

ОТЗЫВ

официального оппонента Синева В.В. на диссертацию

Фомина Алексея Константиновича

на тему: «Моделирование экспериментов с нейтронами и нейтрино в задачах

фундаментальной физики на реакторах»

по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация Фомина Алексея Константиновича выполнена в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Диссертация посвящена вопросам моделирования нейтронных и нейтринных экспериментов, проводимых на ядерных реакторах.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка обозначений и сокращений и списка цитируемой литературы (225 ссылок).

Во введении подробно рассматривается актуальность диссертации, рассматриваются цели и задачи исследования, аргументированно сформулирована научная новизна работы, указана практическая значимость результатов диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту; указан личный вклад автора. Далее следует обоснование достоверности результатов и приведен список мероприятий по апробации диссертации: семинары, конференции и пр.

В первой главе говорится об экспериментах по измерению времени жизни нейтрона всеми научными группами в мире. Показано, как формируется среднее время жизни нейтрона по результатам измерений. Рассматривается возникшая проблема в разбросах величин после появления нового результата измерений в группе ПИЯФ, который, имея самую малую погрешность, демонстрировал расхождение с мировым значением.

Проведен анализ возникшей ситуации и разработана программа моделирования экспериментов по измерению времени жизни нейтрона. После моделирования экспериментов были получены расчетные поправки, которые учитывают особенности конкретных экспериментов. После применения поправок все экспе-

рименты стали давать более согласованный результат. В главе приводится рекомендованное среднее значение времени жизни нейтрона.

Здесь же показано, что новое значение времени жизни гораздо лучше удовлетворяет параметрам Стандартной модели, чем среднемировое. Новое значение улучшает согласие для первоначальной распространенности дейтерия, гелия и барионной асимметрии.

Приведено различие результатов экспериментов на пучке и методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН); указано влияние нового времени жизни на сечение обратного бета распада антинейтрино на протоне, что приводит к увеличению сечения и, соответственно, дефициту регистрируемых антинейтрино.

В последней части главы приводится анализ данных после 2010 года. Делается заключение, что с учетом поправок экспериментов и новых результатов, среднемировое значение с 2013 года стало совпадать со значением, полученным ранее в данной главе.

Во второй главе автор рассматривает эксперимент MAMBO I, описывает установку и созданную модель для моделирования. Приводятся данные моделирования. Показано, что после учета поправок результат этого измерения начинает согласовываться с результатом, полученным в эксперименте с гравитационной ловушкой.

В третьей главе приводится эксперимент по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. Подробно рассматривается методика эксперимента. Затем описывается процедура моделирования эксперимента при помощи разработанной автором программы. Подробно учитываются все возможные систематические погрешности. Как результат появляются поправки, которые вносятся в экспериментальные данные, и результат согласуется с величиной, полученной в эксперименте с гравитационной ловушкой.

В четвертой главе рассматриваются источники ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия. Проводится обзор различных источников УХН. Рассматриваются проекты экспериментов по измерению электрического дипольного момента нейтрона и времени жизни нейтрона с использованием ис-

точника УХН на основе сверхтекучего гелия. Проведено моделирование накопления УХН в ловушке. Рассчитаны несколько вариантов установки с разным расположением камеры с сверхтекучим гелием, диаметром нейтроновода; получены зависимости плотности нейтронов в ловушке от температуры сверхтекучего гелия.

Проведено моделирование ловушки УХН, расположенной на платформе. Получены плотности нейтронов и энергетические спектры для различного положения по высоте ловушки и радиуса поворотного нейтроновода. Моделирование выполнено для объемов ловушек на 35 и 350 л.

Проведено моделирование ловушки УХН на более мощном реакторе ПИК. Показано, что в сравнении с реактором ВВР-М плотность нейтронов уступает на порядок величины.

В пятой главе автор рассматривает эксперимент по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой, что позволяет уменьшить погрешность измерения времени жизни нейтрона до 0.2 с. Эксперимент проводится в Институте Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ) в Гренобле. В работе приводятся результаты измерения времени жизни нейтрона на этой установке. Используется моделирование эксперимента для расчета поправок. В этой главе скрупулезно рассматриваются сама конструкция установки, ее физико-математическая модель. Проведено моделирование эксперимента и получены временные диаграммы счета детектора. Здесь же проведен анализ систематических погрешностей эксперимента, который позволил заявить результат с указанной точностью. Показано идеальное совпадение моделирования и измерений.

В шестой главе речь идет об измерении электрического дипольного момента нейтрона (ЭДМ). Обсуждается результат измерения ЭДМ нейтрона на установке в ИЛЛ. Описывается моделирование регистрации ЭДМ в дифференциальном магнито-резонансном ЭДМ спектрометре ПИЯФ. Получено распределение возможных значений ЭДМ при различных токах утечки в спектрометре. Получен систематический эффект от токов утечки, который учтен при получении результата эксперимента.

В седьмой главе обсуждается возможность наблюдения нейтрон-антинейтронных осцилляций. Методом Монте Карло с использованием оригинальной программы была рассчитана чувствительность эксперимента с УХН по обнаружению осцилляций нейтрон-антинейтрон. Получено, что существующая чувствительность может быть улучшена в 10-40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок ловушки.

В восьмой главе описывается моделирование эксперимента «Нейтрино-4» по поиску стерильных нейтрино на реакторе СМ-3 в Димитровграде. Был описан детектор антинейтрино и промоделирован процесс регистрации антинейтрино. Получен расчетный спектр мгновенных сигналов и проведено сравнение с экспериментом. Получена зависимость антинейтринного эффекта от величины отношения расстояния к энергии.

В заключении автор приводит основные результаты диссертационной работы, а также приводит ресурсы, используемые при выполнении работы.

Актуальность избранной темы проведенного исследования доказывается развитием современной физики как нейтронов, так и нейтрино. Свойства нейтрона являются ключевыми для свойств современного мира. А нейтрино приобретает все больший вес как в сфере фундаментальной, так и прикладной. Имеются предложения использовать нейтрино для томографии Земли, для этого очень важно знать свойства нейтрино, которые можно получить и из исследований в области нейтронной физики, в частности, здесь играет роль время жизни нейтрона.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на материалах научных работ автора, на основании которых написана диссертация.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые было проведено моделирование ряда экспериментов по измерению времени жизни нейтрона, измерению ЭДМ нейтрона, поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций и т.д. Было показано, что правильный учет ряда эффектов может привести к необходимости введения поправок в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона.

Моделирование позволило внести поправки в измерения других экспериментов и согласовать измерения разных групп исследователей.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что в работе получен новый инструмент для изучения свойств нейтронов и нейтрино. Это является значительным вкладом в возможности фундаментальной и прикладной науки для проектирования новых установок.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается согласием расчетных и экспериментальных данных; большим количеством публикаций автора в рецензируемых научных изданиях и докладами на российских и международных конференциях.

К недостаткам работы можно отнести некоторое количество опечаток и небольших неточностей.

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.

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.

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.

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.

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.

Однако, указанные недостатки не снижают качества работы.

Материалы диссертации со всей полнотой изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат отражает содержание диссертации.**

Таким образом, диссертация **Фомина Алексея Константиновича** на соискание ученой степени доктора наук является **научно-квалификационной работой**, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны физико-математические модели экспериментов по измерению времени жизни нейтрона, ЭДМ нейтрона, поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций и детектора реакторных антинейтрино, совокупность которых можно квалифицировать как **научное достижение**, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики .

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник Лаборатории
гамма-астрономии и реакторных нейтрино
ОЭФ ИЯИ РАН,

доктор физико-математических наук
специальность 01.04.16

Синев Валерий Витальевич
07.05.2020 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, 117312 Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а +7 499 135 40 56, vsinev@inr.ru

Подпись Синева Валерия Витальевича заверяю:
Заместитель директора ИЯИ РАН,
доктор физико-математических наук

Г. И. Рубцов

Список публикаций
ведущего научного сотрудника
Лаборатории Гамма Астрономии и Реакторных Нейтрино ИЯИ РАН, д.ф.-м.н.
Синёва Валерия Витальевича
Специальность- 01.04.16- Физика атомного ядра и элементарных частиц.
за 2015-2020 гг.

1. Fengpeng An, Guangpeng An, Qi An, ... Valery Sinev, et al. (JUNO Collaboration), Neutrino physics with JUNO, *J. Phys. G* 43 (2016) 030401.
2. Y. Abe, S. Appel, T. Abrahao, ... V. Sinev, et al. (DC Collaboration), Measurement of θ_{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques, *Journal of High Energy Physics* 01 (2016) 163.
3. Y. Abe, T. Abrahao, H. Almazan, ... V. Sinev, et al. (DC Collaboration), Muon capture on light isotopes in Double Chooz, *Phys. Rev. C* 93, 054608, 2016.
4. Y. Abe, T. Abrahao, H. Almazan, ... V. Sinev, et al. (DC Collaboration), Characterization of the Spontaneous Light Emission of the PMTs used in the Double Chooz Experiment, *Journal of Instrumentation (JINST)*, **11**, 08001 (2016).
5. T. Abrahao, H. Almazan, J. C. dos Anjos, ... V. Sinev, et al. (DC Collaboration), Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 02 (2017) 017.
6. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А. В. Вересникова, ... В. В. Синева, и др., Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН для исследования природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики, *Ядерная физика*, т. 80, № 3, с. 230, 2017.
7. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А. В. Вересникова, ... В. В. Синева, и др., Измерение содержания ^{14}C в жидких сцинтилляторах с помощью детектора малого объема в низкофоновой камере Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, *Ядерная физика*, т. 80, № 6, с. 665, 2017.
8. T. Abrahao, H. Almazan, J. C. dos Anjos, ... V. Sinev, et al. (DC Collaboration), Novel event classification based on spectral analysis of scintillation waveforms in Double Chooz, *Journal of Instrumentation (JINST)*, **13**, 01031 (2018).
9. H de Kerret, T. Abrahao, H. Almazan, ... V. Sinev, et al., Yields and production rates of ^9Li and ^8He measured with the Double Chooz near and far detectors, *J. Phys. Conf. Ser.* 934 no.1, 012011, 2017.