

## ACELERAÇÃO DE ELÉTRONS DEVIDO À TURBULÊNCIA DE LANGMUIR VIA SIMULAÇÃO POR PARTÍCULAS

Janileide Vieira Gomes<sup>1</sup>; Joel Pavan <sup>2</sup>; Fernando Jaques Ruiz Simões Junior<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>*Universidade Federal de Pelotas–fernando.simoes@ufpel.edu.br*

### 1. INTRODUÇÃO

Desde o início da exploração espacial, nos anos 60s, muitas informações, *in situ*, sobre as variações e a influência da atividade solar no meio interplanetário tornaram-se possíveis. A partir de então, tem sido, continuamente detectada a existência de partículas super térmicas no vento solar em diferentes regiões do espaço interplanetário (FELDMAN et al., 1975). A presença destas partículas mais energéticas são caracterizadas por uma modificação na função de distribuição de velocidades (FDV), que difere das FDV Maxwellianas, apresentando uma cauda mais energética. Para descrever fenomenologicamente esse comportamento, que era considerado insólito, Vasyliunas em 1968 (VASYLIUNAS, 1968) propôs uma função de distribuição na qual a variação das velocidades das partículas decai obedecendo uma lei de potência. Tais funções, são conhecidas como funções de distribuição do tipo kappa e apresentam boa correlação com os dados observacionais. No entanto, os mecanismos físicos responsáveis pela energização destas partículas, que se encontram na região das caudas da FDV ainda não são muito bem compreendidos.

A aceleração de partículas no meio interplanetário está relacionadas aos eventos solares eruptivos, principalmente explosões solares (flares) e ejeções coronais de massa (CMEs) (SCHERER, 2005). Estes eventos eruptivos podem dar origem a feixes de elétrons que se propagam a partir da superfície solar, estes feixes passam a interagir com o plasma ambiente do vento solar através de processos turbulentos e não lineares, que envolvem a geração e amplificação de ondas em plasmas devido aos processos de interações onda-partícula e onda-onda, podendo resultar na chamada turbulência de Langmuir (GURNETT et al. 1993).

A descrição dessas interações, em física de plasmas, é realizada considerando um sistema constituído por um plasma de fundo, com uma distribuição de equilíbrio, e, fazendo inserir nesta distribuição um feixe de elétrons com velocidade de deriva não nula. Este processo é denominado interação feixe-plasma. Os efeitos relacionados a essas interações e a consequente troca de energia entre as ondas e as partículas, podem ser observados no espaço de velocidades das partículas, devido à alteração na forma da função de distribuição de velocidades, tanto da função que caracteriza o plasma ambiente quanto da que caracteriza o feixe. O estudo dessas interações onda-partícula e onda-onda, considerando um feixe tênue, pode ser realizado considerando o formalismo da teoria da turbulência fraca (YOON, et al. 2006).

A proposta deste trabalho é simular a interação feixe-plasma, utilizando o método de simulação por partículas PIC (particle-in-cell) para analisar a evolução espaço temporal da função de distribuição de velocidades, ainda, busca-se verificar o índice espectral da função de distribuição do tipo kappa que melhor descreve os resultados obtidos pelas simulações, uma vez que os dados observacionais e resultados analíticos prevêem que as funções do tipo kappa seriam mais apro-

priadas para descreverem o estado final do processo de interação feixe-plasmas (YOON, et al. (2012), RYU, et al. (2007)).

## 2. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho é a técnica de simulação por partícula PIC (particle-in-cell), que consiste na solução numérica das equações que descrevem o movimento individual de cada partícula do plasma (WINSKE, 1996). Nesse modelo, o plasma é representado por um grande número de partículas electricamente carregadas e macroscopicamente neutro; as partículas são distribuídas sobre uma grade de simulação discretizada; cujos movimentos são calculados para cada partícula do plasma, considerando a influência dos campos eletromagnéticos auto-consistentes (BIRDSALL, 2004). As simulações são executadas, utilizando o código de partículas eletromagnético KEMPO 1D (Kyoto university's ElectroMagnetic Particle cOde), que resolve, numericamente, as equações de movimento de Newton-Lorentz e as equações de Maxwell de forma auto-consistente (OMURA; MATSUMOTO, 1993).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar as simulações definimos uma grade espacial de comprimento  $4096\lambda_{De}$ , e espaçamento  $dx=2\lambda_{De}$ , onde  $\lambda_{De}$  é o comprimento de Debye, definido na simulação através da razão entre a velocidade térmica,  $v_{the}$ , e a frequência de plasma,  $\omega_{pe}$ , isto é,  $\lambda_{De} = v_{the}/\omega_{pe}$ . A simulação é realizada durante 1048576 passos temporais, onde cada passo é dado por  $dt=0,02\omega_{pe}^{-1}$ . O plasma ambiente é representado na simulação por 2400 partículas por ponto na grade e o feixe por 24 partículas por ponto na grade, totalizando 4964352 partículas no sistema de simulação, sendo a densidade de partículas do feixe,  $n_b$ , 1% da densidade de partículas do plasma ambiente,  $n_e$ . Os íons participam apenas da neutralidade de cargas do sistema, sendo sua dinâmica desconsiderada na simulação. O campo magnético externo não foi considerado na simulação. A velocidade de deriva do feixe  $v_d$  é  $3,68 v_{the}$ , e a razão entre as temperaturas feixe-plasma é  $T_b/T_p=1$ , definidas na simulação a partir da velocidade térmica,  $v_{the}=0,5$ . O parâmetro  $g$  de plasma, que caracteriza o efeito discreto das partículas na simulação é dado por  $g=1/n_e\lambda_{De}^3=5,2 \times 10^{-5}$ .

O resultado da interação feixe-plasma para o sistema descrito acima é apresentado na Figura(1a), a qual mostra a variação da função de distribuição de velocidades das partículas em relação a componente  $v_x$  das velocidades das partículas, normalizadas na simulação pela velocidade térmica. No instante inicial da simulação tanto o feixe quanto o plasma ambiente possuem distribuições de velocidades Maxwellianas, representadas na figura pela linha preta. O plasma ambiente é representado pela distribuição centralizada em  $v_x/V_{the}=0$  e o feixe pela distribuição centralizada na velocidade de deriva. Os estágios intermediários do processo de interação são representados pelas linhas vermelhas, e a função de distribuição de velocidades ao final da simulação é representada pela linha em azul.

O diagrama que representa a relação de dispersão, Fig.(1b), mostra que o espectro emitido durante o processo de interação é o modo de Langmuir. A

frequência e o número de onda são normalizados na simulação pela frequência de plasma,  $\omega_{pe}$ , e pela velocidade da luz,  $c$ , respectivamente.

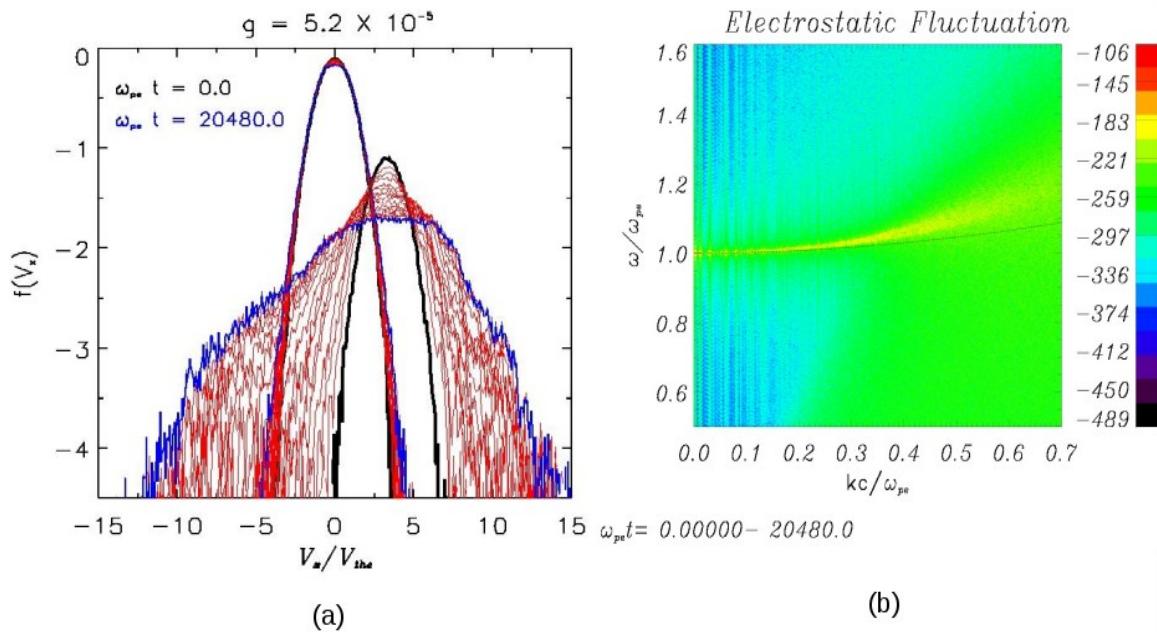


Figura 1: Resultado da interação feixe-plasma via simulação PIC, no qual observa-se a (a) formação da cauda super térmica na função de distribuição de velocidades. (b) Diagrama da relação de dispersão para a componente  $E_x$  do campo elétrico.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho simulamos a interação feixe-plasma utilizando o método de simulação PIC. Este método conserva o efeito discreto das partículas na simulação, assumindo que o parâmetro  $g$  de plasma possui um valor pequeno, porém finito. Esse parâmetro, com valor finito, está diretamente relacionado com a formação das caudas super térmicas na função de distribuição conforme mostrado por (Yoon; Rhee; Ryu (2005)). O resultado final do processo de interação, apresentado na Figura (1a) mostra que a função de distribuição de velocidades das partículas apresenta uma configuração que difere das funções de distribuição Maxwellianas, sendo melhor ajustadas pelas funções do tipo kappa (YOON, et al. (2012), RYU, et al. (2007)). A partir da Fig.(1a) observa-se, ainda, que a população de partículas energéticas que formam a cauda super térmica na função de distribuição de velocidades é basicamente composta pelas partículas do feixe. Isso implica que durante o processo de interação as partículas do feixe ganham mais energia do que as partículas do plasma ambiente. No entanto, os mecanismos responsáveis pela energização destas partículas ainda não é completamente compreendido. A próxima etapa do trabalho será implementar nos diagnósticos uma função kappa teórica a fim de encontrar o índice espectral kappa que melhor se ajusta ao resultado final da função de distribuição de velocidades, conjuntamente, buscamos um melhor detalhamento sobre os processos físicos que ocorrem durante a evolução do sistema.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FELDMAN, W. C.; ASBRIDGE, J.R.; BAME, S.J.; MONTGOMERY, M.D.; GARY, S. P. Solar Wind Electrons. **Journal of Geophysical Research**, v.80, n.31, p.4181-4196, 1975.
- 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, 1968.
- SCHERER, K.; Fichtner, H.; Heber, B., Mall, U. **Space Weather: The physics behind a slogan**. New York: Springer Science & Business Media, 2005. Vol. 656
- GURNETT, D. A.; HOSPODARSKY, G. B.; KURTH, W. S.; WILLIAMS, D. J.; BOLTON, S. J. Fine Structure of Langmuir Waves Produced by a Solar Electron Event. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.98, n.A4, p.5631-5637, 1993.
- YOON, P. H.; RHEE, T.; RYU, C. Self-Consistent Formation of Electron  $\kappa$  Distribution: 1. Theory. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.111, n.A9, 2006.
- YOON, P. H.; ZIEBELL, L. F.; GAELZER, R.; LIN, R. P.; WANG, L. Langmuir Turbulence and Suprathermal Electrons. **Space Science Reviews**, v.173, n.1-4, p.459-489, 2012.
- RYU, C. M.; RHEE, T.; UMEDA, T.; YOON, P. H.; OMURA, Y. (2007). Turbulent Acceleration of Superthermal Electrons. **Physics of Plasmas**, v.14, n.10, p.100701, 2007.
- WINSKE, D.; OMIDI, N. A Nonspecialist's Guide to Kinetic Simulations of Space Plasmas. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.101, n.A8, 1996.
- BIRDSALL, C. K.; LANGDON, A. B. **Plasma physics via computer simulation**. Philadelphia: Institute of Physics Publishing Bristol, 2004.
- OMURA, Y.; MATSUMOTO, H. KEMPO1: Technical Guide to One-Dimensional Electromagnetic Particle Code. In: MATSUMOTO, H.; OMURA, Y. (Ed.). **Computer Space Plasma Physics: Simulation Techniques and Software**. [S.I.]: Terra  
Scientific Publishing Company TERRAPUB, 1993.
- YOON, P. H.; RHEE, T.; RYU, C. M.. Self-Consistent Generation of Superthermal Electrons by Beam-Plasma Interaction. **Physical review letters**, v.95 n.21, 2005.