

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97 - 36

P13-97-36

Б.И.Воронов , Т.Л.Еник, В.А.Ермаков,
В.И.Константинов, Е.Н.Литвиненко, Л.В.Мицына,
Г.С.Самосват, А.А.Смирнова, В.А.Трепалин, Р.В.Харьюзов

НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР УГРА:
УСТРОЙСТВО И НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1997

1. Введение

Уже более 30 лет в ЛНФ ОИЯИ проводятся исследования угловых распределений рассеяния нейтронов ядрами от Be до Th при нейтронных энергиях от сотен эВ до сотен кэВ. Методика и результаты этих исследований описаны в обзоре [1], там же содержится и полная библиография по этим работам.

Использовалась аппаратура трех поколений. Вначале это была батарея BF_3 -пропорциональных счетчиков с общим рабочим объемом $\sim 1,5$ л, которая помещалась в подвижной защите из парафина с B_4C с окном-каналом в направлении на рассеиватель и регистрировала рассеяние на углы от 45° до 135° . Затем была построена установка, состоявшая из девяти неподвижных батарей борных счетчиков объемом $\sim 4,6$ л каждая. Каналы в защите детекторов позволяли регистрировать одновременно нейтроны, рассеянные на 9 углов от 30° до 150° . Установка третьего поколения представляла собой один подвижный детектор в массивной защите, состоявший из 50 счетчиков, заполненных 3He до давления 7–10 атмосфер и имевших суммарный рабочий объем около 8 л.

Описываемый ниже спектрометр УГРА (названный по начальным буквам слов "угловые распределения") — установка четвертого поколения. Она сочетает в себе все положительные стороны предыдущих спектрометров. Первый из них был весьма малосветосильным. Второй был во много раз светосильнее, но возникла проблема разброса спектральных чувствительностей у разных детекторов. Третий спектрометр снял эту проблему и оставил возможность дальнейшего увеличения светосилы за счет увеличения числа подвижных детекторов, регистрирующих каждый "свое" угловое распределение. Эта возможность и реализована в установке УГРА, где, кроме того, существенно уменьшен фон, ибо падающие на мишень и рассеянные ею нейтроны пробегают свой путь в вакууме. Одновременно, по крайней мере на порядок, уменьшается эффект перерассеяния нейтронов, т.е. тех ней-

тронов, которые, рассеявшись мишенью не в детектор, попадают в него из-за последующего рассеяния на окружающих мишень веществах.

2. Устройство спектрометра

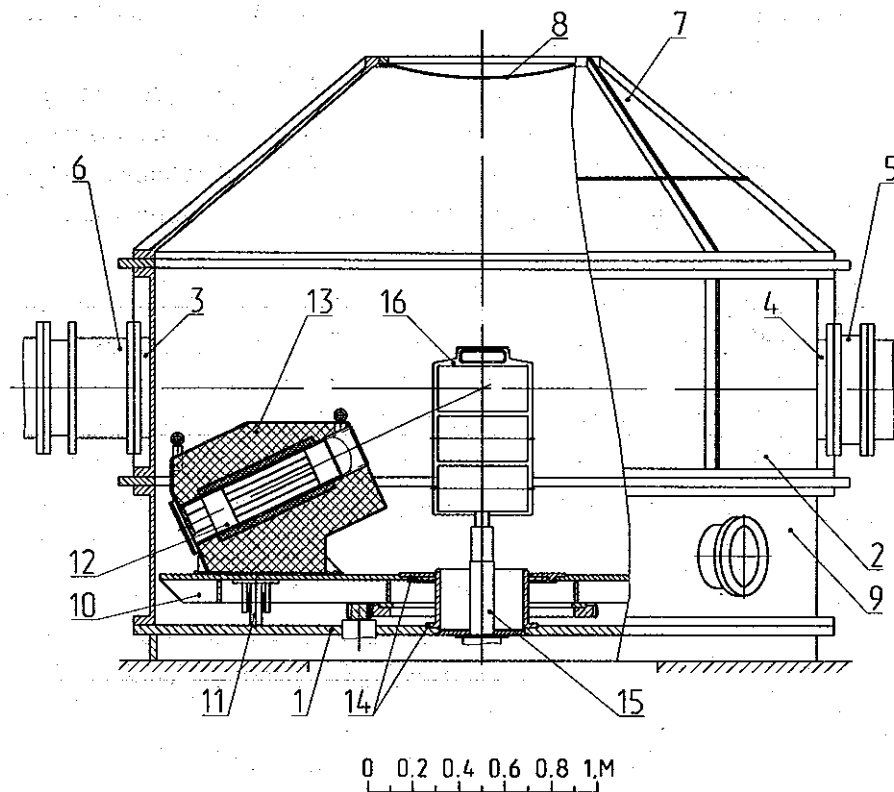


Рис.1. Устройство спектрометра УГРА

1 — дно камеры; 2 — средняя секция; 3, 4 — патрубки с фланцами для стыковки с нейтроноводом; 5 — сильфон; 6 — температурный компенсатор; 7 — верхняя секция; 8 — заглушка; 9 — нижняя секция; 10 — поворотная платформа; 11 — катки платформы; 12 — детектор; 13 — защитный блок детектора; 14 — центрирующий узел; 15 — вертикальная штанга; 16 — рамка

Спектрометр УГРА установлен в экспериментальном павильоне здания 44, и его нейтронные детекторы работают на времяпролетной базе ИБР-30 длиной 250,9 м. Устройство спектрометра показано на рис.1. На массивном стальном дне 1 диаметром ~ 3 м с радиальными и азимутальными ребрами жесткости покоятся одна на другой три секции вакуумной камеры рассеяния, выполненные из алюминия толщиной 12 мм, также имеющие снаружи ребра жесткости и уплотненные друг относительно друга и дна резиновыми прокладками.

В среднюю цилиндрическую секцию 2 сварены два диаметрально противоположных патрубка 3 и 4 с фланцами для вакуумно-плотной стыковки со стальным нейтроноводом через сильфон 5 со стороны ИБР-30 и через температурный компенсатор 6 с противоположной стороны.

Верхняя секция 7 имеет форму усеченного конуса, закрытого сверху вогнутой алюминиевой заглушкой 8 толщиной 2 мм и диаметром 0,8 м, которая легко снимается и позволяет проникнуть в камеру. Сообщение с внутренним объемом камеры возможно также через два люка диаметром 30 см в боковой стенке нижней секции 9, один из которых имеет прозрачное окно из оргстекла.

Внутри камеры на ее дне установлена стальная поворотная платформа 10 диаметром 2,84 м, которая на шести катках 11 может вращаться вокруг вертикальной оси камеры и на которой предполагается установить до 16 нейтронных детекторов. Каждый детектор 12 помещается в цилиндрический канал диаметром 175 мм защитного блока 13 — сварной алюминиевой конструкции, залитой смесью парафина с B_4C . Все оси детекторных каналов лежат на поверхности конуса, вершина которого совпадает с точкой пересечения вертикальной оси камеры с горизонтальной осью нейтронного пучка, и составляют с горизонтальной плоскостью угол 25° .

В центре дна камеры находится центрирующий платформу узел 14, сквозь который проходит вертикальная штанга 15, несущая на своем верхнем конце алюминиевую рамку 16 с тремя прямоугольными окнами размером 39 см по горизонтали и 20 см по вертикали.

Снаружи камеры на ее дне снизу смонтированы электроприводы, осуществляющие три движения внутри камеры. Трехфазный мотор через редуктор вращает платформу 10 со скоростью примерно 1 градус в секунду с остановками в любых из 16 позиций через $22,5^\circ$, что делается с помощью постоянного магнита на одном из защитных блоков и магнитных датчиков, установленных на внешней стороне стенки нижней секции 9 камеры. Два других движения может совершать рамка 16 с установленными в ее окнах исследуемыми образцами: поступательное вверх-вниз — для ввода в пучок любого из трех образцов — и вращательное вокруг вертикальной оси с остановками в двух регулируемых позициях — для выбора оптимальной самоэкранировки в образце.

3. Детекторы

Выбор типа нейтронного детектора для установки был продиктован тремя обстоятельствами. Во-первых, энергетической областью используемых нейтронов, промежуточной между тепловыми и быстрыми нейтронами, где сечение реакций в детекторах уже мало, а энергия нейтронов еще мала для применения метода протонов отдачи. Во-вторых, спектрометрия по времени пролета не позволяет использовать сколько-нибудь "длинный" (т.е. с замедлителем) счетчик, который существенно портил бы временное разрешение. В-третьих, требуется высокая степень дискриминации γ -лучей, которые могут исказить исследуемое угловое распределение рассеиваемых нейтронов. В итоге выбор пал на пропорциональные ^3He -счетчики высокого давления.

Используются пока две (из возможных шестнадцати) батареи промышленных счетчиков типа СМ-33 по 19 штук в каждой. Счетчик имеет длину $\sim 0,5$ м и внутренний диаметр 31 мм, так что суммарный рабочий объем газа одного детектора составляет примерно 6,7 л при давлении 7–10 атмосфер. В дальнейшем предполагается оснащать

спектрометр также и многоклеточными детекторами собственного изготовления.

Для мониторинга нейтронного пучка применяются два коронных счетчика типа СМ-17, находящихся вблизи нейтроновода в ~ 50 м от ИБР-30.

4. Управление спектрометром

Управление спектрометром осуществляется либо вручную с пульта, расположенного в соседнем со спектрометром помещении, либо компьютером, находящимся там же. Автоматическое управление складывается в гибко программируемую цепочку действий: установка одного из 96 состояний спектрометра (16 позиций поворотной платформы, 2 угловых положения рассеивателей и 3 — по высоте), измерение спектров всеми детекторами в течение заданного времени, запись спектров в память, установка следующего состояния и т.д. по всем желаемым состояниям. Эта цепочка может повторяться много раз, а однотипные спектры вместе с показаниями мониторов суммируются, если удовлетворяют условиям повторяемости по некоторым задаваемым критериям.

5. Основные соотношения

Нормированный по монитору и исправленный на фон и искажения рассеивателем, счет детектора в зависимости от угла рассеяния описывается выражением

$$N(\theta) = C[1 + \omega_1 \cos\theta + \omega_2 P_2(\cos\theta)], \quad (1)$$

где константа C пропорциональна интегральному сечению рассеяния σ_s , а параметры анизотропии ω_1 и ω_2 характеризуют дифференциальное сечение. Для нахождения C, ω_1, ω_2 достаточно иметь $N(\theta)$ при трех углах $N_i = N(\theta_i)$, ($i = 1, 2, 3$). Вводя для краткости обозначения $\cos\theta_i = x_i$ и $P_2(\cos\theta_i) = y_i$, имеем

Таблица 1

$\psi, ^\circ$	$\phi, ^\circ$	$\langle \cos\theta \rangle$	$\langle P_2(\cos\theta) \rangle$	$\theta_0, ^\circ$	$\theta_1, ^\circ$	$\theta_2, ^\circ$
90	0	0,903	0,723	25	25,5	25,4
90	67,5	0,347	-0,316	69,7	69,7	69,5
45	90	-0,002	-0,494	90	90,1	86,4
90	157,5	-0,835	0,547	146,9	146,6	146,6
45	180	-0,903	0,724	155	154,6	154,6
90	180	-0,903	0,723	155	154,5	154,5
90	247,5	-0,347	-0,316	110,3	110,3	110,5
45	270	0,002	-0,494	90	89,9	93,6
90	337,5	0,835	0,547	33,1	33,4	33,4

$$C = \frac{\Delta_0}{\Delta}, \quad \omega_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_0}, \quad \omega_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_0},$$

$$\Delta = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2),$$

$$\Delta_0 = N_1(x_2y_3 - x_3y_2) + N_2(x_3y_1 - x_1y_3) + N_3(x_1y_2 - x_2y_1), \quad (2)$$

$$\Delta_1 = N_1(y_2 - y_3) + N_2(y_3 - y_1) + N_3(y_1 - y_2),$$

$$\Delta_2 = N_1(x_3 - x_2) + N_2(x_1 - x_3) + N_3(x_2 - x_1).$$

Рабочее состояние спектрометра характеризуется угловыми позициями рассеивателя и детекторов. Все углы отсчитываются от направления падающих на мишень нейтронов в горизонтальной плоскости по часовой стрелке. Угол плоского рассеивателя ψ может быть любым между 0° и 180° , угол каждого детектора ϕ может принимать 16 значений от 0° до $337,5^\circ$ через $22,5^\circ$. Из-за наклона детекторных осей на 25° угол рассеяния нейтронов θ центром рассеивателя в центр детектора определяется соотношением

$$\cos\theta = \cos 25^\circ \cdot \cos\phi. \quad (3)$$

Однако углы θ для всех остальных зарегистрированных нейтронов имеют некоторый разброс, зависящий от размеров рассеивателя и детектора, а также от их углов ψ и ϕ . Поэтому в выражении (1) подразумеваются усредненные значения полиномов Лежандра $\langle \cos\theta \rangle$ и $\langle P_2(\cos\theta) \rangle$, которые и фигурируют в (2) как x и y соответственно. Значения этих величин находятся четырехкратным численным интегрированием по площади рассеивателя и некоторому эффективному сечению детектора.

Таблица 1 иллюстрирует эффект разброса угла рассеяния на нескольких реальных примерах (θ_0 — угол, определяемый из соотношения (3), θ_1 и θ_2 — углы, соответствующие $\langle \cos\theta \rangle$ и $\langle P_2(\cos\theta) \rangle$).

Упомянутые выше искажения углового распределения рассеивателем вызываются тремя эффектами. Вариация вероятности регистрации нейтрона с углом его рассеяния (за счет разной потери энергии в акте рассеяния) устраняется для ядер с массовым числом $A > 15$ множителем

$$\left(\frac{A + \langle \cos\theta \rangle}{A + 1} \right)^{0,4}, \quad (4)$$

так как эффективность детектора (см. раздел 7 ниже) пропорциональна энергии нейтрона в степени $-0,2$. Далее, интенсивность при каждом угле нужно разделить на фактор самоэкранировки (за счет ослабления нейтронного потока в материале рассеивателя), который имеет вид:

$$\frac{e^{-\frac{n\sigma d}{\cos\beta}} - e^{-\frac{n\sigma d}{\cos\alpha}}}{n\sigma d \left(\frac{1}{\cos\alpha} - \frac{1}{\cos\beta} \right)} \quad \text{при } \sin(\phi - \psi) < 0,$$

$$\frac{1 - e^{-n\sigma d \left(\frac{1}{\cos\alpha} + \frac{1}{\cos\beta} \right)}}{n\sigma d \left(\frac{1}{\cos\alpha} + \frac{1}{\cos\beta} \right)} \quad \text{при } \sin(\phi - \psi) > 0, \quad (5)$$

$$\cos\alpha = \sin\psi, \quad \cos\beta = \cos 25^\circ \cdot |\sin(\phi - \psi)|,$$

где n — число ядер в 1 см^3 рассеивателя, d — его толщина, σ — полное нейтронное сечение его ядер. Третьим эффектом — многократным

рассеянием — в первом приближении можно пренебречь, если рассеиватель не толст.

Интегральное сечение рассеяния для исследуемого рассеивателя определяется соотношением

$$\sigma_s = \frac{A}{A_0} \cdot \frac{M_0}{M} \cdot \frac{C}{C_0} \sigma_{s0}, \quad (6)$$

если помимо исследуемого рассеивателя измерения $N(\theta)$ проведены и с калибровочным рассеивателем с известным сечением. Атомный вес A , масса M , константа C из (1) и сечение σ_s для калибровочного рассеивателя снабжены в (6) индексом 0. Существенно, чтобы формы и площади обоих рассеивателей были одинаковыми.

Следует заметить, что большинство величин в соотношениях (1), (2), (5) и (6) — функции энергии нейтронов и на деле относятся к определенным участкам времяпролетного спектра.

6. Светосила

Представление о светосиле спектрометрического комплекса ИБР-30 + УГРА с пролетной базой 250,9 м дает рис.2. По оси ординат на нем отложено число отсчетов одного детектора при $\phi = 180^\circ$ ($\theta_0 = 155^\circ$) в канале шириной 1 мкс от кадмиевой мишени толщиной 3,5 мм и площадью $20 \times 12 \text{ см}^2$. Спектр, отмеченный цифрой 1, — рассеяние кадмием и воздухом, цифрой 2 — только воздухом, цифрой 3 — то же, что и 1, но в пучке 6 см алюминия. Кривая 4 проведена по провалам "черных" резонансов Al и Mn , когда в пучке — мишень и фильтры из 6 см Al и 4 см порошка $KMnO_4$, после чего она нормирована к провалу алюминия в районе 35 кэВ. Все спектры приведены к экспозиции 18 часов. Следует добавить, что в пучке постоянно находится фильтр из порошка B_4C толщиной ~ 15 мм, существенно подавляющий "рециклические" нейтроны, энергия которых $E < 3,3$ эВ.

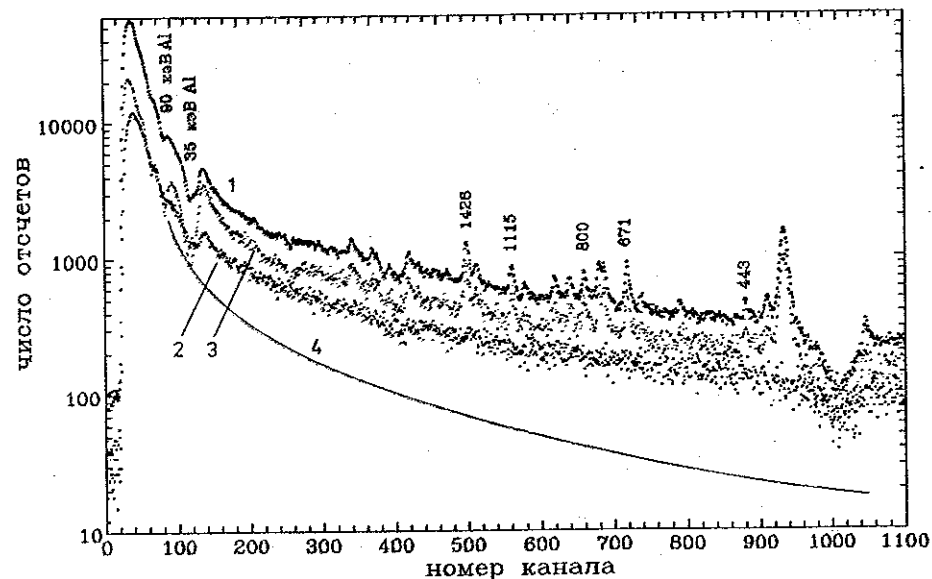


Рис.2. Спектры рассеянных нейтронов

- 1 — рассеяние кадмием и воздухом; 2 — рассеяние воздухом;
3 — рассеяние кадмием и воздухом при наличии в пучке
6 см алюминия; 4 — фон

7. Эффективность детекторов

Абсолютная эффективность одного из детекторов $\epsilon(E)$ изображена на рис.3 (точки). Она была определена путем деления спектра констант C из (1) на спектр нейтронов в пучке, зарегистрированных счетчиком с известной эффективностью. Константы C были получены из измерений с кадмиевой мишенью и без нее при шести положениях поворотной платформы, соответствующих значениям ϕ при $\psi = 90^\circ$ из таблицы 1 для одного детектора и $\phi \pm 180^\circ$ — для второго. При расчете $\epsilon(E)$ был использован телесный угол на рабочий объем газа 19-ти счетчиков, равный $\sim 0,014$ стерадиана.

Разброс экспериментальных точек на рисунке обусловлен как статистикой, так и плохо известным флуктуирующим сечением рассеяния σ_s кадмия [2,3]. Кривые, у которых указано давление ^3He , — расчетные для ничем не окруженного газа. Таким образом, перерасеяние в защите детектора увеличивает его эффективность в $\sim 1,5-10$ раз.

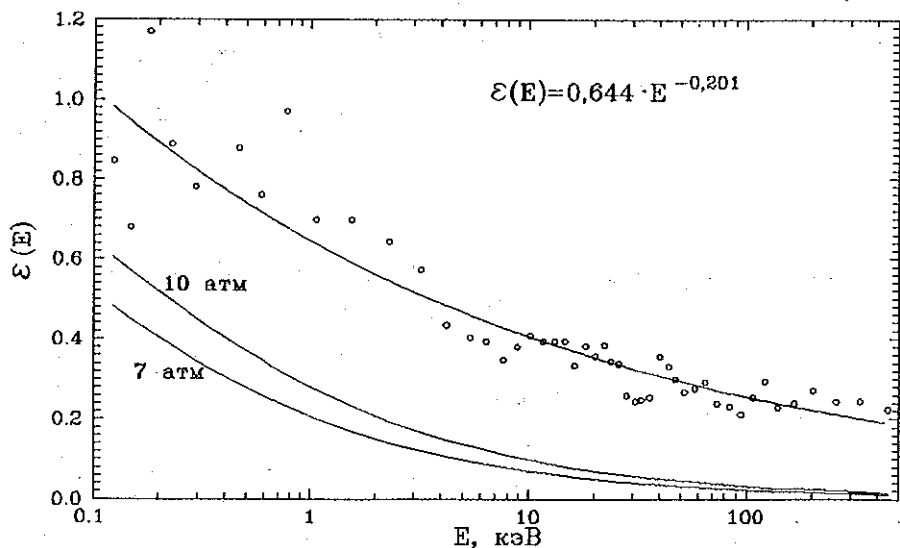


Рис.3. Абсолютная эффективность детектора

Аппроксимирующая $\epsilon(E)$ кривая для другого детектора описывается выражением $\epsilon(E) = 0,598 \cdot E^{-0,190}$ (E — в кэВ).

8. Разрешение

Функция временного разрешения спектрометра изображена в виде гистограммы на рис.4. Она представляет собой усредненную и нормированную по площади на единицу форму пяти узких резонансов кадмия, энергии которых в эВ показаны на рис.2. Ширина этого пика на половине высоты (~ 6 мкс) обеспечивает соответствующее энергетическое разрешение $\Delta E = 0,021E^{3/2}$ (ΔE и E — в кэВ).

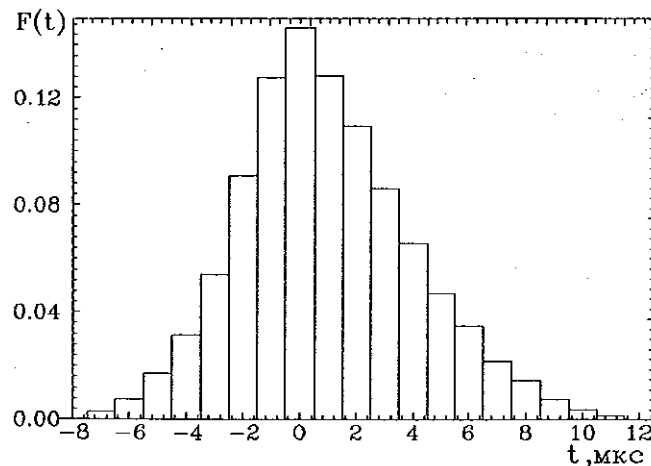


Рис.4.
Функция
временного
разрешения
спектрометра

9. Средняя энергия

Значительность ширины функции разрешения и ее асимметричность относительно максимума делает неточным выражение $E = (573,6/t)^2$, (кэВ), для энергии нейтронов, зарегистрированных в канале, которому приписано время пролета t мкс*). Это выражение дает только наиболее вероятную энергию, и более правильно воспользоваться средней энергией в виде суммы

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=-7}^{11} F_i \left(\frac{573,6}{t-i}\right)^2 C_{t-i}}{\sum_{i=-7}^{11} F_i C_{t-i}}, \quad (7)$$

где F_i — высота i -го столбца гистограммы на рис.4, а C_{t-i} — константа C в канале $t-i$. Эффект такой замены демонстрируется таблицей 2 для случая, когда C одинаковы во всех каналах.

Таблица 2

t , мкс	57	80	120	180	280	500	900
E , кэВ	101,3	51,4	22,9	10,2	4,20	1,316	0,406
\bar{E} , кэВ	105,8	52,9	23,3	10,3	4,23	1,321	0,407

*) В спектрах на рис.2 время пролета t в канале с номером n определяется как $t = n - 19$.

Для нахождения средней энергии участка спектра, состоящего из нескольких каналов, надо усреднить энергии в виде (7) по всем каналам участка, вновь взяв в качестве весов константы C для отдельных каналов, т.е.

$$\bar{E} = \sum_{k=k_1}^{k_2} C_k \bar{E}_k / \sum_{k=k_1}^{k_2} C_k,$$

где \bar{E}_k — средняя энергия по (7) для k -го канала, k_1 и k_2 — начальный и конечный каналы участка.

10. О фоне

На данном этапе исследований спектрометра без откачки его камеры о фоне можно сказать пока только следующее. Если эффект — это нейтроны от кадмиевой мишени, рассеивающей $\sim 11\%$ пучка, то фон (рассеяние воздухом) согласно рис.2 (спектры 1 и 2), составляет примерно 40% от эффекта. Если же эффектом считать рассеяние кадмием и воздухом нейтронов только "правильных" энергий (при наличии в пучке 6 см Al), то фон от запаздывающих нейтронов в пучке и нейтронов, "болтающихся" в помещении, с энергией возрастает, составляя 11%, 20% и 65% при 0,4, 24 и 80 кэВ соответственно (см. спектры 3 и 4 на рис.2). С откачкой камеры фоновые условия безусловно станут много лучше.

Литература

- [1] Г.С.Самосват. ЭЧАЯ, 1995, т.26, вып.6, с.1567-1596.
- [2] V.McLane, C.L.Dunford, P.F.Rose. *Neutron Cross Sections*, v.2, Academic Press, 1988.
- [3] Зо Ин Ок, В.Г.Николенко, А.Б.Попов, Г.С.Самосват. *Сообщение ОИЯИ РЗ-85-133*, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 февраля 1997 года.