

УСКОРЕНИЕ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СОГЛАСОВАННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ ВИСТЛЕРОВ ВО ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛЕ

Филатов Л.В.¹, Мельников В.Ф.²

¹*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

ACCELERATION OF NON-THERMAL ELECTRONS IN A COORDINATED INTERACTION WITH THE TURBULENCE OF WHISTLERS IN A FLASH LOOP

Filatov L.V.¹, Melnikov V.F.²

¹*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia*

²*Pulkovo Observatory of RAS, St.-Petersburg, Russia*

The paper considers the coordinated problem of the interaction of Whistler waves and non-thermal electrons, which allows us to consider not only the processes of scattering and acceleration of electrons, but also the generation of Whistler turbulence itself or its attenuation. Stochastic acceleration of injected non-thermal electrons is taken into account by introducing the corresponding diffusion terms into the unsteady kinetic Fokker-Planck equation. Within the framework of a magnetic trap model with a given electron injection and initial turbulence, the dynamics of turbulence waves and the distribution of electrons in the loop in terms of energy, pitch angle, position in the loop during the flare process during the growth and decline phases are investigated.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-279-282

Микроволновое излучение вспышечной петли определяется наличием в ней ускоренных (нетепловых) электронов. Для исследования распределений этих электронов по энергиям и питч-углам в каждой точке петли необходимо рассмотреть взаимодействие электронов с частицами плазмы петли и волновыми полями в ней [1, 2]. В работах [3, 4] мы рассмотрели, как отразится на распределении инжектированных нетепловых электронов их рассеяние и ускорение путем обмена импульсами и энергией между электронами и волнами вистлеровской турбулентности, заполняющей вспышечную петлю. В этих работах предполагалось, что турбулентность была заданной и неизменной в процессе вспышки. Однако турбулентность может генерироваться или затухать при взаимодействии с нетепловыми электронами [5, 6].

Целью настоящей работы является рассмотрение модели доускорения нетепловых электронов при согласованном взаимодействии с вистлерами, распространяющимися вдоль вспышечной петли. Мы проводим оценку величины такого доускорения и влияние генерации и затухания турбулентности на питч-угловое, энергетическое и пространственное распределения электронов и волн турбулентности.

Описание модели

Рассматривается одномерная нестационарная модель вспышечной петли в виде симметричной магнитной трубки с заданными неоднородными по длине магнитным полем $B(s)$ и плотностью $n(s)$ фоновой плазмы. В вершине такой петли-ловушки происходит нестационарная инжекция быстрых нетепловых электронов, задаваемая функцией $F(E, \mu, s, t)$ со степенным спектром по энергии E (в долях $m_e c^2$) и гауссовым спектром по остальным независимым координатам: расстоянию s до вершины петли, косинусу питч-угла электрона $\mu = \cos \alpha$ и времени t .

Согласованная динамика нетепловых электронов в диффузионном адиабатическом приближении описывается кинетическим уравнением Фоккера-Планка для функции распределения $f(E, \mu, s, t)$ [7]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(c\beta\mu f) - \frac{\partial}{\partial \mu}\left(c\beta\frac{1-\mu^2}{2}\frac{1}{B}\frac{dB}{ds}f\right) = \frac{\partial}{\partial \mu}\left(D_{\mu\mu}^W \frac{\partial f}{\partial \mu}\right) + \frac{1}{\beta\gamma^2}\frac{\partial}{\partial E}\left(D_{EE}^W \frac{\partial f}{\partial E}\right) + F,$$

а плотность энергии волн турбулентности $W(k, s, t)$ уравнением [2]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + v_g \frac{\partial W}{\partial s} = 2\eta W.$$

Здесь β – скорость электрона (доля от скорости света c), $\gamma = E + 1$ – фактор Лоренца, $D_{\mu\mu}^W, D_{EE}^W$ – коэффициенты диффузии электронов по питч-углам и энергии, обусловленные взаимодействием с турбулентностью вистлеров, $\eta(k, s, t)$ – инкремент нарастания плотности энергии волн, v_g – групповая скорость при распространении вистлеров вдоль петли. Частота вистлеров ω и их волновое число k связаны дисперсионным соотношением [8]:

$$\left(\frac{ck}{\omega}\right)^2 = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega_e - \omega)}, \quad \omega_i < \omega < \omega_e < \omega_p,$$

где $\omega_p(s), \omega_e(s)$ – плазменная и гирочастота электронов в каждой точке.

Причиной начального наполнения петли вистлерами может быть, например, процесс конверсии БМЗ и ионно-звуковых волн, образующихся в области вспышечного энерговыделения [2]. Мы полагаем, что плотность энергии этого начального пакета вистлеров соответствует спектру Колмогорова $W(k, s) \sim k^{-5/3}$. Считая турбулентность слабой, такой, что энергия турбулентных пульсаций много меньше тепловой энергии плазмы и магнитной энергии [2], будем использовать для описания взаимодействия электронов с вистлерами квазилинейное приближение [9]. Согласно ему, взаимодействие происходит на резонансных волнах, с которыми у электрона происходит энергообмен и рассеяние. Условие такого резонанса с учетом доплеровского сдвига частоты [7, 8]:

$$\omega - \mu c \beta k = \omega_e / \gamma.$$

Рассматривая это уравнение совместно с дисперсионным уравнением, для электронов определяются резонансные волны (k_r, ω_r). При этом вычисляются коэффициенты диффузии электронов и инкремент турбулентности вистлеров [7, 8]:

$$D_{\mu\mu}^W = \frac{\pi\omega_e}{2B^2}(1-\mu^2)\sum_r k_r W(k_r), \quad D_{EE}^W = \frac{\pi\omega_e}{2B^2}(1-\mu^2)\gamma^2\beta^3\sum_r k_r W(k_r)\left(\frac{\gamma}{N_r}\right)^2.$$

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

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

Результаты моделирования и выводы

При проведении численных расчётов, как и в работах [3, 4], была выбрана параболическая геометрия петли длиной $2l$ и магнитного поля с пробочным отношением $B_{\max}(l)/B_{\min}(0)=5$. Неоднородность концентрации фоновой плазмы принята равной $n_{\max}(l)/n_{\min}(0)=10^3$. Параметры задаваемых изотропной инжекции и заполнения петли турбулентностью следующие:

$$F(E, \mu, s, t) = F_0 \cdot \left(\frac{E}{E_{\min}} \right)^{-\delta} \exp \left(- \left(\frac{s-s_0}{s_1} \right)^2 - \left(\frac{t-t_0}{t_1} \right)^2 \right), \quad \delta = 3.6, \quad E_{\min} = 511 \text{ эВ}, \quad s_0 = 0, \quad s_1 = 3 \cdot 10^8 \text{ см}$$

$$W(k, s, t = 0) = \frac{q-1}{k_{\min}} \left(\frac{k}{k_{\min}} \right)^{-q} \cdot R \frac{B^2}{8\pi}, \quad k_{\min} = \frac{\omega_{pi}}{c}, \quad q = 1.7, \quad R = 10^{-12}; 10^{-7}.$$

Инжекция во времени задавалась гауссовым импульсом с параметрами $t_0 = 1.5c$, $t_1 = 1.5c$. Константа F_0 определяет интенсивность внешней инжекции нетепловых электронов. Расчёты проводились для малой мощности инжекции $F_0 = 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$, в отличие от работ [4, 6], в которых при самосогласованном решении принимались значения $F_0 = 10^5, 3 \times 10^5 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$. Это связано с нерешённой пока проблемой неустойчивости численного счета при больших значениях F_0 . Малый безразмерный параметр R показывает уровень энергии начальной турбулентности вистлеров по отношению к энергии магнитного поля в каждой точке петли. На рис. 1, 2 верхние панели соответствуют низкому уровню начальной турбулентности ($R = 10^{-12}$), а нижние панели высокому ($R = 10^{-7}$).

Рис. 1 (левая панель), иллюстрирует изменение уровня турбулентности вистлеров в центре петли. Справа показано изменение инкремента вистлеровских волн. При низкой начальной турбулентности, инкремент положителен $\eta > 0$ на низких частотах, что ведёт к некоторому росту уровня турбулентности в ограниченном диапазоне частот вистлеров (панель слева). При

высоком уровне турбулентности, инкремент отрицателен на всех частотах, что приводит к заметному уменьшению уровня турбулентности.

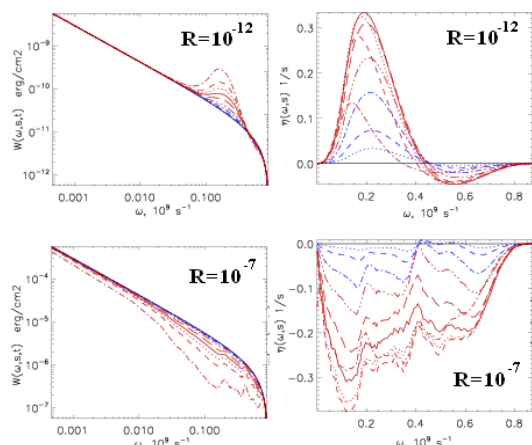


Рис. 1.

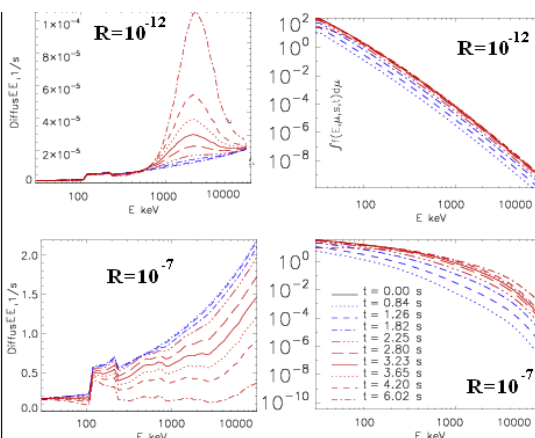


Рис. 2.

На рис. 2 показаны соответствующие изменения во времени спектра коэффициента диффузии по энергии (слева) и энергетического спектра электронов (справа). При слабой начальной турбулентности, $R = 10^{-12}$, диффузия электронов по энергии оказывается слишком слабой ($D_{EE} < 10^{-5} \text{ c}^{-1}$), несмотря на десятикратный рост коэффициента диффузии во время развития неустойчивости. Очевидно, что этого явно недостаточно, чтобы привести к заметному изменению спектра электронов. Напротив, при высоком уровне начальной турбулентности, $R = 10^{-7}$, несмотря на монотонное уменьшение коэффициента диффузии, энергетический спектр электронов существенно уплощается, свидетельствуя о значительном ускорении электронов в области высоких энергий ($E = 100 \text{ кэВ} - 10 \text{ МэВ}$). Однако происходит это благодаря большим значениям коэффициента диффузии ($D_{EE} \sim 1 \text{ c}^{-1}$), обусловленным высоким начальным уровнем турбулентности, а не её самосогласованной генерацией в результате развития неустойчивости.

Полученные результаты указывают на необходимость исследования генерации вистлеров при существенно более высоком уровне мощности инжекции нетепловых электронов в петлю.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-12-00308 (ВФМ), и РФФИ_Чехия, грант № 20-52-26006 (ЛВФ).

Литература

1. Степанов А.В., Зайцев В.В. Магнитосферы солнца и звезд. – Наука, М., 2018, -392с
2. Каплан С.А., Цытович В.Н. Плазменная астрофизика. – Наука, М., 1972, -440с
3. Filatov L.V., Melnikov V.F. // Ge&Ae, 2017, V.57, №8, P.1001-1008.
4. Filatov L.V., Melnikov V.F. // Ge&Ae, 2022, V.62, №8 (в печати).
5. Melnikov V.F., Filatov L.V. // Ge&Ae, 2020, V.60, №8, P.1126-1131.
6. Melnikov V.F., Filatov L.V. // Ge&Ae, 2021, V.61, №8, P. 1189–1196.
7. Melrose D.B. // Solar Physics, 1974, V.37, №4, P.353-365.
8. Hamilton R.J., Petrosian V. // Astrophys.J. 1992, V.398, №10, P.350-358.
9. Веденов А.А., Велихов Е.П., Сагдеев Р.З. // Ядерный синтез. Т.2. №2. С.465-475. 1962.