

И. А. ВАЙСМАН

ВЛИЯНИЕ НУКЛЕОННЫХ ОРБИТ НА ЭФФЕКТИВНОЕ СЕЧЕНИЕ ЗАХВАТА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ И НА ФОРМИРОВАНИЕ СПИНА ДВАЖДЫ-НЕЧЕТНЫХ ЯДЕР

(Представлено академиком А. И. Алихановым 15 X 1952)

Влияние нуклеонных орбит на эффективное сечение захвата медленных нейтронов ядрами (^{1, 2}) и др.) выражается не только в понижении, но и в повышении эффективного сечения захвата медленных нейтронов у некоторых ядер. Табл. 1* показывает, что такое повышение, встречающееся гораздо чаще у ядер с нечетным Z , чем с четным, наблюдается преимущественно у трех групп элементов, а именно у тех, в ядрах которых заполняются 1) протонная суборбита $4f^{7/2}$, 2) протонная суборбита $5g^{9/2}$ (после 42-го протона), 3) протонная и нейтронная суборбита $4d^{5/2}$ (после 60-го протона или нейтрона)**.

У ядер элементов с нечетным Z при заполнении протонной суборбиты $4f^{7/2}$ величина σ заметно выше, чем при заполнении соседних суборбит. Более низкое значение σ наблюдается только у ванадия, что, вероятно, вызывается высокой устойчивостью ядра V^{51} в связи с наличием в нем 28 нейтронов, т. е. с замыканием нейтронной суборбиты $4f^{7/2}$. Точное совпадение границ повышения σ с границами протонной суборбиты $4f^{7/2}$ позволяет предполагать, что повышение связано в данном случае с заполнением этой суборбиты.

У элементов с нечетным Z , в ядрах которых заполняется протонная суборбита $5g^{9/2}$, также наблюдаются сравнительно высокие значения σ , причем лишь после того, как оболочки заполнены 42 протонами. Можно думать, что те особенности энергетического состояния этих ядер, которые находят свое выражение в высоких значениях σ , обусловлены, главным образом, замыканием в предшествующих ядрах конфигурации из 42 протонов. В этом отношении характерно то, что ядра Tc^{99} , содержащие 43 протона, не встречаются в природе как стабильные, а у ядер последующих элементов с нечетным Z спин снижается до минимума, что способствует сохранению их устойчивости. Так же резко снижается спин и у ядра Se^{77} , содержащего 43 нейтрона, причем этому предшествует аномально высокая распространенность ядра As^{75} , содержащего 42 нейтрона.

Чрезвычайно высокие значения σ встречаются у ядер, в которых заполняется орбита $4d$, притом лишь после того, как число нуклеонов в конфигурации превышает 60. В протонной конфигурации огромные значения σ встречаются у ядер не только с нечетным, но и с четным Z , главным образом, у тех, в которых заполняется суборбита $4d^{5/2}$. Аналогичное явление, хотя и менее часто, наблюдается и при запол-

* Таблица составлена по последним сводным данным (³) и др.).

** Повышение σ наблюдается также при заполнении протонной суборбиты $2p^{3/2}$, но здесь оно объясняется специфической причиной — наличием у лития и бора дважды-нечетных изотопов, у которых, как и у всех подобных ядер, эффективные сечения очень велики.

нении нейтронной суборбиты $4d^{5/2}$, чем объясняется очень высокое значение σ у кадмия (вероятно, главным образом, у ядра ${}_{48}\text{Cd}_{63}$). Помимо повышения величины σ , в рассматриваемой группе ядер встречается и ряд других характерных явлений: отсутствие стабильных ядер, которые содержали бы 61 протон или нейтрон, резкое снижение спина у ядер с нечетным числом нейтронов свыше 60, отсутствие стабильного изотопа ${}_{62}\text{Sm}^{146}$, явления α -распада у Sm^{147} и у некоторых искусственно-радиоактивных изотопов последующих элементов ⁽⁸⁾. Так как эти явления наблюдаются после 60-го нуклеона как в протонной, так и в нейтронной конфигурации, то есть основание предполагать, что они в значительной мере объясняются замыканием конфигурации из 60 нуклеонов*.

Таблица 1

Суб-орбиты	Нечетные Z			Четные Z			Суб-орбиты	Нечетные Z			Четные Z			
	Сим-вол	Z	$\sigma \cdot 10^{14} \text{ см}^2$	Сим-вол	Z	$\sigma \cdot 10^{14} \text{ см}^2$		Сим-вол	Z	$\sigma \cdot 10^{14} \text{ см}^2$	Сим-вол	Z	$\sigma \cdot 10^{14} \text{ см}^2$	
$1s^{1/2}$	H	1		He	2		$5g^{9/2}$	Nb	41	1,06	Mo	42	2,40	
$2p^{3/2}$	Li	3	67	Be	4				Rh	45	150	Ru	44	2,46
	B	5	730	C	6				Pd	46	6,6	Pd	46	6,6
$2p^{1/2}$	N	7	1,86	O	8			Ag	47	60	Cd	48	3500	
$3d^{5/2}$	F	9		Ne	10		$5g^{7/2}$	In	49	191	Sn	50	0,58	
	Na	11	0,47	Mg	12	0,06			Sb	51	5,3	Te	52	4,5
$3d^{3/2}$	Al	13	0,22	Si	14	0,10		J	53	6,1	Xe	54		
	P	15	0,15	S	16			Cs	55	29,0	Ba	56	1,05	
	Cl	17	32,7	A	18			La	57	8,8	Ce	58	0,80	
$2s^{1/2}$	K	19	2,05	Ca	20	0,41	$4d^{5/2}$	Pr	59	11,2	Nd	60	44	
$4f^{7/2}$	Sc	21	11,8	Ti	22	5,8			61		Sm	62	10600	
	V	23	4,7	Cr	24	2,83		63	4200	Gd	64	35000		
$4f^{5/2}$	Mn	25	12,8	Fe	26	2,39	$4d^{3/2}$	Tb	65	44	Dy	66	890	
	Co	27	34,2	Ni	28	4,5			Ho	67	64	Er	68	166
$3p^{3/2}$	Cu	29	3,57	Zn	30	1,00	$6h^{11/2}$	Tu	69	118	Yb	70	36	
	Ga	31	2,77	Ge	32	2,2			Lu	71	108	Hf	72	102
	As	33	4,14	Se	34	12,1			Ta	73	21,3	W	74	17,7
$3p^{1/2}$	Br	35	6,4	Kr	36			Re	75	84	Os	76	14,7	
	Rb	37	0,70	Sr	38	1,16		Ir	77	440	Pt	78	8,1	
	Y	39	1,38	Zr	40	0,18		Au	79	95	Hg	80	341	
							$6h^{9/2}$	Tl	81	3,27	Pb	82	0,19	

То, что значения σ гораздо выше при заполнении суборбиты $4d^{5/2}$, чем $5g^{9/2}$, возможно, объясняется отчасти чрезвычайно резким повышением энергетического уровня орбиты $4d$ по сравнению с предыдущей орбитой $5g$. Далее, так как ядра с числом протонов свыше 42 и 60 содержат вместе с тем несколько более 50 и 82 нейтронов, то описанные выше явления выражены у них гораздо более резко, чем у ядер, содержащих свыше 42 и 60 нейтронов. Таким образом, на энергетическое состояние ядер с числом протонов свыше 42 и 60, повидимому, оказывает влияние также и характер заполняющихся в них орбит. У ядер же, в которых заполняется суборбита $4f^{7/2}$, нет оснований связывать повышение величины σ с чем-либо иным, кроме характера заполняющейся орбиты.

* На понижение стабильности ядер после того, как число нуклеонов достигает 42, 60 и др., мы указывали и ранее ⁽⁴⁾, не проводя еще, однако, разграничения между орбитами и иными структурными свойствами ядра.

О существовании орбит свидетельствуют также и некоторые явления из области формирования спинов дважды-нечетных ядер. Данные об этих спинах приведены в табл. 2*.

Таблица 2

Нордгейм (6) считает, что структура конфигураций протонов и нейтронов в дважды - нечетных ядрах точно такая же, как и в ядрах с нечетным A , содержащих соответствующее нечетное число протонов или нейтронов, и что спин дважды-нечетного ядра либо равен разности спинов его протонной и нейтронной групп, либо больше этой разности. Из табл. 2 видно, что в большинстве случаев спин дважды - нечетного ядра равен либо сумме, либо разности фактических спинов тех ядер с нечетным A , которые содержат соответствующее нечетное число протонов или нейтронов. Очевидно,

Символ	Число частиц в дважды нечетном ядре			Фактич. значения спинов ядер с нечетным A , содержащих такое же число		Сумма или разность этих спинов	Теоретич. значения спинов ядер с нечетным A , содержащих такое же число		Сумма или разность этих спинов	Фактический спин, дважды-нечетного ядра
	A	P	N	P	N		P	N		
H	2	1	1	$1/2$	$1/2$	1	$1/2$	$1/2$	1	1
B	10	5	5	$3/2$	$3/2$	3	$3/2$	$3/2$	3	3
N	14	7	7	$1/2$	$1/2$	1	$1/2$	$1/2$	1	1
V	50	23	27	$7/2$	$(7/2)$	(7)	$7/2$	$7/2$	7	7
Na	22	11	11	$3/2$	$3/2$	3	$5/2$	$5/2$	5	3
Na	24	11	13	$3/2$	$5/2$	4	$5/2$	$5/2$	5	4
Co	60	27	33	$7/2$	$(8/2)$	(5)	$7/2$	$5/2$	6	5
Ag	110	47	63	$1/2$	$1/2$	1	$9/2$	$5/2$	7	1
Li	6	3	3	$3/2$	$(3/2)$	(3)	$3/2$	$3/2$	3	1
Cl	36	17	19	$3/2$	$3/2$	3	$3/2$	$1/2$	2	2
K	40	19	21	$3/2$	$(7/2)$	(5)	$1/2$	$7/2$	4	4
Lu	176	71	105	$7/2$	$(3/2)$	(5)	$11/2$	$5/2$	8	≥ 7
Pr	142	59	83	$5/2$	$(9/2)$	(2)	$5/2$	$9/2$	2	2
Co	58	27	31	$7/2$	$(3/2)$	(2)	$7/2$	$5/2$	1	2
Rb	86	37	49	$5/2$	$9/2$	2	$3/2$	$9/2$	3	2
Re	186	75	111	$5/2$	$(1/2)$	(2)	$11/2$	$13/2$	1	1

что в таких случаях он равен также и сумме или разности «групповых» спинов протонной и нейтронной группы данного дважды-нечетного ядра.

У ядер Cl^{36} , K^{40} , Lu^{176} и Re^{186} спин равен сумме или разности не фактических, а теоретических значений «групповых» спинов, и можно думать, что «групповые» спины соответствуют при этом теоретической схеме оболочек. У ядра Li^6 , которое, вероятно, состоит из α -частицы и дейтрона (7), «групповые» спины равны $1/2$, и ядерный спин также равен их сумме.

Все эти явления позволяют сформулировать следующее правило: спин дважды-нечетного ядра всегда в точности равен либо сумме, либо разности «групповых» спинов, свойственных входящим в это ядро нуклеонным конфигурациям, т. е. векторы «групповых» спинов либо параллельны, либо антипараллельны. При этом нечетной совокупности протонов или нейтронов, входящей в состав дважды-нечетного ядра, может быть свойствен иной спин, чем в том случае, когда она находится в составе ядра с нечетным A .

Значение «групповых» спинов дважды-нечетных ядер дают иногда возможность судить о таких спинах ядер с нечетным A , величина которых экспериментально еще не установлена. Так, на основании данных о спинах Co^{58} и Co^{60} можно ожидать, что спины ядер ${}_{26}Fe_{31}$

* Таблица составлена по последним сводным данным (5) с важнейшими дополнениями, опубликованными до середины 1952 г. В скобках показаны значения, не окончательно установленные или предполагаемые.

и ${}_{28}\text{Ni}_{33}$ окажутся равными $3/2$. Наряду с этим «групповые» спины позволяют также судить о действительной величине орбитального момента непарного нуклеона у ряда тяжелых ядер.

Изотопический спин нуклеонов	—	P	P	N	N	N
Число нуклеонов в конфигурации	—	71	75	83	105	111
Суборбита	—	$6h^{11/2}$	$6h^{11/2}$	$6h^9/2$	$5f^5/2$	$7i^{13/2}$
«Групповой» спин	—	$11/2$	$11/2$	$9/2$	$5/2$	$13/2$

Эти данные подтверждают соответствие между теоретической схемой оболочек и фактическим ходом заполнения орбит также и в тяжелых ядрах. Вместе с тем они дают некоторые основания для сравнительной оценки схемы оболочек Эльзассера и так называемой основной схемы Мейер. По схеме Мейер, в которой орбита $4p$ предшествует орбите $7i$, при наличии 111 нейтронов должна заполняться суборбита $4p^{1/2}$, тогда как в действительности заполняется, повидимому, суборбита $7i^{13/2}$, в соответствии со схемой Эльзассера. Предлагаемая Мейер перестановка орбиты $3s^{1/2}$ не является необходимой для объяснения спина ядра ${}_{69}\text{Tl}$, равного $1/2$ (⁸). Эти, а также некоторые другие факты свидетельствуют о том, что схема Мейер является спорной.

Одним из доказательств существования нуклеонных орбит служит то, что при отклонении спинов ядер с нечетным A от теоретической схемы спины изомеров часто соответствуют этой схеме. Тем более показательными являются случаи, когда при таких отклонениях спины, соответствующие теоретической схеме, наблюдаются в виде «групповых» спинов дважды-нечетных ядер в их основном состоянии.

Существование орбитальных квантовых чисел может рассматриваться как свидетельство того, что нуклеонные орбиты столь же реальны, как и электронные*. Особенности, присущие нуклеонным орбитам по сравнению с электронными (в том числе совершенно иной порядок их чередования), не должны затуманивать огромное принципиальное значение того факта, что в основе строения как атомных, так и внутриядерных орбит лежит один и тот же принцип, вследствие чего число частиц как в электронных, так и в нуклеонных орбитах выражается одной и той же формулой $2(2l + 1)$. Подтверждение гипотезы о существовании в ядре оболочек и орбит представляет особый интерес для советской науки, так как оно означает дальнейшее развитие и распространение на область ядерной физики тех идей, которые составляют теоретическую основу созданной Д. И. Менделеевым периодической системы элементов. Единство основного принципа строения нуклеонных и электронных орбит является новым свидетельством величия научного наследия Менделеева.

Поступило
25 IV 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ S. Harris, C. Muhlhouse, C. Thomas, Phys. Rev., 79, 11 (1950).
² H. Hurwitz, H. Bethe, *ibid.*, 81, 898 (1951). ³ H. Pomerance, *ibid.*, 82, 641 (1951). ⁴ И. А. Вайсман, ДАН, 71, 859 (1950). ⁵ J. Mack, Rev. Mod. Phys., 22, 64 (1950). ⁶ L. Nordheim, Phys. Rev., 78, 294 (1950); Rev. Mod. Phys., 23, 322 (1951). ⁷ Г. Бете, Лекции по теории ядра, 1949. ⁸ И. А. Вайсман, ДАН, 88, № 2, 237 (1953).

* Признание реальности нуклеонных орбит не означает отрицания возможности гелионной структуры некоторых легких ядер (Li^6 , C^{12} , O^{16}). Гелионы возникают благодаря тому, что при этом значительно повышается энергия связи между нуклеонами, что возможно лишь при условии, если иначе энергия связи недостаточно высока (наиболее легкие и наиболее тяжелые ядра, некоторые лантаниды). Наряду с этим к числу необходимых условий сохранения гелионов внутри ядра относятся сравнительно небольшая величина Z и отсутствие избытка нейтронов над протонами.