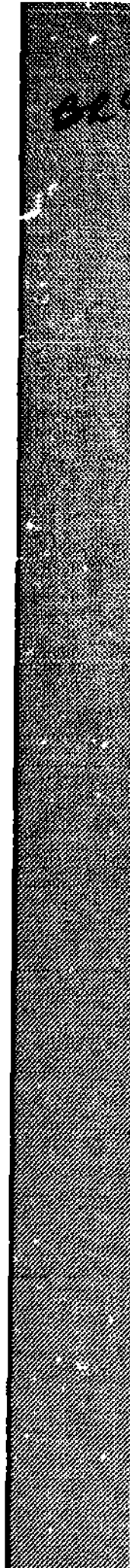




PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
SECRETARIA ESPECIAL DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE -- 5126.





AUTORES
AUTHORS

PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

Ondas de Langmuir
Ondas Eletrônicas de Plasma

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY

Antonio Montes
Antonio Montes Fº

AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR

José Leonardo Ferreira
José Leonardo Ferreira

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION

- INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRIITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

Abraham C. L. Chian
Abraham C. L. Chian

COU/UDC

533.9

DATA/DATE

setembro/1990

PUBLICAÇÃO Nº
PUBLICATION NO

INPE-5126-RPE/631

ORIGEM
ORIGIN

LAP

PROJETO
PROJECT

TÍTULO/TITLE

ESTUDO DE ONDAS E TURBULÊNCIA EM PLASMAS
NATURAIS E EM PLASMAS DE LABORATÓRIO

Nº DE PÁGS
NO OF PAGES

24

LT. MAPA
LAST PAGE

24

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

AUTORES/AUTHORSHIP

José Leonardo Ferreira

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Projeto de estudo de ondas e turbulências em plasmas submetido a CAPES para inclusão no acordo de cooperação internacional CAPES/COFECUB. O projeto será realizado em conjunto com o Laboratório de Física dos Gases e dos Plasmas da Universidade de Paris e se insere na linha de simulação em laboratório de fenômenos de interação onda-partícula que ocorrem em plasmas espaciais.

OBSERVAÇÕES/REMARKS

Projeto de estudo de ondas de Langmuir enviado a CAPES para acordo de de cooperação internacional entre o LAP-INPE e o LPGP da Universidade de Paris.

MEC CAPEB CCI	FORMULÁRIO PARA SOLICITAÇÃO DE COOPERAÇÃO ATRAVÉS DO ACORDO CAPEB/COFECUB
---	--

OBSERVAÇÕES IMPORTANTES	<ol style="list-style-type: none"> 1. Antes de preencher o formulário, leia cuidadosamente as instruções 2. Preencha a máquina 3. Quando o espaço for insuficiente, use estes folhetos de continuação
--------------------------------	--

TÍTULO DO PROJETO	estudo de ondas e turbulência em plasmas naturais e em plasmas de laboratório
--------------------------	---

2) SETOR	Espacial (pesquisas em plasma de laboratório com aplicação na área espacial)	3	Área do Conhecimento	4	Área Geográfica
3) DURAÇÃO PREVISTA	INÍCIO: Janeiro de 1990. TÉRMINO: Dezembro de 1993.		Ciências exatas e da Terra (04.00.00) Sub-área: Física dos Fluidos, plasmas e descargas elétricas.		Região Sudeste, estado de São Paulo, município de São José dos Campos.

INSTITUIÇÃO EXECUTORA DO PROJETO	SIGLA:
Instituto de Pesquisas Especiais Laboratório Associado de Plasma	LAP-INPE
RECO: Av. dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja 12201 - São José dos Campos, SP	TEL: (0123) 229977 R:501 TELEX: 123 3530 INPE BR
DO RESPONSÁVEL PELO PROJETO:	TEL: 22-9977 R.:501
Dr. Leonardo Ferreira, responsável pelo Laboratório de Plasmas Quiescentes	TELEX: Res: 291723
DO DIRIGENTE DA INSTITUIÇÃO: Eng. Márcio Barbosa	CARGO: Diretor Geral
Dr. Gerson Otto Ludwig	Chefe do LAP

INSTITUIÇÃO FRANCESA PARTICIPANTE	SIGLA:
Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas	LPGP
RECO: Université de Paris-Sud-Centre D'Orsay, CNRS-URA 73 Batiment 212-91405 Orsay Cedex, France	TEL: (1) 69-61-72-51 TELEX: 602166 F
DO RESPONSÁVEL PELO PROJETO:	TEL:
Mlle Matthieussent, Doc. des Sciences, Directeur de Recherche CNRS	TELEX:
DO DIRIGENTE DA INSTITUIÇÃO	CARGO:
Directeur: Andre Ricard, Doc. des Sciences	

O projeto será realizado com apoios dos Departamentos de Geofísica Espacial e de Aeronáutica do INPE, e do Instituto Tecnológico de Aeronáutica do CIA.

8 | DESCRIÇÃO SUCINTA DA INSTITUIÇÃO BRASILEIRA

8.1 - BREVE HISTÓRICO

O Laboratório Associado de Plasma iniciou as suas atividades em 1978 através da implantação de um grupo de plasmas dentro da área de ciências espaciais do IN PE. Desde então o grupo vem desenvolvendo trabalhos teóricos e experimentais em Física de Plasmas. Após um período dentro do Departamento de Tecnologias Especiais (1982-1984) como divisão de plasmas, o grupo cresceu e se tornou um laboratório associado do Instituto. Atualmente o LAP conta com vários projetos de pesquisa pura e aplicada em plasmas, que estão distribuídos em três áreas da seguinte forma:

1) Física de Plasmas Básica

Projeto Plasma Quiescente (PQUI) - Estudo teórico e experimental de ondas lineares e não-lineares em plasmas fracamente ionizados. Atenção especial é dada atualmente a processos anômalos relacionados com turbulência e camada dupla acústico iônica, devido à sua importância para o entendimento de fenômenos que ocorrem em plasmas espaciais. O projeto possui duas câmaras de produção de plasma quiescente por descarga termiônica multidipolo magnética. Em uma delas (PQUI-I), foram obtidos resultados importantes como a observação inédita de sólitons acústico-iônicos de rarefação, e a comprovação da existência do mecanismo de reforço na formação de camada dupla acústico-iônica.

Projeto Plasma Magnetizado (PMAG) - Estudo teórico e experimental de plasmas confinados por campos magnéticos intensos. Atualmente o projeto possui um dispositivo de confinamento de plasmas toroidais por estrição a campo reverso.

2) Tecnologia de Plasmas

Projeto Plasma e Radiação (PRAD) - Desenvolvimento de dispositivos de emissão de ondas eletromagnéticas intensas de alta frequência. A atividade principal deste projeto é a construção de um girotron com 10KW de potência na frequência de 35GHz. Ele se encontra em fase final de desenvolvimento e deve entrar em operação em 1990.

Projeto Centrífuga de Plasma (PCEN) - Produção de plasmas metálicos altamente ionizados em rotação. Este projeto possui um dispositivo já em operação, para separação de isótopos através da geração de plasmas giratórios pela combinação de campos elétricos e magnéticos intensos. Ele já obteve vários resultados expressivos para o fator de separação isotópica utilizando cobre e magnésio.

Projeto Propulsão Iônica (PION) - Desenvolvimento de fontes de íons a partir de descargas multidipolo magnéticas para propulsão de satélites artificiais. O projeto já possui um protótipo de laboratório de um propulsor iônico para controle

8 | DESCRIÇÃO SUCINTA DA INSTITUIÇÃO BRASILEIRA

de atitude de satélites. Recentemente, os pesquisadores envolvidos com o projeto PION propuseram o teste de um motor iônico no segundo satélite da missão espacial completa brasileira.

3) Fusão Termonuclear Controlada

Projeto Plasma Toroidal (PTOR)- Estudo teórico e experimental de plasmas confinados magneticamente por máquinas toroidais. Atualmente se encontra em fase de planejamento a construção de um tokamak de pequena razão de aspecto para estudo do equilíbrio de plasmas toroidais na segunda região de estabilidade.

Dos projetos acima mencionados, apenas o projeto PQUI estará vinculado ao projeto de estudo de ondas e turbulência em plasmas. Com o andamento do projeto conjunto com o Laboratório de Gases e de Plasmas da Universidade de Paris em Orsay talvez seja possível no futuro a ampliação das atividades de pesquisa para outras áreas de interesse do LAP-INPE.

8.2 - Corpo de pesquisadores envolvidos no projeto

O Laboratório Associado de Plasma do INPE conta com 8 pesquisadores doutores, 9 mestres, 1 engenheiro e dois técnicos em eletrônica. O LAP conta também com 5 estagiários; 4 bolsistas a nível de mestrado e 8 alunos realizando trabalho de doutoramento em suas dependências. O pessoal de apoio técnico e os estagiários prestam serviços para todos os projetos, inclusive para o projeto PQUI.

Os pesquisadores do LAP envolvidos com o projeto PQUI e que participarão em tempo integral deste convênio são os seguintes:

Dr. José Leonardo Ferreira: Coordenador do projeto no Brasil e responsável pela montagem dos experimentos.

MSc. Maria Virgínia Alves: Responsável pela implantação de um código para simulação computacional usando o método de partículas.

MSc. Julio Guimarães Ferreira: Responsável pela montagem dos diagnósticos de plasma.

Os pesquisadores do LAP que participarão em tempo parcial são os seguintes:

Dr. Gerson Otto Ludwig (Chefe do LAP): apoio em teoria.

Dr. Antonio Montes Filho: apoio em teoria e na simulação computacional com partículas.

MSc. Carlos Shibata: apoio em teoria e na simulação computacional com partículas.

MSc. Gilberto Marrega Sandonato: apoio na montagem dos experimentos e dos diagnósticos de plasma.

Alguns pesquisadores da área de ciência espacial do INPE e do Depto. de Física do ITA-CTA tem interesse em participar como colaboradores externos, devido

6 | DESCRIÇÃO SUCINTA DA INSTITUIÇÃO BRASILEIRA

a correlação do assunto deste projeto com suas atividades de pesquisa atuais: São eles:

- Dr. José A. Bittencourt (Chefe do Depto. de Aeronomia do INPE)
- Dr. Abraham C.L. Chian (Pesquisador do Depto. de Geofísica Espacial do INPE)
- Dr. Valter Gonzalez Pesquisador do Depto. de Geofísica Espacial do INPE
- Dr. Osmar Pinto Jr. (Pesquisador do Depto. de Geofísica Espacial do INPE)
- Dr. Carlos V. Speller (Professor do Inst. Tecnológico da Aeronáutica do CTA).

8.3 - Relação do pessoal a ser treinado ao longo do desenvolvimento deste convênio:

BSc. Edevaldo D. Campos: aluno de mestrado em Física de Plasmas, realizando trabalho experimental voltado para excitação e detecção de ondas de Langmuir.

BSc. Wills C. Damásio: aluno de mestrado em Física de Plasmas, realizando trabalho experimental voltado para o estudo do equilíbrio de plasmas quiescentes confinados por campos multidípolo magnéticos.

MSc. Maria Virgínia Alves: aluna de doutoramento em teoria, realizando trabalho de simulação computacional voltado para o estudo de processos de troca de energia entre ondas e partículas em plasmas com turbulência fraca localizada.

MSc. Júlio G. Ferreira: aluno de doutoramento experimental, realizando trabalho voltado para produção de feixes de íons a partir de descarga termiônica multidípolo magnética.

MSc. Carlos Shibata: aluno de doutoramento teórico, realizando trabalho de simulação computacional de propagação de ondas Whistlers em plasmas.

8.4 - Apoio e interesse institucional (infraestrutura e recursos materiais disponíveis)

O LAP possui um prédio dentro do INPE de S.J. Campos com 510 m² de área útil, sendo 260 m² destinados a salas de pesquisadores e bolsistas e 250 m² de área de laboratório. Parte da área destinada a salas de pesquisadores é ocupada por uma secretária, por uma sala de desenhos e projetos, e por uma sala de temperatura controlada que contém um computador MicroVax 3600 de uso geral do laboratório. Na área destinada aos laboratórios existe uma oficina de eletrônica e um laboratório de química de uso comum dos laboratórios. O LAP ainda se utiliza da oficina mecânica geral do INPE, mas existem planos para que o laboratório tenha sua própria oficina mecânica. O Laboratório de Plasma Quiescente possui 50m² de área, a figura 1 mostra uma visão geral do laboratório com as máquinas PQUI-I e PQUI-II. Os equipamentos instalados neste laboratório são os seguintes:

- Sistema de vácuo com bomba difusora Edwards (280ℓ/s)
- Câmara de vácuo (diam.=30 cm; compr.=75 cm) PQUI-I

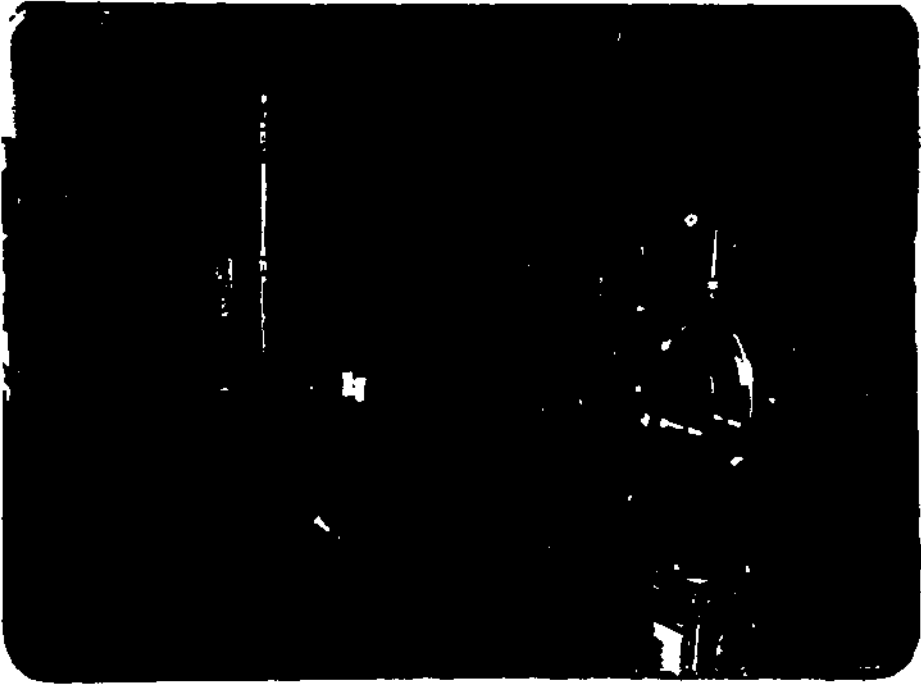


Fig. 1 - Vista geral do Laboratório de Plasma Quiescente mostrando em primeiro plano a máquina PQUI-I e ao fundo a máquina PQUI-II.

8 | DESCRIÇÃO SUCINTA DA INSTITUIÇÃO BRASILEIRA

- Controlador de medidor de vácuo por ionização Leybold
- Fontes de alimentação Tectrol (2x TC60-01, 1x TC60-02, 3x TCA120-02, 1x TCA150-05, 2x TCA120-20, 2x TCA40-100).
- Registrador X-Y HP 7047A
- Integrador síncrono EGG PARC 162
- Gerador de pulsos Tektronix PG 505
- Gerador de funções Tektronix FG 504
- Osciloscópio de feixe duplo Tektronix 7844 (400MHz)
- Analisador de espectro Tektronix 7L13 (1KHz-1,8GHz)
- Amplificador síncrono EGG PARC 124A
- Sistema de vácuo com bomba difusora (2000l/s) e controlador 2002 Edwards
- Câmara de vácuo criometal (diam.=65 cm; compr.=120 cm) PQUI-II
- Osciloscópio Tektronix R7603 com módulo digitalizador programável 7D20 e acessórios
- Unidade de fita magnética Tektronix 4924 (2 unidades)
- Gerador de pulsos Tektronix PG 505
- Gerador de funções Tektronix FG5010
- Registrador X-Y HP 7090A
- Amplificadores de radiofrequência Collins 30-5-1 (3 a 30 MHz; 1 KW; 2 unidades)
- Gerador de radiofrequência HP 08656 (0,1 a 990 MHz)
- Amplificador de radiofrequência Amplifier Research SW1000 (0,5 a 1000 MHz; 5 W).
- Circuito detetor de função de distribuição de elétrons
- Circuito medidor de potencial de plasma
- Gerador de varredura para sondas eletrostáticas
- Circuito derivador para analisador de energia

8.5 - Especificar outras agências que apoiam o projeto

O projeto PQUI desde sua criação vem recebendo verba do tesouro nacional através do INPE, e do PNAE através da FINEP desde sua criação em 1979. Bolsas e auxílios do CNPq, CAPES e FAPESP foram e continuam sendo concedidas a estudantes e pesquisadores vinculados ao projeto.

8.6 - Vinculação do projeto com as linhas de pesquisas do LAP, do INPE e de outras instituições

O projeto de estudo de ondas e turbulência em plasmas produzidos por descarga termiônica multidipolo magnética se insere na linha de pesquisa básica do LAP. O estudo dos mecanismos de produção e perdas de partículas neste tipo de descarga é essencial para o desenvolvimento de câmaras de ionização para os propulsores

9 | DESCRIÇÃO SUCINTA DA INSTITUIÇÃO BRASILEIRA

iónicos do projeto PION. Os trabalhos relativos a otimização de catodos, para aumentar a eficiência de ionização em descargas termiônicas, está contribuindo para o desenvolvimento do canhão de elétrons do girotron desenvolvido pelo projeto PRAD. O conhecimento que será adquirido no estudo de conversão de modos de ondas eletromagnéticas no plasma, será útil para os estudos de geração e aquecimento de plasmas por fontes de ondas eletromagnéticas intensas. Tal assunto vem sendo abordado pelo projeto PTOR através da simulação computacional do trajeto de ondas eletromagnéticas em um plasma confinado por máquinas do tipo tokamak.

A área de ciência espacial do INPE através de pesquisadores dos Departamentos de Geofísica Espacial e Aeronômica e manifestou interesse por este projeto. Estes pesquisadores têm trabalhado intensamente nos últimos anos no estudo dos processos de entrada de partículas carregadas para a atmosfera, através da anomalia magnética do atlântico sul. Acredita-se que este fenômeno seja causado por ondas de plasma na ionosfera e na magnetosfera, que transferem energia para elétrons e íons do plasma. A energia ganha por estas partículas é suficientemente grande para lançá-las na atmosfera.

O estudo de ondas em plasma é também importante para o entendimento dos processos de geração de corrente não indutiva em máquinas do tipo tokamak, como está sendo proposto no Programa Nacional de Plasmas. De acordo com este programa no futuro Laboratório Nacional de Plasmas será desenvolvido um tokamak de pequena razão de aspecto, cujo objetivo será demonstrar experimentalmente a possibilidade de obter plasmas termonucleares com geração de corrente não indutiva usando diferentes métodos (geração com feixes de partículas neutras, geração com ondas na frequência íon ciclotrônica híbrida inferior e geração na frequência elétron ciclotrônica).

8.7 - Importância do projeto a nível regional e nacional

O projeto PQUI está inserido dentro do Programa Nacional de Atividades Espaciais e do Programa Nacional de Plasmas. Ele também foi incluído no recente Plano Estratégico das Atividades Espaciais Brasileiras na área de simulação em laboratório de fenômenos em plasmas espaciais. Tais estudos de simulação tem sido realizados em diversos laboratórios do mundo visando compreender fenômenos tais como:

- propagação de ondas na ionosfera, na magnetosfera e no espaço interplanetário e interestelar;
- interação de satélites e naves espaciais com os plasmas da ionosfera, da magnetosfera e do meio interplanetário;
- interação do vento solar com a magnetosfera terrestre.

8 | DESCRIÇÃO SUCINTA DA INSTRUIÇÃO BRASILEIRA

Com o incremento das atividades de exploração espacial, inclusive com o envio de sondas e naves a outros corpos do sistema solar, este tipo de estudo deverá adquirir interesse científico crescente dada a dificuldade e o custo envolvidos no estudo "in loco" dos mesmos. Do ponto de vista de aplicação tecnológica a médio prazo destas pesquisas, as perspectivas também são amplas. Podemos citar como exemplos os recentes estudos de coleta de cargas da ionosfera para suprimento de energia de satélites e estações espaciais. A utilização de feixes de elétrons na geração de ondas whistlers para comunicação entre satélites também tem sido objeto de pesquisas a nível mundial, inclusive do próprio Laboratório de Física do Gás e do Plasma (LPGP-França) com o qual pretendemos realizar este convênio.

Este projeto terá também importância a nível das universidades e dos institutos do Estado de São Paulo, principalmente para aqueles que tem interesse em física dos plasmas. As universidades USP, UNICAMP, UNESP e o Instituto Tecnológico da Aeronáutica poderão participar do projeto enviando pesquisadores e alunos para realização de cursos, estágios ou mesmo para trabalho conjunto neste projeto.

DESCRIÇÃO SUCINTA DA INSTITUIÇÃO FRANCESA

O Laboratório de Física do Gás e do Plasma (LPGP) está localizado na Universidade de Paris-Sul em Orsay, sendo também um laboratório associado ao Centro Nacional de Pesquisas Científicas (CNRS) da França. Dentre vários experimentos deste laboratório destacam-se os experimentos de ondas e turbulência de Langmuir, e o de ondas whistlers geradas por feixes de elétrons em plasma fracamente magnetizados. Para realização destes estudos o laboratório possui máquinas de plasma quiescente similares às que utilizamos no LAP-INPE, para estudo de ondas e turbulência acústico-iônicas.

O programa experimental de estudo de ondas e turbulência em plasmas proposto pelo LPGP consiste na observação dos mecanismos de excitação e saturação de ondas eletromagnéticas de plasma (ondas de Langmuir) criadas através da conversão linear de modos que o corre na interação de ondas eletromagnéticas com o plasma. Ele já vem sendo realizado no LPGP há cinco anos, e tem relação direta com o atual programa europeu de desenvolvimento de aceleradores de elétrons, através do batimento de ondas eletromagnéticas no interior de um plasma.

O outro programa de estudos do LPGP consiste no estudo de geração de ondas whistlers a partir da interação de um feixe de elétrons com um plasma quiescente fracamente magnetizado. Este é um estudo realizado em colaboração com o Centro Nacional de Estudos de Telecomunicações da França, cujo objetivo é comprovar a viabilidade tecnológica de substituir as antenas dos satélites por feixes de elétrons. A vantagem do feixe de elétrons é que ele possui menos peso e menos volume. Estudos preliminares realizados por vários outros grupos de pesquisa na área mostraram a viabilidade do projeto. Apesar deste estudo não constar na proposta enviada pelo LPGP, o Dr. G. Matthieussent (Coordenador do lado francês) já se mostrou aberto a inclusão deste assunto neste con-ênio a partir do terceiro ano de atividades.

A equipe de pesquisadores franceses envolvida nestes experimentos é a seguinte:

- G. Matthieussent: Doutor em Ciências, Diretor de Pesquisa do CNRS e coordenador deste projeto no LPGP.
- G. Gauthereau: Doutor de 3º Ciclo e Engenheiro Eletrônico.
- K. Tu: Doutor em Ciências e Pesquisador do CNRS.
- J. Codiot: Engenheiro Eletrônico do CNRS.
- M. Benhassine: Doutor de 3º Ciclo e Pesquisador Auxiliar.
- P. Fisher: Doutor de 3º Ciclo.
- B. Cross: Estudante de doutoramento
- P. Lovarn: Estagiário.

10 | JUSTIFICATIVA TÉCNICO-CIENTÍFICA DO PROJETO

10.1 - Diagnóstico do problema a ser abordado

O estudo da saturação de ondas eletrônicas de plasma não lineares é de grande interesse para as pesquisas em fusão inercial por laser, no entedimento do fenômeno das auroras e da física e da aceleração de partículas carregadas que penetram na atmosfera. Recentemente a física da interação de ondas de plasma não lineares tem encontrado aplicação nas novas técnicas de aceleração ultrarelativística de partículas nos chamados aceleradores por batimento de ondas.

No entanto, o estudo destas ondas diretamente nestes experimentos possui grandes empecilhos, como por exemplo a dificuldade de acesso à região experimental. Para observar estas ondas é necessário gerar plasmas com baixo nível de ruído, grande volume experimental e fácil acesso como é o caso das máquinas de plasma quiescente com confinamento magnético superficial. Neste projeto portanto será efetuado um estudo experimental da turbulência de ondas de plasma geradas pelo batimento de duas ondas eletromagnéticas ou pela conversão linear de ondas eletromagnéticas em ondas acústico-iônicas e em ondas de Langmuir. Com as máquinas de plasma quiescente do LAP no Brasil e do LPGP na França será possível confrontar de maneira direta as previsões teóricas relativas ao fenômeno da turbulência de Langmuir, e observar as suas relações com o fenômeno de interação onda-partícula.

10.2 - Breve descrição do grau de desenvolvimento da área de conhecimento

Em plasmas livres de campos externos dois modos de propagação de ondas são possíveis. As ondas eletrônicas de plasma com frequência acima da frequência natural de oscilação do plasma e as ondas acústico-iônicas com frequência menor que a frequência de plasma para íons. As ondas eletrônicas de plasma foram observadas pela primeira vez por Irving Langmuir em 1926 nos tubos eletrônicos, por isso são também chamadas de ondas de Langmuir. As ondas iônicas ou acústico-iônicas, foram previstas teoricamente por Tonks e Langmuir em 1929, mas só foram observadas por R.W. Revans em 1933. O LAP-INPE já vem realizando pesquisas nesta área desde 1980 e o resultado mais expressivo foi a observação inédita de sólitons acústico-iônicos de rarefação na máquina PQUI-I (Ludwig et al., 1984).

As ondas de Langmuir são estudadas em máquinas de plasma quiescente desde o final da década de 1960, quando estas máquinas se mostraram mais promissoras ao estudo de fenômenos básicos em plasmas (Barret et al., 1968). Elas consistem de ondas longitudinais de carga espacial onde os elétrons oscilam devido ao efeito combinado de sua própria inércia com a ação de campos elétricos restauradores. Utilizando as equações de fluido de continuidade e momentum em conjunto com a equação de Poisson é possível mostrar que a frequência de oscilação destes elétrons é dada por:

10 JUSTIFICATIVA TÉCNICO-CIENTÍFICA DO PROJETO

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{m_e E_0} \right)^{1/2} \rightarrow f_p (\text{Hz}) = 9000 \sqrt{n_e}$$

Estas ondas podem ser excitadas por feixes de íons, feixes de elétrons ou mesmo por ondas eletromagnéticas lançadas ao plasma por meio de antenas.

É possível por exemplo excitar ondas de Langmuir em plasmas através do batimento de duas ondas eletromagnéticas com frequências f_1 e f_2 . É importante no entanto, que a diferença entre as duas frequências ($f_2 - f_1$) seja próxima a f_p .

Em um plasma não homogêneo com um perfil de densidade n_e previamente conhecido é possível lançar uma onda eletromagnética de frequência igual a frequência de plasma f_p de um ponto no interior do plasma. Neste ponto a onda eletromagnética entrega parte de sua energia para o plasma. O campo elétrico da onda entra em ressonância com o movimento harmônico dos elétrons do plasma ocasionando perturbações locais suficientes para excitar ondas de Langmuir e ondas acústico-iônicas. Este mecanismo de excitação de ondas em plasmas é bem conhecido e está descrito em vários trabalhos experimentais (Wong et al., 1984).

Se a onda eletromagnética excitadora possuir campo elétrico intenso, ondas não lineares e turbulência serão excitadas. A relação entre os parâmetros do plasma e a escala do gradiente de densidade com os mecanismos de saturação destas ondas ainda são pouco conhecidos. Além disso outros fenômenos como a geração de cavidades (decréscimo localizado da densidade de elétrons), acompanhada pela geração de um campo elétrico localizado durante a excitação das ondas de plasma, também são hoje objeto de pesquisas intensas. Procura-se estabelecer relações entre a energia da onda eletromagnética e dos parâmetros básicos do plasma com os valores de pressão de densidade e de campo elétrico.

Trabalhos teóricos anteriores procuraram explicar a saturação de ondas de plasma turbulentas como resultado da transferência de energia dos modos de grande comprimento de onda. É feita uma analogia com o espectro de Kolmogoroff aplicado a turbulência em fluidos. Em plasmas o amortecimento de Landau foi utilizado para explicar o maior amortecimento dos modos de alta frequência e o acúmulo de energia nos modos de baixa frequência. Em 1972, Zakharov introduziu modificações no modelo das crevasse ondas de plasma não lineares unidimensionais em termos do equilíbrio entre a pressão da radiação e a dispersão. Atualmente os mecanismos de saturação de ondas eletrônicas de plasma são objeto de investigação através de métodos numéricos como a simulação computacional com partículas em duas e três dimensões.

10.3 - Proposta de solução para o problema enfocado

O estudo experimental do mecanismo de saturação de ondas de Langmuir, isto é, do limite máximo da amplitude destas ondas, será efetuado em um plasma com baixo n_e

10 JUSTIFICATIVA TÉCNICO-CIENTÍFICA DO PROJETO

vel de ruído $< 10 \mu\text{Volts}$ e com variação espacial de densidade ajustável. Para isso pretendemos utilizar uma máquina de plasma quiescente com confinamento magnético superficial. Ela pode produzir um plasma espacialmente uniforme ou com gradiente de densidade controlado. Através da introdução de área de perdas de partículas carregadas é possível produzir gradientes de densidade de plasma que podem ser controlados externamente. O grande volume de plasma destas máquinas permite fácil acesso à região experimental. A possibilidade de utilização de diagnósticos simples como sondas de Langmuir, sondas de RF, analisador eletrostático de energia de íons e sondas emissivas vai permitir a obtenção de dados livres da influência dos efeitos perturbativos de ruídos eletromagnéticos.

Para determinar os mecanismos de saturação de ondas eletrônicas de plasma não lineares é preciso em primeiro lugar estudar o comportamento de ondas lineares na máquina de plasma quiescente. o primeiro passo será o de estudar a relação de dispersão para ondas de Langmuir de pequena amplitude e compará-la com a relação de dispersão para ondas não-lineares. Através deste estudo será possível quantificar a influência dos amortecimentos colisional e não-colisional (de Landau), na amplitude das ondas de Langmuir. Este estudo só será possível de ser efetuado se a razão sinal/ruído for no mínimo de um fator 10.

Serão também realizados dois estudos relacionados com a influência da força ponderomotiva no mecanismo de saturação da amplitude das ondas de Langmuir através de dois métodos distintos. No primeiro será produzido na PQUI-II um gradiente de densidade com escala de variação da ordem de $0,7\text{m}$. A interação de uma onda eletromagnética com o plasma, no ponto em $f_{em} = f_p$ vai excitar as ondas de plasma através do fenômeno da conversão de modos. A relação entre a amplitude das ondas de plasmagêradas com a amplitude da onda excitadora será avaliada através da utilização de sondas de RF acopladas a amplificadores sintonizáveis. No segundo método a relação entre a força ponderomotiva e as características da onda de Langmuir excitada (comprimento de onda e frequência) serão avaliadas. Neste caso as ondas de plasma serão excitadas pelo batimento de ondas eletromagnéticas em um plasma homogêneo. As ondas de plasma geradas são em geral de grande amplitude com tempo de saturação após a excitação da ordem de μs . O tempo de saturação das ondas de Langmuir depende da densidade, temperatura e da massa de íons e elétrons. Uma descrição detalhada dos métodos utilizados nestes experimentos será realizada no quadro 12.

10.4 - Viabilidade técnico-científica e financeira de se implantar a solução proposta

Como já mencionamos anteriormente as ondas de Langmuir já vem sendo estudadas em plasmas há mais de 50 anos. No entanto, só nos últimos 20 anos é que as técnicas de produção e diagnóstico de plasma se desenvolveram a ponto de permitir o estudo

10 | JUSTIFICATIVA TÉCNICO-CIENTÍFICA DO PROJETO

da evolução espacial e temporal destas ondas. No LAP-INPE possuímos uma infraestrutura com pessoal já formado em área correlata, e com material disponível suficiente para dar início imediato a este acordo de colaboração.

A fim de dar continuidade ao programa principalmente na parte referente ao estudo de ondas não lineares será necessário a aquisição de equipamento suplementar. A especificação destes equipamentos deverá ser feita em conjunto com a equipe de pesquisadores franceses do LPGP envolvida neste projeto. Pedidos de auxílio a estas pesquisas deverão ser enviados ao CNPq e a FINEP que já financiam grande parte do projeto PQUI.

11 | OBJETIVOS E METAS DO PROJETO

11.1 - OBJETIVOS

Com este acordo de colaboração o LAP-INPE pretende dar continuidade ao estudo de ondas em plasmas que já vem sendo executado desde 1981. Nesta fase pretendemos estudar em detalhe ondas e turbulência de Langmuir. O entendimento dos processos de excitação, propagação e saturação destas ondas levará a compreensão de vários fenômenos que ocorrem em plasmas espaciais e de laboratório. O projeto será realizado em conjunto com o LPGP da Universidade de Paris e possui grande experiência nesta área. Haverá a possibilidade para que os pesquisadores do LAP tomem contato com técnicas modernas de geração e detecção de ondas em plasmas. Além disso é nosso objetivo também formar novos mestres e doutores na área de plasmas, pois ela ainda é no Brasil uma área com poucos pesquisadores.

O presente projeto tem a duração de quatro anos, sendo que ao final do terceiro ano esperamos poder incluir também um estudo de ondas em plasmas magnetizados. Este estudo dependerá da instalação de um campo magnético externo na câmara PQUI-II e estará voltado principalmente para o estudo de ondas whistlers geradas por feixes de elétrons. Estes estudos já estão em curso no LPGP e o LAP também tem muito interesse nesta área. Portanto esperamos que ao final dos quatro anos o projeto possa ser renovado para dar continuidade ao estudo de ondas whistlers em plasmas quiescentes.

11.2 - Metas

O projeto de estudo de ondas e turbulência em plasmas possui várias etapas que deverão ser cumpridas durante a sua execução. São elas:

Primeira etapa: janeiro a junho de 1990.

- Instalação da estrutura multidípolo magnética da PQUI-II.
- Produção e caracterização de plasma quiescente com confinamento superficial.

Segunda etapa: julho de 1990 a dezembro de 1990.

- Desenvolvimento de antenas e circuitos de excitação de ondas de Langmuir.
- Desenvolvimento de diagnósticos para detecção de ondas e turbulência.
- Determinação experimental da relação de dispersão para ondas lineares e não lineares.

Terceira etapa: janeiro a dezembro de 1991.

- Defesa de tese de mestrado do aluno Edevaldo D. Campos sobre geração e detecção de ondas de Langmuir em plasmas quiescentes.
- Defesa de tese de mestrado do aluno Wills C. Damásio sobre difusão de partículas carregadas provocada por turbulência em campos multidípolo magnéticas.
- Medida do amortecimento de ondas de Langmuir. Comparação entre o amortecimento colisional e o não-colisional na propagação das ondas.
- Medida da amplitude máxima de ondas de plasma geradas na conversão linear de

11 | OBJETIVOS E METAS DO PROJETO

modos de uma onda eletromagnética que incide sobre um plasma não homogêneo.

Quarta etapa: janeiro a dezembro de 1992.

- Instalação de uma bobina de Helmholtz na PQUI-II para estudo de ondas de Langmuir na presença de campo magnético externo.
- Determinação do limite de amplitude de ondas de Langmuir geradas pelo batimento de ondas eletromagnéticas.
- Simulação computacional dos experimentos.
- Estudo da influência de um campo magnético externo na propagação de ondas de Langmuir.

Quinta etapa: janeiro a dezembro de 1993.

- Estudos comparativos entre os resultados obtidos via simulação computacional utilizando o método de partículas, e os resultados obtidos experimentalmente.
- Discussão sobre a continuidade do projeto de ondas e turbulência em plasmas, onde será proposto a introdução de um estudo de ondas whistlers geradas por antenas e feixes de partículas. •

12 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DO PROJETO

Para a realização das metas propostas serão empregadas várias técnicas. Algumas já são dominadas pelo LAP-INPE, como por exemplo a utilização de sondas para medida de parâmetros básicos de plasma e de flutuações de densidade. No entanto, para determinação da amplitude de saturação das ondas de plasma técnicas de geração e detecção de sinais na faixa de vhf e microondas serão necessárias. A seguir faremos um resumo de cada uma das principais técnicas que serão utilizadas nestes experimentos.

1) Produção do Plasma Quiescente

O experimento de propagação de ondas de Langmuir será realizado na máquina PQUI II. Ela consiste de um recipiente de vácuo com diâm. = 0,6 m e compr. = 1,2 m feito de aço inox não magnetizável (fig. 1). A câmara é evacuada por bombas de vácuo difusora (2000 l/s) e mecânica (40 m³/h) até uma pressão de fundo de 10^{-6} mbar. Atualmente se encontra em fase de montagem o sistema de confinamento magnético superficial, cuja função é a de aumentar a eficiência de ionização e produzir plasmas mais densos. Ele é formado por três estruturas de campos multidípolo-magnéticos produzidos por barras de ímãs permanentes de ferrita, isoladas eletricamente para formar três plasmas independentes (fig. 2). Sistemas de grades polarizadas poderão ser colocadas para separar os plasmas dependendo da maneira com que as ondas de Langmuir serão excitadas. O plasma é obtido através da introdução de gás nobre (Ar ou He) até uma pressão de 5.0×10^{-4} mbar. A descarga termiônica é produzida por catodos de Níquel cobertos por óxido de bário (BaO), indiretamente aquecidos até uma temperatura de 900°C. Os catodos são polarizados negativamente ($V_d = 50$ Volts) com relação ao anodo formado pela estrutura de ímãs permanentes, e emitem elétrons (primários) que ionizam por colisão os átomos do gás nobre. Com uma corrente de descarga da ordem $I_d = 10A$ será possível formar um plasma com densidade da ordem de 5×10^{10} part/cm³ e temperatura de 2.0eV.

Um campo magnético produzido por uma bobina de Helmholtz, calculada para produzir campo uniforme na região do plasma alvo central, será utilizado em breve. Com ele será possível realizar estudos de outros modos de propagação de ondas em plasmas.

2) Diagnósticos de plasma

São os seguintes os diagnósticos que serão utilizados na PQUI-II para estudo de ondas e turbulência:

- Sonda eletrostática de Langmuir para medida de densidade e temperatura de elétrons do plasma. Ela consiste de um eletrodo polarizado imerso no plasma que possui uma curva característica de Corrente x Tensão aplicada da onde se extraem vários parâmetros do plasma como correntes de saturação de elétrons e de íons, potencial flutuante, densidade e temperatura de elétrons e etc.
- Sonda emissiva para medida de potencial de plasma. Ela consiste de um eletrodo aquecido que emite elétrons na mesma proporção em que são coletados pelo eletrodo. O potencial da curva característica da sonda emissiva em que há balanceamento entre corrente emitida e coletada e dito potencial de plasma.

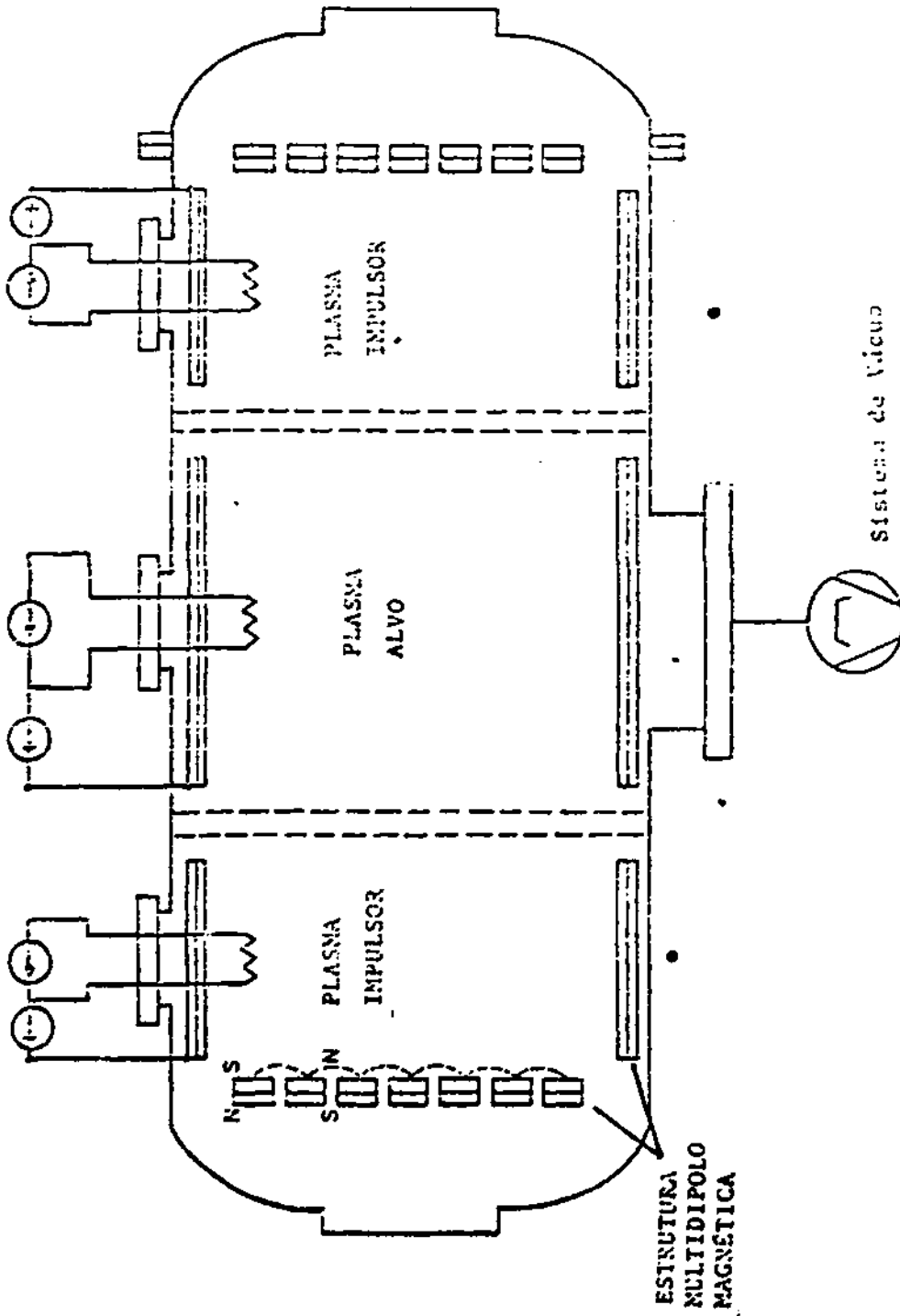


Fig. 2 - Esquema da estrutura interna de máquina PQU-11

2 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DO PROJETO

- Analisador eletrostático de energia de partículas consiste de um sensor de F_{raday} composto por duas grades e um coletor de partículas carregadas. Este sistema seleciona os íons de acordo com sua energia no interior do plasma.
- Sonda de RF para medida de frequência e comprimento de ondas de plasma. Ela pode ser formada por um ou dois eletrodos, ou mesmo por fios em forma de anel. Estes sensores são capazes de medir flutuações locais de densidade ou de campo elétrico. Podem ser acopladas diretamente a analisadores de espectro ou a sistemas interferométricos para medida de comprimento de onda e frequência.

a) Excitação e detecção de ondas de Langmuir

O arranjo experimental para geração e medida de ondas de Langmuir é muito variado, o LAP possui um gerador e um amplificador na faixa de 1 MHz a 1 GHz e com este equipamento devermos iniciar os experimentos medindo amplitude e frequência de ondas de Langmuir. O diagrama do sistema de detecção e excitação de ondas está mostrado na Fig. 2. Para avaliar a relação de dispersão as ondas de Langmuir utilizaremos o sistema interferométrico, os resultados estão mostrados na fig. 3. A antena poderá obter várias formas fio simples, fio em forma de anel, grades, placas paralelas ou até mesmo do tipo corneta frequência de excitação estiver na faixa de microondas ($F > 1 \text{ GHz}$). O sistema interferométrico da fig. 3b vai permitir obter de uma só vez a frequência, o decréscimo em amplitude e o comprimento das ondas de Langmuir.

b) Avaliação da amplitude de saturação de ondas de Langmuir

Como já foi assinalado anteriormente o objetivo deste experimento é o de determinar os mecanismos de saturação de ondas e de turbulência em plasmas. Para isso serão utilizados dois métodos de geração de ondas e turbulência de Langmuir.

MÉTODO A: Geração de ondas de Langmuir em plasma não-homogêneo.

O primeiro passo desta experiência é o de gerar condições de ressonância localizada de uma onda eletromagnética com o plasma. Para isso é necessário que um gradiente de densidade seja formado no plasma, tal que em algum ponto na região central da máquina $F_{\text{em}} = F_p$. Devido ao curto tempo de difusão do plasma para todo o volume da câmara a vácuo, a geração de um gradiente de densidade controlado requer cuidados especiais. Nas máquinas de plasma quiescente este gradiente é gerado por anteparos ou superfícies e perdas de partículas, que são acoplados com a antena produtora da onda eletromagnética de excitação.

Ao interagir com o plasma o campo elétrico da onda EM acopla-se com os elétrons que oscilam na frequência local de plasma. A energia da onda é transferida para os elétrons até que sejam expulsos do ponto de interação, formando uma cavidade ou buraco no perfil de densidade eletrônica. Associado à formação da cavidade ocorre uma separação de cargas que dá origem a um campo elétrico e a uma estabilidade modulacional de ondas de plasma. As ondas acústico-iónicas e as ondas de Langmuir geradas a partir da instabilidade poderão ser detetadas usando sondas de RF. O campo elétrico gerado poderá ser

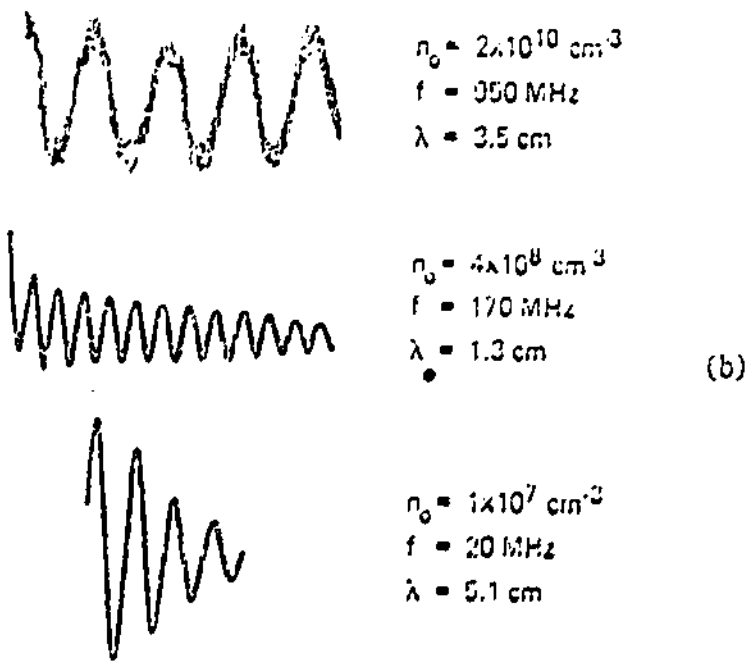
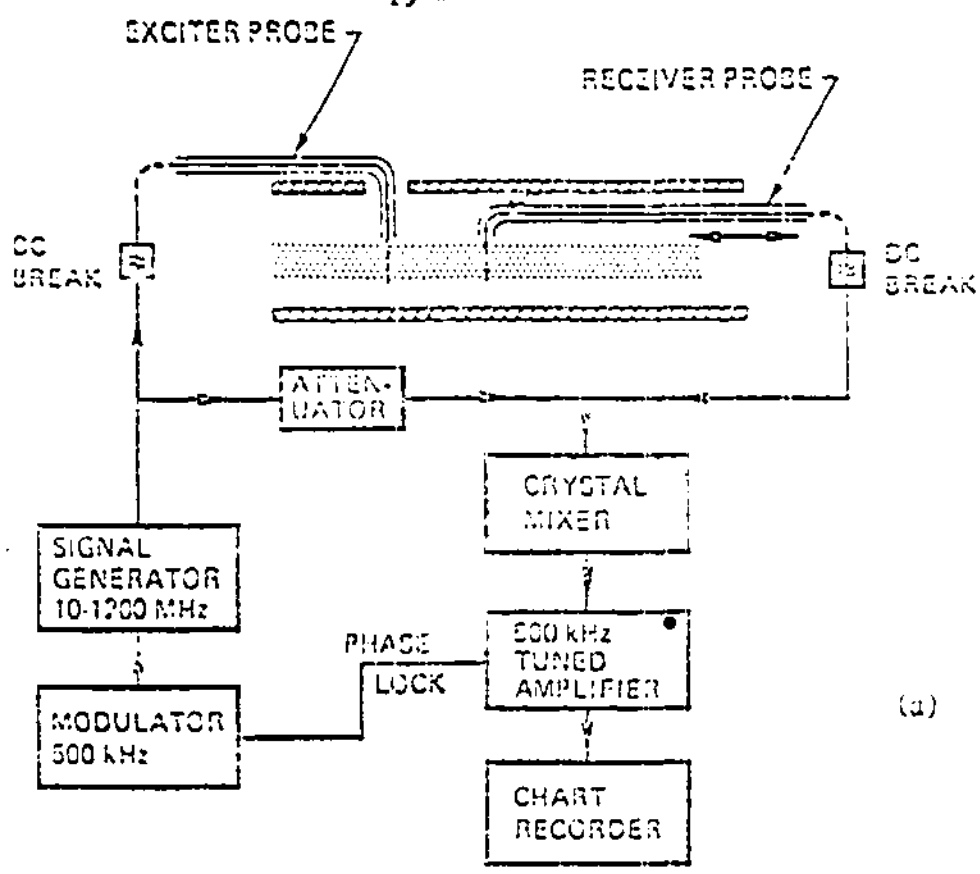


Fig. 3 - Sistema interferométrico de detecção e excitação de ondas de Langmuir (a). Variação espacial da densidade perturbada por ondas de plasma para várias frequências de excitação.

Fonte: Barret et al., 1968.

METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DO PROJETO

validado com uma sonda emissiva e o perfil de densidade medido com sondas eletrostáticas de Langmuir. O tempo necessário para o desenvolvimento e saturação da instabilidade poderá ser medido também com a sonda de RF e comparado com o tempo obtido a partir da teoria, (Cros et al., 1989) que é dado por:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_p \mu W}$$

onde f_p é a frequência de plasma e $\mu = m_e/m_i$ e a razão de massas entre elétrons e íons. A densidade de energia das ondas no plasma W é dada por:

$$W = \frac{1/2 \epsilon_0 E^2}{n_e K_B T_e}$$

MÉTODO B: Batimento de ondas eletromagnéticas em plasma.

A força ponderomotiva associada ao batimento de duas ondas com frequências ω_1 e ω_2 em um plasma homogêneo e neste caso responsável pela separação de cargas e pelo surgimento das ondas eletrônicas de plasma. A equação de evolução da amplitude da onda de Langmuir é dada por:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nu \frac{\partial}{\partial t} + 3 v_{th} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \omega_p^2 \right] E(x,t) = A E_1 E_2 \sin \omega t$$

onde ν é a frequência de colisões elétron-elétron, E_1 e E_2 são os campos elétricos associados com as ondas EM em batimento, $v_{th} = (KT_e/m_e)^{1/2}$ a velocidade térmica dos elétrons e A uma constante que depende do acoplamento das ondas EM em batimento. A magnitude da perturbação de densidade da onda está relacionada com o campo elétrico através da seguinte expressão:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{e}{m} \frac{K_B}{\omega_p^2} E$$

A amplitude relativa $\Delta n/n$ poderá ser medida diretamente através do sistema sonda de RF analisador de espectro e comparada com a expressão acima.

13 PLANO DE TRABALHO DISCRIMINAÇÃO DAS ATIVIDADES/MISSÕES

	DURAÇÃO PREVISTA		LOCAL
	INÍCIO	TÉRMINO	

As atividades e as missões a serem realizadas no período de duração do acordo são as seguintes:

Fevereiro a março de 1990: Missão de reconhecimento francesa ao Laboratório Associado de Plasmas do INPE por um período de 30 a 45 dias para os contatos iniciais, para avaliação da infraestrutura do projeto PQUI e para realização de seminários e conferências sobre o assunto deste convênio.

Junho a agosto de 1990: Missão de reconhecimento brasileira ao Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, Université Paris Sud por um período de 30 ou 60 dias para contatos iniciais com os experimentos de ondas e turbulência já em curso no LPGP. Será feita também uma avaliação dos equipamentos adicionais que serão necessários para o estudo dos processos não-lineares de ondas e turbulência de Langmuir.

Janeiro de 1991: Envio de um estudante brasileiro ao LPGP por um período de 2 a 3 anos, para preparação de uma tese de doutoramento experimental sobre geração de ondas de Langmuir em plasma não-homogêneo.

Abril de 1991: Envio de pesquisadores brasileiros ao LPGP por um período de 3 a 6 meses, para estudo experimental da influência da escala do gradiente de densidade na amplitude máxima das ondas de plasma, geradas na conversão de modos.

Abril de 1992: Vinda de pesquisadores franceses ao LAP-INPE por um período de 3 a 6 meses, para estudo do mecanismo de saturação de ondas de Langmuir geradas no batimento de duas ondas eletromagnéticas, de frequências distintas em plasma homogêneo.

Janeiro de 1993: Envio de um estudante brasileiro ao LPGP por um período de 2 a 3 anos, para preparação de uma tese de doutoramento experimental sobre aceleração de elétrons por batimento de ondas eletromagnéticas em plasmas.

Abril de 1993: Envio de pesquisadores brasileiros ao LPGP por um período de 3 a 6 meses, para estudos de simulação computacional com partículas dos mecanismos de saturação da turbulência de Langmuir. Serão também realizadas discussões sobre a implantação de um sistema de geração e detecção de ondas whistlers na máquina PQUI-II.

Outubro de 1993: Vinda de pesquisadores franceses ao LAP-INPE por um período de 3 a 6 meses para continuidade dos estudos de simulação computacional com partículas de ondas de Langmuir. Avaliação do projeto e discussão sobre a renovação do convênio em termos de estudos de ondas whistlers geradas por feixes de partículas carregadas.

14

ACEITE DA INSTITUIÇÃO

14.1 - CONCORDÂNCIA DO DEPARTAMENTO E/OU COLEGIADO DE PROFESSORES - GRADUAÇÃO.

O projeto de "Estudo de Ondas e Turbulência em Plasmas Naturais e em Plasmas de Laboratório", proposto nesta solicitação de cooperação internacional através do acordo CAPES/COFECUB é de interesse para o Laboratório Associado de Plasma do INPE. As atividades propostas complementam as atuais pesquisas do laboratório e contribuem para o estabelecimento de um programa de pesquisas voltado para simulação em laboratório de fenômenos que ocorrem em plasmas espaciais. Concorro com o projeto e declaro que toda infraestrutura do LAP estará disponível para realização do mesmo.

DATA: 09 / novembro / 1989


Chefe do Departamento

GERSON OTTO LUDWIG
Chefe do Laboratório
Associado de Plasmas

14.2 - REFERENDO DA PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

DATA: 10 / novembro / 1989


MARCO NOGUEIRA BARBOSA

13 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO PROJETO

A verificação do alcance dos objetivos e metas previstas neste projeto poderá ser feita através dos resultados que devem ser obtidos em cada uma das etapas do item 11.2.

- 1ª Etapa: Obtenção do plasma quiescente com as características previstas no projeto, isto é com densidade $n_e = 10$ e $T_e = 2.0$ eV, e publicação do relatório.
- 2ª Etapa: Obtenção da relação de dispersão para ondas de Langmuir lineares, apresentação de dissertação de mestrado do aluno Edevaldo D. Campos sobre o mesmo assunto e publicação de artigo.
- 3ª Etapa: Comparação dos resultados obtidos nos experimentos com as previsões teóricas e com os resultados obtidos em experimentos similares na ionosfera. Os resultados serão publicados.
- 4ª Etapa: Produção de campo magnético uniforme na região central da PQUI-II. Comparação dos resultados experimentais com os obtidos através de simulação computacional com partículas e publicação dos resultados em revistas.
- 5ª Etapa: Formulação de modelos baseados nos resultados obtidos e publicação de artigo conclusivo.

REFERÊNCIAS

- Barret, P.J.; Jones, H.G. and Franklin, R.N. "Dispersion of Electron Plasma Physics, vol. 10, pp. 911 to 918, 1968.
- Chian, A.C.L. "Nonlinear Travelling Longitudinal Waves in a Cold Plasma Physics, vol. 21, 509-530, 1979.
- Cros, B.; Matthieussent G. Godiot, J. and Heron, A. "Stochastic Behavior of Resonant Absorption in a Plasma at Microwave Frequencies". *Europhysics Letters*, 9 (1), pp. 41-46 (1989).
- Ferreira, J.G.; Ferreira, J.L.; Ludwig, G.O. "Estudo da Descarga na Máquina de Plasma Quiescente do INPE". *Anais do IX Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC)*, Campinas, SP, julho de 1988.
- Ferreira, J.L. "Fenômenos Acústico-Iônicos Lineares e Não-Lineares em Descargas Multidipolo magnéticas". *Tese de Doutorado, INPE-4100-TDL/257, Instituto de Pesquisas Espaciais, 1986.*
- Ferreira, J.L.; Ludwig, G.O.; Ferreira, J.G.; Montes, A. "Anomalous Particle Diffusion Through a magnetic Picket Fence". *Proc. of the Symp. on Small Scale Laboratory Plasma Experiments of the Spring College on Plasma Physics, Trieste, Italy, May-June 1989.*
- Heush, B.; Matthieussent, G. "Accélérateurs et Nouveaux Concepts D'Accélération de Particules". *Revue de Physique* 23 (1988) 1417-1421.
- Kim, H.C.; Stenzel, R.L.; Wong, A.Y. "Development of Cavitons and Trapping of RF Field". *Phys. Rev. Lett.* vol. 33, n. 15 (1974) 886-889.
- Ludwig, G.O.; Ferreira, J.L. and Nakamura, Y. "Observation of Ion-Acoustic Rarefaction Solitons in a Multicomponent Plasma with Negative Ions". *Phys. Rev. Lett.* vol. 52, n. 4 (1984).
- Ludwig, G.O.; Ferreira, J.L. and Montes, A. "Double Layers Formed by Beam Driven Ion-Acoustic Turbulence". *Proc. of the Energy Independence Conference on Fusion Energy and Plasma Physics, World Scie. Publ. Co. pg. 396, Aug. 1987.*
- Matthieussent, G. "Project de Collaboration en Ondes Turbulence dans Les Plasmas Naturels et de Laboratoire". *Publication Interne de Physique des Gaz et des Plasmas, juillet 1987.*
- Pinto, O. Jr. and Gonzalez, W.D. "Energetic Electron Precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a Review". *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 51, n. 5, pp. 351-365, 1989.
- Stenzel, R.L. "Whistler Wave Propagation in a large Magnetoplasma". *Phys. of Fluids*, vol. 19, n. 6, June 1976.
- Shibata, C.S.; Montes, A. "Propagation and Damping of Whistler Waves in Tokamaks". *3rd Latin-American Workshop on Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion Research Sochifi/ICTP, Santiago, Chile, julho de 1988.*
- Tanikawa, T.; Wong, A.Y. and Eggleston, D.L. "Trapping of Plasma Waves in Cavitons". *Phys. of Fluids* 27(6), June 1984.
- Wong, A.Y.; Tanikawa, T. and Kushi, A. "Observations of Ionospheric Cavitons". *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, n. 13, March 1987.
- Wong, A.Y.; Cheung, P.Y. and Tanikawa, T. "Evolution from Coherence to Turbulence in Plasmas" in *Statistical Physics and Chaos in Fusion Plasmas* edited by C.W. Horton and L.E. Reichl, John Wiley & Sons, INC 1984.