



Введение

Сегодня активно изучается процесс взаимодействия излучения больших мощностей с плазмой. На данный момент в экспериментах с использованием фемтосекундных лазеров удалось получить импульсы интенсивностью до 10^{22} Вт/см². В случае взаимодействия столь мощного излучения с плазмой возможно образование особых лазерно-плазменных структур. Изучение подобных структур представляет собой фундаментальную задачу и имеет ряд практически важных применений. Ускорение ионов — одно из них. В данной работе исследуются структуры, образующиеся при падении мощного лазерного излучения на бесконечно толстую мишень в режиме ускорения ионов, который известен как режим «плуга».

Модель

В построенной модели используется ряд приближений.

- циркулярно поляризованное излучение
- полубесконечная непрозрачная плазма
- случай "холодной" плазмы
- движения одномерные в отсутствии поперечных неустойчивостей
- задача решается в движущейся система отсчета, связанной с точкой разворота плазмы (b)
- используется приближение четырехжидкостной гидродинамики - движение частиц представимо в виде движения электронных и ионных потоков

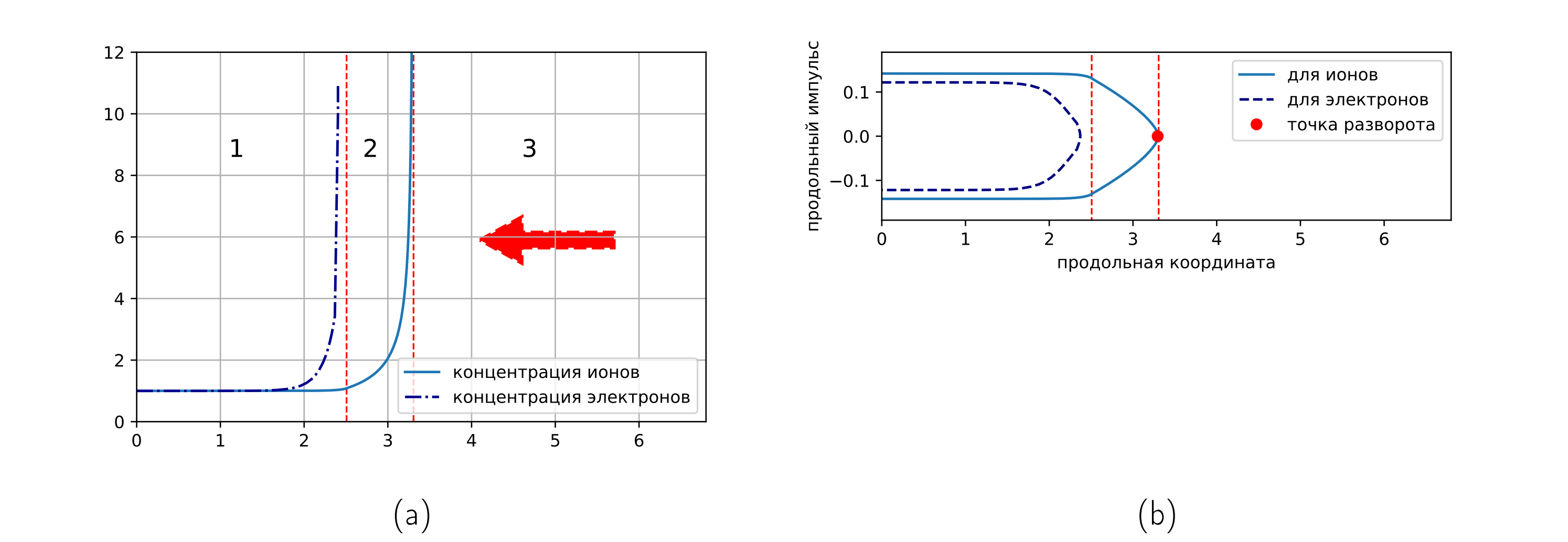


Рис. 1: Ускоряющая стуктура плазменного слоя в режиме плуга. В задаче присутствуют три области: вакуумная(3), ионная(2) и плазменная(1).

Система уравнений и картина решений

Поведение волны удобно описывать в терминах векторного и скалярного потенциалов электромагнитного поля. Исходные уравнения имеют вид:

$$\frac{d^2\varphi}{dz^2} = 4\pi e(N_e - Z_i N_i)$$
$$\Delta \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial \nabla \varphi}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} (e N_e \vec{v}_e - e N_i Z_i \vec{v}_i)$$

Здесь N_e -концентрация электронов, N_i -концентрация ионов, Z_i -степень ионизации ионов (равная для всех ионов). Рассматривается случая монохроматического и циркулярно поляризованного поля:

$$\vec{A}_{\perp}(z, t) = Re\{A(z)(\vec{x}_0 + i\vec{y}_0)e^{i\omega t}\}$$

Вводя безразмерные переменные

$$\tilde{\varphi} = \frac{e\varphi}{m_e c^2}, \quad \xi = \frac{\omega z}{c},$$
$$n_e = \frac{N_e}{N_e^{\infty}}, \quad n_i = \frac{N_i}{N_i^{\infty}} = \frac{N_i Z_i}{N_e^{\infty}}$$
$$a = \frac{eA}{m_e c^2}$$

Для описания движения электронной и ионной компонент обратимся к уравнениям гидродинамики:

$$\frac{\partial \vec{p}_e}{\partial t} + (\vec{v}_e \nabla) \vec{p}_e = \frac{e}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + e \nabla \varphi - \frac{e}{c} [\vec{v}, rot \vec{A}]$$
$$\frac{\partial \vec{p}_i}{\partial t} + (\vec{v}_i \nabla) \vec{p}_i = \frac{e Z_i}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - e Z_i \nabla \varphi - \frac{e Z_i}{c} [\vec{v}_i, rot \vec{A}]$$

Вводим обозначения: $\mu = Z_i \frac{m_e}{m_i} \ll 1$, $\tilde{p}_e = \frac{p_{ez}}{m_e c}$, $\tilde{p}_i = \frac{p_{iz}}{m_i c}$

$$\begin{cases} \varphi'' = n_0(n_e - n_i) \\ a'' + (1 - \frac{n_0 n_e}{\gamma_e^2})a = 0 \\ \varphi = \sqrt{1 + a^2 + \tilde{p}_e^2} - \sqrt{1 + \tilde{p}_e^{\infty 2}} \\ -\varphi = \frac{1}{\mu}(\sqrt{1 + a^2 \mu^2 + \tilde{p}_i^2} - \sqrt{1 + \tilde{p}_i^{\infty 2}}) \end{cases}$$

Для её решения необходимо учесть условия на бесконечности:

$$n_e \tilde{v}_e = \beta^{\infty}, \quad n_i \tilde{v}_i = \beta^{\infty},$$
$$\tilde{p}_e = \gamma_e \tilde{v}_e, \quad \tilde{p}_i = \gamma_i \tilde{v}_i$$

Окончательная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \varphi''(z) = n_0 \beta^{\infty} \left(\frac{\varphi + \gamma_e^{\infty}}{\sqrt{(\varphi + \gamma_e^{\infty})^2 - a^2 - 1}} - \frac{\gamma_i^{\infty} - \varphi \mu}{\sqrt{(\gamma_i^{\infty} - \varphi \mu)^2 - 1}} \right) \\ a''(z) = -a + \frac{n_0 \beta^{\infty}}{\sqrt{(\varphi + \gamma_e^{\infty})^2 - a^2 - 1}} a \end{cases}$$

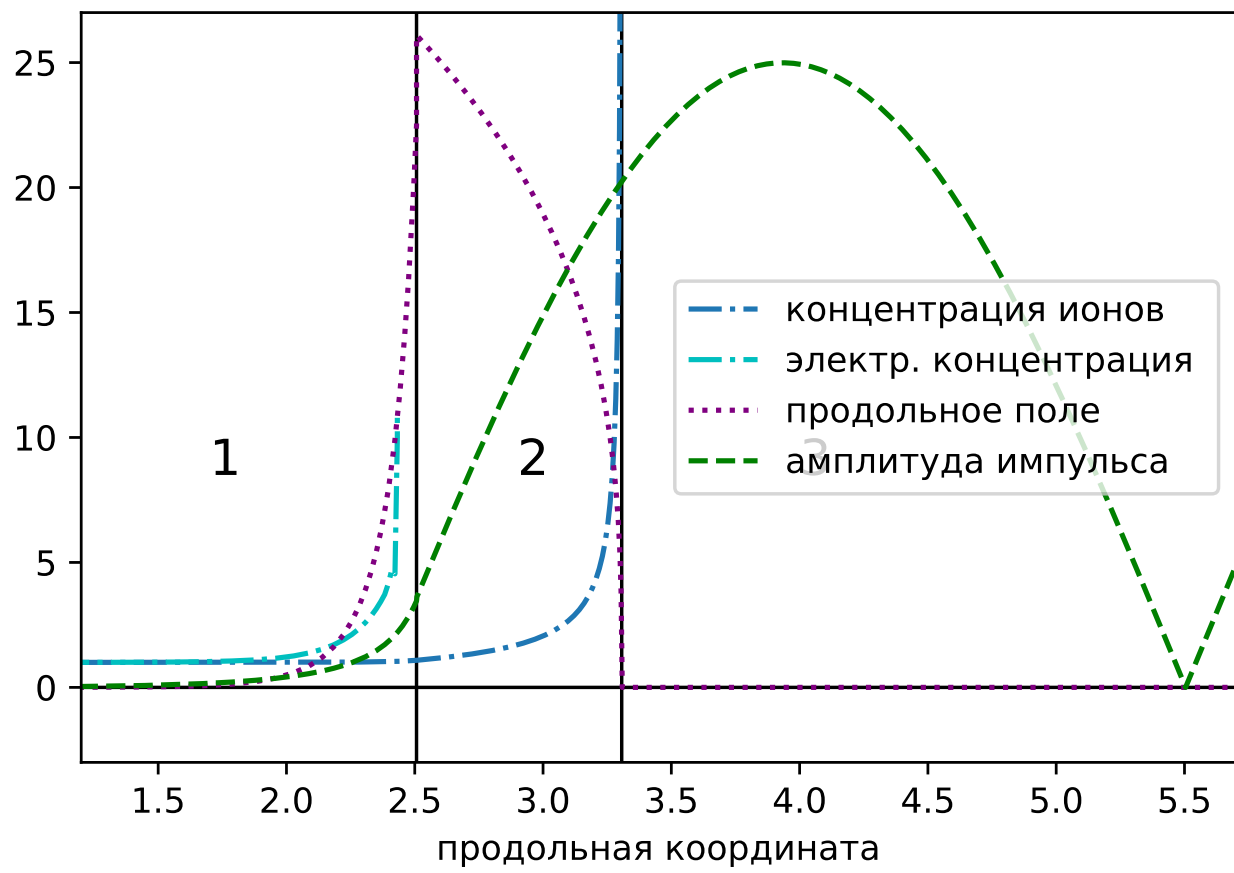


Рис. 2: Структура решений при ускорении ионов в режиме "плуга"(штриховой линии соответствует модуль комплексной амплитуды лазерного поля, пунктиром показана структура продольного электростатического поля, штрих-пунктирной линии соответствуют концентрации электронов и ионов)

Учет продольной температуры электронов

При относительно небольших температурах ее влияние можно оценить в рамках анализа движения пробных электронов, имеющих скорость отличную от средней гидродинамической. Такой анализ удобно проводить путем построения фазового портрета.

Гамильтониан движения электрона имеет вид:

$$H(z, p_z) = \gamma(z, p_z) - \varphi(z)$$

Тогда уравнения движения электрона записываются в виде:

$$\begin{cases} \dot{z} = \frac{p_z}{\gamma} \\ \dot{p}_z = -\frac{\partial \gamma}{\partial z} - E_z(z) \end{cases}$$

$$\text{где } \gamma(z, p_z) = \sqrt{1 + a^2(z) + p_z^2}$$

На границе плазма – ионный слой существует состояние равновесия типа центр. На фазовом портрете также существует седло (S), сепаратрисы, которого разделяют потоки траекторий частиц, уходящих в вакуум и возвращающихся в плазму. В вакуумной области состояния равновесия центр и седло чередуются, что соответствует стоячей волне.

Значение критического импульса электрона на границе плазмы будет соответствовать значению сепаратрисы седла S в граничной точке.

$$p_z = 0, \frac{a}{\sqrt{1 + a^2(z)}} \frac{\partial a}{\partial z} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$$

$$H_{cr} = H(z_b, 0), p_{cr} = \sqrt{(H_{cr} + \varphi(z_s))^2 - a^2(z_s) - 1}$$

Если электрон обладает импульсом, который больше критического, он покидает границу. Если таких электронов достаточно много, то устойчивость структуры нарушится. Таким образом можно оценить температуру, при которой происходит разрушение стационарного режима ускорения ионов в режиме «плуга». Фазовый портрет такого вида получается не при любых соотношениях параметров задачи. Входными параметрами являются параметр закритичности плазмы и амплитуда падающей волны. При некотором изменении параметров волна перестает полностью отражаться, что на фазовом портрете соответствует исчезновению ограниченных траекторий в вакуумной области. Таким образом, существует порог , выше которого существует режим «плуга», ниже – излучение проходит в плазму.

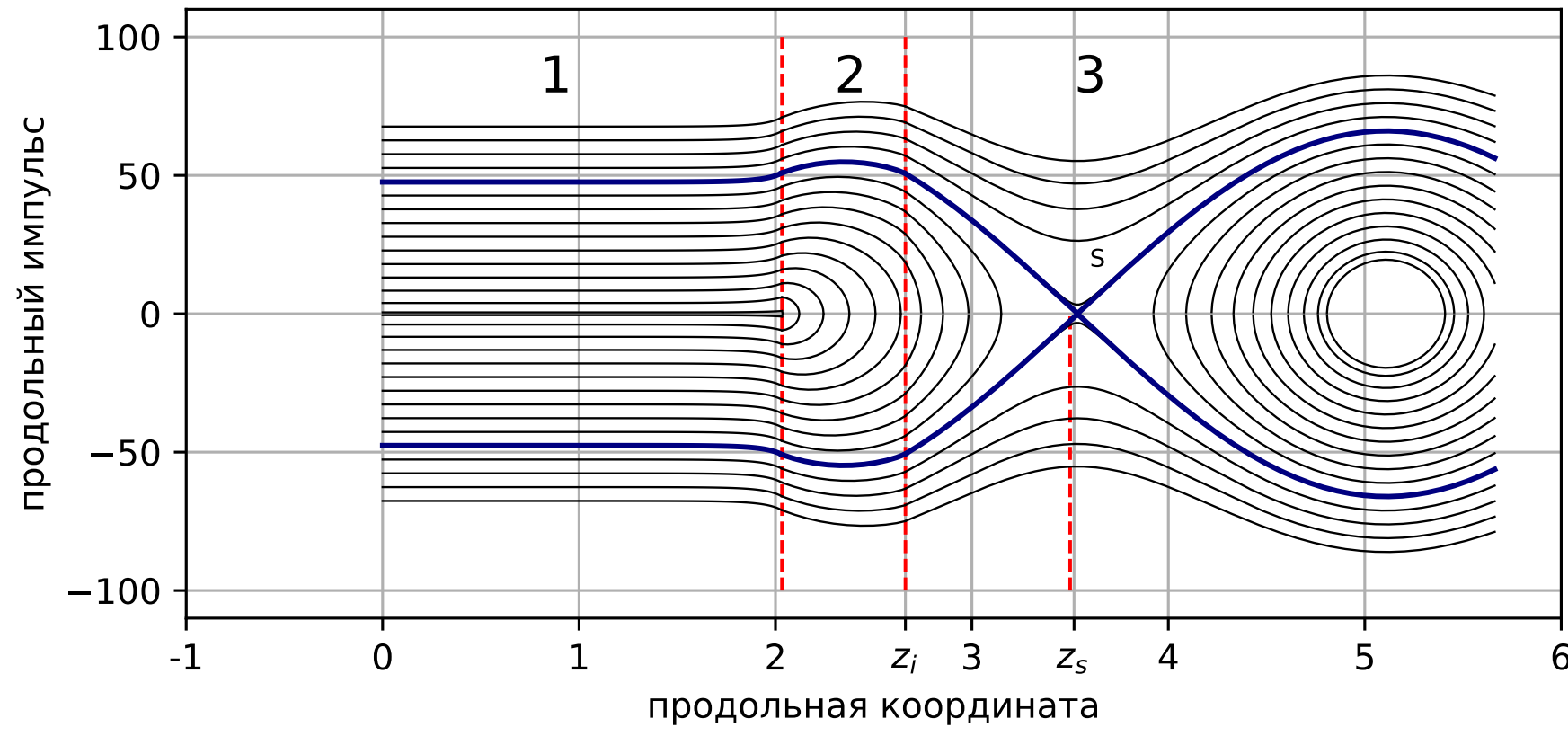


Рис. 3: Фазовый портрет пробного электрона при $n_0 = 15$, $a_{\text{над}} = 33$

Рис. 4: Зависимость критического импульса от коцентрации и скорости электронов

Заключение

- в работе исследована система и развит метод построения лазерно-плазменных структур при ускорении ионов радиационным давлением
- построены решения
- разработан алгоритм построения фазового портрета и нахождения критического импульса для данной системы
- полученные значения критического импульса велики, что говорит об устойчивости данной структуры относительно продольной температуры

Литература

- А.В. Коржиманов, В.И. Еремин, А.В. Ким, М.Р. Тушенцов О взаимодействии релятивистски сильных электромагнитных волн со слоем закритической плазмы // ЖЭТФ, 2007. Т.132, вып.4(10). С. 771.
- Д.А.Войтович, А.В Коржиманов Стационарные лазерно-плазменные структуры при ускорении ионов радиационным давлением в режиме «плуга» // Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А.Железнова Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород, 2019 С. 332-333.
- E. Siminos, M. Grech,S. Skupin,T. Schlegel, and V. T. Tikhonchuk Effect of electron heating on self-induced transparency in relativistic-intensitylaser-plasma interactions //PHYSICAL REVIEW E 86, 056404, 2012.
- Andrea Macchi, Marco Borghesi, Matteo Passoni Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction //RMP, 2013. Vol. 85. С.773.