

## EVOLUÇÃO QUASELINEAR DE ONDAS E PARTÍCULAS EM UM SISTEMA FEIXE-PLASMA

HENRIQUE CERON DA SILVEIRA<sup>1</sup>; JOEL PAVAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Pelotas – dasilveirahc@gmail.com*

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Pelotas – joel.pavan@ufpel.edu.br*

### 1. INTRODUÇÃO

Uma parte muito importante no estudo do universo é o Plasma, considerado o quarto estado da matéria. O Plasma representa 99% da matéria do universo, embora no nosso planeta a quantidade seja pequena se comparado com os outros estados físicos da matéria. Fisicamente o plasma pode ser definido como “um gás ionizado onde predominam as interações coletivas de longo alcance” (interações eletromagnéticas).

Um fenômeno importante no estudo de plasmas é a interação feixe-plasma. O estudo da interação entre um feixe de elétrons e o plasma que o rodeia é de fundamental importância para a física de plasmas, seja no plasma de laboratório ou no plasma espacial. Uma das abordagens utilizadas neste estudo é a teoria de turbulência fraca que é utilizada para descrever a interação entre partículas e ondas de um sistema feixe-plasma. Tradicionalmente esta teoria é válida para um sistema fracamente instável, ou seja, quando o sistema feixe-plasma é composto por feixes de baixa intensidade, embora seja concebível considerar sistemas com feixes de intensidade elevada (BITTENCOURT (2013), YOON (2000); ZIEBELL, GAEZER, YOON (2001)).

### 2. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em duas partes, onde se trabalhou primeiramente nas equações que regem o comportamento do sistema em questão, ou seja, a evolução temporal das ondas e dos feixes.

A evolução das ondas do sistema é dada por

$$\frac{\partial I_k^{\sigma L}}{\partial t} = C_i^{\text{QL}} I_k^{\sigma L}$$

onde

$$C_i^{\text{QL}} = \pi \omega_{pe}^2 \frac{\sigma \omega_{pe}}{k} \int dv \delta(\sigma \omega_{pe} - kv) \frac{\partial f_e}{\partial v}$$

é o coeficiente de emissão induzida das ondas.

A evolução das partículas do sistema é dada por

$$\frac{\partial F_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial v} (D \frac{\partial F_e}{\partial v})$$

onde

$$D = \frac{\pi e_e^2}{m_e^2} \sum_{\sigma \pm 1} \int dk I_k^{\sigma L} \delta(\sigma \omega_{pe} - kv)$$

é o coeficiente de difusão.

O estado inicial do sistema é definido como

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

onde

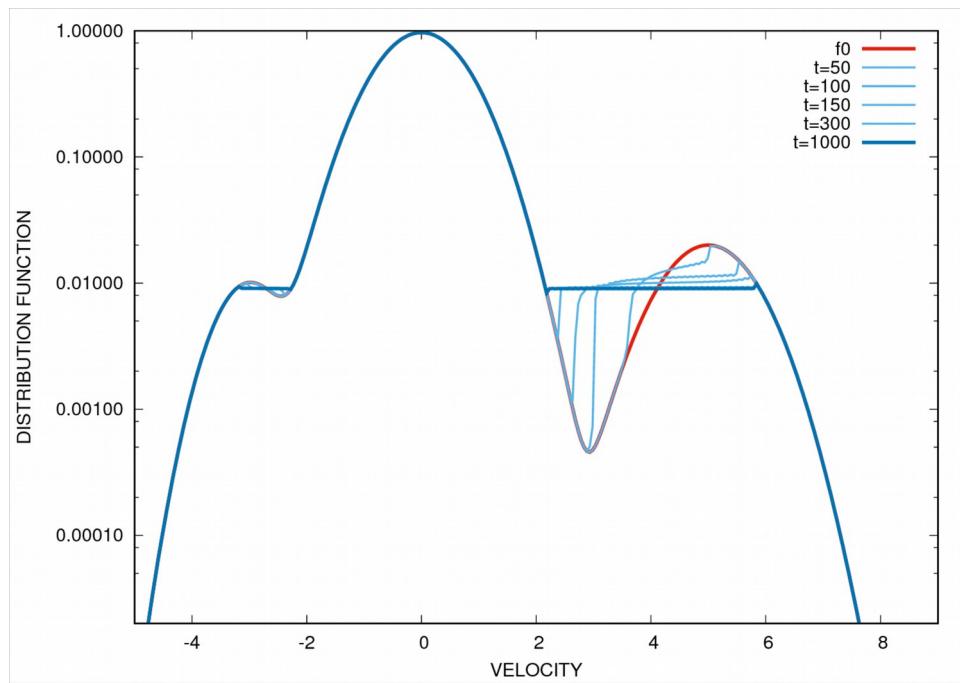
$$v_e = \frac{(n_b v_b - n_f v_f)}{(n - n_b - n_f)}$$

garante que o sistema não tenha deriva.

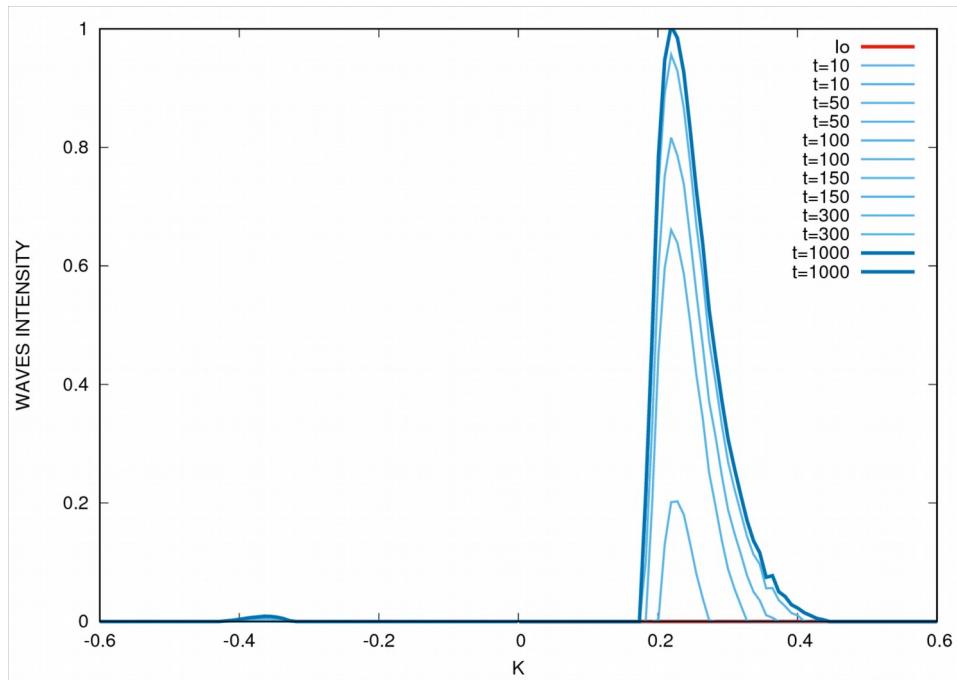
Após trabalhar as equações de evolução do sistema, de forma a satisfazer as necessidades do trabalho foi construído um código na linguagem Fortran, onde estas equações foram introduzidas, juntamente com modelos matemáticos e técnicas de programação, possibilitando assim criar uma simulação computacional para o sistema. Esta ferramenta se mostra muito útil dada a limitação em trabalhar com sistemas do tipo feixe-plasma experimentalmente. O sistema é composto basicamente por um plasma de fundo e dois feixes contraproagantes. Nesta simulação observamos o comportamento do sistema para diversas condições, onde variamos os parâmetros de densidade, temperatura, velocidade de deriva dos feixes, bem como também analisamos o sistema com apenas um feixe. Com a simulação pronta, foram colhidos os resultados apresentados neste trabalho.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observamos que a intensidade das ondas aumenta conforme aumentamos os parâmetros de densidade e velocidade de deriva dos feixes, conforme mostrado na Figura 2. E a evolução dos feixes está representada na Figura 1 deste resumo. Outros parâmetros também foram variados, como a temperatura, e o que se observa neste caso, é que aumentando a temperatura, o sistema evolui mais lentamente para o estado final.



**Figura 1:** Evolução temporal das partículas do sistema.



**Figura 2:** Evolução temporal das ondas do sistema.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos corroboram o esperado pela teoria quasilinear. As ondas crescem na região correspondente à derivada positiva da distribuição, e há a formação de um platô no estado final do sistema. Tais resultados são condizentes com o que se esperava quanto ao comportamento do sistema.

Os próximos passos do trabalho serão incluir os termos não lineares das equações e comparar os dados com os obtidos até agora.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTENCOURT, J.A. **Fundamentals of Plasma Physics**. Springer Science & Business Media, 2013.

### Artigo

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.