

УТВЕРЖДАЮ:

Вице-директор ОИЯИ

Профессор _____ М. Г. Иткис

« 18 » января 2018 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Отзыв Объединенного института ядерных исследований на диссертацию 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

Диссертационная работа посвящена проблемам создания интенсивного антинейтринного источника на основе лития и взрывного нуклеосинтеза трансурановых изотопов в искусственных условиях. Два разрабатываемых диссертантом направления объединяет необходимое условие реализации этих процессов - наличие интенсивных нейтронных потоков для образования изотопа ${}^8\text{Li}$, как источника электронных антинейтрино при бета-распаде, в первом направлении и для рождения сильно нейтронно-избыточных трансурановых изотопов при импульсном облучении урановых и трансурановых мишеней во втором направлении исследований.

На сегодняшний день наиболее интенсивным и широко применяемым антинейтринным источником является ядерный реактор. Однако, быстро спадающий по энергии спектр антинейтрино, значительные и быстро возрастающие ошибки с увеличением энергии сильно осложняют исследования. Разработанные автором варианты интенсивного антинейтринного источника с жестким спектром на основе лития восполняют указанные недостатки. Создание

литиевых источников в предлагаемых схемах перспективно для осцилляционных экспериментов на короткой базе.

Искусственный взрывной нуклеосинтез трансурановых изотопов является уникальным экспериментальным методом синтеза ядер с большим нейтронным избытком, сильно удаленных от области бета-стабильности, т.е. ядер с неисследованными свойствами. Заметим, что экспериментально подтвержден захват до 19 нейтронов в таких процессах. Предложенные автором модели такого r -процесса позволяют рассчитать выходы трансуранов в подобных экспериментах с точностью, превышающей известные опубликованные результаты и достигнуть хорошего или удовлетворительного согласия с экспериментом, в т.ч., в проблемной области - при массовом числе $A > 250$, где зарегистрирована аномалия в выходах трансурановых изотопов, так называемый, нечетно-четный эффект.

Диссертантом предложены и исследованы принципиальные схемы литиевого антинейтринного источника, основанного на различных источниках нейтронов. Тщательно изучены требования к изотопной чистоте. Для создания нейтринного источника большое значение имеет проведенное в работе детальное исследование возможных материалов, применение которых в бланкете обеспечит высокий выход изотопа ^8Li при резком сокращении необходимой массы дорогостоящего чистого изотопа ^7Li .

Введено оригинальное определение жесткости суммарного антинейтринного спектра, что позволяет в едином подходе описания жесткости спектра оценивать преимущества принципиально различных вариантов и режимов работы литиевого источника.

Оригинальным является предложение использовать источник с управляемым антинейтринным спектром, позволяющий менять его жесткость без прерывания эксперимента. Для данной схемы получены аналитические выражения для потоков литиевых антинейтрино. Благодаря жесткости спектра схема позволяет значительно снижать ошибки счета в детекторе (в два и более раз), что особо критично для осцилляционных экспериментов.

Автор детально исследовал ускорительную схему литиевого источника для различных нейтронно-производящих мишеней (вольфрам, свинец, висмут) и энергий протонного пучка. Для ускорительного варианта предложена компактная

схема источника, позволяющая резко сократить массу дорогостоящего высокочистого лития (до 120-130 кг) при уменьшении размеров до 1.3-1.4 м. Сформулированы требования к чистоте дейтерия в используемых в бланкете растворах. Для схемы тандема ускорителя и литиевого бланкета показана возможность обеспечить рекордную чувствительность по углу смешивания ($\text{Sin}^2(2\theta) \leq \sim 0.001$ для $\Delta m^2 > 0.2 \text{ eV}^2$ на доверительном уровне 95%) для поиска стерильных нейтрино.

Диссертант разработал оригинальную адиабатическую модель, учитывающую элементы динамики при взрывном нуклеосинтезе. Такой подход позволил значительно улучшить согласие расчетов с экспериментом.

Несомненной новизной является также учет особенностей нейтронного спектра импульсного процесса, что позволило автору ввести в модель медленную компоненту нейтронного потока.

С учетом особенностей экспериментов по взрывному нуклеосинтезу предложена бинарная модель для расчета выходов трансурановых нуклидов. Бинарная модель позволила исследовать возможность увеличения выходов трансурановых изотопов при включении тяжелых добавок в мишень и достичь наилучшей степени согласия с экспериментом по взрывному нуклеосинтезу из известных опубликованных результатов.

Указанные предложения и исследования по литиевому антинейтринному источнику, разработанные модели взрывного нуклеосинтеза и полученные результаты расчетов являются полностью новыми и несомненно имеют научную и практическую ценность.

Диссертация состоит из: введения, шести глав, заключения и списка литературы (313 наименований). Объем диссертации - 263 стр., включая 111 рисунков и 15 таблиц.

Во введении кратко указаны преимущества литиевого антинейтринного источника и сформулированы задачи его создания. Дан краткий обзор экспериментов по взрывному нуклеосинтезу, проблемы интерпретации аномалии в выходах при массовом числе $A > 250$.

В главе 1 рассмотрены применяемые и возможные нейтринные источники низких энергий, традиционно исследуемые реакции с протоном и дейтроном.

Введено определение кпд blankets. Кратко рассмотрено применение изотопных источников в экспериментах ИТЭФ (в 80-е годы), SAGE, GALLEX/GNO, SNO, «Троицк-ню-масс» в ИЯИ РАН.

В главе 2 рассмотрены особенности быстрого r -процесса множественного захвата нейтронов в условиях взрывного нуклеосинтеза, особенности медленного s -процесса, их отличия. На примере экспериментов "Майк" и "Пар" проиллюстрирован обнаруженный нечетно-четный эффект (с интерпретацией В. И. Кузнецова, ОИЯИ) в выходах трансурановых нуклидов.

Глава 3 посвящена аналоговым и неаналоговым алгоритмам моделирования переноса нейтронов методом Монте-Карло в многокомпонентных средах сложной геометрии. Рассмотрены принципы, реализованные в расчетах переноса нейтронов с кодом MAMONT, автором которого является диссертант, и применявшиеся при моделировании нейтронных полей в литиевых blankets, а так же их верификация по базовым интегральным экспериментам.

Глава 4 посвящена разработке и исследованию характеристик литиевого антинейтринного источника на основе нейтронной активации ${}^7\text{Li}(n,\gamma){}^8\text{Li}$. Рассмотрены возможные геометрии литиевого источника (blanket) на основе реактора, рассчитаны эффективности blankets, требования к изотопной чистоте ${}^7\text{Li}$. Подробно исследованы возможные кандидаты для состава blanket в рамках проблема поиска наиболее перспективных литий-содержащих веществ, обеспечивающих максимальный выход ${}^8\text{Li}$ и минимизирующих массу ${}^7\text{Li}$.

Введено определение обобщенной жесткости суммарного антинейтринного спектра (от активной зоны плюс от ${}^8\text{Li}$). Для осцилляционных экспериментов с короткой базой предложена схема с переносом лития к детектору и получены аналитические выражения антинейтринных потоков. В зависимости от обобщенной жесткости рассчитаны сечения антинейтринно на протоне и дейтроне. Проанализированы источники ошибок и предложены методы их снижения при переходе от чисто реакторного нейтринного спектра к комбинированному (от активной зона плюс от ${}^8\text{Li}$) с изменяемой жесткостью.

Детально рассмотрены характеристики литиевого антинейтринного источника в схеме тандема ускорителя, тяжелой мишени (на основе вольфрама, свинца или висмута) и литиевого blanket. Исследована возможная постановка эксперимента

по поиску стерильных нейтрино с $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$, которые могут обеспечить рекордную чувствительность на доверительном уровне 95%. В ускорительной схеме изучена плотность рождения ${}^8\text{Li}$ для цилиндрической геометрии blankets и показано, как можно снизить необходимую массу ${}^7\text{Li}$ в ~ 150 раз в сравнении с вариантом металлического литиевого blankets при уменьшении размеров источника в 2.5 раза.

В главе 5 подробно рассмотрены возможные нейтронные источники для активации лития: реакторы с постоянным потоком и импульсные; проект РИНГ создания нейтринного источника; существующие и создаваемые нейтронные источники на основе реакций расщепления; ядерные взрывы; возможности создания источников на основе нейтронных генераторов.

Глава 6 посвящена разработке моделей образования трансурановых нуклидов в искусственном импульсном нуклеосинтезе и методике расчетов. Рассмотрена общая схема r -процесса, экстраполяция сечений (n,γ) -захватов для нейтронно-избыточных изотопов и возможные упрощения (с учетом температур, скоростей характерных реакций) для интервала нуклеосинтеза $\sim 10^{-6}$ с. Предложена адиабатическая модель, учитывающая элементы динамики импульсного r -процесса с разбиением интервала нуклеосинтеза на наносекундные интервалы, и с последовательным решением уравнений нуклеосинтеза при изменяющихся начальных условиях по концентрациям стартовых нуклидов и температуре процесса.

Дальнейшее развитие динамической модели искусственного взрывного нуклеосинтеза реализовано автором благодаря учету вклада медленной компоненты нейтронного потока в r -процессе в соответствии с существующими расчетами эволюции нейтронного спектра в интервале взрыва.

Особенности экспериментов, обусловленные наличием иных трансурановых изотопов в мишени реализованы в бинарной модели и расчетах, где показано, что введение затравочных добавок (в т.ч., плутония) может вести к сильному (в разы) изменению выходов изотопов.

В заключении перечислены оригинальные результаты, полученные впервые и представленные автором к защите.

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на многих международных конференциях и обсуждались на научных семинарах в ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ИТЭФ, ОИЯИ, МИФИ, ФЭИ. Они опубликованы в 37 работах, список которых приведен в автореферате.

На разрабатываемые автором принципы создания литиевого антинейтринного источника ссылаются за рубежом и используются при разработке ускорительного варианта антинейтринного источника на основе литиевого blankets (Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. 141802).

Личный вклад автора в получение результатов был определяющим и детализирован в автореферате.

Автореферат диссертации полностью и верно отражает ее содержание.

Рассматриваемая диссертацию не лишена определенных недостатков. Например,

- в главе 5 по некоторым нейтронным источникам есть подробная детализация, которую возможно сократить без ущерба для изложения основных вопросов;

- в тексте часто, особенно во введении и главе 1 встречаются опечатки, несогласования слов в предложениях и тяжело читаемые абзацы.

При моделировании нейтронных полей в литиевом blankets 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.

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.

Однако, отмеченные замечания не снижают ценности результатов, полученных в диссертации. Диссертация является законченным исследованием. Полученные результаты изложены подробно, аргументированно и обоснованно.

Материалы диссертации обсуждались 20 декабря 2017 г. на семинаре Лаборатория 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.

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук

Ю.М. Гледенов

Председатель НТС ОЯФ ЛНФ ОИЯИ

А.Б. Попов

Дополнительная информация от ведущей организации

к отзыву на диссертацию 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

Объединенный институт ядерных исследований
Международная Межправительственная Организация Объединенный институт ядерных исследований (ММО ОИЯИ)

Адрес: г. Дубна Московской области, ул. Жолио Кюри д.6, 141980 Россия.

Электронная почта: post@jinr.ru

Сайт: www.jinr.ru

Тел. +7 (49621) 65-059, Факс +7 (49621) 65-146; +7 (495) 632-78-80

Список работ, связанных с тематикой диссертации Ляшука В. И.

[1] A. Ianni, G. Bellini, J. Benziger et al. Neutrinos from the sun and from radioactive sources // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. V. 237–238. (2013) p.77-81. ISSN 0920-5632. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2013.04.06>

[2] Borexino Collaboration (G. Bellini, et al.). SOX: Short distance neutrino Oscillations with BoreXino // J. High Energ. Phys. V.1308. (2013) p.038. [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2013\)038](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2013)038)

[3] V. I. Zagrebaev, S. G. Zemlyanoy, E. M. Kozulin, Yu. Kudryavtsev, V. Fedosseev, R. Bark, H. A. Othman. Production and study of heavy neutron rich nuclei formed in multi-nucleon transfer reactions // Hyperfine Interact V.216. (2013) p.109. <https://doi.org/10.1007/s10751-013-0838-1>

[4] Borexino Collaboration (G. Bellini et al.). Final results of Borexino Phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy // Phys. Rev. D 89 (2014) p.112007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.112007>

[5] Myeong-Hwan Mun, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, Yongseok Oh, and Youngman Kim. Production cross section of neutron-rich isotopes with radioactive and stable beams // Phys. Rev. C 89. (2014) p.034622.

DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.89.034622>

[6] R. Caballero-Folch, C. Domingo-Pardo, G. Cortes, et al. β -decay and β -delayed Neutron Emission Measurements at GSI-FRS Beyond N=126, for r-process Nucleosynthesis // Nuclear Data Sheets, V.120 (2014) p.81.

<https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.012>

[7] I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin et al. DANSSino: a pilot version of the DANSS neutrino detector // Phys. Part. Nuclei Lett. V.11. (2014) p.473.

<https://doi.org/10.1134/S1547477114040050>

[8] V. Gavrin, B. Cleveland, S. Danshin et al. Current status of new SAGE project with ^{51}Cr neutrino source // Physics of Particles and Nuclei. V.46. Issue 2. (2015) p.131.

<https://doi.org/10.1134/S1063779615020100>

[9] Altenmüller, K., Agostini, M., Appel, S. et al. The search for sterile neutrinos with SOX-Borexino // Phys. Atom. Nuclei V.79. (2016) p.1481.

<https://doi.org/10.1134/S106377881610001X>

[10] V. A. Bednyakov, D. V. Naumov and O. Yu. Smirnov. Neutrino physics and JINR // Phys.-Usp. V.59. (2016) p.225.

DOI: 10.3367/UFNe.0186.201603b.0233

[11] D.V. Naumov, V.A. Naumov, D.S. Shkirmanov. Inverse-square law violation and reactor antineutrino anomaly // Physics of Particles and Nuclei. V.48, Issue 1 (2017) p.12.

<https://doi.org/10.1134/S1063779616060174>