

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В ПЛАЗМЕ С ИОННЫМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ. ТЕХНИЧЕСКИЕ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

А. Л. Фальков, А. А. Овечкин, В. А. Лыков, П. Е. Кискин, Д. А. Варфоломеев, Н. М. Жданова

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Скорость реакций синтеза в общем случае пропорциональна вероятности сближения реагирующих ядер на расстояние, сравнимое с радиусом действия ядерных сил. В неидеальной плазме формируется ближний порядок в расположении ионов, который может оказать существенное влияние на темп термоядерных реакций (конфигурационные поправки в поляризованной плазме). Из основных положений ионно-корреляционной модели среднего атома Старретта и Саумона [1] с учетом гиперцепного замыкания для системы уравнений Орнштейна-Цернике [2] следует, что относительный прирост скорости термоядерных реакций в плотной многокомпонентной неидеальной плазме с коррелированной ионной подсистемой составляет:

$$R_{ij} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(g_{ij}(r) \exp \left(\frac{Z_{*i} Z_{*j}}{rT} \right) \right) = \exp \left(4\pi \int_0^\infty dr r^2 \left(C_{Ie,i}(r) n_{e,j}^{scr}(r) + \sum_{k=1}^{N_m} n_k^{(0)} h_{ik}(r) c_{kj}(r) \right) \right), \quad (1)$$

где g_{ij} – радиальная функция распределения, пропорциональная относительной вероятности обнаружения иона сорта « j » на заданном расстоянии r от ядра сорта « i », T – температура плазмы, Z_{*i} – средний заряд иона некоторого сорта, $C_{Ie,i}$ – прямая ион-электронная корреляционная функция, $n_{e,j}^{scr}$ – экранирующая электронная плотность, N_m – число различных сортов ионов в плазме произвольного элементного состава, $n_i^{(0)}$ – парциальная концентрация i -ого компонента смеси ионов, c_{ij} и h_{ij} – прямая и полная парные корреляционные функции ионов сортов « i » и « j » соответственно. Уравнения модели [1] построены с учетом возможности частичного квантового вырождения электронной подсистемы плазмы, а также поляризации плазмы вследствие сильных ион-ионных и ион-электронных пространственных корреляций. В предельном случае слабой неидеальности плазмы формула (1) переходит в известное выражение из работы [3] и, следовательно, согласуется с результатами работ [4, 5]. Формула (1) удобна для выполнения количественных оценок в широком диапазоне неидеальности плазмы $10^{-1} \leq \langle \Gamma \rangle \leq 10^3$, поскольку все необходимые зависимости могут быть найдены непосредственно при численном решении уравнений модели Старретта и Саумона [1] для смеси плазмы по программе ELEGIA [6].

Применим выражение (1) для оценки прироста скорости dd -реакции в дейтериде урана UD_3 в сферической многокаскадной кумулятивной системе, предназначенной для исследования возможности газодинамического термоядерного синтеза (ГДТС) [7, 8]. Прирост скорости dd -реакции в момент фокусировки ударной волны в центре системы, определенный по формуле (1) для средней температуры (около 0,4 кэВ) и плотности (около 75 г/см³), реализовавшихся в слое из UD_3 , составил $R_{dd} = 1,15 \div 1,23$. Расчеты сжатия сборки выполнялись по программе «Волна» [9] в гидродинамическом приближении с использованием широкодиапазонных уравнений состояния вещества (УРС). Результат устойчив относительно вариации УРС и начальной плотности UD_3 . При этом расчетные значения нейтронного выхода даже без учета поправки (1) удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов [8]. Таким образом, учет поправки к скорости dd -реакции в практике расчетно-теоретической проработки ГДТС-систем следует в настоящее время признать избыточным. В одномерных расчетах определяющее влияние оказал выбор УРС, тогда как при двумерном моделировании работы сборок ГДТС может проявиться существенная роль асимметрии и перемешивания материалов в слоях системы.

Обратимся к оценке влияния ионных корреляций на скорости реакций синтеза в недрах звезд. Прирост скорости реакций pp- и CNO-циклов [10] в центре Солнца (1,35 кэВ, 158 г/см³) и на внешней границе его ядра (0,7 кэВ, 20 г/см³) для плазмы стандартного состава [10] составляет от $R_{pp} \approx 1,05$ до $R_{CNO} \approx 1,20$. Данные результаты близки по величине к оценкам, полученным в работах [4, 5], и не противоречат стандартной модели строения Солнца.

В недрах коричневых карликов [11] – протозвездных объектов с предельно малой массой (около $0,04 \div 0,09 M_{\odot}$) – прирост скоростей pp - и dd -реакций весьма существенен: $R_{pp(dd)} \approx 2 \div 6$ (при температуре не более 0,4 кэВ и плотности от 60 до 600 г/см³). Следовательно, становится более вероятным протекание реакций синтеза в менее массивных астрофизических объектах – менее $\approx 0,1 M_{\odot}$, – чем это считается в настоящее время. Кроме того, длительность начального этапа разогрева недр протозвезды за счет реакций синтеза [12] – стадии горения дейтерия – может существенно сократиться. Таким образом, последовательный учет изменения скоростей термоядерных реакций в неидеальной плазме с сильными ионными корреляциями необходим для уточнения теоретических моделей строения и эволюции звезд.

Литература

1. **Starrett, C. E.** Integral equation model for warm and hot dense mixtures [Текст] / C. E. Starrett, D. Saumon, J. Daligault, S. Hamel // Phys. Rev. E. – 2014. – Vol. 90. – P. 033110.
2. **Крокстон, К.** Физика жидкого состояния. Статистическое введение [Текст] ; под ред. А. И. Осипова. – М. : Изд-во «Мир», 1978. – 400 с.
3. **Salpeter, E. E.** // Aust. J. Phys. – 1954. – Vol. 7. – P. 373.
4. **Bahcall, J. N.** The Salpeter plasma correction for solar fusion reactions [Text] / J. N. Bahcall, L. S. Brown, A. Gruzinov, R. F. Sawyer // A&A. – 2002. – Vol. 383. – P. 291–295.
5. **Цытович, В. Н.** Коллективные плазменные поправки к скоростям термоядерных реакций в плотной плазме [Текст] // ЖЭТФ. – 2002. – Т. 121, № 3. – С. 1080–1091.
6. **Фальков, А. Л.** Структурные и теплофизические свойства плотного ионизованного вещества с учетом кулоновских корреляций ионов [Текст] : дисс. ... канд. физ. – мат. наук : защищена 03.07.24 : утв. 25.11.24 / Фальков Андрей Леонидович. – М., 2024. – 175 с.
7. **Александров, В. А.** Возбуждение термоядерной реакции в фокусе прецизионного сферического заряда взрывчатого вещества [Текст] / В. А. Александров, А. Н. Анисимов, А. Н. Аригин и др. // ВАНТ. Сер. «Математическое моделирование физических процессов». – 1992. – Вып. 4. – С. 92–93.
8. **Александров, В. А.** Радиальное распределение интенсивности термоядерной реакции в мишенях UD_3 , помещенной в фокус сферического заряда ВВ [Текст] / В. А. Александров, В. М. Горбачёв, А. Л. Михайлов и др. // Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. – Саров : ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2005. – Вып. 8. – 355 с.: ил. – С. 102–107.
9. **Куропатенко, В. Ф.** Комплекс программ «Волна» и неоднородный разностный метод расчет неустановившихся движений сжимаемых плотных сред. Часть I. Неоднородный разностный метод [Текст] / В. Ф. Куропатенко, Г. В. Коваленко, В. И. Кузнецова и др. // ВАНТ. Сер. «Математическое моделирование физических процессов». – 1989. – Вып. 2. – С. 9–18.
10. **Гибсон, Э.** Спокойное Солнце [Текст] ; под ред. Э. В. Кононовича. – М. : Изд-во «Мир», 1977. – 408 с.
11. **Kumar, S. S.** Models for stars of very low mass [Text] // NASA technical note TN D-1907. – Washington, D. C. : NASA, 1963. – 25 p.
12. **Ишханов, Б. С.** Нуклеосинтез во Вселенной [Текст] : учеб. пособие. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2017. – 208 с.