

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

Г 53

P3-88-806

Ю.М.Гледенов, М.П.Митриков, И.Чадраабал

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$
ПРИ РЕЗОНАНСНЫХ ЭНЕРГИЯХ НЕЙТРОНОВ

1988

1. ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ проводится систематическое изучение реакции (n, α) на стабильных ядрах в широкой области массовых чисел $60 < A < 190$ с помощью резонансных нейтронов ^{1-6/}. Наиболее подробно исследованы к настоящему времени нечетные изотопы неодима и самария ^{1,2,4,7/}, что позволило получить первые сведения о распределениях α -ширин нейтронных резонансов. Обнаружен α -распад компаунд-состояний и для некоторых деформированных ядер в области $150 \leq A \leq 178$ ^{3,8/}. Дальнейшим расширением круга исследованных ядер явилось наблюдение резонансов в реакции (n, α) на ядрах с $A \leq 100$ ^{4,9/}. Эти ядра характеризуются тем, что для них p -волновая нейтронная силовая функция S_1 почти на порядок больше s -волновой S_0 . Данные по реакции (n, α) на ядрах с $A \leq 100$ необходимы также при расчетах мощных атомных реакторов для оценки накопления гелия в конструкционных материалах реакторов ^{10/}.

Настоящая работа является продолжением исследований реакции (n, α) в этой области атомных весов и посвящена изучению реакции ${}^{91}\text{Zr}(n, \alpha) {}^{88}\text{Sr}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения были выполнены на пучках нейтронов от импульсного реактора ИБР-30, работавшего совместно с линейным ускорителем электронов ЛУЭ-40 при мощности $W = 10$ кВт. Спектрометрия нейтронов осуществлялась по методу времени пролета на пролетных базах $L = 30$ и 85 м. Тонкие мишени из окиси циркония изготовлялись методом осаждения на алюминиевых подложках. Для калибровки сечения исследуемой реакции проводились параллельные измерения на мишени ${}^{147}\text{Sm}$. В табл. 1 приведены более подробные сведения об использованных мишенях.

Измерение выхода α -частиц проводилось с помощью быстрого детектора ^{11, 12/}, который содержит шесть сдвоенных плоских пропорциональных камер, помещенных в общем вакуумированном корпусе из дюралюминия. Рабочим газом служила смесь $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ при давлении $P = 0,6$ атм. Экспериментальные спектры по времени пролета набирались отдельно с каждой камеры при помощи измери-



Таблица 1

Ядро-мишень	Вид соединения	Обогащение, %	Толщина мишени, мг/см ²	Число ядер в слое на см ² · 10 ¹⁹	Количество слоев	S, см ²	E _{α0} , МэВ
⁹¹ Zr	ZrO ₂	91,1	5,0	2,23	4 ÷ 8	2500-5000	5,4
¹⁴⁷ Sm	Sm ₂ O ₃	95,3	5,0	1,68	2	1250	9,8

тельного модуля ИВЦ ЛНФ на базе ЭВМ СМ-3. Спектры записывались на магнитный диск и потом обрабатывались на ЭВМ PDP-11/70. Конструкция детектора, способ его расположения на пучке нейтронов, а также блок-схема электроники показаны на рис. 1. Мишени 4 в этой геометрии облучаются под скользящим углом ~3°, а используемый для формирования нейтронного пучка щелевой коллиматор 1 обеспечивает защиту рабочего объема камер от непосредственного облучения нейтронами и γ-квантами, что существенно уменьшает перегрузку детектора в момент импульса мощности реактора.

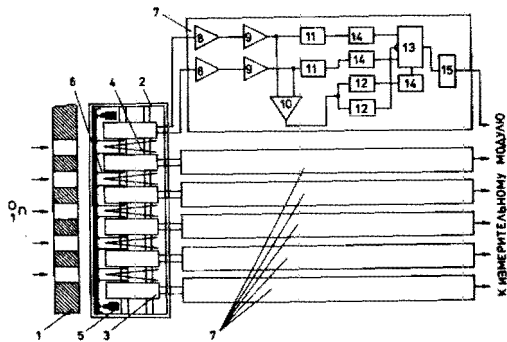


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - щелевой коллиматор; 2 - корпус системы пропорциональных камер; 3 - сдвоенная пропорциональная камера; 4 - мишени; 5 - электромагнит для ввода и вывода калибровочного источника; 6 - калибровочный урановый источник; 7 - секция электроники; 8 - зарядочувствительный предусилитель; 9 - быстрый линейный усилитель; 10 - линейный сумматор; 11 - формирователь импульсов; 12 - дифференциальный дискриминатор; 13 - блок совпадений и антисовпадений; 14 - линия задержки; 15 - согласователь.

Таблица 2

Серия	Колич. мишеней	S ₂ , см	t _{изм} , Г	Разрешение, нс/м	L, м	W _p , кВт
I	8	5000	130	133	30	10
II	4	2500	76	47	85	10
III	4	2500	91	47	85	10
IV	8	5000	100	47	85	9

К каждой сдвоенной пропорциональной камере 3 подключается секция электроники 7, состоящая из аналоговых и цифровых блоков. Схема отбора дает разрешение регистрации импульсов, возникающих одновременно в обеих половинах сдвоенных камер, когда их суммарная амплитуда попадает в окно, определяемое дискриминаторами нижнего и верхнего порогов. Выходные сигналы от шести детекторных систем передаются через длинные сигнальные кабели на измерительный модуль.

Были сделаны четыре серии измерений на исследуемом ядре, данные о которых приведены в табл. 2. Для уменьшения фона от высокоэнергетических нейтронов в четвертой серии был использован алюминиевый фильтр толщиной d = 2 см.

Экспериментальная информация обрабатывалась отдельно для каждой из шести камер, а потом проводилось суммирование для мишеней исследуемого и калибровочного ядер. По данным суммарных спектров были вычислены полные α-ширины нейтронных резонансов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 показаны суммарные для всех серий времяпролетные спектры выхода α-частиц из реакции ⁹¹Zr(n, α)⁸⁸Sr для пролетных баз L = 85 м /нижний спектр/ и L = 30 м /верхний спектр/. Стрелками указаны положения известных нейтронных резонансов. Значения полных α-ширин определялись из суммарных отсчетов α-частиц N_α в отдельных резонансах по формуле:

$$\Gamma_{\alpha}^x = \Gamma_{\alpha}^k \cdot \epsilon_{\alpha}^k \cdot S^k \cdot \phi_n^k \cdot A^k \cdot \Gamma^x \cdot N_{\alpha}^x / (\epsilon_{\alpha}^x \cdot S^x \cdot \phi_n^x \cdot A^x \cdot \Gamma^k \cdot N_{\alpha}^k), \quad /1/$$

где ε_α - эффективность регистрации α-частиц детектором, зависящая от толщины мишени и энергии α-частиц; S - площадь мише-

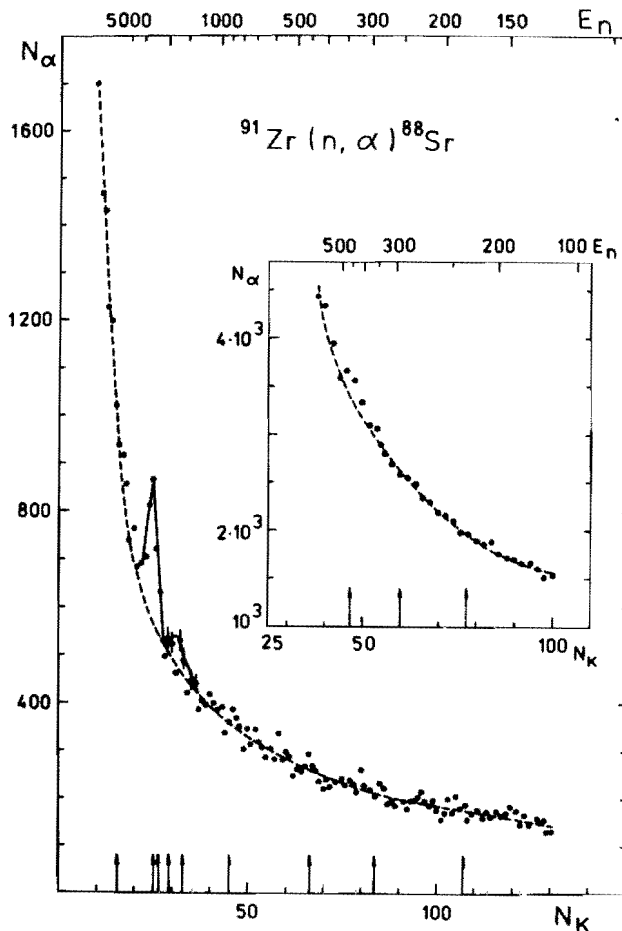


Рис. 2. Экспериментальные времяпролетные спектры выхода α -частиц из реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$: нижний спектр для 85 м и верхний для 30 м баз; стрелками указаны положения известных нейтронных резонансов; экспериментальный фон показан пунктирной линией.

ни; A - площадь резонанса над кривой пропускания; ϕ_n - поток нейтронов; Γ и Γ_α - полная и α -ширины резонанса. Индексы "К" и "Х" обозначают величины для калибровочного и исследуемого резонансов соответственно. Параметры нейтронных резонансов были взяты из атласа /13/; значения параметра A рассчитаны согласно

работе /14/, а зависимость потока нейтронов от энергии - из работы /15/. Фон определялся по межрезонансной области /ход фона показан пунктирной линией на рис. 2/. В качестве калибровочных резонансов были использованы резонансы ^{147}Sm с $E_0 = 3,42$ и $83,7$ эВ, значения полных α -ширин которых $\Gamma_\alpha = (1,8 \pm 0,2)$ и $(2,5 \pm 0,3)$ мкэВ соответственно /16,17/.

Из данных экспериментов на пролетных базах $L = 85$ и 30 м были вычислены полные α -ширины трех резонансов ^{91}Zr с $E_0 = 449,2$; $1531,4$ и $2474,2$ эВ. Еще для трех резонансов с $E_0 = 181,7$; $292,6$ и $892,7$ эВ были получены верхние оценки полных α -ширин с достоверностью 95%. Средневзвешенные значения и оценки полных α -ширин приведены в табл. 3.

E_0 , эВ		$L = 85$		$L = 30$ м		$\sigma_{n,\alpha}^{\text{рез}}$	
		$\Gamma_\alpha^{\text{ср. взв.}}$, мкэВ	Γ_α , мкэВ	$\langle \Gamma_\alpha \rangle^{\text{экс}}$, мкэВ	$\langle \Gamma_\alpha \rangle^{\text{КМ}}$, мкэВ		$\langle \Gamma_\alpha \rangle^{\text{СМ}}$, мкэВ
2474,2	2^+	165 ± 46		88 ± 51	21	26	1,67
1531,4	2^+	12 ± 7					0,57
892,7	3^-	≤ 42					
449,4	$1^-; 3^-$	≤ 67	31 ± 10	31 ± 10	$36; 3$	$43; 5$	0,01
292,6	$2^+; 3^+$	$\leq 1,6$	$\leq 0,43$				
181,1	3^-	$\leq 0,40$	$\leq 0,16$				

Погрешности в Γ_α включают в себя статистические ошибки счета α -частиц и неопределенности в соответствующих резонансных параметрах, входящих в формулу /1/; погрешности калибровки не включены.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 приведена схема α -распада уровней, возбужденных при захвате s - и p -нейтронов ядром ^{91}Zr . При захвате s -нейтронов возбуждаются уровни со спином и четностью $J^\pi = 2^+$ и 3^+ , а при захвате p -нейтронов - с $J^\pi = 1^-, 2^-, 3^-, 4^-$. Стрелками показаны α -переходы на основное (α_0) и первое возбужденное (α_1) состояния дочернего ядра, разрешенные правилами отбора по спину и четности. Как видно, при захвате s -нейтронов α -переходы на основное состояние разрешены только в резонансах со спином 2^+ , а при захвате p -нейтронов - в резонансах со спинами 1^- и 3^- . Вкладом α -переходов на первое возбужденное состояние, отстоящее на $1,836$ МэВ от основного состояния, в обоих случаях можно пренебречь, поскольку проникаемость потенциального барьера для них на несколько порядков меньше. Поэтому полные α -ширины будут равняться парциальным ширинам α_0 -переходов $\Gamma_\alpha \approx \Gamma_{\alpha_0}$.

Приведенные в табл. 3 экспериментальные значения полных α -ширин для резонансов с $E_0 = 2474,2$ и $1531,4$ эВ являются средневзвешенными значениями α -ширин из трех серий измерений на пролетной базе $L = 85$ м. В табл. 3 приведено и среднее значение α -ширины $\langle \Gamma_\alpha \rangle^{\text{экс}}$ обоих резонансов с одинаковым спином, которое можно сравнить с теоретическими расчетами по кластер-

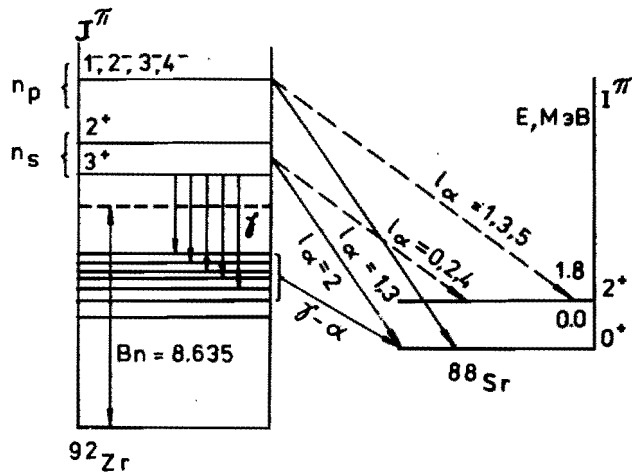


Рис. 3. Схема α -распада возбужденных уровней компаунд-ядра ^{92}Zr : n_s - возбужденные уровни при захвате s -нейтронов ядром ^{91}Zr , а n_p - при захвате p -нейтронов; B_n - энергия связи нейтрона в МэВ; J^π - спин и четность уровней компаунд-ядра ^{92}Zr ; I^π - спин и четность уровней дочернего ядра ^{88}Sr ; E - энергия возбуждения дочернего ядра в МэВ.

ной и статистической моделям. Из-за уменьшения потока нейтронов в экспериментах на базе $L=85$ м можно оценить лишь верхнее значение α -ширины резонанса с $E_0=449,4$ эВ, но видно, что оно не противоречит приведенному значению $\Gamma_\alpha=(31 \pm 10)$ мкэВ из эксперимента на базе $L=30$ м. Спин этого резонанса неизвестен ^{/18/}, поэтому в табл. 3 приведены расчетные значения средней α -ширины для двух спинов.

В последнем столбце табл. 3 приведена оценка вклада резонансов с $E_0=2474,2$, $1531,4$ и $449,4$ эВ в тепловое сечение, вычисленная из параметров резонансов по формуле Брейта-Вигнера ^{/19/} для изолированного уровня при $E_0 \gg E_T$ и $\Gamma \ll E_0$:

$$\sigma_{n,\alpha}^{\text{т(рез)}} = (\pi \cdot \lambda_0^2 \cdot g \cdot \Gamma_n \cdot \Gamma_\alpha / E_0^2) (E_0 / E_T)^{1/2}, \quad /2/$$

где Γ_n и Γ_α - нейтронная и α -ширины, λ_0 - длина волны нейтрона при энергии резонанса E_0 , g - статистический фактор, E_T - тепловая энергия нейтронов.

Для спина резонанса с $E_0=292,6$ эВ в литературе приводятся два значения: $J^\pi = 3^+ /18/$ и $J^\pi = 2^+ /18/$. Принимая первое, более достоверное значение и имея в виду, что α_0 - переход со спином 3^+ запрещен правилами отбора по спину и четности, можно предположить, что с этого возбужденного состояния осуществляется двухступенчатый процесс $(n, \gamma\alpha)$, при котором сначала идет мягкий γ -переход $s \rightarrow s'$, а потом α -переход от промежуточного состояния s' на основное состояние дочернего ядра. При таком предположении экспериментальная полная α -ширина $\Gamma_\alpha^{\text{экс}}$ для

резонанса будет равняться сумме очень малых ширин $\Gamma_{\alpha i}$ и ширины процесса $(n, \gamma\alpha)\Gamma_{\gamma\alpha}$:

$$\Gamma_\alpha^{\text{экс}} = \sum_i \Gamma_{\alpha i} + \Gamma_{\gamma\alpha} \approx \Gamma_{\gamma\alpha}. \quad /3/$$

Это позволяет определить верхнее значение другого важного параметра нейтронных резонансов - силовой функции мягких γ -переходов S_γ . Как известно ^{/20/}, силовую функцию $S_\gamma^{\text{сс}}$ можно рассчитать по формуле:

$$S_\gamma^{\text{сс}} = (2\pi/D) (\Gamma_\gamma(B_n) / A_{\gamma\alpha}) \cdot \Gamma_{\gamma\alpha} \approx (2\pi/D) (\Gamma_\gamma(B_n) / A_{\gamma\alpha}) \cdot \Gamma_\alpha^{\text{экс}}, \quad /4/$$

где $A_{\gamma\alpha}$ - площадь под теоретической кривой α -спектра в реакции $(n, \gamma\alpha)$.

Расчеты $A_{\gamma\alpha}$ сделаны с использованием проницаемостей для α -частиц согласно кластерной модели. Верхние оценки силовой функции мягких γ -переходов в резонансе при $E_0=292,6$ эВ ^{91}Zr следующие:

$$S_\gamma^{\text{сс}}(E1) \leq 670 \cdot 10^{-9} \quad \text{и} \quad S_\gamma^{\text{сс}}(M1) \leq 280 \cdot 10^{-9}.$$

Они получены по формуле /4/ в предположении, что все γ -переходы имеют мультипольность $E1$ или $M1$ при значениях параметров $\Gamma_\gamma(B_n) = (193 \pm 38)$ мэВ ^{/21/} и $D(3^+) = 1368$ эВ.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Ю.П.Попова за постоянную поддержку и интерес к работе, Т.С.Зварову за изготовление мишеней, Н.И.Линькова, Ю.Н.Воронова за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Ю.П. - ЭЧАЯ, 1972, т.2, с.925.
2. Valabanov N.P. et al. - Nucl. Phys., 1976, v.A261, p.35.
3. Балабанов Н.П. и др. - ЯФ, 1978, т.28, вып.5, с.1148.
4. Антонов А. и др. - ЯФ, 1978, т.27, вып. 1, с.18.
5. Пикельнер Л.Б., Попов Ю.П., Шарапов Э.И. - УФН, 1982, т.137, с.39.
6. Попов Ю.П. ОИЯИ, РЗ-87-770, Дубна, 1987.
7. Антонов А. и др. ОИЯИ, РЗ-83-243, Дубна, 1983.
8. Антонов А. и др. ОИЯИ, РЗ-83-242, Дубна, 1983.
9. Антонов А. и др. ОИЯИ, РЗ-81-348, Дубна, 1981.
10. Балабанов Н.П., Гледенов Ю.М. ОИЯИ, РЗ-81-276, Дубна, 1981.
11. Antonov A. et al. - Nucl. Technology, 1982, v.59, p.526.

12. Антонов А. и др. - ПТЭ, 1981, №3, с.52.
13. Mughabghab S.F. et al. Neutron Cross Section, Academic Press, N.Y., 1981, part A.
14. Ефимов В.Н., Шелонцев И.Н. ОИЯИ, Р-641, Дубна, 1961.
15. Голиков В.В. и др. ОИЯИ, РЗ-5736, Дубна, 1971.
16. Гледенов Ю.М., Пак Хон Чер, Попов Ю.П. Бюллетень центра данных ЛИЯФ. Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1977, вып.4, с.3.
17. Втюрин В.А. и др. ОИЯИ, РЗ-8800, Дубна, 1975.
18. Salax M.M. et al. In: Nucl. Data for Basic and Applied Science, Proc. Int. Conf. Santa Fe, New Mexico, 13-17 May 1985, Ed. by P.G.Young et al., v.1, p.593.
19. Лейн А., Томас Р. Теория ядерных реакций при низких энергиях. М.: ИЛ, 1960.
20. Popov Yu.P. In: Neutron Capture Gamma Ray Spectroscopy, Petten, Netherland, 1974, p.2379.
21. Захаров С.М. и др. Ядерные константы, вып.7, ЦНИИАтоминформ, М., 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 ноября 1988 года.

Гледенов Ю.М., Митриков М.П., Чадраабал И. РЗ-88-806
Исследование реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$
при резонансных энергиях нейтронов

Исследована реакция (n, α) на изотопе ^{91}Zr в диапазоне энергии нейтронов до 5 кэВ. Впервые экспериментально обнаружен α -распад нейтронных резонансов ^{91}Zr , измерены α -ширины резонансов при $E_0 = 2,474; 1,531$ и $0,449$ кэВ: (165 ± 46) , (12 ± 7) и (31 ± 10) мкэВ соответственно. Результаты сравниваются с расчетами по кластерной и статистической моделям.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Gledenov Yu.M., Mitrikov M.P., Chadraabal I. РЗ-88-806
The Study of the $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ Reaction
at Neutron Resonance Energies

The (n, α) reaction on the ^{91}Zr isotope was investigated in the neutron energy range up to 5 keV. The measured cross section has shown three neutron resonances at $E_0 = 2.474; 1.531$ and 0.449 , which α -widths were determined to be 165 ± 46 , 12 ± 7 , and 31 ± 10 μeV respectively. These results were compared with those calculated in terms of the cluster and statistical models.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988