием соответствующего унитарного оператора:

$$\langle f' | \mathcal{T} | i' \rangle = \langle f | U^\dagger \mathcal{T} U | i \rangle = \langle f | \mathcal{T} | i \rangle.$$

1.2.1 С-симметрия

Сопряжением знака называется преобразование, ассоциированное с заменой частиц на анти-частицы, т.е. при котором все заряды меняют знак, в то время как другие величины остаются неизменны. Преобразование сопряжения зна-

ка формально описывается оператором C , действие которого на состояние с определённым значением импульса \mathbf{p} , проекции спина s и зарядом q есть

$$C|\mathbf{p}, s, q\rangle = \eta_C|\mathbf{p}, s, -q\rangle, \quad \eta_C^2 = 1.$$

В терминах матрицы рассеяния, C -симметрия выражается как $[C, \mathcal{S}] = 0$; следствием чего является (если обозначать анти-частицы через верхнее подчёркивание)

$$\mathcal{S}_{fi} = \eta_C(f)^* \eta_C(i) \mathcal{S}_{\bar{f}\bar{i}}.$$

Из симметрии сопряжения знака обязательно следует наличие античастицы, для любой нейтральной частицы, которая подчиняется тем же самым законам что и частица; с той лишь разницей, что знаки всех её внутренних зарядов заменены на противоположные. Тем не менее, наличие античастиц не достаточно для проверки нарушения C -симметрии, что связано с более фундаментальной CPT -симметрией; тесты C -симметрии связаны со свойствами взаимодействий частиц. [1, стр. 98]

1.2.2 Р-симметрия

Преобразование чётности определяется как отражение всех пространственных координат относительно точки отсчёта. В квантовой теории, этому преобразованию соответствует (унитарный) оператор P , такой что

$$P|\mathbf{p}, s, q\rangle = \eta_P|-\mathbf{p}, s, q\rangle, \quad \eta_P^2 = 1.$$

Для взаимодействий не нарушающих чётность, т.е. таких что $[P, \mathcal{S}] = 0$, на матрицы рассеяния до преобразования \mathcal{S}_{fi} и после $\mathcal{S}_{f_P i_P}$ есть

$$\mathcal{S}_{fi} = \eta_P(f)^* \eta_P(i) \mathcal{S}_{f_P i_P}.$$

В связи с тем что оператор спина S преобразуется как $P^\dagger S P = S$, P -симметрия теории подразумевает отсутствие P -нечётных слагаемых (таких как $\mathbf{S} \cdot \mathbf{p}$) в сечениях взаимодействий процесса. [1, стр. 30]

1.2.3 Т-симметрия

Под операцией отражения времени понимается отражение «направления движения», т.е. смена знака импульса частицы (при сохранении координаты). В квантовой физике, отражению времени соответствует (анти-унитарный) оператор T , определяемый как

$$T|\mathbf{p}, s, q\rangle = \eta_T|-\mathbf{p}, -s, q\rangle, \quad \eta_T^2 = 1.$$

T -симметрия ($[T, \mathcal{S}] = 0$) обеспечивает

$$\mathcal{S}_{fi} = \eta_T(f)\eta_T(i)^* \mathcal{S}_{fTi_T}.$$

Для процесса $i \rightarrow f$, T -симметрия записывается как $\mathcal{T}_{fTi_T} = \mathcal{T}_{if}$. Матрица перехода удовлетворяет уравнению

$$\mathcal{T}_{if}^2 = \mathcal{T}_{fi}^2 - 2\Im \mathcal{I}_{fi} \mathcal{T}_{fi} - \mathcal{I}_{fi}^2,$$

где \mathcal{I} описывает состояния между i и f ; и следовательно

$$\mathcal{T}_{fTi_T}^2 - \mathcal{T}_{fi}^2 = \mathcal{T}_{fTi_T}^2 - \mathcal{T}_{if}^2 - 2\Im \mathcal{I}_{fi} \mathcal{T}_{fi} - \mathcal{I}_{fi}^2.$$

В зависимости от того есть/нет взаимодействия частиц в конечном состоянии, \mathcal{I}_{fi} не-/равно нулю, и T -нечётные наблюдаемые не-/имеют нулевое математическое ожидание. В связи с этим, наличие T -нечётных слагаемых (таких как $\mathbf{S} \cdot \mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2$) в Гамильтониане системы не может само по себе свидетельствовать о нарушении T -симметрии. [1, стр. 146]

1.2.4 CPT-симметрия

CPT -преобразование появляется при рассмотрении обращения 4-вектора, которое можно произвести с помощью преобразования Лоренца (являющегося симметрией, на сколько известно на данный момент). Интуитивно, PT -преобразование также должно быть эквивалентно обращению пространства-

времени, однако это не так; таковым является *произведение* преобразований C, P и T (в любом порядке) – CPT , являющееся, к тому же, симметрией, по теореме CPT.

CPT-теорема требует того, что при нарушении хотя бы одной из C, P или T симметрий, по крайней мере ещё одна так же должна нарушиться.

1.3 Аномальный Магнитный Дипольный Момент (МДМ)

1.4 Электрический Дипольный Момент (ЭДМ)

1.5 Существование ЭДМ как свидетельство нарушения симметрии

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: [2, 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: [3, 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 [4] 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) [5] 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 [4]. 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 [6, 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-тун 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}) [7, 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 секstupольных полей для подавления спиновой декогеренции пучка

Чтобы минимизировать декогеренцию спина, связанную с бетатронным движением и отклонением импульса, могут быть использованы секstupольные (или октупольные) поля [2, стр. 212]

Секstupоль 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 [7, 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 секstupольей, помещённых в максимумы функций: β_x, β_y для подавления X-, Y-декогеренции, и D_0 для D-декогеренции.

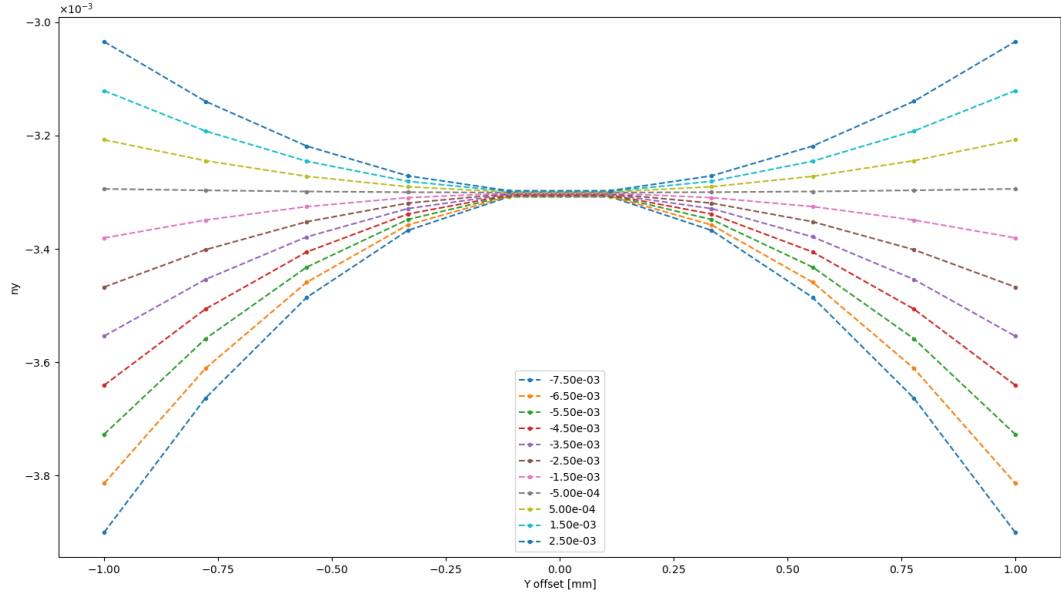
Глава 3

Ожидаемые результаты эксперимента

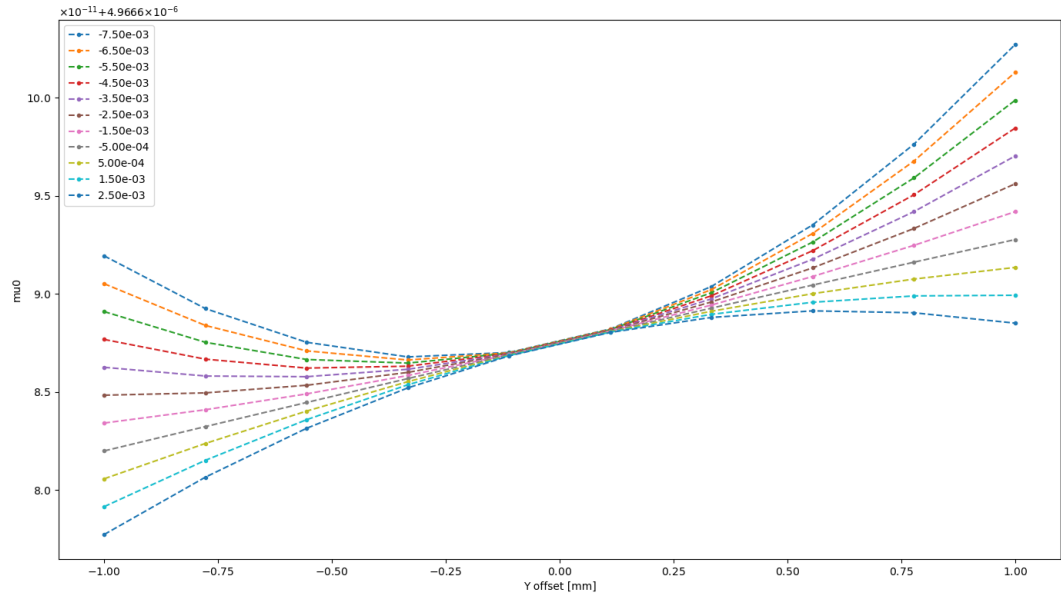
3.1 Время жизни поляризации

После применения секступолей, время жизни поляризации τ_d , 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.

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

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

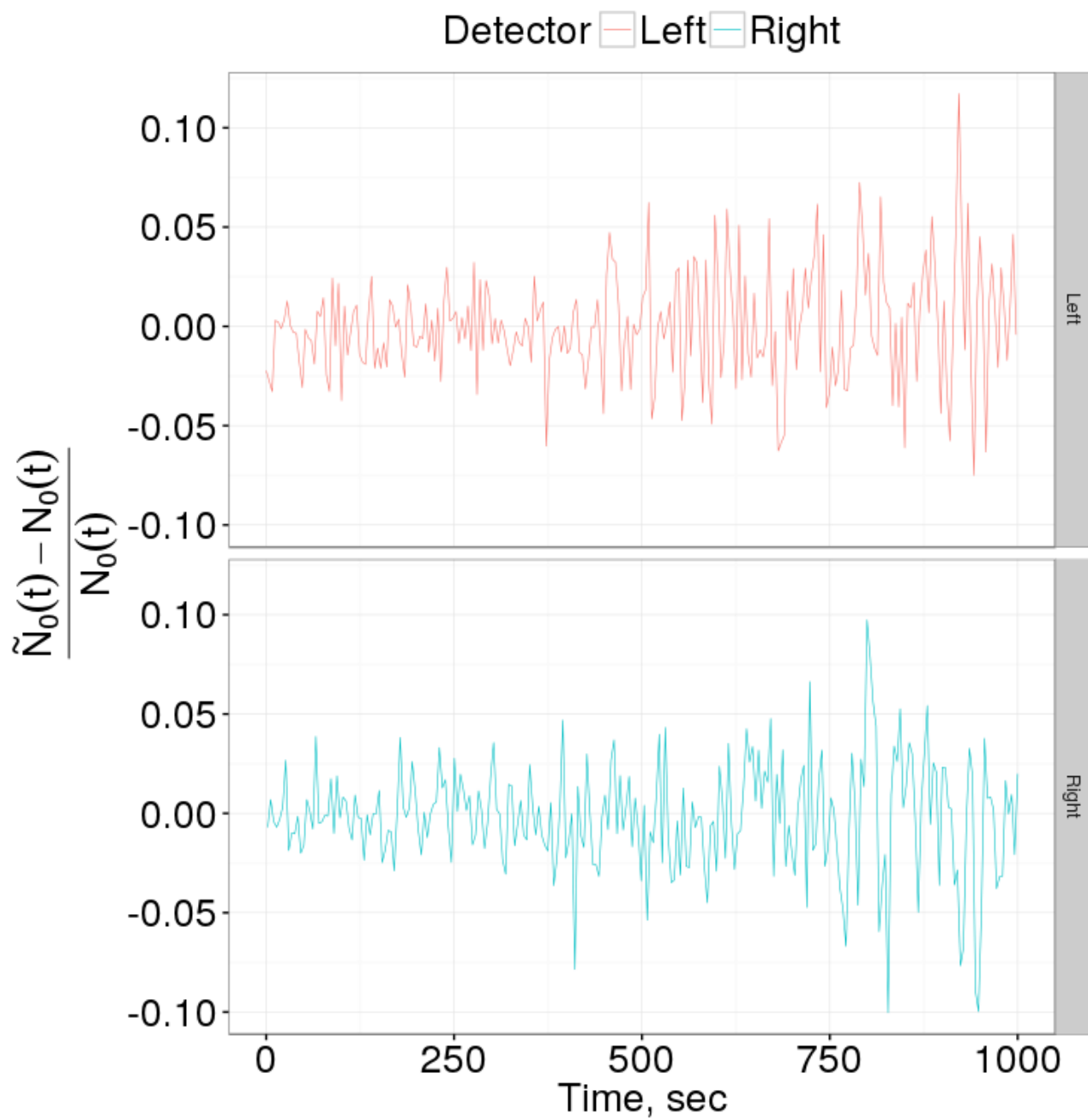


Рис. 3.2: Относительная ошибка измерения частоты событий на правом и левом детекторах как функция времени.

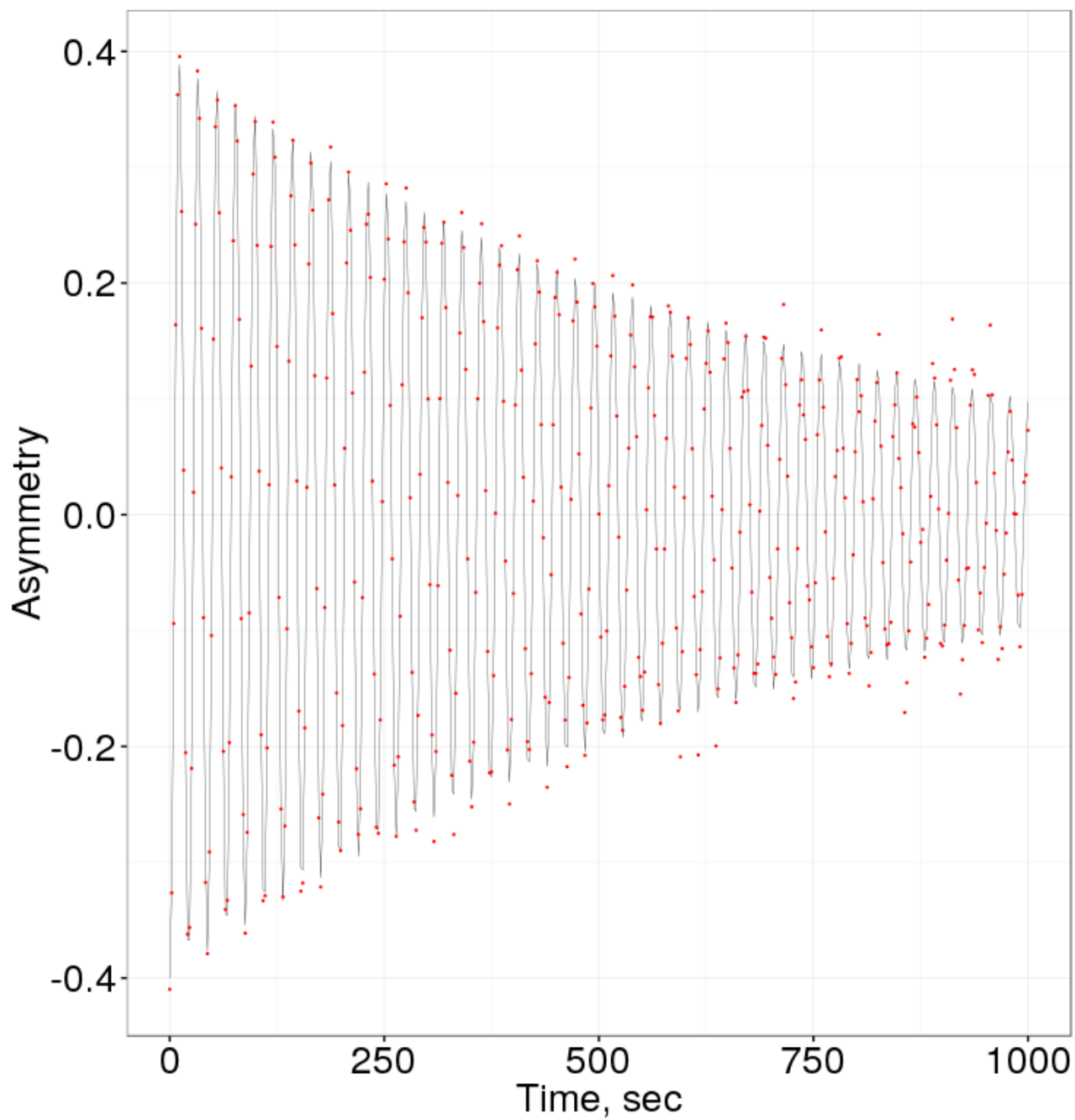


Рис. 3.3: Ожидание (чёрная линия) и измерения (красные точки) асимметрии сечения.

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 [4].

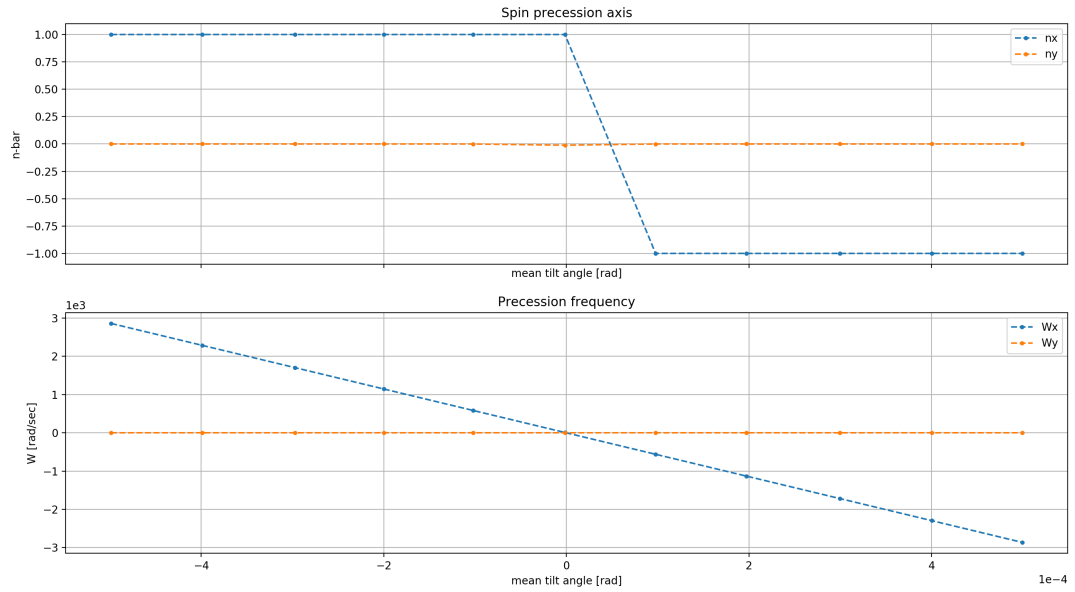


Рис. 3.4: Ось прецессии спина и частоты прецессии для неидеальной FS структуры, при наклонах E+V элементов.

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] 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>.
- [2] 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.
- [3] S R Mane. Spin Wheel. arXiv:150901167 [physics]. 2015 Sep;ArXiv: 1509.01167. Available from: <http://arxiv.org/abs/1509.01167>.
- [4] D Anastassopoulos, V Anastassopoulos, D Babusci. AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the 10⁻²⁹ e · cm level. BNL; 2008. Available from: https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf.
- [5] 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>.

- [6] 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>.
- [7] 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>.