

SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FEIXE-PLASMA COM FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DO TIPO KAPPA

LEONARDO DOS SANTOS FERREIRA¹
FERNANDO SIMÕES JR.²

¹*Universidade Federal de Pelotas – leonardofisicaufpel@gmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – fernandosj@gmail.com*

1. INTRODUÇÃO

A observação do Sol e de fenômenos em grande escala, relacionados a sua interação com a magnetosfera terrestre, remetem à China antiga (HAYAKAWA et al., 2015) e aos povos nativos das regiões polares (BREKKE; EGELAND, 2012). Porém, foi o avanço tecnológico e a exploração espacial que impulsionaram o estudo da atividade solar e dos efeitos que ela causa na Terra. Com isso, foi desenvolvida a ideia de clima espacial a partir dos primeiros estudos acerca do campo magnético e do plasma na região interior do sistema solar (GOLD, 1959; KANE, 2006).

Podemos pensar em clima espacial como sendo o conjunto de fenômenos eletromagnéticos, promovidos, principalmente, pela interação do campo magnético altamente variável do Sol com os outros constituintes do Sistema Solar, e a dinâmica dos plasmas é a base para o seu estudo, assim como um dos pilares da Astrofísica de maneira geral (SCHERER et al., 2005).

Desde os primeiros trabalhos em física de plasmas, com o estudo de descargas elétricas em gases (TONKS; LANGMUIR, 1929), foi desenvolvida uma teoria baseada em plasmas com populações de elétrons com velocidades descritas por uma função de distribuição de velocidades maxwelliana (FDVm). Porém, a partir da década de 1960, começaram a ser detectadas populações de partículas com velocidade acima da previstas pelas FDVm em diferentes regiões do espaço (LAZAR; SCHLICKEISER; POEDTS, 2012), que são descritas pelas FDVs do tipo kappa(κ)(FDV κ)(PIERRARD; LAZAR, 2010).

O grande problema que envolve as FDV κ é que ainda não existe um consenso na comunidade científica quanto a equação matemática que melhor descreve os dados observacionais. Muito mais do que apenas preciosismo, essa discrepância nas representações conduz à fenômenos físicos diferentes. Neste trabalho, estudaremos os modos oscilatórios de Langmuir em plasmas com FDVm e com duas formas de FDV κ diferentes, que são mais usuais na literatura.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho, utilizaremos dois métodos diferentes para obter as relações de dispersão para os modos de Langmuir. O primeiro, para os plasmas descritos por FDVm, consiste na resolução do sistema Vlasov-Maxwell linearizado (VML), dado pelas equações (BITTENCOURT, 2013)

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}; \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f_1 + \frac{q}{m} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \nabla_v f_0 = 0 \quad (2)$$

$$\rho = q \int_{\vec{v}} f_1(\vec{v}) d^3v, \quad (3)$$

$$\vec{J} = q \int_{\vec{v}} \vec{v} f_1(\vec{v}) d^3v, \quad (4)$$

onde \vec{E} e \vec{B} são os campos eletromagnéticos internos resultantes, ρ é a densidade de carga perturbada e \vec{J} é a densidade de corrente perturbada. A segunda, para os plasmas descritos por uma FDV κ , utiliza a forma geral para relação de dispersão dos modos de Langmuir (ZIEBELL;GAEZER; SIMÕES, 2017), dada por

$$1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{\kappa}{(\kappa + \alpha - 5/2)} \frac{1}{\zeta^2} \right) = 0. \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Começando pelo caso de um plasma descrito por uma FDVm, buscamos soluções harmônicas periódicas, na forma

$$\begin{aligned} f_1(\vec{r}, \vec{v}, t) &= f_1(\vec{v}) \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] \\ \psi(\vec{r}, \vec{v}, t) &= \psi \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] \\ \rho(\vec{r}, t) &= \rho \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)], \end{aligned} \quad (6)$$

onde ψ representa qualquer uma das quantidades vetoriais \vec{E} , \vec{B} e \vec{J} . Considerando essas soluções no sistema VML, e considerando a FDVm, dada por

$$f_0(v) = n_0 \left(\frac{m_e}{2\pi k_B T_e} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_e v^2}{2k_B T_e}\right), \quad (7)$$

temos a relação de dispersão para os modos de Langmuir em um plasma maxwelliano

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 + \frac{3k_B T_e k^2}{m_e}. \quad (8)$$

Para o caso das FDV κ , utilizaremos a forma proposta por Vasilyunas (1968), dada por

$$f(v) = \frac{n_0}{(\pi\kappa)^{3/2} w_\kappa^3} \frac{\Gamma(\kappa + 1)}{\Gamma(\kappa - 1/2)} \left(1 + \frac{v^2}{\kappa w_\kappa^2} \right)^{-(\kappa+1)}, \quad (9)$$

e a proposta por Leubner (2002), dada por

$$f(v) = \frac{n_0}{(\pi\kappa)^{3/2} v^3} \frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - 3/2)} \left(1 + \frac{v^2}{\kappa v^2} \right)^{-\kappa}. \quad (10)$$

Utilizando a forma genérica, dada pela Equação (5), escolhendo $\alpha = 1$ para a FDV κ proposta por Vasilyunas, e $\alpha = 0$ para a FDV κ proposta por Leubner, obtemos as respectivas relações de dispersão para os modos de Langmuir em plasmas não maxwellianos

$$\omega^2 \approx \omega_{pe}^2 + \frac{3k_B T_e k^2}{m_e}, \quad (11)$$

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 \left(1 + \frac{3}{2(\kappa - 5/2)} \frac{k^2 v^2}{\omega_{pe}^2} \right). \quad (12)$$

Os gráficos das curvas dadas pelas Equações (8), (11) e (12) estão dispostas na Figura 1.

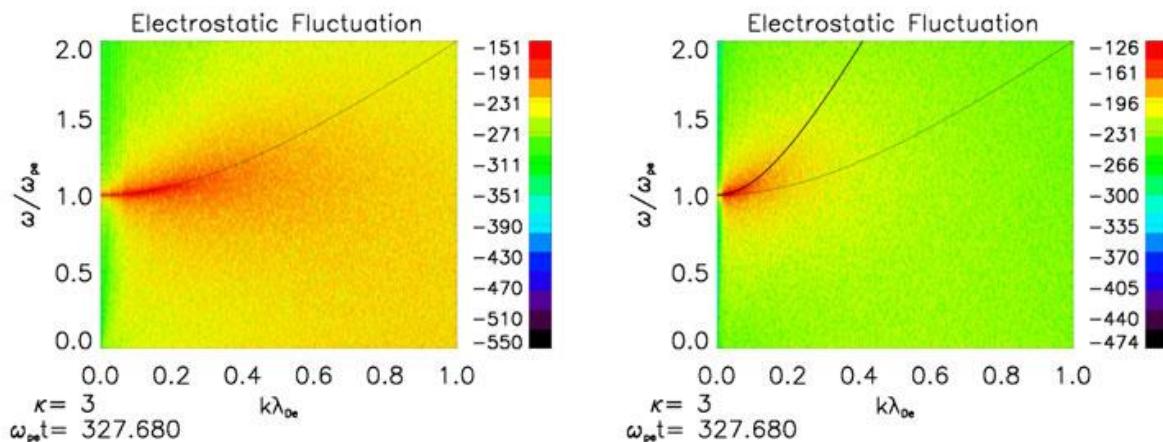


Figura 1: gráficos das relações de dispersão para plasmas maxwellianos e plasmas descritos pela FDV κ de Vasilyunas (coluna da esquerda, linha tênue), e para plasmas descritos pela FDV κ de Leubner (coluna da direita, linha mais escura), para índice espectral $\kappa = 3$.
Fonte: (ZIEBELL; GAEZER; SIMÕES, 2017)

4. CONCLUSÕES

Por comparação direta, as curvas dadas pelas equações (8) e (11) são iguais, o que indica que a FDV κ de Vasilyunas não introduz nenhum tipo de alteração nos modos de Langmuir. Por outro lado, como é evidente pela Figura 1, a FDV κ de Leubner introduz uma discrepância que se acentua a medida que o índice espectral κ assume valores mais baixos, o que era esperado, segundo a literatura (ABDUL; MACE, 2014).

A análise apresentada neste trabalho será utilizada como base para continuação do projeto, que será estudar a evolução de sistemas, mediante a interação feixe-plasma, que apresentam estruturas com FDV κ . Em especial, estudaremos a modificação que a FDV κ introduz nos modos ondulatórios de Langmuir nesses sistemas. Esse resultado é importante porque através do estudo de propagação de ondas em plasmas é possível obter uma série de informações a respeito das propriedades cinéticas do sistema, em especial em fenômenos de plasmas espaciais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HAYAKAWA, H. et al. Records of sunspot and aurora during ce 960–1279 in the chinese chronicle of the sòng dynasty. **Earth, Planets and Space**. v. 67, n. 1, p. 82, maio 2015.
- BREKKE, Asgeir; EGELAND, Alv. **The northern light**: from mythology to space research. 1. ed. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- GOLD, T. Plasma and magnetic fields in the solar system. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 11, p. 1665–1674, nov. 1959.
- KANE, R. P. The idea of space weather: a historical perspective. **Advances in Space Research**, v. 37, n. 6, p. 1261–1264, fev. 2006.
- SCHERER, Klaus et al. **Space Weather**: the physics behind a slogan. 1. ed. Berlin: Springer Science & Business Media, 2005.
- TONKS, L.; LANGMUIR, I. A general theory of the plasma of an arc. **Physical review**, v. 34, n. 6, p. 876, set. 1929.
- LAZAR, M.; SCHLICKEISER, R.; POEDTS, S. Suprothermal particle populations in the solar wind and corona. In: LAZAR, M.; SCHLICKEISER, R.; POEDTS, S. **Exploring the solar wind**. 1. ed. Rijeka: IntechOpen, 2012. p. 241–260.
- PIERRARD, V.; LAZAR, M. Kappa distributions: theory and applications in space plasmas. **Solar Physics**, v. 267, n. 1, p. 153–174, out.
- BITTENCOURT, José. **Fundamentals of plasma physics**. 3. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- ZIEBELL, L. F.; GAEZER, R.; SIMÕES, F. J. R. Dispersion relation for electrostatic waves in plasmas with isotropic and anisotropic kappa distributions for electrons and ions. **Journal of Plasma Physics**, v. 83, n. 5, out. 2017.
- VASYLIUNAS, V. M. A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with ogo 1 and ogo 3. **Journal of Geophysical Research**, v. 73, n. 9, p. 2839–2884, maio 1968.
- LEUBNER, M. P. A nonextensive entropy approach to kappa-distributions. **Astrophysics and space science**, v. 282, n. 3, p. 573–579, nov. 2002.
- ABDUL, R. F.; MACE, R. L. A method to generate kappa distributed random deviates for particle-in-cell simulations. **Computer Physics Communications**, v. 185, n. 10, p. 2383–2386, out. 2014.