ДИНАМИКА ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВО ВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ С УЧЁТОМ РАЗВИТИЯ ПУЧКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Кудрявцев И.В.^{1,2}, Кальтман Т.И.³, Ватагин П.В.¹, Чариков Ю.Е.¹

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

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

³*СПбФ САО РАН, Санкт-Петербург, Россия*

THE DISTRIBUTION FUNCTION OF FAST ELECTRONS DURING THEIR PROPAGATION IN THE FLARE PLASMA WITH THE DEVELOPMENT OF BEAM INSTABILITY

Kudryavtsev I.V.^{1,2}, Kaltman T.I.³, Vatagin P.V.¹, Charikov Yu.E.¹

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

²*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

³*SPb branch of SAO RAS, St. Petersburg, Russia*

The paper presents the results of calculations of the fast electron distribution function and the spectral energy density of Langmuir waves during the propagation of fast electrons along the flare loop with variable density. This takes into account the Coulomb collisions of these electrons with the particles of the flare plasma, the generation of plasma waves and the interaction of waves with fast electrons. During the propagation of fast electrons the Langmuir waves are excited. The transformation of the wave spectrum lead to additional electron acceleration. In addition, a turbulent plasma layer is formed, the thickness of which is determined by the parameters of the plasma and the initial distribution of fast electrons.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-259-262

Во время солнечных вспышек происходит ускорение электронов, которые распространяясь в магнитоактивной плазме излучают в широком диапазоне длин волн – от радио- до рентгеновского и гамма- излучения. Регистрация этих излучений и определение их параметров используется для изучения механизмов ускорения электронов во время солнечных вспышек. К настоящему времени существует много работ, посвященных изучению эволюции функции распределения быстрых электронов и расчету параметров генерируемого излучения с целью реконструкции параметров ускоренных во время вспышек электронов [1, 2]. В этих работах основное внимание уделяется учету кулоновских столкновений и изменению магнитного поля во вспышечной петле. В данной статье рассмотрим особенности эволюции функции распределения быстрых электронов и ленгмюровских волн при распространении электронов во вспышечной плазме с учетом генерации плазменных волн электронами. В [3] была рассмотрена нестационарная, но однородная задача. Для выяснения простран-

ственной зависимости функции распределения электронов и плотности энергии плазменных волн, будем рассматривать неоднородную стационарную задачу кинетики быстрых электронов, распространяющихся во вспышечной плазме. При этом будем полагать, что электроны движутся параллельно оси вспышечной петли в результате действия магнитного поля. В этом случае уравнения для функции распределения быстрых электронов $f(z, v)$ и для спектральной плотности энергии ленгмюровских волн $W_k(z, k)$ будут иметь вид [3–7]:

$$v \frac{\partial f}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial v} \left(D \frac{\partial f}{\partial v} + v_e (vf + V_{Te}^2 \frac{\partial f}{\partial v}) \right), \quad (1)$$

где v – скорость электрона; z – пространственная координата вдоль вспышечной петли; D – коэффициент диффузии в пространстве скоростей при взаимодействии электронов с волнами; v_e – частота кулоновских столкновений быстрых электронов с частицами плазмы,

$$v_g \frac{\partial W_k}{\partial z} = (\gamma_k - v_{ef}) W_k + \frac{\partial \omega_e}{\partial z} \frac{\partial W_k}{\partial k} + Q_k^1, \quad (2)$$

v_g – групповая скорость ленгмюровских колебаний; k – волновое число волны; γ – инкремент пучковой неустойчивости; v_{ef} – эффективная частота, описывающая затухание ленгмюровских волн в результате кулоновских столкновений частиц плазмы; Q_k^1 – мощность тепловых ленгмюровских флуктуаций (см., например [8]); ω_e – плазменная электронная частота.

Будем считать, что быстрые электроны образуются в вершине петли, а концентрация электронов плазмы $n_e(z)$ увеличивается с ростом расстояния от вершины петли по линейному закону:

$$n_e = n_e^0 (1 + z/z_0), \quad (3)$$

где n_e^0 – концентрация электронов плазмы при $z = 0$.

Как известно ([3–7]), выражения для коэффициента диффузии D и инкремента пучковой неустойчивости γ имеют вид:

$$D = \frac{\pi \omega_e^2}{m_e n_e v} (W_k)_{k=\omega_e/v}; \quad (4)$$

$$\gamma_k = \left(\frac{\pi \omega_e}{n_e} v^2 \frac{\partial f}{\partial v} \right)_{v=\omega_e/k}, \quad (5)$$

Система уравнений (1–2) является нелинейной системой дифференциальных уравнений. Система уравнений (1–2) решалась методом конечных разностей (см., например, [9]) с использованием итераций по нелинейно-

сти. При этом, уравнение (2) было преобразовано для коэффициента диффузии D , используя выражение (4).

На рис. 1 приведены результаты расчета при температуре плазмы $T_e = 10^6 \text{ К}$ и $n_0 = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, концентрация быстрых электронов на границе $z = 0$ $n_0^b = 10^5 \text{ см}^{-3}$, а их функция распределения по скоростям представлялась в виде распределения Гаусса, скорость в максимуме распределения v_0 (рис. 1А) соответствует энергии 30 кэВ, а среднеквадратичное отклонение $- 0.06 v_0$, значение $z_0 = 10^7 \text{ см}$.

Рис. 1.

Из рисунка 1А следует, что в области инжекции (кривые 2, 3, 4) происходит трансформация функции распределения быстрых электронов в сторону меньших скоростей с одновременным нарастанием ленгмюровской турбулентности (рис. 1Б, кривые 1–4). В результате роста концентрации электронов плазмы с увеличением z происходит трансформация спектра турбулентности в область больших фазовых скоростей (описывается вторым слагаемым правой части уравнения (2)), что приводит к дополнительному ускорению части электронов (рис. 1А, кривые 6, 7, см. также [3]). На расстоянии от вершины 10^4 см плотность энергии турбулентности W_1

достигает 0.2 эрг/см^3 . С удалением от вершины плотность энергии уменьшается и при $z = 10^5 \text{ см}$ уменьшается до $8 \cdot 10^{-3} \text{ эрг/см}^3$. В дальнейшем, в результате кулоновских столкновений быстрых электронов с частицами плазмы начинает образовываться (как было отмечено в работе [4]) инверсный участок на функции распределения электронов. Это приводит к дальнейшей генерации плазменных волн на расстоянии $\sim 10^7 \text{ см}$ и плотность энергии турбулентности составляет $\sim 10^{-6} - 10^{-5} \text{ эрг/см}^3$ вплоть до 10^8 см .

На рис. 1В показано влияние масштаба изменения концентрации z_0 на динамику трансформации дополнительного ускорения электронов. Увеличение z_0 приводит к уменьшению ускорения электронов. Так, при $z_0 = 10^6 \text{ см}$ дополнительное ускорение происходит до скорости $1,35 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$ (кривая 2), а при $z_0 = 10^7 \text{ см}$ – до $1,17 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$ (кривая 3). При $z_0 = 10^8 \text{ см}$ ускорение на данном расстоянии незначительно.

В заключение отметим, что взаимодействие быстрых электронов с плазменными волнами может менять характер распространения этих электронов в солнечной плазме (см., также работы [10, 11]), что необходимо учитывать при реконструкции распределений быстрых электронов.

Работа Кальтман Т.И. поддержана программой ПРАН 28 и РФФИ 18-02-00045. Работа Кудрявцева И.В. частично поддержана программой ПРАН 28.

Литература

1. Zharkova V.V. et al. // Astron. Astrophys., 2010, V. 512, A8.
2. Melnikov V.F. et al. // Geomagn. and Aeronomy, 2013, V. 53(7), p. 863.
3. Kontar E.P., et al. // A&A, 2012, V. 539, A43
4. Железняков В.В., Зайцев В.В. //Астрономический журнал, 1970, Т. 47, С. 60
5. Каплан С.А., Цытович В.Н. Плазменная Астрофизика – М.: Наука, 1972. 394 с.
6. Цытович В.Н. Теория турбулентной плазмы – М.: Атомиздат, 1971. 424 с.
7. Скрынников Ю.И., Сомов Б.В. // В сборнике «XII Ленинградский семинар по космофизике», под. ред. В.А. Дергачева, Г.Е. Кочарова, С. 72. Ленинград, ЛИЯФ, 1982. 208 с.
8. Vatagin P.V. et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2012, V. 52, P. 1015.
9. Самарский А.А. Теория разностных схем – М.: Наука, 1989. 616 с.
10. Кудрявцев И.В. и др. // В Трудах конф. «Активные процессы на Солнце и звездах», СПб, НИИРФ СПбГУ, 2002. 328 с.
11. Кудрявцев И.В., Чариков Ю.Е. // Астрономический журнал, 1999. Т. 76, С. 464.