

УДК 539.142

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В АТОМНЫХ ЯДРАХ

© 2021 г. Н. Г. Гончарова^{1, *}, А. П. Долгодворов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: n.g.goncharova@gmail.com

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2021 г.

Выполнена оценка коэффициентов поверхностного натяжения четно-четных ядер на основе соотношения, включающего жесткость по отношению к среднеквадратичной деформации. Обсуждается влияние поверхностного натяжения на нейтронное и протонное распределение. Установлена связь коэффициентов поверхностного натяжения с эффектом “нейтронной кожи”.

DOI: 10.31857/S0367676521050082

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая роль поверхностного натяжения в формировании свойств ядер была установлена капельной моделью ядер [1]. В работе О. Бора [2] была показана связь величины коэффициента σ поверхностного натяжения четно-четных ядер с жесткостью ядерной поверхности C относительно квадрупольных колебаний:

$$\sigma = \frac{C + 0.1376(Z^2/R_0)}{4R_0^2}. \quad (1)$$

Жесткость C четно-четных ядер в основном состоянии может быть оценена по величине энергии низшего 2^+ уровня четно-четного ядра и среднеквадратичной деформации β :

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

Вероятности переходов $2^+ \rightarrow 0^+$ в четно-четных ядрах связаны с величинами среднеквадратичной деформации β . Серия экспериментальных исследований этих величин была обобщена в обзоре [3]. (В работе [4] проведено уточнение некоторых из результатов [3].) Эти данные позволили рассчитать величину жесткости для большинства четно-четных ядер [5].

Связь (1) коэффициентов поверхностного натяжения σ в атомных ядрах и жесткости ядер C дает возможность получить приближенные оценки

σ и исследовать связь этих величин с оболочечной структурой ядер [6].

В работах [5, 6] была выявлена корреляция высоких значений величин C и σ с минимумами параметров $r_0 = R_{ch}A^{-1/3}$. Примером такой корреляции является распределение значений коэффициентов поверхностного натяжения и значений параметров r_0 в четных изотопах кальция (рис. 1).

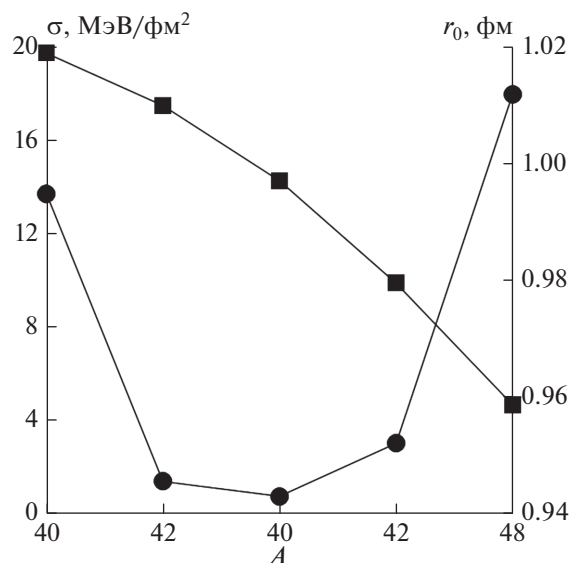


Рис. 1. Значения σ (кружки) и r_0 (квадратики) для изотопов Ca.

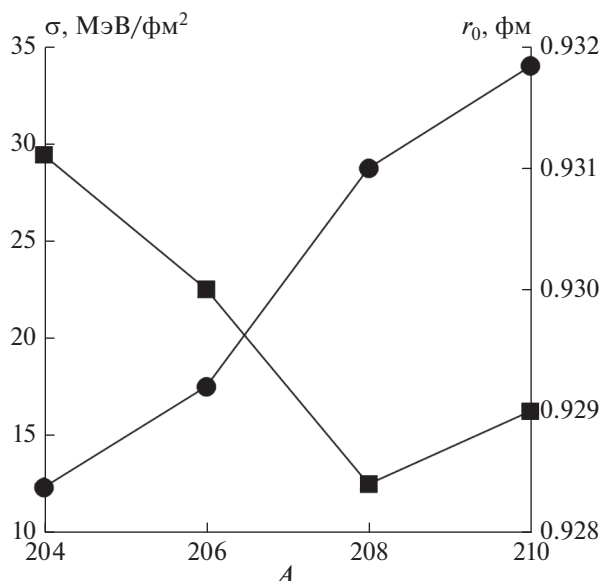


Рис. 2. Значения σ (кружки) и r_0 (квадратики) для изотопов Pb.

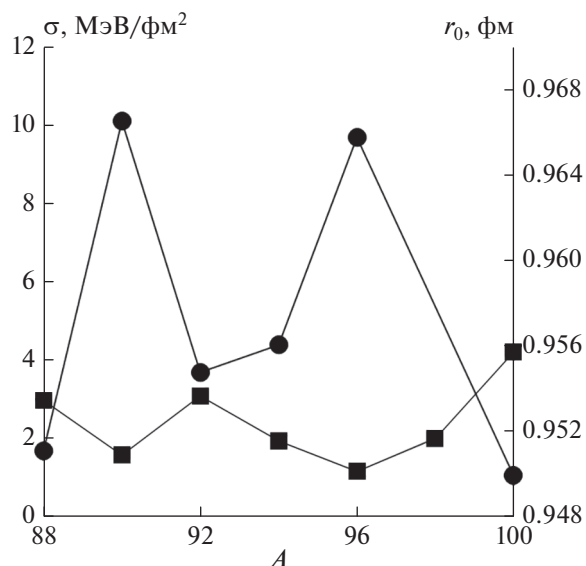


Рис. 3. Значения σ (кружки) и r_0 (квадратики) для изотопов Zr.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА ТОЛЩИНУ “НЕЙТРОННОЙ КОЖИ”

Поскольку нуклонная плотность ядер обратно пропорциональна третьей степени параметра r_0 , 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 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 . (Данные о радиусах ядер, использованные в расчетах коэффициентов σ [7], являются результатом измерений на электронных ускорителях и отражают радиус распределения заряда.)

Заполнение нейтронных подоболочек $(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^8$ в ^{48}Ca имеет следствием максимальное для всех легких ядер значение коэффициента поверхностного натяжения. Пространственная локализация нуклонов на этих подоболочках соответствует более высоким значениям для них среднего радиуса r_n , чем средний радиус протонного распределения r_p . Уменьшение значений среднего радиуса распределения протонов в том же ядре за счет роста поверхностного натя-

жения является, таким образом, дополнительным фактором увеличения разности:

$$\Delta r_{np}^2 = r_n^2 - r_p^2 \tag{3}$$

Значение (3) количественно характеризует толщину т.н. “нейтронной кожи” (neutron skin). Измерениям и расчетам этой величины посвящен ряд работ (см., например, статью [8] и ссылки в ней). На ускорителе MAMI на пионных пучках были проведены измерения величин Δr_{np} в ядре ^{208}Pb [9] и получена ее оценка $\Delta r_{np} = 0.15 \pm 0.03$ фм. Расчет коэффициентов поверхностного натяжения в четных изотопах свинца [6] также указывает на эффект уменьшения радиуса протонной компоненты ^{208}Pb (рис. 2).

Анализ связи коэффициентов поверхностного натяжения в четно-четных ядра с оболочечными эффектами в них [10] выявил, помимо ^{48}Ca и ^{208}Pb , еще несколько четно-четных ядер, для которых также вероятно обнаружение эффекта “нейтронной кожи”. Наиболее перспективными в этом отношении являются изотопы циркония ^{90}Zr и ^{96}Zr (рис. 3). Распределение коэффициентов σ и параметров r_0 , аналогично случаям четных-четных изотопов кальция и свинца, также демонстрирует эффект сжатия протонной компоненты ядра при высоких значениях коэффициента поверхностного натяжения. Оболочечная структура этих ядер указывает на последовательное заполнение поверхностных нейтронных уровней. Если ядро ^{90}Zr имеет 10 нейтронов на верхней подоболочке, то последние подоболочки ^{96}Zr соответствуют структуре

$(1g_{9/2})_n^{10}(2d_{5/2})_n^6$. Дополнительная нейтронная оболочка с шестью нейтронами приводит к уменьшению параметра r_0 по сравнению с ^{90}Zr , т.е. проявляется в некотором увеличении протонной плотности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты коэффициентов поверхностного натяжения четно-четных ядер показали влияние заполненных протонных и нейтронных подоболочек на пространственное распределение нуклонов. Наибольшие значения коэффициентов поверхностного натяжения свойственны магическим ядрам с двумя последовательно заполненными внешними нейтронными подоболочками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *v. Weizsäcker C.F.* // *Z. Phys.* 1935. V. 96. P. 431.
2. *Bohr A.* // *Dan. At. Fys. Medd.* 1953. V. 27. No. 16. P. 1.
3. *Raman S.* // *Atom. Data Nucl. Data Tabl.* 2001. V. 78. P. 1.
4. *Priyuchenko B., Birch M., Singh B. et al.* // *Atom. Data Nucl. Data Tabl.* 2016. V. 107. P. 1.
5. *Гончарова Н.Г., Долгодворов А.П., Сергеева С.И.* // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2014. № 3. С. 33; *Goncharova, N.G., Dolgodvorov, A.P., Sergeeva, S.I.* // *Moscow Univ. Bull.* 2014. V. 69. No. 3. P. 237.
6. *Goncharova N.G.* // *Phys. Part. Nucl.* 2019. V. 50. No. 5. P. 532.
7. *Angeli I., Marinova K.* // *Atom. Data Nucl. Data Tabl.* 2013. V. 99. P. 69.
8. *Thakur V., Dhiman S.* // *Nucl. Phys. A.* 2019. V. 992. Art. No. 121623.
9. *Tarbert C.M., Watts D.P., Glazier D.I. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. Art. No. 242502.
10. *Гончарова Н.Г.* // *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2020. № 5. С. 58; *Goncharova N.G.* // *Moscow Univ. Bull.* 2020. V. 3. No. 5. P. 58.

Influence of neutron shells on surface tension in nuclei

N. G. Goncharova^{a,*}, A. P. Dolgodvorov^b

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 115191 Russia*

**e-mail: n.g.goncharova@gmail.ru*

Coefficients of surface tension for the even-even nuclei were estimated using its dependence on nuclear rigidity and connection with mean squared deformation. The impact of surface tension on the distribution of neutrons and protons was discussed. The connection of surface tension' values with neutron skin was revealed.