

В. А. КРАВЦОВ

## ОБОЛОЧКИ ЛЕГКИХ ЯДЕР И ЭНЕРГИИ СВЯЗИ НУКЛОНОВ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 2 III 1951)

1. В предыдущей работе <sup>(1)</sup> анализ энергий связи нуклонов тяжелых ядер позволил заметить три закономерности для тяжелых ядер. Эти выводы из опытных данных ставят под сомнение современную трактовку независимости построения оболочек протонов и нейтронов внутри ядра. Имеет смысл проверить возможности распространения этих закономерностей на легкие ядра. Для этого используются энергии связи нуклонов легких ядер  $E(Z, N)$ , вычисленные частично из дефектов массы, измеренных масс-спектрометрами, и из измеренных энергий ядерных реакций  $Q$  <sup>(2)</sup>. Тогда по формулам (1) работы <sup>(1)</sup> были вычислены энергии связи нейтронов  $e_n$  и протонов  $e_p$ . Эти энергии связи нуклонов, полученные из опытных данных, для самых легких ядер ( $Z \leq 5$ ) довольно точны, и их погрешности не превышают 0,02 Мэв, но с увеличением атомного номера погрешность быстро растет, достигая при  $Z > 12$  в отдельных случаях 1—2 Мэв. В настоящей работе были использованы значения  $e_n$  и  $e_p$  для ядер с  $Z \leq 20$ .

2. Наибольший интерес представляет проверка для легких ядер первой закономерности предыдущей работы о том, что особо устойчивые оболочки образуются при определенных числах как протонов  $Z_0$ , так и нейтронов  $N_0$ , т. е. для сочетания  $(Z_0, N_0)$ . При этом изменение в отдельности только числа протонов или только числа нейтронов ослабляет связи всех нуклонов.

Первым и наиболее легким особо устойчивым ядром является ядро  $He^4$ , так называемая  $\alpha$ -частица. Построение его можно представить себе двумя путями: дейтрон  $\rightarrow$  тритон  $\rightarrow \alpha$ -частица или дейтерон  $\rightarrow He^3 \rightarrow He^4$ . Энергии связи присоединяемых нуклонов для первого способа последовательно будут: 2,23; 6,26 и 19,74 Мэв; для второго способа: 2,23; 5,50 и 20,50 Мэв. Эти цифры показывают, что наибольшая часть энергии связи  $\alpha$ -частицы, более 70%, приходится на последний нуклон, независимо от того, является ли он протоном (первый случай) или нейтроном (второй случай). Никаких бипротонных или бинейтронных оболочек, как видно по ходу изменений энергий связи, не образуется. Энергия присоединения нуклона к  $\alpha$ -частице, как протона ( $-1,59$  Мэв), так и нейтрона ( $-0,93$  Мэв), отрицательна. Таким образом, первая особо устойчивая ядерная группа или оболочка образуется из 2 протонов и 2 нейтронов (2,2).

Далее образуются весьма устойчивые группы (6,6), (8,8), (10,10), (12,12), (14,14) и т. д. Если судить об устойчивости по разностям энергий связи последнего нуклона в группе и первого или второго нуклонов

вне группы, т. е. по скачку энергии, мы можем сказать, что устойчивость групп убывает с числом нуклонов. Группа (4,4) хотя и имеет очень большой скачок энергии, образует, однако неустойчивое ядро  $\text{Be}^8$ , которое в момент образования распадается на две  $\alpha$ -частицы. Причиной этого является то, что сумма энергий связи двух  $\alpha$ -частиц несколько больше энергии связи  $\text{Be}^8$ . Хотя энергия связи следующего нейтрона мала, всего 1,66 Мэв, он связывает систему, образуя устойчивое ядро  $\text{Be}^9$ .

На рис. 1 представлена зависимость скачка энергии связи нуклонов одного типа от числа нуклонов другого типа. На рис. 1 А даны скачки энергии связи от 6-го к 7-му ( $\Delta e_n$ ) или 8-му ( $\Delta''e_n$ ) нейтрону и от 8-го к 9-му или 10-му нейтрону как функция от числа протонов в ядре  $Z$ . На рис. 1 Б даны скачки энергии связи от 6-го к 7-му или 8-му про-

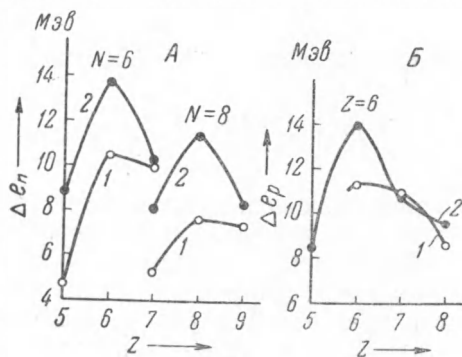


Рис. 1. 1 —  $\Delta''e_n$  или  $\Delta''e_p$ ; 2 —  $\Delta e_n$  или  $\Delta e_p$

тону как функция от числа нейтронов в ядре. Эти графики показывают, что и в легких ядрах существуют не отдельные протонные и нейтронные группы или оболочки, а только общие особо устойчивые системы протонов вместе с нейтронами. Изменение в системе только числа нейтронов или только числа протонов существенно ослабляет связь всех нуклонов системы.

Наличие особо устойчивой ядерной оболочки (20,20) — ядра  $\text{Ca}^{40}$ , впервые отмеченное И. П. Селиновым (3), подтверждается последними измерениями разностей масс ядер и энергий ядерных реакций (4).

Эти опытные данные не обнаруживают существования отдельных оболочек из 20 нейтронов или из 20 протонов, но подтверждают особую устойчивость ядра  $\text{Ca}^{40}$ .

Таким образом, опыт еще раз подтверждает для легких ядер первую закономерность работы (1) и доказывает существование комбинированной протонно-нейтронной оболочки (20,20).

Уменьшение скачка энергии с ростом числа нуклонов является почти равномерным, некоторые изломы кривой позволяют думать о несколько большей устойчивости групп (8,8) и (14,14), но эти изломы настолько незначительны, что их можно приписать и погрешностям экспериментального материала.

3. На рис. 2 представлен график зависимости энергий связи нейтронов устойчивых изотопов от числа протонов, на рис. 3 — график зависимости энергии связи протонов тех же изотопов от числа нейтронов ядре. На обоих графиках выделены энергии четных и нечетных нуклонов. График для нейтронов схож с графиком для протонов; это отверждает, что поведение протонов в ядре качественно схоже с поведением нейтронов.

В среднем энергия четных нуклонов убывает с увеличением числа других нуклонов, что у протонов с ростом числа нейтронов выражено зче. В отличие от тяжелых ядер, у легких ядер существуют резвыраженные колебания энергии связи одного типа нуклонов в зависимости от четности другого типа нуклонов. Амплитуда колебаний больше у энергий нейтронов и убывает с ростом массы ядер. В слабо выраженном виде эти колебания существуют и у тяжелых ядер. Энергии связи одного типа нуклонов с одинаковым номером растут с числом нуклонов другого типа — факт, имевший место и в области тяжелых ядер и поэтому являющийся, вероятно,

универсальным законом для всех ядер с редкими исключениями около замыкающихся оболочек.

Как и в предыдущей работе, для изучения изменений энергий связи нуклонов с ростом числа нуклонов того же типа, для исключения четно-нечетной разности, рассматривались энергии связи только пар нуклонов  $e_{2n}$  и  $e_{2p}$  (см. формулы (2) работы (1)).

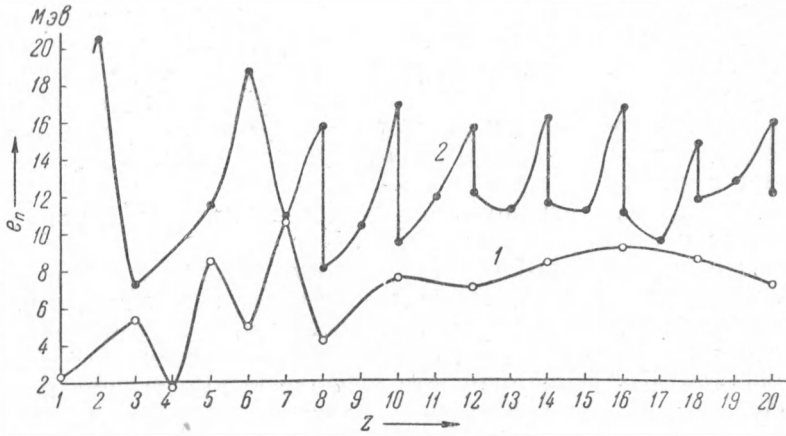


Рис. 2. 1 — нечетные нейтроны, 2 — четные нейтроны

Изучение величин  $e_{2n}$  и  $e_{2p}$  в зависимости от числа нейтронов и, соответственно, от числа протонов в ядре показывает, что энергия

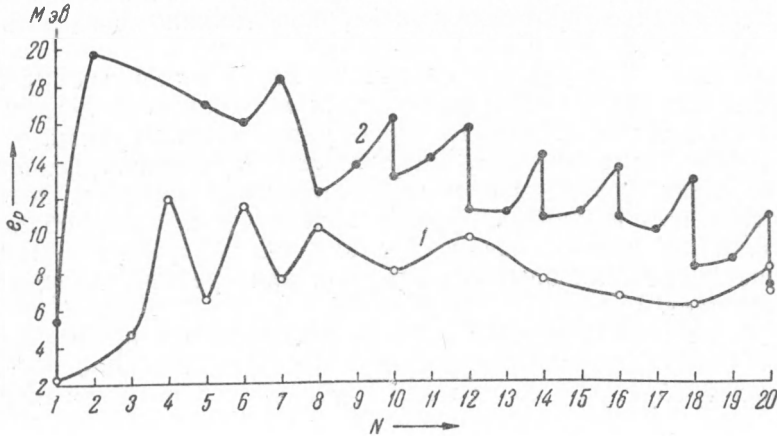


Рис. 3. 1 — нечетные протоны, 2 — четные протоны

связи пар нейтронов при постоянном числе протонов убывает с увеличением числа нейтронов в ядре. Совершенно так же и для протонов оказывается, что энергия связи пар протонов при постоянном числе нейтронов убывает с увеличением числа протонов в ядре. Уменьшение энергии протонов на один протон примерно на 2 Мэв больше, чем у нейтронов. Это падение является наибольшим у самых легких ядер и постепенно убывает с массой ядра.

4. Несмотря на отсутствие соответствующих опытных данных для ядер средних масс, можно считать, что первая закономерность предыдущей работы с небольшой поправкой является универсальной для всех ядер. Более острые максимумы графиков рис. 1 и особая устойчивость ядра  $\text{Ca}^{40}$  говорят, что ослабление связей в особо устойчивых

группах легких ядер происходит от изменения числа одного только типа нуклонов всего на одну частицу, в то время как в тяжелых ядрах для ослабления связей оболочек нужно изменить число нуклонов на 4—5 частиц.

На основании анализа всего опытного материала по энергиям связи легких и тяжелых ядер можно сформулировать следующие универсальные закономерности строения атомных ядер.

1) В ядрах образуются особо устойчивые группы или оболочки из определенного числа  $Z_0$  протонов  $N_0$  нейтронов. Изменение в отдельности только одного числа нейтронов или только числа протонов для легких ядер на одну частицу, для тяжелых на несколько частиц ослабляет связи нуклонов и лишает систему особой устойчивости.

2) Энергия связи пар нейтронов растет с числом протонов в ядре и убывает с числом нейтронов в ядре.

3) Энергия связи пар протонов растет с числом нейтронов в ядре и убывает с числом протонов в ядре.

Вторая и третья опытно установленные закономерности остаются верными во всех случаях, кроме малого числа небольших отклонений, связанных с замыканием групп или оболочек. Эти отклонения столь малы, что их можно объяснить также погрешностями измерений.

Последние две закономерности позволяют думать, что построение ядер обусловлено борьбой противоположных направлений изменений энергий связи нуклонов. Наряду с этим значительную роль здесь будут играть также уже давно известные четно-нечетные колебания энергий связи. Все это хорошо объясняет эмпирическое правило Л. Б. Понизовского<sup>(5)</sup> о том, что достройка ядер производится попеременным прибавлением к ядру протонов и нейтронов или пар протонов и пар нейтронов и т. д. По второй и третьей закономерностям такое чередование протонов и нейтронов должно создавать более устойчивые ядра.

Выводы И. П. Селинова<sup>(6)</sup> о наличии в ядрах гелионных групп также соответствуют второй и третьей закономерностям. В легких ядрах гелионы соответствуют первым особо устойчивым группам. В предыдущей работе была показана возможность образования гелионов и в тяжелых ядрах, правда, с несколько отличным порядком построения их из отдельных нуклонов. Гораздо хуже обстоит дело с объяснением слоев гелионов или оболочек, так как здесь крайне важно иметь более систематически опытный материал для средних ядер, которого пока не хватает.

Безусловно лишь, что все выводы настоящего и предыдущего сообщений говорят о том, что существующее представление об ядерных оболочках требует пересмотра как противоречащее опытным данным.

Ленинградский политехнический институт  
им. М. И. Калинина

Поступило  
21 II 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. А. Кравцов, ДАН, 78, № 1 (1951). <sup>2</sup> Э. В. Шпольский, Атомная физика, 2, 2-е изд., 1950, стр. 682—684; A. Tollestrup, W. Fowler and C. Lauritsen, Phys. Rev., 78, 374 (1950). <sup>3</sup> И. П. Селинов, ЖЭТФ, 4, 666 (1934). <sup>4</sup> W. Low and C. H. Townes, Phys. Rev., 80, 608 (1950). <sup>5</sup> Л. Б. Понизовский, ЖЭТФ, 13, 121 (1943). <sup>6</sup> И. П. Селинов, Приложение в книге Я. И. Френкель «Принципы теории атомных ядер», 1950, стр. 273.