

С 343Г

М-218

Ат.энерг., 1968, т.24, 18.5.1968

в.2, с.173-176.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

РЗ - 3456



Х. Малэцки, Л.Б. Пикельнер, И.М. Саламатин,
Э.И. Шарапов

НЕЙТРОННЫЕ ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ
И СИЛОВЫЕ ФУНКЦИИ ИЗОТОПОВ ГЕРМАНИЯ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

1967.

РЗ - 3456

Х. Малэцки, Л.Б. Пикельнер, И.М. Саламатин,
Э.И. Шарапов

НЕЙТРОННЫЕ ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ
И СИЛОВЫЕ ФУНКЦИИ ИЗОТОПОВ ГЕРМАНИЯ



5335/1, up.

В исследовании нейтронных сечений различных элементов в последние годы важное место занимало получение силовых функций в широком интервале энергий. Этому способствовало улучшение разрешения спектрометров, которое составляло менее 1 нсек/м для лучших установок. Получение более надежных экспериментальных данных позволяет уточнить параметры оптической модели, которая разрабатывалась в ряде работ при различных предположениях как о характере ядерного потенциала^{/1,2/}, так и при новом подходе к описанию процесса образования компаунд-ядра^{/3/}. В этой связи особый интерес представляют измерения на разделенных изотопах, данные по которым довольно ограничены.

Нами были выбраны в качестве объектов исследования плохо изученные изотопы германия.

Измерения пропускания, самоиндикации и радиационного захвата нейтронов проводились по методу времени пролета на импульсном реакторе (ИБР) в режиме с микротроном^{/4/}. Этот режим характеризовался следующими параметрами: интегральный выход нейтронов $3 \cdot 10^{13}$ н/сек, полуширина нейтронного импульса 3 мсек, частота повторения 50 сек⁻¹. Пропускание измерялось при пролетном расстоянии 1000 м жидкостным сцинтилляционным детектором с метилборатом^{/5/}, а радиационный захват - (n, γ)- детектором, состоявшим из двух баков с жидким сцинтиллятором емкостью по 230 литров каждый^{/6/}, установленным на расстоянии 242 м от реактора.

В качестве образцов использовались обогащенные изотопы германия в виде двуокиси Ge O₂, а также образцы из естественной смеси изотопов, данные о которых сведены в таблицу 1.

На рис. 1 приведен для иллюстрации участок экспериментальной кривой, полученной при измерении пропускания с изотопом ^{72}Ge . Получение параметров уровней из измерений пропускания проводилось методом площадей с учетом доплеровского уширения и интерференции между резонансным и потенциальным рассеянием^{/7/}. Для учета интерференции необходимо знание эффективных радиусов ядер для всех изотопов. Так как в литературе^{/8/} имелись данные о σ_p только по трем изотопам, причем значения сечений очень сильно различались между собой, нами были проведены измерения потенциального рассеяния для всех изотопов путем измерения пропускания в широком интервале энергий. Было обнаружено, что сечение в области ниже 1 кэВ заметно возрастает с уменьшением энергии, причем значительный наклон остается после вычитания вклада соседних уровней. Это можно было объяснить влиянием уровней, лежащих ниже энергии связи нейтрона. На присутствие таких уровней указывали также величины сечений захвата тепловых нейтронов^{/12/}, которые для всех изотопов, кроме ^{73}Ge , были значительно больше, чем могли дать положительные уровни.

Из хода кривых пропускания в диапазоне энергий 3–1000 эВ были получены оценки сечения потенциального рассеяния σ_p и параметров отрицательных уровней. Для всех изотопов германия σ_p составляет (6 ± 2) барн.

В таблице II приведены данные об отрицательных уровнях четных изотопов германия, полученные в предположении наличия одного отрицательного уровня для каждого изотопа.

Измерения радиационного захвата нейтронов проводились, в первую очередь, с целью определения радиационных ширин для изотопов германия, о которых не имелось ранее никаких данных. Кроме того, эти измерения в сочетании с самоиндикацией и пропусканием использовались для получения нейтронных ширин уровней. Калибровка эффективности (n, γ) – детектора проводилась по методу одновременной регистрации захвата в каналах совпадения и суммирования импульсов^{/9/} с использованием нормировки по экспериментальным данным для соседних элементов. Неопределенность такой калибровки составляет 10–15%. Процедура получения параметров резонансов описана в работе^{/10/}. В результате обработки экспериментальных данных были получены параметры уровней, сведенные в табл. III. Эти параметры были использованы для нахождения силовых функций S_0 , средних радиационных ширин $\bar{\Gamma}_\gamma$ и средних расстояний между уровнями

для всех изотопов (табл. IV). Силовая функция определялась как $\sum_i \frac{g \Gamma_{n1}^0}{E_1 - E_2}$, а ошибки указывают интервал, в котором лежит истинное значение силовой функции с достоверностью 0,683. Расчет этого интервала проводился на основании работы /11/. При этом учитывалась ошибка, связанная со статистическим распределением нейтронных ширин и расстояний между уровнями, и ошибка в измеренных значениях Γ_{n1} .

Для радиационных ширин ошибка связана, в первую очередь, с точностью калибровки (n, γ) - детектора. Значения D_j определялись из гистограммы нарастания числа уровней с энергией, причем использовался участок, близкий к линейному, на котором не ощущалось влияния пропущенных уровней. Обращает на себя внимание наличие слабых уровней с приведенными нейтронными ширинами на 2-4 порядка ниже средних у изотопов ^{70}Ge и ^{72}Ge . Эти уровни, по-видимому, являются р-волновыми, поэтому они не включались в обработку при расчете достоверного интервала силовой функции S_0 и среднего расстояния между уровнями.

Полученные значения средних расстояний между s-волновыми резонансами позволяют вычислить плотность s-одночастичных состояний вблизи поверхности Ферми. Плотность уровней с полным моментом J при энергии возбуждения U для любой четности в рамках статистической теории выражается в виде (см., например, /13/):

$$\rho(U, J) = \frac{\sqrt{\pi}}{12 a^{1/4} U^{5/4}} \exp(2\sqrt{aU}) \frac{2J+1}{2\sqrt{2\pi} \sigma^3} \exp\left[-\frac{(J + \frac{1}{2})^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (1)$$

Для параметра σ , согласно /13/, имеет место соотношение:

$$\sigma^2 = 0,0888 \sqrt{aU} A^{2/3}. \quad (2)$$

Наблюдаемая плотность уровней может быть связана с теоретическим значением $\rho(U, J)$ соотношением

$$\rho_{\text{набл.}} = \frac{1}{2} \sum_j \rho(U, J), \quad (3)$$

где сумма берется по тем значениям J, которые реализуются в рассматриваемой реакции.

Численные значения параметра a , рассчитанные на основании (1), (2) и (3), приведены в таблице IV. При вычислении энергии возбуждения U вводилась поправка на энергию спаривания нуклонов по формуле Немировского и Адамчука. Для изотопов ^{74}Ge и ^{76}Ge , для которых не было необходимых данных о массах соседних ядер, поправка к U вводилась по данным работы /14/. Погрешность в a учитывает ошибку в \bar{D} , и погрешность энергии возбуждения.

Полученные значения a хорошо согласуются с экспериментальными данными для соседних ядер. Значения силовой функции, найденные для изотопов германия, могут быть сопоставлены с расчетными и экспериментальными данными в рассматриваемой области массовых чисел. На рис. 2 приведена кривая, полученная в работе Бака и Пери /2/, использовавших в расчете по оптической модели потенциал с поверхностным поглощением для динамически деформированных ядер. На этом же рисунке приведены последние экспериментальные данные, заимствованные из работы Гуда и др. /15/. Из рисунка видно, что экспериментальные данные по германию удовлетворительно согласуются с теоретической кривой и данными для соседних ядер.

Следует обратить внимание на тот факт, что для аккуратного получения значений силовой функции необходимо проводить измерения в широком интервале энергии нейтронов. Так, в случае ^{76}Ge силовая функция S_0 , определенная по интервалу $0 < E < 15$ кэв, составляет $0,12 \cdot 10^{-4}$, а для интервала $15 \text{ кэв} < E < 30 \text{ кэв}$ $S_0 = 4,5 \cdot 10^{-4}$. Это может быть связано с флуктуацией в распределении нейтронных ширин, так как число уровней в отмеченных интервалах мало (3-4 уровня). Возможно и другое объяснение этого, связанное с предложенной Фешбахом /3/ концепцией входных состояний, согласно которой силовая функция может заметно меняться с энергией с характерным периодом порядка сотни кэв. Исследованный нами интервал может быть частью этого периода.

Измерения радиационных ширин изотопов германия показали, что значения Γ_γ лежат для всех изотопов в интервале 0,12-0,20 эв. Таким образом, ядра с массовым числом около 70, имеющие радиационную ширину менее 0,2 эв, не являются исключением в общей картине зависимости Γ_γ от массового числа для средних ядер /16/. Следует отметить различие в радиационных ширинах для ^{72}Ge , превосходящее экспериментальную ошибку. Это может быть связано с тем, что уровни, для которых были определены радиационные ширины, имеют разную четность.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.С. Золотарева и его сотрудников за любезное предоставление обогащенных изотопов германия.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.П. Елагин. ЖЭТФ, 44, 370 (1963).
2. В. Buck and F. Perey Phys. Rev. Lett., 8, 444 (1962).
3. H. Feshbach, A. K. Kerman and R. H. Lemmer Ann. of Phys., 41, 230 (1967).
4. В.Д. Ананьев, П.С. Анцупов, С.П. Капица, И.М. Матора, В.Н. Мелехин, Л.А. Меркулов, Р.В. Харьюзов. Атомная энергия 20, 106 (1966).
5. И. Визи, Г.П. Жуков, Г.И. Забиякин и др. Nuclear Electronics I, 27, IAEA, Vienna, 1962.
6. Л.Б. Пикельнер, М.И. Пшитула, Ким Хи Сан, Чен Лин-янь, Э.И. Шарапов. ПТЭ № 2, 48, (1963).
7. K. K. Seth and R. H. Tabony Ann. of Phys., 40, 183 (1966).
8. Von A. Andreeff Ann der Phys., 7, Band 11, 413 (1963).
9. Л.Б. Пикельнер, Э.И. Шарапов. Препринт ОИЯИ Р-1547, Дубна 1963.
10. Ван Най-янь, Н. Илиеску, Э.Н. Каржавина и др. ЖЭТФ, 47, 43 (1964).
11. D. D. Slavinckas and T. J. Kennett Nucl. Phys., 85, 641 (1966).
12. "Neutron Cross Sections" BNL-325 Sec. Ed., Suppl. N2 (1966).
13. А.В. Малышев. ЖЭТФ, 45, 318 (1963).
14. A. Gilbert and A. G. W. Cameron Can. Journ. of Phys., 43, 1446 (1965).
15. W. M. Good, D. Paau, R. Wagner, T. Tamura Phys. Rev., 151, 912 (1966).
16. Ким Хи Сан, Л.Б. Пикельнер, Х. Сиражет, Э.И. Шарапов. ЖЭТФ, 49, 410 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел
21 июля 1967 г.

Таблица I

Характеристики применявшихся образцов германия

Основной изотоп	<i>Ge-70</i>	<i>Ge-72</i>	<i>Ge-73</i>	<i>Ge-74</i>	<i>Ge-76</i>	Естественная смесь*
Содержание основного изотопа (%)	86	89	74	91	70	
Толщина в измерениях пропускания (яд.изотопа/см ² в ед. 10 ²²)	0,81	1,80	0,70	1,16	1,20	1,90
Толщина в измерениях (α, γ) (яд.изотопа/см ² в ед. 10 ²²)	0,17	0,34	-	0,28	0,26	0,79

*) Для естественной смеси указано число ядер элемента/см².

Таблица II

Параметры отрицательных уровней четных изотопов германия

Изотоп	<i>Ge-70</i>	<i>Ge-72</i>	<i>Ge-74</i>	<i>Ge-76</i>
Энергия $ E_{\alpha} $ эВ	560	960	1750	1740
Γ_{α} эВ	1,0	1,3	1,8	1,1

Таблица Ш
 Параметры нейтронных резонансов изотопов
 германия

Ядро- мишень	E_0 эВ	ΔE_0 эВ	Γ_n эВ	$\Delta \Gamma_n$ эВ	Γ_γ эВ	$\Delta \Gamma_\gamma$ эВ
⁷⁰ Ge	1115	4	4,6	1,0	0,160	0,025
	1469	5	0,70	0,12	0,150	0,025
	1935	8	0,030	0,006		
	3140	15	0,046	0,010		
	4230	25	0,055	0,025		
	4378	25	5,9	1,2	0,185	0,040
	5570	35	33	7		
	6750	35	15	5		
	8635	45	51	12		
	9890	80	52	11		
	10310	90	77	16		
	11040	100	8,3	4,7		
	11780	100	22	10		
	13200	100	95	12		
	18440	150	63	24		
	23820	300	75	26		
	25880	300	94	33		
27600	350	141	60			
28600	400	75	34			
⁷² Ge	252,0	0,5	0,00034	0,00010		
	736	2	0,0025	0,0008		
	2180	7	0,046	0,009		
	2614	8	0,79	0,39	0,135	0,030
	2743	8	0,40	0,18	0,230	0,040
	3650	12	0,83	0,43	0,120	0,030
	4560	17	15	3		
	4949	19	27	5		
	8980	50	41	6		
	9640	55	8	5		

11170	60	22	4
12070	70	26	7
19080	130	146	30
29400	300	31	17

73 Ge

102,6	0,2	1,30	0,12	0,192	0,030
204,0	0,4	0,23	0,02	0,210	0,030
224,7	0,4	0,45	0,04	0,198	0,030
320,6	0,7	0,23	0,04	0,190	0,030
332,0	0,7	1,36	0,12		
367,1	0,6	0,72	0,06	0,200	0,030
408,2	0,6	0,25	0,03	0,200	0,030
490,3	0,9	2,00	0,15	0,185	0,030
516	1	0,038	0,005		
557	1	0,39	0,04	0,190	0,030
668	1	0,026	0,008		
735	2	0,017	0,005		
752	2	0,020	0,006		
807	2	0,021	0,006		
849	2	0,14	0,02		
919	2	0,15	0,02		
1028	2	0,09	0,02		
1056	2	0,23	0,06		
1145	2	2,1	0,6		
1218	3	1,3	0,2	0,210	0,030
1313	3	1,3	0,2	0,210	0,030
1353	3	0,29	0,05		
1526	3	1,2	0,2		
1650	4	2,5	0,2		
1802	4	1,6	0,2	0,190	0,030
1925	5	0,33	0,20		
1934	5	0,5	0,2		
1950	5	0,8	0,3		
2011	6	4,0	0,4	0,185	0,030
2256	6	1,7	0,2		
2286	6	3,2	0,3		
2434	8	0,6	0,2		
2558	9	2,1	0,3		
2676	10	1,3	0,2		

2940	11	2,6	0,3
4040	15	8,4	1,0
4238	17	6,0	0,9
4440	19	5,5	1,0
4823	22	1,4	0,6
5200	25	3,0	0,9
5357	25	11	2
5746	30	5,5	1,1
6200	40	2,7	1,3
6320	40	2,3	1,0
6585	45	11,0	2,0
7770	50	16,5	2,5
8530	60	36	3

74 Ge

2846	8	8,0	2,0	0,160	0,040
3035	12	1,0	0,6	0,230	0,040
4170	25	0,064	0,020		
4990	30	94	13		
12030	70	24	13		
19450	150	120	25		
21910	200	50	18		
25100	250	44	21		
42800	500	500	110		
61040	900	810	280		

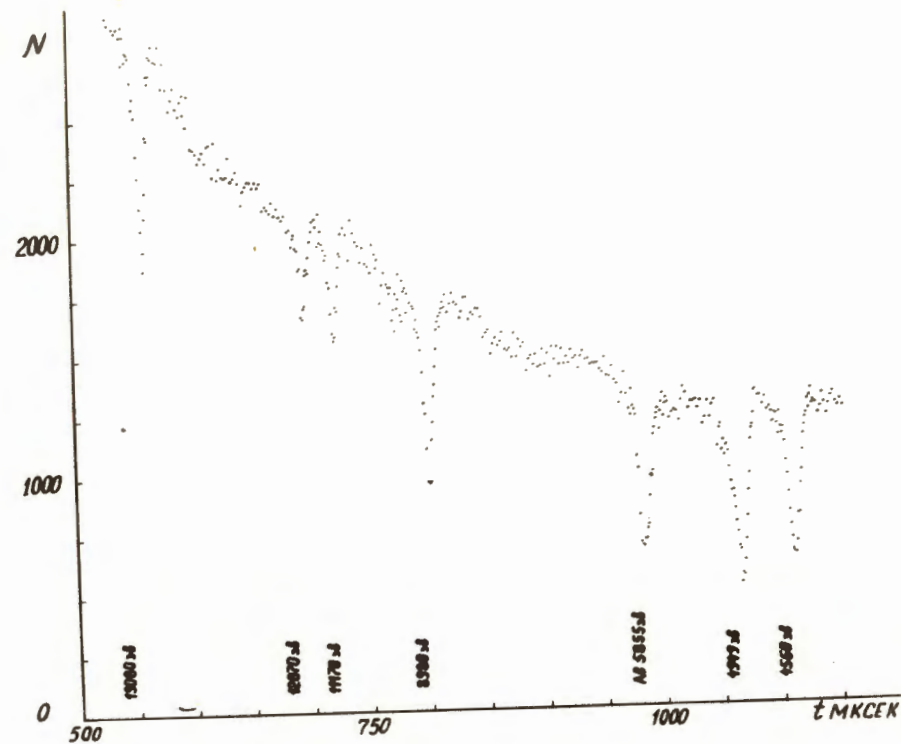
76 Ge

550	1	0,35	0,08	0,115	0,025
4760	20	4,2	1,8	0,120	0,025
13940	90	12	8		
15050	100	84	11		
21040	200	41	17		
22460	200	195	22		
29600	300	760	190		
48700	600	230	120		

Таблица IV

Средние параметры для изотопов германия.

Изотоп	Ge-70	Ge-72	Ge-73	Ge-74	Ge-76
$S_0 \cdot 10^4$	$2,3 \pm 1,0$ $0,9$	$1,0 \pm 0,6$ $0,4$	$2,0 \pm 0,7$ $0,6$	$1,3 \pm 1,1$ $0,6$	$2,3 \pm 2,1$ $1,0$
$\bar{\Gamma}_y$ эв	$0,162 \pm 0,025$	$0,160 \pm 0,025$	$0,197 \pm 0,029$	$0,195 \pm 0,040$	$0,120 \pm 0,025$
\bar{D}_y эв	1330 ± 210	1550 ± 270	124 ± 14	3900 ± 770	4200 ± 825
α Мэв ⁻¹	$10,79 \pm 0,25$	$12,08 \pm 0,34$	$12,60 \pm 0,32$	$11,95 \pm 0,38$	$12,74 \pm 0,41$

Рис. 1. Участок экспериментальной кривой, полученной при измерении пропускания с изотопом ^{72}Ge .

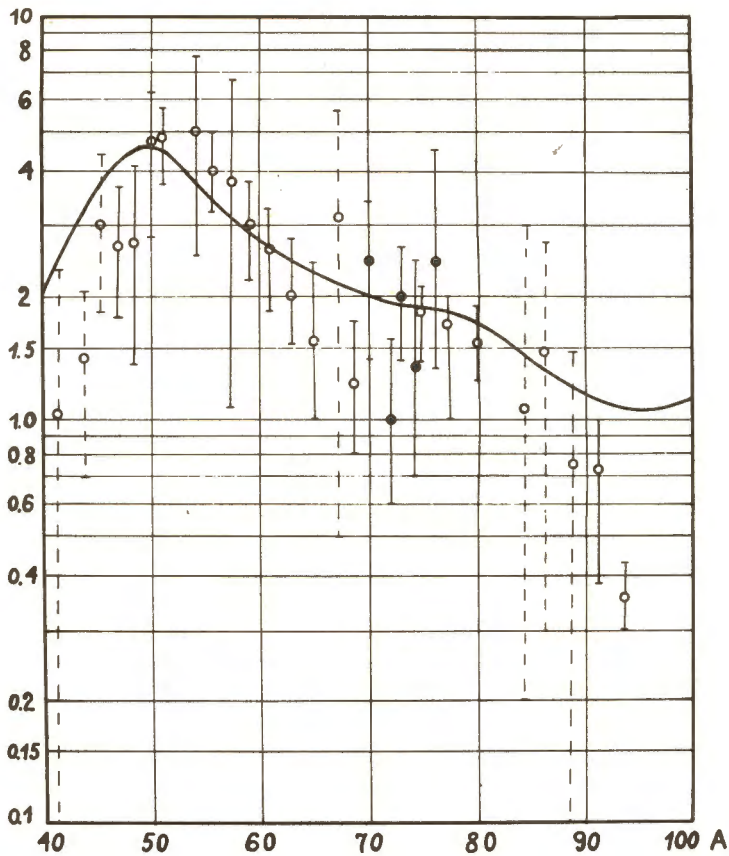
$S_0 \cdot 10^9$ 

Рис. 2. Силаовая функция для s -нейтронов. \bullet - экспериментальные данные из настоящей работы, \circ - экспериментальные данные из работы ^{/15/}. Сплошная кривая - теоретический расчет из работы ^{/2/}.