

## SIMULAÇÕES PIC DE PLASMAS COM FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DO TIPO KAPPA

ANDREW WELVIS SILVA DE OLIVEIRA<sup>1</sup>; FERNANDO JAQUES RUIZ SIMÕES JUNIOR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – andrew.welvis@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – fernando.simoes@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

Funções de distribuição de velocidades do tipo kappa (FDVs- $\kappa$ ) têm se tornado cada vez mais importantes em física de plasmas espaciais. Após VASYLIUNAS (1968) introduzir uma expressão empírica para descrever dados observacionais, numerosos estudos sobre a coroa solar, vento solar e magnetosferas planetárias têm sido realizados utilizando FDVs- $\kappa$  para a análise e ajustes numéricos destes dados.

As FDVs- $\kappa$  apresentam caudas supertérmicas, em que a variação de velocidades decai seguindo uma lei de potência. Basicamente, grande parte da teoria de propagação de ondas em plasmas foi desenvolvida utilizando funções de distribuição de velocidades Maxwellianas. Entretanto, resultados recentes de observações de funções de distribuição de velocidades no meio interplanetário mostram que tais funções são melhor representadas pela família de FDVs- $\kappa$ . MAKSIMOVIC et al. (2005) apresenta dados observacionais para diferentes distâncias do meio interplanetário, mostrando assim, que ocorre um aumento na densidade de partículas com velocidades supertérmicas que é proporcional a distância radial a partir do Sol.

SUMMERS; THORNE (1991) utilizaram uma função do tipo kappa para estudar instabilidades em plasmas, como conclusão de seu trabalho propuseram uma função de dispersão de plasma modificada. Nessa proposta, quando o índice espectral  $\kappa$  tende a infinito, tal relação de dispersão recai na relação de dispersão de plasmas de FRIED; CONTE (1961). Na relação de dispersão modificada de SUMMERS; THORNE (1991) o índice espectral  $\kappa$  só podia assumir valores inteiros, tal problema foi resolvido por MACE; HELLBERG (1995), no qual propuseram uma relação de dispersão em que o índice espectral  $\kappa$  pode assumir qualquer valor real. A função de distribuição do tipo kappa (FDV- $\kappa$ ) de Summers e Thorne, possui a velocidade térmica  $\theta$  dada por  $\theta^2 = [(2\kappa - 3)/\kappa](k_B T_s/m_s)$ , nos quais  $T_s$  e  $m_s$  são a temperatura e massa da espécie  $s$ , respectivamente, e  $k_B$  a constante de Boltzmann. A FDV- $\kappa$  de Summers e Thorne é escrita como:

$$f(\vec{v}) = \frac{N}{(\pi\kappa\theta^2)^{3/2}} \frac{\Gamma(\kappa + 1)}{\Gamma(\kappa - 1/2)} \left(1 + \frac{v^2}{\kappa\theta^2}\right)^{-(\kappa+1)},$$

sendo  $N$  o número da densidade das partículas e  $\Gamma$  a função Gamma. O índice espectral  $\kappa$  na FDV- $\kappa$  de Summers e Thorne pode assumir valores no intervalo  $3/2 < \kappa < \infty$ , quando  $\kappa \rightarrow \infty$  a FDV- $\kappa$  recai em uma função do tipo Maxwelliana.

LEUBNER (2002) a procura de uma justificativa teórica para o uso das FDVs- $\kappa$ , relaciona as funções de distribuições de velocidades obtidas a partir da entropia generalizada de TSALLIS (1988) e funções de distribuições de velocidades fornecidas em plasmas espaciais, propondo assim, uma das FDVs- $\kappa$  amplamente utilizada em ajustes para dados de plasmas espaciais. A FDV- $\kappa$  de Leubner é escrita como:

$$f(\vec{v}) = \frac{N}{(\pi \kappa v_{th}^2)^{3/2}} \frac{\Gamma(\kappa)}{\Gamma(\kappa - 3/2)} \left(1 + \frac{v^2}{\kappa v_{th}^2}\right)^{-\kappa}.$$

No qual  $v_{th}$  é a velocidade térmica, dada por  $v_{th}^2 = 2k_B T_s / m_s$ . Nesta função de distribuição de velocidades o índice espectral  $\kappa$  pode assumir valores no intervalo  $5/2 < \kappa < \infty$ , quando  $\kappa \rightarrow \infty$  a FDV- $\kappa$  recai em uma função do tipo Maxwelliana.

Neste trabalho, simulações computacionais serão realizadas para investigar os modos de propagação em plasmas utilizando FDVs- $\kappa$ . Especificamente, serão realizadas simulações para plasmas isotrópicos descrito pelas FDVs- $\kappa$  propostas por SUMMERS; THORNE (1991) e LEUBNER (2002), plasmas anisotrópicos com FDVs- $\kappa$  propostas por LIVADIOTIS (2015).

## 2. METODOLOGIA

Para introduzir as FDVs- $\kappa$  utilizamos o método proposto por ABDUL; MACE (2014), onde foi possível gerar valores aleatórios seguindo uma função de distribuição de velocidades kappa unidimensional. Neste método, utiliza-se a função de distribuição t-student multiderivativa para gerar valores aleatórios que serão utilizados para o início da simulação PIC.

Para produzir aleatoriamente os valores das velocidades das partículas cuja modulação seja uma função de distribuição de velocidades do tipo kappa (FDV- $\kappa$ ) utilizamos o software Octave (EATON et al. 2017), que possui um pacote chamado STATISTICS que incorpora nativamente a função de distribuição t-student multiderivativa, essa função gera os valores aleatórios das componentes de velocidade que serão introduzidas no código de simulação como as velocidades iniciais das partículas.

As simulações foram realizadas utilizando o método PIC. Este método consiste em acompanhar o movimento individual de um grande número de partículas carregadas, que representam o plasma, resolvendo as equações de movimento e dos campos eletromagnéticos de forma autoconsistente. Este tipo de simulação desempenha um papel significativo na interpretação de efeitos cinéticos altamente não lineares, tais como instabilidades em ondas em plasmas, difusão, aquecimento e aceleração de partículas.

Para a realização das simulações foi utilizado o código de partículas eletromagnético KEMPO1 (Kyoto university's ElectroMagnetic Particle cOde) de OMURA; MATSUMOTO (1993). No código, resolve-se numericamente as equações de movimento de Newton-Lorentz para obter as posições e velocidades das partículas, e as equações de Maxwell para calcular os campos eletromagnéticos de forma autoconsistente.

O código foi alterado para iniciar a simulação com as FDVs- $\kappa$  como as velocidades iniciais das partículas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um dos modos fundamentais de propagação em plasmas é o modo de Langmuir. O modo de Langmuir é um modo eletrostático de alta frequência. Em um plasma descrito por uma função de distribuição de velocidades Maxwelliana é dado por:

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 \left(1 + \frac{3}{2} k^2 \lambda_{De}^2\right).$$

No qual  $\omega_{pe}$  é a frequência de plasma e  $\lambda_{De}$  o comprimento de Debye. Ao considerar a FDV- $\kappa$  de Summers e Thorne, o modo de Langmuir não sofre

alteração, ou seja, é o mesmo quando se considera uma função de distribuição de velocidades Maxwelliana. Já ao considerar a FDV- $\kappa$  de Leubner, o modo de Langmuir sofre alteração, passando a depender do índice espectral  $\kappa$ , sendo dado por:

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

As simulações foram realizadas para plasmas descritos por FDVs- $\kappa$  isotrópicas. Nas quais utilizamos um sistema com comprimento  $L = 4096\lambda_{De}$ , onde o espaçamento de grade é dado por  $\Delta x = 2\lambda_{De}$ . Todas as frequências e velocidades são normalizadas pela frequência de plasma e velocidade térmica dos elétrons, respectivamente. Cada simulação é realizada durante 16384 passos temporais, onde cada passo é dado por  $\Delta t = 0,02\omega_{pe}^{-1}$ , o sistema evolui até  $\omega_{pe}t = 327,68$  períodos de plasmas. Consideramos que a temperatura dos elétrons é igual a temperatura dos íons, velocidade térmica igual a 1,25% da velocidade da luz, e 2048 superpartículas por ponto na grade. Os íons são mantidos fixos durante toda a simulação e participam apenas da neutralidade de carga do sistema.

As simulações foram realizadas para valores do índice espectral  $\kappa$  frequentemente observados no vento solar e na magnetosfera terrestre. No primeiro caso consideramos um plasma descrito pela função de distribuição de velocidades de Summers e Thorne. No segundo caso consideramos um plasma descrito pela função de distribuição de velocidades de Leubner. Em ambos os casos apresentamos o resultado para  $\kappa = 5$ .

O diagrama de dispersão  $\omega \times k$  representado na Figura 1 apresenta o comportamento dos modos de propagação no plasma, para a componente  $x$  do campo elétrico. Acrescentamos nos gráficos curvas para representar as previsões teóricas para o modo de Langmuir quando se considera uma função de distribuição de velocidades Maxwelliana, curva pontilhada, e ao considerar a FDV- $\kappa$ , curva sólida.

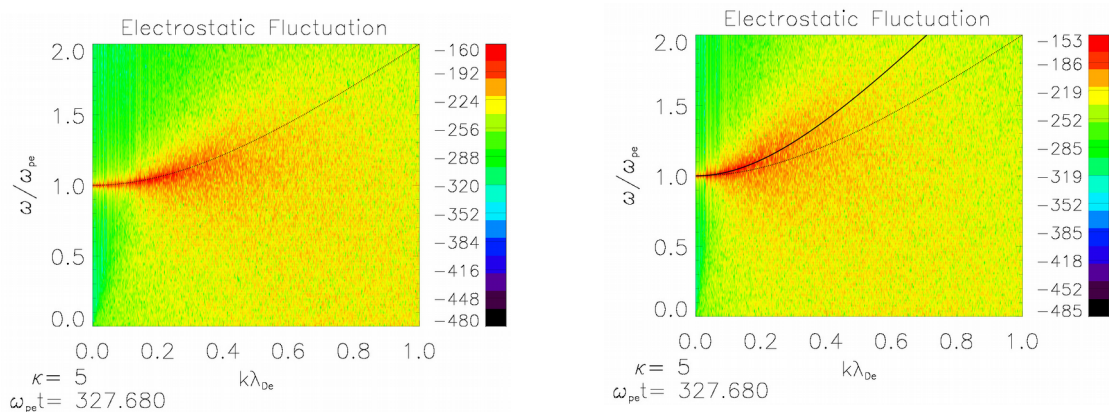


Figura 1. Relação de dispersão para o primeiro caso apresentado pelo gráfico ao lado esquerdo, e para o segundo caso no gráfico ao lado direito .

#### 4. CONCLUSÕES

Apresentamos simulações realizadas utilizando o código KEMPO1, para casos relativísticos, com plasmas isotrópicos descritos pelas FDVs- $\kappa$ , podemos observar que os resultados para os dois casos apresentam uma clara diferença em seus modos de propagação para ondas de altas frequências, nas quais, utilizamos a FDV t-student para gerar os valores de velocidades aleatoriamente

seguindo as FDVs- $\kappa$  abordadas. Além dos casos isotrópicos, foi possível obter os algoritmos para gerar as FDVs- $\kappa$  anisotrópicas nas quais ainda serão realizadas simulações abordando esses casos.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.l.]: Terra Scientific Publishing Company, 1993. Cap. 2, p. 21–65.

ABDUL, R.; MACE, R. A method to generate kappa distributed random deviates for particle-in-cell simulations. **Computer Physics Communications**, Elsevier, v. 185, n. 10, p. 2383-2386, 2014.

LEUBNER, M. P. A nonextensive entropy approach to kappa-distributions. **Astrophysics and space science**, Springer, v. 282, n. 3, p. 573–579, 2002.

TSALLIS, C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. **Journal of statistical physics**, Springer, v. 52, n. 1-2, p. 479–487, 1988.

LIVADIOTIS, G. Introduction to special section on origins and properties of kappa distributions: Statistical background and properties of kappa distributions in space plasmas. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 120, n. 3, p. 1607–1619, 2015.

MACE, R.; HELLBERG, M. A dispersion function for plasmas containing superthermal particles. **Physics of Plasmas**, AIP Publishing, v. 2, n. 6, p. 2098-2109, 1995.

MAKSMOVIC, M.; ZOUGANELIS, I.; CHAUFRAY, J. Y.; ISSAUTIER, K.; SCIME, E.; LITTLETON, J.; MARSCH, E.; MCCOMAS, D.; SALEM, C.; LIN, R. Radial evolution of the electron distribution functions in the fast solar wind between 0.3 and 1.5 AU. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 110, n. A9, 2005.

SUMMERS, D.; THORNE, R. M. The modified plasma dispersion function. **Physics of Fluids B: Plasma Physics**, AIP, v. 3, n. 8, p. 1835–1847, 1991.

FRIED, B. D.; CONTE, S. D. Book. The plasma dispersion function. [S.l.]: N.Y. : Academic Press, 1961.

TSALLIS, C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. **Journal of statistical physics**, Springer, v. 52, n. 1-2, p. 479–487, 1988.

VASYLIUNAS, V. M. A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with OGO1 and OGO3. **Journal of Geophysical Research**, Wiley Online Library, v. 73, n. 9, p. 2839-2884, 1968.

EATON, J. W.; BATEMAN, D.; HAUBERG, S.; WEHBRING, R.; OCTAVE, G. **GNU Octave: Scientific Programming Language**. 2017. Acessado em 23 jul. 2017. Online. Disponível em: <https://www.gnu.org/software/octave/>.