

ОТЗЫВ

официального оппонента
Блинникова Сергея Ивановича
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

Диссертация Владимира Ивановича Ляшука суммирует результаты многолетней работы автора по разработке интенсивного литиевого антинейтринного источника и по физическим моделям импульсного нуклеосинтеза в нейтронных потоках экстремальной плотности. Особую актуальность рассматриваемым в диссертации задачам придают открытия нейтринных осцилляций и необходимость изучения возможности осцилляций в стерильные нейтрино, а также открытие в 2017 году гравитационного излучения при слиянии нейтронных звёзд с последующими электромагнитными сигналами. Это открытие убедительно показало, что основным местом синтеза тяжёлых элементов является слияние и разрушение нейтронных звёзд. Идущие при этом процессы, как и процессы, рассмотренные в диссертации, эффективно реализуются в интенсивных нейтронных потоках через механизмы захвата нейтронов.

Идея создание антинейтринного источника на основе лития-7 высказана в 1965 г. советскими физиками Л. А. Микаэляном, П. Е. Спиваком и В. Г. Циноевым (ЯФ 1965. Т. 1. Вып. 5. С. 853). Необходимость такого нейтринного источника для фундаментальных исследований ясно осознавалась и активность в этом направлении выразилась в предложенном в ИАЭ им. И. В. Курчатова проекте РИНГ создания литиевого источника на основе импульсного графитового реактора. Но перспективное предложение не было реализовано, а проведение нейтринных экспериментов в МэВ-ом диапазоне энергий было ориентировано на антинейтрино от активной зоны ядерного реактора. В диссертации автор детально и всесторонне развивает идею

создания литиевого источника, предлагает принципиально новые схемы и решения, позволяющие перейти к практическому созданию интенсивного антинейтринного источника.

Второе направление диссертации - синтез элементов значительно тяжелее урана - связано с процессом многократного захвата нейтронов, происходящем в космическом нуклеосинтезе. Однако, экспериментальное воспроизведение многократного захвата нейтронов возможно только в условиях ядерных (термоядерных) взрывов, где плотность нейтронного потока превышает 10^{24} нейтронов/см² за кратковременный импульс. Проведение расчетов образования трансураниевых изотопов в искусственном нуклеосинтезе и получение результатов, согласующихся с экспериментальными данными, потребовало разработки новых моделей экспериментального взрывного нуклеосинтеза.

В первом направлении автор целенаправленно сосредоточился на разработке интенсивного антинейтринного источника для короткобазовых экспериментов, в значительной мере ориентированных на поиск стерильных нейтрино с $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$, что, безусловно, актуально для фундаментальных исследований.

Предлагаемый литиевый антинейтринный источник должен быть эффективен, т.е., обеспечивать высокий выход изотопа лития-8. Диссертант последовательно и детально анализирует предлагаемые схемы, вещества, нейтронные поля в моделируемой установке источника, дает аналитические решения для нейтронных потоков и проводит расчеты ожидаемых эффектов. Учитывая высокую стоимость высокочистых литиевых и дейтериевых соединений необходимо было проанализировать и рассчитать антинейтринные потоки как для металлического лития, так и для возможных литийсодержащих материалов, проанализировать и поставить ограничение на требуемую изотопную чистоту. Для целей создания литиевого антинейтринного источника необходим был анализ применения различных нейтронных источников для активации лития (источники со стационарным спектром на основе активной зоны реактора, на основе тандема ускорителя и нейтронно-производящей мишени, импульсные источники) и расчеты обеспечиваемых нейтринных потоков. Автор успешно решил эти актуальные задачи. Полученные результаты, несомненно, являются ценными для перехода к практическому этапу проектирования интенсивного литиевого антинейтринного источника.

Актуальность второго направления в диссертации (разработка моделей взрывного нуклеосинтеза в искусственных условиях) не требует специальных подтверждений, поскольку подобные процессы идут в звёздном нуклеосинтезе - (r -процесс) и обеспечивают обилие элементов во Вселенной. Как уже сказано выше, особую актуальность этому направлению придают открытия 2017 года.

Необходимо отметить, что искусственный взрывной нуклеосинтез - единственный, уникальный вид экспериментов, где возможен столь далекий уход от линии бета-стабильности и образованием изотопов с таким избытком нейтронов (захват до 19 нейтронов). Понимание и модельное воспроизведение этих экспериментальных результатов важно для расчетов распространения элементов в природе. Такой модельный эксперимент позволяет верифицировать ядерные константы для изотопов, удаленных от линии бета-стабильности.

Свойства многих ядер вне долины стабильности неизвестны и должны быть оценены. В моделирование необходимо учесть динамику процесса с изменяющейся температурой, нейтронными потоками, текущим обилием образовавшихся изотопов. Диссертант предложил и реализовал новые модели взрывного нуклеосинтеза, где ввел элементы динамики в интервале взрывного нуклеосинтеза ($\sim 10^{-6}$ с) с учетом падения температуры при адиабатическом расширении вещества, вклада более медленной нейтронной составляющей спектра и для изменения стартового состава мишени.

Кратко укажем полученные диссертантом новые результаты (их научную новизну и практическую ценность).

На основе слоистых структур типа "замедлитель нейтронов- литиевое вещество - нейтронный отражатель" параметрически исследовано изменение выхода лития-8 в схемах с неуправляемым спектром.

Для экспериментов с короткой базой предложена оригинальная петлевая схема литиевого источника с жестким спектром. Особо подчеркнем возможность оперативно менять жесткость спектра.

Введено оригинальное определение обобщенной жесткости. Получены аналитические выражения потоков литиевых нейтрино. Рассчитаны сечения антинейтрино на протоне и дейтроне (в нейтральном и заряженном канале) в зависимости от жесткости.

Показано расчетами, как жесткость обеспечивает принципиальное снижение ошибок счета антинейтрино в схеме с ядерным реактором. Реализация предложения позволит решить проблему ошибок антинейтринного спектра ядерного реактора.

Предложены варианты литий-содержащих веществ, обеспечивающие высокий выход лития-8 при уменьшении размеров источника (это принципиально важно для результатов осцилляционных экспериментов) и резком снижении необходимой массы высокочистого лития (что принципиально для возможности создания источника).

Исследованы характеристики антинейтринного источника в схеме "протонный ускоритель + тяжелая мишень + литиевый бланкет".

Показано, что эксперимент по поиску стерильных нейтрино с $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ в схеме "ускоритель + мишень+ литиевый бланкет + большой антинейтринный детектор" позволяет достичь исключительно высокой чувствительности по углу смешивания.

Для ускорительного варианта предложена эффективная схема компактного литиевого источника с углеродными отражателями с требуемой массой лития-7 - 120-130 кг.

Предложена оригинальная адиабатическая модель взрывного нуклеосинтеза с учетом элементом динамики процесса.

Адиабатическая модель удачно дополнена учетом "медленной" нейтронной компоненты спектра.

Моделирование со сложными мишенями (в рамках предложенной бинарной модели) позволило существенно улучшить согласие с экспериментом.

Объем диссертация не является чрезмерным - 263 стр. (включая список литературы из 313 наименований). В работе много рисунков (111 рисунков); все рисунки имеют подробные и понятные пояснения.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Введение кратко освещает тематику и структуру диссертации: указаны ключевые моменты в каждой из глав и тезисно перечислены полученные результаты по исследованным направлениям.

Глава 1 посвящена искусственным нейтринным источникам низкой энергии (в МэВ-ом диапазоне). Рассмотрены некоторые характеристики ядерного реактора как антинейтринного источника, перспективность использования лития для нейтринных

исследований, указаны традиционно исследуемые реакции с протоном и дейтроном (в нейтральном и заряженном каналах). На примере реакции с дейтроном показано преимущество, получаемое от вклада литиевой компоненты в суммарный спектр. Рассмотрена возможность создания нейтринного источника при термоядерной реакции, инициированной лазерным импульсом. Даны характеристики некоторых возможных и используемых в экспериментах (SAGE, GALLEX/GNO, SNO, "Троицк-ню-масс") изотопных источников.

В главе 2 рассмотрены некоторые взрывные эксперименты, проведенные с целью синтеза трансурановых элементов. Рассмотрены характерные особенности таких импульсных процессов (времена, потоки, энергии нейтронов). Кратко указаны взрывы, проведенные с научными целями, и обнаруженные сверхтяжелые изотопы. Продемонстрировано проявление нечетно-четного эффекта.

В главе 3 представлены методы и подходы, реализуемые при расчете нейтронных полей методом Монте-Карло. Излагаются алгоритмы вероятностного розыгрыша процессов переноса, реализованных в практических расчетах предложенных схем литиевого антинейтринного источника. Большой вклад в методики этих расчётов внесён автором. Проведенные оригинальные расчеты подкреплены моделированием по известным базовым интегральным экспериментам, в сравнении с которыми достигнуто хорошее согласие.

Глава 4 посвящена предлагаемым решениям по созданию литиевого антинейтринного источника. Последовательно определяется эффективность литиевого blankets, зависимость эффективности от изотопной чистоты лития и дейтерия, от параметров предлагаемых схем и анализ их преимуществ и недостатков. Подробно обсуждается обеспечение расчетов ядерными константами.

Дано определение обобщенной жесткости суммарного спектра. В схеме источника на основе ядерного реактора анализируются два подхода - создание источника с неуправляемым и управляемым антинейтринным спектром. Схема с управляемым спектром обеспечивает возможность оперативно менять жесткость в ходе эксперимента. Потоки литиевых антинейтрино определены аналитически. Показано, что увеличение жесткости значительно снижает ошибки счета суммарного спектра. Рассчитаны выходы реакций анти- ν_e на дейтроне и протоне в зависимости от жесткости суммарного спектра.

Проведено широкое исследование перспектив применения различных дейтерированных литиевых соединений и рассчитана эффективность blankets в различных схемах. Задача выбора рассмотрена как задача максимизации эффективности blankets при одновременном снижении массы высокочистого лития.

Для короткобазовых осцилляционных экспериментов на основе тандема протонного ускорителя, нейтронно-производящей мишени и литиевого blankets предложены и рассчитаны ожидаемые антинейтринные потоки для конкретных установок. На примере такого литиевого источника и большого нейтринного детектора показана возможность обеспечения исключительно высокой чувствительности при поиске стерильных нейтрино: $\text{Sin}^2(2\theta) \leq \sim 0.001$ для $\Delta m^2 > 0.2 \text{ eV}^2$ на доверительном уровне 95%. На основе анализа нейтронных полей показано, что возможно создание компактного антинейтринного источника с линейными размерами $\sim 1.3\text{-}1.4$ м и массой лития 120-130 кг.

Пятая глава имеет в основном обзорный характер. Подробно проанализированы применения возможных нейтронных источников для создания нейтринной фабрики (в том числе, ядерные реакторы с постоянным потоком и импульсные, использование ускорителей с нейтронно-производящими мишенями, использование электроядерных установок, нейтронные генераторы, ядерные взрывы и др.).

Шестая глава посвящена образованию трансурановых изотопов при искусственном взрывном нуклеосинтезе. Рассмотрены особенности и отличия медленного *s*-процесса и быстрого *r*-процесса и последующих распадов.

Детально рассмотрены особенности импульсного процесса синтеза трансуранов в искусственных условиях и последующие упрощения в системе уравнений. Предложена адиабатическая модель с разбиением временного интервала на малые временные шаги и дальнейшим последовательным решением уравнений нуклеосинтеза для каждого интервала. Модель позволила ввести температурную зависимость сечений за время нуклеосинтеза $\sim 10^{-6}$ с.

В бинарной модели рассмотрено прохождение нуклеосинтеза при сложном стартовом составе мишени, что позволило промоделировать естественное присутствие изотопа ^{239}Pu в облучаемой мишени.

Введение медленной компоненты нейтронного потока можно рассматривать как упрощенный учет нейтронного спектра при нуклеосинтезе. Решение такой

двухгрупповой модели позволило улучшить согласие в проблемной области при массовом числе $A > 250$, где наблюдается нечётно-чётный эффект.

В заключении приведены полученные оригинальные результаты диссертации, представленные к защите.

Результаты диссертации обсуждались на многих международных конференциях и семинарах (в т.ч. ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ИТЭФ, ОИЯИ, МИФИ, ФЭИ).

Автореферат правильно и полностью отражает содержанием диссертации.

Исследования, проведенные в диссертация являются актуальными и несомненно характеризуются новизной, научной и практической ценностью.

Тем не менее, выскажем ряд замечаний.

- 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.

- При аппроксимации сечений (n, γ)-захвата со стартовым изотопом в моделях нуклеосинтеза в качестве "опорных" сечений используются ^{235}U и ^{238}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.

- При рассмотрении возможных нейтронных источников (глава 5) на возможность создания лазерного нейтронного источника указано слишком кратко.

- 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).

- Иногда встречаются опечатки (например, стр. 97, 119) и анахронизмы (стр. 176, 177, 192). В частности, со ссылкой на отчёт [240], выпущенный в 1995 г., написано, что ЛНС ещё только создаётся.

Однако, вышеуказанные замечания не умаляют ценность полученных в диссертации результатов. Диссертация является завершённой научной работой, выполненной на высоком научном уровне. Результаты представлены полно, последовательно и сопровождаются обоснованными выводами.

Материалы диссертации подробно обсуждались 26 декабря 2017 г. на семинаре лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соисканием ученой степени доктора наук, а ее автор Ляшук Владимир Иванович безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник "НИЦ
"Курчатовский институт" - ИТЭФ,
лаборатория физики плазмы и астрофизики;

Блинников
Сергей Иванович

Дата 17.01.2018 г.

Тел. +7(499)123-8218

E-mail: Sergei.Blinnikov@itep.ru

Адрес: 117218 Россия, Москва,
ул. Большая Черемушкинская, 25

Подпись Блинникова Сергея Ивановича заверяю:

Ученый секретарь

"НИЦ "Курчатовский институт" - ИТЭФ

Канд. ф.-м.н

В. В. Васильев

Официальный оппонент: Блинников Сергей Иванович,

доктор физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и радиоастрономия,
главный научный сотрудник "НИЦ "Курчатовский институт" - ИТЭФ

Список основных публикаций за последние 5 лет.

1. Blinnikov, S., Tolstov, A., Sorokina, E., Dolgov, A. 2013. Radiation hydrodynamics of supernova shock breakouts. *High Energy Density Physics* 9, 17-21.
2. Potashov, M., Blinnikov, S., Baklanov, P., Dolgov, A. 2013. Direct distance measurements to SN 2009ip. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 431, L98-L101.
3. Tominaga, N., Blinnikov, S.I., Nomoto, K. 2013. Supernova Explosions of Super-asymptotic Giant Branch Stars: Multicolor Light Curves of Electron-capture Supernovae. *The Astrophysical Journal* 771, L12.
4. Badjin, D.A., Blinnikov, S.I., Postnov, K.A. 2013. Thermal emission in gamma-ray burst afterglows. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 432, 2454-2462.
5. Dolgov, A.D., Blinnikov, S.I. 2014. Stars and black holes from the very early universe. *Physical Review D* 89, 021301.
6. Blinnikov, S.I. 2014. Mirror matter and other dark matter models. *Physics Uspekhi* 57, 183-188.
7. Moriya, T.J., Tominaga, N., Langer, N., Nomoto, K., Blinnikov, S.I., Sorokina, E.I. 2014. Electron-capture supernovae exploding within their progenitor wind. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 569, id.A57, pp. 569, A57.
8. Kosenko, D., Hillebrandt, W., Kromer, M., Blinnikov, S.I., Pakmor, R., Kaastra, J.S. 2015. Oxygen emission in remnants of thermonuclear supernovae as a probe for their progenitor system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 449, 1441-1448.
9. Blinnikov, S.I., Dolgov, A.D., Postnov, K.A. 2015. Antimatter and antistars in the Universe and in the Galaxy. *Physical Review D* 92, 023516.
10. Tolstov, A., Blinnikov, S., Nagataki, S., Nomoto, K. 2015. Shock Wave Structure in Astrophysical Flows with an Account of Photon Transfer. *The Astrophysical Journal* 811, 47.

11. Kozyreva, A., Blinnikov, S. 2015. Can pair-instability supernova models match the observations of superluminous supernovae?. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454, 4357-4365.
12. Panov, I.V., Korneev, I.Y., Blinnikov, S.I., Roepke, F. 2016. Neutron excess number and nucleosynthesis of heavy elements in a type Ia supernova explosion. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 103, 431-434.
13. Kozyreva, A., Hirschi, R., Blinnikov, S., den Hartogh, J. 2016. How much radioactive nickel does ASASSN-15lh require?. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, L21-L25.
14. Sorokina, E., Blinnikov, S., Nomoto, K., Quimby, R., Tolstov, A. 2016. Type I Superluminous Supernovae as Explosions inside Non-hydrogen Circumstellar Envelopes. *The Astrophysical Journal* 829, 17.
15. Tolstov, A., Nomoto, K., Blinnikov, S., Sorokina, E., Quimby, R., Baklanov, P. 2017. Pulsational Pair-instability Model for Superluminous Supernova PTF12dam: Interaction and Radioactive Decay. *The Astrophysical Journal* 835, 266.