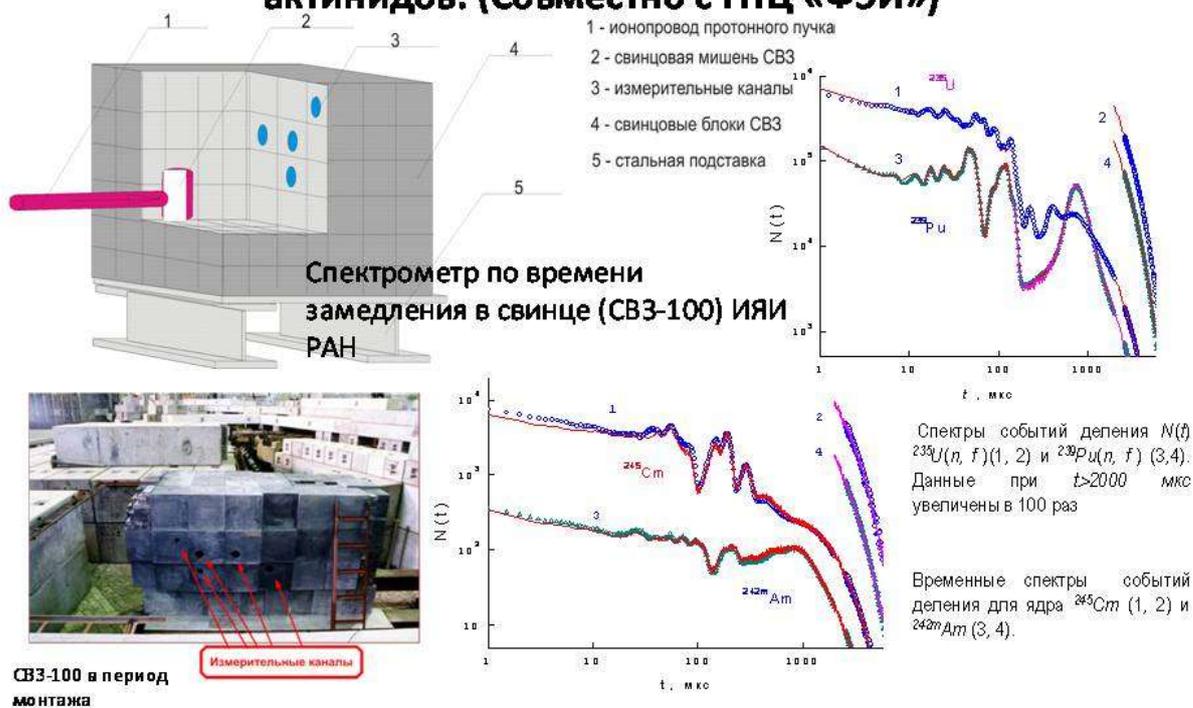


## Исследования подбарьерного деления на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце (СВЗ-100) ИЯИ РАН. Нейтронные сечения деления ядер актинидов. (Совместно с ГНЦ «ФЭИ»)



## ***100 тонн свинца, уникальный ускоритель и выдающиеся результаты***

***или о том, какие нейтронные данные нужны для развития ядерной энергетики***

Текст отчета о важнейших достижениях 2009 года: «В ИЯИ РАН совместно с ГНЦ РФ-ФЭИ (г. Обнинск) на спектрометре третьего поколения по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100, с использованием ускоренного до 209 МэВ пучка протонов сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН в г. Троицке, завершен комплекс масштабных измерений сечений деления резонансными нейтронами всех изотопов америция и кюрия, точные данные о которых необходимы для решения проблемы трансмутации младших актинидов – наиболее радиотоксичных отходов ядерной энергетики». (Из предложений ИЯИ РАН в доклад Президенту РФ и в Правительство РФ)

Что кроется за этими словами?

Сначала немного истории<sup>1</sup>... В конце сороковых-пятидесятых годов прошлого столетия, в период бурного становления исследований по физике нейтронов и нейтрон-ядерных взаимодействий, делались первые шаги в изучении процессов замедления и диффузии нейтронов в различных, в том числе и слабопоглощающих средах. Подобные исследования велись в то время в Лаборатории атомного ядра (ЛАЯ) Физического института АН СССР им. П.Н. Лебедева (заведующим ЛАЯ ФИАН в то время был И.М.

Франк, с 1970 года эта лаборатория входит в состав Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН)). В тяжёлой среде, при замедлении нейтронов в результате последовательности упругих столкновений, передача энергии атомам среды в элементарном процессе мала и происходит группирование скоростей нейтронов в узком интервале вокруг среднего значения, убывающего с ростом времени замедления. На эту особенность процесса замедления нейтронов в тяжёлой среде впервые обратил внимание Е.Л.Фейнберг. Указанная закономерность послужила физической основой нового оригинального метода нейтронной спектрометрии – спектрометрии по времени замедления нейтронов, предложенного Л.Е.Лазаревой, Е.Л.Фейнбергом и Ф.Л.Шапиро.

Первый спектрометр по времени замедления (СВЗ) был сооружён под руководством Ф.Л.Шапиро в ФИАН СССР и запущен в начале 1955 года. Установка представляла собой сборку в виде куба с ребром около двух метров из специально очищенного от примесей свинца с каналами для размещения образцов и детекторов. Импульсным источником нейтронов служил простейший ускоритель дейтронов (нейтронный генератор). Результаты запуска СВЗ были доложены Ф.Л.Шапиро летом 1995 года на Первой Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии.

Председательствующий на том заседании известный американский физик, лауреат Нобелевской премии Е.Вигнер окрестил подобный тип спектрометра «спектрометром для бедных». Действительно, что нужно для СВЗ? – необходимо иметь достаточно большое количество тяжёлого, максимально очищенного от легких примесей материала замедлителя – рабочего вещества спектрометра, и импульсный источник нейтронов достаточной мощности. Добавим сюда методы регистрации, работающие в условиях больших импульсных нагрузок детекторов. При относительно простой конструкции, уже первый СВЗ на три порядка превышал по светосиле спектрометры по времени пролёта при той же мощности источника нейтронов. Прошло много времени, но исследования на СВЗ новых поколений ведутся в США, Японии, Франции. В основном работы направлены на получение данных для ядерной энергетики. Совсем недавно под руководством Нобелевского лауреата К. Руббиа был завершён эксперимент TARC на 300-тонном спектрометре по времени замедления нейтронов в свинце в ЦЕРН с целью проверки одного из возможных механизмов пережигания отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Если учесть, что в качестве драйвера для генерации нейтронов в СВЗ используются современные дорогостоящие ускорители, являющиеся воплощением самых передовых технологий, то не всякая страна может позволить себе проведение исследований на СВЗ на приемлемом уровне.

В учреждении Российской академии наук - Институте ядерных исследований РАН нейтронный спектрометр по времени замедления нейтронов в 100 тоннах свинца с чистотой 0,99996 (СВЗ-100) был запущен в 2003 году в составе Нейтронного комплекса, работу которого обеспечивает

сильноточный линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода (ЛУ ИЯИ РАН), аналогов которому на Евразийском континенте нет. Этот спектрометр является СВЗ третьего поколения, источником нейтронов в которых являются мишени, генерирующие нейтроны в результате процессов скалывания (spallation) при взаимодействии ускоренных протонов с ядрами мишени, в отличие от СВЗ второго поколения, в которых нейтроны генерировались пучками линейных электронных ускорителей (Курчатовский институт, Россия, США, Япония). Высокая интенсивность протонного пучка обеспечивает уникальные возможности нейтронной спектроскопии. Так, по имеющимся оценкам, при выведении среднего тока протонов на уровень 100 мкА при энергии ~ 500 МэВ можно достичь уникальной светосилы эксперимента и регистрировать редкие процессы и (или) использовать микроколичества вещества для изучения деления тяжёлых ядер с образцами массой от 1 пикограмма. (В настоящее время достигнута чувствительность спектрометра для делящегося вещества на уровне ~ 1 нанограмм). Спектрометр создавался для измерений сечений деления трансплутониевых элементов, накапливающихся в топливе ядерных реакторов. Эти данные существенны для оптимизации процесса выжигания (трансмутации) младших актинидов, представляющих наибольшую экологическую опасность среди отходов ядерной энергетики (отработавшего ядерного топлива – ОЯТ). Отметим, что изотопы америция и кюрия в ОЯТ более чем на 90% определяют радиотоксичность отходов ядерной энергетики. Наряду с этим, СВЗ-100 позволяет развивать исследования по физике деления изомеров тяжёлых ядер и процессов нуклеосинтеза в звёздах.

Информация о запуске СВЗ-100 была опубликована в газете «Поиск» и журнале CERN Courier. За прошедшее со времени запуска время на СВЗ-100 были проведены методические работы по исследованию параметров установки и выполнен совместно сотрудниками ИЯИ РАН и Государственного научного центра Российской Федерации - Физико-энергетического института имени А.И. Лейпунского (г.Обнинск) цикл исследований нейтрон-ядерных взаимодействий в ряде образцов младших актинидов при энергиях нейтронов в интервале 0.03 – 20 кэВ. Получены данные, существенно уточняющие имеющиеся и следующие из анализа подземных бомбовых экспериментов шестидесятых годов и косвенных реакторных измерений методом времени пролёта. Новые результаты указывают на необходимость ревизии принятых оценок (типа ENDF/BVII и др.) и расчётных моделей разных стран для оценки всех сечений деления изученных ядер. Более подробную информацию о проведенных на СВЗ-100 исследованиях можно получить на сайте ИЯИ РАН (<http://www.inr.ru/rus/rez05-09.ppt>). Результаты по изотопам америция и кюрия будут включены в национальную библиотеку ядерных данных БРОНД-3. Теоретический анализ вероятности глубоко подпорогового деления даст возможность уточнить структуру и параметры барьеров

деления ядер америция и кюрия, экспериментальная информация о которых до настоящего времени была крайне ограниченной и неточной.

Изотопы младших актинидов (*Am*, *Cm*) играют ключевую роль в проблеме хранения и переработки ОЯТ на основе реакторных и ускорительных технологий. Важнейшим процессом трансмутации является деление ядер под действием нейтронов низких и средних энергий. Большинство изотопов младших актинидов имеет короткое время жизни по отношению к альфа-распаду и (или) спонтанному делению, что усложняет задачу измерения скорости вынужденного деления. По этой причине в экспериментах приходится использовать мишени с достаточно малыми количествами исследуемого вещества. Точность имеющихся нейтрон-ядерных данных для младших актинидов недостаточна, при том, что эта информация крайне необходима для разработки ядерной энергетики будущего, включая технологии замкнутого ядерного цикла.

Задача перехода к ядерной энергетике нового поколения определена как одна из приоритетных. Правительство РФ утвердило концепцию федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и до 2020 года». Соответствующее распоряжение № 1026-р от 23 июля 2009 года подписал премьер-министр В.В. Путин. Госзаказчиком программы определена госкорпорация «Росатом». «Росатому» поручено обеспечить разработку проекта программы и внесение его в Правительство РФ. В концепции программы перечислены основные проблемы современной атомной энергетики РФ: «высокое и постоянно нарастающее количество отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов, неэффективное использование запасов природного урана, возможное снижение научного приоритета атомной энергетики РФ, уменьшение конкурентоспособности продукции атомной энергетики на мировом рынке. Концентрация усилий на создании ядерных энерготехнологий нового поколения на базе реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом (ЯТЦ) обеспечит решение указанных проблем», говорится в документе. Не позднее 2014 года должны быть получены технические решения и разработаны технические проекты таких реакторов и технологий замкнутого ЯТЦ, а к 2020 году станет возможным начать работы по сооружению головных промышленных энергоблоков АЭС в рамках реализации генсхемы размещения энергообъектов до 2020 года. Россия является признанным мировым лидером в развитии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, а также единственной страной в мире, которая в течение многих лет промышленно эксплуатирует реактор этого типа большой мощности (БН-600 на Белоярской АЭС). Научным руководителем данной тематики является Государственный научный центр Российской Федерации - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского.

Сказанное выше красноречиво свидетельствует о важности и своевременности цикла исследований нейтрон-ядерных взаимодействий в младших актинидах, выполненного в совместной работе ИЯИ РАН и ГНЦ

РФ – ФЭИ. Ряд данных опубликован и нашел отражение в международных базах данных (<http://www.nndc.bnl.gov>). Работа выполнялась в рамках программ фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи» и «Физика атомного ядра и элементарных частиц» (ИЯИ РАН), а также при частичной поддержке «Росатома, РФФИ и МАГАТЭ (ГНЦ РФ – ФЭИ). Имеем еще один пример того, как возможности фундаментальных исследований РАН могут обеспечить потребности в научной информации, необходимой для решения практических, «прикладных» задач в интересах прогресса общества. Проекты Института ядерных исследований РАН по направлению технологического прорыва «Ядерные технологии», готовые к реализации в Нейтронном комплексе ИЯИ РАН на базе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода (ЛУ ИЯИ РАН), были представлены в соответствующий Совет по координации научных исследований при Президиуме РАН.

Э.А. Коптелов,  
зам. директора ИЯИ РАН  
Б.И. Фурсов,  
директор отделения ГНЦ РФ - ФЭИ

---

<sup>i</sup> Более полное изложение истории и развития нейтронной спектроскопии по времени замедления в свинце содержится в публикации: Ю.П. Попов, «Спектрометрия нейтронов по времени замедления нейтронов в свинце. От «спектрометра для бедных» (Е. Вигнер) до рекордных потоков»/ *«Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ)»*, Дубна, ОИЯИ, 1995, том 26, вып.6, с.1503.