

INPE-5396-PRP/166

**II MISSÃO DE TRABALHO AO "LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES GAZ ET
DES PLASMAS" DA "UNIVERSITÉ PARIS-SUD**

Maria Virgínia Alves

**INPE
São José dos Campos
1992**

**SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-5396-PRP/166

**II MISSÃO DE TRABALHO AO "LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES GAZ ET
DES PLASMAS" "UNIVERSITÉ PARIS-SUD**

Maria Virgínia Alves

**Projeto de Estudo de Ondas e Turbulências em Plasmas
Acordo CAPES-COFECUB 118/90**

**INPE
São José dos Campos
1992**

CDU: 533.9

**Palavras-chave; Propagação de ondas; Simulação por
partículas; Interação feixe-plasma**

RELATÓRIO DE VIAGEM

II MISSÃO DE TRABALHO AO "LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES GAZ ET DES PLASMAS" DA "UNIVERSITÉ PARIS SUD"

Período: 21/02/92 a 21/03/92

Projeto de Estudo de Ondas e Turbulências em Plasmas

Acordo CAPES-COFECUB 118/90

Maria Virginia Alves

Laboratório Associado de Plasma - LAP

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Introdução

Este relatório descreve as atividades desenvolvidas junto ao "Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP)" da "Université Paris Sud", como parte da missão de trabalho realizada no período de 21 de fevereiro à 21 de março de 1992, dentro do Projeto de Estudo de Ondas e Turbulências em Plasmas, Acordo CAPES/COFECUB 118/90.

Durante este período deu-se continuidade ao estudo, via simulação computacional, de ondas "whistlers" geradas por interação feixe-plasma e sua posterior evolução. Verificou-se a validade do código computacional para a modelização do problema, com resultados positivos, e trabalhou-se na determinação de parâmetros de entrada para a simulação do que ocorre no experimento de ondas "whistlers" do LPGP.

Atividades desenvolvidas

- Várias discussões científicas com os Drs. Gilles Mathieussent, Catherine Krafft e Bertrand Lémège.
- Comparecimento a duas defesas de tese de doutorado:
 - "Resolution Numérique des Equations de la MHD -Application a une colonne de plasma dense optiquement épais en expansion."
 - "Etude d'une décharge micro-onde créée par onde de surface à 433 MHz dans les melanges oxygene-azote in flux." (D. Chereau)
- Resolução numérica da equação de dispersão para um plasma frio; verificação da dependência dos parâmetros ω_{ce}/ω_{pe} e ângulo de propagação; determinação numérica das frequências (números de onda) da interação feixe-plasma.

Detalhamento das atividades científicas

Interações feixe-plasma ocorrem muito frequentemente em plasmas espaciais, gerando vários tipos de ondas ¹. O modo "whistler, entre outros, têm sido observado em conexão com a presença de feixe de elétrons, por satélites e equipamentos de solo. Na tentativa de melhor compreender estas observações, vários trabalhos têm sido realizados tanto experimentais (no espaço ² e no laboratório ³) quanto teóricos ^{4,5}. Dentro do LPGP existe em funcionamento um experimento que visa estudar a geração de ondas "whistlers" através da interação de um feixe de elétrons com um plasma magnetizado ⁶. Para complementar o estudo experimental, um código computacional via partículas foi implementado.

Em linhas gerais, o código caracteriza-se pelo seguinte:

- usa técnicas padrões de simulação por partículas ^{7,8}.
- unidimensional; a posição das partículas é avançada apenas em uma direção, a mesma do campo elétrico longitudinal, que é obtido através da equação de Poisson ($\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0$ com $\vec{E} = -\nabla \phi$).
- velocidades (momentum) nas tres direções obtidas através da equação de Lorentz:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E} + \frac{q}{mc} \left(\frac{\vec{p}}{\gamma} \times \vec{B} \right)$$

$$\text{onde } \vec{p} = \gamma \vec{v} / c \text{ e } \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2}$$

- os campos magnético e elétrico transversal são obtidos resolvendo-se duas das equações de Maxwell com efeitos relativísticos incluídos:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t};$$

a variação temporal é colocada em forma de diferenças finitas e os campos são avançados a intervalos de Δt ; as variações espaciais são resolvidas usando transformadas de Fourier, com condições de contorno periódicas.

- os parâmetros que caracterizam o sistema, tais como densidade do plasma, temperatura, campo magnético externo, relação entre as frequências de plasma e elétron-ciclotrônica são fornecidos como dados de entrada.
- resultados são obtidos em forma de gráficos ou de valores numéricos que são posteriormente tratados para a obtenção de gráficos (otimização do uso do computador). Obtém-se ao final de cada rodada gráficos tais como: variação espacial da densidade, potencial, campo elétrico, temperatura, velocidade (sob a forma de espaço de fase), em instantes de tempo pré-estabelecidos, além da evolução temporal das energias cinética, magnética, elétrica e total do sistema.
- 4 espécies de partículas podem ser utilizadas neste código: elétrons que caracterizam o plasma, elétrons que compõem o feixe e até 2 espécies de íons, se for necessário. Os íons podem ser mantidos imóveis ou não, dependendo do fenômeno que se deseja estudar; sua presença garante a neutralidade do plasma.

De modo a efetuar a validade do código, efetuou-se uma simulação de um sistema feixe-plasma com as seguintes características:

$v_{th} = 0.04c$, velocidade térmica.

$v_{th//} = v_{th}$, velocidade térmica na direção paralela ao campo magnético externo, \vec{B}_0 .

$\frac{n_b}{n} = 0.1$, razão entre a densidade do feixe e a do plasma.

$v_{th\perp} = 6v_{th}$, velocidade térmica na direção perpendicular a \vec{B}_0 .

$\frac{\omega_{pe}}{\omega_{ce}} = 10$, razão entre a frequência eletrônica de plasma e a elétron ciclotrônica.

$\frac{v_b}{v_{th}} = 2$, velocidade do feixe.

A função de distribuição em $t=0$ é dada pela seguinte expressão:

$$f_0 = \frac{n_0}{(2\pi)^{3/2} v_{th}^3} \exp\left(-\frac{v^2}{2v_{th}^2}\right)$$

para o plasma e

$$f_b = \frac{n_b}{(2\pi)^{3/2} v_{th\perp}^2 v_{th\parallel}} \exp\left(-\frac{(v_x - v_b)^2}{2v_{th\parallel}^2} - \frac{v_y^2 + v_z^2}{2v_{th\perp}^2}\right)$$

para o feixe. Aos íons dá-se uma distribuição Maxwelliana, mas estes são mantidos imóveis durante toda a simulação. O número total de partículas é 102400, distribuídas uniformemente, em $t=0$, ao longo de 512 pontos de grade.

Estes parâmetros foram escolhidos de modo a se comparar os resultados obtidos por Newman et al., 1988 ⁵, que utiliza um modelo semelhante ao utilizado por nós. Os resultados obtidos apresentam uma boa concordância, embora não tenhamos realizado uma simulação tão longa quanto a apresentada no artigo supra citado, por motivos de redução de gastos com tempo de CPU.

Uma vez que o código produz os resultados esperados, iniciou-se o trabalho de elaborar um conjunto de condições iniciais que permite simular as condições experimentais. Para isto, resolveu-se numericamente a relação de dispersão do plasma ambiente (sem feixe) nas condições experimentais e como esta curva varia com a razão $\frac{\omega_{pe}}{\omega_{ce}}$. A

seguir introduziu-se o feixe, o que leva a inclusão de outras duas frequências: $\omega = kv_b$ e $\omega = \omega_{ce} - kv_b$. Este estudo permitirá uma otimização da simulação, evitando que se estimule modos instáveis no início da simulação. A Dra. Catherine Krafft dará continuidade a este estudo e nos manterá informados sobre os resultados.

Discutiu-se também como incluir um feixe modulado ao código, para melhor modelar as condições experimentais ⁶. Chegou-se à conclusão de que podemos utilizar o modelo indicado por Birdsall e Langdon, 1985 ⁷.

Conclusões e comentários gerais

Esta missão de trabalho apresentou bons resultados. A interação com a Dra. Catherine Krafft, responsável, juntamente com o Dr. Bertrand Lémège, pela implantação do código computacional foi excelente. Nas

discussões a respeito do código computacional me foi muito útil a experiência adquirida junto ao grupo do Dr. Charles K. Birdsall, em Berkeley, CA, como bolsista da CAPES.

Tive a oportunidade de conversar com Edevaldo D. de Campos, bolsista de doutorado da CAPES dentro deste convênio e verificar que ele se encontra bem adaptado e mantém um bom relacionamento profissional com o grupo.

Obtive algumas informações com a Dra. Catherine Krafft, a pedido do Dr. José Leonardo Ferreira, que nos auxiliarão na construção de um experimento, no INPE, para o estudo de ondas em plasmas magnetizados.

Das discussões científicas surgiram novas idéias quanto a temas de estudo, que representam uma continuidade do que se está fazendo. A inclusão de feixes relativísticos, já possível no código computacional mas até agora não explorado, permitiria simular alguns fenômenos de interesse na área de Astrofísica. Neste assunto, o Dr. Abraham A.C Chian, do Departamento de Geofísica Espacial do INPE seria um excelente colaborador. Além disto, interações entre feixe de íons e plasma é de grande interesse para plasmas magnetosféricos e cometários ⁹.

Assisti a duas defesas de tese de doutorado. Embora ambas não fossem sobre assuntos diretamente correlatos com a minha experiência profissional, pude observar claramente, duas linhas de trabalho distintas. A 1ª era uma tese experimental, mas com uma modelagem teórica para explicar os resultados obtidos. A 2ª era puramente experimental, voltada para necessidades industriais e apenas relatava os resultados obtidos, sem grandes explicações sobre o porque. Isto demonstra duas tendências distintas: uma, a pesquisa buscando o conhecimento e entendimento dos fenômenos físicos e a outra, servindo aos interesses industriais, muitas vezes facilitando a obtenção de recursos, mas sem muita ênfase ao entendimento. O ideal seria reunir as duas coisas. Fazer uma pesquisa que pudesse ser aplicada, facilitando a obtenção de recursos financeiros para o desenvolvimento da mesma, mas com bom entendimento a respeito dos fenômenos físicos envolvidos.

Das conversas com o Dr. Lémbergé verifica-se que, infelizmente, ainda não temos à nossa disposição no Brasil, computadores de grande porte, que nos permitam usar um grande número de partículas e efetuar longas

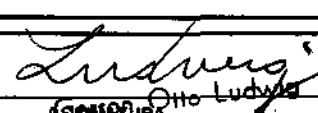
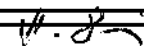
rodadas, em termos de vários períodos de plasma ou elétron-ciclotrônica em pouco tempo real. A aquisição de uma "workstation" pelo LAP nos próximos dois meses nos ajudará bastante, mas ainda estamos longe de uma situação ideal, O Dr. Lémège se dispõe a vir ao Brasil no próximo ano, por um período que pode ir de 2 semanas a 1 mes, desde que haja condições de trabalho.

REFERENCIAS

1. MELROSE, D. B. "Instabilities in space and laboratory plasmas", Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
2. BEGHIN, C. et al. "Artificial particle beams in space plasma studies", ed. by Grandal, Plenum Publishing Corporation, 1982.
3. BERNSTEIN, W., LEINBACH, H., KELLOG, P. J., MONSON, S. J., HALLINAN, T. J., "Further laboratory measurements of the beam plasma discharge", *J. Geophys. Res.*, **84**:7271, 1979.
4. PRITCHETT, P. L., KARIMABADI, H., OMIDI, N., "Generation mechanism of whistler waves produced by electron beam injection in space", *Geophys. Res. Letters*, **16**(8):883, Aug., 1989.
5. NEWMAN, D. L., WINGLEE, R. M., GOLDMAN, M. V., "Theory and simulation of electromagnetic beam modes and whistlers", *Phys. Fluids*, **31**(6):1515, June, 1988.
6. KRAFFT, C., MATHIEUSSENT, G., THÉVENET, P., "Interaction of an electron beam with a plasma near the electron gyrofrequency", *Anais do 1º Congresso Brasileiro de Física dos Plasmas*, Santos, SP, 10-13 de dezembro de 1991, Vol II, pág.131.
7. BIRDSALL, C. K.; LANGDON, A.B., "Plasma physics via computer simulation" MacGraw-Hill, 1985.
8. HOCKNEY, R. W.; J. W. EASTWOOD "Computer simulation using particles" MacGraw-Hill, 1981
9. OMURA, Y., MATSUMOTO, H. "Particle simulations of nonlinear whistler and Alfvén wave instabilities: amplitude modulation, decay, soliton, and inverse cascading", in: *Plasma waves and instabilities at comets and in magnetospheres*. ed. B. T. Tsurutani e H. Oya, Geophysical Monograph, **53**:51, 1989



AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

TÍTULO					
II Missão de Trabalho ao "Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas" da "Université Paris-Sud"					
AUTOR					
Maria Virgínia Alves					
TRADUTOR					
EDITOR					
ORIGEM LAP	PROJETO	SÉRIE	Nº DE PÁGINAS 10	Nº DE FOTOS	Nº DE MAPAS
TIPO					
<input type="checkbox"/> RPQ	<input type="checkbox"/> PRE	<input type="checkbox"/> NTC	<input checked="" type="checkbox"/> PRP	<input type="checkbox"/> MAN	<input type="checkbox"/> PUD
<input type="checkbox"/> TAE					
DIVULGAÇÃO					
<input checked="" type="checkbox"/> EXTERNA	<input type="checkbox"/> INTERNA	<input type="checkbox"/> RESERVADA	<input type="checkbox"/> LISTA DE DISTRIBUIÇÃO ANEXA		
PERIÓDICO/EVENTO					
Relatório enviado à CAPES, dentro acordo CAPES-COFECUB.					
CONVÊNIO					
CAPES/COFECUB					
AUTORIZAÇÃO PRELIMINAR					
09 / 04 / 92			 ASSINATURA Otto Ludwig Chefe do Laboratório Associado de Plasma		
REVISÃO TÉCNICA					
<input type="checkbox"/> SOLICITADA	<input checked="" type="checkbox"/> DISPENSADA				
					ASSINATURA
RECEBIDA ___/___/___	DEVOLVIDA ___/___/___				
					ASSINATURA DO REVISOR
REVISÃO DE LINGUAGEM					
<input type="checkbox"/> SOLICITADA	<input checked="" type="checkbox"/> DISPENSADA				
					ASSINATURA
Nº ___					
RECEBIDA ___/___/___	DEVOLVIDA ___/___/___				
					ASSINATURA DO REVISOR
PROCESSAMENTO/DATILOGRAFIA					
RECEBIDA ___/___/___	DEVOLVIDA ___/___/___				
					ASSINATURA
REVISÃO TIPOGRÁFICA					
RECEBIDA ___/___/___	DEVOLVIDA ___/___/___				
					ASSINATURA
AUTORIZAÇÃO FINAL					
___/___/___			 Letz Alberto Vieira Dias ASSINATURA Centro de Tecnologias Associadas - CTE		
PALAVRAS-CHAVE					
Acordo CAPES/COFECUB - Simulação por partículas -					
Propagação de Ondas - Interação feixe-plasma					