**Расширенная аннотация**

**Предложения к открытию проекта «Разработка и развитие метода меченых нейтронов для определения элементной структуры вещества и изучения ядерных реакций» (проект TANGRA – Tagged Neutrons and Gamma Rays).**

Проект TANGRA (TAgged Neutrons and Gamma Rays) направлен на изучение нейтрон-ядерных реакций с использованием метода меченых нейтронов, поиск новых путей использования нейтронных методов в фундаментальных и прикладных исследованиях, усовершенствование существующих и создание новых подходов к обработке результатов ядерно-физических экспериментов. Одной из задач, решаемых в рамках проекта, является интерпретация существующих экспериментальных данных по реакциям взаимодействия быстрых нейтронов с атомными ядрами, их систематизация и валидация. Приоритетным направлением работы является получение ядерных данных.

Исследование взаимодействия нейтронов с энергиями 14,1 МэВ с веществом, рождающихся в реакции d + t → α + n, в настоящее время приобретает особую актуальность в связи с тем, что эта реакция является наиболее перспективной для осуществления управляемого термоядерного синтеза. Другим применением является получение нейтронного излучения с помощью компактных источников – нейтронных генераторов, которые в настоящее время активно используются как для поиска опасных веществ внутри различных объектов, так и в геологии при исследовании состава и влажности горных пород (т. н. нейтронный каротаж). Важным преимуществом нейтронных генераторов, помимо компактности, является возможность реализации так называемого метода меченых нейтронов (ММН), заключающегося в регистрации заряженных частиц, рождающихся совместно с нейтроном в бинарной реакции, с помощью встроенного в генератор α-детектора. Применение ММН позволяет оценить направление движения излученного нейтрона и получить временную привязку к моменту его рождения. Регистрация сигналов с детекторов вторичных излучений совместно со срабатываниями встроенного в генератор α-детектора позволяет проводить отбор событий по разнице во времени между срабатываниями детекторов. Преимуществом данного подхода является возможность выделения событий, соответствующих реакциям в изучаемом объекте, и его применение приводит к существенному снижению вклада фоновых событий в получаемые результаты.

Реакции (n,xγ) с испусканием γ-квантов являются наиболее доступными для изучения, так как для их регистрации требуются только γ-детекторы, а необходимость в вакуумном оборудовании и длинных пролетных базах отсутствует. Помимо γ-лучей в этих реакциях испускаются обозначаемые как x вторичные частицы: n, p, α. Для исследования этих реакций в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного Института Ядерных Исследований (ЛНФ ОИЯИ, Дубна) была создана установка TANGRA (TAgged Neutrons and Gamma Rays), и, спустя некоторое время, была образована одноименная коллаборация.

*Цели предлагаемого проекта следующие:*

1) Исследование (n,xγ) реакций с помощью ММН;

2) Разработка алгоритмов и программ для анализа экспериментальной информации, поступающей с детекторов нейтронного и γ-излучений;

3) Тестирование различных теоретических подходов, описывающих изучаемые процессы.

4) Создание и развитие базы данных по сечениям реакций взаимодействия нейтронов с энергией 14,1 МэВ с ядрами различных элементов и характеристическим γ-линиям, излучаемых в этих реакциях, для расширения применимости метода меченых нейтронов для идентификации широкого круга сложных химических веществ;

5) Разработка методики исследования элементного состава различных объектов на базе ММН с целью определения содержания в них широкого ряда химических элементов.

6) Экспериментальное и теоретическое исследование (n,γ) и (n’,γ) - корреляций в реакциях неупругого рассеяния нейтронов

7) Исследование реакций (n,α) и (n,2n) характеристики которых необходимы для нужд астрофизики

Несмотря на достаточно долгую историю исследования нейтрон-ядерных реакций, информация об отдельных каналах реакции взаимодействия быстрых (14 МэВ) нейтронов с атомными ядрами остается неполной. Так, наиболее полной подборкой информации по сечениям излучения γ-квантов ядрами различных элементов при энергии налетающих нейтронов около 14 МэВ является (Simakov S.P. et al. IAEA, 1998). Эта компиляция содержит данные для 36 элементов и изобилует большим количеством неточностей и неопределенностей. Следует отметить, что наибольшая часть ранее проведенных экспериментов данного типа была проведена в 60-е – 80-е годы XX века, полнота и точность полученных данных недостаточны для потребностей современных исследований. В рамках планируемых работ предполагается провести измерения сечений излучения γ-квантов для более 50 элементов, в том числе для 24 элементов – впервые. На основе полученной информации впервые будет создана база сечений, пригодная для целей элементного анализа.

Информация, получаемая при исследовании угловых корреляций продуктов нейтрон-ядерных реакций полезна для развития теоретических представлений об особенностях этих процессов. В настоящее время наблюдается острая нехватка данных о корреляциях (n,γ) и (n,n’,γ) для неупругого рассеяния нейтронов энергии 14 МэВ: угловые распределения относительно направления налетающих нейтронов неизвестны для большого числа ядер, для корреляций типа (n,n’,γ) известно всего несколько экспериментов, поставленных в 60-е - 80-е гг. прошлого века, при этом известно значительно больше аналогичных данных по реакциям с протонами.

Одним из новых способов применения метода меченых нейтронов является определение содержания углерода в почве, которая является одним из значимых природных резервуаров углерода. Потребность в увеличении охвата мониторинга одновременно с повышением его точности и детализации в описании вариабельности органического углерода почвы формирует запрос на развитие инструментальной базы, обеспечивающей сокращение объема пробоподготовки, создание полевых/мобильных версий приборов/лабораторий, автоматизацию анализа, возможность в одном измерении определять сразу несколько характеристик.

Исследование реакций неупругого рассеяния нейтронов на ядрах даст дополнительную информацию о механизме реакций (n,n`), (n,2n`), (n,xn`), например, изучение процесса 10B(n, 2n)9B, и позволит протестировать и улучшить теоретическое описание этих процессов. Выполнение экспериментальной программы проекта важно и для фундаментальной ядерной физики: нейтрон-ядерные реакции являются одним из основных источников сведений о деформации ядер, глубине, радиусе и диффузности потенциала ядерных сил. Получаемая при выполнении таких экспериментов информация позволяет уточнить наши представления о структуре и свойствах атомных ядер.

В экспериментах проекта традиционно используется два типа детекторных систем: «Ромашка» и «HPGe». Первая представляет из себя набор детекторов, расположенных в горизонтальной плоскости вокруг изучаемого образца и предназначенная для измерения угловых распределений вторичных частиц (γ-квантов или нейтронов), и состоящая, в зависимости от целей эксперимента, из детекторов NaI(Tl), BGO или пластиковых сцинтилляторов. Большое количество комбинаций «нейтронный пучок-детектор вторичных излучений» позволяет выполнять измерение угловых распределений вторичных частиц и их корреляций с хорошим угловым разрешением без перемещений детекторов.

Вторая система предназначена для исследования сечений излучения γ-квантов с максимально достижимым энергетическим разрешением, для чего используются детекторы из сверхчистого германия. В настоящее время ведется сборка установки для измерения сечений испускания γ-квантов в нейтрон-ядерных реакциях, в состав которой войдут 2 HPGe-спектрометра.

Для разработки методики элементного анализа почв предполагается проведение поэтапной работы, которая будет завершена с получением результатов полевых измерений. Потребуется произвести проектирование и конструирование нескольких экспериментальных установок, каждая из которых будет решать свою задачу. При проектировании планируется активно использовать цифровое моделирование для определения конфигурации каждой установки с учетом специфики ее работы. По крайней мере, одна установка будет предназначена для лабораторной работы с подготовленными образцами, ещё одна установка будет создана для работы непосредственно в поле, в условиях карбонового полигона.

В качестве образцов предполагается использовать как образцы с контролируемым химическим составом, так и образцы реальных почв. Предполагается сравнить значения и точности определения массовых концентраций элементов, полученные традиционными методами анализа, со значениями измеренными на созданных экспериментальных установках с целью верификации разрабатываемой методики на этапе лабораторных исследований.

**Ожидаемые результаты:**

1) Выполнение экспериментов по исследованию угловых распределений рассеянных нейтронов

2) Экспериментальное исследование (n,γ) и (n’,γ)-корреляций.

3) Теоретическое описание исследуемых реакций.

4) Проведение экспериментов по исследованию реакции (n,2n)

5) Заключение о применимости ММН для выполнения элементного анализа почв. В случае положительного результата — создание прототипов стационарной и мобильной установок, а также методических рекомендаций по их использованию для целей сельского хозяйства и экологического мониторинга.

Полученные при реализации настоящего проекта результаты будут ценны как для фундаментальной, так и прикладной науки. Полученные экспериментальные данные по выходам и угловым распределениям γ-квантов могут быть использованы для увеличения точности моделирования методом Монте-Карло различных физических установок. Другим планируемым применением полученных экспериментальных результатов является быстрый элементный анализ. Разработанные прототипы установок для элементного анализа почв могут стать основой для создания устройств, полезных для интенсификации сельского хозяйства и мониторинга состояния окружающей среды.

**Краткий ССВУ анализ**

*Сильные стороны проекта:*

При выполнении проекта предполагается использовать достаточно хорошо отработанную технологию ММН. Используемые в качестве источников нейтронов D-T — генераторы сравнительно недороги и безопасны при правильной эксплуатации. Коллектив проекта высококвалифицирован, хоть и включает в себя значительное количество молодых (до 35 лет) специалистов. У коллектива есть в распоряжении оборудование, которого уже достаточно для выполнения минимальной программы исследований. Сотрудники, участвующие в проекте, имеют большой опыт исследования реакций типа (n,Xγ), реализуемость программы по изучению сечений излучения γ-квантов в этих реакциях не вызывает сомнений при наличии возможности закупки всех планируемых к исследованию образцов.

*Слабые стороны проекта:*

К несущественным недостаткам используемой методики можно отнести конечный срок службы нейтронных генераторов и необходимость их замены при исчерпании ресурса. Потенциальными рисками при разработке методики элементного анализа почв является невозможность прямого разделения углерода, содержащегося в органических и неорганических соединениях, а также наличие большого числа факторов (плотность, влажность, наличие растительности, состав материнской породы и т. д.), влияющих на точность получаемых результатов. Есть риск, что применение созданной методики окажется нецелесообразным по экономическим причинам. Тем не менее, информация о принципиальной неразрешимости указанных проблем отсутствует.

*Предполагаемые сроки выполнения проекта: 2024 – 2028 гг.*

*Оценочная стоимость проекта составляет 675 тыс. долл.*