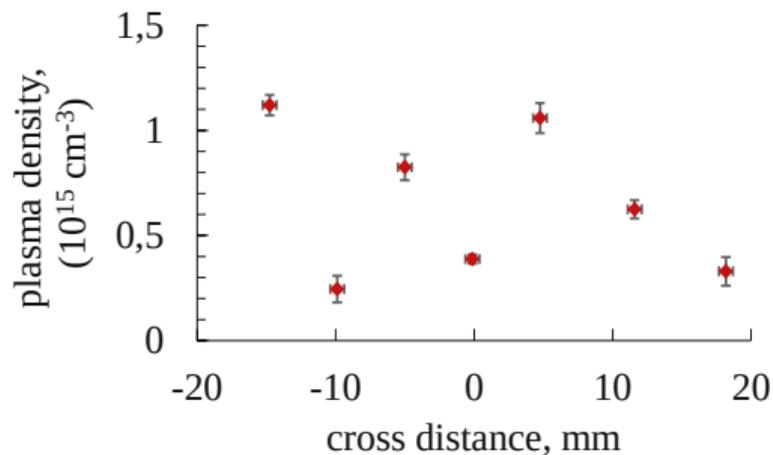


Эффективная генерация излучения из толстой
пучково-плазменной системы при наличии косо́й
модуляции плотности плазмы

Глинский В. В.
(Научный руководитель: Тимофеев И. В.)

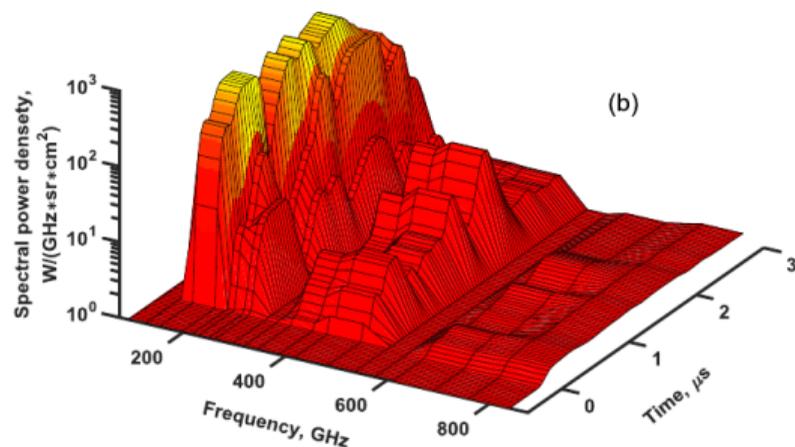
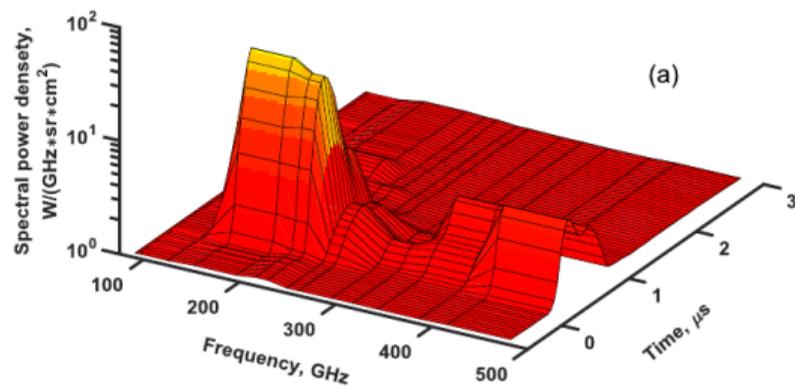
26 апреля 2022 г.

Введение (установка ГОЛ-ПЭТ)



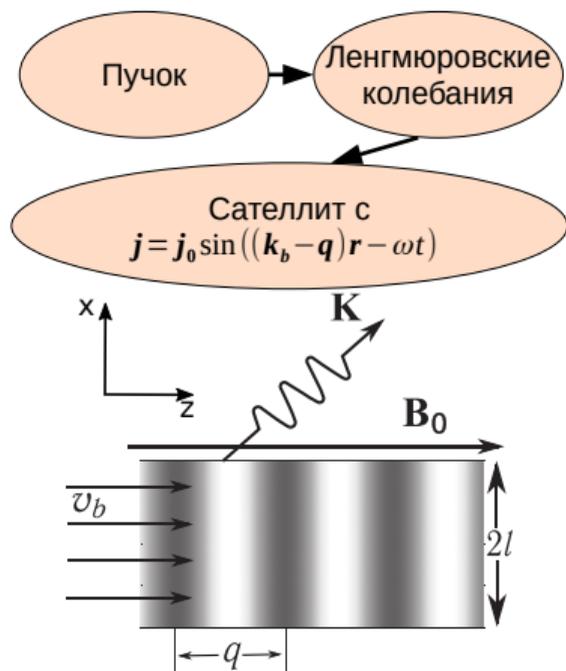
*A.V. Arzhannikov et al. Plasma Phys. Control.
Fusion, 2020, PPCF-102698*

Мощность излучения из плазмы с периодической поперечной неоднородностью увеличивается на порядок и достигает 10 МВт



Механизм плазменной антенны

Рассматривается тонкая замагниченная плазма с чисто продольной модуляцией $n = n_0 + \Delta n \cdot \cos(\mathbf{q} \cdot \mathbf{r})$ при наличии электронного пучка.

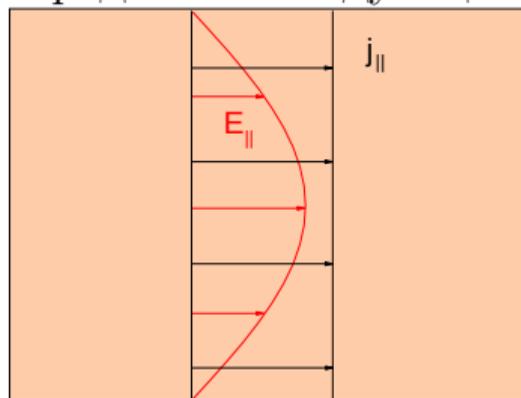


Поле волны плазмы $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)$

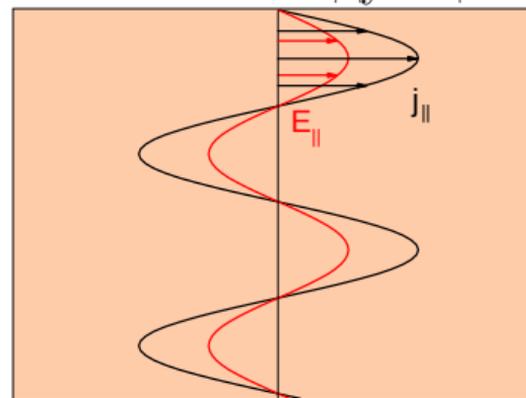
Работа \mathbf{j} над \mathbf{E} в ед. объема

$$\mathbf{j}\mathbf{E} = \mathbf{j}_0\mathbf{E}_0 (\sin((\mathbf{k}_b - \mathbf{q} + \mathbf{k})\mathbf{r} - 2\omega t) + \sin((\mathbf{k}_b - \mathbf{q} - \mathbf{k})\mathbf{r}))$$

Продольная модуляция



Наклонная модуляция



Механизм плазменной антенны

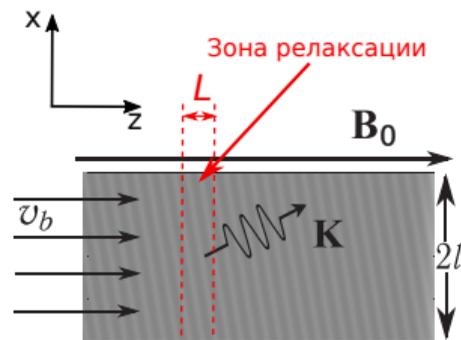
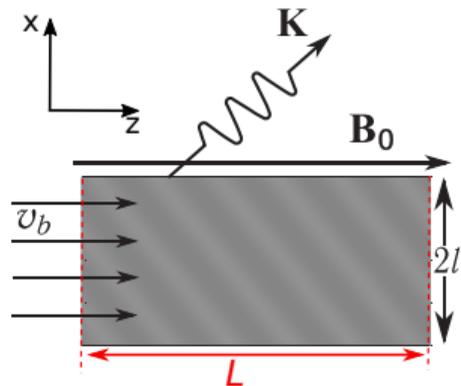
Будут исследованы 2 предельных случая:

1. тонкая плазма ($2l \ll L$)
2. толстая плазма ($2l \gg L$)

Рассматривается холодная плазма с плотностью $n = n_0 + \Delta n \cdot \cos(\mathbf{q} \cdot \mathbf{r})$, помещенная в магнитное поле B_0 , в которую инжектируется холодный пучок со скоростью v_b и плотностью n_b .

Для удобства используются безразмерные величины: расстояния и время измеряются в единицах c/ω_p и ω_p^{-1} , волновые числа и частоты в ω_p/c и ω_p , плотности тока в en_0c , а электрические и магнитные поля в $m_e c \omega_p / e$.

Механизм плазменной антенны



$$E_z = \frac{E_0}{2} e^{ik_b z - i\omega t} + c.c. \rightarrow j_{sattl z} = \mathcal{J} e^{i\mathcal{K}_{\parallel} z - i\omega t - iq_{\perp} x} + c.c.,$$

$$\mathcal{K}_{\parallel} = k_b - q_{\parallel}, \mathcal{J} = i \frac{\delta n E_0}{4\omega}.$$

$$rot \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j}_{plasma} + \mathbf{j}_{sattl}) + \frac{1}{c} \frac{d\mathbf{E}}{dt}, \quad rot \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{B}}{dt}.$$

Ищем решение в виде:

$$\mathbf{E}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{E}(x) e^{i\mathcal{K}_{\parallel} z - i\omega t} + c.c.$$

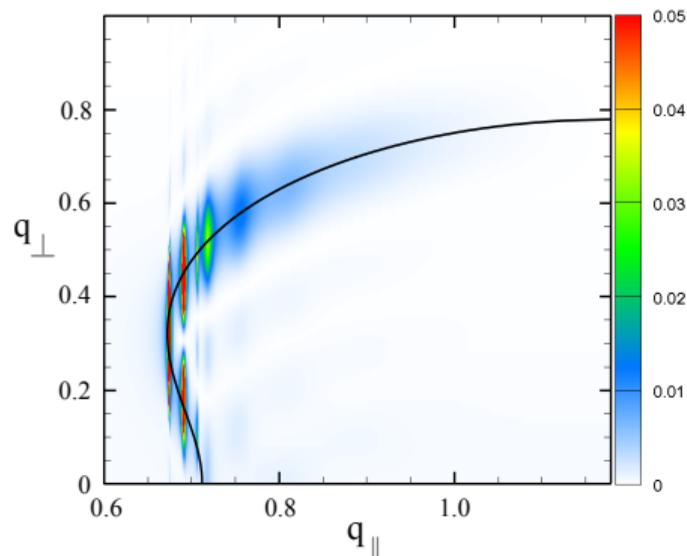
Ищем решение в виде:

$$\mathbf{E}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{E}(z) e^{-iq_{\perp} x - i\omega t} + c.c.$$

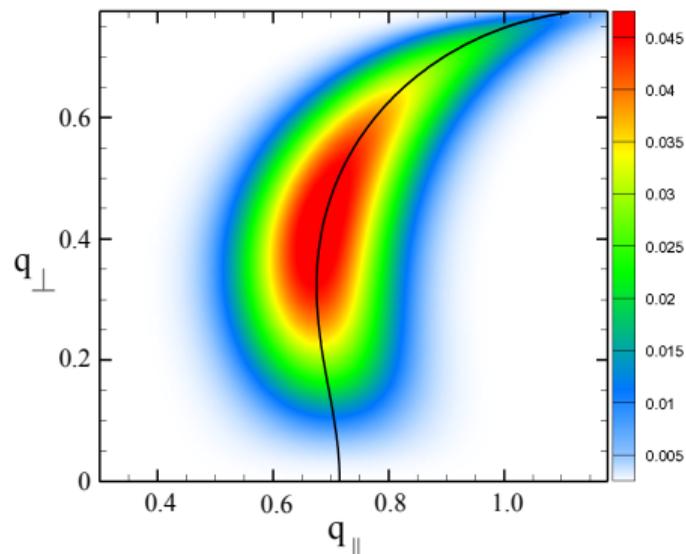
Эффективность выходящего излучения

Для параметров $n_b = 0.01$, $v_b = 0.9$, $\Omega = 0.4$, $k_b = 1.18$ получаются следующие зависимости эффективности излучения \mathcal{P} от q_{\perp} , q_{\parallel} :

Тонкая плазма
 $2l=L=40$, $\delta n = 0.025$

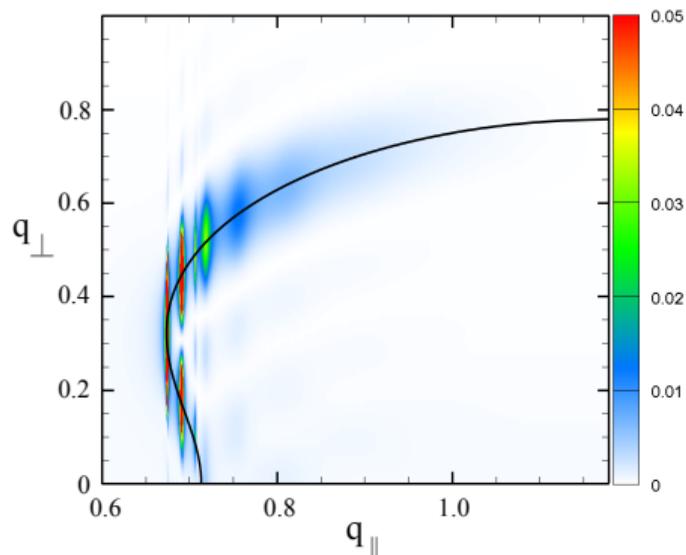


Толстая плазма
 $L=40$, $\delta n = 0.05$



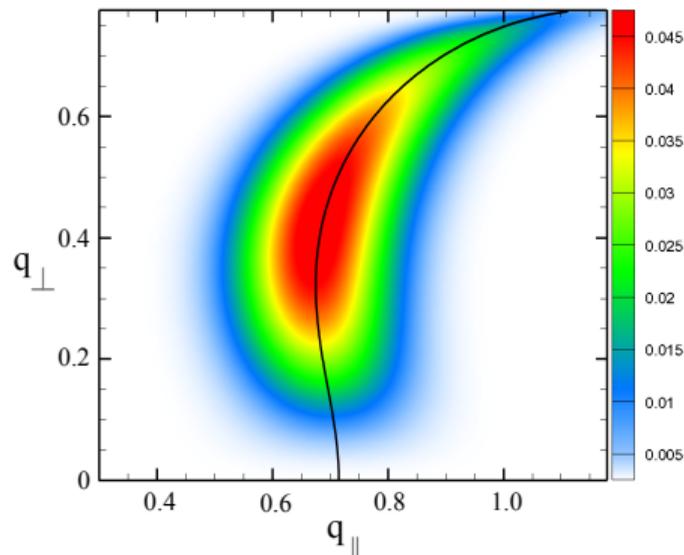
Эффективность выходящего излучения

Тонкая плазма



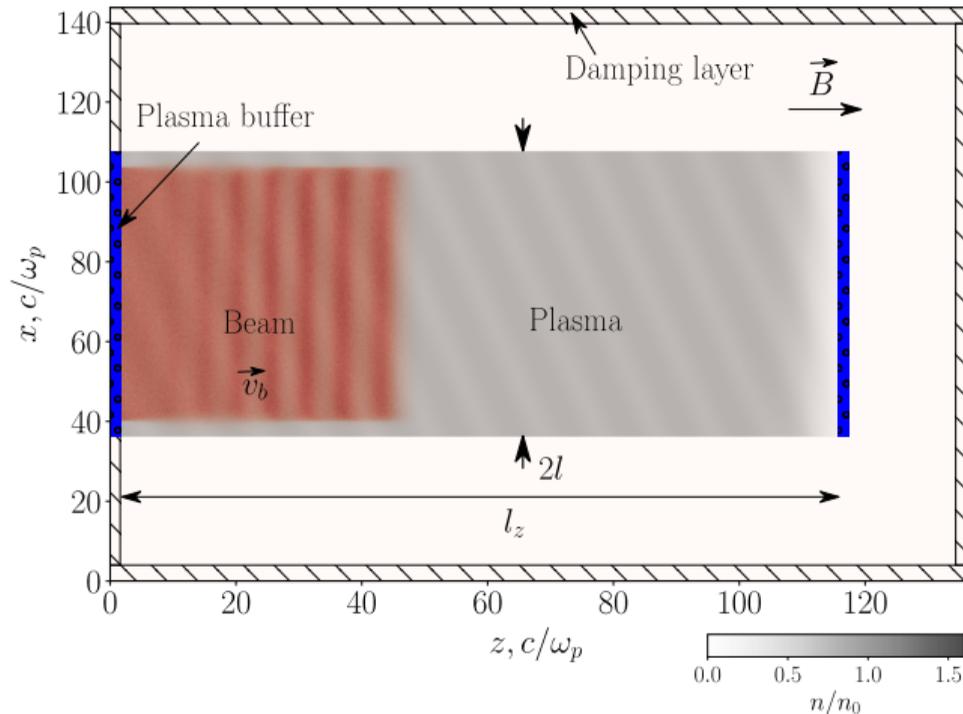
1. $\mathcal{P} \sim l$
2. Максимальные значения \mathcal{P} при резонансе

Толстая плазма



1. \mathcal{P} не зависит от l
2. Максимальные значения \mathcal{P} при резонансе

РІС. Расчетная область



Плотность плазмы на
однородном участке:

$$n_{\text{ripple}}(x, z) = 1 + \delta n \cos(q_{\parallel} z + q_{\perp} x).$$

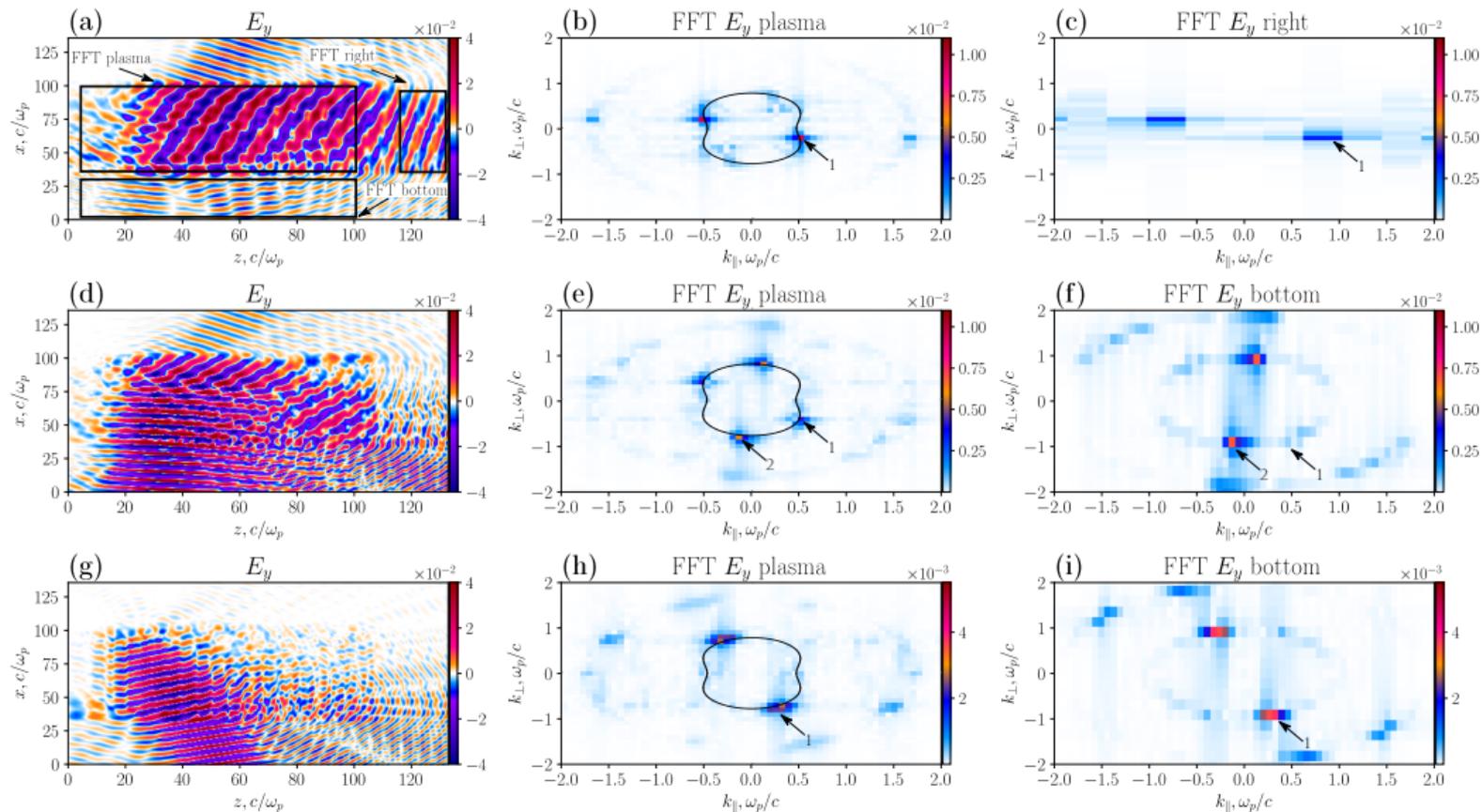
Плотность плазмы на правом
крае:

$$n(x, z) = n_{\text{ripple}}(x, z) \frac{k(l_z + d - z) + a}{(b^4 + (l_z + d - z)^4)^{1/4}}.$$

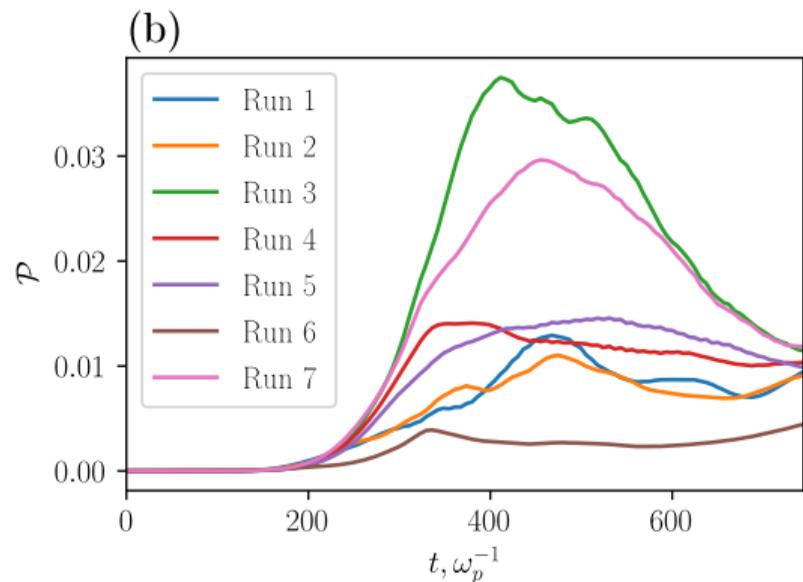
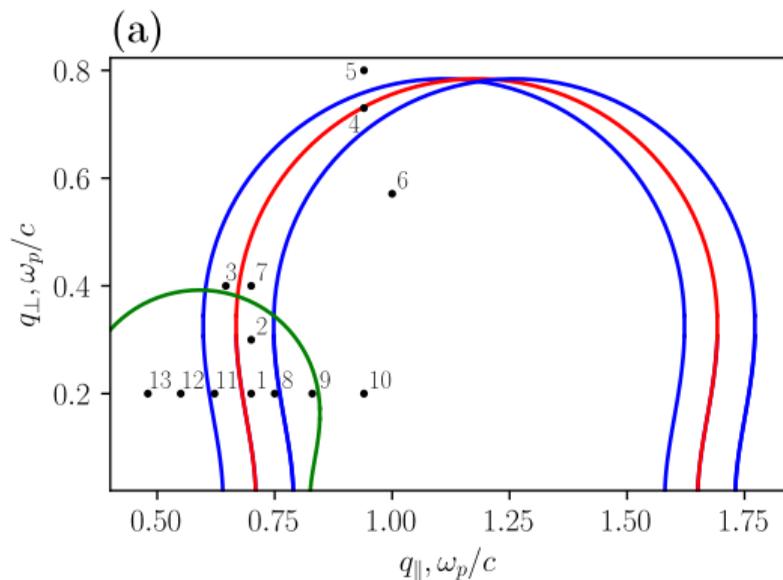
Параметры моделирований

- ▶ В начальный момент времени электроны и ионы плазмы расположены в одних и тех же точках на узлах квадратной сетки, а электронов пучка нет
- ▶ Шаг сетки по x и по y равен $0.04 c/\omega_p$, а шаг по времени равен $0.02 \omega_p^{-1}$
- ▶ Порядка $35 \cdot 10^7$ частиц
- ▶ Изначально ионы холодные, а электроны имеют $f_e \sim \exp(-p^2/(2\Delta p_e^2))$, $T_e = \Delta p_e^2/(2m_e) = 80$ эВ
- ▶ Инжектируемый слева пучок имеет $v_b/c = 0.9$, $T_b = 64$ кэВ и $n_b/n_0 = 0.01$
- ▶ Внешнее однородное \mathbf{B} направлено по z и характеризуется $\Omega = eB_z/(m_e c \omega_p) = 0.4$

Моды в плазме



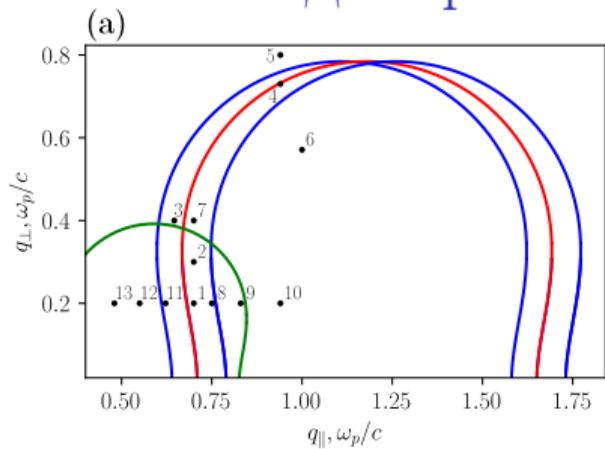
Эффективные режимы генерации ω_p излучения



(a) - Положение резонансов в q - пространстве

(b) - Зависимость эффективности выходящего излучения \mathcal{P} от времени

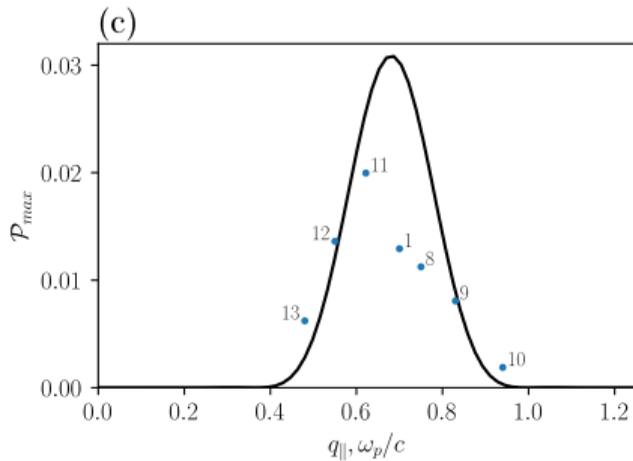
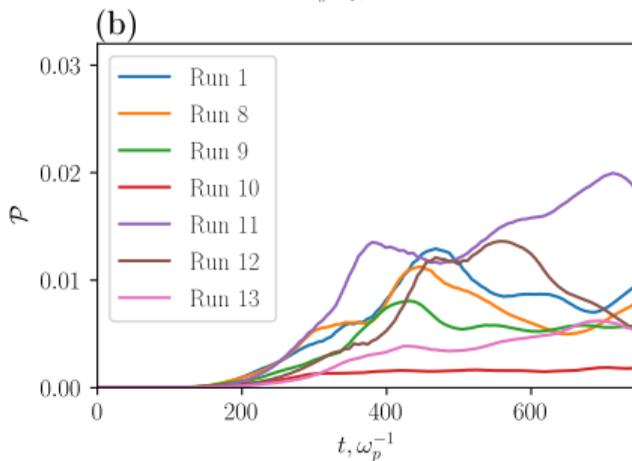
Сопоставление моделирования и теории



(a) - Положение резонансов в q - пространстве

(b) - Зависимость эффективности выходящего излучения \mathcal{P} от времени

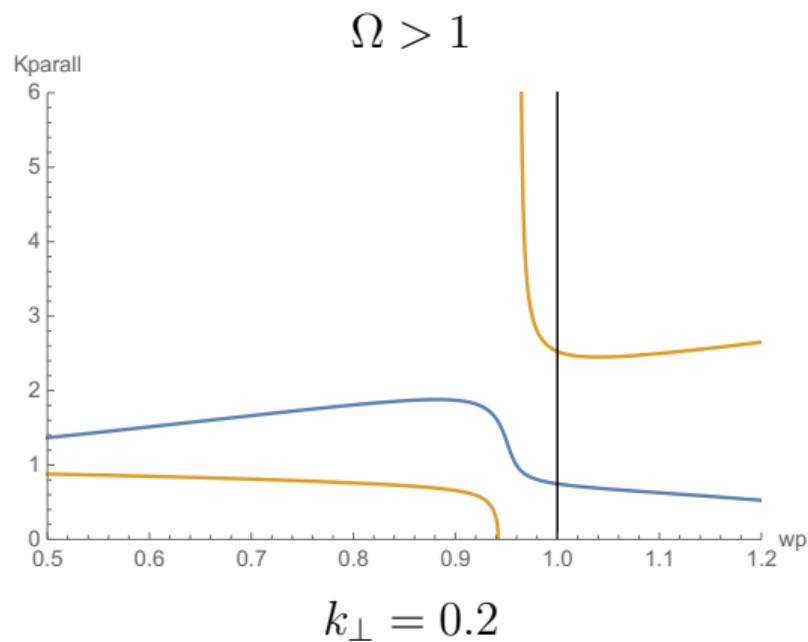
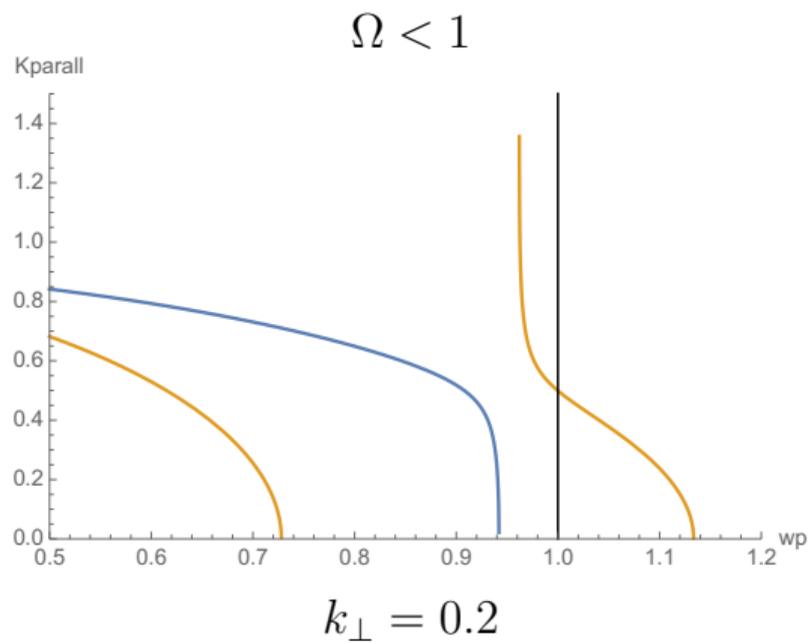
(c) - Сопоставление эффективности излучения с теорией



Выводы

1. Ранее развитая теория плазменной антенны обобщена на случай произвольного угла вектора модуляции плотности плазмы по отношению к магнитному полю.
2. Показано, что в условиях резонанса между длинноволновым сателлитом раскачиваемой пучком волны и собственными модами замагниченной плазмы максимальная эффективность ω_p -излучения достигается в плазме, поперечный размер которой оказывается больше длины релаксации пучка ($2l \gg L$).
3. PIC расчёты показали, что уже в режиме $2l \sim L$ мощность выходящего из плазмы излучения составляет 1% – 3% мощности инжектируемого пучка.
4. Результаты приняты к публикации: Glinskiy V. V., Timofeev I. V., Annenkov V. V. 2022 Efficient generation of ω_p -radiation in a beam-driven thick plasma with oblique density modulation. *Journal of Plasma Physics*

Выход собственных мод



Моделирование с экспериментальным градиентом плотности

