

УТВЕРЖДАЮ

Директор НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

Егорычев В.Ю.

« 23 » 09 2024 года

Отзыв Ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения Института физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

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.

Актуальность темы диссертации.

Работа посвящена исследованию спин-орбитальной динамики частиц в ускорительных комплексах в области спиновых резонансов. Исследования представляют интерес в отношении разработки метода управления поляризацией и обнаружения электрического дипольного момента (ЭДМ) заряженных частиц. Обнаружение ненулевого ЭДМ может объяснить характер барионной асимметрии во Вселенной. Значения ЭДМ, полученные в эксперименте, позволят выбрать теорию за рамками Стандартной Модели физики частиц.

Основные результаты по изучению спин-орбитального движения и управления поляризацией получены в рамках работы диссертанта в международной научной коллаборации JEDI (Juelich Electric Dipole Moment Investigations). Также были получены универсальные аналитические и численные оценки, необходимые для планирования и проведения экспериментов по управлению поляризацией и изучению эффектов спиновой когерентности. Экспериментальные результаты, полученные на ускорителе COSY (COoler SYnchrotron), способствуют проведению и реализации экспериментов с поляризованными пучками в ведущих ускорительных комплексах мира.

Изучение особенностей спин-орбитального движения и управления поляризацией ансамбля частиц есть необходимый этап реализации спиновой программы на установке

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в г. Дубна. Внедрение предлагаемых диссертантом разработок способствует развитию программы прецизионных спиновых экспериментов в ускорительном комплексе. Практическое применение данных результатов существенно расширит научный потенциал комплекса, так как позволит проводить прецизионные исследования явлений за рамками Стандартной Модели физики частиц.

В частности, методика управления поляризацией в области спиновых резонансов позволит обеспечить любое требуемое направление поляризации в любой точке накопительного кольца. Данный факт можно использовать при исследовании столкновений частиц в коллайдере в зависимости от направления спина частиц. Исследование поведения спина в области спиновых резонансов также непосредственно важно для проведения экспериментов по поиску сигнала ЭДМ частиц.

Развитие и практическое применение методики управления поляризацией в режиме “спиновой прозрачности” способствует использованию элементов с относительно слабыми магнитными полями, не возмущающими орбитальное движение в накопителе. Стандартные методы управления поляризацией статическими спин-ротаторами вдали от спиновых резонансов предполагают существенные интегралы поля в элементах и возмущение орбиты. Исследование спин-орбитального движения и управления поляризацией в области спинового резонанса также имеет непосредственную важность для изучения процедуры калибровки эффективного фактора Лоренца, необходимого шага для измерения ЭДМ частотным методом.

Ещё одним вопросом за рамками Стандартной Модели является объяснение преобладания материи над антиматерией. Считается, что объяснение будет найдено, если будет обнаружен источник CP-нарушения. Одним из таких источников является ненулевой ЭДМ частиц. Его наличие обусловлено асимметрией распределения заряда внутри частицы. При этом в эксперименте изучается влияние ЭДМ на спиновую динамику частиц в кольцевом ускорителе.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и 0 приложений. Полный объём диссертации составляет 124 страницы, включая 63 рисунка и 0 таблиц. Список литературы содержит 96 наименований.

В первой главе приведены два основных способа описания спинового движения в ускорителе-накопителе: локальный метод, основанный на уравнении Т-БМТ и матричный анализ, позволяющий также получить интегральные характеристики накопительного кольца. Отдельное внимание уделено описанию спиновой динамики в области спиновых резонансов. Результаты данного раздела необходимы для определения основных характеристик спинового движения в процессах управления поляризацией в области целочисленного и высокочастотного (ВЧ) спинового резонанса, при пересечении резонансов и измерении их мощностей, а также для проведения процедуры калибровки эффективного Лоренц-фактора (γ_{eff}) при измерении ЭДМ частотным методом. Также приведён обзор основных методов поиска ЭДМ заряженных частиц. Особое внимание уделяется методу “замороженного” и “квази-замороженного” спина. Получены основные соотношения для наблюдаемых величин с учётом систематических ошибок измерений.

Вторая глава посвящена исследованию эффектов спиновой декогеренции в накопителях с электрическими и магнитными полями. Было показано, что в магнитном накопителе изменение частоты спин-прецессии линейно по изменению Лоренц-фактора (γ). Из решений нелинейной системы уравнений для синхронного принципа ускорения было получено выражение для смещения равновесного уровня энергии. Данный параметр является ключевым при оптимизации эффектов спиновой декогеренции в ускорителях-накопителях. Смещение равновесного уровня энергии связано с отклонениями частиц в шестимерном фазовом пространстве и может быть выражено в виде изменения универсальной скалярной величины, эффективного Лоренц-фактора (γ_{eff}). Выражение для γ_{eff} свидетельствует о том, что для минимизации эффектов спиновой декогеренции необходимо варьировать 3 параметра накопительного кольца: вертикальную и горизонтальную хроматичность, а также нелинейный коэффициент сжатия орбит. Была произведена численная проверка спин-орбитальной динамики частиц в отношении подавления эффектов спиновой декогеренции. В продольной и горизонтальной плоскости движения частиц результаты численных расчётов совпадают с предсказаниями аналитической модели на основе выравнивания γ_{eff} частиц. Для движения в вертикальной плоскости было показано, что для минимизации декогеренции частиц необходимо учитывать влияние целых и бетатронных резонансов. Для ускорителя COSY было проведено моделирование спиновой динамики протонов, результаты которого согласуются с полученными диссертантом экспериментальными данными. Также предложен метод построения резонансных диаграмм во всём энергетическом диапазоне накопителя для предсказания более оптимальных условий с точки зрения декогеренции частиц. На основе полученного соотношения для γ_{eff} была модернизирована структура накопительного кольца для поиска ЭДМ, разрабатываемая в коллаборации JEDI и SrEDM. В предложенной диссертантом структуре возможно получение времени спиновой когерентности порядка 1000 секунд, что на порядок больше, чем в изначальной версии накопителя.

Третья глава посвящена исследованию управления поляризацией для поиска ЭДМ. Для ускорителя COSY представлена методика управления поляризацией в области целочисленного спинового резонанса с помощью двух навигаторных соленоидов со “слабыми” полями. Получены выражения для направления инвариантной оси в точке поляриметра и наведённой частоты спин-прецессии в зависимости от полей в управляющих соленоидах. Проведены оценки параметров проведения эксперимента с учётом характера несовершенств структуры ускорителя COSY и особенностей перестройки системы высокочастотного питания.

Ещё одним аспектом, рассматриваемым в данной главе, является метод уменьшения деполяризации пучка частиц при использовании высокочастотного спин-ротатора. Данный шаг является ключевым с точки зрения перевода поляризации в плоскость накопительного кольца и проведения экспериментов по поиску ЭДМ. Решение данной задачи, представленное диссертантом, существенно способствовало успешному проведению экспериментальной программы на COSY. Было получено выражение для фактора спин-декогеренции, возникающего при учёте продольного движения частиц. Представлены результаты численного моделирования, совпадающие с аналитическими выкладками, и на основе которых можно провести оптимизацию процесса перевода поляризации относительно условий проведения эксперимента на COSY.

В четвёртой главе приведено исследование структур типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с точки зрения измерения ЭДМ частотным методом. Было получено выражение для измеряемой частоты спин-прецессии для обоих типов структур с радиальными возмущениями поля. В структуре типа “замороженного спина” все локальные вращения складываются линейно, что делает возможным измерение ЭДМ при инъекции пучка в противоположном направлении и вычитании частот. В структуре типа “квази-замороженного спина” имеется нелинейная добавка к частоте из-за антикоммутиации локальных вращений. Было показано, что она может быть вычтена при смене полярности поля как систематический эффект, не влияющий на точность измерения ЭДМ. Направление инвариантной оси в точке поляриметра также не является строго радиальным в структуре типа “квази-замороженного спина” с радиальными возмущениями поля.

В заключении приведены результаты диссертационной работы.

Основные положения диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработан метод увеличения времени спиновой когерентности на основе изменения равновесного уровня энергии частиц.
2. Предложен метод увеличения времени спиновой когерентности протонов при учёте влияния спиновых резонансов.
3. Представлены результаты вычисления мощностей внутренних и целых спиновых резонансов для ускорителя COSY.
4. Представлена концепция спин-прозрачного режима управления поляризацией, включающая в себя аналитические оценки, проработку этапов эксперимента, определение параметров оборудования, необходимого для установки на накопителе.
5. Предложена методика управления поляризацией протонов с помощью ВЧ спин-ротатора без потери поляризации.
6. 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.

Достоверность полученных результатов обеспечивается соответствием аналитических выражений результатам численного моделирования. Результаты аналитических и численных расчётов находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами, и результатами, полученными в ходе экспериментов на ускорителе COSY.

Результаты, полученные в диссертационной работе, были доложены на нескольких всероссийских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Выводы и положения диссертации полностью обоснованы.

Практическая значимость диссертации заключается в подготовке программы и, главное, методов и рекомендаций, имеющих определяющее значение для создания возможности измерения ЭДМ на сооружаемом ускорителе NICA в ОИЯИ (г. Дубна).

Личный вклад: все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично либо при его непосредственном участии, в том числе в соавторстве с коллаборацией JEDI (Juelich Electric Dipole Moment Investigations) и сотрудниками ИЯИ, МФТИ, ИТФ.

Замечания по работе

Диссертация Мельникова А.А. в целом написана ясно, хорошим русским языком, полностью освещает цели, методы и результаты проделанной работы. К ней, однако, имеется несколько замечаний и вопросов, которые не снижают ее ценности.

С точки зрения оформления в диссертации имеется ряд орфографических ошибок (например, «результаты», «урвнения», «прецесии»). Некоторые термины (ф. 2.6) вводятся позже их первого использования в тексте (ф.2.2) и больше нигде не используются.

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»).

Некоторые аспекты в диссертации можно было бы не описывать по моему мнению, например описание свойств матриц Паули. При этом 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.

Заключение

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертационная работа Мельникова А.А. является законченным научным исследованием и соответствует специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики. Она вносит существенный вклад в развитие программы проведения прецизионных экспериментов с поляризованными пучками в комплексе NICA и, возможно, в других ведущих ускорительных центрах.

Рассмотренная диссертация показывает, что её автор в совершенстве владеет современными аналитическими, численными и экспериментальными методами исследований. Сами методы подробно описаны, даны обоснования их использования. В списке литературы упоминаются основные результаты, полученные другими научными группами, что показывает хорошее знание современного состояния исследований в данной области.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях: 10 печатных работ изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи — в журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science, представлены на ведущих международных конференциях.

Результаты диссертации Мельникова А.А. были представлены, обсуждены и одобрены на научном семинаре в Отделении экспериментальной физики Федерального

государственного бюджетного учреждения Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" 10 июля 2024 года.

Диссертация Мельникова Алексея Александровича «Исследование спин-орбитального движения и управления поляризацией в накопительном кольце для поиска электрического дипольного момента лёгких ядер» удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составил
Ведущий научный сотрудник
Отделения экспериментальной физики
Доктор физико-математических наук

Мочалов Василий Вадимович

Подпись В.В. Мочалова заверяю:
Учёный секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

Прокопенко Николай Николаевич

Почтовый адрес:
142281, Московская обл., г. Протвино, площадь Науки д.1,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
Тел.: (4967) 71-36-23
email: fgbu@ihep.ru

Сведения о ведущей организации

Полное наименование	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Краткое наименование	НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ
ИНН	5037007869
Ведомственная принадлежность	НИЦ «Курчатовский институт»
Почтовый индекс, адрес организации	142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1
Телефон	+7 (4967) 71-36-23
Адрес электронной почты	fgbu@ihep.ru
Веб-сайт	http://www.ihep.ru

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Denisov S.P et al., Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 2 data, Journal of Instrumentation, (2024) 19, 2, P02009
2. Denisov S.P et al., Performance and calibration of quark/gluon-jet taggers using 140 fb⁻¹ of pp collisions at TeV with the ATLAS detector, Chinese Physics C, (2024) 48, 2, 23001
3. Kachanov V. et al., Muon identification using multivariate techniques in the CMS experiment in proton-proton collisions at sqrt(s) = 13 TeV, Journal of Instrumentation (2024) 19, 2, P02031
4. Kachanov V. et al., Luminosity determination using Z boson production at the CMS experiment, The European Physical Journal C (2024), 84, 1, 26
5. Artamonov A. et al., Momentum scale calibration of the LHCb spectrometer, Journal of Instrumentation (2024) 19, 2, P02008
6. Artamonov A. et al., The LHCb RICH upgrade for the high luminosity LHC era, Nuclear Instruments and Methods A (2024) 1058, 168824
7. Novoskoltsev F.N. et al., Channel for Simultaneous Formation of Neutrino and Antineutrino Beams at the U-70 Accelerator Complex, Physics of Atomic Nuclei (2024) 86, 1450
8. Kholodenko S. et al., Development of a new CEDAR for kaon identification at the NA62 experiment at CERN, Journal of Instrumentation (2024) 19, 5, P05005
9. Kachanov V. et al., Development of the CMS detector for the CERN LHC Run 3, Journal of Instrumentation (2024) 19, 5, P05064
10. A.V. Ryazantsev et al., A Scintillating Fiber Hodoscope for the SPASCHARM Experiment at the U-70 Accelerator Complex, Instrum. Exp. Tech. 66 (2023) 4, 563.

11. V.V. Abramov et al, Conceptual Design of the SPASCHARM Experiment, Phys. Part. Nucl. 54 (2023) 1, 69-184
12. В.В. Мочалов, Science Requirements and Detector Concepts for the Electron-Ion Collider : EIC Yellow Report, Nucl. Phys. A 1026 (2022) 122447
13. Садовский С.А., Харлов Ю.В. и др. Evidence of Spin-Orbital Angular Momentum Interactions in Relativistic Heavy-Ion Collisions, Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 1, 012301
14. Абрамов В.В. Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams, Phys. Part. Nucl. 52 (2021) 6, 1044-1119 • e-Print: 2102.08477 [hep-ph]
15. PANDA Collaboration, PANDA Phase One, The European Physical Journal A 57 (2021) 6, 184