

539.143.2

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

К ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ «ПОГРАНИЧНЫХ» ЛЕГКИХ ЯДЕР

В настоящее время исследования в области легких ядер представляют собой отдельный своеобразный раздел ядерной физики. В легких ядрах слишком мало нуклонов, чтобы для описания этих ядер были применимы статистические методы, и добавление к легкому ядру всего лишь одного нуклона может привести к существенному изменению его свойств.

Так как нуклонов в легких ядрах мало, здесь сравнительно легко достигаются в эксперименте границы ядерной стабильности. При этом, хотя абсолютная разница между числом протонов и нейтронов в «пограничных» легких ядрах не очень велика, соотношение между составляющими ядро протонами и нейтронами оказывается необычным. Например, у изотопа ${}^8\text{He}$ нейтронов в три раза больше, чем протонов, в то время как для самых тяжелых ядер это отношение не превышает 1,6 : 1. Поэтому свойства ядер вблизи границ ядерной стабильности дают уникальную возможность проверки ядерных теорий, основой которых служит рассмотрение свойств обычных ядер. Кроме того, легкие ядра, лежащие вблизи границ ядерной стабильности, характеризуются необычными видами распада. Помимо самостоятельного ядернофизического интереса свойства легких ядер очень важны для такого быстрого развивающегося раздела науки, как астрофизика. Достаточно напомнить, что, например, Солнце содержит 98% водорода и гелия и только 2% более тяжелых элементов. Солнечная энергия черпается в основном за счет реакций «водородного цикла» $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$, $D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$, ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$, т. е. реакций между самыми легкими ядрами. Такое же преобладание водорода и гелия характерно для всей Галактики. Эта ситуация просто объясняется отсутствием устойчивого ядра с массой 5 и ядерной неустойчивостью ${}^8\text{Be}$. Однако для детального описания современного распространения элементов и эволюции Вселенной необходимы обширные сведения о реакциях между легкими ядрами, анализ их стабильности и видов распадов. Наконец, на реакциях между легкими ядрами $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$, $D + D \rightarrow T + p$ и $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ основаны надежды на термоядерную энергию. Регенерация трития требует проведения процессов типа $n + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$, $n + {}^6\text{Li} \rightarrow T + {}^4\text{He}$ и $n + {}^7\text{Li} \rightarrow n + {}^4\text{He} + T$. Нельзя сказать, что значение этой области ядерной физики было понято сразу, однако еще в начале 60-х годов были сделаны основные прогнозы относительно границы ядерной стабильности и разработаны методы оценки масс «пограничных» ядер. Интересно, что эти прогнозы, потребовавшие немало фантазии и нетривиального подхода, намного опередили постановку соответствующих экспериментов, причем основной вклад в решение указанных вопросов внесли советские физики.

В основу рассмотрения и предсказания свойств легких ядер легли представления об изотопической инвариантности ядерных сил, особенно оправданные именно в случае легких ядер, а также общие закономерности взаимодействия слабосвязанных нуклонов в ядрах.

В случае легких ядер, где кулоновское взаимодействие между протонами в ядре можно рассматривать как малое возмущение по сравнению с изотопически-инвариантным ядерным взаимодействием, полная энергия ядра (Z, N) разбивается на сумму трех слагаемых:

$$c^2 M_N^A = E^A(T) + E_K(Z, N) + c^2(Nm_n + Zm_p), \quad (1)$$

где m_n и m_p — массы нейтрона и протона соответственно, E_K — энергия кулоновского взаимодействия между протонами в ядре, а $E^A(T)$ — та часть энергии связи, которая обусловлена ядерным, изотопически-инвариантным взаимодействием между нуклонами.

Благодаря зарядовой инвариантности ядерных сил $E^A(T)$ зависит только от A (полного числа нуклонов в ядре) и от изоспина T основного состояния рассматриваемого ядра *). Эта часть полной энергии не меняется при переходе от ядра (Z_1, N_1) к изотопически-сопряженному ядру (N_1, Z_1) , например, при переходе от ядра ^{14}C к ядру ^{14}O . Последний член в (1) известен. Ему соответствует масс-дефект в шкале $^{12}\text{C}(N \cdot 8,071 + Z \cdot 7,288)$ МэВ. Второй член в формуле для массы — кулоновская энергия — в настоящее время также известен достаточно хорошо.

Рассчитав эти два слагаемых, предсказывается разница масс изотопически-сопряженных ядер, и, зная массу одного из них, легко оценить устойчивость другого.

Недавно безвременно погибший талантливый советский физик А. И. Базь первый¹, исходя из подобного соотношения, основанного на изотопической инвариантности ядерных сил и известных экспериментальных данных о массах нейтроноизбыточных ядер, предсказал ядерную устойчивость ряда нейтронодефицитных ядер. В дальнейшем он рассматривал возможность существования чисто нейтронных ядер при различных нуклон-нуклонных потенциалах, по-видимому, такие ядра не существуют.

Наиболее полное развитие идеи изотопинвариантности получили в работах Гольданского²⁻⁴. В. И. Гольданский предсказал свойства многих десятков нейтронодефицитных изотопов. Рассмотрение свойств этих изотопов позволило ему предсказать новое (пока еще экспериментально не обнаруженное явление — радиоактивность с испусканием двух протонов). Полученная В. И. Гольданским формула для вычисления масс ядер^{3,4} предвосхитила более поздний версии Гарви—Кельсона, В. И. Гольданский предсказал, что при соответствующих Z для ядер с проекцией изоспина $T_Z = -3/2$ (равно как и для других ядер с $Z > N$) будет преобладать сверхразрешенный β^+ -распад, ведущий к испусканию протонов из аналогового состояния дочерних ядер⁵. В дальнейшем этот эффект наблюдали во многих экспериментальных работах.

Очень большой вклад в исследование необычных свойств легких ядер внес Я. Б. Зельдович. Развивая представления оболочечной модели, он предсказал ядерную устойчивость десятков нейтроноизбыточных ядер⁶. Я. Б. Зельдович первый указал на ядерную устойчивость изотопа ^8He и оценил его массу. (Вскоре после этой публикации Я. Б. Зельдовича появилась работа Гольданского⁷, которая позволила уточнить массу ^8He и моды распада этого самого тяжелого изотопа гелия). Экспериментально этот изотоп был обнаружен в 1961 г. Ложкиным и Римским-Корсаковым⁸. Заметим, что ядерная устойчивость ядра ^6He указывает на отсутствие динейтрона (^2n) с энергией связи больше 0,6 МэВ (иначе ^6He распадался бы на ^4He и ^2n). Однако этот результат тривиален, поскольку существуют обширные экспериментальные данные о взаимодействии двух нуклонов в различных изотопических состояниях. Аналогично существование ^8He исключает возможность ^4n с энергией связи более 3,2 МэВ, что нетривиально. Также впервые Я. Б. Зельдович рассмотрел вопрос о существовании чисто нейтронных ядер⁶ и указал на возможность поиска и исследования состояний с большим изоспином в резонансных реакциях, запрещенных законом сохранения изоспина⁹. Опираясь на свойства таких состояний, можно было предсказать свойства основных состояний других ядер, лежащих вблизи от границы стабильности. В настоящее время этот метод стал основным для детального исследования состояний с большим изоспином в резонансных реакциях. Эти три автора (А. И. Б., В. И. Г. и Я. Б. З.) опубликовали несколько обзоров в УФН, которые отражают динамику развития этого направления. Последний обзор² (совместно с В. З. Гольдбергом) вышел отдельной монографией в 1972 г. В частности, в этой книге указывается на возможность существования такого необычного изотопа водорода как ^7H . Ранее, до обнаружения ^8He , предсказывалась неустойчивость ^7H . Такое заключение было сделано на основании нуклонной нестабильности ^5H и систематики последовательного уменьшения энергий связи избыточных пар нейтронов у известных более тяжелых изотопов, обогащенных нейтронами.

Поскольку теперь известно, что изотоп ^8He связан сильнее, чем ^6He , вопрос о ядре H^7 был рассмотрен более подробно; окончательное решение, однако, не может быть получено без дальнейших экспериментов.

Наконец, следует указать на важные работы П. Э. Немировского, посвященные проблеме устойчивости легких «пограничных» ядер, первая из которых¹⁰, была опубликована в 1959 г.

В этих работах с помощью найденного автором потенциала, учитывающего изотопический эффект, были оценены границы нейтроноизбыточных ядер. Хотя такой подход более справедлив для средних ядер, расчеты П. Э. Немировского для ряда легких ядер дали значения энергий связи более точные, чем расчеты Гарви—Кельсона.

Большую стимулирующую роль сыграли ранние работы Б. С. Джелепова¹¹ и Карнаухова¹², посвященные анализу свойств протонной радиоактивности и перспективам ее обнаружения среди легких ядер.

*) Напомним, что наименьшее значение T для данного ядра равно $T_{\min} = |(N - Z)/2|$ и соответствует, как правило, основному, т. е. наиболее устойчивому состоянию ядра.

Очень большой вклад в исследования легких экзотических ядер (помимо широко-известных исследований в области очень тяжелых) внесла лаборатория Г. Н. Флерова в Дубне. Здесь впервые наблюдали запаздывающие протоны 13 и с помощью оригинальной методики группа В. В. Волкова обнаружила целый ряд нейтронно-избыточных изотопов легких ядер (см. напр. 14).

Публикуемый в этом номере журнала перевод статьи известных американских физиков Д. Черни и А. М. Посканцера вводит читателя в мир удивительных превращений легких экзотических ядер. Эта статья написана очень популярно для журнала «Scientific American» и отражает в основном результаты американских ученых.

В дополнение к этому материалу следует указать на совсем свежую работу Азума и др., впервые наблюдавших запаздывающее испускание двух нейтронов, сопровождающее β -распад ядра ^{11}Li 15 . На возможность такого процесса впервые указал Гольданский 16 .

Заметим, что при распаде ^{11}Li энергетически возможны пока ненаблюдавшиеся экспериментально каналы реакции $^{11}\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He} + {}^4\text{He} + n$ и $^{11}\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + 3n$. Последний процесс приводит к одновременному испусканию трех нейтронов и может идти прямо или через образование промежуточного ядра ${}^8\text{Be}$ неустойчивого по отношению к распаду на две α -частицы.

Автор благодарен Я. Б. Зельдовичу за замечания, сделанные при чтении рукописи.

В. З. Гольдберг

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Базь А. И.— АЭ, 1959, т. 6, с. 571.
2. Базь А. И., Гольданский В. И., Гольдберг В. З., Зельдович Я. Б. Легкие и промежуточные ядра вблизи от границ стабильности.— М.: Наука, 1972.
3. Гольданский В. И.— ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 497.
4. Гольданский В. И.— Nucl. Phys., 1960, т. 19, с. 482.
5. Гольданский В. И.— ДАН СССР, 1962, т. 146, с. 1309.
6. Зельдович Я. Б.— ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 1123.
7. Гольданский В. И.— Ibid., с. 1637.
8. Ложкин О. В., Римский-Корсаков А. А.— ЖЭТФ, 1961, т. 40, с. 1519.
9. Зельдович Я. Б.— ЖЭТФ, 1960, т. 38, с. 278.
10. Немировский П. Э.— ЖЭТФ, 1959, т. 36, с. 889.
11. Дзелепов Б. С.— Изв. АН СССР, Сер. физ., 1951, т. 15, с. 496.
12. Карнаухов В. А.— В кн. Материалы конференции по ядерным реакциям с многозарядными ионами (март 1958 г.).— Дубна: ОИЯИ. Р-374, 1959,— С. 71.
13. Карнаухов В. А., Тер-Акопян Г. М., Субботин В. Г. Препринт ОИЯИ Р-1072, —Дубна, 1962.
14. Артюх А. Г. и др.— В кн. Международная конференция по физике тяжелых ионов.— Дубна, 1971.— С. 193.
15. Azuma R. E. et al.— Phys. Rev. Lett., 1979, v. 43, p. 1652.