

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



6/ix-76

П-58

РЗ - 9743

3478/2-76

А.Б.Попов, Х.Файков, Хван Чер Гу

ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ ТЕРБИЯ

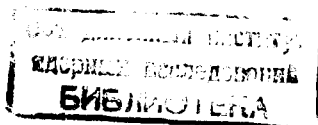
1976

РЗ - 9743

А.Б.Попов, Х.Файков, Хван Чер Гу

ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ ТЕРБИЯ

Направлено в ЯФ



ВВЕДЕНИЕ

В связи с исследованиями взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами тербия, проводившимися в Лаборатории нейтронной физики ^{1/}, возникла потребность в определении параметров нейтронных резонансов для этого ядра в области выше 100 эВ. До сих пор в литературе информация о параметрах нейтронных резонансов ¹⁵⁹Tb ограничивалась данными для области ниже 100 эВ ^{2,3/}, полученными в нашей лаборатории в 1963 г. Для оценки спинового эффекта в силовых функциях необходимо было получить нейтронные ширины для резонансов, расположенных в более высокой энергетической области.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Было выполнено несколько серий измерений пропускания и выхода γ -лучей от захвата нейтронов для образцов разной толщины. Образцы готовились из окиси тербия. Измерения проводились в бустерном режиме работы реактора с размножением по мгновенным нейтронам, равным 100. В этом случае полуширина нейтронного импульса равнялась $\sim 2,5$ мкс. Измерения выхода γ -лучей от захвата нейтронов были выполнены с помощью детектора из 4 кристаллов NaJ для двух образцов $/1,71 \cdot 10^{21}$ и $5,13 \cdot 10^{21}$ ядер/см²/ с разрешением около 11 нс/м. Пропускание измерялось с помощью литиевых стекол с разрешением 11 нс/м /для образцов

1,71.10²¹, 5,13.10²¹ и 9,05.10²¹ яд/см² и 3,5 нс/м / для образцов 5,17.10²¹ и 1,80.10²² яд/см²/. Для определения фона в измерениях пропускания в пучке постоянно находились резонансные фильтры Na и Co /или Mn /. Вся предварительная обработка экспериментальных данных вплоть до вычисления площадей резонансов проводилась на ЭВМ БЭСМ-4 с помощью осциллографа со световым карандашом^{14/}. Мы не проводили мониторинга измерений с образцом и без него, поэтому вычисляли только резонансную часть пропускания путем деления спектра с образцом на спектр без него /после необходимого учета фонов/. При вычислении площадей резонансов из спектра выхода γ -лучей захвата использовалась обычная процедура нормировки по резонансам с известными параметрами. Относительная форма потока нейтронов при этом измерялась с помощью счетчиков, наполненных бором.

Для наблюдаемых резонансов были вычислены значения площадей для нескольких образцов разной толщины как из данных по пропусканию, так и по радиационному захвату /до 200 эВ/. Дальнейшее вычисление параметров проводилось на ЭВМ CDC-6400 методом площадей и методом формы^{16/}. Для 13 резонансов ниже 110 эВ были получены значения радиационных ширин. Они лежат в пределах от 60 до 120 мэВ /что согласуется с данными работы^{12/} /, однако точность их невысока и составляет 20-30%. Поэтому для большинства резонансов нам удалось определить только параметр $g \Gamma_n$ в предположении, что радиационные ширины равны среднему значению $\bar{\Gamma}_\gamma = 90$ мэВ. Вариация Γ_γ на $\pm 10\%$ практически не сказывается на значениях вычисляемых нейтронных ширин.

В области выше 200 эВ по причине недостаточного разрешения и значительной плотности уровней возникли затруднения в вычислении площадей резонансов из-за их перекрытия. Для получения параметров резонансов в этой области была разработана новая программа метода формы для ЭВМ CDC-6400^{16/}. С помощью этой программы были обработаны спектры пропускания для двух образцов разной толщины /5,17.10²¹ и 1,80.10²² яд/см²/, изме-

ренные с наилучшим разрешением. Числовые данные о спектрах пропускания и их статистических ошибках были записаны предварительно на ЭВМ БЭСМ-4 на магнитную ленту, которая затем использовалась на ЭВМ CDC-6400. Поскольку естественные ширины резонансов /обусловленные в основном доплеровским уширением/ равны ширине функции разрешения спектрометра /или даже меньше нее/, то мы не рассчитывали на повышение точности определения параметров. В основном мы преследовали цель устранения неопределенности в вычислении площадей, а также повышения автоматизации обработки экспериментальных данных. Так как ширина функции разрешения была сравнима с естественными ширинами резонансов, трудно было также рассчитывать на определение всего набора резонансных параметров. Обработку методом формы мы проводили в предположении фиксированного значения $\Gamma_\gamma = 90$ мэВ. Вычисления велись одновременно для обоих образцов, обрабатываемые участки спектров пропускания могли содержать до 30 резонансов. Проверялась устойчивость вычисляемых параметров к изменениям Γ_γ . При этом оказалось, что вариация Γ_γ на $\pm 10\%$ приводит к изменениям $g \Gamma_n$ не более, чем на 2%.

Форма функции разрешения была взята в виде, определяемом формой нейтронного импульса бустера, которую можно представить следующим образом:

$$n(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 - e^{-t/\tau} & 0 < t < T \\ (1 - e^{-T/\tau}) e^{-\frac{t-T}{\tau}} & t > T. \end{cases} \quad /1/$$

Здесь T - длительность электронного импульса ускорителя, τ - время релаксации /разрядки/ нейтронного бустера.

Если пренебречь конечной шириной канала временно-го анализатора, то на основании /1/ легко получить, что функция разрешения будет иметь вид

$$R(E, E') = \begin{cases} 0 & E' < E - \epsilon_0 \\ \frac{1}{\epsilon_0} (1 - e^{-T/\tau}) e^{-\frac{E' - E}{\tau w}} & E - \epsilon_0 < E' < E \\ \frac{1}{\epsilon_0} (1 - e^{-T/\tau}) e^{-\frac{E' - E}{\tau w}} & E' > E, \end{cases} \quad /2/$$

где

$$\epsilon_0 = \frac{2TE^{3/2}}{72,3L}, \quad w = \frac{2E^{3/2}}{72,3L},$$

а L - расстояние между источником нейтронов и детектором.

Параметры нейтронного импульса достаточно надежно оцениваются экспериментально путем измерения формы интенсивности γ -лучей деления бустера, которая должна хорошо повторять форму нейтронного импульса для нейтронов достаточно большой энергии. При обработке мы использовали параметры: $T = 1,6$ мкс, $\tau = 2,5$ мкс /которые соответствуют форме нейтронного импульса при разномножении 100/. Проверялась устойчивость вычисляемых резонансных параметров по отношению к изменению параметров функции разрешения. Вариация T на $\pm 10\%$ совсем не сказывается на значениях $E_0, g\Gamma_n$. Вариации τ на $\pm 10\%$ приводят к изменениям $g\Gamma_n$ не более, чем на 5%, для большинства резонансов эти изменения превышали статистические ошибки, даваемые программой.

Поэтому, исходя из предположения, что неточность определения параметров функции разрешения не превышает 10%, мы за величину ошибки значений $g\Gamma_n$ приняли неопределенность, обусловленную этой возможной неточностью определения параметров функции разрешения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Найденные параметры резонансов ^{159}Tb представлены в таблице и на рис. 1. Параметры до 185 эВ получены методом площадей, начиная с резонанса 185,4 эВ и выше, значения $g\Gamma_n$ вычислены методом формы. Следует заметить, что в области 340 эВ в экспериментальных спектрах с образцом и без него мы имели глубокие провалы, вызванные присутствием Mn в алюминиевых заглушках вакуумного нейтропровода, которые затрудняли вычисление пропускания в области резонансов 332,1 - 347,6 эВ. Поэтому у нас нет уверенности в точности вычисленных для них параметров.

На рис. 2 представлена зависимость числа наблюдаемых резонансов от энергии нейтронов. В исследованной нами области до 580 эВ наблюдается почти линейная зависимость $N(E)$, что указывает на незначительный пропуск уровней. На рис. 3 показана зависимость нарастающей суммы приведенных нейтронных ширин $\sum 2g\Gamma_n^0$ от энергии нейтронов, она также близка к линейной.

Полученные нами данные для резонансов ^{159}Tb позволяют оценить среднее расстояние между резонансами

$$D = 4,4 \pm 0,4 \text{ эВ}$$

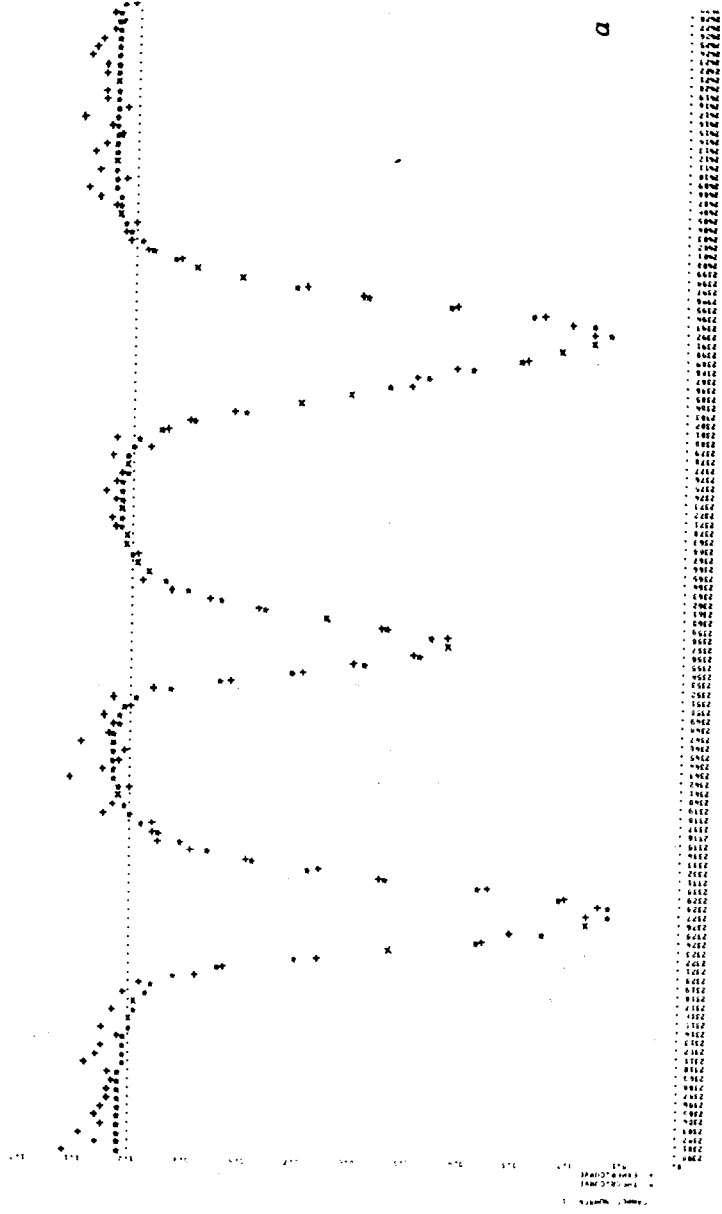
и силовую функцию

$$S^0 = /1,25 \pm 0,18/ \cdot 10^{-1}.$$

Используя значения спинов резонансов из работы /1/, мы получили также средние расстояния и силовые функции для разных спиновых состояний:

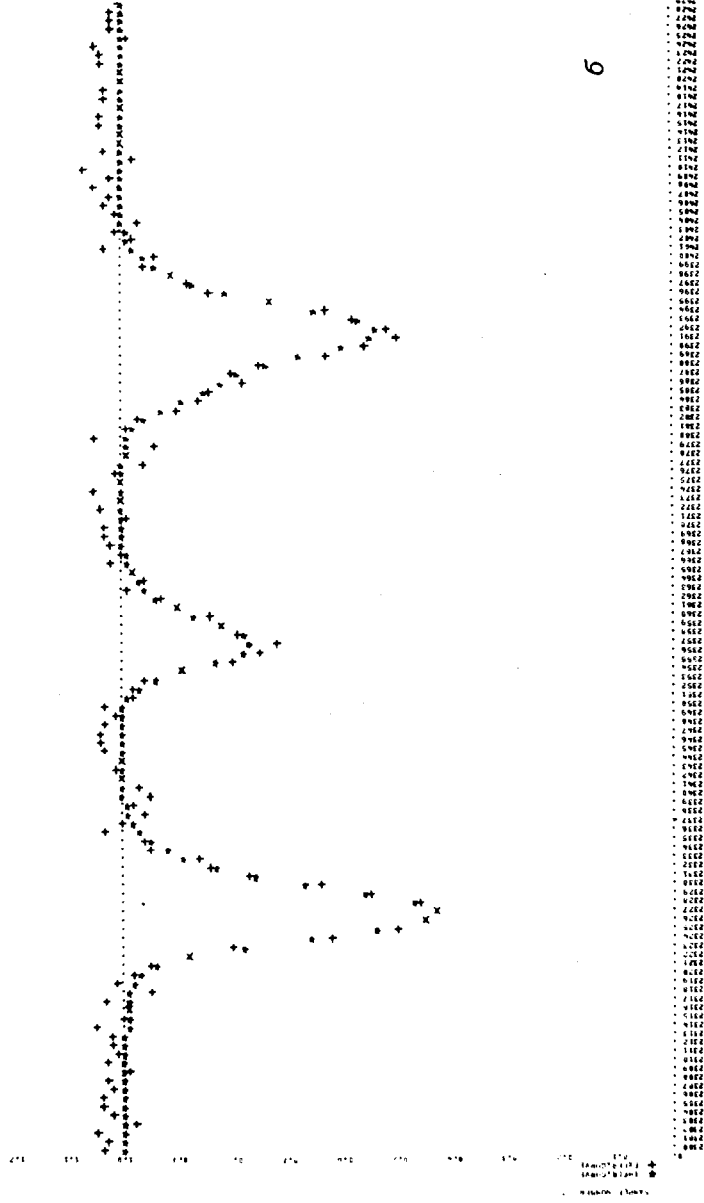
$$D_{J=1} = 10,0 \pm 0,9 \text{ эВ}, \quad S^0_{J=1} = /1,27 \pm 0,37/ \cdot 10^{-4}$$

$$D_{J=2} = 7 \pm 1 \text{ эВ}, \quad S^0_{J=2} = /1,13 \pm 0,30/ \cdot 10^{-4}.$$



a

274
273
272
271
270
269
268
267
266
265
264
263
262
261
260
259
258
257
256
255
254
253
252
251
250
249
248
247
246
245
244
243
242
241
240
239
238
237
236
235
234
233
232
231
230
229
228
227
226
225
224
223
222
221
220
219
218
217
216
215
214
213
212
211
210
209
208
207
206
205
204
203
202
201
200
199
198
197
196
195
194
193
192
191
190
189
188
187
186
185
184
183
182
181
180
179
178
177
176
175
174
173
172
171
170
169
168
167
166
165
164
163
162
161
160
159
158
157
156
155
154
153
152
151
150
149
148
147
146
145
144
143
142
141
140
139
138
137
136
135
134
133
132
131
130
129
128
127
126
125
124
123
122
121
120
119
118
117
116
115
114
113
112
111
110
109
108
107
106
105
104
103
102
101
100
99
98
97
96
95
94
93
92
91
90
89
88
87
86
85
84
83
82
81
80
79
78
77
76
75
74
73
72
71
70
69
68
67
66
65
64
63
62
61
60
59
58
57
56
55
54
53
52
51
50
49
48
47
46
45
44
43
42
41
40
39
38
37
36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0



б

274
273
272
271
270
269
268
267
266
265
264
263
262
261
260
259
258
257
256
255
254
253
252
251
250
249
248
247
246
245
244
243
242
241
240
239
238
237
236
235
234
233
232
231
230
229
228
227
226
225
224
223
222
221
220
219
218
217
216
215
214
213
212
211
210
209
208
207
206
205
204
203
202
201
200
199
198
197
196
195
194
193
192
191
190
189
188
187
186
185
184
183
182
181
180
179
178
177
176
175
174
173
172
171
170
169
168
167
166
165
164
163
162
161
160
159
158
157
156
155
154
153
152
151
150
149
148
147
146
145
144
143
142
141
140
139
138
137
136
135
134
133
132
131
130
129
128
127
126
125
124
123
122
121
120
119
118
117
116
115
114
113
112
111
110
109
108
107
106
105
104
103
102
101
100
99
98
97
96
95
94
93
92
91
90
89
88
87
86
85
84
83
82
81
80
79
78
77
76
75
74
73
72
71
70
69
68
67
66
65
64
63
62
61
60
59
58
57
56
55
54
53
52
51
50
49
48
47
46
45
44
43
42
41
40
39
38
37
36
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

Рис. 1. Участок спектра пропускания ^{159}Tb от 275 до 260 эВ, обработанный методом формы /+ - экспериментальные точки, * - расчетные точки, x - точки, в которых экспериментальные и расчетные значения совпадают/, а - для образца толщиной $1,80 \cdot 10^{-1}$ яд/см², б - для образца толщиной $5,17 \cdot 10^{-1}$ яд/см².

Таблица
 Параметры нейтронных резонансов ^{159}Tb

$E_{\text{рез}}$	$\Delta E_{\text{рез}}$	$\frac{\sigma_{\text{рез}}}{\text{мэВ}}$	$\Delta q_{\text{рез}}$	$\frac{1}{\text{мэВ}}$	$\Delta \Gamma_{\text{рез}}$
1	2	3	4	5	6
21,16	0,02	0,74	0,03	0,43	0,02
24,53	0,03	2,96	0,15	0,96	0,05
27,50	0,05	0,50	0,02	0,15	0,01
33,77	0,05	1,12	0,07	0,70	0,03
40,72	0,06	0,27	0,01	0,114	0,005
43,59	0,06	2,77	0,13	0,67	0,03
45,90	0,07	6,56	0,30	1,55	0,11
50,0	0,1	1,13	0,04	0,25	0,01
51,5	0,1	0,51	0,02	0,189	0,007
54,0	0,1	0,29	0,01	0,064	0,003
57,3	0,1	0,73	0,02	0,155	0,005
58,6	0,1	0,95	0,03	0,129	0,006
65,0	0,1	5,56	0,23	1,10	0,05
66,5	0,1	1,38	0,05	0,45	0,02
73,6	0,1	9,20	0,39	1,72	0,07
76,3	0,1	3,90	0,13	1,19	0,04
77,7	0,1	4,13	0,12	0,75	0,04
78,6	0,1	1,16	0,04	0,21	0,01
88,2	0,2	1,96	0,06	0,33	0,01
90,3	0,2	3,85	0,14	1,08	0,04
95,3	0,2	0,48	0,02	0,13	0,01

1	2	3	4	5	6
97,0	0,1	12,4	0,6	3,36	0,21
108,9	0,1	14,9	0,7	2,28	0,18
111,2	0,1	3,53	0,12	0,54	0,03
113,6	0,1	21,6	1,1	5,39	0,32
115,4	0,1	4,85	0,18	0,72	0,04
118,9	0,1	6,51	0,30	0,96	0,05
128,1	0,1	0,44	0,02	0,104	0,005
137,8	0,1	5,77	0,19	1,31	0,07
141,1	0,1	13,2	0,5	1,76	0,09
143,3	0,1	6,23	0,20	1,39	0,08
150,8	0,1	0,74	0,08	0,12	0,03
152,4	0,1	10,3	0,6	3,52	0,13
155,4	0,1	16,6	0,9	2,13	0,18
167,4	0,1	0,93	0,03	0,19	0,01
169,6	0,1	3,03	0,08	0,62	0,03
172,4	0,1	1,47	0,05	0,179	0,007
177,2	0,1	8,28	0,33	0,99	0,05
185,4	0,1	0,89	0,04	0,174	0,009
190,9	0,2	0,26	0,03	0,037	0,004
197,5	0,2	6,75	0,34	0,768	0,038
199,6	0,2	1,75	0,09	0,330	0,016
201,4	0,2	1,36	0,07	0,153	0,006
210,7	0,2	0,55	0,04	0,101	0,007
216,9	0,2	0,71	0,05	0,128	0,006
219,1	0,2	39,6	1,9	4,28	0,22
225,9	0,2	0,76	0,05	0,081	0,006
228,6	0,2	0,23	0,04	0,031	0,006

Продолжение

1	2	3	4	5	6
232,6	0,2	1,09	0,05	0,191	0,009
235,2	0,2	17,9	0,9	1,87	0,09
238,7	0,2	23,6	1,2	4,07	0,20
241,5	0,2	6,85	0,34	0,705	0,035
244,5	0,2	0,43	0,05	0,055	0,006
251,3	0,2	3,07	0,15	0,310	0,015
254,2	0,2	1,28	0,07	0,129	0,007
262,9	0,2	8,94	0,44	0,882	0,044
263,8	0,2	2,36	0,19	0,388	0,031
268,5	0,2	4,16	0,20	0,406	0,020
273,5	0,2	14,8	0,7	1,43	0,07
280,0	0,2	0,54	0,08	0,064	0,010
281,4	0,2	8,78	0,44	1,40	0,07
284,3	0,2	57,5	2,8	9,09	0,45
290,2	0,2	6,04	0,30	0,946	0,047
300,9	0,2	15,9	0,70	1,47	0,07
305,6	0,2	12,40	0,71	1,13	0,06
310,8	0,2	0,79	0,11	0,089	0,013
312,3	0,2	17,8	0,8	1,61	0,08
315,4	0,2	2,11	0,14	0,237	0,015
323,2	0,2	5,12	0,25	0,569	0,028
325,7	0,2	4,35	0,26	0,482	0,029
328,2	0,2	18,6	1,0	2,05	0,11
332,1	0,3	(16,7)		(1,86)	
345,5	0,3	(4,8)		(0,51)	

Продолжение

1	2	3	4	5	6
347,6	0,3	(18,4)		(1,97)	
350,0	0,3	3,27	0,27	0,35	0,03
356,9	0,3	4,61	0,46	0,49	0,04
358,9	0,3	33,3	1,5	3,52	0,15
361,6	0,3	0,77	0,16	0,080	0,017
366,5	0,3	5,88	0,29	0,615	0,030
368,8	0,3	3,36	0,19	0,350	0,019
372,0	0,3	17,8	0,9	1,84	0,09
374,3	0,3	12,5	0,6	1,29	0,06
378,4	0,3	50,0	2,5	5,14	0,25
381,3	0,3	2,07	0,18	0,211	0,019
384,9	0,3	3,44	0,19	0,350	0,019
403,8	0,4	2,37	0,74	0,23	0,07
404,7	0,4	30,0	1,6	2,97	0,16
409,2	0,4	5,87	0,29	0,580	0,029
410,1	0,4	32,9	1,7	3,22	0,17
421,1	0,4	1,16	0,17	0,110	0,017
429,2	0,4	0,36	0,12	0,034	0,012
432,5	0,4	5,74	0,28	0,552	0,018
440,2	0,4	11,0	0,5	1,05	0,05
442,8	0,4	8,41	0,42	0,799	0,040
444,7	0,4	3,10	0,19	0,294	0,018
451,2	0,4	1,94	0,16	0,183	0,015
453,2	0,4	21,1	1,0	1,98	0,10
457,9	0,4	11,2	0,6	1,05	0,06

Продолжение

1	2	3	4	5	6
464,0	0,4	0,50	0,16	0,046	0,015
468,1	0,4	4,7	2,3	4,32	0,20
474,3	0,4	12,9	0,6	1,19	0,06
476,4	0,4	1,63	0,20	0,149	0,018
480,5	0,1	14,5	0,7	1,32	0,06
482,3	0,4	69,0	4,0	6,28	0,40
485,9	0,4	64,8	4,0	5,87	0,40
494,3	0,4	12,3	0,6	1,10	0,05
498,1	0,4	7,27	0,36	0,632	0,032
503,3	0,4	15,7	0,8	1,40	0,07
510,4	0,4	12,2	0,6	1,08	0,05
517,7	0,4	3,31	0,23	0,291	0,020
521,1	0,4	23,1	1,1	2,03	0,10
526,1	0,4	20,0	1,1	1,79	0,09
533,2	0,4	37,7	1,9	3,26	0,16
544,8	0,5	7,35	0,40	0,630	0,04
546,3	0,5	2,63	0,33	0,23	0,03
552,2	0,5	8,0	0,4	0,68	0,03
557,4	0,5	7,0	0,4	0,59	0,03
560,8	0,5	8,1	0,4	0,69	0,03
565,1	0,5	22,6	1,2	1,90	0,10
570,1	0,5	15,4	0,8	1,29	0,06
576,5	0,5	5,8	0,3	0,46	0,03
580,0	0,5	20,1	1,0	1,66	0,08

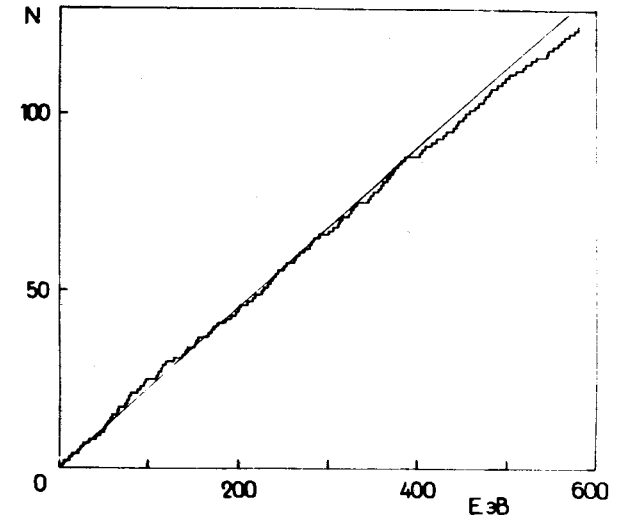


Рис. 2. Зависимость числа наблюдаемых резонансов ^{159}Tb от энергии нейтронов.

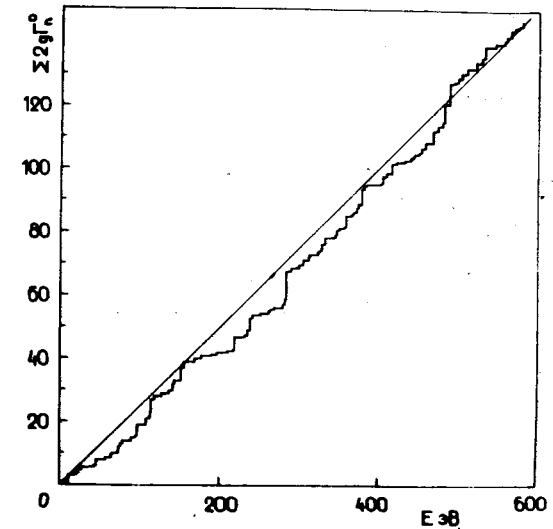


Рис. 3. Зависимость от энергии нейтронов суммы приведенных нейтронных ширин.

Отсутствие заметного спинового эффекта в силовой функции согласуется с данными, полученными ранее для других редкоземельных изотопов ^{15/}.

В заключение авторы выражают признательность Г.Н.Зимину, К.П.Малышеву и В.И.Чивкину за обеспечение хорошей работы электронной аппаратуры измерительно-вычислительного комплекса. Мы благодарны Н.Ю.Шириковой и И.И.Шелонцеву за постоянную помощь в вычислениях на ЭВМ, а также Л.Г.Поповой за участие в измерениях и обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П.Алфименков, А.И.Иваненко, Л.Ласонь и др. Препринт ОИЯИ, РЗ-8599, Дубна, 1975.
2. Ван Най-Янь, Н.Илиеску, Э.Н.Каржавина и др. ЖЭТФ, 47, 43, 1964.
3. Neutron Cross Sections. BNL-325, 3-rd Ed., vol. 1, 1973.
4. В.Б.Злоказов, Л.С.Нефедьева. Сообщение ОИЯИ, IO-5966, Дубна, 1971.
5. Э.Н.Каржавина, Ким Сек Су, А.Б.Попов, Х.Файков. Сообщение ОИЯИ, РЗ-8511, Дубна, 1975.
Э.Н.Каржавина, Ким Сек Су, А.Б.Попов, Х.Файков. Спиновые эффекты в нейтронной силовой функции редкоземельных ядер. Доклад на III Конференции по нейтронной физике. Киев, 1975.
6. А.Б.Попов, И.И.Шелонцев, Н.Ю.Ширикова. Сообщение ОИЯИ, З-9742, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1976 года.