

О Т З Ы В официального оппонента А.И.Болоздыни,

доктора физ.-мат. наук, заведующего лабораторией экспериментальной ядерной физики и профессора кафедры экспериментальной ядерной физики Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ” на диссертационную работу Ляшука Владимира Ивановича

"Интенсивный литиевый антинейтринный источник и взрывной нуклеосинтез в нейтронных потоках",

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Актуальность темы диссертации Ляшука Владимира Ивановича подтверждается тем, что в настоящее время одно из главных направлений в исследовании элементарных частиц связано с изучением свойств нейтрино, включая феномен осцилляций. Это продиктовано неполнотой принятой Стандартной Модели, необходимостью осознания явлений, происходивших на ранних этапах эволюции Вселенной, и понимания динамики её эволюции. Есть также и крайне актуальные прикладные задачи, как, например, мониторинг состояния ядерных реакторов, для решения которых необходимы нейтринные источники высокой интенсивности и понимание процессов образования радиоактивных изотопов в высокоинтенсивных нейтронных полях.

Автором показано, что интенсивный антинейтринный источник на основе изотопа ${}^7\text{Li}$, облучаемого нейтронами, в сравнении с ядерным реактором и другими изотопными источниками обладает явными преимуществами: спектр антинейтрино от распада генерируемого изотопа ${}^8\text{Li}$ характеризуется большой жесткостью и хорошо определен. Такой литиевый источник будет востребован для получения надежных данных по сечениям взаимодействия при регистрации нейтральных и заряженных токов, позволит получить дополнительную информацию при исследовании когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах (эффект впервые наблюден в 2017 году коллаборацией COHERENT - см. D. Akimov et al., Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering // Science 357 (2017) no.6356, 1123-1126). Предлагаемый интенсивный литиевый антинейтринный источник обладает ценными преимуществами также и в сравнении с используемым сейчас нейтринным источником на сильноточном ускорительном источнике SNS (Spallation Neutron Source в Окриджской национальной лаборатории США), где поток состоит из трех типов - мюонных нейтрино, мюонных антинейтрино и электронных нейтрино, и сильно осложняет анализ событий. В экспериментах с литиевым источником может быть получена новая уникальная информация о когерентном рассеянии

электронных антинейтрино, которая будет использована для целей нейтринной диагностики ядерных реакторов.

Диссертант исследует и разрабатывает модели ещё одного класса явлений в интенсивных нейтронных потоках - импульсного нуклеосинтеза трансурановых изотопов в уникальных взрывных экспериментах с нейтронными потоками, сравнимыми с интегральным потоком от мощного энергетического реактора в течение года. При интенсивных нейтронных импульсах в мишени идет многократный захват нейтронов и образование далеких трансуранов: в эксперименте был обнаружен ^{257}Fm при облучении мишени из ^{238}U , что означает захват 19 нейтронов и синтез изотопов с неизвестными свойствами, что недоступно в иных подходах. Многократные нейтронные захваты рассматриваются как возможный путь к достижению удалённых островков стабильности сверхтяжёлых элементов, возможность существования которых предсказывается теоретически: см., например, V.I. Zagrebaev et. al., Phys. Rev. C **84**, 044617 (2011), где моделируется ранее предложенный сценарий (H. W. Meldner, Phys. Rev. Lett. **28**, 975 (1972)) с временным продлением высокопоточной нейтронной экспозиции. Несомненно, что эта часть диссертации, посвященная разработке моделей выхода трансурановых изотопов при импульсном нуклеосинтезе также является актуальной и имеет научную значимость.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения общим объёмом 263 страницы. Материал иллюстрируется и поясняется на 111 рисунках и 15 таблицах. Список литературы включает 313 наименований.

Во Введении обсуждаются основные изотопные характеристики литиевого антинейтринного источника и обозначены проблемы, обнаруженные после анализа выходов трансуранов по известным взрывным экспериментам.

В Главе 1 рассмотрены известные нейтринные источники низкой (МэВ-ный диапазон) энергии и обозначены сложности, связанные с использованием ядерных реакторов в качестве источников электронных антинейтрино.

В Главе 2 дан обзор ряда экспериментов по синтезу трансурановых изотопов, указаны особенности взрывного нуклеосинтеза и существующие подходы в расчётах выходов трансурановых изотопов, а также описан «нечётно-чётный эффект» в выходах изотопов с массовыми числами $A > 250$ и показана возможная роль в этом явлении запаздывающих процессов деления ядер.

Глава 3 посвящена описанию алгоритмов решения задач о переносе нейтронного излучения статистическими методами (метод Монте-Карло), использованные автором при моделировании литиевого нейтринного источника. Алгоритмы использовались для моделирования траекторий

нейтронов (программа МАМОНТ) с учётом сложной геометрии среды, рассеяния на ядрах среды и возможной анизотропии процесса, поглощения, возбуждения ядер и диффузии. В главе 3 приведены результаты верификации программы и проверка согласия расчётов в сравнении с известными экспериментальными результатами.

В Главе 4 изложены основные результаты по предлагаемому литиевому антинейтринному источнику. Путём математического моделирования получены его характеристики и продемонстрирована реальная возможность создания такого источника электронных антинейтрино. Показано, что для увеличения эффективности источника возможно применение ^{11}B в схеме blankets типа «слойки». Подробно рассмотрена проблематика выбора вещества blankets. Анализируется возможность применения широкого списка неорганических и органических литиевых дейтерированных соединений (дейтериды лития, гидроксиды лития, их растворов и др.). Задача выбора вещества сформулирована как задача максимизации эффективности blankets и минимизации его размеров, что крайне важно, как для экспериментов по поиску стерильных нейтрино, так и с практической стороны, учитывая высокую стоимость изотопа ^7Li достаточно высокой чистоты. Для эксперимента с короткой базой предложена схема с непрерывной циркуляцией активируемого литий-содержащего вещества по замкнутому контуру, что позволит значительно увеличить поток литиевых нейтрино на детекторе в реакторном эксперименте.

Рассмотрена схема нейтринного источника на высокоинтенсивном протонном ускорителе. Проведены расчёты для использования тяжелых мишеней - свинец, тантал, вольфрам для предлагаемых геометрий, веществ, энергии пучка. На основе проведенного анализа плотности образования ^8Li предложено эффективное решение для создания компактного антинейтринного источника для поиска стерильных нейтрино. Отметим, что масса лития в предложенной схеме сокращается в 150 раз. Обсуждается постановка перспективного поиска стерильных нейтрино на детекторе с характеристиками, близкими к детектору JUNO.

В Главе 5 приведён подробный обзор возможностей применения различных нейтронных источников при создании нейтринной фабрики. Обсуждаются характеристики высокопоточных реакторов с постоянным потоком, импульсные реакторы, нейтронные spallation-источники и нейтронные генераторы. Акцент сделан на преимуществах импульсных реакторов и приведена возможная схема литиевого источника на базе реактора «Ягуар». Показана перспективность варианта источника с имплозией D-T-мишени в случае достижения потоков, необходимых для нейтринных исследований.

Глава 6 посвящена особенностям взрывного нуклеосинтеза и содержит описание моделей для расчёта выходов трансурановых изотопов в такого рода

экспериментах. Рассмотрены три авторские модели: 1) адиабатическая модель с учетом элементов динамики во временном интервале τ -процесса при одном стартовом изотопе; 2) бинарная адиабатическая модель (учитывается два и более исходно активируемых изотопа) и 3) двух-групповая динамическая модель образования трансураниевых изотопов с медленной нейтронной группой. В данной главе продемонстрировано, что каждая из предложенных моделей ведёт к улучшению согласия с экспериментальными данными. В частности, эффективность расчётов подтверждается сравнением с результатами наиболее удачного эксперимента "Пар", в котором получены все изотопы вплоть до ^{257}Fm .

Представленные в диссертационной работе В.И. Ляшука результаты и положения могут быть квалифицированы как существенный вклад в исследование атомного ядра и элементарных частиц. В частности, автором разработаны эффективные схемы устройства литиевого антинейтринного источника и показано, что с литиевым антинейтринным источником в ускорительном эксперименте по поиску стерильных нейтрино можно достичь чувствительности $\text{Sin}^2(2\theta) \leq \sim 0.001$ для $\Delta m^2 > 0.2 \text{ eV}^2$ на доверительном уровне 95%, а его оригинальные модели расчётов образования трансураниевых изотопов в процессе взрывного нуклеосинтеза позволяют улучшить согласие с экспериментальными данными в проблемном интервале массовых чисел при $A > 250$. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в реферируемых журналах, о ведущей роли автора в этой области свидетельствуют также многочисленные доклады на многих международных конференциях, а также семинарах в ИЯИ РАН, ИТЭФ, НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, ФЭИ. Материалы диссертации обсуждались 23 января 2018 г. на семинаре Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ. Вклад диссертанта ясно обозначен в автореферате и является определяющим. Автореферат корректно воспроизводит результаты, изложенные в диссертации, хотя и грешит некоторыми опечатками (так, на стр. 28 вместо ссылки на Рис. 2.3 ошибочно дана ссылка на Рис. 2.4). Следует отметить, что в предложении эксперимента по поиску стерильных нейтрино на детекторе типа JUNO наряду с рассчитанной чувствительностью эксперимента, желательным было бы привести соответствующее число взаимодействий в детекторе для итогового спектра.

Диссертационная работа В.И. Ляшука несомненно является актуальной, завершённой, выполненной на высоком научном уровне и соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 и

предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

Указанные выше замечания не снижают научной ценности полученных результатов. Выносимые на защиту положения являются весомыми, хорошо аргументированными, не вызывают сомнений и характеризуются научной новизной. Диссертация оформлена в соответствии с существующими требованиями. Автор корректно ссылается в диссертационной работе на результаты, полученные другими исследователями.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Ляшука Владимира Ивановича полностью соответствует требованиям ВАК и специальности 01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц, а её автор – Ляшук Владимир Иванович - заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент: Болоздыня Александр Иванович, доктор физико-математических наук, 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики. 115409, Москва, Каширское шоссе, 31,
Тел. +7 495 788 5699 *9015

Электронный адрес: AIBolozdynya@mephi.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», заведующий межкафедральной лабораторией экспериментальной ядерной физики, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики и космофизики.

(подпись)

А.И. Болоздыня
(инициалы, фамилия)

Подпись А.И. Болоздыни заверяю

Учёный секретарь

В.Г. Цыганов,
кандидат технических наук

Электронный адрес: VGTsuganov@mephi.ru

29 января 2018 г.

Список основных публикаций Болоздыни А.И. за 5 лет:

1. Akimov, D.Yu. et al. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering, *Science* 357(2017)1123-1126; Q1, 2017
2. Akerib, D.S. et al. Identification of radiopure titanium for the LZ dark matter experiment and future rare event searches, *Astroparticle Physics* 96 (2017)1-10; Q1, 2017
3. Akimov, D.Yu. et al. Status of the RED-100 experiment, *Journal of Instrumentation* 12 (2017) C06018; Q1, 2017
4. Akimov, D.Yu. et al. COHERENT Experiment: Current status, *Journal of Physics: Conference Series* 798(2017)012213
5. Akimov, D.Yu. et al. New method of Kr-85 reduction in a noble gas based low-background detector, *Journal of Instrumentation* 12(2017)P04002; Q1, 2017
6. Akimov, D.Yu. et al. Observation of delayed electron emission in a two-phase liquid xenon detector, *Journal of Instrumentation* 11 (2016) C03007; Q1, 2016
7. Akimov, D.Yu. et al. Observation of light emission from Hamamatsu R11410-20 photomultiplier tubes, *Nuclear Instruments & Methods A* 794 (2015) 1-2; Q1, 2015
8. Akimov, D.Yu. et al. A two-phase emission liquid Xe detector for study of low-ionization events at the research reactor IRT MEPhI, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 62(2015)257-263
9. Bolozdynya, A.I., Dmitrenko, V.V., Efremenko, Y.V. et al. The two-phase closed tubular cryogenic thermosyphon, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80 (2015) 159-162; Q1, 2015
10. Akimov, D.Yu. et al. Investigation of Coherent Neutrino Scattering at the Spallation Neutron Source, *Physics Procedia* 74 (2015) 411-415
11. Akerib D.S. et al. (LUX Collaboration). First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research Facility, *Physics Review Letters* 112 (2014) 091303; Q1, 2014
12. Akerib D.S. et al. (LUX Collaboration). First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford Underground Research Facility, *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014) 091303; Q1, 2014
13. Akerib D.S. et al. (LUX Collaboration). The LUX prototype detector: Heat exchanger development, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 709 (2013) 29-36; Q1, 2013
14. Akerib D.S. et al. (LUX Collaboration). The Large Underground Xenon (LUX) experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 704 (2013) 111-126; Q1, 2013
15. Akimov, D. Yu.; Alexandrov, I. S.; Aleshin, V. I.; Belov, V. A.; Bolozdynya et al. Prospects for observation of neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase Xenon emission detector. *Journal of Instrumentation* 8 (2013) P10023; Q1, 2013