СТОХАСТИЧЕСКОЕ ДОУСКОРЕНИЕ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ ВИСТЛЕРОВ ВО ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЛЯХ

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*

STOCHASTIC ACCELERATION OF NON-THERMAL ELECTRONS THROUGH THEIR INTERACTION WITH WHISTLER TURBULENCE IN FLARE LOOPS

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 stochastic acceleration of injected non-thermal electrons in a inhomogeneous and unsteady flare loop when they interact with the turbulence of whistlers. Acceleration is taken into account by introducing the corresponding diffusion term into the studied kinetic Fokker-Planck equation. The effect of whistlers on the pitch-angle and energy distribution of electrons is considered within the framework of a model with given laws of electron injection and filling of the loop with turbulence. The conditions for a significant influence of the acceleration by whistlers are specified.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-281-284

Ускоренные (нетепловые) электроны во вспышечной петле ответственны за ее микроволновое и жесткое рентгеновское излучение. Характеристики этих излучений во многом определяются распределением нетепловых электронов по энергиям и питч-углам в каждой точке петли. Для исследования этих распределений необходимо рассмотреть взаимодействие электронов с частицами плазмы петли и волновыми полями в ней [1, 2]. В работах [3, 4] мы рассмотрели, как отразится на распределениях нетепловых электронов их рассеяние на вистлеровской турбулентности, заполняющей вспышечную петлю. Кроме рассеяния по питч углам, инжектированные электроны, уже ускоренные в токовом слое и в коллапсирующем каспе петли, в принципе, могут ускоряться в самой петле при взаимодействии с волновой турбулентностью. Такое стохастическое ускорение происходит при обмене импульсами и энергией между электронами и волнами со случайными фазами и носит резонансный характер.

Целью настоящей работы является рассмотрение модели доускорения нетепловых электронов при взаимодействии с вистлерами, распространяющимися вдоль вспышечной петли. Мы проводим оценку степени влияния

величины такого доускорения на питч-угловое, энергетическое и пространственное распределения электронов.

Описание модели

Рассматривается одномерная нестационарная модель вспышечной петли в виде симметричной магнитной трубки с заданным неоднородным по длине магнитным полем $B(s)$ и плотностью $n(s)$ заполняющей ее холодной фоновой плазмы. В вершине такой петли-ловушки производится 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 $\mu = \cos \alpha$, времени t . Динамика нетепловых электронов в диффузионном адиабатическом приближении описывается кинетическим уравнением Фоккера-Планка для функции распределения $f(E, \mu, s, t)$ [5]:

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

Здесь β – скорость электрона (доля от скорости света c), $\gamma = E + 1$ – фактор Лоренца, $D_{\mu\mu}^C, D_{\mu\mu}^W, D_{EE}^W$ – коэффициенты диффузии электронов по питч-углам и энергии, обусловленные взаимодействием с турбулентностью вистлеров. При распространении вистлеров вдоль петли, их частота ω и волновое число k связаны следующим дисперсионным соотношением [5]:

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

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

Причинами наполнения петли вистлерами могут быть: (1) генерация вистлеров инжектированными нетепловыми электронами с анизотропным распределением [4], а также (2) процесс конверсии БМЗ и ионно-звуковых волн, образующихся в области вспышечного энергосвечения [2]. В данной модели мы ограничиваемся рассмотрением второй возможности. Мы полагаем, что плотность энергии пакета вистлеров задана, соответствует спектру Колмогорова $W(k, s) \sim k^{-5/3}$ и не зависит от времени. Считая турбулентность слабой, такой, что взаимодействием между модами волн можно пренебречь [2], будем использовать для описания взаимодействия быстрых электронов с вистлерами квазилинейное приближение [6]. Согласно ему, взаимодействие происходит на резонансных волнах, с которыми у электрона происходит энергообмен и рассеяние. Условие такого резонанса с учетом доплеровского сдвига частоты [5]:

$$\omega - \mu c \beta k = n_g \cdot \omega_e / \gamma,$$

где $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ – Лоренц фактор, n_g – номер гармоники гирочастоты. При решении этого уравнения совместно с дисперсионным уравнением, для электронов определяются резонансные волны (k_r, ω_r) . Тогда коэффициенты диффузии на частицах плазмы и на турбулентности вистлеров [5, 7]:

$$D_{\mu\mu}^C = \frac{c}{\lambda_0 \beta^3 \gamma^2} (1 - \mu^2), \quad \lambda_0 = \frac{1}{4\pi n(s) \ln \Lambda}, \quad r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}$$

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

Результаты моделирования и выводы

При проведении численных расчётов, как и в работе [3], 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 $n_{\max}(l)/n_{\min}(0) = 100$. Параметры задаваемых изотропной инжекции и заполнения петли турбулентностью

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

$$W(k, s) = \frac{q-1}{k_{\min}} \left(\frac{k}{k_{\min}} \right)^{-q} \cdot R \frac{B^2}{8\pi}, \quad k_{\min} = \frac{\omega_{pi}}{c}, \quad n_g = 1, \quad q = 1.7, \quad R = 10^{-8} \div 10^{-5}.$$

Инжекция во времени изменялась от 0 до 10с гауссовым импульсом с параметрами $t_0 = 1.5c$, $t_1 = 1.5c$. Безразмерный параметр R показывает уровень энергии турбулентности вистлеров по отношению к энергии магнитного поля в каждой точке петли.

Для целей настоящей работы исследуются три вложенных режима взаимодействия нетепловых электронов с частицами фоновой плазмы и турбулентностью вистлеров. Режим C моделирует только кулоновское рассеяние с коэффициентом диффузии $D_{\mu\mu}^C$, режим CR учитывает дополнительно режим рассеяния на турбулентности волн с коэффициентом диффузии $D_{\mu\mu}^W$, а режим CRW учитывает ещё и стохастическое ускорение при взаимодействии с вистлерами с коэффициентом диффузии D_{EE}^W .

На рис. 1 представлены энергетические спектры инжектированных нетепловых электронов в центре петли в трех рассматриваемых режимах моделирования. На левой панели можно видеть, что кулоновское рассеяние электронов значимо только для низкоэнергичных ($E < 100$ кэВ) электронов. Рассеяние на вистлерах с $R = 10^{-8}$ более значимо и ведет к высыпанию электронов из петли (центральная панель). Дополнительный учет механизма стохастического ускорения приводит к сохранению и доускорению электронов в петле.

Рис. 1.

Рис. 2.

Рис. 2 демонстрирует режим рассеяния (верхние панели) и режим рассеяния с доускорением для более высоких уровней турбулентности: $R=10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}$ слева направо. Видно, что увеличение уровня заданной турбулентности приводит к интенсивному рассеянию электронов на высоких энергиях ($E > 2-3$ МэВ) и, соответственно, к укрупнению спектра. Учет же механизма стохастического ускорения приводит к значительному уплощению спектра в диапазоне $E = 200$ кэВ – 5 МэВ и резкому (на 2 порядка) увеличению концентрации электронов в петле на этих энергиях.

Таким образом, при сделанных в модели предположениях, доускорение электронов может существенно влиять на их энергетический спектр в петле. Существенным при этом является уровень турбулентности. Это показывает на необходимость учета его изменения в петле по причине взаимодействия с электронами или иным причинам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта № 20-52-26006.

Литература

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