

В. А. КРАВЦОВ

ОБОЛОЧКИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР И ЭНЕРГИИ СВЯЗИ НУКЛОНОВ

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

1. На основании различных данных многие авторы (¹⁻¹⁰) делают выводы о существовании в атомных ядрах определенных оболочек протонов и нейтронов. Американские авторы считают, что нейтронные оболочки образуются в ядрах независимо от протонных оболочек. Против независимого построения оболочек говорит наличие обменных сил притяжения между протонами и нейтронами. Проверить существование оболочек можно путем изучения энергий связи присоединяемых нуклонов.

Используя измеренные энергии α - и β -превращений тяжелых ядер, Вапстра вычислил разности энергий связи ядер изотопов, входящих в радиоактивные ряды (¹¹). Разности энергий связи между ядрами различных радиоактивных рядов вычислены в этой работе по ненадежной, полуэмпирической формуле энергий связи ядер. Этот недочет можно исправить, используя установленные из опыта разности энергий связи ядер изотопов разных радиоактивных рядов (¹²) с использованием измеренных энергий реакций типов (d, p), (d, t), (γ , n) и (n, γ). Это дало возможность исправить таблицы Вапстра. По графикам зависимости энергии K -захвата тяжелых ядер от полупериода (¹³) можно рассчитать изменение энергии ядер, испытывающих K -захват. Это дало возможность дополнить таблицы Вапстра ядрами, связанными с радиоактивными рядами K -захватом. Таким образом были получены относительные энергии связи нуклонов $E(Z, N)$, где Z — атомный номер и N — число нейтронов, более чем для 150 ядер различных изотопов с Z от 80 до 98 и N от 117 до 148. Погрешности в вычисленных энергиях в среднем равны 0,5 Мэв, но в отдельных случаях у ядер, энергии которых вычислены по K -захвату, могут достигать и 1 Мэв. Здесь даны лишь некоторые выводы из таблиц энергий.

2. Энергию присоединения нейтрона $e_n(Z, N)$ и энергию присоединения протона $e_p(Z, N)$ легко вычислить из энергий $E(Z, N)$ по формулам:

$$\begin{aligned} e_n(Z, N) &= E(Z, N) - E(Z, N - 1), \\ e_p(Z, N) &= E(Z, N) - E(Z - 1, N). \end{aligned} \tag{1}$$

Если энергия связи, например, нейтронов e_n не зависит от числа протонов в ядре Z , то это позволило бы рассматривать нейтронные оболочки независимо от протонных.

На рис. 1 А представлен график зависимости энергии нейтрона e_n от числа протонов в ядре Z . Энергии нейтронов с номерами выше

126-го даны лишь для моно- α -радиоактивных и стабильных изотопов. Энергии связи нейтронов e_n при $N \leq 126$ значительно больше и имеют максимум при $Z = 82$. При $N > 126$ энергии e_n четных и нечетных нейтронов растут линейно с увеличением Z до $Z = 92$. При $Z > 92$, т. е. для трансуронов, энергия связи нейтронов начинает убывать.

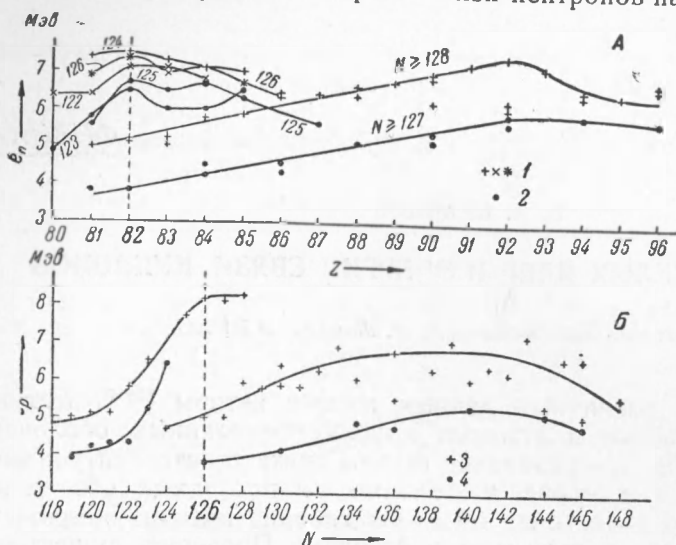


Рис. 1. 1 — четные нейтроны, 2 — нечетные нейтроны, 3 — четные протоны, 4 — нечетные протоны

На рис. 1Б дан график зависимости $e_p = f(N)$. Энергии связи 81-го и 82-го протонов больше остальных. Энергии связи протонов с номером 83 и выше лежат на плавных кривых, разных для четных и нечетных протонов. Отсутствие линейной зависимости e_p , как у e_n на рис. 1А, можно объяснить существованием электростатических сил. Энергия связи протонов e_p

в области трансуронов при $N > 142$ начинает убывать.

Оба графика доказывают наличие ясно выраженных зависимостей вида $e_n = f(Z)$ и $e_p = f(N)$, что уже не позволяет рассматривать протонные оболочки независимо от нейтронных.

3. Последние нуклоны в оболочке имеют энергии связи большие, чем первые нуклоны вне оболочки. Эту разность назовем скачком энергии. Энергия связи четного нуклона больше, чем нечетного, это видно и на графиках рис. 1. Для исключения

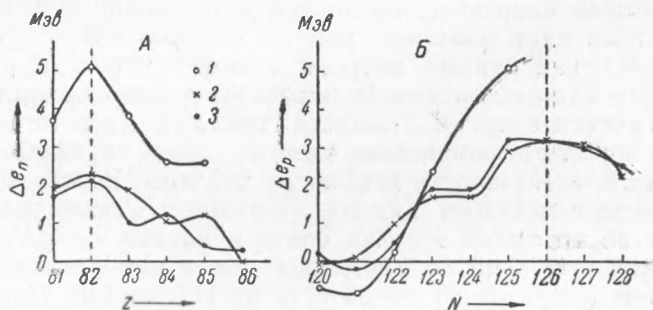


Рис. 2. 1 — Δe_{2n} и Δe_{2p} ; 2 — $\Delta^n e_n$ и $\Delta^n e_p$; 3 — $\Delta' e_n$ и $\Delta' e_p$

четно-нечетных колебаний энергии можно либо вычесть среднюю его величину из скачка, либо рассматривать скачок энергии только между четными нуклонами и, наконец, можно рассматривать скачки энергии между парами одинаковых нуклонов, именно: энергиями добавления к ядру пар нейтронов e_{2n} или пар протонов e_{2p}

$$\begin{aligned} e_{2n}(Z, N) &= e_n(Z, N) + e_n(Z, N-1), \\ e_{2p}(Z, N) &= e_p(Z, N) + e_p(Z-1, N). \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 2А представлены графики зависимости скачка энергии нейтронов в зависимости от числа протонов в ядре. На графике даны три различно вычисленных скачка энергии $\Delta' e_n$, $\Delta^n e_n$ и Δe_{2n} как функции Z , где

$$\Delta' e_n = e_n(Z, 126) - e_n(Z, 127) - \text{средняя четно-нечетная разность}; \quad (3)$$

$$\Delta'' e_n = e_n(Z, 126) - e_n(Z, 128), \quad \Delta e_{2n} = e_{2n}(Z, 126) - e_{2n}(Z, 128). \quad (4)$$

Так же построен график для зависимости скачка энергии протонов у 82-го протона от числа нейтронов в ядре (рис. 2Б).

Из рис. 2А видно, что три кривые имеют максимум при 82 протонах и при $Z = 86$ скачок энергии практически исчезает. На рис. 2Б мы видим, что максимум скачка энергии достигается при $N = 126$ и что при $N \leq 122$ скачка энергии практически нет. Из этих графиков следует, что самостоятельная нейтронная оболочка в 126 нейтронов не существует, она энергетически выгодна лишь если число протонов в ядре незначительно отличается от 82. Совершенно так же оболочка в 82 протона энергетически прочна, если число нейтронов в ядре незначительно отличается от 126. Таким образом, графики рис. 2, состав-

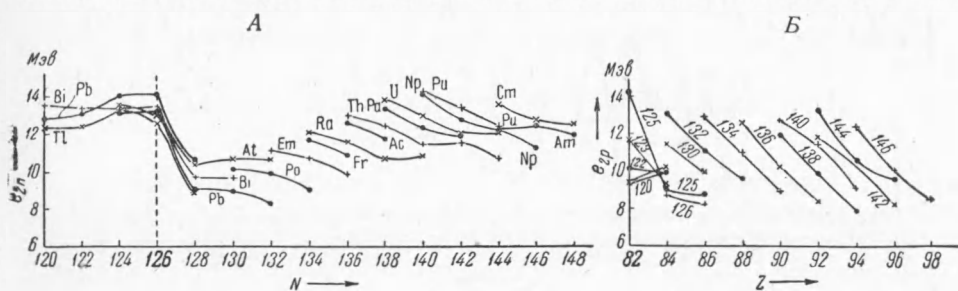


Рис. 3

ленные по опытным данным, приводят к выводу, что в тяжелых ядрах не существует отдельно протонных и отдельно нейтронных оболочек, а есть особо устойчивая система из 82 протонов и 126 нейтронов. Увеличение или уменьшение более чем на 4—5 частиц только одного числа протонов или только одного числа нейтронов ослабляет связи нуклонов и лишает систему особой устойчивости.

4. Если бы оболочки строились из нуклонов одного только типа, энергии связи нуклонов этого типа должны были бы расти с увеличением их числа. Чтобы исключить четно-нечетные колебания, мы будем рассматривать ниже только энергии связи пар нуклонов e_{2n} и e_{2p} .

На рис. 3А представлена зависимость энергии связи пар нейтронов e_{2n} от числа нейтронов в ядре и на рис. 3Б — зависимость энергии связи пар протонов e_{2p} от числа протонов в ядре. Для $N > 126$ энергия связи нейтронов уменьшается с увеличением числа нейтронов в ядре для изотопов одного и того же элемента. Совершенно так же для протонов энергия связи убывает с ростом числа протонов в ядре при том же числе нейтронов. Убывание энергии протонов с ростом числа протонов в среднем в 3 раза больше, чем уменьшение энергии нейтронов с увеличением числа нейтронов, что объясняется электростатическими силами.

5. Из рис. 1—3 следует, что протоны взаимодействуют в ядре с нейтронами. Из сопоставления всех графиков для нейтронов (А) с графиками для протонов (Б) видно, что качественно поведение нейтронов в ядре аналогично поведению протонов. Некоторые количественные различия вполне объясняются силами электростатического отталкивания.

Таким образом, можно считать установленными из опыта следующие три закономерности для тяжелых ядер.

1) В тяжелых ядрах образуется единственная особо устойчивая оболочка из 82 протонов и 126 нейтронов. Изменение в отдельности

только числа нейтронов или только числа протонов более чем на 4—5 частиц ослабляет связи нуклонов и лишает систему особой устойчивости.

2) Энергия связи нуклонов одного типа, добавляемых к ядру сверх оболочки, растет с увеличением в ядре числа нуклонов другого типа. Такой рост продолжается лишь до урана. В области трансуранов энергия нуклонов одного типа убывает с ростом числа нуклонов другого типа.

3) Энергия связи нуклонов убывает с числом одноименных нуклонов в ядре.

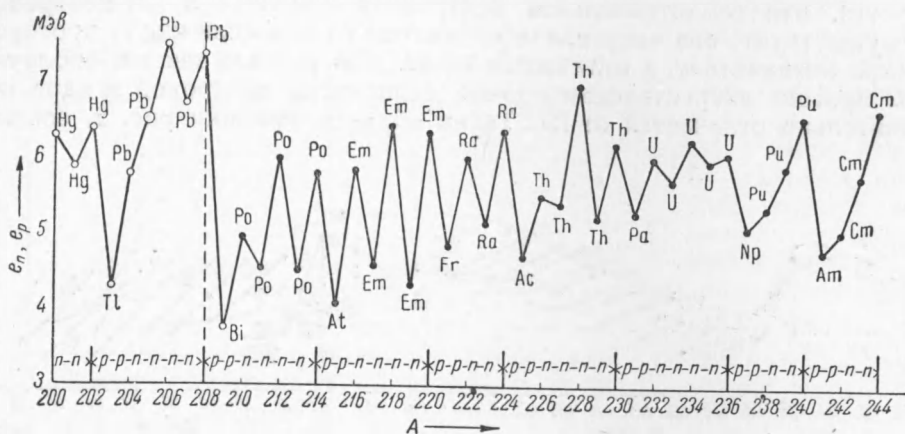


Рис. 4

Отсюда следует, что современная трактовка чисел 20, 50, 82 и 126 вряд ли верна и, в соответствии с законом 1), ее следует пересмотреть. Вероятнее всего, что существуют не отдельные числа устойчивых групп N_0 и Z_0 , а устойчивых комбинаций пар чисел (Z_0, N_0).

Первая правильная попытка построения ядер одновременно из протонов и нейтронов была проведена в работе И. П. Селинова (14).

На рис. 4 представлен график, являющийся продолжением рис. 43 работы И. П. Селинова в области тяжелых ядер. Из рис. 4 можно обнаружить наличие гелионных групп и в тяжелых ядрах. В отличие от высказываний Селинова, в тяжелых ядрах порядок построения гелионов иной: не (pprr), а (ppnn), т. е. сначала присоединяются протоны, а после них нейтроны. Это легко объяснить тем, что энергии протонов e_p из-за электростатических сил меньше энергии нейтронов e_n .

Ленинградский политехнический институт
им. М. И. Калинина

Поступило
21 II 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. Elsasser, Journ. d. Phys., 5, 389 (1934). ² И. П. Селинов, ЖЭТФ, 4, 666 (1934). ³ М. А. Левитская, ДАН, 55, 399 (1947). ⁴ М. Г. Мауер, Phys. Rev., 74, 235 (1948). ⁵ L. Nordheim, Phys. Rev., 75, 1894 (1949). ⁶ E. Feenberg and K. Hammasck, Phys. Rev., 75, 1877 (1949). ⁷ С. А. Шукарев, ЖОХ, 19, 3, 373 и 380 (1948). ⁸ А. П. Знойко, ДАН, 68, 1021 (1949). ⁹ Д. Иваненко и В. Родичев, ДАН, 70, 605 (1950). ¹⁰ Д. Иваненко и А. Соколов, ДАН, 74, 33 (1950). ¹¹ А. Н. Wapstra, Physica, 16, 33 (1950). ¹² J. Huizenga, L. Mag-nusson, L. Simpson and G. Winslow, Phys. Rev., 79, 908 (1950). ¹³ S. G. Thom-son, Phys. Rev., 76, 319 (1949). ¹⁴ И. П. Селинов, Приложение к книге Я. И. Френкеля, Принципы теории атомных ядер, 1950, стр. 273.