

# Laboratório de Física Moderna

## FÍSICA ONDULATÓRIA COM COMPRIMENTO DE ONDA MACROSCÓPICO

### DIFRAÇÃO DE MICRO-ONDAS (Experiência B.2)

#### PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

Fenômenos óticos de interferência e de difração são investigados com uso de feixes de micro-ondas em um objetos com dimensões macroscópicas atuando como refletores parciais e totais, e também com um cubo macroscópico atuando como uma rede cristalina cúbica. É introduzida a noção de planos "atômicos" e as várias possíveis decomposições de redes cristalinas em famílias de planos de rede (planos de Bragg).

#### TÓPICOS RELACIONADOS

Geração e detecção de micro-ondas, interferômetro de Michelson, parâmetros característicos de ondas eletromagnéticas, processo físico de difração, lei de Bragg, famílias de planos de rede.

#### EQUIPAMENTO

Gerador de micro-ondas linearmente polarizadas, de frequência 10,525 GHz, a partir de diodo Gunn e cavidade ressonante. Detector de micro-ondas com sensor de alta frequência, tipo diodo Schottky. Refletores totais metálicos e semi refletores de madeira. Trilhos óticos, com variação angular 0 a 360°, de precisão 1°. Cristal cúbico macroscópico, feito de aproximadamente 512 esferas metálicas de cerca de 0,6 cm de diâmetro, espaçadas entre si por cerca de 3,80 cm, permitindo estudar difração das famílias de planos cristalinos  $\{100\}$  e  $\{110\}$ .

#### TAREFAS EXPERIMENTAIS

1. Estudar o interferômetro de Michelson utilizando feixes de micro-ondas e determinar o comprimento de onda do feixe.
2. Obter espectros de difração correspondentes a duas famílias de planos de rede.
3. Estudar aspectos da lei de difração de Bragg, com o uso de radiação de comprimento de onda macroscópico e de uma rede cúbica de parâmetro de rede macroscópico, determinando a distância interplanar para as duas famílias de planos cristalinos estudadas.

#### PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

##### *Interferômetro de Michelson:*

1. O arranjo experimental está esquematizado na Fig. 1. **A** e **B** são duas placas totalmente refletoras (metálicas), **C** é um refletor parcial (não-metálico), **T** o transmissor e **R** o receptor. As micro-ondas propagam-se até o receptor por dois diferentes caminhos:  $\mathbf{T} \rightarrow \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{R}$  e

$T \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow R$ . A interferência entre os dois feixes que chegam ao receptor leva à observação de máximos e mínimos em função da diferença de distância entre os braços **CA** e **CB** do interferômetro.

2. Conecte o transmissor à fonte de alimentação e ajuste os controles do receptor de modo que um sinal com intensidade razoável seja observável no medidor. Mantenha os dois refletores bastante afastados do refletor parcial central, para evitar efeitos de interferência secundária. Gire o refletor parcial **C** para maximizar o sinal no detector (a posição ideal é a  $45^\circ$  em relação ao braço **CA**).
3. Para uma posição fixa do refletor total **B**, movimente o refletor total **A** ao longo do trilho com escala em décimos de cm e observe os máximos e mínimos de intensidade registrados no medidor.

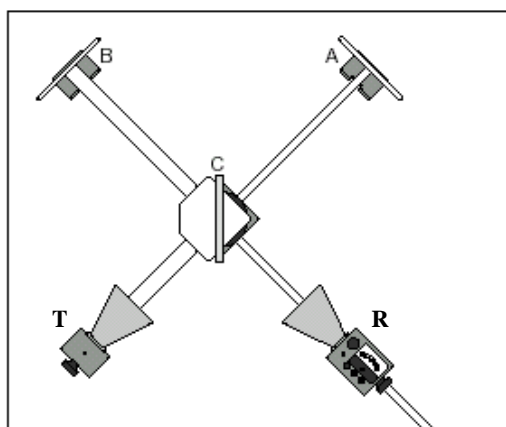


Fig. 1: Arranjo experimental do interferômetro de Michelson.

4. Coloque o refletor **A** em uma posição que produza um máximo de interferência e anote esta posição. Varie agora lentamente a posição de **A**, registrando as posições em que ocorram máximos (ou mínimos) de intensidade e rotulando-os com um índice crescente, até observar em torno de 20 máximos (ou mínimos).
5. Repita essas medidas pelo menos mais duas vezes, modificando a posição inicial do refletor **A**.

#### *Difração de Bragg:*

6. O arranjo experimental encontra-se esquematizado na Fig. 2. As micro-ondas incidentes sobre a rede cúbica, formada por esferas metálicas incrustadas em um arcabouço de plástico, são difratadas nos ângulos definidos pela lei de Bragg, "produzindo picos de difração". As esferas desempenham um papel equivalente ao de átomos em um cristal real. A rotação da rede e/ou do braço do goniômetro (onde está fixo o receptor) permite a observação desses máximos e a medida dos correspondentes ângulos de difração.
7. Posicione o transmissor e o receptor alinhados frontalmente, com ângulo nulo na escala do goniômetro (braço girante associado ao detector). Ajuste a orientação da rede cúbica de modo que os planos (100), paralelos a uma das faces da rede cúbica, estejam *paralelos ao eixo de simetria do transmissor*, com ângulo nulo na escala indicada pela ponta marcadora associada ao arcabouço da rede cúbica. A Fig. 3 serve para a identificação de três diferentes planos formados pelas esferas.

- Conecte o transmissor à fonte de alimentação e ajuste inicialmente os controles do receptor tal que o seletor de ganho fixo fique no máximo (30×) e o de ganho contínuo fique no mínimo. Agora ajuste os ganhos para que o sinal *na direção direta* se apresente com intensidade no fim da escala no medidor. Registre a leitura do medidor nessa situação inicial.
8. Gire a rede cúbica de 1° em um dado sentido (horário, por exemplo) e simultaneamente gire o braço do goniômetro de 2° no mesmo sentido, para atingir a situação conhecida como reflexão especular. Anote o valor do ângulo  $\theta$  entre o eixo de simetria do transmissor (direção de incidência) e a direção paralela aos planos de interesse, conforme Fig. 2(b).
  9. Prossiga dessa forma, sempre girando o braço do goniômetro de 2° para cada 1° de rotação da rede, até atingir o ângulo  $\theta = 55^\circ$ . Registre a leitura do medidor em cada posição. Se for necessário mudar o ganho do receptor (controle “INTENSITY”), anote as alterações feitas para que depois os valores coletados possam ser normalizados. *Lembre-se de não mexer no ajuste de ganho contínuo durante o experimento.*
  10. Repita os procedimentos acima agora utilizando a família de planos (1 1 0), que são planos paralelos à diagonal de uma face do cubo, como mostrado na Fig. 3. Note que o ângulo que faz agora os planos ficarem inicialmente alinhados com a direção direta, ocorre com a rede girada de 45°.
  11. Meça com um paquímetro a distância entre as esferas que formam a rede cúbica. Anote qual foi o procedimento adotado para medir a distância sem danificar a rede cúbica.

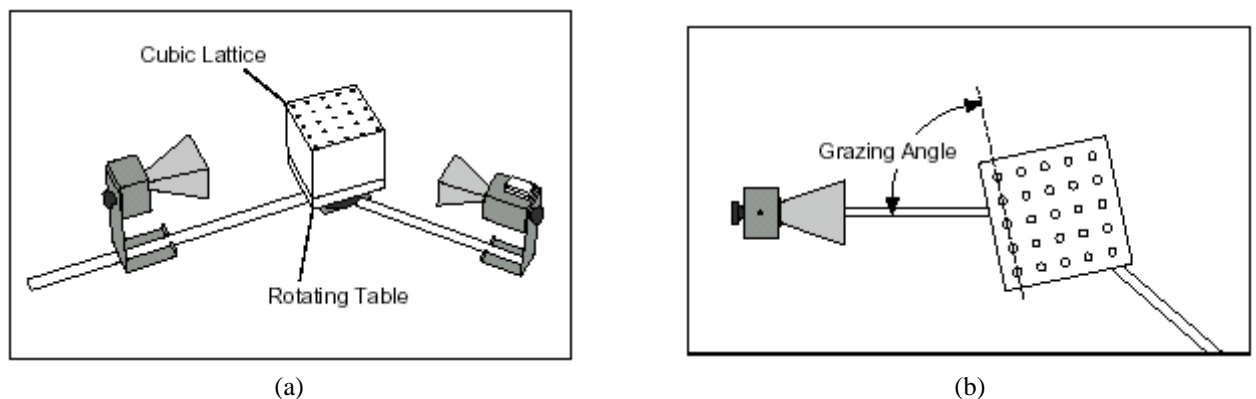


Fig. 2: (a) Arranjo experimental para estudo da lei de Bragg. (b) Ilustração da medida do ângulo de incidência.

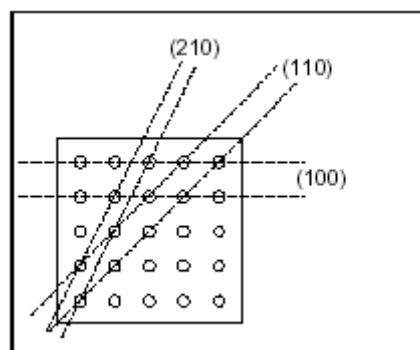


Fig. 3: Ilustração de algumas famílias de planos formados pelas esferas metálicas.

## CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. Seja criterioso no tocante à rotação tanto da rede cúbica, quanto do goniômetro onde está o receptor de micro-ondas. Basta seguir o esquema 1° / 2° cuidadosamente, mas posição correta pode ser sempre checada: (i) para (100) as posições angulares absolutas obedecem a  $\theta_{\text{detector}} = 2\theta_{\text{rede}}$ ; (ii) no caso dos planos (110), tem-se que  $\theta_{\text{detector}} = 2(\theta_{\text{rede}} - 45^\circ)$ .
2. Mantenha sempre todo o aparato experimental limpo e sobre uma superfície firme, limpa e sem rugosidades. Especial cuidado deve ser tomado com partículas metálicas, que atuam como excelentes refletores de micro-ondas.
3. Também deve ser evitado apor a cabeça, ou braços, no interior do aparato instrumental durante as medidas. O corpo humano é composto de várias moléculas polares e radicais livres que podem apresentar polarizabilidade e/ou condutividade, que certamente afetam as medidas.
4. Certifique-se de que o detector de micro-ondas está desligado após o término do experimento, pois senão as duas baterias de 9 V, razoavelmente caras, se consumirão de um dia para o outro.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. Os máximos sucessivos de interferência no interferômetro de Michelson são obtidos cada vez que um dos dois refletores (o refletor **A**, por exemplo) é deslocado de uma distância igual a  $\lambda/2$ .
2. Se a distância interplanar é  $d$ , o ângulo de difração de Bragg, medido entre a direção do feixe incidente e os respectivos planos atômicos é  $\theta$ , e sendo  $n$  um número natural que indica a ordem de difração ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), então a lei de Bragg se expressa como

$$2d \sin \theta = n \lambda .$$

## QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Explique o que você entende por colimação de um feixe de ondas eletromagnéticas e qual sua importância para fenômenos de difração. Que efeito secundário, sobre o espectro de difração, pode produzir um feixe mal colimado.
2. Deduza a condição para ocorrência de máximos no interferômetro de Michelson, esquematizando as trajetórias e diferenças de caminhos ópticos dos feixes que entre si interferem. Qual a condição para ocorrerem mínimos de interferência?
3. Faça uma dedução geométrica da lei de Bragg.
4. Explique, com base em um desenho esquemático, por que o braço do goniômetro deve sempre ser girado de um ângulo igual ao dobro do ângulo segundo o qual a rede cúbica foi girada, no estudo experimental da lei de Bragg.
5. Discuta algumas aplicações práticas da difração em cristais reais.

## PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

1. Apresente em uma tabela os resultados das medidas efetuadas com o interferômetro de Michelson, utilizando as várias medidas efetuadas para obter valores médios e incertezas e tomando o cuidado de ajustar para a mesma origem as medidas feitas com diferentes posições iniciais dos refletores. Acrescente uma coluna contendo os valores médios e suas respectivas incertezas.
2. Monte *um* gráfico das posições médias do refletor **A** no interferômetro de Michelson, obtidas acima, em função do índice de contagem dos máximos de interferência observados.
3. Obtenha a partir do coeficiente angular *desse gráfico* o valor do comprimento de onda da radiação de micro-ondas. Compare com o valor esperado.
4. Faça um gráfico da intensidade registrada em função do ângulo  $\theta$  na prática envolvendo a lei de Bragg, com a família de planos  $\{100\}$ . Utilize primeiro uma escala que permita a observação de todos os valores registrados para  $\theta$  entre 0 e  $55^\circ$  e, a seguir, refaça o gráfico com  $\theta$  entre  $10^\circ$  e  $55^\circ$ .
5. Localize nesse último gráfico os picos de difração observados e determine as respectivas distâncias interplanares a partir da lei de Bragg. Faça uma média dos valores, e compare com os valores esperados a partir da distância entre as esferas, medida em laboratório.
6. Repita os procedimentos 4 a 5 acima, agora para a família de planos  $\{110\}$ .

## DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. Qual a grande vantagem de se utilizar feixes de micro-ondas no estudo do fenômeno da difração?
2. Tanto os refletores totais, usados no interferômetro de Michelson, quanto as esferas da rede cúbica, usadas no estudo da difração, constituem objetos metálicos. Por outro lado, é comum se ouvir advertências sobre os riscos de uso de recipientes metálicos em fornos de micro-ondas. Explique essas observações com base nas propriedades de propagação das ondas eletromagnéticas em meios metálicos. Calcule a profundidade de penetração (*skin depth*) das micro-ondas utilizadas nessa experiência, para alguns metais típicos (cobre, latão, alumínio, etc).
3. A rede cúbica utilizada para estudo da lei de Bragg possuía esferas separadas por distâncias da ordem de cm. Em um cristal real, os átomos encontram-se separados por distâncias da ordem de Å. Qual a ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação que deve ser utilizada para investigar a estrutura de cristais por meio de difração? Justifique!!! Qual a denominação dessa radiação na faixa do espectro eletromagnético?
4. Discuta algumas aplicações práticas do interferômetro de Michelson. É possível medir a velocidade de propagação da luz no vácuo com esse interferômetro?
5. Discuta como um espectro de difração de uma substância pode ser utilizado como uma possibilidade de identificá-la microscopicamente, em termos de seu arranjo atômico.

## BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vol. 4, LTC, 4<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. J. Smit, Micro-ondas, Livros Érica Editora Ltda , São Paulo, 1987.
3. J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Christy, Fundamentos da Teoria Eletromagnética, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1982.
4. A. C. Melisinos, Experiments in Modern Physics, Academic Press, New York, 1966.
5. F. A. Jenkins, H. White, Fundamentals of Optics, McGraw Hill, 1976.
6. J. R. Meyer-Arendt, Introduction to Classical and Modern Optics, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
7. Microwave Optics, Manual de instruções – PASCO Scientific, 1991.
8. M. Ference Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, Curso de Física – Eletrônica e Física Moderna, Edgrad Blücher Ltda.

Redação: Prof. Jair C. C. Freitas e Prof. Rogério N. Suave.

