

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

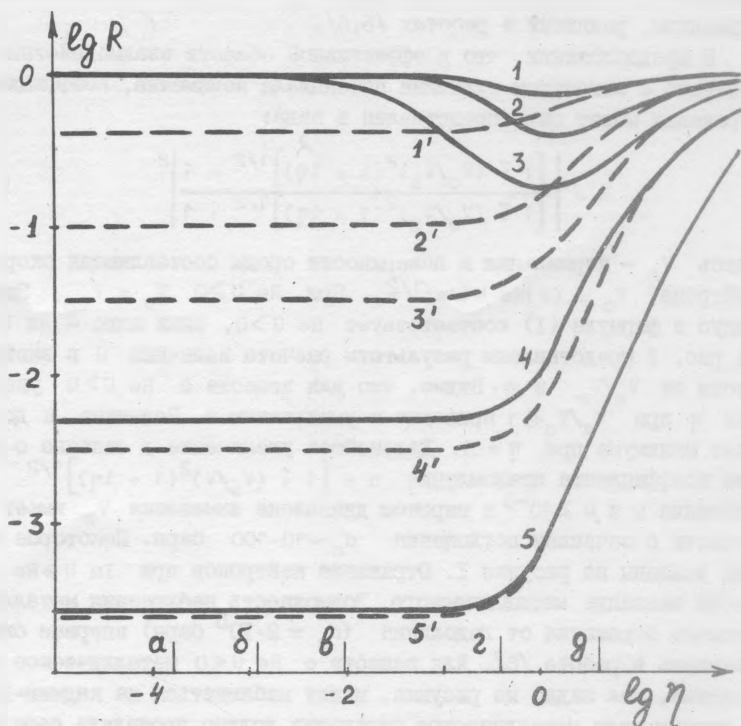
нейтронов v и характеристик среды $v_{гр}$ и η^*). При этом использован формализм, развитый в работах /5,6/.

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

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

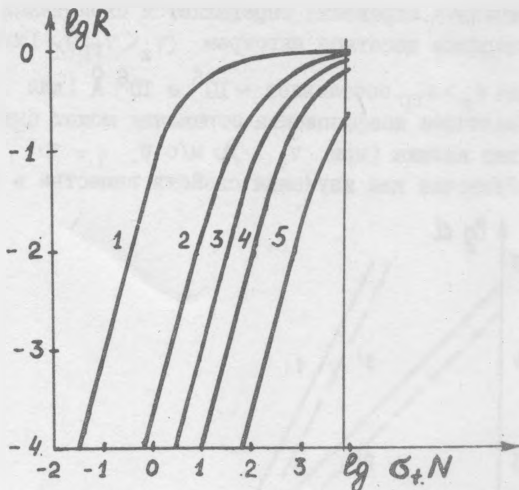
Здесь v_z - нормальная к поверхности среды составляющая скорости нейтрона, $v_0 = (2|\text{Re } U|/m)^{1/2}$. При $\text{Re } U > 0$ $v_0 = v_{гр}$. Знак минус в формуле (I) соответствует $\text{Re } U > 0$, знак плюс - $\text{Re } U < 0$. На рис. 1 представлены результаты расчета величины R в зависимости от v_z/v_0 и η . Видно, что для веществ с $\text{Re } U > 0$ увеличение η 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 η . 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 η для веществ: а - ^{64}Cu ; б - ^{107}Ag ; в - ^{115}In ; г - ^{113}Cd ; д - ^{157}Gd .

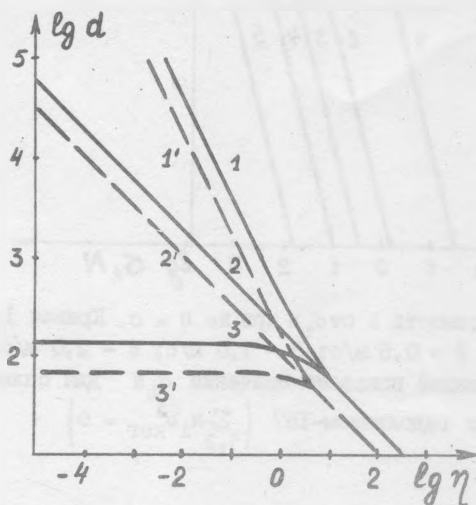
вия нейтрона со средой, форма которого в общем случае должна отличаться от прямоугольной. Предположение о прямоугольности означает, что $\text{Re } U \sim \sum_i N_i b_{\text{КОГ}}^i$ и $\text{Im } U \sim \sum_i N_i \sigma_t^i(k_1)k_1$ не зависят от Z . Здесь N_i - концентрация ядер i -того элемента; $b_{\text{КОГ}}^i$ - длина когерентного рассеяния i -того элемента; σ_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 η . 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 σ_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.