

ОТРАЖЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
ОТ СИЛЬНО ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД

В.В.Голиков, Е.Н.Кулагин, Ю.В.Никитенко

Приводятся результаты исследования отражения ультра-холодных нейтронов от сильно поглощающих образцов естественного кадмия и кадмия, обогащенного изотопом ^{113}Cd до 95%. Экспериментальные данные хорошо описываются теорией отражения УХН, использующей представления о комплексном показателе преломления для нейтронных волн. Из теоретического анализа следует, что в случае естественной смеси изотопов кадмия, имеющей положительную длину рассеяния, захват нейтронов кадмием снижает величину коэффициента отражения УХН. Наоборот, при отрицательной длине рассеяния, которую имеет ^{113}Cd , захват нейтронов увеличивает коэффициент отражения. При учете роли окисной пленки на поверхности кадмия экспериментальные результаты согласуются с расчетом.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Reflection of UCN from Strongly Absorbing Media

V.V.Golikov, E.N.Kulagin, Yu.V.Nikitenko

The results are reported of the study of UCN reflection from strongly absorbing samples of natural cadmium and of cadmium enriched with ^{113}Cd isotope up to 95%. The experimental data are well described in the framework of the theory of UCN reflection which uses the complex reflection index for the refraction of neutron waves. It follows from theoretical analysis that for the natural mixture of cadmium isotopes having a positive scattering length the neutron capture by cadmium reduces the UCN reflection index. On the contrary, if the scattering length is negative, as it is for ^{113}Cd , the neutron capture increases the reflection index. Experimental data are in agreement with calculated results if the oxide film on the cadmium surface is taken into account.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Введение

На основе универсальности явления, выражающегося в том, что всякая среда, эффективно поглощающая некоторое излучение, должна одновременно являться и эффективным отражателем этого излучения, в 1961 году было теоретически рассмотрено отражение ультрахолодных нейтронов /УХН/ от сильно поглощающих сред ^{/1,2/}. Полученные результаты показывают, что в среде с поглощением полное отражение нейтронов невозможно, однако в случае весьма сильных поглотителей коэффициент отражения УХН R в пределе малых скоростей нейтронов ($\lambda \gg 1/N\sigma_a$) должен иметь заметную величину

$$R = 1 - \frac{4mV_z}{\hbar N\sigma_a}, \quad /1/$$

где V_z - нормальная компонента скорости нейтрона в вакууме, N - число ядер среды в единице объема, σ_a - сечение поглощения нейтронов, $1/N\sigma_a$ - эффективная длина пробега нейтрона в среде, определяемая поглощением, λ и m - длина волны и масса нейтрона.

По аналогии с отражением электромагнитных волн от поверхности металла явление отражения УХН от сильно поглощающих сред было названо "металлическим" отражением нейтронов ^{/1,2/}.

Академик И.М.Франк, используя представление о комплексном показателе преломления $n = n' + in''$ для нейтронных волн, рассмотрел в 1974 г. ^{/3,4/} особенности поведения УХН и, в частности, их отражение от поглощающих сред. Было показано, что поскольку когерентная длина рассеяния нейтрона b - величина комплексная /а именно длина рассеяния определяет показатель преломления нейтронных волн/, то во всех случаях n - величина комплексная:

$$n_z^2 = (n'_z + in''_z)^2 = \left(1 - \frac{V_0^2}{V_z^2}\right) + i \frac{V_i^2}{V_z^2},$$

$$n'_z{}^2 = \frac{1}{2V_z^2} \left[(V_z^2 - V_0^2) + \sqrt{(V_z^2 - V_0^2)^2 + V_i^4} \right], \quad /2/$$

$$n''_z{}^2 = \frac{1}{2V_z^2} \left[(V_0^2 - V_z^2) + \sqrt{(V_z^2 - V_0^2)^2 + V_i^4} \right],$$

где $V_0^2 = \frac{\hbar^2 Nb'}{m^2}$; $V_i^2 = \frac{\hbar^2}{m^2} \frac{Nb''}{\pi} = \frac{\hbar}{m} N\sigma_a(V) \cdot V$; b' и b'' - действительная и мнимая части длины рассеяния.

В области УХН /при $V_z < V_0$ / в случае ядер с обычным сечением поглощения $((V_z^2 - V_0^2)^2 > V_i^4)$ мнимая часть показателя преломления для нейтронных волн становится больше действительной: $n_z'' > n_z'$. Эта особенность характерна для отражения электромагнитных волн оптического диапазона от поверхности металлов, и, как подчеркнуто в /4/, следовательно, должна проявиться аналогия отражения и поглощения УХН с оптикой металлов. В случае нейтронных волн величина n_z' оказывается пропорциональной сечению поглощения σ_a , а n_z'' зависит только от V_0 и V_z . Поэтому чем меньше сечение поглощения σ_a , тем меньше n_z' и тем больше коэффициент отражения УХН.

При отражении УХН от сильно поглощающих сред $((V_z^2 - V_0^2)^2 < V_i^4)$ в пределе малых скоростей нейтронов мнимая часть показателя преломления оказывается порядка действительной: $n_z'' \sim n_z'$, причем $|n_z| \gg 1$. Такое поведение коэффициента преломления характерно при отражении металлами электромагнитного излучения радиодиапазона. В этом случае следует ожидать возрастания коэффициента отражения УХН с увеличением сечения поглощения нейтронов.

Из работы /4/ следует, что в общем случае коэффициент отражения нейтронов R поглощающей средой

$$R = \frac{(n_z' - 1)^2 + n_z''^2}{(n_z' + 1)^2 + n_z''^2} = \quad /3/$$

$$= \frac{(V_z^2 + \sqrt{(V_z^2 - V_0^2)^2 + V_i^4}) - \sqrt{2} \cdot V_z \sqrt{(V_z^2 - V_0^2) + \sqrt{(V_z^2 - V_0^2)^2 + V_i^4}}}{(V_z^2 + \sqrt{(V_z^2 - V_0^2)^2 + V_i^4}) + \sqrt{2} \cdot V_z \sqrt{(V_z^2 - V_0^2) + \sqrt{(V_z^2 - V_0^2)^2 + V_i^4}}}$$

Естественно, выражение /1/ для коэффициента отражения R является частным случаем формулы /3/ в пределе малых скоростей нейтронов ($V_z \ll V_i$) при $V_i^4 \gg (V_z^2 - V_0^2)^2$.

В настоящей работе сообщаются экспериментальные результаты исследования отражения нейтронов от сильно поглощающих образцов естественного кадмия и кадмия чистотой 99,95%, обогащенного изотопом ^{113}Cd до 95% /содержание изотопа ^{113}Cd в естественной смеси 12,26%/. Выбор кадмия в качестве объекта исследования обусловлен тем, что мнимая часть длины рассеяния в обоих случаях сравнима по величине с действительной и следует ожидать ее влияния на величину коэффициента отражения нейтронов /5/. В единицах 10^{-12} см в области УХН:

$$b = b' - ib'' = \begin{cases} +0,444 - 0,053i & \text{для естественного Cd} \\ -0,74 - 0,43i & \text{для } ^{113}\text{Cd}. \end{cases}$$

Подчеркнем, что изотоп ^{113}Cd обладает отрицательной длиной рассеяния, а естественный кадмий - положительной. V_0^2 и V_1^2 имеют следующие значения: для естественного кадмия: $V_0^2 = 10,22 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$, $V_1^2 = 1,21 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$; для ^{113}Cd $V_0^2 = -17,03 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$, $V_1^2 = 9,9 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$.

1. Методика эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1а,б. На выходе канала УХН реактора ИБР-2^{7/8}, по которому поступают нейтроны с интервалом скоростей /3,37÷5,67/ мс^{-1} , подсоединен одним из своих отводов тройник 2, изготовленный из медных электрополированных труб. К двум другим отводам тройника подсоединены детектор 3 и образец 4. Детектор и образец могут меняться местами.

В^{7/7} показано, что при установке в тройнике образца с площадью S_0 и коэффициентом отражения $R_0(V)$ счет детектора J_d в обеих геометриях расположения образца может быть записан в единой форме с учетом неоднородного и неизотропного потока УХН:

$$J_{d1,2} = \int_{V_{\text{мин}}}^{V_{\text{макс}}} J_{\text{эфф}}(V) \frac{n_{z,y} \cdot \mu_{D,z,y}(V) \cdot S_d dV}{S_{\text{эфф}}(V) + n_{z,y} \cdot \mu_{D,z,y}(V) \cdot S_d + n_{y,z} \cdot \mu_{0y,z}(V) \cdot S_0} \quad /4/$$

$$= \int_{V_{\text{мин}}}^{V_{\text{макс}}} \mu_{D,z,y}(V) \cdot S_d \cdot I_{z,y}(V) dV,$$

где $J_{d1,2}$ - счет детектора при расположении образца по оси нейтроновода /ось y / и перпендикулярно оси нейтроновода /ось z / соответственно; $J_{\text{эфф}}(V)$ - полный поглощаемый поток УХН; $S_{\text{эфф}}(V)$ - "эффективная" поглощающая площадь канала УХН; S_d - площадь детектора; n_z, n_y - плотность потока УХН в направлениях осей z и y ; $\mu_D(V)$ и $\mu_0(V)$ - усредненные по углам падения коэффициенты поглощения УХН детектором и образцом:

$$\mu_0(V) = 1 - R_0(V),$$

$$\mu_{z,y}(V) = \frac{\int_0^1 \mu_{z,y}(V, \cos \theta) \cdot A_{z,y}(\cos \theta) d \cos^2 \theta}{\int_0^1 A_{z,y}(\cos \theta) d \cos^2 \theta},$$

где $A_z(\cos \theta_z) = \cos^3 \theta_z$; $A_y(\cos \theta_y) = \cos \theta_y$ - анизотропия потока УХН в направлениях осей z и y соответственно; $V_{\text{макс}} = 5,67 \text{ мс}^{-1}$ и $V_{\text{мин}} = 3,37 \text{ мс}^{-1}$ - максимальная и минимальная скорости УХН в канале.

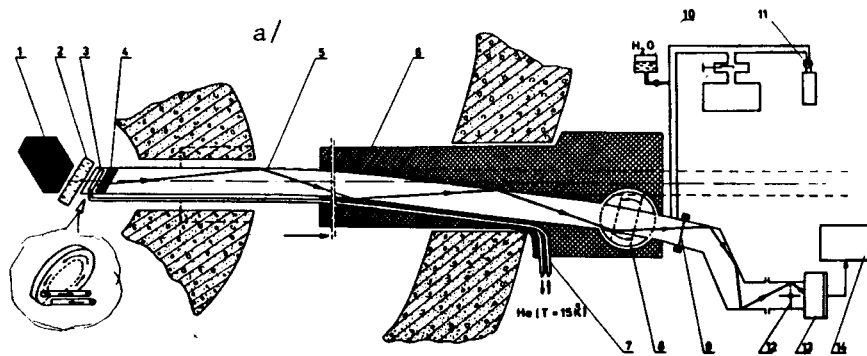
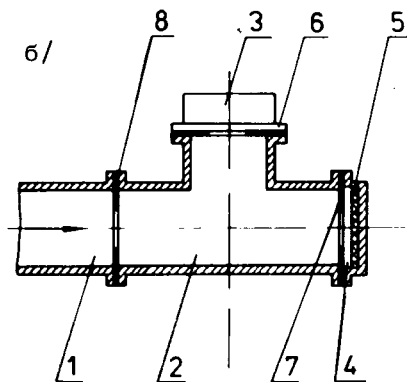


Рис.1. а/ Схема канала УХН:

1 - активная зона реактора, 2 - замедлитель, 3 - конвертор УХН, 4 - дырочный замедлитель, 5 - изогнутый нейтронвод, 6 - защита, 7 - криогенные трубопроводы, 8 - защитный шиббер, 9 - вакуумная мембрана, 10 - вода для намораживания конвертора, 11 - система вакуумной безмасляной откачки, 12 - шторка, 13 - тройник, 14 - электронная аппаратура.



б/ Схема устройства для измерения коэффициента отражения газа УХН, 1 - канал УХН, 2 - тройник, 3 - детектор, 4 - исследуемый образец, 5 - поглотитель УХН /полиэтилен/, 6, 7, 8 - диафрагма.

Учитывая, что для спектра УХН $I(V)$ интегральный коэффициент отражения от меди $\bar{R}_{Cu} = 1$ /с точностью $\sim 0,1\%$ /, а от полиэтилена $\bar{R}_{CH_2} = 0$ /с точностью $\sim 1\%$ /, согласно [7] коэффициент отражения УХН от образца \bar{R}_0 можно выразить через счета детектора при наличии (J_{CH_2}) и отсутствии (J_{Cu}) в тройнике поглотителя /полиэтилена/ площадью S_{CH_2} :

$$\bar{R}_0 = 1 - \frac{1/J_0 - 1/J_{Cu}}{1/J_{CH_2} - 1/J_{Cu}} \cdot \frac{S_{CH_2}}{S_0}, \quad /5/$$

где J_0 - счет детектора при постановке в тройник исследуемого образца площадью S_0 .

Тройник может вращаться вокруг оси нейтронвода. При повороте тройника на 90° при сохранении детектора на горизонтальной оси у спектр потока УХН на образце меняется из-за прохождения энергетического барьера, создаваемого

гравитационным полем. Поскольку энергия взаимодействия УХН с гравитационным полем $W = mgh$, то достичь образца могут только нейтроны, у которых вертикальная компонента скорости $V_z > \sqrt{2gh}$ / g - ускорение свободного падения, h - высота подъема в поле тяжести относительно транспортного нейтроновода/. Использование замедления УХН в гравитационном поле позволяет проводить измерения зависимости коэффициента отражения R от скорости нейтронов, изменяя высоту подъема образца.

Выражение /5/ для интегрального коэффициента отражения \bar{R} справедливо и тогда, когда исследуемый образец, полиэтилен и медь расположены на высоте h . В этом случае \bar{R} является средним значением коэффициента отражения по спектру УХН на высоте h .

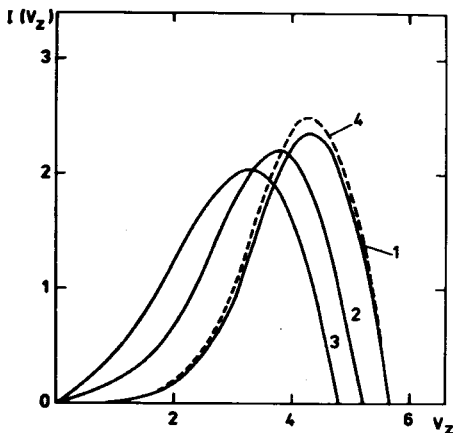


Рис.2. Спектры распределения УХН по проекции скорости V_z в зависимости от высоты подъема образца ^{118}Cd : 1 - $h = 0$ / $\bar{V}_z = 4,06 \text{ мс}^{-1}$ / , 2 - $h = 0,25 \text{ м}$ / $\bar{V}_z = 3,4 \text{ мс}^{-1}$ / , 3 - $h = 0,45 \text{ м}$ / $\bar{V}_z = 2,9 \text{ мс}^{-1}$ / , 4 - образец $\text{Cd}_{\text{ест}}$ $h = 0$ / $\bar{V}_z = 4,05 \text{ мс}^{-1}$ / .

На рис.2 представлены спектры $I(V_z)$ распределения УХН по проекции скорости V_z на высоте h , рассчитанные при наличии в качестве образца изотопа ^{118}Cd . Проведенные аналогичные расчеты с естественной смесью изотопов $\text{Cd}_{\text{ест}}$ показали, что среднее значение компоненты скорости \bar{V}_z слабо зависит от типа образца. Так, для ^{118}Cd при $h = 0, 0,25; 0,45 \text{ м}$ средние значения \bar{V}_z равны $4,06 \text{ мс}^{-1}, 3,39 \text{ мс}^{-1}$ и $2,90 \text{ мс}^{-1}$ соответственно; для $\text{Cd}_{\text{ест}}$ при тех же значениях h \bar{V}_z равно $4,05 \text{ мс}^{-1}, 3,38 \text{ мс}^{-1}$ и $2,89 \text{ мс}^{-1}$.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Суммарная площадь образца изотопа ^{118}Cd составляла $72,5 \text{ см}^2$ при средней толщине $\sim 5 \text{ мм}$, а образец естественного кадмия представлял собой листовой прокат толщиной $0,5 \text{ мм}$, максимальной площадью 314 см^2 .

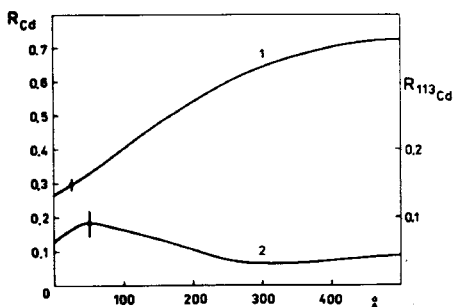


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения \bar{R} от толщины окисной пленки на поверхности кадмия. 1 - система Cd+CdO, 2 - система $^{113}\text{Cd} + ^{113}\text{CdO}$.

Поскольку глубина проникновения УХН в среду при отражении составляет величину порядка 100 \AA , для правильной интерпретации экспериментальных результатов необходимо знать состояние поверхности исследуемого образца. Известно, что за исключением золота ни один чистый металл и ни один сплав не обладает стойкостью против окисления на воздухе при комнатной температуре. Согласно литературным данным ^{/8/} при действии влажного воздуха на поверхности кадмия образуется пленка окиси CdO плотностью $\rho = 8,2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

На рис.3 представлены результаты измерений коэффициента отражения \bar{R} от естественного кадмия и изотопа ^{113}Cd , когда и образец, и детектор располагались в плоскости транспортного нейтропровода $/h = 0/$. В обоих случаях полученные значения \bar{R} не могут быть объяснены теоретическим коэффициентом отражения УХН только от металлического кадмия.

Кривые рис.3 изображают зависимость коэффициента отражения Cd и ^{113}Cd от толщины окисной пленки на поверхности металлического кадмия. /Для CdO $V_0^2 = 19,25 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$, $V_i^2 = 0,995 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$; для ^{113}CdO $V_0^2 = -3,11 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$, $V_i^2 = 8,12 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ /. Расчет коэффициента отражения \bar{R} производился при использовании рекуррентных соотношений для амплитуды отражения нейтронной волны от двухслойной системы "окись-металл" ^{/9/}.

Различный характер зависимости коэффициента отражения УХН от толщины окисла на поверхности металла для ^{113}Cd и Cd_{ест} связан с различием знаков у действительной части длины рассеяния названных ядер.

Из теоретических кривых рис.3 и экспериментальных значений коэффициента отражения \bar{R} было определено, что поверхность кадмия покрыта слоем окиси CdO толщиной $a = 25 \pm 15 \text{ \AA}$; в случае ^{113}Cd - толщина $^{113}\text{CdO} = 50 \pm 40 \text{ \AA}$.

На рис.4 и 5 представлены теоретически ожидаемые зависимости усредненного по спектру УХН коэффициента отражения \bar{R} нейтронов от величины сечения поглощения в еди-

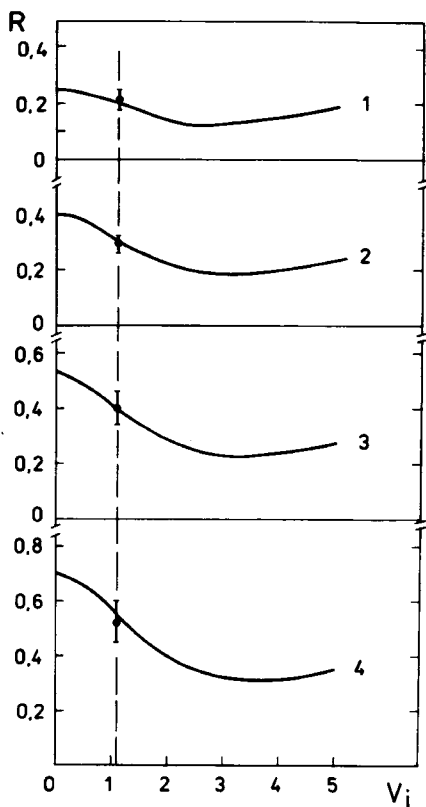


Рис.4. Зависимость усредненного по спектру УХН коэффициента отражения R от величины сечения поглощения в единицах $V_i / \text{мс}^{-1}$ / для системы $\text{Cd} + \text{CdO}$. Теоретические кривые и экспериментальные данные приведены для случаев: 1 - $\bar{V}_z = 4,06 \text{ мс}^{-1}$; 2 - $\bar{V}_z = 3,65 \text{ мс}^{-1}$; 3 - $\bar{V}_z = 3,40 \text{ мс}^{-1}$; 4 - $\bar{V}_z = 2,9 \text{ мс}^{-1}$.

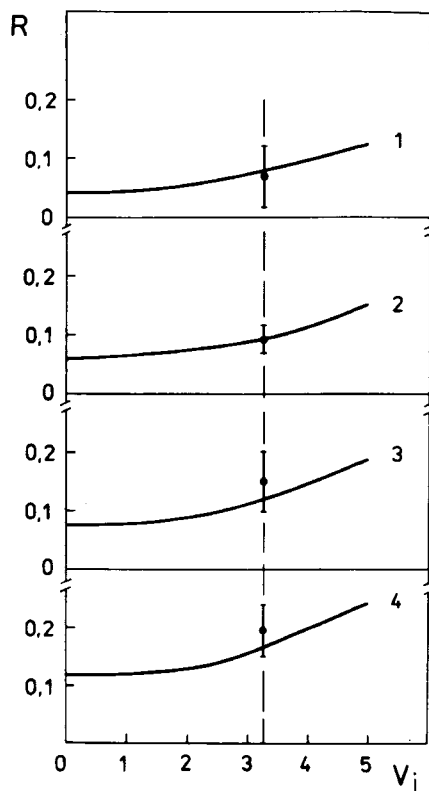


Рис.5. Зависимость усредненного по спектру УХН коэффициента отражения R от величины сечения поглощения в единицах $V_i / \text{мс}^{-1}$ / для системы $^{113}\text{Cd} + ^{113}\text{CdO}$. Теоретические кривые и экспериментальные данные приведены для случаев: 1 - $\bar{V}_z = 4,06 \text{ мс}^{-1}$; 2 - $\bar{V}_z = 3,65 \text{ мс}^{-1}$; 3 - $\bar{V}_z = 3,40 \text{ мс}^{-1}$; 4 - $\bar{V}_z = 2,9 \text{ мс}^{-1}$.

ницах V_i и полученные экспериментальные данные. При учете наличия окисной пленки на поверхности кадмия экспериментальные результаты хорошо описываются теорией отражения УХН от сильно поглощающих сред, использующей представления о комплексном показателе преломления для нейтронных волн /4/.

Согласно теоретическим предсказаниям /4/ для ядер с положительной длиной рассеяния /случай естественной смеси

изотопов кадмия/ при $V_z < V_0\sqrt{3/2}$ коэффициент отражения нейтронов /3/ с ростом сечения поглощения сначала падает, проходит через минимальное значение и при дальнейшем увеличении сечения поглощения начинает возрастать /рис.4/. Рост коэффициента отражения начинается с

$$V_i = V_0 \left(3 - 2 \frac{V_z^2}{V_0^2} \right)^{1/4}, \quad /6/$$

причем при этой величине V_i коэффициент отражения достигает минимального значения $R_{\min} = \frac{V_0\sqrt{2} - V_z}{V_0\sqrt{2} + V_z}$.

Условие /6/ не выполняется как в случае исследованной в данном эксперименте системы Cd + CdO, так и в случае такого сильного поглотителя, как изотоп ^{157}Gd , который ранее /1,2/ предлагался в качестве объекта исследования для обнаружения "металлического" отражения нейтронов. В результате захват нейтронов кадмием снижает величину коэффициента отражения ультрахолодных нейтронов.

Предсказываемый эффект увеличения коэффициента отражения при захвате нейтронов /1,4/ обнаружен при отражении нейтронов от системы $^{118}\text{Cd} + ^{118}\text{CdO}$ -среды, содержащей сильно поглощающие ядра с отрицательной длиной рассеяния /рис.5/. При $V_z = 2,9 \text{ мс}^{-1}$ сечение поглощения увеличивает коэффициент отражения на 40% /кривая 4, рис.5/.

Авторы глубоко признательны академику И.М.Франку, беседе с которым способствовали пониманию многих вопросов, рассмотренных в данной работе, а также В.П.Алфименкову и Л.Б.Пикельнеру за полезные дискуссии и помощь при оценке значений длин рассеяния кадмия.

Литература

1. Гуревич И.И., Немировский П.Э. ЖЭТФ, 1961, 41, с.1175.
2. Гуревич И.И., Тарасов Л.В. Физика нейтронов низких энергий. "Наука", М., 1965, с.296.
3. Франк И.М. ОИЯИ, РЗ-7809, Дубна, 1974.
4. Франк И.М. ОИЯИ, РЗ-7810, Дубна, 1974.
5. Mughabghab S.F. et al. Neutron Cross Section, 1981, vol.1, part A.
6. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. ОИЯИ, РЗ-85-285, Дубна, 1985.
7. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. ОИЯИ, РЗ-85-286, Дубна, 1985.
8. Чижиков Д.М. Кадмий. "Наука", М., 1967, с.17.
9. Игнатович В.К. ОИЯИ, Р4-10778, Дубна, 1977.

Рукопись поступила 28 мая 1985 года.