

02;05;11

©1993

## РАЗВИТИЕ АННИГИЛЯЦИИ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛЕНИЯ

*М.Л.Шматов*

Рассмотрены некоторые требования к конструкции ловушки для хранения конденсированного антивещества, связанные с распылением вещества и антивещества в результате случайных актов аннигиляции.

В ряде работ рассматривалась возможность хранения антиводорода в виде льда, удерживаемого в ловушке без контакта с ее стенками при помощи или электрического, или/и магнитного поля, или лазерного излучения — см., например, [1-9]. В подобной системе неизбежно будет происходить аннигиляция, обусловленная, в частности, сублимацией антиводорода и неидеальностью вакуума [4-8]. Длительное хранение возможно, очевидно, только при условии, что случайная аннигиляция одной античастицы или, в общем случае, относительно малого количества антиводорода не приведет к аннигиляции всего антиводорода. Некоторые вопросы, связанные с продолжительностью хранения твердого антиводорода, рассмотрены в работах [4-8]. Так, в работе [4] обсуждается нагрев и, как следствие, испарение антиводорода в результате аннигиляции его отдельных молекул на внутренней поверхности ловушки, а также конструкционные меры, направленные на частичное подавление этих процессов. В работе [5] (см. также [6]) рассмотрена сублимация антиводорода и отмечена необходимость отвода энергии, выделяющейся при аннигиляции. В работах [7,8] приведены результаты, полученные Дж.Р.Гэйнсом при теоретическом рассмотрении устойчивости антиводородного льда к аннигиляции на его поверхности.

Цепное развитие аннигиляции может быть вызвано не только испарением, но и распылением (см. например, [10-13]) антиводорода и/или материала ловушки. Коэффициент распыления  $Y$  (среднее количество атомов, удаляемых с поверхности одной частицей, бомбардирующей твердое тело или выходящей из него) для конденсированных газов в ряде случаев довольно велик — см., например, [11]. Так, при бомбардировке твердого водорода электронами с энергией 2 кэВ  $Y \approx 200$  атомов/электрон [11]. В подобном эксперименте с энергией электронов 23 эВ наблюдалось

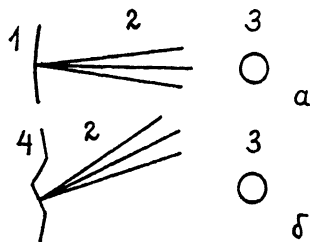
образование кластеров [14]. Их выход в расчете на один электрон был мал [14], однако аннигиляция антиводородного кластера на поверхности вещества может привести к сильному локальному энерговыделению и, как следствие, к вылету значительного количества атомов и других частиц.

При попадании атома или иона на поверхность твердого антиводорода аннигиляции нуклон-антипротон будет предшествовать девозбуждение системы ядро-антипротон, образующейся в состоянии с большим главным квантовым числом [15-18]. Часть энергии может быть передана электрону, связанному с ядром [15,17] или позитрону [18]. В принципе, распыление антиводорода за счет Оже-процессов и кинетической энергии бомбардирующих частиц может быть довольно существенно.

В некоторых случаях аннигиляция антипротона на многонуклонном ядре приводит к образованию двух сравнительно больших осколков остаточного ядра — см., например, [19-23]. В этом случае распыление будет, по-видимому, в значительной степени подобно изучавшемуся в ряде работ (см., например, [10,12] и гл. 5 в [13]) распылению при делении ядер без участия антипротонов. Для распыления осколками деления характерна очень сильная зависимость  $Y$  от состояния поверхности [10,12]. Так, коэффициент распыления  $U^{233}$  при механической очистке поверхности от слоя окислов увеличивался от 24 атомов/осколок до 1200 атомов/осколок [10].

В принципе, магнитные и/или электрические поля позволяют отклонить от антиводорода некоторые частицы, во всяком случае заряженные. Представляет интерес и отвод античастиц в такие области, где их аннигиляция оказывает наименьшее воздействие на антиводородный лед (см. также [4]). Если атомы вещества вылетают преимущественно в направлениях, близких к нормали к поверхности (см. [12]), их попадание на антиводород может быть уменьшено или даже предотвращено за счет профилирования внутренней поверхности ловушки. Пример такого профилирования для случая прямолинейного движения атомов и ловушки, удерживающей единственный антиводородный пар, показан на рисунке. Отметим, однако, что полный анализ эффективности профилирования требует учета испускания других частиц, а также отражения атомов от поверхности и вызываемого ими распыления.

Учет процессов распыления важен, по-видимому, и для решения задачи о том, произойдет ли взрыв при нарушении вакуумной изоляции ловушки (см. [8,9]). Отметим, что в работе [15] рассматривалось вхождение в атмосферу Земли



Совпадение (а) и несовпадение (б) оси конуса разлета распыленных атомов с направлением на центр антиводородного шара. 1 — сферическая внутренняя поверхность ловушки, 2 — конус разлета распыленных атомов, 3 — антиводородный шар, 4 — внутренняя поверхность ловушки, профилированная пирамидальными выступами.

метеорита, состоящего из антивещества. Согласно [15], на высоте, соответствующей плотности атмосферы, приблизительно равной  $10^8$  атомов/см<sup>3</sup>, начнется заметное испарение антивещества.

В экспериментах по распылению наблюдался вылет сравнительно больших кусков вещества с размерами  $> 0.1-1$  мкм (см., например, [12]). Задача о столкновении такого куска с твердым антиводородом, а также о столкновении твердого антиводорода с поверхностью ловушки, требует специального рассмотрения. В принципе, может возникнуть необходимость хранения антиводорода в виде малых “льдинок”, изолированных друг от друга (см. [2]). Отметим, что в работе [24] рассмотрено столкновение твердого антиводорода с поверхностью твердого водорода.

Представляет интерес влияние накопления радиационных повреждений на коэффициенты распыления, связанные с различными частицами, и некоторые другие параметры твердого антиводорода (многие эксперименты, очевидно, могут быть проведены с твердым водородом). Возможно, что при длительном хранении твердого антиводорода потребуется периодическое проведение плавления (или испарения) и замораживания. Может также возникнуть необходимость обновления некоторых деталей ловушек или использования сменяемых экранов. Отметим, что смена экрана может производиться, например, за счет перемотки свернутой в рулон ленты.

Термин “распыление” используется применительно к твердому телу. Очевидно, однако, что подобные процессы

будут происходить и при наличии жидкости, в частности, жидкого антиводорода.

В заключение отметим, что в работе [25] рассматривалось развитие цепного процесса аннигиляции при хранении антипротонов вблизи поверхности, образованной возбужденными атомами водорода.

### Список литературы

- [1] *Forward R.L.* // Preprint AIAA-80-0823. 1980.
- [2] *Forward R.L.* // JBIS. 1982. V. 35. N 9. P. 391-395.
- [3] *Cassenti B.N.* // JBIS. 1982. V. 35. N 9. P. 396-404.
- [4] *Morgan D.L.* // JBIS. 1982. V. 35. N 9. P. 405-412.
- [5] *Cassenti B.N.* // JBIS. 1984. V. 37. P. 483-490.
- [6] *Cassenti B.N.* // J. Propulsion and Power. 1985. V. 1. N 2. P. 143-149.
- [7] *Davis J.* // New Scientist. 1989. V. 122. N 1670. P. 66-70.
- [8] *Nordley G.D.* // JBIS. 1990. V. 43. N 6. P. 241-258.
- [9] *Nordley G.D.* Space Nuclear Power Systems 1989. / Ed. by M.S.El-Genk and M.D.Hoover. Orbit Book Company, Malabar, FL. 1992. P. 121-130.
- [10] *Лантеева Ф.С., Эршлер Б.В.* // Атомная энергия. 1956. В. 4. С. 63-66.
- [11] *Erents S.K., McCracken G.M.* // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 7. P. 3139-3145.
- [12] *Баранов И.А., Кривошатский А.С., Обнорский В.В.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 12. С. 2457-2475.
- [13] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 2. / Под ред. Р.Бериша. М.: Мир, 1986. 488 с.
- [14] *Clampitt R., Gowland L.* // Nature. 1969. V. 223. N 5208. P. 815-816.
- [15] *Nauenberg M., Ruderman M.A.* // Physics Letters. 1966. V. 22. N 4. P. 512-513.
- [16] *Junker B.R., Bardsley J.N.* // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 28. N 19. P. 1227-1229.
- [17] *Moser E.F., Daniel H., von Egidy T. et al.* // Phys. Lett. B. 1986. V. 179. NN 1,2. P. 25-29.
- [18] *Reifenrother G., Klempt E.* // Nucl. Phys. A. 1989. V. 503. NN 3,4. P. 885-898.
- [19] *Botvina A.S., Pjinov A.S., Mishustin I.N. et al.* // Nucl. Phys. A. 1987. V. 475. N 4. P. 663-686.
- [20] *Moser E.F., Daniel H., von Egidy T. et al.* // Z. Phys. A. 1989. V. 333. N 1. P. 89-105.
- [21] *Guaraldo C.* // Il Nuovo Cimento. 1989. V. 102 A. N 4. P. 1137-1173.
- [22] *Cassenti B.N.* // Preprint AIAA 91-2548. 1991.
- [23] *Chen B., Armstrong T.A., Lewis R.A. et al.* // Phys. Rev. C. 1992. V. 45. N 5. P. 2332-2337.
- [24] *Азимов Я.И., Амусья М.Я., Шматов М.Л.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 8. С. 52-56.
- [25] *Zito R.R.* // JBIS. 1983. V. 36. N 7. P. 308-310.

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

Поступило в Редакцию  
13 июля 1993 г.