

8. ВРЕМЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

Существенные преимущества в светосиле по сравнению с методом времени пролета (ВП) (выигрыш в $10^3 - 10^4$ раз) можно получить, используя методику по времени замедления нейтронов (СВЗ) в свинце и еще больше - в графите.

Методы нейтронной спектрометрии по времени замедления в свинце и графите в связи с их высокой светосилой и рядом других особенностей могут оказаться весьма полезными для спектрометрии ядер, удаленных от полосы β -стабильности, и решения многих современных задач.

Впрыскивание короткого импульса быстрых нейтронов в большой блок замедлителя (например, куб с гранью порядка 1-2 м) приводит к тому, что за счет неупругого рассеяния нейтроны быстро теряют свою энергию до энергии первого возбужденного состояния замедлителя (в свинце - до 0,5 МэВ за время $\sim 0,3$ мкс). Затем процесс замедления происходит только за счет упругих столкновений с ядрами замедлителя. Теряя при одном соударении энергию, в среднем равную величине $2/A$, где A - атомная масса ядра замедлителя, нейтроны сравнительно плавно меняют свою энергию со временем практически до энергии теплового равновесия с замедлителем, если объем замедлителя достаточно велик, а сечение поглощения нейтронов ядрами замедлителя мало. Поскольку сечения рассеяния в свинце и графите практически постоянны в области энергий ниже 1 МэВ, т.е. длина пробега нейтрона до следующего акта рассеяния постоянна, то в процессе замедления происходит некоторая «фокусировка» нейтронов по скоростям вокруг среднего значения, поскольку быстрые нейтроны сталкиваются несколько чаще с ядрами замедлителя, чем медленные.

На рубеже 40—50-х годов в лаборатории атомного ядра ФИАН СССР им.П.Н.Лебедева (зав. лабораторией И.М.Франк) проводился цикл работ, посвященный изучению плотности нейтронов в уран-графитовых системах. Естественным продолжением этих исследований явилось изучение таких фундаментальных проблем физики медленных нейтронов, как замедление и диффузия нейтронов и спектрометрия нейтронов в различных, в частности слабопоглощающих, средах. В ходе изучения этих проблем Е.Л.Фейнберг отметил одну особенность процесса упругого замедления нейтронов в тяжелой среде - группирование скоростей нейтронов в сравнительно узком интервале скоростей вокруг среднего значения, убывающего с ростом времени замедления. В результате обсуждения эффекта группирования скоростей нейтронов в процессе их замедления был предложен новый, оригинальный метод нейтронной спектрометрии - спектрометрия по времени замедления нейтронов.

Если в большой объем замедлителя, состоящего из ядер с $A \gg 1$, произвести кратковременный выпуск быстрых нейтронов, то, замедляясь в результате упругих столкновений с ядрами замедлителя и теряя при каждом столкновении в среднем долю энергии $\approx 2/A$, нейтроны будут собираться в квазимоноэнергетическую группу, которая с ростом времени замедления будет перемещаться вниз по шкале скоростей (энергий). Срабатывание детектора нейтронов (или детектора частиц, сопровождающих захват нейтрона ядром исследуемого образца) в течение узкого интервала времени Δt , сдвинутого на время t относительно момента выпуска нейтронов, дает возможность выбирать квазимоноэнергетические нейтроны, средняя скорость которых связана с временем замедления t соотношением

$$t = AR_n \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v'} \right) \quad (31)$$

где R_n - средний пробег нейтрона до рассеяния, а $v' = \text{const}$ — начальная скорость нейтронов.

Первый нейтронный спектрометр по времени замедления (СВЗ) был сооружен под руководством Ф.Л.Шапиро в ФИАН СССР и запущен в начале 1955 года. Он представлял собой куб с ребром около двух метров из свинца, специально очищенного от примесей (общим весом = 140 т), с вертикальным каналом до центра для источника нейтронов и несколькими горизонтальными сквозными каналами для размещения образцов и детекторов. В качестве импульсного источника нейтронов использовался простейший ускоритель дейтронов типа Кокрофта - Уолтона с цирконий-третиевой мишенью и средним выходом 10^8 нейтр./с в реакции $T(d,n)^4\text{He}$. Спектрометр обладал ограниченным разрешением по энергии (30%), но превышал по светосиле спектрометры по времени пролета на три порядка при той же мощности источника нейтронов.

Рабочее вещество для СВЗ выбирают исходя из требований наилучшего разрешения при минимальном γ -фоне и максимальной интенсивности нейтронов. Вещество должно быть тяжелым, обладать малым сечением захвата нейтронов и быть доступным в кубометровых количествах. Наилучшим является свинец, хотя, если эксперимент может проводиться с худшим разрешением, целесообразно использовать графит, который по сравнению со свинцом обеспечивает на порядок большую интенсивность нейтронов и на порядок меньший γ -фон. Необходима специальная очистка свинца от посторонних примесей, которые могут в несколько раз повышать γ -фон СВЗ.

Изотропное облучение нейтронами образца делает невозможным эксперименты по пропусканию в «хорошей» геометрии, а, следовательно, не допускает измерение полных нейтронных сечений. В то же время

наличие больших масс свинца вокруг детектора и образца сильно снижает фон от γ -квантов и от рассеянных в помещении нейтронов.

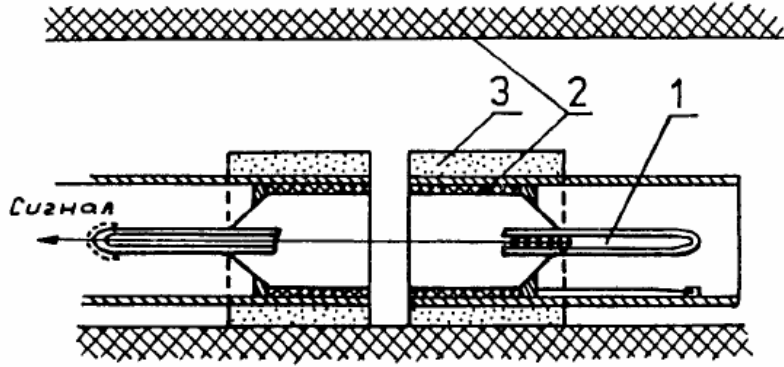


Рис.8. Расположение образца и детектора γ -лучей и канале СВЗ: γ - газовый пропорциональный счетчик; 2 - свинцовая стенка счетчика (конвертер γ -квантов), сверху и снизу - свинец как замедлитель, 3 - образец.

При изотропном облучении нейтронами образца и детектора, помещенных внутри узкого канала в замедлителе, оптимальной становится цилиндрическая геометрия того и другого. Такую геометрию имели детекторы нейтронов (пропорциональные борные, литиевые и ^3He счетчики), осколков деления и часть детекторов γ -квантов (Рис.8). Измерения сечений захвата на СВЗ охватывают широкий диапазон энергий - от тепловых до 40 кэВ. Поскольку энергетическое разрешение СВЗ не превышает 30%, а светосила на 3-4 порядка выше, чем в методике по времени пролета, использование СВЗ перспективно при изучении ядер с малой плотностью уровней, а также при измерении сечений, усредненных по многим резонансам.

Основной особенностью СВЗ второго поколения стало использование более мощных импульсных источников быстрых нейтронов: линейных ускорителей электронов. Таким образом, удалось на два-три порядка поднять потоки нейтронов на исследуемых образцах по сравнению с потоками на первом СВЗ. Это, в свою очередь, позволило перейти к новым исследованиям, в частности, измерениям сечений подбарьерного деления на изотопах трансурановых элементов, доступных иногда лишь в микрограммовых количествах.

Первым СВЗ второго поколения стал RINS (Renselaer Intense Neutron Spectrometer) весом 75 т, построенный в США в середине 70-х годов. В качестве источника нейтронов использовался линейный ускоритель электронов. Здесь впервые было продемонстрировано подбарьерное деление в реакции $^{238}\text{U}(n,f)$. Высокая интенсивность резонансных нейтронов на образце и быстродействующие полусферические ионизационные детекторы осколков деления позволили проводить исследования подбарьерного деления с микрограммовыми образцами, обладающими высокой α -активностью. Спектрометр по времени замедления ИАЭ им.И.В.Курчатова представлял собой свинцовую призму весом -60 т с чистотой свинца 99,98%. В качестве импульсного источника нейтронов использовался линейный ускоритель электронов «Факел». Вольфрамовая мишень электронного пучка была рассчитана на мощность до 10 кВт. Основное направление исследований - измерение сечений деления на микрограммовых образцах трансурановых изотопов.

Общий вид спектрометра KULS-спектрометр по времени замедления университета в Киото, представлен на Рис.9. Вес свинца 38 т. Тележка может придвигаться к линейному ускорителю электронов. Танталовая мишень ускорителя охлаждается сжатым воздухом, что ограничивает мощность пучка электронов на мишени на уровне < 1 кВт. Один из измерительных каналов KULS выложен висмутом (10 см толщиной), что обеспечивает защиту образца и детектора от жесткого γ -излучения после захвата нейтронов в свинце ($E = 7$ МэВ).

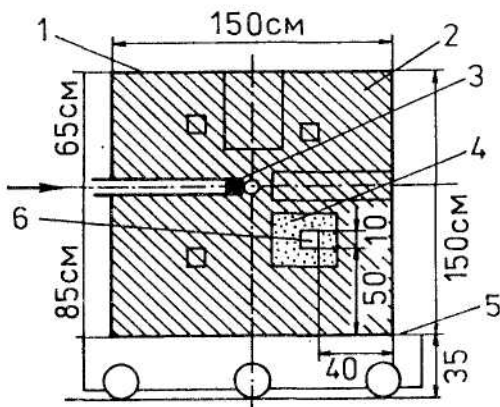


Рис.9. Схема СВЗ KULS: 1 - листовой кадмий, 2 - свинец-замедлитель, 3 - танталовая мишень электронного ускорителя, 4 - вкладыш из висмута, 5 - платформа на колесах, 6 - полость для образца и детектора.

Третье поколение СВЗ связывается с использованием сильноточных протонных ускорителей на энергию ~ 1 ГэВ (мезонных фабрик) в качестве источников нейтронов.

8.1 Спектрометры по времени замедления в свинце, СВЗ

Для свинцового замедлителя средняя энергия нейтронов (в кэВ) просто связана со временем замедления (в мкс):

$$E_n = \frac{183}{(t + 0,3)^2} \quad (32)$$

Таким образом, чтобы нейтронам замедлиться в свинце до 1 кэВ, необходимо время 14 мкс. Оптимальная ширина нейтронного импульса для измерений выше 1 кэВ должна быть в диапазоне 0,1-0,5 мкс, в то же

время при исследованиях в диапазоне ниже 100 эВ для повышения светосилы спектрометра ширину нейтронного импульса можно поднять до 5-10 мкс. Энергетическое разрешение СВЗ в случае свинцового замедлителя составляет около 30 % в диапазоне энергий от 1 эВ до 1 кэВ и ухудшается при более высоких энергиях. В то же время по сравнению с методом по времени пролета СВЗ в свинце дает выигрыш в интенсивности нейтронов на образце в 10^3 - 10^4 раз при одинаковой мощности нейтронного источника. Эта особенность позволяла получать на СВЗ уникальные результаты даже со сравнительно слабыми источниками нейтронов.

СВЗ со свинцом в качестве замедлителя весьма удобны для исследований с радиоактивными образцами, поскольку образцы во время измерений находятся внутри свинцовой призмы и не требуют специальной защиты персонала от излучения образца при выключенном ускорителе.

Нейтронный спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100, разработанный в Институте ядерных исследований, предназначен для исследования взаимодействия нейтронов с ядрами: а) для изучения свойств ядер и нейтронов, б) для решения проблем переработки отработанного ядерного топлива, совершенствования ядерного энергетического цикла, создания экологически чистой ядерной энергетики. Рабочее тело спектрометра массой 100 тонн смонтировано из отфрезерованных блоков свинца чистого 99,996 % весом по тонне и $\frac{3}{4}$ тонны. Длительность импульса протонного 2 мксек. Энергия протонов 209 МэВ. Получены первые уникальные результаты по взаимодействию нейтронов с тяжелыми радиоактивными ядрами.

Спектрометр СВЗ-100 благодаря высокой чистоте свинца имеет рекордное разрешение по сравнению с другими СВЗ. Каналы на больших расстояниях от центра генерации нейтронов позволяют иметь удовлетворительное разрешение до энергии нейтронов порядка 150 кэВ. Спадание нейтронного потока за время цикла наименьшее по сравнению с другими СВЗ из-за его большой массы. СВЗ-100 является спектрометром третьего поколения, существенно превышающим по светосиле спектрометры, использующие электронные пучки. Огромная светосила спектрометра в сочетании с линейным ускорителем протонов позволяет вести измерения с образцами в несколько микрограмм. Планируется увеличение энергии протонного пучка до 500 МэВ и использование группирователя, что позволит вести измерения с наногаммовыми образцами радиоактивных ядер, исследовать редкие процессы, происходящие при взаимодействии нейтронов со стабильными и радиоактивными ядрами

Новизна СВЗ-100 состоит в использовании сверхчистого свинца большой массы, наличия удаленных от мишени каналов, позволяющих избежать перегрузок детекторов при малых временных замедлениях и иметь лучшее разрешение при энергиях до 150 кэВ СВЗ-100 дает возможность получать уникальные научные результаты и проводить измерения с материалами ядерной энергетики, в том числе актинидами, образующимися в энергетических ядерных реакторах. Это особенно важно для решения проблем увеличения выгорания ядерного топлива и связанных с этим экологических задач.

8.2. Спектрометрия нейтронов по времени замедления в графите

Для решения некоторых задач представляется перспективным использование в СВЗ графита в качестве замедлителя. Использование в СВЗ в качестве замедлителя графита вместо свинца на порядок сужает время замедления нейтронов и существенно ухудшает его энергетическое разрешение. Тем не менее, выделение низколежащих резонансов с помощью такого спектрометра возможно.

Такой спектрометр весьма эффективен при измерениях полных резонансных интегралов радиационного захвата и деления для редких и радиоактивных ядер. СВЗ с графитом в качестве замедлителя может оказаться полезным и для поиска и определения параметров низколежащих нейтронных резонансов, которые, как правило, играют основную роль в «выжигании» радиоактивных отходов. Кроме того, использование графита в качестве замедлителя позволяет существенно увеличить *объемную* и *временную* плотности нейтронного потока внутри замедлителя. Это обстоятельство позволяет надеяться на экспериментальную возможность моделирования быстрых процессов синтеза ядер в звездах и при взрывах сверхновых.