

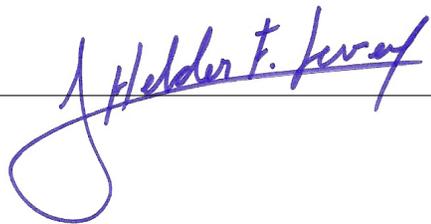
PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

20 de maio de 2016

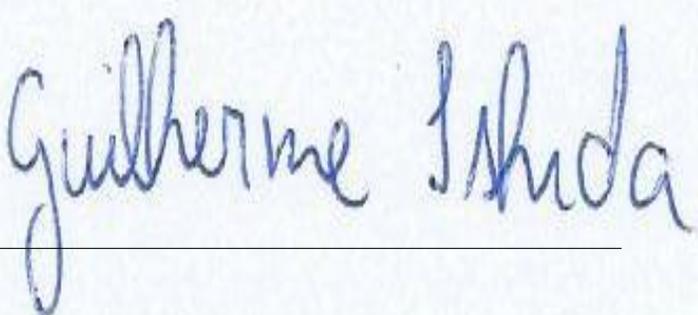
MONITORAMENTO DAS IMPUREZAS DE CARBONO NO TOKAMAK TCABR

Projeto a ser implementado no Laboratório de Física de Plasma do Instituto de Física da **USP**.

Orientador: José Helder F. Severo



Aluno: Guilherme Ishida



Sumário

1	Introdução	2
2	Base Teórica	4
2.1	Emissão óptica do plasma	4
2.2	Detetor fotodiodo avalanche	5
2.3	Monocromador	6
3	Arranjo experimental	6
4	Conclusão	7
5	Cronograma	7

1 Introdução

A espectroscopia é uma das técnicas mais empregadas para o estudo da emissão óptica do plasma. Átomos, moléculas e seus respectivos íons em um plasma são fontes constantes de radiação. A medição desta radiação em tempo real nos proporciona, além de uma enorme possibilidade de obtenção dos parâmetros do plasma, a possibilidade de estudá-lo de forma não invasiva. Uma vez que nas pesquisas de fusão nuclear controlada a temperatura e densidade são medidas independentemente, a espectroscopia é usada para estudar os efeitos das impurezas na coluna de plasma, em particular a densidade de impurezas (n_Z), a carga efetiva do plasma ($Z_{eff} = \sum n_Z Z^2 / n_e$), a potência irradiada P_{rad} , o transporte de impurezas e, adicionalmente, a espectroscopia é muito usada para medir a temperatura iônica T_i e a velocidade de rotação do plasma^[1-4]. A coluna de plasma é composta pelo gás base, (hidrogênio ou deutério) que está praticamente todo ionizado, e por alguns íons de impurezas que advém da interação do plasma com o limitador e paredes do vaso. As impurezas dessorvidas (**C**, **N**, **O** e **Cl**), geralmente chamadas de impurezas leves, possuem uma concentração relativa de alguns %. Por outro lado as impurezas erodidas (**Ti**, **Fe**, **Cr**, e **Ni**) são as mais abundantes nos tokamaks modernos, elas são geralmente referidas como impurezas pesadas e possuem uma concentração típica que é uma ordem de grandeza menor que as impurezas leves. A principal diferença entre essas duas classes de impurezas é que as impurezas leves estão completamente ionizadas no centro da coluna e portanto não emitem qualquer radiação de linhas, enquanto que as impurezas pesadas estão em toda parte e apenas parcialmente ionizadas porque a energia de ionização é maior que a temperatura no centro da coluna. Os íons de impureza são normalmente ionizados por impactos eletrônicos para estados de carga sucessivamente mais elevados a medida que penetram na coluna, formando assim uma espécie de concha (shell) cuja localização depende do perfil de temperatura T_e e do coeficiente de difusão. Esta estrutura é mantida durante toda a descarga por um fluxo contínuo de impurezas para dentro que é equilibrado pela difusão dos íons altamente ionizados que evitam o acúmulo excessivo de impurezas no centro. A presença de impurezas na coluna de plasma tem um profundo efeito no balanço de energia e representa um importante canal de perda. Em meados dos anos 1970, as perdas por radiação foram geralmente consideradas como uma proporção relativamente pequena (menor que 30%) da potência de entrada^[5]. Estas perdas eram, portanto, muitas vezes negligenciadas nos estudos do balanço de energia. Medições no tokamak **DITE**^[6] mostraram que as perdas por radiação podem

representar entre 50% – 100% do total da energia. No tokamak **TFR**^[7] foi relatado uma perda de 40% – 60%, 50% no **T-10**^[8], 50% – 85% no **PLT**^[9] e de 60% – 80% no **ORMAK**^[10].

O Laboratório de Física de Plasmas (**LFP**) do **IFUSP** está sendo equipado com um monocromador de 1000mm de distância focal com configuração Czerny-Turner que está sendo emprestado da Universidade de Campinas e um detetor do tipo fotodiodo avalanche que foi adquirido com recursos **FAPESP** (**proc. 2010/03632-3**) e que será utilizado para monitorar as impurezas de carbono no tokamak **TCABR**.

Recentemente, com o apoio da **FAPESP** (**proc. 2014/13296-8**) foram adquiridos dois programas para traçado de raios cuja finalidade é permitir a simulação de todo o sistema óptico que será utilizado no diagnóstico de monitoração das impurezas. Estes softwares (Oslo e tracePro) foram instalados em uma máquina virtual de forma a proporcionar o seu acesso remoto de diferentes terminais localizados em qualquer parte do mundo. Neste projeto apoiado pela **FAPESP** (Estudo do Perfil da Pressão de Plasma no Tokamak **TCABR** e Criação de um Grupo de Óptica) está previsto a criação de um grupo de óptica que tem a função de:

- criar um banco de programas de óptica instalado em uma máquina virtual do qual terão acesso todos os membros do grupo. Isto permitirá com que os pesquisadores de diferentes laboratórios possam desenvolver seus projetos sem terem que solicitar recursos públicos para compra de novos softwares.
- criar um grupo de desenhistas ópticos brasileiros para que possam dar apoio a projetos nacionais.
- treinar pessoas habilitadas a manusear os programas.
- ampliar as colaborações tanto nacional como internacional na área de óptica.

Portanto, para que possamos dar continuidade a criação do grupo, é necessário treinar pessoas para trabalharem com os softwares de óptica. Além disso, com a recente entrada das instituições públicas de pesquisa do Estado de São Paulo como parceiras no Giant Magellan Telescope, projeto financiado pela **FAPESP** (**2011/51680-6**) (<http://www.gmto.org/2015/06/giant-magellan-telescopes-international-partners-approve-start-of-construction-phase/>), surge no IAG (Instituto Astronômico e Geofísico da USP) e no IF (Instituto de Física da USP) a demanda pela formação de um grupo de desenhistas ópticos capazes de dar suporte aos instrumentos deste telescópio. Para o cumprimento dessa missão, foi feito um acordo informal entre o IAG (grupo liderado pela profa. Claudia Mendes de Oliveira) e o IFUSP (grupo de design opto-mecânico) para a formação de desenhistas ópticos. Com o apoio da STI/USP foram adquiridas mais 10 licenças dos programas Oslo, tracePro e Zemax para consolidar o trabalho da equipe.

Nesse sentido, esse projeto de iniciação científica, que será desenvolvido pelo aluno Guilherme Ishida, consiste em projetar e construir um sistema óptico composto de lentes e talvez por fibras ópticas para coletar luz da coluna de plasma e focalizá-la na fenda de entrada do monocromador, instalar o detetor fotodiodo avalanche na fenda de saída do monocromador. Na execução do projeto óptico será utilizado o programa OSLO de traçado de raios.

2 Base Teórica

2.1 Emissão óptica do plasma

A emissão do plasma é composta pela radiação de linhas, radiação de frenagem (bremsstrahlung) e radiação de recombinação. A radiação de linhas está associada com as transições entre os diferentes níveis de energia que os elétrons podem realizar. A maior contribuição para a radiação de linhas é dada pelas transições do tipo $\Delta n = 0$, onde n é o número quântico principal. O máximo da radiação, para o carbono, ocorre para temperatura de 10eV e corresponde à radiação de linhas cuja transição é do tipo $\Delta n = 0$, e é justificada devido a pequena diferença de energia E_{j-p} envolvida nestas transições, o que faz com que a seção transversal para este tipo de transição seja grande. A figura 1 abaixo, que foi extraída do trabalho de C. Breton^[11], apresenta a soma das potências irradiadas por linhas, frenagem, recombinação e recombinação dieletrônica, em função da temperatura eletrônica, para o carbono por unidade de densidade eletrônica e densidade de impurezas. Como podemos ver, o máximo da radiação ocorre para uma temperatura de 10eV . Após o primeiro máximo, a potência irradiada continua sendo predominantemente a das linhas e pode ser aproximadamente expressa pela relação que segue:

$$P_l(\Delta n = 1) \propto \frac{Z^6}{T_e^{3/2}}$$

onde: $P_l(\Delta n = 1)$ - potência irradiada pelas linhas cujas transições predominantes são as do tipo $\Delta n = 1$. Como pode ser visto na figura 1, a partir de 100eV a radiação de linhas cai rapidamente enquanto a de frenagem começa a aumentar e somente a partir de 1500eV é que a potência total passa a ser dominada pela radiação de frenagem. Para temperaturas típicas do TCABR ($T_e \simeq 500\text{eV}$ no centro), a radiação predominante é a de linhas e o controle desta radiação através do monitoramento das emissões ópticas é de grande interesse para a fusão nuclear pois representa um importante canal de perda de energia.

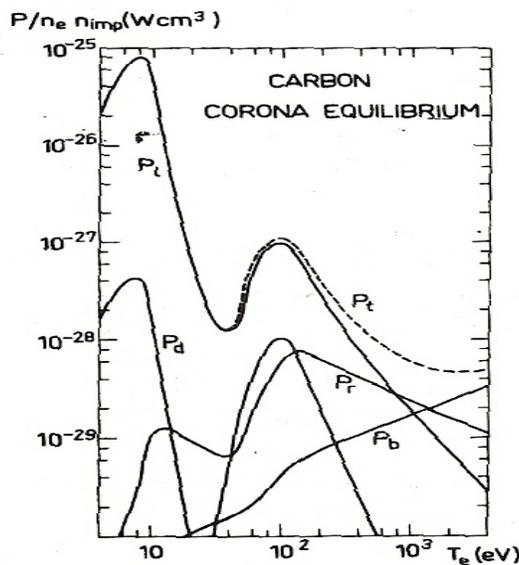


Fig.1 Potência total irradiada por unidade de densidade eletrônica e densidade das impurezas de carbono. P_t - potência total, P_l - potência de linhas, P_r - potência de recombinação, P_d - potência de recombinação dieletrônica e P_b - potência de frenagem..

2.2 Detetor fotodiodo avalanche

O princípio de funcionamento dos fotodiodos baseia-se no efeito fotoelétrico interno que está relacionado com a absorção ou não da radiação eletromagnética quando esta incide no semicondutor. Se a energia do fóton $h\nu$ for superior à banda de energia do semicondutor então ele é absorvido formando assim um par elétron-lacuna.

No fotodiodo avalanche a absorção da radiação eletromagnética pode produzir um par elétron-lacuna. Quando um par elétron-lacuna é gerado, devido ao campo elétrico aplicado na região de junção, os elétrons começam a se deslocar através da camada **N** enquanto que as lacunas se deslocam através da camada **P**. A velocidade de deslocamento das partículas depende do campo elétrico. Se o campo elétrico é suficientemente grande ($> 10^4 V/cm$), alguns pares elétron-lacuna podem adquirir energia suficiente para provocar uma ionização quando colidem com a rede cristalina e com isto geram um novo par elétron-lacuna. Este fenômeno de criação de novos pares recebe o nome de multiplicação em cascata ou avalanche. O número de pares que são criados durante a colisão é normalmente chamado de taxa de ionização e é definido da seguinte maneira:

$$k = \frac{\beta}{\alpha} \quad (1)$$

onde α é a taxa de ionização para os elétrons e β é a taxa de ionização para as lacunas. O ganho do APD depende da intensidade do campo elétrico e é, em geral, tanto maior quanto maior for o campo. O ganho apresenta ainda uma dependência com a temperatura e é tanto menor quanto maior for a temperatura. Esta dependência pode ser explicada da seguinte maneira: com o aumento da temperatura aumenta a vibração da rede cristalina provocando com isto um aumento no número de colisões. Quanto maior o número de colisões menor é a energia adquirida pelos pares durante o processo de aceleração e isto provoca uma diminuição na eficiência da ionização. A construção de um APD difere da de um fotodiodo comum devido à existência de um nível adicional do tipo **P**, entre a região de depleção e a região **N**, como é mostrado na figura abaixo. Os pares elétron-lacuna são gerados na região de depleção, no entanto, a multiplicação em cascata ocorre na região tipo **P** adicionada. Esta multiplicação em cascata pode amplificar o sinal de 50 vezes ou mais.

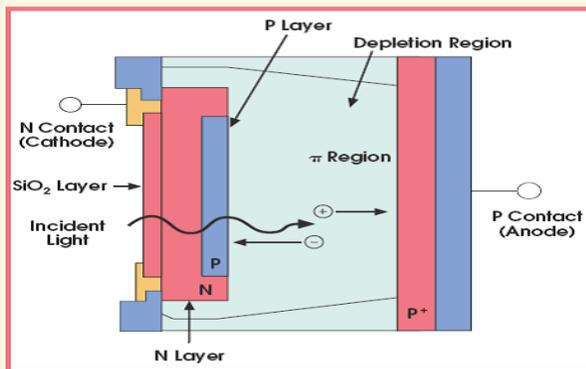


Fig.2 Representação esquemática de um detector fotodiodo avalanche.

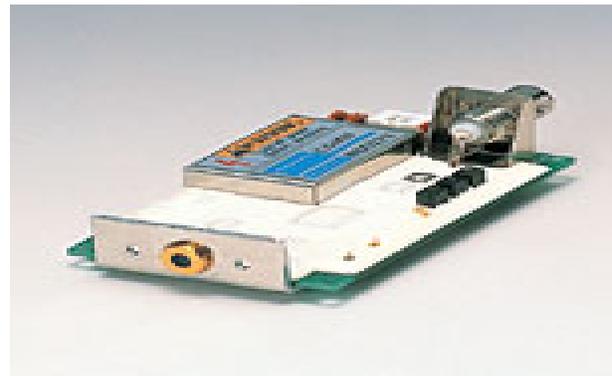


Fig.3 Fotodiodo avalanche modelo C5460-01 de fabricação da Hamamatsu que será utilizado neste projeto para monitorar as impurezas de carbono.

2.3 Monocromador

Os monocromadores são extensivamente utilizados nas pesquisas científicas. Eles podem ser usados em experiências de irradiação de corpos assim como na análise da radiação emitida pelos corpos.

Os monocromadores modernos utilizam como elemento dispersivo a rede de difração, embora aparelhos com prismas ainda sejam bastante comuns. A grande vantagem dos aparelhos com rede de difração consiste no fato de que o comprimento de onda é facilmente linearizado e o alargamento instrumental praticamente independe desse comprimento de onda.

Se por um lado redes ou prismas são usados como elementos dispersivos, por outro lado, os espelhos côncavos são sempre utilizados como elementos colimadores e focalizadores e a razão para isto é que eles não apresentam aberração cromática. Os espelhos côncavos são, em sua grande maioria esféricos, raros instrumentos usam espelhos esféricos.

Na região do espectro acima de $200nm$ a reflectividade das superfícies aluminizadas é bastante alta e por esta razão, a maioria dos monocromadores usa redes planas como elemento dispersivo e espelhos côncavos como elementos colimadores e focalizadores. Para a região do espectro abaixo de $200nm$ o coeficiente de reflexão das superfícies aluminizadas é pequeno e portanto faz-se uso de redes côncavas para focalizar a luz no interior do monocromador.

Para realização deste projeto, será utilizado um monocromador do Laboratório de Plasma da Universidade de Campinas que está sendo emprestado para o Laboratório de Física de Plasmas do **IFUSP**. Este equipamento possui as seguintes características: distância focal de $1000mm$, $f_{number} = 8,4$ e uma configuração do tipo Czerny-Turner. A figura 3 mostra uma representação esquemática desse tipo de aparelho.

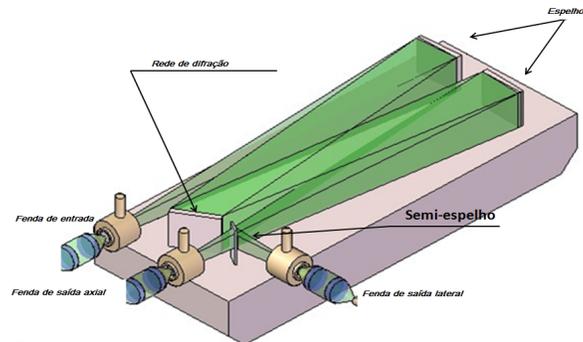


Fig.4 Representação esquemática do monocromador do tipo Czerny-Turner que será utilizado neste projeto.

3 Arranjo experimental

Para realização deste projeto, será utilizado um dos dois monocromadores que estão sendo emprestados do Laboratório de Plasma da Universidade de Campinas que deixou de existir após a aposentadoria do prof. Machida Munemassa. Este equipamento possui as seguintes características: distância focal de $1000mm$ e uma configuração do tipo Czerny-Turner. Este monocromador está equipado com uma rede de difração de $110 \times 110mm$ com 1200 ranhuras por milímetro. Para monitoramento das linhas espectrais, será instalado na fenda de saída um detetor do tipo foto-

diodo avalanche que foi adquirido com recursos **FAPESP** ([proc. 2010/03632-3](#)) e que está representado na figura 3 acima.

4 Conclusão

O projeto de iniciação científica do aluno Guilherme Ishida tem como objetivo principal o monitoramento das impurezas de carbono no tokamak **TCABR**. A viabilização deste projeto se dará mediante a utilização de um monocromador que está sendo disponibilizado pela Universidade de Campinas. Equipamentos adicionais necessários para a realização deste projeto como detectores (fotodiodo avalanche e fotomultiplicador), fibra óptica, lentes e lâmpada para calibração absoluta do diagnóstico já existem no Laboratório, portanto o projeto é perfeitamente viável e possível de ser concretizado. É importante acrescentar ainda que este projeto visa principalmente treinar o aluno a manipular todas as ferramentas necessárias para desenvolver um trabalho experimental em óptica no **LFP** e neste sentido, durante a execução deste projeto, o aluno passará por todas as etapas que envolvem um trabalho experimental que são:

1 - projeto óptico - aprender a projetar sistemas ópticos utilizando o programa para traçado de raios OSLO.

2 - projeto mecânico - aprender a projetar suportes mecânicos utilizando os softwares necessários (autocad e outro).

3 - projeto elétrico - aprender sobre o detector e a sua instalação para torná-lo um medidor de radiação eletromagnética.

4 - tratamento de dados - aprender a manipular os softwares para tratamento de dados (origin e matlab).

Neste projeto de iniciação científica que está sendo apresentado, o aluno terá que simular toda a trajetória dos raios de luz até a fenda de entrada do monocromador.

A simulação do traçado de raios até a fenda de entrada do monocromador será feita com a ajuda do programa OSLO que foi obtido com recursos **FAPESP** ([proc. 2014/13296-8](#)) visando apoiar a criação de um grupo de óptica especialista em traçado de raios. Além disso, o projeto visa ainda treinar pessoas habilitadas a desenvolver projetos ópticos e contribuir para a formação de um grupo de desenhistas ópticos capazes de dar suporte aos instrumentos que serão utilizados no projeto Giant Magellan Telescope, projeto este que está sendo implementado com o apoio da **FAPESP** ([proc. 2011/51680-6](#)) (<http://www.gmto.org/2015/06/giant-magellan-telescopes-international-partners-approve-start-of-construction-phase/>).

5 Cronograma

A realização do projeto de pesquisa se dará no decorrer de um ano e tem como previsão inicial o seguinte:

- **Segundo semestre de 2016** - neste período está previsto que o aluno estude óptica e aprenda a manusear o programa para traçado de raios OSLO e projete a objetiva para colimar a luz emitida pelo plasma na fenda de entrada do monocromador.
- Instalação da objetiva e tomada dos primeiros dados.
- **Primeiro semestre de 2017** - calibração absoluta do monocromador para medir as linhas espectrais das impurezas de carbono.

- tomada de dados.

Referências

- [1] **Severo JHF**, et al - 2003 - Nuclear Fusion 43 1047.
- [2] **Severo JHF**, et al - 2007 - Review of Scientific Instruments 78 043509.
- [3] **J. H. F. Severo**, et al - 2009 - Nuclear Fusion 49, 115026 (2009).
- [4] F. I. Parra, M. F. F. Nave, A. A. Schekochihin, C. Giroud, J. S. de Grassie, **J. H. F. Severo**, P. de Vries, K.-D. Zastrow, and JET-EFDA Contributors - Scaling of spontaneous rotation in tokamaks with temperature and plasma current - Physical Review Letters Vol.: 108 Edição: 9 Número do artigo: 095001 (2012)
- [5] Furth, H.P., Nucl. Fusion 15 (1975) 487.
- [6] Paul, J.W.M., Axon, J.B., Burt, J., Craig, A.D., Erents, S.K., et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 6th Int. Conf. Berchtesgaden, 1976) Vol. 2, IAEA, Vienna (1977) 269.
- [7] Equipe TFR, *ibid.*, Vol.-1,35.
- [8] Berlizov, A.B., Bobrovskij, G.A., Bagdasarov, A.A. Vasin, N.L., Vertiporokh, V.P., et al., *ibid.*, Vol. 1,3.
- [9] Bol, K., Arunasalam, V., Bitter, M., Boyd, D., Brau, K., et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 7th Int. Conf. Innsbruck, 1978) Vol. 1, IAEA, Vienna (1979) 11.
- [10] Edmonds, P.H., England, A.C., Nucl. Fusion 18 (1978)23.
- [11] C. Breton, C. de Michelis and M. Matioli - 1978 Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 19 367.