

## Роль оболочечной структуры в формировании поверхностного натяжения в атомных ядрах

Н. Г. Гончарова<sup>a</sup>

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра общей ядерной физики.  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Поступила в редакцию 16.05.2020, после доработки 04.06.2020, принята к публикации 08.06.2020.

Оценка коэффициентов  $\sigma$  поверхностного натяжения четно-четных ядер с  $10 < A < 212$  проведена на основе использования их связи с жесткостью ядер. Значения жесткости рассчитаны из данных о средней квадратичной деформации ядер. Исследована корреляция значений  $\sigma$  со структурой нейтронных и протонных подоболочек. Показана связь поверхностного натяжения с деформацией.

*Ключевые слова:* поверхностное натяжение, оболочечная структура.

УДК: 539.142.2.3. PACS: 21.60.-p.

### ВВЕДЕНИЕ

Важная роль поверхностного натяжения в ядрах при формировании его свойств была показана на заре развития физики ядра при создании капельной модели [1]. Хотя связь поверхностного натяжения и кулоновского взаимодействия нуклонов с формой ядер была установлена, количественные оценки свойств ядерной поверхности являются одной из актуальных проблем физики ядра.

В работах О. Бора и сотрудников была выявлена связь коэффициента поверхностного натяжения атомных ядер с их жесткостью [2, 3], т. е. с характеристикой, определяющей коллективные колебания ядер. Коллективные квадрупольные колебания поверхности четно-четных ядер являются главной модой возбуждения этих ядер при низких энергиях. Коллективные квадрупольные колебания ядер ответственны за формирование низших возбужденных состояний четно-четных ядер, причем потенциальная энергия коллективных колебаний таких ядер является функцией жесткости ядра.

Жесткость  $C$  четно-четного ядра относительно квадрупольных колебаний связана с величиной коэффициента поверхностного натяжения ядра [3]:

$$C = 4R^2\sigma - \frac{3Z^2e^2}{10\pi R}. \quad (1)$$

В теории коллективных колебаний (см., например, [4]) доказана связь жесткости  $C$  в основном состоянии с энергией низшего  $2^+$  уровня четно-четного ядра и его среднеквадратичной деформацией  $\beta$ :

$$C = \frac{5E(2^+)}{2\beta^2}.$$

В обзоре [5] приведены результаты серии экспериментальных и теоретических работ, целью которых было определение среднеквадратичной деформации ядер  $\beta$  в основных состояниях. (Оценка возможна благодаря связи вероятности переходов  $2^+ \rightarrow 0^+$  с этой величиной.) (В обзоре [6] приведены ссылки на уточненные результаты для вероятностей переходов  $2^+ \rightarrow 0^+$ .)

Эти данные позволили провести расчет жесткостей четно-четных ядер [7]. Полученные результаты показали высокую степень зависимости величин  $C$  от оболочечной структуры ядра.

Связь жесткости и поверхностного натяжения открыла возможность проведения оценки коэффициентов  $\sigma$  поверхностного натяжения для большинства четно-четных ядер [8]. В расчетах были использованы данные [9, 10] о радиусах ядер.

Результаты [8] выявили очень большие различия в величинах  $\sigma$ : от  $\sigma \sim 0.8-1.1$  МэВ/фм<sup>2</sup> для деформированных ядер и вплоть до  $\sigma \sim 30$  МэВ/фм<sup>2</sup> для четных изотопов свинца.

Данная работа посвящена исследованию влияния оболочечной структуры на поверхностное натяжение четно-четных ядер.

Какие факторы определяют степень точности проведенных оценок коэффициентов поверхностного натяжения? Поскольку оценки  $\sigma$  проведены на основании расчетов жесткости ядер относительно квадрупольных коллективных колебаний, а эти расчеты, в свою очередь, базируются на результатах установления величин среднеквадратичных деформаций  $\beta$ , точность указанных ниже значений  $\sigma$  не может быть выше точности оценок  $\beta$  [5, 6].

Вторым важным фактором, влияющим на точность оценки коэффициентов поверхностного натяжения ядер, является необходимость использования экспериментальных данных о радиусах ядер. Связь поверхностного натяжения и жесткости в формуле (1) включает радиус ядра как характеристику пространственного распределения нуклонов. Проблема сравнительных величин нейтронных и протонных распределений в ядрах обсуждается в научной литературе (см. например, [11–13]). В частности, большой интерес представляет связь превышения нейтронного радиуса над протонным с параметрами так называемого «пигми»-резонанса [14]. Однако распределение массы известно лишь для немногих ядер, поэтому в обсуждаемых здесь расчетах по необходимости используются зарядовые радиусы ядер.

Наконец, проведенные оценки основаны на связи поверхностного натяжения и жесткости, причем расчет жесткостей выполнялся лишь для квадрупольных колебаний поверхности ядер. Хотя эти

<sup>a</sup> E-mail: [n.g.goncharova@physics.msu.ru](mailto:n.g.goncharova@physics.msu.ru),  
[n.g.goncharova@gmail.com](mailto:n.g.goncharova@gmail.com)

Таблица 1. Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (МэВ/фм<sup>2</sup>) ядер с ( $12 \leq A \leq 40$ )

A	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	36	38	40
Z	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16	16	18	18	18
N	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16	18	20	18	20	22
$\sigma$	1.4	5.5	4.7	1.4	0.3	0.4	0.4	0.7	0.9	1.6	1.6	2.2	6.9	1.9	4.7	1.5

Таблица 2. Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (МэВ/фм<sup>2</sup>) ядер с ( $40 \leq A \leq 66$ )

A	40	42	44	46	48	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
Z	20	20	20	20	20	22	22	22	24	26	28	28	28	28	30	30
N	20	22	24	26	28	24	26	28	28	28	28	30	32	34	34	36
$\sigma$	13.7	1.6	1.2	3.3	17.9	0.8	1.0	3.1	1.7	2.0	4.3	2.4	1.8	1.8	1.2	1.4

колебания являются доминирующими в коллективных возбуждениях [4], другие типы коллективных колебаний также могут воздействовать на свойства ядерной поверхности.

Указанные факторы позволяют оценить точность расчетов коэффициентов поверхностного натяжения четно-четных ядер не выше, чем 15–20%.

### 1. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В ЯДРАХ С $12 < A \leq 40$

Результаты оценок коэффициентов поверхностного натяжения в легких ядрах с числом нуклонов  $A \leq 40$  представлены в табл. 1.

Расчеты коэффициентов поверхностного натяжения  $\sigma$  [8] четно-четных ядер показали доминирующую роль заполненности нейтронных оболочек и подоболочек в формировании высоких значений  $\sigma$ . Например, добавление нейтронной пары в «магическому» ядру  $^{16}\text{O}$  приводит к значительному уменьшению коэффициента поверхностного натяжения. Однако анализ ситуации с легкими ядрами (табл. 1) указывает на более сложный характер этой зависимости. Добавление пары нейтронов к ядру  $^{12}\text{C}$  приводит к резкому увеличению  $\sigma$  в ядре  $^{14}\text{C}$ , причем коэффициент поверхностного натяжения в этом ядре превышает его значение в дважды «магическом»  $^{16}\text{O}$ .

Низкие значения коэффициентов поверхностного натяжения характерны для атомных ядер, деформированных в основном состоянии. ( $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{24}\text{Mg}$  относятся к деформированным ядрам, что доказывается наличием в их спектрах вращательных полос). Следует отметить, что теоретические расчеты возбужденных состояний, например гигантского дипольного резонанса в таких ядрах, могут быть успешными лишь при условии учета реальной структуры основных состояний ядер. Такой учет может быть осуществлен при построении системы базисных конфигураций задачи на основе информации об экспериментальном распределении «дырочных» состояний, что реализуется в теоретическом подходе «частица — состояние конечного ядра» [15, 16]. Поскольку распределение состояний ядра ( $A - 1$ ) в реакции подхвата нуклона содержит информацию о реальной форме ядра-мишени, использование этой спектроскопии при построении базисных конфигураций задачи о резонансных возбуждениях ядра позволило, в частности, получить реалистическую картину сечений возбуждения деформированного ядра  $^{24}\text{Mg}$  [17].

Добавление пары нейтронов к ядру  $^{28}\text{Si}$  заметно увеличивает коэффициент поверхностного натяжения (табл. 1). Этот эффект может быть следствием того факта, что поверхность ядра  $^{30}\text{Si}$  сформирована двумя полностью заполненными  $(1d_{5/2})^6(2s)^2$  нейтронными подоболочками. Расчеты изовекторных дипольных возбуждений в ядрах  $^{28}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$  [18], основанные на использовании спектроскопии прямых реакций подхвата нейтрона, показали, что удовлетворительное описание гигантских резонансов в ядре  $^{28}\text{Si}$  достигается в предположении отклонения этого ядра от сферической формы. На картину резонансных возбуждений этого ядра значительное влияние оказывает отклонение его формы от сферы, являющееся следствием сравнительно низкого значения  $\sigma$ .

### 2. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В ЯДРАХ С $40 \leq A \leq 66$

Влияние оболочечной структуры на поверхностное натяжение особенно ярко проявляется в четных изотопах кальция. Сравнение полученных величин с оболочечной структурой исследуемых четно-четных ядер показало доминирующее воздействие структуры нейтронных оболочек на поверхностное натяжение ядра. (табл. 2 и рис. 1).

Для четно-четных изотопов кальция коэффициенты поверхностного натяжения максимальны для ядер  $^{40}\text{Ca}$  и  $^{48}\text{Ca}$ .

Последовательное добавление нейтронных пар  $(1f_{7/2})^2$  в  $^{42}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ca}$  и  $^{46}\text{Ca}$  приводит к меньшим значениям  $\sigma$ , чем у «дважды магического»  $^{40}\text{Ca}$ , причем одновременно уменьшается величина параметра  $r_0$ .

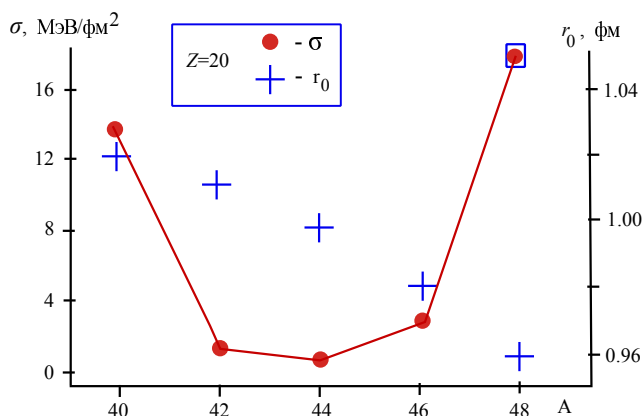
Рис. 1. Значения  $\sigma$  и  $r_0$  изотопов Ca

Таблица 3. Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (МэВ/фм<sup>2</sup>) ядер с  $68 \leq A \leq 96$

A	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96
Z	30	32	32	32	34	34	34	36	36	36	38	40	40	40	40
N	38	38	40	42	42	44	46	46	48	50	50	50	52	54	56
$\sigma$	1.5	1.3	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.3	4.0	2.6	5.3	10	3.7	4.4	9.7

Заполнение нейтронных подоболочек  $(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^8$  в <sup>48</sup>Ca имеет следствием максимальное для всех исследованных ядер, за исключением двух четных изотопов свинца, значение  $\sigma$ . Параметр  $r_0$  достигает минимума в ядре <sup>48</sup>Ca.

Поскольку нуклонная плотность ядер обратно пропорциональна третьей степени параметра  $r_0 = R_{ch} \cdot A^{-1/3}$ , то уменьшение его значений соответствует сжатию протонной составляющей ядерной материи. Корреляция высоких значений жесткости и минимумов в распределении плотности заряда атомного ядра является следствием влияния поверхностного натяжения на форму и размер ядра. Рост коэффициента поверхностного натяжения вызывает рост давления  $p$  на сферу радиуса  $R$ , что отражает «классическая» формула Лапласа  $p = 2\sigma/R$ . Увеличение поверхностного натяжения и связанное с ним увеличение давления на ядро, несмотря на слабую сжимаемость ядерной материи, приводит к минимальным значениям параметра  $r_0$  для зарядовых радиусов, т. е. к сжатию протонной компоненты ядерной материи.

Оценки коэффициентов поверхностного натяжения в четных изотопах титана показало, что добавление протонной пары к нейтронной структуре  $(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^n$  дважды «магического» <sup>48</sup>Ca ядра резко уменьшает значения  $\sigma$ :  $\sigma(^{50}\text{Ti})/\sigma(^{48}\text{Ca}) \approx 0.17$  (табл. 2 и рис. 1, 2).

Распределение коэффициентов поверхностного натяжения в четных изотопах ядер Cr, Fe, Ni, Zn показано на рис. 3. Максимумы  $\sigma$  соответствуют «магическим» числам нейтронов  $N = 28$  и  $N = 40$ . На рис. 3 видно также влияние заполненности протонных оболочек и подоболочек на величину поверхностного натяжения.

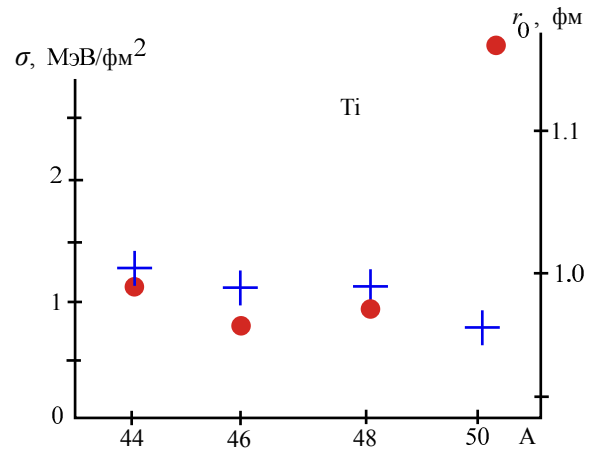


Рис. 2. Значения  $\sigma$  и  $r_0$  изотопов Ti

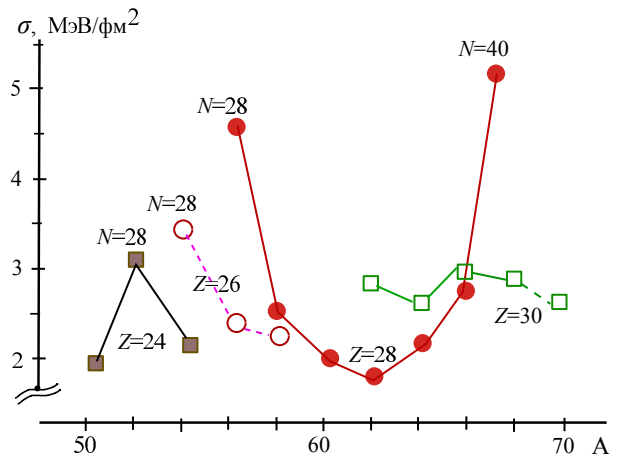


Рис. 3. Коэффициенты  $\sigma$  изотопов Cr, Fe, Ni, Zn

### 3. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

#### В ЯДРАХ С $68 \leq A \leq 96$

Интересным примером влияния заполненности нейтронных подоболочек на поверхностное натяжение являются четные изотопы циркония (рис. 4, табл. 3).

Ядро <sup>90</sup>Zr с заполненной нейтронной подоболочкой  $(1g_{9/2})^{10}$  имеет значение  $\sigma$  примерно в 5 раз более высокое, чем ядро <sup>88</sup>Zr, и примерно в 3 раза более высокое, чем ядро <sup>92</sup>Zr с конфигурацией поверхностных нейтронов  $(1g_{9/2})^{10}(2d_{5/2})^2$ . Однако поверхностное натяжение ядра <sup>96</sup>Zr с замкнутыми нейтронными конфигурациями  $(1g_{9/2})^{10}(2d_{5/2})^6$  оказывается близким к  $\sigma$  «дважды магического» <sup>90</sup>Zr. (На близость свойств <sup>96</sup>Zr «магическим» ядрам было впервые указано в работе [19]). Для изотопов <sup>90</sup>Zr и <sup>96</sup>Zr с максимальными значениями  $\sigma$  также характерны минимальные значения параметра  $r_0$  (рис. 4).

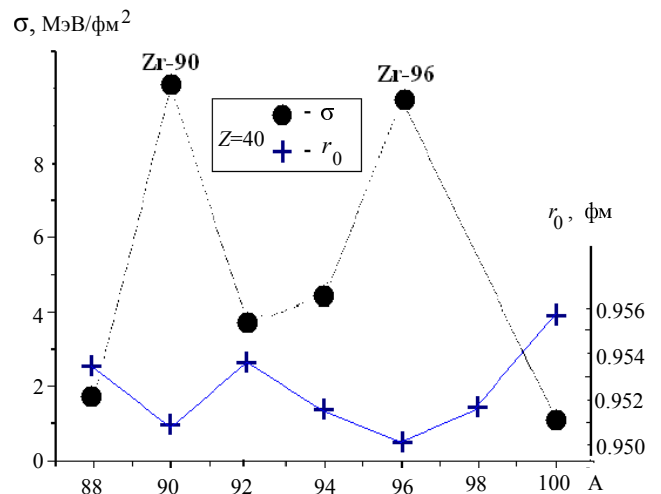


Рис. 4. Коэффициенты  $\sigma$  и значения  $r_0$  четных изотопов Zr

Таблица 4. Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (МэВ/фм<sup>2</sup>) ядер с  $96 \leq A \leq 122$ 

A	96	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120	122
Z	42	42	42	44	44	46	46	48	48	48	50	50	50	50
N	54	56	58	58	60	60	62	62	64	66	66	68	70	72
$\sigma$	1.6	1.6	1.0	1.0	0.9	1.2	1.1	1.6	3.3	1.4	3.9	3.8	3.8	3.9

Таблица 5. Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (МэВ/фм<sup>2</sup>) ядер с  $124 \leq A \leq 150$ 

A	124	126	128	130	132	134	136	138	140	142	144	146	148	150
Z	50	52	52	52	54	56	56	56	58	58	60	60	62	62
N	74	74	76	78	78	78	80	82	82	84	84	86	86	88
$\sigma$	4.4	1.7	2.0	2.5	1.8	1.6	2.3	5.3	5.1	2.0	2.2	1.5	5.9	1.2

Таблица 6. Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (МэВ/фм<sup>2</sup>) ядер с  $152 \leq A \leq 182$ 

A	152	154	156	158	160	162	164	166	168	170	172	174	176	178	180	182
Z	62	62	64	64	66	66	66	68	68	68	70	70	72	72	72	74
N	90	92	92	94	94	96	98	98	100	102	102	102	104	106	108	108
$\sigma$	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.12	1.12	1.1	1.15	1.14	1.2	1.2	1.2	1.3

Таблица 7. Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (МэВ/фм<sup>2</sup>) ядер с  $184 \leq A \leq 210$ 

A	184	186	188	190	192	194	196	198	200	202	204	204	206	208	210
Z	74	74	76	76	78	78	80	80	80	80	80	82	82	82	82
N	110	112	112	114	114	116	116	118	120	122	124	122	124	126	128
$\sigma$	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.8	2.1	2.2	2.7	3.3	11.3	17.5	28.7	<b>33.9</b>

#### 4. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В ЯДРАХ С $96 \leq A \leq 150$

Результаты расчетов коэффициентов поверхностного натяжения в ядрах с числом нуклонов  $96 \leq A \leq 150$  показаны в табл. 4 и 5.

Для ядер этой группы характерны сравнительно невысокие колебания коэффициента поверхностного натяжения в пределах четных изотопов одного элемента. Например, для олова ( $Z = 50$ ) колебания величин  $\sigma$  для изотопов с числом нейтронов  $N = 66-72$  не превышают 2.5%. Колебания поверхностного натяжения сравнительно невелики также в четных изотопах молибдена ( $Z = 42$ ) и теллура ( $Z = 52$ ) и ряда других элементов. Такие элементы отличаются большим количеством стабильных изотопов, например, у олова ( $Z = 50$ ) их 10. Максимальные значения  $\sigma$  в ядрах группы с  $96 \leq A \leq 150$  достигаются в барии ( $^{138}\text{Ba}$ ) и церии ( $^{140}\text{Ce}$ ), т. е. в ядрах с «магическим» числом нейтронов  $N = 82$ .

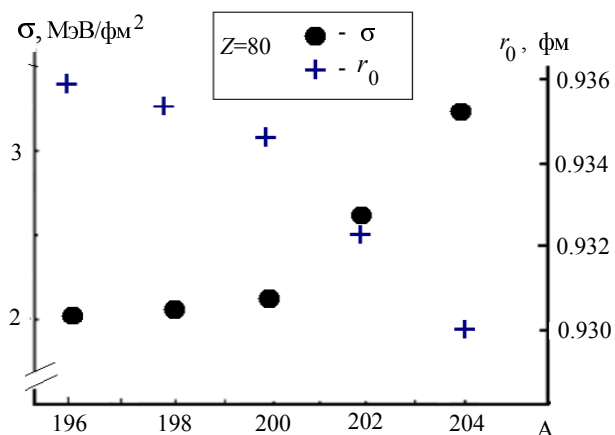
#### 5. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В ЯДРАХ С $152 \leq A \leq 182$

Эта группа четно-четных ядер отличается от рассмотренных выше низкими значениями коэффициентов поверхностного натяжения, причем для ядер с  $Z = 64-72$  колебания  $\sigma$  не превышают 20%. Спектры возбуждения этих ядер отличаются хорошо выраженными вращательными полосами; измерения квадрупольных моментов для нечетных изотопов этой группы также указывают на высокий уровень деформаций [20].

#### 6. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В ЯДРАХ С $184 \leq A \leq 210$

Для ядер с числом нуклонов от 182 до 194 коэффициент поверхностного натяжения монотонно растет с ростом  $A$ . В четных изотопах ртути темп роста  $\sigma$  с добавлением пары нейтронов увеличивается, достигая значения 3.3 МэВ/фм<sup>2</sup> для изотопа  $^{204}\text{Hg}$ . Стоит отметить, что оценки параметра  $r_0$  изотопов ртути показали его уменьшение с ростом числа нейтронов (рис. 5).

Наиболее ярко влияние оболочечной структуры на поверхностное натяжение тяжелых стабильных ядер проявляется в изотопах ртути и свинца: коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  возрастает более чем втрое при добавлении пары протонов ( $3s$ )<sup>2</sup>

Рис. 5. Коэффициенты  $\sigma$  и значения  $r_0$  четных изотопов Hg

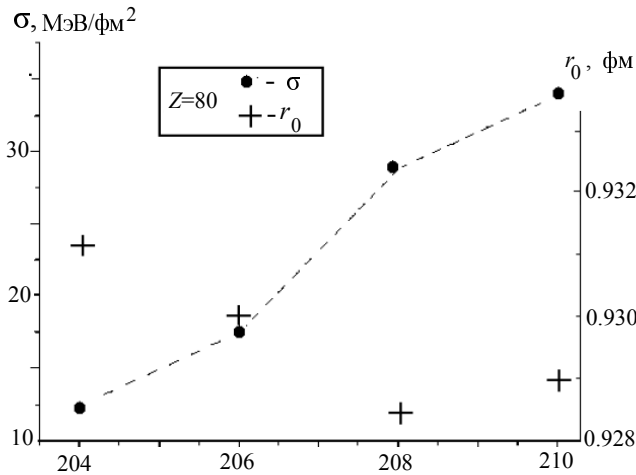


Рис. 6. Коэффициенты  $\sigma$  и параметры  $r_0$  изотопов Pb

к ядру  $^{204}\text{Hg}$  и образовании «магического» числа протонов 82. Достраивание нейтронной оболочки свинца до  $N = 126$  приводит к еще более резкому росту  $\sigma$  (рис. 6).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных выше таблиц коэффициентов поверхностного натяжения четно-четных атомных ядер следует, что максимальные значения  $\sigma$  принадлежат, как и ожидалось, дважды «магическим» ядрам  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ . Однако неожиданным является сравнительно невысокое значение  $\sigma$  для  $^{16}\text{O}$  и, более того, превышение (табл. 1) поверхностного натяжения ядра  $^{14}\text{C}$  над  $\sigma(^{16}\text{O})$ .

Наибольшие значения коэффициентов поверхностного натяжения среди других близких по числу нуклонов четно-четных ядер характерны для тех «магическим» по протонам ядер, оболочечная структура поверхности которых соответствует двум последовательно заполненным нейтронным подоболочкам. Это  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и в особенности  $^{210}\text{Pb}$ . Особые свойства таких ядер связаны с наличием у них так называемой «neutron skin» [13].

Добавление пары нейтронов к структуре не «магического» четно-четного ядра приводит, как правило, к увеличению поверхностного натяжения при создании при этом замкнутой по нейтронам оболочки. Такова ситуация с парами  $^{36}\text{Ar}_{18}-^{38}\text{Ar}_{20}$ ,  $^{48}\text{Ti}_{26}-^{50}\text{Ti}_{28}$ ,  $^{34}\text{S}_{18}-^{36}\text{S}_{20}$ ,  $^{136}\text{Ba}_{80}-^{138}\text{Ba}_{82}$ . Однако увеличение поверхностного натяжения при добавлении пары нейтронов происходит и в других случаях, например,  $^{82}\text{Kr}_{46}-^{84}\text{Kr}_{48}$ ,  $^{110}\text{Cd}_{62}-^{112}\text{Cd}_{64}$ . Последовательное повышение коэффициента  $\sigma$  происходит при добавлении нейтронных пар и в изотопах теллура  $^{126}\text{Te}_{74}-^{128}\text{Te}_{76}-^{130}\text{Te}_{78}$  (табл. 5).

Добавление пары нейтронов к замкнутой по нейтронам подоболочке приводит, как правило, к уменьшению коэффициента  $\sigma$ . Примерами таких случаев являются пары  $^{16}\text{O}_8-^{18}\text{O}_{10}$ ,  $^{38}\text{Ar}_{20}-^{40}\text{Ar}_{22}$ ,  $^{40}\text{Ca}_{20}-^{42}\text{Ca}_{22}$ ,  $^{90}\text{Zr}_{50}-^{92}\text{Zr}_{52}$ ,  $^{140}\text{Ce}_{82}-^{142}\text{Ce}_{84}$ .

Добавление пары протонов к ядру с «магическим» числом протонов также приводит к уменьшению поверхностного натяжения. Таков результат сравнения коэффициентов  $\sigma$  в ядрах  $^{18}\text{O}-^{20}\text{Ne}$ ,  $^{48}\text{Ca}-^{50}\text{Ti}$ ,  $^{90}\text{Zr}-^{92}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Zr}-^{98}\text{Mo}$ .

Если при добавлении к ядру пары протонов создается замкнутая по протонам подоболочка, коэффициент  $\sigma$  испытывает, как правило, заметный рост:  $\sigma(^{54}\text{Fe}) < \sigma(^{56}\text{Ni})$ . Если в результате добавления пары протонов создается «дважды магическое» ядро, рост поверхностного натяжения особенно значителен. К таким выводам приводит сравнение коэффициентов поверхностного натяжения в ядрах  $^{38}\text{Ar}-^{40}\text{Ca}$ ,  $^{88}\text{Sr}-^{90}\text{Zr}$ .

Особенно резкое возрастание  $\sigma$  при добавлении пары протонов к четно-четному ядру имеет место для ядра  $^{204}\text{Hg}-^{206}\text{Pb}$  — более чем в 5 раз!

Указанные выше тенденции в изменении коэффициентов поверхностного натяжения ядер при добавлении пары нейтронов или протонов действительно в большинстве случаев, однако отнюдь не абсолютно! Особый интерес представляют отклонения от этого правила.

Например, добавление пары нейтронов к ядру  $^{70}\text{Ge}$  с образованием  $^{72}\text{Ge}$ , т. е. ядра с «магическим» числом нейтронов  $N = 40$ , сопровождается уменьшением коэффициента поверхностного натяжения (табл. 3).

Наиболее парадоксальным фактом, выявленным при исследовании поверхностного натяжения в четно-четных ядрах является ситуация с легчайшими ядрами: добавление пары протонов к ядру  $^{14}\text{C}$  с  $\sigma=5.5$  МэВ/фм<sup>2</sup> приводит к дважды «магическому» ядру  $^{16}\text{O}$  со значительно меньшим значением коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  (табл. 1).

Адекватная интерпретация особенностей изменений коэффициентов поверхностного натяжения при заполнении ядерных оболочек требует более глубокого исследования нуклон-нуклонных и нуклон-кластерных взаимодействий.

Автор выражает благодарность И. Н. Бобошину за обсуждение работы и ценные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weizsäcker C. F. // Zs. f. Phys. 1935. **96**. P. 431.
2. Bohr A. // Dan. at. Fys. Medd. 1952. **22**, N 14. P. 7.
3. Alder K., Bohr A., Huus T. et al. // Rev. Mod. Phys. 1956. **28**, P. 433.
4. Айзенберг И., Грайнер В. Модели ядер. Атомиздат. М., 1975. (Eisenberg J., Greiner W. Nuclear Theory. V. 1. N-H Pucl. Com P. Amsterdam-London, 1970)
5. Raman S., Nestor Jr. C.W., Tikkanen P. // At. Data & Nucl. Data Tables. 2001. **78**, 1.
6. Pritychenko B., Birch M., Singh B. et al. // At. Data & Nucl. Data Tables. 2016. **107**, № 1.
7. Гончарова Н. Г., Долгодворов А. П., Сергеева С. И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 3. С. 33 (Goncharova N.G., Dolgodvorov A.P., Sergeeva S.I. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2014. **69**, N 3. P. 237.)
8. Goncharova N. G. // Phys. Part. Nucl. 2019. **50**, N 5. P. 532.
9. <http://cdfc.sinp.msu.ru/services/radchart/radmain>
10. Angeli I., Marinova K. // At. Data & Nucl. Data Tables. 2013. **99**. P. 69.
11. Batty C. J., Friedman E. et al. // Adv. Nucl. Phys. 1989. P. 191.
12. Pethick C. J., Ravenhall D. J. // Nucl. Phys. A. 1996. **606**. P. 173.
13. Thakur V., Dhiman S. K. // Nucl. Phys. A. 2019. 992. 121623.

14. Гончарова Н. Г., Джиоев А. А. // Изв. РАН. с. ф. 2000. **64**. С. 171.
15. Гончарова Н. Г. // Ядерная физика. 2009. **72**. С. 1803. (Goncharova N. G. // *Phys. At. Nucl.* 2009 **72**, N 10. P. 1745.)
16. Goncharova N. G., Pronkina N. D. // *Nucl. Phys. A.* 2007. **788**. P. 394.
17. Goncharova N. G., Pronkina N. D. // *Phys. At. Nucl.* 2007. **71**, N 4. P. 641.
18. Goncharova N. G., Tretyakova T. Yu, Fedorov N. A. // *Bull. RAS. Physics.* 2016. **80**. P. 325.
19. Boboshin I. N., Ishkhanov B. S., Varlamov V. V. // *Phys. At. Nucl.* 2004. **67**. P. 1846.
20. Stone N. J. // *Hyperfine Interactions.* 2015. **230**. P. 7.

### The Role of the Shell Structure in the Formation of Surface Tension in Atomic Nuclei

**N. G. Goncharova**

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: [n.g.goncharova@gmail.com](mailto:n.g.goncharova@gmail.com), [n.g.goncharova@physics.msu.ru](mailto:n.g.goncharova@physics.msu.ru).*

The surface tension coefficients  $\sigma$  of even-even nuclei with  $10 < A < 212$  were estimated by using their dependence on the nuclear rigidity. The values of the nuclear rigidity were calculated based on the data on the mean squared deformation of nuclei. The correlation of the values of  $\sigma$  with the structure of the neutron and proton subshells was investigated. The connection of the surface tension with the nuclear deformation was revealed.

*Keywords:* surface tension, shell structure, nuclear rigidity, surface tension in nuclei.

*PACS:* 21.60.-n.

*Received 16 May 2020.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2020. **75**, No. 5. Pp. 440–446.

#### Сведения об авторе

Гончарова Наталья Георгиевна — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-16-97, (495) 421-79-13, e-mail: [n.g.goncharova@gmail.com](mailto:n.g.goncharova@gmail.com).