

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.163.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **10.10.2024 г. № 18/11**

О присуждении **Мельникову Алексею Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование спин-орбитального движения и управления поляризацией в накопительном кольце для поиска электрического дипольного момента лёгких ядер» по специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики» принята к защите 20.06.2024 г., протокол №16/9 диссертационным советом 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 823/нк от 20 апреля 2023 года.

Соискатель Мельников Алексей Александрович 1996 года рождения. В 2020 году соискатель освоил программу магистратуры с отличием Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 — «Прикладные математика и физика», (диплом 1077244872537, выданный 17.07.2020 г.). В 2020 году поступил в аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия по специальности 01.04.01 (1.3.2) – «Приборы и методы экспериментальной физики», окончил аспирантуру ИЯИ РАН 30.09.2024 г. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника отдела ускорительного комплекса ИЯИ РАН.

Диссертация выполнена в отделе ускорительного комплекса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, Сеничев Юрий Валерьевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел ускорительного комплекса, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Теряев Олег Валерианович, доктор физ.-мат. наук, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), лаборатория теоретической физики, заместитель директора,

Свирида Дмитрий Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, лаборатория поляризационных исследований, старший научный сотрудник,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", г. Протвино,

В своем положительном заключении, подписанном Мочаловым Василием Вадимовичем, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Отделения экспериментальной физики, и утвержденном директором НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, доктором физико-математических наук, Егорычевым Виктором Юрьевичем, указала, что работа отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Мельников Алексей Александрович заслуживает

присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Соискатель имеет 12 опубликованных работ по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе 2 статьи — в журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно.

Список основных работ по результатам диссертационного исследования:

1. Природа спиновой декогеренции поляризованного пучка легких ядер в накопительном кольце для поиска ЭДМ / А. Мельников, Ю. Сеничев, А. Аксентьев, С. Колокольчиков // Письма в ЖЭТФ. — 2023. — Т. 118, вып. 10. — С. 713—720.

2. Спиновый навигатор на базе корректирующих диполей Нуклотрона/ОИЯИ / Ю. Филатов, А. Кондратенко, М. Кондратенко, Е. Цыплаков, А. Бутенко, С. Костромин, В. Ладыгин, Е. Сыресин, И. Гурылева, А. Мельников, А. Аксентьев // Письма в ЖЭТФ. — 2022. — Т. 116, вып. 7. — С. 411—418.

3. Система спин-флипа протонов на базе корректирующих диполей Нуклотрона/ОИЯИ на спиновом резонансе $\gamma \cdot G = 7$ / Ю. Филатов, А. Кондратенко, Н. Николаев, Ю. Сеничев, М. Кондратенко, С. Виноградов, Е. Цыплаков, А. Бутенко, С. Костромин, В. Ладыгин, Е. Сыресин, И. Гурылева, А. Мельников, А. Аксентьев // Письма в ЖЭТФ. — 2023. — Т. 118, вып. 6. — С. 389—396.

4. Melnikov, A. Investigation of Proton Spin Decoherence Mechanisms at COSY / A. Melnikov, A. Aksentev, Y. Senichev // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Март. — Т. 85, № 11. — С. 1881—1885.

5. Aksentev, A. Investigation of Spin Decoherence of a Beam with a Nonadiabatic Change in the Orientation of the Stable Axis of the Spin / A. Aksentev,

A. Melnikov, Y. Senichev // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2022. — Март. — Т. 85, № 10. — С. 1675—1678.

6. Senichev, Y. Spin Chromaticity of Beam: Orbit Lengthening and Betatron Chromaticity / Y. Senichev, A. Aksentyev, A. Melnikov // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2022. — Февр. — Т. 84, № 12. — С. 2014—2017.

7. Melnikov, A. Robustness of the Spin-Navigator Based Method for the Manipulation of the Beam Polarization Axis in a Spin-Transparent Storage Ring / A. Melnikov, A. Aksentyev, Y. Senichev // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2022. — Февр. — Т. 84, № 11. — С. 1871—1873.

8. Aksentev, A. Manipulation of Beam Polarization Orientation in a Spin-Transparent Storage Ring / A. Aksentev, A. Melnikov, Y. Senichev // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2022. — Февр. — Т. 84, № 10. — С. 1752—1756.

9. Investigation of Methods to Decrease Proton Beam Depolarization while using an RF Spin-rotator/ A. Melnikov, N. Nikolaev, A. Aksentyev, Y. Senichev, S. Kolokolchikov // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Март. — Т. 86, № 11. — С. 2429—2433.

10. Quasi-frozen Spin Concept at NICA for EDM Search and its Matrix Analysis / A. Melnikov, A. Aksentyev, Y. Senichev, S. Kolokolchikov // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Т. 87, № 4.

11. Studies of the spin coherence time of protons at COSY / A. Melnikov, A. Aksentyev, Y. Senichev, S. Kolokolchikov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2024. — Т. 2687, № 5. — 052025.

12. A feasibility study into the quasi-frozen spin regime of operation of the NICA storage ring / A. Aksentyev, A. Melnikov, Y. Senichev, S. Kolokolchikov, V. Ladygin, E. Syresin, A. Butenko // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2024. — Т. 2687, № 2. — 022028.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что диссертация обладает внутренним единством, содержит важные физические и методические результаты, имеющие большое научное значение и практическую ценность. Диссертация полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым

Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и сотрудников ведущей организации и наличием работ высокого научного уровня по близкой тематике.

В отзывах оппонентов и ведущей организации были высказаны следующие критические замечания и пожелания:

- В процедуре получения резонансной диаграммы для совокупного влияния резонансов было бы желательно описать алгоритм для сложения их воздействий с учетом фазы.

- Было бы полезно привести подробный вывод важной формулы (3.20), которая приведена со ссылкой как на работу автора [41], так и на более раннюю работу 2012 г. [80], а также детально обсудить связь с численным расчетом, использующим (3.23).

- В работе содержатся отдельные опечатки и стилистические неточности, что, однако, не приводит к существенным затруднениям при чтении. Некоторые определения известных величин даны слишком подробно, как например, свойства матриц Паули на с.18, где 4,6,7 следуют из известного представления для произведения двух матриц со свободными индексами через символ Кронекера и тензор Леви-Чивиты.

- Во введении, при обсуждении различных экспериментов по измерению ЭДМ упоминаются очень различные фундаментальные частицы, от элементарных лептонов до составных адронов и ядер; было бы уместно упомянуть возможные механизмы возникновения ЭДМ в столь различных случаях.

- При рассмотрении экспериментов с инъекцией пучка в накопитель в противоположных направлениях (CW/CCW, например, в разделе 1.4.2) никак не комментируется влияние магнитного поля Земли, которое может давать заметный вклад в поля структуры кольца на рассматриваемом уровне точности. В особенности непростая ситуация возникает, видимо, при наличии близких геомагнитных аномалий, таких, что поле Земли неоднородно на масштабе размеров кольца накопителя. Также не упоминаются возможные последствия гистерезисных явлений, которые могут приводить не только к трудностям

восстановления магнитных полей структуры кольца при переполусовке, но и возникновению нелинейных эффектов, искажающих пространственные характеристики этих полей.

- На стр. 45 из текста работы совершенно непонятно, чем использование ВЧ резонатора помогает увеличению времени спиновой когерентности, и каковы должны быть его параметры.

- В разделе 2.1 делается утверждение о том, что вся спиновая динамика частиц в накопителях определяется единственным скалярным параметром γ_{eff} , «отождествляющим частицы с различными отклонениями в шестимерном фазовом пространстве с точки зрения спиновой динамики» (цитата из работы). Это утверждение глубоко нетривиально, чрезвычайно важно и имеет многочисленные последствия для выводов и утверждений, сделанных в диссертации, однако степень его обоснованности в тексте работы оставляет желать много лучшего. Стоило бы уделить намного больше внимания изложению подробностей этого вопроса.

- Возвращаясь к CW/CCW экспериментам, стоило бы подробнее описать всю экспериментальную процедуру, начав с калибровки эффективного фактора Лоренца для измерения ЭДМ. Отметить, как достигается эквивалентность двух пучков с точки зрения спиновой динамики после смены полярности поля, подчеркнуть, в какой плоскости производятся циклы калибровки и измерений. А также описать методику обработки результатов, объединяющих многократные инъекции в накопительное кольцо в продолжении годового периода измерений.

- Для читателя, не слишком просвещенного в вопросах пучковой динамики, остается непонятным, что изображено на рисунках 2.3 и 2.5. Хотелось бы более пространной интерпретации этих рисунков.

- Раздел 2.7 посвящен одному из основных экспериментальных результатов работы, и его существенной частью является оптимизация токов секступолей для достижения нулевой хроматичности. Однако измерение самой величины хроматичности полностью опущено в работе, хотя является нетривиальной процедурой, пусть и хорошо отработанной при эксплуатации ускорителей. Стоило бы посвятить описанию таких измерений несколько абзацев с иллюстрациями.

- В работе выполнен анализ пучковой динамики в проектируемом прототипе накопителя РТН для измерений ЭДМ протона и предложена его модификация для увеличения на порядок времени спиновой декогерентности. Однако эта часть работы кажется неполной без подробного анализа спиновых резонансов для обоих рассматриваемых накопителей, включая влияние изменения суперпериодичности с $P=4$ до $P=2$ на частоту следования и характеристики резонансов. Как отмечено в главе 2, спиновые резонансы могут существенно влиять на спин-декогеренцию протонного пучка.
- В разделе 3.1.4. упоминается раскачка пучка сигналом белого шума для наведения на мишень поляриметра. Внесение дополнительной случайной поперечной раскачки должно бы приводить к увеличению эмиттанса пучка, и как следствие, уменьшению времени спиновой когерентности. Хотелось бы дополнительных пояснений, почему такой способ наведения не оказывает влияния на характеристики пучка.
- Для некоторых общепринятых терминов приводится англоязычное название, которое легко можно заменить на общепринятые русские термины. Например, «спин-флиппинг» не что иное как «переворот спина», «экстракция» легко заменяется на «вывод». К тому же эти англицизмы в тексте написаны по-разному («спин-тьюн» и «спин-тюн»).
- В диссертации чересчур кратко описана схема поляриметрии на ускорителе COSY и процесс получения временной эволюции сигнала асимметрии по анализу спин-прецессии частиц.
- В диссертации также приводятся результаты моделирования для изменения частоты спин-прецессии частиц в случае движения в накопителе с электрическими и магнитными полями. Полученная зависимость является параболической, что и прогнозируется при удлинении орбит. Но детально не обсуждается вопрос об оптимальных значениях хроматичности и фактора сжатия орбит при движении в дополнительном электростатическом поле.
- В диссертации достаточно часто упоминается необходимость минимизации систематических ошибок, однако не приведено никаких оценок этой величины, что критично для проведения самого эксперимента.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена небольшого количества опечаток, грамматических и стилистических ошибок. Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Соискатель Мельников А.А. ответил на заданные в ходе защиты вопросы и высказанные замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Разработан метод увеличения времени спиновой когерентности на основе изменения равновесного уровня энергии частиц.
- Предложен метод увеличения времени спиновой когерентности протонов при учёте влияния спиновых резонансов.
- Представлены результаты вычисления мощностей внутренних и целых спиновых резонансов для ускорителя COSY.
- Представлена концепция спин-прозрачного режима управления поляризацией, включающая в себя аналитические оценки, проработку этапов эксперимента, определение параметров оборудования, необходимого для установки на накопителе.
- Предложена методика управления поляризацией протонов с помощью ВЧ спин-ротатора без потери поляризации.
- Разработан и верифицирован в численном эксперименте матричный метод анализа структур накопительных колец типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с целью проведения эксперимента по поиску ЭДМ в частотной области.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована тем, что:

Исследования эффектов спиновой декогеренции протонов имеют определяющее значение как для экспериментальной программы на ускорителях COSY и Nuclotron based Ion Collider Facility (NICA), так и для создания специализированного накопителя для поиска ЭДМ.

Было получено и верифицировано понятие для эффективного фактора Лоренца, а также разработан метод построения резонансных диаграмм для учёта влияния спиновых резонансов. Что позволит проводить прецизионные

эксперименты с поляризованными пучками частиц в накопительных кольцах. В основе диссертационного исследования был разработан и обоснован новый тип структур для поиска ЭДМ с более сильной фокусировкой, который может стать итоговым вариантом проектируемого накопителя для поиска ЭДМ.

Развитие методики управления поляризацией в области нулевого спинового резонанса является ключевым этапом для проведения экспериментов по поиску ЭДМ на NICA. Это также позволит убедиться в целесообразности использования метода измерения ЭДМ в частотной области как более перспективного с точки зрения учёта систематических ошибок. Данный факт, несомненно, позволит увеличить научный потенциал комплекса NICA и других проектируемых накопителей для поиска ЭДМ.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы комплексы программ численного моделирования COSY Infinity, MAD-X, OPTIM. Изложены методы построения программ для численных расчётов, используемые аналитические модели описания физического эксперимента, этапы и физические особенности проведения эксперимента. Описаны особенности внедрения и реализации методики проведения эксперимента на накопительном кольце. Изучены особенности проведения эксперимента на ускорителе COSY, даны обоснованные практические и методические рекомендации для оптимизации основополагающих процессов, таких как перевод поляризации в плоскость накопительного кольца и достижение времени спиновой когерентности порядка 1000 секунд.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными, что подтверждается качественным согласием результатов численного моделирования с экспериментальными данными. В частности, результаты по оптимизации времени спиновой когерентности, полученные на COSY, согласуются с общепринятыми принципами спин-орбитальной динамики и предыдущими результатами, полученными в коллаборации JEDI. Используемые в работе комплексы программ для численного моделирования были многократно апробированы при решении близких задач из области исследований. Полученные диссертантом результаты

были представлены на основных международных конференциях, совещаниях коллаборации и международных научных групп по тематике исследования.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Результаты по подготовке и проведению экспериментов на ускорителе COSY получены в соавторстве с коллаборацией JEDI (Juelich Electric Dipole Moment Investigations) и сотрудниками ИЯИ, МФТИ, ИТФ. Автор лично принимал участие в получении всех упомянутых экспериментальных результатов. Диссертант лично принимал участие в получении и обработке исходных данных эксперимента на ускорителе COSY, аналитические и численные модели анализа спин-орбитального движения на ускорителях COSY и NICA были созданы автором лично. Мельников А.А. также лично, либо при его определяющем участии, подготавливал к публикации основные печатные работы по теме диссертационного исследования.

На заседании 10 октября 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Мельникову Алексею Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук за разработку и исследование методики проведения прецизионных экспериментов с поляризованными пучками в накопительных кольцах, таких как поиск ЭДМ заряженных частиц.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве **22** человек, из них **9** докторов наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: **за - 22**, **против - 0**, **недействительных бюллетеней - 0**.

Председатель
диссертационного совета 24.1.163.01
доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

_____ Кравчук Л.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01
кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С.В.

10.10.2024 г.

М.П.