

СПИНОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ НЕЙТРОННОЙ СИЛОВОЙ ФУНКЦИИ

SPIN DEPENDENCE OF NEUTRON STRENGTH FUNCTION

Л. Ласонь, Х. Малэцки, Х. Файков

Физический Институт Лодзинского Университета*

(Поступила в редакцию 18 марта 1977 г.)

The experimental data on the difference of strength function for two spin states of a number of nuclei is considered and comparison is made with the theoretically expected difference. The last is caused by the fluctuation of values of neutron widths and level spacings. It is shown that deviations observed in experiment have statistical character only.

1. Введение

Нейтронная силовая функция является одним из важнейших параметров, представляющих интерес так для теории ядра, как и для практических приложений ядерной физики. В настоящее время, для большинства изотопов величина s -волновой силовой функции определена достаточно хорошо. Следует, однако, подчеркнуть, что эти данные были получены для смеси двух спиновых состояний $J = I \pm 1/2$ (I — спин ядра мишени). Таким образом, вопрос спиновой зависимости силовой функции остается до сих пор открытым. Его решение требует достаточного количества данных о спинах резонансных уровней. Накопление необходимой информации идет, однако, очень медленно, так как определение спинов, это одна из сложнейших задач нейтронной спектроскопии. Первые попытки обнаружить спиновый эффект были предприняты сравнительно давно. Итак, например, в работах [1], [2] для изотопов ^{97}Au , ^{69}Ga , ^{77}Se , ^{75}As , $^{79,81}\text{Br}$ была найдена существенная разница в силовых функциях для разных спиновых состояний. Однако, в более точных измерениях проведенных в Дубне [3], [4] где использовались разделенные изотопы, этот эффект не был подтвержден.

К 1969 году было накоплено уже довольно много данных о спинах нейтрон-

* Address: Instytut Fizyki, Uniwersytet Łódzki, Narutowicza 68, 90-136 Łódź, Poland.

ных резонансов. Особенно обширные исследования параметров нейтронных резонансов были проведены в Дубне для круга ядер в области массовых чисел 69—87 [3—7]. В связи с этим, казалось полезным провести тщательный анализ существующих результатов с целью окончательного выяснения вопроса о существовании спиновой зависимости силовой функции. Такой анализ [8], привел его авторов к заключению, что экспериментальные данные не противоречат гипотезе о равенстве s - волновых силовых функции для обоих спиновых состояний. С тех пор этот вопрос поднимался еще несколько раз [9—11], но оказалось, что расширение энергетической области, или повторные более точные измерения сильно изменяют величины исследованных эффектов.

С момента появления работы [8] прошло уже восемь лет. В это время благодаря развитию экспериментальной техники и появлению новых методов определения спинов, круг исследованных изотопов расширился вдвое, а также значительно возросло количество исследованных резонансов с известным спином для данного изотопа. Поэтому, нам показалось очень полезным повторить анализ выполненный в [8] для всех доступных в настоящее время данных. Таким образом, кроме данных использованных в [8] (с соответствующими поправками) в анализ включено все результаты полученные по 1972 год и собраны в [12], а также более новые измерения проведенные, прежде всего, в Дубне [14—16, 24, 28—31] и Брукхевен [25, 27, 32—35, 37, 38]. Следует отметить, что во всех последних работах, стандартный метод определения спинов основанный на измерениях g -факторов, был заменен либо методом множественности γ -квантов (дубненские работы) либо методом заселенности низколежащих уровней. Позволило это очень существенно увеличить количество исследованных резонансов.

Надо еще упомянуть третий тип исследований описанный в [14—16] в котором непосредственно измерялась относительная разность усредненных сечений для параллельной и антипараллельной ориентации спинов нейтронов и ядер. В случае независимости потенциального рассеяния от спина, величина эта пропорциональна к соответствующему эффекту для силовых функций [39]. В измерениях этих охватываются широкие энергетические участки и нет опасности пропуска резонансов.

2. Метод анализа и результаты

Так как наш анализ полностью совпадает с процедурой подробно описанной в [8], мы здесь приводим только необходимые определения и основные результаты теоретического рассмотрения.

Идея предложенная в [8] состоит в проверке гипотезы о равенстве силовых функций не для одного ядра, а для целой совокупности ядер. В этом случае, исходя из известных законов распределения нейтронных ширин и расстояний между уровнями, можно получить выражение для функции распределения величины

$$z = \frac{S}{\langle S \rangle},$$

где S — силовая функция, $\langle S \rangle$ — среднее значение силовой функции. Распределение это является распределением Фишера с плотностью вероятности:

$$f(z, n) = C_n \cdot z^{\frac{n}{2} - 1} \cdot \left(1 + \frac{n}{k} z\right)^{-\frac{n+k}{2}}, \quad (1)$$

где n — количество уровней, k — является некоторой функцией n , C_n — нормировочная константа. Так как количество исследованных резонансов было разное для разных ядер, удобно рассматривать распределение величины очень слабо зависящей от числа уровней. Такой величиной является, например,

$$\frac{a}{\bar{\sigma}} = \frac{S^+ - S^-}{\langle S \rangle \bar{\sigma}},$$

где S^+ — силовая функция для резонансов с $J = I + 1/2$, S^- — силовая функция для резонансов с $J = I - 1/2$.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} (\sigma^+ + \sigma^-)$$

где $(\sigma^+)^2$ и $(\sigma^-)^2$ — дисперсии функций $f(z^+, n^+)$ и $f(z^-, n^-)$ соответственно. Можно показать, что плотность вероятности для этой величины дается формулой:

$$f\left(\frac{a}{\bar{\sigma}}\right) = C_n^* \bar{\sigma} \int_{\frac{a}{\bar{\sigma}}}^{\infty} [x(x - a\bar{\sigma})]^{\frac{n}{4} - 1} \left\{ \left(\frac{n}{2k} x + 1\right) \left[1 + \frac{n}{2k} (x - a\bar{\sigma})\right] \right\}^{-\frac{n+2k}{4}} dx. \quad (2)$$

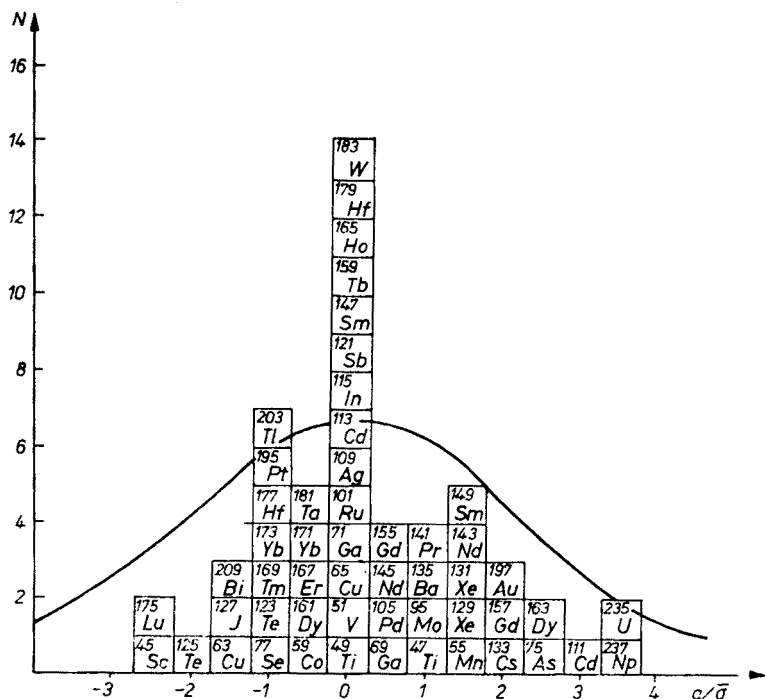


Рис. 1. Сравнение теоретического и экспериментального распределений разностей силовых функций для двух спиновых состояний, выраженных в единицах средней абсолютной ошибки

ТАБЛИЦА I

№№ п/п	Мишень	$+n$	n^+	n^-	n^-	$E(b)$	$S^+ \times 10^{-4}$	$S^- \times 10^{-4}$	Литература
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	^{45}Sc	24	27	26	29	106000	2.86	5.84	[12]
2.	^{47}Ti	19	19	13	13	75000	4.44	1.76	[12]
3.	^{49}Ti	14	15	12	13	225000	3.20	3.07	[12]
4.	^{51}V	15	15	12	12	145000	8.0	7.6	[17, 18, 19]
5.	^{55}Mn	30	34	26	29	203500	4.14	2.70	[12]
6.	^{59}Co	26	44	23	36	105000	3.46	3.83	[12]
7.	^{63}Cu	14	18	16	22	30000	1.80	2.94	[12]
8.	^{65}Cu	7	10	7	9	25000	1.50	1.20	[12]
9.	^{69}Ga	6	7	3	4	3500	1.2	1.0	[4]
10.	^{71}Ga	5	5	4	4	3300	1.5	1.3	[4]
11.	^{75}As	15	20	13	16	3800	2.4	1.0	[20, 21]
12.	^{77}Se	14	19	5	7	4000	1.17	1.71	[12]
13.	^{95}Mo	6	10	4	6	980	0.63	0.15	[12]
14.	^{101}Ru	7	8	5	5	250	0.34	0.35	[12]
15.	^{105}Pd	9	9	4	4	130	0.30	0.22	[22, 23]
16.	^{109}Ag	15	29	7	12	622	0.85	0.88	[12]
17.	^{111}Cd	20	26	4	6	908	0.32	0.06	[24, 25]
18.	^{113}Cd	18	20	4	6	1364	0.28	0.30	[24, 25]
19.	^{115}In	16	16	14	14	423	0.27	0.29	[12, 26]
20.	^{121}Sb	7	9	7	8	167	0.44	0.42	[12]
21.	^{123}Te	14	19	6	8	665	0.95	1.55	[12]
22.	^{125}Te	17	27	4	7	1520	0.48	1.30	[12]
23.	^{127}J	6	7	6	7	237	0.7	1.7	[12]
24.	^{129}Xe	24	37	7	12	2090	1.19	0.72	[12]
25.	^{131}Xe	13	23	7	13	2550	1.12	0.65	[12]
26.	^{133}Cs	8	11	4	6	360	1.34	0.40	[12]
27.	^{135}Ba	10	11	3	4	650	1.3	0.29	[12]
28.	^{141}Pr	7	10	5	7	1120	4.2	2.6	[12]
29.	^{143}Nd	18	18	14	14	1210	4.88	2.72	[12, 28]
30.	^{145}Nd	22	22	14	14	660	2.8	2.4	[12, 28]
31.	^{147}Sm	22	32	19	25	400	3.8	3.9	[12, 28]
32.	^{149}Sm	46	46	36	36	250	5.8	4.1	[12, 28]
33.	^{155}Gd	19	24	9	12	63	2.43	2.08	[12]
34.	^{157}Gd	20	22	13	15	196	2.9	1.4	[12, 29]
35.	^{159}Tb	38	38	28	28	311	1.13	1.17	[13, 14]
36.	^{161}Dy	23	26	21	23	140	1.33	1.96	[30]
37.	^{163}Dy	21	21	17	21	300	1.24	0.54	[30]
38.	^{165}Ho	29	29	26	26	307	1.82	1.83	[15]
39.	^{167}Er	38	38	24	24	280	2.0	2.3	[31, 32]
40.	^{169}Tm	51	57	17	19	680	1.3	1.6	[16, 12]
41.	^{171}Yb	14	15	4	5	128	1.09	1.42	[33, 12]
42.	^{173}Yb	33	33	21	21	620	1.2	1.5	[31, 33]
43.	^{175}Lu	7	7	10	10	57	0.38	1.49	[34, 35]
44.	^{177}Hf	48	48	50	50	295	2.2	2.8	[12]
45.	^{179}Hf	9	9	10	10	92	2.23	2.00	[12]

Таблица I (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
46.	^{181}Ta	12	17	11	15	138	1.64	2.05	[12]
47.	^{183}W	16	22	4	7	360	2.2	2.3	[36]
48.	^{195}Pt	26	28	10	11	800	1.45	1.93	[12]
49.	^{197}Au	31	41	17	22	995	2.3	1.3	[12]
50.	^{203}Tl	8	14	8	11	19231	1.4	2.1	[37]
51.	^{209}Bi	5	6	6	7	70	0.45	1.28	[12, 38]
52.	^{235}U	31	41	17	24	40	1.16	0.44	[12]
53.	^{237}Np	52	69	31	42	80	1.38	0.66	[12]

Плотность (2) имеет место только в случае чисто статистического поведения величины $a/\bar{\sigma}$. Поэтому, сравнивая частоту экспериментальных значений $(a/\bar{\sigma})_{\text{эксп}}$ с теоретическим распределением можно проверить нашу гипотезу.

Результаты соответствующих расчетов и экспериментальных значений $a/\bar{\sigma}$ для 53 ядер показаны на рис. 1.

В таблице I перечислены исследованные изотопы, величина энергетического интервала и значения силовых функций для двух разных спиновых состояний, а также, показано число наблюдаемых уровней для резонансов со спином $I+1/2 - n_j^+$ и для резонансов со спином $I-1/2 - n_j^-$. Величины n^+ и n^- — это количество уровней определено при помощи процедуры описанной в [8]. Эта последняя состоит в случайном разыгрыше (с учетом спиновой зависимости плотности уровней) спинов для тех резонансов, для которых определены нейтронные ширины, но неизвестны моменты количества движения. Следует подчеркнуть, что во многих случаях, при более высоких энергиях можно было заметить существенный пропуск резонансов. Однако, никакие попытки учесть этот эффект нами не делались.

Как видно из приведенных результатов анализа, существенного различия между экспериментальной гистограммой и теоретическим распределением не наблюдается. Действительно, оценка сделана с использованием критерия Пирсона показала, что вероятность того, что экспериментальные данные могут быть описаны распределением (2), равна 90%. Тем самым можно считать, что наблюдаемые отклонения от равенства $S^+ = S^-$ являются чисто случайными.

На рис. 1 обращает на себя внимание большой пик для малых значений $a/\bar{\sigma}$. Этот факт в никакой мере не противоречит сделанным выводом. Его появление может быть чисто случайным и более точные измерения могут значительно изменить „положение“ отдельного ядра в гистограмме, о чем легко убедиться сравнивая нашу гистограмму с гистограммой приведенной в [8].

Надо еще отметить, что статистический анализ не исключает возможности существования спинового эффекта для отдельных ядер. Кроме этого, все использованные нами данные относятся к энергетическому интервалу от нуля до около нескольких сот электроновольт (за исключением нескольких ядер, для которых этот

интервал простирается до более высоких энергий). Тем самым, наши выводы остаются в силе только для низких энергий и ни в коей мере не исключают возможности проявления спиновых эффектов при более высоких энергиях (килоэлектронвольтовая область).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Julien, G. Bianchi, C. Corge et al., *Phys. Lett.* **10**, 86 (1964).
- [2] J. Julien, International Conf. on the Study of Nuclear Structure with Neutrons, Antwerpen, 1965.
- [3] Х. Малэцки, Л. Б. Пикельнер, И. М. Саламатин, Э. И. Шарапов, препринт ОИЯИ РЗ-3956, Дубна 1968.
- [4] Х. Малэцки, Л. Б. Пикельнер, И. М. Саламатин, Э. И. Шарапов, препринт ОИЯИ, РЗ-4152, Дубна 1968.
- [5] Х. Малэцки, Л. Б. Пикельнер, И. М. Саламатин, Э. И. Шарапов, *Атомная Энергия* **24**, 173 (1968).
- [6] Х. Малэцки, Л. Б. Пикельнер, И. М. Саламатин, Э. И. Шарапов, *Ядерная Физика* **9**, 1119 (1969).
- [7] М. К. Гребенюк, П. Ш. Ковач, Х. Малэцки, И. М. Саламатин, препринт ОИЯИ РЗ-4357, Дубна 1969.
- [8] Х. Малэцки, Л. Б. Пикельнер, И. М. Саламатин, Э. И. Шарапов, *Ядерная Физика* **11**, 111 (1970).
- [9] C. M. Newstead, J. P. Delaroche, B. Cauvin, Intern. Conf. on the Study of Nuclear Structure with Neutrons, Budapest 1972, p. 144.
- [10] С. Сосева, II School on Neutron Physics, Alushta, April 2-19, 1974, p. 266.
- [11] Э. Н. Каржавина, Ким Сек Су, А. Б. Попов, Х. Файков, III Всесоюзная Конференция по Нейтронной Физике, Киев 1975, стр. 229.
- [12] BNL-325, 3-Ed. *Neutron Cross Section*, vol. 1, *Resonance Parameters*, 1973.
- [13] А. Б. Попов, Х. Файков, Хван Чер Гу, препринт ОИЯИ РЗ-9743, Дубна 1976.
- [14] В. П. Алфименков, Г. Г. Акоюн, В. А. Вагов, препринт ОИЯИ РЗ-9852, Дубна 1976.
- [15] Г. Г. Акоюн, В. П. Алфименков, Я. Вежбицки и др. (направлено в печать — препринт ОИЯИ).
- [16] Г. Г. Акоюн, В. П. Алфименков, Я. Вежбицки и др., Всесоюзная Конференция по Нейтронной Физике, Киев 1977.
- [17] G. Rohr, E. Friedland, *Nucl. Phys.* **A104**, 1 (1967).
- [18] J. Morgenstern, Saclay Rapport CEA, R-3609, 1968.
- [19] F. W. Firk, J. E. Lynn, M. C. Moxon, *Proc. Phys. Soc.* **82**, 477 (1963).
- [20] J. Julien, Saclay Rapport CEA, R-3385, 1968.
- [21] J. B. Garg, W. W. Havens J. Rainwater, *Phys. Rev.* **136**, B 177 (1964).
- [22] C. Coceva, F. Corvi, P. Giacobbe, M. Stefanon, *Phys. Lett.* **16**, 159 (1965).
- [23] L. M. Bollinger, R. E. Cote, H. E. Jackson, Congrès International de Physique Nucléaire (Paris), vol. 2, 1964.
- [24] Э. Н. Каржавина, Ким Сек Су, А. Б. Попов, Х. Файков, *Спины нейтронных резонансов ^{113}Cd и ^{115}Cd* , Дубна 1973, (непечатанная информация).
- [25] H. I. Liou et al., *Phys. Rev.* **C10**, 709 (1974).
- [26] F. Corvi, M. Stefanon, *Nucl. Phys.* **A233**, 185 (1974).
- [27] A. Stolovy, A. I. Namenson et al., *Phys. Rev.* **C5**, 2030 (1972).
- [28] Э. Н. Каржавина, Ким Сек Су, А. Б. Попов, препринт ОИЯИ РЗ-6237, Дубна 1972.
- [29] Э. Н. Каржавина, Ким Сек Су, А. Б. Попов, препринт ОИЯИ РЗ-6948, Дубна 1973.
- [30] Э. Н. Каржавина, Ким Сек Су, А. Б. Попов, Х. Файков, *Ядерная Физика* **22**, 3 (1975).
- [31] Э. Н. Каржавина, Ким Сек Су, А. Б. Попов, Х. Файков, препринт ОИЯИ РЗ-8511, Дубна 1975.

- [32] H. I. Liou et al. *Phys. Rev.* **C5**, 1002 (1972).
- [33] H. I. Liou et al., *Phys. Rev.* **C7**, 823 (1972).
- [34] A. I. Namenson, A. Stolovy, G. L. Smith, *Nucl. Phys.* **A237**, 45 (1975).
- [35] H. I. Liou et al., *Phys. Rev.* **C11**, 1231, (1975).
- [36] R. C. Block, R. W. Hockenburg, J. E. Russel, ORNL-3924, 31, (1965).
- [37] H. I. Liou et al. *Phys. Rev.* **C12**, 102 (1975).
- [38] U. N. Singh et al. *Phys. Rev.* **C13**, 124 (1976).
- [39] Л. Б. Пикельнер, *ЭЧАЯ* **2**, 918 (1972).