

И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов

ФОРМУЛА ДЛЯ ЭНЕРГИИ ПЕРВОГО ВОЗБУЖДЕННОГО ЯДЕРНОГО СОСТОЯНИЯ С ИЗОСПИНОМ $T_>$

На основе современных международных банков данных по ядерной спектроскопии создан полный массив всей экспериментальной информации об энергиях первых состояний с изоспином $T_> = |N - Z|/2 + 1$ для ядер с $1 \leq A \leq 61$. На основании систематического анализа этой информации предложено новое выражение для расчета энергий нижних ядерных уровней с изоспином $T_>$. Традиционная формула обобщена на область $N \leq Z$. В качестве постоянного члена формулы использована величина разности масс нейтрона и протона. Усредненное расхождение между экспериментальными (ENSDF) данными и значениями, рассчитанными по предлагаемой формуле, составляет 0.107 МэВ для почти всех (116 из 118) рассмотренных ядер.

Формула для нахождения энергии первого возбужденного состояния E ядра (N, Z) с изоспином, величина которого на 1 больше, чем абсолютная величина изоспина $|N - Z|/2$ в основном состоянии, играет важную роль в расчетах распадных характеристик атомных ядер. В качестве такой формулы обычно используется следующее соотношение [1]

$$E(N, Z) = E_{\text{св}}(N, Z) - E_{\text{св}}(N + 1, Z - 1) + 1.444 (Z - 1/2)/A^{1/3} - 1.13 \text{ (МэВ)}, \quad (1)$$

где $E_{\text{св}}$ - энергии связи ядер, Z , N , A - соответственно число протонов (заряд), число нейтронов и массовое число ядра.

До сих пор, однако, не было проведено сколько-нибудь систематической и массовой проверки этой формулы. Это отчасти объясняется разрозненностью экспериментальных данных, трудностями сбора и систематизации большого количества специфической информации из разных источников. Положение существенно улучшилось в последнее время с развитием крупномасштабных компьютерных банков ядерных данных. Многие из них являются результатом многолетнего непрерывающегося труда международных коллективов ученых. На Web-сервере (<http://depni.npi.msu.ru/cdfe>) Центра данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) НИИЯФ МГУ приведены адреса доступа к некоторым таким банкам данных, поддерживаемых в рамках международной сети Центров ядерных данных.

Одним из таких банков ядерных данных является самый крупный на сегодняшний момент банк данных по структуре атомного ядра и ядерным распадам ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) [2]. Среди данных о состояниях ядер, содержащихся в этом файле, представлена (хотя, к сожалению, в недостаточно хорошо формализованном виде) и экспериментальная информация об изоспинах. Для ее извлечения и обработки в ЦДФЭ НИИЯФ МГУ были разработаны специальные программы, которые позволили произвести необходимые операции в диапазоне ядер с массовыми числами $1 \leq A \leq 61$. Расчеты по формуле (1) были проведены также с автоматическим подключением еще одного компьютерного банка данных - широко известного банка данных по точным массам и энергиям [3], который позволяет быстро и эффективно получать значения энергий связи атомных ядер. Всего в указанном диапазоне оказалось 118

ядер от ${}^6\text{Li}$ до ${}^{61}\text{Zn}$, для которых имеются сведения о состояниях с изоспином $|N - Z|/2 + 1$.

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов по формуле (1) показало, что эта формула неверна приблизительно для половины рассмотренных ядер: она не описывает современные экспериментальные данные даже на качественном уровне. Более того, в ряде случаев формула (1) дает нефизические результаты – очень большие по величине отрицательные значения энергий возбуждения ядер. В Таблице 1 приведено несколько примеров таких случаев (формулы (2) и (3) см. далее).

При детальном рассмотрении оказалось, что формула (1) описывает обсуждаемые состояния только в ядрах с $N > Z$ и, следовательно, нуждается в обобщении на все остальные ядра.

Соображения симметрии приводят к следующему общему виду обсуждаемой формулы:

$$E(N,Z) = E_{\text{св}}(N,Z) - E_{\text{св}}(N + 1, Z - 1) + 1.444 (Z - 1/2)/A^{1/3} - 1.13 \text{ (МэВ)} \text{ для } N > Z, \quad (2)$$

$$E(N,Z) = E_{\text{св}}(N,Z) - E_{\text{св}}(N - 1, Z + 1) - 1.444 (Z + 1/2)/A^{1/3} + 1.13 \text{ (МэВ)} \text{ для } N \leq Z.$$

Некоторые случаи сравнения экспериментальных
и рассчитанных по формулам (1)-(3) энергий (в кэВ) состояний

с изоспином $|N - Z|/2 + 1$

Ядро	Эксперимент	Формула (1)	Формула (2)	Формула (3)
^{13}N	15064.6	-141.02	15071.73	15107.15
^{15}O	12255	-274.95	10857.22	10882.24
^{17}F	11192.9	100.44	11110.74	11125.95
^{19}Ne	7616	-9.91	7407.86	7413.46
^{21}Na	8973	35.81	8744.02	8985.54
^{24}Al	5957	-9533.10	5963.95	5939.75
^{25}Al	7901	-16.32	7986.54	7964.87
^{26}Si	13080	-397.81	12962.37	12929.59
^{28}P	5900	-9348.88	5775.70	5734.52
^{57}Cu	5350	10.97	5462.68	5319.07

С помощью формул (2) были проведены расчеты энергий состояний с изоспином $|N - Z|/2 + 1$ для всех 118 ядер от ^6Li до ^{61}Zn . Было установлено, что первые (низшие) состояния с изоспином $T_>$ описываются вполне удовлетворительно. Средний модуль отклонения расчетных значений от экспериментальных составил 111 кэВ для 116 из 118 рассмотренных ядер. Исключением являются ядра ^{15}O и ^{26}Mg : для этих двух ядер, речь о которых пойдет дальше, отклонения составили заметно большие величины.

Численные параметры, входящие в формулы (2) и описывающие Кулоновское смещение [3], были также подвергнуты некоторому пересмотру. Было решено значение (1.13 МэВ) второго параметра каждой из формул заменить на другое (1.293 МэВ), численно равное разности масс нейтрона и протона, и при помощи вариации первого численного параметра (1.444) попытаться достичь той же точности формул. При таком подходе четвертое (последнее) слагаемое формул отвечало бы за нарушение изоспиновой симметрии, возникающее из-за разницы масс нейтрона и протона, а третье было бы обусловлено разницей зарядов, и физический смысл всех частей формул становился бы совершенно прозрачен. Действительно, такую программу удалось реализовать. Модифицированные формулы выглядят следующим образом:

$$E(N,Z) = E_{\text{св}}(N,Z) - E_{\text{св}}(N + 1,Z - 1) + 1.484 (Z - 1/2)/A^{1/3} - 1.293 \text{ (МэВ)} \quad \text{для } N > Z, \quad (3)$$

$$E(N,Z) = E_{\text{св}}(N,Z) - E_{\text{св}}(N - 1,Z + 1) - 1.484 (Z + 1/2)/A^{1/3} + 1.293 \text{ (МэВ)} \quad \text{для } N \leq Z.$$

Средний модуль отклонения даваемых ими значений от экспериментальных на том же массиве из 116 ядер составил 107 кэВ.

В Таблице 2 представлены данные для всех упомянутых выше 118 ядер от ${}^6\text{Li}$ до ${}^{61}\text{Zn}$, для которых имеются сведения о состояниях с изоспином $T_> = |N - Z|/2 + 1$. В ней приведены и экспериментальные данные из банка данных ENSDF и значения, рассчитанные по формулам (3).

Сравнение экспериментальных и рассчитанных по формулам (3)

энергий (кэВ) первых состояний с изоспином $T_> = |N - Z|/2 + 1$

Ядро	Эксперимент	Формула (3)
${}^6\text{Li}$	3563	3505
${}^7\text{Li}$	11240	11067
${}^7\text{Be}$	11010	10683
${}^8\text{Li}$	10822	10431
${}^8\text{Be}$	16626	16716
${}^8\text{B}$	10619	10167
${}^9\text{Be}$	14392	14028
${}^9\text{B}$	14655	14649
${}^{10}\text{Be}$	21220	20779
${}^{10}\text{B}$	1740	1935
${}^{11}\text{B}$	12557	12433
${}^{11}\text{C}$	12160	12048
${}^{12}\text{B}$	12750	12549
${}^{12}\text{C}$	15110	15200
${}^{13}\text{C}$	15108	14833
${}^{13}\text{N}$	15065	15107
${}^{14}\text{C}$	22100	21955
${}^{14}\text{N}$	2313	2600
${}^{15}\text{N}$	11615	11608
${}^{15}\text{O}$	12255	10882
${}^{16}\text{N}$	9928	9763

^{16}O	12796	12487
^{17}O	11079	10933
^{17}F	11192.9	11126
^{18}O	16399	16071
^{18}F	1042	1130
^{19}F	7540	7473
^{19}Ne	7616	7413
^{20}F	6519	6386
^{20}Ne	10274	10222
^{20}Na	6570	6514
^{21}Ne	8859	8719
^{21}Na	8973	8986
^{22}Ne	14070	13774
^{22}Na	657	770
^{23}Na	7891	7780
^{23}Mg	7795	7792
^{24}Na	5966	5797
^{24}Mg	9516	9523
^{24}Al	5957	5940
^{25}Mg	7787	7596
^{25}Al	7901	7965
^{26}Mg	18050	12998
^{26}Al	228.305	378.53
^{26}Si	13080	12930
^{27}Al	6814	6718

²⁷ Si	6626	6534
²⁸ Al	5992	5865
²⁸ Si	9316	9321
²⁸ P	5900	5735
²⁹ Si	8290	8125
²⁹ P	8379	8382
³⁰ P	678	811
³¹ P	6381	6267
³¹ S	6268	6261
³² P	5072	4927
³² S	7003	7048
³² Cl	5024	5047
³³ S	5480	5344
³³ Cl	5544	5601
³⁴ Cl	0	121
³⁵ S	9155	8945
³⁵ Cl	5654	5577
³⁵ Ar	5573	5563
³⁶ Cl	4300	4198
³⁶ Ar	6611	6566
³⁶ K	4266	4297
³⁷ Cl	10222	10138
³⁷ Ar	4993	4905
³⁷ K	5049	5030
³⁸ Cl	8216	8145

^{38}Ar	10631	10566
^{38}K	130	211
^{39}Ar	9078	9024
^{39}K	6546	6585
^{40}K	4384	4447
^{40}Ca	7658	7500
^{41}K	8349	8378
^{41}Ca	5819	5895
^{41}Sc	5939	5751
^{42}K	6450	6422
^{42}Ca	9750	9775
^{42}Sc	0	-103
^{43}Ca	7990	8000
^{43}Sc	4235	4387
^{44}Ca	11850	11780
^{44}Sc	2783	2889
^{44}Ti	6598	6320
^{45}Ti	4723	4832
^{46}Ti	9168	9196
^{47}Ca	12745	12586
^{47}Sc	8400	8346
^{47}Ti	7349	7366
^{47}V	4150	4249
^{48}Sc	6678	6574
^{48}Ti	10726	10698

^{48}V	3018	3100
^{48}Cr	5793	5889
^{49}Ti	8724	8650
^{49}V	6446	6447
^{49}Cr	4764	4824
^{49}Mn	4820	4762
^{50}V	4809	4780
^{50}Cr	8425	8428
^{50}Mn	0	-47
^{51}Cr	6630	6576
^{52}V	8838	8844
^{52}Cr	11264	11244
^{52}Mn	2926	2954
^{52}Fe	5652	5953
^{55}Co	4721	4814
^{56}Co	3587	3638
^{56}Ni	6436	6320
^{57}Co	7274	7307
^{57}Ni	5135	5265
^{57}Cu	5350	5319
^{61}Cu	6460	6432
^{61}Zn	3380	3409

Весьма интересно отметить, что для очень широкого (0 – 22000 кэВ) диапазона значений энергий обсуждаемых первых (нижних) изобар-аналоговых уровней формулы (3) приводят к чрезвычайно малым ($\Delta = 107$ кэВ!) отклонениям от экспериментальных значений из файла ENSDF для 116 из 118 перечисленных в Таблице 2 ядер.

Как отмечалось выше, были обнаружены только два случая впечатляющих расхождений Δ между результатами расчетов с использованием формул (3) и экспериментальными данными ENSDF:

- для ядра ^{15}O $\Delta = 1373$ (12255 – 10882) кэВ;
- для ядра ^{26}Mg $\Delta = 5052.65$ (18050 – 12997.35) кэВ.

Объяснения этим расхождениям могут быть даны в рамках предположения о том, что уровни ядер ^{15}O (при энергии 12255 кэВ) и ^{26}Mg , (при энергии 18050 кэВ), приведенные в Таблице 2 среди изобар-аналогов основных состояний соответствующих ядер, в действительности являются изобар-аналогами не основных, а возбужденных состояний. Формат записи данных массива ENSDF, в принципе, это допускает. Но в таком случае вполне естественным является предположение, что в обоих обсуждаемых ядрах при энергиях, рассчитываемых по формулам (2), должны существовать настоящие изобар-аналоги соответствующих основных состояний.

Уровни, возбуждаемые в обоих ядрах при энергиях, близких к рассчитываемым по формулам (2), среди которых могут присутствовать такие состояния, приведены в Таблице 3.

Энергии, спины и четности состояний

обсуждаемых ядер в области энергий первых изобар-аналогов основных состояний, рассчитанных по формулам (2)

Ядро	Данные настоящей работы		Данные ENSDF	
	Е, кэВ	J^π	Е, кэВ	J^π
^{15}O	10882.24	$1/2^+$	10506	$(3/2)^+$
			10917	$7/2^+$
			10938	$1/2^+$
			11025	$1/2^-$
			11151	
			11218	$3/2^+$
^{26}Mg	12997.35	3^+	12479	6^-
			12865	6^-
			12958	$(0 - 6)^-$
			13958	$(0 - 6)^-$

Из Таблицы 3 отчетливо видно, что в случае ядра ^{15}O из всех возможных кандидатов предпочтение должно быть отдано состоянию $(1/2^+)$ при энергии 10938 кэВ, хотя и состояние при энергии 11151 кэВ, значения спина-четности которого неизвестны, также в принципе могло бы быть интерпретировано как изобар-аналог основного состояния.

В случае ядра ^{26}Mg подходящих кандидатов не наблюдается. Однако весьма небольшое количество состояний, обнаруженных в обсуждаемой области энергий, и относительно большие расстояния между ними дают основания высказать предположение о том, что рассматриваемая область энергии исследована недостаточно хорошо. Из всего сказанного выше можно сделать вывод о том, что в ядре ^{26}Mg при энергии около 13 МэВ должно существовать $T_>$ -состояние (3^+).

На основании всего сказанного выше об интерпретации настоящих изобар-аналогов основных состояний ядер ^{15}O и ^{26}Mg можно сделать 2 следующих предсказания:

- в ядре ^{15}F должно существовать состояние с $J^\pi = 5/2^+$ (значения спина и четности уровня ядра ^{15}O при энергии 12255 кэВ) при энергии около 1373 (12255 – 10882) кэВ;
- в ядре ^{26}Na должно существовать состояние 6^- (значения спина и четности уровня ядра ^{26}Mg при энергии 18050 кэВ) при энергии около 5052.65 (18050 – 12997.35) кэВ.

Предсказание для ядра ^{15}F абсолютно подтверждается данными ENSDF, согласно которым в этом ядре имеется состояние ($5/2^+$) при энергии 1300 ± 100 кэВ, изоспин которого ($3/2$) равен изоспину основного состояния. Следовательно, определенно можно констатировать, что для ядра ^{15}O в ENSDF содержится и в Таблице 2, соответственно, приводится изобар-аналог возбужденного (не основного!) состояния ядра ^{15}F при энергии 1300 ± 100 кэВ.

В ядре ^{26}Na в обсуждаемой области энергий имеются 3 состояния с неизвестными значениями спина и четности: 4702 ± 15 , 4940 ± 30 и 5080 ± 60 кэВ. Если предположить, что других состояний в данной области энергий не существует, можно предсказать, что, по крайней мере, одно из перечисленных состояний имеет значения спина и четности $J^\pi = 6^-$.

Основные выводы

1. Показано, что традиционно используемая для определения значений энергии первых (нижних) изобар-аналоговых уровней формула (1) дает неверные значения в области ядер $N \leq Z$.
2. Предложенные формулы (3), в которых впервые удалось разделить поправку к основной части на массовую и кулоновскую части, описывают всю совокупность обсуждаемых данных для ядер с $1 \leq A \leq 61$ со средней погрешностью 107 кэВ, за исключением случаев ядер ^{15}O и ^{26}Mg .
3. Показано, что для ядер ^{15}O и ^{26}Mg большие расхождения данных, рассчитанных по формулам (3), с экспериментальными, которые приведены в файле ENSDF, обусловлены тем, что в ENSDF в этих двух случаях приведены изобар-аналоги не основных (как во всех остальных случаях), а возбужденных состояний. Рассмотрение всех обстоятельств, связанных с этими расхождениями, позволяет утверждать, что с большой вероятностью изобар-аналогом основного состояния ядра ^{15}F является состояние при энергии 10938 кэВ (с существенно меньшей вероятностью им может быть и состояние при

энергии 11151 кэВ) ядра ^{15}O , но никак не указанное в ENSDF состояние при энергии 12255 кэВ.

Кроме того, все сказанное выше позволяет сделать два предсказания:

- в ядре ^{26}Mg при энергии возбуждения вблизи 13 МэВ должно существовать состояние с $J^\pi = 3^+$;
- по крайней мере, одно из состояний 4702, 4940, 5080 ядра ^{26}Na должно иметь спин-четность $J^\pi = 6^-$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.D.Anderson, C.Wong, J.V.MacClare. // Phys.Rev. 1965. V.138. P.B615
2. T.W.Burrows. // Nucl.Instr.and Meth.in Phys.Res. 1990. V.A286. P.595.
3. 2. G.Audi, A.H.Wapstra. // Nucl.Phys., 1995. V. A595. P. 409.

Центр данных фотоядерных экспериментов

Научно-исследовательский институт ядерной физики им.Д.В.Скобельцына

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

I.N.Boboshin, V.V.Varlamov, B.S.Ishkhanov

**FORMULA FOR THE ENERGY POSITION OF THE FIRST $T_{>}$ -ISOSPIN
NUCLEAR STATE**

The complete data set for energies of the $1 \leq A \leq 61$ nuclei lowest levels with isospin $T_{>} = |N - Z|/2 + 1$ was produced on the base of the modern nuclear spectroscopy data banks. Using the systematical analysis of this information the energy position description of the lowest nuclear levels with isospin $T_{>} = |N - Z|/2 + 1$ has been achieved. The traditional formula was improved for $N \leq Z$ region. The neutron and proton mass difference is used as a formula constant. The averaged disagreement between experimental (ENSDF) data and values calculated using proposed formula is equal to 0.107 MeV for the almost all (116 from 118) nuclei investigated.

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
Lomonosov Moscow State University
119899 Moscow, Russia