

Новые методы ускорения частиц и экстремальные состояния материи
19.06.2020

Параметрические неустойчивости в сильно градиентной фемтосекундной лазерной плазме

И.Н. Цымбалов, Д.А. Горлова, С.А. Шуляпов, К.А. Иванов, А.Б. Савельев.
Физический факультет и Международный лазерный центр
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Содержание

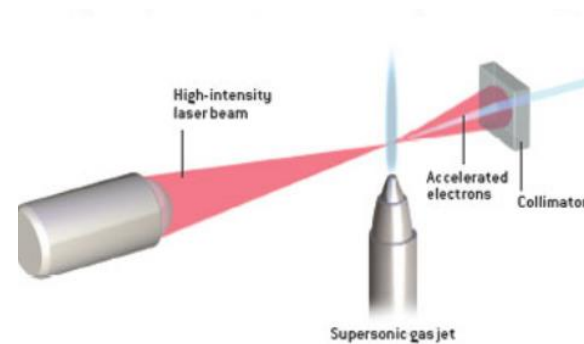
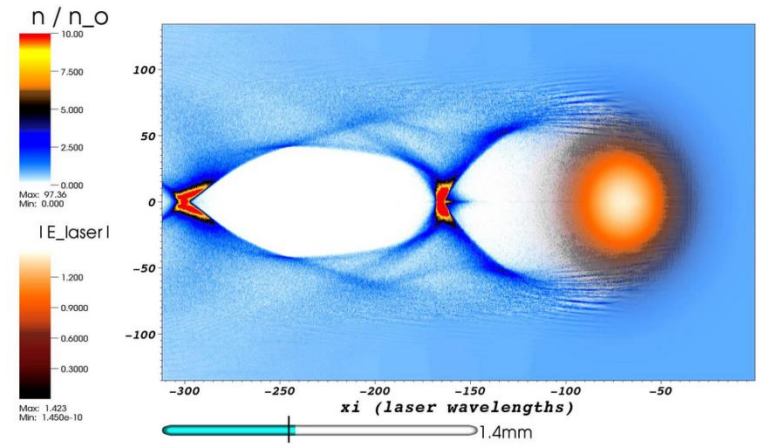
Актуальность исследования параметрических неустойчивостей для задач плазменного ускорения электронов

Неустойчивость ВКР – двухплазмонный распад в сильно градиентной фемтосекундной лазерной плазме

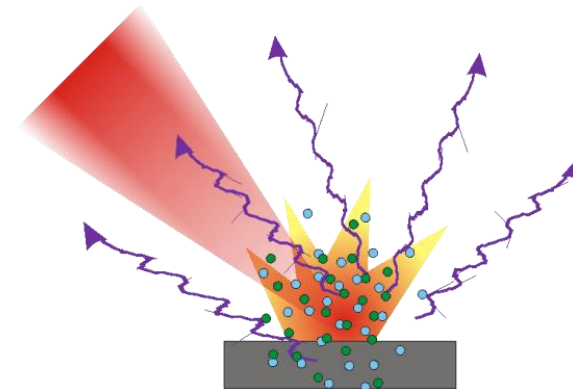
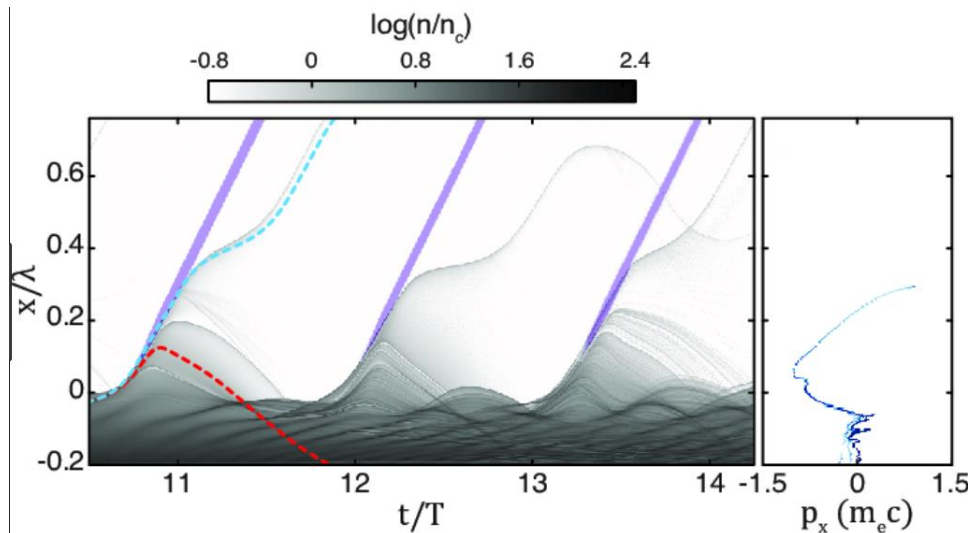
Генерация полуторной гармоники и ее использование для диагностики плазмы

Актуальность работы

Ускорение электронов в малоплотных мишенях



Ускорение электронов на поверхности твердотельной мишени



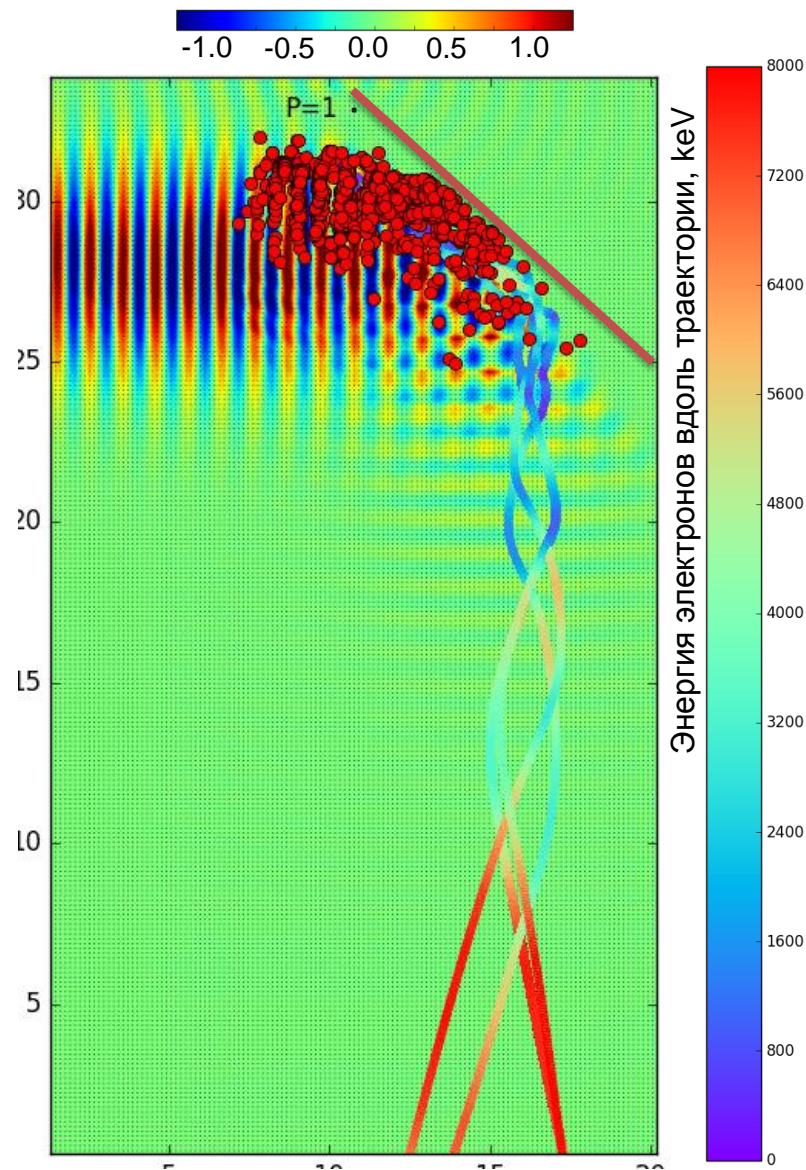
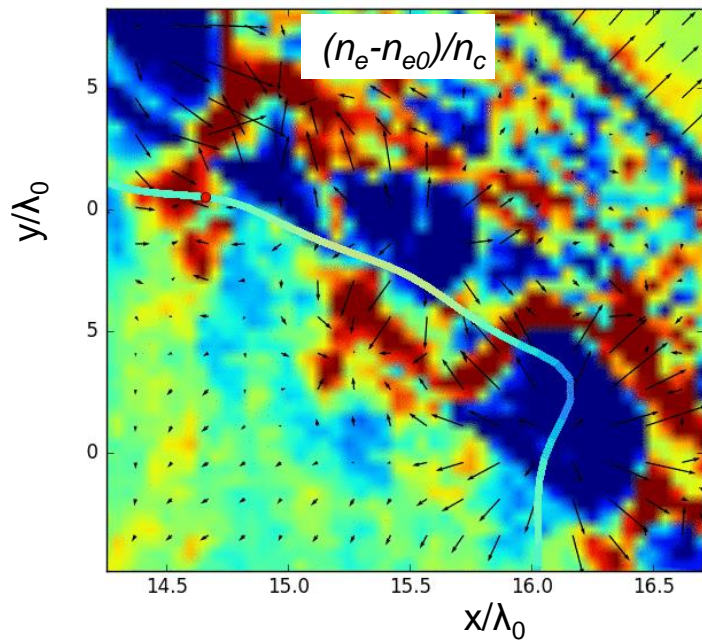
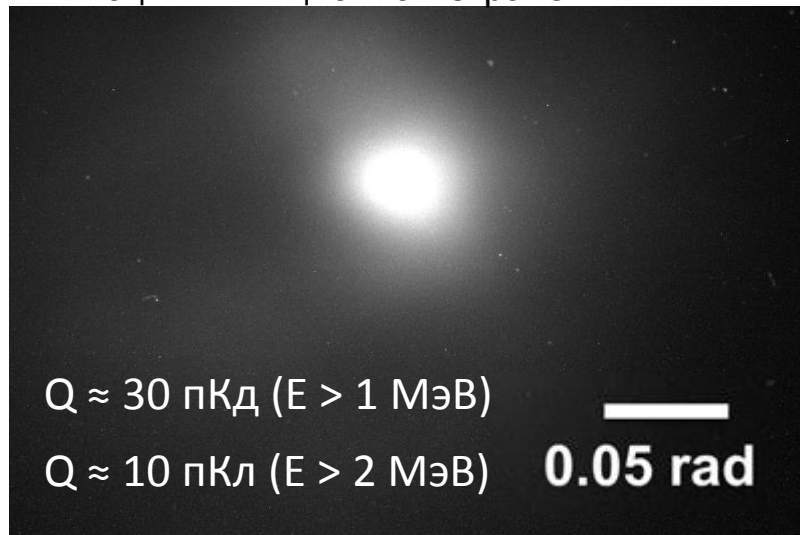
Thévenet, M., et al. *Nature Physics* 12.4 (2016): 355.

Mao, J. Y., et al. *Applied Physics Letters* 106.13 (2015): 131105.

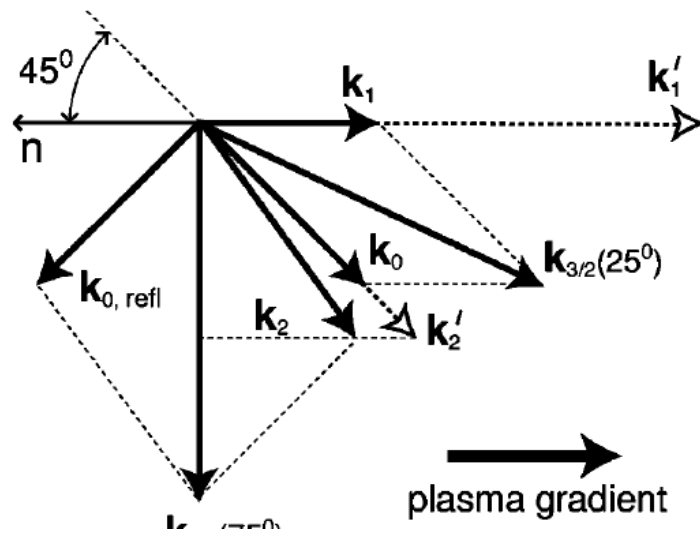
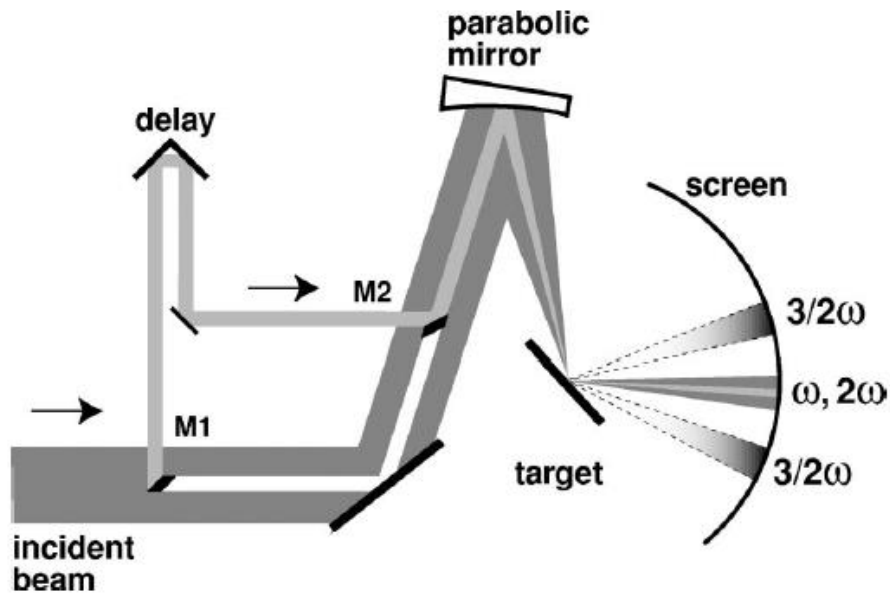
Ma, Yong, et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (2018): 201800668.

Электронный пучок, полученный при отражении лазерного излучения релятивистской интенсивности от плазмы

Изображение электронного пучка на сцинтилляционном экране

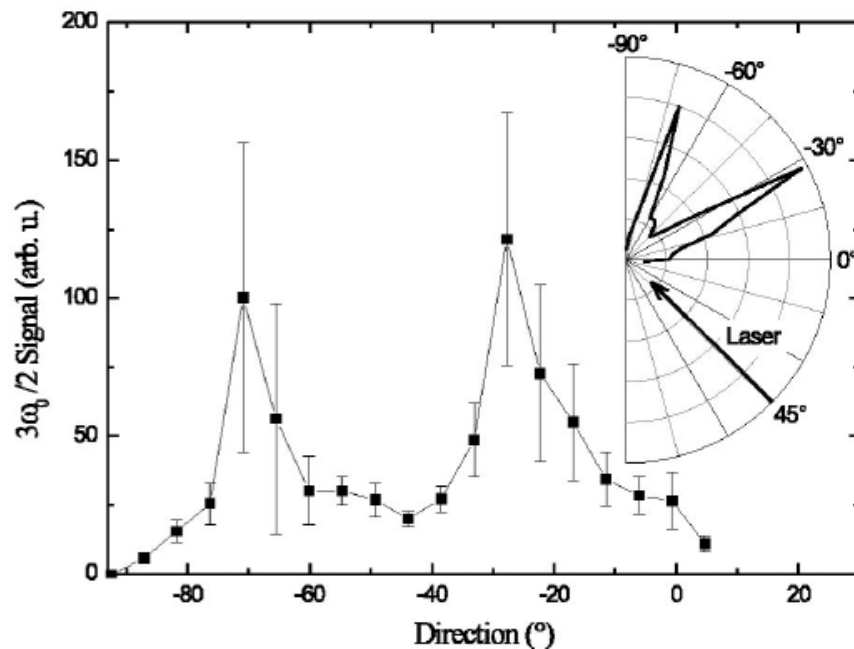


Плазменные волны и генерация $3/2\omega$ на поверхности твердотельной мишени



Tarasevitch A. et al. 3/2 harmonic generation by femtosecond laser pulses in steep-gradient plasmas //Physical Review E. – 2003. – T. 68. – №. 2. – C. 026410.

Veisz L. et al. Three-halves harmonic emission from femtosecond laser produced plasmas //Physics of Plasmas. – 2002. – T. 9. – №. 8. – C. 3197-3200.



Параметры моделирования

Шаг по времени– 0.003 фс

Шаг по пространству– $\lambda/100$

Область взаимодействия– 30x30 мкм

Лазерный пучок:

Длина волны (λ) – 1 мкм

Длительность(FWHM) – 50-100 фс

импульса (Total) – 200 фс

Диам. в фокусе (D_f) – 4 мкм

Интенсивность (I) – $5 \cdot 10^{18}$ Вт/см²

Поляризация – линейная (в Oxy)

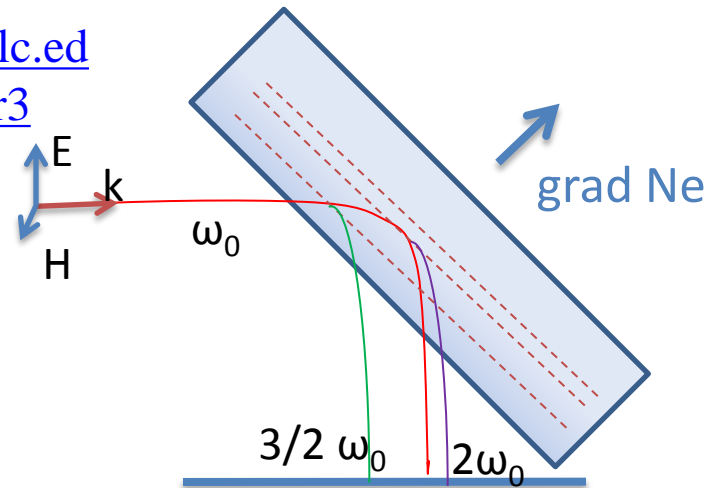
3D3V PIC code
Mandor

[http://mandor.ilc.ed
u.ru/mandor3](http://mandor.ilc.ed
u.ru/mandor3)

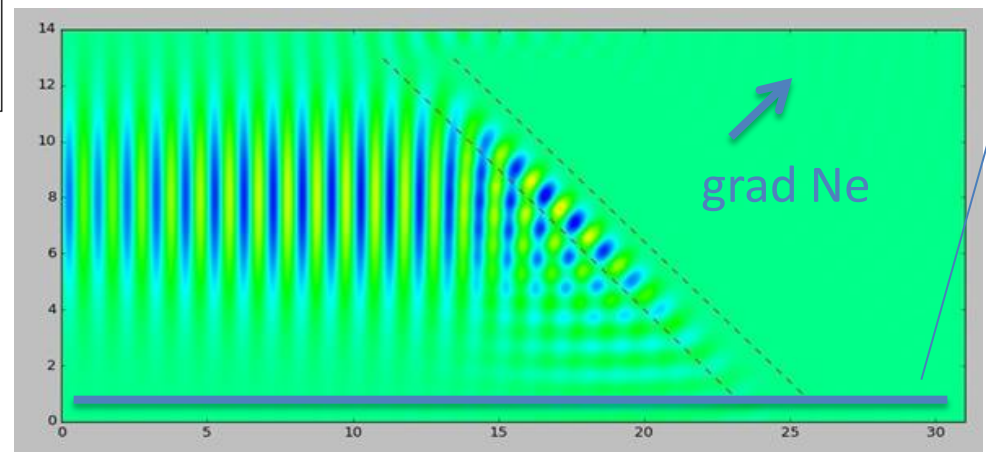
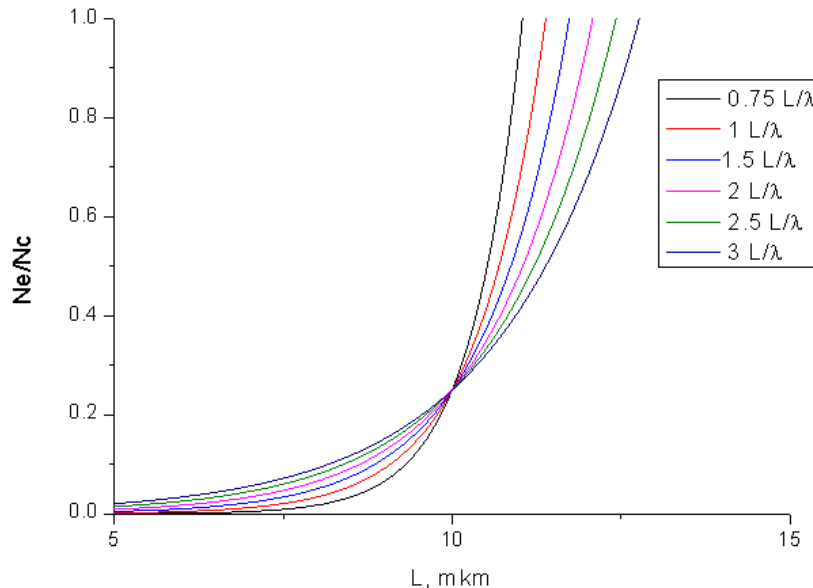
Частиц в ячейке ~ 10

Всего части $> 10^8$

Время вычисления ~ 3 дня
на 128 ядрах кластера “Ломоносов”

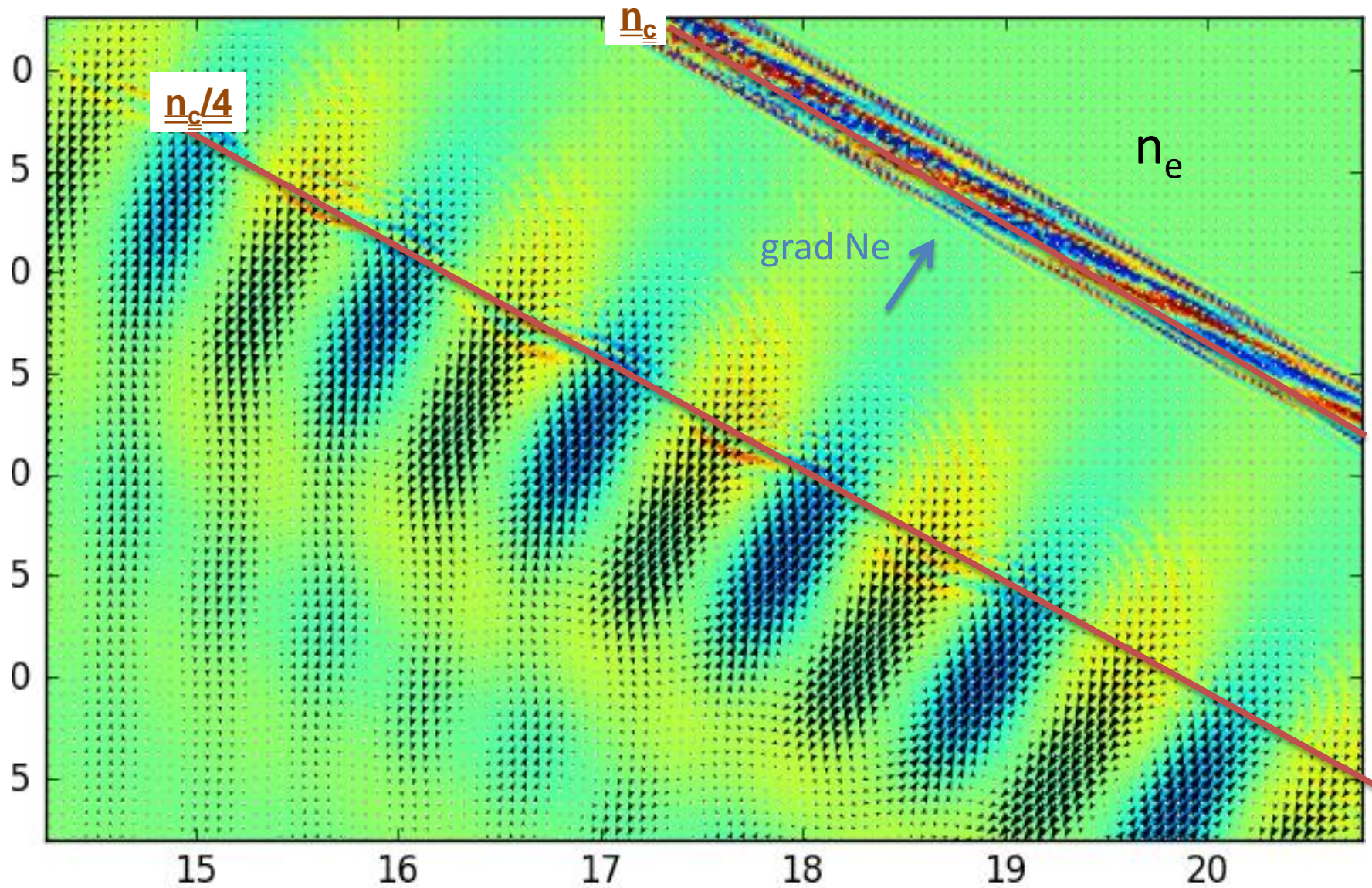


Мишень:

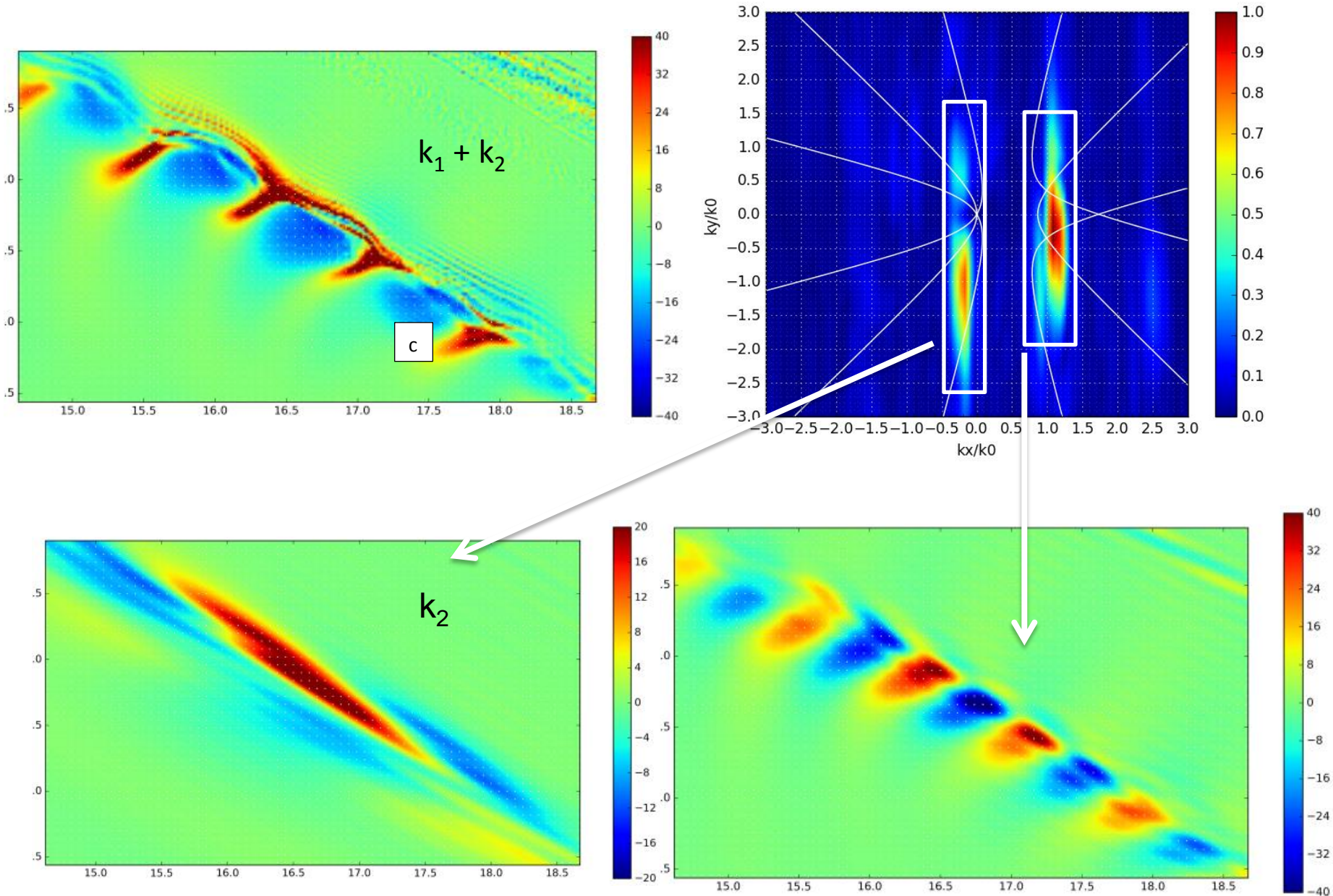


Плазменные волны

$I=10^{17}$ W/cm²



Плазменные волны

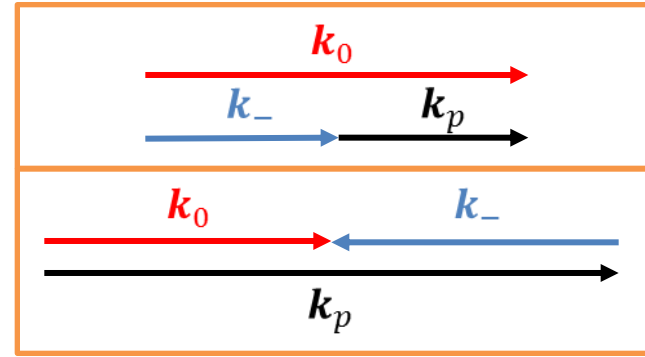


Параметрические неустойчивости в плазме:

ВКР

$$\omega_0 = \omega_s + \omega_{pe} \quad n \leq \frac{n_{cr}}{4}$$

$$\underline{k}_0 = \underline{k}_s + \underline{k}_{pe} \quad \omega_0 \geq 2\omega_{pe}$$



ВКР вперед

ВКР назад

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \omega_{pe}^2\right)n_1 = \frac{n_0 e^2}{m^2 c^2} \nabla^2 (\underline{A}_L \cdot \underline{A}_1)$$

Усиление
флуктуаций
электронной
плотности n_e

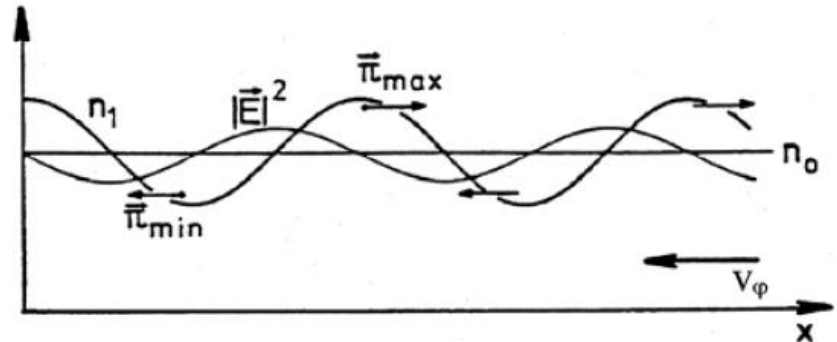
Биекция поля
накачки и
Стоксовой волны
создают
пондеромоторную
силу

$$(\underline{A}_L + \underline{A}_1)^2$$

Поперечный ток
 $\underline{j} = -en_e \underline{v}$
 \underline{v} – осцилляционная
скорость

Излучение
ТОКОМ
Стоксовой
волны

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right) \underline{A}_1 = \frac{4\pi}{c} \underline{j}_t$$

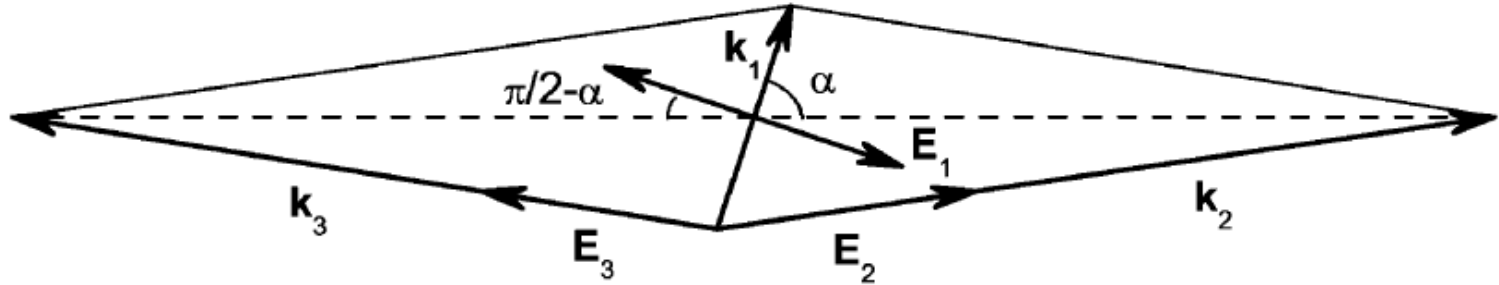


Двухплазменная неустойчивость

$$\omega_{p1} + \omega_{p2} = \omega_0 \quad k_{p1} + k_{p2} = k_0$$

$$n \approx \frac{n_{cr}}{4}$$

$$\omega_0 \approx 2\omega_{pe}$$



Усиление
флуктуаций
электронной
плотности n_{e1}

Биения полей
накачки и второго
плазмона

$$(\underline{E}_L + \underline{E}_2)^2$$

$$(\underline{E}_L + \underline{E}_1)^2$$

Биения полей
накачки и первого
плазмона

Усиление
флуктуаций
электронной
плотности n_{e2}

Двухплазменная неустойчивость

$$\omega_{p1} + \omega_{p2} = \omega_0 \quad k_{p1} + k_{p2} = k_0$$

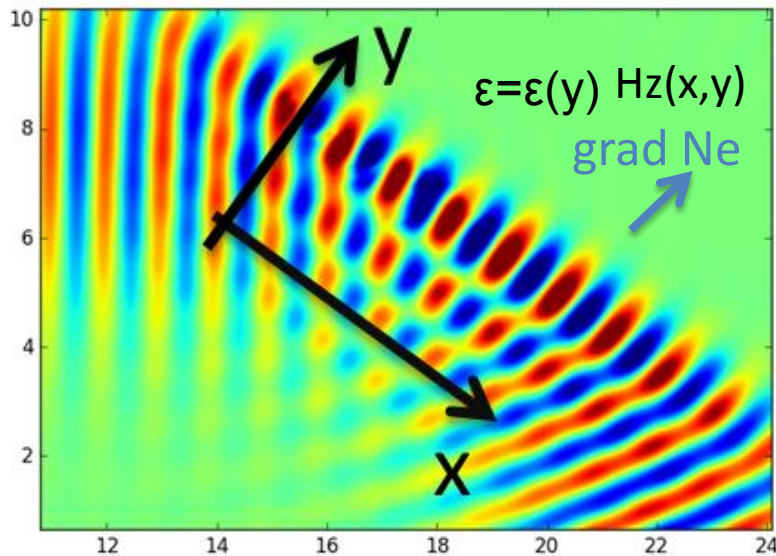
Инкремент неустойчивости

$$\gamma = \frac{|k v_{osc}|}{4} \frac{|(k - k_0)^2 - k^2|}{k|k - k_0|}$$

Гипербола
максимально
го
инкремента

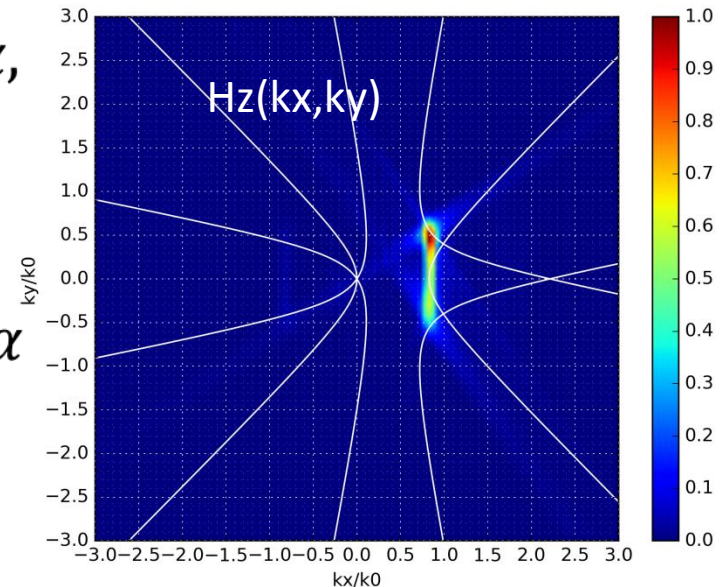
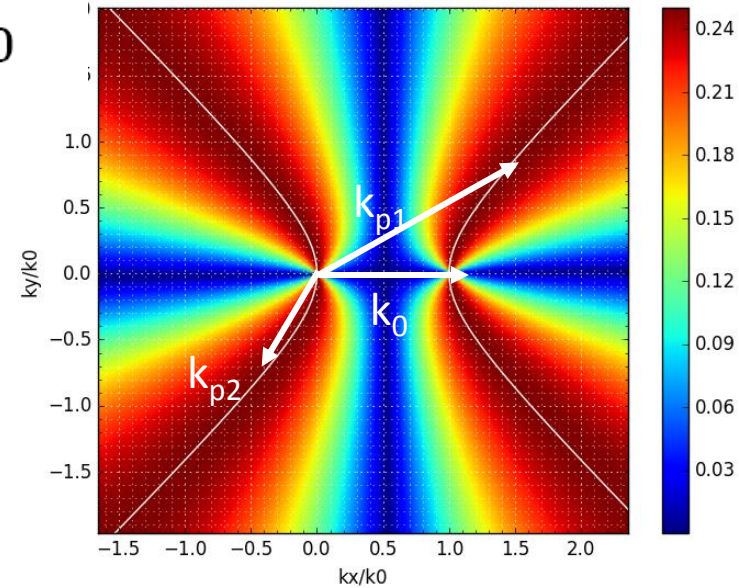
$$k_{\perp}^2 = k_{\parallel}(k_{\parallel} - k_0)$$

Волна накачки



$$k_x = k_0 \sin \alpha,$$

k_y : from
 $k_0 \cos \alpha$
to $-k_0 \cos \alpha$



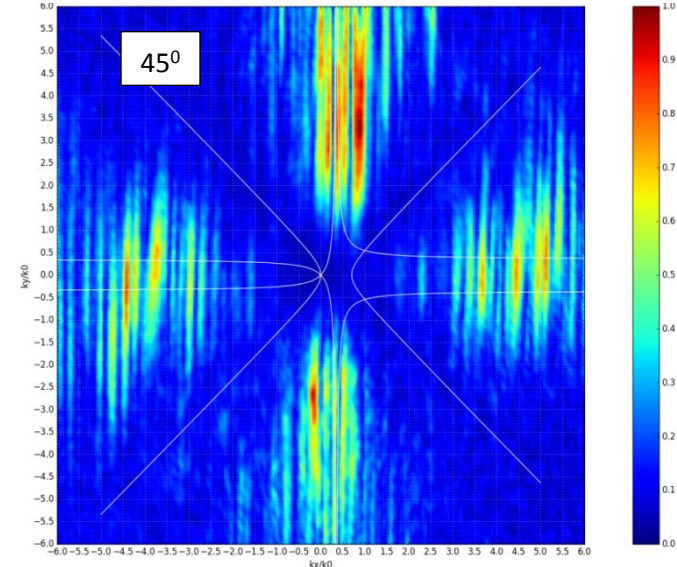
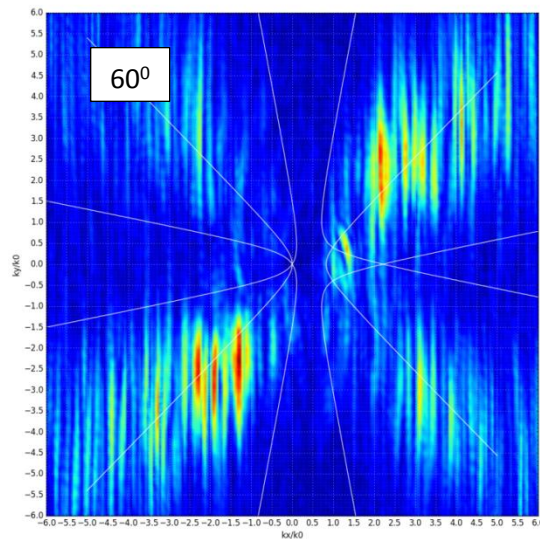
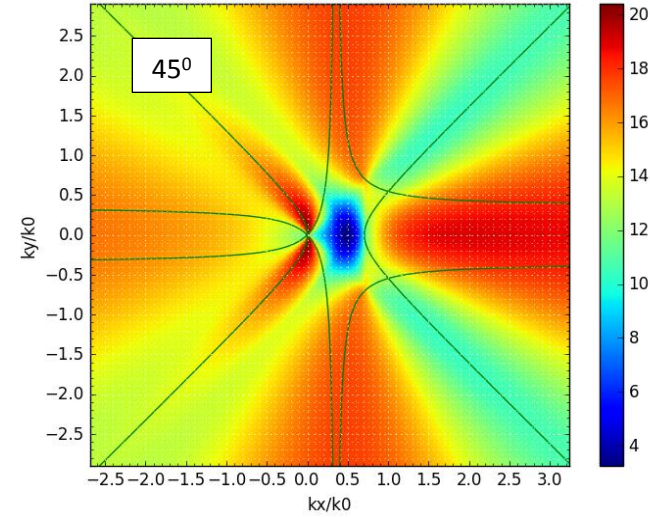
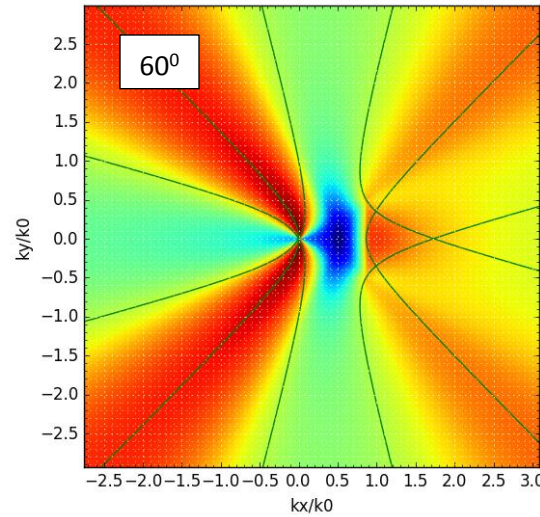
Двухплазменная неустойчивость

Инкремент неустойчивости для плоской волны накачки $\gamma = \frac{|kv_{osc}|}{4} \frac{|(k - k_0)^2 - k^2|}{k|k - k_0|}$

Инкремент неустойчивости для случая наклонного падения

$$\Gamma(k) = \sum_{\Delta k_0} \gamma(k, k_0, v_{osc}(k_0))$$

Начальная температура электронов $T_e = 100 \text{ eV}$



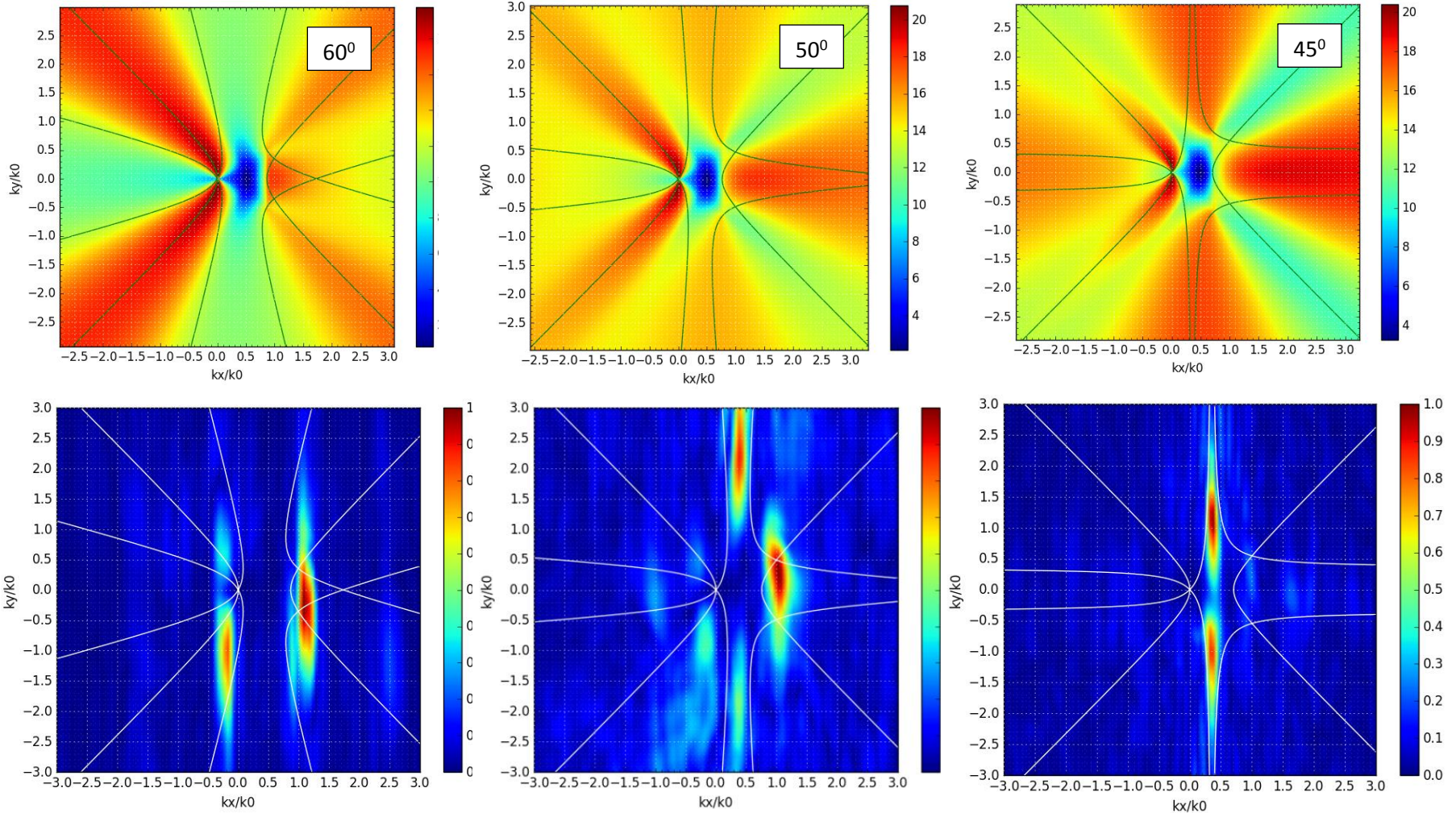
Гибридная неустойчивость

Характерные значения

волновых чисел

$$k_{1x} \approx 1.1 - 1.2 \omega_0 / c$$

И. Н. Цымбалов и др. *Квантовая электроника*,
vol. 49, no. 4, pp. 386–390, 2019.



$$\pi_0 \sim -\nabla E^2$$

Пондеромоторная сила

$E^2 = E(\omega_0) E_1(\omega_0/2) + E(\omega_0) E_2(\omega_0/2) + E(\omega_0) E_s(\omega_0/2) +$ нерезонансные члены

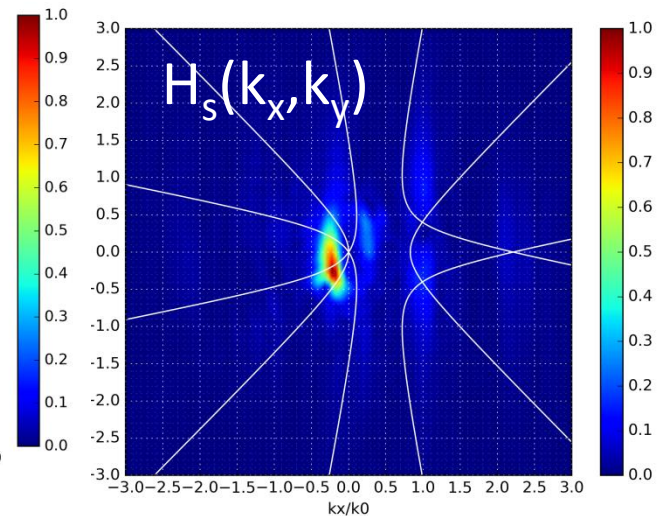
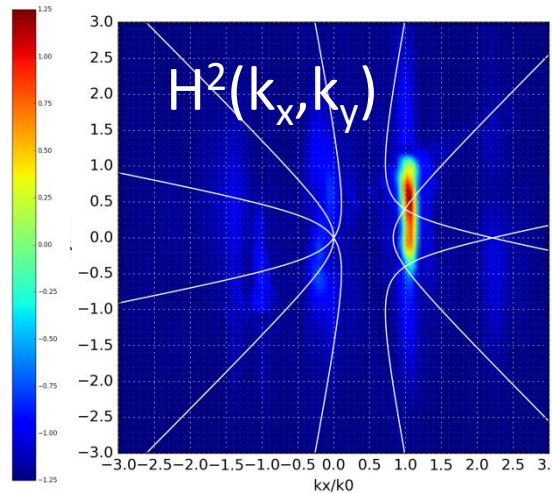
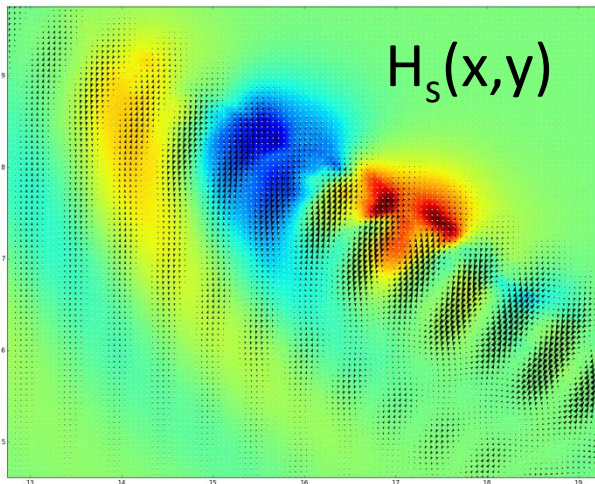
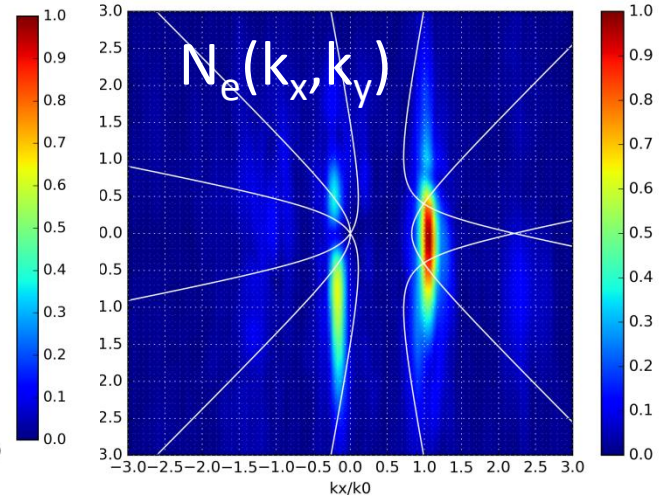
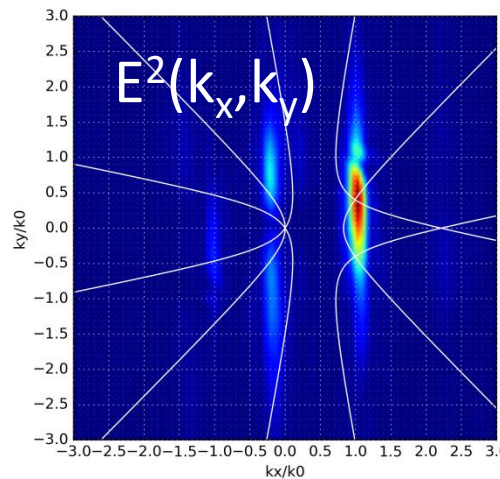
$H^2 = H(\omega_0) H_s(\omega_0/2) +$ нерезонансные члены $k_{1x} + k_{2x} = k_{0x}$

$E_{1,2}(\omega_0/2)$ – поля плазменных волн

$$k_{1x} \approx 1.1\omega_0/c \quad k_{2x} \approx -0.23\omega_0/c \quad k_{0x} \approx 0.87\omega_0/c$$

$E(\omega_0), H(\omega_0)$ – поля лазерного импульса (накачка)

$E_s(\omega_0/2), H_s(\omega_0/2)$ – поля Стоксовой рассеянной электромагнитной волны



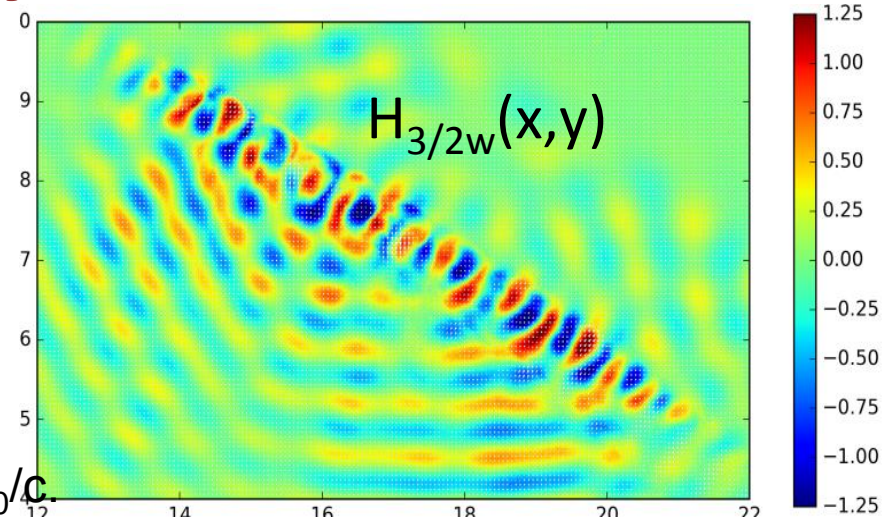
Генерация излучения $3/2\omega$

$$\mathbf{j}_1(3\omega_0/2) = \rho(\omega_0/2)\mathbf{v}(\omega_0)$$

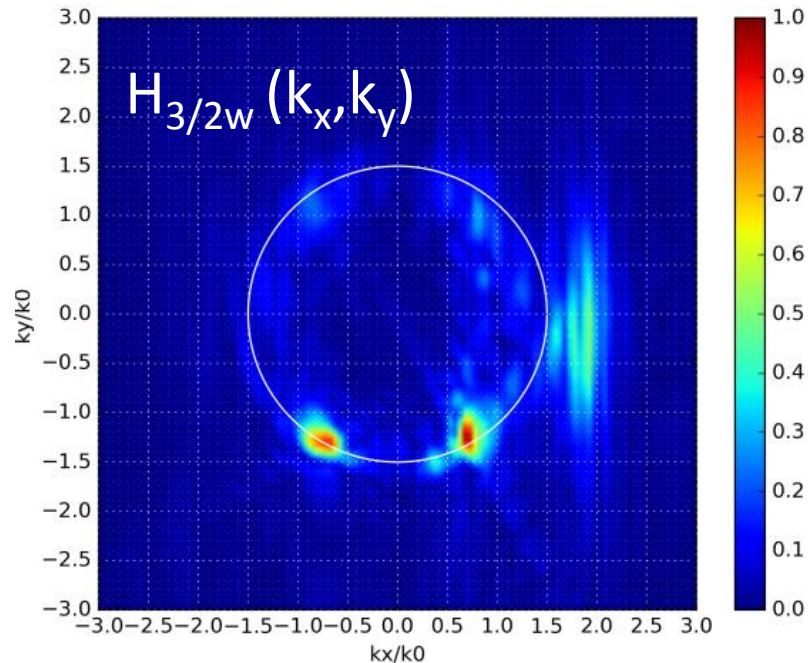
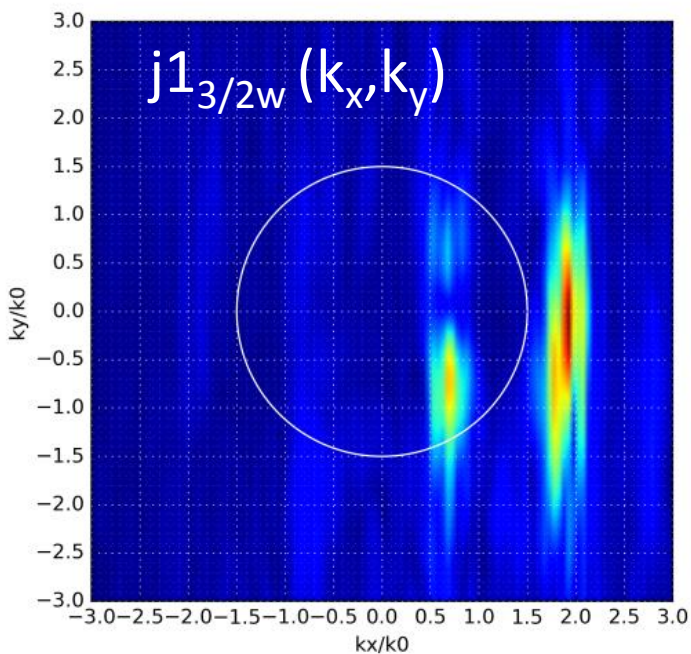
$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) \underline{\mathbf{A}}_1 = \frac{4\pi}{c} \underline{\mathbf{j}}_t$$

$$k_{11x}(3/2\omega_0) = k_{0x} + k_{2x} = 0.9\omega_0/c - 0.2\omega_0/c = 0.7\omega_0/c$$

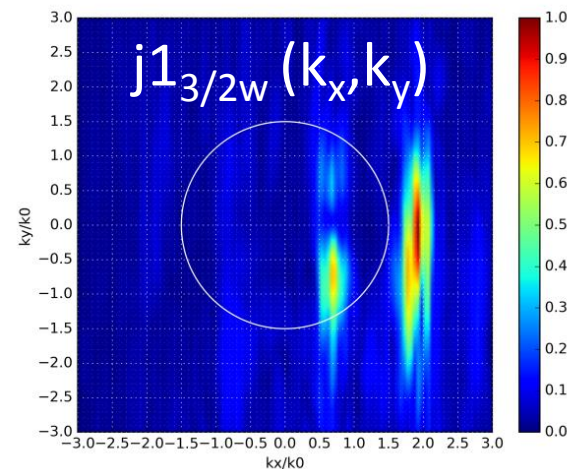
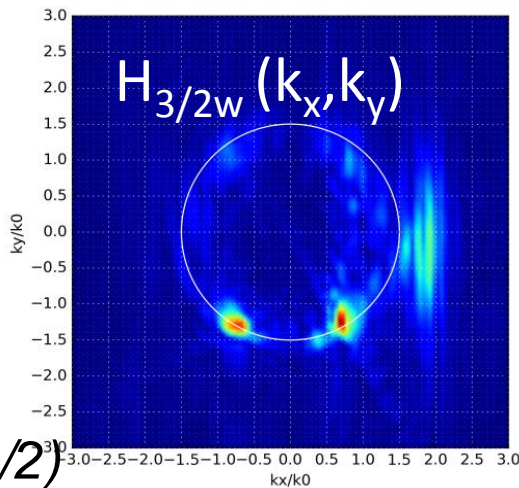
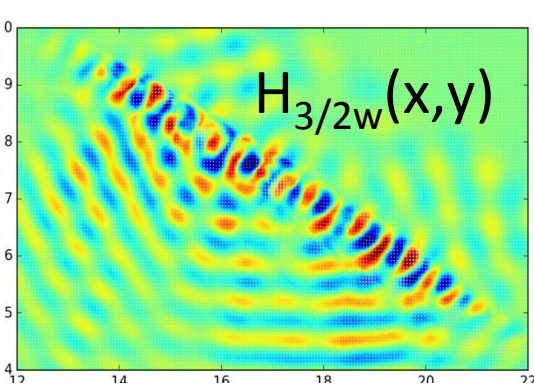
$$k_{12x}(3/2\omega_0) = k_{0x} + k_{1x} = 0.9\omega_0/c + 1.1\omega_0/c = 2\omega_0/c$$



“radiation circle”
 $c^2\mathbf{k}^2 = (3/2\omega_0)^2 - \omega_p^2$



Генерация излучения $3/2\omega$ $j_1(3\omega_0/2) = \rho(\omega_0/2)v(\omega_0)$



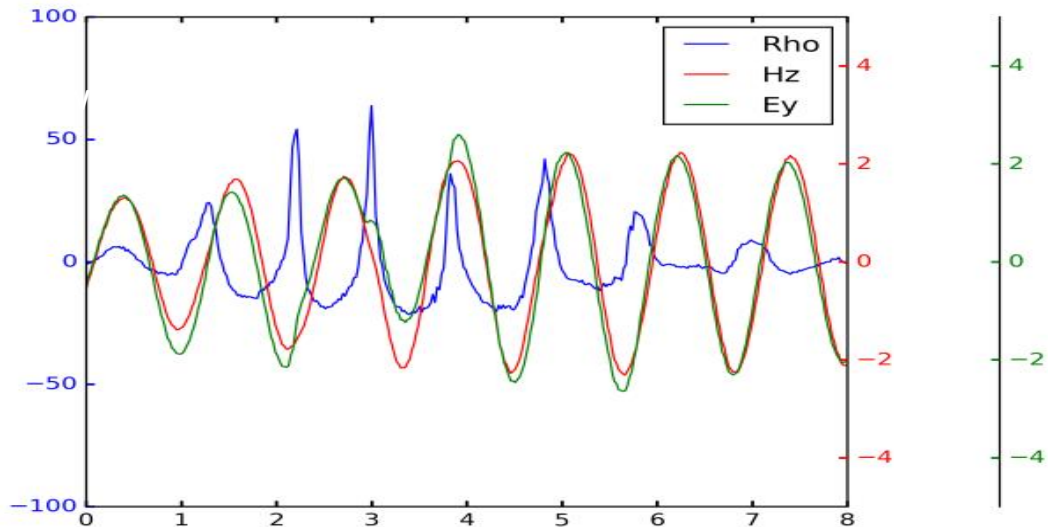
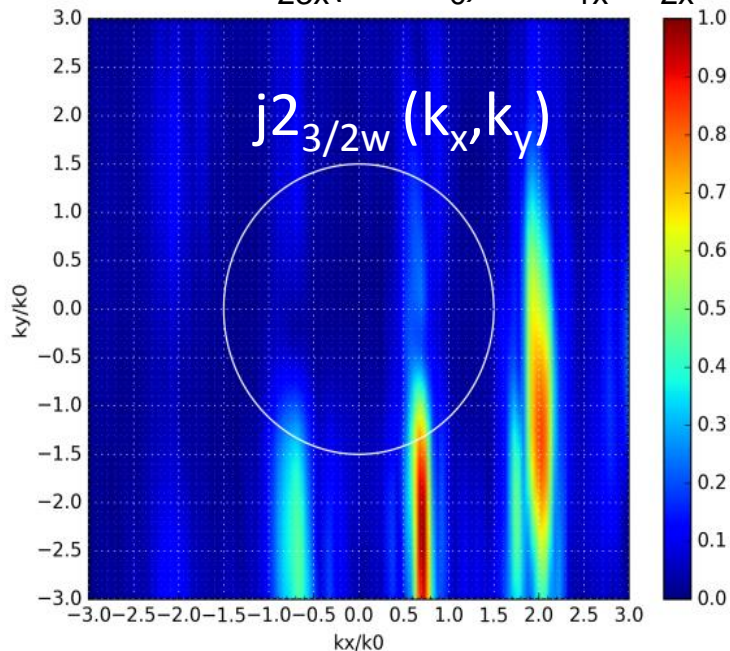
$$j_2(3\omega_0/2) = \rho(2\omega_0/2)v(\omega_0/2)$$

$$k_{21x}(3/2\omega_0) = 2k_{2x} + k_{2x} = -0.46\omega_0/c - 0.23\omega_0/c = -0.69\omega_0/c,$$

$$k_{22x}(3/2\omega_0) = k_{1x} + 2k_{2x} = 1.1\omega_0/c - 0.46\omega_0/c = 0.64\omega_0/c$$

$$k_{23x}(3/2\omega_0) = 2k_{1x} + k_{2x} = 2.2\omega_0/c - 0.23\omega_0/c = 1.97\omega_0/c$$

$\rho(2\omega_0/2)$ – вторая гармоника нелинейной плазменной волны



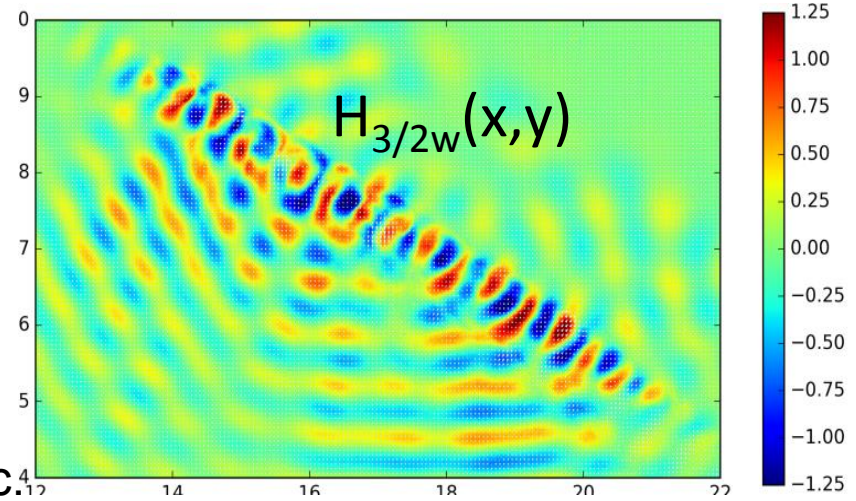
Генерация излучения $3/2\omega$

$$\mathbf{j}_1(3\omega_0/2) = \rho(\omega_0/2)\mathbf{v}(\omega_0)$$

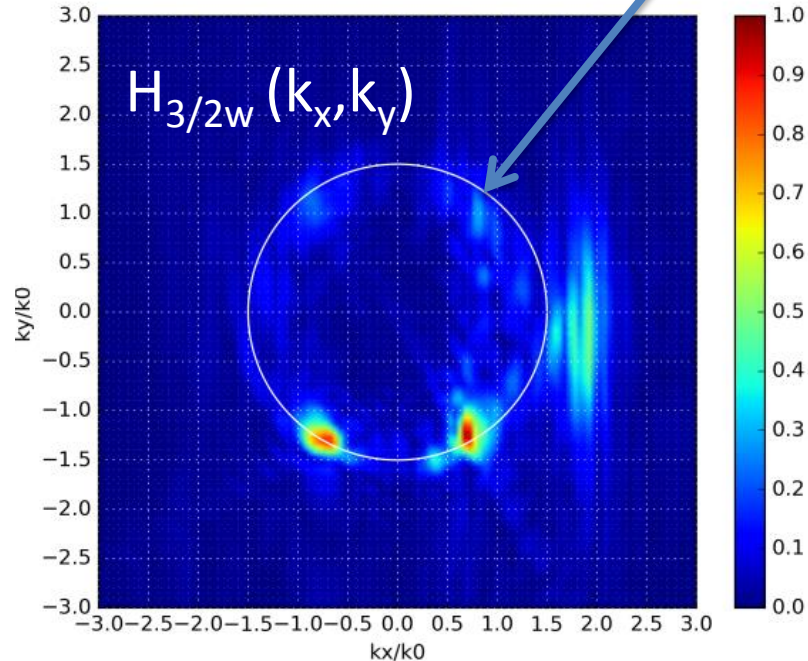
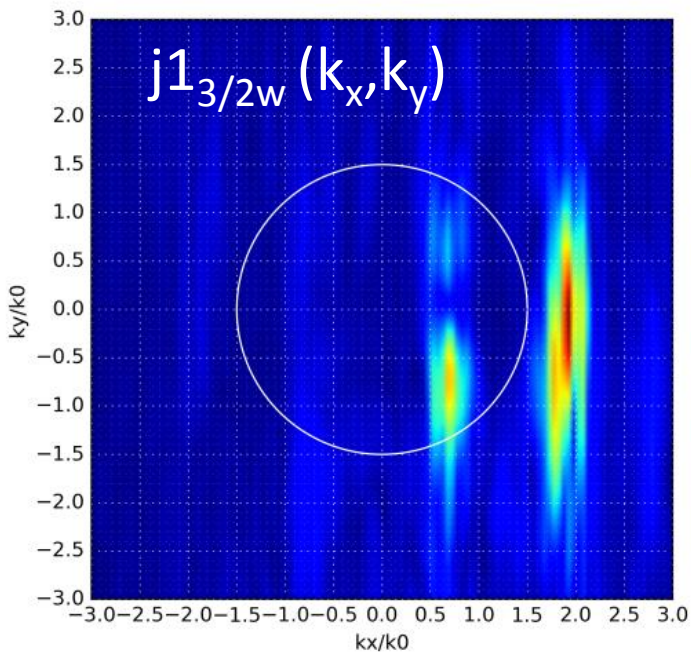
$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) \underline{\mathbf{A}}_1 = \frac{4\pi}{c} \underline{\mathbf{j}}_t$$

$$k_{11x}(3/2\omega_0) = k_{0x} + k_{2x} = 0.9\omega_0/c - 0.2\omega_0/c = 0.7\omega_0/c$$

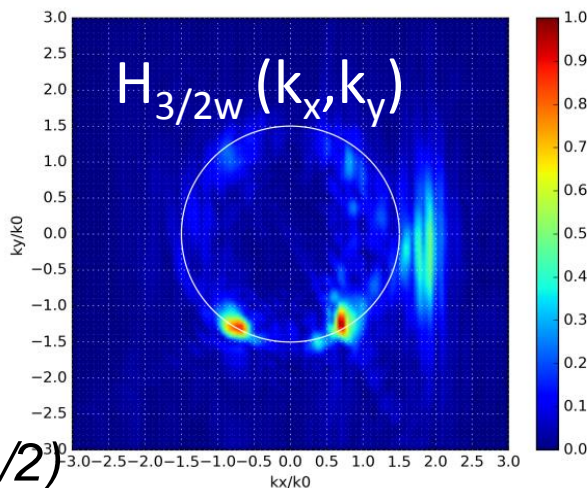
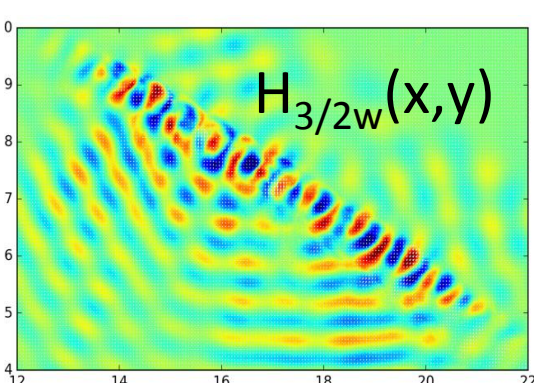
$$k_{12x}(3/2\omega_0) = k_{0x} + k_{1x} = 0.9\omega_0/c + 1.1\omega_0/c = 2\omega_0/c$$



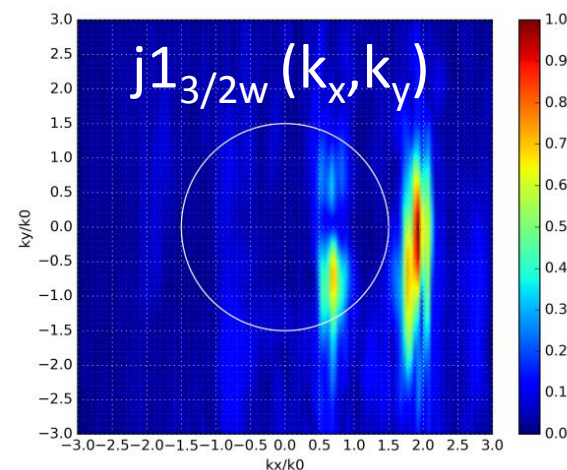
дисперсионное соотношение
 $c^2\mathbf{k}^2 = (3/2\omega_0)^2 - \omega_p^2$



Генерация излучения $3/2\omega$



$$j_1(3\omega_0/2) = \rho(\omega_0/2)v(\omega_0)$$



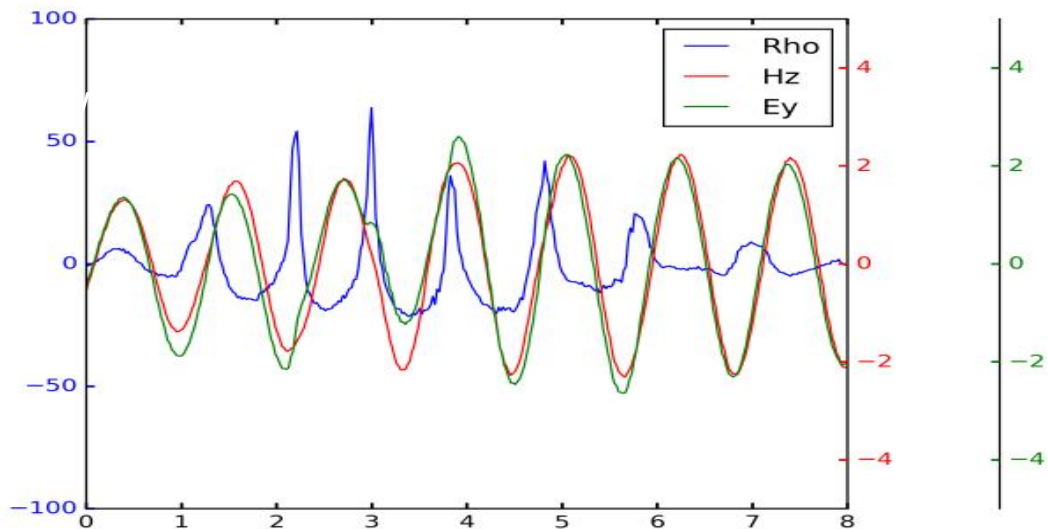
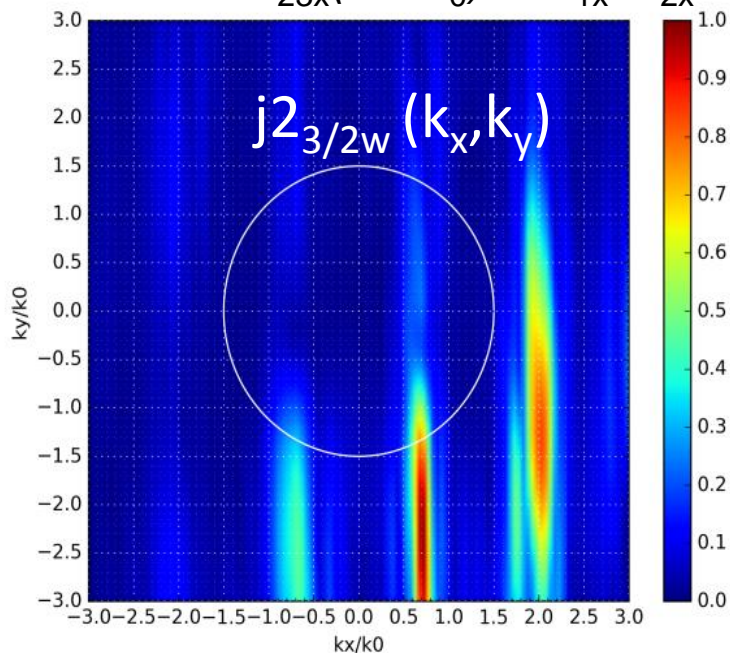
$$j_2(3\omega_0/2) = \rho(2\omega_0/2)v(\omega_0/2)$$

$$k_{21x}(3/2\omega_0) = 2k_{2x} + k_{2x} = -0.46\omega_0/c - 0.23\omega_0/c = -0.69\omega_0/c,$$

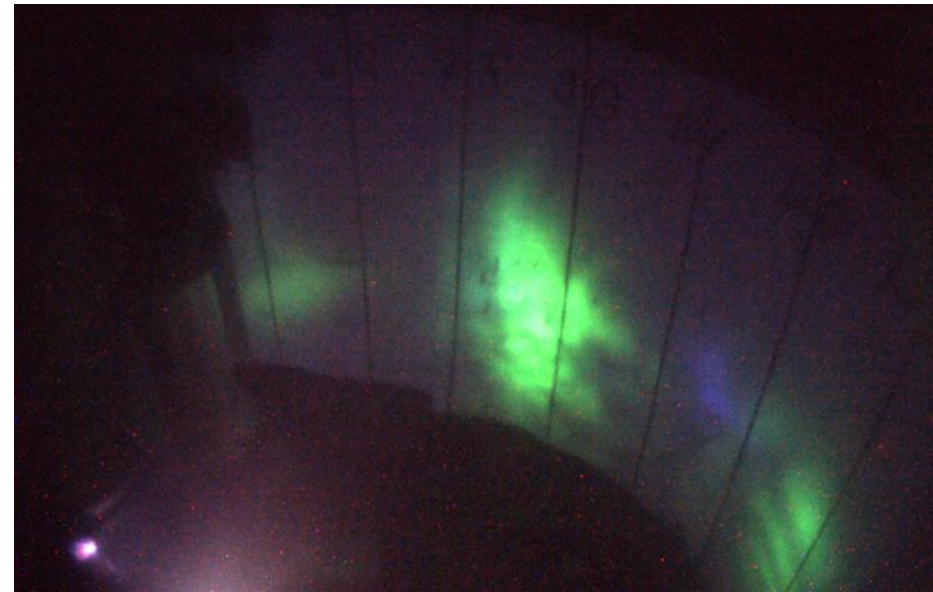
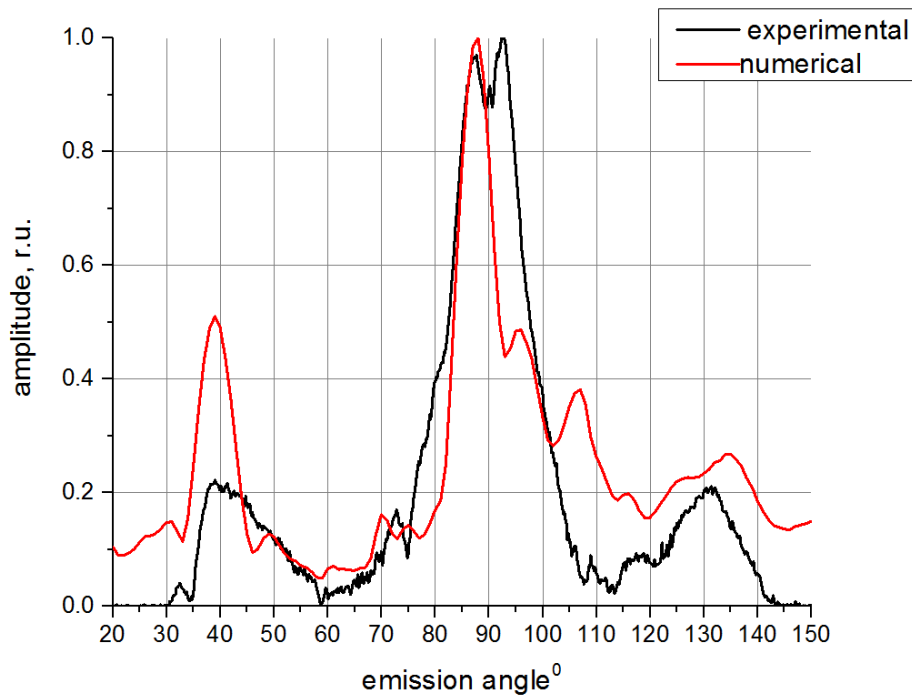
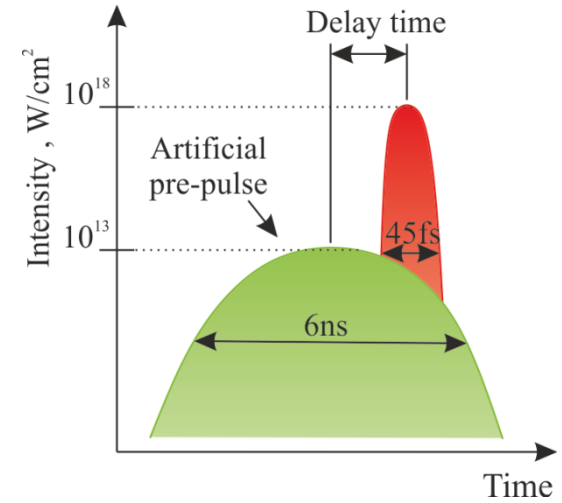
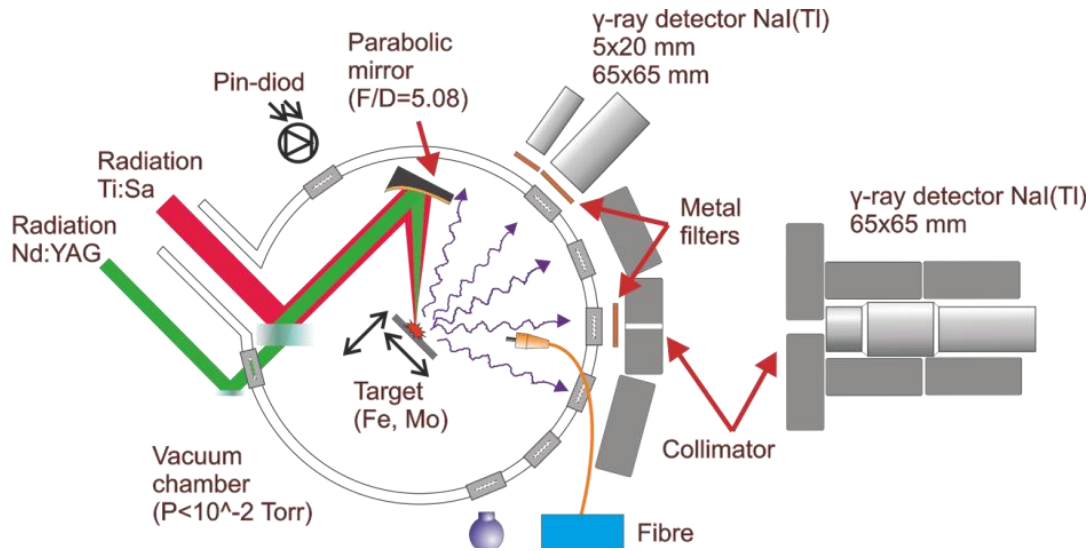
$$k_{22x}(3/2\omega_0) = k_{1x} + 2k_{2x} = 1.1\omega_0/c - 0.46\omega_0/c = 0.64\omega_0/c$$

$$k_{23x}(3/2\omega_0) = 2k_{1x} + k_{2x} = 2.2\omega_0/c - 0.23\omega_0/c = 1.97\omega_0/c$$

$\rho(2\omega_0/2)$ – вторая гармоника нелинейной плазменной волны

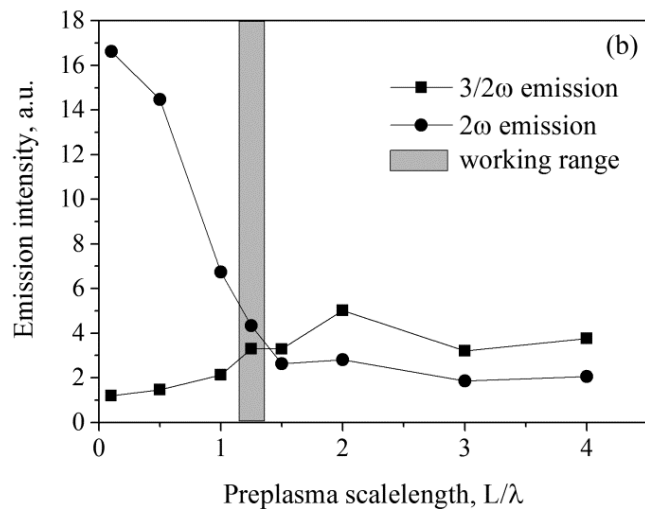
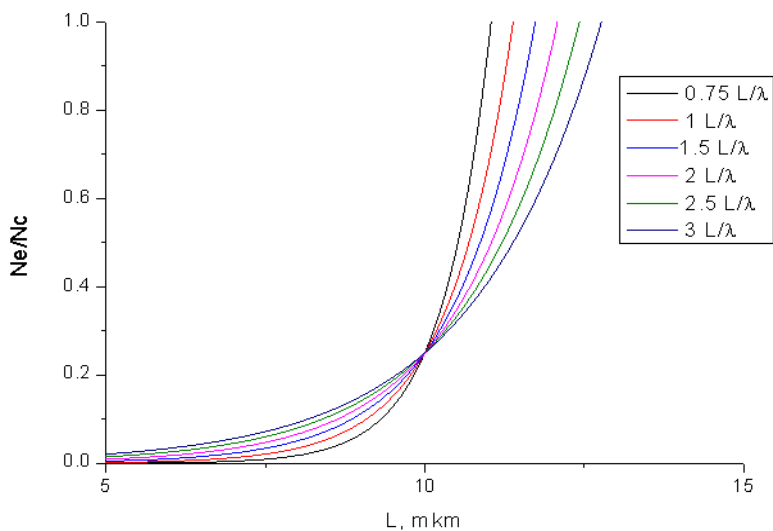
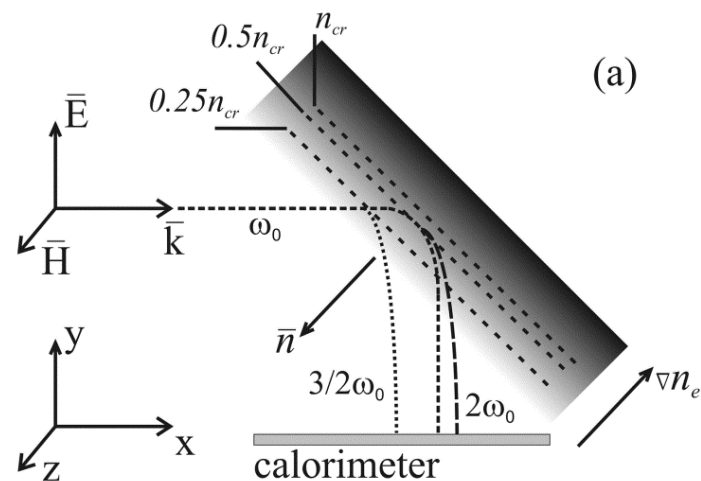
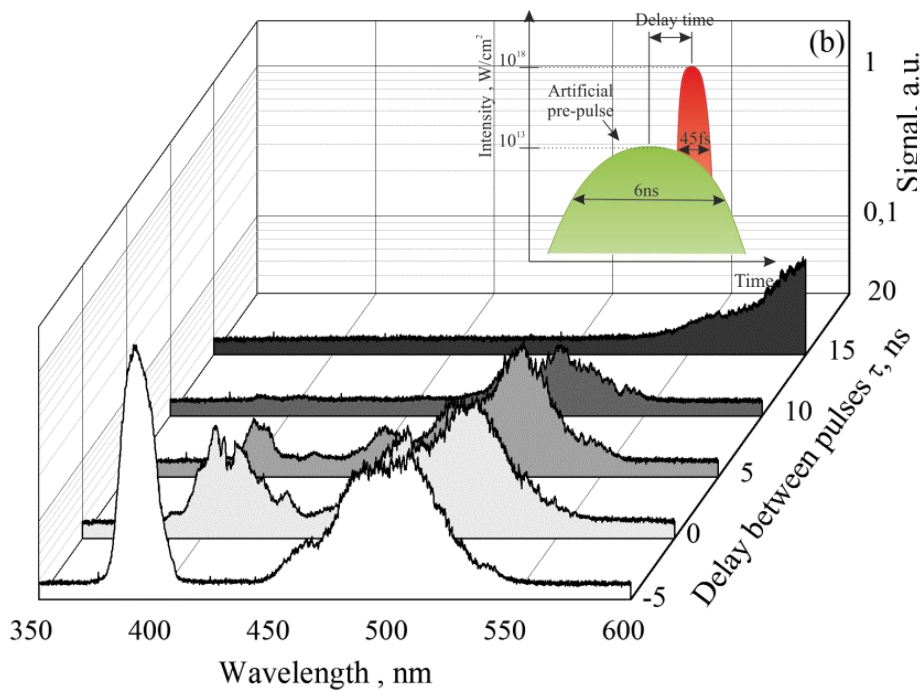


3/2w: измерение угловых зависимостей

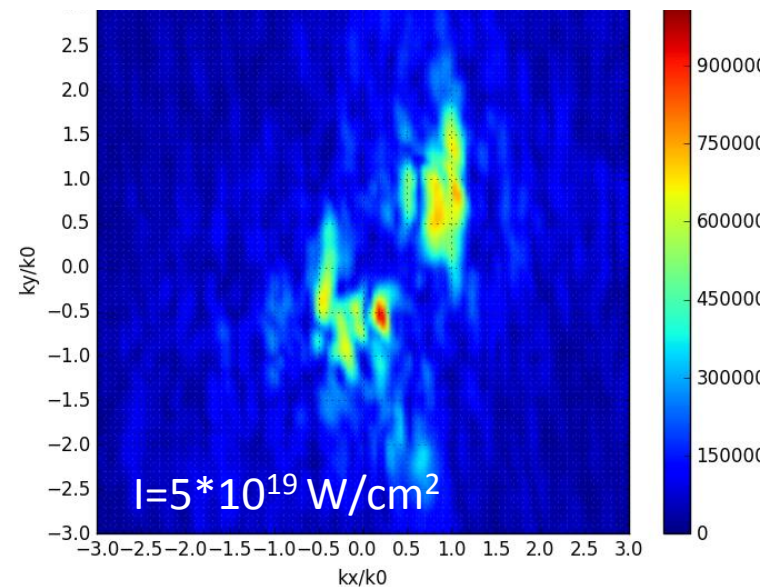
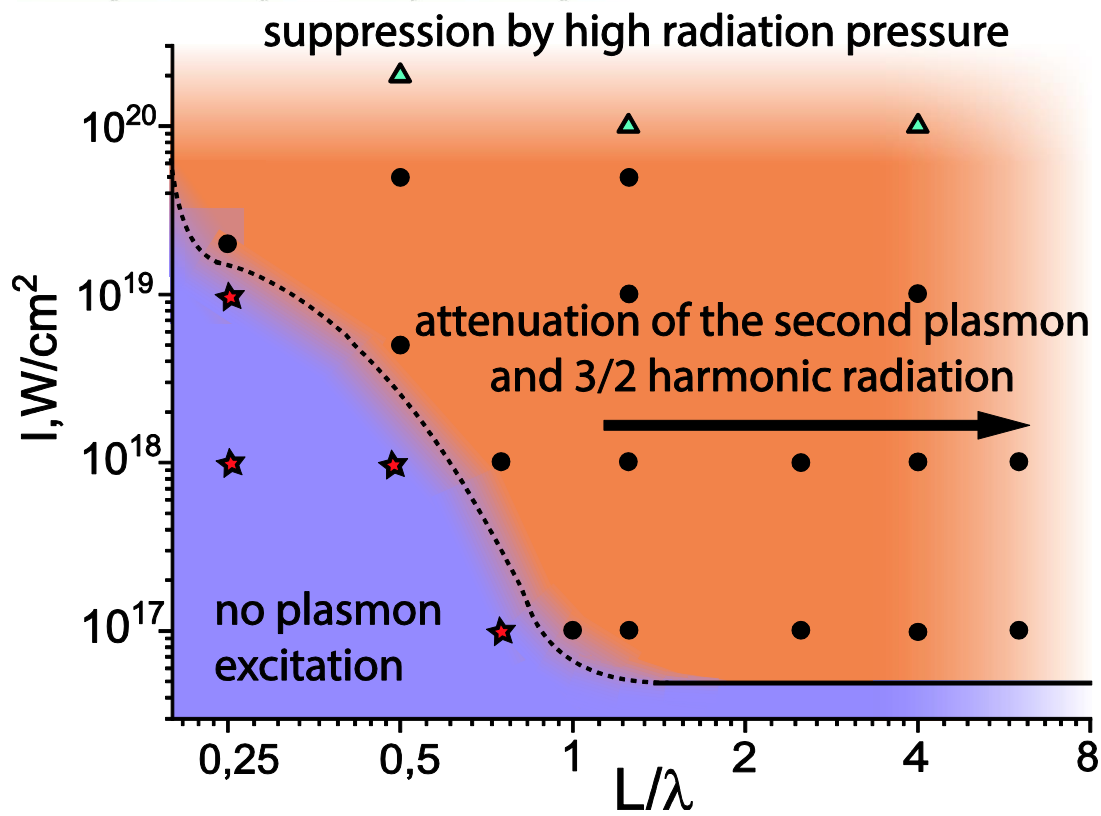
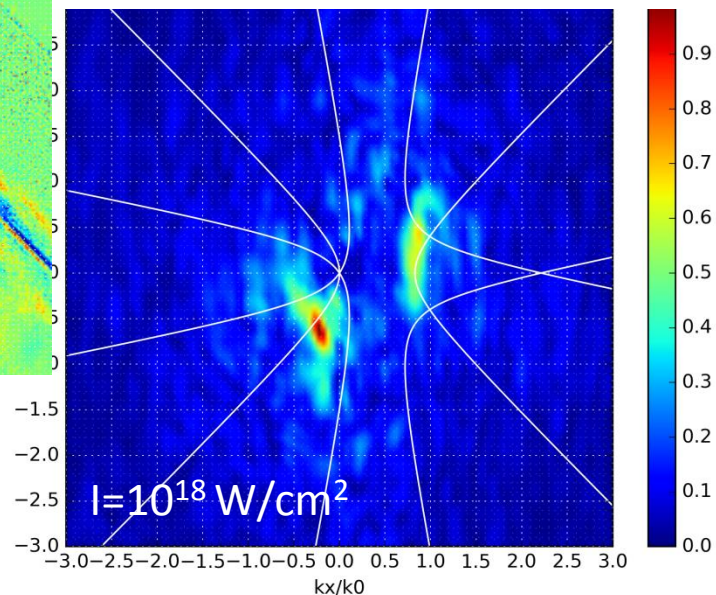
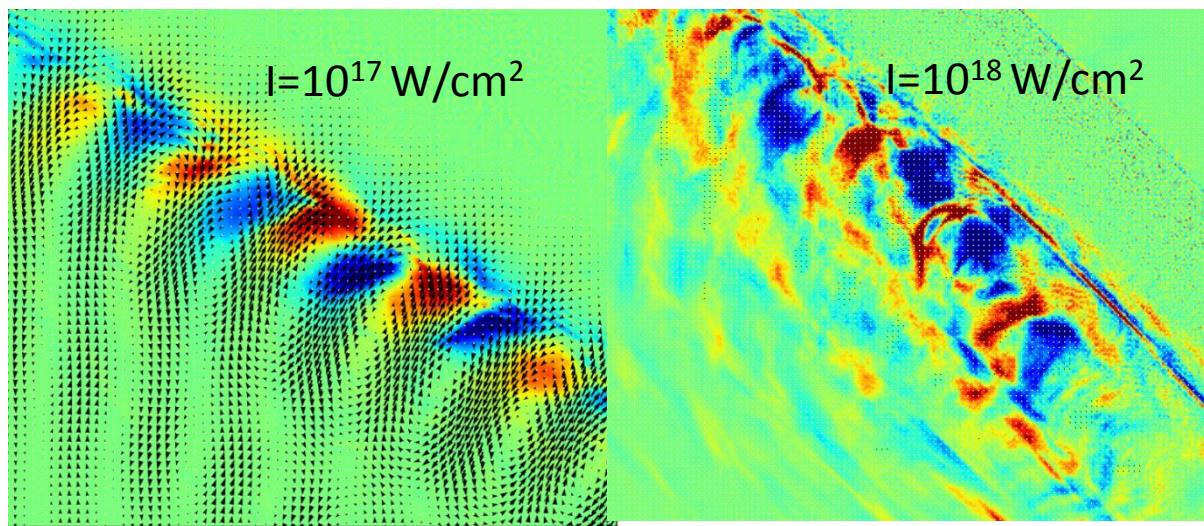


Оценка параметров преплазмы

Ivanov K. A. et al. *Physics of Plasmas*. – 2017. – T. 24. – №. 6. – С. 063109.



Переход к большим интенсивностям



Основные результаты

1. Гибридная неустойчивость ВКР – двухплазмонный распад является основным механизмом возбуждения плазменных волн при наклонном падении (под углом 45-60 град.) р-поляризованного лазерного излучения с интенсивностью в диапазоне 10^{17} - $5 \cdot 10^{19}$ Вт/см² на плазму с градиентом концентрации электронов $L/\lambda=0.5-3$ (λ - длина волны излучения) в области начальных концентраций 0.2-1 от критической концентрации n_c . Генерирующиеся при этом плазменные волны имеют широкий пространственный спектр $\Delta k \sim k_0$ (k_0 - волновое число падающего излучения) вдоль оси, направленной по градиенту электронной концентрации, а проекции волновых чисел на ось, направленную вдоль поверхности плазмы близки к $\sim 1.2k_0$ и $\sim 0.2k_0$.

2. Условия синхронизма для генерации излучения на частоте $3/2\omega$ в неоднородной плазме с $L/\lambda=0,5-3$ вследствие рассеяния р-поляризованного лазерного излучения с интенсивностью 10^{17} - $5 \cdot 10^{19}$ Вт/см² на плазменных волнах гибридной неустойчивости при углах падения 45-60 град. выполняются немедленно, в области возбуждения этих волн, из-за широкого пространственного спектра плазмонов и волны накачки. Нелинейность плазменных волн уже при интенсивностях 10^{17} Вт/см² приводит к появлению дополнительного механизма генерации излучения на частоте $3/2\omega$ за счет генерации нелинейного тока при взаимодействии второй гармоники одного из плазмонов с первой гармоникой другого плазмона либо со стоксовой электромагнитной волной.

Спасибо за внимание!