

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**МАССЫ АТОМНЫХ ЯДЕР
И ВОПРОС О ЯДЕРНЫХ ОБОЛОЧКАХ**

В последние годы для объяснения ряда свойств атомных ядер получила широкое распространение модель так называемых ядерных оболочек, согласно которой при наличии в ядрах 2, 8, 20 (28), 50, 82 и 126 протонов или нейтронов имеет место заполнение протонных или нейтронных оболочек.

Первые указания на особую устойчивость и распространённость ядер, в составе которых имеется по 20, 50 и 82 протона или нейтрона, были даны ещё в 1933 г. в работе советского учёного И. П. Селинова¹. В 1948 г. было предложено и теоретическое объяснение последовательности заполнения ядерных оболочек, основанное на предположении о влиянии спин-орбитального взаимодействия при заполнении уровней нуклонов в ядрах².

Вопросу о ядерных оболочках было посвящено большое число работ ряда советских физиков.

Роль ядерных оболочек весьма ярко проявляется при сопоставлении точных значений масс разных ядер в связи с тем, что энергия связи нуклона, присоединение которого знаменует заполнение оболочки, заметно выше, чем средняя энергия связи. Напротив, энергия связи нуклона, присоединяемого к ядру с заполненной соответствующей оболочкой, ниже средней энергии связи. Для сопоставления энергии связи нуклонов в разных ядрах в 1950—1952 гг. было выполнено много работ по масс-спектрографическому определению точных значений масс ряда ядер от кремния до урана. В таблице приводятся соответствующие данные, полученные группами Дакворта^{3—10}, Нира^{11,12} и Гаудсмита^{13,14}. При этом массы ядер, приводимые в таблице на основании^{11,12}, пересчитаны из упаковочных коэффициентов, а данные других работ приводятся без каких-либо пересчётов.

Материалы, приведённые в таблице, представляют самостоятельный интерес для расчётов тепловых эффектов различных ядерных реакций или порогов таких реакций. В этом смысле таблица является дополнением к справочным таблицам масс лёгких ядер (обычно — до железа), приводимых в ряде курсов ядерной физики.

Однако, помимо этого, сопоставление масс разных ядер может быть использовано для исследования вопроса о ядерных оболочках. Именно такое сопоставление и было выполнено в¹⁵.

На рисунке (стр. 480), заимствованном из¹⁵, приводится зависимость средней энергии связи (на один нуклон) от массового числа ядер для 115 стабильных ядер элементов с $Z > 21$. Помимо масс-спектроскопических данных работ^{3—10}, использованы данные о тепловых эффектах ряда ядерных превращений и о поглощении микроволн.

Массы атомных ядер

Z	Элемент	A	Масса и погрешность	Источник
1	2	3	4	5
14	Si	28	27,99581 $\pm$ 0,00008	6
14	Si	29	28,98567 $\pm$ 0,00014	6
14	Si	30	29,98290 $\pm$ 0,00015	5
16	S	32	31,983 $\pm$ 0,001	13
17	Cl	35	34,9805 $\pm$ 0,0005	13
19	K	41	40,975 $\pm$ 0,002	13
22	Ti	46	45,96697 $\pm$ 0,00005	11
22	Ti	47	46,96668 $\pm$ 0,00009	11
22	Ti	48	47,96314 $\pm$ 0,00005	11
22	Ti	48	47,96405 $\pm$ 0,00019	7
22	Ti	49	48,96359 $\pm$ 0,00005	11
22	Ti	50	49,96075 $\pm$ 0,00005	11
23	V	51	50,96053 $\pm$ 0,00005	11
24	Cr	50	49,96020 $\pm$ 0,00025	4
24	Cr	50	49,96210 $\pm$ 0,00005	11
24	Cr	52	51,95710 $\pm$ 0,00026	4
24	Cr	52	51,95705 $\pm$ 0,00010	11
24	Cr	53	52,95771 $\pm$ 0,00010	11
24	Cr	54	53,95631 $\pm$ 0,00022	11
25	Mn	55	54,95545 $\pm$ 0,00027	6
26	Fe	54	53,95664 $\pm$ 0,00027	3
26	Fe	56	55,95285 $\pm$ 0,00016	6
27	Co	59	58,95029 $\pm$	5
28	Ni	58	57,95354 $\pm$ 0,00029	6
28	Ni	60	59,94840 $\pm$ 0,00030	5
28	Ni	64	63,94733 $\pm$ 0,00019	8
29	Cu	63	62,94862 $\pm$ 0,00020	8
29	Cu	65	64,94749 $\pm$ 0,00021	8
29	Cu	65	64,94884 $\pm$ 0,00032	4
30	Zn	64	63,94852 $\pm$ 0,00019	8
32	Ge	70	69,9447 $\pm$ 0,0006	8
32	Ge	72	71,9430 $\pm$ 0,0006	8
32	Ge	74	73,9426 $\pm$ 0,0009	8
32	Ge	76	75,9433 $\pm$ 0,0009	8
33	As	75	74,9432 $\pm$ 0,0010	8
34	Se	74	73,9439 $\pm$ 0,0009	8
35	Br	79	78,944 $\pm$ 0,001	13
35	Br	81	80,943 $\pm$ 0,001	13
36	Kr	82	81,93843 $\pm$ 0,00029	10
36	Kr	84	83,93850 $\pm$ 0,00029	10
36	Kr	84	83,938 $\pm$ 0,001	13
36	Kr	86	85,93658 $\pm$ 0,00024	10
37	Rb	85	84,931 $\pm$ 0,0015	13
37	Rb	87	86,9295 $\pm$ 0,0020	13
38	Sr	86	85,93533 $\pm$ 0,00043	7
38	Sr	88	87,93374 $\pm$ 0,00053	7
40	Zr	90	89,93178 $\pm$ 0,00063	5
42	Mo	94	93,9343 $\pm$ 0,0008	8

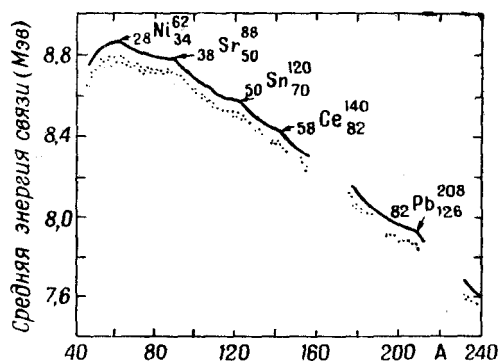
Продолжение

Z	Элемент	A	Масса и погрешность	Источник
1	2	3	4	5
42	Mo	96	95,93597 $\pm$ 0,00039	5
42	Mo	98	97,93610 $\pm$ 0,00040	7
42	Mo	100	99,93860 $\pm$ 0,00040	5
46	Pd	104	103,93635 $\pm$ 0,00052	4
46	Pd	108	107,93682 $\pm$ 0,00043	4
46	Pd	110	109,94060 $\pm$ 0,00077	6
48	Cd	110	109,93873 $\pm$ 0,00066	6
48	Cd	112	111,93997 $\pm$ 0,00045	6
48	Cd	116	115,94200 $\pm$ 0,00070	6
50	Sn	115	114,94020 $\pm$ 0,00035	12
50	Sn	116	115,93910 $\pm$	12
50	Sn	116	115,93794 $\pm$ 0,00058	6
50	Sn	117	116,94045 $\pm$ 0,00023	12
50	Sn	117	116,94208 $\pm$ 0,00017	7
50	Sn	118	117,93982 $\pm$ 0,00035	12
50	Sn	119	118,94121 $\pm$ 0,00024	12
50	Sn	120	119,94060 $\pm$ 0,00036	12
50	Sn	120	119,94012 $\pm$ 0,00072	7
50	Sn	122	121,94254 $\pm$ 0,00037	12
50	Sn	124	123,94482 $\pm$ 0,00025	12
52	Te	126	125,9427 $\pm$ 0,0010	8
52	Te	128	127,9471 $\pm$ 0,0010	8
52	Te	130	129,9467 $\pm$ 0,0009	8
53	I	127	126,94539 $\pm$	12
53	I	127	126,9415 $\pm$ 0,0025	13
54	Xe	124	123,94594 $\pm$ 0,00025	12
54	Xe	126	125,94481 $\pm$ 0,00025	12
54	Xe	128	127,94445 $\pm$ 0,00013	12
54	Xe	129	128,94608 $\pm$ 0,00026	12
54	Xe	129	128,94536 $\pm$ 0,00026	10
54	Xe	129	128,9455 $\pm$ 0,0015	13
54	Xe	130	129,94475 $\pm$	12
54	Xe	130	129,945 $\pm$ 0,002	13
54	Xe	131	130,94681 $\pm$ 0,00065	12
54	Xe	131	130,944 $\pm$ 0,002	13
54	Xe	132	131,94614 $\pm$ 0,00013	12
54	Xe	132	131,94727 $\pm$ 0,00060	10
54	Xe	132	131,945 $\pm$ 0,002	13
54	Xe	134	133,94801 $\pm$ 0,00027	12
54	Xe	134	133,947 $\pm$ 0,002	13
54	Xe	136	135,95050 $\pm$ 0,00014	12
56	Ba	136	135,9488 $\pm$ 0,0010	8
56	Ba	137	136,9502 $\pm$ 0,0010	8
56	Ba	138	137,9498 $\pm$ 0,0009	8
58	Ce	140	139,9489 $\pm$ 0,0009	8
58	Ce	142	141,9537 $\pm$ 0,0009	8
59	Pr	141	140,9514 $\pm$ 0,0008	8
60	Nd	144	143,9560 $\pm$ 0,0008	8

Продолжение

Z	Элемент	A	Масса и погрешность	Источник
1	2	3	4	5
60	Nd	150	149,9687 $\pm 0,0008$	8
72	Hf	176	175,9923 $\pm 0,0011$	8
72	Hf	178	177,9936 $\pm 0,0013$	8
72	Hf	180	180,0029 $\pm 0,0007$	8
73	Ta	181	181,0031 $\pm 0,0013$	8
74	W	182	182,0033 $\pm 0,0011$	8
74	W	183	183,0059 $\pm 0,0013$	8
74	W	184	184,0052 $\pm 0,0011$	8
78	Pt	194	194,0256 $\pm 0,0014$	7
78	Pt	195	195,02652 $\pm 0,00078$	4
78	Pt	196	196,02744 $\pm 0,00060$	7
82	Pb	208	208,0422 $\pm 0,0015$	7
82	Pb	208	208,0416 $\pm 0,0010$	9
82	Pb	208	208,0416 $\pm 0,0015$	14
83	Bi	209	209,0466 $\pm 0,0015$	14
90	Th	232	232,1093 $\pm 0,0010$	9
92	U	234	234,1129 $\pm 0,0010$	9
92	U	235	235,1156 $\pm 0,0010$	9
92	U	238	238,1241 $\pm 0,0010$	9

Из рисунка очевидно наличие ряда изломов плавной зависимости средней энергии связи от массовых чисел, связанных с заполнением ядерных оболочек. В области самых тяжёлых ядер излом в сторону повышения



средней энергии связи соответствует ядру $^{208}_{82}\text{Pb}$. Это ядро характеризуется заполнением как протонных (82 протона), так и нейтронных (126 нейтронов) оболочек.

Заполнению нейтронных оболочек (82 нейтрона) отвечает излом кривой в точке, соответствующей ядру $^{140}_{58}\text{Ce}$. Оболочки, содержащие по 50

протонов или нейтронов, заполняются в ядрах ${}_{50}\text{Sn}^{120}$ и ${}_{38}\text{Sr}^{88}$, что также отвечает изломам кривой энергии связи нуклеонов. Наконец, пик кривой для ядра ${}_{28}\text{Ni}^{62}$ соответствует заполнению оболочки при 20 протонах. Таким образом, систематическое исследование масс ряда ядер в широком интервале массовых чисел подтвердило основные положения представлений о ядерных оболочках. Представляет интерес исследование масс ядер в интервалах массовых чисел, пока ещё мало изученных, а также более подробное рассмотрение суммы уже полученных данных с целью уточнения последовательности заполнения уровней нуклеонов в ядрах.

Г. И.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Селинов, ЖЭТФ, **4**, 666 (1934) (доложено 16 апреля 1933 г.).
2. M. G. Mayer, Phys. Rev., **74**, 235 (1948).
3. H. Duckworth а. H. Johnson, Phys. Rev., **78**, 179 (1950).
4. H. Duckworth и др., Phys. Rev., **78**, 479 (1950).
5. H. Duckworth и др., Phys. Rev., **79**, 188 (1950).
6. H. Duckworth а. R. Preston, Phys. Rev., **79**, 402 (1950).
7. H. Duckworth а. R. Preston, Phys. Rev., **82**, 468 (1951).
8. H. Duckworth и др., Phys. Rev., **83**, 1114 (1951).
9. G. Stanford, H. Duckworth и др., Phys. Rev., **85**, 1039 (1952).
10. C. Kegley а. H. Duckworth, Nature, **167**, 1025 (1951).
11. A. Nier и др., Phys. Rev., **85**, 726, L 12 (1952).
12. R. Halsted, Phys. Rev., **85**, 726, L 13 (1952).
13. S. Goudsmit и др., Phys. Rev., **84**, 824 (1951).
14. S. Goudsmit и др., Phys. Rev., **85**, 630 (1952).
15. H. Duckworth, Nature, **170**, 158 (1952).