

ТОРМОЖЕНИЕ И КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ НАЛЕТАЮЩЕГО ИОНА В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ

Вычислена тормозная способность трехкомпонентной плазмы на основе уравнения Пуассона-Власова. Исследована критическая скорость налетающего иона. Показано, что потери энергии налетающего иона на электронах и ионах плазмы будут одинаковыми при скоростях налетающего иона, значительно меньших тепловой скорости частиц плазмы.

1. Исследование потерь энергии налетающего иона в среде представляет интерес для проблемы управляемого термоядерного синтеза и взаимодействия заряженных частиц с веществом [1, 2]. При этом важное значение имеют состав плазмы, ее плотность и температура. Зачастую в термоядерных установках возникает плазма, состоящая из электронов и нескольких сортов ионов. В связи с этим ниже исследуется зависимость критической скорости налетающего иона, при которой потери энергии на электронах и на ионах одинаковы, на основе тормозной способности трехкомпонентной плазмы.

2. Рассмотрим трехкомпонентную плазму, содержащую электроны и два сорта ионов с зарядами $q_i = -e$, $q_j = -2e$, и массами $m_i = m_p$, $m_j = 4m_p$.

Для соблюдения условия квазинейтральности необходимо выполнение следующих соотношении:

$$z_i n_i + z_j n_j = n_e, \quad n_i = \frac{\alpha n_e}{z_i \alpha + z_j (1 - \alpha)},$$

$$n_j = \frac{(1 - \alpha) n_e}{z_i \alpha + z_j (1 - \alpha)}, \quad (1)$$

где $\alpha = n_i / n_j$.

Известно, что [3, 4] тормозная способность плазмы описывается с помощью уравнения Власова-Пуассона:

$$-\left[\frac{dE}{dx} \right] = Ze \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{r=V_p t}, \quad (2)$$

где

$$\Phi(\vec{r}, t) = \frac{Ze}{2\pi^2} \int d^3 k \frac{e^{i\vec{k}(\vec{r} - \vec{V}_p t)}}{k^2 \varepsilon(\vec{k}, \vec{k} \vec{V}_p)} \quad (3)$$

– псевдопотенциал, учитывающий коллективные эффекты.

В формуле (3)

$$\varepsilon(\vec{k}, \omega) = 1 + \frac{1}{k^2} \left(W\left(\frac{\omega}{k}\right) + W\left(\sqrt{M_1} \frac{\omega}{k}\right) + W\left(\sqrt{M_2} \frac{\omega}{k}\right) \right) \quad (4)$$

представляет собой диэлектрическую проницаемость трехкомпонентной плазмы, где $M_1 = m_i / m_e$, $M_2 = m_j / m_e$.

Результаты численного решения уравнения (2) приведены на рис. 1, из которого видно, что

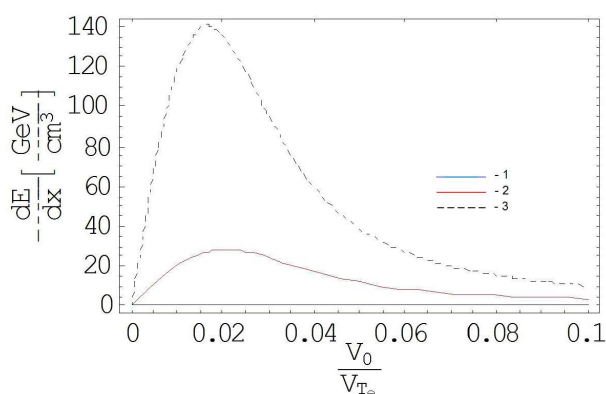


Рис. 1. Потери энергии налетающего протона в плазме при $T_e=200$ eV, $n_e = 10^{25}$:

- 1 – потери энергии на электронах плазмы,
- 2 – потери энергии на электронах и ионах водорода,
- 3 – потери энергии на электронах, ионах водорода и ионах гелия

критическая скорость наступает при значениях скорости налетающего иона меньших, чем тепловая скорость электронов.

Критической скоростью налетающего иона называется скорость, при которой потери энергии одинаковы на электронной и ионных компонентах плазмы, т.е.

$$S_e = S_i + S_j, \quad (5)$$

где

$$S_e = - \left[\frac{dE}{dx} \right]_e = \frac{\partial}{\partial x} \frac{Z^2 e^2}{2\pi^2} \int d^3k \frac{e^{i\vec{k}(\vec{r}-\vec{V}_p t)}}{k^2 \varepsilon_e(\vec{k}, \vec{k}\vec{V}_p)}, \quad (6)$$

$$S_{i,j} = - \left[\frac{dE}{dx} \right]_{i,j} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{Z^2 e^2}{2\pi^2} \int d^3k \frac{e^{i\vec{k}(\vec{r}-\vec{V}_p t)}}{k^2 \varepsilon_{i,j}(\vec{k}, \vec{k}\vec{V}_p)}. \quad (7)$$

Решение уравнения (5) с учетом (6) и (7) при $\alpha = 0,5$ приводит к зависимости критической скорости от плотности и температуры электронов плазмы, приведенной на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что зависимость критической скорости от температуры при всех значениях плотности носит немонотонный характер. Отметим, что при плотностях $n \approx 10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и температуре $T \approx 100 \text{ эВ}$ критическая скорость имеет небольшой макси-

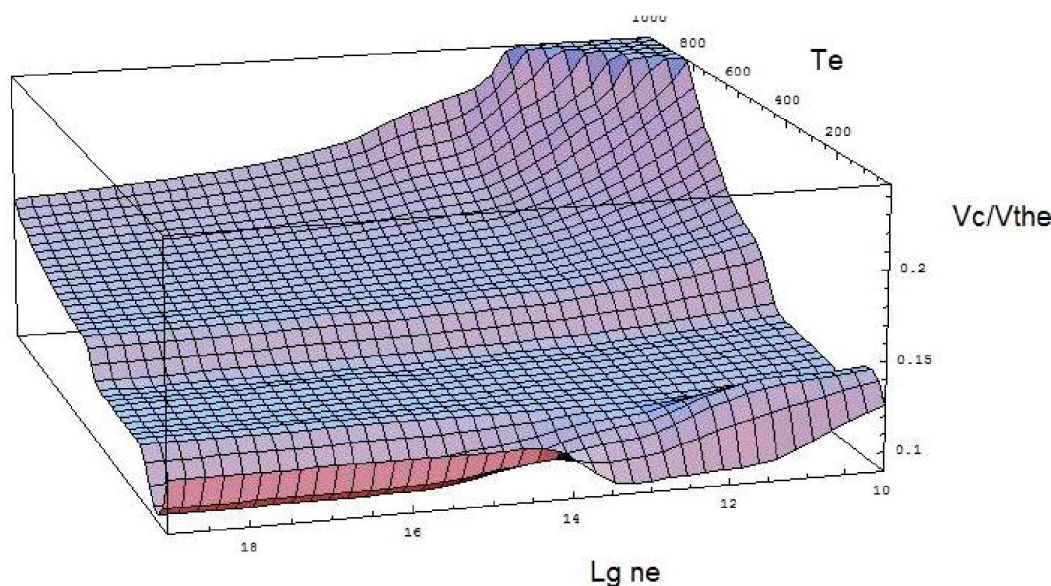


Рис. 2. Критическая скорость налетающего иона в ед. тепловой скорости электронов плазмы в зависимости от температуры и плотности плазмы при $\alpha = 0,5$

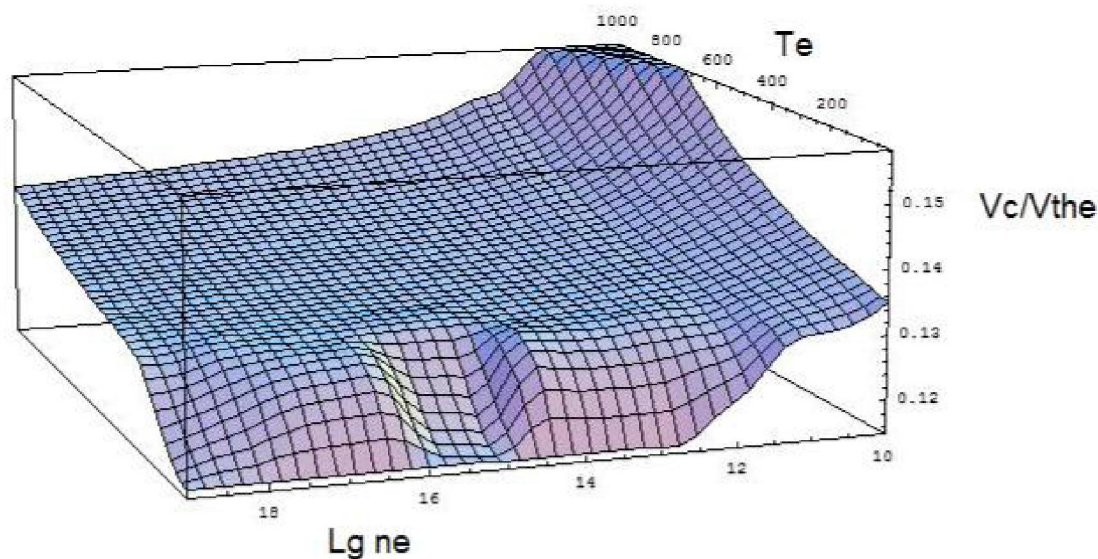


Рис. 3. Критическая скорость налетающего иона в ед. тепловой скорости электронов плазмы в зависимости от температуры и плотности плазмы при $\alpha = 0,1$

мум. Нетрудно также заметить что, в интервале плотности $n \approx 10^{14} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и при той же температуре $T \approx 100 \text{ эВ}$ критическая скорость имеет минимум. Этот минимум остается неизменным вплоть до значения $n \approx 10^{14}$, а при дальнейшем уменьшении плотности она растет, достигая своего максимального значения при $n \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Зависимость критической скорости от плотности и температуры частиц плазмы при $\alpha = 0,1$ приведено на рис. 3. существенно отличается от случая $\alpha = 0,5$. В этом случае зависимость критической скорости от плотности при фиксированных значениях температуры плазмы возникают два максимума, соответствующие значениям плотности $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, и один минимум при $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Сравнением рис. 2 и 3 показана достижение критической скорости происходит быстрее при $\alpha = 0,1$. Из анализа рис. 1 и 2 следует, что эффективное взаимодействие налетающего иона с плазмой происходит при скоростях значительно меньших, чем тепловая скорость электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Deutsch C., Maynard G.* Stopping of pointlike charges in a dense electron fluid // *Recent Res. Devel. Plasmas.* 1(2000): 1-23.
2. *Arista N.R., Brandt W.* Energy loss and straggling of charged particles in plasmas of all degeneracies // *Phys. Rev. A.* V. 23. P. 1898, (1980).
3. *Баумбетов Ф.Б., Стариков К.В., Ташеев Б.А.* Тормозная способность трехкомпонентной полностью ионизованной плазмы // *Вестник КазНУ.* 2006. № 1. С. 53-56.
4. *Peter Th., Meyer-ter-Vehn J.* Energy loss of heavy ions in dense plasma // *Phys. Rev.* V. 43. P. 1998.

Резюме

Үш компонентті плазманың тежеуіш қабілеті Пуассон-Власов теңдеуі негізінде есептелген. Плазмаға ұшып кіретін ионның кризистік жылдамдығы зерттелген. Плазмаға ұшып кіретін ионның плазма электрондары мен иондары тарапынан тежелулері, ұшып кіруші ион жылдамдығының плазма бөлшектерінің жылулық жылдамдығынан әлдеқайда кіші мәндерінде бірдей болатыны көрсетілген.

Summary

Stopping power of threecomponental plasmas is calculated on the basis of the Vlasov-Poisson equation. Critical velocity of the projectile ion is investigated. It has been shown that energy loss of the projectile ion on the electrons and ions of the plasma is equal in case of smaller projectile ion velocity than thermal velocity of plasma particles.

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы;

²Парижский XI университет, Орсе́й, Франция

Поступила 28.03.08г.