

# Трёхмерный кинетический код CFHALL для моделирования замагниченной плазмы

А.Ю. Перепёлкина, В.Д. Левченко, И.А. Горячев

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

2012

CFHALL — трехмерный кинетический код для моделирования замагниченной плазмы

- Производительность
- Точность

# Основные уравнения

## Уравнения Максвелла

$$\begin{aligned} \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \vec{E}, & \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \nabla \times \vec{B} - \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \\ \nabla \vec{B} &= 0, & \nabla \vec{E} &= 4\pi \rho, \end{aligned} \quad (1)$$

## Плотности и токи

$$\rho = \sum_{\alpha} \int f_{\alpha} e_{\alpha} d\vec{v}, \quad \vec{j} = \sum_{\alpha} \int \vec{v}_{\alpha} f_{\alpha} e_{\alpha} d\vec{v}. \quad (2)$$

## Кинетическое уравнение

$$\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} + \vec{v}_{\alpha} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \vec{r}_{\alpha}} + \frac{e_{\alpha}}{m_{\alpha} \gamma} \left( \frac{1}{c} \vec{v}_{\alpha} \times \vec{B} + \vec{E} \right) \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \vec{v}_{\alpha}} = 0 \quad (3)$$

- Схема FDTD (Finite Difference Time Domain) для эволюции электромагнитных полей
- Метод «частица-в-ячейке» (Particle-in-Cell — PIC) для интегрирования уравнения Власова

- Самосогласованные электромагнитные поля
- Кинетическое трехмерное описание плазмы
- Повышение эффективности вычислений при помощи алгоритма LRnLA
- Различный масштаб временных шагов для полей и частиц

$$dt_{FLD} < \frac{dx}{\sqrt{3}c} \sim \frac{\lambda_D}{\sqrt{3}c}, \quad dt_{PIC} < \frac{1}{\omega_e} \quad (4)$$

$$dt_{PIC} \sim 10dt_{FLD} \quad (5)$$

- Второй порядок точности форм-фактора метода PIC

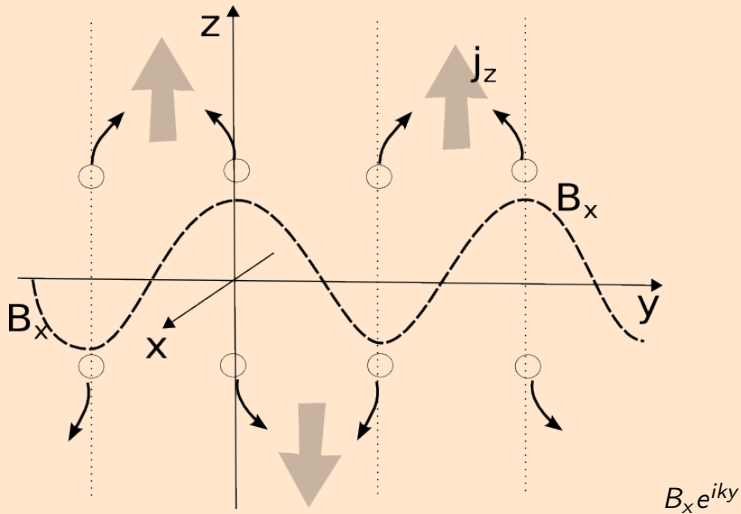
## Тестовые задачи

- Колебания плазмы
- Проникновение электромагнитного импульса в плазму
- Скин-слой

## Приложения

- Исследование аномальной проводимости холловского двигателя — задача о распространении плазмы в скрещенных электрическом и магнитных полях
- Взаимодействие лазерных импульсов с подкритической плазмой
- Вейбелевская неустойчивость

# Вейбелевская неустойчивость



$$f(\vec{v}) = \delta(v_x)\delta(v_y)\delta(v_z - a) + \delta(v_x)\delta(v_y)\delta(v_z + a)$$

## Обезразмеривание

Масса	$m_e$
Заряд	$e$
Скорость	$c$
Время	$\omega_p^{-1}$
Размеры	$c/\omega_p$
Поля	$m\omega_p c/e$

## Начальные условия

$$f(\vec{v}) = f_m(v_x)f_m(v_y)f_m(v_z - 0.5) + f_m(v_x)f_m(v_y)f_m(v_z + 0.5),$$

$f_m$  — распределение максвелла с температурой 0.005.

Все компоненты электромагнитных полей равны нулю.

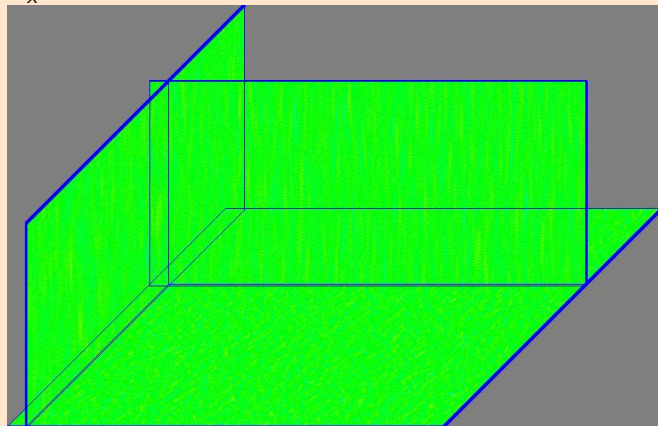


## Численные параметры

- Область  $512 \times 512 \times 240$  ячеек, 4 электрона от каждого пучка в каждой ячейке
- Шаги сетки  $dx = dy = 0.02$ ,  $dz = 0.05$
- Размер области  $10.24 \times 10.24 \times 12$   $c/\omega_p$
- Шаг по времени  $dt = 0.005$
- Расчет 1 шага занимает 8 секунд на Intel core5 @ 3.3GHz
- Размер данных  $\sim 24Gb$ .

# Результат моделирования

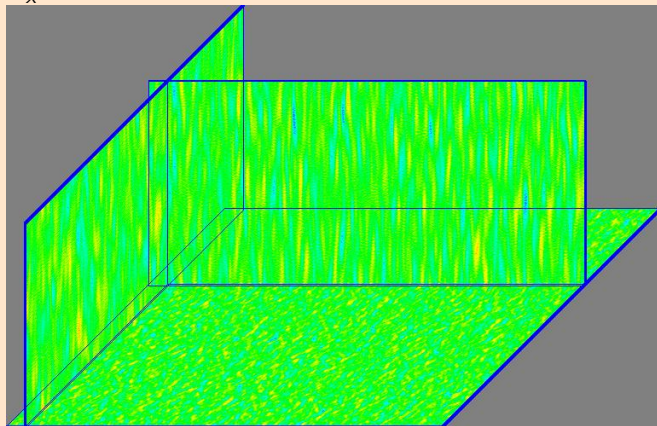
$$B_x \sim -0.05 \div 0.05$$



$$t \sim 6.4$$

# Результат моделирования

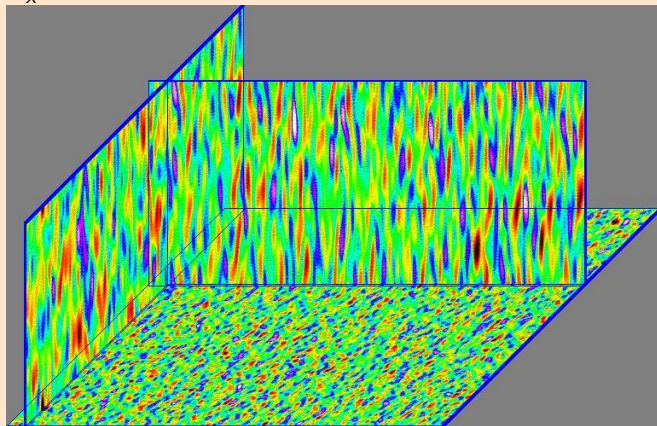
$B_x \sim -0.05 \div 0.05$



$t \sim 8.96$

# Результат моделирования

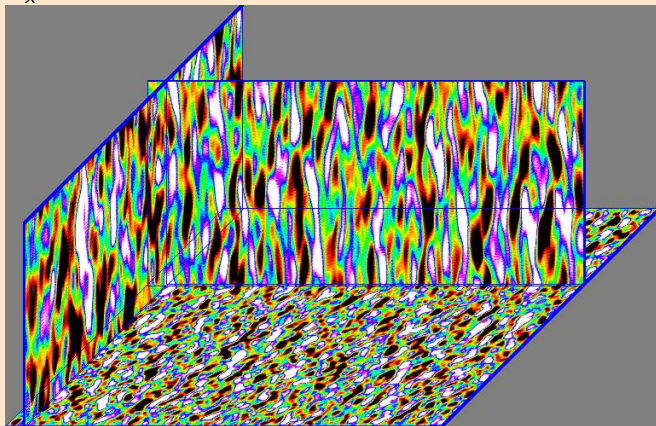
$B_x \sim -0.05 \div 0.05$



$t \sim 11.52$

# Результат моделирования

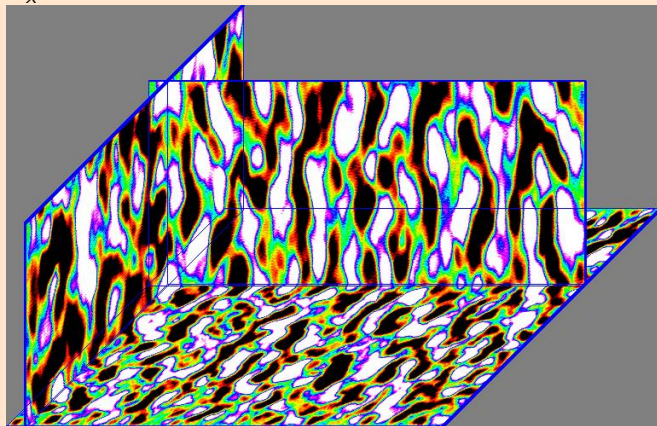
$$B_x \sim -0.05 \div 0.05$$



$$t \sim 14.08$$

# Результат моделирования

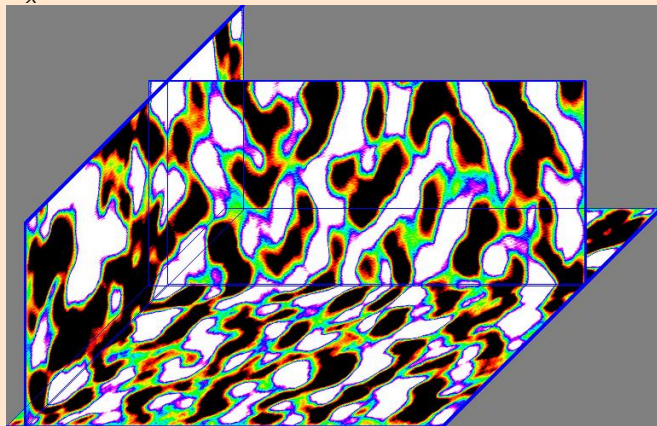
$$B_x \sim -0.05 \div 0.05$$



$$t \sim 16.64$$

# Результат моделирования

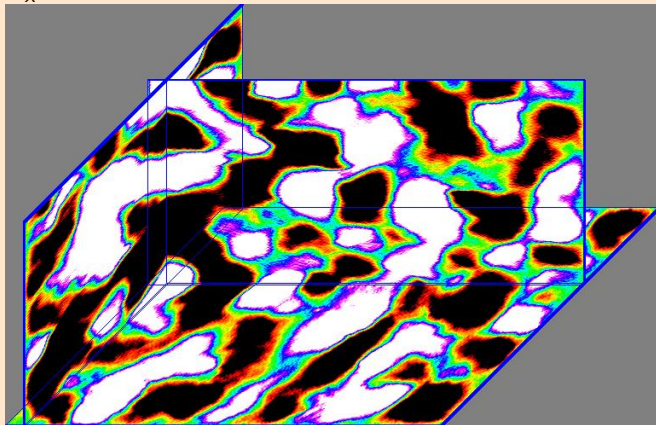
$B_x \sim -0.05 \div 0.05$



$t \sim 19.2$

# Результат моделирования

$B_x \sim -0.05 \div 0.05$

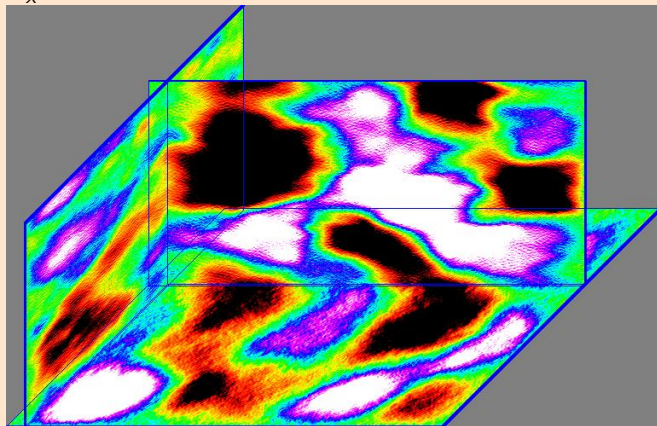


$t \sim 25.6$



# Результат моделирования

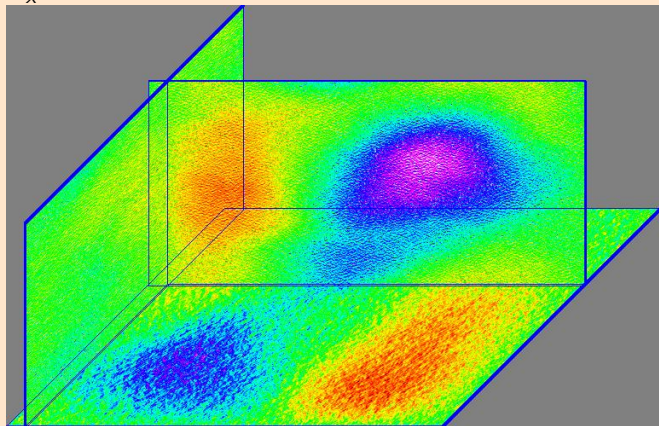
$B_x \sim -0.05 \div 0.05$



$t \sim 38.4$

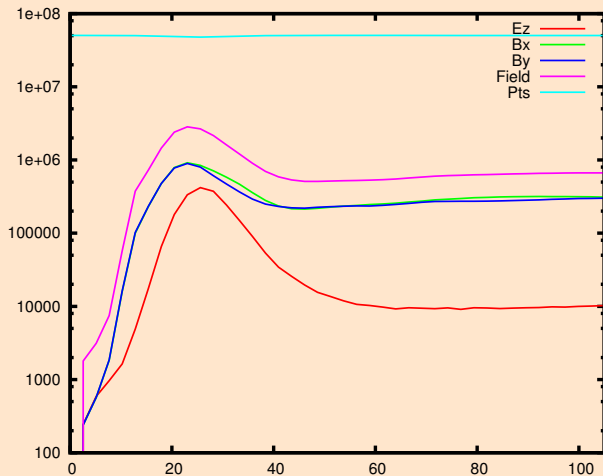
# Результат моделирования

$B_x \sim -0.05 \div 0.05$

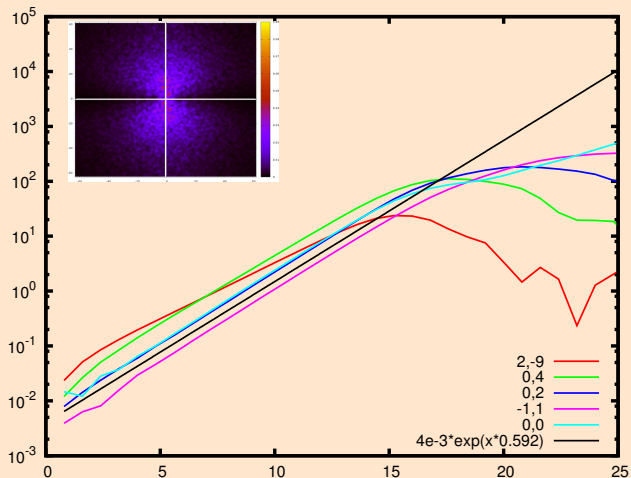


$t \sim 100$

# Результат моделирования



# Результат моделирования



128x128x120,  
 $dx = dy =$   
 $dz = 0.01,$   
1.28x1.28x1.2  
 $c/\omega_p$

Ricardo A. Fonseca  
et al.,  
Three-dimensional  
Weibel instability in  
astrophysical  
scenarios, Phys.  
Plasmas 10, 1979  
(2003)

- Разработан трехмерный кинетический код для моделирования плазмы на основе LRnLA алгоритмов.
  - Код основан на решении самосогласованной системы Власова-Максвелла
  - Учтена существенная разномасштабность задачи
  - Использован форм-фактор второго порядка точности
- Проведены расчеты по моделированию неустойчивости Вейбеля
  - Большой размер сетки позволяет разрешить колебание с максимальным инкрементом
  - Величина инкремента совпадает с теоретическими оценками