

3. СПЕКТРОМЕТР НЕЙТРОНОВ ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЁТА

В методе времени пролёта энергия частицы определяется по времени, которое она затрачивает на пролет определенного фиксированного расстояния. Для нерелятивистских частиц время пролета связано с кинетической энергией соотношением

$$t[нс] = 72,3L[м] \sqrt{\frac{A[a.е.м]}{E[МэВ]}} \quad (2)$$

где t - время пролета в наносекундах, L - пролетная база в метрах, A - массовое число частицы в атомных единицах массы, E - кинетическая энергия частицы в МэВ.

Чаще всего методика времени пролета используется для измерения энергетических спектров нейтронов. Для нейтронов эта методика часто оказывается единственной, обеспечивающей требуемую точность измерений. Однако она применяется и с заряженными частицами для их идентификации.

В сфере нейтронной спектроскопии эта техника позволяет прецизионно измерять энергии нейтронов практически по всему интересующему интервалу энергии (от 10^{-2} до 10^8 эВ). В методе времени пролета нейтроны посылаются короткими импульсами и измеряется время их пролета на известном расстоянии. Имея достаточную интенсивность, можно улучшить точность этих измерений, увеличивая пролетную базу, и с помощью многоканальных временных анализаторов одновременно измерять тысячи различных значений энергии нейтронов.

В спектрометрах по времени пролета обычно используются пульсирующие источники, которые дают нейтроны в широкой энергетической области. Основная идея метода состоит в том, что интервал времени между испусканием нейтронов и достижением отдельными нейтронами удаленного детектора определяет скорость и соответственно энергию нейтронов. Связывая выход детектора с многоканальным временным анализатором, можно непосредственно получить распределение нейтронов по скоростям.

Принцип спектроскопии нейтронов по времени пролета основан на измерении времени t , необходимого нейтрону для преодоления расстояния L от источника до детектора. Расстояние L называют пролетной базой спектрометра.

Время пролета определяется моментом времени t_0 , когда нейтрон проходит начало пролетной базы и моментом времени t_1 , когда он достигает детектора ($t_f = t_1 - t_0$). Для фиксации момента t_1 используется сигнал детектора, для фиксации момента t_0 часто используют импульсные пучки с короткими сгустками. Длительность сгустков в циклотронах обычно несколько наносекунд, в изохронных циклотронах около наносекунды. Для ускорителей с непрерывными пучками применяются специальные устройства группировки частиц. Период повторения сгустков T_0 определяет нижнюю границу диапазона измеряемых энергий

$$E_{\min} = \left(\frac{72,3L}{T_0} \right)^2 \quad (3)$$

Период повторения выбирают таким, чтобы исключить наложение сигналов от разных сгустков. В циклических ускорителях это можно сделать периодическим, кратным периоду ВЧ-генератора отклонением пучка. Время пролета t связано со скоростью v и энергией E нейтрона простыми соотношениями:

$$v = L/t; \quad (4)$$

$$E = \frac{m}{2} \left(\frac{L}{\tau} \right)^2. \quad (5)$$

Таким образом, измеряя время пролета t на известной пролетной базе L , можно вычислить энергию нейтрона. Количество нейтронов определяют по скорости счета детектора.

Время t измеряют специальными электронными «часами» - временным анализатором импульсов с детектора. Для медленных нейтронов время t достаточно велико и легко измеримо. Например, тепловые нейтроны со скоростью $v = 2200$ м/сек пролетают расстояние $L = 10$ м за время

$$t = L/v = 4,545 \cdot 10^{-3} \text{ сек} = 4545 \text{ мксек}.$$

Измеряемым параметром A в спектрометре по времени пролета является время t , а экспериментальным распределением $\varphi_s(t)$ - временное распределение $\varphi_s(t)$. По измеренному распределению $\varphi_s(t)$ затем находят энергетическое распределение нейтронов или спектр нейтронов.

В методе по времени пролета вместо скорости нейтронов обычно используют величину $t_0 = 1/v$. Эту величину в спектроскопии принято называть обратной скоростью нейтрона. Ее выражают в единицах микросекунда на метр (мксек/м) и наносекунда на метр (нсек/м). Обратная скорость t_0 характеризует время, необходимое нейтрону для прохождения единицы пути. Она является удобной величиной при расчете времени пролета t определенной базы L . Чтобы найти время t , необходимо базу L умножить на обратную скорость t_0 : $t = t_0 L$. Например, нейтроны с энергией 100 эВ ($t_0 = 7,15$ мксек/м) пролетают базу $L = 100$ м за время $t = 7,15 \cdot 100 = 715$ мксек. Энергия нейтрона E связана с обратной скоростью t_0 соотношением:

$$E = \frac{m}{2t_0^2} \quad (6),$$

Подставив значение массы нейтрона, получим формулу для расчета энергии нейтрона:

$$E = \frac{5233}{2t_0^2} \text{ эВ.} \quad (7)$$

Для измерения времени t при известной пролетной базе L необходимо знать момент выхода нейтрона из источника (момент старта) и момент прихода его в детектор (момент финиша). Момент финиша совпадает с моментом детектирования (регистрации) нейтрона, в то время как момент старта нейтрона из источника остается неизвестным. Чтобы избежать этой трудности, используют импульсный источник нейтронов, в котором момент выхода некоторого количества нейтронов (импульса нейтронов) четко фиксируется с помощью внешних устройств источника нейтронов. Момент образования импульса нейтронов в источнике и является моментом старта. Таким образом, нейтроны всех энергий измеряемого спектра имеют общий старт и разный финиш. Время t равно разности моментов финиша и старта.

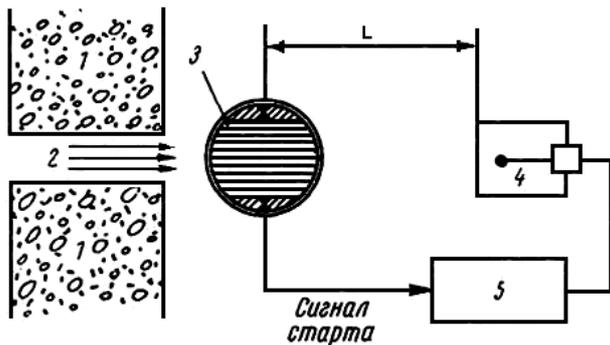


Рис. 2. Блок-схема спектрометра нейтронов по «времени пролета»: 1-бетонная защита реактора; 2 - пучок нейтронов; 3 - механический прерыватель пучка нейтронов; 4 - детектор нейтронов; 5 - временной анализатор.

Блок-схема спектрометра нейтронов по времени пролета (Рис. 2) состоит из импульсного источника нейтронов, детектора нейтронов, отделенного пролетной базой L от источника, и временного анализатора импульсов.

Основными элементами нейтронного спектрометра являются источник I моноэнергетических нейтронов с плавно изменяемой энергией и детектор D нейтронов или вторичного излучения.

В методе времени пролёта используются нейтронные источники с широким энергетическим спектром, испускающие нейтроны в виде коротких вспышек длительностью t . Специальное электронное устройство, называемое временным анализатором, фиксирует интервал времени t между нейтронной вспышкой и моментом попадания нейтрона в детектор, т. е. время пролёта нейтронами расстояния L от источника до детектора. Энергия нейтронов E в эВ связана со временем t в мксек соотношением:

$$E = (72,3L)^2/t^2. \quad (8)$$

Так как вторичная частица испускается практически одновременно с захватом нейтрона ядром, а, следовательно, определяется энергия нейтрона по времени t пролёта. Энергетическое разрешение ΔE нейтронного спектрометра по времени пролёта приближённо можно представить в виде:

$$\Delta E/E = 2\tau/t. \quad (9)$$

Импульсными источниками нейтронов обычно служат ускорители заряженных частиц или стационарные ядерные реакторы с механическими прерывателями, периодически пропускающими нейтроны в течение времени $t \sim 1$ мксек. В нейтронной спектроскопии часто используются детекторы, вырабатывающие сигнал, величина которого пропорциональна энергии регистрируемой частицы. Это позволяет измерить энергетический спектр вторичных частиц, вылетающих из мишени, что значительно расширяет объём информации о возбуждённых состояниях ядер и механизмах различных ядерных переходов и т.д.

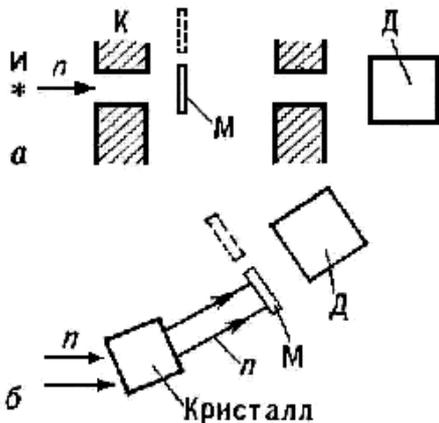


Рис.3. Схемы нейтронных спектрометров: а – с моноэнергетическим I ; б – с кристаллическим монохроматором на канале ядерного реактора: D – нейтронный детектор; M – поглощающая или рассеивающая модель; K – коллиматор.