

## Отзыв

официального оппонента Теряева Олега Валериановича на диссертацию Мельникова Алексея Александровича «Исследование спин-орбитального движения и управления поляризацией в накопительном кольце для поиска электрического дипольного момента лёгких ядер», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Эксперименты с поляризованными пучками являются мощным инструментом проверки различных элементов Стандартной модели и поисков новой физики. Диссертационная работа Мельникова А.А. посвящена динамике спина в ускорителях, она была выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Основные результаты работы получены диссертантом лично, в рамках работы в составе коллаборации JEDI (Juelich Electric Dipole Moment Investigations) в исследовательском центре г. Юлих в Германии. Исследование направлено на изучение особенностей спиновой динамики в кольцевых ускорителях с целью измерения Электрического Дипольного Моента (ЭДМ) частиц, связанным с нарушением CP-чётности, являющимся, в частности, необходимым условием возникновения барионной асимметрии Вселенной. Это подтверждает актуальность и значимость диссертационного исследования.

Мельниковым А.А. был проведён детальный анализ эффектов спиновой декогеренции в ускорителях-накопителях и получены первые данные по достижимому времени спиновой когерентности протонов в пилотном эксперименте на ускорителе COoler SYnchrotron (COSY). Продемонстрировано, что основным фактором, влияющим на декогеренцию спинов протонов, является действие спиновых резонансов при вертикальном движении частиц, представлено полное и подробное исследование влияния спиновых резонансов на декогеренцию, объясняющее полученные экспериментальные результаты. Достижение времени спиновой когерентности протонов на уровне 1000 секунд есть необходимое условие для проведения экспериментов по поиску ЭДМ на накопительных кольцах. Данные исследования актуальны для реализации специализированного накопителя для поиска ЭДМ, разрабатываемого коллаборацией SpEDM в CERN и для перспективного развития ускорительного комплекса NICA в ОИЯИ. При этом эксперименты по поиску ЭДМ могут, в перспективе, стать важным элементом физической программы детектора SPD на NICA и ускорительного комплекса в целом. Это подтверждает актуальность, новизну и практическую значимость работы.

Диссертантом решён вопрос о переводе поляризации пучка протонов в плоскость накопительного кольца. Данная задача возникла в ходе экспериментов с поляризованными протонами на ускорителе COSY. Протоны, в силу относительно большой магнитной аномалии, являются более чувствительными к спиновым резонансам, что потребовало детального исследования данного эффекта. Процедура перевода поляризации в плоскость накопительного кольца является необходимым подготовительным шагом к экспериментам с поляризованными пучками. Успешное аналитическое, численное и практическое решение данной задачи диссертантом способствовало проведению экспериментальной программы на ускорителе COSY. Приведённые Мельниковым А.А. методические рекомендации носят практическую ценность и для других экспериментов с поляризованными пучками в ведущих ускорительных центрах.

Важнейшей задачей для программы спиновых экспериментов в ускорительных комплексах является не только ускорение пучков с сохранением поляризации, но и возможность управления поляризацией для измерения наиболее важных поляризационных эффектов. Особо важна роль продольной поляризации в точке столкновения пучков, создание которой, особенно в случае дейтронов, не имеет экспериментально апробированного решения. Управление поляризацией также необходимо для изучения физики поляризационных явлений в адронных столкновениях высоких и промежуточных энергий, что станет важным элементом работы комплекса NICA после завершения строительства и запуска детектора SPD.

В основе системы управления поляризацией пучков в коллайдере NICA и ускорителе COSY лежит новый метод управления динамикой спина лёгких ядер — режим спиновой прозрачности (S(pin)T(ransparency)). В данной моде появляется уникальная возможность управлять направлением поляризации с помощью спиновых навигаторов, — специальных магнитных вставок на основе слабых полей. Спиновые навигаторы позволяют получать любое требуемое направление поляризации в любом месте орбиты для любого сорта частиц (p, d, He-3), а также реализовать систему многократных переворотов спина (спин-флип) для снижения систематических ошибок эксперимента. В традиционном коллайдере с вертикальным ведущим полем ST-режим реализуется на дискретных величинах энергии, соответствующих целым спиновым резонансам. При этом в настоящее время нет ни одного коллайдера в мире, который имел бы или планировал создание условий для работы на пучках поляризованных дейтронов. Для дейтронов ST-режим представляется единственным решением для управления поляризацией при энергиях NICA, поскольку применение стандартной методики управления ориентацией спина, используемой в коллайдере RHIC в BNL, на NICA невозможно из-за необходимости использования огромных интегралов поперечных магнитных полей.

Пилотный эксперимент по управлению поляризацией в ST-режиме планировался на ускорителе COSY. Диссертантом была проведена работа по реализации данной концепции, включая аналитические и численные оценки, подготовку оборудования к установке в накопительное кольцо. Метод управления поляризацией в режиме спиновой прозрачности также может быть реализован для релятивистского коллайдера тяжелых ионов (RHIC) и электрон-ионного коллайдера (eIC) в Брукхейвенской лаборатории в США, полученные результаты способствуют развитию методов и средств эффективного управления поляризацией на накопительных кольцах. Это также подтверждает новизну и значимость работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 124 страницы, включая 63 рисунка. Список литературы содержит 96 наименований. Основные результаты диссертационной работы многократно представлены автором на международных и всероссийских конференциях, 12 печатных работ опубликованы в рецензируемых журналах.

**Введение** включает в себя краткий обзор современного состояния области исследований. В нём определены цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна, обосновывается актуальность проводимого исследования. Приведены выносимые на защиту положения и их научная и практическая значимость. Дана информация об апробации полученных результатов, сделанных по результатам работы публикациях, личном вкладе автора.

В **первой** главе представлены основные методы описания спин-орбитальной динамики в ускорителях-накопителях на основе уравнения Томаса-Баргманна-Мишеля-Телегди (Т-БМТ) и на основе спинорной матричной техники. Представлены спиновые матрицы основных элементов накопительных колец и выражения для направления инвариантной оси и частоты спин-прецессии для основных типов структур ускорителей-накопителей. Также приведены основные соотношения для описания спиновой динамики в области спиновых резонансов. Приведён обзор основных методов поиска ЭДМ в ускорителях-накопителях. При учёте ЭДМ-компоненты спин-прецессии в уравнении Т-БМТ были рассмотрен метод “замороженного спина”, представлены основные особенности методов измерения ЭДМ в пространственной и частотной области. Для ускорителей-накопителей широкого класса был рассмотрен метод “квази-замороженного спина” для поиска ЭДМ.

Вторая глава посвящена исследованию эффектов спиновой декогеренции в накопителях с электрическими и магнитными полями. Из решения системы нелинейных дифференциальных уравнений для “принципа синхронного ускорения” Векслера–Макмиллана было получено выражение для смещения равновесного уровня продольной фазовой траектории. Данное выражение является универсальным скаляром, отождествляющим частицы с различными отклонениями в шестимерном фазовом пространстве с точки зрения спиновой динамики.

В диссертационной работе была произведена проверка соотношения для поднятия равновесного уровня в численном эксперименте с точки зрения орбитальной и спиновой динамики частиц. Известно, что спиновая динамика в вертикальной плоскости характеризуется действием целых и внутренних спиновых резонансов, что и наблюдалось в численном эксперименте. Изменение частоты спин-прецессии под действием спиновых резонансов было определено двумя способами: усреднением набег фазы спинового движения в плоскости накопителя и вычислением мощностей резонансов для определения их совокупного влияния. Результаты для спиновой динамики протонов отражают существенное влияние спиновых резонансов на достижимое время когерентности спинов. Было предсказано оптимальное значение энергии ускоренного пучка по результатам совокупной резонансной диаграммы.

Первый эксперимент по изучению эффектов спиновой декогеренции протонов был проведён на ускорителе COSY. Предварительные результаты эксперимента при энергии пучка 140 МэВ, сигнализируют о достижимом времени когерентности 0.2 с при указанных параметрах. Полученный результат согласуется как с численными, так и с аналитическими оценками, представленными в диссертационной работе.

Из соотношения для поднятия равновесного уровня фазовой траектории следует, что для минимизации эффектов спиновой декогеренции необходимо иметь три семейства секступолей, расположенных в точках с ненулевой дисперсией и различным отношением оптических бета-функций. Данный факт был использован при проектировании специализированного накопительного кольца для поиска ЭДМ протона. Было показано, что в упомянутой структуре возможно достижение времени спиновой когеренции порядка 1000 секунд, что на порядок выше, чем в изначальной структуре, предлагаемой коллаборацией SpEDM.

**Третья** глава посвящена исследованию управления поляризацией для поиска ЭДМ. В частности, разработана “спин-прозрачная” (ST) схема управления поляризацией при фиксированной энергии в области целочисленного спинового резонанса. Для управления

поляризацией протонов на ускорителе COSY предполагается использование двух соленоидов-навигаторов со слабыми магнитными полями. <ыли получены выражения для направления инвариантной оси в зависимости от полей в соленоидах-навигаторах и наведённой частоты спин-прецессии, из которых следует, что можно получить любое направление инвариантной оси в плоскости накопителя путём вариации полей в навигаторных соленоидах. Приведены аналитические оценки необходимых параметров накопителя для проведения эксперимента, исследованы его основные этапы проведения эксперимента.

Также в данной главе рассматривается вопрос управления поляризацией в области высокочастотного спинового резонанса. Было продемонстрировано, что при учёте синхротронных колебаний частиц имеется два источника спин-декогеренции, определяющих эффективность процесса переворота поляризации: фаза попадания частиц в поле ВЧ соленоида и фаза спинового движения. Было продемонстрировано, что эффективность переворота спин-векторов ансамбля частиц характеризуется фактором спин-декогеренции. Также рассмотрено влияние связи ВЧ и внутренних спиновых резонансов, отстройки от резонанса по частоте на эффективность переворота поляризации.

**Четвертая** глава посвящена исследованию свойств структур типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с точки зрения измерения ЭДМ частотным методом. При этом величина ЭДМ частицы в накопительном кольце с радиальными возмущениями поля получается по результатам измерений полной частоты прецессии спина с помощью поляриметра. В концепции линейного вклада локальных частот в величину измеряемой частоты систематические эффекты от магнитного дипольного момента можно вычесть, инжектируя пучок в противоположном направлении. Для обоих типов структур была получена точная форма связи измеряемой частоты с локальными поворотами спина, что послужит моделью оценки измеряемой величины ЭДМ в эксперименте на NICA.

Было показано, что для структуры типа “замороженного спина” с радиальными возмущениями измеряемая частота спин-прецессии есть среднее значение от локальных частот, а направление инвариантной оси радиальное. Для структуры типа “квази-замороженного спина” с радиальными возмущениями поля вектор инвариантной оси лежит в плоскости накопителя, и его направление не строго радиальное; также существуют нелинейные добавки к измеряемой частоте. Было показано, что систематический эффект от последних можно учесть при обратной инжекции пучка. Также представлены данные численного моделирования, описывающие поведение направления инвариантной оси и частоты спин-прецессии в области спинового резонанса, при котором спин “квази-заморожен”. Полученные численные результаты согласуются с предсказаниями модели уединённого резонанса.

**В заключении приведены основные результаты работы.**

По содержанию работы можно сделать следующие замечания:.

- 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.

Высказанные замечания не являются принципиальными и ни в коей мере не ставят под сомнение высокий уровень работы и полученных результатов.

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. Численные расчёты были произведены в программной среде COSY Infinity, которая была многократно апробирована в ходе решения задач из области исследований и тестировалась на экспериментальных данных. Полученные диссертантом результаты были представлены на основных международных конференциях, совещаниях коллаборации и международных научных групп.

Новизна результатов диссертации отражена в 12-ти печатных работах автора в физических журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых базами Scopus и Web of Science. Все положения, выносимые на защиту, и основные результаты являются новыми и значимыми для области исследований.

Диссертационная работа Мельникова А.А. является оригинальным, логически согласованным и полным исследованием, которое характеризует автора как состоявшегося молодого учёного. Текст оформлен грамотно, с использованием современной научной терминологии. В работе используются как известные основные концепции физического эксперимента с поляризованными пучками, так и собственные идеи и разработки, предлагаемые автором. Основные применяемые автором алгоритмы и физические модели подробно описаны в тексте диссертации и обоснованы.

Полученные автором результаты имеют существенное значение с научной и методической точек зрения, способствуют развитию фундаментальной физики и решению современных прикладных задач. Основные положения, выносимые на защиту, в полной мере опубликованы в печатных работах автора. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Основные результаты, полученные автором, являются существенным вкладом в развитие методики проведения прецизионных экспериментов на ускорителях-накопителях. Последние являются флагманскими экспериментами мирового уровня, позволяющими развить научный потенциал ускорительных комплексов, в частности NICA, и ответить на фундаментальные вопросы науки. Что подтверждает новизну, ценность и значимость работы, выполненной Мельниковым Алексеем Александровичем.

С учётом вышеизложенного считаю, что диссертация Мельникова Алексея Александровича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,

Теряев Олег Валерианович,

доктор физ.-мат. наук по спец-ти 01.04.02 – «Теоретическая физика»,

Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), Лаборатория теоретической физики, заместитель директора.

141980, Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

Тел. +7 (496) 216 43 43, e-mail: teryaev@theor.jinr.ru,

\_\_\_\_\_ О.В. Теряев      « 16 » \_\_сентября\_\_\_\_\_ 2024 г.

Печать

#### **Сведения об оппоненте**

Теряев Олег Валерианович,

доктор физ.-мат. наук по спец-ти 01.04.02 – «Теоретическая физика»,

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.J. Silenko, O. V. Teryaev. Siberian Snake-Like Behavior for an Orbital Polarization of a Beam of Twisted (Vortex) Electrons. Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд.:JINR, Publishing Department, 2, 77–78, 2019.

2. С. Н. Вергелес, Н. Н. Николаев, Ю. Н. Обухов, А. Я. Силенко, О. В. Теряев. Эффекты общей теории относительности в прецизионных спиновых экспериментах по проверке фундаментальных симметрий. Успехи физических наук, ISSN:0042-1294, eISSN:1996-6652, Изд.:Редакцией журнала, 2, 113–154, 2023.

3. V. Abgaryan et al., MPD Collaboration. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA. Eur.Phys.J. A, 58, 140-189, 2022.

4. V.I. Zakharov, G.Yu. Prokhorov, O.V. Teryaev. Polarization of Elementary Particles in Heavy-Ion Collisions as a Manifestation of Quantum Field Theory Anomalies. *Physics of Particles and Nuclei*, ISSN:1063-7796, Изд:Pleiades Publishing Ltd., 522–528, 2021.
5. Zinchenko A., Teryaev O.V., Baznat M., Sorin A.S.. Polarization of Lambda-hyperons, vorticity and helicity structure in heavy-ion collisions. *PoS EPS-HEP*, 308-314, 2022.
6. G.Yu. Prokhorov, O.V. Teryaev, V.I. Zakharov. Gravitational chiral anomaly for spin 3/2 field interacting with spin 1/2 field. *Physical Review D*, Изд:APS, 2, 025022, 2022.
7. O. Teryaev. Studies of hadronic and heavy ion polarisation at NICA. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, Vol. 318–323, November 2022, p. 27-31.
8. E. Nazarova, R. Akhat, M. Baznat, O. Teryaev, A. Zinchenko. Monte Carlo Study of Lambda Polarization at MPD. *Phys.Part.Nucl.Lett.*, 4, 429-438, 2021.
9. G. Prokhorov, O. Teryaev, V. Zakharov. Polarization in HIC: comparison of methods. *EPJ Web Conf.*, 204 (2019) 05003.
10. Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, and O.V. Teryaev. Quantum spin dynamics in external classical fields. *EPJ Web of Conferences*, 10007-1– 10007-7, 2019.