

# Численное моделирование захвата ионов бесстолкновительной плазмы электрическим полем поглощающей сферы

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)

Девятая ежегодная конференция  
«Физика плазмы в Солнечной системе»

13 февраля 2014 г.

# Постановка задачи

- Предмет исследования — возмущение плазмы поглощающей сферой.
- Рассматривается бесстолкновительная плазма в условиях применимости уравнения Власова.
- Цель — получить характеристики плазмы (функция распределения, величина электрического поля) на больших временах. Особое внимание уделяется частицам, захваченным полем поглощающей сферы.

# Уравнения исследуемой системы

В исследуемой системе электрическое поле описывается уравнением Пуассона, кинетика частиц — 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.

# Граничные и начальные условия

- Начальные условия — нейтральная однородная плазма с функциями распределения  $f_{e,i}^0$ .
- Граничные условия:
  - при  $r = R$  (на поверхности сферы): поглощение падающих частиц сферой;
  - при  $r \rightarrow \infty$ :  $f_{e,i} = f_{e,i}^0$ .
- При  $t = 0$  заряд поглощающей сферы равен нулю и  $E_0 = 0$ .

# Возможность аналитического решения

- Возможности решения задачи аналитически ограничены из-за неопределенности функции распределения захваченных ионов.
- Энергия электрического поля может быть сравнимой с кинетической энергией частиц, поэтому нельзя воспользоваться линеаризацией уравнений.
- Следовательно, необходимо применять численные методы.

# Подход к решению задачи

- Сферическая симметрия позволяет рассматривать динамику частиц как движение **с одной степенью свободы**. При этом задача остается **трёхмерной**.
- Для определения поля используется адаптированный метод PIC («Particles-in-Cells»).
- Кинетика частиц плазмы рассчитывается с помощью метода Рунге-Кутты 2-го порядка.
- В качестве  $f_{e,i}$  были взяты моноэнергетические функции распределения.

# Система единиц

При решении задачи использовалась следующая система единиц:

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

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

# Безразмерные уравнения

В этих единицах уравнения можно переписать так:

$$\dot{r}^{e,i} = v_r^{e,i}$$

$$\dot{v}_r^e = \frac{M^2}{r^3} - E$$

$$\dot{v}_r^i = \frac{M^2}{r^3} + \mu E$$

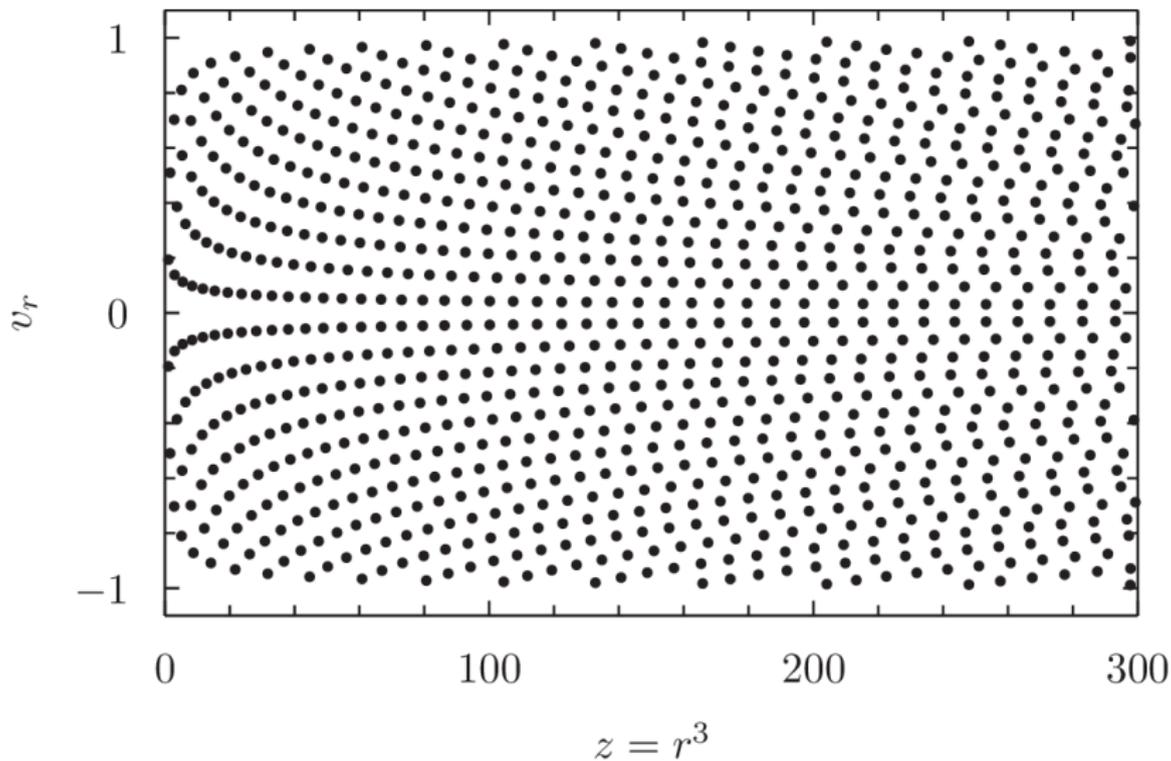
$$\frac{D_e^2}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 E) = n_i - n_e$$

Здесь  $D_e = d_e/R$  — безразмерный дебаевский радиус,  
 $\mu = m_e/m_i$ .

# Начальные распределения

- Были опробованы следующие начальные распределения:
  - прямоугольное по  $(r, v_r)$ ;
  - случайное;
  - по  $(M, \tau)$ .
- Наиболее удобным оказалось распределение  $(M, \tau)$ , когда макрочастицы с одинаковым моментом располагаются с одинаковым «временным» промежутком  $\tau$ .
- Полезная особенность — без поля через время  $\tau$  фазовая плоскость будет переходить сама в себя.

# Пример сетки $(M, \tau)$

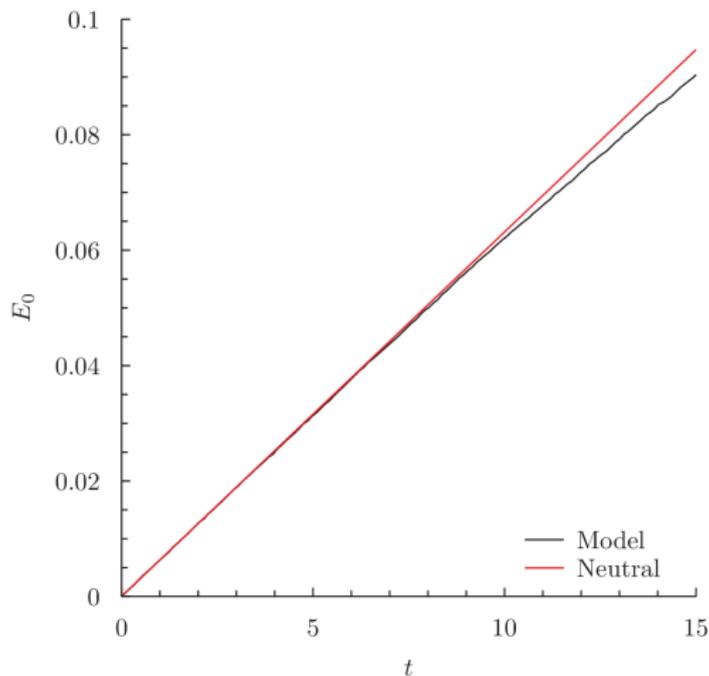


# Реализация модели в коде

- Был разработан универсальный код для решения сферически-симметричных нестационарных задач.
- Использовались технологии распараллеливания GPGPU (вычисления общего назначения на графических процессорах) и OpenCL.
- За счёт симметрии возможно проводить расчёты для больших времен с разумными требованиями к ресурсам.

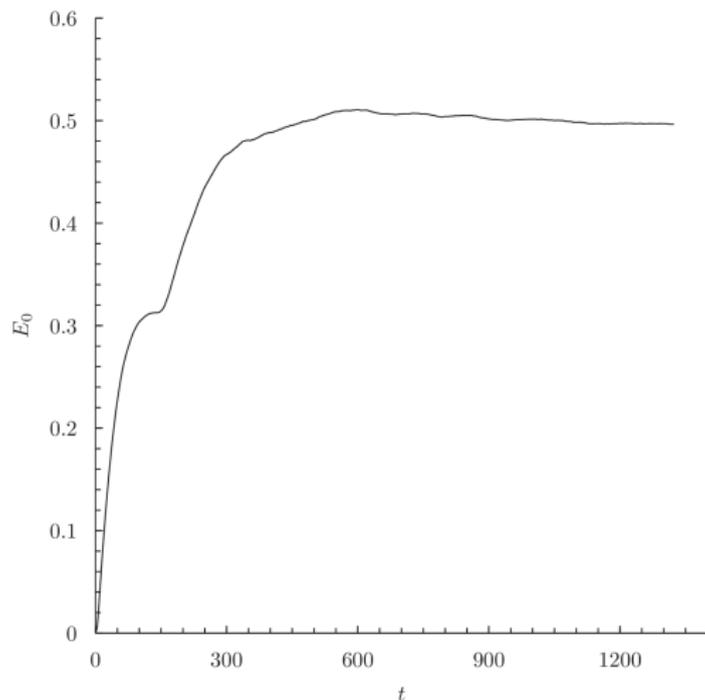
# Зарядка на малых временах

При  $t \rightarrow 0$  электрическое поле очень слабое, поэтому можно считать, что электроны и ионы свободно движутся.



# Поле в асимптотике

На больших временах поле стремится к асимптотическому значению ( $j_e = j_i$ ).

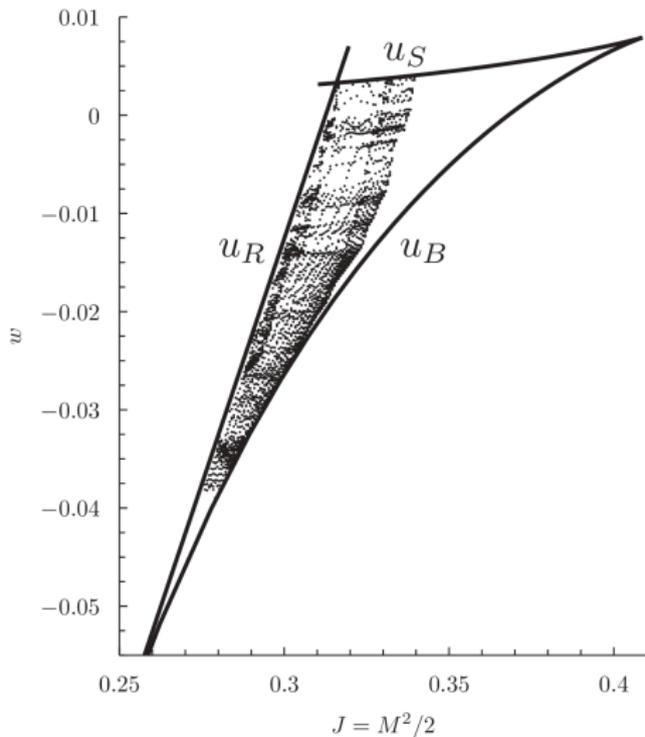


# Захваченные частицы — фазовая плоскость

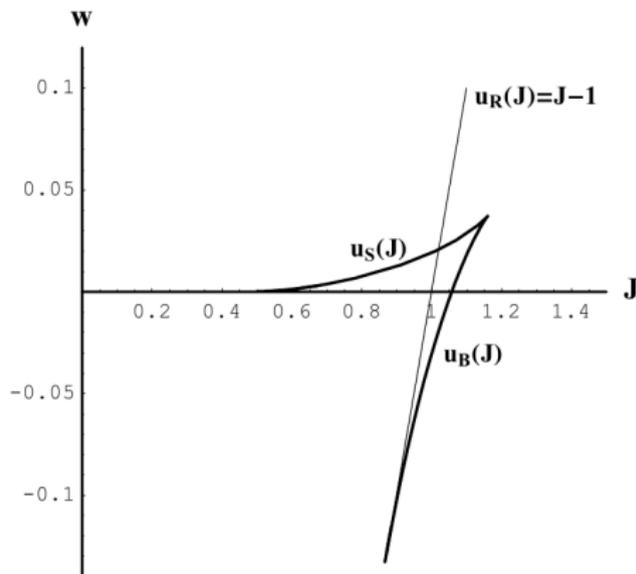
- Были найдены параметры, при которых происходит «захват» частиц плазмы, причем на небольших расстояниях от сферы.
- Их можно оценить, пользуясь соотношением  $d_e \simeq \sqrt{Rd_i}$  (в безразмерном виде  $u^2 D_e / \mu \simeq 1$ ).
- Также были получена анимация суммарной фазовой плоскости во времени.

# Захваченные частицы — потенциальная яма

- Для анализа удобен график  $(w, M^2/2)$ .
- Дополнительно на нем изображены кривые, характеризующие границу сферы ( $u_R$ ), дно эффективного потенциала ( $u_B$ ) и следующий за ним горб ( $u_S$ ).
- На основе этих данных выполнена селекция захваченных частиц. Видно, что они вписываются в границы потенциальной ямы.
- Интересно, что форма потенциальной ямы похожа на таковую для линейного случая.



Результат численного  
моделирования  
нелинейной задачи



Аналитическое решение  
в линейном случае

# Заключение

- Была проведена работа по численному моделированию сильно нелинейной физической системы.
- Наблюдался процесс образования сгустка захваченных ионов.
- Заложена основа для дальнейшей работы по повышению точности и производительности.

Спасибо за внимание!