

02;12

## Определение значений периода полураспада для атомарного трития и свободного тритона с использованием данных о химических сдвигах постоянной бета-распада

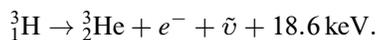
© Ю.А. Акулов, Б.А. Мамырин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 22 января 2000 г.

Определены экспериментально обоснованные значения периода полураспада для атомарного трития —  $(t_{1/2})_a = (12.264 \pm 0.018)$  года и для свободного тритона —  $(t_{1/2})_f = (12.238 \pm 0.020)$  года.

Бета-распад трития есть смешанный сверхразрешенный переход  $1/2^+ \rightarrow 1/2^+$  между членами изоспинового дублета:



При рассмотрении этого процесса теоретически на примере относительно простой трехнуклонной задачи могут быть исследованы различные модели внутриядерного взаимодействия. Для проверки представлений о структуре волновых функций ядер, формы внутриядерного потенциала и роли межнуклонного мезонного обмена при бета-распаде необходимо располагать точными значениями основных характеристик бета-перехода, в частности, константой времени жизни свободного тритона (ядра трития). Поскольку избыток массы второго нейтрона в ядре трития весьма близок к кулоновской энергии второго протона в ядре гелия, два изоспиновых состояния почти вырождены. Малое значение высвобождаемой энергии делает бета-спектр весьма чувствительным к структуре доступного формирующемуся бета-электрону электронного фазового пространства вблизи бета-активного ядра. Влияние электронного окружения тритона вызывает изменения темпа бета-распада, превосходящие по величине вариации периода полураспада, обусловленные различиями принятых моделей внутриядерного взаимодействия.

Вследствие этого экспериментальное значение периода полураспада (или постоянной распада  $\lambda = \ln 2/t_{1/2}$ ), соответствующее распаду тритона в составе некоей атомно-молекулярной системы, может быть использовано в теоретических построениях лишь в том случае, если изменения постоянной распада (химические сдвиги), обусловленные влиянием электронного окружения тритона, могут быть для данной атомно-молекулярной системы точно измерены или вычислены.

При рассмотрении процесса формирования  $\beta$ -электрона в фазовом пространстве тритийсодержащих атомно-молекулярных систем различают три канала реакции: 1 — прямое образование электрона сплошного спектра; 2 — образование электрона сплошного спектра за счет замещения орбитального электрона  $\beta$ -электроном; 3 — распад в связанные состояния, т.е. формирование  $\beta$ -электрона на одной из оболочек дочернего атома. Развита в [1,2] теория позволяет, в принципе, определять вероятность распада в связанные состояния при произвольном электронном окружении тритона, однако в удовлетворительном согласии между собой находятся вычисленные различными авторами вероятности распада в связанные состояния лишь для простейших атомарных систем  $T^+$  и  $T$ . Вычисленные в [3–5] отношения вероятности распада в связанные состояния к вероятности распада в сплошной спектр для  $T^+$  составили соответственно: 1.10, 1.03 и 1.08% (т.е.  $\Delta\lambda_{bt}/\lambda = (1.07 \pm 0.04)\%$ ). Относительное увеличение скорости распада, обусловленное распадом в связанные состояния в атоме  $T$ , было вычислено в работах [1–3,5]; получены значения 0.56, 0.69, 0.66, 0.55% (т.е.  $\Delta\lambda_{ba}/\lambda = (0.62 \pm 0.07)\%$ ). Взаимодействие в конечном состоянии  $\beta$ -электрона с орбитальным электроном, приводящее к переводу орбитального электрона в состояния сплошного спектра (при этом  $\beta$ -электрон может остаться в связанном состоянии в атоме гелия, но может и сам оказаться в одном из  $s$ -состояний сплошного спектра), должно приводить к увеличению относительной скорости распада тритона в атоме  $T$  на  $\Delta\lambda_{ct}/\lambda \approx 0.15\%$  [5,6]. Для тритийсодержащих систем, в которых доступен  $\beta$ -электрону фазовый объем вблизи тритона деформируется молекулярными орбиталями, результаты вычисления обменных поправок к вероятности бета-распада имеют лишь качественный характер.

При прямом образовании в результате бета-распада электрона сплошного спектра в кулоновском поле ядра влияние электронного окружения на величину фазово-пространственного множителя ( $f$ ) опи-

сывается путем введения параметра экранировки заряда ядра орбитальными электронами и параметра уменьшения наблюдаемого значения верхней граничной энергии, обусловленного возбуждением атомных электронов при взаимодействии их с  $\beta$ -электроном в конечном состоянии [7]. Большое внимание, уделяемое в последние годы проблеме массы нейтрино, стимулировало проведение теоретических исследований атомных эффектов в высокоэнергетической части бета-спектра для ряда тритийсодержащих атомно-молекулярных систем: T, T<sup>-</sup>, T<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>T и других [4,5,9,10]. В случае распада из основного состояния атома трития около 70% переходов осуществляются в 1s состояние иона <sup>3</sup>He<sup>+</sup>, ~ 25% — в 2s состояние; ~ 1.3% — 3s состояние и т.д. [6,8]. Это приводит к увеличению скорости распада тритона в атоме на  $\Delta\lambda_{ex}/\lambda \approx 0.50\%$  [4,5] по сравнению со скоростью распада свободного тритона. Детальное теоретическое рассмотрение эффекта экранировки, возмущающего низкоэнергетичную часть бета-спектра, проведено только для случаев распада тритона в атоме T и ионе T<sup>-</sup> [5], где экранирующий потенциал формируется простыми электронными конфигурациями;  $ns^1$  — в ионе <sup>3</sup>He<sup>+</sup> и  $1s^2, 2s^2, ns^1ms^1$  — в нейтральном атоме гелия. Для атома T это приводит к уменьшению постоянной распада на  $\Delta\lambda_s/\lambda \approx 0.41\%$  по сравнению со значением  $\lambda$  для свободного тритона.

Таким образом, полный комплект теоретических значений поправок к периоду полураспада, учитывающий четыре возможных атомных эффекта при бета-распаде — распад в связанные состояния, обменный эффект, экранировку заряда ядра орбитальными электронами, возбуждение орбитальных электронов, — получен только для свободного тритона и для свободного атома трития. Это означает, что абсолютная величина периода полураспада для свободного тритона может быть вычислена только с использованием абсолютного значения периода полураспада для атома трития, которое должно быть определено экспериментально. Прямое измерение периода полураспада для атомарного трития требует решения весьма сложной задачи стабилизации свободных атомов водорода в течение интервалов времени, соизмеримых с величиной периода полураспада (по этой же причине не удастся получить экспериментальным путем значения периода полураспада для T<sup>+</sup> и T<sup>-</sup>). Другой подход к решению проблемы экспериментального определения временных характеристик бета-распада в нестабильных атомно-молекулярных системах состоит в проведении специальных

экспериментов по измерению разности скоростей распада трития в двух соединениях, для одного из которых может быть измерено также и абсолютное значение постоянной распада. В работе [11] предложен метод определения разности постоянных распада трития путем сопоставления скоростей роста отношений содержания в образцах радиогенного гелия-3 и реперного гелия-4. Метод был использован для измерения разности постоянных бета-распада для атомарного и молекулярного трития. Схема эксперимента предусматривала создание двух идентичных образцов газовой смеси, содержащей гелий-4 и молекулярный тритий и последующее воздействие на один из них с целью перевода трития в атомарное состояние. Для получения термализованных свободных атомов трития использовался механизм резонансной диссоциации, когда молекулы  $T_2$  получают энергию, необходимую для разрыва межатомной связи, за счет удара второго рода при взаимодействии с атомами ртути, возбуждаемыми в ВЧ разряде. Разряд, создаваемый в одном из образцов полем с частотой 1 MHz и напряженностью  $\sim 100$  V/cm, поддерживался в течение 171 min. За это время в каждом из двух образцов образовывалось по  $\sim 2 \cdot 10^{13}$  атомов гелия-3. Контроль возможных утечек трития и гелия из ампул с образцами смеси осуществлялся с помощью пропорциональных счетчиков с чувствительностью  $\sim 10^6$  атомов трития и изотропного масс-спектрометра с чувствительностью  $\sim 3 \cdot 10^4$  атомов гелия. По пяти сериям масс-спектрометрических измерений гелиевых изотопных отношений, в каждой из которых в камеру поочередно напускались пробы гелиевой смеси из молекулярного и атомарного образцов, было определено относительное изменение постоянной бета-распада для молекулярного и атомарного трития:  $(\lambda_a - \lambda_m)/\lambda_m = 0.00257 \pm 0.00045$  [12]. Указанная погрешность соответствует одному стандартному отклонению и обусловлена главным образом межсерийной погрешностью измерения гелиевых изотопных отношений.

Полученный результат позволяет определить абсолютное значение периода полураспада для атомарного трития, поскольку период полураспада для молекулярного трития измерен в прямых экспериментах. Среднее взвешенное двух последних по времени опубликования и хорошо согласующихся между собой оценок периода полураспада для молекулярного трития, одна из которых получена изотропно-гелиевым методом [13], другая — по кривой распада, снятой методом регистрации тормозного излучения бета-

электронов [14], составляет:  $\langle (t_{1/2})_m \rangle = (12.296 \pm 0.017)$  года. Учитывая, что  $\Delta t_{1/2}/t_{1/2} = -\Delta\lambda/\lambda$  при  $\Delta\lambda/\lambda \ll 1$ , находим:  $(\Delta t_{1/2})_{ma} = (t_{1/2})_m - (t_{1/2})_a = (0.0316 \pm 0.0055)$  года. Следовательно, абсолютное значение периода полураспада для атомарного трития составляет:  $(t_{1/2})_a = (12.264 \pm 0.018)$  года, причем погрешность этого значения практически полностью определяется неопределенностью величины  $\langle (t_{1/2})_m \rangle$ . Поскольку для определения  $\langle (t_{1/2})_m \rangle$  и  $(\Delta t_{1/2})_{ma}$  использовались экспериментальные методики, позволяющие учесть все каналы реакции бета-распада, полученное значение  $(t_{1/2})_a$  соответствует полной вероятности распада для атомарного трития (т. е. учитывает как процессы, приводящие к образованию электронов сплошного спектра, так и распад в связанные состояния). В этом случае при переходе от  $(t_{1/2})_a$  к значению периода полураспада для тритона —  $(t_{1/2})_t$  — необходимо учитывать все четыре поправки на атомные эффекты для свободного атома трития. С учетом того, что атомные поправки по величине  $\ll 1$ , значение  $(t_{1/2})_t$  можно определить из соотношения:

$$(t_{1/2})_a \left( 1 + \frac{\Delta\lambda_{ba} + \Delta\lambda_{ch} + \Delta\lambda_{ex} - \Delta\lambda_s}{\lambda} \right) = (t_{1/2})_t \left( 1 + \frac{\Delta\lambda_{bt}}{\lambda} \right),$$

где второе слагаемое в скобках правой части равенства обусловлено изменением значения  $(t_{1/2})_t$  за счет распада в связанные состояния иона  ${}^3\text{He}^+$  — единственного возможного атомарного эффекта при распаде свободного тритона. Воспользовавшись приведенными выше теоретическими значениями атомных поправок и экспериментальным значением  $(t_{1/2})_a$ , для периода полураспада тритона из указанного соотношения получаем:  $(t_{1/2})_t = (12.238 \pm 0.020)$  года. Такое значение периода полураспада соответствует, например, процессу уменьшения концентрации ядер трития за счет бета-распада в полностью ионизированной водородной плазме.

Тем случаям, когда учитывается только влияние на бета-спектр кулоновского поля ядра, т. е. когда при вычислении фазового-пространственного множителя используется стандартная функция Ферми и не учитывается распад в связанные состояния, — будет соответствовать значение периода полураспада  $(t_{1/2})_{tc} = (12.369 \pm 0.020)$  года. Такое значение периода полураспада должно использоваться, в частности, при определении обусловленного бета-распадом энерговыделения в тритированной плазме, поскольку при распаде в связанные состояния

практически всю выделяющуюся энергию уносят антинейтрино. Величина  $(t_{1/2})_{ic}$  должна также использоваться при вычислении приведенного периода полураспада тритона  $ft_{1/2}$ , если верхняя граница энергетического интервала интегрирования в фазовом пространстве принимается равной ядерной разности масс трития и гелия-3, т.е. не учитывается разность энергий связи орбитальных электронов в исходной и конечной атомно-молекулярных системах. Располагая точным значением  $ft_{1/2}$  для тритона, можно получить независимые оценки фундаментальных величин: отношения фермиевской и гамов-теллеровской констант связи в слабом взаимодействии и времени жизни свободного нейтрона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 97-03-33665) и ГНТП "Фундаментальная метрология" (проект № 4.06).

## Список литературы

- [1] *Sherk P.M.* // Phys. Rev. 1949. V. 75. N 5. P. 789–791.
- [2] *Bahcall J.N.* // Phys. Rev. 1961. V. 124. N 2. P. 495–499.
- [3] *Тухонов В.Н., Чукреев Ф.Е.* // Вопр. атом. науки и техн. 1980. Сер. "Атом. матер." В.1 (4). С. 12–14.
- [4] *Budick B.* // Phys. Rev. Lett. // 1983. V. 51. N 12. P. 1034–1037.
- [5] *Harston M.R., Pypers N.C.* // Phys. Rev. A. 1993. V. 48. N 1. P. 268–278.
- [6] *Haxton W.S.* // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. N 8. P. 807–810.
- [7] *Bergkvist K.-E.* // Phys. Scripta. 1971. V. 4. P. 23–31.
- [8] *Williams R.D., Koonin S.E.* // Phys. Rev. C. 1983. V. 27. N 4. P. 1815–1817.
- [9] *Froelich P., Jeziorski B., Kolos W., Monkhurst H. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N 18. P. 2871–2874.
- [10] *Kaplan I.G., Smelov G.V., Smutny V.N.* // Phys. Lett. B. 1985. V. 161. P. 389–403.
- [11] *Акулов Ю.А., Мамырин Б.А., Шихалиев П.М.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 18. С. 72–75.
- [12] *Акулов Ю.А., Мамырин Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 68. В. 3. С. 167–170.
- [13] *Акулов Ю.А., Мамырин Б.А., Хабарин Л.В.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 10. С. 940–942.
- [14] *Budick B., Chen Jianshen, Lin Hong* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. N 19. P. 2630–2633.