

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С343Г1

Б-20

РЗ - 8653

26/2-75

Н.П.Балабанов, Ю.М.Гледенов, Пак Хон Чер,
Ю.П.Попов, В.Г.Семенов

1900/2-75

ИЗУЧЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ

В РЕАКЦИИ (n, α)

НА ^{105}Pd , ^{149}Sm И ^{171}Yb

1975

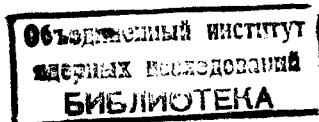
РЗ - 8653

Н.П.Балабанов, Ю.М.Гледенов, Пак Хон Чер,
Ю.П.Попов, В.Г.Семенов

ИЗУЧЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ

В РЕАКЦИИ (n, α)

НА ^{105}Pd , ^{149}Sm И ^{171}Yb



ВВЕДЕНИЕ

Исследования полных вероятностей α -распада отдельных возбужденных состояний атомных ядер позволили получить к настоящему времени значительную физическую информацию о природе нейтронных резонансов. Дальнейшее совершенствование методики измерений дало возможность существенно расширить круг исследуемых ядер, а также увеличить объем сведений относительно α -распада их возбужденных состояний.

В настоящей работе приводятся данные об α -распаде нейтронных резонансов изотопов ^{105}Pd , ^{149}Sm и ^{171}Yb , что является продолжением исследований сферически симметричных ядер, близких к замкнутым оболочкам^{/1/}, ядер, принадлежащих переходной области^{/2/}, и деформированных ядер^{/3/}. Исследования такого рода представляют интерес для выяснения структуры высоковозбужденных состояний и влияния формы ядра на процесс α -распада, а также для установления границ применимости различных модельных представлений.

Экспериментальные результаты исследования реакции (n, α) на изотопе ^{149}Sm являются дополнительными и уточненными по сравнению с опубликованными ранее^{/2/}. Реакция (n, α) для изотопов ^{105}Pd и ^{171}Yb наблюдается впервые.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения выходов (n, α) -реакции на изотопах ^{105}Pd , ^{149}Sm и ^{171}Yb проводились на пучке нейтронов ИБР-30

Таблица I

Ядро-мишень	E_{α} , МэВ	Вид соединения	Содержание изотопа, %	Площадь слоя, см ²	Кол-во слоев	Толщина слоя соединения, мкг/см ²	Временное разрешение, мкс /м	Время измерения, часы
Pd^{105}	6,3	металл	естественная смесь 22,6	450	4	12,1	0,13	180
Sm^{149}	9,3	Sm_2O_3	96,9	850	6	10,5	0,06	290
Yb^{171}	9,6	Yb_2O_3	90,2	850	4	7,9	0,13	410
Sm^{147} калибр.	9,8	Sm_2O_3	96,4	850	1	5,2	-	-

*) Взято из работы /20/

Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, работавшего в режиме бустера с линейным ускорителем электронов. В качестве детектора α -частиц использовалась многосекционная пропорциональная камера^{/4/}. Мишени ^{149}Sm и ^{171}Yb представляли собой слои окиси вещества, нанесенные на алюминиевые подложки методом осаждения. ^{105}Pd в измерениях использовался в виде металлической фольги толщиной 10 мкм. В табл. I приводятся некоторые сведения об использованных мишенях и условиях измерений.

На рис. 1, 2 и 3 приведены временные спектры выходов (n, α) -реакции для изотопов ^{105}Pd , ^{149}Sm и ^{171}Yb соответственно. Стрелками отмечены положения известных нейтронных резонансов. Обработка полученных результатов проводилась методом, описанным в работе^{/5/}. Калибровка осуществлялась по резонансу изотопа ^{147}Sm с энергией 3,4 эВ, α -ширина которого $\Gamma_{\alpha} = 2,5$ мкэВ,

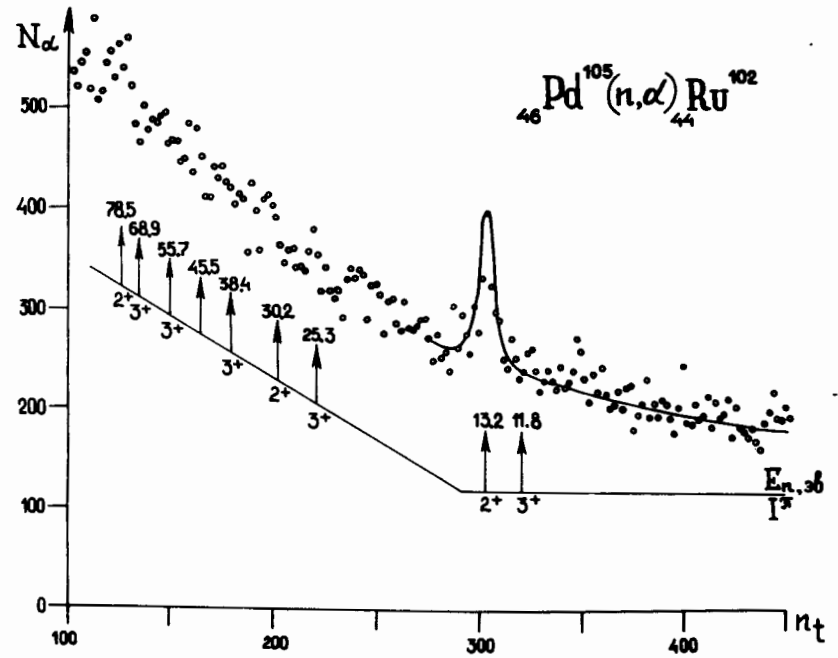


Рис. 1. Временной спектр (n, α) -реакции на изотопе ^{105}Pd

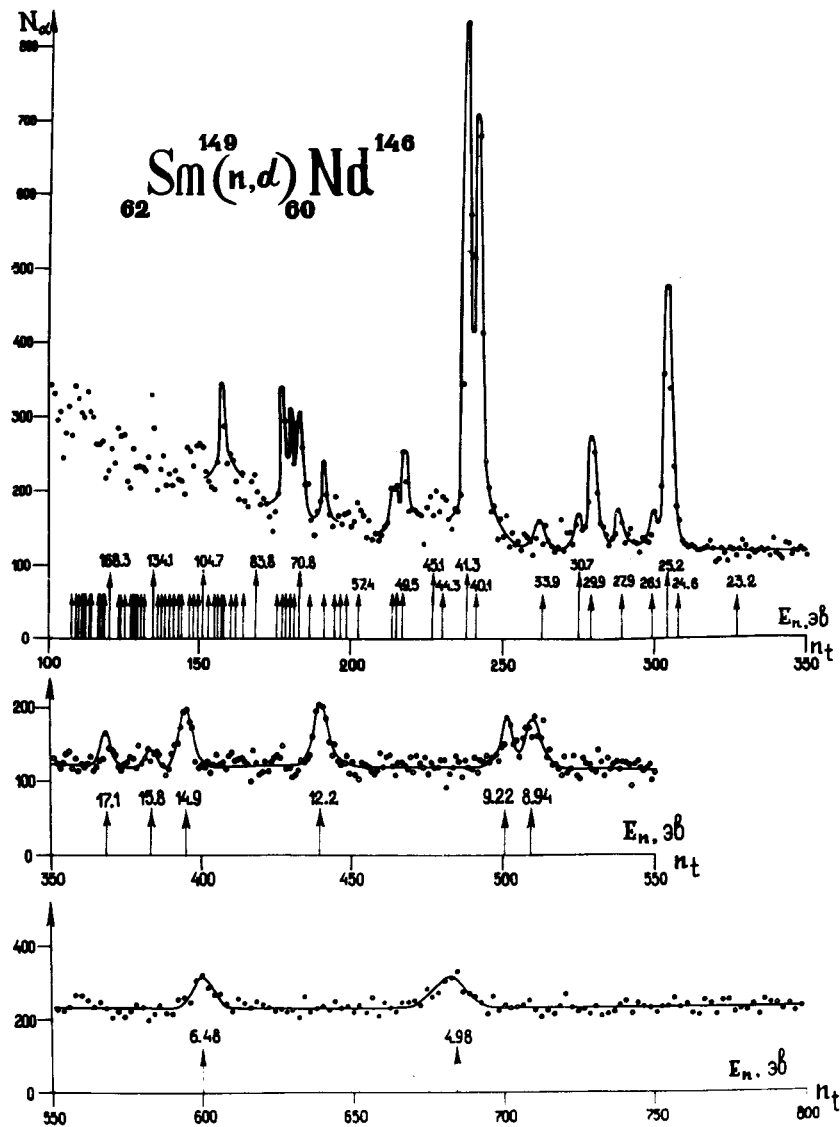


Рис. 2. Временной спектр (n, α) - реакции на изотопе ^{149}Sm

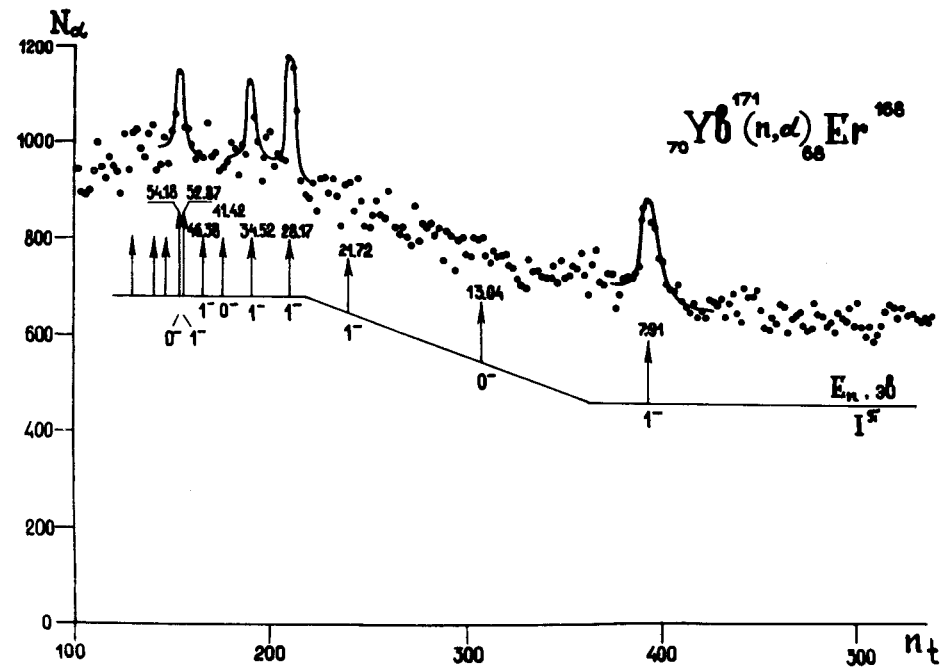


Рис. 3. Временной спектр (n, α) - реакции на изотопе ^{171}Yb

получена в работе /2/. Параметры нейтронных резонансов брались из работ /6,7/, а зависимость потока нейтронов от энергии - из работы /8/.

В табл. 2 приведены значения и оценки полных α-ширин измеренных нейтронных резонансов. Верхние оценки даются со статистической достоверностью 95%. В приведенных в таблице значениях ошибок учтены как статистические ошибки, так и неопределенности в значениях параметров соответствующих нейтронных резонансов. Ошибка абсолютной нормировки альфа-ширин сюда не вошла.

Таблица 2

Pd ¹⁰⁵			Yb ¹⁷¹			Sm ¹⁴⁹		
E ₀ (эВ)	J	Γ x 10 ⁷ (эВ)	E ₀ (эВ)	J	Γ x 10 ⁸ (эВ)	E ₀ (эВ)	J	Γ x 10 ⁷ (эВ)
11,8	3	≤ 4,1	7,91	I	0,36±0,05	0,098	4	0,37±0,10
13,2	2	1,3±0,2	13,04	0	≤ 0,3	0,87	4	0,23±0,05
25,3	3	≤ 0,8	21,72	I	≤ 8,1	4,98	4	0,21±0,06
30,2	2	≤ 9,8	28,17	I	2,5 ± 0,5	6,48	3	0,59±0,15
38,4	3	≤ 11,2	34,52	I	0,7 ± 0,3	8,9	4	0,18 ± 0,09
45,5	-	-	41,42	0	≤ 1,8	9,2	3	0,95±0,40
55,7	3	≤ 0,9	46,38	I	≤ 14,2	12,2	3	1,2±0,3
68,9	3	≤ 1,9	52,87	I	5,2 ± 1,5	14,9	4	0,4±0,1
78,5	2	≤ 1,2	54,18	0	-	15,8	3	(1,8)
						17,1	4	(0,24)
						23,2	4	≤ 0,7
						24,6	4	-
						25,2	3	1,1±0,2
						26,1	4	0,30±0,15
						27,9	3	7,0±3,0
						29,9	3	2,1±0,2
						30,7	4	0,2±0,1
						33,9	4	(0,17)
						40,1	3	3,8±0,3
						41,3	3	3,7±0,3
						44,3	4	0,3±0,1
						45,1	4	0,5±0,2
						49,5	3	1,1±0,2

*) по данным работы /10/
 **) по данным настоящей работы

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 3 приведены средние значения полных α -ширин изотопов ¹⁰⁵Pd, ¹⁴⁹Sm и ¹⁷¹Yb, полученные экспериментально и рассчитанные по оптической модели /ОМ/ взаимодействия α -частиц с ядром с использованием потенциала Вудса-Саксона с переменной диффузностью /9/. Приведены также значения эффективного числа каналов, участвующих в реакции (n, a):

$$\nu_{\text{эфф}}^{\text{ОМ}} = \frac{(\sum P_c)^2}{\sum P_c^2}, \quad /1/$$

рассчитанные из величин проницаемостей потенциального барьера P_c , а для изотопа ¹⁴⁹Sm - и значение

$$\nu_{\text{эфф}} = \frac{2 \cdot \langle \Gamma_a \rangle^2}{\langle \Gamma_a^2 \rangle - \langle \Gamma_a \rangle^2}, \quad /2/$$

полученное из экспериментальных данных.

Таблица 3

Ядро-мишень	J ^π	Число резонансов	Γ _c эксп (эВ)	Γ _c ^{ОМ} (эВ)	ν _{эфф.}	ν _{эфф.} ^{ОМ}
Pd ¹⁰⁵	2 ⁺	1	(1,3±0,2) x 10 ⁻⁷	(0,90±0,20) x 10 ⁻⁷	-	1,5
	2 ⁺	(3)	≤ 4,1 x 10 ⁻⁷	-	-	-
	3 ⁺	(5)	≤ 3,8 x 10 ⁻⁷	(0,05±0,01) x 10 ⁻⁷	-	1,5
Sm ¹⁴⁹	3 ⁻	13	(2,1±0,3) x 10 ⁻⁷	(5,2±0,5) x 10 ⁻⁷	3,0 ^{+2,5} _{-1,3}	2,4
	4 ⁻	15	(0,28±0,04) x 10 ⁻⁷	(0,67±0,05) x 10 ⁻⁷	7+14	2,5
Yb ¹⁷¹	0 ⁻	(2)	≤ 1,0 x 10 ⁻⁸	(6,2±0,6) x 10 ⁻⁹	-	≥ 1,1
	1 ⁻	4	(2,2 ± 0,6) x 10 ⁻⁸	(19 ± 2) x 10 ⁻⁸	-	4,0

Для исследованных изотопов, за исключением ^{171}Yb , наблюдается хорошее соответствие экспериментальных ширин значениям, полученным из модельных представлений.

Палладий-105. Реакция $^{105}_{46}\text{Pd}(n, \alpha)^{102}_{44}\text{Ru}$ наблюдается впервые. В эксперименте обнаружен резонанс, соответствующий α -распаду возбужденного состояния ^{106}Pd на 13,2 эВ выше энергии связи нейтрона, еще для семи резонансов сделаны верхние оценки полных α -ширин, которые находятся в согласии с данными работы /1/. Полученное значение и верхние оценки полных α -ширин не противоречат расчетным данным /табл. 3/. Малое значение средней полной α -ширины для резонансов со спином 3^+ обусловлено запретом α -распада этих состояний в основное состояние дочернего ядра ^{102}Ru , а вероятность α -распада на первое возбужденное состояние ^{102}Ru должна быть в среднем в двадцать раз меньше /табл. 3/, поскольку E_α уменьшается с 6,3 до 5,8 МэВ.

Самарий-149. Изотоп ^{149}Sm относится к тому не широкому пока кругу ядер, у которых удалось измерить довольно большое число α -ширин. Это позволяет вернуться к проверке применимости статистической теории к описанию реакции (n, α) /11/. Настоящие измерения проведены с лучшим разрешением по энергии нейтронов по сравнению с ранними работами /2,10/. Кроме того, теперь большинство резонансов в области $E_n < 100$ эВ идентифицировано по спину. Это дает возможность более детально проанализировать экспериментальные данные.

При анализе распределений полных α -ширин мы использовали резонансы с $E_0 < 71$ эВ за исключением резонансов с $E_0 = 23,2; 24,6; 62,1$ эВ со спином 4^- и $E_0 = 60,9$ эВ с $J^\pi = 3^-$, для которых удалось получить лишь верхние оценки α -ширин /см. табл. 2/.

На рис. 4 представлены интегральные распределения полных α -ширин самария-149 отдельно со спинами 3^- и 4^- . Экспериментальные гистограммы сравниваются с распределениями, рассчитанными по статистической те-

рии. В случае полных α -ширин /11/ интегральное распределение должно иметь вид:

$$N \cdot P(\Gamma_\alpha > \Gamma) = N \cdot \int_{\Gamma}^{\infty} P(y) dy, \quad /3/$$

где $P(y)$ - хи-квадрат распределение с числом степеней свободы $\nu_{\text{эфф}}$, полученным по формуле /1/, и экспериментальным значением $\langle \Gamma_\alpha \rangle$. Теоретические значения $\nu_{\text{эфф}}^{\text{OM}} = 2,4$ ($J^\pi = 3^-$) и $2,5$ ($J^\pi = 4^-$) /см. табл. 3/ приводят к распределениям, представленным на рис. 4 сплошными кривыми.

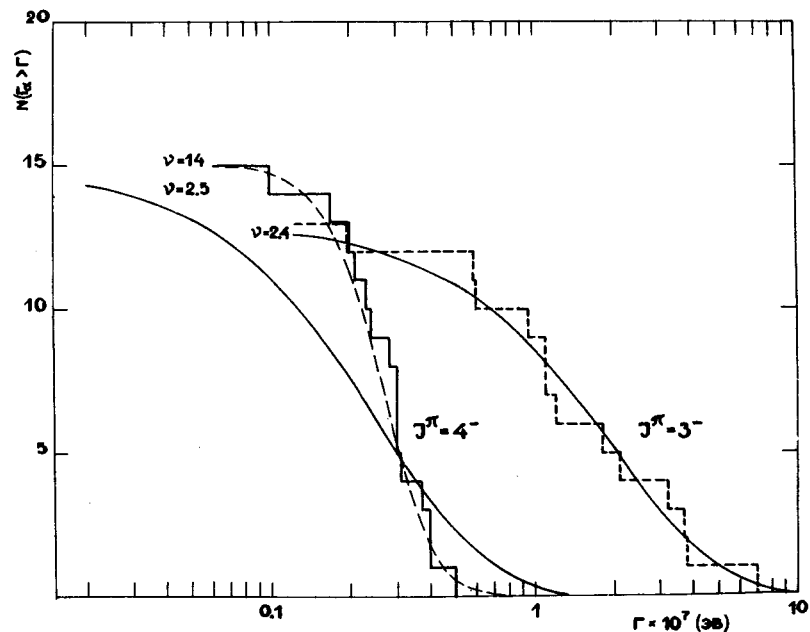


Рис. 4. Интегральные распределения полных α -ширин ^{149}Sm : гистограммы - экспериментальные распределения; сплошные плавные кривые - рассчитанные распределения при теоретических значениях ν ; пунктирная плавная кривая - полученная в результате подгонки к эксперименту / $\nu = 14$ /.

Для резонансов со спином 3^- наблюдается хорошее согласие расчетного и экспериментального распределений, в то же время не удалось получить удовлетворительного описания экспериментального распределения полных альфа-ширин резонансов со спином 4^- с использованием указанных параметров. Эксперимент дает более узкое распределение, чем предсказывает статистическая теория. Значительно лучшее согласие с экспериментом получается при $\nu = 14$ /пунктирная кривая/.

Из экспериментальных значений полных α -ширин по формуле /2/ можно определить эффективное число степеней свободы, однако ограниченный статистический набор ширин и их экспериментальные ошибки могут привести к некоторому смещению оценки числа степеней свободы.

Нами был проделан детальный анализ экспериментальных ширин с применением метода Монте-Карло, аналогичный использованному в работах /12,13/ при обработке парциальных γ -ширин.

Для 13 резонансов со спином 3^- в результате такого анализа получено значение $\nu_{\text{эфф}} = 3,0^{+2,5}_{-1,3}$ /доверительный интервал от 10 до 90%/ , что вполне согласуется с теоретическим значением. Для 15 резонансов со спином 4^- получено $\nu_{\text{эфф}} = 14,9$. Попытка поместить пропущенные резонансы в самом "неприятном" месте - при нулевом значении Γ_α /хотя эксперимент дает оценки $\Gamma_\alpha < 0,4 \times 10^{-7}$ эВ и $\Gamma_\alpha < 0,7 \times 10^{-7}$ эВ/ приводит к величине $\nu_{\text{эфф}} = 7,6$. В случае такого узкого распределения из-за экспериментальных ошибок не представляется возможным определить границы доверительного интервала для $\nu_{\text{эфф}}$, тем не менее, можно показать, что различие между теоретическим и экспериментальным значениями числа степеней свободы значительно.

Чтобы оценить достоверность такого заключения для ряда статистических наборов ширин, случайно выбираемых из совокупности с $\nu = 2,5$ /т.е. с теоретическим значением/, вычисляли ν по методу максимального правдоподобия. Из 1000 таких значений ν не было ни одного, большего 14,9, и только 18 превысило 7,6.

Таким образом, несмотря на большие экспериментальные ошибки и ограниченную выборку ширин, можно

сделать вывод о несоответствии экспериментального и теоретического распределений α -ширин резонансов со спином 4^- .

Здесь уместно отметить, что в работах /2,14/, где описание распределения 15 полных α -ширин ^{149}Sm проводилось без разделения резонансов по спинам суммой двух распределений, указывалось, что лучшую подгонку дает сумма распределений с $\nu(3^-) = 2,5$ и $\nu(4^-) = 20+60$. Однако малый набор экспериментальных α -ширин и необходимость анализировать суммарное по спином распределение не позволили тогда прийти к определенным заключениям.

Для полных α -ширин $^{147}\text{Sm}/^{15}/$ наблюдается хорошее согласие теоретических распределений /для одного и другого значений спина/ с экспериментальными. Таким образом, отклонение в распределении экспериментальных значений полных α -ширин от предсказываемого статистической теорией наблюдается только для резонансов ^{149}Sm со спином 4^- .

В настоящее время трудно с уверенностью указать физическую причину такого сужения распределения α -ширин. Возможно, это связано с наличием некоторой корреляции волновых функций, ответственных за α -переходы на первые возбужденные состояния конечного ядра ^{146}Nd для исследованных резонансных состояний. Можно упомянуть, что в последнее время и для случая парциальных γ -ширин дискутируется вопрос о возможном превышении на несколько десятков процентов $\nu_{\text{эксп}}$ по сравнению с $\nu_{\text{теор}} = 1$ в этой же области атомных ядер /16/. В то же время α -ширины, вероятно, определяются в основном вкладом малонуклонных типов возбуждения, а, следовательно, для них более обычными могут быть отклонения от статистической теории.

В области 9 эВ в реакции $^{149}\text{Sm}(n, \alpha)^{146}\text{Nd}$ обнаружен дублет, состоящий из резонансов 8,9 и 9,2 эВ, которым мы, используя временные спектры α -частиц в различных амплитудных окнах из работы /10/, приписали спины 4^- и 3^- соответственно. При измерениях нейтронных ширин резонанс 9,2 эВ не был обнаружен, по-видимому, из-за малости нейтронной ширины и недоста-

точного разрешения по энергии нейтронов. Однако в работе Бечваржа и др.^{16/} высказывалось предположение о возможности существования этого дублета в связи с неоднозначностью спиновой идентификации, получающейся с помощью различных методик.

Относительно полное изучение резонансных состояний ^{150}Sm позволяет искать корреляции между нейтронными и альфа-ширинами этих состояний. Статистическая теория рассматривает Γ_α и Γ_n^0 как характеристики независимых способов распада отдельного уровня составного ядра, флуктуирующие совершенно независимо.

Нами были подсчитаны коэффициенты корреляции $r[\Gamma_\alpha, 2g\Gamma_n^0]$ методом, указанным в работе^{17/}. Результаты расчета даны в табл. 4. Из данных этой таблицы можно утверждать, что в пределах ошибок $r=0$, что указывает на отсутствие корреляции величин Γ_α и $2g\Gamma_n^0$ для ^{149}Sm .

Иттербий-171. Исследование изотопа ^{171}Yb представляет интерес с точки зрения изучения влияния деформации на α -распад возбужденных состояний деформированных ядер. Экспериментальные данные по полным α -ширинам из реакции $^{171}\text{Yb}(n, \alpha)^{168}\text{Er}$ получены впервые.

Можно полагать, что среднее значение α -ширин получено достаточно надежно, так как усреднение велось по четырем резонансам при ожидаемом значении $\nu_{\text{эфф}}=4$, что эквивалентно усреднению по полутора десяткам резонансов с $\nu=1$.

Таблица 4

J^π	Число пар	$r[\Gamma_\alpha, 2g\Gamma_n^0]$
3^-	13	$-0,32 \pm 0,26$
4^-	15	$-0,20 \pm 0,40$
$3^- + 4^-$	28	$-0,23 \pm 0,19$

Интересно отметить, что согласно расчетам по оптической модели^{9/} для ^{171}Yb предполагается усиление α -переходов на фактор 4-5 за счет близости гигантского /оптического/ максимума. Однако сравнение с экспериментом /табл. 3/ приводит к выводу, что такое усиление в данном случае не имеет места.

Возможно, расчеты, сделанные по ОМ для сферических ядер, не могут претендовать на предсказание положения гигантского резонанса в области деформированных в основном состоянии ядер.

Отметим, что средняя α -ширина, рассчитываемая в кластерной модели α -распада^{18/}, которая не предсказывает гигантских резонансов во взаимодействии α -частиц с ядрами, удовлетворительно согласуется с экспериментальной величиной, хотя вычисления проведены также в пренебрежении деформацией ядра.

Оценки сечения $\sigma(n, \alpha)$ в тепловой точке, полученные из резонансных параметров ^{171}Yb , дают величину $\sigma_\alpha^\theta = 0,01$ мкбарн, что не противоречит данным работы^{19/}, в которой $\sigma_\alpha < 1,5$ мкбарн.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.И.Фурману за полезные обсуждения, А.Аврамовой и В.Е.Рыжову - за изготовление мишеней и помощь при измерениях.

Литература

1. Ю.П.Попов, М.Флорек. ЯФ, т. 9, вып. 6, 1163 /1969/.
2. J.Kvitek, Yu.P.Porov. Nucl. Phys., A154, 177 (1970).
3. Н.П.Балабанов, Ю.М.Гледенов, Ким Тхе Себ, Ю.П.Попов, В.Г.Семенов, М.Флорек. ОИЯИ, РЗ-7376, Дубна, 1973.
4. Н.П.Балабанов, Ю.П.Попов, К.Г.Родионов, В.Г.Семенов. ОИЯИ, РЗ-6602, Дубна, 1972.
5. Yu.P.Porov et al. Nucl. Phys., A188, 212 (1972).
6. BNL-325, Third edition, v. 1, New York, 1973.
7. Э.Н.Каржавина, Ким Сек Су, А.Б.Попов. ОИЯИ, РЗ-6237, Дубна, 1972.
8. В.В.Голиков и др. ОИЯИ, З-5736, Дубна, 1971.

9. В.И.Фурман, Ю.П.Попов. *Материалы Всесоюзного совещания по нейтронной физике, ч. 1, Киев, 1972, стр. 159.*
10. П.Винивартер и др. *ОИЯИ, РЗ-7245, Дубна, 1973.*
11. Ю.П.Попов, Р.Ф.Руми, М.Пшитула, М.Стэмпиньски, *Acta Phys. Pol., B4, 275 (1973).*
12. L.M.Bollinger et al. *Phys.Rev., 132, 1640 (1963).*
13. D.L.Price et al. *Nucl.Phys., A121, 630 (1968).*
14. Ю.П.Попов и др. *Nuclear Data for Reactors, v. 1, p. 669, Vienna, IAEA, 1970.*
15. N.P.Balabanov, Yu.P.Рорov, V.G.Semenov. *In Contributions to the Conference on Nuclear Structure Study with Neutrons, Report B4, p. 140, Budapest, 1972.*
16. F.Becvar, R.E.Chrien, O.A.Wasson. *JINR Communication, B3-3-7830.*
17. Е.В.Гай, Н.С.Работнов. *ЯФ, т. 6, 1313 /1967/.*
18. С.Г.Кадменский, В.И.Фурман. *ЭЧАЯ, б, вып. 2 /1975/.*
19. A.Emsallem et al. *Nucl.Phys., A231, 437 (1974).*
20. А.Ф.Дадакина. *Бюллетень информационного центра по ядерным данным, вып. 3, 226. Атомиздат, Москва, 1966.*

*Рукопись поступила в издательский отдел
4 марта 1975 года.*