

## 6. РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЁТА

Понятие разрешения в спектрометре нейтронов по времени пролета имеет свои особенности. Точность измерения спектра нейтронов в таком спектрометре зависит от точности измерения времени пролета  $t$  нейтроном пролетной базы  $L$ . В свою очередь точность измерения времени  $t$  определяется несколькими факторами. Главными из них являются длительность импульса нейтронов источника и ширина канала временного анализатора. Во-первых, по стартовому импульсу фиксируется момент образования импульса нейтронов. Однако, в какой точно момент времени в течение длительности импульса  $T$  вышел зарегистрированный нейтрон из источника, остается неопределенным. Во-вторых, момент «финиша» нейтрона в детекторе лежит в интервале времени  $\Delta t_{кан}$  и регистрация импульса во временном анализаторе производится с точностью до ширины канала. Кроме того, некоторая неопределенность вносится фронтом нарастания импульса в детекторе  $\Delta t_{дем}$ . Все эти неточности в измерении времени пролета  $t$  называют временными неопределенностями спектрометра по времени пролета. Суммарную временную неопределенность всех факторов

$$\Delta t = T + \Delta t_{дем} + \Delta t_{кан} \quad (16)$$

принимают в качестве меры разрешения спектрометра. Если значение  $\Delta t$  сравнимо с временем пролета  $t$ , то разрешение будет очень плохим. Если же значение  $\Delta t$  намного меньше времени пролета  $t$ , то спектрометр имеет хорошее разрешение. Неопределенность  $\Delta t$  не зависит от пролетной базы  $L$ , в то время как время пролета  $t$  пропорционально  $L$ :

$$t = t_0 L. \quad (17)$$

Следовательно, чем больше значение  $L$ , тем лучше разрешение. Количественно под разрешением спектрометра по времени пролета понимается отношение неопределенности  $\Delta t$  к пролетной базе  $L$ :

$$\Delta t_0 = \Delta t / L, \quad (18)$$

которое выражают в микросекундах на метр (мксек/м) или наносекундах на метр (нсек/м). Разрешение  $\Delta t_0$  имеет размерность обратной скорости  $t_0$ . Оно показывает возможную погрешность в обратной скорости нейтрона при измерении на данном спектрометре. Иначе говоря, разрешение - это неопределенность во времени пролета, отнесенная к 1 м пролетной базы.

Время пролета  $t$  зависит от энергии нейтронов. Оно максимально для данной базы  $L$  у нейтронов с граничной скоростью и минимально для самых быстрых нейтронов спектра. Как следствие этого, и соотношение между временной неопределенностью  $\Delta t$  и временем пролета  $t$  также зависит от энергии нейтронов. Таким образом, разрешение спектрометра по времени пролета будет разными для нейтронов различных энергий.

сделать периодическим, кратным периоду ВЧ-генератора отклонением пучка. Энергетическое разрешение спектрометра практически полностью определяется временным разрешением

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta t}{t}; \quad (19)$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = 2,77 \cdot 10^{-2} \frac{E^2}{L} \quad (20)$$

Временное разрешение в свою очередь определяется длительностью сгустков частиц и временными характеристиками детектора и регистрирующей аппаратуры. Для регистрации нейтронов во времяпролетных спектрометрах обычно используют пластиковые или жидкие сцинтилляторы, обладающие малыми временами высвечивания и временная неопределенность, связанная с фиксированием момента  $t_1$  обычно составляет доли наносекунды.

Величина  $\Delta t_0$  представляет собой скоростное или временное разрешения. Энергетическое разрешение по абсолютной величине в два раза больше временного разрешения.

Пролетное расстояние обычно около метра, иногда несколько больше. Ограничение здесь накладывает снижение эффективности регистрации за счет уменьшения телесного угла, который уменьшается обратно пропорционально квадрату пролетной базы. При временном разрешении 1 нс, пролетной базе 1 м энергетическое разрешение для нейтронов с энергией 16 МэВ равно 1.8 МэВ, а для нейтронов с энергией 4 МэВ равно 220 кэВ.



Рис. 4. Спектрометр для измерения потока быстрых нейтронов (лаборатория GGNT).

При исследовании спектров нейтронов по методу времени пролета в эксперименте измеряют функцию  $\varphi(t)$ , показывающую

распределение нейтронов по времени пролета  $t$  на пролетной базе  $L$ . Каждый  $k$ -канал временного анализатора регистрирует нейтроны, время пролета которых заключено в интервале от  $t_k$  до  $t_k + \Delta t_k$ , где  $\Delta t_k$  - ширина  $k$ -канала временного анализатора. Всем нейтронам в этом временном интервале приписывают одно и то же время пролета  $t_k$ . Если значение  $\Delta t_k$  всех каналов одинаково и равно  $\Delta t$ , то время  $t_k = N_k \Delta t$ , где  $N_k$  - номер  $k$ -канала временного анализатора по порядку. Следовательно, функция  $\varphi(t)$  при измерении описывается гистограммой  $\varphi_3(t_k)$ , которая приближенно отражает действительное временное распределение нейтронов. Переход от распределения  $\varphi_3(t_k)$  к энергетическому спектру нейтронов  $f(E_k)$  осуществляется с помощью формул, связывающих время пролета нейтронов  $k$ -канала  $t_k$  с энергией нейтрона  $E_k$  для данной пролетной базы  $L$ . По формуле  $t_k = t_{0k} L$ , где  $t_{0k}$  - скорость нейтронов, зарегистрированных в  $k$ -канале. Так как  $t_k = t_{0k} L$ , то

$$t_{0k} = \frac{N_k \Delta t}{L}. \quad (21)$$

Подставим выражение для скорости  $t_{0k}$  в формулу (7):

$$E_k = \frac{5233 L^2}{(N_k \Delta t)^2}, \quad (22)$$

где  $L$  — пролетная база, м;  $\Delta t$  - ширина канала временного анализатора, мксек.

Такое преобразование необходимо сделать для каждого канала временного анализатора, чтобы затем перейти к энергетическому спектру нейтронов  $f(E_k)$ . Заметим, что спектр  $f(E_k)$  имеет нелинейную шкалу по энергии нейтронов  $E_k$ , так как энергетическая ширина канала временного анализатора не постоянна, а пропорциональна  $E_k$ . Действительно, при постоянном значении  $\Delta t_0$

$$\Delta E_k \sim E_k^{3/2} \Delta t \sim E_k^{3/2}, \quad (23)$$

где  $\Delta E_k$  - ширина канала временного анализатора в энергетических единицах;  $\Delta t$  - ширина канала во временных единицах, численно равная  $\Delta t_0$ ;  $E_k$  - средняя энергия нейтронов, зарегистрированных в  $k$ -канале временного анализатора.

Нейтронный спектрометр по времени пролета применяют при исследовании ряда физических величин, определение которых связано с измерением спектра нейтронов. К таким применениям относится широкий класс задач по измерению нейтронных эффективных сечений. Например, экспериментальные значения полного эффективного сечения  $\sigma_t(E)$  рассчитываются по двум спектрам нейтронов, измеренным с помощью спектрометра по времени пролета. Вначале измеряют спектр нейтронов  $\varphi_{03}(E_k)$  от источника за какое-то время  $\tau$ . Затем на пути нейтронов из источника располагают пластину исследуемого вещества толщиной  $\delta$  и вновь в течение времени  $\tau$  измеряют спектр нейтронов  $\varphi_3(E_k)$ , который отличается от спектра  $\varphi_{03}(E_k)$ . Для каждого канала временного анализатора связь между спектрами нейтронов  $\varphi_{03}(E_k)$  и  $\varphi_3(E_k)$  по закону ослабления потока нейтронов:

$$\varphi_3(E_k) = \varphi_{03}(E_k) e^{-\sigma_t(E_k) N \delta} \quad (24)$$

где  $N$  — число ядер вещества в  $1 \text{ см}^3$ ;  $\sigma_t(E_k)$  - полное эффективное сечение для нейтронов с энергией  $E_k$ .

При измерении сечения  $\sigma_t$  экспериментально получают величину

$$T(E_k) = \frac{\varphi_3(E_k)}{\varphi_{03}(E_k)}, \quad (25)$$

которую называют пропусканием исследуемого образца. Поэтому и сам метод измерения сечения  $\sigma_t$  получил название метода пропускания. Из закона ослабления нейтронов следует, что пропускание

$$T(E_k) = e^{-\sigma_t(E_k) N \delta}. \quad (26)$$

**Рис. 5.** Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100(100 тонн)



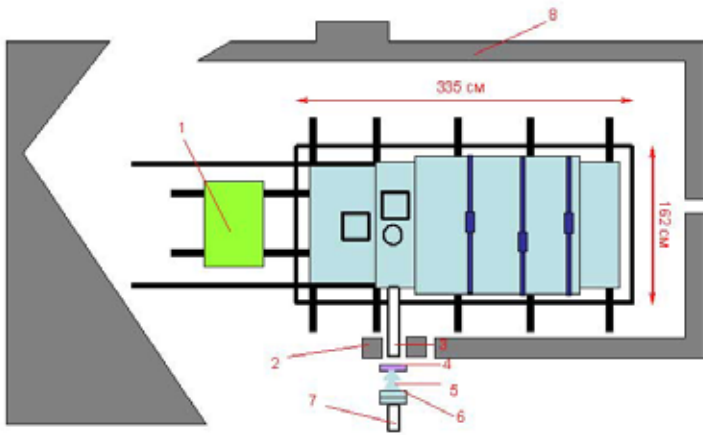
Отсюда легко вычислить полное эффективное сечение  $\sigma_t(E_k)$ :

$$\sigma_t(E_k) = -\frac{\ln T(E_k)}{N \delta}. \quad (27)$$

Продлав такие расчеты для каждого канала временного анализатора, получают кривую зависимости полного

эффективного сечения  $\sigma_t(E)$  в определенной энергетической области.

Спектрометр нейтронов по времени пролета решает и много других физических задач. К ним относятся: измерение парциальных сечений (рассеяния, поглощения, деления), изучение спектров, захватного  $\gamma$ -излучения и т. д.



**Рис. 6.** Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце.

Предположим, что нейтронный импульс имеет продолжительность  $\Delta t$ , измерения проводятся на пролетной базе длиной  $l$  и задержку  $t$  между стартом нейтронного импульса и его регистрацией можно определить точно. Кроме того, примем, что физические размеры пульсирующего источника и детектора вносят неопределенность  $\Delta l$  в длину пролетной базы. Тогда можно записать энергетическое разрешение  $\Delta E/E$  как

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\Delta v}{v} = \frac{2\sqrt{(\Delta l)^2 + (v\Delta t)^2}}{l} \quad (28)$$

где  $v$  — скорость нейтронов, а относительно  $\Delta l$  и  $\Delta t$  предполагается, что они подчиняются независимым гауссовым распределениям. Можно сразу отметить, что в пределе высоких энергий, когда  $(v\Delta t)^2 \gg (\Delta l)^2$ , энергетическое разрешение имеет вид:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2v\Delta t}{l}. \quad (29)$$

где  $\Delta t/l$  — номинальное разрешение, мксек/м или нсек/м.

Ясно также, что в пределе низких энергий разрешение дается выражением

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\Delta l}{l}. \quad (30)$$

не зависящим от скорости нейтронов и продолжительности импульса благодаря неравенству  $(v\Delta t)^2 \ll (\Delta l)^2$ . Следовательно, в достижении хорошего разрешения при низкой энергии нейтронов (скажем,  $E_n < 100$  эВ) кроме базы важными факторами являются длинная пролетная база и короткие детекторы, тогда как при высоких энергиях (скажем,  $E_n > 10$  кэВ) кроме длины базы оказывается важной уже малая продолжительность импульса  $\Delta t$ . Можно показать, что временная неопределенность в процессе замедления нейтронов для случая пульсирующих ускорителей грубо эквивалентна неустраняемой неопределенности длины  $\Delta l$  порядка нескольких сантиметров. Этот факт необходимо иметь в виду при расчетах энергетического разрешения.