

01  
©1994

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНЕНИЯ ТВЕРДОГО АНТИВОДОРОДА

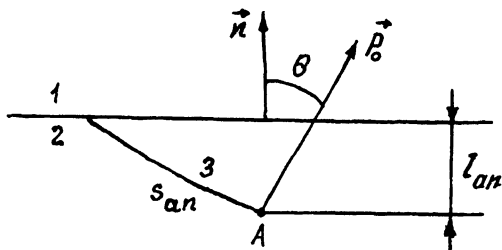
*М. Л. Шматов*

Длительное хранение антивещества возможно только в том случае, если случайная аннигиляция одной античастицы не приведет к аннигиляции значительной части антивещества [1,2]. В работе [2] в качестве механизма цепной реакции аннигиляции в ловушке, удерживающей твердый водород, рассматривались процессы распыления антиводорода и материала ловушки. Подобным образом будет действовать и эффект отдачи остаточного ядра при аннигиляции  $\bar{p}$  (далее для краткости используется термин "эффект отдачи").

В общем случае часть остаточных ядер, получивших импульс в результате эффекта отдачи (далее они называются "ядрами отдачи"), может быть "поглощена", т.е. остановлена, в веществе [3]. Рассмотрим ситуацию, когда с внутренней поверхностью ловушки сталкивается молекула  ${}^1\bar{H}_2$ , энергия которой  $E_m$  составляет величину порядка  $10^{-4}$  эВ или меньше. Такие столкновения будут происходить, в частности, вследствие сублимации твердого антиводорода (см., например, [4]). Покажем, что в данной ситуации имеется заметная вероятность выхода ядра отдачи из материала ловушки.

Согласно работе [5], при столкновении атомов  ${}^1H$  и  ${}^1\bar{H}$  эффективное сечение образования атома  $p\bar{p}$  (и одновременно  $P_s$ ), которое обозначим через  $\sigma_{p\bar{p}}$ , уменьшается при увеличении энергии столкновения  $E_c$ . При малых  $E_c$  это сечение довольно велико: так,  $\sigma_{p\bar{p}}(E_c = 10^{-3} \text{ эВ}) \approx 450a_B^2$ , где  $a_B$  — боровский радиус [5]. Исходя из этих результатов, можно предположить, что вероятность захвата антипротонов рассматриваемой молекулы атомами первого монослоя материала ловушки близка к единице. В подобном случае, очевидно, при  $\theta < \pi/2$ , где  $\theta$  — угол между внешней (по отношению к веществу) нормалью к поверхности и вектором начального импульса ядра отдачи (см. рисунок), остановка или рассеяние ядра отдачи материалом ловушки просто невозможны.

В работе [6] рассматривается столкновение  ${}^1H-\bar{p}$  при энергии порядка и меньше  $10^{-4}$  эВ. Согласно [6], в этом



Аннигиляция одного из антипротонов молекулы  ${}^1\bar{\text{H}}_2$  в материале ловушки.

1 — внутреннее пространство ловушки (вакуум), 2 — материал ловушки, 3 — траектория антипротона в веществе ( $s_{an}$  — длина этой траектории), A — точка аннигиляции,  $\vec{p}_0$  — вектор начального импульса ядра отдачи,  $\vec{n}$  — внешняя нормаль к поверхности.

случае метод расчета, использовавшийся в [5], приводит к завышению вероятности аннигиляции  $p-\bar{p}$  в десять и более раз. Для сечения образования протония, которое для столкновения  ${}^1\text{H}-\bar{p}$  будем обозначать как  $\sigma'_{\text{Pn}}$ , в [6] получено выражение  $\sigma'_{\text{Pn}} = 0.41\pi a_B/k$ , где  $k$  — волновой вектор налетающего антипротона. Эта формула позволяет предположить, что даже в том случае, если  $\sigma_{\text{Pn}}$  в [5] завышено, при  $E_m \lesssim 10^{-4}$  эВ эффективное сечение образования антипротонных атомов  $\sigma_{\text{at}}$  составляет, как минимум, величину порядка  $a_B^2$ .

Обозначим расстояние от внутренней поверхности ловушки до точки аннигиляции через  $l_{an}$ , а расстояние, проходимое  $\bar{p}$  в веществе, — через  $s_{an}$ . Очевидно, что  $l_{an} \leq s_{an}$  (см. рисунок). Оценим  $s_{an}$  как  $1/(\sigma_{\text{at}}n)$ , где  $n$  — концентрация атомов. При  $\sigma_{\text{at}} \sim a_B$  получаем, что  $s_{an} \sim 10^{-7}$  см. Так, если  $\sigma_{\text{at}} = a_B^2$ , то для графита, при  $n = 1.13 \cdot 10^{23}$  см $^{-3}$  (см. [7]),  $s_{an} = 32 \text{ \AA}$ .

Рассмотрим результаты экспериментов по изучению замедленного деления  ${}^{238}\text{U}$ , вызываемого аннигиляцией  $\bar{p}$  [3]. Вероятность выхода ядра отдачи из пленки  ${}^{238}\text{U}$  с поверхностной плотностью  $2 \cdot 10^{-4}$  г/см $^2$ , что соответствует толщине  $1070 \text{ \AA}$  (см. [7]), составляла приблизительно 50% [3]. Эта величина найдена из сравнения выхода ядер отдачи из пленок толщиной 535 и  $1070 \text{ \AA}$  [3]. Таким образом, естественно ожидать, что при  $l_{an} \sim 10 \text{ \AA}$  и не слишком большом  $\theta$  вероятность выхода остаточного ядра из вещества близка к единице.

Оценим рассеяние и торможение ионов отдачи, а также их выход из вещества в расчете на одну молекулу  ${}^1\bar{\text{H}}_2$ , кото-

рый обозначим как  $Y_{\text{rec}}$ , для аннигиляции  $\bar{p}$  в графите. Предположим, что эффект отдачи обусловлен только испарением протонов (см. [8]). Тем самым, по-видимому, значительно занижается характерное значение энергии ядра отдачи  $E_{\text{rec}}$ , а также вероятность самого эффекта отдачи. Однако это приближение представляет интерес как основанная на экспериментальных результатах оценка минимального значения  $Y_{\text{rec}}$ .

Обозначим через  $P_{\text{evap}}$  вероятность испарения  $p$  в результате аннигиляции  $\bar{p}$ . Для нахождения этой величины по данным, приведенным в [8], применим формулу

$$P_{\text{evap}} = Y / \left( N_{\text{direct}} / N_{\text{evap}} + 1 \right), \quad (1)$$

где  $Y$  — выход протонов с энергией 15–200 МэВ в расчете на один аннигилирующий  $\bar{p}$ ,  $N_{\text{direct}} / N_{\text{evap}}$  — отношение числа протонов, испущенных в результате прямого процесса взаимодействия пионов с ядром, к числу испаренных протонов. Подставляя в (1) параметры  $^{12}\text{C}$  из [8], получаем:  $P_{\text{evap}} \approx 8.8 \cdot 10^{-2}$ . Так как  $P_{\text{evap}}^2 \ll 1$ , будем полагать, что вероятность испарения из одного ядра более чем одного  $p$  пренебрежимо мала.

Предположим, что  $\bar{p}$  аннигилирует с  $p$ , после чего происходит только испарение  $p$  с энергией 7 МэВ (см. [8]). Тогда ядро отдачи представляет из себя  $^{10}\text{Be}$ ,  $E_{\text{rec}}$  первоначально равна 700 кэВ. При движении в веществе ядро отдачи может захватить электроны [9]. В данной работе, где оценивается наибольшее влияние вещества на движение ядра отдачи, этот процесс не учитывается.

При оценке рассеяния воспользуемся формулой Резерфорда, которую представим в виде

$$d\sigma_{\text{sc}} \approx \left[ \frac{(Z_C - 2)Z_C e^2}{E_{\text{rec}}} \right]^2 \frac{\cos \theta_1}{\sin^4 \theta_1} d\Omega, \quad (2)$$

где  $d\sigma_{\text{sc}}$  — эффективное сечение рассеяния на угол от  $\theta_1$  до  $\theta_1 + d\theta_1$ ,  $Z_C$  — атомный номер углерода,  $e$  — заряд электрона,  $d\Omega = 2\pi \sin \theta_1 d\theta_1$  [10]. Подставив в (2) численные значения, получаем, что эффективное сечение рассеяния на большие углы мало по сравнению с  $a_B^2$ , т. к.  $[(Z_C - 2)Z_C e^2 / E_{\text{rec}}]^2 = 2.44 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2 = 8.71 \cdot 10^{-7} a_B^2$ .

При  $E_{\text{rec}} = 700 \text{ кэВ}$  скорость ядра  $^{10}\text{Be}$  меньше скорости некоторых электронов атома С. Поэтому расчет ионизационных потерь энергии на единицу длины пути по формуле Бете–Блоха приводит к завышенному результату — см.

[<sup>9,11</sup>]. Однако и этот результат, равный  $2.36 \cdot 10^{10}$  эВ/см, при  $l_{an} \sim 10^{-7}$  см сравнительно мал.

Таким образом, в рассмотренной модели графит не оказывает существенного влияния на движение ядра отдачи даже при значениях  $\theta$ , близких к  $\pi/2$ , поэтому  $Y_{rec} \approx 2 \cdot 0.5 \cdot P_{evap} \approx 8.8 \cdot 10^{-2}$ . Здесь подразумевается, что оба антипротона аннигилируют на разных ядрах. Возможно, что в рамках более строгой модели  $Y_{rec} \approx 1$ . Отметим, что рассеяние ядер отдачи на малые углы может привести к их выходу из вещества и при значениях  $\theta$ , слегка превышающих  $\pi/2$ . Вероятно, для некоторых веществ при достаточно малой характерной величине  $l_{an}$ , т.е. при достаточно малой энергии  $E_m$  (см. [<sup>5,6</sup>]), это вызовет реализацию значений  $Y_{rec}$ , слегка превышающих единицу.

По-видимому, воздействие на антиводородный лед, оказываемое аннигиляцией  $\bar{p}$  на внутренней поверхности ловушки, будет уменьшено при нанесении на эту поверхность элемента с малой атомной массой (например, Li или Be), полимера или LiH.

После аннигиляции  $\bar{p}$  на ядре тяжелого элемента возможно деление остаточного ядра [<sup>3,8</sup>]. В ряде случаев осколки деления выбивают с поверхности твердого тела большое количество атомов [<sup>12</sup>]. В рассматриваемой здесь системе это может произойти как с материалом ловушки, так и с антиводородным льдом. Вероятно, содержание примесей тяжелых элементов в материале внутренней поверхности ловушки должно быть как можно меньшим.

Когда атом или ион с многонуклонным ядром сталкивается с антиводородной льдинкой или другой мишенью, содержащей с своим составе несколько антиядер, возникает возможность аннигиляции более чем одного антиядра на группе связанных между собой нуклонов. Такой процесс представляет интерес не только с точки зрения проблемы безопасности хранения антивещества, но и в качестве метода создания высоковозбужденного остаточного ядра, в частности, как попытка достижения его мультифрагментации. Для этих целей целесообразно использовать мишень, содержащую антидейтроны и даже более тяжелые античастицы.

Вопрос о том, при каком количестве антиядер в мишени вероятность аннигиляции  $N$  антиядер ( $N \geq 2$ ) на группе связанных нуклонов, которую обозначим через  $P_N$ , будет достаточно велика для экспериментальной регистрации этого процесса, в настоящее время неясен. Так, предположим, что атом или положительный ион сталкивается с молекулой  $^1\bar{H}_2$  или ионом  $^1\bar{H}_2^-$ . Обозначим через  $\sigma_{2\bar{p}}$  эффективное сечение формирования антипротонного атома с двумя

антипротонами. Рассмотрим вкратце самый простой случай, когда перед столкновением обе частицы находятся в основных состояниях и хотя бы одна из них нейтральна. Исходя из результатов [5,6], можно ожидать, что при энергии столкновения  $E'_c \lesssim 10^{-4}$  эВ достижимы значения  $\sigma_{2\bar{p}} \gtrsim a_B^2$ . Первоначально, однако, оба антипротона будут находиться в состояниях с большими главными квантовыми числами  $n_1$  и  $n_2$ , аннигиляция произойдет только после уменьшения этих чисел [5,6,8,13]. Как отметил Й.Хартманн, одним из каналов уменьшения  $n_{1(2)}$  является Оже-переход, сопровождающийся потерей связи второго  $\bar{p}$  с ядром. Эффект отдачи при первой аннигиляции  $\bar{p}$  может привести к такому же результату, что отметил Я.И.Азимов. Возможно, тем не менее, что для некоторых элементов вероятность  $P_2$  будет "наблюдаемо" велика. Так, увеличение числа электронов приведет, по-видимому, к увеличению роли Оже-процессов уменьшения  $N_{1,2}$ , сопровождающихся удалением электрона; при возрастании массы начального ядра уменьшается характерная скорость ядра отдачи, образующегося после аннигиляции одного  $\bar{p}$  — см. [13]. Увеличение количества электронов на внешней электронной оболочке может привести и к увеличению  $\sigma_{2\bar{p}}$ .

Автор благодарит Я.И.Азимова и Й.Хартманна за полезное обсуждение рассматриваемых в статье вопросов.

### Список литературы

- [1] Zito R.R. // JBIS. 1983. V. 36. N 7. P. 308–310.
- [2] Шматов М.Л. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 18. С. 31–35.
- [3] Armstrong T.A., Vocquet J.P., Ericsson G. et al. // Phys. Rev. C. 1993. V. 47. N 5. P. 1957–1969.
- [4] Cassenti B.N. // JBIS. 1984. V. 37. P. 483–490.
- [5] Kolos W., Morgan D.L., Schrader D.M., Wolniewicz L. // Phys. Rev. A. 1975. V. 11. N 6. P. 1792–1796.
- [6] Воронин А.Ю. // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. В. 3 (9). С. 760–773.
- [7] Гольдин Л.Л., Игошин Ф.Ф., Козел С.М. и др. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие. Под ред. Л.Л. Гольдина. М.: Наука, 1983. 704 с.
- [8] Hoffmann P., Hartmann F.J., Daniel H. et al. // Nucl. Phys. A. 1990. V. 512. N 4. P. 669–683.
- [9] Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 5. Ч. 2. М.: Наука, 1989. 416 с.
- [10] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 1. Механика. 4-е изд. М.: Наука, 1988. 216 с.

- [11] Фраунфельдер Г., Хенли Э. // Субатомная физика. М.: Мир, 1979. 736 с.
- [12] Баранов И.А., Кривохатский А.С., Обнорский В.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 12. С. 2457-2475.
- [13] Љјиноу А.С., Назарук В.И., Чигринов С.Е. // Nucl. Phys. A. 1982. V. 382. N 3. P. 378-400.

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

Поступило в Редакцию  
11 марта 1994 г.

---