

Ядерные мультиплеты в легких нечетно-нечетных ядрах и их проявление в γ -переходах после захвата теплового нейтрона^{*)}

Л. В. Грошев, А. М. Демидов

Рассматриваются состояния нечетно-нечетных ядер с $A < 60$, различающиеся между собой величиной полного момента J , но содержащие в конфигурации нечетный протон и нечетный нейтрон с заданными моментами i_p и i_n . Дается обзор экспериментальных данных, позволяющих предполагать существование таких ядерных мультиплетов вблизи основных состояний ядер. Проводится сравнение схем γ -распада состояний четно-нечетных (нечетный нейтрон) и нечетно-нечетных ядер с $A < 60$, образующихся при захвате тепловых нейтронов. Для объяснения особенностей γ -переходов в нечетно-нечетных ядрах используются представления о мультиплетах.

В последние годы появилось много работ [1]—[3], в которых различными методами измерены энергии и интенсивности γ -лучей, испускаемых при захвате тепловых нейтронов. Кроме того, в результате изучения β -распада и ядерных реакций, вызываемых заряженными частицами, накопилось много сведений об энергиях и других характеристиках уровней ядер. Сочетание этих данных дает возможность составить достаточно надежные схемы γ -переходов ядер с атомным весом $A < 60$, образующихся после захвата теплового нейтрона.

Схемы γ -переходов таких ядер обсуждались в 1954 г. Кинси и Бартоломью [1]. В своей работе они приходят к выводу, что исходные состояния этих ядер, образующиеся при захвате теплового нейтрона, распадаются путем испускания ядром в основном $E1$ - и $M1$ -квантов. Отмечая, что в реакции (n, γ) на естественных смесях изотопов у ядер с $A < 60$ образуются преимущественно четно-нечетные (нечетные по числу нейтронов) и нечетно-нечетные ядра, авторы детально обсуждают схемы γ -переходов четно-нечетных ядер. При этом они приходят к выводу,

что в этих ядрах наиболее интенсивны γ -переходы на уровни с характеристиками $2p_{3/2}$ и $2p_{1/2}$.

Измерения спектров γ -лучей реакций (n, γ) , выполненные в нашей лаборатории с помощью комптоновского спектрометра в более широком интервале энергий исследуемого γ -излучения [2], позволяют уточнить схемы γ -переходов четно-нечетных ядер и более надежно составить их для нечетно-нечетных ядер. В свою очередь появились новые сведения о характеристиках уровней ядер, в том числе и для нечетно-нечетных ядер. Сопоставление всех этих данных позволяет установить определенные закономерности.

Ниже приводятся данные о нижних уровнях нечетно-нечетных ядер для области малых атомных весов ($A \leq 60$) и обсуждается вопрос о γ -переходах в этих ядрах.

При рассмотрении нечетно-нечетных ядер мы будем исходить из предположения о том, что состояния таких ядер определяются характеристиками нечетного протона и нечетного нейтрона. Кроме того, мы будем предполагать, что имеет смысл говорить о полном моменте нечетного нуклона $\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$.

Естественно, что не во всех случаях эти предположения будут выполняться. Однако

^{*)} Доложено на Всесоюзном совещании по ядерной спектроскопии в Ленинграде (январь 1957 г.).

Таблица 1

Ядро	Конфигурация		Характеристики состояния		Энергия дублета $\kappa_{эв}$
	p	n	основного	первого возбужденного	
Al^{28}	$d_{5/2}^{-1}$	$s_{1/2}$	3^+	2^+	29
P^{32}	$s_{1/2}$	$d_{3/2}$	1^+	2^+	77
N^{16}	$p_{1/2}$	$d_{5/2}$	2^-	3^-	300
P^{30}	$s_{1/2}$	$s_{1/2}$	1^+	0^+	688
N^{14}	$p_{1/2}$	$p_{1/2}$	1^+	0^+	2310

можно думать, что вблизи основного состояния ядра они в большинстве случаев выполняются.

Рассмотрим некоторую ядерную конфигурацию с заданными моментами нечетного протона (j_p) и нечетного нейтрона (j_n). В пределах такой конфигурации должно существовать несколько состояний, отличающихся друг от друга величиной полного момента J , но имеющих одну и ту же четность, причем величина J удовлетворяет условию $j_p + j_n \geq J \geq |j_p - j_n|$. Число таких состояний должно равняться $2j+1$, где j —меньшее значение из j_p и j_n . При наличии взаимодействия между нечетными нуклонами, различного при разных значениях J , рассматриваемые состояния не будут совпадать по энергии. Совокупность таких состояний мы будем называть в дальнейшем ядерным мультиплетом. Если такие мультиплеты существуют, то наиболее отчетливо должны проявляться мультиплеты, включающие основные состояния нечетно-нечетных ядер. В этом случае характеристики нечетного протона и нечетного нейтрона, как правило, известны из характеристик основных состояний соответствующих соседних нечетно-четных и четно-нечетных ядер.

Имеющиеся в настоящее время данные по интересующему нас вопросу хотя и не являются исчерпывающими, но все же весьма убедительно говорят в пользу существования ядерных мультиплетов в нечетно-нечетных ядрах. Остановимся на рассмотрении этих данных*).

I

Если протон или нейтрон в нечетно-нечетном ядре имеет момент $1/2$, то вблизи основного состояния ядра должен иметься дублет. К таким ядрам, в частности, относятся Al^{28} и все изотопы фосфора. Для Al^{28} и P^{32} давно установлено существование дублета с малым расщеплением.

В табл. 1 приведены дублеты, которые могут быть выделены на основании имеющихся схем уровней. В верхней части таблицы приведены ядра, у которых нечетный протон и нечетный нейтрон имеют различные l , в нижней части таблицы—при одинаковых l .

У ядер Al^{28} и P^{32} ближайшее возбужденное состояние за пределами дублета находится

ся соответственно при энергии 0,97 и 0,57 Мэв. В этих случаях ядерные дублеты выделяются очень четко.

В ядре N^{16} состояния $p_{1/2} d_{5/2}$ и $p_{1/2} s_{1/2}$ мало различаются по энергии. Здесь два дублета перекрываются, образуя четыре уровня с характеристиками 2^- , 0^- , 3^- 1^- и энергиями 0, 113, 300, 390 $\kappa_{эв}$ [7].

У ядер N^{14} и P^{30} энергия возбуждения следующего после дублета уровня равна соответственно 3,95 и 1,14 Мэв.

Из табл. 1 видно, что взаимодействие между нечетным протоном и нечетным нейтроном мало, если они имеют различные l ; оно становится значительно больше, если нечетные нуклоны обладают одинаковым l .

Если моменты нечетного протона и нечетного нейтрона равны или превышают $3/2$, то можно ожидать, что основное состояние ядра войдет в мультиплет более высокого порядка. В настоящее время известно несколько случаев сложных мультиплетов, хорошо отделенных от других уровней. Они проявляются, если в основном состоянии ядра нечетные протоны и нейтроны имеют различные l .

На рис. 1 приведены схемы уровней для Cl^{38} и K^{40} и для сравнения—схема Ca^{41} .

В ядрах K^{40} и Ca^{41} нечетный нейтрон находится в одинаковом состоянии, а именно $1f_{7/2}$. Как показал Демидов [8], у этих ядер уровни $2p_{3/2}$, выделяющиеся тем, что через них с большой вероятностью идет реакция стриппинга (d, p), имеют приблизительно одну и ту же энергию возбуждения. Имеющиеся в настоящее время результаты исследований реакции (d, p) показывают, что это утверждение справедливо для более

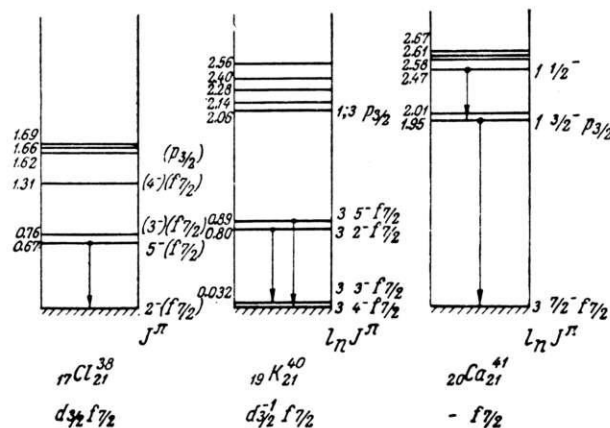
*) Ссылки на литературу даются только в том случае, если данные не вошли в обзоры [4]—[6].

широкого круга ядер. В табл. 2 приведен список ядер, у которых нечетный нейтрон находится в состоянии $f_{7/2}^{\pm 1}$, $f_{7/2}^{\pm 3}$. У всех приведенных в таблице ядер уровень $2p_{3/2}$ имеет приблизительно одну и ту же энергию возбуждения.

Таблица 2

Ядро	Конфигурация основного состояния	Энергия возбуждения уровня $2p_{3/2}$ Мэв
$^{38}_{17}\text{Cl}_{21}$	$d_{3/2} f_{7/2}$	$\geq 1,62$ [9]
$^{41}_{18}\text{Ar}_{23}$	$d_{5/2}^2 f_{7/2}^3$	1,40 [10]
$^{40}_{19}\text{K}_{21}$	$d_{3/2}^1 f_{7/2}$	2,06 [11]
$^{41}_{20}\text{Ca}_{21}$	— $f_{7/2}$	1,95 [12]
$^{43}_{20}\text{Ca}_{23}$	— $f_{7/2}^3$	2,05 [12]
$^{45}_{20}\text{Ca}_{25}$	— $f_{7/2}^{-3}$	1,89 [12]
$^{49}_{22}\text{Ti}_{27}$	$f_{7/2}^2 f_{7/2}^{-1}$	1,40 [13]

У ядра Ca^{41} этот уровень соответствует первому возбужденному состоянию с энергией 1,95 Мэв. В отличие от Ca^{41} у нечетно-нечетного ядра K^{40} при меньших возбуждениях


 Рис. 1. Схемы низколежащих уровней ядер Cl^{38} , K^{40} и Ca^{41} .

имеются три уровня. Опыты по изучению реакции (d, p) на ядре K^{39} показывают, что эти уровни и основное состояние имеют одинаковую четность и полные моменты J , значения которых лежат в интервале $j_p + j_n \geq J \geq |j_p - j_n|$ (см. рис. 1).

Поэтому группу из 4 уровней K^{40} можно трактовать как мультиплет для конфигурации $d_{3/2}^1 f_{7/2}$. Аналогичная конфигурация $d_{3/2} f_{7/2}$ имеет место у Cl^{38} . Недавно Гольдштейн и Тальми [14], исходя из предположения о том, что радиальные функции в этих двух конфигурациях одинаковы, установили наличие линейной зависимости между энергетическими интервалами ΔE для мультиплетов конфигураций $d_{3/2}^1 f_{7/2}$ и $d_{3/2} f_{7/2}$. Взяв экспериментальные значения ΔE для мультиплета K^{40} , они получили соответствующие значения ΔE для мультиплета Cl^{38} . Вычисленные таким способом энергии уровней Cl^{38} приведены в табл. 3. Там же приведены энергии уровней ядра Cl^{38} , полученные недавно в работе [9] путем магнитного анализа продуктов реакции $\text{Cl}^{37}(\text{d}, \text{p})\text{Cl}^{38}$. Как видно из таблицы, между расчетными и экспериментальными данными имеется хорошее согласие. Аналогичные результаты получены недавно Пандия [15].

Таблица 3

	E Мэв	J^π	E Мэв	J^π	E Мэв	J^π	E Мэв	J^π
Рассчитано по K^{40}	0	2-	0,70	5	0,75	3	1,32	4-
Данные эксперимента .	0	2-	0,672	5-	0,762	—	1,312	—

Довольно хорошо изучены уровни нечетно-нечетных ядер Na^{24} и Cl^{36} с конфигурациями основных состояний $(d_{3/2}^2)_{3/2} d_{5/2}^1$ и $d_{3/2} d_{5/2}^1$. Однако при образовании этих ядер в результате реакции (d, p) нейтрон с орбитальным моментом $l_n = 2$ захватывается только в основное и первое возбужденное состояние. Для второго и третьего возбужденных состояний $l_n = 0$, т. е. нейтрон захватывается не в d, а в s-состояние. Это может быть связано с тем, что из-за сильного взаимодействия между нечетным протоном и нейтроном при одинаковом l (энергия 1-го возбужденного состояния равна 470 кэв для Na^{24} и 770 кэв для Cl^{36}) мультиплет перекрывается с другими уровнями и его остальные два компонента лежат значительно выше.

Аналогичная картина наблюдается для мультиплета из шести компонентов, имеющего место в случае ядра Al^{26} с конфигурацией $d_{5/2}^1 d_{5/2}^1$ для основного состояния. Это ядро мы рассмотрим в разделе III.

II

Отметим еще одну особенность в расположении уровней нечетно-нечетных ядер, связанную, как нам кажется, с существованием в них ядерных мультиплетов. Среди уровней данного сложного мультиплета, принадлежащих одной и той же конфигурации, могут встретиться состояния, в которых ядра имеют моменты, различающиеся на 3, 4 и 5 единиц. Это обстоятельство может привести к появлению ядерной изомерии, отличающейся по своей природе от обычной изомерии, для которой характерны переходы между уровнями с сильно различающимися l . Такие изомеры, как известно, располагаются «островами» непосредственно перед магическими числами. Для первого такого острова N или $Z \geq 39$ ($A \geq 69$). В табл. 4 приведены характеристики состояний легких нечетно-нечетных ядер с $A \leq 60$, между которыми происходят изомерные переходы. Все эти ядра расположены за пределами первого «острова» изомерии со стороны меньших A . Из табл. 4 видно, что моменты всех состояний, участвующих в изомерных переходах, согласуются с условием $j_p + j_n < J < |j_p - j_n|$ и что все переходы происходят без изменения четности.

Таблица 4

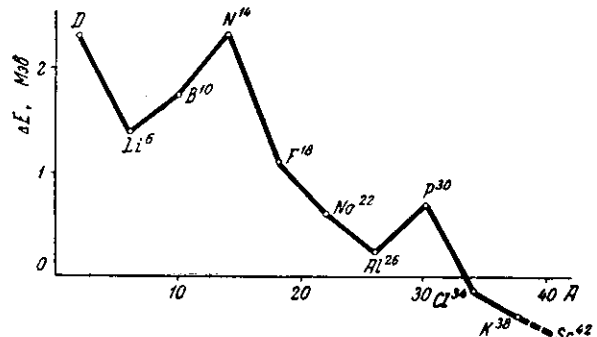
Ядро	Конфигурация основного состояния [16]		Характеристика состояния	
	p	n	изомерного	основного
$^{22}_{11}\text{Na}$	$d_{5/2}^3$	$d_{5/2}^3$	(0 ⁺)	3 ⁺
$^{24}_{11}\text{Na}$	$d_{5/2}^3$	$d_{5/2}^{-1}$	1 ⁺	4 ⁺
$^{26}_{13}\text{Al}$	$d_{5/2}^{-1}$	$d_{5/2}^{-1}$	0 ⁺	5 ⁺
$^{31}_{17}\text{Cl}$	$d_{3/2}$	$d_{3/2}$	3 ⁺	0 ⁺
$^{38}_{17}\text{Cl}$	$d_{3/2}$	$f_{7/2}$	5 ⁻	2 ⁻
$^{38}_{19}\text{K}$	$d_{3/2}^{-1}$	$d_{3/2}^{-1}$	3 ⁺	0 ⁺
$^{41}_{21}\text{Sc}$	$f_{7/2}$	$f_{7/2}^3$	6, 7 ⁺	2, 3 ⁺
$^{46}_{21}\text{Sc}$	$f_{7/2}$	$f_{7/2}^5$	7 ⁺	4 ⁺
$^{52}_{25}\text{Mn}$	$f_{7/2}^3$	$f_{7/2}^{-1}$	2 ⁺	6 ⁺
$^{58}_{27}\text{Co}$	$f_{7/2}^{-1}$	$p_{3/2}^{-1}$	5 ⁺	2 ⁺
$^{60}_{27}\text{Co}$	$f_{7/2}^{-1}$	$p_{3/2}^{-1}$	2 ⁺	5 ⁺

У Al^{28} и изотопов фосфора, имеющих ядерные дублеты с $\Delta J = 1$, изомерия не наблюдается. При соответствующем расположении уровней она может не наблюдаться и в случае сложного мультиплета, как это, например, имеет место в случае K^{40} (см. рис. 1).

III

Рассмотрим отдельно вопрос о мультиплетах для нечетно-нечетных ядер с $N = Z$. Данные о ядрах, относящихся к этой категории, приведены в табл. 5. В столбце 2 приведены конфигурации основных состояний. В следующем столбце даны характеристики основного и ближайших возбужденных состояний.

Многочисленно отмечалось [18], что у нечетно-нечетных ядер с $N = Z$ уровни с нечетным J имеют четный изотопический спин T , и наоборот. Известно также [19], что в нечетно-нечетных ядрах с $T_z = 0$ разность энергий между низшими состояниями с $T = 1$ и $T = 0$ значительно меньше, чем в четно-четных ядрах с $A = 4n$. С увеличением A эта разность уменьшается.

Рис. 2. График зависимости $\Delta E = E_{\uparrow\uparrow} - E_{\downarrow\downarrow}$ от атомного веса для нечетно-нечетных ядер с $N = Z$.

На рис. 2 приведена зависимость разности энергии связи $\Delta E = E_{\uparrow\uparrow} - E_{\downarrow\downarrow}$ от атомного номера для двух состояний одного и того же ядра, в которых моменты j_p и j_n соответственно параллельны ($J = 2j$, $T = 0$) или антипараллельны ($J = 0$, $T = 1$). Величина $\Delta E = E_{\uparrow\uparrow} - E_{\downarrow\downarrow}$ во всех случаях, за исключением Li^6 , совпадает с разностью энергий низших состояний с $T = 0$ и $T = 1$ ($-\Delta E = E_{T=0} - E_{T=1}$). Из рис. 2 видно, что ΔE при $A \sim 34$ меняет знак. При $A > 34$ основ-

Таблица 5

Ядро	Конфигурация основного состояния		Характеристики состояний					
	p	n		основного	1-го возбужденного	2-го возбужденного	3-го возбужденного	
D	$s_{1/2}$	$s_{1/2}$	J^π T	1^+ 0	$0^{+*})$ 1			
Li ⁶	$p_{3/2}$	$p_{3/2}$	J^π T	1^+ 0	3^+ 0	0^+ 1		2^+ выше
B ¹⁰	$p_{3/2}^{-1}$	$p_{3/2}^{-1}$	J^π T	3^+ 0	1^+ 0	0^+ 1		2^+ выше
N ¹⁴	$p_{1/2}$	$p_{1/2}$	J^π T	1^+ 0	0^+ 1			
F ¹⁸	$s_{1/2}$	$s_{1/2}$	J^π T	1^+ 0	0^+ 1			
Na ²²	$d_{5/2}^3$	$d_{5/2}^3$	J^π T	3^+ 0	0^+ 1	$**)$		
Al ²⁶	$d_{5/2}^{-1}$	$d_{5/2}^{-1}$	J^π T	5^+ 0	0^+ 1	3^+ 0	1^+ 0	$2, 4^+$ выше
P ³⁰	$s_{1/2}$	$s_{1/2}$	J^π T	1^+ 0	0^+ 1			
Cl ³⁴	$d_{3/2}$	$d_{3/2}$	J^π T	0^+ 1	3^+ 0			2^+ выше
K ³⁸	$d_{3/2}^{-1}$	$d_{3/2}^{-1}$	J^π T	0^+ 1	3^+ 0			2^+ выше
Sc ⁴²	$f_{7/2}$	$f_{7/2}$	J^π T	0^+ 1				
Co ⁵⁴	$f_{7/2}^{-1}$	$f_{7/2}^{-1}$	J^π T	0^+ 1				

*) Виртуальное состояние.

**) Первым возбужденным уровнем, вероятно, является уровень $1^+, T=0$, на небольшом расстоянии от которого находится состояние $J=0, T=1$, приведенное в таблице (см. [17]).

***) Состояние с такой характеристикой лежит выше состояний, указанных в предыдущих столбцах.

ным состоянием является состояние с $T=1$ (см. табл. 5). Кроме включенных в таблицу ядер (Cl^{34} , K^{38} , Sc^{42} [20] и Co^{54} [21]), момент $J=0^+$ в основном состоянии имеет Mn^{50} и, возможно, V^{46} [21].

Из приведенных в табл. 5 примеров сложных мультиплетов видно, что все их нижние компоненты имеют нечетное J или $J=0^+$. Недостающие четные компоненты лежат значительно выше, что связано с зарядовой не-

зависимостью ядерных сил. Сравним нечетно-нечетное ядро, имеющее $N=Z$, с соседними четно-четными ядрами с $T_z = \pm 1$ ($N'-Z' = \pm 2$). Основные состояния таких ядер являются состояниями 0^+ и имеют $T=1$. Эти состояния и компонент мультиплета с $J=0^+$ и $T=1$ рас-

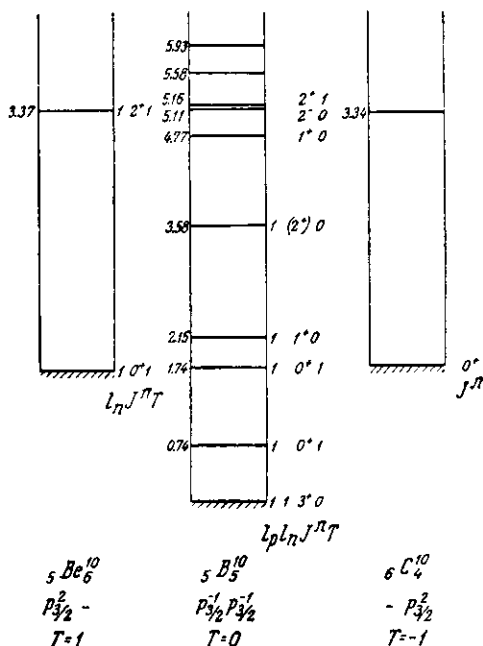


Рис. 3. Схемы уровней ядер $\text{Be}^{10}-\text{B}^{10}-\text{C}^{10}$ в изобарном триплете с $A=10$.

смаатриваемого ядра составляют изобарный триплет. Поэтому компонент мультиплета 2^+ должен лежать относительно состояния 0^+ не ниже, чем первый уровень 2^+ в соседних четно-четных ядрах с $T_z = \pm 1$. Если компонент мультиплета 2^+ имеет то же происхождение, что и в нечетно-нечетном ядре, то он будет или совпадать с этим уровнем, или лежать где-то выше его, если последний имеет какое-то другое происхождение. Аналогичное заключение справедливо и для компонента 4^+ в более сложных ядерных мультиплетах.

На рис. 3 и 4 приведены схемы уровней ядер B^{10} , Al^{26} и для сравнения схемы их изобаров с $T_z = \pm 1$, причем основные состояния этих ядер нанесены на одной прямой с состоянием 0^+ нечетно-нечетного ядра. Из

рис. 3 видно, что у B^{10} уровень $J = 2^+$, $T = 1$ с энергией 5,16 Мэв приблизительно совпадает с уровнем 2^- Bc^{10} и C^{10} и поэтому он (а не первый возбужденный уровень 2^+ с энер-

Таблица 6

Ядро	Характеристика основного состояния	Ядро	Характеристика основного состояния
Li^8	2^+	Sc^{48}	6^+
B^8	2^+	V^{48}	4^+
Na^{24}	4^+	Sc^{50}	2^+
Al^{24}	4^+	V^{50}	6^+
Cl^{36}	2^+	V^{52}	2^+
Cl^{38}	2^-	Mn^{52}	6^+
Cl^{40}	2^-	Mn^{54}	2^+
K^{40}	4^-	Mn^{56}	2^+
Sc^{40}	4^-	Co^{56}	4^+
K^{42}	2^-	Co^{58}	2^+
Sc^{44}	$2, 3^+$	Cu^{60}	2^+
Sc^{46}	4^+	Co^{60}	5^+

Таблица 7

Ядро	Конфигурация		Характеристика основного и ближайших возбужденных состояний				Примечание
	p	n	1	2	3	4	
Cl^{34}	$d_{3/2}$	$d_{3/2}$	0^+	3^+			2^+ выше *)
Cl^{36}	$d_{3/2}$	$d_{3/2}^{-1}$	2^+				0^+ выше
K^{38}	$d_{3/2}^{-1}$	$d_{3/2}^{-1}$	0^+	3^+			2^+ выше
Cl^{38}	$d_{3/2}$	$f_{7/2}$	2^-	5^-	3^-	4^-	
K^{40}	$d_{3/2}^{-1}$	$f_{7/2}$	4^-	3^-	2^-	5^-	
Sc^{40}	$f_{7/2}$	$d_{3/2}^{-1}$	4^-				2^- выше
Sc^{42}	$f_{7/2}$	$f_{7/2}$	0^+				2^+ , 4^+ , 6^+ выше
Sc^{48}	$f_{7/2}$	$f_{7/2}^{-1}$	6^+				0^+ выше
Co^{54}	$f_{7/2}^{-1}$	$f_{7/2}^{-1}$	0^+				2^+ , 4^+ , 6^+ выше
Sc^{50}	$f_{7/2}$	$p_{3/2}$	2^+				4^+ выше
Co^{56}	$f_{7/2}^{-1}$	$p_{3/2}$	4^+				2^+ выше
Co^{58}	$f_{7/2}^{-1}$	$p_{3/2}^{-1}$	2^+				4^+ выше

*) Состояние с такой характеристикой лежит выше состояний, указанных в предыдущих столбцах.

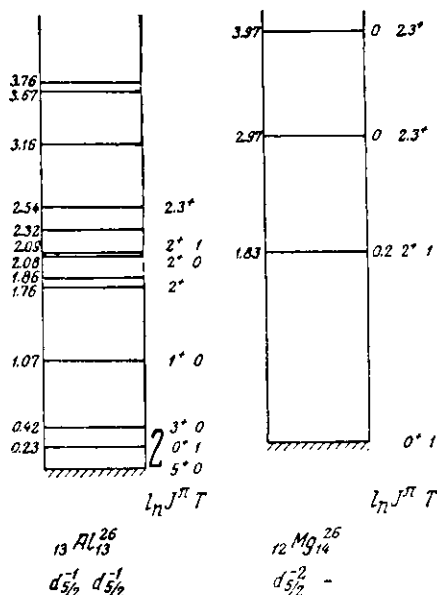


Рис. 4. Схемы уровней ядер Al^{26} — Mg^{26} в изобарном триплете с $A=26$.

гией 3,58 Мэв) может входить в состав мультиплетта. В случае Al^{26} (рис. 4) компонентом 2^+ , возможно, является уровень с энергией 1,76 Мэв, совпадающий с уровнем 2^+ Mg^{26} . По последним данным [22], уровень с $E = 1,76$ Мэв действительно имеет $T = 1$. Компонент мультиплетта 4^+ лежит где-то еще выше.

IV

Как уже отмечалось, в мультиплеттах нечетно-нечетных ядер при $N = Z$ компоненты с нечетными J и с $J = 0^+$ лежат ниже состояний 2^+ , 4^+ и т. д. У всех других нечетно-нечетных ядер ($N \neq Z$) наблюдается иная картина. В табл. 6 приведены характеристики основных состояний для таких ядер (за исключением ядер с N или Z , равными 7, 9 и 15, у которых j_p или $j_n = 1/2$). Из таблицы видно, что почти во всех случаях основное состояние имеет четный момент. Неоднозначность наблюдается лишь для недостаточно хорошо изученного ядра Sc^{44} . Единственным

явным исключением является $^{50}_{27}\text{Co}_{33}$, момент основного состояния которого равен 5^+ [22]. Возможно, что причиной этого исключения является то обстоятельство, что при $N = 33$ впервые начинается заполнение следующей ядерной оболочки при незаполненной предыдущей.

Отметим еще одну особенность ядерных мультиплетов. В табл. 7 приведено несколько групп нечетно-нечетных ядер, для которых можно ожидать наличия мультиплетов из четырех компонентов. Там же даны характеристики известных компонентов мультиплетов. В отдельные группы объединены ядра с заданными j_p и j_n для нечетных протонов и нейтронов. Конфигурации этих ядер получаются друг из друга при замене частицы на дырку

V

Ядерные мультиплеты, по-видимому, проявляются в спектрах γ -лучей, испускаемых при захвате тепловых нейтронов, если в результате захвата образуется нечетно-нечетное ядро.

Для подтверждения высказанного предположения проведем сопоставление таких γ -спектров для четно-нечетных (нечетный нейтрон) и нечетно-нечетных излучающих ядер. На рис. 5 проведено такое сравнение для трех пар ядер

$$^{29}_{14}\text{Si}_{15} - ^{28}_{13}\text{Al}_{15}, \quad ^{41}_{20}\text{Ca}_{21} - ^{40}_{19}\text{K}_{21} \quad \text{и} \quad ^{57}_{26}\text{Fe}_{31} - ^{56}_{25}\text{Mn}_{31}.$$

Ядра каждой пары имеют одинаковое число нейтронов. Из рис. 5 видно, что для четно-

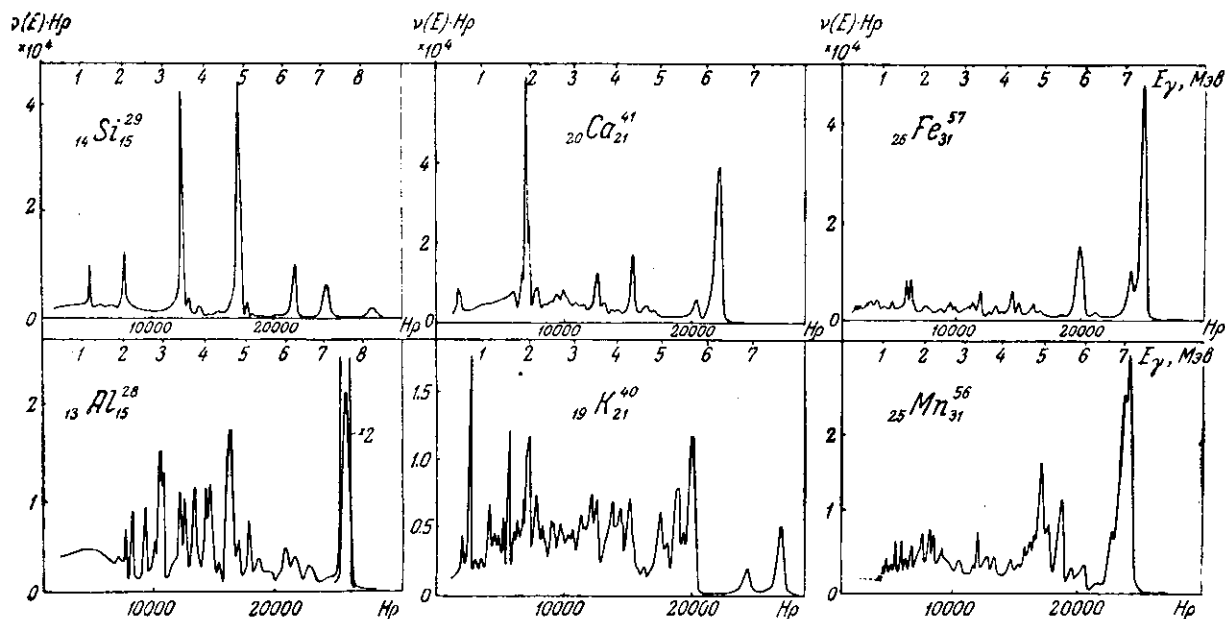


Рис. 5. Спектры γ -лучей, испускаемых при захвате тепловых нейтронов ядрами с N , равным 15, 21 и 31.

или дырки на частицу. Из приведенных примеров видно, что переход с заменой одной частицы на дырку приводит к тому, что наиболее высоко лежащий компонент мультиплета (см. последний столбец табл. 5; 2^+ у Cl^{34} , 4^- у Cl^{38} , 6^+ у Sc^{42} и 4^+ у Sc^{50}) становится основным состоянием. Повторение такого перехода (например, $\text{Cl}^{36} \rightarrow \text{K}^{38}$, $\text{Sc}^{48} \rightarrow \text{Co}^{54}$ или $\text{Co}^{56} \rightarrow \text{Co}^{58}$) восстанавливает первоначальную картину.

нечетных ядер спектры имеют сравнительно простую форму. В спектрах нечетно-нечетных ядер линий значительно больше. Последнее прямо связано с увеличением плотности уровней в нечетно-нечетных ядрах по сравнению с четно-нечетными.

Рассмотрим относительные вероятности γ -переходов из исходного состояния, образованного при захвате теплового нейтрона, на различные уровни четно-нечетных и нечетно-

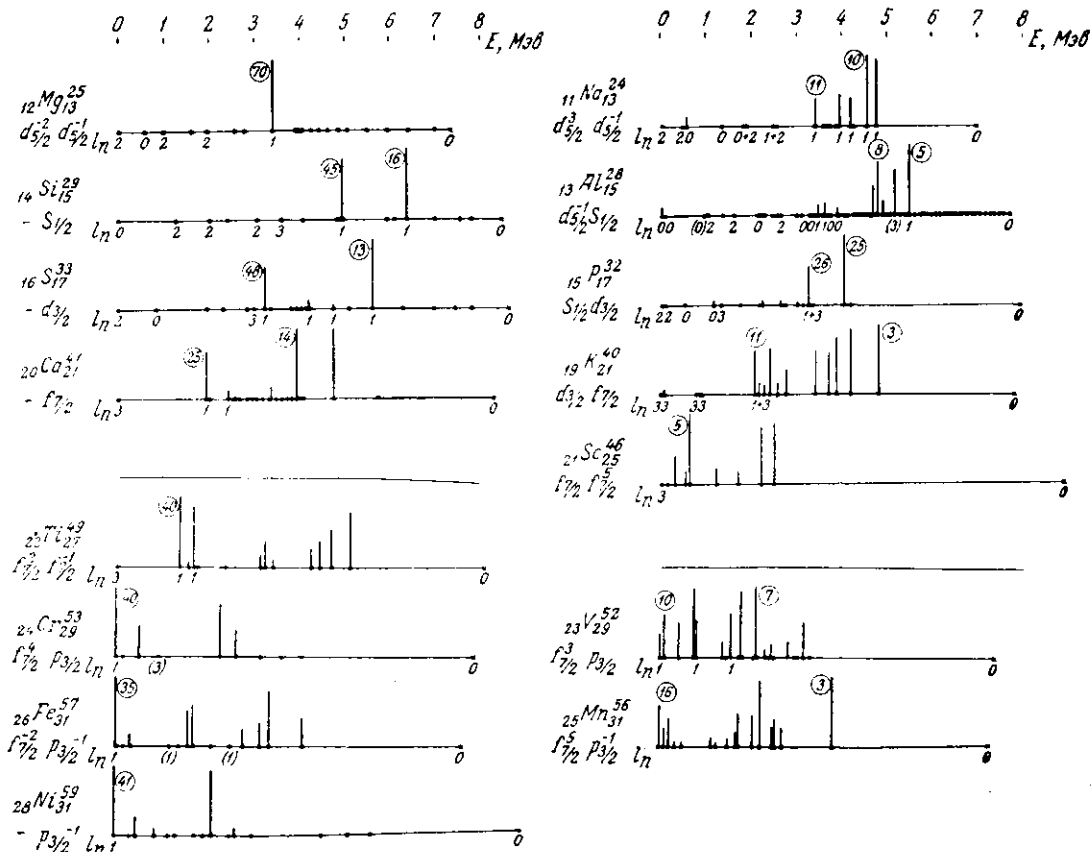


Рис. 6. Диаграмма γ -распадов состояний, образовавшихся при захвате тепловых нейтронов, четно-нечетных и нечетно-нечетных ядер.

1. В случае Mg сравнимый вклад в сечение поглощения тепловых нейтронов вносят два изотопа (Mg^{24} —44% и Mg^{25} —46%, Mg^{26} —10%). По этой причине расшифровка спектра затруднена, надежно установлены лишь γ -переходы на уровни с энергией меньше 4 Мэв в Mg^{25} .

2. В случае Cr сравнимый вклад в сечение поглощения дают три изотопа (Cr^{50} —27,5%, Cr^{52} —20,5%, Cr^{53} —55%). Анализ спектра также затруднен. Пользуясь тем, что энергия связи нейтрона у Cr^{51} известна (9,07 Мэв), можно установить отсутствие у него перехода в основное состояние. Это связано с тем, что в основном состоянии Cr^{51} нейтрон имеет характеристику $f_{7/2}^1$, а не $p_{3/2}$, как у Cr^{53} .

3. При поглощении нейтронов в железе в подавляющем большинстве случаев (92%) образуется ядро Fe^{57} , имеющее энергию связи нейтрона 7,65 Мэв. В 5% случаев образуется Fe^{56} , для которого энергия связи равна 9,34 Мэв. У Fe^{56} последний нейтрон находится в состоянии $p_{3/2}$. В соответствии с этим для него наблюдается переход в основное состояние, на долю которого приходится 40 квантов на 100 захватов в этом изотопе.

4. Аналогичная картина наблюдается у Ni^{61} (нейтрон $p_{3/2}^1$), который образуется в 16% случаев и имеет очень интенсивный переход в основное состояние.

нечетных легких ядер ($A < 60$). Интересующие нас переходы выделялись на основании принятых в настоящее время схем γ -переходов.

Относительная вероятность данного перехода принималась равной числу γ -квантов на один захваченный нейтрон $-p_i$, деленному на $(h\nu_i)^3$. Деление интенсивности γ -перехода на $(h\nu_i)^3$ уничтожает зависимость его вероятности от энергии, поскольку известно [1], что наиболее интенсивные переходы являются дипольными. Полученные результаты представлены на диаграмме (рис. 6). По горизонтальным осям отложены энергии возбуждения ядра (уровни ядер указаны точками), высота вертикальных линий пропорциональна относительным вероятностям переходов из исходного состояния на данный уровень. Для каждого ядра за единицу вероятности принята наибольшая величина $p_i/(h\nu_i)^3$. Цифры в кружках у некоторых линий указывают для данного перехода число γ -квантов на сто захваченных нейтронов. При составлении диаграммы для ядер Mg^{25} , P^{32} , Sc^{46} и Cr^{53} использовались данные работ [1], для Si^{29} , S^{33} , Ca^{41} , Ti^{49} , Fe^{57} , Ni^{59} , Na^{24} и K^{40} —данные работ [2], для Al^{28} , V^{52} и Mn^{56} —данные работы [24].

Из опытов по изучению реакции (d, p) для ряда уровней установлен момент l_n , который нейтрон вносит в ядро. Величины l_n приведены ниже оси абсцисс. Левая часть диаграммы относится к четно-нечетным, а правая—к нечетно-нечетным ядрам. При распаде исходного состояния четно-нечетных ядер характерно то обстоятельство, что вероятность перехода на самый низкий уровень с $l_n=1$, который четко выделяется во всех приведенных четно-нечетных ядрах по большей вероятности реакции (d, p) , наиболее велика и в зависимости от ядра составляет от 25 до 70%. Как неоднократно отмечалось в литературе, этот уровень обусловлен переходом нечетного нейтрона в состояние $2p_{3/2}$. Из рассмотрения левой части диаграммы видно, что, помимо перехода на уровень с нейтроном в состояние $2p_{3/2}$, имеются другие γ -переходы, сравнимые с ним по относительной вероятности. Обычно эти γ -переходы идут на уровни, расположенные примерно на 2 Мэв выше уровня $2p_{3/2}$. Хольт и Маршам [25] предположили, что в ядрах Si^{29} и S^{33} этот уровень соответствует переходу нечетного нейтрона в состояние $2p_{1/2}$. Для

других ядер характеристики этих уровней еще не найдены.

На диаграмме ясно видно постепенное понижение уровня $2p_{3/2}$ при увеличении атомного веса A . В ядрах Cr^{53} , Fe^{57*} , Ni^{59} он становится основным состоянием. Поэтому в этих ядрах имеет место интенсивный γ -переход в основное состояние.

Таким образом, в случае четно-нечетных ядер наиболее вероятны γ -переходы из исходного состояния на небольшое число уровней. В тех случаях, когда характеристики этих уровней найдены, они оказываются уровнями $p_{3/2}$ или $p_{1/2}$. При рассмотрении правой части диаграммы (нечетно-нечетные ядра) мы видим увеличение числа линий сравнимой интенсивности (в среднем порядка 10 γ -квантов на 100 захватов). При этом необходимо отметить, что интенсивные γ -переходы идут группами, полную структуру которых пока еще не удается определить. Однако обращает на себя внимание то обстоятельство, что у V^{52} , Mn^{56} и Co^{60} [1], [24] (на диаграмме не приведен), для которых в основном состоянии нейтрон имеет характеристику $p_{3/2}$, наблюдается группа линий вблизи основного состояния. У более легких ядер, основные состояния которых содержат нейтрон с характеристиками, отличными от $p_{3/2}$, группы интенсивных линий перемещаются в сторону более высоких энергий, причем в некоторых случаях для этих уровней из реакции (d, p) было найдено значение $l_n=1$.

Если сравнить четно-нечетное и нечетно-нечетное ядра с одним и тем же числом нейтронов ($^{12}_{13}Mg^{25}-^{11}_{13}Na^{24}$, $^{14}_{15}Si^3-^{13}_{15}Al^{25}$, $^{20}_{21}Ca^{41}-^{19}_{21}K^0$, $^{24}_{29}Cr^{53}-^{23}_{29}V^{52}$, $^{26}_{31}Fe^{57}-^{25}_{31}Mn^{56}$), то легко установить, что в нечетно-нечетных ядрах первая группа интенсивных переходов идет на уровни, расположенные приблизительно в той же области энергий, где находится уровень $2p_{3/2}$ в соответствующих четно-нечетных ядрах.

Отмеченную особенность спектров γ -лучей нечетно-нечетных ядер, как нам кажется, можно понять, если учесть наличие ядерных мультиплетов в нечетно-нечетных ядрах. При этом предполагается, что можно говорить о мультиплетах как у основного, так и у возбужденного состояний.

*) По последним данным [26], основное состояние ядра Fe^{57} имеет характеристику $1/2^-$, а характеристика $3/2^-$ принадлежит первому возбужденному состоянию с энергией 14 кэв.

Если рассматривать захват теплового нейтрона легким ядром как процесс прямого взаимодействия, происходящего без образования составного ядра, то из результатов, полученных для четно-нечетных ядер, следует, что при захвате s -нейтрона наиболее вероятным является электрический дипольный переход, при котором нейтрон переходит в p -состояние. Если в нечетно-нечетном ядре имеется конфигурация, содержащая, допустим, $p_{3/2}$ -нейтрон, то в соответствии с тем, что излагалось вначале, может образоваться ядерный мультиплет. В таком случае в нечетно-нечетном ядре переходы на уровни с нейтроном $p_{3/2}$, для которых $\Delta J=0, \pm 1$, должны иметь примерно равную интенсив-

ность (в нечетно-нечетном ядре указанные переходы также будут электрическими дипольными, так как предполагается, что уровень обусловлен в основном переходом нейтрона в p -состояние без изменения состояния протона).

На основании такого предположения легко объяснить появление групп линий сравнимой интенсивности в случае нечетно-нечетных ядер, а также перемещение этих групп линий в другие области спектра приблизительно так же, как это происходит с уровнем $2p_{3/2}$ в соответствующих четно-нечетных ядрах.

Поступила в редакцию 28 II 1957 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. V. Kinsey, G. A. Bartolomew, Phys. Rev. **93**, 1260 (1954); **83**, 519 (1951); **85**, 1012 (1952); **89**, 375, 386 (1953).
2. Л. В. Грошев, Б. П. Адышев, А. М. Демидов, Физические исследования (Доклады советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии). Изд. АН СССР, 1955 г., стр. 252; Атомная энергия **2**, 28, 40 (1956).
3. T. H. Braid, Phys. Rev. **102**, 1109 (1956); M. Reier, M. H. Shamos, Phys. Rev. **100**, 1302 (1955).
4. F. A. J. J. zenberg, T. Lauritsen, Rev. Mod. Phys. **27**, 77 (1955).
5. P. M. Endt, J. C. Klyuwer, Rev. Mod. Phys. **26**, 95 (1954).
6. Б. С. Дзелепов, Л. К. Пекар, Схемы распада радиоактивных изотопов. Изд. АН СССР, 1957 г.
7. E. K. Warruton, J. N. Gruer, Bull. Amer. Phys. Soc. **II**, 1, 325 (1956).
8. А. М. Демидов, Известия АН СССР (Серия физическая) **8**, 962 (1956).
9. C. H. Paris, W. W. Buechner, P. M. Endt, Phys. Rev. **100**, 1317 (1955).
10. H. B. Burrows, T. S. Green, S. Hinds, R. Middleton, Proc. Phys. Soc. **69 A**, 310 (1956).
11. Н. Теплов, Диссертация, МГУ, 1954 г.
12. J. B. French, B. J. Raz, Phys. Rev. **104**, 1410 (1956).
13. G. F. Pieper, Phys. Rev. **88**, 1299 (1952).
14. S. Goldstein, I. Talmi, Phys. Rev. **102**, 589 (1956).
15. S. P. Pandya, Phys. Rev. **103**, 956 (1956).
16. M. Goepfert-Mayer, J. H. D. Jensen, Elementary Theory of Nuclear Shell Structure (1955).
17. D. H. Wilkinson, Phil. Mag. **11**, 1031 (1956).
18. A. De-Shalit, Phys. Rev. **91**, 1479 (1953); S. A. Moszkowski, D. C. Peaslee, Phys. Rev. **93**, 455 (1953).
19. А. Базь, Я. Смородинский, УФН **LV**, 215 (1955).
20. H. Morinaga, Phys. Rev. **100**, 431 (1955).
21. R. W. King, Rev. Mod. Phys. **26**, 327 (1954).
22. L. L. Green, J. J. Singh, J. C. Willmott, Proc. Phys. Soc. **69 A**, 335 (1956).
23. W. Dobrowolski, R. V. Jones, C. D. Jeffries, Phys. Rev. **101**, 1001 (1956).
24. Л. В. Грошев, А. М. Демидов, В. Н. Лущенко, В. И. Пелехов, Атомная энергия (будет опубликовано).
25. J. R. Holt, T. N. Marsham, Proc. Phys. Soc. **A 66**, 258 (1953).
26. T. Lindqvist, E. Heer, Nucl. Phys. **2**, 680 (1957).