



PRESIDENCIA DA REPUBLICA
SECRETARIA DA CIENCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5403-PRP/169

**PROGRAMA DE
APERFEIÇOAMENTO CIENTÍFICO
EM NÍVEL DE
PÓS-DOCTORAMENTO NO
EXTERIOR JUNTO À NATIONAL
INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE
- JAPAN -**

Mario Ueda

Este relatório cobre os três últimos meses de pesquisas realizadas em NIFS, Japão, financiados pela FAPESP em nível de pós-doutoramento

INPE
São José dos Campos
Maio de 1992

Publicado por:

Divisão de Ensino e Documentação - DED

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515

12201 - São José dos Campos - SP - Brasil

Telex: 123.3530 INPE BR

Fone: (0123) 41.8977 - Ramal 324

Fax: 0123-21-8743

- Solicita-se intercâmbio
- We ask for exchange
- Si sollecita intercambio
- On demande l'échange
- Mann bittet um Austausch
- Pidesse canje
- Просим обмена
- 歡迎著作交換
- 出版物的交還及不歸

Publicação Externa - É permitida sua reprodução para interessados.

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

INPE-5403-PRP/169

**PROGRAMA DE
APERFEIÇOAMENTO CIENTÍFICO
EM NÍVEL DE
PÓS-DOCTORAMENTO NO
EXTERIOR JUNTO À NATIONAL
INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE
- JAPAN -**

Mario Ueda

**Este relatório cobre os três últimos meses de pesquisas realizadas
em NIFS, Japão, financiados pela FAPESP em nível de
pós-doutoramento**

**INPE
São José dos Campos
Maio de 1992**

CDU: 533.9

**Palavras-chave: Fusão; Sistema helicoidal; Plasma;
Diagnóstico; Feixe de lítio neutro;
Flutuação de densidade**

RELATÓRIO / FAPESP

**PROCESSO: Física dos Fluidos e Plasmas e Descargas Elétricas
91/0303-2.**

**PROJETO: Programa de Aperfeiçoamento Científico em Nível de
Pós-doutoramento no Exterior junto `a National
Institute for Fusion Science (NIFS), Nagoya, Japan.**

PERÍODO: Janeiro/92 - Março/92.

AUTOR: Mario Ueda

**ENDEREÇO PERMANENTE: Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais (INPE), São José dos Campos,
S.Paulo.**

1- INTRODUÇÃO

O autor deste relatório foi ao NIFS (National Institute for Fusion Science) para concluir uma visita científica `aquele instituto através do convenio JSPS-CNPq, de 10 meses de duração. O objetivo principal desta visita era o treinamento na área de espectroscopia por emissão de feixe (Beam Emission Spectroscopy), onde um feixe sonda de partícula neutra é injetado num plasma e a emissão do átomo do feixe resultante é medido fornecendo parâmetros importantes do plasma produzido. No trabalho aqui descrito escolheu-se o feixe de lítio neutro rápido (8 keV) como feixe sonda e a emissão da linha de ressonância de LiI (6708 Å) foi detectada usando o método de detecção com sensibilidade de fase.

Devido aos excelentes resultados experimentais obtidos, medindo perfis de densidade do plasma da borda com este diagnóstico avançado, foi possível participar de vários experimentos programados no dispositivo CHS (Compact Helical Device) do tipo helicoidal, com baixa razão de aspecto, em operação no NIFS. Na Fig. 1 mostramos o desenho esquemático do dispositivo CHS e na Fig. 2, a posição toroidal do diagnóstico por feixe de lítio rápido. Na Fig.3, o esquema experimental do diagnóstico por feixe de lítio é mostrado.

Os 3 últimos meses financiados pela FAPESP foram essenciais para se completar algumas medidas no CHS, para análises finais de dados coletados, discussões finais com outros pesquisadores no projeto, participações em congressos e na redação de alguns artigos.

A seguir, descreveremos detalhadamente os trabalhos realizados nos 3 meses (janeiro/92 a março/92) de duração da bolsa da FAPESP. Para detalhes do trabalho realizado nos primeiros 10 meses em NIFS, vide RELATORIO/FAPESP "Diagnóstico de plasma da borda no dispositivo CHS com feixe de lítio neutro rápido", mandado `a FAPESP em Janeiro de 92.

2- TRABALHOS REALIZADOS EM NIFS NO PERÍODO DA VIGÊNCIA DA BOLSIA DA FAPESP (Janeiro/92 - Março/92)

No mês de Janeiro foi dada ênfase ao desenvolvimento, aprimoramento e utilização de um programa computacional necessário para se obter o perfil da densidade da borda do dispositivo CHS a partir do perfil de emissão de feixe de Li^0 , nos casos com forte atenuação do feixe dentro do plasma.

A equação que fornece a densidade eletrônica quando se tem o perfil do fluxo de fótons de LiI (6708 Å) é dada por:

$$n_e(r) = \frac{v_A}{\langle \sigma_{em} \cdot v \rangle_{eff}} \cdot \frac{N_{vp}(r)}{\int_0^r \frac{\langle \sigma_{i,cx} \cdot v \rangle_t}{\langle \sigma_{em} \cdot v \rangle_{eff}} \cdot N_{vp}(r') dr'}$$

onde v_A é a velocidade dos átomos monoenergéticos de Li^0 do feixe, $N_{vp}(r)$ o fluxo de fótons, $\langle \sigma_{em} \cdot v \rangle_{eff}$ o rate coefficient efetivo da emissão e $\langle \sigma_{i,cx} \cdot v \rangle_t$ o rate coefficient total para ionização e transferência de carga dos átomos no feixe. Neste cálculo foram incluídos: a dependência em densidade da razão $\langle \sigma_{i,cx} \cdot v \rangle_t / \langle \sigma_{em} \cdot v \rangle_{eff}$; ionização a partir dos estados 2^2S e 2^2P ; excitação a partir dos estados 2^2S e 2^2P e deexcitação a partir dos estados 2^2S e 2^2P , todos devidos a colisões com elétrons. Foram também incluídos processos correspondentes devido a colisões com prótons além do processo da transferência de carga a partir dos estados 2^2S e 2^2P de Li^0 .

Um exemplo da aplicação deste programa para reconstrução da densidade, desenvolvida com o esforço principal do Mr. S.Sasaki, está mostrado no resultado da Fig.4, onde é feita a comparação dos resultados deste método, do método de calibração em gás (válido para regiões sem atenuação do feixe) e do método de espalhamento Thomson.

O programa computacional para reconstrução da densidade foi desenvolvido para ser usado em computadores da Macintosh (mais de 90% de computadores pessoais sendo usado atualmente em NIFS são da marca NEC ou Macintosh), com o método gráfico da Kaleidagraph. Este método de

determinação da densidade foi útil para estender a aplicabilidade da sonda de feixe de lítio, até regiões mais internas comparadas ao caso em que a densidade é obtida a partir da calibração do feixe em gas neutro, principalmente para plasmas de alta densidade produzido por injeção de NBI. O método da reconstrução da densidade foi extensivamente utilizado para determinar os diferentes perfis de densidade da borda em plasmas de alta densidade. Um artigo descrevendo a aplicação deste método no plasma do CHS foi submetido a uma revista de instrumentação (a primeira versão segue em anexo):

- Edge Plasma Density Reconstruction for Fast Monoenergetic Lithium Beam Probing. S.Sasaki, S.Takamura, M.Ueda, H.Iguchi, J.Fujita, and K.Kadota. Submetido para Review of Scientific Instruments, Abril 1992.

Do final de janeiro/92 a 15 de Fevereiro, dedicou-se o tempo integral para se medir a densidade na borda de um plasma produzido por ECH (53 GHz, 150 kW), com o feixe de lítio. O resultado desta medida para o caso típico está mostrado na Fig.5. Neste período também foram realizadas medidas de perfis de densidade na borda de plasmas ECH com elongações diferentes do padrão. Os resultados estão mostrados nas Fig.6(a) e (b).

A partir do meado de fevereiro até o meado de março/92, realizou-se o teste de um filtro de alta resolução ($\Delta\lambda_{1/2} \sim 3.5 \text{ \AA}$), com o objetivo de se eliminar a radiação de fundo extremamente intenso no CHS. Comparado ao sistema de filtro anterior, com $\Delta\lambda_{1/2} \sim 15 \text{ \AA}$, houve uma melhora considerável no S/N que passou de S/N ~ 1 para S/N $\sim 5-7$, com o novo filtro. Embora se deseje S/N da ordem de 20 para se ter uma boa medida do fluxo de fótons, os resultados com o novo filtro são encorajadores, indicando que um aumento razoável da intensidade do feixe de lítio atual permitirá a medida do fluxo fotônico em nível desejável, sem a necessidade de detecção com sensibilidade de fase que tem limitado a resolução temporal das nossas medidas a 1-3 ms. Isto poderá permitir a medida da flutuação da densidade na borda do plasma.

Uma tentativa da medida da flutuação da densidade foi feita num plasma

produzido com injeção de NBI. Na Fig.7 mostramos as formas de onda dos sinais obtidos com a fotomultiplicadora representando o caso sem o feixe (acima) e o caso com o feixe (abaixo). Pode-se ver que o sinal sem o feixe (do background) tem flutuação bem menor que o sinal com o feixe (proporcional à densidade do plasma). Um melhor ajuste do filtro e um aumento de 2-3 vezes na intensidade do feixe de lítio poderá resultar em medidas mais convincentes. Mas estas medidas preliminares já indicam que

$$\frac{\tilde{n}_e(r_0)}{n_0(r_0)} \lesssim 20\% \quad \text{p.} \quad r_0 = 121.6 \text{ cm}$$

quando o raio do LCFS (em vácuo)(Last Closed Flux Surface) é de 122.5 cm. Do mesmo grupo de dados, pode-se concluir também que não ocorre nenhum fenômeno violento como disrupção neste tipo de descarga em CHS em contraste com os Tokamaks. Os sinais flutuam com frequência de cerca de 10 kHz, em concordância com resultados das sondas magnéticas.

A partir de 15 de março/92 procurou-se dedicar tempo integral na confecção dos posters e na preparação das apresentações orais para conferência e na redação dos artigos. Foram apresentados os seguintes trabalhos na 9th Plasma and Nuclear Fusion Conference, Osaka University, Osaka, Japan, realizado em Março 25-27, 1992:

- "Effects of Magnetic Axis Shift and Different Heating Schemes on the CHS Edge Plasma Density Profile". M.Ueda et al. Apresentação oral de M.Ueda.

- "ICRF heating experiments in CHS". K.Nishimura, M.Ueda et al. Apresentação oral de K.Nishimura.

- "Experiment on induced plasma rotation by discharge with electrode in CHS". H.Yamada, M.Ueda et al. Apresentação oral de H.Yamada.

Na Annual Meeting of Physical Society of Japan realizado em Keio University, Tokio, Japan, realizado em Março 27-30/92, foi apresentado o trabalho:

- "Experiment in CHS with different NBI injection angle. S.Okamura, M.Ueda et al. Apresentação oral do S.Okamura.

Na 10th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Monterey, California, USA, realizado em March 30-April 3, 1992, foram apresentados os trabalhos:

- "Measurement of the Edge Plasma Density in CHS by Fast Neutral Lithium Beam Probing". M.Ueda et al. Apresentação de M.Ueda (poster).

- "An Analytical Erosion Model for Divertor Plates and Limiter Experiments in CHS". A.Sagara, M.Ueda et al. Apresentação oral de A.Sagara.

Estes trabalhos da 10th PSI terão os correspondentes artigos publicados na Journal of Nuclear Materials (ambos já foram aceitos).

Para completar a lista dos trabalhos apresentados devemos citar as apresentações:

- "Does the natural emission transition probability change in the plasma?" K.Sato, M.Ueda et al. Apresentação oral do K.Sato no 1992 NIFS Plasma Spectroscopy Meeting on Impurity Measurements in Magnetic Confinement Devices, realizado em NIFS, Nagoya, Japan, January 21-22, 1992.

- "Edge Density Profile of ECH Plasmas with Different Elongations. M.Ueda et al. No 33th Torus Group Meeting, Fev 10/1992, NIFS.

Devemos citar ainda os artigos curtos publicados na Stellarator News, editados por James A. Rome e publicados pela Fusion Energy Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.

- "Experiments in CHS." Shoichi Okamura for CHS group. Issue # 19, pg 3-4, January 1992.

- "Diagnostics Improvements for Transport Study in CHS." Harukazu Iguchi for CHS group. Issue # 20, March 1992.

Neste último artigo estão destacados os resultados recentemente obtidos com o feixe de lítio no CHS(ver anexo).

Finalmente devemos enumerar os trabalhos submetidos para conferencias no período:

- "ECH Power Deposition Control in CHS." S.Kubo, H.Idei, M.Hosokawa, Y.Takita, H.Iguchi, I.Yamada, M.Ueda, K.Ida, S.Morita, S.Okamura, H.Yamada, K.Nishimura, K.Matsuoka, H.Arimoto, N.Noda, A.Sagara, H.Sanuki, C.Takahashi, J.Todoroki, K.Toi. 1992 international Conference on Plasma Physics, Innsbruck, Austria, 29 June - 3 July, 1992.

- "Density Profile and Particle Transport of NBI-Heated Plasmas in the Low-Aspect-Ratio Heliotron/Torsatron CHS." H.Iguchi, K.Ida, S.Morita, M.Ueda, H.Yamada, S.Okamura, K.Matsuoka, R.Akiyama, H.Arimoto, M.Hosokawa, H.Idei, O.Kaneko, T.Kohmoto, S.Kubo, K.Nishimura, N.Noda, T.Ozaki, A.Sagara, S.Sakakibara, H.Sanuki, Y.Takeiri, Y.Takita, C.Takahashi, I.Yamada, K.Uchino, H.Takenaga, K.Muraoka, *Ibid*.

- "MHD and Confinement Characteristics in the High- β Regime on the CHS Low-Aspect-Ratio Heliotron/Torsatron." H.Yamada, R.Akiyama, H.Arimoto, M.Fujiwara, K.Hanatani, S.P.Hirshman, H.Hosokawa, K.Ida, H.Idei, K.Ichiguchi, H.Iguchi, O.Kaneko, T.Kohmoto, S.Kubo, D.K.Lee, K.Matsuoka, S.Morita, O.Motojima, K.Nishimura, N.Noda, S.Okamura, T.Ozaki, A.Sagara, S.Sakakibara, H.Sanuki, T.Shoji, C.Takahashi, Y.Takeiri, Y.Takita, S.Tanahashi, J.Todoroki, K.Toi, M.Ueda, I.Yamada. 14th IAEA International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Wurzburg, Germany, 30 September- 7 October 1992.

- "Confinement Study of High Energy Ions using Neutral Beams with Variable Injection Angle and ICRF Heating Experiments in CHS." S.Okamura, K.Hanatani, K.Nishimura, R.Akiyama, T.Amano, H.Arimoto, M.Fujiwara, M.Hosokawa, K.Ida, H.Idei, H.Iguchi, T.Kamimura, O.Kaneko, T.Kohmoto, T.Kotani, S.Kubo, R.Kumazawa, K.Matsuoka, S.Morita, O.Motojima, T.Mutoh, N.Nakajima, N.Noda, M.Okamoto, T.Ozaki, A.Sagara, S.Sakakibara, H.Sanuki, T.Seki, T.Shoji, F.Shinpo, C.Takahashi, Y.Takeiri, Y.Takita, S.Tanahashi, J.Todoroki, K.Toi, M.Ueda, T.Watanabe, T.Watari, H.Yamada, I.Yamada. *Ibid*.

- "A Role of Neutral Hydrogen in CHS Plasmas with Reheat and Collapse and JIPP T-IIU Tokamak Plasmas." S.Morita, H.Iguchi, O.Kaneko, T.Ozaki, M.Ueda, H.Yamada, K.Adati, R.Akiyama, H.Arimoto, M.Fujiwara, H.Hamada, K.Ida,

H.Idei, K.Kawahata, T.Kohmoto, S.Kubo, R.Kurnazawa, K.Matsuoka, T.Morisaki, N.Nishimura, S.Okamura, M.Sakurai, S.Sakakibara, A.Sagara, C.Takahashi, Y.Takeiri, H.Takenaga, Y.Takita, K.Toi, K.Tsumori, K.Uchino, I.Yamada, T.Watari.
Ibid.

Foi possível participar deste número relativamente elevado de trabalhos graças à competência do grupo do CHS liderado por Prof. K. Matsuoka do NIFS e um ótimo relacionamento do autor com o grupo, com o supervisor da parte experimental Dr. H.Iguchi e com o supervisor host Prof. J.Fujita que tem a experiência de liderança na área de diagnóstico por feixe de lítio com mais de 15 anos. Tudo isso permitiu participações ativas em vários experimentos em andamento no CHS. O apoio da FAPESP, nos últimos meses, foi fundamental para finalizar com sucesso este pós-doutoramento, uma vez que ele permitiu que se completassem algumas medidas importantes no CHS, além de realização de análises dos dados e redação dos artigos in loco o que agilizou imensamente os processos de correção dos últimos.

3- CONCLUSÃO

Apesar de termos aplicado um método de diagnóstico um pouco diferente daquele proposto no pedido de auxílio inicial (submetido em 5 de fevereiro de 91), o programa experimental desenvolvido em NIFS foi extremamente proveitoso. Segundo o pedido inicial se pretendia usar um diagnóstico com feixe de hidrogenio neutro para realizar uma espectroscopia por transferencia de carga. Por sugestão do meu host (Prof. J.Fujita) preferiu-se aplicar um diagnóstico com feixe de lítio neutro rápido (8 keV) para realizar uma espectroscopia por emissão de feixe e medir o perfil de densidade na borda do dispositivo CHS. Os resultados experimentais obtidos entre março a dezembro de 1991 estão descritos no relatório mandado à FAPESP no início do ano.

Nos 3 últimos meses financiados pela FAPESP conseguiu-se concluir

alguns experimentos com aquele diagnóstico, completar algumas análises de dados, preparar apresentações e trabalhos para conferências e revistas, além de elaborar trabalhos para conferências importantes vindouras. Foram também visitados os seguintes laboratórios de plasma naquele período:

- National Institute for Fusion Science (Toki site), onde está sendo construído o laboratório para abrigar o maior dispositivo de confinamento de plasma helicoidal do mundo, o Large Helical Device (LHD).

- The Institute of Laser Engineering at Osaka University, onde está em operação o sistema de laser de vidro GEKKO XII de 55 TW para o estudo de fusão por confinamento inercial.

- Laboratórios de Feixe Intenso de Ions (Reiden IV) e Free Electron Laser, na Faculdade de Engenharia da Universidade de Osaka.

- Laboratório de Plasma do Departamento de Engenharia e Física de Alta Temperatura, onde está em operação o dispositivo FRC de plasma FIX.

COMPACT HELICAL SYSTEM (CHS)

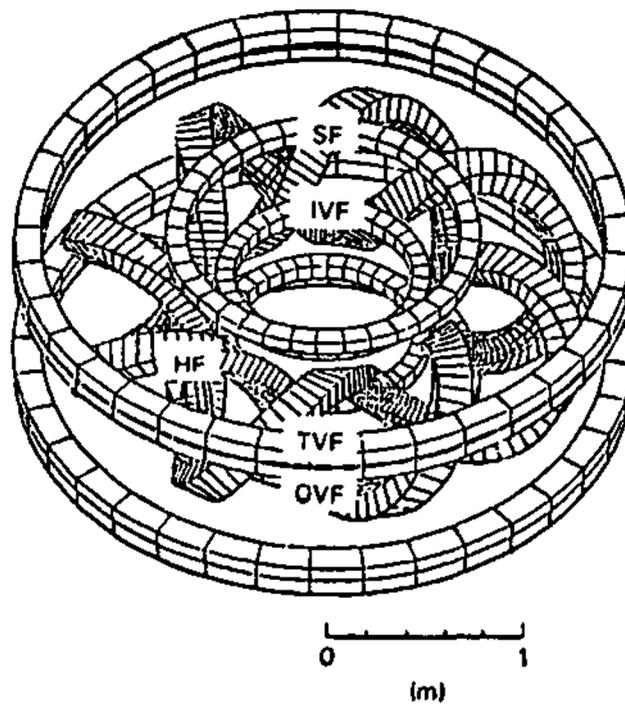


Fig.1- Desenho esquemático do dispositivo de plasma helicoidal CHS (Compact Helical System).

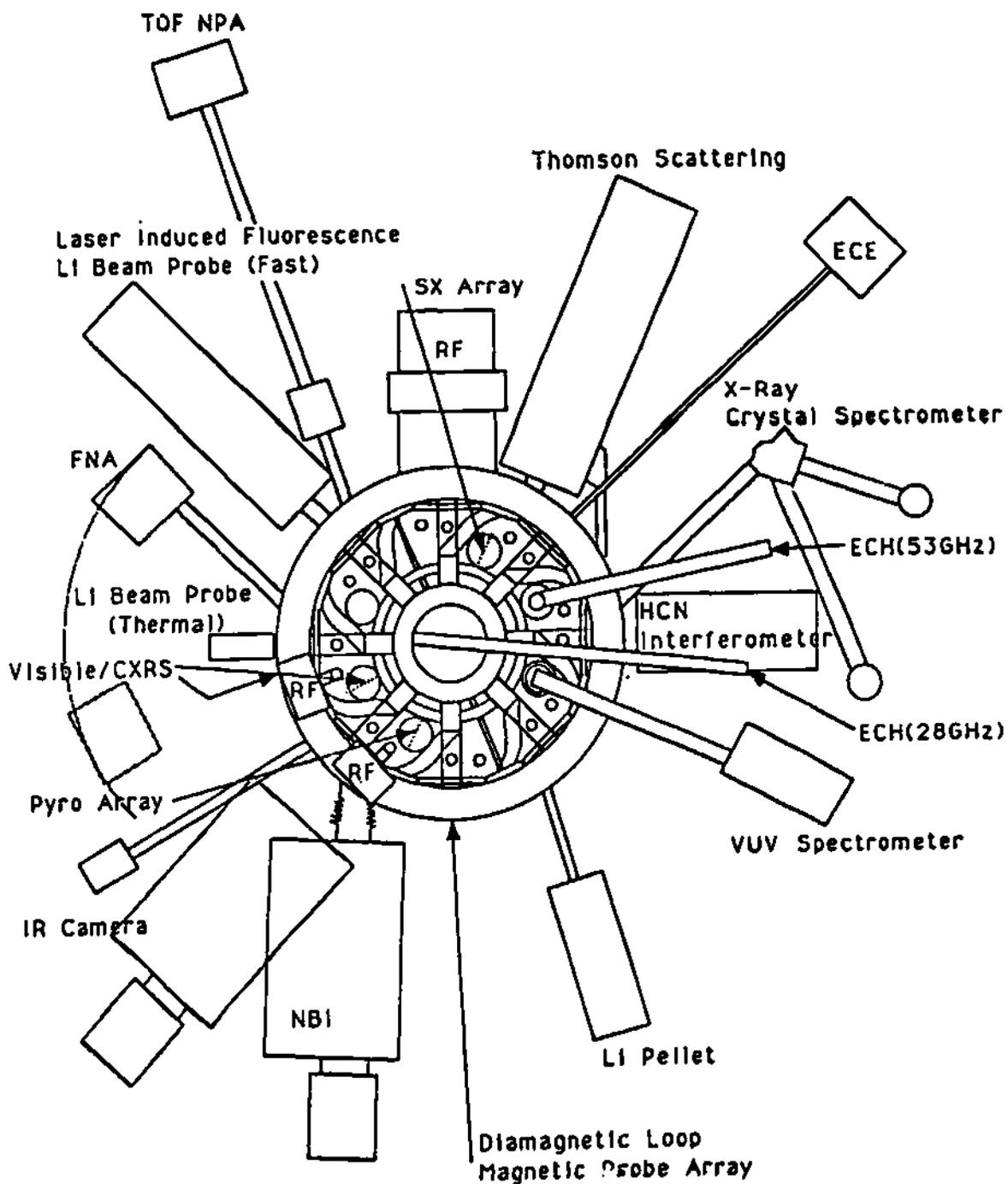


Fig.2- Esquema do dispositivo CHS com os diagnósticos e sistemas de aquecimento ECH, ICH e NBI.

EXPERIMENTAL SET UP OF FAST NEUTRAL LITHIUM BEAM PROBING IN CHS

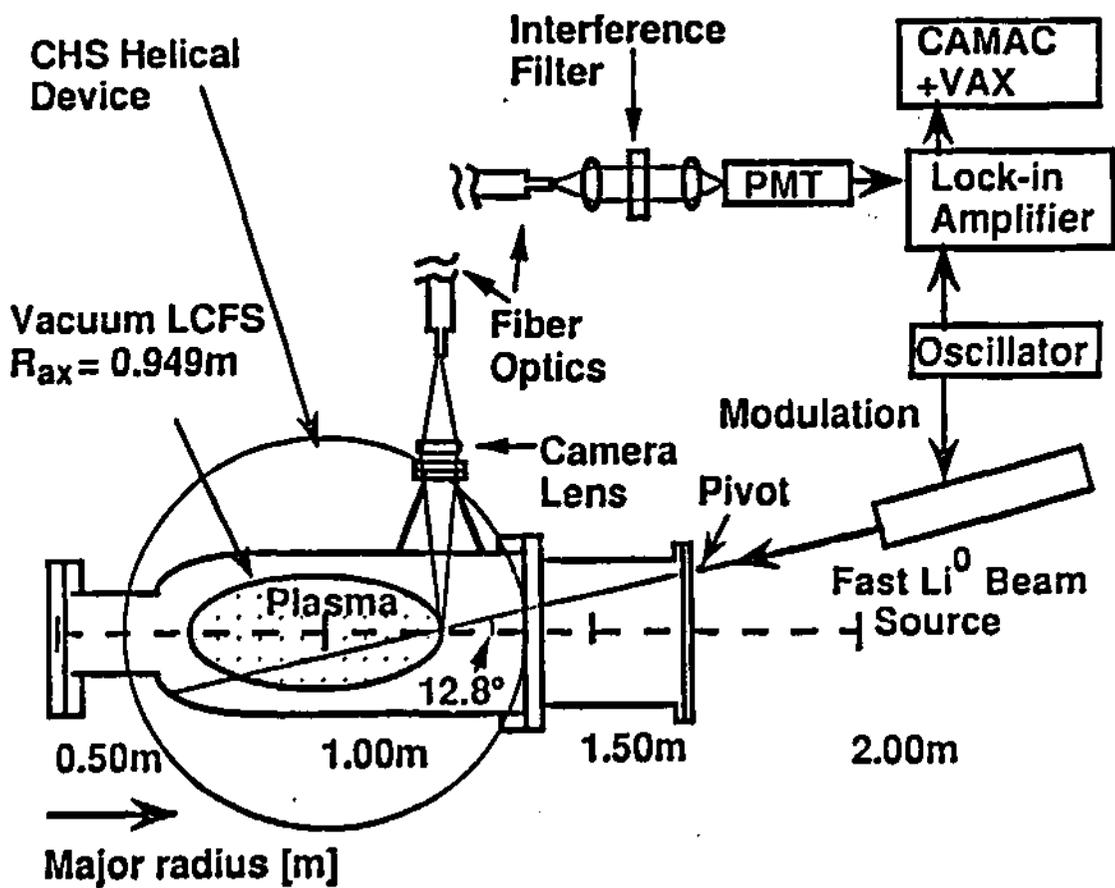


Fig.3- Arranjo experimental do diagnóstico por feixe de lítio neutro rápido no CHS.

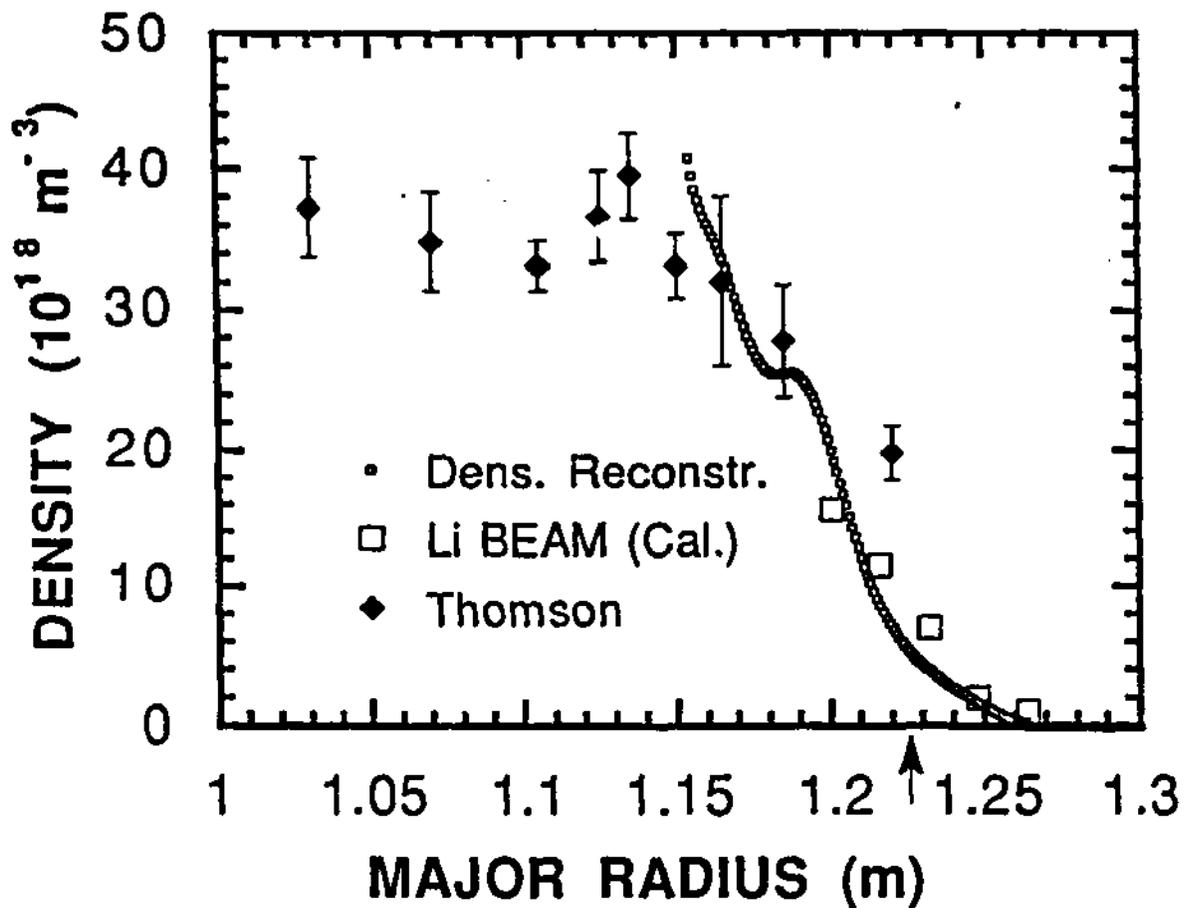


Fig.4- Comparação dos perfis de densidade no CHS medidos com sonda de feixe de lítio neutro rápido por métodos de calibração em gás, reconstrução de densidade e por espalhamento Thomson. O plasma com $R_{ax} = 0.949 \text{ m}$, $B_t = 0.9 \text{ T}$ e com aquecimento NBI foi medido em $t = 80 \text{ ms}$. A seta indica a posição do LCFS(em vácuo)

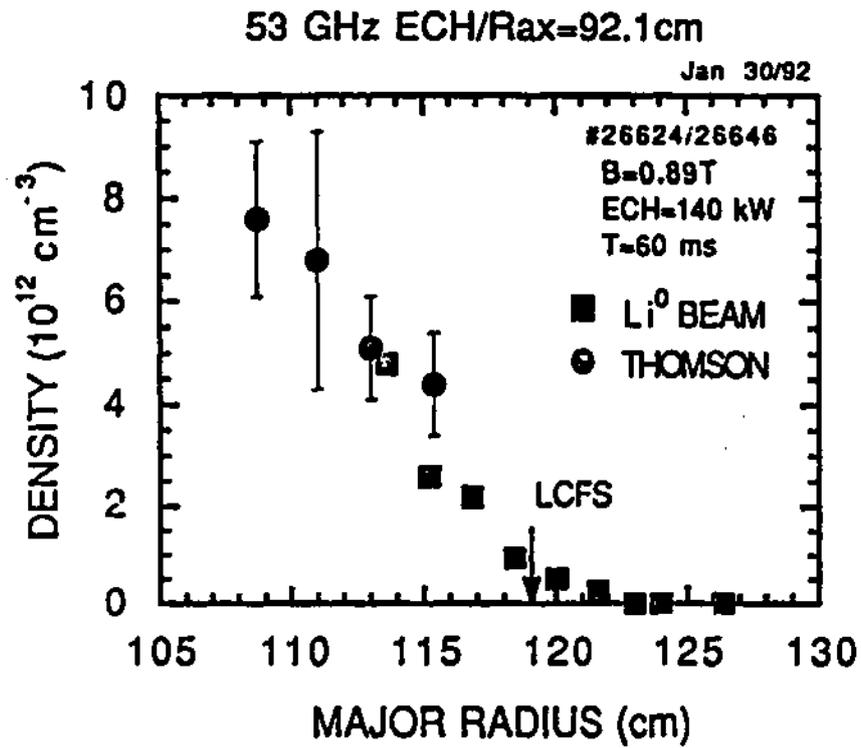


Fig.5- Perfil de densidade na borda do CHS medido com o feixe de lítio e espalhamento Thomson, para um plasma produzido por ECH. Caso padrão.

Density profile at the edge $t=60\text{ms}$ #26657-71
Rax=92cm, QM 150 Jan30/92

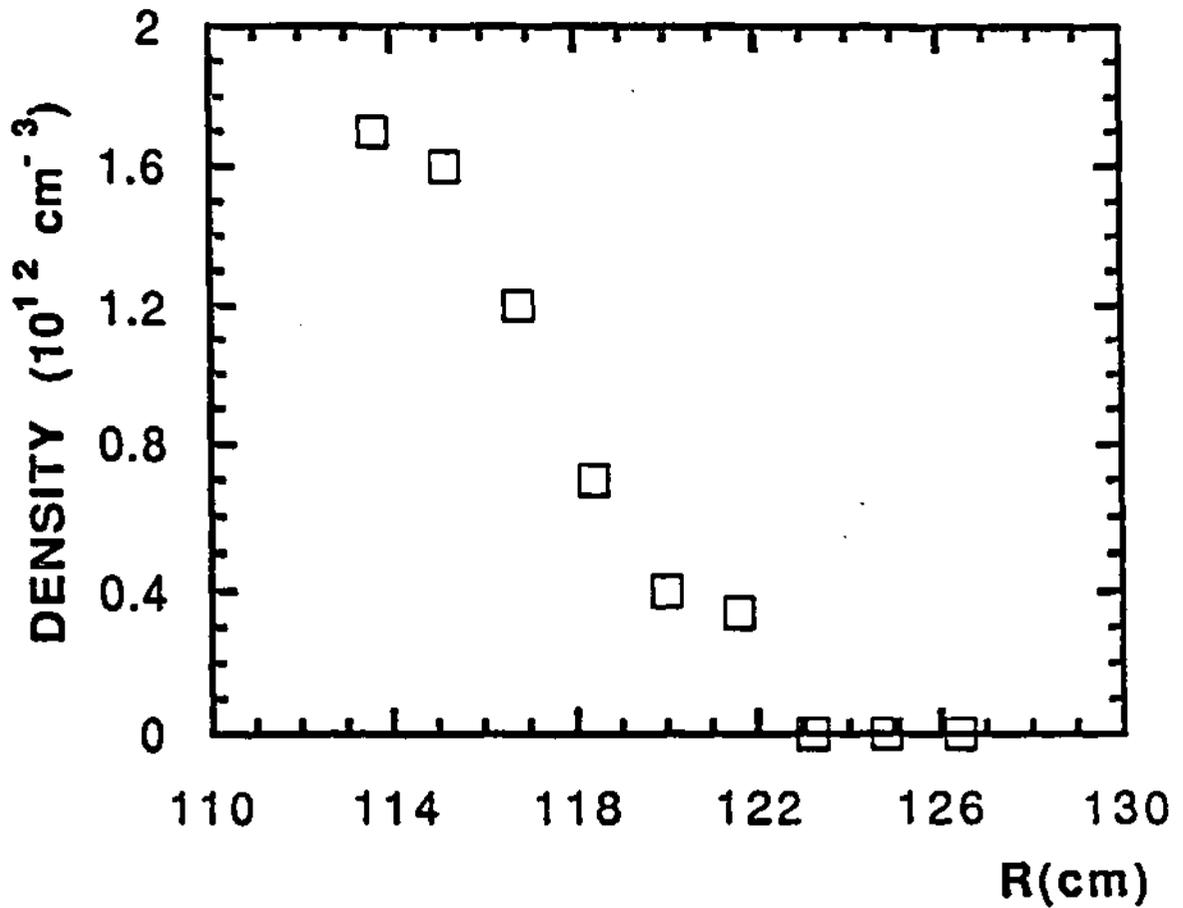
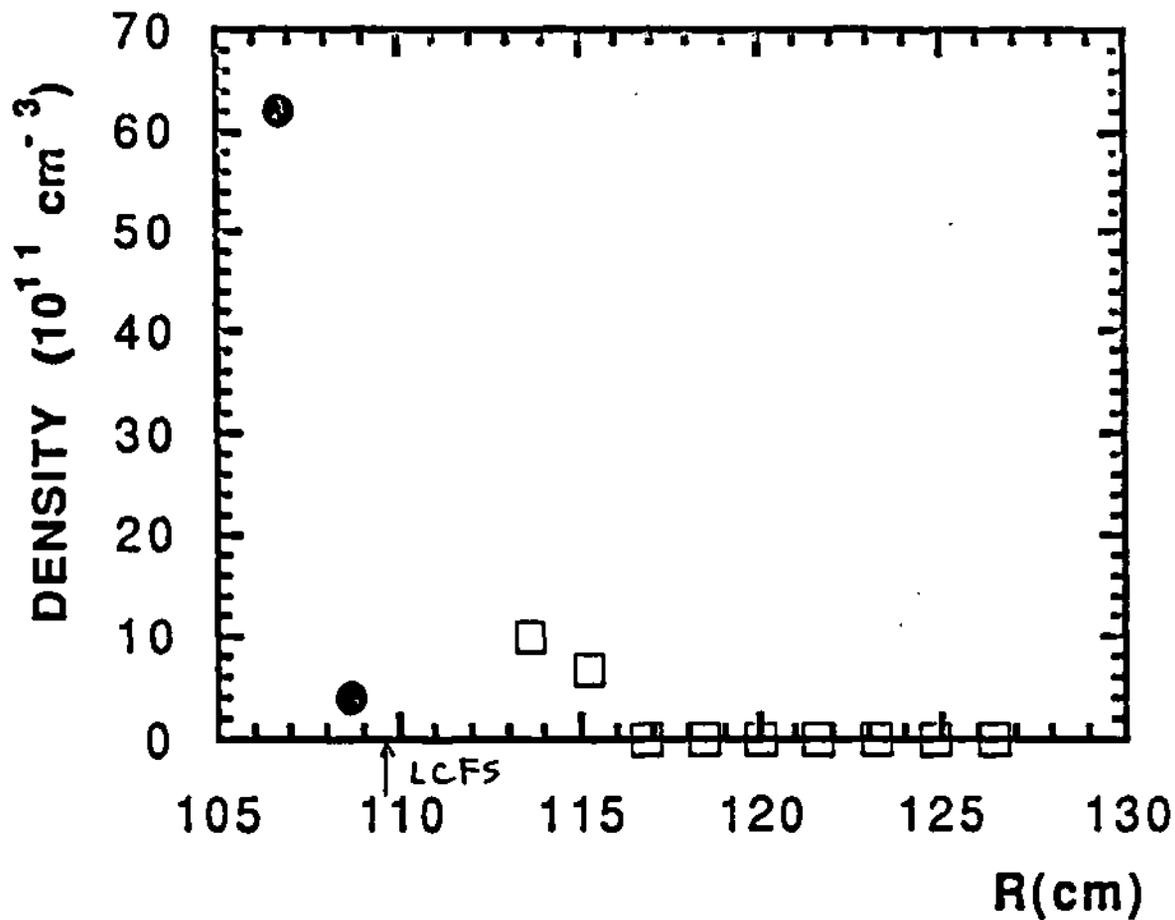


Fig.6(a)- Perfil de densidade na borda do CHS medido com feixe de lítio.
Plasma com elongação menor que o padrão, produzido por ECH.

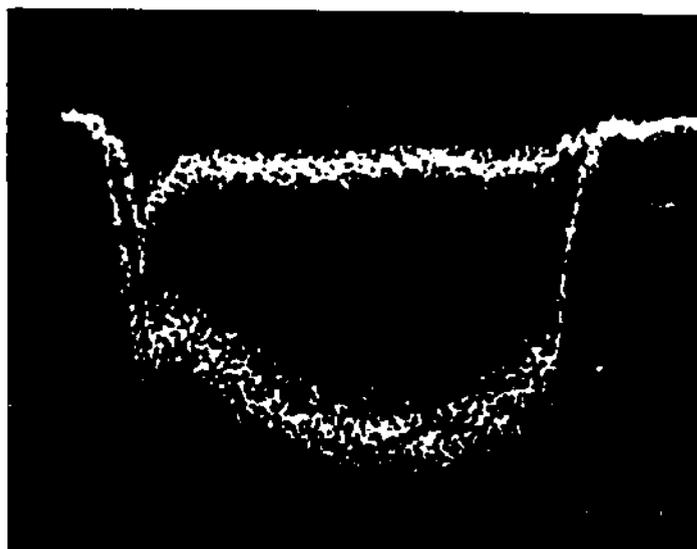


⊙ Thomson

□ Lithium

Fig.6(b)- Perfil de densidade na borda do CHS medido com o feixe de lítio e espalhamento Thomson. Plasma com elongação maior que padrão.

Int.
(u.a.)



20 ms/div.

Fig.7- Formas de onda dos sinais da fotomultiplicadora para casos sem (acima) e com o feixe de lítio.

**PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS
EDITADAS PELO INPE**

RELATÓRIOS DE PESQUISA

- Reportam resultados de pesquisa tanto de natureza técnica quanto científica.

NOTAS TÉCNICO-CIENTÍFICAS

- Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, software, sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados e atlas, e documentação de projetos de engenharia.

MANUAIS TÉCNICOS

- Descrevem normas, procedimentos, instruções e orientações.

PUBLICAÇÕES DIDÁTICAS

- Apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

TESES E DISSERTAÇÕES

- Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

PUBLICAÇÕES SERIADAS

- Periódicos Técnico-científicos: Boletim de Sensoriamento Remoto, Climatálise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática.
- Anais de Eventos