

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНЫХ И НЕУПРУГИХ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МЕДЛЕННЫХ И УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ С ТАНТАЛОМ И МЕДЬЮ
С ПОМОЩЬЮ ГРАВИТАЦИОННОГО НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

А. В. Антонов, А. И. Исаков, И. В. Мешков.

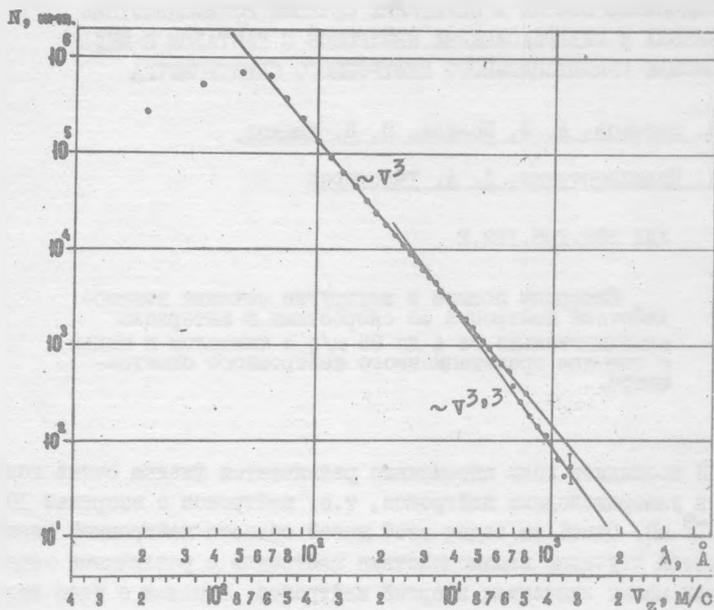
А. Д. Перекрестенко, А. А. Тихомирсов

УДК 539.125.162.2

Измерены полные и неупругие сечения взаимодействия нейтронов со скоростями в интервале приблизительно от 4 до 85 м/с с танталом и медью с помощью гравитационного нейтронного спектрометра.

В последние годы интенсивно развивается физика очень холодных и ультрахолодных нейтронов, т.е. нейтронов с энергией $10^{-4} + 10^{-9}$ эВ. Одной из задач этой новой области нейтронной физики является изучение взаимодействия нейтронов с различными веществами при малых значениях энергий нейтронов. В связи с этим авторами создан аппарат — гравитационный нейтронный спектрометр /1/ (установленный на реакторе МИФИ ИРТ-2000) для спектрометрии нейтронов в интервале энергий $5 \cdot 10^{-5}$ эВ + 10^{-9} эВ., что соответствует скорости нейтронов ~ 100 м/с + 1 м/с с разрешением по энергии $\sim 16\%$. Следует заметить, что после ряда усовершенствований в установке ее характеристики значительно улучшились по сравнению с характеристиками, описанными в работе /1/. Так, например, разрешение по энергии улучшено до 16%, а интенсивность регистрируемых нейтронов увеличена более, чем в 20 раз, остаточное давление в установке понижено до $1 \cdot 10^{-4}$ тор. На рис. 1 показан полученный за 150 мин измерений нейтронный спектр, исправленный на фон, для диапазона скоростей нейтронов от 3,3 м/с до 196,8 м/с. Фон не зависит от скорости нейтронов и составляет $\sim 50\%$ от регистрируемой интенсивности при скорости нейтронов 4 м/с. Интегральная интен-

сивность регистрируемых нейтронов составляла $2,2 \cdot 10^4$ имп/мин. Измерения велись при частоте "всплеск" нейтронного пучка 0,89 Гц и при длительности "всплеск" 30 мс (для $V_z = 10$ м/с). Длительность канала временного анализатора импульсов составляла 20,48 мс.



Р и с. 1. Нейтронный спектр (время набора 150 мин)

Спектрометр использовался для исследования полного и неупругого сечений взаимодействия нейтронов с твердым телом при скоростях нейтронов приблизительно от 3 до 90 м/с. Полное сечение σ_t определялось по пропусканию пучка нейтронов через образец. Сечение неупругого рассеяния σ_{ie} , определяемое динамикой рассеивающей системы, оценивалось из результатов измерений полных сечений при двух температурах — комнатной и 80 К. Разница в полных сечениях при этих двух температурах приблизительно соответствует значению сечения неупругого рассеяния. При расчете σ_t вводилась поправка на преломление нейтронной волны в веществе, в результате

чего скорость нейтрона в веществе определялась как $V' = \sqrt{V_z^2 \pm V_{гр}^2}$. Здесь V_z - вертикальная составляющая скорости нейтрона, определяемая временем пролета 6 - метровой пролетной базы спектрометра; $V_{гр}$ - граничная скорость нейтрона (нейтроны, имеющие $V_z \leq V_{гр}$, испытывают отражение при падении из вакуума на вещество с положительной амплитудой когерентного рассеяния). Знак (-) соответствует веществам с положительной амплитудой когерентного рассеяния, а знак (+) - веществам с отрицательной амплитудой когерентного рассеяния. Граничная скорость нейтронов определялась как

$$V_{гр} = \frac{h}{m} \sqrt{\frac{N b_{\text{ког}}}{\pi}}, \quad (1)$$

где h - постоянная Планка, m - масса нейтрона, N - число атомов в 1 см^3 исследуемого вещества, $b_{\text{ког}}$ - когерентная амплитуда рассеяния исследуемого вещества.

При энергиях нейтронов меньших 10^{-6} эВ становится заметной рефракция /2/, связанная с многократным отражением нейтронов на границах образца, имеющего толщину больше, чем длина волны нейтрона. Поэтому при вычислениях σ_t вводилась поправка на рефракцию. Эта поправка определялась так же, как в работе /3/. Полное наблюдаемое пропускание нейтронов через образец с учетом многократного отражения нейтронной волны от его границ определяется формулой:

$$\tau = \alpha T^2 / (1 - \alpha^2 R^2). \quad (2)$$

В этом выражении $\alpha = \exp(-\sigma_t \frac{N_A}{A} \gamma)$, где N_A - число Авогадро, A - атомный вес, γ - толщина образца. Величина α определяет ослабление прошедшей через образец нейтронной волны благодаря захвату и неупругим процессам. T и R - соответственно коэффициенты прохождения и отражения нейтронной волны от рассеивающего потенциала, определяемого как $\langle U \rangle = \frac{h^2 k_{гр}^2}{2m}$, h - постоянная Планка, m - масса нейтрона, а $k_{гр}^2 = 4\pi N b_{\text{ког}}$, где $k_{гр}$ - волновое число соответствующее $V_{гр}$ вещества, N - число атомов в 1 см^3 этого вещества, $b_{\text{ког}}$ - когерентная амплитуда рассеяния исследуемого вещества. Коэффициенты T и R рассчитывались по формулам:

$$R = \frac{4k_z \operatorname{Re} k'}{|k_z + k'|^2} \quad R = \left| \frac{k_z - k'}{k_z + k'} \right|^2$$

где k_z - перпендикулярная к поверхности образца составляющая волнового вектора нейтрона, k' - волновое число нейтрона внутри исследуемого вещества. По формуле (2) определялось ослабление (α) прошедшей через образец нейтронной волны с учетом отражения от передней и задней стенок образца:

$$\alpha = -\frac{1}{2} \frac{R^2}{vR^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{R^2}{vR^2}\right)^2 + \frac{1}{R^2}}$$

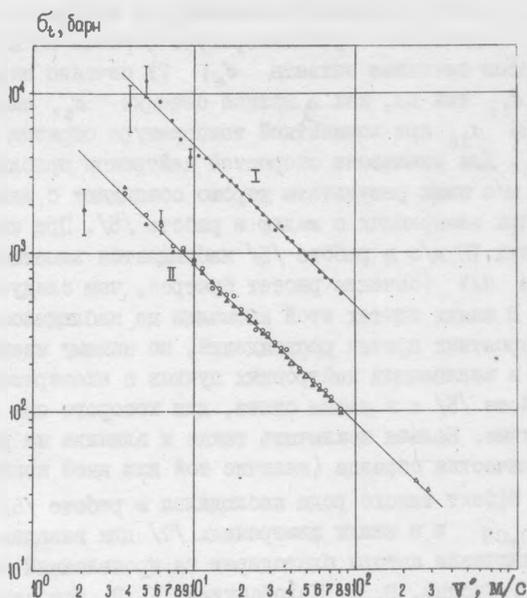
Из величины α , рассчитывались значения σ_t .

На рис. 2 показаны полные сечения для тантала (I) и меди (II), полученные нами из измерений на спектрометре, для диапазона скоростей нейтронов от 4 м/с до 85 м/с.

Тантал. Измерения σ_t были проведены при температуре 297 К на поликристаллическом образце тантала, обладавшего чистотой 99,98%. Толщина (поверхностная плотность) образца составляла $3,6 \cdot 10^{-2}$ г/см² \pm 3%. На рис. 2 (I) показана зависимость σ_t от v' . При вычислениях σ_t вводились поправки на преломление нейтронной волны в веществе и рефракцию; последняя при $v' = 10$ м/с составляла $\sim 2,5\%$. Из рисунка видно, что зависимость σ_t от v' хорошо аппроксимируется прямой $\sim 1/v'$. Для скорости нейтронов $v = 2200$ м/с с помощью экстраполяции было получено значение $\sigma_t = 21,3 \pm 1,2$ б. Эта величина хорошо совпадает с сечением захвата при $v = 2200$ м/с $\sigma_c = 21 \pm 1$ б, приведенным в /4/.

Резюмируя можно заключить, что полное сечение взаимодействия нейтронов танталом при скоростях от 4 м/с и до 85 м/с в основном определяется захватом нейтронов.

Медь. Для измерений использовался поликристаллический образец меди чистотой 99,99% при толщине $6,7 \cdot 10^{-2}$ г/см² \pm 3%. На рис. 2 (кривая II) показана зависимость σ_t от v' . Кружками обозначены сечения, полученные при температуре 297 К, а треугольниками - при температуре 80 К (температура Дебая меди 343 К). При вычислениях σ_t (так же, как и в случае тантала) вводились поправки на преломление и рефракцию нейтронной волны в веществе. Последняя поправка для $v' \sim 10$ м/с составляла $\sim 5\%$. Из рис. 2



Р и с. 2. Полные нейтронные сечения в зависимости от скорости нейтронов. I - тантал; II - медь o - температура образца 297 K, ▲ - температура 80 K; Δ - данные работы /4/

видно, что обе зависимости σ_t от v , измеренные при различных температурах образцов, хорошо аппроксимируются прямыми $\sim 1/v$. Исходя из различия этих кривых можно оценить вклад в полное сечение, вносимый неупругим рассеянием при комнатной температуре. При скорости нейтронов $v = 10$ м/с он соответствовал сечению неупругого рассеяния $\sigma_{1e} = 33 \pm 30$ б, что находится в хорошем согласии с оценкой этой величины, приведенной в работе /5/. Из полученных при температуре 80 K экспериментальных данных экстраполяции было определено σ_t в тепловой области, оказавшееся равным (для $v = 2200$ м/с) $3,77 \pm 0,16$ б, что находится в хорошем согласии с данными /4/ для сечения захвата $\sigma_a = 3,77 \pm 0,03$ б. Из проведенных нами измерений с медью, можно сделать следующие

выводы: 1) полное сечение взаимодействия нейтронов со скоростями от 3,7 и до 82 м/с при температуре образца 80 К в основном определяется сечением захвата σ_a ; 2) сечение неупругого рассеяния σ_{in} так же, как и полное сечение σ_t , следует закону $1/v$; 3) σ_{in} при комнатной температуре образца не превышает 3% от σ_a . Для диапазона скоростей нейтронов приблизительно от 10 до 80 м/с наши результаты хорошо совпадают с данными, полученными при измерениях с медью в работе /5/. При скоростях нейтронов меньших 10 м/с в работе /5/ наблюдается заметное отклонение от закона $1/v$ (сечение растет быстрее, чем следует из этого закона). В наших опытах этой аномалии не наблюдалось. Одной из весьма вероятных причин расхождений, по нашему мнению, является различие в коллимации нейтронных пучков в эксперименте, описанном в работе /5/ и в нашем опыте, для которого она была значительно лучше. Нельзя исключить также и влияние на результаты измерений качества образца (наличие той или иной концентрации дефектов). Эффект такого рода наблюдался в работе /6/ для сплава $Al_{0,92}Zn_{0,08}$ и в наших измерениях /7/ для ванадия.

В заключение авторы благодарят за проявленный интерес к работе Н. Г. Басова, В. М. Колобашкина, Д. В. Скобелычна. Авторы благодарят также группу обслуживания реактора, в особенности А. П. Крикова, помогавшего при выполнении данных работ, С. Б. Степанова за участие в обсуждении полученных результатов и Ю. А. Лапушкина за участие в проведении измерений.

Поступила в редакцию
14 июля 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. В. Антонов, А. И. Исаков, И. В. Мешков, А. Д. Перекрестенко, А. А. Тихомиров, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, 10 (1977).
2. Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ, 9, 1389 (1959).
3. A. Steyerl, Nucl. Instr. and Meth., 101, 295 (1972).
4. D. Hughes, R. Schwartz, Neutron Cross Sections, BNL-325, 1958.
5. A. Steyerl, H. Vonach, Z. Physik, 250, 166 (1972).

6. A. Steyerl, Материалы II школы по нейтронной физике, Алуста, 1974 г., стр. 42, Издательство Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.
7. А. В. Антонов, А. И. Исаков, И. В. Мешков, А. Д. Перекрестенко, А. А. Тихомиров, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, 43 (1978).