

УТВЕРЖДАЮ

Ректор НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессор

М.Н. Стриханов

01 "Сентябрь" 2020 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Диссертация Аксентьева Александра Евгеньевича на тему «Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрана в накопительном кольце» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника выполнена в Институте лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) на кафедре Электрофизических установок (№ 14), в период с 2015 по 2019 гг.

В период подготовки диссертации А.Е. Аксентьев обучался в очной аспирантуре Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Диплом об окончании аспирантуры выдан в 2019 году ФГАОУ ВО «Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ».

А.Е. Аксентьев окончил с отличием НИЯУ МИФИ по специальности Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в 2015г. с присвоением квалификации «инженер-физик» и в том же году поступил в аспирантуру кафедры Электрофизических установок.

По результатам рассмотрения диссертации «Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрана в накопительном кольце» на заседании кафедры Электрофизических установок 26 февраля 2020г. принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы. Диссертация Аксентьева Александра Евгеньевича «Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрана в накопительном кольце» является законченной научно-квалификационной работой и посвящена решению актуальной проблемы современной фундаментальной физики – проверке нарушения СР-инвариантности, одного из условий Барионной асимметрии вселенной, с использованием накопительного кольца. В ходе работы соискателем изучены особенности спиновой динамики пучка в накопительном кольце в окрестности т.н. состояния “замороженного спина.” Под состоянием “замороженного спина” понимается ситуация, когда направление спин-вектора частицы пучка зафиксировано относительно её вектора импульса. Полученные выводы основаны на проведении численного моделирования динамики пучка ионов в накопительном кольце с помощью программы COSY Infinity; они согласуются с аналитическими оценками и результатами численных экспериментов, проведенных другими авторами с помощью альтернативных пакетов программ, а также результатами, полученными в экспериментах на ускорителе COSY (Исследовательский центр “Юлих,” Германия).

Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично, в частности автором:

1. Разработан метод измерения электрического дипольного момента дейтрана, основанный исключительно на измерении частоты прецессии поляризации пучка при обращении в накопительном синхротроне.
2. Предложен принцип построения магнитооптической структуры накопительного синхротрона, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрана.
3. Получены результаты исследования явления декогеренции спина пучка дейтранов в окрестности состояния “замороженного спина,” а также метода подавления спин-декогеренции, основанного на использовании нелинейных магнитных элементов.
4. Исследовано влияние различного рода несовершенств оптической структуры накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
5. Проведено численное моделирование метода калибровки нормализованной частоты прецессии спина при смене полярности ведущего поля накопительного кольца.
6. Исследованы систематические ошибки в различных предложенных методах поиска электрического дипольного момента.

7. Проведена оценка статистических свойств разработанного метода измерения электрического дипольного момента в накопительном кольце.

Результаты диссертации внедрены:

1. Разработанный метод является одним из предложений, входящих в отчёт “Feasibility Study for an EDM Storage Ring,” подготавливаемый коллаборацией CPEDM для CERN.

2. Методы статистической обработки данных эксперимента по наблюдению временной инвариантности в условиях накопительного кольца были применены во время проведения эксперимента Time Reversal Invariance at Cosy (TRIC).

3. Во время исследований по оптимизации времени когерентности спина с помощью сектупольных полей на ускорительном комплексе COSY (Исследовательский центр "Юлих").

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием результатов численного моделирования, проведённого соискателем, с ранее проведенными аналитическими оценками, а также численными экспериментами, проведёнными другими авторами с использованием альтернативных пакетов программ. Часть результатов, касающихся декогеренции спинов частиц пучка, также согласуется с результатами экспериментов, проведённых на ускорителе COSY.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые предложен метод измерения электрического дипольного момента дейтрона, требующий измерения единственной физической величины — частоты прецессии поляризации пучка в накопительном синхротроне.

2. Изучена спин-орбитальная динамика пучка в накопительном кольце в окрестности состояния “замороженного спина”.

3. Предложен метод калибровки средней по пучку нормированной частоты прецессии спина, позволяющий уменьшить вклад систематических ошибок в оценку ЭДМ.

4. Введено определение эффективного значения фактора Лоренца, необходимого для определения зависимости частоты прецессии спина частицы от её положения в фазовом пространстве.

5. Выполнены статистические оценки предельной чувствительности измерения ЭДМ предложенным методом.

Практическая ценность Разработанный метод измерений представляет интерес с точки зрения планирования экспериментов по поиску

ЭДМ на различных ускорителях, в том числе на ускорительном комплексе NICA ОИЯИ (Дубна).

Апробация результатов диссертации.

Основные результаты диссертации были представлены на международных и российских конференциях:

International Particle Accelerator Conference 2017, 2019;

Международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии” III-V (2016--2019 гг.);

Результаты докладывались и обсуждались на конференциях коллаборации JEDI 2017—2019, а также студенческих семинарах Института Ядерных Исследований Исследовательского центра “Юлих.”

Специальность, которой соответствует диссертация

Тема диссертации соответствует специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Согласно Паспорту специальности 01.04.20 (по физико-математическим наукам), рассматриваемые в диссертации вопросы относятся к пунктам:

1. Расчетно-теоретические аспекты создания ускорителей, накопителей и систем транспортировки ускоренных пучков. Анализ проблем расходимости пучка.
3. Исследования и расчеты динамики пучков заряженных частиц в ускоряющих и фокусирующих каналах. Сложение пучков. Разработка расчетных программ.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях

Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях: 5 изданы в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, 7 — в трудах международных конференций.

Публикации в журналах, включённых в базу цитирования SCOPUS:

1. A. Aksentyev, Y. Valdau, D. Eversheim, B. Lorentz. Test of Time Reversal Invariance at Cosy (TRIC) // Acta Physica Polonica B **48** pp. 1925--1934 (2017) (**WoS, Scopus**)
2. Y. Valdau, A. Aksentyev, D. Eversheim, B. Lorentz. The physics program of PAX at COSY // J.Phys.: Conf. Ser. **678** (2016) 012027 (**WoS, Scopus**)
3. A.E. Aksentyev, Y.V. Senichev. Statsitical precision in charged particle EDM search in storage rings // J. Phys.: Conf. Ser. **941** (2017) 012083 (**WoS, Scopus**)

4. **A. Aksentev.** Modeling of spin-orbital dynamics in a storage ring // J.Phys.: Conf. Ser. **1238** (2019) 012079 (**WoS, Scopus**)

5. **A. Aksentyev, Y. Senichev.** Frequency domain method of the search for the electric dipole moment in a storage ring. J.Phys.: Conf. Ser. **1435** (2020) 012026 (**WoS, Scopus**)

Публикации в сборниках трудов международных конференций

6. **Аксентьев, Ю. Сеничев.** Статистическая точность при поиске ЭДМ заряженных частиц в накопительных кольцах. В сборнике: Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017. Сборник научных трудов III Международной конференции. 2017. С. 51.

7. **Аксентьев.** Моделирование спин-орбитальной динамики пучка в накопительном кольце. В сборнике: Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2018 Сборник научных трудов IV Международной конференции. 2018. С. 391-392.

8. **Аксентьев, Ю. Сеничев.** Декогеренция спина в структуре с замороженным спином, её подавление и эффект на ЭДМ статистику в методе Frequency Domain. В сборнике: Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2019 Сборник научных трудов V Международной конференции. 2019. С. 132-133.

9. **A. Aksentyev, Y. Senichev.** Model of statistical errors in the Search for the Deuteron EDM in the Storage Ring. В кн.: Proceedings of 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17), 14-19 May 2017. – Copenhagen, Denmark. Pp. 2258-2260.

10. **A. Aksentyev, Y. Senichev.** Simulation of the Guide Field Flipping Procedre for the Frequency Domain Method. В кн.: Proceedings of 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19-24 May 2019 – Melbourne, Australia.

11. **A. Aksentyev, Y. Senichev.** Spin Motion Perturbation Effect on the EDM Statistic in the Frequency Domain Method. В кн.: Proceedings of 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19-24 May 2019 – Melbourne, Australia.

12. **A. Aksentyev, Y. Senichev.** Spin Decoherence in the Frequency Domain Method of Search of a particle EDM. В кн.: Proceedings of 10th Int. Paritcle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19-24 May 2019 – Melbourne, Australia.

Результаты исследования также вошли в отчёт «Feasibility Studiy for an EDM Storage Ring», подготавливаемый коллаборацией CPEDM для CERN.

Личный вклад автора в публикациях

[1], [2] Разработал методику обработки данных эксперимента, для поиска и коррекции систематических ошибок в

- эксперименте по проверке временной инвариантности;
- [3], [6], [9] Оценил статистическую точность и требуемые параметры, такие, как длительность измерительного цикла, предполагаемого эксперимента по поиску ЭДМ;
- [4], [7] Разработал трекинговый код на основе интегратора Рунге-Кутты для моделирования спин-орбитальной динамики в накопительном кольце;
- [5] Провёл численную оценку частоты МДМ спин-прецессии при реалистичной точности установки оптических элементов ускорителя;
- [8], [12] Исследовал декогеренцию спина в накопительном кольце в области нулевого спинного резонанса и выявил связь между частотой прецессии и наклоном оси прецессии спина в неидеальной структуре;
- [10] Промоделировал процедуру калибровки ведущего поля накопительного кольца с помощью наблюдений за прецессией поляризации пучка в горизонтальной плоскости;
- [11] Исследовал влияние бетатронного движения частицы на систематическую ошибку определения частоты прецессии её спина; показал незначительность эффекта и его контролируемость.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод измерения электрического дипольного момента дейтрона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина при движении пучка в накопительном синхротроне.
2. Принцип построения магнитооптической структуры накопительного синхротрона, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.
3. Результаты исследования спин-декогеренции пучка дейtronов в окрестности состояния “замороженного спина” и метод её подавления с помощью нелинейных оптических элементов.
4. Результаты исследования эффектов различного рода несовершенств оптической структуры накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
5. Метод калибровки нормализованной частоты прецессии спина при смене полярности ведущего поля и его численная модель.
6. Результаты исследования систематических ошибок в различных

предложениях по проведению эксперимента по поиску электрического дипольного момента и их сравнения с разработанным методом.

7. Результаты исследования статистических свойств разработанного метода измерения электрического дипольного момента в накопительном кольце.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1) В разделе 2.2.4 не рассмотрен вопрос о причинах невозможности одновременной оптимизации всех семейств сектуполей; не ясно, это следствие только использованного численного метода или же физических процессов.

2) В разделе 2.2.6 нет объяснения, каким образом сектупольные поля унифицируют не только нормализованную частоту прецессии спина, но также и направления осей стабильного спина частиц пучка.

3) В разделе 2.4.3 ничего не сказано о характере калибровочных графиков процедуры по смене полярности ведущего поля, а именно множественности значений разницы между радиальными компонентами часты прецессии спина пучков, движущихся в противоположных направлениях в кольце, при одном и том же значении разницы вертикальной компоненты.

Принято следующее решение:

Диссертация Аксентьева Александра Евгеньевича «Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника как законченная научно-квалификационная работа, в результате которой разработан метод измерения электрического дипольного момента (дейтрона) в накопительном кольце, учитывающий особенности спиновой динамики пучка вблизи состояния “замороженного спина.” Поиск ЭДМ элементарных частиц является перспективным направлением исследований, в связи с чем разработанный метод имеет потенциал для внесения значительного вклада в развитие ускорителей заряженных частиц научного назначения в России.

Диссертация Аксентьева Александра Евгеньевича «Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце» заслушана и одобрена на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ.

Заключение принято на заседании кафедры Электрофизических установок
НИЯУ МИФИ от 26 февраля 2020г. Присутствовало на заседании 17 чел.
Результаты голосования: «за» – 11, «против» – нег, «воздержалось» – нет,
протокол НТС кафедры Электрофизических установок № 1 от 26 февраля
2020г.

И.О. заведующего кафедрой
Электрофизических установок,
к.т.н., доцент



B.V. Дмитриева

Ученый секретарь кафедры
Электрофизических установок,
д.т.н., профессор



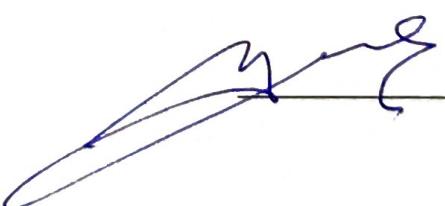
A.E. Шиканов

Директор Института лазерных и
плазменных технологий
д.ф.-м.н., профессор



A.P. Кузнецов

Председатель Совета по аттестации и
подготовке научно-педагогических
кадров НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н., профессор



N.A. Кудряшов