

На правах рукописи

Колокольчиков Сергей Дмитриевич

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

1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Сеничев Юрий Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел ускорительного комплекса, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Мочалов Василий Вадимович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А.Логонова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"», отделение экспериментальной физики, лаборатория поляризационных экспериментов, ведущий научный сотрудник.

Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, заместитель руководителя Комплекса по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности. Данная работа посвящена исследованию поведения тяжёлых ионов и поляризованных пучков лёгких заряженных частиц в ускорительных и накопительных установках с целью расширения физической программы исследований в комплексе NICA-Nuclotron.

На ранних этапах формирования Вселенная находилась в состоянии экстремально плотной и горячей материи, известной как кварк-глюонная плазма [1]. Подобное состояние материи наблюдается в недрах нейтронных звезд [2] и 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 получения статистически значимых результатов в коллайдерном эксперименте необходимо накопление достаточного объёма экспериментальных данных, что количественно характеризуется интегральной величиной — светимостью. Обеспечение её высокого уровня является ключевым требованием. Для исследования кварк-глюонной плазмы светимость находится на уровне порядка $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для тяжелоионного пучка [4]. Достижение таких рекордных значений требует тонкой настройки всех систем ускорителя, что может быть связано с большими временными затратами. При ускорении тяжёлых ионов высокая зарядность и интенсивность пучка накладывают серьёзные ограничения на параметры сгустка из-за внутривидового рассеяния (ВВР) [5]. Для преодоления этих проблем, структура должна обладать высоким временем ВВР и содержать специальные установки стохастического и электронного охлаждения.

Другой нерешенной проблемой современной физики остается вопрос о распределении спина внутри протона, так называемый "*спиновый кризис протона*". В 1989 году коллаборация EMC (European Muon Collaboration) [6] показала, что вклад кварков в спин протона составляет небольшую часть и по оценкам находится на уровне около 30% [7]. Исследования этого вопроса проводились в коллайдерных экспериментах с использованием поляризованных протонных и дейтронных пучков: при низких энергиях – на установках COSY-ANKE [8] и SATURNE [9], а при высоких энергиях на RHIC [10].

Изучение спиновой структуры протонов и дейтронов требует подготовки и ускорения поляризованных пучков, обеспечивающих светимость порядка $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [11]. Поляризация пучка является дополнительной степенью свободы, вследствие чего определённые сечения рассеяния приобретают зависимость от поляризации сталкивающихся сгустков. Поскольку отношение заряда к массе для протона почти в два раза отличается от соответствующего значения для тяжёлых ионов, максимальная энергия эксперимента кратно увеличивается.

В структуре, оптимальной для тяжёлоионного эксперимента, критическая энергия подобрана таким образом, что столкновение происходит до достижения её значения, и, следовательно, никаких проблем с её преодолением не возникает. Критическая энергия является важным параметром ускорительной установки, и при разработке структуры этому вопросу уделяется особое внимание. Для протонов прохождение критической энергии становится ключевым фактором, ограничивающим параметры сгустка и требующим принятия дополнительных мер для её преодоления.

При ускорении протонного пучка длительное нахождение вблизи критической энергии или пересечение этой области существенно влияет на параметры и стабильность пучка. В такой ситуации нарушается адиабатичность продольного движения, усиливаются нелинейные эффекты, а затухание Ландау уже не способно эффективно подавлять возникающие возмущения. Дополнительное воздействие оказывают пространственный заряд и другие импедансы, способствуя развитию продольной микроволновой неустойчивости, нестабильности отрицательной массы и поперечной неустойчивости типа «голова–хвост» (head–tail) [12; 13]. При малой интенсивности влияние критической энергии на параметры сгустка незначительно. Проблема становится актуальной для интенсивных пучков с числом частиц порядка 10^{10} – 10^{12} . Высокая интенсивность в коллайдерных экспериментах определяется требованиями по достижению большой светимости, однако любое увеличение эмиттанса приводит к её снижению. Степень проявления указанных эффектов определяется временем пребывания пучка вблизи критической энергии, поэтому применяются методы быстрого пересечения или поднятия критической энергии.

Известная проблема физики состоит в объяснении барионной асимметрии, то есть наблюдаемого преобладания материи над антиматерией. Существующие законы физики до сих пор не способны полностью объяснить этот дисбаланс. В работе 1967 год А. Д. Сахаров сформулировал общие необходимые условия для возникновения 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 наличие подобного эффекта при рассмотрении распада сигма-гиперона Σ^+ и его античастицы $\bar{\Sigma}^+$. Позднее, в 1964 году, Д. Кронин и В. Фитч экспериментально обнаружили нарушение CP-инвариантности слабого взаимодействия в распаде нейтральных каонов K_2^0 на два пиона π^+ , π^- [15], за что в 1980 году были удостоены Нобелевской премии по физике.

В современной Стандартной модели частиц нарушаются P-[16] и CP-симметрии. Источником CP-нарушения является наличие комплексной фазы в

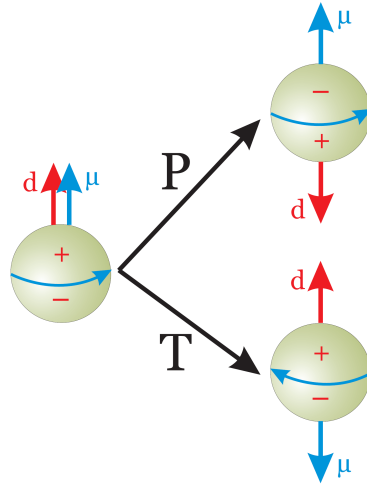


Рис. 1 — Схематическое изображение нарушение P- и T-симметрии ненулевым электрическим дипольным моментом.

матрице смешивания кварков Кабиббо-Кабаяси-Маскавы для слабых взаимодействий [17] и коэффициента θ_{QCD} в лагранжиане квантовой хромодинамики [18], однако в сильных взаимодействиях CP-нарушений не обнаружено. Согласно CPT-теореме, CP-инвариантность эквивалентна T-инвариантности. Ненулевой электрический дипольный момент (ЭДМ) элементарных частиц может быть источником такого нарушения. ЭДМ является фундаментальным свойством материи, обусловленным неоднородностью распределения заряда внутри частицы. Поскольку ЭДМ представляется полярным вектором, а не псевдовектором, для него нарушается как P-, так и T-инвариантность, что показано на рис. 1. Величина ЭДМ в Стандартной модели мала для экспериментального детектирования и оценивается на уровне $|d_n| < 10^{-30} - 10^{-32} e \cdot \text{см}$ для нейтрона [19]. Возможность существования ЭДМ была впервые обсуждена в заметке Перселла и Рэмси в 1950 году [20], однако ненулевой ЭДМ пока не обнаружен. Суперсимметричные теории (SUSY) предсказывают ЭДМ на уровне $|d_n| < 10^{-27} - 10^{-29} e \cdot \text{см}$ для нейтрона, что создаёт реальные перспективы его экспериментального обнаружения. Такие точности не достигнуты: первые существенные ограничения были установлены Н. Рэмси и коллегами $|d_n| < 5 \times 10^{-20} e \cdot \text{см}$ (90% C.L.) [21], а современное ограничение, полученное в эксперименте nEDM, составляет $|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} e \cdot \text{см}$ (90% C.L.) [22].

Исследование ЭДМ осуществляется, согласно уравнению Т-БМТ, по его влиянию на поведение поляризации в электромагнитных полях. Для нейтрона и нейтральных атомов положение сохраняется при воздействии внешних магнитных и электрических полей. В случае заряженных частиц движение определяется силой Лоренца, что требует применения ускорительных установок, обеспечивающих длительное накопление пучка с заданными параметрами и выполняющих

роль накопительного кольца. Наиболее перспективным направлением является изучение ЭДМ протона и дейтрона. Для этого создаются поляризованные пучки с максимально близкими свойствами в плане прецессии спина во внешних полях. Это позволяет сохранять поляризацию вдоль выбранной оси, при этом спины частиц прецессируют с одинаковой частотой. Для измерения величины ЭДМ на уровне $10^{-29} e \cdot \text{см}$ необходимо удерживать пучок на орбите с сохранением поляризации в течение времени порядка ~ 1000 с, с последующим анализом рассеяния на мишени поляриметра. Влияние магнитного дипольного момента (МДМ) при этом должно быть подавлено до величины, меньшей сигнала ЭДМ. Такая техника впервые была предложена в Брукхейвенская Национальная Лаборатория (BNL) и получила название "замороженный спин"[23]. Позднее была предложена концепция "квази-замороженного спина"[24], в которой осуществляется пространственное разделение электрического и магнитного полей, а условия подавления влияния МДМ выполняются за полный оборот по кольцу.

Ещё одним перспективным направлением исследований в рамках программы спиновой физики является поиск аксиноподобных частиц. Изучается резонанс, возникающий при совпадении $g - 2$ частоты прецессии спина вокруг ведущего магнитного поля ускорителя с частотой колебаний аксионного поля. В этом случае ускоритель выполняет роль широкополосной зондирующей антенны по частоте спиновой прецессии [25].

Приведённые вопросы фундаментальной физики требуют детального изучения и исследуются с помощью ускорительных установок. Такие установки обеспечивают достижение высоких энергий частиц и предельной точности измерений. Практика использования подобных комплексов распространена в мировых ядерных центрах: CERN [26], BNL [27], J-PARC [28].

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) является современным центром, оснащённым передовой материально-технической базой и формируемым 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 проведения различных экспериментов. MPD-детектор используется 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 ранее не применялась для целенаправленных исследований поляризованных адронных столкновений. Особый интерес представляет возможность изучения поляризованных дейтронов. Таким образом, структура коллайдера должна обеспечивать ускорение как тяжёлых ионов, так и лёгких частиц, при этом требования к удержанию пучков различаются в зависимости от типа частиц.

Исследования направлены на расширение существующей физической программы, дополняя её новым направлением исследований с поляризованными пучками. В работе ускоритель выступает как экспериментальная установка, позволяя исследовать процессы в пучке непосредственно в комплексе Nuclotron-NICA. Предложенные подходы применимы также на других аналогичных установках без потери общности.

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

1. Разработать дуальную магнитооптическую структуру коллайдера, отвечающую возможности работы с тяжёлыми ионами и лёгкими частицами без изменения оборудования кольца;
2. Исследовать регулировку критической энергии для поляризованного пучка в структуре с модуляцией дисперсионной функции;
3. Исследовать методом численного моделирования динамику пучка лёгких частиц с учётом высших порядков коэффициента уплотнения орбиты в структуре с резонаторами гармонического и барьерного типов;
4. Исследовать поведение динамической апертуры при компенсации хроматичности в процессе скачка критической энергии;
5. Определить особенности поведения поляризации пучка при пересечении критической энергии;
6. Исследовать особенности поведения пучка в режиме квази-замороженного спина с целью создания установки для изучения ЭДМ протона и дейтрона.

Научная новизна:

1. Впервые предложена дуальная структура коллайдера NICA для тяжёлых ионов и лёгких частиц с подавителями дисперсии на краях арок;
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. Разработаны 8- и 16-периодичные структуры Nuclotron с квази-замороженным спином для выделения ЭДМ сигнала лёгких ядер;

5. Впервые предложена модификация структуры коллайдера NICA с обводными каналами, обеспечивающими возможность проведения экспериментов по поиску ЭДМ дейтрона методом квази-замороженного спина.

Практическая значимость:

Проведённый анализ динамики пучка вблизи критической энергии позволил определить её влияние на устойчивость движения поляризованных протонных пучков и установить оптимальные параметры процедуры её преодоления.

Разработанная дуальная структура обеспечивает эффективную работу как с тяжёлыми ионами, так и с лёгкими частицами, что делает возможным проведение двух направлений исследований в одном ускорительном комплексе: экспериментов по изучению кварк-глюонной плазмы и исследований поляризованных пучков в симметричных и асимметричных коллайдерных режимах.

Расширена применимость метода резонансных структур для случаев с нарушенной периодичностью дисперсионной функции на арках.

Для поляризованных частиц адаптирован метод квази-замороженного спина для коллайдера NICA. Разработана магнитооптическая схема обводных каналов с фильтрами Вина, обеспечивающая реализацию экспериментов по измерению электрического дипольного момента дейтрона без существенной модификации базовой структуры ускорителя.

Предложенные решения могут быть использованы не только на NICA, но и на Nuclotron с сохранением функций бустера для поляризованных пучков, что создаёт возможность проведения независимых экспериментов по поиску ЭДМ и аксиона в рамках программы спиновой физики комплекса NICA–Nuclotron.

Методология и методы исследования. Основными методами исследования являются математическое и компьютерное моделирование, численный эксперимент. Для исследования были использованы программы для расчёта поперечной динамики: MAD-X [33], OPTIM [34], BMAD [35], продольной динамики: BLong [36], спин-орбитальной динамики: COSY Infinity [37].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель оптимизированной дуальной структуры комплекса NICA–Nuclotron для тяжёлых ионов с учётом внутripучкового рассеяния и для лёгких частиц с повышенной критической энергией, превышающей энергию эксперимента [A1];
2. Метод подавления дисперсии резонансной магнитооптической структуры с отсутствующими магнитами на основе двух семейств квадруполей и крайних ячеек поворотной арки [A2; A3];
3. Рассчитано и экспериментально подтверждено на примере ускорителя У-70 влияние на динамику пучка высших порядков разложения коэффициента уплотнения орбиты по импульсу и продольного импеданса

- вблизи критической энергии для поляризованных пучков протонов [A4; A5];
4. На основе сравнительного анализа использования гармонического и барьерного ВЧ при скачке критической энергии показана возможность сокращения расстояния между барьерами с учётом продольной микроволновой неустойчивости [A6—A8];
 5. Предложены модернизированные 8- и 16-периодные структуры Nuclotron с квази-замороженным спином для экспериментов по измерению ЭДМ лёгких ядер при сохранении функций бустера в коллайдер NICA [A9; A10];
 6. Методика сохранения поляризации и выделения ЭДМ-сигнала в пучке дейтронов в структуре коллайдера NICA с обводными каналами на основе метода фильтров Вина [A11—A15].

Достоверность полученных результатов обеспечивается сочетанием аналитических и численных методов, проверкой их корректного применения и сопоставлением с известными данными в литературе. Результаты диссертации были апробированы на научных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

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. Долгопрудный, Россия;
- XXVII и XXVIII Всероссийская 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 конференции 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 ИЯИ РАН и ИФВЭ. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 11 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.

В **первой главе** особое внимание уделено процессам внутривпучкового рассеяния и роли критической энергии, влияющим на динамику многозарядных тяжёлых ионов и лёгких ядер. С этой целью рассматривается дуальная магнитооптическая структура, адаптируемая для обоих типов экспериментов.

Для тяжёлых ионов ключевым фактором становится внутривпучковое рассеяние. Разогрев пучка приводит к росту поперечного эмиттанса и продольного разброса по импульсам. Для стабилизации параметров используются методы электронного и стохастического охлаждения. Рассматривается стабильность пучка с точки зрения времени жизни пучка, в стационарном, независимом, от времени случае параметры пучка при наличии внутривпучкового рассеяния и охлаждения определяются как

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

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

Использование стохастического охлаждения оказывается зависимо от продольного смещения частиц относительно референсной и такого параметра как коэффициента скольжения η . 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 ВПР и в конечном счёте не скомпенсировать его.

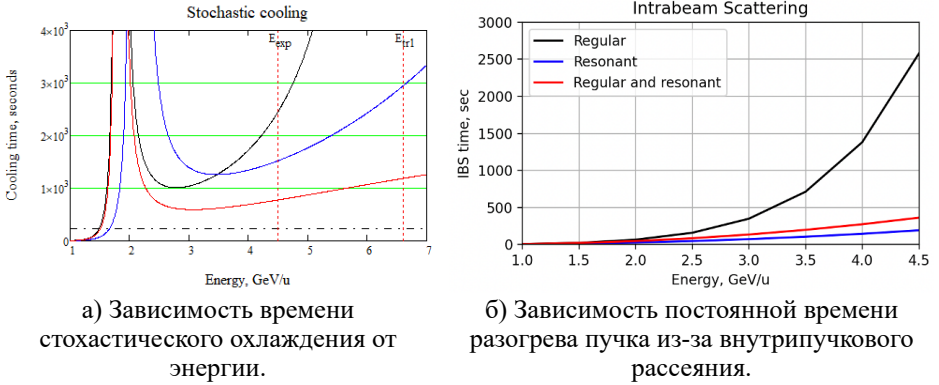


Рис. 2 — Сравнение времени разогрева пучка и охлаждения. Черная линия — 'регулярная', синяя — 'резонансная', красная — 'комбинированная' структура, прерывистая — идеальный случай.

В случае лёгких частиц, таких как протоны, соотношение заряда к массе примерно в два раза выше, чем у тяжёлых ионов, что пропорционально повышает энергию эксперимента. При этом критическая энергия остаётся неизменной, поскольку определяется магнитооптической структурой установки. Для устойчивого продольного движения необходимо её преодоление. Одним из эффективных способов является применение резонансной структуры для повышения критической энергии.

Во **второй главе** рассмотрено влияние высших порядков разброса по импульсам и продольных импедансов при пересечении критической энергии, а также метод скачка критической энергии для различных ускоряющих потенциалов. Для этого произведено математическое моделирование процесса, описываемое 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. Данная процедура осуществляется модулированием дисперсионной функции при приближении энергии пучка к критическому значению. Результаты численного моделирования сопоставлены с экспериментами на ускорителе У-70 (Протвино). Также проанализировано влияние высших порядков расширения орбиты и простейших моделей импедансов на динамику пучка.

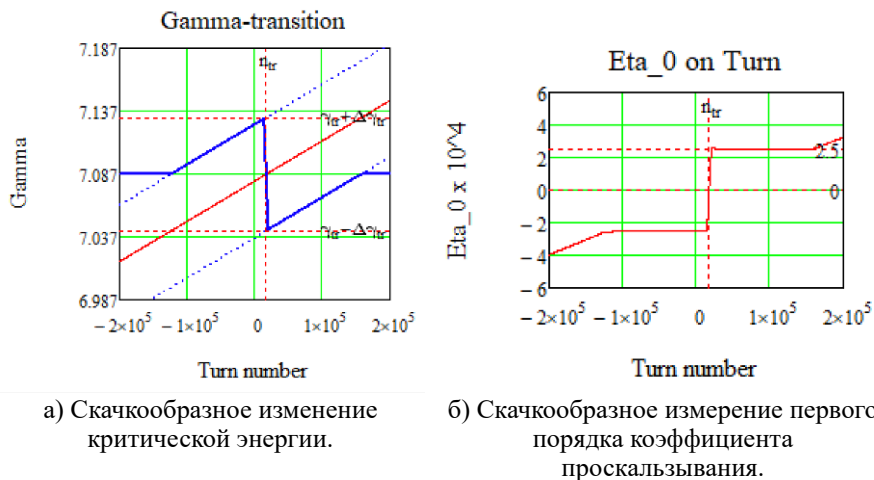


Рис. 3 — Процедура скачка критической энергии для барьерного ВЧ.

Продольная микроволновая неустойчивость вблизи критической энергии накладывает ограничения на параметры сгустка и светимость 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 вариация критической энергии в резонансной структуре. Для этого используется суперпериодическая модуляция

градиентов квадрупольных линз или модуляция кривизны орбиты, что приводит к изменению коэффициента уплотнения орбиты — величины, напрямую связанной с критической энергией ускорителя

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

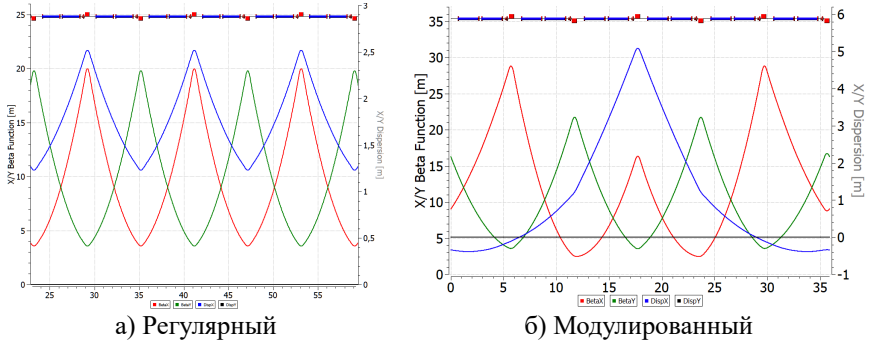


Рис. 4 — Твисс-параметры для различных суперпериодов.

Для регулярной магнитооптической структуры коллайдера NICA проанализированы варианты модернизации, позволяющие повысить критическую энергию. Поскольку установка является стационарной, реализация резонансной структуры возможна за счёт модуляции градиентов в квадрупольных линзах. Для 12 ФОДО ячеек на поворотной в NICA может быть реализовано 4 суперпериода с набегом частоты бетатронных 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 при подавлении дисперсии в модифицированной структуре. Поэтому рассмотрены схемы подавления дисперсии, что может быть осуществлено как квадрупольями в двух крайних ФОДО ячейками, так и при использовании только двух семейств квадрупольей.

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

В четвертой главе рассматривается возможность изучения электрического дипольного момента лёгких заряженных частиц. Исследована концепция квази-замороженного спина для накопительных колец, позволяющая модернизировать кольца без изменения их базового назначения и расширить экспериментальные возможности.

Проанализирована спиновая динамика в кольце с использованием электростатических элементов и элементов с комбинированной функцией, что показано на рис. 5.

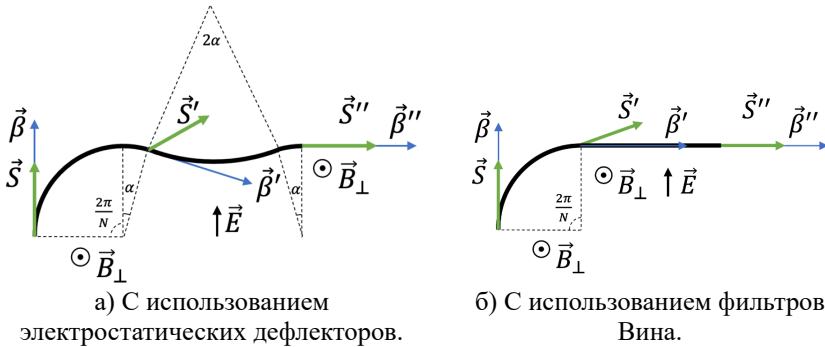


Рис. 5 — Принципиальная схема "квази-замороженной" структуры.

Для экспериментов по поиску ЭДМ применяется альтернативный метод управления спином — квази-замороженный спин. В отличие от метода замороженного спина, спин-вектор не сохраняет ориентацию на всём обороте, а восстанавливается на прямолинейном участке. Это достигается использованием элементов с электрическим и магнитным полями — электростатического deflectора с магнитным киккером или фильтра Вина. Поворот спина в арке компенсируется соответствующим поворотом в компенсирующем элементе. Поля подбираются так, чтобы создать нулевую силу Лоренца и сохранить прямолинейность орбиты. Поляриметры после компенсации фиксируют ту же ориентацию спин-вектора, которая для них оказывается «замороженной».

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 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 повёрнутыми на π фильтрами Вина при меньшей энергии.

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

1. На основе анализа внутриволнового 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 физических программ;
3. В новой конфигурации кольца проведено численное моделирование продольной динамики с учётом высших порядков разложения по импульсу и влияния импеданса. Экспериментальные данные пересечения критической энергии на синхротроне У-70 подтвердили соответствие численных оценок для различных интенсивностей сгустка;
4. Использование процедуры скачка критической энергии ограничено его величиной, а также темпом изменения градиентов в квадрупольях арки по сравнению с темпом ускорения пучка. Рассмотрено влияние гармонического и барьерного ВЧ на особенности рассмотренного скачка. Приведены оценки продольной микроволновой неустойчивости, показывающие существенное ограничение на параметры сгустка;

5. Исследована спиновая динамика для изучения ЭДМ заряженных частиц. Показана потенциальная возможность реализации концепции квази-замороженного спина с введением обводных каналов и сохранением исходного назначения установки на основе моделирования. На прямых участках предложено использовать фильтры 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-периодичных структурах возможно проведение независимых прецизионных экспериментов по исследованию ЭДМ дейтрона и протона.

Проведенные исследования показывают особенности применения ускорительной техники для фундаментальных экспериментов.

В качестве ближайших исследований влияния критической энергии на параметры пучка предполагается изучение метода скачка критической энергии, включающее детальное рассмотрение продольной динамики с учётом точных данных по импедансу кольца с использованием экспериментально измеренных данных на действующем коллайдере.

Одновременно для будущей реализации концепции дуальной структуры для легких и тяжелых частиц планируется введение схемы раздельного питания квадрупольей на установке коллайдера NICA для создания резонансной структуры с целью исключения прохождения критической энергии для протонного пучка во всем диапазоне энергий ускоренного пучка.

В части поляризованных пучков важной задачей, вытекающей из результатов диссертации, будет применение методики измерения ЭДМ. Она включает в себя вопрос достижения высокого времени когерентности, необходимой для детектирования сигнала с использованием поляриметра.

В части развития магнитооптической структуры комплекса NICA-Nuclotron будут рассмотрены возможности создания отдельного кольца с замороженным или квази-замороженным спином.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Features of dual-purpose structure for heavy ion and light particles / S. D. Kolokolchikov, Y. V. Senichev, A. E. Aksentyev, A. A. Melnikov // Nuclear Science and Techniques. — 2025. — Т. 36, № 11. — С. 210. — URL: <https://doi.org/10.1007/s41365-025-01791-4>.
- A2. Магнито-оптическая Структура Коллайдера NICA с Высокой Критической Энергией / С. Колокольчиков, Ю. Сеничев // Ядерная физика и инжиниринг. — 2022. — Т. 13, № 1. — С. 27–36. — URL: <https://doi.org/10.56304/S2079562922010171>.

- A3. Особенности Прохождения и Повышения Критической Энергии Синхротрона / С. Колокольчиков, Ю. Сеничев // Ядерная физика и инжиниринг. — 2023. — Т. 14, № 6. — С. 587—592. — URL: <https://doi.org/10.56304/S2079562923010153>.
- A4. 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>.
- A5. Transition Energy Crossing in NICA Collider of Polarized Proton Beam in Harmonic and Barrier RF / S. D. Kolokolchikov, A. E. Aksentev, A. A. Mel'nikov, Y. V. Senichev // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Т. 87, № 10. — С. 1449—1454. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824100211>.
- A6. Longitudinal Dynamic in NICA Barrier Bucket RF System at Transition Energy Including Impedances in BLonD / S. Kolokolchikov, Y. Senichev, A. Aksentev, A. Melnikov, V. Ladygin, E. Syresin // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — Т. 21, № 3. — С. 419—424. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477124700389>.
- A7. Acceleration and crossing of transition energy investigation using an RF structure of the barrier bucket type in the NICA accelerator complex / S. Kolokolchikov, Y. Senichev, A. Melnikov, E. Syresin // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — Т. 2420, № 1. — С. 012001. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012001>.
- A8. Transition Energy Crossing of Polarized Proton Beam at NICA / S. Kolokolchikov, Y. Senichev, A. Aksentiev, A. Melnikov, E. Syresin, V. Ladygin // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Т. 87, № 3. — С. 212—215. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700054>.
- A9. 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, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, A. Melnikov, V. Ladygin, E. Syresin, N. Nikolaev // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — Т. 2420, № 1. — С. 012052. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012052>.
- A10. Consideration of an Adapted Nuclotron Structure for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei / Y. V. Senichev, A. E. Aksentyev, S. D. Kolokolchikov, A. A. Melnikov, V. P. Ladygin, E. M. Syresin // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Т. 86, № 11. — С. 2434—2438. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110418>.

- A11. Проектирование Каналов Вурасс в Ускорительном Комплексе NICA для Экспериментов с Поляризованными Пучками по Поиску ЭДМ / С. Колокольчиков, А. Аксентьев, А. Мельников, Ю. Сеничев, В. Ладыгин, Е. Сыресин // Ядерная физика и инжиниринг. — 2024. — Т. 15, № 5. — С. 457—463. — URL: <https://doi.org/10.56304/S2079562924050257>.
- A12. ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search / S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov, Y. Senichev, E. Syresin, V. Ladygin // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Т. 2687, № 2. — С. 022026. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022026>.
- A13. NICA Facilities for the Search for EDM Light Nuclei / Y. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, A. Melnikov, N. Nikolaev, V. Ladygin, E. Syresin // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Т. 87, № 4. — С. 436—441. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700534>.
- A14. Spin Coherence and Betatron Chromaticity of Deuteron Beam in “Quasi-Frozen” Spin Regime / S. Kolokolchikov, A. Aksentiev, A. Melnikov, Y. Senichev // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Т. 86, № 12. — С. 2684—2688. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106377882311025X>.
- A15. Spin coherence and betatron chromaticity of deuteron beam in NICA storage ring / S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov, Y. Senichev // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Т. 2687, № 2. — С. 022027. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022027>.

Список литературы

1. 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, T. Hatsuda, T. Kojo, P. D. Powell, Y. Song, T. Takatsuka // 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. 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.pnpnp.2022.103990>.
4. 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. 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. 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: [nucl-ex/0511052](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0511052). — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.9.050101>.
9. 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. — Т. 90, вып. 1. — С. 012007. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.012007>.
11. Prospects for spin physics at RHIC / G. Bunce, N. Saito, J. Soffer, W. Vogelsang // 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. 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. Accelerator Physics (Fourth Edition) / S.-Y. Lee. — World Scientific Publishing Company, 2018. — URL: <https://doi.org/10.1142/11111>.
14. 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 2π Decay of the K_2^0 Meson / J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay // Phys. Rev. Lett. — 1964. — Т. 13, вып. 4. — С. 138–140. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.138>.
16. A Theory of Spontaneous T Violation / T. D. Lee // Phys. Rev. D. — 1973. — Т. 8, вып. 4. — С. 1226–1239. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.8.1226>.

17. 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. CP-nonconserving effects in quantum chromodynamics / V. Baluni // Phys. Rev. D. — 1979. — Т. 19, вып. 7. — С. 2227–2230. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.19.2227>.
19. 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. On the Possibility of Electric Dipole Moments for Elementary Particles and Nuclei / E. M. Purcell, N. F. Ramsey // Phys. Rev. — 1950. — Т. 78, вып. 6. — С. 807–807. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.78.807>.
21. Experimental Limit to the Electric Dipole Moment of the Neutron / J. H. Smith, E. M. Purcell, N. F. Ramsey // Phys. Rev. — 1957. — 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. — 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. 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]. — 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. 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]. — URL: doi.org/10.7566/JPSCP.37.011012.
31. ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ОБЪЕКТА «КОМПЛЕКС NICA»: тех. отч. / В. Матвеев, В. Кекелидзе, Р. Ледницки, Б. Гикал ; ОИЯИ. — 28.12.2018. — URL: https://nica.jinr.ru/documents/TDR_spec_Fin0_for_site_short.pdf.
32. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / К. 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.
33. MADX. — URL: <https://madx.web.cern.ch/>.
34. <http://www-bdnew.fnal.gov/pbar/organizationalchart/lebedev/OptiM/optim.htm>. — URL: <https://blond.web.cern.ch/>.
35. Bmad: A relativistic charged particle simulation library / D. Sagan // Nucl. Instrum. Meth. — 2006. — Т. A558, № 1. — С. 356—359. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.001> ; Proceedings of the 8th International Computational Accelerator Physics Conference.
36. BLonD. — URL: <https://blond.web.cern.ch/>.
37. COSY Infinity. — URL: <https://www.cosyinfinity.org>.

Научное издание
Колокольчиков Сергей Дмитриевич
Исследование динамики поляризованного пучка
в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron
в приложении к изучению электрического дипольного момента
лёгких ядер

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 18.03.2026
Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 006/26 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а