

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Н749

P3-87-408

М.И.Новопольцев*, Ю.Н.Покотилловский

ИЗМЕРЕНИЕ ОТРАЖЕНИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
ОТ ПОВЕРХНОСТИ ВЕЩЕСТВ
С БОЛЬШИМ СЕЧЕНИЕМ ЗАХВАТА

* Мордовский государственный университет,
Саранск

1987

В работе^{/1/} было обращено внимание на то, что, как и в оптике, для сильных поглотителей нейтронов должно наблюдаться увеличение отражения нейтронов от поверхности раздела вакуум - поглощающая среда. В оптике этот эффект известен как "металлическое" отражение света^{/2,3/}. Заметной величина отражения становится тогда, когда длина пробега излучения в среде становится порядка или меньше длины волны.

Как известно, амплитуда отраженной от поверхности раздела нейтронной волны выражается следующим образом:

$$r = \frac{p_{\perp} - p'_{\perp}}{p_{\perp} + p'_{\perp}}, \quad /1/$$

где p_{\perp} и $p'_{\perp} = \sqrt{p_{\perp}^2 - 2mU}$ - соответственно нормальные к поверхности раздела компоненты импульса нейтрона в вакууме и веществе,

$$U = U_r + iU_i \approx \frac{p_r^2}{2m} - i \frac{p_i^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} 4\pi \sum_j N_j b_j \quad /2/$$

- потенциал взаимодействия нейтрона со средой^{/4/}. Здесь N_j - число ядер сорта j в единице объема среды, b_j - комплексная длина рассеяния нейтрона на ядрах среды, m - масса нейтрона.

Из приведенных выражений видно, что при чисто мнимой b и $p_{\perp}^2 \sim 2|U|m$ коэффициент отражения $R = |r|^2$ отличен от нуля и при $p_{\perp}^2 \ll 2|U|m$ $R \rightarrow 1$. Поскольку по оптической теореме $\text{Im}b = \frac{\sigma p}{2\hbar}$, где σ - полное сечение взаимодействия нейтрона со средой, p - импульс нейтрона в среде, то в пределе малых энергий увеличение поглощения приводит к увеличению коэффициента отражения*.

* Отметим, что здесь нет полной аналогии с оптикой, где при малых частотах в типичных металлах коэффициент преломления имеет вид $n = A \exp(-i(\pi/4))$, в оптическом диапазоне $n = Bi$, а для медленных нейтронов при очень большом поглощении $n = C \exp(i(\pi/4))$ /A, B, C действительны/.

Точное выражение для коэффициента отражения в общем случае содержится в лекциях /5/ :

$$R = 1 - \frac{2\sqrt{2} p_{\perp} \{ (p_{\perp}^2 - p_r^2) + [(p_{\perp}^2 - p_r^2)^2 + p_i^4]^{1/2} \}^{1/2}}{p_{\perp}^2 + [(p_{\perp}^2 - p_r^2)^2 + p_i^4]^{1/2} + \sqrt{2} p_{\perp} \{ (p_{\perp}^2 - p_r^2) + [(p_{\perp}^2 - p_r^2)^2 + p_i^4]^{1/2} \}^{1/2}} \quad /3/$$

В случае очень сильного поглощения $p_i \gg p_r$ и малой энергии нейтрона $p_{\perp} \ll p_i$ формула /3/ дает выражение для коэффициента отражения:

$$R = 1 - 2\sqrt{2} \frac{p_{\perp}}{p_i} = 1 - \frac{4p_{\perp}}{\hbar N \sigma} \quad /4/$$

то есть формулу /13/ из работы /1/. Последнее равенство в /4/ получается при учете /2/ и того, что в указанном пределе $\text{Re} p_{\perp}' = \frac{p_i}{\sqrt{2}}$.

Для элементов с большим сечением захвата длина рассеяния заметно изменяется даже в диапазоне энергий тепловых нейтронов из-за наличия близких резонансов. Энергетический ход длины рассеяния определяется /6/ формулой

$$b = b_0 + \sum_i \frac{2 \Gamma_{ni} (E - E_i) g_i}{k_i [4(E - E_i)^2 + \Gamma_i^2]} - i \sum_i \frac{\Gamma_{ni} \Gamma_i g_i}{k_i [4(E - E_i)^2 + \Gamma_i^2]} \quad /5/$$

где b_0 - длина потенциального рассеяния, Γ_i и Γ_{ni} - полная и нейтронная ширины резонанса при энергии E_i , g_i - статистический фактор, k_i - волновой вектор для энергии E_i .

В нашей работе экспериментально исследована энергетическая зависимость коэффициента отражения ультрахолодных нейтронов от поверхности некоторых сильных поглотителей нейтронов: ^{113}Cd , ^{155}Gd .

Схема установки показана на рис. 1. Нейтроны поступали по вакуумированному нейтроноводу 1 и через пленочный полиэтиленовый коллиматор 2 падали под углом 45° на отражающее зеркало 3, размещенное в вакуумном кожухе 4. Отраженные от зеркала нейтроны попадали в зеркальный нейтроновод 5 и далее на вход корреляционного времяпролетного спектрометра /7,8/. Интенсивность нейтронов на входе в установку измерялась с помощью монитора 6. Отражающее зеркало было изготовлено из хорошо полированной нержавеющей стали, на его поверхность напылялись в вакууме тонкие слои $//3-5/ \cdot 10^3 \text{ \AA}/$ исследуемых элементов. Весь рабочий объем: подводные нейтроноводы, камера отражателя и спектрометр, откачивался несколькими сорбционными и маг-

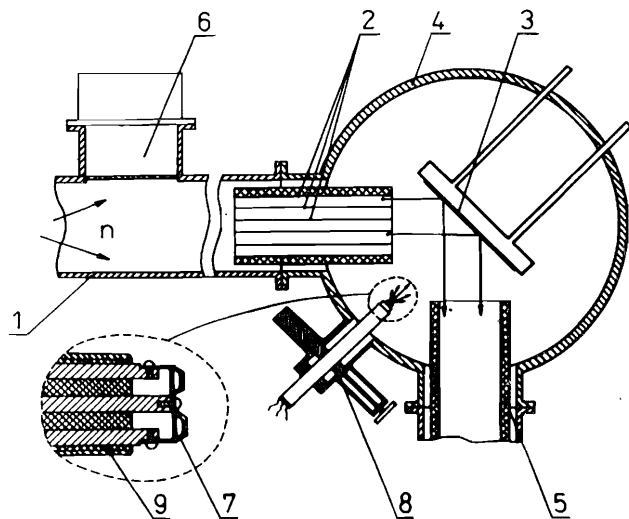


Рис. 1. Схема установки для исследования отражения УХН. Пояснения - в тексте.

ниторазрядными насосами до давления $< 10^{-4}$ тор. Для испарения изотопов и изотопных смесей использовались миниатюрные танталовые и молибденовые ампулы 7 с малым /диаметр ~ 1 мм/ отверстием для испарения.

Такая конструкция обеспечивала хорошее перемешивание пара перед испарением на подложку изотопных смесей. Устройство испарения давало возможность производить без нарушения вакуума до шести последовательных испарений изотопов на подложку. Имелся также шлюз 8 для извлечения и ввода штанги 9 с ампулами без напуска воздуха в установку.

Определение энергетической зависимости коэффициента отражения нейтронов от различных поверхностей производилось следующим образом. Вначале измерялся спектр нейтронов, отраженных от чистой поверхности зеркала из нержавеющей стали, коэффициент отражения от которой в использованном диапазоне энергий нейтронов принимался нами за единицу. Последнее обстоятельство установлено в ряде экспериментов по хранению ультрахолодных нейтронов в сосудах, где показано, что коэффициент отражения от нержавеющей стали отличается от единицы не более чем на $10^{-3}/9/$. Затем измерялся спектр нейтронов, отраженных от напыленного исследуемого вещества, впоследствии напыленный слой с поверхности зеркала удалялся и снова измерялся исходный спектр для контроля неизменности исходного спектра. Кроме того, для контроля постоянства свойств отражающей поверхности

непрерывно измерялась интегральная интенсивность отраженных нейтронов. Для смещения спектра падающих нейтронов в область более низких энергий все устройство вместе со спектрометром в некоторых измерениях поднималось относительно транспортного нейтронвода на высоту $H = 50$ см, что приводило к гравитационному замедлению нейтронов на ~ 50 нэВ.

На рис. 2 показан спектр падающих нейтронов при измерениях на высоте 50 см и нулевой высоте, а на рис. 3 представлены результаты измерения зависимости коэффициента отражения нейтронов от нормальной компоненты скорости нейтронов для различных сильнопоглощающих веществ.

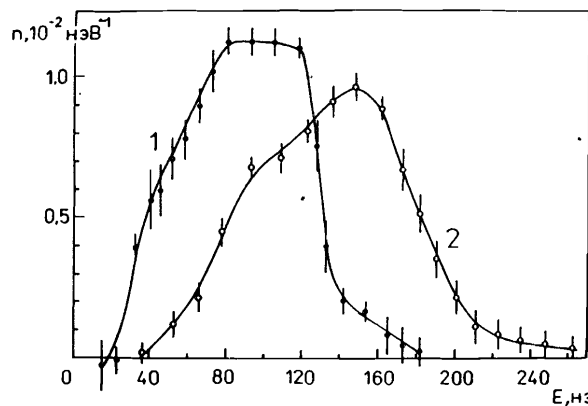
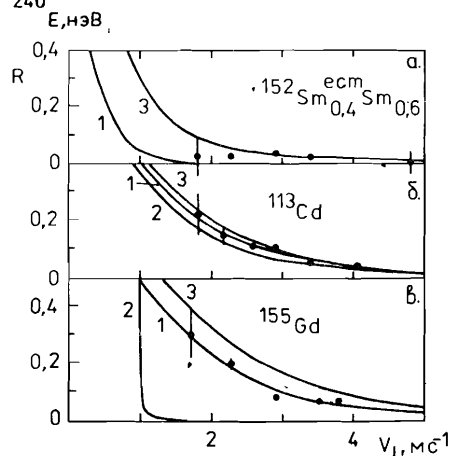


Рис. 2. Спектр нейтронов, отраженных от поверхности нержавеющей стали при: 1/ расположении установки со спектрометром на высоте $H = 50$ см относительно канала УХН; 2/ $H = 0$.

Рис. 3. Экспериментальные данные и расчетные кривые для коэффициента отражения нейтронов от соответствующих материалов. 1 - потенциал вычисляется в соответствии с амплитудами, приведенными в /6/; 2 - то же, но $\text{Im}b = 0$; 3 - амплитуды из /6/ при 50 А слое окисла соответствующего металла.



Для получения достоверных результатов принципиально важно было перед каждым испарением исследуемого вещества под-

готовить зеркальную, но не отражающую нейтроны подложку. Такая подложка создавалась напылением смеси изотопов самария ^{152}Sm 40% + $^{e\text{cm}}\text{Sm}$ 60%. Такой состав подбирался из требования, чтобы $\text{Re}\sum N_j b_j = 0$, а мнимая часть потенциала была бы еще не настолько велика, чтобы могло проявиться заметное "металлическое" отражение нейтронов. На рис. 3 показаны экспериментальная и расчетная зависимости от нормальной к поверхности компоненты скорости коэффициента отражения от такой смеси. Видно, что коэффициент отражения в доступном диапазоне энергий не превышает 3%, однако наблюдается заметное отличие от расчета. Оно может быть вызвано, во-первых, некоторым окислением металла в вакууме, во-вторых, неполным соответствием напыленной смеси заданной исходно при смешивании изотопов. На рис. 3 показаны также коэффициенты отражения нейтронов от поверхности зеркал из ^{113}Cd и ^{155}Gd , там же приведены соответствующие расчетные кривые, полученные в различных предположениях о виде потенциала напыленного слоя. При этом использовались вычисленные в соответствии с /5/ длины рассеяния для использованных нами изотопных смесей*:

$$\begin{aligned} &^{152}\text{Sm}_{0,4} + {}^{e\text{cm}}\text{Sm}_{0,6}, & b &= (0,06 - i0,59)f, \\ &^{113}\text{Cd}, & b &= (-6,88 - i4,13)f, & /6/ \\ &^{155}\text{Gd}, & b &= (0,67 - i13,04)f. \end{aligned}$$

Для ^{155}Gd , как видно из рис. 3, наблюдается в чистом виде отражение нейтронов, обусловленное мнимой частью потенциала. Для ^{113}Cd $\text{Re}b > \text{Im}b$, и вклад $\text{Im}b$ в отражение невелик. Тем не менее экспериментальные данные наилучшим образом согласуются с кривой на рис. 3б / χ^2 для кривых 1, 2 и 3, соответственно, равны 6,5; 19,8 и 9,3/.

На рис. 4 представлены результаты контрольных измерений полной интенсивности отраженных нейтронов, начинаемых сразу же /в пределах одной минуты/ после окончания испарения. Из приведенных данных видно, что в течение измерений коэффициент отражения не менялся.

* Состав ^{113}Cd : $^{113}\text{Cd} - 95,8\%$, $^{110}\text{Cd} - 0,12\%$, $^{111}\text{Cd} - 0,12\%$, $^{112}\text{Cd} - 1,28\%$, $^{114}\text{Cd} - 2,47\%$, $^{116}\text{Cd} - 0,21\%$, ^{106}Cd и $^{108}\text{Cd} - 0,01\%$, химические примеси $< 0,05\%$. Состав ^{155}Gd : $^{155}\text{Gd} - 90,7\%$, $^{154}\text{Gd} - 0,4\%$, $^{156}\text{Gd} - 6,7\%$, $^{157}\text{Gd} - 1,3\%$, $^{158}\text{Gd} - 0,7\%$, $^{160}\text{Gd} - 0,2\%$, химические примеси, Fe - 0,4%, Ca - 0,15%, Cu - 0,07%, Si - 0,03%, Al - 0,03%. Состав ^{152}Sm : $^{152}\text{Sm} - 98,4\%$, $^{144}\text{Sm} - 0,03\%$, $^{147}\text{Sm} - 0,16\%$, $^{148}\text{Sm} - 0,21\%$, $^{149}\text{Sm} - 0,23\%$, $^{150}\text{Sm} - 0,24\%$, $^{154}\text{Sm} - 0,74\%$, химические примеси $< 0,2\%$.

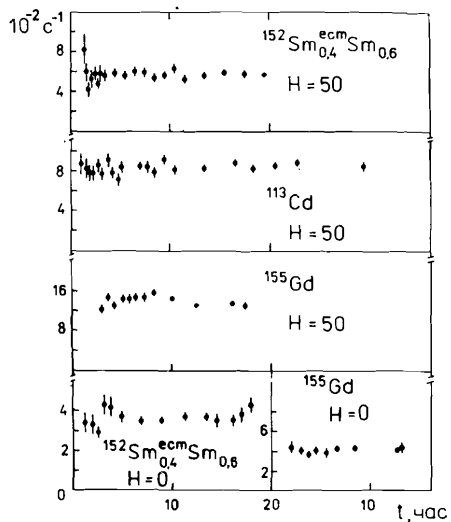


Рис. 4. Контрольные измерения полной интенсивности отраженных нейтронов.

Кроме условия $Imb \gg Reb$ второе условие $p_{\perp} \ll p_i$, где была бы применима формула /4/ /при этом $R \rightarrow 1/$ для реально существующих в природе изотопов и их возможных смесей, выполняется при $v_{\perp} < 1$ м/с. Это было недоступно в условиях описанных экспериментов*.

В заключение авторы выражают признательность В.И.Морозову, Ю.Н.Панину и Е.В.Рогову за предоставление возможности

проведения измерений на канале ультрахолодных нейтронов /10/, а также Ю.В.Никитенко за помощь при подготовке экспериментальной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич И.И., Немировский П.Э. - ЖЭТФ, 1961, 41, с.1175.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. Изд.9-е, М.: Наука, 1976, с.486.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1959, с.76.
4. Гуревич И.И., Тарасов Л.В. Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965.
5. Франк И.М. ОИЯИ, РЗ-7809, РЗ-7810, Дубна, 1974.
6. Mughabghab S.F. - Neutron Cross Sections, 1984, Academic Press, N.Y.
7. Новопольцев М.И., Покотилловский Ю.Н. ОИЯИ, РЗ-81-828, Дубна, 1981.
8. Новопольцев М.И., Покотилловский Ю.Н. ОИЯИ, РЗ-85-843, Дубна, 1985.
9. Игнатович В.К., Лушиков В.И. - ЭЧАЯ, 1984, 15/2/, с.330.

* Эксперименты по измерению интегральных коэффициентов отражения УХН от сильно поглощающих веществ описаны в работах /11,12/.

10. Морозов В.И., Панин Ю.Н., Рогов Е.В. Препринт ИАЭ-4410/2, М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.
11. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. Краткие сообщения ОИЯИ № 9-85, Дубна, 1985, с.26.
12. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. Сообщение ОИЯИ, РЗ-86-767, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 июня 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
D3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
D1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
D9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
D7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
D2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Новопольцев М.И., Покотилковский Ю.Н. P3-87-408

Измерение отражения ультрахолодных нейтронов от поверхности веществ с большим сечением захвата

Измерена энергетическая зависимость коэффициента отражения ультрахолодных нейтронов от поверхности сильнопоглощающих элементов ^{113}Cd и ^{155}Gd . Образцы изготавливались методом термического испарения в вакууме непосредственно в нейтронном пучке. Спектры отраженных нейтронов измерялись с помощью времяпролетного корреляционного спектрометра. В случае ^{155}Gd , для которого реальная часть потенциала взаимодействия много меньше мнимой, наблюдался эффект "металлического" отражения нейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Novopoltsev M.I., Pokotilovskij Yu.N. P3-87-408

Measurement of Ultracold Neutron Reflection from the Surface of Samples with Large Capture Cross Section

The energy dependence of reflection coefficient of ultra-cold neutrons from ^{113}Cd and ^{155}Gd strongly absorbing element surface is measured. Samples were prepared by the method of thermal evaporation in vacuum directly in neutron beam. The spectra of reflected neutrons were measured with the correlation type of time-of-flight spectrometer. In the ^{155}Gd case for which real part of the interaction potential is more less than the imaginary part the effect of "metallic" reflection of neutrons is observed.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987