

APROXIMAÇÃO DE HARMÔNICOS ELETROSTÁTICOS EM PLASMAS ESPACIAIS VIA SIMULAÇÕES DE PARTÍCULAS

**KARINA AKEMI VARGAS YASSUNAKA¹; FERNANDO JAQUES RUIZ SIMÕES
JUNIOR.²**

¹*Universidade Federal de Pelotas – karina-vargas3@hotmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – fernando.simoes@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

A matéria que compõe o Universo é classificada em quatro estados: sólido, líquido, gás e plasma. A força de ligação entre as partículas que constituem uma substância difere de um estado para outro, ou seja, o equilíbrio entre a energia térmica ou cinética da partícula e a energia das forças de ligação determinam o estado da matéria (BITTENCOURT, 2004). Dessa maneira, o plasma é considerado um gás ionizado pois, após fornecer bastante energia a um gás atômico, uma fração crescente de átomos possuirá energia cinética suficiente para superar a energia de ligação do elétron da camada de valência formando, assim, um íon.

O fenômeno de plasma pode ocorrer na natureza em diversos locais como, por exemplo, em eventos solares transientes dentre os quais pode-se destacar as explosões solares (“flares”) e ejeções de massa coronal (CMEs – “Coronal Mass Ejections”). O estudo sobre estes eventos são de suma importância, uma vez que são responsáveis por falhas em sistemas de navegação (GPS – “Global Positioning System”), equipamentos de comunicação (satélites) além de apresentar perigo para astronautas devido à exposição às partículas energéticas provenientes destes eventos.

As explosões solares são caracterizadas pela liberação repentina de energia (feixes de partículas energéticas) no meio interplanetário que aquece o plasma local e, conseqüentemente, acelera as partículas. Assim, são produzidas intensas emissões de radiação eletromagnética.

As explosões solares são classificadas em cinco tipos, sendo a Emissão Solar Tipo III o interesse deste trabalho. A Figura 1 (GOLDMAN, 1984) representa esquematicamente o cenário de uma emissão solar tipo III. O feixe de elétrons provenientes do Sol, resultado da liberação de energia durante uma erupção solar (GOLDMAN, 1984), propaga-se radialmente a partir do Sol ao longo das linhas de campo magnético. Este feixe, ao entrar em contato com o plasma ambiente do vento solar, induz ondas de Langmuir e radiação eletromagnética com frequências próximas à frequência de plasma local e harmônicos (GURNETT et al., 1993; LIN et al., 1986).

Neste trabalho, foram realizadas simulações computacionais a fim de investigar a interação não linear de múltiplos feixes de elétrons de densidades diferentes com um plasma ambiente. Nas simulações, foi utilizado um código de partículas (PIC – “Particle in Cell”) unidimensional, KEMPO1 (Kyoto university’s ElectroMagnetic Particle cODE) (OMURA MATSUMOTO, 1993), em sua versão modificada para suportar múltiplas injeções de feixes de elétrons (SIMÕES JR., 2008; SIMÕES JR. et al., 2010).

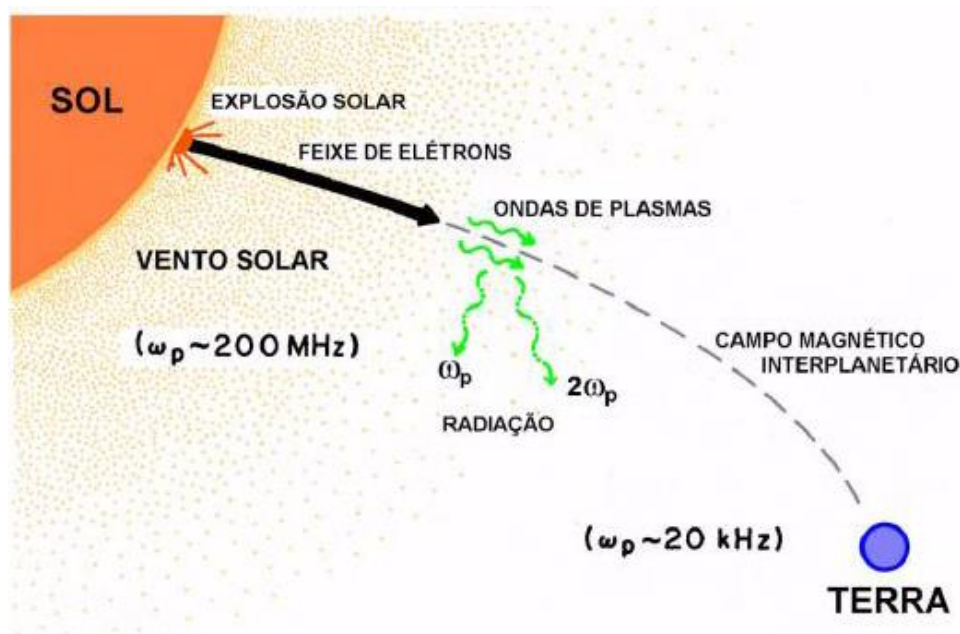


Figura 1: Representação esquemática da geração de ondas de Langmuir e emissão de ondas de rádio do tipo III.

2. METODOLOGIA

Uma das principais vantagens de utilizar simulações computacional é a geração de informações detalhadas sobre os fenômenos físicos que ocorrem no meio interplanetário e, como consequência, é possível fazer a investigação de fenômenos lineares e não lineares. Diferentes estruturas de plasmas espaciais observadas no meio interplanetário, provenientes dos fenômenos solares transientes e do vento solar (FORBES, 2000), podem ser investigadas a partir de simulação computacional.

Neste trabalho, foi utilizado um código de simulação chamado KEMPO1, que é um código do tipo PIC modificado para receber múltiplas injeções de feixes de partículas. Além disso, ele é constituído por sub-rotinas, que resolve as equações de Maxwell e a equação de movimento das partículas de forma autoconsciente, ou seja, considera-se os campos externos aplicados e os campos gerados pelo movimento das partículas.

O instante inicial da simulação, $t = 0$, foi considerado aquele no qual o primeiro feixe é injetado no sistema (plasma de fundo). Este feixe é responsável por perturbar o estado de equilíbrio e induzir ondas de Langmuir. Em seguida, foi injetado o segundo feixe com parâmetros pré definidos e a simulação evoluiu até o sistema atingir o estado de equilíbrio dinâmico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A escolha dos parâmetros utilizados nas simulações são baseadas em dados observacionais característicos do meio interplanetário e estão apresentados na Tabela 1, em sua forma normalizada. Para cada simulação, a densidade do segundo feixe em relação ao primeiro foi variada a fim de se obter um feixe cada vez mais denso e investigar a aproximação de harmônicos eletrostáticos gerados.

Para realizar as simulações, foi considerado um sistema com tamanho $L = 2048\lambda_D$, onde λ_D é o comprimento de Debye, e o espaçamento da grade foi

definido como $\Delta x = 1,0 \lambda_D$. As simulações foram executadas em um total de 16384 passos temporais, com $\Delta t = 0,02 \omega_{pe} t^1$. Após a injeção do segundo feixe, a simulação evoluiu num total de $\omega_{pe} t = 327,68$ períodos de plasmas.

Parâmetros	Plasma de Fundo	1º Feixe	2º Feixe		
			1ª Simulação	2ª Simulação	3ª Simulação
ω_p	1,0	0,35	0,175	0,28	0,385
q/m	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
V_{pe}	1,0	2,54	2,54	2,54	2,54
V_{pa}	1,0	2,54	2,54	2,54	2,54
V_D	0,1	7,5	7,5	7,5	7,5
PCH	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
np	512 x 2048	256 x 2048	256 x 2048	256 x 2048	256 x 2048

Tabela 1: Parâmetros de entrada definidos para o caso padrão e para o segundo feixe nas três simulações.

Na tabela acima, ω_p é a frequência de plasma, q/m é a razão de carga e massa, V_{pe} e V_{pa} são as velocidades térmicas perpendicular e paralela, respectivamente, V_D é a velocidade de deriva, PCH é o ângulo de arremesso e np é o número de partículas de cada espécie que constitui o plasma. Os parâmetros pré definidos satisfazem a condição de Courant-Fredericks-Lewis (CFL) $\Delta x > c \Delta t$ juntamente com a condição $\Delta x \leq 3 \lambda_D$ (BIRDSALL; LANGDON, 1991), onde c é a velocidade da luz no vácuo.

A Figura 2 apresenta as relações de dispersão, diagrama $\omega \times k$, para dois casos estudados, o primeiro, chamado caso padrão no qual é considerado somente o 1º feixe e o segundo caso, chamado 2º simulação. Os resultados mostram que o primeiro feixe de elétrons é responsável em introduzir ondas de Langmuir e harmônicos destas ondas no sistema, via instabilidade feixe-plasma, (Figura 2a). Após a injeção do segundo feixe, (Figura 2b), podemos observar que os harmônicos tem suas velocidades de grupo e fase modificadas, implicando em uma aproximação relativa entre os mesmos.

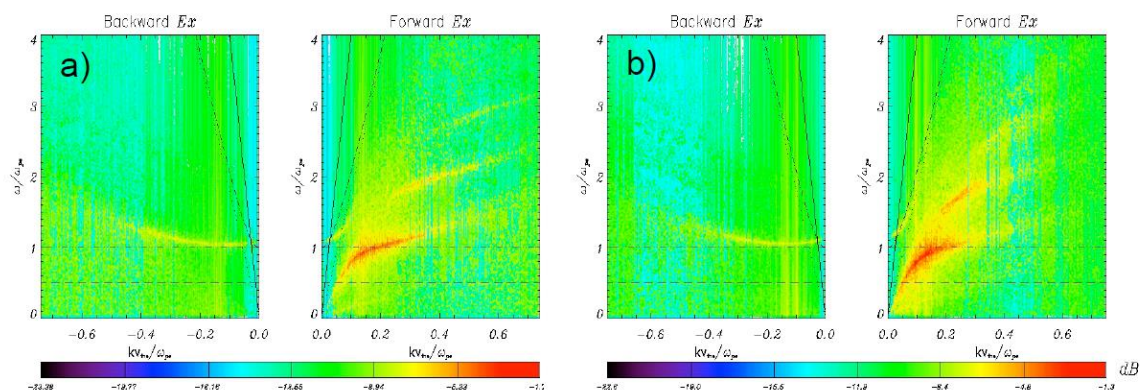


Figura 2: Relação de dispersão obtida a partir da componente "x" do campo elétrico. Quadro a) representa as ondas com propagação para frente (forward) e para trás (backward) num sistema com um único feixe. O quadro b) apresenta os resultados para o sistema incluindo o segundo feixe de elétrons durante a simulação.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foram realizadas simulações computacionais de plasmas espaciais via código de partículas (PIC-Codes). Foram considerados diferentes conjuntos de parâmetros. Em um primeiro momento, um feixe de partículas foi injetado em um plasma ambiente, esse processo reproduz o primeiro estágio da emissão eletrostática. No segundo momento, foram considerados feixes com diferentes densidades eletrônicas, isto é, diferentes frequências de plasma. A fim de se obter o efeito efetivo da densidade, todos os outros parâmetros foram mantidos constantes para as diferentes simulações. A partir dos resultados podemos verificar que a aproximação dos harmônicos está relacionada com as variações das velocidades de grupo e fase dos modos de propagação, já que estas são dependentes das densidades eletrônicas do meio. Ainda serão apresentados outros resultados para os diferentes feixes de elétrons apresentados na Tabela 1.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTENCOURT, J. A. Introduction. In: BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics**. New York: Springer, 2004. Cap. 1, p. 1-32.

BIRDSALL, C. K.; LANGDON, A. B. **Plasma Physics via Computer Simulation**. 2. ed. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1995.

FORBES, T. G. A review on the genesis of coronal mass ejections. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 23153, 2000.

GOLDMAN, M. V. Strong turbulence of plasma waves. **Reviews of Modern Physics**, v. 56, n. 4, p. 709-735, Oct. 1984.

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. A 4, p. 5631–5637, Apr. 1993.

LIN, R. P.; LEVEDAHL, W. K.; LOTKO, W.; GURNETT, D. A.; SCARF, F. L. Evidence for nonlinear wave-wave interactions in solar type III radio bursts. **The Astrophysical Journal**, v. 308, n. 2, p. 954–965, Sept. 1986.

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 (TERRAPUB), 1993.

SIMÕES JR., F. J. R. **Simulação Computacional de Emissões Eletromagnéticas em Plasmas Espaciais**. Tese (Doutorado) — INPE - 15344-TDI/1380, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Maio 2008.

SIMÕES JR., F.J.R.; ALVES, M. V.; GAELZER, R. One-dimensional electromagnetic simulation of multiple electron beams propagating in space plasmas. **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 115, p. A06105, June 2010.