

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.119.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **24.09.2020 г. № 2/59**

О присуждении **Фомину Алексею Константиновичу**, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование экспериментов с нейтронами и нейтрино в задачах фундаментальной физики на реакторах» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, – принята к защите 13 февраля 2020 года, протокол №1/58 диссертационным советом Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства образования и науки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года.

Соискатель Фомин Алексей Константинович, 1973 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Моделирование экспериментов с ультрахолодными нейтронами» защитил в 2006 году, в диссертационном совете, созданном на базе Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук. А.К. Фомин работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Лаборатория физики нейтрона).

Научный консультант – доктор физико-математических наук Серебров Анатолий Павлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Лаборатория физики нейтрона, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

1. **Иванов Вадим Константинович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Кафедра экспериментальной физики, профессор;

2. **Негодаев Михаил Александрович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Лаборатория электронов высоких энергий, главный научный сотрудник;

3. **Синёв Валерий Витальевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Лаборатория гамма-астрономии и реакторных нейтрино, ведущий научный сотрудник;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва)

в своем положительном отзыве, подписанном Студеникиным Александром Ивановичем (доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики МГУ им. М.В. Ломоносова); утвержденном Федяниным Андреем Анатольевичем (доктор физико-математических наук, проректор МГУ им. М.В. Ломоносова) указала, что диссертация Фомина Алексея Константиновича «Моделирование экспериментов с нейтронами и нейтрино в задачах фундаментальной физики на реакторах» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-

математических наук, а её автор Алексей Константинович Фомин заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Соискатель имеет 82 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации 36 работ, из них 33 опубликовано в рецензируемых научных изданиях. Целью диссертации явилось обеспечение моделирования ряда существующих и планируемых экспериментов входящих в программу исследований Лаборатории физики нейтрона НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, а также других экспериментов, которые имеют непосредственное отношение к данным исследованиям: по измерению времени жизни нейтрона, поиску электрического дипольного момента нейтрона, поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций, созданию новых источников ультрахолодных нейтронов, поиску стерильного нейтрино. В диссертации А.К. Фомина представлены и обобщены результаты работы по моделированию экспериментов на реакторах ИЛЛ (г. Гренобль), СМ-3 (г. Димитровград), создание источников УХН на реакторах ВВР-М и ПИК (г. Гатчина). В диссертации представлены результаты, опубликованные в российских и зарубежных журналах в период с 2009 по 2019 гг. Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Serebrov A.P., Fomin A.K., Monte Carlo simulation of quasi-elastic scattering and above-barrier neutrons in the neutron lifetime experiment MAMBO I // JETP Lett. 2009. V. 90. P. 555.
2. Fomin A.K., Serebrov A.P., A Detailed analysis and Monte Carlo simulation of the neutron lifetime experiment // JETP Lett. 2010. V. 92. P. 40.
3. Serebrov A.P., Fomin A.K., Neutron lifetime from a new evaluation of ultracold neutron storage experiments // Physical Review C. 2010. V. 82. P. 035501.
4. Serebrov A.P., Fomin A.K., Calculation of the ultracold neutron yield from a superfluid helium source in the WWR-M reactor // Technical Physics. 2015. V. 60. P. 1238.
5. Serebrov A.P., Kolomenskiy E.A. ... Fomin A.K. et al., New search for the neutron electric dipole moment with ultracold neutrons at ILL // Physical Review C. 2015. V. 92. P. 055501.

6. Serebrov A.P., Fomin A.K., Onegin M.S. et al., Monte Carlo simulation of the Neutrino-4 experiment // *Physics of Atomic Nuclei*. 2015. V. 78. P. 1595.
7. Serebrov A.P., Fomin A.K., Kharitonov A.G. et al., High-density ultracold neutron sources for the WWR-M and PIK reactors // *Crystallography Reports*. 2016. V. 61. P. 144.
8. Serebrov A.P., Fomin A.K., Kamyshkov Yu.A., Sensitivity of experiment on search for neutron–antineutron oscillations on the projected ultracold neutron source at the WWR-M reactor // *Technical Physics Letters*. 2016. V. 42. P. 99.
9. Fomin A.K., Serebrov A.P., Simulation of Experiment on Measurement of Neutron Lifetime Using the Big Gravitational Trap of Ultracold Neutrons with the Absorber // *Technical Physics*. 2017. V. 62. P. 1903.
10. Serebrov A.P., Kolomensky E.A., Fomin A.K. et al., Neutron lifetime measurements with a large gravitational trap for ultracold neutrons // *Physical Review C*. 2018. V. 97. P. 055503.
11. Fomin A.K., Serebrov A.P., Monte Carlo Model of the Experiment on Measuring the Neutron Lifetime // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2018. V. 10. P. 741.
12. Serebrov A.P., Ivochkin V.G. ... Fomin A.K. et al., First Observation of the Oscillation Effect in the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino // *JETP Letters*. 2019. V. 109. P. 213.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации. В них отмечено, что работа посвящена актуальным научным проблемам и выполнена на высоком уровне. Полученные А.К. Фоминым результаты являются новыми и оригинальными. В качестве критических замечаний указаны:

1. Не приведена техническая информация, касающаяся вычислительных ресурсов и программного обеспечения.
2. На временных диаграммах в главе 5 не обозначены измерительные циклы, на рисунках со спектрами не указано к чему они относятся.
3. В главе 8 не представлены результаты моделирования для детектора антинейтрино без секционирования и для модели детектора.

4. В первой главе в п. 1.2.3. сравниваются методики измерения времени жизни нейтрона на пучках и при помощи хранения. Можно было бы привести более подробное описание различий.
5. На стр. 30 сказано: «вероятность распада нейтрона в атом водорода». Наверное, подразумевалось, что нейтрон распадается, как обычно, на протон, электрон и антинейтрино, но тут же образуется атом водорода, если импульс электрона очень мал.
6. Надписи на некоторых рисунках сделаны латинскими буквами, в подписи к рисунку и в тексте — кириллицей, например, рис. 4.5 на стр. 74 и рис. 4.13 на стр. 86.
7. На рис. 5.5 не понятно, какая диаграмма относится ко времени удержания 300 с, а какая к 2000 с. Аналогично для рис. 5.17 и 5.22.
8. На стр. 174 говорится о «бампе» (выпуклости) в спектре, но не оговаривается, в каком — речь может идти об антинейтринном спектре или о спектре позитронов, наблюдаемых в эксперименте.
9. В тексте диссертации встречаются повторы, опечатки, стилистические погрешности и специализированное изложение материала в некоторых местах.

В отзывах указано, что отмеченные недостатки не влияют на качество представленных результатов и не снижают общий уровень диссертации. Во всех отзывах сделан вывод о том, что диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а её автор Алексей Константинович Фомин заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой научной квалификацией, полученными ими научными результатами мирового уровня и многолетним опытом научных исследований по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

1. В 2010 году после внесения соответствующих поправок было получено среднемировое время жизни нейтрона 880.0 ± 0.9 с, отличное от установившегося с 2001 года значения PDG 885.7 ± 0.8 с. С новым значением времени жизни нейтрона: (1) устранено наметившееся разногласие со Стандартной моделью, (2) наблюдается лучшее согласие с космологическими данными, (3) обнаружено расхождение в результатах измерения времени жизни нейтрона между пучковым методом и методом хранения, (4) изменилась эффективность нейтринных детекторов, что внесло свой вклад в реакторную антинейтринную аномалию.
2. При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона МАМВО I, включающий в себя эффект квазиупругого рассеяния УХН на поверхности жидкого фомблина, который был открыт после проведения эксперимента. Получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет -6.0 ± 1.6 с.
3. При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. За счет рассмотрения эффектов неполного вытекания из внутреннего объема во время чистки при работе с внешним объемом, нагрева нейтронов затворами и разной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных объемов хранения получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет -5.5 ± 2.4 с.
4. Получены значения плотности УХН достижимой на источниках создаваемых на реакторах ВВР-М и ПИК. С этой целью разработана компьютерная модель источника УХН на основе сверхтекучего гелия. Полученная плотность УХН на реакторе ВВР-М на 2 порядка величины превышает плотность существующих в мире источников. В результате оптимизации параметров источника на реакторе ВВР-М получена расчетная плотность УХН в ловушке ЭДМ спектрометра $1.3 \cdot 10^4$ н/см³ и плотность в эксперименте по измерению

времени жизни нейтрона $8.4 \cdot 10^3$ н/см³, что позволит на порядок величины улучшить статистическую точность этих экспериментов. Расчетная плотность УХН на реакторе ПИК на порядок величины хуже, чем на реакторе ВВР-М.

5. Разработана компьютерная модель эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. Результаты моделирования внесли свой вклад на всех этапах эксперимента: от конструирования установки до получения результата измерений. Получены систематические неопределенности связанные с неопределенностью функции потерь (0.3 с), неточностью расчета эффективной частоты соударений (0.1 с), неточностью установки угла ловушки УХН (0.1 с). Моделирование позволило заявить результат эксперимента с указанной точностью $881.5 \pm 0.7_{\text{стат}} \pm 0.6_{\text{сист}}$ с.
6. Разработана компьютерная модель эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с длительным удержанием УХН. Получен систематический эффект от токов утечки, который составляет $< 10^{-26}$ е·см. Данный эффект был учтен при получении результата эксперимента, который на уровне достоверности 90% устанавливает верхний предел на величину ЭДМ нейтрона $|d_n| < 5.5 \cdot 10^{-26}$ е·см.
7. Разработан проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием УХН. При помощи созданной компьютерной модели получена чувствительность эксперимента на новом источнике УХН создаваемом на реакторе ВВР-М. Чувствительность существующего эксперимента ИЛЛ может быть превышена в 10-40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок.
8. Разработана компьютерная модель детектора реакторных антинейтрино в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино. Произведены все необходимые расчеты при проектировании установки. Полученный расчетный спектр сравнен с экспериментальным. Между расчётным и экспериментальным спектром наблюдается расхождение в области 3 МэВ,

что может являться началом нового интересного научного исследования и требует дальнейшего изучения.

Совокупность перечисленных результатов можно квалифицировать как крупное научное достижение.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в работе рассмотрены вопросы, имеющие принципиальное значение для физики элементарных частиц. В работе получено новое значение времени жизни нейтрона, с которым: (1) устранено наметившееся разногласие со Стандартной моделью, (2) наблюдается лучшее согласие с космологическими данными, (3) обнаружено расхождение в результатах измерения времени жизни нейтрона между пучковым методом и методом хранения, (4) изменилась эффективность нейтринных детекторов, что внесло свой вклад в реакторную антинейтринную аномалию. Созданные Монте-Карло модели экспериментов по измерению времени жизни нейтрона и поиску электрического дипольного момента нейтрона позволили заявить результаты этих экспериментов с указанной точностью. Разработан проект нового эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций – процесса, в котором происходит несохранение барионного числа. Разработана компьютерная модель детектора для актуального эксперимента по поиску стерильного нейтрино, получен расчетный спектр.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что предложенные методы и подходы могут быть применены при разработке и моделировании экспериментов с ультрахолодными нейтронами и антинейтрино, которые сейчас активно ведутся в России и за рубежом. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых источников УХН в России (ПИК, ОИЯИ) и за рубежом (ESS, ILL). Эта задача является крайне важной, так как в настоящее время точность существующих экспериментов с УХН ограничена статистикой. На практике могут быть использованы 7 программ для ЭВМ, зарегистрированных автором диссертации:

1. А.К. Фомин, Программа для моделирования хранения ультрахолодных нейтронов в ловушке с учетом квазиупругого рассеяния на стенках //

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018617809 от 2 июля 2018 г.

2. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента с регистрацией ультрахолодных нейтронов неупруго рассеянных при взаимодействии со стенками сосудов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018618893 от 23 июля 2018 г.
3. А.К. Фомин, Программа для моделирования источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018660577 от 24 августа 2018 г.
4. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с хранением ультрахолодных нейтронов в материальной ловушке // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611711 от 6 февраля 2018 г.
5. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магниторезонансного спектрометра // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018615721 от 15 мая 2018 г.
6. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с ультрахолодными нейтронами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662103 от 27 октября 2017 г.
7. А.К. Фомин, Программа для моделирования детектора реакторных антинейтрино // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662880 от 20 ноября 2017 г.

Оценка достоверности результатов выявила, что достоверность полученных с использованием разработанных моделей физических результатов подтверждается экспериментальными данными. Работа прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях, ее результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Личный вклад соискателя состоит в том, что автором произведена разработка программного обеспечения и моделирование. Проведена обработка полученных данных и их анализ. Полученные результаты представлены в виде

статей и докладов на семинарах и конференциях. В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантами под руководством А.К. Фомина, а также грантов, где автор выступил в роли исполнителя. Автором зарегистрировано 7 результатов интеллектуальной деятельности по теме диссертации.

На заседании, проведенном 24 сентября 2020 года в удаленном интерактивном режиме в соответствии с Приказом Минобрнауки № 734 от 22 июня 2020 года, диссертационный совет принял решение присудить Фомину А.К. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве **22** человек, (в т.ч. участвующих в удаленном интерактивном режиме - 4), из них **7** докторов наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **30** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - **22**, против - **0**.

Председатель заседания,
заместитель председателя
диссертационного совета Д 002.119.01
доктор физ.- мат. наук

_____ Безруков Л.Б.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01
кандидат физ.- мат. наук

_____ Демидов С.В.

24.09.2020 г.

м.п.