

# Вклад захваченных частиц в экранирование сферического поглощающего тела в бесстолкновительной плазме

А. А. Киселёв<sup>1 2</sup> М. С. Долгоносов<sup>1</sup>  
В. Л. Красовский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

Десятая ежегодная конференция  
«Физика плазмы в Солнечной системе»

19 февраля 2015 г.

# Предмет исследования

- Предметом исследования является изучение динамики зарядки поглощающего тела сферической формы в бесстолкновительной плазме.
- Неопределенность функции распределения захваченных частиц является ключевой проблемой при рассмотрении этой системы.
- Подобные задачи возникают в пылевой плазме и в теории электрического зонда с плавающим потенциалом.

# Постановка задачи

- В некоторый момент времени  $t = 0$  в изотропной плазме возникла поглощающая заряд сфера с радиусом  $R$ .
- Сначала поток более подвижных электронов превышает поток ионов, и сфера заряжается отрицательно. Далее электронный поток уменьшается, а ионный увеличивается.
- Цель — проследить переход плазмы в асимптотическое состояние равновесия, когда потоки электронов и ионов на сферу выравниваются.

# Исходные уравнения

- Электрическое поле описывается уравнением Пуассона, функция распределения частиц плазмы — уравнением Власова.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 E) = 4\pi e (n_i - n_e)$$
$$\frac{\partial f_{e,i}}{\partial t} + v_r \frac{\partial f_{e,i}}{\partial r} + \left( \frac{M_{e,i}^2}{m_{e,i}^2 r^3} \mp \frac{e}{m_{e,i}} E \right) \frac{\partial f_{e,i}}{\partial v_r} = 0$$

Здесь  $M_{e,i}$  — момент импульса электрона или иона,  $v_r$  — радиальная скорость.

- Аналитически задача не решается из-за неопределенности функции распределения захваченных частиц.

# Граничные и начальные условия

- Начальные условия — нейтральная однородная изотропная плазма с функциями распределения  $f_{e,i}^0$ .
- Граничные условия:
  - На электрическое поле:  $E(r = R, t) = E_0(t)$
  - На функции распределения:  $f_{e,i}(r = \infty, v, t) = f_{e,i}^0(v)$ , поглощение частиц плазмы сферой при  $r = R$ .
- Заряд поглощающей сферы:

$$E_0(t) = \frac{Q_0(t)}{R^2}$$

# Метод решения задачи

- Сферическая симметрия позволяет использовать для решения **трехмерной** задачи **канонические** уравнения движения, описывающие динамику электронов и ионов формально как движение **с одной степенью свободы**.
- Численное моделирование основано на адаптированном методе PIC («Particles-in-cells»).
- Уравнения движения частиц плазмы решаются с помощью метода Рунге-Кутты 4-го порядка.
- Расчеты проводились для моноэнергетических  $f_{e,i}^0$ .

# Единицы измерения физических величин

При решении задачи использовались следующие единицы измерения:

$$\begin{aligned}[r] &= R, [v_e] = [v_i] = u_e, [t] = R/u_e, [n] = n_0, \\ [M_e] &= m_e u_e R, [M_i] = m_i u_e R, [\phi] = m_e u_e^2 / e, \\ [E] &= m_e u_e^2 / e R\end{aligned}$$

Здесь  $R$  — радиус поглощающей сферы,  $u_e$  — начальная скорость электронов.

# Физические параметры системы

- У физической системы есть три характерных параметра:
  - $D_e = d_e/R$ , где  $R$  — радиус сферы
  - $\mu = m_e/m_i$
  - $u = u_e/u_i$ , где  $u_{e,i}$  — начальные скорости электронов и ионов
- Значения параметров для приведенных далее расчетов:
  - $D_e = 6 \quad (R/d \simeq 0.79)$
  - $u = 0.005 \quad (T_i/T_e \simeq 0.046)$
  - $\mu = 1/1836$



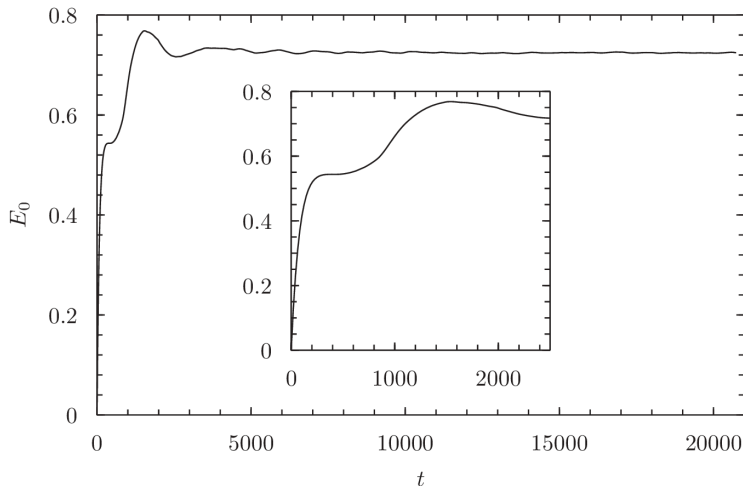
# Безразмерные уравнения

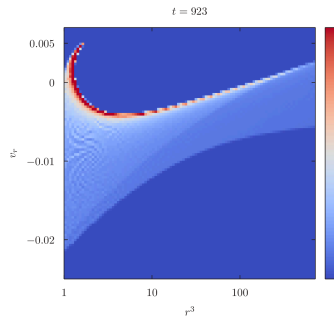
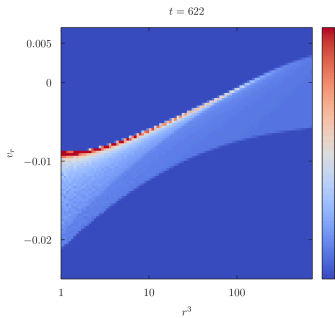
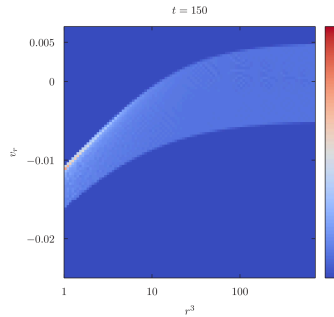
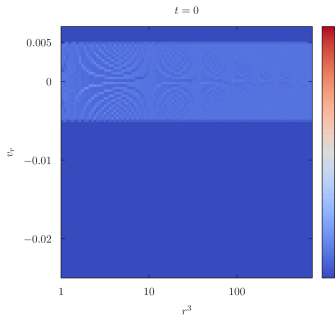
В выбранных единицах измерения уравнения имеют вид:

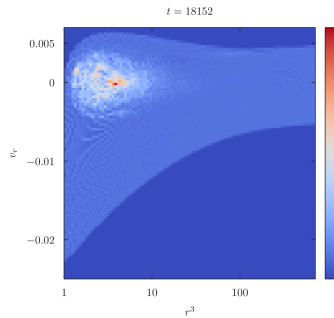
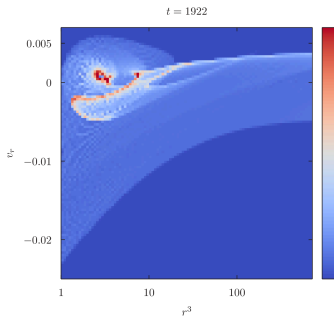
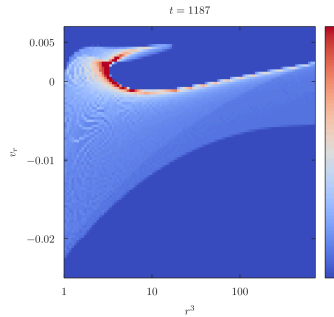
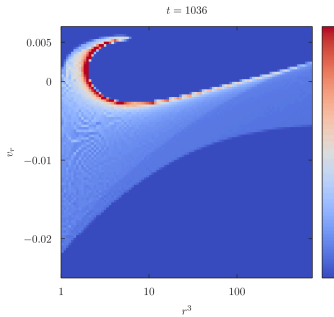
$$\frac{D_e^2}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 E) = n_i - n_e$$
$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_r \frac{\partial f}{\partial r} + \left( \frac{M^2}{r^3} + c_{e,i} E \right) \frac{\partial f}{\partial v_r} = 0 ,$$
$$c_e = -1 , \quad c_i = \mu$$

# Временная зависимость поля на сфере

На больших временах величина поля на сфере  $E_0(t)$  стремится к асимптотическому значению ( $|j_e| = |j_i|$ ).







# Относительный заряд захваченных частиц

- Вклад захваченных частиц в экранировку определяется как отношение заряда захваченных частиц к заряду сферы:

$$\frac{q_T}{q_0} = 0.18, \quad q_{0,T} = |Q_{0,T}| \frac{m_e u_e^2 R}{e}$$

- Полученные результаты значительно отличаются от результатов работы J. Goree, *Phys. Rev. Letters*, 1992, Vol. 69, N. 2, где утверждается, что явление захвата несущественно в космической плазме.
- Наши данные показывают, что заряды поглощающей сферы и захваченных частиц **соизмеримы**.

# Заключение

- Выполнено численное моделирование процесса зарядки сферы в бесстолкновительной плазме.
- Получены пространственно-временные зависимости для электрического поля.
- Прослежена динамика процесса захвата и впервые определена равновесная функция распределения захваченных частиц в бесстолкновительной плазме.
- Разработанное программное обеспечение представляет собой универсальный инструмент для численного решения широкого спектра задач кинетики плазмы в условиях сферической симметрии.

Спасибо за внимание!

# Пример начального распределения

