

УДК 539.163

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АНАЛОГОВОГО СОСТОЯНИЯ С $J^\pi = 5/2^+$ В ЯДРЕ ^{31}P

А.Н. Водин¹, Л.П. Корда¹, А.О. Растрепина², И.В. Ушаков¹,
В.Т. Быков¹, Г.Э. Туллер², М.В. Ващенко²

¹ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

² Харьковский национальный университет им В.Н. Каразина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4

Поступила в редакцию 15 марта 2006 г.

Исследована реакция $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ в интервале энергий протонов от 1750 до 1905 кэВ. Измерены спектры γ -распада резонансов при $E_p = 1770, 1830, 1880, 1894$ и 1896 кэВ. Определены силы указанных резонансов, их радиационные ширины и построены схемы их γ -распада. Измерены угловые распределения γ -лучей, на основании которых определены спины и четности резонансных состояний ядра ^{31}P и коэффициенты смеси δ в прямых переходах. Проведено сравнение интенсивностей $M1$ -переходов с расчетами по многочастичной модели с поверхностным δ -взаимодействием. Показано, что при распаде аналогового резонанса существенную роль играет изобарическое коллективное состояние типа поляризации остова. Проведен анализ корреляций между парциальными ширинами распада фрагментированного аналогового $d_{5/2}$ -резонанса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ядерная реакция $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$, изоспин, изобар-аналоговое состояние, γ -распад, угловые распределения, вероятность $M1$ -перехода.

Исследования изобар-аналоговых резонансов (АР) представляют значительный интерес, обусловленный выяснением роли зарядовой зависимости ядерных сил в механизме смешивания уровней по изоспину в ядрах, а также для развития микроскопической теории атомного ядра. Результаты, полученные в [1], позволяют предположить, что АР с $J^\pi = 5/2^+$ значительно фрагментированы в ядрах $1d_{2s}$ -оболочки. Настоящая работа является дальнейшим развитием этой идеи на примере ядра ^{31}P , в котором изучен γ -распад фрагментов одночастичного $d_{5/2}$ -состояния с $E^* \approx 9,09$ МэВ, являющегося изобарическим аналогом материнского уровня ядра ^{31}Si с $E^* = 2,789$ МэВ с $J^\pi = 5/2^+$ и $T = 3/2$.

Согласно данным по ($^3\text{He},d$)-реакции [2] и упругому рассеянию протонов [3] состояния с $E^* = 9,009; 9,067; 9,116; 9,129$ и $9,131$ МэВ являются компонентами тонкой структуры аналогового $d_{5/2}$ -резонанса в ^{31}P . Радиационный канал распада этих состояний практически не исследован, и эта причина стимулировала настоящие опыты. Компоненты данного АР наблюдались как изолированные резонансы в реакции $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ при энергии протонов $E_p = 1770, 1830, 1880, 1894$ и 1896 кэВ. В связи с этим была изучена функция возбуждения реакции в окрестности АР, построены схемы γ -распада указанных резонансов и измерены угловые распределения γ -лучей, возникающих при их распаде. В итоге было получено экспериментальное распределение парциальных радиационных ширин Γ_γ распада АР, которое впоследствии сравнивалось с выводами многочастичной модели оболочек с поверхностными δ -силами [4]. Рассмотрены корреляции между парциальными ширинами распада фрагментированного аналогового $d_{5/2}$ -состояния с целью выяснения, для каких каналов γ -распада АР является общим входным состоянием.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на электростатическом ускорителе протонов ЭСУ-5 Лаборатории ядерной спектроскопии ННЦ ХФТИ. Ускоренные протоны с энергетическим разбросом 400 эВ отклонялись на 90° через анализирующий магнит и после прохождения системы юстировочных диафрагм бомбардировали мишень, установленную под углом 45° в камере рассеяния, которая являлась одновременно и цилиндром Фарадея. Ток протонов на мишени составлял 10 мкА, и из-за большой плотности энерговыделения она охлаждалась потоком воды с высокой турбулентностью. В экспериментах использовалась изотопная мишень ^{30}Si , приготовленная методом "вбивания" ионов ^{30}Si в танталовую подложку непосредственно в электромагнитном сепараторе [5]. Толщина мишени составляла 4 кэВ при энергии протонов $E_p \sim 2$ МэВ. Присутствие в подложке ^{19}F не сказалось значительным образом на результатах эксперимента. γ -Спектры регистрировались Ge(Li)-детектором объемом 63 см^3 с энергетическим разрешением 3,0 кэВ для γ -линий ^{60}Co . Абсолютная калибровка спектрометра по эффективности проводилась с помощью стандартного набора монохроматических источников ОСГИ-II и по выходам γ -линий из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ при $E_p = 991,86(3)$ кэВ. Для того чтобы ослабить низкоэнергетический фон γ -излучения из подложки Ge(Li)-детектор помещался в специальную защиту, выполненную из Pb и Cu. Угловые распределения γ -лучей, возникающих при распаде резонансных состояний ядра ^{31}P , измерялись под углами $\theta_{\text{лаб}} = 0, 30, 45, 60$ и 90° относительно направления пучка налетающих протонов. В качестве монитора γ -излучения использовался спектрометр на базе кристалла NaI(Tl) с размерами $\varnothing 150 \times 100 \text{ мм}^2$. Этот же детектор

использовался для измерения функции возбуждения реакции $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$. Эксперименты проводились на спектрометрическом оборудовании, выполненном в стандарте "КАМАК" и работающем в "линию" с ПЭВМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерена функция возбуждения реакции $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ в области $E_p = 1750 \div 1905$ кэВ с различными порогами дискриминации энергии γ -лучей ($E_\gamma > 2,61$ и $E_\gamma > 6,13$ МэВ). γ -Кванты регистрировались NaI(Tl)-детектором под углом $\theta_{\text{лаб}} = 55^\circ$ относительно направления пучка протонов с шагом $\Delta E_p = 1,8$ кэВ. В качестве примера на рис.1 представлены результаты измерения относительного выхода γ -лучей с $E_\gamma > 6,13$ МэВ в зависимости от энергии налетающих протонов. В исследуемой области энергии установлено положение 8 резонансов, идентифицированных как возбужденные состояния ядра ^{31}P . При этом Q реакции принималось равным 7296,61(20) кэВ, согласно [6]. Полученные нами результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в обзоре Эндта [6]. Экспериментальная ширина $\Gamma_{\text{экср}}$ резонанса при $E_p = 1808$ кэВ равна 9(1) кэВ. Для остальных резонансных пиков она составляет величину $\approx 4,0$ кэВ, что обусловлено конечной толщиной мишени и энергетическим разбросом в пучке протонов.

Для определения абсолютного выхода γ -квантов из реакции $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ было проведено сравнение выходов исследуемых резонансов с выходом резонанса при $E_p = 2187$ кэВ. Сила резонанса при $E_p = 2187$ кэВ хорошо известна [7]. Она равна:

$$S = (2J + 1) \frac{\Gamma_p \Gamma_\gamma}{\Gamma} = 9,5 \pm 0,9 \text{ эВ}, \quad (1)$$

где J - спин резонансного состояния, Γ_p и Γ_γ - протонная и радиационная парциальные ширины резонанса, Γ - полная ширина резонанса. Полученные таким образом силы резонансов S представлены в табл. 1, в которой приведены также соответствующие значения Γ_γ , вычисленные с учетом данных по упругому рассеянию протонов ядрами ^{30}Si [3]. В том случае, если неизвестна протонная ширина Γ_p резонансного уровня, предполагалось, что $\Gamma_p \gg \Gamma_\gamma$, и в табл. 1 указан лишь нижний предел значения величины Γ_γ .

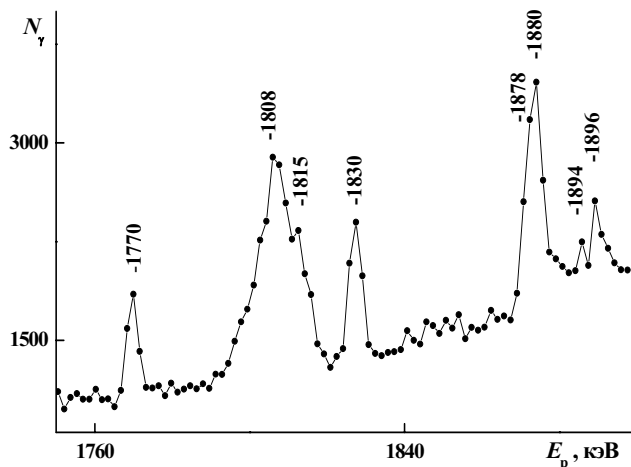


Рис. 1. Функция возбуждения реакции $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ в области энергии протонов $E_p = 1750 \div 1905$ кэВ.

Таблица 1. Радиационные ширины резонансов в реакции $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$

$E_p^{(1)}$, кэВ	E^* , МэВ	$2J^\pi$	S , эВ	$\Gamma_p^{(2)}$, эВ	Γ_γ , эВ
1770	9,005	5^+	2,8(8)	65(20)	0,47(14)
1808	9,046	3^-	4,4(13)	9400(900)	1,10(11)
1815	9,053	$(3^+, 5)$	1,0		
1830	9,067	5^+	3,4(10)	16(5)	0,57(18)
1878	9,113	7^-	0,88	1(1)	0,12(12)
1880	9,116	5^+	4,8(14)	22(7)	0,83(26)
1894	9,129	5^+	0,59(17)	3(2)	0,10(7)
1896	9,131	5^+	1,4(4)	4(2)	0,23(12)

Примечание: ¹⁾ - значение E_p указано с ошибкой ± 1 кэВ. Значения Γ_p взяты из [3].

Измерены γ -спектры распада резонансов при $E_p = 1770, 1830, 1880, 1894, 1896$ кэВ. Схемы распада резонансов строились на основании баланса энергий и интенсивностей для наблюдаемых γ -переходов с учетом всех известных данных об уровнях ^{31}P . Разные варианты схем γ -распада этих резонансов были предложены в [8, 9], но наиболее подробные сведения о коэффициентах ветвления b_γ получены в [10]. Наши данные подтверждают результаты авторов [10] и позволяют дополнительно выявить слабые γ -переходы на уровне с $E^* = 3,134$ и, возможно, 5,988 МэВ (в каскаде $r \rightarrow 5,988 \rightarrow 2,234$ МэВ нижний γ -переход однозначно не установлен) для резонанса при $E_p = 1770$ кэВ. Верхний предел интенсивности для этих переходов $I_\gamma < 1\%$. В табл. 2 приведены предлагаемые схемы распада резонансных уровней в виде значений коэффициентов b_γ и соответствующие им экспериментальные значения парциальных радиационных ширин Γ_γ распада фрагментированного аналогового $d_{5/2}$ -резонанса.

Таблица 2. Парциальные γ -ширины распада резонансных $5/2^+$ -состояний и вероятности $M1$ -переходов в ^{31}P

E_f^* , МэВ	$2J_f^\pi$	E_p (кэВ); E_i^* (МэВ); $2J_i^\pi$														
		1770; 9,009; 5^+			1830; 9,067; 5^+			1880; 9,116; 5^+			1894; 9,129; 5^+			1896; 9,131; 5^+		
		b_γ %	Γ_γ , $10^{-2}\cdot\text{эВ}$	$B(M1)$, $10^{-2}\cdot\mu_n^2$	b_γ %	Γ_γ , $10^{-2}\cdot\text{эВ}$	$B(M1)$, $10^{-2}\cdot\mu_n^2$	b_γ %	Γ_γ , $10^{-2}\cdot\text{эВ}$	$B(M1)$, $10^{-2}\cdot\mu_n^2$	b_γ %	Γ_γ , $10^{-2}\cdot\text{эВ}$	$B(M1)$, $10^{-2}\cdot\mu_n^2$	b_γ %	Γ_γ , $10^{-2}\cdot\text{эВ}$	$B(M1)$, $10^{-2}\cdot\mu_n^2$
0	1^+	13	6,1	$E2$	1	0,6	$E2$				7	0,7	$E2$			
1,266	3^+	1	0,5	0,1	2	1,1	0,2				6	0,6	0,1	29	6,7	1,2
2,234	5^+	6	2,8	0,8	42	23,9	6,4	49	40,7	10,6	18	1,8	0,5	1	0,2	0,1
3,134	1^+	1	0,5	$E2$	1	0,6	$E2$				1	0,1	$E2$			
3,295	5^+				10	5,7	2,5	5	4,2	1,8	4	0,4	0,2	19	4,4	1,9
3,415	7^+	2	0,9	0,5	7	4,0	1,9				7	0,7	0,3	2	0,5	0,2
3,506	3^+	13	6,1	3,1	1	0,6	0,3	6	5,0	2,4	6	0,6	0,3			
4,190	5^+	32	15,0	11,5	3	1,7	1,3	7	5,8	4,1	2	0,2	0,1			
4,261	3^+										3	0,3	0,2	6	1,4	1,0
4,431	7^-	4	1,9	$E1$	2	1,1	$E1$				5	0,5	$E1$	16	3,7	$E1$
4,594	3^+	6	2,8	2,8	2	1,1	1,1	9	7,5	6,9	2	0,2	0,2			
4,634	7^+	5	2,4	2,4	21	12,0	11,7	4	3,3	3,2	28	2,8	2,6	7	1,6	1,5
4,783	5^+	1	0,5	0,5	4	2,3	2,5	4	3,3	3,5	2	0,2	0,2	13	3,0	3,1
5,529	$7^+(5^+)$	5	2,4	4,8	3	1,7	3,3	6	5,0	9,2	1	0,1	0,2	2	0,5	0,8
5,559	3^+							7	5,8	11,0						
5,773	$(5,7^+)$	8	3,8	9,5				2	1,7	3,8						
5,892	9^+										6	0,6	$E2$			
5,988	3^-	(1)	0,5	$E1$	2	1,1	$E1$							1	0,2	$E1$
6,233	(3^+-9^+)							1	0,8	3,0	3	0,3	1,1			
6,381	$3^+; 3^-$	3	1,4	6,6				1	0,8	3,5	3	0,3	1,2			
6,461	5^+				1	0,6	2,7									
6,610	3^-													3	0,7	$E1$
6,842	$(5,7)^-$													2	0,5	$E1$

Квантовые характеристики резонанса при $E_p = 1770$ кэВ установлены в упругом рассеянии протонов ядрами ^{30}Si [3], где ему были приписаны значения $J^\pi = 5/2^+$. Однако для расчета приведенных вероятностей прямых γ -переходов необходимы данные о параметрах смешивания по мультипольностям δ . В связи с этим были измерены угловые распределения γ -лучей и на основании их анализа определены значения δ . Функция угловой корреляции искалась в виде разложения по четным полиномам Лежандра:

$$W(\theta) = 1 + a_2 P_2(\cos \theta) + a_4 P_4(\cos \theta), \tag{2}$$

где коэффициенты a_2 и a_4 зависят от угловых моментов начального и конечного состояний и параметра δ . Найденные по методу наименьших квадратов коэффициенты a_2 и a_4 сопоставлялись с их теоретическими значениями для различных гипотез о спине J резонансного уровня и соответствующим ему значением δ с помощью критерия χ^2 .

Таблица 3. Коэффициенты a_2 и a_4 в функции угловой корреляции и параметры δ

$E_i^* \rightarrow E_f^*$, МэВ	$2J_i^\pi \rightarrow 2J_f^\pi$	$a_2(\Delta a_2)$	$a_4(\Delta a_4)$	$\delta(\Delta\delta)$
9,009 \rightarrow 0	$5^+ \rightarrow 1^+$	-0,60(16)	-0,84(3)	0,07($\pm \infty$)
\rightarrow 2,234	$\rightarrow 5^+$	-0,24(19)	0,07(18)	-0,57(1)
\rightarrow 3,415	$\rightarrow 7^+$	-0,69(16)	-0,86(28)	-0,12(4)
\rightarrow 3,506	$\rightarrow 3^+$	0,28(4)	-0,15(5)	-0,41(11)
\rightarrow 4,190	$\rightarrow 5^+$	0,46(7)	-0,11(7)	-0,14(10)
\rightarrow 4,594	$\rightarrow 3^+$	-0,12(6)	0,00(9)	-0,48(6) или 0,72(8)

ны экспериментальные значения приведенных вероятностей $B(M1)$ прямых γ -переходов, наблюдающихся при распаде компонентов тонкой структуры AP (см. табл. 2).

Определенные таким образом коэффициенты a_2 и a_4 в функции углового распределения γ -лучей и соответствующие им значения параметров δ приведены в табл. 3. В результаты измерений внесены поправки, учитывающие конечный телесный угол детектора. Указанные ошибки являются стандартными отклонениями. На основании всей совокупности полученных данных были определены

Известно, что стандартной мерой корреляции является коэффициент линейной корреляции:

$$r(x, y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\sum_i (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}}. \quad (4)$$

Были рассчитаны коэффициенты r для всех каналов распада обсуждаемых резонансов, значения которых приведены в табл. 4. Результаты сравнений показывают, что наблюдается сильная корреляция между $M1$ -переходом $AC \rightarrow AAC$ и протонной шириной Γ_p : коэффициент корреляции равен $r = 0,99 \pm 0,10$. Существует также корреляция между Γ_p и парциальными ширинами радиационных переходов на возбужденные состояния с $E^* = 3,506$ ($r = 0,99 \pm 0,10$); $4,594$ ($r = 0,53 \pm 0,06$) и $5,529$ ($r = 0,25 \pm 0,03$) МэВ, которые принадлежат СПО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существование значительной корреляции между Γ_p и парциальными ширинами распада на СПО можно объяснить следующим образом: $T_{<}$ - компонент AP является относительно простой конфигурацией и он может быть вторым (после AP) входным состоянием. Таким образом, можно заключить, что в процессе γ -распада аналогового $d_{5/2}$ -резонанса в ядре ^{31}P основную роль играют коллективные изобарические состояния с поляризованным остовом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водин А.Н. и др. Тонкая структура аналогового $d_{5/2}$ - резонанса в ^{23}Na // Известия РАН. Сер. физ. -2004. -Т. 68. -№ 11. -С. 1577-1580.
2. Vernotte J. et al. $^{30}\text{Si}(^3\text{He},d)^{31}\text{P}$ reaction at 25 MeV // Phys. Rev. C. -1990. -V. 41. -P. -1956-1974.
3. Outlaw D. A., Mitchell G. E. and Bilpuch E. G. A high-resolution study of the $^{30}\text{Si}(p,p)^{30}\text{Si}$ reaction // Nucl. Phys. A. -1976. -V. 269. -P. 99-111.
4. Maripuu S. Shell-model calculations of M1 transition probabilities from isobaric analogue states // Nucl. Phys. A. -1969. -V. 123. -P. 357-364.
5. Гусева М. И. Приготовление изотопных мишеней в электромагнитном сепараторе // ПТЭ. -1957. -Т. 5. -С. 112-116.
6. Endt P. M. Energy levels of $A = 21-44$ nuclei (VII) // Nucl. Phys. A. -1992. -V. 521. -P. 1-830.
7. Riihonen M., Keinonen J. and Anttila A. Hydrogen burning of $^{29,30}\text{Si}$ in explosive carbon burning // Nucl. Phys. A. -1979. -V. 313. -P. 251-268.
8. Wolff A. C., Meyer M. A. and Endt P. M. A study of the excited states of ^{31}P with the $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ reaction // Nucl. Phys. A. -1968. -V. 107. -P. 332-346.
9. Bornman C. H. et al. Spins and decay schemes of $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ resonance levels at $E_p = 2 - 3$ MeV // Nucl. Phys. A. -1968. -V. 112. -P. 231-240.
10. De Neijs E. O. et al. Levels of ^{31}P from proton capture in ^{30}Si // Nucl. Phys. A. -1975. -V. 254. -P. 45-62.
11. Lane A. M. New term in the nuclear optical potential: implications for (p,n) mirror state reactions // Phys. Rev. Letters, -1962. -V. 8. №4, -P.171-172.
12. Гапонов Ю. В., Лютостанский Ю. С. Микроскопическое описание Гамов-Теллеровского резонанса и коллективных изобарических 1^+ - состояний сферических ядер // ЭЧАЯ. -1981. -Т. 12. -Вып. 6. -С. 1324-1363.

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF ANALOGUE STATES WITH $J^\pi = 5/2^+$ IN ^{31}P

A.N. Vodin¹, L.P. Korda¹, G.O. Rastrepina², I.V. Ushakov¹, V.T. Bykov¹, G.E. Tuller², M.V. Vashchenko²

¹National Scientific Centre "Kharkiv Institute of Physics and Technology", 1, Akademichna st., 61108, Kharkiv, Ukraine

²Kharkiv National University, 4, Svobody sq, 61077, Kharkiv, Ukraine

The experimental study results of the $d_{5/2}$ analogue resonance γ -decay in reaction $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$ are presented. The decay scheme of the given resonance is elaborated. The angular γ -radiation distributions are measured and the partial γ -widths are determined. The comparison of intensities of $M1$ transitions are conducted with calculations on the many-partial model with the superficial δ -interaction. It is shown that the isobaric collective state of the core polarization type takes a substantial part then the analogue resonance decays.

KEY WORDS: nuclear reaction $^{30}\text{Si}(p,\gamma)^{31}\text{P}$, isobar analog state, γ -decay, angular distribution, probability of $M1$ transition.