

УДК 539.17

НЕЙТРОННЫЕ СИЛОВЫЕ ФУНКЦИИ И ДЛИНЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ЧЕТНО-ЧЕТНЫХ ЯДРАХ

Д. А. Заикин, М. В. Мордовской, И. В. Суркова

В рамках двухфононного варианта оптической модели со связью каналов рассчитаны нейтронные силовые функции и длины потенциального рассеяния нейтронов на четно-четных сферических ядрах. Результаты расчетов хорошо согласуются со значениями, полученными из экспериментальных данных. Согласие достигнуто при использовании единого набора значений параметров оптической модели со связью каналов, полученного авторами ранее из анализа полной совокупности экспериментальных данных по нейтронным сечениям для энергий нейтронов в интервале 0,07 – 3,00 МэВ.

Нейтронные силовые функции на протяжении многих лет являются объектом экспериментальных и теоретических исследований, необходимых для дальнейшей разработки и уточнения оптической модели ядра при низких энергиях. Исследование нейтронных силовых функций имеет также важное значение для получения нейтронных сечений, особенно в тех случаях, когда проведение их измерений представляет большую трудность. Одновременно такие исследования являются важным источником информации о сечении образования составного ядра и, следовательно, о потенциале поглощения оптической модели (ОМ).

Описание нейтронных силовых функций в рамках ОМ удовлетворительно отражает в среднем их зависимость от A , при этом правильно описываются положения максимумов. Трудности же заключаются прежде всего в описании положений и величин глубоких минимумов s - и p -силовых функций S_0 (при $A \approx 120$) и S_1 (при $A \approx 54$).

В ряде работ предпринимались попытки улучшить описание s - и p -силовых функций как в рамках оптической модели со связью каналов (ОМСК), так и с использованием микроскопических или полумикроскопических моделей. Однако для более или менее удовлетворительного описания силовых функций в этих подходах требовалось либо делать дополнительные и малообоснованные предположения (как, например, предположение о различных радиусах действительной и мнимой частей ОП [1] или о сильной зависимости поглощения от орбитального момента нейтрона [2]), либо проводить индивидуальную подгонку параметров ОМСК [3], приводящую к сильному различию этих параметров для различных (даже соседних) ядер. Использование микроскопических и полумикроскопических моделей [4 – 8], несмотря на некоторые успехи, также не привело к единому описанию силовых функций совместно с другими нейтронными данными.

Проведенный в [9] анализ данных по неупругому рассеянию нейтронов с возбуждением коллективных уровней 2_1^+ в интервале энергии до нескольких сотен килоэлектрон-вольт в области порога реакции на четно-четных сферических и переходных ядрах с $46 \leq A \leq 206$, а также s -волновых нейтронных силовых функций с использованием простейшего однофононного варианта ОМСК показал, что в этом случае возможно удовлетворительно описать только часть экспериментальных данных едиными параметрами ОМСК. Отличие теоретических сечений и величин S_0 , рассчитанных с использованием единых параметров потенциала ОМСК в однофононном варианте, от экспериментальных могут быть связаны не только с разбросом индивидуальных параметров для конкретных изотопов, но и с использованием простейшего варианта ОМСК.

Другая сторона проблемы заключается в неточности определения экспериментальных нейтронных силовых функций [10]. При этом многие новые данные привели к весьма существенным для ряда изотопов изменениям экспериментальных значений нейтронных силовых функций S_0 и S_1 . Эти изменения, однако, оставили в силе ряд проблем, сформулированных ранее [11]. Прежде всего, по-прежнему областями неудовлетворительного теоретического описания остаются области массовых чисел между $3s$ - и $4s$ -, $3p$ - и $4p$ -резонансами, в рамках ОМ не объясняется уменьшение S_0 с ростом A для изотопических цепочек ряда элементов и т.д. Таким образом, накопленная за многие годы экспериментальная информация по S_0 , S_1 , S_2 , а также длинам потенциального рассеяния s - и p -нейтронов (R'_0 и R'_1) по-прежнему нуждается в теоретическом осмысливании.

Значения нейтронных силовых функций S_l ($l = 0, 1, 2$) определяются из опыта как $S_l = \langle \Gamma_n^{(l)} \rangle / \langle D^{(l)} \rangle$, где $\langle \Gamma_n^{(l)} \rangle$ и $\langle D^{(l)} \rangle$ имеют обычный смысл приведенной ширины и среднего энергетического интервала между уровнями составного ядра.

Величина S_0 известна в настоящее время для большинства стабильных ядер, причем значительная часть информации о ней получена из анализа изолированных резонансов. Экспериментальные данные по S_1 значительно менее подробны и получены, в основном, в области $A \simeq 100$ и в редкоземельной области. Экспериментальные данные по d -волновой силовой функции S_2 в настоящее время являются весьма ограниченными, т.к. свойства d -нейтронных резонансов изучены слабо.

В работах [12 – 14] был предложен метод определения S_1 , свободный от целого ряда недостатков, присущих другим методам (низкая статистическая точность в методе определения S_1 по параметрам индивидуальных резонансов, необходимость привлечения дополнительных данных для определения S_1 по полным сечениям и сечениям радиационного захвата). Изучение анизотропии упругого рассеяния нейтронов при энергиях до нескольких сотен $\kappa\text{эВ}$ позволяет определить величины S_1 совместно с длинами потенциального рассеяния R'_0 и R'_1 для четно-четных ядер.

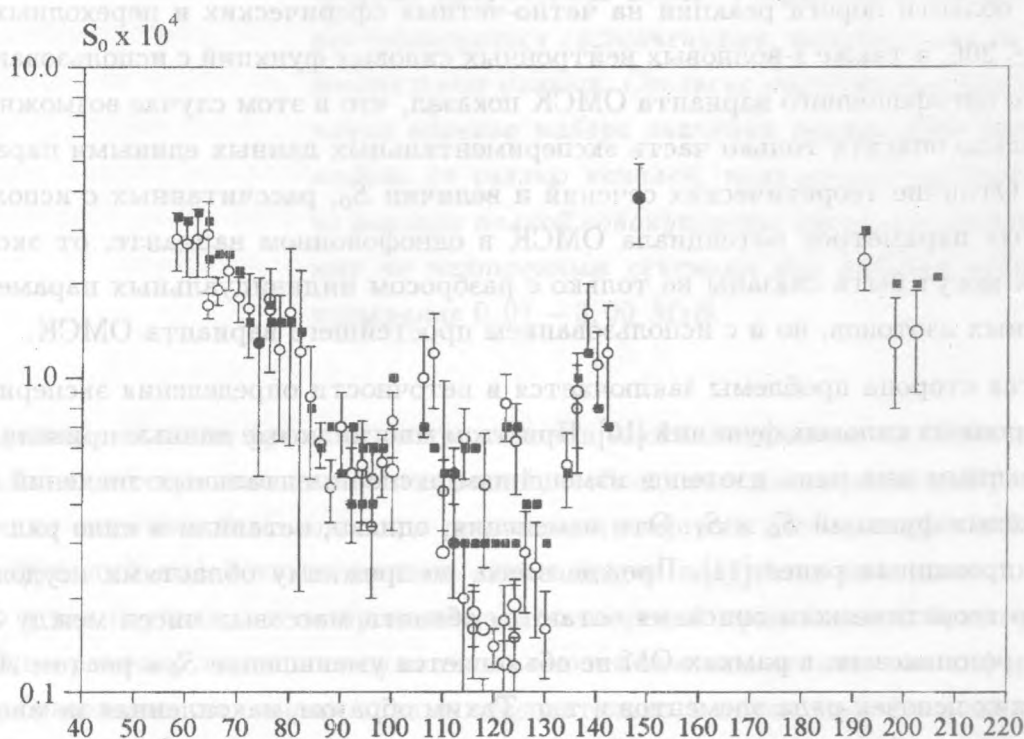


Рис. 1. Силовые функции s -нейтронов: ● – расчетные величины, ○ – экспериментальные значения из работ [11, 19 – 21, 23, 25, 27 – 29].

Ранее нами [15] было получено оптимальное описание имеющихся эксперименталь-

ных сечений неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением коллективных уровней 2_1^+ для большого числа сферических ядер, существенно отличающихся по своим свойствам, в рамках двухфононного вибрационного варианта ОМСК. В этом анализе использовался формализм описания средних сечений, предложенный в [16]. Свободными параметрами модели являлись глубина изоскалярного потенциала V_0 и глубина мнимого потенциала W . Учет связи каналов дал возможность описывать экспериментальные данные до $E_n \sim 3 \text{ МэВ}$ без введения энергетической зависимости параметров ОП. Параметры модели для каждого ядра находились из оптимального описания исследуемых сечений с использованием критерия χ^2 . Применение данного подхода позволило получить хорошее описание (χ^2 почти во всех случаях было $\leq 1,0$) экспериментальных сечений для сферических ядер в широкой области массовых чисел со значениями $V_0 = 52,5 \pm 1,5 \text{ МэВ}$ и $W = 2,5 \pm 0,5 \text{ МэВ}$. Совпадающие с этими значениями V_0 и W были получены при аналогичном описании совокупности нейтронных данных для четно-четных ядер в области $3p$ -резонанса [17, 18], что позволило сделать вывод о возможности описания нейтронных данных при исследуемых энергиях одним набором параметров предложенного варианта ОМСК.

В рамках этого подхода предпринято настоящее рассмотрение величин s -, p - и d -волновых нейтронных силовых функций, а также радиусов потенциального рассеяния s - и p -нейтронов, которые являются основной экспериментальной информацией для получения параметров оптической модели при низких энергиях.

Расчеты S_0 , S_1 , S_2 , R'_0 и R'_1 были проведены для 56 четно-четных сферических ядер, расположенных в периодической таблице по обе стороны редкоземельных ядер. Для ядер с $A < 58$ описание S_0 , S_1 , S_2 , R'_0 и R'_1 не проводилось, т.к. применение ОМ к ним не всегда является вполне корректным.

В расчетах исходно использовались параметры V_0 и W потенциала ОМСК, полученные авторами при оптимальном описании сечений неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением коллективных уровней 2_1^+ для сферических ядер с $56 \leq A \leq 206$ [15] и совокупности нейтронных данных для изотопов Cd , Sn , Te [18].

Результаты расчетов представлены на рисунках 1 и 2 и в таблицах 1 и 2 вместе с экспериментальными значениями нейтронных силовых функций и длин потенциального рассеяния нейтронов. Экспериментальные значения этих величин брались из компиляций [11, 19], а также, особенно для величин R'_1 и S_2 , из работ [14, 20 – 27].

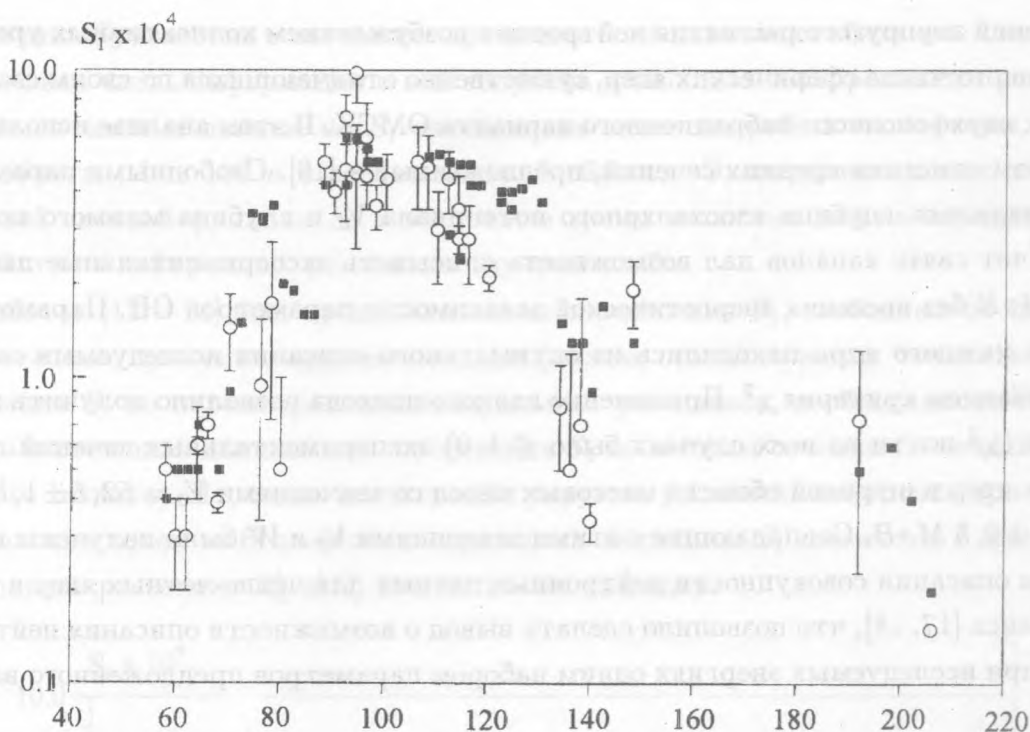


Рис. 2. Силовые функции р-нейтронов: ● – расчетные величины, ○ – экспериментальные значения из работ [11, 14, 19 – 21, 23 – 28].

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные и расчетные значения R'_0

Ядро	$R'_0, \text{ ф м}$		Ядро	$R'_0, \text{ ф м}$	
	эксп.	теор.		эксп.	теор.
^{58}Ni	$8,0 \pm 0,5$	7,2	^{76}Se	$7,5 \pm 0,7$	7,0
^{60}Ni	$6,7 \pm 0,3$	6,9	^{78}Se	$8,3 \pm 0,8$	6,7
^{62}Ni	$6,2 \pm 0,3$	6,8	^{80}Se	$8,7 \pm 0,8$	6,8
^{64}Ni	$7,6 \pm 0,3$	6,8	^{82}Se	7,5	7,1
^{74}Se	$7,5 \pm 0,7$	6,8	^{88}Sr	$7,1 \pm 0,1$	6,6

Продолжение таблицы 1

Ядро	$R'_0, \text{ф м}$		Ядро	$R'_0, \text{ф м}$	
	эксп.	теор.		эксп.	теор.
^{90}Zr	$7,2 \pm 0,2$	6,7	^{120}Sn	$6,1 \pm 0,1$ [20]	5,8
^{92}Zr	$7,2 \pm 0,2$	6,6		$6,1 \pm 0,2$ [21]	
^{94}Zr	$7,2 \pm 0,2$	6,6	^{122}Sn	$5,7 \pm 0,3$	5,7
^{96}Zr	$7,2 \pm 0,2$	6,7		$6,1 \pm 0,1$ [20]	
^{92}Mo	$7,0 \pm 0,2$	6,5		$6,1 \pm 0,2$ [21]	
^{94}Mo	$7,2 \pm 0,2$	6,6		$6,3 \pm 0,1$ [23]	
^{96}Mo	$7,0 \pm 0,2$	6,5	^{124}Sn	$5,9 \pm 0,2$	5,8
^{98}Mo	$6,9 \pm 0,2$	6,5		$6,0 \pm 0,1$ [20]	
^{100}Mo	$6,9 \pm 0,2$	6,2		$6,1 \pm 0,2$ [21]	
^{110}Cd	$6,6 \pm 0,1$ [20]	5,8		$6,4 \pm 0,2$ [23]	
^{112}Cd	$6,5 \pm 0,1$ [20]	5,8	^{122}Te	$5,9 \pm 0,2$	5,6
^{114}Cd	$6,5 \pm 0,1$ [20]	5,8	^{124}Te	$5,8 \pm 0,2$	5,4
^{112}Sn	$5,8 \pm 0,2$ [21]	6,0	^{126}Te	$5,6 \pm 0,2$	5,6
	$5,9 \pm 0,2$ [21]		^{128}Te	$5,5 \pm 0,3$	5,6
^{114}Sn	$6,3 \pm 0,3$	5,9	^{130}Te	$5,4 \pm 0,3$	5,8
	$5,9 \pm 0,2$ [21]				
^{116}Sn	$6,2 \pm 0,1$	5,9	^{136}Ba	5,45	4,6
	$5,8 \pm 0,2$ [21]		^{138}Ba	5,45	4,7
^{118}Sn	$6,0 \pm 0,2$	5,9	^{140}Ce	$5,7 \pm 0,5$	4,8
	$6,1 \pm 0,2$ [20]			$5,1 \pm 0,3$ [26]	
	$5,6 \pm 0,2$ [21]		^{142}Ce	$5,9 \pm 0,7$	5,1

Примечание: экспериментальные значения величин без ссылок взяты из работ [11, 19].

Как правило, экспериментальные значения S_0 известны достаточно хорошо из анализа изолированных резонансов, значения же S_1 , полученные разными методами, во многих случаях сильно различаются. Отметим при этом, что экспериментальные силовые функции являются средними по исследуемому интервалу энергий величинами, поэтому S_1 , рассчитанные в одной энергетической точке (обычно 10 или 100 кэВ), не

гарантируют хорошего совпадения с экспериментальными значениями; в большинстве случаев теоретические значения рассчитывались нами при $E_n = 40$ кэВ.

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные и расчетные значения R'_1 и S_2

Ядро	$R'_1, \text{ф.м.}$		$S_2 \cdot 10^4$	
	эксп.	теор.	эксп.	теор.
^{92}Mo	$2,25 \pm 0,91$ [14]	2,8		
^{94}Mo	$3,18 \pm 0,60$ [14]	2,9		
^{106}Cd	$8,7 \pm 0,6$ [14]	8,1		
^{108}Cd	$9,9 \pm 0,8$ [14]	8,9		
^{110}Cd	$10,7 \pm 0,8$ [14]	9,9		
^{112}Cd	$10,4 \pm 0,6$ [14]	10,1		
^{116}Cd	$10,5 \pm 0,6$ [14]	10,0		
^{112}Sn	$8,2 \pm 0,3$ [21]	9,9	$0,3 \pm 0,1$ [21]	0,25
^{114}Sn	$7,8 \pm 0,3$ [21]	8,6	$0,2 \pm 0,1$ [21]	0,17
^{116}Sn	$11,3 \pm 0,4$ [14]	11,2	$0,20 \pm 0,04$ [21]	0,25
	$8,2 \pm 0,3$ [21]			
^{118}Sn	$11,8 \pm 0,6$ [14]	11,1	$0,16 \pm 0,05$ [21]	0,20
	$8,5 \pm 0,3$ [21]			
^{120}Sn	$11,1 \pm 0,3$ [14]	10,9	$0,14 \pm 0,02$ [21]	0,19
	$8,7 \pm 0,3$ [21]			
^{122}Sn	$12,5 \pm 0,6$ [14]	12,4	$0,17 \pm 0,05$ [21]	0,22
	$8,6 \pm 0,3$ [21]			
^{124}Sn	$12,2 \pm 0,6$ [14]	11,5	$0,15 \pm 0,08$ [21]	0,21
	$8,7 \pm 0,3$ [21]			
	$10,5 \pm 0,3$ [23]			
^{148}Sm			$3,5 \pm 0,46$ [28]	3,1
^{206}Pb			1,5 [24]	1,64

Подчеркнем, что трудность описания силовых функций для ряда ядер связана с недостаточной точностью их экспериментального определения, при этом разброс в экспериментальных значениях бывает очень большим. Одной из причин этого разброса может быть то, что силовые нейтронные функции и радиусы потенциального рассеяния

извлекаются из анализа экспериментальных сечений, измеренных при сильно отличающихся энергиях нейтронов. Учет этого факта в большинстве случаев ликвидирует такое различие. Это подтверждается и тем обстоятельством, что результаты наших расчетов для различных энергий нейтронов согласуются с соответствующими экспериментальными данными. Например, для ряда изотопов нами на рис. 2 приводятся два значения для S_1 , рассчитанные для энергий 40 кэВ и $\approx 700 \text{ кэВ}$. Последние согласуются с экспериментальными значениями, полученными в [21]. С учётом этих особенностей результаты нашего анализа в едином подходе ОМСК дают хорошее описание S_0 , S_1 , R'_0 и R'_1 для большого числа чётно-чётных сферических ядер.

Таким образом, расчеты S_0 , S_1 , S_2 , R'_0 и R'_1 , а также проведенный ранее анализ сечений неупругого рассеяния с возбуждением уровней 2_1^+ [15] и нейтронных сечений для сферических ядер в области $3p$ -резонанса [18] показывают возможность описать все эти величины в двухфононном варианте ОМСК с единым набором параметров и без введения каких-либо энергетических зависимостей в области $E_n = 0,04 - 3,00 \text{ МэВ}$. Следует при этом подчеркнуть, что улучшение точности экспериментального определения нейтронных силовых функций и радиусов потенциального рассеяния дало бы возможность повысить надежность теоретического анализа этих величин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Buck В., Perey F. Phys. Rev. Lett., **8**, 444 (1962).
- [2] Sierra J. M., Turinsky R. J. Proc. EANDC top discuss. Prepr. I AERI 5984. Tokyo. 1975, p. 193.
- [3] Newstead C. M., Cierjaks. Ibid., p. 230.
- [4] Black В., Feshbach Н. Ann. Phys., **23**, 47 (1963).
- [5] Адамчук Ю. В., Сироткин В. К. Препринт ИАЭ 2560, М., 1975.
- [6] Зарецкий Д. Ф. Нейтронная физика (Матер. 4-й Всесоюзн. конф. по нейтронной физике, Киев, 1977). М., ЦНИИАтоминформ, 1977, ч. 1, с. 123.
- [7] Weidenmüller Н. А. Nucl. Phys., **75**, 189 (1966).
- [8] Соловьев В. Г. Нейтронная физика (Матер. 3-й Всесоюзн. конф. по нейтронной физике, Киев, 1975). М., ЦНИИАтоминформ, 1976, т. 3, с. 53.
- [9] Конобеевский Е. С., Мусаелян Р. М., Попов В. И., Суркова И. В. ЭЧАЯ, **13**, 300 (1982).

- [10] Кононов В. Н. Труды 30-й Международной школы по нейтронной физике (Алушта, 1978). Дубна, 1978, с.415.
- [11] Mughabghab S. F., Divadeenam M., Holden N. E. Neutron Cross Sections. N.Y. Acad. Press. 1981, p. 1.
- [12] Попов А. В., Самосват Г. С. Nuclear Data for Basic and Applied Science (Proc. Int. Conf., Santa Fe, 1985), v. 1, p. 621.
- [13] Самосват Г. С. ЭЧАЯ, **17**, 713 (1986).
- [14] Самосват Г. С. Исследование анизотропии упругого рассеяния промежуточных нейтронов. Диссертация. Дубна, 1987.
- [15] Заикин Д. А., Мордовской М. В., Суркова И. В. Изв. РАН, Сер. физ., **62**, N 1, 117 (1998).
- [16] Hofmann H. M., Rihert J., Terpel J. W., Weidenmuller H. A. Ann. Phys., **90**, 403 (1975).
- [17] Заикин Д. А., Мордовской М. В., Суркова И. В. ВАНТ, сер.: Ядерные константы, вып. 2, 98 (1996).
- [18] Заикин Д. А., Мордовской М. В., Суркова И. В. Изв. РАН, Сер. физ., **62**, N 1, 124 (1998).
- [19] Mughabghab S. F. Neutron Cross Sections, 1, Part B. Academic Press, 1984.
- [20] Koester L., Washkowski W., Meier J. Z. Phys., **326A**, 185 (1987).
- [21] Тимохов В. М., Боховко М. В., Исаков А. Г. и др. ЯФ, **50**, 609 (1989).
- [22] Carlton R. F., Harvey J. A. and Hill N. W. Phys. Rev., **52C**, 1498 (1995).
- [23] Carlton R. F., Harvey J. A. and Hill N. W. Phys. Rev., **54C**, 2445 (1996).
- [24] Hogen D. J., Harvey J. A. and Hill N. W. Phys. Rev., **29C**, 478 (1979).
- [25] Вертебный В. П., Ворона П. Н., Кальченко А. И. и др. ЯФ, **22**, 674 (1975).
- [26] Samardha H. S. Phys. Rev., **18C**, 1254 (1978).
- [27] Sidappa K., Sriramachandra Murty, Rama Rao J. Ann. Phys., **83**, 355 (1974).
- [28] Кононов В. Н. Экспериментальное изучение величины альфа, сечений захвата нейтронов и средних резонансных параметров топливно-сырьевых реакторных материалов и продуктов деления. Диссертация, Обнинск, 1980.

[29] Грудzeвич О. Т., Толстикoв В. А. ЯФ, 58, N 12, 2127 (1995).

Институт ядерных исследований РАН

Поступила в редакцию 25 июня 1998 г.