МГД УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Кузнецов В.Д., Осин А.И.
ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

MHD SHOCK WAVES AND TURBULENCE IN COLLISIONLESS SOLAR WIND PLASMA

Kuznetsov V.D., Osin A.I.
IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

A shock wave solution is presented for the 8-moment MHD approximation of the solar wind plasma. Parameter regions are determined for the compression and rarefaction waves as well as regions of stability and various directions of heat fluxes behind the shock front. Evolutionarity of shock waves is discussed for a plasma with heat fluxes when speeds of linear waves depend on the magnitude and direction of the heat flux.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-257-260

Введение

Бесстолкновительная плазма солнечного ветра, как показывают измерения на космических аппаратах [1–3], характеризуется температурной анизотропией ($T_{\parallel}$ и $T_{\perp}$), а также наличием в ней тепловых потоков ($S_{\parallel}^{\parallel}$ и $S_{\parallel}^{\perp}$) и турбулентности. Описание ударных волн в такой плазме впервые предложено в [4] на основе 8-моментного МГД-приближения.

Решение для ударных волн

Для простейшего случая одномерной продольной ударной волны, распространяющейся вдоль магнитного поля, полученное в [4] решение имеет вид

$$\begin{aligned}\frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{1}{Y}; \quad \frac{u_2}{u_1} = Y \\ \frac{p_{\parallel 2}}{p_{\parallel 1}} &= 1 + M_1^2 - M_1^2 Y \\ \kappa_{\parallel 1} \frac{S_{\parallel 2}^{\parallel}}{S_{\parallel 1}^{\parallel}} &= \kappa_{\parallel 1} + 3M_1 + M_1^3 - 3M_1(1 + M_1^2)Y + 2M_1^3 Y^2 \\ \frac{p_{\perp 2}}{p_{\perp 1}} &= \frac{1}{Y} \left[1 - 2\kappa_{\perp 1} \frac{M_1(1 - Y)}{N(M_1, \kappa_{\parallel 1})} \right]\end{aligned}$$

$$\frac{S_{||2}^{\perp}}{S_{||1}^{\perp}} = \frac{M_1^2 - 1}{N(M_1, \kappa_{||1})}$$

где $N(M_1, \kappa_{||1}) = 2M_1^2 Y - M_1^2 - 1$, а функция $Y = Y(M_1, \kappa_{||1})$ имеет вид

$$Y_{\pm} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{M_1^2} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{12} + \frac{1}{2M_1^4} - \frac{2\kappa_{||1}}{3M_1^3}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{M_1^2} \right) \pm \sqrt{D}$$

и определяет две ударные волны – быструю (Y_+) и медленную волну (Y_-), отвечающие двум волнам малой амплитуды в плазме с тепловыми потоками [5–7]. Здесь были введены следующие определения для безразмерных параметров

$$\begin{aligned} Y &= \frac{u_2}{u_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad \alpha = \frac{p_{\perp}}{p_{||}} \\ a_{||}^2 &= \frac{p_{||}}{\rho}; \quad a_{\perp}^2 = \frac{p_{\perp}}{\rho}; \quad M = \frac{u}{a_{||}} \\ \kappa_{||} &= \frac{S_{||}^{\perp}}{p_{||} a_{||}} = \frac{S_{||}^{\perp}}{\rho a_{||}^3}; \quad \kappa_{\perp} = \frac{S_{||}^{\perp}}{p_{\perp} a_{||}} = \frac{S_{||}^{\perp}}{\rho a_{\perp}^2 a_{||}}. \end{aligned}$$

Определение $\kappa_{\perp}$ здесь отличается от принятого в [4], что проявилось в отсутствии параметра анизотропии α в выражении для $p_{\perp 2}/p_{\perp 1}$.

Функция $Y = Y(M_1, \kappa_{||1})$ определяет на плоскости параметров $(M_1, \kappa_{||1})$ области сжатия ($Y_{\pm} < 1$) и разрешения ($Y_{\pm} > 1$) (см. рис. 1).

Турбулентность

Наличие в плазме теплового потока $S_{||}^{\perp}$, как установлено в [5, 7], приводит к потоковой неустойчивости при $|\kappa_{||}| > \kappa_{||}^* = \sqrt{2(\sqrt{2} - 1)} \approx 0,91$, что необходимо учитывать при рассмотрении ударных волн. Одновременное выполнение условий $|\kappa_{||1}| < \kappa_{||}^*$ и $|\kappa_{||2}| < \kappa_{||}^*$, где $\kappa_{||2}$ (за фронтом ударной волны):

$$\kappa_{||2}(M_1, \kappa_{||1}) = \frac{\kappa_{||1} + 3M_1 + M_1^3 - 3M_1(1 + M_1^2)Y + 2M_1^3 Y^2}{\sqrt{Y}(1 + M_1^2 - M_1^2 Y)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

определяет на плоскости параметров $(M_1, \kappa_{||1})$ области устойчивости (заштрихованы на рис. 1, 2). Таким образом, обе ударные волны (быстрая и медленная), распространяясь по устойчивой среде ($|\kappa_{||1}| < \kappa_{||}^*$ перед фронтом), могут приводить к потоковой неустойчивости ($|\kappa_{||2}| > \kappa_{||}^*$) и турбулентности за фронтом ударной волны. Как можно видеть, условие $|\kappa_{||2}| > \kappa_{||}^*$ может выполняться даже при нулевом тепловом потоке перед фронтом ударной волны.

Рис. 1. Для быстрой (Y_+) и медленной (Y_-) ударных волн показаны кривые $Y_{\pm} = 1$, области сжатия ($Y_{\pm} < 1$) и разрежения ($Y_{\pm} > 1$). Заштрихованы области параметров ($M_1, \kappa_{||1}$), для которых имеет место устойчивость плазмы перед фронтом ударной волны и за ним.

Рис. 2. Поток поперечной тепловой энергии вдоль магнитного поля.

Тепловые потоки

Из формулы (1) для $\kappa_{||2}(M_1, \kappa_{||1})$ на плоскости параметров $(M_1, \kappa_{||1})$ можно определить величину и направление теплового потока $S_{||2}^{\perp}$ за фронтом ударной волны. Для каждой ударной волны три кривые: $\kappa_{||1} = 0$, $\kappa_{||2} = 0$ и $Y_{\pm} = 1$ на плоскости параметров $(M_1, \kappa_{||1})$ пересекаются в одной точке, разбивая область устойчивости плазмы перед и за фронтом на физически разные подобласти – на подобласти сжатия ($Y_{\pm} < 1$) и разрежения ($Y_{\pm} > 1$), со сменой направления (знака) теплового потока $S_{||2}^{\perp}$ и без смены знака за фронтом ударной волны. Знак теплового потока за фронтом положителен для точек правее кривой $\kappa_{||2} = 0$ для Y_- и левее этой кривой для Y_+

Аналогичный анализ может быть выполнен для теплового потока $S_{\parallel 2}^{\perp}$ (см. рис. 2). В этом случае кривыми, разделяющими область параметров $(M_1, \kappa_{\parallel 1})$, являются кривые $M_1 = 1$ и $N(M_1, \kappa_{\parallel 1}) = 0$ ($M_2 = u_2/a_{\parallel 2} = 1$, только для Y_-), где $a_{\parallel}$ - скорость тепловой волны (несжимаемой волны малой амплитуды).

Эволюционность ударных волн

Помимо требования устойчивости состояния плазмы по обе стороны фронта ударных волн необходимо изучить вопрос эволюционности полученных решений. Эволюционность разрыва согласно методу Ландау [8] может быть определена путем подсчета числа волн, уходящих от фронта ударной волны, и исходя из числа уравнений, определяющих граничные условия на разрыве [4]. Условия, дающие нужное число уходящих волн и определяют область значений параметров $(M_1, \kappa_{\parallel 1})$, для которых имеет место эволюционность разрыва. Анализ эволюционности будет представлен в отдельной работе.

Литература

1. *Matteini L. et al.* // Geophys. Res. Lett., 2007, **34**, L20105.
2. *Stansby D. et al.* // Solar Phys., 2018, **293**, 155.
3. *Demars H.G., Schunk R.W.* // Planet Space Sci, 1990, **38**, 1091.
4. *Kuznetsov V.D., Osin A.I.* // Physics Letters, 2018, **A382**, 2052.
5. *Namikawa T., Hamabata H.J.* // Plasma Phys., 1981, **26** (1), 95.
6. *Захаров В.Ю.* / в сб. Вопросы магнитной гидродинамики без столкновений в сильном магнитном поле. – М.: МГУ, 1988. – с. 48.
7. *Кузнецов В.Д., Джалилов Н.С.* // Физика плазмы, 2009, **35** (11), 1041.
8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. – М.: Наука, 1986.