

Аннотация доклада.

Е.Лычагин

Report on the theme

"Investigations of Neutron Nuclear Interactions and Properties of the Neutron" (2020-2021) and a proposal for its extension until the end of the seven-year plan.

Тема была продлена на 3 года (2020-2022) на 50-ом заседании ПКК по ядерной физике. Т.к. дирекцией ОИЯИ принято решение о продлении научных тем только в пределах текущей семилетки, руководство темы предлагает продлить её до конца семилетнего плана – на 2023 год. При этом в течение 2022-2023 гг будет сформулирована и предложена научная программа исследований на следующую семилетку, которая будет представлена на одном из ПКК 2023 года.

В рамках темы реализуется три проекта. С 2017 года проект ТАНГРА и два новых проекта открыты с 2022 года: проект ЭНГРИН и проект «Модернизация ЭГ-5». Эти проекты также будут продлеваться на 2023 год. Планируется, что результаты проекта ТАНГРА и промежуточные результаты двух других проектов будут доложены на 56-ом заседании ПКК.

В докладе будут представлены наиболее интересные результаты, полученные в 2020 и 2021 гг по основным направлениям исследований темы.

Изучение ядерных реакций, вызванных нейтронами.

1. Запланированное измерение Р-чётной но квази Т-нечётной корреляции в тройном делении вида $\vec{\sigma}_n \cdot [\vec{p}_l \times \vec{p}_t]$, где $\vec{\sigma}_n$ - спин нейтрона, $\vec{p}_l$ - импульс лёгкого осколка деления, $\vec{p}_t$ - импульс третьей частицы (α - частицы, нейтрона или γ) в резонансе 1.14 эВ компаунд ядра ^{236}U из-за невозможности провести необходимой модернизации нейтронного канала установки POLI FRM2, связанной с пандемией, не было реализовано. Проведён детальный анализ результатов ранее выполненных измерений при энергии нейтронов 0,06 эВ, что позволило впервые сравнить углы поворота оси деления при разных энергиях нейтронов, вызывающих деление. Результаты этого анализа вошли в кандидатскую диссертацию, защищённую в конце 2020 года.
2. В рамках проекта TANGRA получены угловые распределения гамма квантов в реакции $(n,n'\gamma)$ для нейтронов с энергией 14 МэВ для новых нуклидов ^{12}C , ^{24}Mg , ^{52}Cr , ^{56}Fe на детекторе «Ромаша» (из 18 BGO детекторов). Подготовлена и защищена в 2021 году кандидатская диссертация на основе полученных результатов. Испытана новая конфигурация установки с HPG детектором. Измерены угловые распределения неупруго рассеянных нейтронов на ядре ^{12}C . Ведутся методические работы по разработке количественного анализа содержания углерода в почвах, используя методику меченных нейтронов.
3. В соответствии с запросами библиотеки BROND и ГИЦ ФЭИ проведены измерения сечений реакций (n,α) для ^{14}N , ^{35}Cl , ^{91}Zr , ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{61}Ni в диапазоне энергий 3-5.5 МэВ. Все эти реакции имеют большое прикладное значение для ядерной энергетики и даже для сельского хозяйства (product 32P can be used to study the absorption of phosphate fertilizers by plants using the radionuclide tracking method). Результаты в данной области энергий для ^{60}Ni , ^{61}Ni получены впервые.
4. В коллаборации с коллегами из Карлового университета, Прага проведена теоретическая обработка экспериментальных данных по спектрам множественности каскадного гамма-

распада нейтронных резонансов компаунд-ядра ^{196}Pt , полученных на установке DANCE в лаборатории Лос-Аламоса. Анализ указанных спектров показывает, что ранее используемые параметры моделей для описания радиационной силовой функции и плотности уровней возбужденных состояний должны быть скорректированы с учётом полученных результатов.

5. В 2021 году совместно с ТУ Прага были проведены измерения редких мод спонтанного деления с высокоактивным (~400 кБк) образцом Cf-252. Для регистрации лёгких частиц используются детекторы Timerix с модернизированными электронными платами. Основная цель исследования – обнаружить пятерное деление. Набор статистики в течение 2-х месяцев позволил уверенно выделить p, d, t, α , Li, Be, B, C в качестве легчайшей частицы в тройном делении и спектры регистрируемых p, d, t, α . Кластерные разрешающие способности детектора Timerix позволяют легко разделить пары (α , α) и (α , t) от четверного деления. В имеющихся результатах имеются события, указывающие на возможность существования пятерного деления. Набор статистики и обработка данных будут продолжены.

Исследования квантовомеханических явлений с ультрахолодными и холодными нейтронами, изучение свойств нейтрона.

1. Исследование нестационарных процессов взаимодействия медленных нейтронов на примере отражения от бегущей поверхностной волны было продолжено. Результаты, полученные в 2019 г на рефлектометре с фиксированной длиной волны нейтронов (4.3 Å) удовлетворительно описываются теорией, однако амплитуда рассеянной волны в новых измерениях 2020 года методом ТОФ (длины волн 5-20 Å) при фиксированном угле рассеяния отличаются от ожидаемых почти в 2 раза. Объяснение причины расхождения требует дальнейшего исследования.
2. Наблюдаемое изменение энергии и скорости УХН после прохождения через преломляющий образец, колеблющийся с переменным ускорением, привело к утверждению, что результатом взаимодействия частицы с любым объектом, движущимся с ускорением, должно быть изменение его энергии и частоты, определяемое соотношением $\Delta\omega = ka\tau$, где k - волновое число, a - ускорение объекта и τ - время взаимодействия. Для проверки этого утверждения была проведена серия расчётов отражения нейтронов от различных потенциальных структур. Полученные результаты указывают на справедливость вывода. Моделирование отражения от осциллирующей структуры различными методами показало, что в условиях резонанса (при возникновении большой групповой задержки) результаты численного расчёта отличаются от расчетов в приближениях, допускающих аналитическое решение. Полученные результаты требуют дополнительного анализа.
3. Начаты работы по подготовки тестового эксперимента на ИБР-2 по демонстрации возможности временной фокусировки УХН. В качестве фокусирующего устройства выбрана движущаяся дифракционная решетка. Определены её параметры, ведётся расчёт нейтронной системы. При успешной реализации тестового измерения открываются перспективы создания на ИБР-2 (а в дальнейшем на новом импульсном нейтронном источнике ОИЯИ) источника УХН высокой плотности.
4. В рамках создания прототипа источника очень холодных нейтронов (ОХН) на основе наноалмазных отражателей разработана процедура позволяющая сравнивать отражательную способность различных порошков наноалмазов. Экспериментальное определение альбедо требует большого количества материала. Количество же синтезируемого материала не велико. Имея 1-10 грамм алмазного порошка можно охарактеризовать его методом МУРН на пучке холодных нейтронов. Из этого измерения

извлекаются параметры физической модели, используемой для описания транспорта ОХН в порошке и затем проводится модельный расчёт альбеда. Корректность данной процедуры проверена на экспериментальных данных по пропусканию ХН через толстый образец. Проведено сравнение порошков с различными размерными и структурными характеристиками. Определён порошок с оптимальными свойствами для использования в качестве наноалмазного отражателя в конструкции прототипа источника ОХН.

Проведено большое количество анализов микропримесей порошков при их модификации и отработке процедуры очистки от примесей.

Ведётся проектирование экспериментальной установки для прототипа.

Прикладные работы с использованием ядерно-физических методов

Широким фронтом ведутся работы с использованием различных ядерно-физических методик для задач экологии, материаловедения, археологии, искусствоведения, медицины, исследований объектов внеземного происхождения и пр. Данные работы идут в сотрудничестве с большим числом исследователей из различных исследовательских институтов стран участниц и России. В докладе будет представлено несколько примеров данных исследований.

1. В 2020 году в ОИЯИ был издан атлас атмосферных выпадений тяжелых металлов «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе – оценки на основе анализа мхов-биомониторов», в который вошли результаты по 36 странам среди которых 14 стран-участниц ОИЯИ: Азербайджан, Армения, Беларусь, Болгария, Вьетнам, Грузия, Казахстан, Молдова, Монголия, Польша, РФ, Румыния, Словакия, Украина и Чехия. Данные по одномоментному сбору мхов-биомониторов на больших территориях, представленные в атласе, позволяют оценивать как пространственные, так и временные тренды изменения концентраций тяжелых металлов, а также идентифицировать области с высоким уровнем загрязнения в результате локального и трансграничного переноса металлов.
2. Исследован сверток хлопчатобумажной ткани, размещенный космонавтами на внешней поверхности МКС и находившийся там в течение 10 лет. Используя нейтронный активационный анализ (НАА), удалось определить содержание 39 элементов в загрязнённом фрагменте свертка ткани и 19 элементам в чистом фрагменте. Были выявлены три основных источника загрязнений. Одним из них можно считать частицы пыли, образующиеся при падении (на станцию) метеоритов, астероидов или комет. Вторым источником являются материалы самой станции (Al, Ti и т.п.). Третьим источником осаждения дополнительных элементов на свертке можно считать частицы, выбрасываемые с Земли, например, вулканический пепел. В верхнюю часть ионосферы на высоту орбиты МКС ионизированные частицы из состава газопылевых выбросов вулкана могут попасть с восходящей ветвью глобальной электрической цепи.
3. Совместно с Институтом Микробиологии и Биотехнологии, в Кишиневе изучено влияние немодифицированных (AgNPs) и модифицированных биомассой *Spirulina platensis* наночастиц серебра (AgNPs-Spirulina) на крыс. Содержание серебра в органах определяли методом НАА. У животных, которым вводили немодифицированные наночастицы, самое высокое содержание серебра было обнаружено в головном мозге и почках, тогда как у животных, которым вводили AgNPs-Spirulina, серебро в основном накапливалось в головном мозге и семенниках. После периода полувыведения серебро быстро выводится из селезенки и почек; однако клиренс из мозга был очень низким, независимо от типа наночастиц.
4. Результаты элементных и комплементарных методов анализа образцов культурного наследия используются для решения насущных задач в области гуманитарных наук. Осуществляется

сотрудничество с Институтом археологии РАН, Государственным институтом искусствознания, Музейно-выставочным комплексом "Волоколамский кремль", Музеем Дубны

Исследована уникальная домонгольская фресковая живопись XII века одного из самых древних памятников русской архитектуры – Георгиевского собора Юрьева монастыря в Великом Новгороде (1119 г.), определена технология живописи (смешанная: *al fresco* и *al secco*), выявлено использование чрезвычайно дорого привозного лазурита, на основании чего сделаны важные выводы о статусности заказчиков. Проведён анализ процесса изменения колорита росписей при старении и в условиях пожара. Полученная информация необходима для обоснованного проведения экспериментов по цифровой реконструкции первоначального колорита. Активно решается вопрос о поиске критериев определения места происхождения археологической керамики по анализу её элементного состава с использованием методов математической статистики.

Эксплуатация и развитие установки ИРЕН.

1. В 2020 - 2021 гг. установка ИРЕН отработала 2700 часов на физический эксперимент, из них 100 часов в 2021 году на частоте 50 Гц. В конце ноября 2021 г клистрон первой ускоряющей секции вышел из строя. Ведутся работы по его замене. Планируется, что установка возобновит работу в первом квартале 2022 года.
2. В 2020 году введена в эксплуатацию установка для активационного анализа на ИРЕН с пневмопочтой. В 2021 году впервые на ней проведены тестовые измерения гамма-активации на гамма-производящей мишени.
3. Начата поэтапная реализация проекта реконструкции помещений пучковой инфраструктуры нейтронного источника ИРЕН. Проведена замена кранов в экспериментальных залах, что позволяет приступить к демонтажу старого оборудования. Закачивается ремонт на каналах №1,6.

В докладе также представлены задачи на 2023 год, которые будут решаться в рамках темы. В области научных исследований это:

1. Измерение спектров гамма-квантов в *s*- и *p*- резонансах, нацеленное на поиск *P*-четных и *P*-нечетных эффектов в реакциях с медленными поляризованными нейтронами.
2. Получение данных для ядерной энергетики и астрофизики: измерение интегральных и дифференциальных нейтронных сечений, угловых корреляций в области энергии от холодных нейтронов до ~ 1 ГэВ.
3. Измерение массово-энергетических и угловых распределений осколков, нейтронов и гамма-квантов деления; поиск редких мод деления.
4. Измерение сечений и угловых корреляций в реакциях $(n, n'\gamma)$ и $(n, 2n)$ при взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами (проект ТАНГРА).
5. Отработка методики эксперимента по измерению времени жизни нейтрона на выведенных пучках реактора ИБР-2 и ИРЕН (пучковый, оригинальный метод).
6. Исследование нестационарных квантовых эффектов и моделей взаимодействия с алмазными наноструктурами для медленных нейтронов.
7. Определение элементного состава и поверхностных структур различных образцов ядерно-физическими методами для решения задач материаловедения, экологии, истории, археологии, искусствоведения, реставрации и наук о жизни.

В области методически и прикладных работ:

1. Стабильная работа ИРЕН на физический эксперимент. Увеличение интенсивности ИРЕН за счёт увеличения частоты импульсов.

2. Разработка и развитие методов поляризации нейтронов для экспериментов по поиску эффектов нарушения четности и временной инвариантности в нейтронно-ядерных взаимодействиях.
3. Модернизация электростатического генератора ЭГ-5, расширение инструментальной базы ускорительного комплекса.
4. Создание прототипа источника очень холодных нейтронов и его тестирование на выведенном пучке нейтронов реакторов ИБР-2 или HFR (Гренобль, Франция).
5. Подготовка тестового эксперимента с временной фокусировкой УХН на ИБР-2.
6. Создание и развитие нейтронных и гамма-детекторов для космических аппаратов.
7. Создание методики гамма-активационного анализа и анализа по мгновенным гамма-квантам для ИРЕН.

Члены ПКК также будут проинформированы о текущем состоянии работ по созданию нового источника нейтронов в ОИЯИ.