

01;03
©1993

ГИДРОДИНАМИКА УДАРНО-КЛАСТЕРНОГО СИНТЕЗА

В.Е.Фортков, Г.С.Романов, А.В.Тетерев

В гидродинамическом приближении методами механики сплошной среды проведены расчеты высокоскоростного соударения дейтерийсодержащих кластеров и конденсированных мишеней. Проанализирована динамика движения ударно-сжатой плазмы, найдены ее давления и температуры, рассчитан выход термоядерных нейтронов, который сопоставляется с экспериментом. Показано, что замедленная ион-электронная релаксация приводит к значительному улучшению условий синтеза и росту нейтронного выхода.

В [1] приведены результаты экспериментов по бомбардировке дейтерийсодержащих титановых мишеней потоком электростатически ускоренных кластеров $(D_2O)_n$ с $n \sim 10 - 10^3$, где был зарегистрирован выход нейтронов термоядерного спектра с интенсивностью $\sim 10^{-13} - 10^{-15}$ нейтронов, на один кластерный дейтрон. Сделанные там же в гидродинамическом приближении качественные оценки ожидаемого выхода нейтронов дали величины на 10^{10} порядков меньшие экспериментальных, что сразу же обострило интерес к этой проблеме [2-4] и стимулировало поиск альтернативных объяснений данного эффекта. Так в [3] обсуждаются модели внутримолекулярного обмена, в [4,5] — вклад высокоэнергетических флуктуаций и многочастичные эффекты, а выполненные в [4] гидродинамические оценки основаны на нереалистично высоких степенях сжатия плазмы $\sim 10^{10}$.

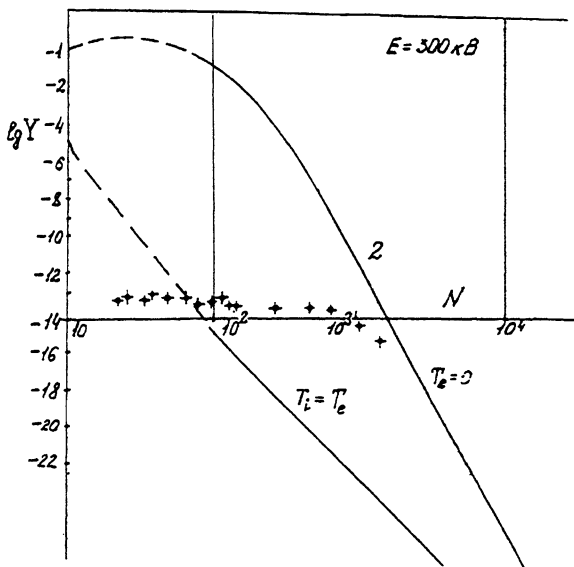
Вместе с тем ясно, что даже упрощенный гидродинамический анализ приводит к сложной пространственной нестационарной картине движения, содержащей мощные ударные и тепловые волны, волны разгрузки, сопровождаемой нелокальным переносом энергии в среде с экстремально высокими давлениями и температурами. Ввиду крайне резкой зависимости регистрируемого в экспериментах нейтронного выхода от параметров термоядерной плазмы, необходим аккуратный расчет физических условий в зоне столкновений, который может быть выполнен лишь численными методами. В данной работе это сделано путем интегрирования на ЭВМ двумерных уравнений движения и переноса энергии

электронной теплопроводностью, альфа-частицами и излучением.

Сделаем оценки условий эксперимента [1]. Опыты [1] выполнены с токами пучка $\sim 10^{-9}$ А, где расстояние между летящими дейтронами, много больше их собственных размеров, а также размеров области мишени, сжатой и разогретой в результате удара. Это позволяет описывать процесс движения и удара каждого кластера независимо от соседей. Электрическое поле ускорителя $E \sim 3 \cdot 10^5$ В разгоняет дейтроны до скоростей $V_n \sim 0.6 - 6 \cdot 10^7$ см/с. Удар таких дейтронов о конденсированную мишень даст давление в сотни мегабар и температуры килоэлектровольтового диапазона, при которых кратность равновесной ионизации мишени и ударника достигает 10. Однако в условиях обсуждаемых экспериментов ионизация вряд ли успеет развиться, т.к. характерное время жизни ударно-сжатой плазмы ($\sim R/C \sim 10^{-14}$ с) меньше времени ион-электронной релаксации ($\sim 10^{-12}$ с).

Таким образом, по-видимому, реализуется следующая схема процесса. При ударе кластера в нем и мишени возникают мощные ударные волны, во фронте которых происходит сжатие и нагрев имеющих наибольшую вязкость тяжелых частиц, которые вступают в реакцию термоядерного синтеза. Образование и нагрев свободных электронов при этом замедлен. Таким образом, кинетическая энергия передается непосредственно тяжелой компоненте и поэтому исключаются потери энергии на ионизацию и охлаждение плазмы электронной теплопроводностью и излучением. В этом, по-видимому, состоит основное отличие данного типа термоядерного синтеза от традиционных способов нагрева плазмы [6] электрическим током, лазерным и корпускулярными потоками, где энергия воспринимается электронами, которые затем ее передают ионам.

Численное моделирование процесса высокоскоростного удара проводилось путем интегрирования уравнений механики сплошной среды в эйлеровой системе координат методом крупных частиц с учетом переноса энергии теплопроводностью (метод прогонки) и излучением (многокрупное приближение). Термодинамические свойства плазмы описывались кольцевым дебаевским приближением в большом каноническом ансамбле статистической механики [7], а оптические и транспортные свойства квантостатической моделью [8]. Отметим (и это подтверждено контрольными расчетами), что ввиду относительно невысоких температур радиационный перенос энергии играет незначительную роль. Мал также разогрев топлива α -частицами, которые



Зависимость нейтронного выхода Y от размеров кластера при ускоряющем поле 350 кВ. Точки — эксперимент [1]; 1 — равновесная ионизация $T_i = T_e$, 2 — разогретые ионы и холодные электроны.

к тому же из-за невысокой плотности плазмы почти беспрепятственно уходят из зоны реакции.

При расчете числа актов реакции синтеза использовались известные выражения для скорости Д-Д реакции, основанной на подбарьерной модели Гамова [6]. Учитывалось выгорание атомов термоядерного топлива. Сопоставление рассчитанных значений нейтронного выхода Y , рассчитанного на один кластерный дейтрон с экспериментом представлена на рисунке. Результаты расчетов с малым числом частиц в кластере $N; N^*$ являются малообоснованными, т.к. заведомо лежат вне пределов гидродинамического приближения. Основываясь на сопоставлении расчетов скоростного удара методами молекулярной динамики и динамики сплошной среды [9], а также на измерении электронных свойств ртутных кластеров [10], можно ожидать, что граница гидродинамического приближения лежит в районе $N^* \sim 100$. Ниже этой границы гидродинамические расчеты носят ориентировочный характер и отмечены на рисунке пунктиром.

Мы видим, что нейтронный выход термоядерной реакции чрезвычайно чувствителен к параметрам плазмы. Особенно важным, как мы уже отмечали, является учет кинетики

передачи энергии от нагретых ионов к холодным электронам (см. кривую 1 — мгновенная и равновесная ионизация, $T_i = T_e$ и кривая 2 — когда вся кинетическая энергия кластера передается ионам, а электроны остаются холодными). Учет этого эффекта увеличивает ионную температуру плазмы почти на порядок, а нейтронный выход — на $10^{10} - 10^{12}$ порядков. Как и в эксперименте, полученная из расчетов зависимость нейтронного выхода от величины ускоряющего электростатического поля носит полулогарифмический характер с близкими наклонами кривых. Учитывая сказанное относительно N^* , мы видим, что в отличие от оценок [1,4] гидродинамический расчет дает более высокие значения нейтронного выхода. При этом для малых кластеров гидродинамический расчет завышает число нейтронов даже в модели $T_i = T_e$.

Более детальные расчеты готовятся к публикации. Авторы благодарны В.И.Гольданскому за стимулирующие дискуссии.

Список литературы

- [1] *Beuchler R.J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. N 12. P. 1293–1295; 1991. V. 67. N 4. P. 473–476.
- [2] *Леонас В.Б.* // УФН. 1990. Т. 160. В. 11. С. 135–141.
- [3] *Echenique P.M., Manson J.R., Ritchie R.M.* // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. N 12.
- [4] *Carraro C., Chen B.O., Schramm S., Koonin S.E.* // Phys. Rev. 1990. V. 42. P. 1379.
- [5] *Куснер Ю.С., Николаев В.И.* // Письма ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 18. С. 46–49.
- [6] *Дюрештадт Дж., Мозес Г.* Инерционный термоядерный синтез. Атомэнергиздат.: М. 1984.
- [7] *Ebeling W., Forster A. et al.* Thermophysical Properties of Hot Dense Plasmas. В.Г.Теубнер Verlagsgesellschaft. Leipzig, 1991.
- [8] *Беспалов И.М., Полищук А.Я., Фортвов В.Е.* // Письма ЖТФ. 1990. Т. 16. N 11. С. 80.
- [9] *Hollian B.L.* // Phys. Rev. 1987. A36. N 8. P. 3943–3946.
- [10] *Rademann K.* // Ber. Bunsenges Phys. Chem. 1990. V. 93. P. 653–670.

Поступило в Редакцию
16 июля 1993 г.