

PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

11 de abril de 2016

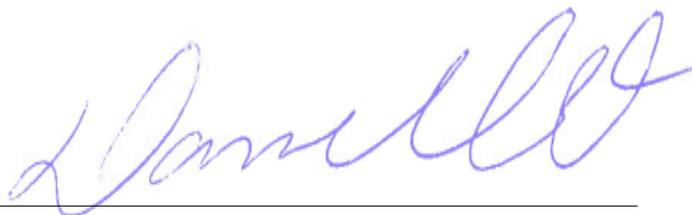
ESTUDO SOBRE A DISPERSÃO LINEAR RECÍPROCA DO MONOCROMADOR THR1000 ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NO PROGRAMA ZEMAX PARA TRAÇADO DE RAIOS

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

Coordenador: José Helder F. Severo



Aluno: Daniel Oliveira de Azambuja



Sumário

1	Introdução	2
2	Monocromador	3
2.1	Introdução	3
2.2	Espelhos esféricos	4
2.2.1	Aberração esférica	4
2.2.2	Aberração coma	5
2.2.3	Dispersão linear e resolução de um monocromador	6
2.3	Estimativa da Largura a meia altura (FWHM) para a linha do CVI	6
2.4	Redução da dispersão linear recíproca do THR1000	7
3	Arranjo experimental	8
4	Conclusão	8
5	Cronograma	9

1 Introdução

A espectroscopia é uma das técnicas mais empregadas para o estudo da emissão óptica do plasma. Átomos, moléculas e seus respectivos íons são fontes constantes de radiação. A medição dessa radiação em tempo real nos proporciona, além de uma enorme possibilidade de obtenção dos parâmetros do plasma, a possibilidade estudá-lo de forma não invasiva. A medição da radiação emitida pelo plasma é feita com a ajuda de instrumentos ópticos dispersivos, que tem a função de separar essa radiação em diferentes comprimentos de onda e de detetores.

Os instrumentos ópticos mais comuns utilizados para separar a radiação em diferentes comprimentos são os filtros ópticos, monocromadores, policromadores, espectrômetros e espectrógrafos, enquanto que os detetores mais comuns usados para medir a radiação são os tubos fotomultiplicadores de elétrons (**PMT**), fotodiodos, e câmeras do tipo **CCD** (charge coupled devise) que permite obter a imagem do objeto emissor.

O Laboratório de Física de Plasmas (**LFP**) do **IFUSP** está equipado com um monocromador de **1000mm** de distância focal com configuração Czerny-Turner de fabricação Jobin Yvon e uma câmera **CCD 512X256** que foi adquirida com recursos **FAPESP (proc. 2002/03632-3)** e que está sendo utilizada para medir o perfil radial da temperatura iônica no projeto do estudo do perfil de pressão (Estudo do Perfil da Pressão de Plasma no Tokamak **TCABR** e Criação de um Grupo de Óptica) no tokamak **TCABR (proc. 2014/13296-8)**.

Embora seja possível obter uma imagem do plasma com esses equipamentos, essa imagem não é perfeita pois é limitada pelas aberrações produzidas pelos elementos ópticos (lentes e monocromador) quando são atravessados pela luz. Essas aberrações acabam tanto reduzindo as características técnicas do aparelho quanto produzindo deformações na imagem que podem levar a uma interpretação errônea dos resultados.

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 do perfil de pressão. 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 (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 que permitirá com que os pesquisadores de diferentes laboratórios possam desenvolver seus projetos sem terem que solicitar recursos públicos para compra novos de 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 Daniel Azambuja, consiste em, além das simulações do traçado de raios no interior do monocromador THR1000 com o programa Zemax, com o objetivo de modificar a dispersão linear recíproca desse aparelho para que outros tipos de detetores de pixeis grandes como o Ma-PMT (multinodo photomultiplier tube) possam ser usados na saída lateral, viabilizar um acordo já firmado entre o IAG e o IFUSP para formação de especialistas em desenho ópticos.

2 Monocromador

2.1 Introdução

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 comum. 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 elemento 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.

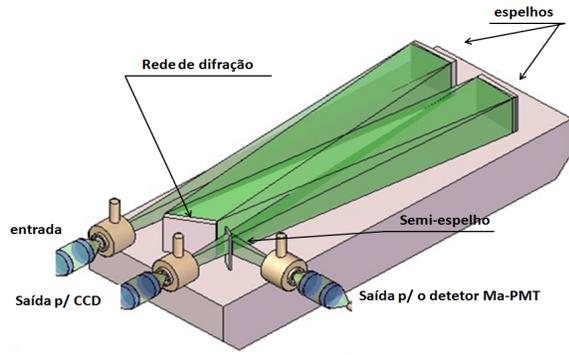


Fig.1 Representação esquemática do feixe de luz no interior do monocromador THR1000.

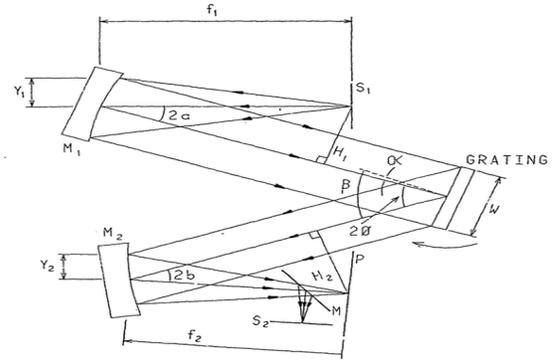


Fig.2 Representação esquemática das grandezas utilizadas nas equações.

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 tomado como base o monocromador do Laboratório de Física de Plasmas do IFUSP. Este equipamento, cujo modelo é **THR1000**, tem sido usado em muitas experiências espectroscópicas. Ele possui as seguintes características: distância focal de 1000mm , $f_{\text{number}} = 8,4$ e uma configuração do tipo Czerny-Turner. A figura 1 mostra o feixe de luz se propagando no interior do monocromador e sendo dividido no semi-espelho onde parte dele incidirá sobre o CCD e parte pode incidir sobre o Ma-PMT.

2.2 Espelhos esféricos

2.2.1 Aberração esférica

Em geral, nos monocromadores os principais tipos de aberrações ópticas são a esférica e a coma que podem ser caracterizadas pelo desvio da imagem real em relação a imagem ideal de um objeto que é obtida na aproximação paraxial.

A aberração esférica de uma frente de onda W_S em um espelho esférico pode ser estimada pela equação abaixo:

$$W_S = \frac{y^4}{4r^3} = \frac{y^4}{32f^3}, \quad (1)$$

onde y é a altura na qual o raio atinge o espelho e $r = 2f$ é o raio de curvatura do espelho e f sua distância focal. Como mostra Murty [1] a aberração esférica pode ser reduzida para $y^4/16r^3$ se for feito um deslocamento focal adequado do aparelho. Tomando como limite máximo para a aberração esférica o critério de Rayleigh, então podemos escrever que:

$$\frac{y_{\text{max}}^4}{8r^3} \leq \frac{\lambda}{4}, \quad (2)$$

então a equação (1) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$D \leq 256\lambda (f_{\text{number}})^3 \quad (3)$$

onde $D = 2y_{max}$ e $f_{number} = f/D$. Como exemplo de aplicação vamos tomar os parâmetros do monocromador THR1000 que usa uma rede de difração de $110 \times 110 \text{mm}$ portanto, $D = 110 \cdot \sqrt{2} = 155,56 \text{mm}$. Tomando como referência o comprimento de onda de 500nm obtemos, de acordo com a fórmula (3) $f_{number} = 10,67$ o que corresponde a uma distância focal para o aparelho de $f = 1659,86 \text{mm}$, no entanto foi dito que a distância focal do THR1000 era de 1000mm ou seja escolhe-se construir o aparelho com uma distância focal menor para ele ficar mais compacto, embora isto implique em uma aberração esférica maior. Para o monocromador THR1000 ela é da ordem de $3 \cdot 10^{-3} \text{mm}$.

2.2.2 Aberração coma

A segunda mais importante aberração é a coma e, devido sua natureza assimétrica ela pode ser corrigida ou totalmente eliminada através de escolhas adequadas entre os raios dos espelhos ou através da distância entre os espelhos e as fendas.

A aberração coma no espelho 1 da figura 2 pode ser expressa como segue:

$$W_C = H_1 \frac{y_1^3}{r_1^3} \quad (4)$$

onde $H_1 = f_1 \sin(2a)$ e r_1 é o raio de curvatura do espelho 1. As grandezas f , H , r , y , a , b , α e β estão todas representadas na figura 2. Para o espelho 2 a aberração vale:

$$W_C = H_2 \frac{y_2^3}{r_2^3} \quad (5)$$

onde $H_2 = f_2 \sin(2b)$ e r_2 é o raio de curvatura do espelho 2. A coma é anulada quando a condição abaixo for satisfeita.

$$H_1 \frac{y_1^3}{r_1^3} = H_2 \frac{y_2^3}{r_2^3} \quad (6)$$

Seja w_α e w_β a largura do feixe incidente e difratado respectivamente. A partir a figura 2 podemos escrever que:

$$\frac{w_\alpha}{w_\beta} = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = \frac{y_1}{y_2} \quad (7)$$

pois $y_1 \simeq w_\alpha/2$ e $y_2 \simeq w_\beta/2$, onde α e β são os ângulos de incidência e difração, respectivamente. Assim sendo, a equação (6) pode ser escrita como segue:

$$H_1 \frac{\cos^3 \alpha}{r_1^3} = H_2 \frac{\cos^3 \beta}{r_2^3} \quad (8)$$

A partir da equação (8) podemos notar que se escolhermos espelhos com o mesmo raio, a razão entre as distâncias será $H_1/H_2 = \cos^3 \alpha / \cos^3 \beta$. Embora a equação (8) mostre a condição para correção da coma no entanto, a coma tangencial é diferente de zeros em outros comprimentos de onda. Ela pode ser expressa como segue:

$$W_{TC} = \frac{3H_1 W^2}{32f^2} \left(\frac{\cos^3 \alpha}{\cos^3 \beta} - \frac{\cos^3 \alpha_0}{\cos^3 \beta_0} \right) \cos^2 \beta \quad (9)$$

onde α_0 e β_0 são os ângulos de incidência e difração para o comprimento de onda para a qual a coma é corrigida. Substituindo os parâmetros do monocromador THR1000 na equação (8) e supondo

que a coma foi corrigida para $\lambda = 500nm$ obtemos $W_{TC} \simeq 0,014mm$, considerando ainda que a dispersão linear do aparelho é da ordem de $8,4\text{\AA}/mm$ obtemos que o alargamento instrumental mínimo que pode ser obtido com esse aparelho é da ordem de $0,1\text{\AA}$.

2.2.3 Dispersão linear e resolução de um monocromador

O poder de resolução dos monocromadores é dado pela equação abaixo:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (10)$$

onde m é a ordem de difração e N é o número total de ranhuras da rede de difração. Para o THR1000 temos $m = 1$ e $w = 110mm$ com 1200 linhas/mm. Com isto temos que $\lambda/\Delta\lambda = 1,32 \cdot 10^5$. Na prática, a resolução do aparelho é tomada como sendo 80% do valor teórico, portanto para o THR1000 $\lambda/\Delta\lambda = 1 \cdot 10^5$.

A dispersão linear recíproca é definida como segue:

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{10^7}{mnf} \cos\beta [\text{\AA}/mm] \quad (11)$$

onde n densidade de ranhuras por mm. Para o THR1000 $d\lambda/dx = 8,4\text{\AA}/mm$. Isto significa que um alargamento instrumental da ordem de $0,1\text{\AA}$ implica em uma abertura de fenda de $12\mu m$.

2.3 Estimativa da Largura a meia altura (FWHM) para a linha do CVI

A largura a meia altura (FWHM) de uma linha espectral, por exemplo o carbono CVI (529,05nm) pode dar informações sobre a temperatura iônica do plasma. Essa largura a meia altura pode ser estimada como segue:

$$\Delta\lambda_T = \sqrt{(\Delta\lambda_s)^2 + (\Delta\lambda_a)^2} \quad (12)$$

onde $\Delta\lambda_s = \Delta\lambda_D = 7,71 \cdot 10^{-5} \lambda_0 \sqrt{\frac{T(eV)}{\mu}}$ e $\Delta\lambda_a$ é o alargamento instrumental que, para uma abertura de fenda de $100\mu m$, é da ordem de $0,84\text{\AA}$. Para uma temperatura iônica máxima da ordem de $200eV$ temos que $\Delta\lambda_T = 1,9\text{\AA}$. Isso significa que se quisermos ter uma boa resolução ao medir a temperatura iônica a linha espectral inteira (aproximadamente $2,5 \cdot \Delta\lambda_T$) deve estar uniformemente distribuída ao longo de pelo menos uns 16 pixels. Isto implica que o tamanho de cada pixel deve ser da ordem de $37\mu m$. A câmera CCD que está sendo utilizada para medir o perfil radial da temperatura iônica ([proc. 2014/13296-8](#)) possui pixels de $25\mu m$ o que é suficiente para as medidas que estão sendo proposta. No entanto, esse detector possui a desvantagem de só realizar uma medida durante um disparo tokamak, isto significa que não temos informação da evolução temporal da temperatura.

Alguns anos atrás surgiu no mercado uma nova modalidade de tubos fotomultiplicadores, os chamados Ma-PMT que são tubos fotomultiplicadores de elétrons composto de vários catodos de modo a poder diferenciar espectralmente e espacialmente a radiação que está sendo medida. A figura abaixo mostra os modelos que são comercializados atualmente pela Hamamatsu.

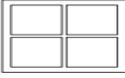
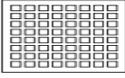
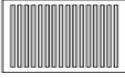
Type	Metal Channel Dynode Multianode Photomultiplier Tubes					
	Matrix			Linear		Matrix
	M4	M16	M64	L16	L32	M64
Anode Shape						
Number of Anodes	4	16	64	16	32	64
Pixel Size (mm)	9 × 9	4 × 4	2 × 2	0.8 × 16	0.8 × 7	5.8 × 5.8

Fig.3 Possíveis configurações do detector multi-anodo PMT comercializados pela empresa Hamamatsu.

Como podemos ver a menor dimensão do pixel no modelo L16 é de $0,8mm$ o que muito maior do que as nossas necessidades atuais. Uma solução para este problema consiste em alterar a dispersão linear recíproca do monocromador de modo a fazer com o detector L16 possa fazer medidas da evolução temporal da temperatura iônica.

Vamos estimar a redução que deve sofrer a dispersão linear recíproca do monocromador para a linha espectral do CVI esteja bem distribuída entre os 16 pixels do detector L16. Como a largura a meia altura é da ordem de 2Å podemos considerar a largura total da linha como sendo $2,5.2 = 5\text{Å}$. Portanto, essa banda deve estar uniformemente distribuída entre os 16 pixels. Isto implica que sobre cada pixel teremos uma banda cuja largura é de $5/16 = 0,3\text{Å}$. Portanto a dispersão linear recíproca não deve ser maior que $0,3\text{Å/mm}$, o que significa dizer que ela deve passar de $8,4$ para $0,3$ o que implica em uma magnificação de $1/28$ vezes. Portanto podemos escrever que:

$$\left(\frac{d\lambda}{dx}\right)_{magnified} = M \left(\frac{d\lambda}{dx}\right)_{original} \quad (13)$$

2.4 Redução da dispersão linear recíproca do THR1000

A dispersão linear recíproca do aparelho pode ser alterada se introduzirmos uma lente cilíndrica na fenda lateral de saída. Essa lente deve então magnificar o espectro na direção somente da dispersão.

Para determinar as características dessa lente vamos usar a equação do fabricante de lentes, ou seja;

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (14)$$

onde R_1 e R_2 são os raios de curvatura das superfícies esquerda e direita da lente, d é a espessura da lente e n seu índice de refração. Vamos tomar uma lente no formato de um bastão cilíndrico de modo que podemos escrever $R_1 = r$, $R_2 = -r$ e $d = 2r$. Portanto, a equação (14) assume a seguinte forma:

$$f = \frac{nr}{2(n - 1)} \quad (15)$$

Considerando o índice de refração do vidro como sendo $n = 1,5$ e um cilindro de $3mm$ de diâmetro obtemos $f = 2,25mm$.

Seja z_1 a distância do objeto (fenda lateral de saída) até a lente e z_2 a distância da imagem (ponto onde será instalado o detector) até a lente, então a relação entre f , z_1 e z_2 é descrita pela fórmula abaixo.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \quad (16)$$

Por razões práticas, vamos considerar a posição do detector até a fenda de saída igual a $z_d = z_1 + z_2$ variável ($z_d = 50 - 200mm$) permitindo com que as distâncias z_1 e z_2 sejam ajustadas manualmente antes dos experimentos. Podemos combinar a equação (16) com a expressão para z_d e obter z_1 e z_2 em função de z_d ou seja:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{z_d}{2} - \sqrt{\frac{z_d^2}{4} - f \cdot z_d} \\ z_2 = \frac{z_d}{2} + \sqrt{\frac{z_d^2}{4} - f \cdot z_d} \end{cases} \quad (17)$$

Portanto, a magnificação $M = z_2/z_1$ pode ser escrita como segue:

$$M = \frac{\frac{z_d}{2} + \sqrt{\frac{z_d^2}{4} - f \cdot z_d}}{\frac{z_d}{2} - \sqrt{\frac{z_d^2}{4} - f \cdot z_d}} \quad (18)$$

Substituindo os valores de z_d e f na equação acima verificamos que a magnificação oscila entre $0,05 - 0,01$ sendo que o valor esperado é de $M = 0,036$.

3 Arranjo experimental

Para realização deste projeto, será utilizado o software Zemax que está instalado em uma máquina virtual e que pode ser acessado remotamente. Neste projeto o aluno Daniel deve, inicialmente simular o monocromador THR1000 que está representado na figura 1 e determinar, também através de simulações, a melhor lente, ou conjunto de lentes que deve ser instalado na fenda de saída lateral do monocromador para que sua dispersão linear seja reduzida em aproximadamente 28 vezes.

4 Conclusão

Neste projeto de iniciação científica que está sendo apresentado, o aluno terá que simular toda a trajetória dos raios de luz no interior do monocromador até a fenda de saída onde poderá ser instalado um novo detector Hamamatsu L16, caso os resultados das simulações confirmem a previsão teórica. Portanto esse projeto tem como objetivo fazer um estudo da dispersão linear recíproca do monocromador THR1000 visando altera-la para que seja possível usar um novo tipo de detector Hamamatsu L16 na saída que propocionará medir a evolução temporal da temperatura iônica no tokamak TCABR.

A simulação do traçado de raios no interior do monocromador será feita com a ajuda do programa Zemax que foi obtido através do STI/USP visando apoiar um acordo de colaboração entre o IFUSP e o IAG para criação de um grupo de desenhistas ópticos que deve dar suporte ao projeto Giant Magellan Telescope.

Com a simulação do traçado de raios espera-se melhor explorar todo o potencial do equipamento assim como estudar a influência da abertura da fenda de entrada na resolução espectral do equipamento.

É importante destacar o fato de que esse projeto não tem o objetivo de instalar o detector L16 na fenda de saída do monocromador, até mesmo porque ainda não possuímos, em nosso Laboratório, esse tipo de detector, mas sim provar ou não sua viabilidade para medidas da evolução temporal da temperatura iônica no tokamak TCABR. Como esse tipo de alteração na dispersão linear dos monocromadores nunca foi feito, queremos primeiramente, através de simulações ópticas provar a sua viabilidade. 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 (2011/51680-6) (<http://www.gmto.org/2015/06/giant-magellan-telescopes-international-partners-approve-start-of-construction-phase/>).

Este projeto visa ainda treinar o aluno a manipular todas as ferramentas necessárias para desenvolver um trabalho de óptica no Laboratório de Física de Plasmas do IFUSP. Portanto durante a execução deste projeto, o aluno passará por todas as etapas que envolvem um trabalho em óptica que são:

1. **projeto óptico** - aprender a projetar sistemas ópticos utilizando o programa para traçado de raios Zemax.
2. **projeto mecânico** - aprender a projetar suportes mecânicos utilizando os softwares necessários (autocad ou Solid Edge).
3. **tratamento de dados** - aprender a manipular os softwares para tratamento de dados (origin e matlab).

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 Zemax e projete a objetiva que será instalada na saída do monocromador para alterar a dispersão linear recíproca do monocromador.
- **Primeiro semestre de 2017** - neste semestre está previsto a simulação do monocromador THR100 no Zemax assim como a interpretação dos resultados.

Referências

- [1] M. V. R. K. Murty - 1962 - *J. Opt. Soc. Am.* **52** 515.