

УДК 621

Кластерный синтез легких ядер D+D

В. Ю. Великодный

Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

В. А. Битюрин

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия

В ряде экспериментальных работ, в которых исследовалось взаимодействие кластеров из тяжелой воды, разогнанных до энергии 300 кэВ, со стенкой из дейтериевых материалов (TiD), был обнаружен “аномально” высокий выход продуктов реакции ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$ при увеличении размеров кластеров. Авторы данной работы показали, что “аномально” высокий выход продуктов реакции ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$ при увеличении размера кластеров обусловлен неравновесными эффектами, возникающими из-за коллективного взаимодействия ${}^2\text{D}$ с тяжелыми атомами — O, Ti по механизму Ферми. На основе анализа экспериментальных данных и теоретических результатов предложен способ реализации процесса синтеза легких ядер со скоростью, близкой к максимальной, при относительно низких средних энергиях, приходящихся на один нуклон в кластере $\sim 0,005 \div 0,8$ кэВ.

Впервые идея о возможности существенного влияния эффектов поступательной неравновесности во фронте ударной волны на кинетику физико-химических превращений в газовой смеси с существенно различающимися массами была высказана в работе [1]. Впоследствии были выведены критерии, необходимые и достаточные условия для реализации этих эффектов [2—4]. Получены параметры смеси и потока, при которых эти эффекты проявляются наиболее ярко. Результаты работ [1—4] были экспериментально подтверждены в [5]. В [1—4] был предсказан и в [5] экспериментально обнаружен эффект “усиления” в двухкомпонентной смеси, состоящий в том, что, например, для газовой смеси, содержащей H_2 — 99 % и I_2 — 1 %, при поступательной температуре за фронтом ударной волны ~ 1170 К регистрировался пик сверхравновесного излучения, соответствующий электронному уровню у молекулы I_2 с энергией 6,4 эВ, а это эквивалентно температуре $\sim 74\,000$ К. Предельную “эффективную” температуру для относительно большей части тяжелых компонентов в зоне поступательной неравновесности во фронте ударной волны возможно приближенно оценить по формуле [3, 4]

$$T_{\text{эф}} \approx T_l \frac{m_h}{m}, \quad (1)$$

где T_l — температура легкого компонента за фронтом ударной волны;

m_h — масса тяжелой частицы;

m_l — масса легкой частицы.

В работе [2] показано, что аналогичные эффекты реализуются и при истечении смеси легких и тяжелых частиц из сопла Лавала в вакуум или разреженную газовую среду. В работе [6] экспериментально и теоретически исследовалось взаимодействие фронта ударной волны и наночастиц (кластеров). Получены длины пути выравнивания скорости несущего газа и кластерной примеси в зависимости от сечения и массы компонентов. На основе различных подходов метода — Монте-Карло [7] и решения системы кинетических

уравнений Больцмана [8] — предсказан эффект “усиления” в многокомпонентной смеси, состоящей из легкого газа-носителя и двух тяжелых компонентов при соотношении концентраций и масс $n_{h1} \leq n_{h2} \ll n_l$, $m_l \ll m_{h1} \leq m_{h2}$, где l — индекс, обозначающий легкий компонент, h — тяжелый.

Из результатов работ [6—8] вытекает возможность реализации эффектов “усиления” в газовой смеси, содержащей кластеры с дисперсией по размерам и массам. Сочетание истечения из сопла Лавалья и последующего торможения в ударной волне для газовой смеси, состоящей из легкого газа-носителя и тяжелых молекул или атомов при $n_l \gg n_h$, $\rho_l \geq \rho_h$, позволяет получить предельную “эффективную” температуру во фронте ударной волны

$$T_{эф} \approx T_l \left(\frac{m_h}{m_l} \right) [3].$$

Например, если легкий газ-носитель является смесью H_2 , H , а

тяжелая примесь — атомы I и поступательная температура легкого компонента за фронтом ударной волны $T_l \approx T^* = 20\,000$ К (где T^* — температура торможения в форкамере сопла), то $T_{эф} \sim 1,7 \cdot 10^6$, для относительно большей части атомов I . Наличие кластеров (см. ниже) еще более значительно увеличивает эффект “усиления”. Эффекты, описанные и полученные экспериментально в [1—8], служат отправной точкой для обоснования возможности проведения реакций термоядерного синтеза в существенно неравновесных условиях, когда основная масса вещества остается относительно “холодной”, а “горячими” являются лишь реагенты. Сочетание эффектов, обусловленных поступательной неравновесностью в сопле Лавалья, во фронте ударной волны и неравновесного перераспределения энергии между тяжелыми и легкими компонентами при столкновении кластеров, состоящих из тяжелых элементов и атомов дейтерия или трития, дает возможность предложить два способа реализации кластерного термоядерного синтеза. Первый способ описан в [9] и состоит в том, что газ с примесью тяжелых металлов или молекул истекает из сопла Лавалья, образуя кластеры, а затем эта смесь тормозится в ударной волне. Второй способ состоит в том, что легкий газ с примесью паров тяжелых металлов истекает из сопла Лавалья, образуя кластеры, и ими осуществляют бомбардировку стенки из дейтерированных материалов. Остановимся на последнем, тем более, что имеются экспериментальные работы, в которых исследовалось взаимодействие заряженных кластеров тяжелой воды, разогнанных в электрическом поле, со стенкой из дейтерированных материалов.

В конце 80-х — начале 90-х годов XX века в ряде экспериментальных работ [10, 11], в которых исследовалось взаимодействие кластеров из тяжелой воды, разогнанных до энергии 300 кэВ, со стенкой из дейтерированных материалов (TiD , $(CD_2)_n$) был обнаружен “аномально” высокий выход продуктов реакции ${}^2D + {}^2D \rightarrow {}^1H + {}^3T$ при увеличении размеров кластеров. Интересным является тот факт, что выход продуктов 1H в реакции ${}^2D + {}^2D$ при изменении числа молекул в кластере в пределах $N = 20 \div 1000$ менялся в разы (см. рисунок, а), хотя энергия, приходящаяся на один нуклон, менялась в сотни раз при фиксированной энергии разгона кластеров $E = 300$ кэВ. Расчеты на основе различных моделей, использующих “равновесную теорию” [12, 13], показали, что выход продуктов 1H при $N = 20 \div 1000$ может отличаться в $10^5 \div 10^6$ раз и более (см. рисунок, б). Обозначения $Y_{TT}, Y_{KO}, Y_{TS}, Y_{TN}$ на рисунке, б для расчетов на основе различных моделей “равновесной теории” такие же, как и в работе [12]. Все расчеты на основе “равновесной теории” дают существенное отличие от результатов эксперимента [10] — (косые крестики х). Авторы данной работы показали, что “аномально” высокий выход

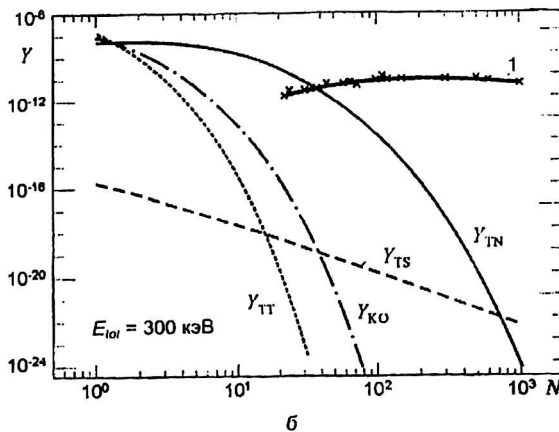
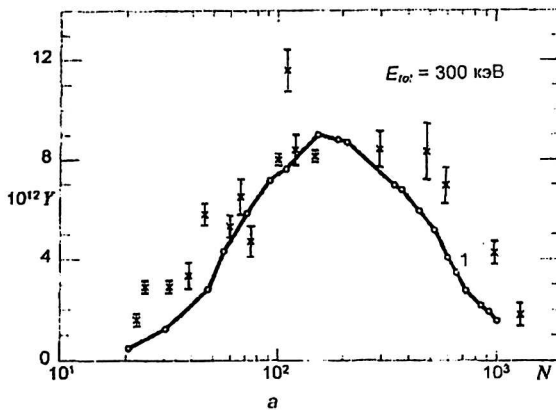
продуктов реакции ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^1\text{H} + {}^3\text{T}$ при увеличении размера кластеров обусловлен неравновесными эффектами, возникающими из-за коллективного взаимодействия ${}^2\text{D}$ с тяжелыми атомами — O, Ti по механизму Ферми. Эффективная температура (в килоэлектронвольтах), приобретаемая атомами ${}^2\text{D}$ за счет механизма коллективного взаимодействия, определяется по формуле

$$T_{\text{эф}} = \frac{2}{3} \frac{E}{N} \left(0,316 + 0,5 \exp \left(-0,5 \left(\frac{N_0}{N} \right)^{2/3} \right) N^{2/3} \right), \quad (1)$$

где E — энергия кластера, в кэВ;

N — число молекул в кластере;

$N_0 \sim 120$ — число молекул в кластере, для которого выход продукта реакции ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$ максимален.



Зависимость числа N молекул D_2O в кластере от изменения выхода Y продукта ${}^1\text{H}$ реакции:
 а — ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^1\text{H} + {}^3\text{T}$ (сравнение теории и эксперимента); б — ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$ (сравнение расчетов на основе различных моделей с экспериментальными данными); х — эксперимент

Эффективная температура определяется из соотношения [9]

$$\langle \nu \sigma(T_{\text{эф}}) \rangle_{\text{eq}} = \langle \nu \sigma \rangle_{\text{неq}},$$

где $\langle \rangle_{\text{eq}}$ — выражение для константы скорости термоядерного процесса в “равновесных условиях”;

$\langle \rangle_{neg}$ — выражение для константы скорости, обусловленное неравновесными эффектами.

Расчет выхода Y продукта реакции ${}^2D + {}^2D = {}^1H + {}^3T$ при реагировании атомов 2D , ускоренных в кластерах при их столкновении со стенкой из TiD, с атомами 2D , находящимися в стенке, проводился по формуле [12]

$$Y = 7,5 \cdot 10^{-10} E^{5/6} N^{1/6} \exp(-44,24 / \sqrt{1,5T_{эф}}),$$

где $T_{эф}$ берется из (1). Результаты расчета выхода Y продукта 1H реакции ${}^2D + {}^2D$ при взаимодействии со стенкой из Ti, насыщенного 2D , на основе (1) и сравнение с экспериментом [10] представлены на рисунке, а, кривая 1. Результаты сравнения расчета выхода Y продукта 1H на основе (1) с различными “равновесными моделями” [12] и экспериментом [10] представлены на рисунке, б, кривая 1. На основе анализа экспериментальных данных и теоретических результатов предложен способ реализации процесса синтеза легких ядер со скоростью, близкой к максимальной при относительно низких средних энергиях, приходящихся на один нуклон в кластере $\sim 2,5$ эВ. Суть способа состоит в разгоне в сопле Лавалья смеси 2D_2 , 2D и паров тяжелых металлов Th^{232} , U^{238} , Pd^{106} , образовании дейтерированных кластеров из этих металлов и бомбардировки ими мишени из тяжелых металлов Th^{232} , U^{238} , Pd^{106} , насыщенных 2D или 3T . Например, если начальная температура в форкамере сопла $\sim 50\,000$ К (получаемая в результате взрыва проволоочки из тяжелого металла), то конечная энергия у части атомов 2D ~ 100 кэВ за счет эффектов “усиления” при взаимодействии дейтерированного кластера из тяжелых металлов со стенкой из тяжелых металлов, насыщенных тритием. Соотношение — между компонентами смеси в форкамере сопла, при этом $n_h \ll n_l$, $\rho_h \leq \rho_l$, где n_h , ρ_h — концентрация и плотность паров тяжелых металлов, соответственно; n_l , ρ_l — концентрация и плотность легкого газа-носителя. Суть эффектов “усиления” состоит в том, что при одинаковой температуре торможения легкого газа и паров металла T^* при разгоне смеси в сопле Лавалья тяжелая примесь приобретает скорость, близкую к скорости легкого компонента. При этом энергия паров тяжелых металлов увеличивается в m_h/m_l раз. При образовании кластера в струе охлаждающегося газа его энергия равна

$$E \approx E_l \frac{m_h}{m_l} N_h,$$

где E_l — энергия легкого компонента-носителя;

E — энергия кластера;

N_h — число тяжелых атомов в кластере.

В результате взаимодействия кластера со стенкой его энергия частично передается находящимся в нем атомам 2D . Величина передаваемой энергии определяется из (1), где N заменяется на N_h .

Выводы

1. Предложены способы, состоящие в передаче энергии от легких частиц к тяжелым при истечении из сопла Лавалья, концентрации этой энергии при образовании кластеров в охлаждающемся потоке, реализации накопленной энергии при столкновении со стенкой или при торможении в зоне поступательной неравновесности во фронте ударной волны.

2. Реализация энергии, накопленной в кластерах, осуществляется за счет неравновесного перераспределения энергии от тяжелых элементов к легким по механизму Ферми в результате эффектов коллективного взаимодействия:

при столкновении кластеров, имеющих дисперсию по массам и диаметрам во фронте ударной волны;

при столкновении со стенкой из дейтерированных материалов.

3. Способ, в котором кластеры взаимодействуют со стенкой, открывает принципиальную возможность использовать для проведения термоядерного синтеза реакции: ${}^1\text{H} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^2\text{He} + {}^2\text{D}$, ${}^1\text{H} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li} + {}^4\text{He}$, ${}^1\text{H} + {}^{11}\text{B} \rightarrow {}^3\text{He}$, в этом случае кластер насыщается ${}^1\text{H}$, а стенка содержит ${}^9\text{Be}$ или ${}^{11}\text{B}$.

4. Устройства для проведения термоядерных реакций, принцип работы которых основан на вышеуказанных способах, могут быть созданы на базе уже существующих технологий. Характерной их особенностью являются малогабаритность и возможность использования их в качестве источника нейтронов с потоком $f \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ 1/(см}^2\text{·с)}$ в импульсном режиме.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований по гранту № 00-02-16614.*

Л и т е р а т у р а

1. Зельдович Я. Б., Генцих А. П., Манелис Г. Б. Особенности поступательной релаксации во фронте ударной волны в газовой смеси// Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 2. С. 349.
2. Великодный В. Ю. Уравнения движения газовой смеси при наличии химических реакций// ЖТФ. 1990. Т. 60. № 4. С. 22.
3. Великодный В. Ю., Битюрин В. А. Влияние эффектов поступательной неравновесности на кинетику физико-химических превращений во фронте ударной волны//Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. № 4. С. 39.
4. Великодный В. Ю., Битюрин В. А. Влияние эффектов поступательной неравновесности на кинетику физико-химических превращений во фронте ударной волны//Хим. физика, 1997. Т. 16. № 9. С. 14.
5. Великодный В. Ю., Емельянов А. В., Ерелин А. В. Неадиабатическое возбуждение молекул йода в зоне поступательной неравновесности ударной волны// ЖТФ. 1999. № 16. С. 23.
6. Emelianov A. V., Eremin A. V., Velikodnyi V. Yu. Study of non-equilibrium effects within shock front in gas-nanoparticles mixture// 22 nd Int. Symp. Shock Waves. London. 1999. Paper 3971.
7. Kulikov S. V. Possibility of accelerations of the threshold processes for multicomponent gas in the front of a shock wave// Shock Waves. 1997. № 7. P. 25.
8. Velikodnyi V. Yu., Bityurin V. A. On Peculiarities of High Threshold Physical-Chemical Transformations within a Translational Non-Equilibrium Region in a Shock Wave Front//21 th Int. Symp. RGD. Marscille (France), 1998. P. 233.
9. Великодный В. Ю., Битюрин В. А. О возможности термоядерного синтеза во фронте ударной волны.// Прикл. физика, 2001. № 3. С. 12.
10. Beuhler R. J., Friedlander G., Friedmann L. Cluster-Impact Fusion// Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. № 12. P. 1292.
11. Fallaveir M., Kemmler J., Kirsch R., Poizat J. C., Remillieux J., Thomas J. P. Search for Nuclear Fusion in Deuterated Targets under Cluster-Beam Impact// Ibid. 1990. V. 65. № 5. P. 621.
12. Carraro C., Chen B. Q., Schraman S., Koonin S. E. Estimates of cluster-impact fusion yields// Phys. Rev. A 1990. V. 42. № 3. P. 1379.
13. Echenique P. M., Manson J. R., Ritchie R. H. Cluster-Impact Fusion// Phys. Rev. Letters. 1990. V. 64. № 12. P. 1413.

Cluster synthesis of light nuclei such as D+D

V. Yu. Velikodnyi

Institute of Applied Mechanics RAS, Moscow, Russia

V. A. Bityurin

Institute High Temperature RAS, Moscow, Russia

In series experimental works in which interaction heavy-water clusters, accelerated to a total energy of the order of 300 keV, with deuterated targets (TiD) was examined, the "anomalous" high yields the products of reaction ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$ under increasing sizes clusters was revealed. Authors this work showed, that "anomalous" high yields products of the reaction ${}^2\text{D} + {}^2\text{D}$ under increasing a clusters sizes connected with non-equilibrium effects arise from collective interaction ${}^2\text{D}$ with heavy atoms — O, Ti by Fermi mechanism. On the basis experimental data and theoretical results the method of realization the process of synthesis of light nuclei with speed closed to maximum value under relatively low average energy for one nuclon in cluster $\sim 0.005\text{--}0.8$ keV was proposed.