

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ЭЛЕМЕНТОВ

В.А.Белоконь, Ю.А.Ильинский, Р.В.Хохлов

На основе экстраполяции известных условий УТС обсуждаются возможности синтеза различных элементов.

О принципиальной возможности синтеза любых элементов, на лабораторном и даже промышленном уровне, говорят результаты астрофизики и физики, в особенности – развитие исследований УТС [1–8]. Здесь рассмотрение ограничивается методами инерциального удержания сверхплотной плазмы, создаваемой специальными режимами сжатия [6–14]. Для мишени массой M с формой, близкой к сферической, необходимое значение "оптической толщины" $\langle \rho R \rangle \approx M^{1/3} \langle \rho \rangle^{2/3}$ достигается сверхплотным сжатием [6], предпочтительно изэнтропическим, с пиковой мощностью внешнего воздействия (например – лазерного) $\dot{E} \sim (\rho R)^2$ [11]. Иницирующая температура получается контролируемым повышением энтропии [6–8].

Известные условия синтеза $D_T \rightarrow {}^4\text{He} + n (\langle \rho R \rangle = 2 \div 5 \text{ г/см}^2, \rho_{\text{max}} \approx 10^3 \text{ г/см}^3, T_{\text{и}} \approx 5 \div 10 \text{ кэв})$ достижимы воздействием импульса $E \approx 0,1 - 1,0 \text{ Мдж}$ максимальной мощности $\dot{E} \gtrsim 10^{14} \text{ вт}$ [7, 14]. Иницирование малой доли горючего с $(\rho R)_T \lesssim 1 \text{ г/см}^2$ достаточно для значительного выгорания [6–8, 10, 12].

В противоположность экзотермическим процессам УТС, универсальный синтез элементов охватывает реакции и со слабым энерговыделением, и со значительным поглощением энергии [1, 2, 6]. Здесь следует ожидать более жестких требований: $50 \lesssim T \lesssim 500 \text{ кэв}, \langle \rho R \rangle \gtrsim 100 \text{ г/см}^2$. Если энергия импульса ограничена $E \lesssim 100 \text{ Мдж}$ [16], то возникает необходимость в плотностях $\rho \gtrsim 10^5 \text{ г/см}^3$, достижимых профилированием импульсов до мощности $\gtrsim 10^{17} \text{ вт}$ (возможно – с перестройкой частоты в процессе сжатия).

Снижение необходимой мощности может быть, по-видимому, достигнуто с мишенями квазиодномерного сжатия рассредоточенных элемен-

тов (плотных сгустков плазмы), ускоряемых до $10^8 - 9$ см/сек, согласно зависимости $\rho^{max}/\rho_0 \approx [(\gamma - 1)u^{max}/2a_0^{3B}]^{2/(\gamma - 1)}$ [11].

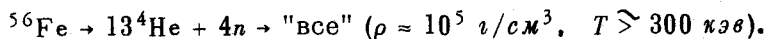
Энергию необходимого воздействующего импульса можно снизить на один - два порядка величины использованием кумулятивных [5,6,9,12] явлений, а также достижением еще в процессе ускорения [10] значений $\langle \rho R \rangle$, при которых включается тепловыделение, дающее [8, 14] добавочную скорость внутренней оболочке с повышенными значениями A , $T_{и}$. Этим преодолевается пробел между температурой горения $T(DT) \ll 100$ кэв [6, 8] и $T \gg 200$ кэв для "варки" большинства элементов железного диапазона.

Гидродинамическая многостадийность типа рассмотренной автором работы [9], интересна скорее для перехода к более "тугоплавким", нежели к более крупным мишеням.

"Химическим" путем преодоления той же трудности является многостадийное инициирование с перекрыванием температур горения и инициирования: $DT \Rightarrow DD \Rightarrow H^{11}B \rightarrow 3\ ^4He + 8,7$ Мэв ($\rho \gg 10^5$ г/см³, $\rho R \gg 100$ г/см²). Последняя реакция [1, 6] интересна удобством утилизации, 99,9%-ным выходом альфа-частиц, возможностью использования ее для термостатирования универсального синтеза элементов, а также тем, что бора на Земле гораздо больше, чем дейтерия. Около половины получаемой энергии (≈ 70 дж/нг $H^{11}B$, $1 \ll E_\alpha \ll 4$ Мэв) можно отводить на синтез $\ ^4He + \ ^{18}O \rightarrow \ ^{22}Ne + \gamma$, поглощающий ≈ 20 дж/нг $\ ^{22}Ne$. Этот процесс, однако, не оптимален.

Если исходный элемент - гелий, то равновесные продукты его "варки", при $\rho \approx 10^5$ г/см³, $100 \ll T \ll 500$ кэв, могут содержать до нескольких процентов никеля, титана, аргона и серы, сохраняемых за счет эффекта "замороженного равновесия" [1, 2].

До железа или никеля элементы образуются сгоранием более легких. Следующие получаются захватом альфа-частиц и нейтронов, источником которых может послужить энергетически крайне невыгодная реакция [1, 2]



В ее продуктах, при достаточной близости к локальному равновесию, в силу обилия нейтронов и запрета синтеза альфа-частица + нейтрон, происходит рекомбинационный синтез элементов с массовыми числами около пиков $A = 80, 130, 195$ (не исключая также синтез сверхтяжелых элементов) [2].

Достижению высоких плотностей в рассматриваемых процессах способствует "сток" энергии (до ≈ -100 дж/нг) на диссоциацию ядер, производство равновесных фотонов, нейтронизацию материи и рождение пар [1, 2,6,16]. Эти явления приводят к уменьшению эффективного показателя адиабаты Пуассона γ от $5/3$ до $4/3 + 1$, т. е. к существенному усилению сжатия импульсами данной энергии [10, 11].

Для "лестничной" эволюции изотопов в направлении "острова стабильности" сверхтяжелых элементов [6] интересна многократная сверхплотная обработка "термоядерной золы" с выдерживанием времен бета-распада. "Принудительный" β^+ -распад в плотной среде сильно вырожденных электронов [15] мог бы привести к решению проблемы сокращения этих времен.

Универсальный синтез ядер целесообразно разделить на три категории: аналогичные обычному УТС мощные экзотермические (в целом) процессы с "варкой" малых примесей — исходных элементов для получения новых; "варка" с малым положительным или нулевым энергобалансом (ср. [16]); эндотермические процессы, не исключающие использования гидродинамической энергии разлета продуктов синтеза.

Избыточная энергия процессов универсального синтеза может быть использована и на основе известных [6] принципов утилизации УТС (наиболее эффективной для заряженных продуктов реакций при изэнтропическом сжатии [6,11]), и на новых принципах, например — с получением стимулированного рекомбинационного гамма-излучения.

Практическое решение проблемы эффективного синтеза дефицитных изотопов из таких ядер как Н, He, В, С, О, Si, Fe во многом зависит от дальнейшего прогресса в "архитектуре" мишеней с устойчивым и продуктивным сверхплотным сжатием.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
19 октября 1976 г.

Литература

- [1] G. Gamow. The Creation of the Universe, London Mc Millan 1961;
Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков. Релятивистская астрофизика, М., 1967.
- [2] В.С.Имшенник, Д.К.Надежин: *Астрон. Ж.*, **42**, 6, 1965; D. Schramm, W. Arnett (eds): *Explosive Nucleosynthesis*, Texas Univ. Press 1973; T. Weaver, G. Chapline: *Astrophys. J.*, **192**, L57, 1974.
- [3] Н.Г.Басов, О.Н.Крохин. *ЖЭТФ*, **46**, 171, 1964; Н.Г.Басов, А.А.Кологривов, О.Н.Крохин, А.А.Рупасов, Г.В.Склизков, А.С.Шиканов: *Письма в ЖЭТФ*, **23**, 474, 1976,
- [4] F. Dawson: *Phys. Fluid.*, **7**, 981, 1964; A. Hertzberg, T. Daiber, C. Wittliff: *Phys. Fluid.* **9**, 617, 1966; И.В.Немчинов: *Прикл. мат. мех.* **31**, 300, 1967.
- [5] Е.И.Забабахин. "Механика в СССР за 50 лет" М., изд. Наука, **2**, 313, 1970.
- [6] John H. Nuckolls, L. Wood; UCRL-50021-72, 73, 74; -74191, 1972; -74345, 938, 1973; -75364, 1974; -77725, 1976; *Physica Scrip.* **10A**, 149, 1974.
- [7] K. Brueckner: *Rev. Mod. Phys.*, **46**, 325, 1974; *Nucl. Fus.*, **15**, 471, 1975; **16**, 387, 1976.
- [8] R. Mason, R. Morse, G. Fraley: *Phys. Fluids*, **17**, 474, 1974; **18**, 814, 1975; *Nucl. Fus.*, **15**, 935, 1031, 1975; *Phys. Rev. Lett.*, **35**, 1520, 1975.
- [9] F. Winterberg: *Nature*, **251**, 44, 1974; **258**, 512, 1975.
- [10] R. Kidder: *Nucl. Fusion*, **14**, 53, 1974; **16**, 3, 405, 1976.
- [11] В.А.Белоконь: *ДАН СССР*, **222**, 575, 1975. *Письма в ЖЭТФ*, **1**, 824, 1975.
- [12] *Proceedings of 1975 E-BEAM Conference*, ed. by G. Yonas, SANDLABS, 1976.

- [13] С.И.Анисимов, П.П.Пашинин, А.М.Прохоров. УФН, 119, 401, 1976.
- [14] С.Л.Боголюбский, Б.П.Герасимов, В.И.Ликсонов, А.П.Михайлов, Ю.П.Попов, Л.И.Рудаков, А.А.Самарский, В.П.Смирнов: Письма в ЖЭТФ, 24, 206, 1976; M.Sweeney. Appl. Phys. Lett., 29, 231, 1976.
- [15] B.Rust, M.Leventhal, S. Mc Call: Nature, 262, 2139, 1976.
- [16] G.Chapline: Preprint (for Nature) UCRL, june 1976.
-