

## 5. УСКОРИТЕЛЬ КАК ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСОВ НЕЙТРОНОВ

Длительность импульса нейтронов в спектрометре с механическим прерывателем не удастся сделать короче 1 мксек. Дальнейшее уменьшение длительности импульса нейтронов, улучшающее разрешающую способность, наталкивается на большие технические трудности. Более короткий импульс нейтронов получают при помощи ускорителей заряженных частиц. Пучок ускоренных частиц (протонов или электронов) кратковременно отклоняют на мишень, в которой происходит ядерная реакция с вылетом одного или нескольких нейтронов. В качестве источников заряженных частиц используют линейные ускорители электронов, микротрон, циклотрон, фазотрон. Возникающий импульс быстрых нейтронов может иметь длительность всего несколько наносекунд. Затем быстрые нейтроны пропускаются сквозь водородсодержащий замедлитель (вода, полиэтилен и т. д.), из которого на пролетную базу выходит импульс медленных нейтронов.

В качестве импульсного источника нейтронов используют также импульсные ядерные реакторы. К ним относится, например, импульсный быстрый реактор (ИБР), сооруженный в г. Дубне (СССР). Активная зона реактора ИБР состоит из неподвижной части и подвижной (вращающейся части). Когда обе части отделены одна от другой, реактор находится в подкритическом состоянии. В процессе вращения подвижная часть активной зоны на короткое время соединяется с неподвижной. При этом положении обеих частей реактор находится в состоянии большой надкритичности и в нем развивается цепная ядерная реакция. За короткое время надкритичности в реакторе возникает мощный импульс нейтронов длительностью в несколько десятков микросекунд. Нейтроны, проходя пролетную базу  $L$ , частично выбывают из пучка, рассеиваясь и поглощаясь на ядрах атомов воздуха. При больших значениях  $L$ , достигающих 1000 м, потеря нейтронов может быть значительной. Чтобы уменьшить эти потери, на пролетной базе сооружают специальные нейтронотводы из вакуумированных труб. В них создают вакуум около 0,1 мм рт. ст. На конце пролетной базы располагают детектор нейтронов. Он должен иметь максимальную чувствительность к нейтронам и охватывать возможно большую площадь пучка. Последнее условие необходимо для увеличения эффективности детектора, так как пучок нейтронов от источника расходится по закону  $1/R^2$  и на конце пролетной базы поток нейтронов невелик. В качестве детектора нейтронов в спектрометре по времени пролета используют батареи счетчиков  $BF_3$ , сцинтилляционные счетчики нейтронов и ряд других специальных детектирующих систем.

Временной анализатор, на который поступают импульсы с детектора и подается стартовый сигнал, выполняет две основные функции. Во-первых, он служит электронными «часами», регистрируя по стартовому импульсу момент старта нейтронов и по импульсу детектора момент прихода нейтрона в детектор. Во-вторых, временной анализатор накапливает в своей памяти информацию о количестве нейтронов, пришедших в детектор в следующие друг за другом отрезки времени после стартового сигнала. Эти отрезки времени называют временными каналами анализатора (кратко, каналами). Каждому каналу соответствует ячейка памяти временного анализатора. С приходом стартового импульса во временном анализаторе открывается первый канал. Импульсы с детектора в течение интервала времени, равного ширине первого канала, записываются в первую ячейку памяти. Затем последовательно открываются второй, третий и т. д. каналы и соответственно переключаются ячейки памяти. После отработки последнего канала временной анализатор закрывается, а затем вновь запускается следующим стартовым импульсом, и весь цикл регистрации снова повторяется. Суммарное время всех каналов временного анализатора не должно превышать интервала времени между двумя последовательными импульсами нейтронов от источника, что исключает эффект рецикличности.

Источником быстрых нейтронов (с энергиями выше 100 МэВ) служат пульсирующие ускорители, которые могут давать значительно более короткие вспышки, чем любые механические устройства. Почти любой пульсирующий ускоритель, на котором можно осуществлять реакции с нейтронами в выходном канале, можно использовать для нейтронных измерений по времени пролета, если только интенсивность нейтронов достаточно высока.

Синхроциклотрон Колумбийского университета на энергию 400 МэВ с продолжительностью вспышки 20 нсек интенсивно используется в качестве импульсного источника: нейтронов, рождающихся в реакциях расщепления при бомбардировке свинцовой мишени быстрыми протонами. Однако наиболее широко в спектроскопии по времени пролета используются линейные ускорители электронов из-за их относительно низкой стоимости и удобства. Эти ускорители работают на  $(\gamma, n)$ - и  $(\gamma, f)$ -реакциях на тяжелых мишенях и могут давать в зависимости от настройки продолжительности импульсов от десятков микросекунд для низкоэнергетических экспериментов до нескольких наносекунд в случае более быстрых нейтронов.

Заглядывая вперед в будущее нейтронной спектроскопии по времени пролета, во-первых, удивляешься тому, как много потенциальных возможностей для развития остается даже в самих импульсных нейтронных источниках. В низкоэнергетическом конце нейтронного спектра, где можно работать с относительно длинными импульсами и высокими мощностями циклов, интенсивность в конечном счете

ограничивается лишь скоростью теплосъема с нейтронного конвертора или другого подобного устройства. При этом полезно заметить, что производство нейтронов с помощью электронного пучка относительно неэффективно, так как на каждый полученный нейтрон в мишени диссипируется несколько гигаэлектронвольт энергии электронов. Делящиеся нейтронные конверторы более эффективны - энергия диссипации на один нейтрон составляет несколько сот мегаэлектронвольт, но наиболее эффективными из всех источников нейтронов являются реакции расщепления, идущие на заряженных частицах высоких энергий (протонах). Для протонов с энергией 1 ГэВ, например, мишень из урана будет поглощать только 20-30 МэВ на один испущенный нейтрон.

Таким образом, импульсный источник нейтронов крайне высокой интенсивности можно создать с помощью пульсирующего протонного ускорителя высокой энергии с большим током в сочетании с мишенью из жидкого тяжелого металла. Для работ в низкоэнергетической области, особенно для тепловых энергий, очень важна конструкция замедлителя. Для более высоких энергий нейтронов, где малая длительность импульса (несколько наносекунд) существенна, современное состояние экспериментальной техники еще не позволяет даже приблизиться к пределу, определяемому теплосъемом. Максимальный имеющийся выход нейтронов ограничивается достижимыми токами ускорителей с очень короткими вспышками. Наивысших выходов можно достигнуть накоплением энергии за длительный период и использованием ее в течение нескольких наносекунд для получения нейтронного импульса. Эту идею можно реализовать на устройствах с большим циркулирующим током, таких, как синхроциклотрон, дополненных системой быстрого отклонения тока на мишень. Кроме того, указанную идею можно осуществить, если накапливать электромагнитную энергию в волноводе, полости или индукционном устройстве и затем использовать большую часть энергии при впрыскивании короткого и мощного импульса тока электронов. Кажется вероятным, что дальнейшее развитие техники получения очень коротких интенсивных импульсов будет происходить по пути улучшения техники, электронных пушек и т. д.

Табл. 1. Характеристики нейтронных спектрометров с пульсирующими ускорителями.

Местонахождение спектрометра	Тип ускорителя	Тип ускоряемых частиц	Мишень	Энергия, Мэв	Ток в импульсе, нА	Продолжительность импульса, нсек	Максимальная частота повторений, 1/сек	Скорость прохода пучка электронов в импульсе, 10 <sup>11</sup> нейтронов/сек	Полное число нейтронов в импульсе	Лучшее возможное разрешение, мекВ/М
Карлсруэ	90-см изохронный циклотрон	Дейтроны	U	50	3000	1	160 000	6	6 · 10 <sup>11</sup>	0,005
Харуэлл	110-см синхроциклотрон	Протоны	W	150	3000	4	800	300	1,2 · 10 <sup>11</sup>	0,04
Ок-Ридж	Электронный линейный ускоритель	Электроны	Ta	140	15 000	2,3—24	1000	40	≈ 10 <sup>11</sup>	0,03
Харуэлл	Электронный линейный ускоритель	Электроны	иИЦ Бустер	40	650	100—1700	500	≈ 10	1,7 · 10 <sup>11</sup>	0,3
ИБР-30 Дубна	Электронный линейный ускоритель	Электроны	Импульсный быстрый реактор	44	180	1800	100	100	1,5 · 10 <sup>11</sup> (для частоты повторения 100)	≈ 2
ЛИУ-30 Проект, Дубна	Линейный наддуковый ускоритель электронов	Электроны	(U)	30	25 000	500	500	240	1,2 · 10 <sup>11</sup>	—

Другим техническим усовершенствованием, имеющим возможность повлиять на будущее нейтронной спектроскопии, является улучшение эффективности и разрешения по времени и энергии детекторов. Непрерывное развитие экспериментальных систем, использующих по методу on-line ЭВМ со все большим объемом памяти, несомненно приведет к серьезным последствиям, поскольку станут возможны эксперименты, в которых будут одновременно регистрироваться и сортироваться события, являющиеся функциями нескольких параметров, причем с высоким разрешением.

Конечно, гораздо труднее указать направления, в которых может возникнуть прогресс в понимании физических явлений, связанный с развитием методики, однако уже сейчас некоторые тенденции очевидны. Результаты измерений многих сечений, очень важных для конструирования реакторов на быстрых нейтронах, согласовываются после существовавшей много лет ситуации, когда между данными различных авторов имелись большие расхождения. В области ядерной физики уже отмечалось драматическое открытие промежуточной структуры в сечениях околбарьерного деления, связанной с изомерией формы ядра. Эти работы будут продолжаться, пока не удастся понять и объяснить сложную форму потенциального барьера деления. Увеличение интенсивности импульсных источников с белым спектром нейтронов позволит успешно продолжить изучение различных слабых эффектов, подобных (n, α)-реакции в резонансной области, исследуемой в Дубне. Во всех упомянутых областях, а также во многих других использование новых более мощных импульсных источников вместе с улучшением экспериментальной методики должно привести к

более глубокому пониманию ядерных реакций.