

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

539.143

ЯДРА С ИЗБЫТКОМ НЕЙТРОНОВ

Атомные ядра, содержащие значительно больше нейтронов, чем стабильные ядра, известны на Земле, несомненно, существуют в природе и играют важную роль в процессах эволюции звезд и ядерно-химических процессах синтеза элементов. По современным представлениям, звезды, содержащие основную массу вещества вселенной, эволюционируют путем перехода из менее плотных состояний в состояния с возрастающей плотностью. При этом водород, составляющий первоначально основную массу звезды, выгорает, превращаясь в более тяжелые элементы, т. е. свободные протоны превращаются в связанные нейтроны.

Увеличение плотности звезды приводит ее в состояние с вырожденным электронным газом, фермиевская граничная энергия которого растет. Возрастание фермиевской энергии смещает полосу устойчивости ядер из области, известной для ядер, распространенных на Земле, в область все большего избытка нейтронов. Нейтронно-избыточные ядра, бывшие β -активными на Земле, становятся стабильными в недрах звезды с вырожденным электронным газом. Их распад запрещен принципом Паули, если фермиевская энергия газа превосходит энергию распада этих ядер. Поэтому уплотнение звезды в процессе эволюции ведет к ее нейтронизации, т. е. превращению все большей доли протонов в нейтроны. Значительная часть звезд переходит в состояние, известные под названием нейтронных звезд, в которых практически все протоны превратились в нейтроны.

На пути возрастающей нейтронизации в составе звезды, несомненно, образуются различные нейтронно-избыточные ядра. Их распространенность в звезде определяется средним для данного состояния значением отношения N/Z числа нейтронов к числу протонов и условиями термодинамического равновесия. Наиболее распространенными при низких температурах будут ядра с наибольшей для данного отношения N/Z энергией связи. И, очевидно, последними в этой истории нейтронизации звезды сложными ядрами, существующими перед переходом в чисто нейтронное состояние, будут ядра с наибольшим отношением N/Z в связанных состояниях.

Какие же ядра имеют связанные состояния при наибольшем отношении N/Z ? Ответить с речительством на этот вопрос в настоящее время невозможно. Но с большой вероятностью можно назвать недавно открытое ядро He^8 . Его отношение $N/Z=3$, по-видимому, рекордно для ядер в связанном (ядерными силами) состоянии. Конечно, у нейтронных звезд N/Z значительно больше, но они связаны гравитационными, а не ядерными силами. Анализ энергии чисто нейтронного вещества без гравитации проводился в нескольких теоретических работах ¹⁻⁵. Хотя количественно результаты этих работ разноречивы, по все они показывают, что нейтронный газ имеет положительную энергию, монотонно убывающую с уменьшением плотности. Необходимого для существования жидкой капли минимума энергии, по-видимому, не существует.

Граница устойчивости ядер в области нейтронного избытка (граница положительных значений энергии связи нейтрона) обсуждалась неоднократно ^{1, 6-8}. Камерон в 1957 г. выпустил таблицы масс ядер ⁷, рассчитанные по полумпирическим формулам, которые широко используются для оценок масс неизвестных ядер. Но в области большого избытка нейтронов эти таблицы, по-видимому, неверны. В 1959 г. Камерон, анализируя образование трансурановых элементов при ядерном взрыве, нашел ⁹, что энергия связи нейтрона убывает с увеличением N/Z медленнее, чем дано в его таблицах 1957 г. Недавно в работе Камерона и Элкина ¹⁰ проведена новая ревизия полумпирических формул масс ядер и даны два новых варианта таблиц масс. Один из них рассчитан по формуле с экспоненциальной зависимостью изотопического члена энергии от $(A - 2Z)$. При такой зависимости энергия связи нейтрона всегда положительна и границы устойчивости не существует. Этот вариант расходится с расчетами чисто нейтронного газа и, по-видимому, не соответствует истине. Граница устойчивости

должна существовать. Но где она, неизвестно. Если она не достигает значений $N/Z=3$, то ядром с наибольшим относительным избытком нейтронов оказывается He^8 .

Для легких ядер полуэмпирические формулы масс практически совсем неприменимы, их массы и связи меняются более нерегулярно, чем у средних и тяжелых ядер. Для предсказания масс неизвестных легких ядер использовались менее общие эмпирические закономерности. В одной из работ этого типа Зельдович¹, пытаясь уточнить границы устойчивости легких ядер с учетом эффектов оболочек и спаривания нуклонов, предсказал существование нескольких нейтронно-избыточных легких ядер, в том числе ядра He^8 . Затем Гольданский¹¹ поддержал это предсказание, основываясь на рассмотрении возбужденных уровней ядра Li^7 . В настоящее время проведена уже серия опытов, доказывающих существование He^8 и подтверждающих справедливость предсказания.

Первое наблюдение He^8 сделано в 1961 г. Ложкиным и Римским-Корсаковым¹². В ядерной эмульсии, облученной очень быстрыми протонами, они наблюдали характерные Т-образные распады ядер Li^8 в конце следов относительно малой плотности. Для объяснения таких наблюдений они предположили, что следы малой плотности образованы не Li^8 , а He^8 и что в конце следа до распада $\text{Li}^8 \rightarrow 2\alpha$ происходит распад $\text{He}^8 \rightarrow \text{Li}^8$. По-видимому, это предположение вполне основательно и достоверно и нет оснований оспаривать первенство Ложкина и Римского-Корсакова в наблюдении He^8 , хотя их наблюдение в свое время не могло рассматриваться как доказательство существования He^8 .

В 1963 г. Нефкенс¹³ также сообщил о наблюдении He^8 . Но, учитывая предыдущее поспешное и ошибочное «открытие» Нефкенсом ядра He^8 , его сообщение трудно было считать положительным свидетельством существования He^8 . Действительно, последующие опыты опровергли и период, указанный Нефкенсом для He^8 , и границу β -спектра, следовательно, снова показали несостоятельность Нефкенса.

Сильной поддержкой предсказания существования He^8 была работа Детраза и др.¹⁴, в которой доказано, что уровень Li^7 с энергией возбуждения 11, 13 $M\text{эв}$ характеризуется изоспином $T = 3/2$. Это подтвердило соображения Гольданского, и уточненные его выкладки привело к предсказанию следующих пределов масс-дефекта ΔHe^8 :

$$31,6 M\text{эв} < \Delta (\text{He}^8) < 32,4 M\text{эв}$$

и энергии распада на уровень 0,98 $M\text{эв}$ Li^8 от 9,7 до 10,5 $M\text{эв}$ ($10,1 \pm 0,4 M\text{эв}$).

Второе непосредственное наблюдение He^8 сделано в работе Ветстона и Томаса¹⁵. С помощью двумерного анализатора они изучали легкие продукты спонтанного деления Cf^{252} . Каждому сорту легких ядер на диаграмме $dE/dx - E$ соответствовала своя полоса. Наряду с хорошо известными α -частицами они зарегистрировали неизвестные до тех пор в качестве продуктов деления ядра He^6 и, кроме того, получили около 10 отсчетов в полосе, соответствующей He^8 .

В аналогичном опыте Черны и др.¹⁷ получили более определенные результаты наблюдений He^8 , доказывающие появление его в качестве продукта спонтанного деления Cf^{252} .

Распад He^8 наблюден в опытах Посканзера и др.¹⁶. Они получали He^8 , бомбардируя протонами с энергией 2,2 $G\text{эв}$ мишени из пористого пластика или ваты. Мишень промывалась газом, который после прохождения двух фильтрующих ловушек поступал в измерительные камеры. В газе была обнаружена новая активность с периодом 122 ± 2 мсек , которая и приписана распаду He^8 . Были зарегистрированы β -частицы, γ -кванты $0,99 \pm 0,02 M\text{эв}$ и запаздывающие нейтроны, испускаемые с этим периодом. Гамма-кванты испускаются при переходе Li^8 в основное состояние из первого возбужденного состояния $1+$ с энергией 0,975 $M\text{эв}$. На этот уровень происходит разрешенный распад He^8 из состояния 0^+ (предполагаемое основное состояние четно-четного ядра). Запаздывающие нейтроны испускаются после β -распада He^8 на уровне Li^8 с энергией $> 2 M\text{эв}$.

В опытах найдено, что вероятность испускания запаздывающих нейтронов составляет 12%.

Масса ядра He^8 определена в опытах Черны и др.¹⁷. При помощи телескопа полупроводниковых счетчиков они измерили энергию ядер He^8 , образующихся в реакции $\text{Mg}^{26}(\alpha, \text{He}^8) \text{Mg}^{22}$ при бомбардировке мишени из Mg^{26} α -частицами с энергией около 80 $M\text{эв}$. Предварительно ими же была определена в реакции $\text{Mg}^{24}(p, T)\text{Mg}^{22}$ масса ядра Mg^{22} . В шкале S^{12} масс-дефект Mg^{22} оказался равным $-0,38 \pm 0,55 M\text{эв}$.

Сечение подхвата четырех нейтронов в реакции (α, He^8) очень мало, поэтому искоемые ядра He^8 появлялись на большом фоне других частиц и случайных совпадений, вызванных продуктами попутных, более вероятных реакций α -частиц в мишени и ее окрестностях. Поэтому в схеме анализа продуктов реакций использован не один детектор dE/dx , а два, т. е. двойной контроль по соотношению $dE/dx - E$ вместо одностороннего. Зарегистрировано небольшое число (около 30) ядер He^8 , но в их энергетическом спектре явно обнаруживаются две группы. Одна из них соответствует основному состоянию конечного ядра Mg^{22} , другая — возбужденному, с энергией 1,22 $M\text{эв}$.

По энергии группы основного состояния найдена величина масс-дефекта He^8 , равная $31,65 \pm 0,12 \text{ Мэв}$ (в шкале C^{12}), хорошо согласующаяся с предсказанием Гольданского. Из этой величины следует, что связь пары нейтронов в He^8 равна $2,1 \text{ Мэв}$, а четверки нейтронов — $3,4 \text{ Мэв}$. Связь пары нейтронов в ядре He^8 равна $0,96 \text{ Мэв}$, т. е. вдвое меньше, чем в He^3 . При такой тенденции не исключена возможность, что следующая пара нейтронов, заканчивающая застройку p -оболочки, тоже будет иметь положительную энергию связи и, следовательно, существует еще более тяжелый изотоп He^{10} с магическим числом нейтронов $N = 8$ и отношением $N/Z = 4$. Правда, существующие оценки массы не дают связанного состояния He^{10} ¹⁹, ²⁰.

Если He^{10} не имеет связанного состояния, то He^8 , по-видимому, имеет рекордно большое отношение $N/Z = 3$, так как кратные He^8 ядра Be^{16} , C^{24} , O^{32} и т. д., по существующим оценкам, лежат за пределами устойчивости. Принципиально в сильно нейтронизированной звезде с вырожденным электронным газом возможно существование больших количеств He^8 . Снятие электронного вырождения разрешает распад $\text{He}^8 \rightarrow \text{Li}^8 \rightarrow 2\alpha$, при котором выделяется около 3 Мэв на нуклон, приблизительно вчетверо больше, чем при распаде свободных нейтронов. Эти «взрывные» свойства He^8 могут представлять интерес для некоторых астрофизических явлений.

Для ядерной физики He^8 интересен, как легчайшее ядро с изоспином $T = 2$. Пользуясь им в опытах, подобных ¹⁷, можно вести спектрометрические исследования ядер, отличающихся от ядер мишени на 4 и 5 нейтронов. Для этого кроме реакции (α , He^8) можно использовать реакцию (He^3 , He^8), в которой подхватывается 5 нейтронов. С другой стороны, столкновения He^8 с другим ядром будут с большой вероятностью приводить к обратной реакции (He^8 , α) передачи четырех нейтронов. Несмотря на трудности получения He^8 , эта реакция может оказаться полезной для исследований нейтронно-избыточных ядер.

Н. А. Власов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, ЖЭТФ 38, 1123 (1960).
2. E. E. Salpeter, Ann. Phys. 11, 393 (1960).
3. K. A. Brueckner, J. L. Gammet, J. T. Kubis, Phys. Rev. 118, 1095 (1960).
4. P. C. Sood, S. A. Moszkowski, Nucl. Phys. 21, 582 (1960).
5. J. S. Levinger, L. M. Simmons, Phys. Rev. 124, 916 (1961).
6. И. Э. Немировский, ЖЭТФ 36, 883 (1959).
7. A. G. W. Cameron, Canad. J. Phys. (1957).
8. P. A. Seeger, Nucl. Phys. 25, 1 (1961).
9. A. G. W. Cameron, Canad. J. Phys. 37, 322 (1959).
10. A. G. W. Cameron, R. M. Elkin, Canad. J. Phys. 43, 1288 (1965).
11. В. И. Гольданский, ЖЭТФ 38, 1637 (1960).
12. О. В. Ложкин, А. А. Римский-Корсаков, ЖЭТФ 40, 1519 (1961).
13. B. M. K. Nefkens, Phys. Rev. Letts. 10, 243 (1963).
14. C. Detraz, J. Cerny, R. H. Pehl, Phys. Rev. Letts. 14, 708 (1965).
15. S. L. Whetstone, T. D. Thomas, Phys. Rev. Letts. 15, 198 (1965).
16. A. M. Poskanzer, R. A. Esterlund, R. McPherson, Phys. Rev. Letts. 15, 1030 (1965).
17. J. Cerny et al., Phys. Rev. Letts. 16, 469 (1966).
18. А. Н. Базь, В. И. Гольданский, Я. Б. Зельдович, УФН 85, 445 (1965).
19. G. T. Garvey, J. Kelson, Phys. Rev. Letts. 16, 197 (1966).
20. J. Jänecke, Nucl. Phys. 73, 97 (1965).