

Н. Н. КОЛЕСНИКОВ

АНАЛИЗ ЯДЕРНЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ ПРИ ПОМОЩИ КРИВЫХ УСТОЙЧИВОСТИ*

(Представлено академиком А. А. Лебедевым 29 III 1954)

Наиболее убедительными аргументами в пользу оболочечной модели ядра явилось рассмотрение ядерных моментов и энергий связи ядер, а также β - и γ -переходов, которые показали, что оболочечные представления о структуре ядер являются хорошим приближением ⁽¹⁻⁵⁾. Анализ этих, а также и других свойств ядер позволил установить факт резкого изменения последних при числах N и Z равных 2, 8, 20, 50, 82, 126, которые были названы критическими или магическими. Далее было показано, что эти числа могут быть получены, исходя из последовательности уровней потенциальной ямы, промежуточной между прямоугольной и осцилляторной, если при этом учесть еще спин-орбитальное расщепление. Схема Майер приводит к следующей последовательности уровней:

$$1s \substack{(2)} \mid 2p \substack{(8)} \mid 3d \substack{(20)} \mid 4f_{7/2} \substack{(28)} \mid 4f_{5/2} \substack{(28)} \mid 3p \substack{(50)} \mid 5g_{7/2} \substack{(50)} \mid 4d \substack{(82)} \mid 6h_{7/2} \substack{(82)} \mid 5f \substack{(126)} \mid 4p \substack{(126)} \mid 7i_{13/2} \substack{(126)} \mid \dots$$

причем наиболее сильное расщепление уровней происходит при Z и N равных 2, 8, 20, 50, 82, 126 ⁽⁶⁾. Однако ряд авторов указывает на возможность существования небольшого расщепления уровней и при других числах нейтронов и протонов ⁽¹⁾. В то же время нет уверенности в правильности следования подуровней в интервалах между главными магическими числами. Часть таких данных дает исследование моментов ядер, однако, по нашему мнению, не менее существенным является исследование энергий связи ядер. Однако надежных энергий связи имеется немного. Это делает ненадежным использование их для обнаружения весьма небольших скачков энергий, которые могли быть обусловлены подоболочками. Ввиду этого не является достаточно надежным использование кривой масс-дефектов ⁽⁷⁾.

В связи с этим наиболее разумным является использование кривых устойчивости (Z^* или I^*) ⁽¹⁾, которые можно успешно строить лишь на основании имеющихся данных о разности энергий ядер — изобар ⁽⁸⁾. Если использовать известные в настоящее время основные члены: ядерной, кинетической, кулоновской, поверхностной энергий, к которым разумно добавить еще энергию внутриядерных образований (например, α -частиц), то выражение энергии связи ядра с массовым числом A и зарядом Z может быть записано в виде ^(8, 9):

$$E_{\text{свт}}(A, Z) = \alpha_1 A + \alpha_2 A^{2/3} + \alpha_3 \frac{(Z - \sum Z_i)^{2/3}}{A^{1/3}} + \alpha_4 \frac{(N - \sum N_i)^{2/3}}{A^{1/3}} + \alpha_5 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \alpha_6 \sum Z_i + \alpha_7 \sum \frac{Z_i}{A} \quad (1)$$

* Доложено на конференции в Академии наук СССР в марте 1952 г.

(без учета четности), где первый и второй члены учитывают ядерное взаимодействие; третий и четвертый — кинетическую энергию протонов и нейтронов, соответственно; пятый — кулоновскую энергию; шестой и седьмой — энергию внутриядерных образований; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$ — числовые коэффициенты; N_i и Z_i — числа нейтронов и протонов, соответственно, составляющих внутриядерные группы сорта i . Значение Z^* определяется из условия:

$$\left(\frac{\partial E_{\text{св}}}{\partial Z} \right)_{A=\text{const}} = 0.$$

Используя предыдущий вид формулы энергии связи, можно получить (во втором приближении, пренебрегая членами разложения, содержащими I/A в степени выше второй) формулу вида

$$I_T^* = a_0 A^{1/2} + a_1 A + a_2 A^{1/3}, \quad 2Z_T^* = A - I_T^*. \quad (2)$$

Первый член является основным и в общем правильно передает характер эмпирической кривой I^* . Заметим, что I^* не являются, вообще говоря, значением I реального ядра, а показывают, при каком I (не обязательно целом) ядро было бы наиболее устойчивым среди других изобаров. Энергия же связи может быть теперь представлена в виде

$$E_{\text{св}_T}(A, Z) = E_{\text{св}_T}(A, Z^*) - k_T (Z - Z_T^*)^2 + \delta,$$

где мы ограничились одним членом разложения и учли еще поправку на четность δ (¹⁰), $k_T = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 E_{\text{св}_T}}{\partial Z^2} \right)_{\substack{A=\text{const} \\ Z=Z^*}}$.

В предыдущей формуле коэффициенты можно грубо найти из теоретических соображений (что делалось, например, для нескольких иной формулы энергии связи Я. Френкелем и В. Чердынцевым (⁹) и др.) либо, что еще лучше, путем сравнения с экспериментом, выбрав эмпирически несколько удачных точек (¹¹). Вблизи построенной таким образом кривой будут располагаться в общем все устойчивые ядра. Однако детального сравнения с экспериментом до сих пор не было произведено.

Как показывает сравнение эмпирической кривой I^* с теоретической кривой I_T^* , эти кривые оказываются в общем весьма близкими, но в то же время имеются многочисленные локальные отклонения Z^* от Z_T^* как в ту, так и в другую сторону. Эти отклонения, появляющиеся в строго определенных («критических») местах, происходят вследствие того, что в предыдущей формуле для энергии связи не учтена еще энергия $\tilde{\epsilon}$, связанная с образованием оболочек протонов и нейтронов, появляющихся в строго определенных местах (при определенных Z и N):

$$\tilde{\epsilon} = \sum \tilde{\epsilon}_i (Z_{\text{крит}}, N_{\text{крит}}),$$

причем так как $\tilde{\epsilon}$ функция периодическая (в смысле ядерной периодичности), то, кроме местных изгибов кривой Z^* , должен периодически изменяться коэффициент k :

$$k = k_T - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\epsilon}}{\partial Z^2} \right)_{\substack{A=\text{const} \\ Z=Z^*}} = k_T + \tilde{k}.$$

Из предыдущего следует, что в пределах проявления одной оболочки, там, где будет достигаться $\max |Z^* - Z_T^*|$, $\tilde{k} \leq 0$, и $\tilde{k}$ бу

дет максимально при $|Z^* - Z_T^*| \approx 0$. Это, действительно, имеет место, как показывает эмпирическое рассмотрение.

При построении эмпирической кривой Z^* использовались полные энергии β -переходов нечетных (по A) ядер. Везде, где это было возможно, выбирались для однозначности энергии β -переходов изобаров, ближайших к стабильному изобару (12). В некоторых случаях использовались разности энергий изобаров, оцененные по периоду K -захвата, — там, где не имелось других данных по энергиям β -переходов. В нескольких случаях k и Z^* были вычислены и для ядер других четностей. Эмпирически было найдено, что формула для I^* может быть представлена в виде

$$I^* = 0,00994 A^{5/4} - 0,0372 A - 0,0000878 A^{7/4} + \Delta(A),$$

где $\Delta(A) = \sum_i a_i \exp\{-b_i(A - A_{\text{крит}i})\}$, причем, например, для $A_{\text{крит}2} = 17$ $a_2 = +0,28$, $b_2 = 0,43$. $\Delta(A)$ характеризует горбы и провалы кривой I^* , что, повидимому, связано с образованием ядерных структур. Ха-

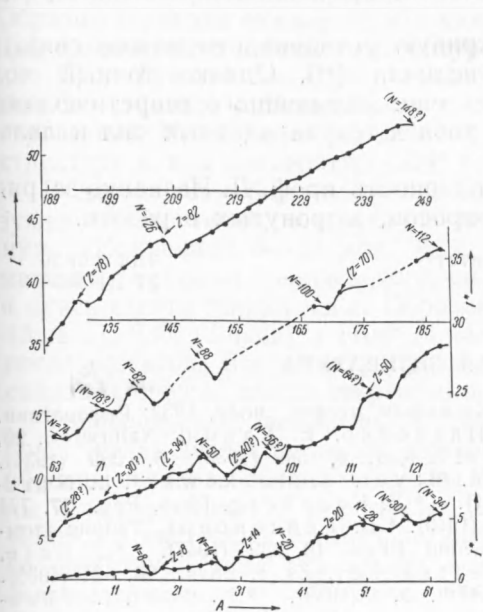


Рис. 1

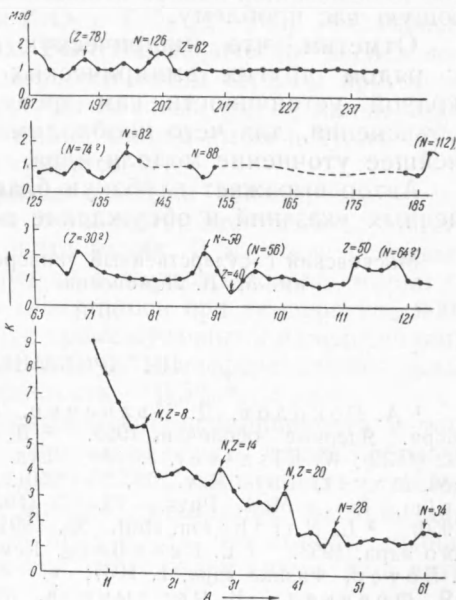


Рис. 2

актерно, что в таких местах кривая Z^* (либо I^*) идет параллельно либо линии $Z = \text{const}$, либо $N = \text{const}$, что говорит, согласно предыдущему, о том, что в этих местах относительно велики энергии присоединения, соответственно, нейтронов или протонов. Это можно связать с заполнением протонных и нейтронных оболочек.

В соответствии с этим нейтронная оболочка будет иметь место там, где

$$\frac{\Delta Z^*}{\Delta A} < 0, \quad \frac{\Delta^2 Z^*}{\Delta A^2} = 0, \quad \text{или } I^* || N = N_{\text{крит}i}.$$

Протонная оболочка будет иметь место там, где

$$\frac{\Delta Z^*}{\Delta A} > 0, \quad \frac{\Delta^2 Z^*}{\Delta A^2} = 0, \quad \text{или } I^* || Z = Z_{\text{крит}i}.$$

В соответствии с этим правилом можно считать магическими числа:

для протонов: 2, 8, 14, 20, 28, 34, 50, 78, 74, 70, 82, (30?), (40)?;

для нейтронов: 2, 8, 14, 20, 28, 34, 50, 74, 82, 88, 100, 112, 126, (148?), (56?), (64?), (30?), где общепринятые или «главные» магические числа выделены жирным шрифтом. Другие приведенные числа можно считать субмагическими, соответствующими окончанию подоболочек. Если использовать схему Майер⁽³⁾, то можно думать, что число 14 соответствует окончанию $3d_{1/2}$ подоболочки, число 28 — подоболочке $4f_{1/2}$, 34 — подоболочке $4f_{1/2}$, 40 — состоянию $3p$; 56? — состоянию $4d_{1/2}$; 64 — состоянию $5g_{7/2}$; 70 — $3s$; 88 — $5f_{1/2}$, 100 — $6h_{1/2}$; 112 — $4p$. Числа 30?, 74? и 78 не удается привести в соответствие с заполнением каких-либо подоболочек в обычной схеме Майер; однако возможно, что порядок заполнения уровней подоболочек (которые между собой весьма близки) может несколько меняться (аналогично атомным системам) в зависимости от соотношения между числом нейтронов и протонов.

Кроме того, не исключена роль поверхности и коллективных взаимодействий, дискутируемых в настоящее время⁽¹³⁾ и которые могли бы выяснить ряд вопросов и, возможно, пролить свет и на интересующую нас проблему.

Отметим, что эмпирическую кривую устойчивости можно связать с рядом других эмпирических величин⁽¹⁴⁾. Однако точный ход кривой устойчивости сам требует еще дальнейшего теоретического объяснения, для чего необходима точная теория ядерных сил и дальнейшее уточнение модели ядра.

Автор выражает глубокую благодарность проф. Д. Иваненко за ряд ценных указаний и обсуждение вопросов, затронутых в работе.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
27 III 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Соколов, Д. Иваненко, Квантовая теория поля, 1952; Реферативн. сборн. Ядерные оболочки, 1953. ² Д. Иваненко, Е. Гапон, Naturwiss., 20, 792 (1932); W. Elsasser, J. de Phys. et le Rad., 4, 549 (1933); 5, 389 (1934). ³ M. Mayer, Phys. Rev., 78, 16 (1950); M. Mayer, S. Mozkowskii, L. Nordheim, Rev. Mod. Phys., 23, 315 (1951). ⁴ E. Feenberg, Phys. Rev., 77, 771 (1950). ⁵ L. Nordheim, ibid., 75, 1894 (1949). ⁶ В. Гейзенберг, Теория атомного ядра, 1953. ⁷ E. Feenberg, Rev. Mod. Phys., 19, 239 (1947). ⁸ Г. Бете, Р. Бечер, Физика ядра, I, 1937; v. Weizsäcker, Zs. f. Phys., 96, 431 (1935). ⁹ Я. Френкель, В. Чердынцев, ЖЭТФ, 9, 1 (1939). ¹⁰ N. Bohr, J. Wheeler, Phys. Rev., 56, 426 (1939). ¹¹ I. Curie, J. de Phys. et le Rad., 6, 209 (1945). ¹² G. Seaborg, Rev. Mod. Phys., 25, No. 2 (1953). ¹³ A. Bohr, Phys. Rev., 81, 134 (1951); D. Hill, J. Wheeler, Phys. Rev., 89, 1102 (1953). ¹⁴ Д. Иваненко, Н. Колесников, ДАН, 89, 253 (1953).