РОЛЬ АНОМАЛЬНОГО ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ 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*

ROLE OF THE ANOMALOUS DOPPLER EFFECT IN THE INTERACTION OF ENERGETIC ELECTRONS WITH WHISTLER TURBULENCE IN FLARE LOOPS

Filatov L.V.¹, Melnikov V.F.²

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

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

Influence of the anomalous Doppler effect on the resonant interaction of fast electrons and whistler turbulence waves in solar flare loops is considered. The degree of its influence on the scattering of the injected electron beam is compared with the normal Doppler effect under different angles between the wave and magnetic field.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-309-312

Известно, что энергичные (нетепловые) электроны во вспышечной петле генерируют микроволновое и жесткое рентгеновское излучение. Характеристики этих излучений 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 работе [3] мы рассмотрели, как отразится на распределениях нетепловых электронов и их гиротронном излучении взаимодействие этих электронов с вистлеровской турбулентностью, заполняющей вспышечную петлю. При этом учитывались только вистлеры, распространяющиеся вдоль петли по направлению магнитного поля. Это справедливо когда плазма внутри вспышечных петель плотнее, чем снаружи, что приводит к волноводному, квазипродольному распространению вистлеров [4]. Вместе с тем, в магнитосферах активных областей возможно существование вспышечных петель, в которых плотность плазмы не отличается заметно от плотности плазмы внешних магнитных трубок. В этом случае вистлеры могут распространяться под большими углами к магнитному полю [5].

Взаимодействие между энергичными электронами и вистлерами, в котором происходит рассеяние электронов по питч-углам, носит резонансный характер. При таком взаимодействии необходимо учитывать допле-

ровские смещения частоты излучения движущегося электрона. В работах [2, 4] показано, что при продольном распространении вистлеров существенен только нормальный эффект Доплера. В то же время, для вистлеров, распространяющихся под большим углом к магнитному полю, значимым становится и аномальный эффект Доплера [5].

Целью настоящей работы является рассмотрение модели резонансного взаимодействия нетепловых электронов с вистлерами, распространяющимися во вспышечной петле под произвольным углом. Мы проводим оценку степени влияния величины этого угла на питч-угловое, энергетическое и пространственное распределения электронов и определяем отличительные особенности, связанные именно с аномальным эффектом Доплера.

Описание модели

Основные параметры модели выбраны такими же, как в работе [3]. Рассматривается одномерная нестационарная модель вспышечной петли в виде симметричной магнитной трубки с неоднородным по длине магнитным полем $B(s)$ и плотностью $n(s)$ заполняющей ее холодной фоновой плазмы. В вершине петли 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 точки петли, косинусу питч-угла электрона $\mu = \cos \alpha$, времени t . Динамика инжектированных электронов описывается кинетическим уравнением Фоккера-Планка для функции распределения $f(E, \mu, s, t)$ [6]:

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

здесь β – скорость электрона (часть скорости света), $D_{\mu\mu}^w$ – коэффициент диффузии (рассеяния) электронов по питч-углам, обусловленный взаимодействием с турбулентностью вистлеров. При распространении волн под углом θ к магнитному полю петли, частота ω и волновое число k связаны следующим дисперсионным соотношением [4]:

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

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

В данной модели мы полагаем, что плотность энергии пакета вистлеров соответствует спектру Колмогорова $W(k, s) \sim k^{-5/3}$ и не зависит от времени и направления распространения волн. Начальным источником вистлеров в петле может быть процесс конверсии БМЗ волн, образующихся в области вспышечного энерговыделения [2]. Считая турбулентность слабой, такой, что взаимодействием между модами волн можно пренебречь

[2], будем использовать для описания взаимодействия быстрых электронов с вистлерами квазилинейное приближение [7]. Согласно ему, взаимодействие происходит на резонансных волнах, с которыми у электрона происходит энергообмен и рассеяние. Условием циклотронного резонанса с учетом доплеровского сдвига частоты является [5]:

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

где $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ – Лоренц фактор, $n_g = \pm 1$ – номер гармоники гирочастоты, знак которого определяет направление доплеровского сдвига (нормальный или аномальный эффект). При решении этого уравнения совместно с дисперсионным уравнением, могут быть определены резонансные волны (k_r, ω_r) . Тогда коэффициент диффузии на турбулентности вистлеров в створе углов распространения $(-\theta_1, +\theta_1)$ вычисляется как [8]:

$$D_{\mu\mu}^W = \frac{\pi \omega_e}{2B^2} (1 - \mu^2) \int_{-\cos \theta_1}^{\cos \theta_1} d \cos \theta (1 + n_g |\cos \theta|)^2 \sum_r k_r W(k_r).$$

Результаты моделирования и обсуждение

При проведении численных расчётов 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 инжекции, и наполнения петли турбулентностью представлены на рис. 1.

Рис. 1.

Определение резонансных волн k_r, ω_r иллюстрируется на рис. 1, где пересекаются дисперсионная ветвь и прямая резонансного условия. Можно отметить, что при нормальном эффекте Доплера взаимодействие электронов происходит как со встречными, так и с попутными вистлерами, а при аномальном эффекте взаимодействие есть только с попутными волнами. Высокочастотные волны, вследствие степенной формы колмогоровского спектра, имеют меньшую плотность энергии. Таким образом, резонансных волн на аномальном эффекте Доплера меньше и они менее интенсивны.

Это, безусловно, сказывается на значении коэффициента питч-угловой диффузии электронов на вистлерах $D_{\mu\mu}^W$, вклад в который вычислялся для различных углов распространения θ .

На рис. 2 приведены энергетические спектры распределения инжектированных электронов в процессе рассеяния на вистлерах при различных углах θ в центре петли на нормальном и аномальном эффекте Доплера. На верхних панелях показана динамика спектра при различных углах θ на нормальном эффекте Доплера ($n_g = +1$). Видно, что с ростом угла рассеяния происходит в меньшем диапазоне энергий, а рассеяние на низких энергиях прекращается (излом в спектре смещается в область более высоких энергий). Нижние панели иллюстрируют слабость рассеяния электронов на аномальном эффекте Доплера ($n_g = -1$). Коэффициент диффузии в этом случае на три порядка меньше, чем на нормальном эффекте Доплера (усредненные по энергиям $\bar{D}_{\mu\mu}^W$ при $\mu = 0.6$ приводятся на рис. 2). Однако с ростом угла θ значимость аномального эффекта Доплера нарастает.

Рис. 2.

Таким образом, при сделанных в модели предположениях, аномальный эффект Доплера может влиять на рассеяние электронов на вистлерах, но в очень малой степени.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-02-00856, 17-52-80064 и Программы ПРАН.

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. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфеновские мазеры. – ИПФАН, 1986, –190 с.
5. Мальцева О.А., Чернов Г.П. // Кинематика и физика небес. тел. 1989. Т.5, №6. С.44-54
6. Hamilton R.J., Petrosian V. // Astrophys.J. 1992, V.398. №10. P.350-358.
7. Веденов А.А., Велихов Е.П., Сагдеев Р.З. // Ядерный синтез. Т.2. №2. С.465-475. 1962.
8. Melrose D.B. // Solar Physics, 1974, V.37, №4, P.353-365.