
ÓTICA FÍSICA: EXPERIÊNCIAS INTRODUTÓRIAS TOMANDO COMO EIXO O CONCEITO DE COERÊNCIA¹

Mirta Jaén

Leonor C. de Cudmani

Elisa Colombo

Instituto de Física

Universidade Nacional de Tucumán

San Miguel de Tucumán – Argentina

I. Introdução

A prática docente e pesquisas educacionais que vimos realizando nos têm permitido detectar núcleos de dificuldade na aprendizagem da “ótica física” nos cursos universitários básicos. Os mesmos parecem dever-se fundamentalmente:

- Ao tratamento dos temas de interferência, difração e polarização, em geral de forma isolada, sem explicitar suficientemente sua integração, imprescindível para compreender e interpretar os fenômenos aos quais se referem;

- À profunda internalização de um modelo simplificado de onda infinita linearmente polarizada, de amplitude e frequências constantes, usado fora de seus limites de validade, o que dificulta a troca de paradigma necessária para uma rigorosa compreensão de um conceito básico como o de coerência luminosa. Esta pré-concepção é gerada em boa parte pela instrução, mas mostra-se tão arraigada como os conceitos intuitivos;

- Aos fenômenos envolvidos necessitarem de uma construção conceitual com alto grau de abstração, razão pela qual é difícil apelar à intuição ou a modelos simples em busca de explicações e interpretações.

Propomos aqui um esboço de experiências introdutórias que podem ser utilizadas para gerar a mudança conceitual necessária. O conceito de coerência luminosa

¹ Traduzido por Márcia P. Hofmann e Bartira C. S. Grandi (Depto. de Física – UFSC) e revisado por Eduardo Humeres (Depto. de Química – UFSC).

surge como um núcleo conceitual eficiente para a estruturação integrada dos fenômenos luminosos de interferência, difração e polarização.

Algumas das experiências são mencionadas na bibliografia básica ^(1,2,3,4,5) em um contexto conceitual diferente. As mesmas foram selecionadas e complementadas em função dos objetivos do trabalho.

A simples condição de “diferença de fase constante” imposta a duas ondas para que sejam coerentes, sem especificar tipo de fonte luminosa, geometria e dimensões do sistema ou características do detector, envolve implicitamente o modelo de ondas monocromáticas ideais e conduz à idéia de que a coerência está associada unicamente à fonte.

É por isto que o presente trabalho tem sido encarado de maneira que o estudante consiga relacionar o conceito de coerência luminosa não somente ao tipo particular de fonte usada, mas também à geometria do sistema e às características espaciais e temporais do detector. Surge a necessidade de deixar de lado o modelo simplificado de onda eletromagnética infinita para visualizá-la como um pacote de ondas emitidas em tempos muito curtos (da ordem de 10^{-10} s para uma fonte térmica comum). Portanto, a sensibilidade espacial e temporal do detector desempenha um papel decisivo. Se os padrões variam com uma velocidade incompatível com a sensibilidade do detector, o instrumento simplesmente dá uma média obtendo-se iluminação uniforme⁽⁶⁾.

Resgatamos o valor da experiência direta e ativa do estudante no processo de aprendizagem que estimula suas capacidades para a investigação científica. Também queremos destacar o valor da experiência qualitativa em uma primeira etapa do processo de aprendizagem, na medida em que tende a obter uma precisão conceitual fundamental na introdução de um tema e evitar, desta forma, uma posterior utilização mecânica de fórmulas.

O desenvolvimento de equipamentos de baixo custo tem aumentado consideravelmente em nosso meio, vinculado ao crescimento do número de estudantes dos ciclos básicos das carreiras científicas e à situação sócio-econômica. Sem dúvida este tipo de prática tem permitido dar uma resposta adequada à situação estabelecida, porém, mais importante ainda é, a nosso ver, resgatar o valor educativo intrínseco deste tipo de atividade onde o estudante tem que delinear, construir e avaliar, em geral, seus dispositivos experimentais.

II. Observações preliminares

Propõe-se uma série de observações (Apêndice 1) que tendem a despertar a curiosidade do estudante assim como a desenvolver sua capacidade para observar mais criticamente o que o rodeia. Desta maneira, contradizendo suas idéias prévias de que a

aparência de padrões estáveis de interferência necessitam de fontes altamente coerentes, poderá descobrir que no dia a dia está vendo – usando como detector seu olho – fenômenos de interferência luminosa que dão lugar a padrões estáveis de intensidade não uniforme. Basta mencionar como exemplo a observação tão comum de figuras de difração de fontes afastadas vistas através do pára-brisa de um carro.

Observando distintas fontes luminosas através dos olhos semicerrados, de seus dedos quase juntos ou usando um lenço poderá visualizar os padrões de intensidade não uniforme mais característicos.

A partir destas observações, o aluno poderá identificar as variáveis significativas:

- Características da fonte luminosa;
- Características do sistema experimental; e
- Características do detector.

Nesta parte e com base em perguntas formuladas pelo docente (Apêndice 1) pode-se orientar a discussão com os estudantes e revisar as seguintes questões:

- Não foi necessário dispor de fontes que emitam trens de onda infinitos para observar padrões estáveis de intensidade não uniforme (Apêndice 2). Conseguiu-se a coerência com dispositivos simples utilizando fontes comumente consideradas “incoerentes”. Todos os dispositivos usados pelo aluno têm como finalidade limitar a radiação luminosa àquelas contribuições com diferença de fase constante, excluindo as restantes⁽⁷⁾.

- Neste sentido são de fundamental importância as dimensões relativas do sistema experimental. Pode-se observar a borda definida de uma ranhura ou o padrão de difração da mesma segundo a distância a que se encontra da fonte. Uma fonte extensa próxima pode converter-se em puntual ao afastar-se. Os fenômenos de interferência, sempre presentes, podem dar lugar a “padrões estáveis de intensidade não uniforme” ou a “padrões médios de intensidade uniforme”. É por isto que não achamos conveniente então falar de “padrões de interferência” e “ausência de interferência”⁽⁶⁾.

- Toma-se consciência do papel do detector: uma radiação que se comporta como incoerente para o olho (tempo de resposta da ordem de 0,1 s) pode resultar coerente quando se detecta com uma película fotográfica (tempo de resposta da ordem de 10^{-3} s) ou com um fotomultiplicador (tempo de resposta da ordem de 10^{-9} s).

III. Feixes coerentes por divisão de frentes de onda

Diferenciando padrões de interferência e difração.

Propõe-se as experiências descritas no Apêndice 3. O aluno poderá assimilar o fenômeno de difração como um caso de interferência de um grande número de fontes⁽⁸⁾.

Para poder interpretar seus resultados o aluno deverá recorrer a um modelo de emissão de trens de onda finitos, caracterizados por sua largura de banda e seu comprimento de coerência.

Através de algumas questões colocadas para a discussão (Apêndice 3), os estudantes podem chegar a discriminar conceitos tais como:

- O diagrama de difração, devido à interferência de ondas originadas nas bordas dos objetos iluminados, varia com a forma dos mesmos enquanto que, ao agregar uma segunda abertura, aparece o efeito conhecido como de interferência que não depende de sua forma e sim da posição relativa das fontes que interferem. Aparece então um padrão de interferência modulado por um de difração.

- Não se trata de dispor de fontes de luz que irradiem frentes de ondas infinitas e perfeitamente planas como às vezes interpreta o estudante. A chave está em que as radiações que interferem provêm de uma mesma frente de ondas que incide sobre ambos os orifícios^(2,6).

Deste modo o estudante pode construir, com base em suas próprias observações, modelos de interpretação que permitam explicar como é possível obter padrões estáveis com fontes incoerentes: por divisão de frentes de onda. Obtêm-se os **feixes** coerentes que interferem separando uma mesma frente de onda por algum tipo de interação com a matéria.

- À luz destas considerações, revisam-se os conceitos de “fonte puntual”, “fendas estreitas”, “orifícios pequenos”, “distâncias grandes” enquanto aproximações que se justificam pelas comparações entre as dimensões experimentais envolvidas (Apêndices 4 e 5).

IV. Feixes coerentes por divisão de intensidade

Interferência em lâminas delgadas

O objetivo destas experiências é que o aluno visualize outra forma possível e simples de obter feixes coerentes. Trata-se neste caso de dividir a intensidade do feixe incidente por algum tipo de interação do mesmo com a matéria.

Os estudantes repetem e analisam criticamente observações comuns, similares às da vida diária: uma camada muito delgada de azeite sobre água, uma cunha de ar

entre vidros ou uma bolha de sabão permitirão observar padrões de intensidade não uniforme e especialmente a dependência com a composição espectral da fonte utilizada.

As experiências propostas (Apêndice 6) permitem ao estudante identificar os parâmetros em jogo e as condições sob as quais se consegue a coerência.

Propõe-se uma série de perguntas (Apêndice 6) para guiar a discussão a questões tais como:

- Quais são os limites para a observação de padrões estáveis de intensidade não uniforme em películas delgadas de ar, azeite, etc.? A condição de coerência para as ondas que interferem deixa de ser cumprida quando a diferença de caminho ótico supera o comprimento do trem de ondas da radiação que se está usando. Não é suficiente então a conhecida condição de “diferença de caminhos óticos igual a um múltiplo inteiro ou semi-inteiro de comprimentos de onda” para caracterizar os padrões de interferências. Qual é o limite para esse número inteiro? Para diferenças de caminhos óticos menores que $\lambda/4$ não se consegue a condição de interferência construtiva, o que explica que se veja negra a camada de azeite muito delgada^(2,4).

- Por que nestas experiências é mais visível o efeito do colorido das franjas do que nas experiências com as ranhuras? Neste ponto discute-se ordens de grandeza envolvidas nas experiências (distâncias entre ranhuras da ordem do milímetro enquanto a camada de ar entre lâminas de microscópio é da ordem de vários comprimentos de onda). Pode-se estimar a partir daí as larguras das franjas correspondentes.

- Como se consegue nestas experiências os feixes coerentes que interferem? Esta questão leva a rever o processo pelo qual temos conseguido coerência, onde estão as “fontes coerentes” em cada caso, criadas nos processos de refração e reflexão que sofre o feixe em diferentes interfases. O processo implica a divisão da intensidade do feixe incidente em feixes secundários de menor intensidade que o primeiro, o qual introduz uma limitação do tipo energético na observação dos padrões.

- Por último poder-se-á discriminar, comparando-se com a análise realizada no parágrafo anterior, como influem o tipo de fonte (comprimento de onda, largura da banda), a geometria e dimensões do sistema experimental e as características do detector.

V. Feixes coerentes por divisão de componentes ortogonais

Fenômenos com luz polarizada

O tema da polarização da luz apresenta de forma particularmente aguda o problema da desconexão com os outros fenômenos luminosos^(10,11); em particular, a rela-

ção entre polarização e coerência luminosa é pouco aprofundada na prática educativa e, em consequência, pouco compreendida.

Em geral os estudantes sabem que certos efeitos podem ser observados com luz incidente polarizada e não com luz natural. A obtenção de luz elíptica e colorida por interferência em lâminas birrefringentes, o estudo de tensões internas em elementos transparentes e a medição da atividade ótica são alguns exemplos que se pode mencionar.

O propósito desta seção é que o aluno resgate o modelo de luz polarizada como soma de componentes ortogonais e coerentes entre si para explicar os fenômenos de interferência que observa^(2,6,12).

Através das experiências e das questões que se discutem com os alunos (A-pêndice 7) pretende-se chegar a uma conceitualização mais clara de alguns pontos que queremos destacar:

- “A luz natural pode ser considerada como a soma de duas componentes ortogonais incoerentes; a luz polarizada, no entanto, pode ser representada como a soma de duas componentes ortogonais coerentes”.

Com base neste modelo pode-se analisar o papel do primeiro polarizador como “coerentizador” das componentes ortogonais do campo elétrico incidente. Diferencia-se assim do papel do analisador – segundo polarizador – no dispositivo experimental que se identifica como um “sintonizador de um canal de interferência”⁽⁶⁾. Como interessa destacar o papel da coerência luminosa, focaliza-se a atenção nesta função de selecionar um plano de transmissão, mais do que como detector de luz polarizada.

- A interferência que origina as cores, quando se trabalha com luz policromática, realiza-se entre as projeções no plano de transmissão do analisador, das duas componentes ortogonais coerentes, defasadas, que emergem da placa retardadora (fita durex, celofane, etc.).

- Na medida em que internaliza o modelo proposto, o estudante pode compreender que qualquer que seja o tipo de polarização do feixe incidente, não somente linear, terá a condição de que a diferença de fase entre as componentes ortogonais mantém-se constante.

- Outra questão que convém aprofundar é a limitação que impõe o comprimento de coerência da radiação. A diferença de caminho ótico entre as componentes ortogonais, ao atravessar uma dada espessura, não deve ser maior do que o comprimento de coerência da radiação incidente para obter padrões estáveis não uniformes, o que por sua vez está associado ao grau de monocromaticidade da fonte.

- As condições de interferência construtiva (ou destrutiva) dependem do comprimento de onda.

- Uma análise comparativa dos efeitos da cor em uma cunha delgada de ar e em uma cunha de material birrefringente permite uma síntese integradora dos dois fenômenos estudados. No caso de interferência em uma cunha delgada as dimensões envolvidas são da ordem do comprimento de onda, e no caso da interferência em cunhas de material birrefringente são de duas ou três ordens maiores, dependendo da diferença entre os índices de refração ordinário e extraordinário do material.

VI. Conclusão

No presente trabalho tentamos resgatar a experiência como ferramenta didática valiosa quando se trata de abordar temas pouco intuitivos para os estudantes, que necessitam para sua interpretação de modelos de alto nível de abstração.

Temos visto que é útil integrar a experiência prévia dos estudantes, as observações da vida diária, com as experiências específicas de laboratório como forma de favorecer um processo de modificação gradual de estruturas e modelos internalizados e não uma simples superposição de esquemas incompatíveis.

Trata-se de uma proposta de experiências simples nas quais a coerência luminosa é o conceito integrador de fenômenos da ótica física que o aluno tem estudado em capítulos independentes e desarticulados entre si. Em especial, a polarização da luz, separada tradicionalmente do resto, integra-se nesta síntese com os conceitos básicos de interferência de feixes coerentes.

Pode-se obter uma maior internalização de idéias chaves para realizar uma síntese integradora da ótica física levando em conta:

- O conceito de coerência, associado não somente à monocromaticidade da fonte, mas também a suas dimensões e as do sistema experimental;

- A idéia de que não existem fontes “absolutamente” coerentes nem “intrinsecamente” incoerentes ainda que o laser seja uma muito boa aproximação das primeiras e uma lâmpada incandescente das segundas;

- Que conforme se modifiquem a geometria e dimensões do sistema experimental uma mesma fonte pode comportar-se como “coerente” ou como “incoerente”;

- Que obter um padrão estável de interferência é o resultado de um processo de medição cuja observação depende do detector utilizado. O que o olho percebe como média em uma dada situação pode ser discriminado por um fotomultiplicador, por exemplo;

- Que há um vínculo entre o tamanho da fonte e sua intensidade, que impõe limites físicos à situação experimental: nem sempre uma fenda pode ser feita tão pequena

quanto se necessita, pois então não se dispõe de intensidade suficiente para que o padrão possa ser visto.

O conjunto de experiências aqui descritas está sendo implementado no Laboratório de Física Experimental, em cursos de licenciatura e engenharias da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Nacional de Tucumán (UNT), com uma resposta entusiasta por parte dos alunos. Também foram usadas como parte de diferentes seminários realizados nas Reuniões Nacionais de Física (Tucumán – Argentina 1985, Mar del Plata – Argentina, 1987) com resposta idêntica.

Resultados mais objetivos desta instrumentação estão sendo analisados e serão objeto de trabalhos futuros.

Consideramos, então, que a simplicidade dos equipamentos utilizados e a factibilidade das observações, juntamente com a riqueza conceitual que permitem abordar, fazem desta proposta um recurso didático valioso para numerosas situações de aprendizagem e pode ser generalizada a outros campos da física.

APÊNDICE 1

OBSERVAÇÕES PRELIMINARES

1.1 - Observar com os olhos semicerrados fontes luminosas distintas (um tubo fluorescente, uma lâmpada incandescente comum, uma lanterna, uma vela; se houver, convém incorporar fontes de descarga como arco de Hg ou lâmpada de néon, lâmpada de sódio), a luz do céu, a luz difusa refletida nas paredes ou na mesa de trabalho e reflexos especulares (por exemplo, em uma tesoura ou em um trinco cromado).

Descrever o efeito produzido ao girar a cabeça e ao aproximar-se ou afastar-se da fonte.

1.2- Repetir as observações através dos dedos semicerrados da mão, modificando a separação dos dedos e girando a mão.

1.3- Olhar através de um lenço (ou de qualquer tecido como o de uma cortina ou o de um guarda-chuva) as distintas fontes de luz, a diferentes distâncias. Girar o lenço para apreciar o efeito da inclinação do tramado.

Questões a discutir com os estudantes

1- Por que não se observam padrões estáveis de interferência quando se olha o céu ou as superfícies difusoras? Pode-se dizer que, nestes casos, as ondas não interferem?

2- Os padrões que você observa com os olhos semicerrados se devem à abertura do olho ou à presença das pestanas?

3- Como as características de cada fonte afetam o padrão observado?

4- Como se modifica o que você observa quando se afasta da fonte? A que se deve este efeito?

5- Por que a sombra projetada no piso por um orifício em um toldo é circular? É a mesma situação que a sombra dos interstícios pequenos entre as folhas da copa de uma árvore?

6- O que sucede quando você troca o tramado do tecido através do qual observa a fonte de luz?

7- O que têm em comum o tecido do lenço, os olhos semicerrados e os dedos quase juntos?

8- Se ao invés do olho você utilizasse um detector mais sensível, que modificações poderia esperar?

9- A partir dos resultados de suas observações, caracterize as diferentes fontes em termos da largura de banda e comprimento de coerência (Apêndice 2).

APÊNDICE 2

A partir dos resultados de suas observações e ajudado pela consulta bibliográfica, o aluno poderá realizar um quadro como o seguinte:

| | luz solar | lâmpadas de descarga em gases comuns | fonte laser |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| tempo de coerência (s) | 10^{-15} | 10^{-11} | 10^{-8} até 10^{-1} |
| largura de banda (c s) | 3×10^{14} | 5×10^{10} | 5×10^8 até 5 |
| comprimento de coerência | vários comprimentos de onda | vários mm | 0,5 m até 10^7 m |

APÊNDICE 3

FEIXES COERENTES POR DIVISÃO DE FRENTES DE ONDAS

Diferenciando padrões de interferência e difração

Experiências

3.1- Fazer em uma cartolina acetinada (pode servir um cartão de apresentação), com a ajuda de uma agulha, orifícios de tamanhos diferentes da ordem ou menores do que 0,5 mm (atenção! trate de fazê-los o menor possível, porém assegure-se de que passe luz).

Cobrir a superfície de uma lâmina de microscópio com um pedaço de papel metalizado (papel de alumínio) e fixá-lo com fita durex. Realizar ranhuras de diferentes espessuras (da ordem de 0,1 mm) utilizando uma lâmina de barbear.

Observar as diferentes fontes de luz através de cada um dos orifícios e das fendas construídas.

Modificar as distâncias relativas entre o olho (detector), a fenda (ou orifício) e a fonte de luz. Modificar a orientação relativa da fenda e da fonte extensa de luz.

3.2- De forma similar à indicada na experiência 1, construir pares de orifícios e pares de ranhuras de diferentes dimensões e diferente separação (da ordem ou menores do que o milímetro).

Repetir com eles as observações descritas na experiência 1. Utilizar também como fontes os pontos brilhantes de um pedaço de vidro martelado iluminado ou os reflexos especulares em bordas de superfícies cromadas.

3.3- Construir agora duas fendas paralelas de igual espessura, porém de diferentes comprimentos. Realizar com elas observações similares às anteriores, de maneira a diferenciar claramente os dois fenômenos presentes, passando da situação que se observa com uma fenda única à que se observa através de duas (Fig.1).

Questões a discutir com os estudantes

1- A imagem obtida é modificada quando as distâncias relativas fonte-fenda-olho variam, usando a mesma abertura?

2- O padrão observado com um orifício (ou com uma ranhura) ou com dois orifícios (ou com duas ranhuras) depende da forma da abertura?

3- Compare os padrões que se obtém com uma e duas fendas.

4- Explícite a forma na qual conseguiu as condições de coerência necessárias nas experiências realizadas^(2,6).

5- De que grandezas físicas depende a observação de um padrão estável de intensidade não uniforme?

6- Realize uma análise sistemática de como influi em cada caso:

i) a monocromaticidade da fonte;

ii) o tamanho da fonte;

iii) a geometria do sistema experimental;

iv) as dimensões do sistema experimental.

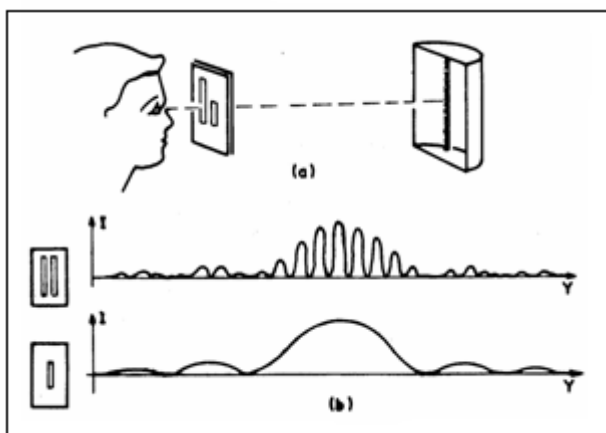


Fig.1- (a) Dispositivo simples que permite comparar os padrões de interferência com uma e duas fendas. (b) Distribuição de intensidades obtidas com duas e uma fenda.

7- Como se relacionam os parâmetros macroscópicos com o comprimento do trem de ondas ou “comprimento de coerência”^{(3, 6, Apêndices 4 e 5)?}

APÊNDICE 4

O aluno pode revisar as condições em que a fonte deve satisfazer para ser considerada “puntual”:

Partindo da condição de que a diferença de caminhos óticos entre os feixes que interferem seja menor do que o comprimento de coerência da radiação, obtém-se a relação (4.1), a qual define as dimensões que podem ser toleradas em uma fonte real sem perda apreciável (menor que 10%) da visibilidade do padrão de franjas^(5,9):

$$S < \frac{\lambda}{4} \frac{L}{2d}, \quad (4.1)$$

onde:

S = tamanho da fonte,

λ = comprimento de onda médio da radiação,

2d = distância entre as fendas,

L = distância da fonte à(s) fenda(s).

Esta condição pode ser verificada com as estimativas efetuadas pelos alunos em suas experiências.

APÊNDICE 5

O estudante pode revisar as equações referentes às características do padrão de franjas que obtém em suas experiências com fendas duplas (ou pares de orifícios) (Fig.2).

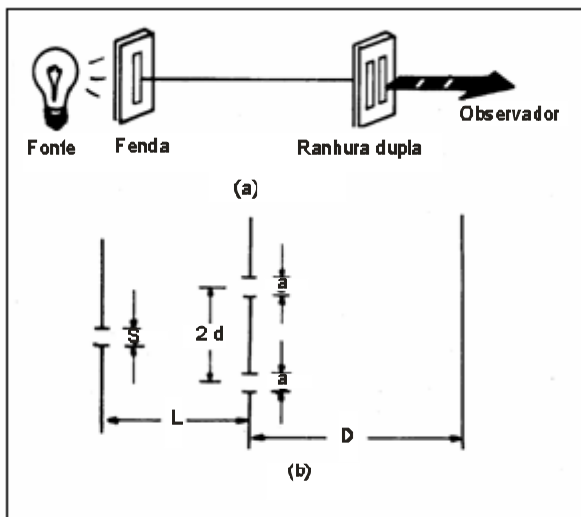


Fig.2- (a) Dispositivo simples que permite realizar a experiência de interferência com ranhura dupla. (b) Esquema do dispositivo mostrado em (a).

A posição dos máximos do “padrão de interferência” é dada pela eq. (5.1):

$$y = \frac{k D \lambda}{2d}, \quad (5.1)$$

onde:

y = distância do eixo óptico até a posição de máximo em uma tela;

k = número de ordem,

D = distância da fenda dupla à tela,

2d = distância entre fendas,

λ = comprimento de onda da radiação,

e a largura das franjas deste padrão pela eq. (5.2):

$$\beta = \frac{D \lambda}{2d}. \quad (5.2)$$

Quais são as limitações para a observação deste padrão? Além da consideração sobre o tamanho da fonte feita no Apêndice 4, deve-se considerar a largura de banda da radiação incidente (que é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação quando se utiliza luz branca), a distância entre as fendas e a tela de observação e a separação entre ranhuras.

Para observar um padrão nítido, sem perda considerável de contraste entre franjas, deverá ser satisfeita a condição dada pela eq. (5.3):

$$y = \left(\frac{\lambda^2}{4} \Delta\lambda \right) \frac{D}{2d}. \quad (5.3)$$

Esta relação estabelece uma condição quantitativa entre:

- As características de monocromaticidade da fonte $(\lambda, \Delta\lambda)$;
- As dimensões do sistema experimental $(D, 2d)$;
- A extensão máxima do padrão observável que assegura as condições de coerência no sistema experimental $(y)^{(5,6,9)}$.

APÊNDICE 6

FEIXES COERENTES POR DIVISÃO DE INTENSIDADE

Interferência em lâminas delgadas

Experiências

6.1- Pressionar uma lâmina de microscópio nas extremidades sobre sua mesa de trabalho e iluminar com diferentes fontes de luz (utilizar uma fonte extensa e uma fonte puntual). Modificar o ângulo de incidência da radiação. Observar o mesmo fenômeno colocando uma cobertura sobre uma lâmina de microscópio.

6.2- Construir uma pequena cunha introduzindo um pequeno pedaço de papel em um extremo das lâminas de microscópio, diminuindo sua espessura até ver um padrão de franjas.

6.3- Colocar uma gota de azeite (de baixa tensão superficial) em um recipiente com água quente. Observar a luz refletida de uma fonte extensa à medida que a gota

de azeite se espalha. Para evitar reflexos que mascarem o efeito, convém colocar uma cartolina preta no fundo.

6.4- Utilizando uma placa de mica (das que são utilizadas como suporte da resistência em ferros elétricos) iluminada com diferentes fontes de luz, projete sobre uma tela o padrão de franjas “de interferência”. Encontre a espessura máxima para a qual o padrão é visível.

6.5- Utilizando uma solução de detergente em água, forme películas delgadas de espessura variável. Analise os limites do padrão obtido.

Questões a discutir com os estudantes

1- Caso se aumente em demasia ou se diminua muito a pressão sobre as lâminas de microscópio, as franjas desaparecem. Explique porquê.

2- Estime a espessura máxima (ordem de grandeza) da camada de azeite (ou de ar) que permite observar padrões estáveis de interferência.

3- Quando a película é suficientemente delgada (menor do que $\lambda / 4$), desaparece o padrão. Explique^(2,4).

4- Como são obtidos nestas experiências os feixes coerentes que interferem, dando padrões estáveis^(5,6)?

5- A que se deve o aparecimento de cor no padrão de interferência? Observou o mesmo efeito nas experiências com fenda dupla? Compare as ordens de grandeza em jogo.

6- Como influem nestes casos as características da fonte de luz? E a geometria do dispositivo experimental⁽⁶⁾?

7- Como se relacionam os parâmetros geométricos com o “comprimento de coerência” da radiação que emite a fonte em cada caso^(2,5)?

APÊNDICE 7

FEIXES COERENTES POR DIVISÃO DE COMPONENTES ORTOGONAIS

Fenômenos com luz polarizada

Experiências

7.1- Observar um pedaço de fita durex, presa sobre uma lâmina de microscópio, entre dois polarizadores cruzados iluminada com luz aproximadamente monocromática (pode ser usada uma fonte de luz branca com filtro de cor) (Fig.3).

Girar o analisador para observar as mudanças de intensidade do padrão resultante identificando as direções correspondentes aos valores máximo e mínimo da luz elíptica obtida.

Modificando a direção da fita durex – lâmina retardadora – analisar a influência da direção do eixo ótico. Mudar agora o plano de polarização da luz incidente. Você comprovará que em ambos os casos o resultado é similar.

Repetir estas observações com papel celofane, polietileno esticado e mica para comprovar que atuam também como lâminas birrefringentes retardadoras^(2,3).

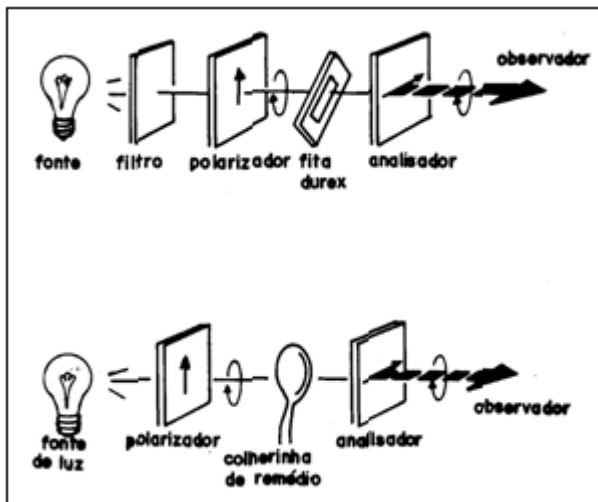


Fig.3- Esquemas de dispositivos experimentais que permitem visualizar a interferência por divisão de componentes ortogonais.

7.2- Repetir a experiência 7.1 mas com luz branca (retire o filtro). Agora, ao girar o analisador você poderá observar mudanças de cor na fita durex. Girar a fita durex e o polarizador de entrada.

Modificar, agora, a espessura da lâmina (fita durex) para observar a influência do caminho ótico percorrido. Para isto, você deve primeiro inclinar a lâmina de microscópio e após, superpor camadas de fita. Fazer o mesmo com papel celofane.

Determinar em cada caso para quantas lâminas superpostas desaparece a cor por interferência devido a que a defasagem entre componentes supera o comprimento de coerência da luz incidente⁽⁹⁾.

7.3- Observar entre dois polarizadores cruzados qualquer elemento de plástico transparente ao seu alcance (Fig.3). Em geral encontra-se que a luz reaparece ao atravessar o plástico (se o material é birrefringente) e se observam zonas igualmente coloridas – isóchromas – e linhas escuras – isóclinas⁽²⁾.

7.4- Observar grãos de açúcar “aprisionados” por duas lâminas de microscópio entre dois polarizadores cruzados com luz aproximadamente monocromática. A luz reaparece ao atravessar os grãos porque tem a propriedade de modificar a direção de polarização do feixe incidente^(2,13).

Questões para discutir com os estudantes

1- Como se consegue a coerência dos feixes que interferem em todas as experiências analisadas?

2- Qual o papel do analisador no dispositivo experimental: detectar a luz polarizada ou sintonizar um canal de interferência?

3- O que você esperaria que ocorresse se, ao invés de luz linearmente polarizada, incidisse luz elipticamente polarizada? Com os mesmos elementos que você tem, esboce uma experiência para discutir melhor esta questão.

4- Quando se trabalha com luz branca e lâminas retardadoras, que condição deve ser obedecida para se ver uma determinada cor? Em que casos se obtém cores complementares? Analise a conveniência de trabalhar com luz monocromática⁽²⁾.

5- Como influi em suas experiências o comprimento de coerência do feixe de luz incidente?

5.a- Compare a intensidade das cores obtidas quando se intercalam poucas ou muitas camadas de fita durex entre polarizadores cruzados^(6,13).

5.b- Qual é a espessura máxima que a lâmina retardadora pode ter para que seu efeito seja apreciável? Explique porque se perde o padrão estável de interferência⁽⁹⁾.

5.c- Sua resposta é modificada caso as camadas de fita durex superpostas tenham orientações distintas?

5.d- Há um limite na espessura do plástico para o qual você deixará de ver as zonas coloridas?

6- Como suas respostas se modificariam com outras fontes luminosas?

7- Caso você trabalhasse com uma fonte laser, seria necessário polarizar a luz incidente?

8- Caso você dispusesse de uma cunha de material birrefringente, o que você esperaria ver?

9- Analise comparativamente os fenômenos de interferência em cunhas delgadas de ar e cunhas de material birrefringente.

Referências Bibliográficas

- 1- RESNICK, R.; HALLIDAY, R. C. **Física**. Continental, 1977. t. 2.
- 2- HECHT, E.; ZAJAC, A. **Óptica**. Fondo Educativo Interamericano, 1974.
- 3- CRAWFORD, F. S. **Berkeley physics course**. Reverté, 1971. v. 3
- 4- SEARS, F. W. **Óptica**. Aguilar, 1970.
- 5- LANDSBERG, G. S. **Óptica**. Mir, 1984. t. 1, 2.
- 6- CUDMANI, L. C. et al. **Óptica física básica** – estruturada alrededor del concepto de coherencia luminosa. Imprenta U.N.T. Argentina, 1990. (Publicación 1441).
- 7- CUDMANI, L. C.; FONTDEVILA, P.; COLOMBO, E. Óptica de Fourier y filtrado espacial. **Rev. Española de Física**, v. 2, n. 3, 1988.
- 8- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Física: mecánica, radiación y calor**. Fondo Educativo Interamericano, 1971. v. 1.
- 9- BORN, M.; WOLF, F. **Principles of optics**. Great Britain: Pergamon, 1964.
- 10- COLOMBO, E.; JAÉN, M. Fenómenos con luz polarizada: una propuesta de experiencias sencillas para grupos pequeños de estudiantes. In: REUNIÓN NACIONAL DE FÍSICA, 5, 1987, Argentina. Memórias...
- 11- CUDMANI, L. C.; SANDOVAL, S. J.; DANÓN, M. P. Paradigmas en el aprendizaje de la óptica física: resultados de una experiencia piloto. **Revista de Enseñanza de la Física**, 1989.
- 12- FRANKE, H. et al. **Diccionario de física**. Buenos Aires: Labor, 1967.
- 13- ROSSI, B. **Fundamentos de óptica**. Reverté, 1966.