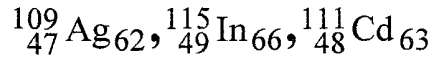


## СТРУКТУРА АКТИВАЦІЙНИХ РІВНІВ ЯДЕР



І. В. Соколюк

Ужгородський державний університет, 294000, Ужгород, вул. Підгірна, 46. e-mail:

siv@gaser.uzhgorod.ua

В роботі проведено аналіз даних про активаційні рівні ядер  ${}^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,  ${}^{115}_{49}\text{In}_{66}$ ,  ${}^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ , що спостерігаються в реакції  $(\gamma, \gamma')^m$ , спільно з даними з реакції одноступінчастої передачі. Визначені оболонкові конфігурації переходів з основного стану ядер  ${}^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,  ${}^{115}_{49}\text{In}_{66}$ ,  ${}^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$  на активаційні рівні, які відповідають одноступінчастим переходам між підоболонками валентних  $2p1f1g$ - і  $1g2d3s1h$ -оболонки.

## Вступ

Стійкий інтерес до реакції збудження ізомерних станів ядер в реакції непружного розсіювання гамма-квантів в області енергій збуджень вище енергії зв'язку нуклона привів до накопичення великого матеріалу з цього питання. Для десятків ядер отримані інтегральні та диференціальні перерізи збудження ізомерних станів ядер в реакції непружного розсіювання гамма-квантів, а для деяких ядер отримані характеристики активаційних рівнів (рівнів, через які відбувається заселення ізомерних станів). Це дозволило виявити окремі загальні закономірності збудження ізомерних станів і перейти до вивчення механізму протікання таких реакцій. Одною з центральних проблем є вивчення структури активаційних рівнів, а отже і механізму їх збудження.

Навряд чи можна в найближчий час вирішити дану проблему шляхом теоретичним. Але в ряді випадків, як нам представляється, на дане питання можна отримати відповідь при вивченні кореляцій між активаційними рівнями та рівнями, що спостерігаються в інших реакціях, зокрема в реакціях зриву та підхвату [1].

Теоретичний і експериментальний інтерес до ядер  ${}^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,  ${}^{115}_{49}\text{In}_{66}$ ,  ${}^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$

пояснюється наявністю валентних протонів та нейтронів на різних підоболонках валентної оболонки цих ядер. Згідно оболонкової моделі, вони належать до протонної  $1f2p1g$ -оболонки (оболонка з магічним числом  $Z=50$ ) та нейтронної  $1g2d3s1h$ -оболонки. Для повного заповнення протонної оболонки цих ядер бракує від трьох до одного протона. Тобто, в них заповнюється протонна підоболонка  $1g_{9/2}$ . Більш детально структура протонної  $1f2p1g$ -оболонки буде розглянута нижче. Число нейтронів у розглядуваних ядрах змінюється від 62 до 66. В роботі [2] зверталась увага на імовірну магічність числа 64. Було показано, що магічність одної з оболонки (протонної або нейтронної) впливає на структуру іншої оболонки. Тому можна очікувати, що це буде впливати на механізм заселення ізомерних станів даних ядер.

## Оболонкова структура активаційних

рівнів ядер  ${}^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,  ${}^{115}_{49}\text{In}_{66}$ ,  ${}^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$

Ядра  ${}^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,  ${}^{115}_{49}\text{In}_{66}$ . Збудження ізомерних станів ядер  ${}^{109}\text{Ag}$ ,  ${}^{115}\text{In}$  в реакції  $(\gamma, \gamma')$  вивчалось в роботі [3,4]. Одержані в цих роботах енергії активаційних рівнів приведені в таблицях 1, 2. В цих же таблицях приведені спектроскопічні

характеристики, отримані в реакціях однопротонної передачі.

Таблиця 1. Спектроскопічні характеристики рівнів ядра  $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ .

E кеВ	$J^\pi$	$\Gamma_m/\Gamma$	$^{110}_{48}\text{Cd}_{62} (d, ^3\text{He})$			$^{108}_{46}\text{Pd}_{62} (^3\text{He}, d)$			$E^a, \text{кеВ} [4]$	конфігурації переходів
			$l$	$n_{lj}$	$S^-$	$l$	$n_{lj}$	$S^+$		
0	$1/2^-$		1	$2p_{1/2}$	1.3	1	$2p_{1/2}$	0.86		
88	$7/2^+$								metastable	
132	$9/2^+$	*	4	$1g_{9/2}$	5.6	4	$1g_{9/2}$	2.4		
311	$3/2^-$		1	$2p_{3/2}$	0.8	1	$2p_{3/2}$	0.43		
415	$5/2^-$	*	3	$1f_{5/2}$	**	(3)		$\approx 0.2$	$410 \pm 10$	$3f_{5/2} \rightarrow 2p_{1/2}$
701	$3/2^-$	*	1	$2p_{3/2}$	0.6				$680 \pm 30$	$3p_{3/2} \rightarrow 2p_{1/2}$
707	$1/2^+$					0	$3s_{1/2}$	0.29		
724	$3/2^+$	*								
735	$5/2^+$	*	2	**	0.2	2	$2d_{5/2}$	1.9		
862	$5/2^-$	*	3	$1f_{5/2}$	0.7				$855 \pm 5$	$3f_{5/2} \rightarrow 2p_{1/2}$
869	$5/2^+$	*				2	$2d_{5/2}$			
890	$9/2^+$		4	$1g_{9/2}$	0.7					
911	$7/2^+$	*				4		2.7		
1091	$(9/2)^-$									
1098	$(5/2)^+$									
1210	$(9/2)^+$		4	$1g_{9/2}$	0.5				$1210 \pm 10$	$1g_{9/2} \rightarrow 2p_{1/2}$
1260	$(1/2)^-$					(1)		0.2		
1324	$3/2^-$	*	1	$2p_{3/2}$	0.7					
1430	$(1/2)^+$					0		0.03		
1490	$5/2$					2		0.36		
1500	$3/2^-$		1	$2p_{3/2}$	0.4				$1480 \pm 10$	$2p_{3/2} \rightarrow 2p_{1/2}$
1524	$(3/2)^-$									
1599										
1613	$(1/2)^-$									
1658	$(1/2)^+$					0	$3s_{1/2}$	0.2	$1675 \pm 10$	$2p_{1/2} \rightarrow 3s_{1/2}$
1736	$(3/2)^-$									
1792	$(7/2)^-$									

З таблиці 1 видно, що для ядра  $^{109}\text{Ag}$  в реакції  $(\gamma, \gamma')$  спостерігаються активаційні рівні, котрі також себе проявляють в реакції  $^{110}_{48}\text{Cd} (d, ^3\text{He})$ . Враховуючи те, що у ядра  $^{110}\text{Cd}$  в основному стані протонні підоболонки  $2p_{1/2}$ ,  $2p_{3/2}$ ,  $1f_{5/2}$  повністю заповнені, а на підоболонці  $1g_{9/2}$  є 8 протонів, можна зробити висновок, що для того, щоб заселити рівні з енергіями 410 кеВ, 680 кеВ, 855 кеВ, 1210 кеВ, необхідно здійснити протонний перехід з підоболонки  $1f_{5/2}$ ,  $2p_{3/2}$ ,  $1g_{9/2}$  на підоболонку  $2p_{1/2}$ , так як ці рівні є дірками у відповідних підоболонках. Окремо стоїть

справа з активаційними рівнями з енергіями 1480 кеВ та 1675 кеВ. Цим рівням можна приписати рівні з енергіями 1490 кеВ ( $5/2^+$ ) та 1658 кеВ ( $1/2^+$ ) відповідно. Ці рівні спостерігаються в реакції  $^{108}_{46}\text{Pd} (^3\text{He}, d)$ . Так як в цій реакції проявляє себе підоболонка  $2p_{1/2}$ , то це означає, що вона в ядрі  $^{108}_{46}\text{Pd}$  незаповнена. В такому разі для збудження активаційних рівнів з енергіями 1490 кеВ та 1658 кеВ необхідно у ядрі  $^{109}\text{Ag}$  перевести протон з підоболонки  $1p_{1/2}$  на підоболонки  $3d_{5/2}$  та  $3s_{1/2}$ , тобто здійснити переходи  $2p_{1/2} \rightarrow 3d_{5/2}$  та  $2p_{1/2} \rightarrow 3s_{1/2}$ .

Звертає на себе увагу те, що перехід  $2p_{1/2} \rightarrow 3s_{1/2}$  спостерігається і в ядра  $^{77}\text{Se}$ , лише в нейтронній оболонці.

Таким чином можна зробити висновок, що активаційні рівні ядра  $^{109}\text{Ag}$  в реакції  $(\gamma, \gamma')$  збуджуються шляхом однопротонних переходів між підоболонками верхньої оболонки даного ядра.

Активаційні рівні для ядра  $^{115}\text{In}$ , котрі отримані в роботах [3,4] приведені в таблиці 2. В цій же таблиці приведені спектроскопічні характеристики рівнів, котрі спостерігаються в реакціях однопротонної передачі. З таблиці 2

видно, що активаційні рівні, які спостерігаються в реакції  $(\gamma, \gamma')$ , корелюють з рівнями, що спостерігаються в реакціях однопротонної передачі. Це означає, що аналогічно, як для ядра  $^{109}\text{Ag}$ , активаційні рівні формуються в результаті однопротонних переходів. Конфігурації переходів приведені в цій же таблиці.

Отже аналогічно, як і для ядер  $^{77}\text{Se}$  та  $^{87}\text{Sr}$  [3], для ядер  $^{109}\text{Ag}$  та  $^{115}\text{In}$  активаційні рівні, які спостерігаються в реакції  $(\gamma, \gamma')$  формуються шляхом однопрутонних переходів між підоболонками верхньої оболонки даних ядер

Таблиця 2. Спектроскопічні характеристики рівнів ядра  $^{115}_{49}\text{In}_{66}$ .

E, кеВ	J <sup>π</sup>	Γ <sub>m</sub> /Γ	$^{114}\text{Cd}(^3\text{He}, d)$			$^{116}\text{Sn}(d, ^3\text{He})$			E <sup>a</sup> , кеВ[3]	Конфігурації переходів
			l	nlj	S <sup>+</sup>	l	nlj	S <sup>-</sup>		
0	9/2 <sup>+</sup>		4	1g <sub>9/2</sub>	0.9	4	1g <sub>9/2</sub>	7.4		
336	1/2 <sup>-</sup>		1	2p <sub>1/2</sub>	0.14	1	2p <sub>1/2</sub>	1.7		
597	3/2 <sup>-</sup>	*	1	2p <sub>3/2</sub>	0.15	1	2p <sub>3/2</sub>	2.0	600±10	2p <sub>3/2</sub> → 1g <sub>9/2</sub>
829	3/2 <sup>+</sup>	*	2+0	3d <sub>3/2</sub>	0.3+0.3				830±10	2g → 2d
864	1/2 <sup>+</sup>	*								
934	7/2 <sup>+</sup>	*	4+2		8.5+0.86	*			932±2	2p → 1g
941	5/2 <sup>+</sup>	*							943±2	2g → 2d
1041	5/2 <sup>-</sup>	*				3	1f <sub>5/2</sub>	0.7		
1078	5/2 <sup>+</sup>	*				*			1078±3	2p → 2d
1132	11/2 <sup>+</sup>									
1192	(3/2)	*								
1287	1/2-5/2 <sup>-</sup>	*				*				
1290	13/2 <sup>+</sup>									
1347	(5/2 <sup>-</sup> )	*								
1418	(9/2 <sup>+</sup> )	*								
1449	9/2 <sup>+</sup>	*	4	1g <sub>9/2</sub>	0.32	4	1g <sub>9/2</sub>	1.2		
1463	7/2 <sup>+</sup>	*								
1470	1/2, 3/2 <sup>-</sup>					1	2p	0.3	1465±5	2p <sub>3/2</sub> → 1g <sub>9/2</sub>
1478		*								
1486	9/2 <sup>+</sup>					4	1g <sub>9/2</sub>	1.7		
1497	(7/2 <sup>+</sup> )	*							1495±5	
									1565±10	
1602	(7/2 <sup>+</sup> )									
1609	(7/2 <sup>+</sup> )	*								
1640	1/2, 3/2 <sup>-</sup>					1	2p <sup>-</sup>	0.4	1635±15	2p <sub>3/2</sub> → 1g <sub>9/2</sub>
1650	3/2 <sup>+</sup>		2	2d <sub>3/2</sub>	0.5, 0.65					
1737	(9/2 <sup>+</sup> )	*								

**Ядро  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ .** В роботах [4,5], використовуючи пучок електронів (з енергією до 3 MeV) та  $\gamma$ -квантів, проводилось дослідження збудження ізомерного стану ядра  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ . В результаті було виявлено три активаційні рівні з енергіями  $740\pm 10\text{keV}$ ,  $1120\pm 10\text{keV}$  та  $1330\pm 10\text{keV}$ . Низьколежачі рівні цього ядра вивчалися також в реакціях  $(n,\gamma)$ ,  $(n,p'\gamma)$ ,  $(\alpha,3n\gamma)$ ,  $(^3\text{He},2n\gamma)$ ,  $(p,p')$ ,  $(d,d')$ ,  $(d,p)$ ,  $(d,t)$ . Енергетична схема рівнів отримана в цих реакціях приведена в таблиці 3. В цій же таблиці приведена спектроскопічна інформація рівнів отримана в реакціях однонуклонної передачі та енергії активаційних рівнів, що спостерігаються в реакції  $(\gamma,\gamma')^m$  (дані взяті з файла ENSDF[6]). Згідно оболонкової моделі, в ядрі  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$  мають бути заповнені нейтронні  $2d_{5/2}$  - та  $1g_{7/2}$  - оболонки. Як видно з таблиці, нейтрони розкидані по  $2d_{5/2}$ -,  $1g_{7/2}$ -,  $3s_{1/2}$ -,  $1h_{11/2}$ -,  $2d_{3/2}$ - підоболонках  $1g_{7/2}d_{3/2}1h$ -оболонки. Це може бути результатом впливу нейтронної  $1g_{7/2}d_{3/2}1h$ -оболонки, на якій число нейтронів близьке до числа 64, яке є претендентом на магічне число [2].

З таблиці 3 видно, що однозначної відповідності між енергіями активаційних рівнів та рівнями, що спостерігаються в реакціях іншого типу не має. Згідно експериментальних даних (файл ENSDF[6]), претендентами на активаційні рівні можуть бути рівні з енергіями 681, 705, 831, 968, 1151, 1339 кеВ (в таблиці 3 вони позначені знаком - \*).

В області енергій першого активаційного рівня з енергією  $740\pm 10\text{keV}$ , згідно схеми  $\gamma$ -розпаду, претендентом на активаційний рівень є рівень з енергією  $705 \pm 10\text{keV}$  ( $J^\pi = 7/2^+$ ). Цей рівень через рівень з енергією 681 кеВ ( $J^\pi = 9/2^-$ ) приводить до заселення метастабільного рівня. В цій області енергій є рівень з енергією 736 кеВ, який спостерігається лише в реакції непружного розсіювання протонів та дейтронів. Але згідно експериментальних

даних (файл ENSDF[6]) він не заселяє метастабільний стан.

Рівень з енергією  $705\pm 10\text{keV}$  ( $J^\pi = 7/2^+$ ) (якому ми приписуємо активаційний рівень з енергією  $740\pm 10\text{keV}$ , що спостерігається в реакції  $(\gamma,\gamma')^m$ ) спостерігається в реакціях однонуклонної передачі  $((d,t)$ ,  $(d,p)$ ). Згідно даних з цих реакцій слідує, що він формується підоболонкою  $1g_{7/2}$ . Це означає, що даний активаційний рівень формується шляхом однонуклонного переходу з більш низьколежачої підоболонки (для конкретизації конфігурації даного переходу бракує експериментальної інформації про оболонкову структуру основного стану ядра Cd) на підоболонку  $1g_{7/2}$ . Але ми можемо сказати, що даний активаційний рівень формується за рахунок однонуклонного переходу.

В області енергій другого активаційного рівня з енергією  $1120\pm 10\text{keV}$ , претендентом на активаційний рівень є рівень з енергією  $1151\pm 10\text{keV}$  (який через рівень з енергією 705 кеВ приводить до заселення метастабільного стану ядра  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ ). В цій області енергій в реакції однонуклонної передачі спостерігається рівень з енергією  $1130\pm 20\text{keV}$  і він формується  $1d_{5/2}$  підоболонкою. Цей рівень згідно даних (файл ENSDF) спостерігається лише в даній реакції, тому ми ідентифікуємо ці два рівні як один рівень з енергією  $1151\pm 10\text{keV}$  і спіном  $J^\pi = 5/2^+$ . Таким чином даний активаційний рівень також формується за рахунок однонуклонного переходу на нейтронну підоболонку  $1d_{5/2}$ . Як і в попередньому випадку конфігурацію переходу ми не можемо визначити через відсутність інформації про оболонкову структуру основного стану ядра Cd.

Наступний активаційний рівень спостерігається при енергії  $1330\pm 10\text{keV}$ . В цій області енергій претендентом на активаційний рівень є рівень з енергією  $1339\text{keV}$  ( $J^\pi = 13/2^-$ ), який приводить до

Таблиця 3. Спектроскопічні характеристики рівнів ядра  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ .

E, KeV	$J^\pi$	$\Gamma_m/\Gamma$	$^{112}\text{Cd}(d,t)$ $^{110}\text{Cd}(d,p)$		$E^a, \text{keV}[4]$	конфігурації переходів
			$l$	$nlj$		
0	$1/2^+$		0			
245	$5/2^+$		2			
342	$3/2^+$		2			
396	$11/2^-$		5			
417	$7/2^+$		4			
620	$5/2^+$		2			
681	$(9/2)^-$	*				
705	$7/2^+$	*	4		$740 \pm 10$	$? \rightarrow 1g_{7/2}$
736	$3/2, 5/2^+$					
753	$5/2^+$					
755	$3/2^+$					
831	$(7/2)^-$	*				
854	$7/2^+$					
856	$3/2^+$					
865	$3/2^+$		2			
867	$3/2^+$					
968	$15/2^-$	*				
986	$9/2^+$					
1017	$3/2^+$					
1020	$1/2^+$		0			
1047	$(7/2^+)$					
1057						
1078	$3/2^+$					
1116	$3/2^+$					
1118	$3/2^+$					
1130			2		$1120 \pm 10$	$? \rightarrow 2d_{5/2}$
1151	$(5/2^+)$	*				
1186	$1/2^+$		0			
1190	$3/2^+$					
1257	$11/2^+$					
1275	$(5/2^+)$					
1289						
1299	$(7/2^+)$					
1322						
1326	$1/2, 3/2^+$					
1340	$(13/2)^-$	*			$1330 \pm 10$	
1341	$1/2, 3/2$					

заселення метастабільного стану ядра  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ . Цей рівень спостерігається в реакціях  $(\alpha, 3n\gamma)$  та  $(^3\text{He}, 2n\gamma)$ . Він належить до смуги, побудованої на ізомерному стані з енергією 396 кеВ ( $J^\pi$

$=11/2^-$ ). Для того, щоб заселити цей рівень з основного стану з спіном  $1/2^+$  необхідно здійснити  $\gamma$ -перехід М6- або Е7-мультипольності, що мало імовірно. Тому скоріше всього даний рівень формується

за рахунок взаємодії  $\gamma$ -квантів з нейтронами  $1h_{11/2}$ -підоболонки.

З наведеного вище можемо зробити висновок, що активаційні рівні формуються за рахунок однонуклонних переходів в рамках валентної  $1g2d3s1h$ -оболонки.

### Висновки

Проведений спільний аналіз експериментальних даних про активаційні рівні ядер та спектроскопічних даних рівнів, що спостерігаються в реакціях однонуклонної передачі показав, що активаційні рівні в реакції непружного розсіювання гамма-квантів формуються через однонуклонні переходи між підоболонками валентної оболонки розглядуваних ядер. Це дозволило провести ідентифікацію окремих активаційних рівнів та визначити їх оболонкову структуру і тип гамма-переходів.

Слід відмітити, що для більш детальної ідентифікації активаційних рівнів, необхідна додаткова інформація про спектроскопічні характеристики ядерних рівнів з реакцій однонуклонної передачі з утворенням ядер  $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,

$^{115}_{49}\text{In}_{66}$ ,  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ . Звертає на себе увагу перспективність наближення в якому збуджені стани ядра  $^{115}_{49}\text{In}_{66}$  розглядається, як діркові стани в остові  $^{116}_{50}\text{S}_{116}$  та стани типу частинка з остовом  $^{114}_{48}\text{Cd}_{66}$ . Аналогічна ситуація спостерігається для ядер  $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ , де збуджені стани можна розглядати як дірки в остові  $^{110}_{48}\text{Cd}_{62}$ , та стани типу частинка з остовом  $^{108}_{46}\text{Pd}_{62}$ . У випадку основного стану ядер  $^{108}_{46}\text{Pd}_{62}$  велику роль напевно відіграють сили спарювання. Тому, що у випадку даних ядер підоболонка  $2p_{1/2}$  проявляє себе в реакціях протонного підхвату та зриву. Така поведінка протонної оболонки ( $Z=50$ ), можливо пов'язана з впливом магічного числа  $N=64$ .

Отримані результати говорять про необхідність теоретичних рохрахунків в наближенні однонуклонних переходів в рамках оболонкової моделі. А також необхідні експерименти для більш прецизійного визначення енергій активаційних рівнів.

1. V.S. Dzjamko, I.V. Sokolyuk, T.M. Zajac, *Hyperfine Interact.*, 107,175 (1997)
2. V.A. Morozov, *Rapid communicat. JINR, Dubna, No.7[33]*, 53(1988).
3. M. Boivin, Y.Caushois, X. Heno, *Nucl. Phys.*, A176, 3, 626(1971).
4. M. Boivin, Y.Caushois, X. Heno, *Nucl. Phys.*, A137, 3, 520(1969).

5. E.C. Booth, J. Brownson, *Nucl.Phys.*, 66, 3, 529(1965).
6. *Evaluated Nuclear Structure Data File*, (National Nuclear Data Centre, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York).

## STRUCTURE OF ACTIVATION LEVELS OF THE $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ , $^{115}_{49}\text{In}_{66}$ , $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$ NUCLEI

I. V. SOKOLYUK

Uzhgorod State University, 294000, Pidgirna str., 46, Uzhgorod, e-mail: siv@gaser.uzhgorod.ua

The result on the activation levels of  $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,  $^{115}_{49}\text{In}_{66}$ ,  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$  nuclei observed in  $(\gamma, \gamma')^m$  reaction along with the data concerning one-nucleon transfer reaction, are analyzed. The shell configurations of transitions from  $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ ,  $^{115}_{49}\text{In}_{66}$ ,  $^{111}_{48}\text{Cd}_{63}$  nuclei ground state to the activation levels, corresponding to one-nucleon transitions between the subshells within the upper unfilled  $2p1f1g$ - and  $1g2d3s1h$ -shell, are determined.