

ОТРАЖЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ И ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫХ  
НЕЙТРОНОВ ОТ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Т. А. Айбергенов, А. В. Антонов, А. И. Исаков, В. И. Микеров

УДК 539.125.5

В работе проведен анализ зависимости коэффициента отражения нейтронов от скорости нейтронов и характеристик среды, рассмотрены имеющиеся в настоящее время возможности исследования взаимодействия ультрахолодных и очень холодных нейтронов (УХН и ОХН) с веществом.

Исследование отражения УХН и ОХН от поверхности веществ в конденсированном состоянии представляет существенный интерес. Этот интерес вызван наблюдаемым расхождением экспериментальных и теоретических значений времени удержания УХН в ловушках из слабо поглощающих веществ, а также возможностью использования УХН и ОХН для изучения свойств веществ в приповерхностной области, в тонких пленках и слоях (например, для изотопов, доступных в небольших количествах). Явление отражения может быть использовано для изучения объемных свойств вещества, если по каким-либо причинам неприменим метод, основанный на пропускании нейтронов.

Появление и развитие техники спектрометрирования нейтронов низких энергий с помощью гравитационных спектрометров /1,2/ и дифрактометров /3/, интерференционных структур /4/ позволяет исследовать зависимость коэффициента отражения  $R$  от скорости и угла падения нейтронов, что существенно для выяснения закономерностей их взаимодействия с поверхностью вещества. Достигнутая интенсивность нейтронов и фоновые условия эксперимента /1,2/ позволяют в настоящее время измерять величины коэффициентов отражения  $R \geq 10^{-3}$  и коэффициентов потерь  $\mu = 1 - R \geq 10^{-3}$ . Для определения реальных возможностей изучения поставленных выше вопросов возникла необходимость расчета значений  $R$  в зависимости от скорости

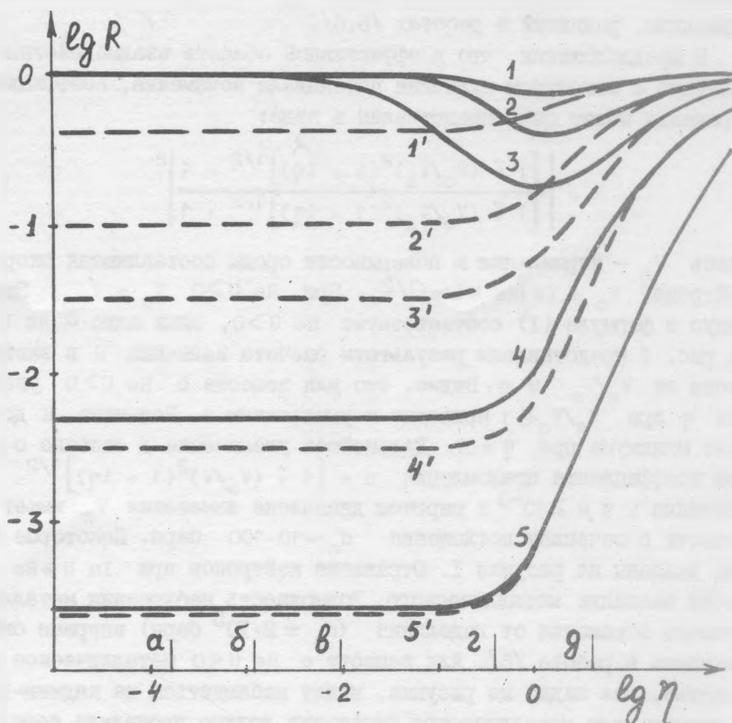
нейтронов  $v$  и характеристик среды  $v_{гр}$  и  $\eta^*$ ). При этом использован формализм, развитый в работах /5,6/.

В предположении, что в эффективной области взаимодействия нейтрона с веществом величина потенциала неизменна, коэффициент отражения может быть представлен в виде:

$$R = \left| \frac{[1 + (v_0/v_z)^2(1 + i\eta)]^{1/2} - 1}{[1 + (v_0/v_z)^2(1 + i\eta)]^{1/2} + 1} \right|^2 \quad (I)$$

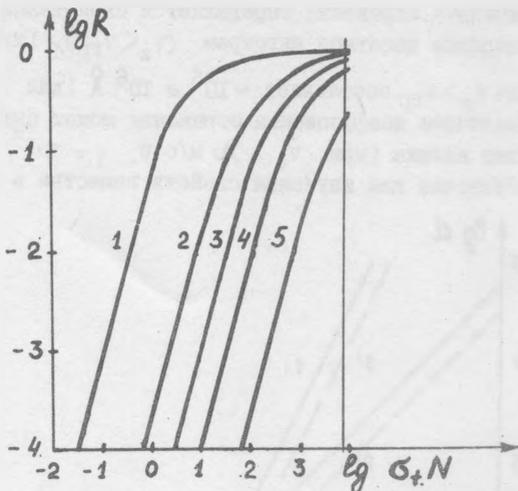
Здесь  $v_z$  - нормальная к поверхности среды составляющая скорости нейтрона,  $v_0 = (2|\text{Re } U|/m)^{1/2}$ . При  $\text{Re } U > 0$   $v_0 = v_{гр}$ . Знак минус в формуле (I) соответствует  $\text{Re } U > 0$ , знак плюс -  $\text{Re } U < 0$ . На рис. 1 представлены результаты расчета величины  $R$  в зависимости от  $v_z/v_0$  и  $\eta$ . Видно, что для веществ с  $\text{Re } U > 0$  увеличение  $\eta$  при  $v_z/v_0 \leq 1$  приводит к уменьшению  $R$ . Величина  $R$  достигает минимума при  $\eta = 1$ . Дальнейшее увеличение  $R$  связано с ростом коэффициента преломления  $n = [1 + (v_0/v)^2(1 + i\eta)]^{1/2}$ . Значения  $R$  и  $\mu \geq 10^{-3}$  в широком диапазоне изменения  $v_z$  имеет ряд веществ с сечением поглощения  $\sigma_c \sim 10-100$  барн. Некоторые из них указаны на рисунке 1. Отражение нейтронов при  $\text{Im } U \geq \text{Re } U$  носит название металлического. Возможность наблюдения металлического отражения от гадолиния ( $\sigma_c \approx 2 \cdot 10^5$  барн) впервые была показана в работе /6/. Для веществ с  $\text{Re } U < 0$  металлическое отражение, как видно из рисунка, может наблюдаться на кадмий-113. В чистом виде металлическое отражение должно проявлять себя на веществах с  $\text{Re } U = 0$ . Для сплава типа внедрения гадолиния с кадмием-113 соответствующего состава ( $\lg \sum_{i=1}^2 \sigma_c^i N_i = 3,85$ ) величина  $R$  может составлять  $\sim 0,28$  при  $v_z = 5$  м/с (рис. 2). Аномально малое время удержания нейтронов в экспериментах по хранению УХН приводит к предположению, что взаимодействие нейтронов с приповерхностным слоем вещества заметно отличается от взаимодействия с веществом в объеме. Поэтому большой интерес вызывает возможность экспериментального нахождения потенциала взаимодейст-

\*  $\eta = \text{Im } U / \text{Re } U$ , где  $\text{Im } U$ ,  $\text{Re } U$  - мнимая и действительная части потенциала взаимодействия нейтронов с веществом,  $v_{гр}$  - граничная скорость для вещества.



Р и с. I. Зависимость  $R$  от  $\eta$ . Сплошные кривые при  $\text{Re } U > 0$ , штриховые при  $\text{Re } U < 0$ . Кривые 1 и 1' соответствуют  $v_2/v_0 = 0,2$ ; 2 и 2' - 0,6; 3 и 3' - 1,0; 4 и 4' - 2,0; 5 и 5' - 4,0. Буквами показаны значения  $\eta$  для веществ: а -  $^{64}\text{Cu}$ ; б -  $^{107}\text{Ag}$ ; в -  $^{115}\text{In}$ ; г -  $^{113}\text{Cd}$ ; д -  $^{157}\text{Gd}$ .

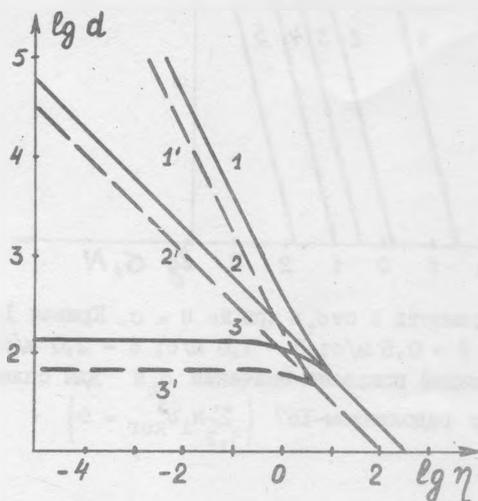
вия нейтрона со средой, форма которого в общем случае должна отличаться от прямоугольной. Предположение о прямоугольности означает, что  $\text{Re } U \sim \sum_i N_i b_{\text{КОГ}}^i$  и  $\text{Im } U \sim \sum_i N_i \sigma_t^i(k_1)k_1$  не зависят от  $Z$ . Здесь  $N_i$  - концентрация ядер  $i$ -того элемента;  $b_{\text{КОГ}}^i$  - длина когерентного рассеяния  $i$ -того элемента;  $\sigma_t^i$  - полное сечение неупругих процессов, отнесенное к одному ядру  $i$ -того элемента,  $\sigma_t^i = \sigma_c^i + \sigma_{\text{НУ}}^i$  ( $\sigma_c^i, \sigma_{\text{НУ}}^i$  - сечения поглощения и неупруго-



Р и с. 2. Зависимость  $R$  от  $\sigma_t N$  при  $\text{Re } U = 0$ . Кривая 1 соответствует  $v_z = 0,1$  м/с; 2 - 0,5 м/с; 3 - 1,0 м/с; 4 - 2,0 м/с; 5 - 5,0 м/с. Вертикальной линией показано значение  $\sigma_t N$  для сплава кадмия-IIЗ с гадолинием-I57 ( $\sum_{1,2} N_i b_{\text{ког}}^i = 0$ )

го рассеяния);  $k_1$  - действительная часть волнового вектора нейтрона в веществе. Отклонение формы барьера от прямоугольной может быть, очевидно, связано с зависимостями  $N_i = N_i(z)$ ,  $\sigma_{\text{HY}}^i = \sigma_{\text{HY}}^i(k_1, z)$ . Последняя обусловлена изменением динамических свойств среды с глубиной в приповерхностной области. Тот факт, что форма потенциала отличается от прямоугольной, может быть легко установлен по отклонению экспериментальной зависимости  $R = R(v_z)$  от теоретической, описываемой формулой (I). Возможность установления вида потенциала требует создания модели потенциала для получения функции  $R = R(v_z)$  и сопоставления экспериментальных результатов с теоретическими. Очевидно, что величина  $R$  определяется характером изменения потенциала среды с глубиной вплоть до глубины  $d$ , определяемой затуханием нейтронной волны в веществе. Как видно из рис. 3, на котором представлены результаты расчета  $d$  в случае прямоугольной формы потенциала ( $v_{\text{гр}} = 5$  м/с),

величина коэффициента отражения определяется свойствами среды в слое толщиной порядка десятков ангстрем ( $v_z < v_{гр}$ ). Глубина затухания в случае  $v_z > v_{гр}$  составляет  $\sim 10^5 + 10^6 \text{ \AA}$  (для  $\eta = 10^{-3}$ ,  $v_{гр} = 5 \text{ м/с}$ ). Величина коэффициента отражения может быть при этом сравнительно велика (при  $v_z = 10 \text{ м/с}$  и  $\eta = 10^{-3}$   $R = 7 \cdot 10^{-3}$ ) и достаточна для изучения свойств вещества в слое ука-



Р и с. 3. Зависимость  $d$  от  $\eta$ . Сплошные кривые при  $v_{гр} = 5 \text{ м/с}$ , штриховые при  $v_{гр} = 9 \text{ м/с}$ . Кривые 1 и 1' соответствуют  $v_z = 2v_{гр}$ ; 2 и 2' -  $v_{гр}$ ; 3 и 3' -  $0,2v_{гр}$

занной толщины. Таким образом, изменяя  $v_z$  можно зондировать приповерхностную область вещества в пределах  $\sim 10 + 10^6 \text{ \AA}$  и исследовать при этом  $N_1 = N_1(z)$ ,  $\sigma_t^i = \sigma_t^i(k_1, z)$ ,  $\sigma_{н\psi}^i = \sigma_{н\psi}^i(k_1, z)$ ,  $\sigma_c^i = \sigma_c^i(k_1)$ . Большой интерес в опытах по отражению нейтронов представляет возможность проверки закона  $1/v$  для подбарьерных нейтронов. Независимо от формы потенциального барьера коэффициент отражения определяется  $v_z$ . В экспериментах с фиксированным  $v_z$ , но различными  $v$  (различными  $k_1$ ) постоянство  $R$  будет наблюдаться тогда, когда  $\text{Im } U \sim \sum_i \sigma_t^i k_1 = \text{const}$ , т.е., когда выполня-

ется закон  $1/V \left( \sigma_t^i \sim \frac{a_i}{k_1} \right)$ . Если для определения абсолютной величины  $\sigma_t^i$ , как отмечалось выше, необходимо знать вид потенциала взаимодействия, то для установления соотношения между средними сечениями поглощения  $\bar{\sigma}_c$  и неупругого рассеяния  $\bar{\sigma}_{\text{нУ}}$  (усреднение ведется по элементам, а в случае  $\bar{\sigma}_{\text{нУ}}$  и по эффективной области взаимодействия) в этом нет необходимости. Это соотношение может быть получено путем определения потерь нейтронов при отражении, отдельно из-за поглощения и из-за неупругого рассеяния. Потери нейтронов из-за поглощения могут быть найдены при регистрации частиц, возникающих при распаде компаунд-ядра (в случае урана-235 могут регистрироваться осколки деления). Вклад неупругого рассеяния может быть определен либо непосредственно, путем регистрации неупруго рассеиваемых нейтронов, либо исходя из результатов измерений полного коэффициента потерь и коэффициента потерь из-за поглощения. Поскольку  $\bar{\sigma}_{\text{нУ}} \sim 10$  барн [7], для проведения таких измерений удобно использовать вещества с  $\sigma_t \leq 100$  барн, например, Ag, In. Коэффициенты потерь для этих веществ при  $v_z/v_{\text{гД}} \sim 0,6$  составляют  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ , при  $v_z/v_{\text{гД}} \sim 1,0 - 1 \cdot 10^{-1}$ .

Таким образом, спектрометрические исследования отражения УХН и ОХН от поверхности конденсированных сред могут дать существенную информацию как о механизме взаимодействия нейтронов с веществом, так и о структуре поверхностного слоя вещества.

Поступила в редакцию  
29 марта 1979 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. A. Steyerl, Nucl. Instr. and Meth., 101, 295 (1972).
2. А. В. Антонов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № II, 38 (1978).
3. H. Schelenhofer, A. Steyerl, Phys. Rev. Lett., 39, 21, 1310 (1970).
4. А. В. Антонов, А. И. Исаков, В. И. Михеров, С. А. Старцев, Письма в ЖЭТФ, 20, вып. 9, 632 (1974).
5. И. М. Франк, Препринт ОИЯИ, РЗ-7810, 1974 г.
6. И. И. Гуревич, П. Э. Немировский, ЖЭТФ, 41, вып. 4 (10), 1175 (1961).
7. Ю. Ю. Косвинцев и др., Препринт ОИЯИ, РЗ-11594, 1978 г.