

ОТЗЫВ

официального оппонента Студеникина Александра 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

Диссертационная работа посвящена актуальным вопросам разработки концепции интенсивного литиевого антинейтринного источника и развитию моделей экспериментального импульсного нуклеосинтеза в нейтронных потоках высокой плотности. Необходимым условием протекания исследованных физических процессов является наличие интенсивных нейтронных потоков. Антинейтринный спектр разрабатываемого литиевого источника характеризуется большой жесткостью, что представляет значительный интерес для различных нейтринных экспериментов, в частности, для экспериментов по поиску стерильных нейтрино. Разработка моделей искусственного нуклеосинтеза актуальна не только для понимания процессов, происходящих в условиях ядерного взрыва, но и для развития наших представлений о природном нуклеосинтезе и проверки значений ядерных констант сверхтяжелых элементов по полученным экспериментальным данным.

Использование ядерного реактора в качестве интенсивного источника антинейтрино позволило в 1953-1960 гг. группе Рейнеса и Коуэна осуществить целый ряд прорывных экспериментов по регистрации взаимодействия антинейтрино с протоном. Однако уже в этих пионерских работах исследователи столкнулись с проблемами неопределенности потока антинейтрино. Успешным решением проблем, возникающих в экспериментах с использованием реакторных антинейтрино, будет создание литиевого антинейтринного источника. Наиболее простым решением может быть использование значительной массы чистого изотопа ${}^7\text{Li}$ (порядка ~ 10 т, что практически сложно претворить с учетом высокой стоимости чистых веществ),

расположенной непосредственно вблизи активной зоны и облучаемой интенсивным потоком нейтронов реактора. Образующий при нейтронной активации изотоп ${}^8\text{Li}$ быстро распадается ($T_{1/2} \sim 0.8$ с) с испусканием электронных антинейтрино с хорошо известным жестким спектром со средней энергией ~ 0.65 МэВ и максимальной энергией до 13 МэВ. Основные преимущества антинейтринного спектра изотопа ${}^8\text{Li}$ предлагалось ранее использовать на базе реактора РИНГ (Е. Д. Воробьев, Л. А. Микаэлян, А.И. Назаров и др., Препринт ИАЭ, 2384, 1974) с импульсным режимом работы, что позволило бы разделить по времени два антинейтринных потока - от активной зоны и от ${}^8\text{Li}$. Однако воплотить в жизнь идею такого реактора не удалось.

Диссертант развивает концепцию литиевого антинейтринного источника, разрабатывает и анализирует возможные схемы размещения лития (типа «слоек»), рассматривает как режимы с неуправляемым спектром, так и с регулированием спектра. Автор логично вводит формальное определение жесткости спектра и всесторонне анализирует параметры работы уже с учетом достижимой жесткости суммарного спектра.

В диссертации проведен детальный сравнительный анализ применения возможных литиевых веществ с учетом требуемой изотопной чистоты ${}^7\text{Li}$ и требуемой массы лития для обеспечения высокой эффективности источника. Предложены высокоэффективные литиевые соединения, позволяющие сильно (в десятки раз) сократить необходимую массу ${}^7\text{Li}$. Данные исследования очень ценны как для достижения высоких характеристик установки, так и для ее практического создания.

Для нейтринных экспериментов с короткой базой предложена схема с регулируемым спектром. Получены аналитические зависимости для потоков литиевых антинейтрино. Рассчитаны сечения рассеяния антинейтрино на протоне и дейтроне в зависимости от жесткости спектра. На основе схемы с регулируемым спектром предложен способ значительного снижения ошибок нейтринного счета детектора. Отметим, что таким образом для целей

регистрации антинейтрино удастся снять остроту проблемы неопределенностей в спектре реакторных нейтрино в интервале $\sim 5-7$ МэВ.

Диссертант подробно анализирует вариант источника антинейтрино для схемы протонного ускорителя (для $E_p = 50 - 300$ МэВ) с тяжелыми мишенями (вольфрам, свинец, висмут) и литиевым бланкетом и прогнозируемые потоки литиевых антинейтрино. Проведенный детальный анализ нейтронных полей в схеме с ускорителем позволил автору предложить эффективную модель компактного литиевого источника с использованием углеродных отражателей и внешнего легководного поглотителя. Это позволило достигнуть уменьшения линейных размеров источника до 1.2-1.3 м, а общей массы очищенного ${}^7\text{Li}$ - до 120-130 кг, что принципиально важно для реального создания источника и проведения экспериментов с короткой базой по поиску стерильных нейтрино с разностью квадрата масс в диапазоне $\Delta m^2 \sim 1$ эВ².

Выполненный в диссертации расчет для схемы с протонным ускорителем, литиевым бланкетом вокруг мишени и большим нейтринным детектором показал возможность достижения высокой чувствительности к значению угла смешивания на уровне $\sin^2 2\theta \leq 0.001$ для $\Delta m^2 > 0.2$ эВ² с доверительным уровнем 95%.

Таким образом, можно без сомнения утверждать, что при разработке интенсивного литиевого антинейтринного источника автор предложил интересные и конструктивные решения проблемы на основе использования изотопа ${}^7\text{Li}$. Предложенное автором решение проблемы имеет большую научную и практическую ценность. Об этом наглядно свидетельствует цитирование опубликованных работ автора, содержащих вошедших в диссертацию результаты, авторитетными международными научными группами (см., например, E.Ciuoli, J.Evslin, F.Zhao, Neutrino physics with accelerator driven subcritical reactors, JHEP01(2016)004; E.Ciuffoli, H.Mohammed, J.Evslin, F. Zhao, M.Deliyergiyev, Getting the most neutrinos out of IsoDAR, Eur. Phys. J. C (2017) 77:864).

Автором предложены новые модели образования трансураниевых изотопов при экспериментальном взрывном нуклеосинтезе. Новизна моделей состоит в учете динамики процесса (адиабатическая модель), моделировании со сложным стартовым составом (бинарная модель), учете вклада медленного нейтронного потока в итоговое образование трансураниевых нуклидов (введении двух энергетических групп в динамической модели).

Адиабатическая модель позволила учесть температурные изменения в процессе взрывного нуклеосинтеза. С учетом сильной зависимости сечений нейтронного захвата от температуры модель позволяет ввести временную зависимость сечений активации мишени и перейти от модели со статическим описанием процесса многократных захватов нейтронов (т.е., с постоянной скоростью захвата) к динамике, где скорость захвата определяется функциональной зависимостью от времени в интервале нуклеосинтеза.

Особенности экспериментов по искусственному нуклеосинтезу с неизбежным процессом активации не основных, но вовлеченных в процесс активации сверхтяжелых нуклидов (тяжелее ^{238}U), учтен в предложенной бинарной модели образования трансураниевых.

В работе автор также развивает динамическую модель образования трансураниевых нуклидов и предлагает учесть вклад «медленной» составляющей нейтронного флюенса (двух групповая модель) при активации изотопного состава мишени, устанавливаемой для синтеза трансураниевых изотопов. Модель позволяет грубо с учетом замедления задать спектр захватываемых мишенью нейтронов во временном интервале нуклеосинтеза.

Таким образом, развивая модели образования трансураниевых нуклидов автор предложил новые оригинальные решения. Проведенные в диссертации исследования предложенных автором моделей надежно подтверждают возможность их практического использования при расчетах выходов трансураниевых изотопов и для оценки сечений активации сильно нейтронно-избыточных ядер в импульсных процессах.

Объем диссертационной работы составляет 263 страницы и включает 111 рисунков, 15 таблиц и перечня литературы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и перечня цитируемой литературы - 313 ссылок.

Введение. Рассмотрены характеристики литиевого антинейтринного источника. его преимущества. Указаны принципиальные особенности нуклеосинтеза при искусственном взрывном процессе. сформулированы стоящие перед автором задачи.

Глава 1. Приведено сжатое введение в искусственные нейтринные источники низкой энергии. Излагаются «плюсы» и «минусы» реактора как антинейтринного источника в сравнении с предлагаемым источником на основе ${}^7\text{Li}$ и указано на перспективы экспериментов с источником. Приведены примеры применения изотопных нейтринных источников в известных экспериментах.

Глава 2. Кратко представлены особенности экспериментального взрывного нуклеосинтеза, а также сходство и различие с синтезом элементов в звездах. Указано на отличие взрывного нуклеосинтеза (r -процесса) от образования изотопов в медленном s -процессе. Продемонстрирован нечетно-четный эффект в выходах трансуранов при массовом числе $A > 250$ с интерпретацией В.И. Кузнецовым. Указано на роль запаздывающих процессов распада в эффекте.

Глава 3. Дан обзор методов статистического моделирования (метод Монте-Карло) для расчета транспорта нейтронов в МэВ-ом диапазоне энергий. Представлены алгоритмы для расчета переноса в многокомпонентных средах со сложной геометрией; рассмотрено моделирование функции источника, поглощения и упругого и неупругого рассеяния нейтронов. Кратко представлены алгоритмы аналогового и неаналогового моделирования. Представлены особенности авторской программы, использованной для расчета литиевого blankets. Дан обзор и результаты расчетов по известным базовым интегральным экспериментам.

Глава 4. Глава посвящена разработке литиевого антинейтринного источника. Рассмотрены схемы ${}^7\text{Li}$ -источника на основе ядерного реактора как источника нейтронов. Введено определение эффективности источника и представлены рекомендации, включая требования по изотопной чистоте ${}^7\text{Li}$. Описан предлагаемый источник с управляемым спектром, требования к нему, параметрически исследованы характеристики антинейтринных потоков. Выведены аналитические выражения для потоков литиевых антинейтрино. Рассмотрены возможности введения бора в литиевый бланкет с нейтронным источником от (D,T)-реакции.

С учетом поглощающих и замедляющих свойств проведен детальный анализ множества кандидатов для ${}^7\text{Li}$ -бланкета и даны рекомендации для практического создания источника на основе дейтерированных литийсодержащих соединений.

Введено определение обобщенной жесткости суммарного спектра и рассчитаны сечения антинейтрино на протоне и дейтроне в зависимости от жесткости. Единообразный подход с использованием жесткости позволил предложить способ значительного снижения ошибок счета.

Детально рассмотрена схема источника на основе тандема ускорителя, тяжелой мишени и ${}^7\text{Li}$ -бланкета. В конкретной схеме установки для энергии протонов 200 МэВ рассчитана выходы нейтронов, эффективность бланкета, потоки антинейтрино. Детально анализируются влияние изотопной чистоты дейтерия.

Рассмотрена возможная постановка эксперимента по поиску стерильных нейтрино в случае $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ для нейтринных моделей (3+1) и (3+2). Рассмотрен вариант эксперимента с для достижения высокой чувствительность по $\text{Sin}2(2\Theta)$.

Анализ нейтронного поля в ${}^7\text{Li}$ -бланкете позволил предложить эффективную компактную схему источника с большим сокращением массы чистого ${}^7\text{Li}$.

Глава 5. Глава дает широкий обзор характеристик возможных нейтронных источников для создания нейтринной фабрики. Рассмотрены нейтронные

источники с постоянным потоком и импульсные. Представлены выводы по перспективам использования реакторов, ускорителей нейтронных генераторов, взрывов и др. источников для создания нейтринной фабрики.

Глава 6. В главе излагаются особенности искусственного взрывного нуклеосинтеза в формировании тяжелых элементов. Описывается методика расчета выходов трансурановых изотопов в статической модели и при переходе к динамической (адиабатической) модели с принимаемыми допущениями при переходе от общей системы уравнений к упрощенной - одноклассовой. Сечения аппроксимируются пропорционально энергии связи присоединяемого нейтрона.

При динамике временной интервал r -процесса разбивается на короткие шаги с изменением сечения захватов в соответствии с температурой среды.

С учетом возможности добавок иных изотопов рассмотрена бинарная модель, Модель продемонстрировала большое влияние малых добавок трансурановых изотопов в мишени на итоговые выходы трансуранов.

Предложена двух групповая модель, учитывающая динамику процесса и грубо вводящая вклад медленной нейтронной составляющей в суммарном нейтронном потоке. Модель явно позволила улучшить согласие в сложной для моделирования области при массовом числе $A > 250$ - в области проявления аномального эффекта.

Заключение. Подводится итог работы и формулируются основные результаты.

Аппробация работы. Результаты, полученные в диссертационной работе представлены и обсуждены на многих международных конференциях. Данные работы также обсуждались на семинарах в ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ИТЭФ, МИФИ, ФЭИ, ОИЯИ.

Автореферат точно и полностью отражает содержанием диссертации.

Суммируя вышесказанное заключаем, что исследования, проведенные в диссертации, несомненно являются актуальными, новыми и обладают научной и практической ценностью.

Отметим некоторые замечания к диссертации.

Главы 1 и 2 - небольшие по объему и их было бы целесообразно объединить в одну, состоящую из двух разделов.

В списке литературы есть две ссылки со смешанной буквенно-цифровой нумерацией: 78а и 79а .

В диссертации следовало бы отдельно и явно подчеркнуть, что предлагаемые автором схемы бланкета типа «слойки» применимы также и для нейтринных источников с управляемым спектром.

Заключение по диссертации

Приведенные выше замечания не умаляют значимости результатов, полученных в диссертации. Достоинством диссертации является ее нацеленность на создание литиевого антинейтринного источника и реальный эксперимент. Вклад автора в рассмотренные направления значителен и не вызывает сомнений. Представленная диссертация выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научной работой.

Материалы диссертации обсуждались 11 января 2018 г. на научном семинаре группы по физике нейтрино кафедры теоретической физики физического факультета МГУ.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соисканием ученой степени доктора физико-математических наук. Автор работы 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,
профессор кафедры теоретической физики
физического факультета МГУ

А.И.Студеникин

« 22 » января 2018 г.

тел.: +7-495-939-16-17,
адрес электронной почты: studenik@srd.sinp.msu.ru ,
почтовый адрес: 119991, Россия, Москва, Ленинские Горы,
МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2,
физический факультет

Декан физического факультета МГУ,
профессор

Н.Н. СЫСОЕВ

Официальный оппонент: Студеникин Александр Иванович,

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика, профессор физического факультета МГУ.

Список основных публикаций за последние 5 лет:

- [1] C. Guinti and A. Studenikin, Neutrino electromagnetic interactions: a window to new physics, **Rev. Mod. Phys.** 87 (2015) 531-591, Supplemental Material - 13 p.
- [2] A. Studenikin, New bounds on neutrino electric millicharge from limits on neutrino magnetic moment, **Europhys. Lett.** 107 (2014) 21001 (5 p.).
- [3] K. Kouzakov, A. Studenikin, Electromagnetic properties of massive neutrinos in low-energy elastic neutrino-electron scattering, **Phys. Rev. D** 95 (2017) 055013 (9 p.).
- [4] A. Studenikin, I. Tokarev, Millicharged neutrino with anomalous magnetic moment in rotating magnetized matter, **Nucl. Phys. B** 884 (2014) 396-407.
- [5] A. Studenikin, Status and perspectives of neutrino magnetic moments, **J. Phys. Conf. Ser.** 718 (2016) 062076 (8 p.).
- [6] A. Studenikin, Electromagnetic neutrino: a short review, **Nucl. Part. Phys. Proc.** 273–275 (2016) 1711–1718.
- [7] K. Kouzakov, A. Studenikin, Theory of neutrino-atom collisions: the history, present status and BSM physics, **Adv. High Energy Phys.** 2014 (2014) 569409 (16 p.).
- [8] I. Balantsev, A. Studenikin, From electromagnetic neutrinos to new electromagnetic radiation mechanism in neutrino fluxes, **Int. J. Mod. Phys. A** 30 (2015) 1530044 (10 p.).
- [9] C. Giunti, K. Kouzakov, Yu-Feng Li, A. Lokhov, A. Studenikin, Shun Zhou, Electromagnetic neutrinos in laboratory experiments and astrophysics, **Annalen der Phys.** 528 (2016) 198-215.
- [10] P. Kurashvili, K. Kouzakov, L. Chotorlishvili, A. Studenikin, Spin-flavor oscillations of ultra-high-energy cosmic neutrinos in the interstellar space: The role of neutrino magnetic moments, **Phys. Rev. D** 96 (2017) 103017.
- [11] A. Grigoriev, A. Lokhov, A. Studenikin, A. Ternov, Spin light of neutrino in astrophysical environments, **J. Cosm. & Astropysics** 11 (2017) 024.
- [12] A. Studenikin, Electromagnetic properties of neutrinos: three new phenomena in neutrino spin oscillations, **Europhys. Journal Web of Conferences** 125 (2016) 04018 (10 p).
- [13] Studenikin, From neutrino electromagnetic interactions to spin oscillations in transversal matter currents, **PoS NOW2016** (2017) 070 (5 p.).