

На правах рукописи

**Колокольчиков Сергей Дмитриевич**

**Исследование динамики поляризованного пучка в  
ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в  
приложении к изучению электрического дипольного  
момента лёгких ядер**

Специальность 1.3.2 —  
«Приборы и методы экспериментальной физики»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель: профессор, доктор физико-математических наук

**Сеничев Юрий Валерьевич**

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество**,  
доктор физико-математических наук, профессор,

Не очень длинное название для места работы,  
старший научный сотрудник

**Фамилия Имя Отчество**,

кандидат физико-математических наук,  
Основное место работы с длинным длинным  
длинным длинным названием,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования с длинным длинным длинным длинным названием

Защита состоится DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов на заседании диссертационного совета Д 123.456.78 при Название учреждения по адресу: Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Название библиотеки.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: Адрес, ученому секретарю диссертационного совета Д 123.456.78.

Автореферат разослан DD mmmmmmmm2025 года.

Телефон для справок: +7 (0000) 00-00-00.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 123.456.78,  
д-р физ.-мат. наук

Фамилия Имя Отчество

## Общая характеристика работы

Данная работа посвящена исследованию поведения тяжелых ионов и поляризованных лёгких заряженных частиц в ускорительных и накопительных установках с целью изучения фундаментальных свойств материи. Представленные результаты направлены на формирование комплексной физической программы исследований, включающей вопросы по разрешению спинового кризиса и изучению электрического дипольного момента элементарных частиц.

На сегодняшний день, механизм формирования и эволюции Вселенной остается загадкой. По текущим представлениям, на ранних этапах формирования Вселенной материя находилась в экстремально плотном состоянии, известной как кварк-глюонная плазма [1]. Подобное состояние материи может наблюдаться в недрах нейтронных звезд [2], а также в результате столкновения тяжелых заряженных частиц. Подобные эксперименты могут осуществляться в рамках коллайдерных исследований с тяжелыми частицами и помогут в изучении фазовых переходов и критических явлений в сильновзаимодействующей ядерной материи при экстремальных барионных плотностях [3].

Для достижения статистически значимых результатов любого коллайдерного эксперимента требуется набор достаточного количества статистических данных, что выражается в такой интегральной характеристике как светимость. Обеспечение её высокого уровня является ключевым требованием. Для исследования кварк-глюонной плазмы это требование находится на уровне порядка  $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [4]. Такие светимости являются рекордными и для их достижения может потребоваться существенная настройка всех систем ускорителя, что может потребовать большого времени. При ускорении тяжелых ионов высокая зарядность и интенсивность пучка вызывает серьёзные ограничения на параметры сгустка из-за внутрипучкового рассеяния (ВПР) [5]. Для преодоления этих проблем, спроектированная структура должна обладать высоким временем ВПР, а также содержать специальные установки стохастического и электронного охлаждения для компенсации эффектов разогрева пучка.

Другой нерешенной проблемой современной физики остается вопрос о распределении спина внутри протона, так называемый "спиновый кризис протона". В 1989 году коллаборацией EMC (European Muon Collaboration) [6] было показано, что вклад кварков в спин протона составляет лишь небольшую часть и по современным оценкам находится на уровне около 30% [7]. Исследования этого вопроса проводились при изучении в коллайдерных экспериментах с поляризованными пучками протонов и дейтронов в COSY-ANKE [8] и SATURNE [9] при низких энергиях и протонов в RHIC при высоких [10].

Для изучения спиновой структуры протонов и дейтронов необходима подготовка и ускорение поляризованных пучков для достижения светимости порядка  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [11]. Поляризация пучка является дополнительной степенью свободы, определенные сечения рассеяния приобретают зависимость от поляризации сталкивающихся сгустков. Поскольку соотношение заряда к массе для протона отличается по сравнению с тяжелыми ионами почти в два раза, то максимальная энергия эксперимента кратно увеличивается. В структуре, оптимальной для тяжелоионного эксперимента, подобрано значение критической энергии таким образом, что столкновение происходит до критического значения и никаких проблем по её преодолению не возникает. Критическая энергия является важным параметром ускорительной установки и при проектировании структуры этому вопросу уделяется особое внимание. Таким образом, для протонов прохождение критической энергии становится важным параметром, ограничивающим параметры сгустка, и требует принятия дополнительных мер для её преодоления.

При ускорении протонного пучка относительно длительное нахождение вблизи критической энергии или её пересечение существенно влияет на параметры пучка и его стабильность. Нарушается адиабатичность продольного движения, существенными становятся нелинейные эффекты, затухание Ландау оказывается неспособно подавить возникающие возмущения, а наличие пространственного заряда и других импедансов оказывает влияние на развитие продольной микроволновой неустойчивости, неустойчивости отрицательной массы и поперечной голова-хвост (head-tail) [12; 13]. В случае малых интенсивностей критическая энергия не оказывает значительного влияния на параметры сгустка. Проблема прохождения критической энергии является характерной для интенсивных сгустков с количеством частиц порядка  $10^{10} - 10^{12}$ . Высокая интенсивность в коллайдерных экспериментах, обусловлена требованиями по достижению высокого значения светимости. Однако, любое увеличение эмиттанса пучка приводит к снижению конечной светимости эксперимента. Влияние всех приведенных эффектов, ограничено временем нахождения вблизи критической энергией, в этой связи используются методы быстрого пересечения или поднятия критической энергии.

Известная проблема физики состоит в объяснении барионной асимметрии, то есть наблюдаемым преобладанием материи над антиматерией. До сих пор, существующие физические законы не способны полностью объяснить такой дисбаланс. В работе 1967 год А. Д. Сахаровым были сформулированы общие необходимые условия для наличия барионной асимметрии: 1) Нарушение закона сохранения барионного заряда; 2) Нарушение C- и CP-симметрии; 3) Нарушение на ранних этапах формирования Вселенной термодинамического равновесия [14]. Согласно второму условию, *"Возникновение C-асимметрии по нашей гипотезе является*

следствием нарушения  $CP$ -инвариантности при нестационарных процессах расширения горячей Вселенной на сверхплотной стадии, которое проявляется в эффекте различия парциальных вероятностей зарядово-сопряженных реакций". Ранее в 1958 году С. Окубо теоретически показал такой эффект при рассмотрении распада сигма гиперона  $\Sigma^+$  и его античастицы  $\bar{\Sigma}^+$ . Позднее в 1964 году Д. Кронин и В. Фитч экспериментально обнаружили нарушение  $CP$ -инвариантности слабого взаимодействия в процессах распада нейтральных каонов  $K_2^0$  на два пиона  $\pi^+, \pi^-$  [15], за что в 1980 году были удостоены нобелевской премии по физике.

В современной Стандартной модели частиц  $P$ -[16] и  $CP$ -симметрии нарушаются. Источником  $CP$ -нарушения является наличие комплексной фазы в матрице смешивания кварков Кабиббо-Кабаяси-Маскава для слабых взаимодействий [17] и коэффициента  $\theta_{QCD}$  в лагранжиане квантовой хромодинамики [18], однако не обнаружено  $CP$ -нарушений в сильных взаимодействиях. Согласно СРТ-теореме,  $CP$ -инвариантность эквивалентна  $T$ -инвариантности. Источником такого нарушения может являться ненулевой электрический дипольный момент (ЭДМ) элементарных частиц, фундаментальное свойство материи и обусловленное неоднородностью распределения заряда внутри частицы. Поскольку ЭДМ представляется полярным вектором, а не псевдовектором, то для него нарушается как  $P$ -, так и  $T$ -инвариантность, что показано на рис. 1. Величина ЭДМ в Стандартной Модели слишком мала для экспериментального детектирования и находится на уровне  $|d_n| < 10^{-30} - 10^{-32} \text{ е} \cdot \text{см}$  для нейтрона [19]. Возможность его существования была сформулирована в заметке 1950 Перселл и Рэмси [20], однако ненулевое ЭДМ пока точно не обнаружено. Другие теоретические модели, такие как Суперсимметричные (SUSY), также предсказывают наличие ЭДМ, но на уровне  $|d_n| < 10^{-27} - 10^{-29} \text{ е} \cdot \text{см}$  для нейтрона, которые оставляют существенную надежду на экспериментальное обнаружение. Стоит отметить, что и таких точностей пока достигнуто не было, а сделаны только существенные ограничения для нейтрального нейтрона, впервые появившиеся в работе Н. Рамси и его коллег  $|d_n| < 5 \times 10^{-20} \text{ е} \cdot \text{см}$  (90% C.L.) [21], текущее ограничение находится на уровне  $|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} \text{ е} \cdot \text{см}$  (90% C.L.), что получено в работе nEDM [22].

Исследование ЭДМ осуществляется согласно уравнению Т-БМТ по его влиянию на поведение поляризации в электромагнитных полях. В случае ЭДМ нейтрона, а также нейтральных атомов их положение сохраняется при действии внешних магнитных и электрических полей. В случае заряженных частиц происходит движение согласно силе Лоренца, что и приводит к необходимости применения ускорительных установок, позволяющих длительное накопление пучка с заданными параметрами и выступающих в роли накопительного кольца. Наиболее интересным и перспективным направлением выглядит изучение ЭДМ протона и дейтрона. Для этого требуется создание пучков поляризованных частиц с

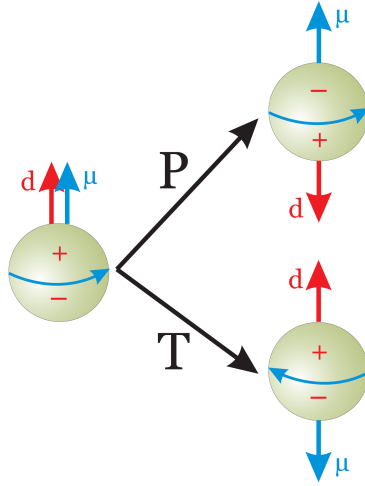


Рис. 1 — Схематическое изображение нарушение P- и T-симметрии ненулевым электрическим дипольным моментом.

максимально близкими свойствами с точки зрения прецессии спина во внешних полях. Тогда сохраняется поляризация вдоль конкретной оси, а также спины частиц прецессируют с одинаковой частотой. Для накопления величины ЭДМ на уровне  $10^{-29} \text{ e} \cdot \text{см}$  необходимо удерживать пучок на орбите с сохранением поляризации течение времени  $\sim 1000$  секунд с последующим анализом рассеяния на мишени поляриметра. При этом влияние магнитного дипольного момента (МДМ) должно быть подавлено до величины, меньшей сигнала ЭДМ. Такая техника впервые была предложена в БНЛ (Брукхейвенская Национальная Лаборатория) и имеет название 'замороженный' спин [23]. Позднее, была предложена концепция 'квази-замороженного' спина [24], в которой происходит пространственное разделение электрического и магнитного полей и условия подавления влияния МДМ-компоненты за полный оборот по кольцу.

Ещё одним перспективным направлением исследований в рамках программы спиновой физики является поиск аксионоподобных частиц. При этом изучается резонанс при совпадении  $g - 2$  частоты спиновой прецессии вокруг ведущего магнитного поля ускорителя с частотой колебаний аксионного поля. Для этого ускоритель будет использован в роли широкополосной зондирующей антенны по частоте прецессии спина [25].

Приведённые вопросы фундаментальной физики подлежат детальному рассмотрению и могут быть исследованы с использованием ускорительных установок, предназначенных для проведения разнообразных экспериментов. Эти установки позволяют достигать высоких энергий

частиц, а также предельных точностей измерений. Такая практика применяется в крупных мировых ядерных центрах: CERN [26], BNL [27], J-PARC [28].

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) является современным передовым центром, который оборудован передовой материально-технической базой, отвечающей мировым тенденциям и формируется на базе ОИЯИ в городе Дубна, Россия [29]. Основной установкой комплекса является коллайдер, в котором предусмотрены два места встречи пучков, где расположены два детектора: MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector) [30]. Каждый из этих детекторов предназначен для различных экспериментов. MPD-детектор будет использован для исследования кварк-глюонной плазмы, возникающей в результате столкновения тяжёлых ионов [31; 32]. SPD-детектор направлен на изучение поведения сталкивающихся поляризованных пучков протонов и дейтронов. Кинематическая область, охватываемая SPD, уникальна и никогда не использовалась целенаправленно при поляризованных адронных столкновениях. Кроме того, уникальной возможностью станет изучение поляризованных дейтронов. Таким образом, структура коллайдера должна поддерживать ускорение как тяжёлых ионов, так и лёгких частиц. При этом требования к удержанию пучков для различных типов частиц существенно отличаются.

**Актуальность темы.** Исследования направлены на формирование полноценной физической программы. В работе отдается приоритет исследованиям свойств пучков частиц, где ускоритель выступает в роли детектирующего устройства и позволяет решить поставленные задачи фундаментальной физики в комплексе Nuclotron-NICA. Применение изложенных в работе подходов возможно и на других похожих установках без потери общности.

**Целью** данной диссертации является изучение особенностей поведения лёгких поляризованных пучков в предлагаемой дуальной структуре, а также исследования электрического дипольного момента с использованием квази-замороженной концепции. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Определение требований к дуальной структуре для тяжелых ионов;
2. Регулирование критической энергии для поляризованных частиц методом резонансной модуляции дисперсионной функции;
3. Проведение численного моделирования динамики пучка легких частиц с учетом высших порядков коэффициента уплотнения орбиты в высокочастотных резонаторах гармонического и барьерного типа;

4. Изучение поведения динамической апертуры с учетом высших порядков при прохождении пучка через критическую энергию с скомпенсированной хроматичностью;
5. Определение особенностей поведения поляризации пучка при совершении процедуры скачка критической энергии;
6. Изучение концепции «квази-замороженного» спина с целью создания установки для исследования ЭДМ дейтрона и протона;
7. Исследование спин-орбитального движения поляризованного пучка в магнитном кольце с фильтрами Вина;

### **Научная новизна:**

1. Впервые предложена дуальная структура для тяжелых ионов и лёгких частиц для коллайдера NICA;
2. Впервые предложены методы подавления дисперсии поворотной аркой в резонансной магнитооптической структуре с отсутствующими магнитами;
3. Впервые исследован метод скачка критической энергии с использованием барьерного ускоряющего потенциала с учётом ограничений по продольной микроволновой неустойчивости;
4. Были проведены исследования продольной динамики с учётом высших порядков разложения по импульсу, а также влиянием импеданса. На их базе сформулированы ограничения на величину и темп скачка критической энергии;
5. Были разработаны 8- и 16-периодичная квази-замороженная структура Nuclotron для выделения ЭДМ сигнала легких ядер;
6. Была разработана структура коллайдера NICA с обводными каналами, неориентированная изначально на эксперименты по поиску ЭДМ дейтрона методом квази-замороженного спина;

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложена реализация дуальной структуры для комплекса NICA-Nuclotron, оптимальная для тяжелых частиц с точки зрения внутрипучкового рассеяния и легких частиц с поднятой критической энергией выше энергии эксперимента; [A1; A2]
2. Реализован метод вариации критической энергии для магнитооптики коллайдера NICA с отсутствующими магнитами при подавлении дисперсионной функции двумя семействами квадруполей и двумя крайними ячейками поворотной арки; [A3; A4]
3. Представлены результаты численного моделирования продольной динамики с учетом влияния высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов в окрестности критической энергии и сравнение с экспериментальными результатами, полученными на У-70; [A5; A6]



4. Проведен анализ использования гармонического ВЧ при процедуре скачка в коллайдере NICA. Для барьерного ВЧ представлены данные моделирования продольной динамики, а также предложено сокращение длины между барьерами из-за продольной микроволновой неустойчивости; [A7–A9]
5. Предложены модернизированные 8/16-периодичные структуры Nuclotron с квази-замороженным спином для исследования электрического дипольного момента легких ядер, с сохранением функции бустера; [A10–A12]
6. Применен метод фильтров Вина для сохранении направления поляризации на основе введения обводных каналов в структуре коллайдера NICA с квази-замороженным спином для выделения ЭДМ сигнала в поляризованном пучке дейтронов; [A13–A17]

**Достоверность** полученных результатов подтверждается согласованием аналитических вычислений с результатами численных экспериментов. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на российских и международных конференциях, а также были представлены на рабочих встречах:

- Workshop “Polarized beam in NICA” в 2022 г.;
- Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ-2020. Москва, Россия;
- 63, 65, 66-ая Всероссийская научная конференция МФТИ в 2020, 2023, 2024 гг. г. Долгопрудный, Россия;
- XXVII и XXVIII Всероссийские конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC’21, RuPAC’23. Алушта; Новосибирск, Россия;
- VII, VIII, IX и X Международная конференция Лазерные и Плазменные технологии ЛаПлаз’21, ЛаПлаз’22, ЛаПлаз’23, ЛаПлаз’24, ЛаПлас’25. Москва, Россия;
- XIII, XIV, XVI международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC’22 IPAC’23, IPAC’25. Бангкок, Тайланд; Венеция, Италия; Тайпей, Тайвань;
- XIX Международная конференция по спиновой физике высоких энергий DSPIN’23. Дубна, Россия;
- XI-я Международная конференция по ядерной физике в накопительных кольцах STORI’24. Хуэйчжоу, провинция Гуандун, Китай;

**Личный вклад.** Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Содержание диссертации и выносимые на защиту основные положения отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Результаты по подготовке и проведению эксперимента на ускорителе У-70 получены в соавторстве с сотрудниками ИИИ РАН и ИФВЭ. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, 13 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В последующих главах сначала описываются особенности дуальной магнитооптической структуры, а потом идёт более детальное рассмотрение вариации дисперсионной функции в резонансных структурах, методов преодоления критической энергии и в конце возможность проведения прецизионных экспериментов по изучению ЭДМ элементарных заряженных частиц и поиску аксионоподобных частиц.

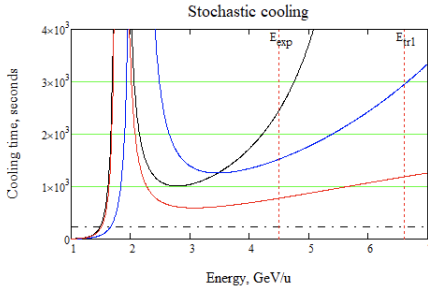
В **первой главе**: особое внимание уделено процессам внутрипучкового рассеяния и наличию критической энергии, влияющие на динамику многозарядных тяжёлых ионов и лёгких ядер. С этой целью рассматривается дуальная магнитооптическая структура, способная адаптироваться для целей обоих типов экспериментов.

В случае тяжелых ионов зарядность выделяет проблему внутрипучкового рассеяния пучка на первый план. Разогрев пучка приводит к росту поперечного эмиттansa и продольного разброса по импульсам. Для предотвращения неконтролируемого роста фазового объёма применяются техники по охлаждению пучка. Рассматривается стабильность пучка с точки зрения времени жизни пучка, в стационарном, независимом, от времени случае параметры пучка при наличии внутрипучкового рассеяния и охлаждения определяются как

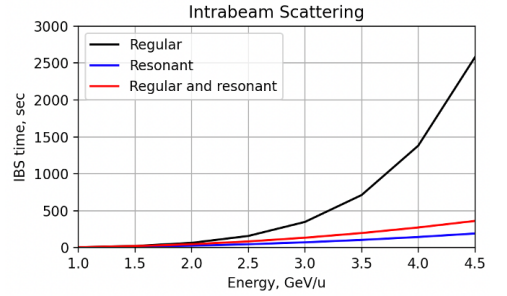
$$\varepsilon_{st} = \tau_{tr} \cdot \left( \frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{\text{IBS}} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_{st}},$$

$$\delta_{st}^2 = \tau_{\text{long}} \cdot \left( \frac{d\delta^2}{dt} \right)_{\text{IBS}} \Big|_{\delta^2=\delta_{st}^2}.$$

В современных установках используется как стохастическое, так и электронное охлаждение. Использование стохастического охлаждения оказывается зависимо от продольного смещения частиц относительно референсной и такого параметра как коэффициента скольжения  $\eta$ . Использование 'резонансных' структур с варьируемым значением коэффициента уплотнения орбиты способно уменьшить время охлаждения до оптимального значения в случае 'комбинированной' структуры, где одна поворотная арка с комплексным значением критической энергии, а другая с действительными. Однако, соответствующее внесение изменений в оптику установки может приводить к росту ВПП и в конечном счёте не компенсировать его.



а) Зависимость времени стохастического охлаждения от энергии.



б) Зависимость постоянной времени разогрева пучка из-за внутрипучкового рассеяния.

Рис. 2 — Сравнение времени разогрева пучка и охлаждения. Черная линия — 'регулярная', синяя — 'резонансная', красная — 'комбинированная' структура, прерывистая — идеальный случай.

Для легких частиц, таких как протоны, соотношение заряда к массе отличается почти в 2 раза по сравнению с тяжелыми ионами, таким образом пропорционально увеличивается и энергия эксперимента. При этом критическая энергия остается неизменной, поскольку является характеристикой конкретной установки и определяется магнитооптикой. Преодоление критической энергии является необходимым для обеспечения стабильности, в первую очередь, продольного движения. Таким образом, для тяжелых ионов такой проблемы не возникает, а в случае легких частиц,

требуется принимать меры по преодолению критической энергии. Одним из таких методов может являться создание 'резонансной' структуры.

Во второй главе проведён учёт влияния высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов при пересечении критической энергии. Также рассмотрен метод скачка критической энергии для различных ускоряющих потенциалов с целью сохранения стабильности сгустка. Для этого произведено математическое моделирование процесса, описываемого уравнением продольного движения:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \eta(\delta) \cdot \frac{h \cdot \Delta E}{\beta^2 \cdot E_0}, \\ \frac{d(\Delta E)}{dt} = \frac{V(\tau)}{T_0}. \end{cases}$$

Как видно, уравнение зависит от параметров магнитооптической структуры, ускоряющей станции, энергии пучка, а также разброса по импульсам внутри сгустка.

Применение различных типов ВЧ оказывает существенное влияние на динамику пучка. В зависимости от используемого типа изменяется темп ускорения, а также вид удерживающей сепаратрисы. В случае гармонического ВЧ, ускорения происходит смещением фазы равновесной частицы и в разы большее, чем в случае индукционного ускорения при использовании барьерной станции.

Для преодоления критической энергии классически используется процедура скачка критической энергии. Это достигается путем модулирования дисперсионной функции при приближении энергии пучка к значению критической энергии. Данные численного моделирования, также апробированы на экспериментальной установке У-70 в Протвино. Также рассмотрены эффекты влияния высших порядков коэффициента расширения орбиты и простейших моделей импедансов на динамику пучка.

Существенное ограничение на параметры сгустка возникают из-за продольной микроволновой неустойчивости вблизи критической энергии. В конечном счёте это ограничивает величину светимости коллайдерного эксперимента.

Было показано, что для процедуры скачка критической энергии ключевыми являются темп изменения критической энергии по отношению к темпу ускорения от ВЧ станции, а также максимально возможная величина изменения критической энергии во время процедуры.

В третьей главе рассматривается метод вариации критической энергии путем модуляции дисперсионной функции в резонансной структуре. Для этого может вводиться как суперпериодическая модуляция градиентов квадрупольных линз, так и модуляция кривизны орбиты, тем самым изменяя коэффициент сжатия орбиты, который напрямую связан с критической энергией ускорителя

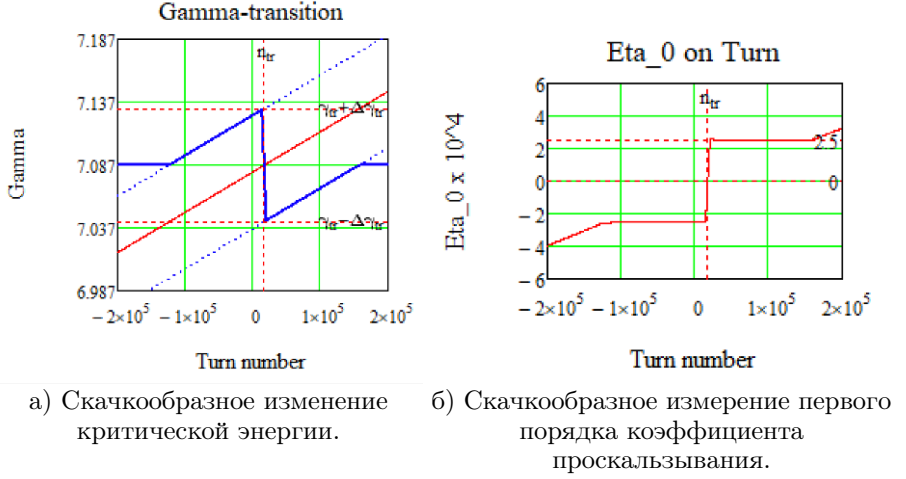


Рис. 3 — Процедура скачка критической энергии для барьерного ВЧ.

$$\alpha = \frac{1}{\gamma_{tr}^2} = \frac{1}{C} \int_0^C \frac{D(s)}{\rho(s)} ds.$$

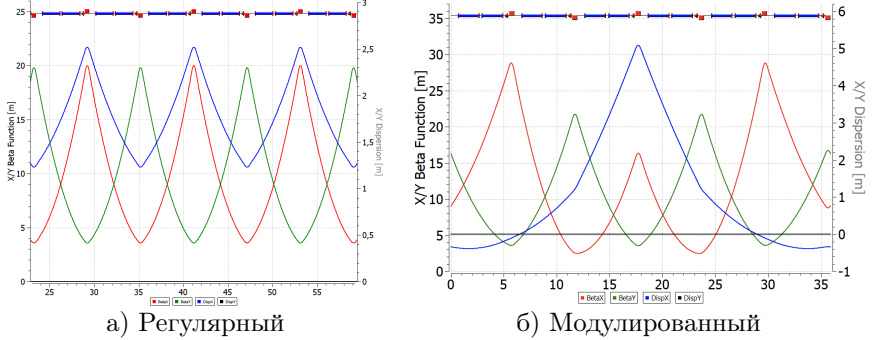


Рис. 4 — Твисс-параметры для различных суперпериодов.

Для 'регулярной' магнитооптической структуры коллайдера NICA рассмотрены варианты модернизации для создания 'резонансной' структуры с поднятой критической энергией. Поскольку установка рассматривалась как стационарная, то это возможно только путем модуляции градиентов в квадрупольных линзах. Для 12 ФОДО ячеек на поворотной

в NICA может быть реализовано 4 суперпериода с набегом частоты бета-тронных колебаний равным 3. Тем самым реализуя резонансное условие, необходимое для модуляции дисперсионной функции.

Поскольку исходная 'регулярная' структура имеет на концах поворотных арок подавители дисперсии в виде 'missing magnet', то это естественным образом должно быть учтено и в подавлении дисперсии для модифицированной структуры. Поэтому рассмотрены схемы подавления дисперсии, оно может быть осуществлено как квадрупольями в двух крайних ФОДО ячейками, так и при использовании только двух семейств квадруполей.

Рассмотрен вопрос подавления натуральной хроматичности, а также нелинейных эффектов в таких структурах. Представлены схемы расстановки секступолей в рассмотренных оптиках.

В четвертой главе рассматривается возможность изучения электрического дипольного момента легких заряженных частиц. Исследовано применение концепции "квази-замороженного" спина для накопительных колец. Рассматривается возможность модернизации колец с сохранением текущего предназначения и расширением исследовательских возможностей установок.

Изучена спиновая динамика в кольце с использованием электростатических, а также элементов с совмещенной функцией, что показано на рис. 5.

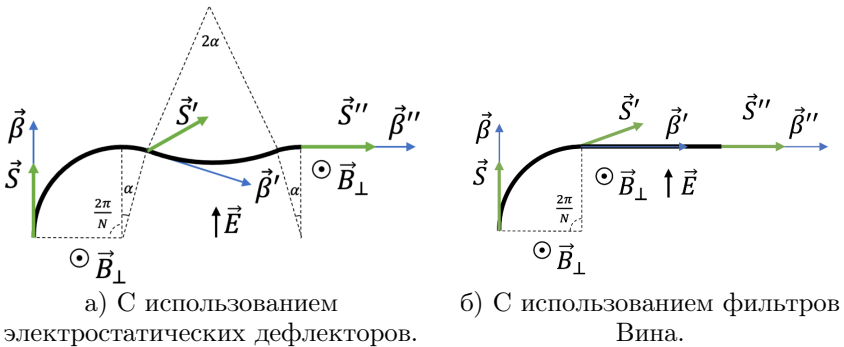


Рис. 5 — Принципиальная схема "квази-замороженной" структуры.

Для проведения эксперимента по поиску ЭДМ становится необходимым использовать альтернативный метод управления спином, концепция «квази-замороженного» спина. В отличие от метода «замороженного» спина, спин больше не сохраняет ориентацию в течение всего периода обращения, а восстанавливает на прямолинейном участке. Это возможно

благодаря использованию элементов как с электрическим, так и с магнитным полями, которые называются фильтрами Вина, на прямом участке. Поворот спина в арке на определенный угол компенсируется соответствующим поворотом в фильтре Вина. Поля подбираются таким образом, чтобы создать нулевую силу Лоренца и не нарушить прямолинейность орбиты. Поляриметры, расположенные после фильтров Вина, будут обнаруживать ту же ориентацию спин-вектора, и для них она будет 'заморожена'.

Приведена структура NICA с обводными каналами bypass для реализации накопительного кольца с фильтрами Вина на прямых участках, без вмешательства в текущую оптику коллайдера. Для обеспечения высокого показателя время когерентности SCT (Spin Coherence Time), порядка 1000 секунд возможно использовать главное кольцо NICA в качестве накопителя, а не в режиме коллайдера. По этой причине, предлагается установить дополнительные обводные каналы bypass. Таким образом, можно создать совершенно новую регулярную структуру, что является большим преимуществом, не требующей значительной перестройки комплекса и затрат, при всём при этом, позволит задействовать NICA в различных экспериментах.

Текущая структура синхротрона Nuclotron не предполагает программу исследований ЭДМ. Для расширения возможностей Nuclotron в качестве самостоятельной машины рассматривается возможность модернизации. Наибольший интерес может представлять структура, способная одновременно быть использована для изучения ЭДМ как дейтронов, так и протонов. С точки зрения орбитальной динамики протон и дейтрон практически идентичны, масса дейтрона, вдвое больше, чем у протона. Спиновая же динамика отличается достаточно существенно для разного сорта частиц.

Рассмотрена «квази-замороженная» структура с электростатическими дефлекторами и фильтрами Вина. Показано, что для компенсации отклонения спина в магнитной арке, должны быть использованы элементы, отклоняющие на одинаковый угол, то есть с одинаковой кривизной как электрического, так и магнитного полей. При этом тип отклоняющего элемента не имеет значения, это может быть как фильтр Вина, так и электростатический дефлектор. Таким образом, при неизменной магнитной арке, длина фильтра Вина окажется меньше на суммарную длину киккеров, так как в нём совмещены функции электростатического дефлектора и киккера в один элемент. Отдельно для протонов показано, длина компенсирующих элементов больше длины магнитной арки. И для исследования протонов может быть использована та же структура, но с повернутыми на 180 градусов фильтрами Вина при меньшей энергии [A3].

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе анализа внутрипучкового рассеяния, а также стохастического охлаждения показано, что варьирование коэффициента проскальзывания (slip-factor) в резонансной структуре способно увеличить эффективность стохастического охлаждения. Особенно эффективным может быть использование комбинированной структуры. Однако, эффекты ВПР для приведенных структур оказались в несколько раз большими и в конечном счёте недостаточными, делая предпочтительной регулярную структуру для тяжелоионного эксперимента с минимально модулированным Твисс-функциями;
2. Для коллайдерных экспериментов с поляризованными протонами резонансная структура позволяет поднять критическую энергию выше энергии эксперимента, путем искажения дисперсионной функции. Такой подход не требует существенных затрат и делает возможным реализацию дуальной структуры для двух полноценных физических программ;
3. Численные исследования показали, что прохождение критической энергии может вызывать нестабильность продольного фазового движения. Использование процедуры скачка критической энергии может быть использовано для преодоления этой проблемы. Получены экспериментальные данные процедуры скачка критической с синхротрона У-70, которые находятся в соответствии с проведенными численными оценками с учетом высших порядков разложения коэффициента уплотнения орбиты и импедансов для различных интенсивностей сгустка;
4. Использование процедуры скачка критической энергии может быть ограничено его величиной, а также для темпом изменения градиентов в квадруполях арки по сравнению с темпом ускорения пучка. Рассмотрено различие применения гармонического и барьерного ВЧ на особенности рассмотренного скачка. Приведены оценки продольной микроволновой неустойчивости, показывающие существенное ограничение на параметры сгустка.
5. Исследована спиновая динамика для возможности изучения ЭДМ заряженных частиц. Реализована концепция квази-замороженного спина с введением обводных каналов и сохранением изначального предназначения установки. На прямых участках предлагается расположение фильтров Вина для компенсации поворота спина под действием МДМ в магнитной арке.
6. Рассмотрена модернизированная структура синхротрона Nuclotron с сохранением функции бустера поляризованного пучка в коллайдер NICA. В предложенных 8/16-периодических



структурах возможно проведение независимых прецизионных экспериментов по исследованию ЭДМ дейтрона и протона, а также осуществлению поиска аксиона в режиме сканирующей антенны.

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. Features of dual-purpose structure for heavy ion and light particles / S. D. Kolokolchikov [и др.] // Nuclear Science and Techniques. — 2025. — Т. 36, № 11. — С. 210. — URL: <https://doi.org/10.1007/s41365-025-01791-4>.
- A2. Formation of Polarized Proton Beams in the NICA Collider-Accelerator Complex / E. M. Syresin [и др.] // Physics of Particles and Nuclei. — 2021. — 1 сент. — Т. 52, № 5. — С. 997–1017. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063779621050051>.
- A3. Колокольчиков С.Д., С. Ю. Магнито-оптическая Структура Коллайдера NICA с Высокой Критической Энергией / С. Ю. Колокольчиков С.Д. // Ядерная физика и инжиниринг. — 2022. — Т. 13, № 1. — С. 27–36. — URL: <https://doi.org/10.56304/S2079562922010171>.
- A4. С.Д., К. Особенности Прохождения и Повышения Критической Энергии Синхротрона / К. С.Д., С. Ю.В. // Ядерная физика и инжиниринг. — 2023. — Т. 14, № 6. — С. 587–592. — URL: <https://doi.org/10.56304/S2079562923010153>.
- A5. Kolokolchikov, S. D. Transition Energy Crossing in Harmonic RF at Proton Synchrotron U-70 / S. D. Kolokolchikov, Y. V. Senichev, V. A. Kalinin // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Т. 87, № 9. — С. 1355–1362. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106377882410020X>.
- A6. Transition Energy Crossing in NICA Collider of Polarized Proton Beam in Harmonic and Barrier RF / S. D. Kolokolchikov [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Т. 87, № 10. — С. 1449–1454. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824100211>.
- A7. Longitudinal Dynamic in NICA Barrier Bucket RF System at Transition Energy Including Impedances in BLonD / S. Kolokolchikov [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — 1 июня. — Т. 21, № 3. — С. 419–424. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477124700389>.
- A8. Acceleration and crossing of transition energy investigation using an RF structure of the barrier bucket type in the NICA accelerator complex / S. Kolokolchikov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — 1 янв. — Т. 2420, № 1. — С. 012001. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012001>.

- A9. Transition Energy Crossing of Polarized Proton Beam at NICA / S. Kolokolchikov [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — 1 июня. — Т. 87, № 3. — С. 212–215. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700054>.
- A10. Quasi-frozen spin concept of magneto-optical structure of NICA adapted to study the electric dipole moment of the deuteron and to search for the axion / Y. Senichev [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — 1 янв. — Т. 2420, № 1. — С. 012052. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012052>.
- A11. Consideration of an Adapted Nuclotron Structure for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei / Y. V. Senichev [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — 1 дек. — Т. 86, № 11. — С. 2434–2438. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110418>.
- A12. Quasi-frozen spin for both deuteron and proton beam at periodic EDM storage ring lattice / S. Kolokolchikov [и др.] // Nuclear Science and Techniques. — 2025.
- A13. Проектирование Каналов Вурасс в Ускорительном Комплексе NICA для Экспериментов с Поляризованными Пучками по Поиску ЭДМ / К. С.Д. [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. — 2024. — Т. 15, № 5. — С. 457–463. — URL: <https://doi.org/10.56304/S2079562924050257>.
- A14. ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search / S. Kolokolchikov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — 1 янв. — Т. 2687, № 2. — С. 022026. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022026>.
- A15. NICA Facilities for the Search for EDM Light Nuclei / Y. Senichev [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — 1 авг. — Т. 87, № 4. — С. 436–441. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700534>.
- A16. Spin Coherence and Betatron Chromaticity of Deuteron Beam in “Quasi-Frozen” Spin Regime / S. Kolokolchikov [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — 1 дек. — Т. 86, № 12. — С. 2684–2688. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106377882311025X>.
- A17. Spin coherence and betatron chromaticity of deuteron beam in NICA storage ring / S. Kolokolchikov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — 1 янв. — Т. 2687, № 2. — С. 022027. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022027>.

## Список литературы

1. *Fuller, G. M.* The Quark - Hadron Phase Transition in the Early Universe: Isothermal Baryon Number Fluctuations and Primordial Nucleosynthesis / G. M. Fuller, G. J. Mathews, C. R. Alcock // Phys. Rev. D. — 1988. — Т. 37. — С. 1380. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.37.1380>.
2. From hadrons to quarks in neutron stars: a review / G. Baym [и др.] // Rept. Prog. Phys. — 2018. — Т. 81, № 5. — С. 056902. — arXiv: [1707.04966](https://arxiv.org/abs/1707.04966) [[astro-ph.HE](#)]. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aaae14>.
3. *Apolinário, L.* Heavy quarks and jets as probes of the QGP / L. Apolinário, Y.-J. Lee, M. Winn // Prog. Part. Nucl. Phys. — 2022. — Т. 127. — С. 103990. — arXiv: [2203.16352](https://arxiv.org/abs/2203.16352) [[hep-ph](#)]. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2022.103990>.
4. *Robert-Demolaize, G.* The Luminosity Upgrade at RHIC / G. Robert-Demolaize // 6th International Particle Accelerator Conference. — 2015. — FRXC1. — URL: <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-FRXC1>.
5. *Martini, M.* Intrabeam Scattering / M. Martini, F. Antoniou, Y. Papaphilippou // ICFA Beam Dyn. Newslett. — 2016. — Т. 69. — С. 38–59. — URL: <https://inspirehep.net/literature/1507570>.
6. An investigation of the spin structure of the proton in deep inelastic scattering of polarised muons on polarised protons / J. Ashman [и др.] // Nuclear Physics B. — 1989. — Т. 328, № 1. — С. 1–35. — URL: [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(89\)90089-8](https://doi.org/10.1016/0550-3213(89)90089-8).
7. *Liu, K.-F.* Status on lattice calculations of the proton spin decomposition / K.-F. Liu // AAPPs Bulletin. — 2022. — Т. 32, № 1. — С. 8. — URL: <https://doi.org/10.1007/s43673-022-00037-4>.
8. Determination of deuteron beam polarizations at COSY / D. Chiladze [и др.] // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2006. — Т. 9. — С. 050101. — arXiv: [nuclex/0511052](https://arxiv.org/abs/nuclex/0511052). — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.9.050101>.
9. *Kunne, R. A.* Spin physics at saturne 2 / R. A. Kunne // Adriatico Research Conference on Polarization Dynamics in Nuclear and Particle Physics. — 03.1992. — URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE93633260.xhtml>.
10. Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in  $\vec{p} + \vec{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV / A. Adare [и др.] // Phys. Rev. D. — 2014. — Июль. — Т. 90, вып. 1. — С. 012007. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.012007>.

11. Prospects for spin physics at RHIC / G. Bunce [и др.] // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 2000. — Т. 50. — С. 525–575. — arXiv: [hep-ph/0007218](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0007218). — URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.50.1.525>.
12. Ng, K. Y. Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities / K. Y. Ng // U.S. Particle Accelerator School (USPAS 2002). — 04.2002. — URL: <https://doi.org/10.1142/5835>.
13. Lee, S.-y. Accelerator Physics (Fourth Edition) / S.-y. Lee. — World Scientific Publishing Company, 2018. — URL: <https://doi.org/10.1142/11111>.
14. Sakharov, A. D. Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe / A. D. Sakharov // Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 1967. — Т. 5. — С. 32–35. — URL: <https://doi.org/10.1070/PU1991v034n05ABEH002497>.
15. Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K_2^0$  Meson / J. H. Christenson [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 1964. — ИЮЛЬ. — Т. 13, вып. 4. — С. 138–140. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.138>.
16. Lee, T. D. A Theory of Spontaneous  $T$  Violation / T. D. Lee // Phys. Rev. D. — 1973. — АВГ. — Т. 8, вып. 4. — С. 1226–1239. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.8.1226>.
17. Höcker, A. CP Violation and the CKM Matrix / A. Höcker, Z. Ligeti // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 2006. — Т. 56, Volume 56, 2006. — С. 501–567. — URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.56.080805.140456>.
18. Baluni, V. CP-nonconserving effects in quantum chromodynamics / V. Baluni // Phys. Rev. D. — 1979. — АПР. — Т. 19, вып. 7. — С. 2227–2230. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.19.2227>.
19. Pretz, J. Electric Dipole Moment (EDM) searches for leptons and hadrons / J. Pretz // PoS. — 2024. — Т. HQL2023. — С. 010. — URL: <https://doi.org/10.22323/1.462.0010>.
20. Purcell, E. M. On the Possibility of Electric Dipole Moments for Elementary Particles and Nuclei / E. M. Purcell, N. F. Ramsey // Phys. Rev. — 1950. — ИЮНЬ. — Т. 78, вып. 6. — С. 807–807. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.78.807>.
21. Smith, J. H. Experimental Limit to the Electric Dipole Moment of the Neutron / J. H. Smith, E. M. Purcell, N. F. Ramsey // Phys. Rev. — 1957. — ОКТ. — Т. 108, вып. 1. — С. 120–122. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.108.120>.

22. Measurement of the Permanent Electric Dipole Moment of the Neutron / C. Abel [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Февр. — Т. 124, вып. 8. — С. 081803. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.081803>.
23. A New method of measuring electric dipole moments in storage rings / F. J. M. Farley [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2004. — Т. 93. — С. 052001. — arXiv: [hep-ex/0307006](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0307006). — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.052001>.
24. Quasi-frozen Spin Method for EDM Deuteron Search / Y. Senichev [и др.] // 6th International Particle Accelerator Conference. — 2015. — MOPWA044. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2015/doi/JACoW-IPAC2015-MOPWA044.html>.
25. *Nikolaev, N. N.* Spin of Protons in NICA and PTR Storage Rings as an Axion Antenna / N. N. Nikolaev // JETP Letters. — 2022. — Т. 115, № 11. — С. 639–643. — URL: <https://doi.org/10.1134/S0021364022600653>.
26. New physics searches with heavy-ion collisions at the CERN Large Hadron Collider / R. Bruce [и др.] // J. Phys. G. — 2020. — Т. 47, № 6. — С. 060501. — arXiv: [1812.07688](https://arxiv.org/abs/1812.07688) [[hep-ph](https://arxiv.org/abs/hep-ph)]. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6471/ab7ff7>.
27. The RHIC design overview / H. Hahn [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Т. 499. — С. 245–263. — URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01938-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01938-1).
28. Reliability of J-PARC accelerator system over the past decade / K. Yamamoto [и др.] // JPS Conf. Proc. / под ред. N. Saito. — 2021. — Т. 33. — С. 011016. — URL: <https://doi.org/10.7566/JPSCP.33.011016>.
29. Status of NICA Complex / A. V. Butenko [и др.] // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2024. — Т. 21, № 3. — С. 212–217. — URL: <https://doi.org/10.1134/S154747712470002X>.
30. *Ladygin, V. P.* Spin Physics Detector at NICA / V. P. Ladygin // JPS Conf. Proc. — 2022. — Т. 37. — С. 011012. — arXiv: [2203.14704](https://arxiv.org/abs/2203.14704) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/hep-ex)]. — URL: [doi.org/10.7566/JPSCP.37.011012](https://doi.org/10.7566/JPSCP.37.011012).
31. ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ОБЪЕКТА «КОМПЛЕКС NICA» : тех. отч. / В. Матвеев [и др.] ; ОИЯИ. — 28.12.2018. — URL: [https://nica.jinr.ru/documents/TDR\\_spec\\_Fin0\\_for\\_site\\_short.pdf](https://nica.jinr.ru/documents/TDR_spec_Fin0_for_site_short.pdf).
32. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / K. Abraamyan [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2011. — Т. 628, № 1. — С. 99–102. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.293> ; VCI 2010.



*Колокольчиков Сергей Дмитриевич*

Исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе  
NICA-Nuclotron в приложении к изучению электрического дипольного момента  
лёгких ядер

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

