

Э. Я. Вильковский

О ВОЗМОЖНОСТИ СИНТЕЗА ЯДЕР РАЗЛИЧНЫХ ЗАРЯДОВ
В ПЛАЗМЕ С СИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

(Представлено академиком А. Д. Сахаровым 23 IX 1969)

А. В. Гуревичем ⁽¹⁾ показана возможность установления двух стационарных состояний движения примесных многозарядных ионов (с зарядом Z) в плазме с основными ионами (заряд $Z_{i0} < Z$) в электрическом поле.

Примесные многозарядные ионы в системе координат, где основные ионы покоятся, следуют за потоком электронов с характерными скоростями (при $T_e = T_i, Z_{i0} = 1$)

$$v(E) \sim \frac{Z-1}{Z} \left(\frac{m}{M_{i0}}\right)^{1/2} \frac{E}{E_K} v_e^T \quad \text{в состоянии I, } 0 < v < v_i^T,$$

$$v(E) \sim \frac{Z-1}{Z} \frac{E}{E_K} v_e^T \quad \text{в состоянии II, } v_i^T < v < v_e^T,$$

где v_e^T, v_i^T — тепловые скорости электронов и основных ионов плазмы; m/M_{i0} — отношение масс электрона и основного иона; $v(E)$ — скорость примесного иона в поле с напряженностью E ; E_K — критическое по отношению к убеганию электронов значение напряженности электрического поля;

$$E_K = 4\pi e^3 Z_{i0} n \ln \Lambda / kT,$$

где e — заряд электрона; n — электронная плотность; $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм; k — постоянная Больцмана; T — температура плазмы.

Большой интерес представляет значительная величина энергии примесных ионов во втором состоянии

$$\mathcal{E}_Z^E = \frac{M_Z v^2}{2} \simeq \frac{M_Z}{m} \left(\frac{Z-1}{Z} \frac{E}{E_K}\right)^2 \mathcal{E}_e^T,$$

где M_Z/m — отношение масс примесного иона и электрона; \mathcal{E}_e^T — тепловая энергия электронов плазмы.

Обсудим возможности синтеза ядер примесных ионов, находящихся во втором состоянии, с основными ионами плазмы. Так как направленная скорость примесных ионов в этом случае много больше тепловых скоростей ионов, $v_Z^E \gg v_{i0}^T > v_Z^T$, функции распределения основных и примесных ионов можно представить для расчета в виде

$$f_{i0}(v) = N \delta(v), \quad f_Z(v) = NX \delta(v - v_Z^E),$$

где N — количество основных ионов в единице объема, X — относительное содержание примеси.

В качестве примера рассмотрим реакции $\text{Li}^6 + \text{D}^2 \rightarrow \text{Li}^7 + p + 5 \text{ Мэв}$, $\text{Li}^6 + \text{D}^2 \rightarrow 2\text{He}^4 + 22,4 \text{ Мэв}$, $\text{He}^3 + \text{D}^2 \rightarrow \text{He}^4 + p + 18,3 \text{ Мэв}$.

Для различных значений относительной скорости многозарядных и основных ионов v (соответствующая энергия дейтона в системе покоя тяжелого ядра $\mathcal{E}_D = M_D v^2 / 2$) вычислим следующие величины: температуру плазмы

$$T = \frac{m}{3k} (v_e^T)^2 = \frac{2}{9\pi} \frac{m}{k} \left(\frac{Z}{Z-1} \frac{E_K}{E}\right)^2 v^2,$$

величины $\langle v\sigma \rangle$ и $W/N^2 = \langle v\sigma \rangle X \varepsilon$, где ε — энергия, выделяемая в данной реакции, W — мощность, выделяемая в единице объема.

Второе состояние устанавливается при $E \geq E_{II} = \lambda(T_e/T_i)E_1$ (1), где $\lambda(T_e/T_i) \simeq 1, 2$ при $T_e = T_i$

$$E_1 = \frac{Z}{Z-1} \left(\frac{3}{2\pi} \frac{m}{M_{i0}} \right)^{1/2} E_K \sim \frac{Z}{Z-1} \cdot 0,051 E_K.$$

Так как второе состояние возможно лишь при $E_{II} < E < E_K$, проведем расчет для двух случаев: а) $E = 0,2 E_K$, б) $E = 0,6 E_K$. Результат расчета

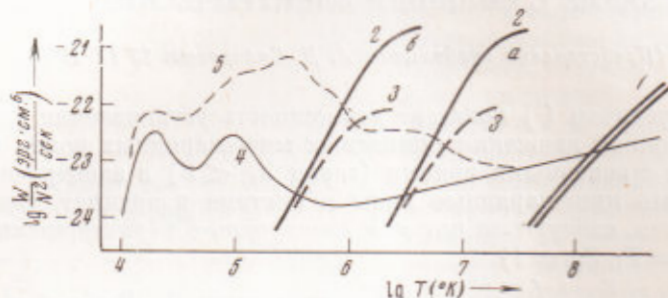


Рис. 1. Зависимость мощностей различных процессов в плазме от температуры (логарифмический масштаб). а — $E = 0,2 E_K$; б — $E = 0,6 E_K$. 1 — W/N^2 (эрг·см³/сек для реакции (термоядерной) $D^2 + D^2 +$ вторичные реакции); 2 — W/N^2 для реакции $He^3 + D^2 \rightarrow He^4 + p$; 3 — W/N^2 для реакции $Li^6 + D^2 \rightarrow Li^7 + p$; 4 — W/N^2 , γ -излучение плазмы (90% дейтерия, 10% гелия); 5 — W/N^2 , γ -излучение плазмы с космическим (фотосферы Солнца) обилием примесей

представлен на рис. 1 (принято $X = 0,1$); там же для сравнения показаны величины W^γ/N^2 , где W^γ — мощность γ -излучения с учетом излучения в линиях, рекомбинационного и тормозного излучения (2).

Рис. 1 позволяет качественно судить о балансе энергии в плазме. Видно, что реакции Li^6, D и He^3, D дают выход энергии, превосходящий излучение плазмы при $T \sim (10^5 \div 10^7)^\circ K$.

Выводы. Существует принципиальная возможность синтеза ядер различных зарядов в плазме с сильным электрическим током при условии кулоновской проводимости. Дополнительный подогрев плазмы за счет реакции He^3, D может в этом случае облегчить достижение условий термоядерного синтеза на реакции D, D .

Вывод о возможности осуществления двух стационарных состояний движения примесных ионов был сделан (1) на основе рассмотрения одночастичных соударений. Остается открытым вопрос, насколько повлияют на это явление коллективные процессы в плазме.

Из сказанного очевидно необходимость исследования возможности осуществления второго состояния в лабораторных установках. Реакции синтеза предоставляют, кстати сказать, возможность детектирования второго состояния по продуктам реакций синтеза наряду с обычными спектральными методами.

Выражаю свою благодарность А. В. Гуревичу за поддержку и обсуждение работы, а также участникам семинара Института атомной энергии им. И. В. Курчатова, принявшим участие в обсуждении работы.

Поступило
7 VII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. В. Гуревич, ЖЭТФ, 40, 1825 (1961). ² А. Г. Дорошкевич, Р. А. Сюняев, Астр. журн., 46, 20 (1969).