

На правах рукописи

Салеев Артем Владимирович

**НОВЫЕ АСПЕКТЫ СПИНОВОЙ
ДИНАМИКИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОИСКУ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО
МОМЕНТА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА
НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦАХ**

Специальность 01.04.16 —
«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Самара — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Николаев Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Воронин Владимир Владимирович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение Петербургский институт ядерной
физики имени Б.П. Константинова,
заместитель директора по научной работе

Николаев Иван Борисович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
имени Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской Академии Наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение Институт физики высоких
энергий имени А.А. Логунова

Защита состоится «__» _____ 20__ г. в __ часов на заседании диссертационного совета 720.001.03 на базе Лаборатории ядерных проблем имени В.П. Джелепова в Объединенном институте ядерных исследований по адресу: ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, 141980, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований и на сайте www.info.jinr.ru/announce_disser.htm.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
720.001.03, д-р физ.-мат. наук

Г. А. Карамышева

Общая характеристика работы

Само наше существование обязано исключительно барионной асимметрии Вселенной. В теории Большого Взрыва, барионная асимметрия Вселенной образуется во время неравновесного расширения Вселенной за счёт процессов с изменением барионного заряда с одновременным нарушением CP -симметрии [8]. В Стандартной Модели (СМ) имеется топологический механизм несохранения барионного заряда [9]. Экспериментально наблюдаемое в распадах каонов и тяжёлых частиц нарушение CP успешно параметризуется ненулевой фазой в матрице смешивания кварков Кабибо-Кобаяши-Маскавы (СКМ) [10]. Но барионный заряд Вселенной, предсказываемый СМ, примерно на девять порядков меньше, чем наблюдаемый экспериментально [11–13]. Это явным образом требует наличия CP -нарушающих механизмов помимо СКМ-параметризации в Стандартной Модели. (см. также [14])

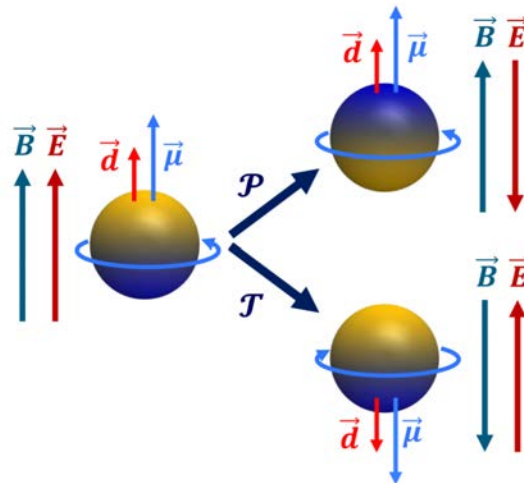


Рис. 1 — Нарушение пространственной (P) и временной (T) симметрии при наличии ЭДМ (иллюстрация М. Розенталя (M. Rosenthal) [15])

Электрические дипольные моменты (ЭДМ) возможны (см. Рис. 1) только в случае нарушения пространственной симметрии (P) и инвариантности обращения времени (T) (и нарушения CP как следствие CPT -теоремы). Следовательно, поиск ЭДМ адронов и лептонов является важным шагом на пути к физике за пределами СМ. ЭДМ прецессирует в электрическом поле точно так же, как магнитный дипольный момент (МДМ) в магнитном поле. Уместны простые размерные оценки. Ядерный магнетон $\mu_N = e\hbar/2m_Nc \approx 10^{-14} \text{ е}\cdot\text{см}$ даёт естественный масштаб

для МДМ нуклонов и лёгких ядер. ЭДМ требует P -нарушающего слабого взаимодействия, которое вносит подавление ЭДМ на множитель порядка $\sim 10^{-7}$, а также дополнительные $\sim 10^{-3}$ за счёт нарушения CP -симметрии [16]. Таким образом, естественный масштаб для ЭДМ нуклонов

$$d_N \sim 10^{-3} \times 10^{-7} \times \mu_N \sim 10^{-24} \text{ е}\cdot\text{см}. \quad (1)$$

В СМ, CP -симметрия нарушается в переходах, меняющих аромат кварков. Для того, чтобы образовать нейтральный по аромату ЭДМ, необходимо еще раз применить слабое взаимодействие, которое возвращает прежнее значение аромата, что подавляет ЭДМ ещё на семь порядков и приводит к исчезающе малому ЭДМ нуклонов в СМ:

$$d_N^{\text{SM}} \sim 10^{-3} \times 10^{-7} \times \mu_N \times 10^{-7} \sim 10^{-31} \text{ е}\cdot\text{см}. \quad (2)$$

До настоящего момента самые жёсткие верхние пределы были установлены на ЭДМ нейтральных атомов, молекул и нейтронов, которые в состоянии покоя могут быть помещены в сильные электрические поля [17]. В таких опытах обычно отслеживают сдвиг частоты прецессии, вызванный электрическим полем E , параллельным или антипараллельным магнитному полю B (подробнее в обзоре [18]). На сегодняшний день для ЭДМ нейтрона был достигнут [19–21] верхний предел $d_n < 2.9 \times 10^{-26} \text{ е}\cdot\text{см}$. Чувствительность подготавливаемых сейчас экспериментов по поиску ЭДМ нейтронов, может быть улучшена до $d_n \sim 10^{-27} \text{ е}\cdot\text{см}$.

От вращения спина нейтральных пучков в пролётной кинематике, в случае нейтронов перешли к опытам с ультрахолодными нейтронами в ловушках. По сути, пролётная кинематика остаётся актуальной в поисках ЭДМ нейтральных атомов и молекул. Для нейтронов возможно выделение сигнала ЭДМ также от взаимодействия с гигантскими внутрикристаллическими электрическими полями. Эта техника развивается в ПИЯФ им. Константинова РАН [22; 23] и в принципе может стать конкурентоспособной с техникой ловушек для ультрахолодных нейтронов [24].

Данная работа основана на части результатов экспериментальных исследований, которые были проведены коллаборацией «JEDI» (англ. Jülich Electric Dipole moment Investigations) на ускорителе «COSY» (COoler

Synchrotron [25]) в 2014-2016 гг. Эти работы были мотивированы планами поиска ЭДМ протонов и дейтронов, используя накопительное кольцо [26; 27] (см. Рис. 2). Это часть общемировых усилий по достижению новых рубежей в прецизионной спиновой динамике поляризованных пучков в накопительных кольцах.

Систематические ошибки, подстерегающие на пути к ЭДМ заряженных частиц, кардинально отличаются от таковых в экспериментах с нейтральными атомами и нейтронами. Определение влияния систематических ошибок делает важной задачу изучения прецизионной спиновой динамики в накопителях. В частности, требуется понимание того, в какой мере вращение спина в фоновых магнитных полях в накопителе может имитировать эффект ЭДМ.

Практическая значимость

Стандартная Модель электрослабых взаимодействий не в состоянии объяснить бариогенезис во Вселенной в силу слишком слабых эффектов несохранения CP и барионного заряда. С одной стороны, нарушение CP-симметрии — один из трех фундаментальных критериев бариогенезиса. С другой стороны, CP-несохранение приводит к ЭДМ нуклонов, ядер и атомов. Верхний предел на ЭДМ нейтрона и нейтральных атомов и молекул недостаточен для определения изотопических свойств несохранения CP-симметрии. Отличительная черта Квантовой Хромодинамики (КХД) как фундаментальной теории сильных взаимодействий — это возможность нарушения CP за счет «тэта-члена». Теоретических ограничений на тэта-член нет, верхние границы на него получают только из модельных расчётов ЭДМ нейтронов. Несмотря на изоскалярность тэта-члена, ЭДМ протонов и нейтронов ожидается разным, что делает в высшей степени актуальным поиск ЭДМ протонов и дейтронов. Если спины холодных и ультрахолодных нейтральных атомов, молекул и нейтронов можно поместить в статические электрические поля, то для заряженных частиц это возможно только в накопительных кольцах, когда электрическое поле есть часть удерживающего поля. Поэтому такие поиски ЭДМ заряженных частиц ранее не проводились, их теория практически не разрабатывалась, и любой результат в этом направлении является пионерским. Если ЭДМ нуклонов не будет найден с точностью лучше 10^{-29} е·см, то это практически исключит воз-

Частица	Импульс p [ГэВ/ c]	Аномальный магнитный момент G	E [МВ/м]	B (Т)
Протон	0.701	1.792847	13.977	0.000
Дейтрон	1.000	-0.142987	-3.361	0.135
^3He	1.211	-4.183963	13.943	-0.042

Таблица 1 — Параметры для «заморозки спина» горизонтальным электрическим полем E и вертикальным магнитным полем B при поиске ЭДМ в кольце радиуса $r = 30$ м.

возможность объяснения бариогенезиса во Вселенной за счет обобщающих СМ электрослабых механизмов.

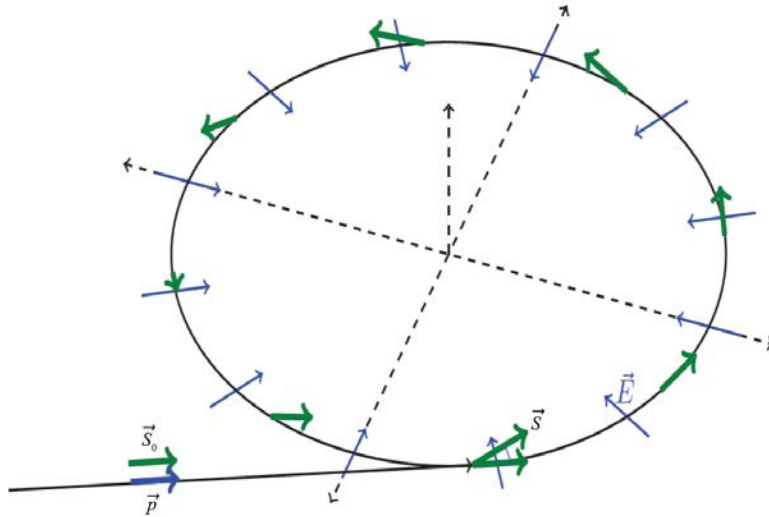


Рис. 2 — Иллюстрация идеи сигнала ЭДМ в чисто электростатическом кольце с «замороженным» спином [27].

Конечной целью исследований коллаборации JEDI на COSY является обоснование возможности измерения электрического дипольного момента протонов, дейтронов и ядер гелия-3 с предельно достижимой статистической точностью 10^{-29} е·см. Поиск ЭДМ с такой амбициозной чувствительностью потребует строительства специализированного накопительного кольца [26]. Для этого кольца должны быть выбраны такие параметры удерживающего электрического и магнитного полей, при которых частота вращения спина за счёт МДМ фиксируется на частоте обращения частиц (см. Таблицу 1), в результате чего вращение спина в плоскости кольца «замораживается» — ось стабильного спина будет направлена параллельно ведущему электрическому полю \vec{E} (см. Рис. 2). Отличный от нуля

ЭДМ приводит к вращению исходной продольной поляризации из плоскости кольца и она приобретает вертикальную компоненту. Здесь предполагается отсутствие искажений замкнутой орбиты неидеальностями элементов кольца. Часть систематических ошибок при определении сигнала ЭДМ планируется избежать при использовании встречных пучков. Но окончательное решение о строительстве может быть принято только если будут поняты все источники возможных систематических ограничений точности и способы их устранения. Последнее требует детального теоретического и экспериментального изучения относящихся к ЭДМ аспектов спиновой динамики.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное развитие прецизионной спиновой динамики в накопителях в приложении к задаче высокочувствительных поисков ЭДМ заряженных частиц с целью поиска CP-несохранения за счет механизмов вне Стандартной Модели. На нынешнем этапе экспериментов на ускорителе COSY предполагается использование в качестве ротатора спина радиочастотного фильтра Вина. Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

1. определение временной зависимости поляризации от свойств пучка при различных режимах работы фильтра Вина в поисках ЭДМ резонансным методом,
2. реализация способа контроля относительной фазы спина и радиочастотного поля спинового ротатора, которая позволит сохранять условие точного спинового резонанса в течение длительного времени, необходимого для накопления сигнала ЭДМ,
3. разработка теории затухания вертикальных осцилляций спина в резонансном радиочастотном режиме из-за сдвоя фазы, вызванного синхротронными колебаниями, и предсказанного удлинения времени когерентности горизонтальной поляризации при «магических энергиях», что может резко увеличить чувствительность к ЭДМ,
4. разработка теории влияния фона МДМ на систематическое ограничение точности определения сигнала ЭДМ в магнитном кольце,

5. поиск способов прямого измерения и минимизации ложных сигналов от вращения магнитного момента в радиальных и продольных магнитных полях из-за несовершенства магнитной дорожки накопительного кольца, что увеличило бы чувствительность методики с радиочастотным фильтром Вина,
6. реализация метода измерения фона МДМ в накопительном кольце COSY на основе прецизионного измерения частоты прецессии спина,
7. оценка систематических эффектов от вращения магнитного момента за счёт неточности позиционирования статических магнитных спиновых ротаторов в методе минимизации ложных сигналов.

Теоретическая работа по спиновой динамике в накопителях в рамках настоящего исследования полностью нацелена на подготовку первого в мире эксперимента по поиску сигнала ЭДМ дейтронов на ускорителе COSY. При нынешнем статусе накопительного кольца, это возможно с точностью до $10^{-19} - 10^{-21}$ е·см, и намечается последующее увеличение чувствительности после реконструкции накопительного кольца.

Автор является одним из лидеров теоретической поддержки международной коллаборации JEDI в области систематических фоновых эффектов. Программа поиска ЭДМ является основной для Института ядерной физики в Юлихе. Эксперимент планируется провести в 2018 г., в последующую пятилетку планируется реконструкция COSY с изучением систематических эффектов на новом уровне чувствительности, с возможным улучшением верхнего предела на ЭДМ до 10^{-24} е·см, и подготовкой проекта специализированного кольца для поиска ЭДМ к 2022-2023 гг.

Научная новизна:

1. Для оценки неидеальностей кольца развит подход, основанный на модуляции частоты прецессии горизонтального спина, которая может быть измерена с относительной точностью до 10^{-10} . На первой стадии в качестве анализирующих элементов использованы имеющиеся на ускорителе COSY соленоиды двух систем электронного охлаждения пучка.

2. На основе проведённого анализа экспериментальных данных коллаборации JEDI, показано, что при современном неоптимизированном статусе кольца COSY, техника на основе модуляции частоты прецессии спина позволит контролировать угловую ориентацию оси стабильного спина с точностью до 2.8 мкрад.
3. Проведено численное моделирование спиновой и орбитальной динамики, которое позволяет оценить точность метода определения оси стабильного спина при возмущении замкнутой орбиты неидеально выставленными соленоидами.
4. Проведён эксперимент по стабилизации относительной фазы спина и радиочастотного поля с точностью до 0.21 рад, с удержанием точного спинового резонанса при временах порядка 100 с.
5. Впервые выведена зависимость скорости неэкспоненциального демпинга осцилляций вертикальной поляризации от синхротронных амплитуд во время спинового резонанса и предсказан уход фазы осцилляций

Достоверность полученных результатов обеспечивается как согласием теоретических ожиданий с экспериментом JEDI, так и численным моделированием систематических эффектов на основе программного комплекса моделирования спин-орбитальной динамики «COSY Infinity» [28]. Теоретический анализ основан на стандартном спинорном формализме [29]. Полученные на основе этого формализма теоретические зависимости модуляции частоты прецессии спина полями искусственных неидеальностей (ИН) полностью совпадают с численным моделированием динамики спина в «COSY Infinity», и также подтверждаются в эксперименте с достаточно высокой точностью.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка теории затухания вертикальных осцилляций спина в резонансном радиочастотном режиме.
2. Теоретическая разработка нового метода прямого измерения интегральных паразитных радиального и продольного магнитного полей в накопительных кольцах с помощью модуляции спинтьюна частиц.

3. Результаты численного моделирования режимов работы неидеально выставленного статического соленоида, возбуждающего коллективное бетатронное движение пучка.
4. Теоретическая разработка метода контроля относительной фазы радиочастотного поля ротатора спина и фазы прецессии спина в накопительном кольце.

Апробация работы. Представленные в диссертации результаты прошли научную апробацию и получили должную известность в научном сообществе. Они докладывались на Ученом Совете Самарского Университета, Ученом Совете Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, рабочих совещаниях коллаборации JEDI (2013-2017 гг., г. Юлих, Германия), на ежегодных конференциях «DPG Frühjahrstagung» Немецкого Физического Общества (Дрезден, 2013 и 2017 гг.; Франкфурт, 2014 г.; Вупперталь, 2015 г.; Дармштадт, 2016 г.), семинарах «CANU/FFE» в Центре Физики г. Бад Хоннеф (2013 и 2015 гг., Германия), 21 Международном Симпозиуме по Спиновой Физике в Пекинском Университете (SPIN-2014, Китай, 20-24 октября 2014г.), 16 и 17 Рабочих совещаниях по физике спина при высоких энергиях (DSPIN 2015 и 2017 гг., ОИЯИ, г. Дубна, Россия) и на семинаре Лаборатории Ядерных Проблем имени Л.П. Джелепова в ОИЯИ.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1–4], и 3 — в тезисах докладов [5–7], из них 6 работ входят в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного раздела приложения. Полный объём диссертации составляет 134 страницы с 34 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 65 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проведенных в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся

задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава В этой главе изложена суть резонансного метода для поиска ЭДМ на COSY. На усовершенствованном кольце COSY, ожидаемая статистическая точность метода $\sigma|d_d| < 10^{-24}$ е·см. Достижение такой точности требует разработки специального метода контроля относительной фазы между фазой РЧ поля спинового ротатора и фазой горизонтальной компоненты прецессии спина, о котором подробно рассказано в последнем разделе главы.

Концепция заключается в поиске резонансного вращения спина за счёт ЭДМ из начального горизонтального направления спинов циркулирующих дейтронов в вертикальное и наоборот, возникающего за счёт работы РЧ фильтра Вина на частоте прецессии спина дейтронов. РЧ фильтр Вина как таковой прозрачен для ЭДМ частицы, его эффект заключается в модуляции спиновой частоты. Эта модуляция во взаимодействии с прецессией ЭДМ в статическом индуцированном электрическом поле E кольца, приводит к осцилляциям вертикальной поляризации с частотой пропорциональной ЭДМ [30]. На практике, время когерентности горизонтальных спинов слишком мало, чтобы наблюдать полные периоды осцилляций вертикальной поляризации за счёт ЭДМ, и можно будет увидеть только начальный этап медленного роста вертикальной поляризации (Рис. 3(а)).

Сила спинового резонанса пропорциональна ЭДМ,

$$\epsilon = \frac{1}{2}\chi_{WF} \sin \xi_{EDM} \quad (3)$$

где угол ξ_{EDM} определяет наклон оси стабильного спина в идеальном кольце за счёт ЭДМ, а χ_{WF} — амплитуда угла поворота спина в РЧ фильтре Вина.

На Рис. 3 изображён пример регистрации сигнала ЭДМ при росте вертикальной поляризации P_y во время работы РЧ фильтра Вина на частоте свободной прецессии спина $\nu_s f_R = 120.8$ кГц. Предполагаемое значение ЭДМ дейтрона $d_d = 10^{-19}$ е·см. Энергия пучка $T = 236$ МэВ, амплитуда напряжённости электрического поля в фильтре Вина $E = 3$ кВ/м и направление исходного вектора поляризации $\vec{P} = \vec{e}_x$. За время наблюде-

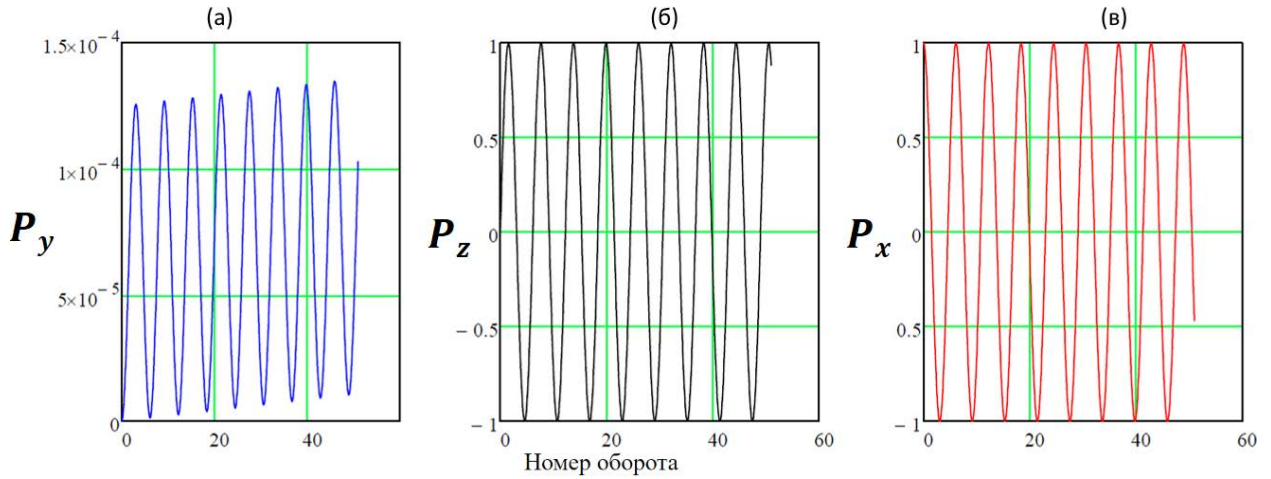


Рис. 3 — а) Рост вертикальной поляризации P_y за счёт ЭДМ при работе РЧ фильтра Вина на частоте прецессии спина в кольце. На графиках б) и в) показаны осцилляции горизонтальных компонент поляризации P_z и P_x .

ния 1000 с, или 7.6×10^8 оборотов, величина вертикальной поляризации составит $P_y > 0.1$.

Прецизионное измерение спинтьюна, обсуждаемое в работе [31], можно осуществлять в режиме реального времени для проведения измерения фазы между прецессией спина и внешнего радиочастотного устройства. Такая возможность была впервые реализована для создания активной системы обратной связи, которая стабилизирует относительную фазу на уровне 0.21 рад. Основной принцип действия системы обратной связи заключается в непрерывном контроле частоты прецессии спина и согласовании фазы прецессии спина с фазой радиочастотного поля соленоида. Стабилизация фазы позволяет сохранять условие точного спинового резонанса, а так же контролировать скорость роста (или амплитуду осцилляций) вертикальной поляризации, которая зависит от значения относительной фазы ϕ , как $\propto \sin \phi$. Так как эта методика в полной мере применима и при использовании РЧ фильтра Вина, решение этой задачи является необходимым требованием для первого прямого поиска ЭДМ в накопительном кольце. Кроме того, такая система может быть использована в методе «замороженного спина» [26], где направление поляризации в плоскости кольца должно сохраняться направленным вдоль вектора импульса.

По результатам главы опубликованы работы [1; 3; 4; 7].

Вторая глава В данной главе обсуждается явление отхода от условия радиочастотного спинового резонанса из-за синхротронных колебаний

частиц в пучке. Приводится аналитическое описание того, как происходит процесс неэкспоненциального затухания радиочастотных осцилляций вертикальной поляризации частиц. Это затухание сопровождается нетривиальным уходом фазы осцилляций. Кроме того, обсуждается зависимость скорости декогерентности от гармоник радиочастотного ротатора спина и возможность проверить предсказания о «магических» энергиях, при которых скорость декогерентности близка к нулю.

Уход фазы осцилляций при малых временах удержания пучка может повлиять на точность определения частоты вертикальных осцилляций поляризации, и, как следствие, сигнала ЭДМ. Полученные предсказания могут быть проверены экспериментально. Показано, что огибающая вертикальной поляризации зависит только от параметра ρ , характеризующего скорость декогерентности спинов. При интерпретации экспериментальных данных следует фитировать вертикальные осцилляции спина к полученной аналитической форме $A(n)$ (где n — номер оборота), которая зависит только от двух свободных параметров: силы индуцированного спинового резонанса ϵ_0 , заданной для центральной частицы, и ρ :

$$A(n) = \frac{\exp \{ -\sin^2 \varphi(n) \}}{(1 + \rho^2 n^2)^{1/4}} \cos \{ \epsilon_0 n - \kappa(n) \} , \quad (4)$$

где

$$C_{rf} = \frac{\eta}{\beta^2} \cdot \left(1 + \frac{K}{G\gamma} \right) - 1 , \quad (5)$$

$$\rho = \frac{1}{4} \epsilon_0 C_{rf}^2 \psi_s^2 , \quad (6)$$

$$\varphi(n) = \arctan(\rho n) , \quad (7)$$

$$\kappa(n) = \frac{1}{2} [\varphi(n) + \sin 2\varphi(n)] . \quad (8)$$

Параметр ψ_s описывает распределение по импульсам частиц в сгустке, а $\kappa(n)$ дает уход фазы осцилляций вертикальной поляризации.

Экспериментальная проверка предсказания о значительном увеличении времени когерентности спинов частиц при «магических» энергиях, для которых выполняется условие $C_{rf} = 0$, имеет важное практическое значение. Она позволит определить режим работы ускорителя (в частности,

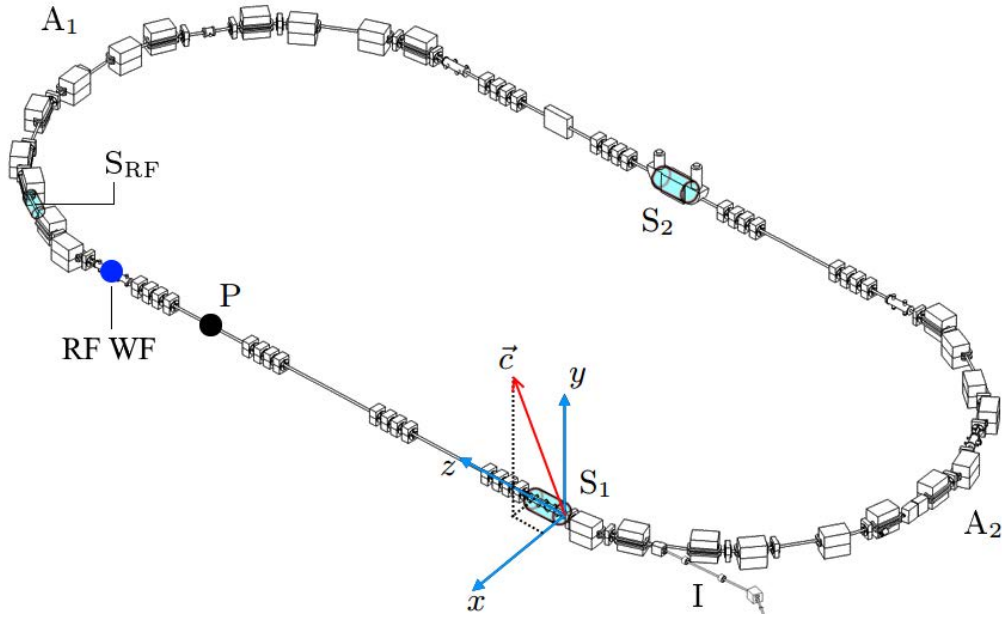


Рис. 4 — Схема экспериментальной установки с двумя соленоидами S_1 и S_2 , находящимися в противоположных прямых секциях накопительного кольца COSY. Вектор \vec{c} указывает направление оси стабильного спина перед соленоидом S_1 , в тот момент, когда S_1 и S_2 выключены. Две арки обозначены как A_1 и A_2 , а P указывает положение поляриметра «EDDA», S_{RF} — положение РЧ соленоида, и I обозначает часть магнитной дорожки инжекции. RF WF обозначает положение радиочастотного фильтра Вина. Пучок циркулирует по часовой стрелке.

значение слип-фактора η и гармоники K частоты РЧ поля), необходимый для оптимизации эксперимента по установлению предела на ЭДМ с помощью РЧ фильтра Вина.

По результатам главы опубликована работа [2].

Третья глава В этой главе обсуждается проблема фона к сигналу ЭДМ, создаваемого МДМ при прохождении частиц через паразитные магнитные поля элементов кольца. В качестве решения этой проблемы предложен метод контроля фона от МДМ на основе измерения рельефа частоты прецессии спина при спиновом отклике кольца на статические спиновые ротаторы.

Измерение рельефа частоты прецессии спина с помощью статических ротаторов спина позволяет определить угловую ориентацию оси стабильного спина \vec{c} в накопительном кольце (см. Рис. 4). При наличии ЭДМ наклон оси стабильного спина в идеальном кольце будет статическим сиг-

налом ЭДМ, точность определения которого будет зависеть от точности метода. Так как достижимая относительная точность измерения спиновой частоты в COSY составляет около 10^{-10} и может быть выше, при улучшении статистики, этот метод может стать более предпочтительным в перспективе поисков ЭДМ на COSY и в принципе для чисто магнитных накопительных колец. Но в то же время, при наличии неидеальностей магнитной дорожки, ось стабильного спина приобретает наклон, связанный с вращением спина за счёт МДМ. Для того, чтобы оценить возможности определения наклона оси стабильного спина в COSY в тестовом эксперименте, предложено использовать уже доступные устройства — соленоиды систем электронного охлаждения пучка. Сигнал ЭДМ в такой конфигурации ротаторов спина, в которой используются только соленоиды, выделить в чистом виде не удаётся. Однако можно отработать этот метод в эксперименте на COSY и выявить его недостатки, что подробно изложено в четвертой главе. Кроме того, с помощью настройки оси вращения и угла поворота спина в статическом ротаторе спина, метод позволяет прецизионно ориентировать ось стабильного спина кольца относительно желаемого направления.

Изменение спинтьюна $\Delta\nu_s$ в зависимости от углов поворота спина χ_1 и χ_2 в двух статических соленоидах S_1 и S_2 (см. Рис. 4) относительно исходного значения ν_s^0 (при $\chi_1 = \chi_2 = 0$), даётся уравнением

$$\begin{aligned} \cos(\pi\nu_s^0) - \cos(\pi[\nu_s^0 + \Delta\nu_s(\chi_1, \chi_2)]) = \\ [1 + \cos(\pi\nu_s^0)] \sin^2\left(\frac{1}{2}\chi_+\right) - [1 - \cos(\pi\nu_s^0)] \sin^2\left(\frac{1}{2}\chi_-\right) \quad (9) \\ - \frac{1}{2}a_+ \sin(\pi\nu_s^0) \sin\chi_+ + \frac{1}{2}a_- \sin(\pi\nu_s^0) \sin\chi_-, \end{aligned}$$

где углы поворота спина χ_{\pm} и параметры, характеризующие неидеальность кольца a_{\pm} , определены как

$$\chi_{\pm} = \frac{1}{2}(\chi_1 \pm \chi_2) \quad \text{и} \quad a_{\pm} = (\vec{c} \cdot \vec{n}_2^r) \pm (\vec{c} \cdot \vec{n}_1). \quad (10)$$

Следовательно, определение параметров a_{\pm} равносильно определению проекций оси стабильного спина \vec{c} на плоскость, образованную векторами $\vec{n}_1 \simeq \vec{e}_z$ и $\vec{n}_2^r \simeq \cos(\pi\nu_s^0) \vec{e}_z - \sin(\pi\nu_s^0) \vec{e}_x$.

Отметим различный статус четырёх членов в Ур. (9). Первые два члена, пропорциональные $\sin^2\left(\frac{1}{2}\chi_{\pm}\right)$, даются теорией с абсолютной нормировкой. Последние два члена, пропорциональные $\sin\chi_{\pm}$, входят с неизвестными коэффициентами a_{\pm} , которые будут определены экспериментально.

По результатам главы опубликованы работы [1; 5; 6].

В **четвертой главе** обсуждается исследование неидеальностей магнитной дорожки COSY — паразитных магнитных полей в плоскости накопительного кольца. Описано первое экспериментальное приложение метода измерения рельефа частоты прецессии спина к измерению наклона оси стабильного спина в ускорителе COSY.

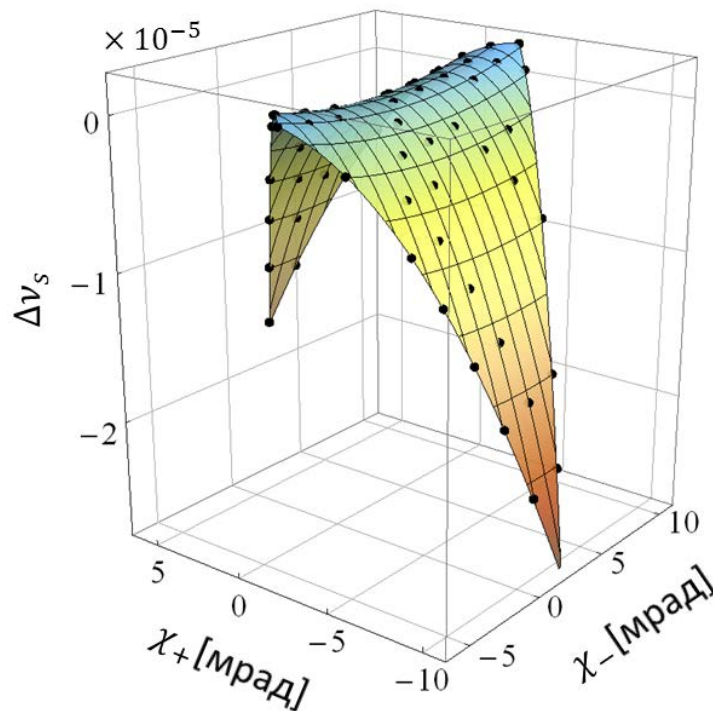


Рис. 5 — Показана карта скачков спинтьюна $\Delta\nu_s(\chi_+, \chi_-)$. Каждая точка представляет результат одного цикла измерений. Усы погрешностей меньше, чем маркеры точек измерений. Поверхность получена фитом экспериментальных данных, а положение седловой точки по теоретической формуле определяет параметры a_{\pm}^* .

С помощью измерения рельефа частоты прецессии спина определяются параметры a_{\pm}^* , которые обозначают положение седловой точки рельефа спинтьюна (см. Рис. 5). Параметры a_{\pm}^* заданы проекциями оси стабильного спина \vec{c} на плоскость, образованную векторами \vec{n}_1 и \vec{n}_2^r . Эта плоскость почти совпадает с плоскостью кольца, и ось стабильного спина

имеет почти ортогональное направление, вдоль $[\vec{n}_1 \times \vec{n}_2^r]$, к этой плоскости. Можно оценить точность, с которой допускается контролировать проекции оси стабильного спина $c_{x,z}$ на плоскость кольца,

$$\begin{aligned}\delta c_z &\approx \frac{1}{2} \left\{ (\delta a_+^*)^2 + (\delta a_-^*)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} &= 0.7 \cdot 10^{-6}, \\ \delta c_x &\approx \frac{\left\{ [1 - \cos(\pi\nu_s^0)]^2 (\delta a_+^*)^2 + [1 + \cos(\pi\nu_s^0)]^2 (\delta a_-^*)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{|\sin(2\pi\nu_s^0)|} &= 1.7 \cdot 10^{-6},\end{aligned}$$

где δa_{\pm}^* обозначает погрешность для a_{\pm}^* , которая получается после фита данных. Основной вывод из χ^2 -анализа: угловое направление оси стабильного спина относительно плоскости, заданной вектором $[\vec{n}_1 \times \vec{n}_2^r]$, может быть определено со *статистической* точностью не хуже 2.8 мкрад.

Кроме того, в этой главе показано, что имеются статистически значимые остаточные погрешности (расхождение точек данных с фитом), которые имеют вид, подобный самому рельефа спинтьюна. Эти остаточные погрешности составляют порядка 1% от величин самих скачков спинтьюна, но даже такая малость величин остаточных погрешностей значительно превышает точность методики определения спинтьюна. Чисто внешне остаточные погрешности выглядят как эффект небольшого рескейлинга угла поворота спина в соленоидах по сравнению с рассчитанным по закону Ампера.

По результатам главы опубликованы работы [1; 6].

Пятая глава В этой главе сделана попытка понять, в какой степени отмеченные выше остаточные расхождения между экспериментом и уравнением (9) могут быть следствием неидеальной ориентации дрейфовых соленоидов.

Когда соленоид повернут вокруг оси y на угол ξ_y , его ось направлена по вектору $\vec{k} = \cos \xi_y \vec{e}_z + \sin \xi_y \vec{e}_x$, и он производит горизонтальное магнитное поле, пропорциональное $\sin(\xi_y) \chi_{AI} \simeq \xi_y \chi_{AI}$, которое вызывает вертикальное смещение орбиты. Повороты вокруг оси x создают вертикальное магнитное поле и горизонтальные сдвиги орбиты.

Мы моделируем орбитальную и спиновую динамику в кольце пакетом программ «COSY Infinity». В реализованном сейчас варианте пакет

позволяет моделировать матрицу переноса спина \mathbf{T} для данной орбиты для всего кольца без разбивки по элементам. На Рис. 6 показана картина искажений орбиты при наклоне оси одного из соленоидов. Экспериментальные данные по искажению орбиты отвечают $\xi_y(S_2) = 8$ мрад.

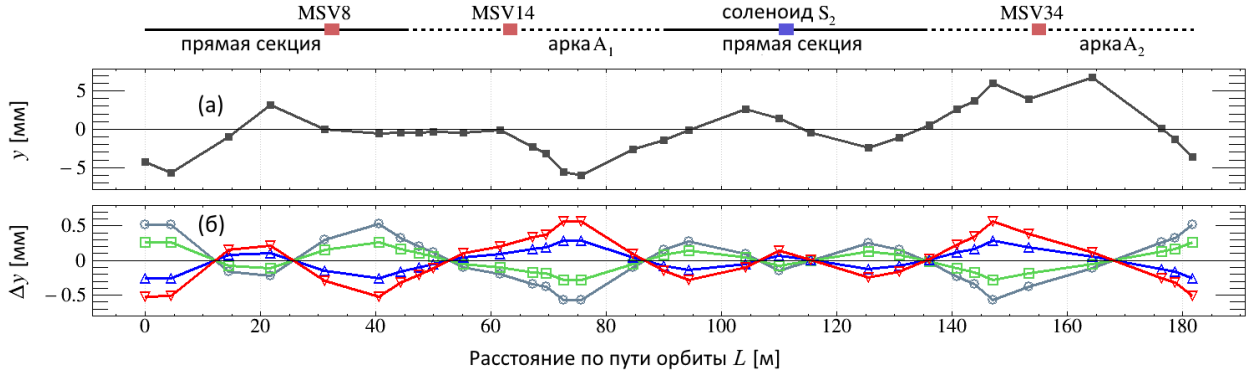


Рис. 6 — а) Вертикальная проекция y [мм] замкнутой орбиты пучка для одного из наборов корректирующих магнитов, когда соленоид S_2 выключен. б) Вертикальный сдвиг замкнутой орбиты Δy [мм] относительно абсолютного положения, когда соленоид S_2 включен и создаёт поворот спина на угол $\chi_{AI} = 12.98$ мрад, при этом перекоос соленоида задан поворотом вокруг оси y на угол $\xi_y = -8(\circ)$, $-4(\square)$, $4(\triangle)$, и $8(\nabla)$ мрад. Наблюдаемые сдвиги линейны по ξ_y .

Мы оцениваем соответствующие вариации матрицы переноса спина для кольца COSY без соленоида как

$$\mathbf{t}_R\left(q_s^R(\xi, \chi_{AI}), \vec{c}(\xi, \chi_{AI})\right) = \mathbf{T}(\xi, \chi_{AI}) \mathbf{t}_S^{-1}(\xi, \chi_{AI}), \quad (11)$$

Это даёт оценку вариации как спинтьюна $q_s^R(\xi, \chi_{AI})$, так и оси стабильного спина в собственно кольце COSY без учёта соленоида. Основной вывод: найденные вариации выглядят как эффект рескейлинга угла поворота,

$$\chi_{\pm} \rightarrow \tilde{\chi}_{\pm} = \frac{1}{2}(k_1 \chi_1 \pm k_2 \chi_2). \quad (12)$$

и можно оценить ожидаемые $K_{1,2}$ (где $k_{1,2} = 1 + K_{1,2}$) в предположении, что дрейфовые системы электронных охладителей могут быть аппроксимированы идеальными соленоидами. Такая оценка даёт $K_{1,2}$ примерно на порядок меньше, чем эмпирические значения из фита остаточных расхождений уравнением (9) с включенным рескейлингом.

Неполное описание $K_{1,2}$ можно связать частично с тем, что магнитное поле S_2 есть комбинация полей собственно дрейфового соленоида и корректирующих и тороидальных магнитов — описание последних в «COSY Infinity» не реализовано. Наше заключение: анализирующие искусственные неидеальности в кольце не должны создавать искажений орбиты.

Следует так же заметить, что в одном из разделов пятой главы, посвященном влиянию корректирующих магнитов кольца на спинтьюн, обсуждается контроль неидеальностей кольца при помощи корректирующих магнитов.

Результаты пятой главы представлены в работе [1].

В приложении А приведены результаты численного моделирования спиновой динамики пучка при наличии синхротронных осцилляций частиц во время спинового резонанса с РЧ соленоидом и подтверждены выводы Главы 2 о сохранении когерентности спинов частиц вблизи «магических» энергий и уходе фазы осцилляций вертикальной поляризации.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации, которые являются личным вкладом диссертанта и заключаются в следующем:

1. Разработан метод измерения направления оси стабильного спина на основе модуляции спинтьюна статическими соленоидами, который был применён для определения влияния интегрального эффекта магнитных полей неидеальностей кольца COSY. Для существующего сегодня состояния магнитной дорожки COSY, направление оси стабильного спина можно контролировать с точностью до 2.8 мкрад. В задаче поиска ЭДМ дейтрона метод позволяет достичь на существующем COSY статистическую точность определения сигнала ЭДМ $\approx 10^{-20}$ е·см (обсуждается энергия пучка дейтронов $T = 270$ МэВ). Ожидается, что метод измерения оси стабильного спина будет иметь широкое применение при калибровке различных устройств, задействованных для поиска ЭДМ в магнитных и гибридных магнито-электрических накопительных кольцах.
2. Проведено численное моделирование спиновой и орбитальной динамики для равновесной частицы при наличии искажения замкнутой орбиты за счёт неточности ориентации оси статиче-

ского соленоида относительно пучка в методе измерения направления оси стабильного спина и проведено сравнение с экспериментальными данными. Выявлена необходимость более детального описания динамики спина в соленоидах и получены оценки влияния сдвигов орбиты на изменение динамики спина в кольце.

3. Разработана теория затухания осцилляций вертикальной поляризации в резонансном радиочастотном режиме, позволяющая определить энергии пучка и гармоники радиочастотного поля фильтра Вина, при которых будет значительно снижена декогерентность поляризации, происходящая за счёт синхротронных колебаний частиц, во время накопления сигнала ЭДМ. Предсказан уход фазы осцилляций, что позволит избежать систематической неточности в определении сигнала ЭДМ.
4. Разработан метод контроля относительной фазы между фазой радиочастотного поля ротатора спина и фазой прецессии спина в накопительном кольце с точностью 0.21 радиан, который позволяет удерживать условие точного спинового резонанса, необходимого для накопления сигнала ЭДМ. Метод так же позволит получить зависимость скорости роста вертикальной поляризации от относительной фазы и будет задействован при поисках ЭДМ дейтрона с РЧ фильтром Вина и, в перспективе, при поисках ЭДМ в электростатическом кольце.

Метод поиска ЭДМ на основе модуляции спинтьюна статическими спиновыми ротаторами и метод РЧ фильтра Вина оба подвержены одному и тому же влиянию от фона полей неидеальностей элементов накопительного кольца. Сигнал вращения спина в подходе РЧ фильтра Вина подавляется слабостью толчка спина в фильтре Вина. Тем не менее, важность запланированного эксперимента с РЧ фильтром Вина состоит в том, что создаётся площадка для тестирования техники измерения малых поворотов спина, которые будут так же измеряться и в окончательных экспериментах по поиску ЭДМ в будущих накопительных кольцах.

Несмотря на то, что COSY никогда не планировалось использовать как кольцо для поиска ЭДМ, эти исследования послужат отправной точкой для усовершенствования COSY. Даже оценки на ЭДМ протонов и дей-

тронов, сильно уступающие по точности данным для нейтронов, являются незаменимым шагом на пути к разработке специализированных высокоточных накопительных колец для поиска ЭДМ.

Публикации автора по теме диссертации

1. Spin tune mapping as a novel tool to probe the spin dynamics in storage rings / A. Saleev [et al.] // *Phys. Rev. Accel. Beams*. — 2017. — July. — Vol. 20, issue 7. — P. 072801.
2. Non-exponential decoherence of radio-frequency resonance rotation of spin in storage rings / A. Saleev [et al.] // *JETP Letters*. — 2017. — Aug. — Vol. 106, issue 4. — Pp. 213–216. — [Pis'ma v ZhETF. — 2017. — Vol. 106. — Pp. 199–200.]
3. *Rathmann F., Saleev A., Nikolaev N. N.* Search for electric dipole moments of light ions in storage rings // *Phys. Part. Nucl.* — 2014. — Vol. 45. — Pp. 229–233.
4. Phase locking the spin precession in a storage ring / N. Hempelmann, ..., A. Saleev, [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — July. — Vol. 119, issue 1. — P. 014801.
5. (EDM@Juelich): Learning the systematic limitations on EDM at COSY / N. Nikolaev [et al.] // *Proc. of XV Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics*. — 2014. — P. 101. — ISBN 978-5-9530-0377-3.
6. *Saleev A., Nikolaev N., Rathmann F.* Studies of Systematic Limitations in the EDM Searches at Storage Rings // *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* — 2016. — Feb. — Vol. 40. — P. 1660093.
7. *Rathmann F., Saleev A., Nikolaev N. N.* The search for electric dipole moments of light ions in storage rings // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2013. — Vol. 447. — P. 012011.

Список литературы

8. *Sakharov A. D.* Violation of CP Invariance, c Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe // *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* — 1967. — Vol. 5. — Pp. 32–35. — [Usp. Fiz. Nauk 161, 61 (1991)].
9. *Kuzmin V. A., Rubakov V. A., Shaposhnikov M. E.* On the Anomalous Electroweak Baryon Number Nonconservation in the Early Universe // *Phys. Lett.* — 1985. — Vol. B155. — P. 36.
10. *Patrignani C., Particle Data Group.* Review of Particle Physics // *Chinese Physics C.* — 2016. — Vol. 40, no. 10. — P. 100001.
11. *Rubakov V. A., Shaposhnikov M. E.* Electroweak baryon number non-conservation in the early universe and in high-energy collisions // *Usp. Fiz. Nauk.* — 1996. — Vol. 166. — Pp. 493–537. — arXiv: hep-ph/9603208 [hep-ph]. — [Phys. Usp. 39, 461 (1996)].
12. *Riotto A., Trodden M.* Recent progress in baryogenesis // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* — 1999. — Vol. 49. — Pp. 35–75. — arXiv: hep-ph/9901362 [hep-ph].
13. *Engel J., Ramsey-Musolf M. J., Kolck U. van.* Electric dipole moments of nucleons, nuclei, and atoms: The Standard Model and beyond // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2013. — Vol. 71. — Pp. 21–74.
14. *Kusenko A., Pearce L., Yang L.* Leptogenesis via the 750 GeV pseudoscalar // *Phys. Rev. D.* — 2016. — Apr. — Vol. 93, issue 11. — P. 115005.
15. *Rosenthal M. S.* Experimental Benchmarking of Spin Tracking Algorithms for Electric Dipole Moment Searches at the Cooler Synchrotron COSY : PhD thesis / Rosenthal Marcel Stephan. — RWTH Aachen U., 2016.
16. *Khriplovich I. B., Lamoreaux S. K.* CP violation without strangeness: Electric dipole moments of particles, atoms, and molecules. — 1997. — ISBN 978-3642645778.

17. An Improved experimental limit on the electric dipole moment of the neutron / C. A. Baker [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2006. — Vol. 97. — P. 131801. — arXiv: hep-ex/0602020 [hep-ex].
18. *Lamoreaux S. K., Golub R.* The Neutron Electric Dipole Moment: Yesterday, Today and Tomorrow // Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. — 2009. — Vol. 20. — Pp. 583–634.
19. Baker et al. Reply: / C. A. Baker [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2007. — Apr. — Vol. 98, issue 14. — P. 149102.
20. Revised experimental upper limit on the electric dipole moment of the neutron / J. M. Pendlebury [et al.] // Phys. Rev. D. — 2015. — Nov. — Vol. 92, issue 9. — P. 092003.
21. New measurements of the neutron electric dipole moment / A. P. Serebrov [et al.] // JETP Letters. — 2014. — Vol. 99, no. 1. — Pp. 4–8.
22. *Fedorov V. V., Voronin V. V.* Neutron optics of noncentrosymmetric crystals: New possibility of searches for the neutron electric dipole moment and CP-violating forces // Physics of Atomic Nuclei. — 2014. — June. — Vol. 77, no. 6. — Pp. 695–703.
23. Measurement of the neutron electric dipole moment via spin rotation in a non-centrosymmetric crystal / V. Fedorov [et al.] // Physics Letters B. — 2010. — Vol. 694, no. 1. — Pp. 22–25.
24. New search for the neutron electric dipole moment with ultracold neutrons at ILL / A. P. Serebrov [et al.] // Phys. Rev. C. — 2015. — Nov. — Vol. 92, issue 5. — P. 055501.
25. *Maier R.* Cooler synchrotron COSY — Performance and perspectives // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1997. — Vol. 390, no. 1. — Pp. 1–8.
26. A storage ring experiment to detect a proton electric dipole moment / V. Anastassopoulos [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 2016. — Vol. 87, no. 11. — P. 115116.

27. srEDM Collaboration, план эксперимента доступен в http://www.bnl.gov/edm/files/pdf/proton_EDM_proposal_20111027_final.pdf.
28. *Berz M.* Computational aspects of optics design and simulation: COSY INFINITY // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1990. — Vol. 298, no. 1. — Pp. 473–479.
29. *Lee S. Y.* Spin Dynamics and Snakes in Synchrotrons. — World Scientific, 1997. — ISBN 9789810228057.
30. *Morse W. M., Orlov Y. F., Semertzidis Y. K.* rf Wien filter in an electric dipole moment storage ring: The “partially frozen spin” effect // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2013. — Nov. — Vol. 16, issue 11. — P. 114001.
31. New Method for a Continuous Determination of the Spin Tune in Storage Rings and Implications for Precision Experiments / D. Evermann [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Aug. — Vol. 115, issue 9. — P. 094801.