



**Аксентьев Александр Евгеньевич**

**Метод замороженного спина для поиска  
электрического дипольного момента дейтрона в  
накопительном кольце**

Специальность 01.04.20 —  
«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в **Forschungszentrum Jülich GmbH**.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор  
**Сеничев Юрий Валерьевич**  
кандидат физ.-мат. наук, доцент  
**Полозов Сергей Маркович**

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество**,  
доктор физико-математических наук, профес-  
сор,  
Не очень длинное название для места работы,  
старший научный сотрудник  
**Фамилия Имя Отчество**,  
кандидат физико-математических наук,  
Основное место работы с длинным длинным  
длинным длинным названием,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-  
разовательное учреждение высшего професси-  
онального образования с длинным длинным  
длинным длинным названием

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY** г. в **XX** часов на заседании  
диссертационного совета **Д 123.456.78** при **Название учреждения** по адре-  
су: **Адрес**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке **Название библиотеки**.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учре-  
ждения, просьба направлять по адресу: **Адрес**, ученому секретарю диссер-  
тационного совета **Д 123.456.78**.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm YYYY** года.  
Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00**.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
**Д 123.456.78**,  
д-р физ.-мат. наук

**Фамилия Имя Отчество**

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Данное диссертационное исследование является частью проекта, посвящённого поиску ЭДМ элементарных частиц.

Одной из основных проблем современной физики является барионная асимметрия вселенной, т.е. преобладание числа частиц над числом античастиц в наблюдаемой вселенной. На текущий момент нет никаких свидетельств существования первичной антиматерии в нашей галактике; количество наблюдаемой антиматерии согласуется с её производством во вторичных процессах. Также не наблюдается фонового гамма-излучения от нуклон-антинуклонных взаимодействий, которое можно было бы ожидать, если бы вещество и антивещество во вселенной были бы разделены на кластеры галактик. [1]

В своей статье 1967 года, академик АН СССР А.Д. Сахаров сформулировал три необходимых условия, которым должен был удовлетворять процесс бариогенеза, чтобы материя и антиматерия в первичной вселенной производились с разными скоростями. Побудительным мотивом формулировки стало открытие космического фонового излучения и нарушение CP четности в системе нейтральных K-мезонов. [2] Три необходимых условия Сахарова таковы:

- несохранение барионного числа;
- нарушение зарядовой симметрии C- и CP-симметрии;
- взаимодействие вне теплового равновесия.

Если они существуют, перманентные ЭДМ частиц нарушают P- и T-симметрии, а значит, по теореме CPT — и CP-симметрию. Стандартная Модель (СМ) элементарных частиц позволяет учесть CP-нарушение посредством матрицы Кабиббо-Кабаяши-Масакавы, однако значения ЭДМ, предсказываемые ей для, например, нейтрона, лежат в диапазоне от  $10^{-33}$  до  $10^{-30}$  е·см. [3] К примеру, теория SUSY (суперсимметрия) предсказывает наличие ЭДМ гораздо большей величины (на уровне  $10^{-29} - 10^{-24}$  е·см). Таким образом, ЭДМ элементарных частиц являются чувствительным индикатором физики за гранью СМ.

Поиск ЭДМ частиц был начат более 50-ти лет назад. Первый эксперимент по измерению ЭДМ нейтрона был проведён др. Н.Ф. Рэмзи (dr. N.F. Ramsey) в конце 1950-х годов. По результатам эксперимента, верхняя граница ЭДМ нейтрона была ограничена величиной  $5 \cdot 10^{-20}$  е·см. [4] С тех пор было проведено множество более точных экспериментов, и на данный момент, верхняя граница на ЭДМ нейтрона находится на уровне  $2.9 \cdot 10^{-26}$  е·см. [5; 6]

Большинство экспериментов проводятся на зарядово-нейтральных частицах, таких как нейтрон или атомы. ЭДМ заряженных частиц, таких как протон или дейтрон, можно измерить в накопительном кольце,

на основе прецессии поляризации пучка в электрическом поле в системе центра масс пучка.

Идея использования накопительного кольца для детектирования ЭДМ заряженных частиц появилась в процессе разработки  $g - 2$  эксперимента [7] в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (BNL, США). По результатам экспериментов в BNL, верхняя граница на мюонный ЭДМ была установлена на уровне  $10^{-19}$  е·см. [8] В 1990-х годах, дискуссия преимущественно велась вокруг мюонного эксперимента [9], однако также рассматривался и дейтрон, у которого похожее отношение аномального магнитного момента к массе.

В 2004 году, коллаборацией srEDM (Storage Ring EDM Collaboration) [10] в BNL был предложен эксперимент 970 по детектированию ЭДМ дейтрона на уровне  $10^{-27}$  е·см в накопительном кольце. Начиная с 2005 года, на циклотроне AGOR KVI-центра передовых радиационных технологий (KVI-Center for Advanced Radiation Technology) в университете Гронингена была проведена серия тестов по технико-экономическому обоснованию эксперимента.

В 2008 году начались тесты на накопительном кольце COSY в Исследовательском центре “Юлих” (FZJ, Германия). Впоследствии, эти тесты развились в программу по изучению динамики пучка для разработки технологий, требуемых для эксперимента по поиску ЭДМ. В этом же году было сделано второе предложение [11] эксперимента по поиску ЭДМ дейтрона, в этот раз, на уровне  $10^{-29}$  е·см через один год сбора статистики.

В то же время было решено, что эксперимент по детектированию ЭДМ протона обладает некоторыми достоинствами, в техническом отношении. Среди таковых возможность одновременной инжекции противоположно-циркулирующих пучков, что позволяет оптимизировать сокращение систематических эффектов, в которых не нарушается временная симметрия. Тем не менее, на COSY была продолжена работа над экспериментом с дейтроном, ввиду того, что результаты, полученные для дейтрона, распространяются и на протон.

В 2011 году была сформирована коллаборация JEDI (Jülich Electric Dipole moment Investigations). [12] Целью коллаборации является не только разработка ключевых технологий для srEDM, но также и проведение предварительного эксперимента прямого наблюдения ЭДМ дейтрона.

В 2018 году, JEDI-коллаборация выполнила первое измерение дейтронного ЭДМ на COSY. Поскольку в кольце с незамороженным спином ЭДМ генерирует мало-амплитудные осцилляции вертикальной компоненты поляризации пучка (при импульсе дейтронов 970 МэВ/с, как на COSY, амплитуда колебаний ожидается на уровне  $3 \cdot 10^{-10}$  при величине ЭДМ  $d = 10^{-24}$  е·см), используется резонансный способ измерения [13; 14], с использованием специально-созданного для COSY ВЧ Вин-фильтра. [15; 16]

**Целью** данной работы является численное моделирование метода поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце с замороженным спином.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать явление декогеренции спина пучка в окрестности нулевой спиновой частоты, а также секступольный метод её подавления.
2. Исследовать влияние возмущений спиновой динамики на ЭДМ-статистику.
3. Исследовать влияние неточности установки E+V спин-ротаторов на систематическую ошибку ЭДМ-статистики.
4. Промоделировать процесс калибровки спин-тюна пучка при смене полярности ведущего поля.

**Научная новизна:**

1. Промоделирована процедура калибровки спин-тюна пучка при смене направления его движения.
2. Исследована систематическая ошибка эксперимента по поиску ЭДМ в накопительном кольце, связанная с бетатронными колебаниями.
3. Систематизированы общие проблемы методов поиска ЭДМ в накопительном кольце.
4. Классифицированы методы типа замороженного спина детектирования ЭДМ частицы в накопительном кольце.

**Практическая значимость.** Результаты исследования вошли в Yellow Report под названием “Feasibility Study for an EDM Storage Ring,” подготавливаемый для CERN коллаборацией CPEDM, в которую входит коллаборация JEDI.

**Методология и методы исследования.** Основными методами исследования являются математическое и компьютерное моделирование, и численный эксперимент.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Подтверждена теория механизма секступольного подавления декогеренции.
2. Подтверждено утверждение о равенстве спин-тюнов частиц с одинаковыми эффективными Лоренц-факторами; найдена интерпретация эффективного Лоренц-фактора как меры продольного эмиттанса частицы.
3. Показано, что калибровка ведущего магнитного поля ускорителя посредством наблюдения частоты прецессии поляризации пучка в горизонтальной плоскости — потенциально работающая методика.

4. Доказано, что возмущения спиновой динамики пучка, вызванные бетатронными колебаниями — пренебрежимо малый систематический эффект, поддающийся контролю в методологии частотной области.
5. Доказано, что эффективная длительность цикла измерения поляризации находится в диапазоне от двух до трёх постоянных времени жизни поляризации.
6. Показана принципиальная возможность получения верхнего предела оценки ЭДМ на уровне  $10^{-29}$  е·см за полное время измерений длительностью один год.
7. Доказано, что угловая скорость паразитного МДМ вращения линейно зависит от среднего угла наклона спин-ротаторов, и не зависит от конкретной реализации распределения наклонов.
8. Доказано, что точность установки оптических элементов ускорителя не позволяет измерять ЭДМ частицы методами пространственной области.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается согласованием аналитических вычислений с результатами численных экспериментов. Результаты компьютерных симуляций находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

- IX международной конценренции по ускорителям заряженных частиц IPAC'17, Копенгаген, Дания.
- X международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC'19, Мельбурн, Австралия.
- конференциях коллаборации JEDI, Юлих, Германия, 2017–2019.
- III международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии,” (LaPlas) Москва, Россия.
- IV международной конференции LaPlas, Москва, Россия.
- V международной конференции LaPlas, Москва, Россия.
- студенческих семинарах Института Ядерных Исследований, Исследовательский Центр “Юлих,” Германия.

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в коллаборации JEDI, а также подготовке Yellow Report для CERN.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 1 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 7 — в трудах международных конференций по SCOPUS.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной

литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Содержание следующих глав такого:

### Первая глава

1. Вводит понятие замороженного спина.
2. Проводит классификацию методов поиска ЭДМ в накопительном кольце с замороженным спином.
3. Проводит классификацию проблем, общих для всех методов поиска ЭДМ в накопительном кольце.
4. Описывает метод измерения ЭДМ в накопительном кольце с замороженным спином, разрешающий описанные проблемы.
5. Описывает магнитооптические структуры накопительных колец, которые можно использовать для детектирования ЭДМ предлагаемым методом.

Во второй главе содержится подробное рассмотрение проблем, обозначенных в первой главе, и методов их решения; описаны результаты моделирования.

В третьей главе описаны результаты экспериментов, проводимых на ускорителе COSY (находящемся на территории Исследовательского центра “Юлих”, Германия).

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Были изучены эффекты спиновой динамики, составляющие систематические ошибки эксперимента по поиску электрического дипольного момента частицы методом замороженного спина в накопительном кольце, как то:
  - возмущения спиновой динамики вызванные бетатронным движением частицы;
  - декогеренция спинов частиц пучка;
  - МДМ прецессия спина, вызванная неидеальностями ускорителя.
2. Для каждого из эффектов, было описано средство борьбы, и проведено численное моделирование, подтверждающее его эффективность.
3. Были сформулированы:
  - понятия методов пространственной и временной областей;
  - понятие двумерно-замороженного спина;
  - необходимые условия успешного измерения ЭДМ в накопительном кольце;
  - метод Frequency Domain, удовлетворяющий всем сформулированным условиям.
4. Описаны структуры накопительных колец с непрерывно- и квази-замороженным спином.

В основное тело работы не вошло статистическое моделирование эксперимента; для него отведено **приложение А**.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Aksentev, A. E.* Statistical precision in charged particle EDM search in storage rings / A. E. Aksentev, Y. V. Senichev // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — Дек. — Т. 941. — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/941/i=1/a=012083>.
2. *Aksentyev, A.* Model of Statistical Errors in the Search for the Deuteron EDM in the Storage Ring / A. Aksentyev, Y. Senichev // *Hadron Accelerators (8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17), 14–19 мая 2017)*. — Copenhagen, Denmark : JACOW, Geneva, Switzerland. — С. 2258–2260. — URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/doi/JACoW-IPAC2017-TUPVA079.html>.
3. *Аксентьев, А.* Статистическая точность при поиске ЭДМ заряженных частиц в накопительных кольцах / А. Аксентьев, Ю. Сеничев // *Ускорители заряженных частиц (III Международная конференция “Лазерные, плазменные исследования и технологии”, 24–27 янв. 2017)*. — Москва, Россия, 2017.
4. *Аксентьев, А.* Моделирование спин-орбитальной динамики пучка в накопительном кольце / А. Аксентьев // *Ускорители заряженных частиц (IV Международная конференция “Лазерные, плазменные исследования и технологии”, 30 янв.—1 февр. 2018)*. — Москва, Россия, 2018.
5. *Аксентьев, А.* Декогеренция спина в структуре с замороженным спином, её подавление и эффект на ЭДМ статистику в методе Frequency Domain / А. Аксентьев, Ю. Сеничев // *Ускорители заряженных частиц (V Международная конференция “Лазерные, плазменные исследования и технологии”, 12–15 февр. 2019)*. — Москва, Россия, 2019.
6. *Aksentyev, A.* Simulation of the Guide Field Flipping Procedure for the Frequency Domain Method / A. Aksentyev, Y. Senichev // *Hadron Accelerators (10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19–24 мая 2019)*. — Melbourne, Australia, 2019.
7. *Aksentyev, A.* Spin Motion Perturbation Effect on the EDM Statistic in the Frequency Domain Method / A. Aksentyev, Y. Senichev // *Hadron Accelerators (10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19–24 мая 2019)*. — Melbourne, Australia, 2019.



8. *Aksentyev, A.* Spin decoherence in the Frequency Domain Method for the search of a particle EDM / A. Aksentyev, Y. Senichev // *Hadron Accelerators (10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19–24 мая 2019).* — Melbourne, Australia, 2019.

## Список литературы

1. *Trodden, M.* Electroweak baryogenesis / M. Trodden // *Rev. Mod. Phys.* — 1999. — Окт. — Т. 71, вып. 5. — С. 1463–1500. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.71.1463>.
2. Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K_2^0$  Meson / J. H. Christenson [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 1964. — Июль. — Т. 13, вып. 4. — С. 138–140. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.138>.
3. *Harris, P. G.* The Neutron EDM Experiment / P. G. Harris // *arXiv:0709.3100 [hep-ex]*. — 2007. — 19 сент. — *arXiv: 0709.3100*. — URL: <http://arxiv.org/abs/0709.3100> (дата обр. 16.04.2019).
4. *Smith, J. H.* Experimental Limit to the Electric Dipole Moment of the Neutron / J. H. Smith, E. M. Purcell, N. F. Ramsey // *Phys. Rev.* — 1957. — Окт. — Т. 108, вып. 1. — С. 120–122. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.108.120>.
5. Improved Experimental Limit on the Electric Dipole Moment of the Neutron / C. A. Baker [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Сент. — Т. 97, вып. 13. — С. 131801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.131801>.
6. Baker et al. Reply: / C. A. Baker [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — Апр. — Т. 98, вып. 14. — С. 149102. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.149102>.
7. Precise Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment / H. N. Brown, G. Bunce, R. M. Carey [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Март. — Т. 86, вып. 11. — С. 2227–2231. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.86.2227>.
8. Improved limit on the muon electric dipole moment / G. W. Bennett, B. Bousquet, H. N. Brown [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2009. — Сент. — Т. 80, вып. 5. — С. 052008. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.80.052008>.
9. New Method of Measuring Electric Dipole Moments in Storage Rings / F. J. M. Farley, K. Jungmann, J. P. Miller [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Июль. — Т. 93, вып. 5. — С. 052001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.93.052001>.
10. srEDM Collaboration. — URL: <https://www.bnl.gov/edm/>.

11. AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the  $10^{-29}$  e·cm level. Тex. орч. / D. Anastassopoulos, V. Anastassopoulos, D. Babusci [и др.] ; BNL. — 2008. — URL: [https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron\\_proposal\\_080423\\_final.pdf](https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf) (дата обр. 25.11.2016).
12. JEDI Collaboration. — URL: <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/about/introduction.shtml>.
13. *Morse, W. M.* rf Wien filter in an electric dipole moment storage ring: The “partially frozen spin” effect / W. M. Morse, Y. F. Orlov, Y. K. Semertzidis // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2013. — Ноябрь. — Т. 16, вып. 11. — С. 114001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.16.114001>.
14. Spin tune mapping as a novel tool to probe the spin dynamics in storage rings / A. Saleev, N. N. Nikolaev, F. Rathmann [и др.] // Phys. Rev. Accel. Beams. — 2017. — Июль. — Т. 20, вып. 7. — С. 072801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.072801>.
15. Electromagnetic Simulation and Design of a 11el Waveguide RF Wien Filter for Electric Dipole Moment Measurements of Protons and Deuterons / J. Slim [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — 21 авг. — Т. 828. — С. 116–124. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216303710> (дата обр. 18.04.2019).
16. *Slim, J.* First commissioning results of the waveguide RF Wien filter / J. Slim, for the JEDI Collaboration // Hyperfine Interactions. — 2019. — Янв. — Т. 240, № 1. — С. 7. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10751-018-1547-6>.

*Аксентьев Александр Евгеньевич*

Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента  
дейтрона в накопительном кольце

Автореф. дис. на соискание ученой степени **канд. физ.-мат. наук**

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

