

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 1.3.15 —  
«Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких  
энергий»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

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 mmmmmmmmm2024** 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 динамики поляризованных пучков в ускорителях и накопителях.

Поведение спина частицы в ансамбле описывается уравнением Т-БМТ. Проекция спинов частиц на заданную ось определяет поляризацию пучка.

Поляризованный пучок представляет большой интерес в коллайдерных исследованиях, при котором сечение рассеяния зависит от поляризации пучка. Также, долгое сохранение поляризации пучка может быть использовано и в накопителях. Более тонким, являются не просто поляризованные пучки, а также когерентные. В этом случае, пучок становится не просто поляризованным, но и спины частиц прецессируют с одинаковой частотой.

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 являются: коллайдер NICA, бустер тяжелых ионов Booster, а также Nuclotron.

Коллайдер NICA, имеет 2 места встречи, в которых расположены детектора: 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. При ускорение тяжелых ионов, из-за внутрипучкового рассеяние,

Подготовка и ускорение поляризованных пучков для экспериментов на детекторе SPD представляет особый интерес и будет рассмотрено в этой работе.

Nuclotron является бустером, однако, требующем модернизации. Соответствующей концепт модернизации рассмотрен с точки зрения использования Nuclotron в тесной связке с коллайдером NICA.

**Актуальность темы.** Исследования направлены на формирование полноценной физической программы по исследованию спиновой динамики в комплексе NICA-Nuclotron.

**Целью** данной диссертации является изучение особенностей динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron с

учетом возможной модернизации магнитооптической структуры комплекса для исследования электрического дипольного момента. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Моделирование магнитооптики с модулированной дисперсионной функцией;
2. Расчёт времени внутрипучкового рассеяния;
3. Проведение численного моделирования продольной динамики частиц с учетом высших порядков коэффициента скольжения в ВЧ гармонического и барьерного типа;
4. Обеспечение стабильности пучка с точки зрения динамической апертуры при процедуре скачка критической энергии, подавление хроматичности, компенсация нелинейных эффектов;
5. Сохранение поляризации пучка при совершении процедуры скачка критической энергии;
6. Проектирование кольцевого ускорителя с возможностью применения метода «квази-замороженного спина»;
7. Спин-орбитальное моделирование в магнитном кольце с дополнительными элементами со скрещенными магнитными и электрическими полями;

Этот абзац появляется только в автореферате. Для формирования блоков, которые будут обрабатываться только в автореферате, заведена проверка условия `\ifsynopsis`. Значение условия задаётся в основном файле документа (`synopsis.tex` для автореферата).

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

### **Научная новизна:**

1. Исследована возможность проектирования дуальной магнитооптической структуры с возможностью преодоления критической энергии методом вариации критической энергии;
2. Исследована динамика поляризованного пучка при прохождении критической энергии скачком в ВЧ различных типов;
3. Разработка альтернативных прямых секций, путем создания обходных каналов `ByPass`;
4. Изучена реализации метода «Квази-Замороженного Спина» с установленными фильтрами Вина на альтернативных прямых секциях для возможности изучения ЭДМ дейтронов в накопительном кольце NICA;
5. Модернизация кольца канала Nuclotron с учётом возможности создания режима «Квази-Замороженного Спина» и изучения ЭДМ протона;

6. Изучение спин-орбитальной динамики в предложенных структурах.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что рассмотрены общие принципы проектирования магнитооптических структур.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Принципы построения дуальной магнитооптической структуры для тяжелых ионов и протонов (дейтронов? Может сказать «легких ядер»);
2. Методы позволяющие минимизировать влияние внутрипучкового рассеяния (IBS) для обеспечения достаточного времени жизни пучка;
3. Методы вариации критической энергии в резонансных магнитооптических структурах путем суперпериодической модуляции дисперсионной функции;
4. Принципы построения регулярной структуры с различными методами подавления дисперсии;
5. Результаты исследования продольной динамики поляризованного пучка для процедуры скачка критической энергии;
6. Методы подавления натуральной хроматичности и компенсации нелинейных эффектов секступолями;
7. Принципы проектирования оптимальных магнитооптических структур для изучения электрического дипольного момента легких ядер в режиме «Квази-Замороженного Спина»;
8. Реализована адаптация существующей структуры методом создания альтернативных обходных прямых секций BuPass;
9. Результаты спин-орбитального моделирования динамики поляризованного пучка в спроектированных структурах.

**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 докладывались на конференциях: ИТЭФ'20, МФТИ'20, RuPAC'21, ЛаПлаз'21, ЛаПлаз'22, IPAC'22, ЛаПлаз'23, IPAC'23, DSPIN RuPAC'23, IPAC'25.

**Личный вклад.** Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Содержание диссертации и выносимые на защиту основные положения отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 0 печатных изданиях, 0 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 описывается общий принцип, позволяющий ..., а потом идёт апробация на частных примерах: ... и ....

В **первой главе**: рассматриваются общие принципы проектирования дуальной магнитооптической структуры как для тяжелых, так и легких ядер. Рассматривается стабильность пучка с точки зрения времени жизни пучка, подверженного внутрипучковому рассеянию. Стохастическое и электронное охлаждение применяется для охлаждения пучка.

Критическая энергия является важной характеристикой ускорительной установки.

картинку можно добавить так:

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

а) L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X



б) Knuth

Рис. 1 — Подпись к картинке.

Формулы в строку без номера добавляются так:

$$\lambda_{T_s} = K_x \frac{dx}{dT_s}, \quad \lambda_{q_s} = K_x \frac{dx}{dq_s},$$

Во **второй главе** рассматривается метод вариации критической энергии в «резонансных» магнитооптиках. Для этого вводится суперпериодическая модуляция градиентов квадрупольных линз, тем самым варьируя дисперсионную функцию. Рассмотрен вопрос подавления хроматичности, а также нелинейных эффектов в таких структурах.

**Третья глава** посвящена исследованию возможности прохождения критической энергии, характерней для регулярных структур. Исследована процедура скачка критической энергии. Данные численного моделирования, также апробированы на экспериментальной установке.

Можно сослаться на свои работы в автореферате. Для этого в файле `Synopsis/setup.tex` необходимо присвоить положительное значение счётчику `\setcounter{usefootcite}{1}`. В таком случае ссылки на работы других авторов будут подстрочными. Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в [vakbib1; vakbib2]. Использование подстрочных ссылок внутри таблиц может вызывать проблемы.

В **четвертой главе** рассматривается возможность исследования в комплексе Nuclotron–NICA электрического дипольного момента легких ядер. Для коллайдера NICA приведена возможность введения альтернативных каналов bypass. Рассматривается возможность модернизации Nuclotron.ы

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

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

При использовании пакета `biblatex` список публикаций автора по теме диссертации формируется в разделе «**Публикации.**» файла `common/characteristic.tex` при помощи команды `\nocite`

*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 \_\_\_\_\_