

Отзыв

официального оппонента Свириды Дмитрия Николаевича 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.

Диссертационная работа Мельникова А.А. посвящена изучению особенностей спиновой динамики в области спиновых резонансов с целью проведения прецизионных экспериментов на ускорителях-накопителях. Одним из таких экспериментов является поиск Электрического Дипольного Моментa (ЭДМ) заряженных частиц. ЭДМ, в случае обнаружения, может пролить свет на характер барионной асимметрии вселенной, и, несомненно, будет способствовать развитию фундаментальной физики за пределами Стандартной Модели.

Основная экспериментальная часть работы выполнена в исследовательском центре г. Юлих в Германии. При этом была решена задача по оптимизации процесса перевода поляризации пучка частиц в плоскость накопительного кольца с помощью высокочастотного (ВЧ) соленоида. Основной опыт работы на ускорителе COSY получен с дейтронами, которые являются на порядок менее чувствительными к спиновым резонансам. Управление поляризацией протонов представляет собой гораздо более сложную задачу. Диссертантом были даны методические рекомендации по оптимизации данного процесса, что существенно способствовало выполнению экспериментальной программы на COSY.

После перевода поляризации в плоскость накопительного кольца производится эксперимент по поиску ЭДМ на основе данных о спин-прецессии частиц. Мельниковым А.А. также аналитически и численно было проанализировано спин-орбитальное движение протонов в накопителе. Было показано, что существенным фактором, влияющим на разброс частот спин-прецессии частиц, является учёт спиновых резонансов при движении в вертикальной плоскости. Представленные диссертантом аналитические и численные оценки для достижимого времени когерентности соответствуют значениям, полученным в эксперименте. Исследование эффектов спиновой декогеренции протонов имеет определяющее значение как для экспериментальной программы на ускорительном комплексе Nuclotron based Ion Collider fAcility (NICA), так и для создания специализированного накопителя для поиска ЭДМ.

Также диссертантом разработана методика управления поляризацией в области целочисленного спинового резонанса на ускорителе COSY и проведены работы по её экспериментальной реализации. Развитие “спин-прозрачной” методики управления поляризацией — ключевой шаг в проведении прецизионных экспериментов на накопителях. Первый в своём роде эксперимент по управлению спином в целочисленном резонансе планировался изначально на ускорителе COSY. Результаты разработок в данной области используются для управления поляризацией в комплексе NICA. Успешная реализация данной концепции позволит вывести эксперименты с поляризованными пучками на новый уровень точности, что является ключевым фактором для таких экспериментов, как поиск ЭДМ частиц. 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.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 124 страницы, включая 63 рисунка. Приложений и таблиц работа не содержит. Список литературы состоит из 96 наименований. Текст работы изложен понятным языком, а основные результаты многократно представлены автором на различных всероссийских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах.

Во введении приведен достаточно подробный обзор современного состояния области исследований, направленных на изучение спиновой динамики частиц. Также в нём указывается цель диссертационной работы, описываются задачи, стоящие перед диссертантом. Обсуждается научная новизна, обосновывается практическая значимость и актуальность проводимого исследования.

В первой главе приводятся основные аналитические методы описания спин-орбитального движения частиц в накопителе, а также — основанные на этом методы управления поляризацией пучка частиц. Отдельное внимание уделяется описанию методов измерения ЭДМ, таких как метод “замороженного” и “квази-замороженного” спина. Проводится сравнение методов измерения ЭДМ в пространственной и частотной области. Для обоих методов описывается способ учёта систематических ошибок и основные этапы проведения эксперимента.

Во второй главе рассматриваются эффекты спин-декогеренции пучка частиц в накопителях. Вводится понятие эффективного Лоренц-фактора, проводится проверка данной концепции в численном эксперименте. Показано, что выравнивание равновесных уровней энергии частиц соответствует уменьшению разброса частот спин-прецессии. Также было продемонстрировано, что учёт влияния спиновых резонансов для протонов имеет определяющее значение при планировании эксперимента по поиску ЭДМ. Для ускорителя COSY была получена резонансная диаграмма в вертикальной плоскости, вычислены значения мощностей для целых и внутренних резонансов. Основываясь на результатах данной главы, была предложена новая структура накопителя-прототипа для поиска ЭДМ протона с суперпериодичностью 2 и более жёсткой фокусировкой. Было показано, что в данной структуре можно достичь необходимой величины времени спиновой когерентности ~ 1000 с, что на порядок больше, чем в изначально проектируемой структуре.

Третья глава посвящена исследованию управления поляризацией для поиска ЭДМ. Разработана схема управления поляризацией в окрестности целочисленного спинового резонанса на ускорителе COSY, включая методику проведения эксперимента, оценки параметров необходимого оборудования для установки в накопительное кольцо. Также в третьей главе рассматривается вопрос управления поляризацией в области ВЧ спинового резонанса: представлены аналитические оценки и результаты численного моделирования процесса переворота поляризации пучка с учётом синхротронных колебаний. Получено

выражение для фактора спин-декогеренции частиц, что позволяет сделать практические выводы по минимизации деполяризации пучка в процессе переворота поляризации.

В четвёртой главе рассматриваются вопросы измерения ЭДМ частотным методом в структурах типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина. Основные характеристики структур с радиальными возмущениями, такие как частота спин прецессии и направление инвариантной оси в точке наблюдения, были вычислены с помощью матричной техники. Получен вид нелинейной добавки к частоте для структуры типа “квази-замороженного” спина, и показано, что она МДМ-типа.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Замечания и пожелания:

1. 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.
2. 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 переполюсовке, но и возникновению нелинейных эффектов, искажающих пространственные характеристики этих полей.
3. На стр. 45 из текста работы совершенно непонятно, чем использование ВЧ резонатора помогает увеличению времени спиновой когерентности, и каковы должны быть его параметры
4. В разделе 2.1 делается утверждение о том, что вся спиновая динамика частиц в накопителях определяется единственным скалярным параметром γ_{spin} , «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.
5. Возвращаясь к CW/CCW экспериментам, стоило бы, на мой взгляд, 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.

6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

Замеченные опечатки:

- стр. 7-8. : обозначения для ЭДМ вида dn , dp и dm следовало бы приводить в виде d_n , d_p и d_m , также, как и далее в тексте
- стр. 8, последний абзац: «..изначально не предназна » заменить на «предназначена»
- стр. 33, последний абзац: « Φ_{\square}^{\square} » следует читать как « $\Phi_{\square\square}^{\square}$ »
- стр. 60, предпоследний абзац: « \square оборов» заменить на « \square оборотов»

Приведенные здесь замечания не являются критичными, нисколько не снижают значимости и ценности полученных результатов.

Считаю диссертационную работу Мельникова А.А. отличным и полным научным трудом, ценным с научной и методической точек зрения. Хочу отметить, что текст диссертации написан доступным грамотным языком. Автор продемонстрировал отличное знание научной терминологии и основных концепций области исследований.

Полученные автором результаты имеют существенное значение как для фундаментальной физики, так и для прикладных задач. Основные результаты диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Проведённая автором методическая и экспериментальная работа будет способствовать проведению экспериментов нового уровня точности на существующих и строящихся ускорителях-накопителях, а также окажет влияние на проектирование новых накопительных колец, что, в свою очередь, позволит исследовать физику за рамками Стандартной модели. Новизна и актуальность работы, таким образом, несомненна.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Достоверность и обоснованность результатов диссертации обеспечивается использованием корректных аналитических и численных методов описания спиновой динамики, таких как модель уединённого резонанса, спиновый формализм и др. Полученные автором экспериментальные результаты на ускорителе COSY полностью согласуются с теоретическими и численными расчётами, а также предыдущими экспериментальными данными. Основные научные результаты, полученные диссертантом, были многократно апробированы в ходе совещаний коллабораций и рабочих групп, на международных конференциях и симпозиумах, были напечатаны в реферируемых журналах, что подтверждает достоверность и надёжность обсуждаемой работы.

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,

Свирида Дмитрий Николаевич,

кандидат физ.-мат. наук по спец-ти 01.04.16 – «Физика ядра и элементарных частиц»,

Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, лаборатория поляризационных исследований, старший научный сотрудник.

123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Тел. +7-499-789-9629, e-mail: Dmitry.Svirida@itep.ru,

_____ Д. Свирида

« 01 » _августа__2024 г.

Подпись Свириды Дмитрия Николаевича заверяю:

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов

Сведения об оппоненте

Свирида Дмитрий Николаевич,

кандидат физ.-мат. наук по специальности 01.04.16 – «Физика ядра и элементарных частиц»,

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

1. A.V. Tishevsky (Dubna, JINR), I.G. Alekseev (Moscow, ITEP), I.S. Volkov (Dubna, JINR), Yu. V. Gurchin (Dubna, JINR), A.Yu. Isupov (Dubna, JINR) et al. «Study of the Scintillation Detector Prototype for the Upgraded Polarimeter at the Internal Target Station at the Nuclotron», Phys.Part.Nucl.Lett. 20 (2023) 5, 1165-1168; DOI:10.1134/S1547477123050710.
2. A.A. Poblaguev (Brookhaven), A. Zelenski (Brookhaven), E. Aschenauer (Brookhaven), G. Atoian (Brookhaven), K.O. Eyser (Brookhaven) et al. «Precision small scattering angle measurements of proton-proton and proton-nucleus analyzing powers at the RHIC hydrogen jet polarimeter», e-Print: 2211.17146 [hep-ex].
3. STAR Collaboration • M.S. Abdallah (American U., Cairo) et al. «Longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet and dijet production in polarized proton collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV», Phys.Rev.D 105 (2022) 9, 092011; DOI:10.1103/PhysRevD.105.092011.
4. STAR Collaboration • M.S. Abdallah (American U., Cairo) et al. « Global Λ -hyperon polarization in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=3$ GeV», Phys.Rev.C 104 (2021) 6, L061901; DOI: 10.1103/PhysRevC.104.L061901.
5. STAR Collaboration • Jaroslav Adam (Brookhaven) et al. « Measurement of transverse single-spin asymmetries of π^0 and electromagnetic jets at forward rapidity in 200 and 500 GeV transversely polarized proton-proton collisions», Phys.Rev.D 103 (2021) 9, 092009; DOI: 10.1103/PhysRevD.103.092009.
6. A.A. Poblaguev (Brookhaven), A. Zelenski (Brookhaven), E. Aschenauer (Brookhaven), G. Atoian (Brookhaven), K.O. Eyser (Brookhaven) et al. « Precision Small Scattering Angle Measurements of Elastic Proton-Proton Single and Double Spin Analyzing Powers at the RHIC Hydrogen Jet Polarimeter», Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 16, 162001; DOI:10.1103/PhysRevLett.123.162001.
7. Andrei Poblaguev (Brookhaven), A. Zelenski (Brookhaven), G. Atoian (Brookhaven), E.C. Aschenauer (Brookhaven), K.O. Eyser (Brookhaven) et al. « Study of elastic proton-proton single and double spin analyzing powers at RHIC HJET polarimeter», PoS SPIN2018 (2019), 143; DOI: 10.22323/1.346.0143.