



## XXIX всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2025»



(13-17 октября 2025 года, Москва, ИЗМИРАН)

Филатов Л.В. , Мельников В.Ф.

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург*

### О РОЛИ ВИСТЛЕРОВСКИХ ВОЛН В РАСПРЕДЕЛЕНИИ И ИЗЛУЧЕНИИ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛЕ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

# Цели работы

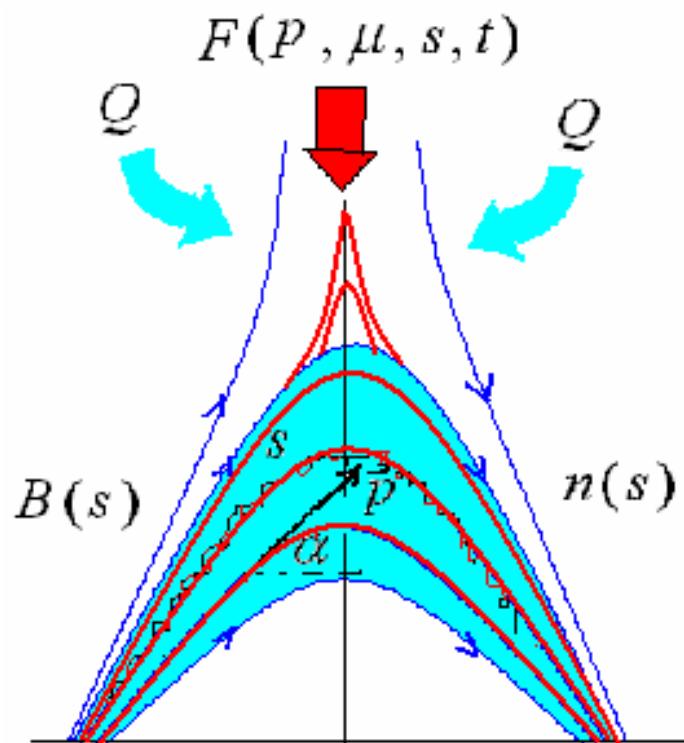
- Ускоренные тем или иным образом нетепловые электроны инжектируются в петлю при вспышке,держиваются в ней и генерируют ее микроволновое и рентгеновское излучение. Их распределение по энергиям, питч-углам, времени и положению в петле важно для диагностики этих излучений. Нас интересовало взаимодействие электронов с частицами и волнами в плазме петли.

Цели исследования были следующие:

- Определить возможность вистлеровской турбулентности по доускорению и рассеянию электронов в петле
- Исследовать влияние параметров турбулентности вистлеров при взаимодействии с электронами.
- Выявить возможность генерации вистлеров самими нетепловыми электронами при согласованном нестационарном взаимодействии.
- Оценить возможности внешнего источника турбулентности вистлеров
- Найти критерии диагностики плазмы петли по наблюдаемым излучениям с высоким пространственно-временным разрешением

# Кинетическая модель одномерной неоднородной нестационарной вспышечной петли

$$\vec{p} = (p_{\parallel} = p \cdot \mu; \quad p_{\perp} = p\sqrt{1 - \mu^2}); \quad \mu = \cos \alpha$$



$p, \mu, s, t$

-Дрейфовые координаты нетепловых электронов

$B(s), n(s)$

-Магнитное поле и плотность плазмы петли

$Q, F(p, \mu, s, t)$

-Инжекция электронов и волн

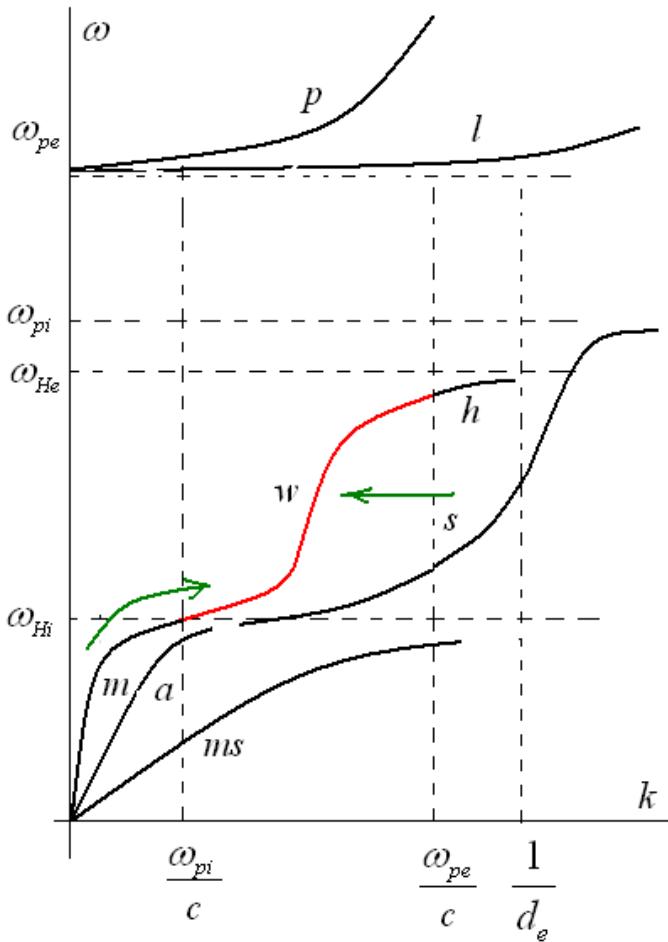
$f(p, \mu, s, t)$

-Плотности распределения электронов и энергии волн

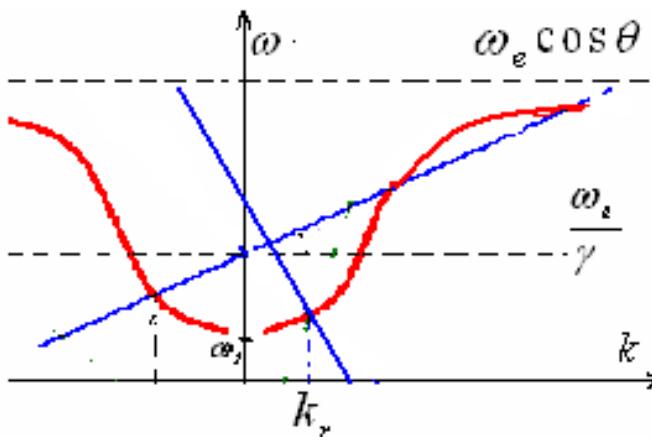
$W(k, s, t)$

# Вистлеры и резонансные электроны в петле

$$\omega_i < \omega < \omega_e < \omega_p$$



$$\left(\frac{ck}{\omega}\right)^2 = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega_e |\cos \theta| - \omega)}$$



$$\theta = \square \bar{B}, \bar{k} < 19.5^\circ$$

$$V_{II} \cdot (\omega/k) < 0$$

$$n_g = 1; \quad \theta = 0$$

$$\omega - V_{II} k \cos \theta = n_g \frac{\omega_e}{\gamma}$$

$$w(p, k) = \frac{\pi e^2}{4\hbar} \frac{\omega_e}{\omega_p^2} \frac{V \sin^2(\alpha)}{|\cos(\alpha)|} \frac{(1 + n_g |\cos \theta|)^2}{\cos^2 \theta} \delta(k - k_r)$$

- Вероятность взаимодействия волна-частица

# Кинетическое уравнение в переменных импульс питч-угол

$$p_1 = p_{\square} = p\mu, \quad p_2 = p_{\perp} = p\sqrt{1-\mu^2}, \quad \Rightarrow \quad \mu = \cos \alpha, \quad p = m_e c \sqrt{\gamma^2 - 1}, \\ \beta = V/c, \quad \gamma^{-2} = (1 - \beta^2), \quad E = \gamma - 1,$$

Уравнения квазилинейной теории для электронов (Фоккера-Планка)

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(\dot{s}f) + \frac{\partial}{\partial \mu}(\dot{\mu}f) + \frac{\partial}{\partial p}(\dot{p}f) = \\ \frac{\partial}{\partial \mu} \left[ D_{\mu\mu} \frac{\partial f}{\partial \mu} + D_{\mu p} \frac{\partial f}{\partial p} \right] + \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} p^2 \left[ D_{p\mu} \frac{\partial f}{\partial \mu} + D_{pp} \frac{\partial f}{\partial p} \right] + F(p, \mu, s, t);$$

Коэффициенты переноса электронов

$$\dot{s} = c\beta\mu; \quad \dot{\mu} = -c\beta \frac{1-\mu^2}{2} \frac{B_s}{B}; \quad \dot{p} = \frac{m_e c^2}{\lambda_0} \frac{1}{\beta^2} \quad \lambda_0 = \frac{1}{4\pi r_e^2 n(s) \ln \Lambda}$$

$f(p, \mu, s, t)$ :

Начальные и граничные условия для

$$f(0) = 0, \quad f_G = 0, \quad \partial f_G = 0$$

Коэффициенты диффузии электронов на вистлерах (D.Melrose)

$$\begin{pmatrix} D_{\mu\mu} \\ D_{\mu p} = D_{p\mu} \\ D_{pp} \end{pmatrix} = \sum_r \frac{\pi \omega_e}{2\gamma B^2} (1 - \mu_r^2) (1 + n_g |\cos \theta|)^2 \cdot k_r W(k_r) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma mc / N_r \cos \theta \\ (\gamma mc / N_r \cos \theta)^2 \end{pmatrix}$$

$$\mu_r = \frac{\omega_r - \omega_e / \gamma}{k_r \cdot c \beta} \quad v_g = \frac{\partial \omega}{\partial s} \quad N_r = \frac{c k_r}{\omega_r}$$

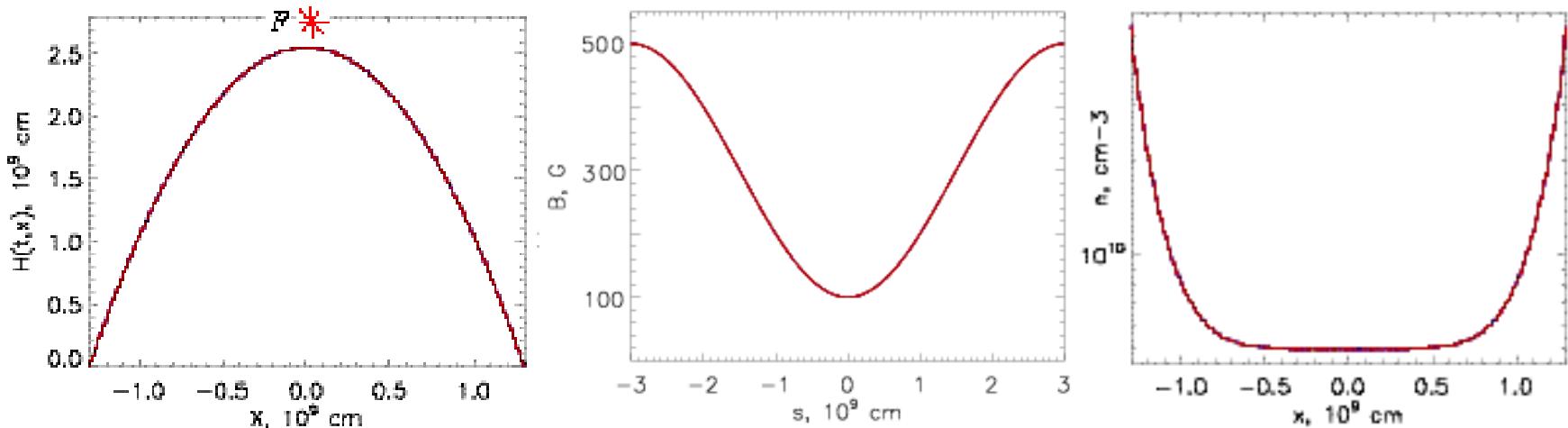
Уравнение переноса энергии вистлеров при взаимодействии с электронами

$$\boxed{\frac{\partial W}{\partial t} + v_g \frac{\partial W}{\partial s} = 2\gamma W + Q(\omega, s, t)}$$

и Коэффициент нарастания волн (Инкремент)

$$\eta(k, s, t) = \frac{4\pi^2 e^2 \cdot v_g}{kc} \int (1 - \mu_r^2) \gamma^2 \beta^2 \left\{ \frac{1}{\beta \gamma^2} \frac{\partial f}{\partial \mu} + \frac{\gamma \beta}{N_r} \frac{\partial}{\partial E} \left( \frac{f}{\beta \gamma^2} \right) \right\}_{\mu=\mu_r} dE$$

# МОДЕЛИ ГЕОМЕТРИИ ПЕТЛИ , МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ



$$h(x) = h_0 \left( 1 - \frac{x^2}{x_0^2} \right)$$

$$B(s) = B_0 + (B_1 - B_0) \cdot \left( \frac{s}{l} \right)^2$$

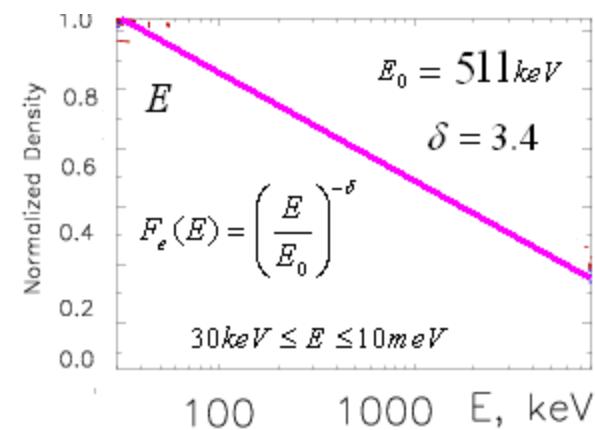
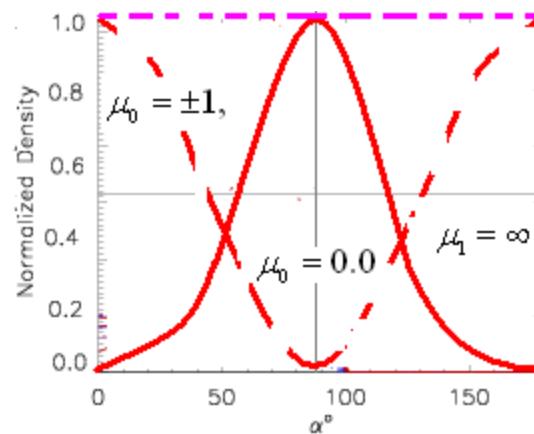
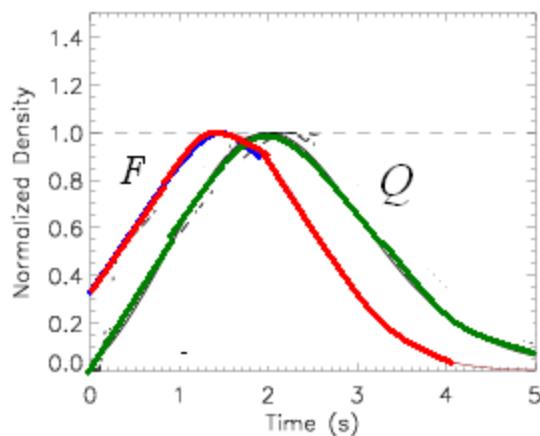
$$n(s) = n_0 + (n_1 - n_0) \cdot \left( \frac{s}{l} \right)^4$$

$$-l \leq s \leq l, \quad l = 3 \cdot 10^9 \text{ sm}$$

$$B_1 / B_0 = 5$$

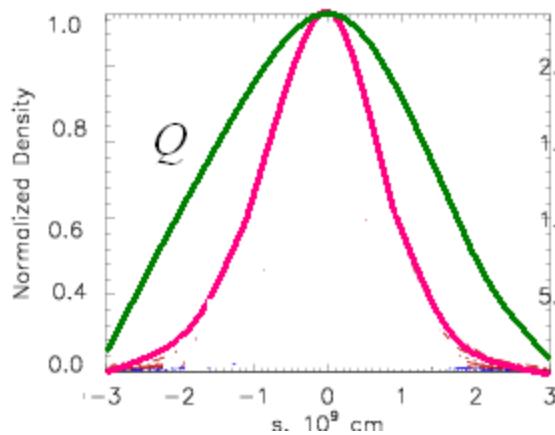
$$n_1 / n_0 = 1000$$

# МОДЕЛИ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ИСТОЧНИКА ВОЛН

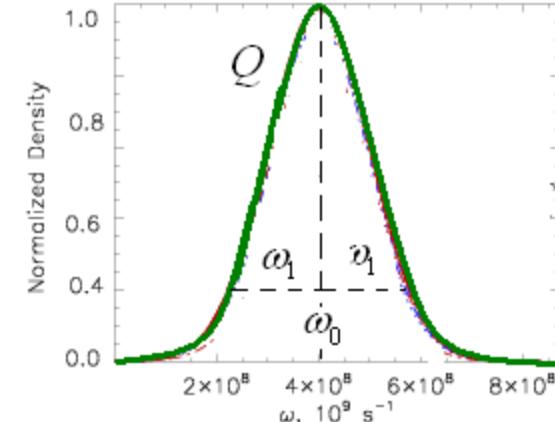


$$F(t, s, \mu, E) = F_0 \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\delta} e^{-\left(\frac{s-s_0}{s_1}\right)^2 - \left(\frac{\mu-\mu_0}{\mu_1}\right)^2 - \left(\frac{t-t_0}{t_1}\right)^2}$$

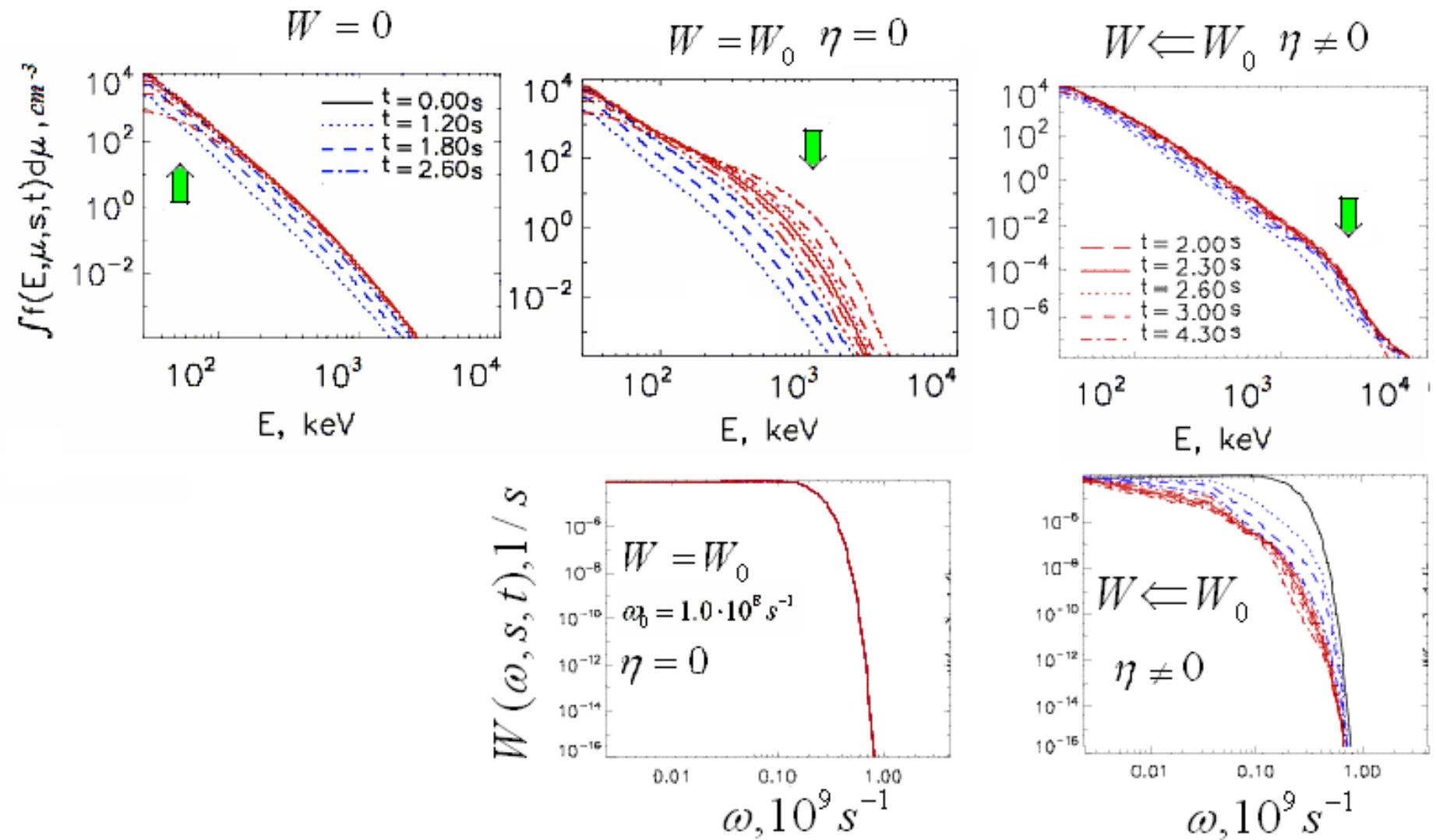
$$Q(t, s, \omega) = Q_0 e^{-\left(\frac{\omega-\omega_0}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{s-s_0}{s_1}\right)^2 - \left(\frac{t-t_0}{t_1}\right)^2}$$



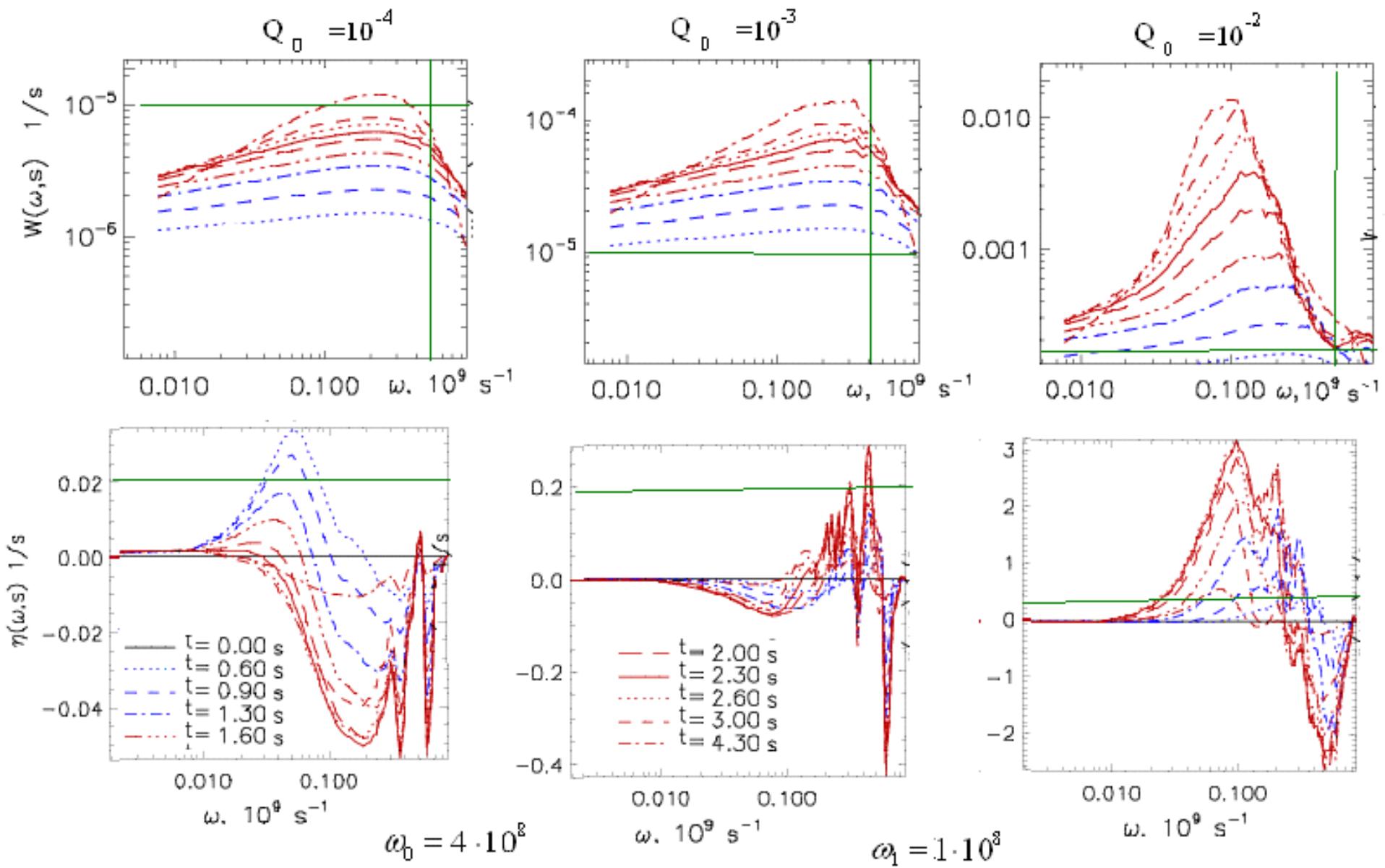
$$Q_0 = \begin{pmatrix} 10^{-4} \\ 10^{-3} \\ 10^{-2} \end{pmatrix} \text{ erg cm}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$$



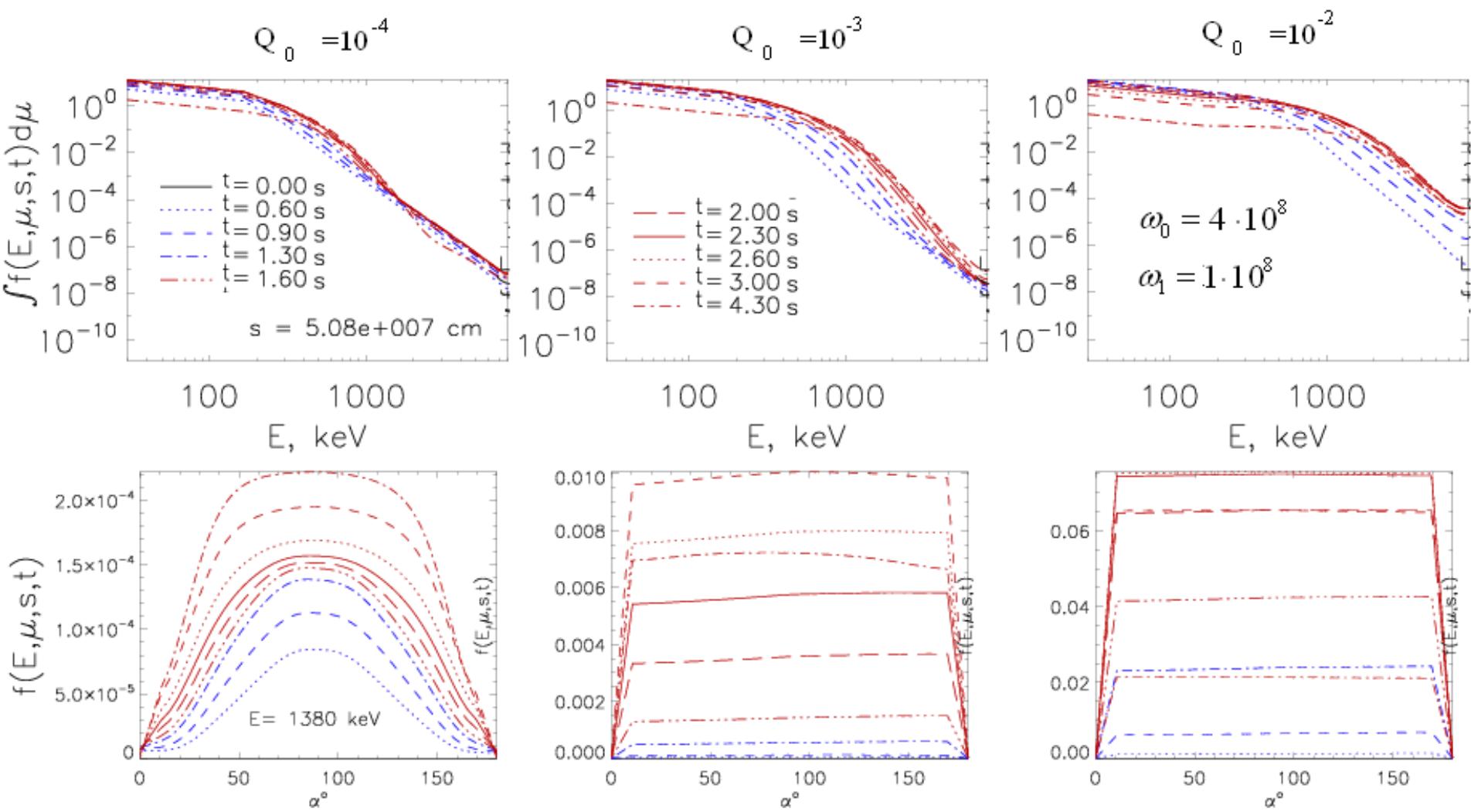
# Энергетические спектры электронов в вершине петли при различных режимах взаимодействия с турбулентностью



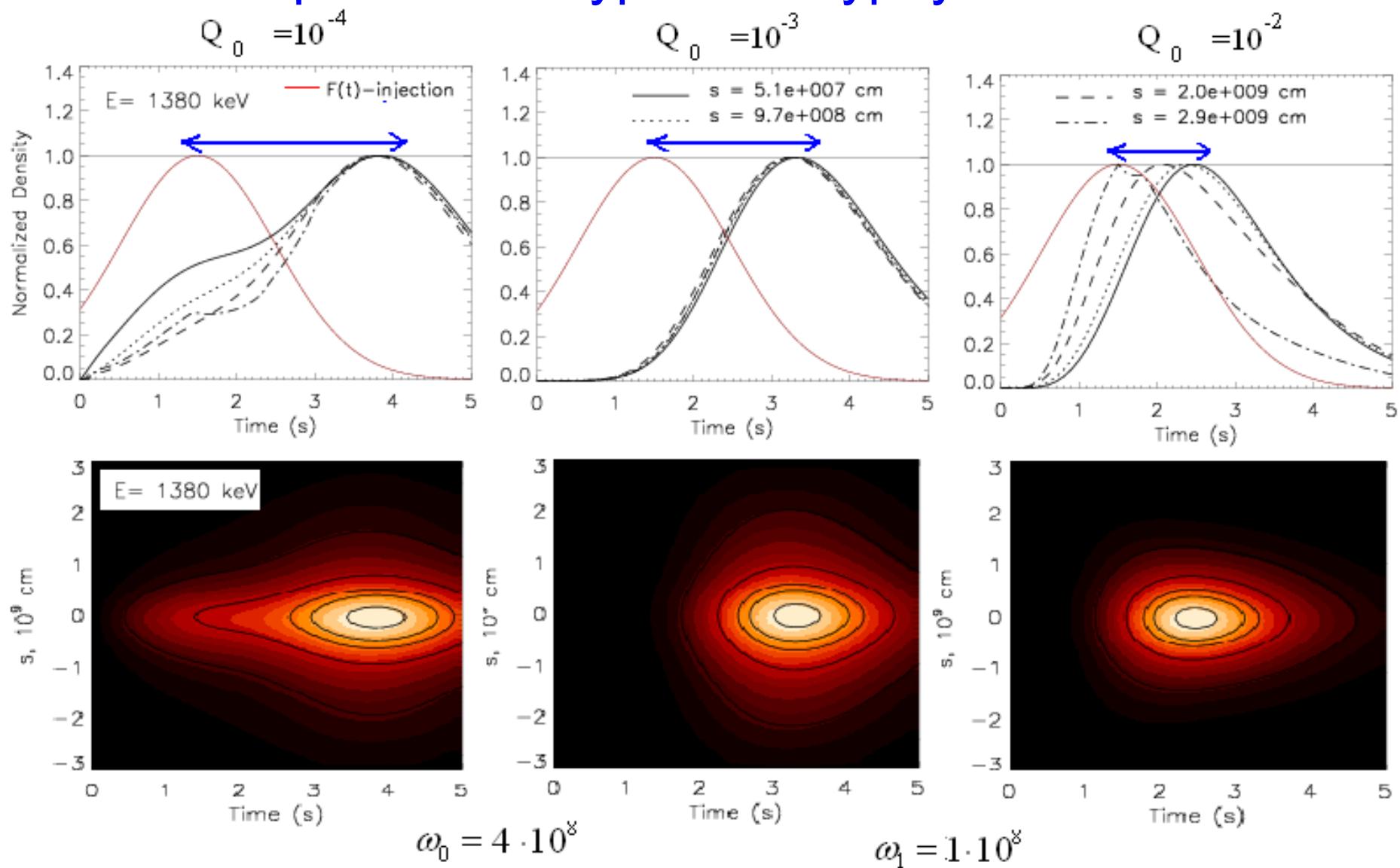
# СПЕКТРЫ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ИНКРИМЕНТА ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН



# Энергетические и питч-угловые спектры нетепловых электронов в вершине петли при различных уровнях турбулентности



# Временные задержки и пространственно-временна яркость нетепловых электронов при различных уровнях турбулентности



# ВЫВОДЫ

- Проведён численный анализ влияния источника турбулентности вистлеров во вспышечной петле на эффективность ускорения и рассеяния нетепловых электронов.
- Установлено, что при заданной стационарной вистлеровской турбулентности, начиная с определенной ее интенсивности, инжектированные электроны эффективно доускоряются. Установлено также наличие тесной связи между рассеянием (изотропизацией) и ускорением электронов в турбулентности вистлеров.
- При нестационарной турбулентности без внешнего источника в режиме согласованного взаимодействия, начально-заданная турбулентность затухает без заметного доускорения электронов.
- Однако, если имеется источник турбулизации с определенными параметрами мощности, частотного спектра генерируемых волн и пространственно-временных размеров, то доускорение инжектированных электронов в процессе вспышки происходит, при этом их энергетический спектр уплощается.
- Источник турбулизации может быть как внешний при вспышечном энерговыделении, так и внутренний при взаимодействии вистлеров с частицами и другими волнами в петле. Необходимо детальное исследование как возможных моделей источников, так и вспышечных событий в рентгеновском и мк-волновом диапазоне, соответствующих особенностям доускорения и рассеяния на турбулентности вистлеров.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ