

На правах рукописи



Sign

Колокольчиков Сергей Дмитриевич

Исследование динамики поляризованного пучка в
ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в
приложении к изучению электрического дипольного
момента легких 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 mmmmmmmmm YYYU 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 mmmmmmmmm2025** года.
Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00.**

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

Sign
Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Данная работа посвящена исследованию стабильности динамики тяжелых ионов, а также поляризованных пучков в ускорителях и накопителях. Также будут разобраны вопросы проектирования современных ускорительных установок.

Возможность использования ускорительных установок для различных экспериментов является большим преимуществом. Такая практика применяется в крупных ядерных центрах CERN [?], RHIC [?]. Последовательные программы экспериментов расписаны на годы вперед. Такие установки отвечают в первую очередь фундаментальным исследованиям, но и приносят за собой необходимые технологии для полноценного развития научно-технической базы.

NICA является передовым центром, расположенным в России, город Дубна. Коллайдер NICA, имеет 2 места встречи, в которых расположены детекторы: MPD(Multi-Purpose Detector) [?] и SPD(Spin Polarized Detector) [?]. Каждый из них предназначен для разных экспериментов. MPD-детектор – будет использован для исследования кварк-глюонной плазмы, возникающей в результате столкновений тяжелых ионов золота. SPD-детектор направлен на изучение поведения сталкивающихся поляризованных пучков протонов и дейтронов. Таким образом, структура коллайдера должна быть использована как для ускорения пучков тяжелых ионов, так и легких. При этом требования, предъявляемые для удержания пучка для разного сорта частиц, отличаются.

Основным требованием коллайдерных экспериментов, является достижение большого количества соударений, то есть высокого уровня светимости. Для исследования кварк-глюонной плазмы это требование должно быть на уровне $10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Такие светимости являются рекордными и для их достижения может потребоваться существенной настройки всех систем ускорителя и может занять достаточно большое время. При ускорении тяжелых ионов высокая зарядность и интенсивность пучка вызывает серьезные ограничения на параметры пучка из-за внутрипучкового рассеяния. Для преодоления этих проблем, спроектированная структура должна высоким временем внутрипучкового рассеяния, а также содержать специальные установки стохастического и электронного охлаждения. Стохастическое охлаждение также в существенной степени зависит от конкретной оптики установки и может быть оптимизировано для компенсации эффектов ВПР. Электронное охлаждение применяется на небольших энергиях свутска и способно охладить пучок на начальных этапах ускорения.

В том же кольце могут быть ускорены и другие частицы. Подготовка и ускорение поляризованных пучков для экспериментов на детекторе

SPD представляет особый интерес, поскольку поляризация является дополнительной степенью свободы и может привести дополнительную информацию, в том числе в коллайдерные эксперименты. В этом случае определенные сечения рассеяния приобретают зависимость от поляризации сталкивающихся сгустков.

Соотношение заряда к массе для протона отличается по сравнению с тяжелыми ионами почти в два раза. Таким образом, максимальная энергия эксперимента кратно увеличивается. Но для существующей магнитооптики, оптимальной для тяжелоионного эксперимента подобрано значение критическое энергии таким образом, что столкновение происходит до критического значения и никаких проблем по её преодолению не возникает. Стоит отметить, что критическая энергия является важным параметром ускорительной установки и при проектировании установки этому вопросу уделяется особое внимание. Долгое нахождение вблизи критической энергии или её пересечение существенно влияет на динамику пучка и его стабильность. Таким образом, для протонов прохождение критической энергии становится важным параметром, ограничивающим параметры сгустка и требующем принятия дополнительных мер по её преодолению.

Классическим методом преодоления является процедура скачка критической энергии. При этом изменяются параметры ускорителя для внесения соответствующего возмущения и резкого кратковременного скачка критической энергии в момент близости энергии сгустка к критическому значению. После скачка, значения установки возвращаются к исходному значению до скачка с поправкой на увеличившуюся энергию пучка. Однако, сложностью является непосредственное создание скачка с заданной величиной и темпом, что не всегда легко реализуемо.

Альтернативным способом, который применяется для того чтобы избежать потери стабильности, является создание или модификация структуры с заведомо большим значение критической энергии. Такая структура носит название 'резонансной' и уже применялась на установках мирового уровня CERN, J-PARC. Принципиальным отличием от регулярной структуры является обеспечение резонансного условия для количества суперпериодов и частоты бетатронных колебаний в горизонтальной плоскости. Однако, это справедливо только для не полностью регулярных структур, а содержащих регулярную модуляцию градиента квадруполой или кривизны орбиты. В таком случае, происходит изменение оптических функций ускорителя и варьирование критической энергии выше энергии эксперимента, в том числе до комплексных значений, полностью убирая зависимость установки от дополнительных процедур преодоления.

Отдельным большим направлением, помимо коллайдерных экспериментов, является управление поляризацией. Спин является квантовой величиной, но в силу теоремы Эренфеста для любой квантовой величины может быть записано уравнение в квази-классическом приближении

для ансамбля частиц. Поведение спина частицы в ансамбле описывается уравнением Т-БМТ. Проекция спинов частиц на заданную ось и определяет поляризацию пучка. Для таких экспериментов интерес представляет долгое сохранение поляризации пучка, что может быть использовано и реализовано в накопительных установках

Более тонким направлением исследований, являются не просто поляризованные пучки, а также когерентные. В этом случае, пучок становится не просто поляризованным вдоль конкретной оси, но и спины частиц прецессируют с одинаковой частотой. В таком случае появляется возможность исследовать также ЭДМ элементарных частиц. Данная величина характеризует асимметрию распределения заряда частицы. Наличие ЭДМ объясняется тем, что он нарушает СР-симметрию, последнее было предсказано Сахаровым как одно из условий бариогинеза на ранних этапах вселенной. Для накопления малой величины ЭДМ необходимо долгое удержание пучка с последующим анализом на поляриметре рассеяния. При этом влияние МДМ должно быть подавлено. Такая техника впервые была предложена в BNL и имеет название 'замороженный' спин. Позднее, была предложена концепция 'квази-замороженного' спина, в которой происходит пространственное разделение полей и интегральное подавление МДМ-компоненты за полный оборот по кольцу.

Представленные исследования исходят из возможности изучения в комплексе NICA-Nuclotron. Построенный ускорительный комплекс является проектом мегасайнс и оборудован передовой материально-технической базой, отвечающей мировым тенденциям в ускорительной технике. Основными функционирующими установками помимо уже упомянутого коллайдера NICA являются бустер тяжелых ионов Booster, а также синхротон Nuclotron.

В коллайдере NICA для реализации концепции "квази-замороженного" спина необходима установка соответствующего оборудования. Для реализации накопительного кольца из структуры коллайдера, необходима модернизация с созданием обходных каналов bypass. Таким образом, на полученных прямолинейных участках могут быть расположены прямые фильтры Вина, выполняющий функцию компенсации МДМ-компоненты в скрещенных магнитных и электрических полях, не возмущающие орбиту в силу равенства нулю силы Лоренца.

Nuclotron является бустером поляризованных частиц в коллайдер, однако, требующем модернизации. Соответствующей концепт модернизации рассмотрен с точки зрения использования Nuclotron в тесной связке с коллайдером NICA. Использование Nuclotron для полноценных спиновых экспериментов делает эту машину столь же интересной, сколько и отдельные программы на коллайдере. Кроме того, особенности магнитооптики Nuclotron открывают возможность измерение ЭДМ не только дейтрона, но и протона, однако, при несколько меньшей энергии. На текущий день

измерений ЭДМ как дейтрона, так и протона не было осуществлено и представляется передним краем физического эксперимента на ускорительной установке.

Ещё одним направлением исследований в рамках формирующейся программы спиновой физике является исследование аксиона. В этом случае резонансным методом между частотой спиной прецессии и частотой осциллирующего скалярного аксионного поля может быть получена масса аксиона или получено ограничение. Для этого ускоритель будет использован в роли зондирующей антенны по частоте прецессии спина.

Актуальность темы. Исследования направлены на формирование полноценной физической программы по исследованию динамике поляризованных пучков в комплексе Nuclotron-NICA. Применение изложенных в работе подходов возможно и на других похожих установках без потери общности.

Целью данной диссертации является изучение особенностей динамики многозарядных тяжёлоионных и лёгких поляризованных пучков для проведения коллайдерных экспериментов в дуальной структуре, а также исследования электрического дипольного момента и поиска аксиона с использованием квази-замороженной концепции. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Расчёт времени внутрипучкового рассеяния для тяжелых ионов;
2. Оценка влияния методов с стохастического охлаждения пучка на время жизни;
3. Моделирование магнитооптики с модулированной дисперсионной функцией;
4. Проведение численного моделирования продольной динамики частиц с учетом высших порядков коэффициента уплотнения орбиты в высокочастотных резонаторах гармонического и барьерного типа;
5. Обеспечение стабильности пучка с точки зрения динамической апертуры при процедуре скачка критической энергии, подавление хроматичности, компенсация нелинейных эффектов;
6. Сохранение поляризации пучка при совершении процедуры скачка критической энергии;
7. Изучение концепции «квази-замороженного» спина с целью создание установки для исследования ЭДМ дейтрона и протона
8. Спин-орбитальное моделирование в магнитном кольце с дополнительными элементами со скрещенными магнитными и электрическими полями;

Научная новизна:

1. Исследованы закономерности динамики многозарядных тяжёлых ионов и лёгких поляризованных частиц в дуальной магнитооптической структуре с учётом различий во внутривещном рассеянии и влияния критической энергии на устойчивость пучка;
2. Предложен метод резонансной модуляции дисперсионной функции с применением дополнительного семейства квадрупольных линз, что позволило повысить критическую энергию и стабильность пучка в режиме ускорения лёгких частиц;
3. Приведены способы подавления дисперсии на краях поворотных арок в отсутствии регулярности, а также способы подавления нелинейных эффектов;
4. Выполнено численное моделирование прохождения критической энергии с учётом высших порядков зависимости от импульсного разброса, а также влияния импедансов, что позволило количественно оценить влияние данных факторов на сохранение пучка;
5. Исследована продольная динамика поляризованного пучка при нахождении вблизи и прохождении критической энергии методом скачка в гармоническом и барьерном ВЧ, что позволило количественно оценить стабильность пучка в различных режимах ускорения;
6. Предложено применение метода фильтров Вина для сохранения направления поляризации в пучках, что расширяет возможности по исследованию электрического дипольного момента и аксионно-подобных частиц;
7. Рассмотрены вариации изучения ЭДМ дейтрона и протона в многопериодических структурах с использованием электростатических дефлекторов или фильтров Вина;

Практическая значимость:

Влияние внутривещного рассеяния, а также критической энергии существенно влияет на динамику пучка. Дуальность структуры указывает на возможность её эффективного решения обоих эффектов и использования сразу для двух фундаментально значимых исследований. Во-первых, для изучения кварк-глюонной плазмы в коллайдерных экспериментах с тяжёлыми ионами. Во-вторых, для исследования лёгких поляризованных пучков в асимметричных коллайдерных столкновениях. Данный подход, может быть осуществлён в коллайдере NICA с использованием MPD и SPD детекторов.

При искажении дисперсионной функции возникает необходимость её подавления на краях поворотных арок для обеспечения бездисперсионных

прямых промежутков. Любое нарушение регулярности приводит к необходимости применения дополнительных усилий по подавлению дисперсии, а также коррекции возникающей нелинейности.

Исследование динамики пучка вблизи критической энергии показывает необходимость её преодоления, а также способствует определению оптимальных параметров скачка критической энергии, а также его влияние на динамику сгустка.

Наличие ЭДМ заряженных частиц может быть установлено только с использованием ускорительных установок в качестве накопительного кольца. Кроме того, реализация условия "квази-замороженности" спина может быть осуществлена без нарушения основной функции установки. Создание обводных каналов bypass позволит избежать точек встречи, также расположить прямые фильтры Вина независимо от оборудования, используемого для тяжело-ионного эксперимента. В конечном счёте, это позволит использовать NICA в режиме накопительного кольца. Такой подход может быть использован и для Nuclotron, сохраняется функция бустера для поляризованного пучка в коллайдер, а также возможно проведение независимых экспериментов по исследованию ЭДМ как протона, так и дейтрона и поиску аксиона. Такие исследования являются отдельной частью программы спиновой физики, которая формируется на установке NICA-Nuclotron.

Методология и методы исследования. Основными методами исследования являются математическое и компьютерное моделирование, численный эксперимент. Для исследования поперечной динамики: MAD-X, OPTIM, продольной динамики: BLoND; спин-орбитальной динамики: COSY Infinity.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Основные свойства дуальной магнитооптической структуры для легких ядер и тяжелых частиц с учетом различия внутрипучкового рассеяния. Время жизни пучка в дуальной структуре с учетом вариации коэффициента проскальзывания в разных арках; [1], [2]
2. Учет влияния высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов в численном моделировании движения в окрестности критической энергии и сравнение с экспериментальными результатами, полученными на У-70; [3], [4]
3. Результаты математического моделирования процесса прохождения ансамбля частиц через критическую энергию с различной скоростью и при различной форме ускоряющего потенциала с учетом ограничений по продольной микроволновой неустойчивости; [5], [6], [7]

4. Резонансная модуляция дисперсионной функции, как метод вариации критической энергии. Результаты оптимизации дисперсионной функции при наличии отсутствующих магнитов (missing magnets); [8], [9]
5. Особенности поляризованных пучков, используемых для исследования электрического дипольного момента в структурах с «квази-замороженным» спином на примере модернизированной структуры Нуклотрона; [10], [11], [12]
6. Метод фильтров Вина для сохранении направления поляризации на основе введения обводных каналов в структуре с квази-фrozen спином для выделения ЭДМ сигнала в поляризованном пучке; [13], [14], [15], [16], [17]

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 докладывались на российских и международных конференциях, а также 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 и XIV международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC’22 IPAC’23. Бангкок, Тайланд; Венеция, Италия;
- XIX Международная конференции по спиновой физике высоких энергий DSPIN’23. Дубна, Россия;
- XI-я Международная конференция по ядерной физике в накопительных кольцах STOR’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 XX печатных изданиях, X из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, X — в тезисах докладов.

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

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

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

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 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.

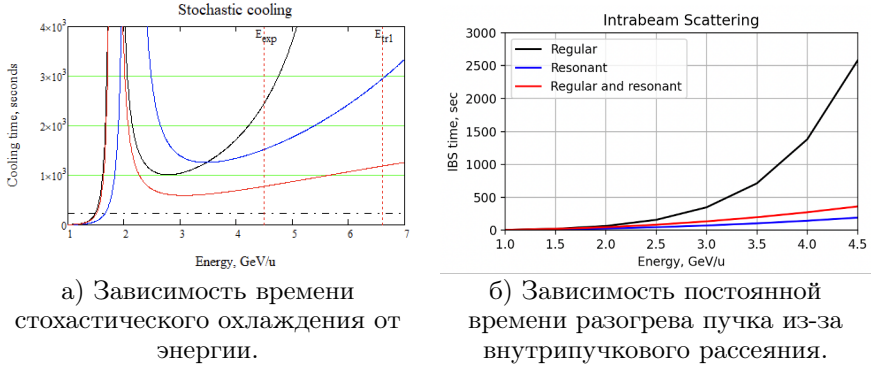


Рис. 1 — Сравнение времени разогрева пучка и охлаждения. Черная линия — 'регулярная', синяя — 'резонансная', красная — 'комбинированная' структура, прерывистая — идеальный случай.

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 является 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:

$$\frac{d\tau}{dt} = \eta(\delta) \cdot \frac{h \cdot \Delta E}{\beta^2 \cdot E_0}$$

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \frac{V(\tau)}{T_0}$$

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

Влияние 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, а также простейших моделей импедансов на динамику пучка.

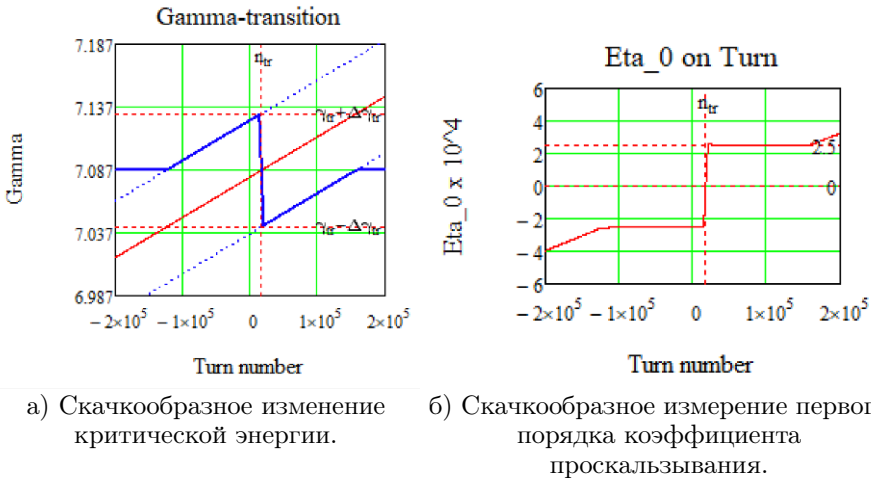


Рис. 2 — Процедура скачка критической энергии для барьерного ВЧ.

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

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

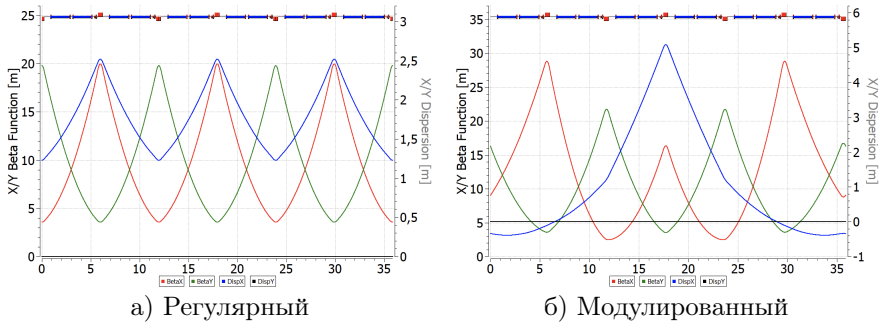


Рис. 3 — Твисс-параметры для различных суперпериодов.

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 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 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 квадруполов.

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

В четвертой главе 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.

Рассмотрена спиновая динамика в кольце с использованием электростатических, а также элементов с совмещенной функцией, что показано на рис. 4.

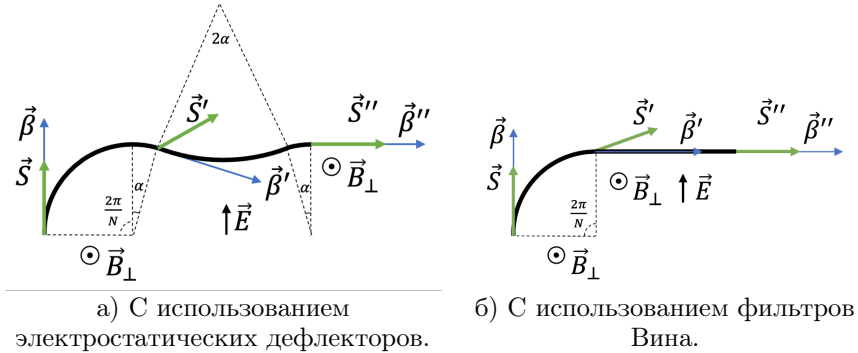


Рис. 4 — Принципиальная схема "квази-замороженной" структуры.

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 ориентацию 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. [8]

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 в резонансной структуре способно увеличить эффективность стохастического охлаждения. Особенно эффективным может быть использование комбинированной структуры. Однако, эффекты ВПР для приведенных структуры 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 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 квадрупольях 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 конечного сгустка.
5. Исследования спиновая динамики 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

1. (to be written) Dual-structure features for heavy ion and light particles at NICA collider / S.D. Kolokolchikov, A.E. Aksentyev, A.A. Melnikov, Yu.V. Senichev // *Chinese Physics C*. — 2025.
2. Formation of Polarized Proton Beams in the NICA Collider-Accelerator Complex / E. M. Syresin, A. V. Butenko, P. R. Zenkevich et al. // *Physics*

- of Particles and Nuclei*. — 2021. — Vol. 52, no. 5. — Pp. 997–1017. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063779621050051>.
3. Kolokolchikov S.D., Senichev Yu.V., Kalinin V.A. (to be published) Transition energy crossing in harmonic RF at U-70 proton synchrotron // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2025.
 4. (to be published) Transition energy crossing in NICA collider of polarized proton beam in harmonic and barrier RF / S.D. Kolokolchikov, Yu.V. Senichev, A.E. Aksentyev, A.A. Melnikov // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2025.
 5. Longitudinal Dynamic in NICA Barrier Bucket RF System at Transition Energy Including Impedances in BLonD / S. Kolokolchikov, Yu. Senichev, A. Aksentev et al. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2024. — Vol. 21, no. 3. — Pp. 419–424. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477124700389>.
 6. 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. — Vol. 2420, no. 1. — P. 012001. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012001>.
 7. Transition Energy Crossing of Polarized Proton Beam at NICA / S. Kolokolchikov, Yu. Senichev, A. Aksentiev et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Vol. 87, no. 3. — Pp. 212–215. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700054>.
 8. Kolokolchikov S. D., Senichev Y. V. Magneto-Optical Structure of the NICA Collider with High Transition Energy // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — Vol. 84, no. 10. — Pp. 1734–1742. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778821100185>.
 9. Kolokolchikov S., Senichev Yu. Peculiarities of Crossing and Raising the Synchrotron Transition Energy // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 10. — Pp. 2260–2264. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110236>.
 10. 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 et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2023. — Vol. 2420, no. 1. — P. 012052. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012052>.

11. Consideration of an Adapted Nuclotron Structure for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei / Yu. V. Senichev, A. E. Aksentyev, S. D. Kolokolchikov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 11. — Pp. 2434–2438. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110418>.
12. (to be written) Modernization of Nuclotron as booster for NICA and EDM experiment / S.D. Kolokolchikov, A.E. Aksentyev, A.A. Melnikov, Yu.V. Senichev // *JETP Letters*. — 2025.
13. Designing Bypass Channels in NICA Accelerator Complex for Polarized Beam Experiments for EDM Search / S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 11. — Pp. 2423–2428. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110248>.
14. ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search / S Kolokolchikov, A Aksentyev, A Melnikov et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2024. — Vol. 2687, no. 2. — P. 022026. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022026>.
15. NICA Facilities for the Search for EDM Light Nuclei / Yu. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Vol. 87, no. 4. — Pp. 436–441. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700534>.
16. Spin Coherence and Betatron Chromaticity of Deuteron Beam in “Quasi-Frozen” Spin Regime / S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov, Yu. Senichev // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 12. — Pp. 2684–2688. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106377882311025X>.
17. 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. — Vol. 2687, no. 2. — P. 022027. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022027>.

Колокольчиков Сергей Дмитриевич

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

