

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Негодаева Михаила Александровича
на диссертацию Фомина Алексея Константиновича
«МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С НЕЙТРОНАМИ И НЕЙТРИНО В
ЗАДАЧАХ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ НА РЕАКТОРАХ», представленную на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
01.04.01-Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа Алексея Константиновича Фомина посвящена вопросам моделирования нейтронных и нейтринных экспериментов на реакторах. Основные задачи современных экспериментов с ультрахолодными нейтронами ($\sim 10^{-7}$ эВ) на реакторах связаны с уточнением времени жизни нейтрона, поиском его электрического дипольного момента и нейтрон-антинейтронных осцилляций. Созданные диссертантом математические модели использовались при проектировании и проведении измерений в экспериментах, имеющих принципиальное значение для физики элементарных частиц. Этим обусловлена **актуальность** работы А.К. Фомина.

Автором диссертации были решены следующие задачи:

- методом моделирования осуществлен поиск возможных систематических погрешностей в различных экспериментах по измерению времени жизни нейтрона и проведен анализ мировых данных по измерению времени жизни нейтрона с учетом поправок экспериментов;
- проведено моделирование источников ультрахолодных нейтронов (УХН) на реакторах ВВР-М и ПИК, получено значение достижимой на них плотности УХН;
- методом моделирования проведен поиск возможных систематических погрешностей в эксперименте по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магниторезонансного спектрометра;
- методом моделирования получена оценка чувствительности эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с ультрахолодными нейтронами;
- проведено моделирование детектора реакторных антинейтрино в эксперименте по поиску стерильного нейтрино «Нейтрино-4» и получен расчетный спектр антинейтрино.

Новизна результатов диссертации определяется как созданием уникальных программ для моделирования экспериментальных установок и измерений в

экспериментах, так и важностью физической информации, полученной с использованием созданных А. К. Фоминым моделей.

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.

Предложенные в диссертации методы моделирования и программы могут быть применены при моделировании экспериментов с УХН и антинейтрино, которые сейчас активно ведутся в России и за рубежом, что говорит о ее **практической значимости**.

Личный вклад автора в создание программ для моделирования экспериментов и полученных с их использованием физических результатов несомненен. А.К. Фомин имеет 7 свидетельств о государственной регистрации этих программ для ЭВМ.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературы. Объем диссертации 208 стр., она содержит 103 рисунка и 12 таблиц. Список литературы включает 225 наименований.

Во введении автором дана общая характеристика работы. Описаны актуальность, цели и задачи, практическая значимость, структура и объем, положения, выносимые на защиту.

В первой главе описывается проблема измерений времени жизни нейтрона и ситуация, которая возникла после эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с гравитационной ловушкой. Результат этого эксперимента ставил под сомнение мировое среднее значение для времени жизни нейтрона, что потребовало проведение новых экспериментов, а также поиск возможных систематических ошибок в старых экспериментах. Автор кратко описывает результаты проведенного им моделирования экспериментов, которые позволили уточнить мировое среднее значение времени жизни нейтрона, и это новое значение согласуется с результатом эксперимента с гравитационной ловушкой. Кроме того, автором отмечается, что анализ нейтронного β -распада с новым среднемировым значением времени жизни нейтрона находится в согласии со Стандартной моделью, а анализ первичного нуклеосинтеза на ранних стадиях формирования Вселенной показывает, что использование нового времени жизни нейтрона улучшает согласие данных для первоначальной распространенности дейтерия, гелия и барионной асимметрии. В этой же главе автор показывает, что результаты измерения времени жизни

нейтрона с хранением УХН и в пучковых экспериментах заметно отличаются. В настоящее время это расхождение получило название «нейтронной аномалии».

Во **второй главе** описывается моделирование эксперимента по измерению времени жизни нейтрона МАМВО I. Эксперимент основан на хранении УХН в материальной ловушке с фомблиновым покрытием при комнатной температуре. Приведена подробная схема эксперимента. Монте-Карло моделирование эксперимента было проведено с учетом гравитации и квазиупругого рассеяния УХН при отражениях от фомблина. Относительное влияние того или иного эффекта на окончательный результат было исследовано при помощи его включения или выключения в моделирование. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошее согласие. В результате моделирования суммарная поправка к экспериментальному результату составила -6.0 ± 1.6 с.

В **главе три** описывается эксперимент по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. Эксперимент основан на хранении УХН в материальной ловушке с фомблиновым покрытием. В моделировании этого эксперимента были исследованы три эффекта: 1 – эффект неполного вытекания из внутреннего объема во время чистки при работе с внешним объемом, 2 – эффект нагрева нейтронов затворами, 3 – эффект разной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных объемов. Каждый рассмотренный автором эффект дает отрицательную поправку для измеренного значения времени жизни нейтрона. Полученная суммарная поправка результата этого эксперимента составляет -5.5 ± 2.4 с.

Глава четыре посвящена источникам УХН на основе сверхтекучего гелия. Автор диссертации описывает историю создания и развития источников УХН, поясняет необходимость создания новых высокоинтенсивных источников УХН для измерения времени жизни нейтрона и поиска его электрического дипольного момента, приводит результаты моделирования источников на основе сверхтекучего гелия на реакторах ВВР-М и ПИК. С помощью метода Монте-Карло А.К. Фоминым произведено моделирование выхода УХН в источнике. В процессе моделирования варьировались различные параметры с целью оптимизации выхода УХН. В результате моделирования автором показано, что плотность УХН на реакторе ВВР-М на 2-3 порядка величины превышает плотность существующих источников УХН и на порядок более эффективен по сравнению с проектируемым на реакторе ПИК мощностью 100 МВт.

В **главе пять** диссертант приводит результаты моделирования эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. В результате моделирования получены временные диаграммы счета детектора УХН, которые совпадают с экспериментальными. Подробно рассмотрены 3 схемы измерений: 1) с мониторингом (поворот ловушки для очистки от нейтронов, превышающих ее гравитационный барьер), без поглотителя; 2) без мониторинга, с поглотителем; 3) с мониторингом, с поглотителем. Во всех расчетах принятое в модели время жизни нейтрона воспроизведено с точностью 0.1 с. Эта ошибка принята как систематическая неопределенность метода размерной экстраполяции из-за использования расчетного значения эффективной частоты соударений. С учетом других систематических эффектов полная систематическая неопределенность составила 0.6 с. Моделирование, выполненное Алексеем Константиновичем Фоминым, позволило заявить результат эксперимента с точностью $881.5 \pm 0.7_{\text{стат}} \pm 0.6_{\text{сист}}$ с.

В **главе шесть** говорится о моделировании эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с длительным удержанием УХН. Приведена схема установки и дано описание эксперимента. Показано, что одной из возможных причин ложного ЭДМ эффекта являются токи утечки, возникающие при подаче высокого напряжения на электроды. А.К. Фомин разработал модель эксперимента для выяснения влияния токов утечки на результат измерений. В расчете моделировалась траектория каждого нейтрона от момента входа в нейтронную систему до момента окончания хранения в одной из камер. 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 $|dn| < 5.5 \cdot 10^{-26}$ е·см.

В **седьмой главе** говорится о моделировании эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием ультрахолодных нейтронов от высокоинтенсивного источника УХН, который создается на реакторе ВВР-М и в котором будет получена плотность на 2-3 порядка выше, чем на существующих в мире источниках УХН. Автором диссертации методом Монте Карло была произведена оценка чувствительности эксперимента с УХН на планируемом источнике в сравнении с чувствительностью эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций на

пучке холодных нейтронов от реактора, который был осуществлен в Институте Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция). По результатам выполненных автором расчетов была выбрана геометрия ловушки УХН и разработана конструкция экспериментальной установки. Автором было показано, что чувствительность эксперимента на реакторе ВВР-М в ПИЯФ может превысить чувствительность эксперимента в Гренобле в 10-40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок.

В главе **восемь** описывается эксперимент «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино на реакторе СМ-3 (Димитровград, Россия). А.К. Фоминым было проведено моделирование различных вариантов детектора этого эксперимента и рассчитан их ожидаемый спектр мгновенных сигналов. В эксперименте были измерены зависимости нейтринного потока и нейтринного спектра на различных расстояниях от активной зоны реактора в диапазоне 6-12 м. Было проведено сравнение расчетного спектра с измеренными на трёх расстояниях: 7.3, 9.3 и 11.1 м, которое показало, что характер отклонений экспериментального спектра от расчётного в рамках имеющейся точности оказался одинаковым для разных расстояний.

В **Заключении** сформулированы **основные результаты** диссертационной работы.

Таким образом, в диссертации А.К. Фомина представлены и обобщены результаты 13-летней работы по моделированию текущих и разрабатываемых экспериментов фундаментальной физики с нейтронами и нейтрино на реакторах Института Лауэ-Ланжевена (г. Гренобль), СМ-3 (г. Димитровград), на реакторе ВВР-М (г. Гатчина), а также на строящемся реакторе ПИК (г. Гатчина).

Достоинством диссертации является ее безусловная актуальность и связь с проводимыми и будущими нейтронными и нейтринными экспериментами на реакторах как в России, так и за рубежом. В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантами РФФИ, РНФ, Министерства образования и науки Российской Федерации. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне, прекрасно иллюстрирована.

В качестве замечания могу отметить встречающиеся в тексте повторы, опечатки, стилистические погрешности. Указанные выше недостатки не снижают высокого качества работы.

Результаты диссертации доложены на международных конференциях и отражены в 33 научных статьях, которые опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК и

индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Автореферат отражает содержание диссертации.

Работа соответствует 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 искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН

05 марта 2020 г., г. Москва

М.А. Негодаев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН

Телефон: +7(499) 132-65-77

E-mail: negodaevma@lebedev.ru

Подпись М.А. Негодаева удостоверяю.

Ученый секретарь ФИАН

Канд. физ.-мат. наук

А.В. Колобов

Негодаев Михаил Александрович

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Отрасль науки: Физико-математические науки

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

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

1. O. D. Dalkarov, **M. A. Negodaev**, A. S. Rusetskii, A. P. Chubenko, Yu. L. Pivovarov, and T. A. Tukhfatullin. Orientation effect in the neutron yield in deuterated Pd target bombarded by deuterium ion beam // Phys. Rev. Accel. Beams 22, 034201 – Published 12 March 2019
2. O. D. Dalkarov, **M. A. Negodaev**, A. S. Rusetskii, et al. Studying the Emission of X-Ray Quanta, Neutrons, and Charged Particles from Deuterated Structures Irradiated with X-Rays // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques volume 13, pages 272–279 (2019)
3. Dalkarov, O. D.; **Negodaev, M. A.**; Rusetskiii, A. S.; Lyakhov, B. F.; Tsehosh, V., I; Saunin, E., I; Bolotokov, A. A.; Kudriashov, I. A.; Famina, N., V. Nuclear Reactions under Irradiation of Deuterated Structures by X Rays // Physics of Atomic Nuclei volume 82, pages 425–438 (2019)
4. Bagulya, A. V.; Dalkarov, O. D.; **Negodaev, M. A.**; Rusetskii, A. S. Low-energy nuclear reactions in crystal structures // Physics of Particles and Nuclei volume 48, pages 691–697(2017)
5. Bagulya, A. V.; Dalkarov, O. D.; **Negodaev, M. A.**; Rusetskii, A. S.; Tsehosh, V. I.; Bolotokov, A. A., X-Ray Spectra from Deuterated Crystal Structures Interacting with Ion Beams with Energies below 25 keV // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques volume 11, pages 58–62 (2017)
6. Bagulya, A. V.; Dalkarov, O. D.; **Negodaev, M. A.**; Pivovarov, Yu. L.; Rusetskii, A. S.; Tukhfatullin, T. A. Orientation effect in d(d,n)He-3 reaction initiated by 20 keV deuterons at channeling in textured CVD-Diamond target // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms Volume 402, 1 July 2017, Pages 243-246
7. A.V.Bagulya, O.D.Dalkarov, **M.A.Negodaev**, A.S.Rusetskii, A.P.Chubenko V.G.Ralchenko, A.P.Bolshakov, Channeling effect in polycrystalline deuterium-saturated CVD diamond target bombarded by deuterium ion beam // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms Volume 355, 15 July 2015, Pages 340-343

8. Bagulya, A. V.; Dalkarov, O. D.; **Negodaev, M. A.**; Rusetskii, A. S.; Chubenko, A. P.; Study of DD-reaction yields from the Pd/PdO:D-x and the Ti/TiO₂:D-x heterostructure at low energies using the HELIS setup // *Physica Scripta*, Volume 90, Number 7, 2015
9. Airapetian, A.; Akopov, N.; Akopov, Z.; ... **Negodaev M.**; ... Zupranski, P.
Transverse-target-spin asymmetry in exclusive omega-meson electroproduction // *The European Physical Journal C* volume 75, Article number: 600 (2015)
10. Airapetian, A.; Akopov, N.; Akopov, Z.; ... **Negodaev M.**; ... Zupranski, P. Bose-Einstein correlations in hadron-pairs from lepto-production on nuclei ranging from hydrogen to xenon // *The European Physical Journal C* volume 75, Article number: 361 (2015) 1.
11. Akopov, N.; Akopov, Z.; Augustyniak, W.; ... **Negodaev M.**, ... Zupranski, P.; Pentaquark Theta(+) search at HERMES // *Phys. Rev. D* 91, 057101 – Published 31 March 2015
12. Airapetian, A.; Akopov, N.; Akopov, Z.; ... **Negodaev M.**; ... Zupranski, P.
Beam-helicity asymmetry in associated electroproduction of real photons $e p \rightarrow e \gamma \pi N$ in the Δ -resonance region // *Journal of High Energy Physics* volume 2014, Article number: 77 (2014)
13. Airapetian, A.; Akopov, N.; Akopov, Z.; ... **Negodaev M.**; ... Zupranski, P.
Transverse target single-spin asymmetry in inclusive electroproduction of charged pions and kaons // *Physics Letters B* Volume 728, 20 January 2014, Pages 183-190
14. Airapetian, A.; Akopov, N.; Akopov, Z.; ... **Negodaev M.**; ... Zupranski, P. Reevaluation of the parton distribution of strange quarks in the nucleon // *Phys. Rev. D* 89, 097101 – Published in 2014
15. Airapetian, A.; Akopov, N.; Akopov, Z.; ... **Negodaev M.**; ... Zupranski, P. Transverse polarization of Lambda hyperons from quasireal photoproduction on nuclei // *PHYSICAL REVIEW D* 90, 072007 – Published 17 October 2014