

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 **15.02.2018 г. № 2/39**

О присуждении Ляшуку Владимиру Ивановичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация "Интенсивный литиевый антинейтринный источник и взрывной нуклеосинтез в нейтронных потоках" по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, принята к защите 21.09.2017 г., протокол № 6/33 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 Ляшук Владимир Иванович, 1952 года рождения, после окончания МИФИ (факультет теоретической и экспериментальной физики) работал в Институте теоретической и экспериментальной физики (г. Москва) до 2008 г., а с 2008 г. - работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук "Радиоактивные превращения при импульсном нуклеосинтезе и в  $(n, \tilde{\nu}_e)$ -конверторе" защитил 23 сентября 1991 г. (протокол №5) в диссертационном совете, созданном на базе Московского инженерно-физического института. Специальность - 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц. Выдан диплом КД № 047880 (дата выдачи - 20 ноября 1991г., Москва). В настоящее время Ляшук В.И. работает в должности старшего научного сотрудника Отдела экспериментальной физики в

Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Диссертация выполнена в Отделе экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Официальные оппоненты:

- **Блинников Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ» (г. Москва), лаборатория физики плазмы и астрофизики, главный научный сотрудник;

- **Болоздыня Александр Иванович**, доктор физико-математических наук, НИЯУ МИФИ (г. Москва), лаборатория экспериментальной ядерной физики, заведующий лабораторией; кафедра экспериментальной ядерной физики и космофизики, профессор;

- **Студеникин Александр Иванович**, доктор физико-математических наук, МГУ имени М.В.Ломоносова (г. Москва), кафедра теоретической физики физического факультета, профессор;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация «Объединенный институт ядерных исследований» (ОИЯИ, г. Дубна) в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук Ю.М. Гледеновым (Отделение ядерной физики Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ, ведущий научный сотрудник) и председателем НТС Отделения ядерной физики Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником, А. Б. Поповым, указала, что:

- материалы диссертации обсуждались 20 декабря 2017 г. на семинаре Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка (ЛНФ) Объединенного института ядерных исследований; отзыв рассмотрен и утвержден научно-техническим советом Отделения ядерной физики ЛНФ (протокол от 25 декабря 2017 г);

- диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук; автор диссертации Ляшук Владимир Иванович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Соискатель имеет 116 опубликованных работ; в том числе по теме диссертации - 44 работы, опубликованных в рецензируемых научных изданиях - 19.

Выделим наиболее значимые работы:

- [1] Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Конвертор реакторных нейтронов в антинейтрино на основе литиевых соединений и их растворов // Атомная энергия, 1990. т.69, вып.2, с.1209.
- [2] Lyutostansky Yu.S., Lyashuk V.I. Powerful hard-spectrum neutrino source based on lithium converter of reactor neutrino to antineutrino // Nuclear Science and Engineering. 1994. v.117. p.77.
- [3] Lutostansky Yu.S., Lyashuk V.I. Powerful dynamical neutrino source with a hard spectrum // Phys.Atom.Nucl. 2000. V.63 p.1288-1291; Yad.Fiz. 2000 т.63. с.1361.
- [4] Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И., Панов И. В. Расчеты образования трансурановых элементов в интенсивных нейтронных потоках в адиабатических условиях. Изв.РАН. Сер. физическая. 2010, т.74. с.536.
- [5] Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Концепция мощного антинейтринного источника // Известия РАН. Сер. физическая. 2011. т.75. № 4. с.504.
- [6] Лютостанский Ю.С., Ляшук В. И., Панов И.В. Получение трансурановых элементов в бинарной модели в условиях импульсного нуклеосинтеза // Известия РАН. Сер. физическая, 2011. т.75. № 4. с.569.
- [7] Ляшук В.И. Моделирование выходов трансурановых изотопов во взрывном нуклеосинтезе с учетом элементов динамики процесса // Изв.РАН. сер. физическая. 2012. т.76. № 11. с.1321.

- [8] Лютостанский Ю.С., Ляшук В.И. Оценка выходов трансурановых нуклидов с массами до  $A=270$  в условиях импульсного нуклеосинтеза // Изв.РАН. сер. физическая. 2012. т.76. № 4. с.520.
- [9] Горбаченко О. М., Кондратьев В. Н., Лютостанский Ю. С., Ляшук В. И.. LiВ-Нейтронный конвертор для нейтринного источника // Изв.РАН. сер. физическая. 2014. т.78. № 7. с.832.
- [10] Ляшук В. И., Лютостанский Ю. С.. Интенсивный нейтринный источник на основе изотопа  ${}^7\text{Li}$ : реакторная и ускорительная реализации // Изв.РАН. сер. физическая. 2015. т.79. № 4. с.472.
- [11] Ляшук В. И; Лютостанский Ю. С. Антинейтринный источник высокой интенсивности на основе литиевого конвертора. Предложение к перспективному эксперименту по исследованию осцилляций // Письма в ЖЭТФ, 2016, т.103, вып.5 с. 331.
- [12] Lyashuk V. I. Intensive lithium  $\tilde{\nu}_e$ -source: Effective solution for accelerator scheme // Results in Physics. V.6, 2016, p. 961.
- [13] Lyashuk V. I. Hard Antineutrino Source Based on a Lithium Blanket: A Version for the Accelerator Target // Particles and Nuclei, Letters. 2017. V.14. No.3. p. 465.
- [14] Lyashuk V. I. Problem of reactor antineutrino spectrum errors and it's alternative solution in the regulated spectrum scheme // Results in Physics. 2017. V.7. p.1212.

В данных публикациях изложены физические принципы создания интенсивного литиевого антинейтринного источника, проработаны предлагаемые варианты (схемы) создания источника: с неуправляемым и управляемым спектром (на основе активной зоны реактора) и на основе ускорителя с нейтронно-производящей мишенью. Детально исследованы вопросы: эффективности литиевого blankets, функциональной зависимости характеристик источника с управляемым спектром и его преимуществ для нейтринных экспериментов, проблема снижения массы высокочистого лития, уменьшения размеров источника, оценена чувствительность к углу смешивания

при поиске стерильных нейтрино. Предложены модели образования трансурановых изотопов в условиях взрывного нуклеосинтеза: адиабатическая модель (ввод динамики в интервале нуклеосинтеза позволяет учесть изменение сечений при падении температуры в интервале нуклеосинтеза); в двухгрупповой динамической модели вводится медленная нейтронная компонента, что позволяет принять в учет особенности нейтронного спектра при нуклеосинтезе; в бинарной модели учитывается сложный стартовый состав облучаемой мишени.

Вклад соискателя в полученные результаты является определяющим. Личный вклад соискателя адекватно отражен в автореферате диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от ведущей организации (ОИЯИ, г. Дубна) и официальных оппонентов. В отзывах отмечается, что результаты являются обоснованными и представлены подробно и аргументированно.

Материалы диссертации обсуждались на семинарах: в ведущей организации - Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна (20 декабря 2017, семинар Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка); 26 декабря 2017 г. - на семинаре лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ; 23 января 2018 г. - на семинаре Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ; 11 января 2018 г. - на семинаре группы по физике нейтрино кафедры теоретической физики физического факультета МГУ. В заключениях отзывов указывается, что диссертация 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.

Выбор ведущей организации и оппонентов обоснован их высокой квалификацией и известными в мире результатами их работ по сходной тематике.

В отзывах есть критические замечания и рекомендации.

- Автор довольно подробно рассмотрел различные оценки сечения реакций на литии. При этом, целесообразно было бы выяснить влияние различных оценок на расчетные значения эффективности литиевого blankets.

- В предложении эксперимента по поиску стерильных нейтрино на детекторе типа JUNO наряду с рассчитанной чувствительностью эксперимента желательно привести соответствующее число взаимодействий в детекторе для итогового спектра.

- При аппроксимации сечений (n,  $\gamma$ )-захвата со стартовым изотопом в моделях нуклеосинтеза в качестве "опорных" сечений используются  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Следовало бы раскрыть, какова чувствительность выходов трансуранов к значениям в разных "опорных" вариантах, упомянутых в тексте.

- В предложенной уран-плутониевой бинарной модели с учётом запаздывающих процессов указано на проявление нечётно-чётного эффекта. Параметры запаздывающих процессов брались из одного источника, а их следовало бы проварьировать.

- На стр. 50 и далее описаны результаты расчётов из работ [79,79a]. В частности, там использовалась программа РОЗ. К сожалению, не указано, что этот код был разработан в ИПМ им. М.В.Келдыша.

- В таблице 4.3.1 требуются дополнительные разъяснения по структуре данных.

- В тексте есть тяжело читаемые абзацы и опечатки, в т.ч.: во введении, главе 1; на стр. 97, 119; на стр. 28 вместо ссылки на Рис. 2.3 ошибочно дана ссылка на Рис. 2.4; есть анахронизмы - стр. 176, 177, 192 (ссылка [240] на LHC); в списке литературы есть две ссылки с измененным стилем нумерации: [78a] и [79a].

- Оппоненты высказали мнения по изложению материала: 1) главы 1 и 2 - небольшие по объему и их можно было бы объединить в одну, состоящую из двух разделов; 2) в главе 5: по некоторым нейтронным источникам есть подробная детализация, которую возможно сократить без ущерба для изложения основных вопросов; на возможность создания лазерного

нейтронного источника указано слишком кратко; 3) автор неоднократно (в главе 1, 4, 5) рассматривает преимущества импульсных источников нейтронов (в т.ч., импульсных реакторов) для создания нейтринного источника. Для цельности изложения и в качестве пожелания в дальнейшей работе (например, при написании обзора по возможным источникам на основе лития) было бы полезно более последовательно и в рамках одного раздела изложить вопросы создания импульсных литиевых антинейтринных источников; 4) в диссертации следовало бы отдельно и явно подчеркнуть, что предлагаемые соискателем схемы blankets типа "слойки" применимы также и для нейтринных источников с управляемым спектром; 5) чтение диссертации было бы облегчено, если бы автор в тексте и в подписях к рисункам явно указывал на своё авторство (не только в конце глав).

Однако, отмеченные замечания не снижают ценности результатов, полученных в диссертации. Диссертация является завершённым исследованием, выполненным на высоком научном уровне.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны основные принципы, исполнение которых необходимо для реализации интенсивного антинейтринного источника на основе литиевого blankets (в т. ч., выбор эффективных литий-содержащих материалов, ограничение по концентрации примесных изотопов, схемы компоновки источника типа «слойки»); предложения подкреплены детальными расчетами зависимости выходов изотопа  $^8\text{Li}$  от ключевых параметров компоновки и концентраций);

впервые для короткобазовых нейтринных экспериментов предложен источник с управляемым антинейтринным спектром в схеме с принудительной циркуляцией активируемого литий-содержащего вещества в замкнутой петле; уникальность схема обеспечивает плавное управление спектром без остановки эксперимента;

введено определение жесткости  $H$  результирующего антинейтринного спектра, что позволило получить зависимости изменения сечений антинейтрино на протоне и дейтроне от изменения потока литиевых антинейтрино;

получены аналитические выражения для расчета потоков литиевых антинейтрино в схеме с управляемым спектром;

впервые для схемы с управляемым спектром показана и подтверждена расчетами возможность принципиального снижения ошибок регистрации антинейтрино (в два раза и более), обусловленных неопределенностями реакторного антинейтринного спектра; получена зависимость ошибок регистрации от жесткости; продемонстрирована возможность создания высокоинтенсивного антинейтринного источника с хорошо определенным управляемым спектром;

сформулирована и решена задача уменьшения размеров blankets при обеспечении высокой его эффективности, что подкреплено детальными расчетами с учетом чистоты лития и дейтерия;

проведены детальные расчеты вариантов литиевого антинейтринного источника в схеме с ускорителем и нейтронно-производящей мишенью;

для схемы антинейтринного источника с ускорителем показано, что применение такого литиевого источника для поиска стерильных нейтрино (с  $\Delta m^2 \sim 1 \text{эВ}^2$ ) на детекторе типа JUNO позволяет достичь высокой чувствительности по углу смешивания;

предложено эффективное решение для ускорительной схемы литиевого антинейтринного источника, позволяющее сократить необходимую массу изотопа  ${}^7\text{Li}$  до 120–130 кг и уменьшить линейные размеры в 2.5 раза (до 1.3–1.4 м), что важно для короткобазового осцилляционного эксперимента;

предложенная адиабатическая модель образования трансурановых изотопов в условиях взрывного нуклеосинтеза с учетом динамики импульсного процесса продемонстрировала, что учет температурной зависимости сечения

нейтронных захватов приводит к улучшению согласия с экспериментальными данными;

предложенная двухгрупповая динамическая модель выхода трансуранов во взрывном нуклеосинтезе с введением медленной компоненты потока показала, что учет медленной составляющей нейтронного флюенса корректирует выходы трансуранов и работает на улучшение согласия с экспериментом в проблемной области при массовом числе  $A > 250$ ;

предложена бинарная динамическая модель, что важно для учета сложного стартового состава мишени; модель обеспечивает значительное улучшение согласия с экспериментальными результатами выходов трансурановых изотопов и интересна для исследования влияния сверхтяжелых добавок в мишени на итоговые выходы.

Результаты, полученные в диссертации, являются оригинальными, обоснованными и достоверными. Обоснованность и достоверность представленных модельных результатов основывается на многоэтапных шагах по тестированию проводимых расчетов. Моделированию антинейтринного литиевого источника предшествовал длительный и ёмкий этап расчетов по базовым интегральным экспериментам (предназначенным для тестирования расчетных программ). Результаты подтвердили хорошую степень согласия с экспериментами, с результатами расчетов по известным транспортным кодам, и адекватность использованных моделей. Данные методические исследования детально изложены в диссертации.

В расчетах по предложенным моделям образования трансурановых изотопов (адиабатическая, двухгрупповая, бинарная) при взрывном нуклеосинтезе достигнуто лучшее в мире согласие с экспериментальными данными, что подтверждает их обоснованность и достоверность. Особую актуальность исследованиям по взрывному нуклеосинтезу придает также открытие гравитационного излучения (2017 г.) при слиянии нейтронных звезд (что указало на особую роль нейтронных захватов при синтезе тяжелых элементов - процессов, рассмотренных в диссертации).

Теоретическая и практическая значимость представленных соискателем исследования подтверждается также тем, что сейчас формируется группа специалистов ведущих ядерных центров (Англии, США, Японии, Швейцарии, Италии), заявляющих о цели создания литиевого антинейтринного источника на основе ускорителя с нейтронно-производящей мишенью и литиевым бланкетом на базе детектора KamLAND (A. Bungau, A. Adelman, J. R. Alonso, et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. 141802) и ссылающаяся на идеи, представленные в данной диссертации. Данной группой опубликовано обширное предложение - "white paper" по созданию такого литиевого источника.

Личный вклад соискателя отражен в автореферате и состоит в разработке основных требований к литиевому антинейтринному источнику; предложенных схемах антинейтринного источника; указанном подходе по принципиальному сокращению необходимой массы высокочистого лития и значительному уменьшению размеров источника; рассмотрению возможной постановки эксперимента по поиску стерильных нейтрино; в предложенных моделях образования трансурановых изотопов при взрывном нуклеосинтезе.

Результаты могут быть использованы в создании интенсивного литиевого антинейтринного источника для фундаментальных исследований в области физики атомного ядра и элементарных частиц. Более того, идеи, изложенные в диссертации, уже используются в мире при проработке проекта литиевого антинейтринного источника на базе детектора KamLAND (как указано выше). Предложения по созданию антинейтринного источника обсуждались и вызывают интерес в НИЦ "Курчатовский институт" (г. Москва). Данные предложения вызвали значительный интерес в ОИЯИ (г. Дубна) при обсуждении преимуществ антинейтринного источника и для программ исследований. Предложения могут быть реально применены на создаваемом сейчас крупнейшем в мире детекторе JUNO в Китае, о чем детально указано в диссертации. Такой источник будет очень перспективен для фундаментальных астрофизических исследований по исследованию нейтринных взаимодействий,

о чем было указано выступавшими физиками на защите диссертации. Значительный интерес вызывают результаты, полученные при моделировании взрывного нуклеосинтеза с образованием трансурановых изотопов, поскольку близкие процессы происходят в звездах (и особенно при слиянии нейтронных звезд - недавно зарегистрированном явлении). Результаты представленных исследований по взрывному нуклеосинтезу тесно пересекаются с астрофизическими исследованиями, проводимыми в НИЦ "Курчатовский институт"- ИТЭФ (г.Москва) и с известными работами по синтезу сверхтяжелых ядер в ОИЯИ (г.Дубна). Такие физические модели безусловно улучшают наши знания о фундаментальных процессах, происходящих во вселенной и реализованных в проведенных масштабных экспериментах по изучению взрывного нуклеосинтеза.

На заседании 15.02.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Ляшуку В. И. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **20** человек, из них **6** докторов наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц, участвовавших в заседании, из **26** человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - **20**, против - **нет**, недействительных бюллетеней - **нет**.

Председатель

диссертационного совета Д 002.119.01

д.ф.-м.н., академик РАН \_\_\_\_\_ Рубаков В.А.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

д.ф.-м.н., член-корр. РАН \_\_\_\_\_ Троицкий С.В.

15.02.2018 г.

МП