

Evolução Quase Linear de Ondas e Partículas em um Sistema Feixe-Plasma

HENRIQUE CERON DA SILVEIRA¹;
JOEL PAVAN³

¹Universidade Federal de Pelotas – dasilveirahc@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – joel.pavan@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O estudo da interação entre um feixe de elétrons e o plasma que o rodeia é de fundamental importância para a física de plasmas. Esta interação de partículas carregadas com o plasma ambiente, no meio interplanetário, constitui o chamado sistema feixe-plasma. Uma das abordagens utilizadas neste estudo é a teoria de turbulência fraca, que serve para descrever a interação de partículas e ondas de um sistema. O feixe de elétrons é gerado através de eventos solares eruptivos, como as ejeções de massa coronal (CMEs), que lançam no espaço uma quantidade muito grande de partículas, e os chamados *solar flares*. A interação destas partículas com o plasma produz instabilidade, que gera emissão de ondas eletromagnéticas. Um tipo de emissão produzida através desta interação são as emissões de tipo III. Dentre as principais características das emissões tipo III, que as tornam um alvo interessante de estudo, destacam-se o baixo tempo de decaimento e a frequência, que é da ordem da frequência de plasma.

Neste trabalho foram utilizadas as equações da teoria de turbulência fraca (Yoon (2000)) para descrever o sistema feixe-plasma, às quais foram adicionados termos referentes à presença dos íons no sistema. Aliado a técnicas computacionais, buscou-se verificar o comportamento do sistema a fim de comparar os resultados obtidos via simulação computacional com a previsão teórica.

2. METODOLOGIA

O sistema utilizado é composto por um plasma de fundo maxwelliano, íons e dois feixes contrapropagantes. Para início do trabalho foi feito o tratamento teórico das equações da teoria de turbulência fraca, que regem a evolução do sistema. A equação que rege a evolução das partículas é dada por

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial v} \left(A f_a + D \frac{\partial f_a}{\partial v} \right) \quad (1)$$

onde

$$A = \frac{e^2}{4\pi m_a} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{pa}^2} \sum_{\sigma=\pm 1} \int dk \delta(\sigma \omega_k^L - kv) \frac{\sigma \omega_k^L}{k} \quad (2)$$

é o coeficiente de arrasto, e

$$D = \frac{\pi e^2}{m_a^2} \sum_{\sigma=\pm 1} \int dk \delta(\sigma \omega_k^L - kv) I_k^{\sigma L} \quad (3)$$

é o coeficiente de difusão das partículas. Cabe ressaltar que o subíndice “a” serve tanto para elétrons quanto para íons. A evolução das ondas do sistema é dada por

$$\frac{\partial I_k^{\sigma L}}{\partial t} = C_s + C_i I_k^{\sigma L} \quad (4)$$

onde

$$C_s = \frac{ne^2\omega_{pe}^2}{k^2} \sum_a \int dv \delta(\sigma\omega_k^L - kv) f_a \quad (5)$$

é o coeficiente de emissão espontânea das ondas, e

$$C_i = \frac{\sigma\omega_k^L\pi}{k} \sum_a \omega_{pa}^2 \int dv \delta(\sigma\omega_k^L - kv) \frac{\partial f_a}{\partial v} \quad (6)$$

é o coeficiente de emissão induzida das ondas.

A função de distribuição de velocidades dos elétrons é definida por

$$F_e(t=0) = \frac{1 - n_b/n - n_f/n}{\sqrt{\pi}v_{te}} \exp\left(-\frac{(v - v_e)^2}{v_{te}^2}\right) + \frac{n_b/n}{\sqrt{\pi}v_{tb}} \exp\left(-\frac{(v + v_b)^2}{v_{tb}^2}\right) + \frac{n_f/n}{\sqrt{\pi}v_{tf}} \exp\left(-\frac{(v - v_f)^2}{v_{tf}^2}\right) \quad (7)$$

onde

$$v_e = \frac{(v_b n_b - v_f n_f)}{(n - n_b - n_f)} \quad (8)$$

garante que o sistema não tenha deriva.

Ainda, a função de distribuição de velocidades dos íons é descrita por

$$\phi_i = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-v^2 \frac{T_i m_e}{T_e m_i}) \sqrt{\frac{T_i m_e}{T_e m_i}} \quad (9)$$

Os termos v_e, v_b e v_f representam as velocidades de deriva do plasma de fundo, do feixe *backward* e do feixe *forward*, respectivamente. Já a carga elementar do elétron é dada por e , e m_e é a massa do elétron. A frequência de plasma é ω_{pe} e k é o número de onda. As velocidades térmicas dos elétrons do plasma de fun-

do, do feixe *backward* e do feixe *forward* são dadas, respectivamente, por v_{te} , v_{tb} e v_{tf} .

Para obtenção dos resultados numéricos foi utilizado um código computacional criado para simular o sistema em questão. Inicialmente o sistema considerava apenas elétrons e o trabalho em questão tratou de incluir ao sistema e, consequentemente, ao código os íons. Tal inclusão permitiu analisar o comportamento do sistema com a presença dos íons, por meio da variação do parâmetro de razão de temperaturas de elétrons e íons, T_e/T_i .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

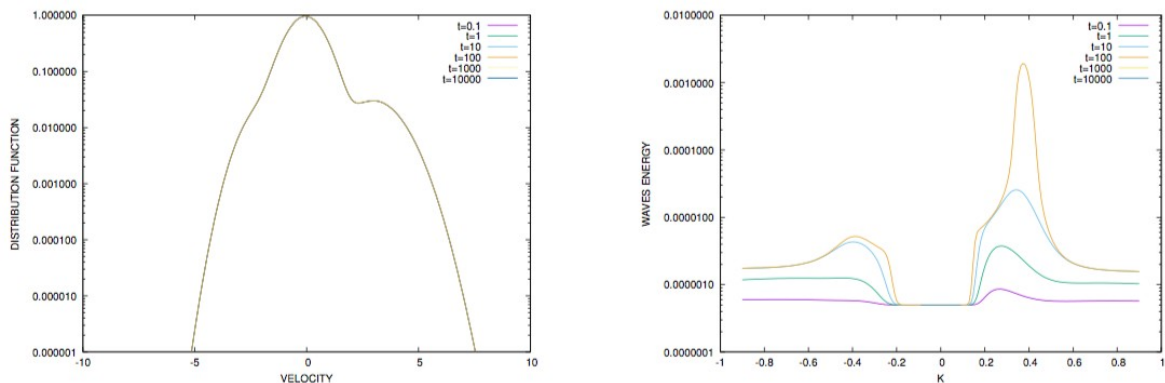


Figura 1: Evolução da Função de Distribuição de Velocidades dos elétrons do sistema (esq.) e evolução das ondas do sistema (dir.) para uma razão de temperaturas $rt = 2e^{-2}$.

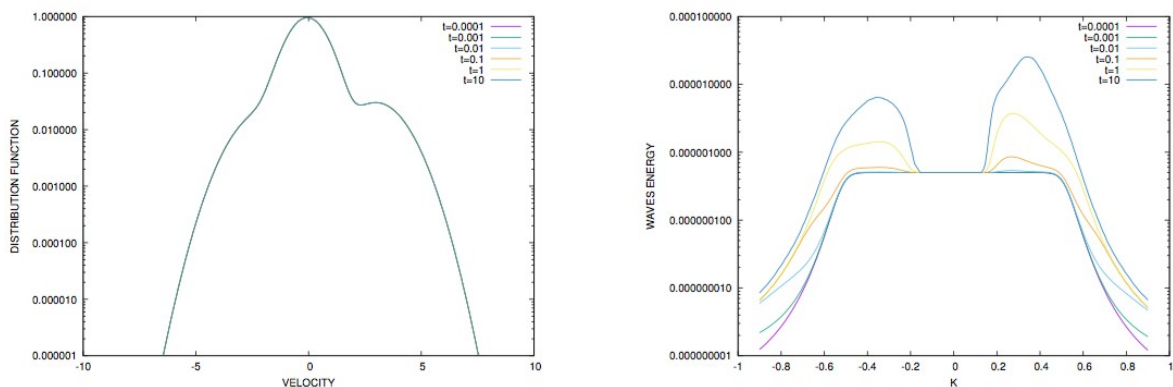


Figura 2: Evolução da Função de Distribuição de Velocidades dos elétrons do sistema (esq.) e evolução das ondas do sistema (dir.) para uma razão de temperaturas $rt = 2e^{-3}$.

Para atingir os resultados expostos foi variado o parâmetro da razão das temperaturas de íons e elétrons. Pelas figuras 1 e 2 é possível ver que a presença de íons afeta o crescimento das ondas. Quanto menor a razão das temperaturas, o que significa íons mais quentes, menor o crescimento das ondas, enquanto para uma razão de temperatura maior (Figura 1), maior o crescimento das ondas.

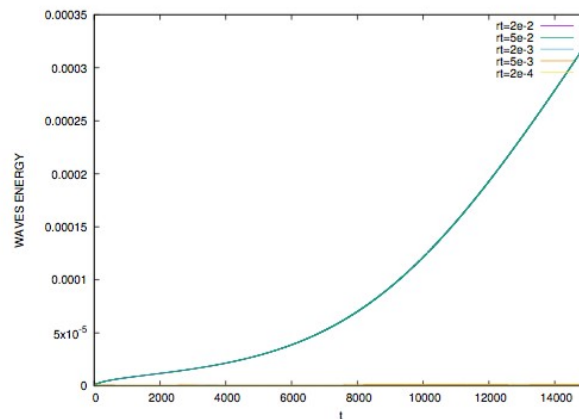


Figura 3: Energia das ondas do sistema para cinco variações do parâmetro de razão de temperaturas de íons e elétrons.

A figura 3 mostra o crescimento da energia das ondas com a evolução temporal do sistema. Conforme as ondas absorvem energia das partículas, sua energia cresce. É esperado que no estado final do sistema a energia das partículas sature e não haja mais absorção por parte das ondas. Tal estado, no entanto, não é de interesse para os resultados apresentados.

4. CONCLUSÕES

Como é possível ver nas figuras 1 e 2, que mostram a evolução temporal das partículas e ondas do sistema, as ondas absorvem energia na região de derivada positiva dos feixes. Tal absorção, no entanto, é afetada pela presença de íons e é menor quanto menor for a razão da temperatura de íons e elétrons, o que é corroborado pelo resultado exposto na figura 3.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

YOON, P.H. Generalized weak turbulence theory. **Physics of Plasmas**, v. 7, n. 12, p. 4858 – 4871, 2000.

ZIEBELL, L.F.; GAELZER, R.; YOON, P.H. Nonlinear development of weak beam-plasma instability. **Physics of Plasmas**, v. 8, n. 9, p. 3982-3995, 2001.

GAELZER, R.; ZIEBELL, L.F.; VINAS, A.F.; YOON, P.H.; RYU, C-M. Assymmetric solar wind electron superthermal distributions. **The Astrophysical Journal**, v. 677, n. 1, p. 676, 2012.