

BR 9127244

CNEC



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

INPE -- 5127



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS
**ACELERAÇÃO DE PARTÍCULAS
ONDAS ELETRÔNICAS DE PLASMA
ONDAS WHISTLERS**

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
Gerson Otto Ludwig
**Gerson Otto Ludwig
Chefe do LAP**

AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR
José Leonardo Ferreira

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION
 INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY
Julio Guimarães Ferreira
Julio Guimarães Ferreira

ISSN/UDC
537.5

DATA DATE
setembro/1990

INPE-5127-RPE/632
**PROJETO DE ESTUDO EXPERIMENTAL DE ONDAS
E TURBULÊNCIAS EM PLASMAS**

José Leonardo Ferreira

SISTEMA
LAP

PROJETO
PROJECT
PQUI

NÚMERO DE PÁGINAS
NO OF PAGES
40

ÚLTIMA PÁGINA
LAST PAGE
35

TIPO DE PUBLICAÇÃO
NO OF PAGES

NÚMERO DE MAPAS
NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

O objetivo deste projeto é realizar experimentos com fenômenos ondulatórios que ocorrem em plasmas. O interesse maior está no estudo das ondas de Langmuir e whistlers devido às suas relações com fenômenos comuns a plasmas espaciais e a plasmas de laboratório. Os novos conceitos de aceleração de partículas utilizando ondas eletromagnéticas, o surgimento das auroras nas regiões polares e a precipitação de partículas carregadas para atmosfera, através das anomalias do campo magnético terrestre são exemplos de fenômenos onde estas ondas desempenham um papel importante. Neste projeto pretendemos estudar a propagação destas ondas em uma máquina de plasma quiescente, que produz plasma com características muito semelhantes às do plasma ionosférico, isto é, baixa densidade e temperatura. O projeto fará parte das atividades da área de física de plasma básica do LAP, contará com a colaboração dos Departamentos de Astronomia e Geofísica Espacial do INPE e com o apoio do Laboratório de Physique des Gaz et des Plasmas da Université de Paris-Sud, na França.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Proposta de Auxílio à Pesquisa submetido ao CNPq e aprovada pelo MEC para realização de acordo científico e tecnológico com a França, através do convênio CAPES / COFECUB.

ABSTRACT

The objective of this project is to perform experiments with wave phenomena on plasmas. Particular attention will be given to Langmuir and whistler waves due to its relations with several phenomena occurring on space and laboratory plasmas. The new concepts of particle acceleration with electromagnetic waves, the auroral phenomena on the polar regions and the charged particle precipitation to the atmosphere through anomalies of the earth magnetic field are examples where these waves have an important role. In this project we intend to study the propagation of these waves in a quiescent plasma machine. This machine is able to produce a plasma with density and temperature with values similar to what is met in the ionosphere. This project will be a part of the activities of the basic plasma group of the INPE's Associated Plasma Laboratory (LAP). It will have the collaboration of the departments of Aeronomy and Geophysics also from INPE, and the collaboration of the Plasma and Gas Physics Laboratory from University of Paris - South, in France.



SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	v
<u>1 INTRODUÇÃO</u>	1
<u>2 DETALHAMENTO DO PROJETO</u>	4
Ondas e turbulências de Langmuir.....	4
Aceleração de partículas em plasmas.....	7
Ondas Whistlers.....	9
<u>3 METODOLOGIA</u>	10
Produção do plasma quiescente.....	10
Diagnóstico de plasma.....	13
Medida da relação de dispersão para ondas de Langmuir.....	15
Avaliação da amplitude de saturação de ondas de Langmuir em plasma não-homogêneo.....	17
Medida da aceleração de elétrons em um plasma com ou sem campo magnético externo.....	18
Estudo da interação de ondas whistlers com elétrons no cone de perdas de uma cúspide magnética.....	20
Relação dos equipamentos e materiais disponíveis no laboratório de plasma quiescente do LAP-INPE.....	21
<u>4 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DO PROJETO</u>	23
<u>5 RELAÇÃO DO PESSOAL ENVOLVIDO NO PROJETO</u>	24
<u>6 OUTRAS ENTIDADES ENVOLVIDAS NA EXECUÇÃO DO PROJETO</u>	25

	<u>Pag.</u>
7 <u>RELAÇÃO DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS SOLICITADOS AO CNPq....</u>	25
8 <u>COMENTÁRIOS FINAIS.....</u>	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	29

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Vista geral do laboratório de Plasma Quiescente do LAP-INPE.....	3
2 - Máquina de plasma quiescente PQUI-II com sistemas de produção e diagnósticos de plasma.....	11
3 - Estrutura interna da máquina PQUI-II.....	12
4 a) Sistema interferométrico de detecção e excitação de ondas de Langmuir.....	16
b) Variação espacial da densidade perturbada por ondas de Langmuir.....	16

1 INTRODUÇÃO

O projeto de estudo de ondas e turbulência em plasmas se insere no projeto Plasma Quiescente (PQUI) do LAP que, desde 1981, vem realizando estudos de ondas lineares e não lineares em plasmas fracamente ionizados (Fig. 1). Atenção especial é dada atualmente a processos relacionados com a difusão anômala de partículas através de campos multidipolo magnéticos e a formação de camada dupla acústico-iônica devido à turbulência. O projeto possui duas câmaras de produção de plasma (PQUI-I e PQUI-II), cujas características são adequadas ao estudo de fenômenos básicos e à simulação da propagação de ondas em plasmas espaciais, devido à uniformidade e ao grande volume dos plasmas gerados. Em uma delas (PQUI-I) foram obtidos resultados importantes como a observação inédita de sólitons acústico-iônicos de rarefação, e a comprovação experimental do mecanismo de reforço na formação de camada dupla acústico-iônica.

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 têm sido realizados em diversos laboratórios do mundo, visando compreender fenômenos de propagação de ondas da ionosfera, na magnetosfera e no espaço interplanetário e interestelar. 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 exemplo, a utilização de feixes de elétrons modulados na geração de ondas whistlers para comunicação entre satélites orbitando na magnetosfera.

Nos últimos anos a comunidade de geofísica tem dado grande atenção aos processos de entrada de partículas carregadas para

atmosfera, através da anomalia magnética do Atlântico Sul. Existem evidências experimentais que mostram que o fenômeno é causado por um acoplamento ressonante entre ondas e partículas. As partículas com velocidades próximas da velocidade de fase da onda poderão ser aprisionadas pelo poço de potencial associado à perturbação, e serem aceleradas em direção à atmosfera. As partículas encontram maior facilidade para penetrar na atmosfera nas regiões onde existem perturbações ou anomalias no campo magnético da Terra. As ondas que mais parecem contribuir para este processo são as ondas whistlers e as ondas de Langmuir.

A interação onda-partícula em plasmas é um fenômeno também importante na formação das auroras. No entanto, atualmente, o maior interesse está em observá-lo em plasmas de laboratório. É neles que os estudos deste processo estão contribuindo para o desenvolvimento de novas concepções para aceleradores de partículas. Existem, atualmente, pelo menos duas linhas de pesquisa nesta área. A primeira, procura obter ondas de Langmuir de grande amplitude, com campo elétrico associado de até 1,0 GV/m, através do batimento de duas ondas eletromagnéticas provenientes de Lasers de alta potência em um plasma de alta densidade (Beat Wave Accelerator). A segunda produz a aceleração das partículas através de campos elétrico e magnético cruzados (Surfatron). O campo magnético é, em geral, estático e produzido externamente, e o campo elétrico é proveniente de uma onda de Langmuir produzida por um processo conhecido como conversão linear de modos de ondas eletromagnéticas.

O projeto de ondas e turbulências em plasmas pretende estudar estes mecanismos de aceleração de partículas. Para isso, iniciaremos nossos estudos com a medida experimental das relações de dispersão para ondas de Langmuir lineares e não-lineares na máquina PQUI-II. Em seguida, estudaremos a conversão linear de modos de ondas eletromagnéticas em um plasma quiescente com gradiente de densidade controlável. Este último estudo servirá de base para a realização de estudos de aceleração de partículas, utilizando o



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

conceito do Surfatron. Após a instalação de campos magnéticos externos será possível, também, realizar estudos de geração e propagação de ondas whistlers, utilizando feixes de partículas e antenas imersas no plasma.

Para realização destes estudos, contamos com a maior parte do material necessário já instalado na máquina PQUI-II. No entanto, não possuímos alguns equipamentos fundamentais para a realização deste projeto. Por isso, além da bolsa de pesquisa estamos solicitando, também, um auxílio para compra de materiais e equipamentos para este projeto.

2 DETALHAMENTO DO PROJETO

A) Ondas e Turbulências de Langmuir

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 1926, mas só foram observadas por Revans (1933, citados por Chen, 1977).

As ondas de Langmuir são estudadas em máquinas de plasma quiescente desde o final da década de 1969, quando estas máquinas se mostraram mais promissoras ao estudo de fenômenos básicos em plasmas. 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:

$$\omega_p = \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}^{1/2} \quad f_p \text{ (Hz)} = 9000 \sqrt{n_e}$$

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 de f_p .

Em um plasma não homogêneo com perfil de densidade n_e , previamente conhecido é possível lançar uma onda eletromagnética de frequência igual à 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.

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 como os valores de pressão, densidade e de perfil de potencial elétrico.

Na presença de feixes intensos de partículas ou de ondas eletromagnéticas de alta potência é comum o aparecimento de ondas de Langmuir turbulentas. Vários trabalhos teóricos procuram explicar a saturação do espectro das ondas turbulentas como resultado da transferência de energia dos modos de grande comprimento de onda, para os modos de pequeno comprimento de onda. Isto é, na verdade, uma analogia ao espectro de Kolmogoroff aplicado à 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 descrevendo 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.

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 nível de ruído 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.

B) Aceleração de Partículas em Plasmas

A aceleração de partículas a partir da interação com ondas e campos eletromagnéticos já vem sendo investigada em plasmas espaciais desde a década de 50 por Fermi, MacMillan e outros (1985). No entanto, só recentemente os mecanismos físicos destes processos foram determinados. Através de simulação computacional Tajima e Dawson demonstraram que um pulso de onda eletromagnética intensa pode criar um pacote de ondas eletrônicas de plasma através da ação de forças ponderomotivas não lineares. Elétrons com velocidades próximas a velocidade de fase do pacote de onda gerado podem ser aprisionados pelo poço do potencial associado à onda de Langmuir não linear e serem acelerados para altas energias. Estudos experimentais posteriores feitos, principalmente, nos laboratórios da UCLA por Joshi e outros, demonstraram em parte os resultados obtidos a partir de simulação, e verificaram que as partículas têm um limite máximo para a energia final adquirida.

Recentemente ficou demonstrado que, mesmo utilizando o batimento de ondas eletromagnéticas intensas, proveniente de lasers de alta potência, não é possível acelerar as partículas até ao limite máximo de energia obtido a partir de simulação computacional. Para contornar estas dificuldades, Katsouleas e Dawson (1983), propuseram um novo conceito de aceleração que, pelo menos teoricamente, não possui nenhuma limitação. A este novo método de aceleração de partículas deu-se o nome de Surfatron.

Através da introdução de um campo magnético perpendicular à direção de propagação das ondas de Langmuir, é possível defletir as partículas de forma a cruzarem a frente de onda. Este movimento realizado pelas partículas é semelhante ao movimento de um surfista, que procura se manter em fase com a onda, realizando um movimento que tem duas componentes de velocidade: uma paralela e outra

perpendicular à direção de propagação da onda. O ganho de energia por unidade de distância percorrida pela partícula na direção de propagação (z) e na direção perpendicular (x) são dados por:

$$\frac{\Delta U_z}{\Delta \lambda} = 300 \text{ GeV/cm.} \frac{B(\text{KG})}{n_e (\times 10^{16} \text{ cm}^{-3})} \cdot \frac{1}{\lambda^2}$$

$$\frac{\Delta U_x}{\Delta \lambda} = 0,1 \text{ GeV/cm.} \frac{8 \text{ KG } n_e (\times 10^{16} \text{ cm}^{-3})^{1/2}}{n_e (\times 10^{16} \text{ cm}^{-3})^3 \lambda}$$

Estas expressões foram calculadas, originalmente, para serem aplicadas nos casos em que as ondas de Langmuir são produzidas por pulso de laser de alta potência em plasma totalmente ionizado de alta densidade 10^{19} cm^{-3} com campo magnético estabilizador da ordem de 100 KGauss.

A primeira constatação experimental de aceleração de elétrons, usando o método do Surfatron, foi feita, no entanto, em uma máquina de plasma quiescente com gradiente de densidade controlável e densidade e temperatura de elétrons de, no mínimo, $2,0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ e 2,0 eV respectivamente. A onda eletromagnética excitadora era produzida por um magnetron de 2,45 Ghz e 3,0 KW, e o campo magnético estabilizador da ordem de 10 Gauss. Com estes parâmetros foram obtidas energias de aceleração para os elétrons da ordem de 100 eV.

C) Ondas Whistlers

Desde os primeiros estudos de emissão de ondas eletromagnéticas da ionosfera havia uma curiosidade só hoje entendida, referente a um som de frequência descendente em forma de assvio. Este som pode ser facilmente ouvido nos autofalantes de rádios aparelhados com faixas de ondas curtas. Sabe-se hoje que a origem destes assvios está associada a ondas eletromagnéticas circularmente polarizadas à direita, que se propagam ao longo das linhas do campo magnético da Terra, na região da ionosfera. Estas ondas são, em geral, provocadas por descargas elétricas na atmosfera e podem se propagar de um hemisfério ao outro. Um observador posicionado em qualquer um deles notará que as frequências mais altas chegam primeiro ao seu receptor. Esta é uma propriedade destas ondas que pode ser deduzida da relação de dispersão dada por:

$$\frac{\omega^2}{k^2 c^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - \omega_c)} \quad -1$$

A velocidade de fase das ondas whistlers (em português, ondas de assvio) é tanto maior quanto maior for a frequência. Além disso, vale notar também da relação de dispersão que as ondas whistlers só se propagam com frequência abaixo da frequência ciclotrônica para os elétrons.

Recentemente, pesquisadores do Depto. de Geofísica do INPE encontraram evidências de que elétrons que se precipitam na atmosfera com energias da ordem de 1 MeV através da anomalia magnética do Atlântico Sul são, na verdade, acelerados por ondas whistlers de baixa frequência (ondas hiss). Acredita-se que este fenômeno de interação onda partícula esteja vinculado a um processo conhecido como ressonância de Landau. Cálculos do engrandecimento do

coeficiente de difusão clássico para os elétrons no cone de perdas do campo magnético da anomalia, indicam a possibilidade de ocorrência destes fenômenos.

Será possível simular em laboratório estes processos com a aplicação de um campo do tipo espelho magnético no plasma da máquina PQUI-II. O campo deverá ser suficientemente variável para permitir ajustes no cone de perdas nas cúspides do campo magnético. As ondas serão excitadas por antenas do tipo lupa posicionadas no centro do plasma entre os cones de perdas. Será, também, realizado um estudo inédito da conversão linear de ondas whistlers em ondas acústico-iônica e de Langmuir, em um plasma quiescente não-homogêneo.

3 METODOLOGIA

Para a realização das metas propostas neste projeto 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 flutuações de densidade e de analisadores de energia para detetar feixes e medir funções de distribuição de energia de partículas. No entanto, para medir frequência, comprimento de onda e amplitude de ondas de Langmuir e whistlers técnicas de geração e detecção de sinais na faixa de UHF e microondas serão necessárias. A seguir faremos um resumo de cada uma das principais técnicas que serão empregadas nestes experimentos.

A) 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.=0,6m e compr.=1,2m feito de aço inox não magnetizável (Fig.2). A câmara é evacuada por bombas de vácuo difusora (2000 l/s) e mecânica (40 m³/h) até uma pressão de fundo de 10⁻⁸ 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



Fig. 2 - Máquina de Plasma Qufescente PQU1-II com sistemas de Produção e Diagnóstico de plasma.

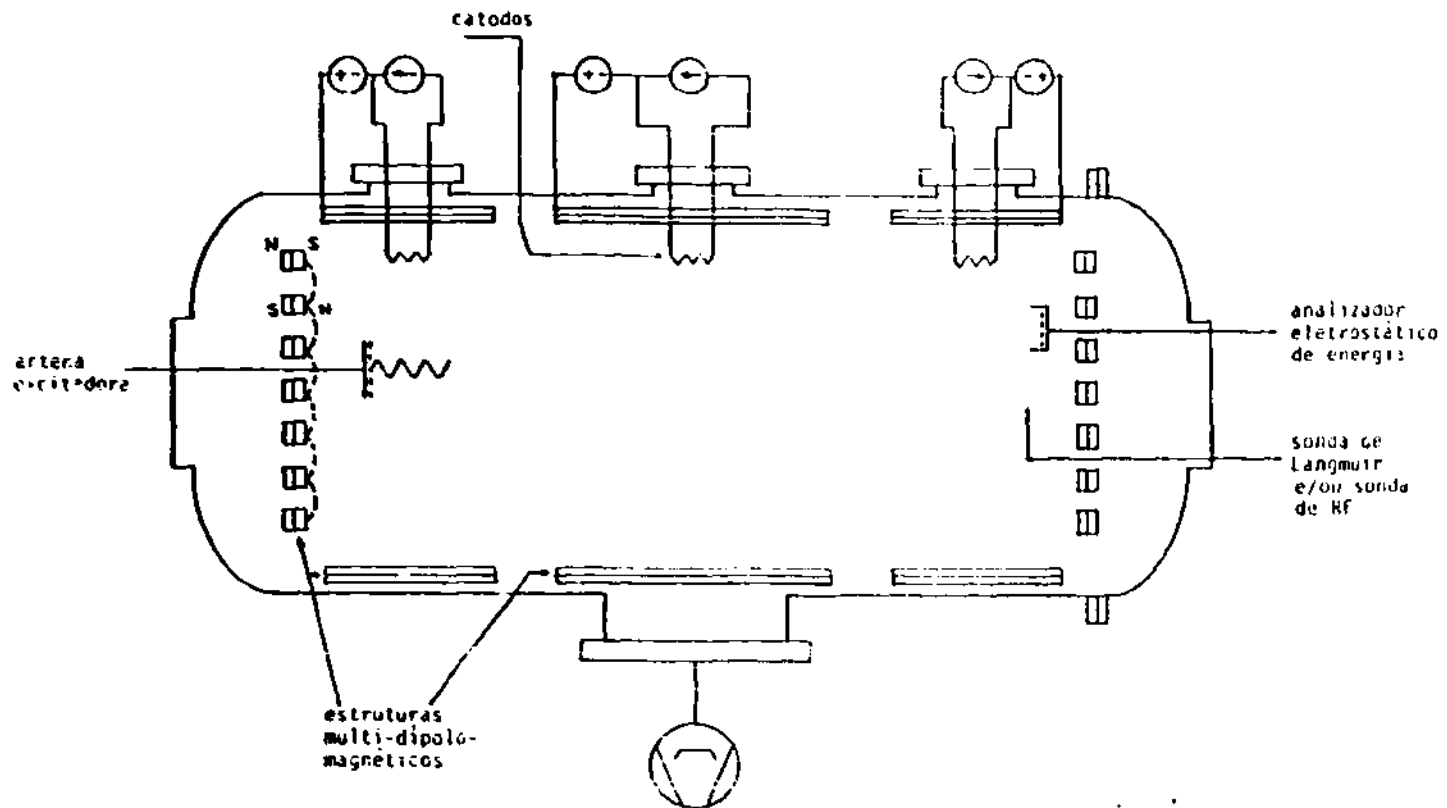


Fig. 3 - Estrutura interna da máquina PQUI-II.

produzir plasmas mais densos. Ele é formado por três estruturas de campos multidipolo-magnéticos produzidos por barras de ímãs permanentes de ferrita, isoladas eletricamente para formar três plasmas independentes (Fig. 3). Sistemas de grades polarizadas poderão ser colocadas para separar os plasmas dependendo da maneira com que as ondas forem excitadas. O plasma é obtido através da introdução de gás nobre (Ar ou HE) até uma pressão de $5,0 \times 10^{-4}$ 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 de $I_d = 10A$ será possível formar um plasma com densidade da ordem de $5,0 \times 10^{10}$ part/cm³ e temperatura de 2,0 eV.

Campos magnéticos produzidos por várias bobinas serão utilizados nos estudos de aceleração de partículas com ondas de Langmuir e ondas whistlers. Dois conjuntos de bobinas serão utilizados para produzir dois campos magnéticos perpendiculares entre si. O campo na direção z (eixo da máquina) será necessário para geração de ondas whistlers e deverá produzir um valor máximo de 500 Gauss. O outro campo de menor magnitude ($B_y \text{ max.} = 50$ Gauss) será utilizado para acelerar partículas no esquema do tipo surfatron. O campo B_v terá a função de manter em fase a velocidade da partícula e a velocidade de propagação da onda.

B) Diagnósticos de Plasma

São os seguintes os diagnósticos que serão utilizados na PQUI-II neste projeto:

- 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 de onde se extraem vários

parâmetros do plasma como corrente de saturação de elétrons e 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 a coletada, é dito potencial de plasma.
- Analisador eletrostático de energia de partículas consiste de um sensor de Faraday composto por duas grades e um coletor de partículas carregadas. Este sistema seleciona íons ou elétrons dependendo dos potenciais aplicados às grades. A sua grande vantagem é que, devido às suas dimensões, ele pode ser introduzido no interior do plasma, isto o faz ideal para medir a energia de partículas aceleradas por ondas em plasmas.
- Sonda de RF para medida de frequência, comprimento de onda e amplitude de ondas de Langmuir e Whistlers. 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 fazer parte de um sistema interferométrico.
- Sonda magnética para medida de campo e ou de flutuações magnéticas. Sondas do tipo Hall conectadas a amplificadores serão utilizadas no mapeamento do campo magnético da PQUI-II e na medida de flutuações magnéticas provocadas por ondas whistlers.

- Medidor de função de distribuição de energia de elétrons. Um circuito detetor de segunda harmônica será utilizado para obter a segunda derivada da curva característica de um sonda de Langmuir, que é proporcional à função de distribuição de energia dos elétrons do plasma.
- Sistema de aquisição de dados para coleta e elaboração das medidas efetuadas pelas sondas. Ele é formado por um microcomputador do tipo PC, com placa de interface para digitalizadores acoplados aos diversos sensores da máquina PQUI-II.

C) Medida da Relação de Dispersão Para Ondas de Langmuir

A relação de dispersão para ondas de Langmuir lineares, também conhecida como relação de Bohm-Gross para ondas eletrônicas de plasma é dada por:

$$f^2 = f_p^2 + \frac{3 V_{the}^2}{\lambda^2}$$

onde f_p é a frequência de plasma; V_{the} é a velocidade térmica dos elétrons e f e λ são respectivamente a frequência e o comprimento da onda de Langmuir.

O arranjo experimental para geração e detecção de ondas de Langmuir é muito variado. Neste experimento vamos produzir ondas, utilizando uma grade circular imersa no plasma e ativada por gerador e amplificador de RF na faixa de 10 MHz a 990 MHz de frequência e potência máxima de 5 W. Para detetar e analisar os diversos modos excitados utilizaremos um analisador de espectro conectado a uma sonda de RF polarizada com desacoplamento DC via transformador de pulso. Para avaliar a relação de dispersão para estas ondas é necessário medir simultaneamente frequência e comprimento de onda. Isto só poderá

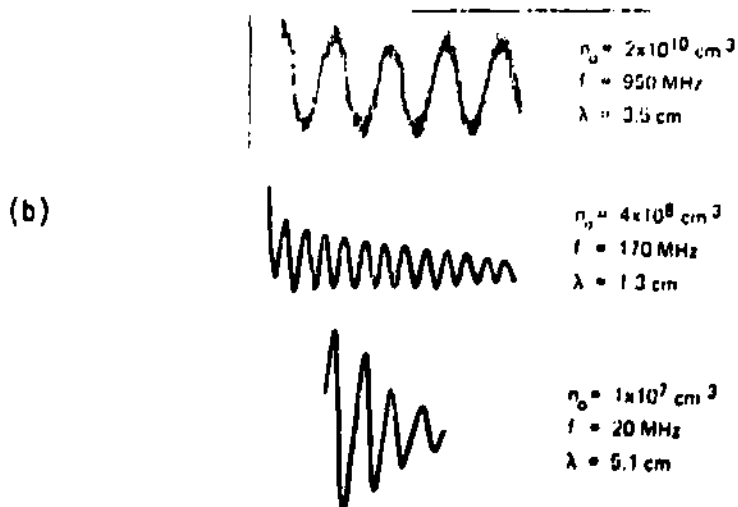
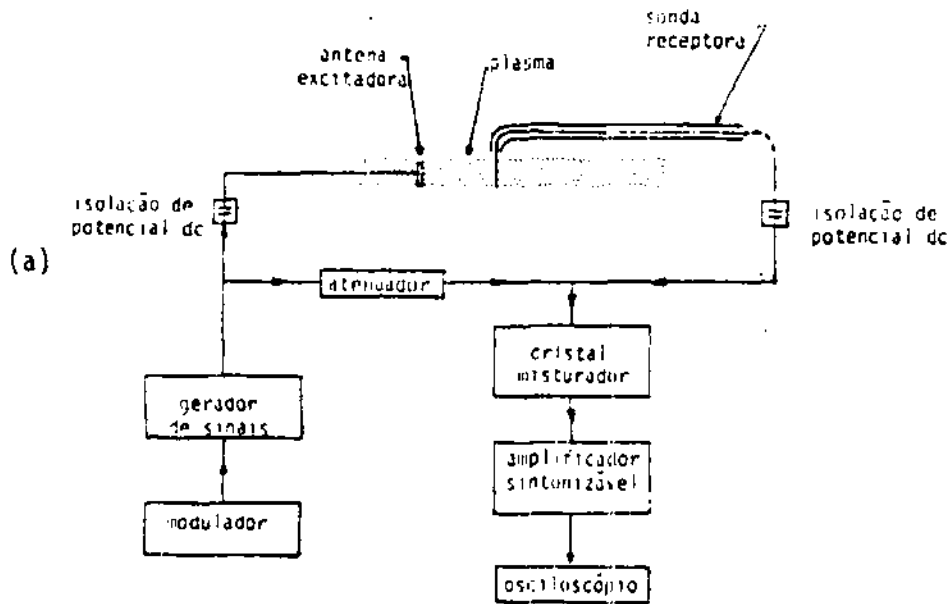


Fig. 4 - (a) - Sistema interferométrico de detecção e excitação de ondas de Langmuir.
(b) - Variação espacial da densidade perturbada por ondas de Langmuir.

ser realizado através de um sistema interferométrico como exemplificado na Fig. 4. Observe-se na Fig. 4b que é também possível medir o amortecimento espacial destas ondas com este sistema.

D) Avaliação da Amplitude de Saturação 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 $f_m = f_p$. Devido ao curto tempo de difusão do plasma para todo volume da câmara de 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 de perdas de partículas, que são presos à própria 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, acelerando-os para fora da região de interação, formando uma cavidade ou buraco no perfil espacial de densidade eletrônica. Associado à formação da cavidade ocorre uma separação de cargas que dá origem a um campo elétrico e a uma instabilidade. As ondas de Langmuir geradas a partir da instabilidade poderão ser detetadas usando sondas de RF. O campo elétrico localizado poderá ser avaliado 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 $\mu = m_e/m_i$ é a razão de massas entre elétrons e íons, e W a densidade de energia das ondas no plasma dada por:

$$W = \frac{1/2 E_0^2}{n_e k_B T_e}$$

E) Medida da Aceleração de Elétrons em um Plasma Com ou Sem Campo Magnético Externo

Sendo o plasma um meio constituído por partículas carregadas com igual número de cargas opostas ele é eletricamente neutro em comprimentos maiores que o comprimento de Debye λ_D . Em um plasma, qualquer campo elétrico é imediatamente blindado pelas partículas carregadas, que tendem a manter a quase neutralidade do meio. A blindagem de campos elétricos em plasmas é muito eficiente, permitindo que campos superiores a 100 MV/cm possam ser gerados em seu interior. Estes campos podem ser produzidos por ondas eletromagnéticas longitudinais ($k//E$) de grande amplitude ou por ondas EM transversais através da conversão linear de modos em um plasma não homogêneo.

O campo elétrico máximo gerado na interação onda-plasma poderá ser estimado a partir das seguintes relações:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \delta n_e$$

$$\omega_{pe} = \left(\frac{n_{e0} e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2}$$

Se a perturbação causada pela onda no plasma for da ordem da densidade local do mesmo ($\delta n_e \sim n_{e0}$), o campo elétrico máximo será dado por:

$$E_{\max.} = 0,97 \sqrt{n_{e0}} \text{ (V/cm)}.$$

A máquina PQUI-II poderá produzir plasma com densidades entre 10^9 part./cm³ e 10^{12} part./cm³. Campos elétricos gerados nestas condições deverão estar no máximo entre 30 KV/cm e 1MV/cm. Neste projeto pretendemos realizar um experimento com aceleração de elétrons que será dividido em duas fases. Na primeira, estudaremos as condições para gerações de grandes campos elétricos e sua relação com o fenômeno de geração de "cavitons". Na segunda fase, construiremos um analisador para medir a energia, a dos elétrons acelerados com e sem campo magnético externo. De acordo com o conceito de aceleração de elétrons proposto no SURFATRON é possível manter o elétron acelerado em fase com a onda de plasma a partir da aplicação de um campo magnético B_0 perpendicular à direção de propagação da onda com velocidade de fase V_p . A aceleração de partículas, neste caso, é na direção $V_p \times B_0$, e é caracterizado pelo fato de que um campo elétrico DC aparece no referencial da onda, acelerando as partículas aprisionadas perpendicularmente à direção de propagação da onda. A potência mínima

requerida para a onda EM, para acelerar elétrons com até 100 eV foi experimentalmente determinada e é da ordem de 1KW para plasmas com densidade em torno de 10^{10} part./cm³. Nesta proposta estamos solicitando materiais e equipamentos para reproduzir estas condições na máquina PQUI-II.

F) Estudo da Interação de Ondas Whistlers com Elétrons no Cone de Perdas de uma Cúspide Magnética

As bobinas magnéticas com espiras refrigeradas à água que pretendemos instalar na máquina PQUI-II poderão produzir um campo na região central do plasma de até 500 Gauss; isto é suficiente para magnetizar apenas os elétrons do plasma. Na cúspide magnética será possível atingir valores de campo magnético de até 1 KGauss e aí para um plasma de hélio ou hidrogênio teremos íons magnetizados. Com as fontes de corrente à disposição no LAP será possível trabalhar com campos magnéticos com, no máximo, 150 Gauss, que produzirão no plasma uma frequência elétron ciclotrônica de 420 MHz. Para um plasma com densidade de 10^{10} part./cm³ a frequência eletrônica de plasma será de 898 MHz. Neste caso, se uma onda for excitada com frequência da ordem de 200 MHz o comprimento de onda será da ordem de 30 cm, muito grande para as dimensões da máquina que possui Diam. = 60 cm e Compr = 120 cm. Por isto, nesta proposta, estamos solicitando fontes de corrente que permitirão a aplicação de campos magnéticos mais altos no plasma.

Com sondas de RF dipolares posicionadas em vários pontos ao longo da passagem da onda será possível avaliar as condições para reflexão destas ondas nas cúspides magnéticas. Estas sondas serão úteis, também, nos experimentos de produção de ondas whistlers por feixes de elétrons modulados na frequência de excitação das ondas.

Para avaliar a influência das ondas whistlers no aumento da difusão dos elétrons através do cone de perdas utilizaremos um

analisador eletrostático posicionado na saída do cone para medir a função de distribuição dos elétrons com e sem a presença das ondas whistlers. O coeficiente de difusão poderá ser estimado a partir da avaliação do perfil de densidade eletrônica ao longo do eixo da cuspide na presença ou não das ondas whistlers.

G) Relação dos Equipamentos e Materiais Disponíveis no Laboratório de Plasma Quiescente do LAP-INPE

- Sistema de vácuo com bomba difusora Edwards (280 l/s)
- Câmara de vácuo (diâm. = 30 cm; compr. = 75 cm) PQUI-I
- Controlador de medidor de vácuo por ionização Leybold
- Fontes de alimentação Tectrol (duas TC60-01, Uma TC60-02, três TCA120-02, uma TCA150-05, duas TCA120-20, duas TCA-40-100)
- Registrador X-Y HP 7047A
- Integrador síncrono EGG PARC 162
- Gerador de pulsos Tektronics PG-505 (duas unidades)
- Gerador de funções Tektronics FG 504
- Osciloscópio de duplo feixe Tektronics 7844 (400 MHz)
- Analisador de espectro Tektronics 7113 (1Khz-1,8 GHz)
- Amplificador síncrono EGG PARC 124A

- Sistema de vácuo bomba difusora (2000 l/s) e controlador 2002 Edwards
- Câmara de vácuo criometal (diam. = 65 cm; compr. = 120 cm) PQUI-II
- Osciloscópio Tektronics R7603 com módulo digitalizador programável 7020 e acessórios
- Unidade de fita magnética Tektronics 4924 (2 unidades)
- Gerador de funções Tektronics PG5010
- Registrador X-Y HP 7090A
- 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
- Microcomputador tipo IBM PC XT com 704 memória RAM, interface RS 232, cartão controlador GPIB e impressora

4 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DO PROJETO

Primeiro ano - 1990

1º Trimestre - Montagem da estrutura interna da máquina PQUI-II e caracterização do plasma gerado.

Obs.: atividade já encerrada

2º Trimestre - Avaliação da relação de dispersão para ondas Langmuir em plasma homogêneo.

Obs.: atividade em andamento

3º Trimestre - Medida da amplitude máxima da saturação de ondas turbulentas de Langmuir excitadas por ondas eletromagnéticas em um plasma não-homogêneo.

4º Trimestre - Instalação dos campos magnéticos (B_z e B_y) externos na PQUI-II e avaliação do perfil espacial destes campos no interior da máquina.

Segundo ano - 1991

1º Trimestre - Estudo experimental da Geração de Cavitons com e sem campo magnético externo.

2º Trimestre - Geração e detecção de ondas whistlers lineares. Medida da relação de dispersão em plasma homogêneo.

3º Trimestre - Instalação de fontes de RF de alta potência, montagem de circuito acoplador de impedância e construção de antena capacitiva para aumentar a eficiência de geração das ondas eletromagnéticas.

4^o Trimestre - Estudo da aceleração de elétrons usando o esquema do tipo surfatron com fontes de RF de alta potência operando em regime pulsado. Estudo do aumento da difusão de elétrons no cone de perdas de um espelho magnético na presença de ondas whistlers não-lineares.

5 RELAÇÃO DO PESSOAL ENVOLVIDO NO PROJETO

- Dr. José Leonardo Ferreira

Coordenador do projeto e responsável pela montagem dos experimentos.

- MSc. Maria Virgínia Alves

Responsável pela implantação de um código para simulação computacional, usando o método de partículas dos fenômenos de interação onda-partícula em plasmas quiescentes.

- MSc. Júlio Guimarães Ferreira

Responsável pela montagem dos diagnósticos de plasma.

Os seguintes alunos de mestrado estão realizando tese vinculada ao assunto deste projeto:

- BSc. Edevaldo D. Campos

- BSc. Wills C. Damásio

Os pesquisadores do LAP que irão colaborar em tempo parcial com este projeto são os seguintes:

- Dr. Gerson Otto Ludwig (Chefe do Laboratório)

- Dr. Antonio Montes Filho

- MSc. Carlos Shinya Shibata

- MSC. Gilberto Marrega Sandonato

6 OUTRAS ENTIDADES ENVOLVIDAS NA EXECUÇÃO DO PROJETO

Este projeto terá o apoio do Dept de Aeronomia do INPE através do pesquisador, atual chefe do Dept , Dr. José A. Bittencourt, devido às relações deste assunto com pesquisas de determinação da densidade local na ionosfera, que ora se realizam no Departamento.

Os pesquisadores do Dept de Geofísica Espacial do INPE têm interesse no projeto porque, atualmente, estão estudando a influência de ondas whistlers de baixa frequência na precipitação de partículas para atmosfera, através da anomalia magnética do Atlântico Sul. São eles:

- Dr. Valter Gonzalez
- Dr. Abraham C. L. Chian
- Dr. Osmar Pinto Jr.

O projeto também contará com o apoio do Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas da Université de Paris, na França, através do pesquisador e chefe do programa de ondas em plasmas Doc. des Sciences Gille Matthieussent.

7 RELAÇÃO DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS SOLICITADOS AO CNPq

Material de Consumo

Nacional - Fio de cobre ôco isolado, filtros e conexões para refrigeração, componentes eletrônicos para circuitos e chapas e perfilados de cobre,----- 6000 BTFs

Importado - Misturador duplo para sinais de rf. Acoplador direcional e atenuadores ajustáveis na faixa de VHF e UHF-----
----- \$5000

Equipamentos

Nacional - Duas fontes de corrente marca Tectrol de 400A e 28V
mod. TCY 28-400----- 50000 BTNFs

Importado - Amplificador de RF da Amplifier Research de 1 KW.
para operar na faixa de 1 MHz a 1000MHz em modo pulsado mod.
1000LAM9----- US \$30000

Cronograma de Desembolso Financeiro

3º Trimestre 1990 - Compra do material de consumo e dos
equipamentos nacionais.

1º Trimestre de 1991 - Compra dos equipamentos e do material
de consumo importado.

8 COMENTÁRIOS FINAIS

O projeto de Estudo de Ondas e Turbulência em plasmas, apesar de dar ênfase, inicialmente, a fenômenos que ocorrem em plasmas espaciais, pretende, com o tempo, isto é, após ganhar maior experiência na área, voltar-se, também, para fusão termonuclear controlada. O LAP - INPE recentemente firmou um acordo bilateral com o Dept de Energia dos Estados Unidos para estudar a viabilidade de construção de um Tokamak de pequena razão de aspecto com geração não-indutiva de corrente de plasma. Um dos mecanismos mais promissores é o de geração de corrente, usando ondas na frequência híbrida inferior. Com o equipamento que estamos solicitando ao CNPq e, com o que já possuímos, poderemos realizar estudos detalhados de geração e detecção destas ondas.

Com relação aos recursos destinados a este projeto por outras fontes, vale dizer que o projeto vem recebendo da FINEP e do tesouro nacional, através do INPE, desde 1979. Recentemente recebeu recursos da FAPESP para compra de um sistema de aquisição de dados. Para o biênio 1990/91 ainda não houve aprovação de nenhuma verba para o projeto PQUI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, F.F., **Introduction to plasma physics**. New York, Plenum 1977
cap. 4, p. 77.
- Cros, B.; Mathieussent, G.; Gadiot, J.; Heron, A. Stochastic
behavior of resonant absorption in a plasma at microwave
frequencies. Europphysics Letters, 9(1):41-46, 1989.
- Katsouleas, T.; Dawson, J.M. Unlimited electrons acceleration in
laser driven plasma waves. Physics Review Letters, 51(5):392-
395, 1983.
- MacMillan e Fermi. **Particle acceleration in astro physics**. UCLA
Group Selected Reprints on Laser-Plasma Acceleration. Los
Angeles, USA, University of California, June 1985, part. 1.
- Zakharov, V.E. Langmuir wave collapse. Soviet Physics JETP,
35:908-911, 1972.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Barret, P.; Jones, H.G.; Franklin, R.N. Dispersion of electron plasma waves. Plasma Physics, 10:911-918, 1968.

Clayton, C.E.; Joshi, C.; Darow, C.; Umstadter, D. Relativistic plasma-wave excitation by collinear optical mixing. Physics Review Letters, 54(21):2343-2346, 1985.

Domier, C.W.; Nishida, Y.; Luhmann, Jr., N.C. Control of pump depletion in $V_p \times B$ accelerator of electrons. Physics Review Letters, 63(17):1803-1806, 1989.

Ferreira, J.L. **Fenômenos acústicos-iônicos lineares e não-lineares em descargas multidipolo magnéticas.** (Tese de Doutorado em Física dos Plasmas) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986. (INPE-4100-TDL/257).

_____ Anomalous particle diffusion through a magnetic picket fence. Symposium on Small Scale Laboratory Plasma Experiments of the Spring College on Plasma Physics, Trieste, May-June 1989.

Ferreira, J.L.; Ferreira, J.G.; Ludwig, G.O. Estudo da descarga na máquina de plasma quiescente do INPE. In: Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC), 9., Campinas, julho 1988. Anais. Campinas, p. 53-56, 1988.

Heush, B., Mathieussent, G. Accélérateurs et nouveaux concepts d'accélération de particules. Revue de Physique, 23:1417-1421, 1988.

Kim, H.C.; Stenzel, R.L.; Wong, A.Y. Development of cavitons and trapping of RF field. Physics Review Letters, 23(15):886-889, 1974.

- Ludwig, G.O.; Ferreira, J.L.; Nakamura, Y. Observation of ion-acoustic rarefaction solitons in a multicomponent plasma with negative ions. Physics Review Letters, 52(4):275-378, 1984.
- Ludwig, G.O.; Ferreira, J.L.; Montes, A. Double layer formed by beam driven ion-acoustic turbulence. In: Energy independence Conference on Fusion Energy and Plasma Physics, Rio de Janeiro, July 1987. Proceedings. Trieste, World Science Publ. Co., Aug. 1987.
- Matthiessent, G. **Project de collaboration en ondes turbulence dans les plasmas naturels et de laboratoire.** Université de Paris-Sud, Orsay, France. Publication Interne du Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas. July 1987.
- Pinto Jr., O.; Gonzalez, W.D. Energetic electron precipitation at the south atlantic magnetic anomaly: a review. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 51(5):351-365, 1989.
- Shibata, C.S.; Montes, A. Propagation and damping of whistler waves in tokamaks. In: Latin American Workshop on Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion Research, Santiago, July 1988. Proceedings. Santiago, Chile, Universidad Catolica del Chile, July 1988, 3., p. 71-72.
- Stenzel, R.L. Whistler wave propagation in a large magnetoplasma. Physics of Fluids, 19(6):857-864, June 1986.
- Tajima, T.; Dawson, J.M. Laser electron accelerator. Physics Review Letters, 43(4):267, July 1979.
- Tanikawa, T.; Wong, A.Y.; Eggleston, D.L. Trapping of a plasma waves in cavitons. Physics of Fluids, 27(6):1416, June 1984.

•

Wong, A.Y.; Cheung, P.Y.; Tanikawa, T. **Evolution from coherence to turbulence in plasmas.** In: Horton, C.W., Reich, L.E., ed. **Statistical Physics and Chaos in Fusion Plasmas.** New York, John Wiley, 1984.