

# Механизм насыщения вейбелевской неустойчивости.

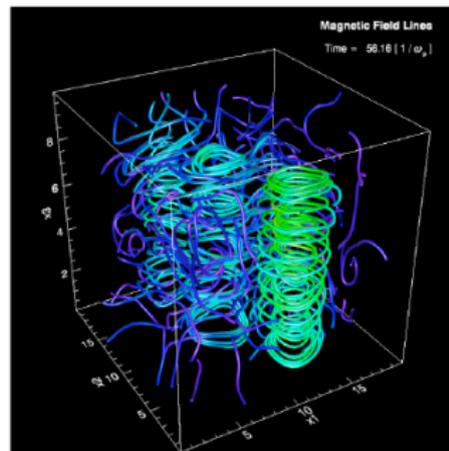
Михаил Гарасёв, Евгений Деришев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

18 декабря 2017 г. НЕА — 2017

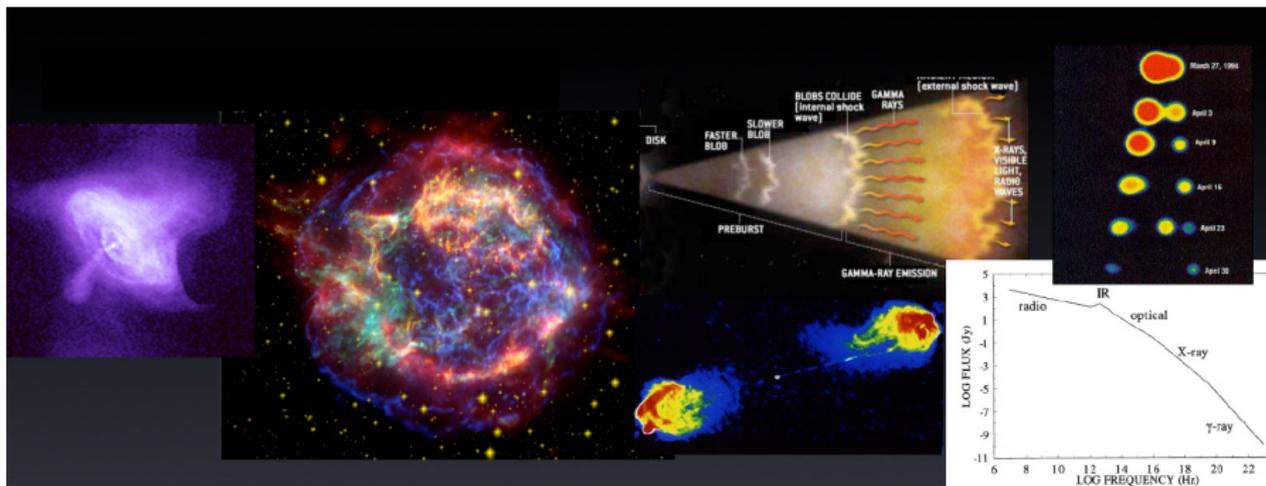
# Вейбелевская неустойчивость в анизотропной плазме

- ▶ Возникает в плазме с анизотропным распределением частиц
- ▶ Приводит к генерации турбулентных магнитных полей, с энергией сравнимой с плотностью тепловой энергии плазмы
- ▶ Развивается на временах, сравнимых с плазменным временем  $\omega_p^{-1}$



Наибольший интерес представляет по отношению к двум задачам — возникновение магнитных полей при лазерной абляции плазмы (Fox et al., 2015) и бесстолкновительные ударные волны в астрофизике (Medvedev & Loeb, 1999).

# Вейбелевская неустойчивость в астрофизике



- ▶ Бесстолкновительные ударные волны в астрофизических источниках со слабым магнитным полем  $\lambda \gtrsim R$
- ▶ Вейбелевская неустойчивость непосредственно влияет структуру фронта ударной волны, формирует нетепловую компоненту функции распределения и определяет мощность и спектр синхротронного излучения.

# Вейбелевская неустойчивость. Теория

Апериодическая  
неустойчивость

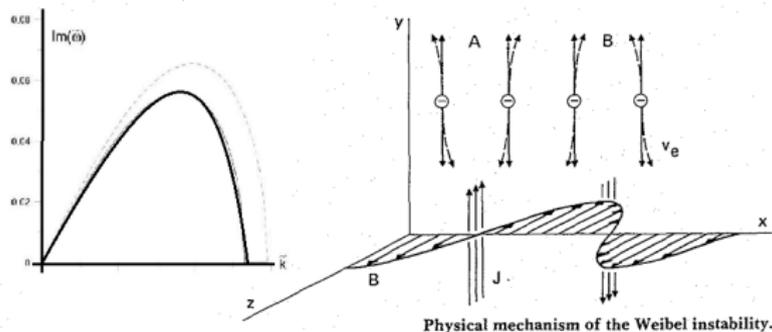
$$A = \frac{\langle p_{\parallel} \rangle^2}{\langle p_{\perp} \rangle^2} - 1.$$

$$k_{\text{limit}} = \frac{\omega_p}{c} \sqrt{A}$$

Декремент  
магнитного поля в  
изотропной плазме:

$$\gamma_k \sim k^3$$

Насыщение — следствие нелинейных эффектов, когда гирорадиус частиц становится сравним с размером возникших филаментов?



Physical mechanism of the Weibel instability.

## PIC-моделирование вейбелевской неустойчивости

- ▶ Код EPOCH
- ▶ Уравнения движения для частиц - метод Вея (2007), форма частиц: В-сплайны 3-го порядка, геометрия 2D3V
- ▶ Уравнения Максвелла для электромагнитных полей на сетке — метод Ли
- ▶ Периодические граничные условия
- ▶ Точность сохранения энергии  $\delta e/e \lesssim 10^{-5}$
- ▶  $n_{ppc} \sim 1000$
- ▶  $L_x \times L_y = 1200r_D \times 1200r_D$

## Постановка задачи

Начальные условия: "ящик" заполненный анизотропной  $e^-e^+$  двухтемпературной плазмой с  $T = 10 - 5000$  кэВ. Было проведено несколько групп симуляций:

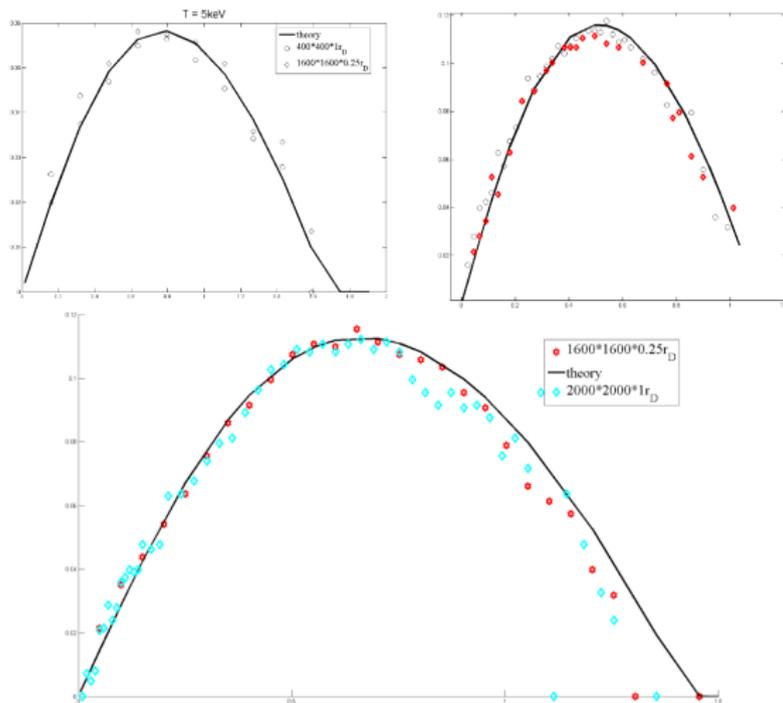
- ▶ Отслеживание развития вейбевеской неустойчивости с шумов в плазме с разными температурами и начальной анизотропией
- ▶ Развитие вейбелевской неустойчивости в плазме с затравочным полем, с заранее заданным спектром
- ▶ Отслеживание генерации гармоник из-за нелинейных эффектов в плазме с заданным сильным магнитным полем

Используемые обозначения:

$$\epsilon_B = \frac{\langle B^2 \rangle}{8\pi N \bar{E}} \quad K = \frac{k c}{\omega_p},$$

$$f(K) = \frac{\omega_p^2}{8\pi N \bar{E} c^2 k} F(k), \quad \langle B^2 \rangle = \int F(k) dk, \quad \epsilon_B = \int K f(K) dK.$$

# Инкремент вейбелевской неустойчивости



# Стадии развития вейбелевской неустойчивости

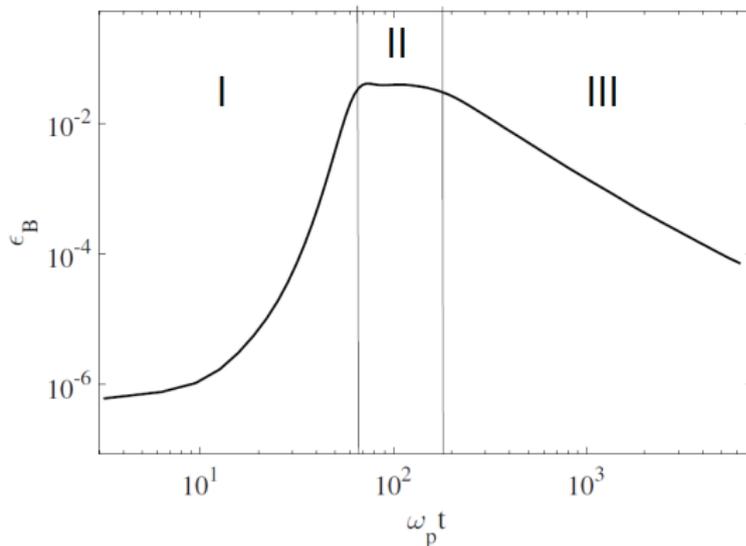
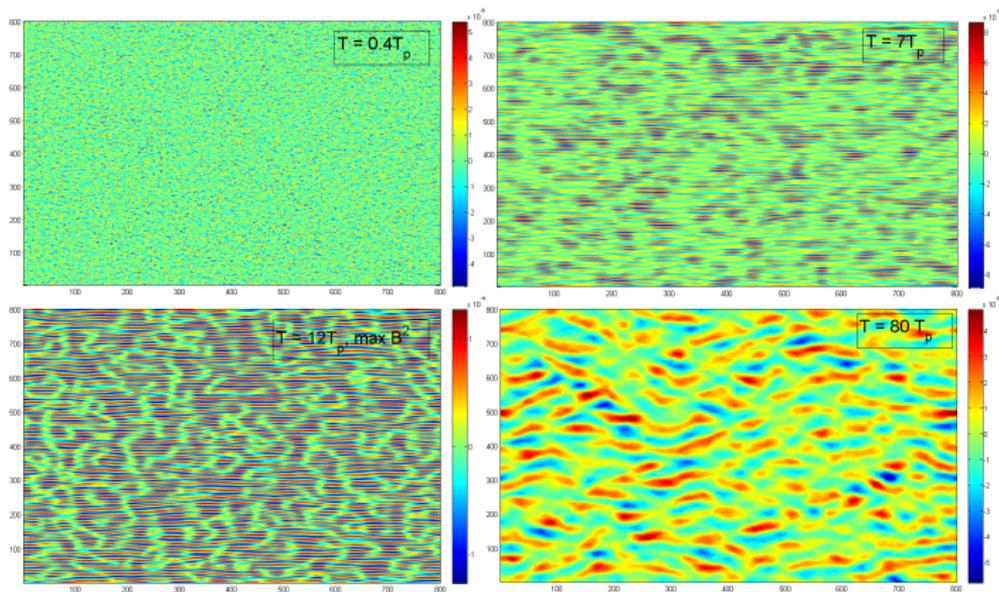


Рис. 1: Магнетизация в зависимости от времени для начальной анизотропии  $A = 2$ . Римскими цифрами обозначены стадии развития вейбелевской неустойчивости. *I* — стадия экспоненциального роста (линейная стадия), *II* — стадия насыщения, *III* — стадия затухания.

# Генерация магнитного поля вейбековской неустойчивостью.



# Спектр флуктуаций магнитного поля

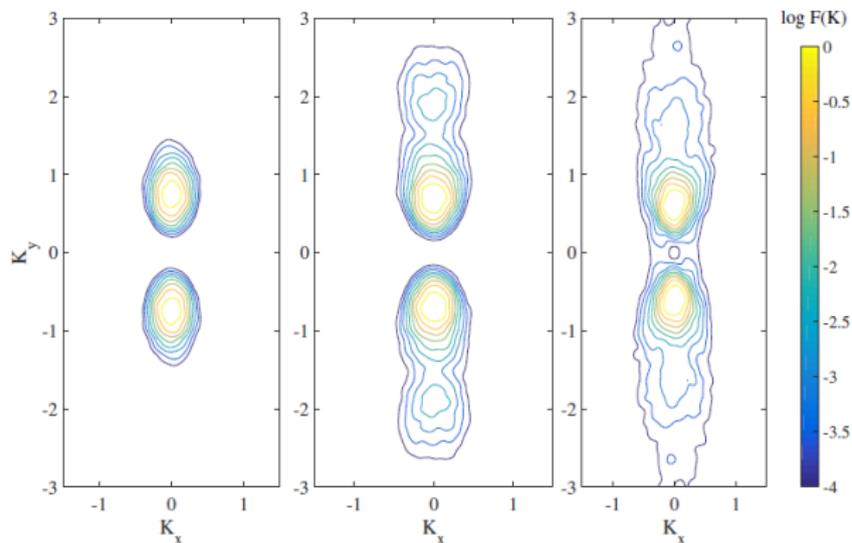


Рис. 4: Двумерный спектр мощности флуктуаций магнитного поля для расчета с начальной анизотропией  $A = 3$  в моменты времени  $\omega_p t = 60, 85, 110$ . Линии уровня расположены через  $\sqrt{10}$ .

# Нелинейные эффекты при развитии вейбелевской неустойчивости

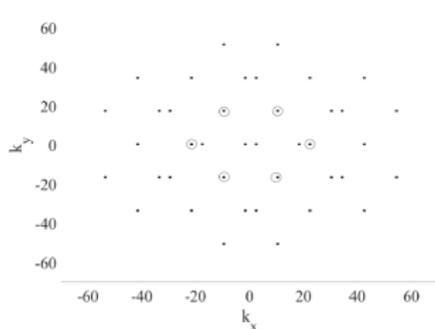


Рис. 6: Двумерный фурье-образ магнитного поля для расчета с заданным магнитным полем в момент  $t = 5\omega_p^{-1}$  после старта расчета. Компоненты волновых векторов измеряются в единицах  $2\pi/L$ , где  $L$  — длина и ширина области расчета. Исходно заданные моды с  $(k_x, k_y) = (22, 0), (11, 17), (-11, 17)$  отмечены кружками.

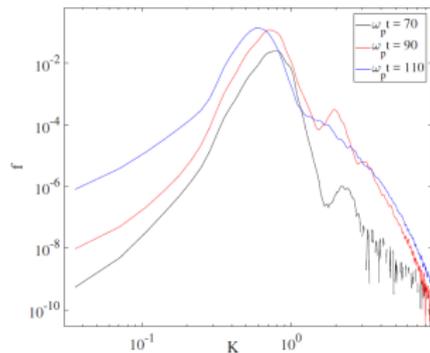


Рис. 2: Спектральное распределение нелинейности в разные моменты времени для расчета с начальной анизотропией  $A = 3$ . Черная кривая соответствует тому моменту стадии экспоненциального роста, когда нелинейность становится хорошо различимой, красная кривая — окончанию стадии экспоненциального роста, синяя кривая — середине стадии насыщения.

# Нелинейные эффекты при развитии вейбелевской неустойчивости

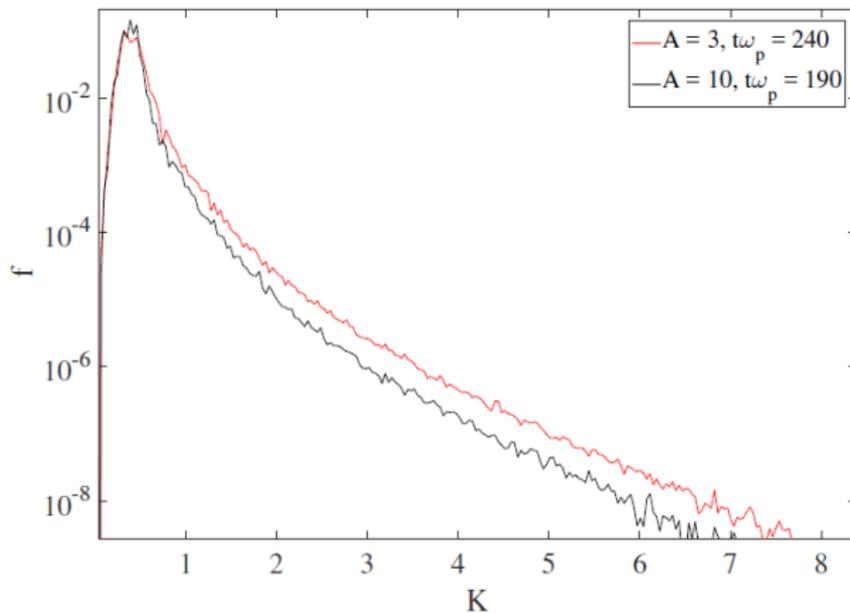
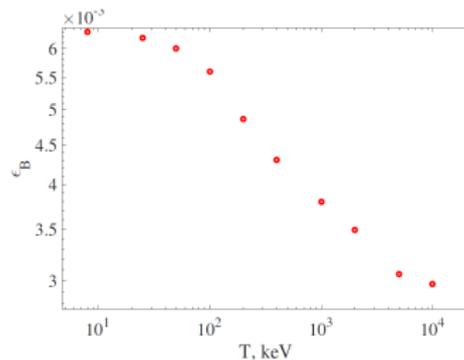
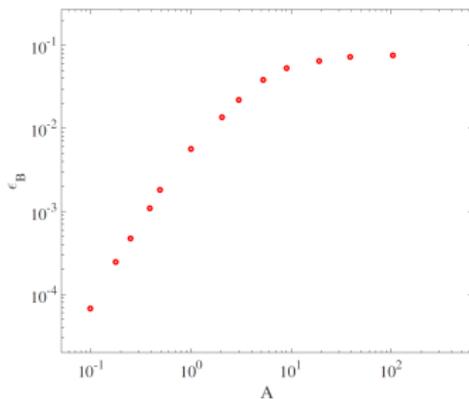
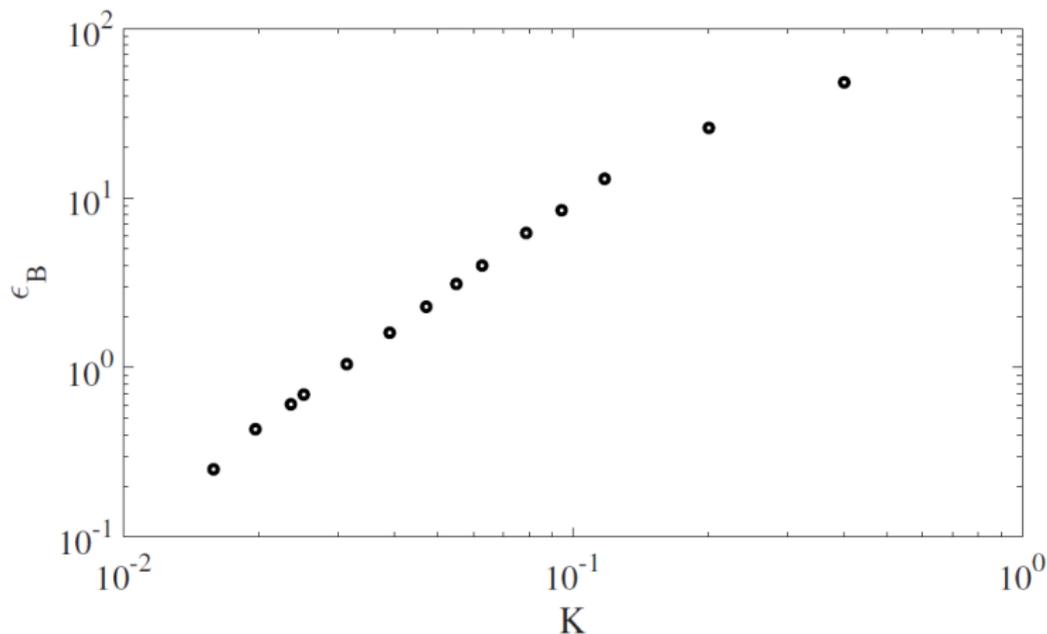


Рис. 5: Спектральное распределение нелинейности к концу стадии насыще-

# Насыщение магнитного поля в зависимости от начальной анизотропии



# Насыщение магнитного поля в зависимости от спектра начальных возмущений



## Основные результаты

- ▶ Безразмерная амплитуда нелинейных гармоник возникающих при развитии вейбелевской неустойчивости мала на всех стадиях роста магнитного поля, даже при больших начальных анизотропиях функции распределения
- ▶ Насыщение вейбелевской неустойчивости связано с изотропизацией функции распределения из-за взаимодействия с турбулентным магнитным полем.
- ▶ С другой стороны нелинейные эффекты играют принципиальную роль в генерации крупномасштабных мод магнитного поля и определяют закон его затухания