

01; 04

© 1991

УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
УДАРНО-КЛАСТЕРНОГО СИНТЕЗА

Ю.С. К у с н е р, В.И. Н и к о л а е в

В „гидродинамическом” приближении проведены оценки принципиальной возможности осуществления реакций термоядерного синтеза при столкновении ионного кластера, содержащего дейтерий, с поверхностью. Полученные оценки являются достаточно оптимистичными и вместе с тем согласуются с уже имеющимися экспериментальными данными.

Одним из главных стимулов исследований кластированных ионных пучков явились возможности их использования для инжекции топлива в устройства для осуществления управляемых термоядерных реакций. Физически эти возможности обусловлены существенно более низким, чем единица, удельным зарядом кластера, что позволяет снизить эффекты кулоновского взаимодействия и, в то же время, ускорять кластерные пучки до нужных энергий.

Газодинамические пучки кластированных ионов водорода с подходящими для инжекции параметрами были получены в 1982 г. [1, 2]. В 1989 г. были экспериментально реализованы условия осуществления  $D-D$  синтеза и зарегистрированы продукты реакции при столкновениях ионных кластеров тяжелой воды, предположительно  $(D_2O)_N^+$ , ускоряемых до энергии 0.3 МэВ, с числом молекул в кластере  $N$  порядка  $10^2$  [3].

Максимальное значение вероятности, измеренное в экспериментах [3], составляет  $10^{-14}$  событий на дейтрон или  $2 \cdot 10^{-12}$  на кластер из 100 молекул тяжелой воды. Это значение, существенно более низкое, чем необходимо для осуществления энергетически выгодной реакции, оказывается тем не менее примерно в  $10^{10}$  раз выше, чем ожидаемое согласно известным выражениям для сечений реакций синтеза. Это противоречие в работе [3] объяснялось сжатием и разогревом кластера при ударе о поверхность. Однако контрольные эксперименты показали, что выход реакции существенно возрастает, если атомы дейтерия присутствуют и в мишени, что не согласуется с „гидродинамической” моделью процесса.

Оценим принципиальную возможность осуществления термоядерной реакции в такой схеме. Пусть однозарядный кластерный ион массы  $mN$  ускорен разностью потенциалов  $U_0$  до скорости  $v_0$ :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{mN}}. \quad (1)$$

Предположим далее, что при ударе о мишень этот ускоренный ион адиабатически разогревается до тех пор, пока тепловая скорость  $U_T$  составляющих его частиц при конечной температуре  $T_f$  не превысит  $U_0$ :

$$U_0 > U_T = \sqrt{\frac{3kT_f}{m}}, \quad (2)$$

после чего кластер разрушится (испарится). Из соотношения (2) следует оценка для максимально достижимой температуры сжатия  $T_f$ :

$$T_f (K) < 9 \cdot 10^3 \left( \frac{U_0}{N} \right) (\text{В/мол}) = 7.75 \cdot 10^{-9} U_0^2 (\text{см/с}).$$

Последнее из соотношений написано для дейтрона и практически совпадает с „гидродинамическим“ значением температуры  $T_I$  за фронтом образующейся при ударе о мишень волны [4-5]:

$$T_I (K) = \frac{2\gamma'(\gamma' - 1)}{(\gamma' + 1)^2} \frac{A}{R} U_0^2 = 6 \cdot 10^{-9} U_0^2 (\text{см/с}) \quad (3)$$

при значении  $\gamma' = 5/3$ , принятом в [3]. Здесь  $\gamma'$ ,  $A$  и  $R$  - показатель адиабаты Пуассона, атомный вес и универсальная газовая постоянная соответственно. В работе [6] было показано, что совпадение результатов „гидродинамического“ и „кинетического“ рассмотрения для кластеров при  $N > 10$  вполне обосновано и теоретически, и экспериментально. При  $U_0 = 10^5$  В и  $N = 10$ ,  $T_f = 9 \cdot 10^7$  К, т.е., в принципе,  $T_f$  может превысить критическое значение  $T_c = 5 \cdot 10^7$  К для осуществления реакции  $D/T$  синтеза.

При условии  $N \gg 1$  электрической энергией взаимодействия кластера с мишенью можно пренебречь и основной канал потери энергии - разрушение мишени ударной волной - может быть оценен по гидродинамической модели удара [4]. Испаренная масса мишени  $M_e$ :

$$M_e = mN \left( \frac{U_0}{U_c} \right)^2, \quad (4)$$

где критическое значение скорости кластера, при которой еще может происходить испарение:

$$U_c = \sqrt{2E/mN}, \quad (5)$$

$E$  - энергия связи атомов мишени. Таким образом, потери энергии кластера на образование кратера радиусом  $r_c$ :

$$E = mNeU_0, \quad r_c = r_0 \left( \frac{U_0}{U_c} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

$r_0$  - начальный радиус кластера. Принимая для оценки  $E=10^{11}$  эрг/ $\tau$  [4], получаем:  $E_c=1.5 \cdot 10^{-9}$  эрг = 1 КэВ,  $r_c = 3 \cdot r_0$ . Таким образом, потери энергии кластера в начальный момент времени  $\tau = r_0/v_0$  при взаимодействии с мишенью невелики, и можно предполагать, что значение  $T_f$ , вычисленное по формуле (3), может достигнуть нужных для осуществления реакций синтеза с достаточной высокой вероятностью значений.

Поскольку относительные потери кинетической энергии кластера при взаимодействии с поверхностью мишени невелики, можно оценить верхнее значение степени сжатия кластера ( $\rho_f/\rho_0$ ) при ударе о поверхность, предположив, что значение  $T_f$  из (3) достигается при адиабатическом сжатии за "время взаимодействия"  $\tau = r_0/v_0$ :

$$(\rho_f/\rho_0) = (T_f/T_0)^{1/(\gamma-1)} = (9 \cdot 10^3 U_0/N T_0)^{5/2} \quad (7)$$

для  $\gamma=7/5$ . Принимая для численных оценок  $N=300$ ,  $T_0=300$  К,  $U_0=10^5$  В, что соответствует условиям проведения экспериментов [3], получаем:

$$(\rho_f/\rho_0) = 10^{10}. \quad (8)$$

Это значение соответствует обнаруженной экспериментально высокой вероятности осуществления реакции. Если далее применить критерий Лоусона для реакций  $D/D$  синтеза в образующейся при столкновении за время  $\tau = r_0/v_0$  плазме:

$$\tau \rho_f > 5 \cdot 10^{16} \quad (9)$$

и использовать  $\rho_f$  из (8), то критерий (9) выполняется при  $N < 35$ ; при  $U_0=3 \cdot 10^5$  В - для  $N < 140$  молекул в кластере. Поскольку удельные потери энергии на кулоновское взаимодействие быстро растут при увеличении заряда (уменьшении  $N$ ) кластера, а потери на испарение согласно (6) от  $N$  не зависят, то полученные значения практически определяют оптимальные значения  $N_{opt}$  для осуществления  $D/D$  синтеза. Оцененные значения  $N_{opt}$  хорошо совпадают с наблюдавшимися в экспериментах (3).

Рассмотренной выше гидродинамической модели осуществления реакций синтеза в сжимающемся и разогреваемом при ударе о мишень кластере противоречит экспериментальный факт [3] увеличения выхода при насыщении дейтерием поверхности мишени. Однако в работе [7] показано, что даже при расширении пара высокообогащенной (более, чем 99%) тяжелой воды, в пучке образуются смешанные кластеры, в которых при  $N > 100$  содержание дейтерия не выше 50%, поэтому насыщение мишени дейтерием увеличивает вероятность  $D/D$  столкновений за фронтом ударной волны.

Таким образом, гидродинамическая модель согласуется с экспериментальными фактами, обнаруженными при осуществлении реакций  $D/D$  синтеза в столкновениях ионных кластеров с поверхностью.

Авторы благодарят Л. Фридмана (Ерукхейвенская национальная лаборатория, США) и Дж. Фена (Йельский университет, США) за любезно предоставленную возможность с большой пользой обсудить рассмотренные в статье проблемы.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Александров М.Л., Куснер Ю.С. Газодинамические молекулярные, ионные и кластированные пучки / Под ред. Е.П. Велихова. Л.: Наука, 1989.
- [2] Weuschler R.I., Friedman L. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. P. 1097-1099.
- [3] Weuschler R.I., Friedlander G., Friedman L. // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. P. 1292-1295.
- [4] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений. М.: Физматгиз, 1963.
- [5] Манзон Б.М. // УФН. 1981. Т. 134. В. 4. С. 611-639.
- [6] Куснер Ю.С., Приходько В.Г., Симонова Г.В., Фирстов В.Е. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 9. С. 1772-1781.
- [7] Александров М.Л., Куснер Ю.С., Николаев В.И., Потапов П.Н. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 18.

Институт  
аналитического  
приборостроения  
АН СССР, С.-Петербург.

Поступило в Редакцию  
20 июня 1991 г.