
THORLABS

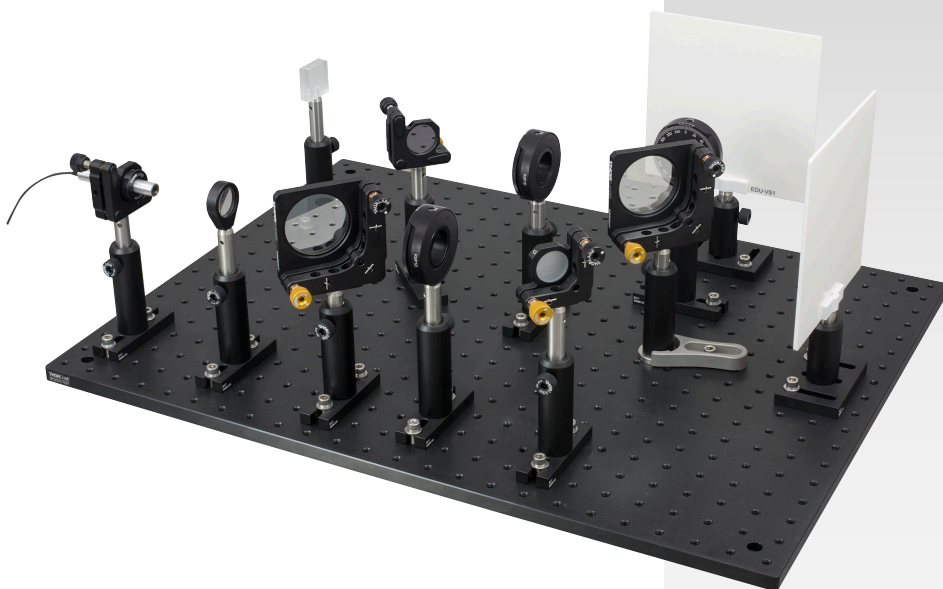
Discovery

EDU-QE1

EDU-QE1/M

Kit de Demonstração Borracha Quântica

Guia do Usuário

















Índice

Capítulo 1	Definições para os Símbolos de Aviso	1
Capítulo 2	Segurança.....	2
Capítulo 3	Descrição do Produto	3
Capítulo 4	Configuração.....	5
4.1.	<i>Lista de Componentes e Peças.....</i>	<i>5</i>
4.2.	<i>Montagem dos Componentes</i>	<i>8</i>
4.3.	<i>Instalação e Ajuste.....</i>	<i>15</i>
4.3.1.	Instalação do Laser	15
4.3.2.	Espelhos e Divisores de Feixe.....	15
4.3.3.	Telas e Alinhamento	17
4.4.	<i>Observações Adicionais:.....</i>	<i>20</i>
4.4.1.	Complementaridade de Padrões e Deslocamentos de Fase....	20
4.4.2.	Padrão em Forma de Anéis	21
Capítulo 5	Experimento	23
5.1.	<i>Experimento 1: Informações sobre o Percurso em Física Quântica.....</i>	<i>23</i>
5.2.	<i>Experimento 2: Borracha Quântica</i>	<i>25</i>
5.3.	<i>Experimento 3: Experimento Intelectual.....</i>	<i>26</i>
Capítulo 6	Dicas de Ensino	28
Capítulo 7	Resolução de Problemas	30
Capítulo 8	Outras Ideias	31
Capítulo 9	Regulamentação	32
Capítulo 10	Contatos Mundiais da Thorlabs	33

Capítulo 1 Definições para os Símbolos de Aviso

Uma lista dos símbolos de aviso que você poderá encontrar neste manual ou em seu dispositivo é fornecida abaixo.

Símbolo	Descrição
	Corrente Contínua
	Corrente Alternada
	Corrente Contínua e Alternada
	Aterramento
	Terminal Condutor de Proteção
	Terminal Chassi ou Quadro
	Equipotencialidade
	Ligado (Alimentação)
	Desligado (Alimentação)
	Ligado na posição de Controle Biestável
	Desligado da Posição de Controle Biestável
	Atenção: Risco de Choque Elétrico
	Atenção: Superfície quente
	Atenção: Risco de Perigo
	Aviso: Radiação laser

Capítulo 2 Segurança



ATENÇÃO



IMPORTANTE: Os filtros polarizadores são cobertos em cada lado por uma película protetora transparente. Recomendamos a utilização de luvas durante a montagem dos polarizadores para que a película não entre em contato direto com os dedos. Evitar a exposição dos polarizadores à luz UV, temperaturas altas, e químicos tais como acetona.



AVISO



O modulo laser é um laser classe 2, portanto não requer a utilização de óculos de proteção. No entanto, para evitar lesões, não olhe diretamente para o feixe de laser.

Capítulo 3 Descrição do Produto

Em um interferômetro de Mach-Zehnder, um feixe de luz é dividido em um dos dois caminhos ópticos por um divisor de feixe. Devido a uma diferença de percurso óptico entre os dois percursos, os padrões de interferência complementares podem ser observados quando a luz é recombinada por um segundo divisor de feixe. Esses padrões de interferência são observados em duas telas de observação, uma vez que o segundo divisor de feixe produz dois feixes combinados.

Um interferômetro Mach-Zehnder é muito útil para demonstrar as propriedades de mecânica quântica complementar e do apagamento das informações do percurso. Caso um polarizador seja colocado em cada braço do interferômetro e seus planos de polarização sejam girados 90° de frente um ao outro, o padrão de interferência desaparece. Isto pode ser explicado por meio da eletrodinâmica clássica. No entanto, uma descrição da mecânica quântica também pode ser aplicável, caso o feixe de luz do interferômetro seja reduzido a fótons individuais (ou a apenas um fóton individual). Ao introduzir os polarizadores cruzados na instalação, os dois percursos de luz possíveis tornam-se distinguíveis mediante a obtenção das informações sobre o percurso. O padrão de interferência (propriedade da onda) e as informações sobre o percurso (propriedade de partículas) não podem ser medidos simultaneamente, uma vez que a medição das informações sobre o percurso destroem o padrão de interferência.

Caso seja acrescentado um terceiro polarizador entre o segundo divisor de feixe e a tela, com o eixo de polarização a 45° em relação aos outros polarizadores, todos os fótons que atingirem a tela mais uma vez terão a mesma polarização. Este polarizador “apaga” as informações sobre o percurso e um padrão de interferência fica mais uma vez visível na tela.

Ao invés de utilizar fótons individuais, assim como no experimento original com a borracha quântica, este kit utiliza uma fonte laser de luz verde de onda contínua (CW) que produz um feixe visível a olho nu. Embora o resultado do experimento possa ser explicado pela física clássica, a descrição da mecânica quântica oferece uma analogia perfeita ao experimento da borracha quântica com um único fóton.

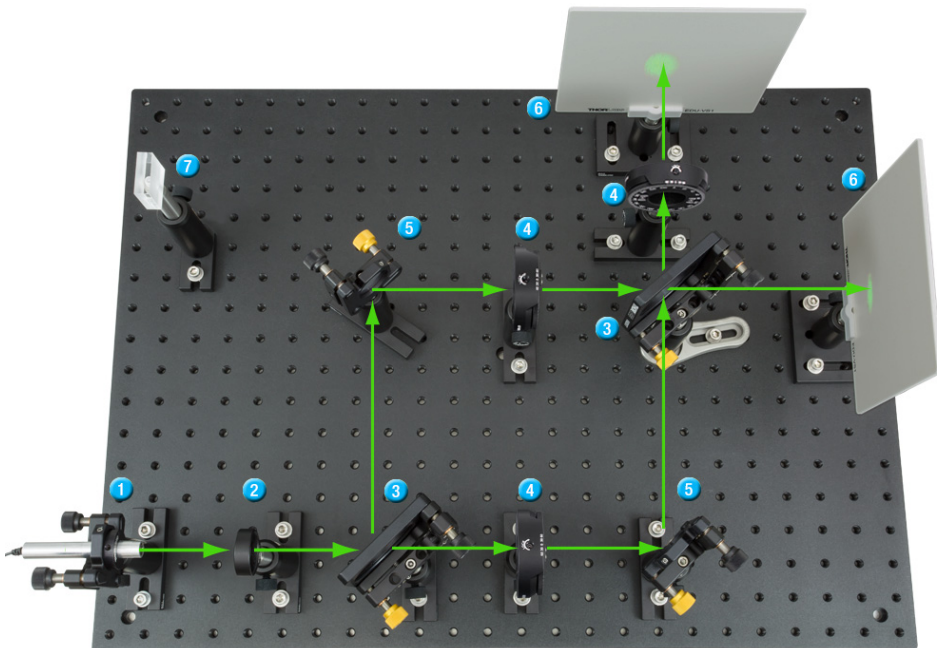


Figura 1 Configuração e Diagrama do Interferômetro de Mach-Zehnder, Incluindo (1) Laser, (2) Lentes, (3) Divisores de Feixe, (4) Polarizadores, (5) Espelhos e (6) Telas de Observação (7) Ferramenta para alinhar

Capítulo 4 Configuração




4.1. Lista de Componentes e Peças

Nos casos em que os kits métricos e imperiais contenham itens com códigos diferentes, os códigos e medidas de denominação métrica são indicados através de parênteses, salvo disposição em contrário.


 <p>1 x CPS532-C2¹ 532 nm Módulo Laser de Diodo</p>	 <p>1 x LDS5(-EC) Fonte de Alimentação para Laser, 5 VDC</p>	 <p>1 x AD11NT Adaptador Ø2" (50.8 mm) sem Rosca para Componentes de Ø11 mm</p>
 <p>1 x LB1901 Lente Ø1", f = 75 mm</p>	 <p>1 x LMR1(M) Suporte para Lente Ø1"</p>	 <p>2 x EBS2 50:50 Divisor de Feixe Ø2"</p>
 <p>2 x KM200T Suporte para Divisor de Feixe Ø2"</p>	 <p>1 x LPVISE2X2 Polarizador Linear (Ø1" em Círculos de 3)</p>	 <p>3 x RSP1D(M) Suporte para Polarizador Rotativo Ø1"</p>

¹ O CPS532-C2 é uma versão classe 2 de baixa potência do nosso módulo laser de diodo CPS532 classe 3.


 <p>2 x ME1-G01 Espelho de Alumínio Ø1"</p>	 <p>3 x KM100 Suporte Cinemático para Espelhos de Ø1"</p>	 <p>2 x EDU-VS1(/M) Tela de Observação</p>
 <p>10 x TR3 (TR75/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Haste de Montagem com 3" (75 mm)</p>	 <p>9 x PH3 (PH75/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Suporte para Haste com 3" (75 mm)</p>	 <p>2 x TR2 (TR50/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Haste de Montagem com 2" (50 mm), para Tela de Observação</p>
 <p>2 x PH2 (PH50/M) Ø1/2" (Ø12.7 mm) Suporte para Haste de 2" (50 mm), para Tela de Observação</p>	 <p>8 x BA1(/M) Base para Suporte, 1" x 3" x 3/8" (25 mm x 58 mm x 10 mm)</p>	 <p>2 x BA2(/M) Base para Suporte, 2" x 3" x 3/8" (50 mm x 75 mm x 10 mm)</p>
 <p>1 x PH3E (PH75E/M) Suporte para Haste com 3.19" (80.9 mm)</p>	 <p>1 x CF125 Garfo de Aperto, Recorte para Parafuso 1.24" (31.5 mm)</p>	 <p>1 x BA1S(/M) Base para Suporte, 1" x 2.3" x 3/8" (25 mm x 58 mm x 10 mm)</p>

 <p>1 x MB1824 (MB4560/M) Placa de Ensaio de Alumínio, 18" x 24" (45 cm x 60 cm)</p>	 <p>1 x RDF1 4 Pés de Borraca para Placa de Ensaio</p>	 <p>1 x SM1RR Anel de fixação rosqueado, SM1</p>
 <p>4 x F25SSK1-GOLD Manípulo Ajustador Dourado</p>	 <p>1 x AT1(/M) Ferramenta para alinhar, 1.18" x 1.18" (30.0 mm x 30.0 mm)</p>	 <p>1 x SPW606 Chave de boca para rosca SM1, 1" (25.4 mm)</p>

Kit Imperial

Tipo	Quantidade	Tipo	Quantidade
Parafuso 1/4"-20 x 1/2"	11	Porca 1/4"	4
Parafuso 1/4"-20 x 5/8"	11	Arroela 1/4"	11
Parafuso 1/4"-20 x 3/4"	4	 <p>1 x BD-3/16L Chave Hexagonal ponta bola para parafusos 1/4"-20</p>	
Parafusos 8-32 incluídos nos suportes			
1 x Chave Sextavada para parafusos 8-32 (9/64") 1x Chave Sextavada para parafusos sem cabeça 8-32 (5/64"), 1x Chave Sextavada para parafusos sem cabeça 6-32 (1/16"),			

Kit Métrico

Tipo	Quantidade	Tipo	Quantidade
Parafuso M6 x 12 mm	11	Porca M6	4
Parafuso M6 x 16 mm	11	Arroela M6	11
Parafuso M6 x 20 mm	4	 <p>1 x BD-5ML Chave Sextavada ponta bola para parafusos M6</p>	
Parafusos M4 incluídos nos suportes			
1 x Chave sextavada para parafusos M4 (3 mm)			
1x Chave Sextavada para parafusos sem cabeça M4 (2 mm), 1x Chave Sextavada para parafusos sem cabeça M3 (1,5 mm),			

4.2. Montagem dos Componentes

1. Primeiramente, monte os componentes ópticos individuais e os suportes. Utilize os parafusos 1/4"-20 (M6) com 1/2" (12 mm) de comprimento para conectar os suportes de haste PH3 (PH75/M) e PH2 (PH50/M) às bases do BA1(/M) e BA2(/M), respectivamente. Durante a montagem, utilize os parafusos 1/4"-20 (M6) com 5/8" (16 mm) de comprimento para fixar os componentes na placa de ensaio.
2. Encaixe os espelhos ME1-G01 nos dois suportes KM100, usando os parafusos do suporte. Prenda os divisores de feixe EBS2 nos suportes KM200T e as lentes LB1901 no suporte LMR1(/M) usando os anéis de fixação rosqueados já incluídos nos suportes. Substitua os manípulos inferiores dos suportes KM100 e KM200T pelos manípulos dourados F25SSK1-GOLD colocando uma chave hexagonal dentro do manípulo e desaparafusando-o. Um vídeo com instruções pode ser encontrado na página web do KM100 em www.thorlabs.com.



Figura 2 Procedimento de Montagem dos Componentes

- Encaixe os suportes KM100, KM200T, LMR1(/M) e RSP1D(/M) às hastes TR3 (TR75/M) utilizando os parafusos de fixação ou parafusos de ajuste 8-32 (M4)



incluídos, e insira-os nos suportes para hastes PH3 (PH75/M). Coloque uma das hastes do KM200T no suporte PH3E (PH75E/M). Conecte as telas de observação às hastes TR2 (TR50/M) utilizando os parafusos de ajuste incluídos e insira-as nos suportes para hastes PH2 (PH50/M).

Figura 3 Procedimento de Montagem do KM100(/M) e KM200T nos postes

- Parafuse a ferramenta de alinhamento AT1(/M) em uma haste TR3 (TR75/M) e coloque-a em um suporte para haste PH3 (PH75/M) com a base BA1S(/M) presa a ele.
- Prenda a tela EDU-VS1(/M) em uma haste TR2 (TR50/M). Use o suporte PH2 (PH50/M) e a base BA2/M para segurar as hastes.



ATENÇÃO



IMPORTANTE: Os filtros polarizadores são cobertos em cada lado por uma película protetora transparente. Recomendamos a utilização de luvas durante a montagem dos polarizadores para que a película não entre em contato direto com os dedos. Evitar a exposição dos polarizadores à luz UV, temperaturas altas, e químicos tais como acetona. Assegure que os três polarizadores sejam montados de modo que fiquem paralelos a 0°.

- Remova as duas películas protetoras no filme polarizador - você deve usar luvas e não tocar no próprio filme polarizador. Neste caso, recomenda-se de colar um pedaço de fita na película protetora, de modo que ele se projeta além da borda. Se você remover a fita, segure a película de proteção juntos. Para afrouxar a película protetora, pode ser necessário cortar a borda achatada com um par de tesouras e remover a película protetora com um par de pinças.
- Depois de remover as películas protetoras, coloque 2 dos 3 filtros polarizadores LPVISE2X2 nos suportes RSP1D(/M) e fixe-os utilizando os anéis de fixação incluídos. A orientação do polarizador é indicada pela forma do mesmo, conforme ilustrado na foto à direita. O corte reto é paralelo a polarização do feixe transmitido. Instruções para assegurar a montagem e alinhamento corretos dos polarizadores podem ser encontradas nos próximos passos.



- Coloque o laser CPS532-C2 sobre no adaptador AD11NT usando o parafuso de fixação na lateral do adaptador. Coloque o adaptador no suporte KM100 restante, conecte o laser à fonte de alimentação LDS5(-EC), verifique no fundo do LDS5(-EC) para garantir que a voltagem correta e usada e ligue-o.

**AVISO**

O modulo laser é um laser classe 2, portanto não requer a utilização de óculos de proteção. No entanto, para evitar lesões, não olhe diretamente para o feixe de laser.

- Coloque os dois polarizadores em frente ao laser e rotacione o último de forma que os dois polarizadores fiquem perpendiculares (quase nenhuma luz deve passar). A orientação da escala angular não importa neste ponto. Por exemplo, os ângulos na imagem a direita estão em “277°” e “34°”, mas os polarizadores estão perpendiculares.



10. Gire o suporte do primeiro polarizador em 180° com relação ao eixo do poste de forma que as indicações apontem uma para a outra, veja a imagem abaixo:



11. Gire o segundo polarizador no sentido do relógio até que esteja perpendicular ao primeiro. Anote por quantos graus você virou o segundo polarizador (vamos chama-lo de φ). Certifique que a transmissão está próxima de zero (às vezes, o eixo de polarização do laser causa uma queda de intensidade. Entretanto, a transmissão só cairá a zero para polarizadores perpendiculares). No nosso exemplo, o segundo polarizador foi posicionado em “143°” (nota: esta ainda é uma indicação aleatória e não tem informação sobre a posição absoluta do polarizador), veja a imagem abaixo:



Assim, no nosso caso, $\varphi = 277^\circ - 143^\circ = 134^\circ$

12. Agora, gire o suporte do primeiro polarizador de volta para a posição inicial, de forma que as indicações apontem para o laser novamente.



13. Gire o primeiro polarizador no sentido do relógio por $\phi/2$. No nosso caso, a indicação do primeiro polarizador estava em "34°". Então o polarizador deve ser girado de $34^\circ - 134^\circ/2 = 34^\circ - 67^\circ = 327^\circ$, veja a imagem abaixo:



14. Desta forma, encontramos a orientação do primeiro polarizador paralela ou perpendicular a placa de ensaio óptica. Então, em nosso exemplo, a indicação de "327°" deve ser alterada para 90° ou 0°. Utilize o terceiro polarizador para identificar se a orientação encontrada é de 90° ou 0° (novamente, o corte reto é paralelo a polarização do feixe transmitido). Solte os dois parafusos pequenos na frente do suporte rotativo e gire a escala para 0° ou 90°, veja imagem abaixo:



15. Gire o segundo polarizador de forma que fique perpendicular ao primeiro (novamente, a transmissão deve ir a zero). Solte os dois parafusos pequenos na frente do suporte rotativo e gire a escala para 90° ou 0° , veja imagem abaixo:



16. Monte o terceiro polarizador e ajuste a escala corretamente usando os outros dois polarizadores, como nos passos anteriores.

4.3. Instalação e Ajuste

4.3.1. Instalação do Laser

1. Fixe o conjunto do laser à ponta da placa de ensaio óptica.
2. Certifique-se de que o laser seja polarizado a 45° ajustando o polarizador em -45° de frente para o laser e girando o laser no suporte até que obtenha mínima transmissão. Então, retire novamente o polarizador da instalação.

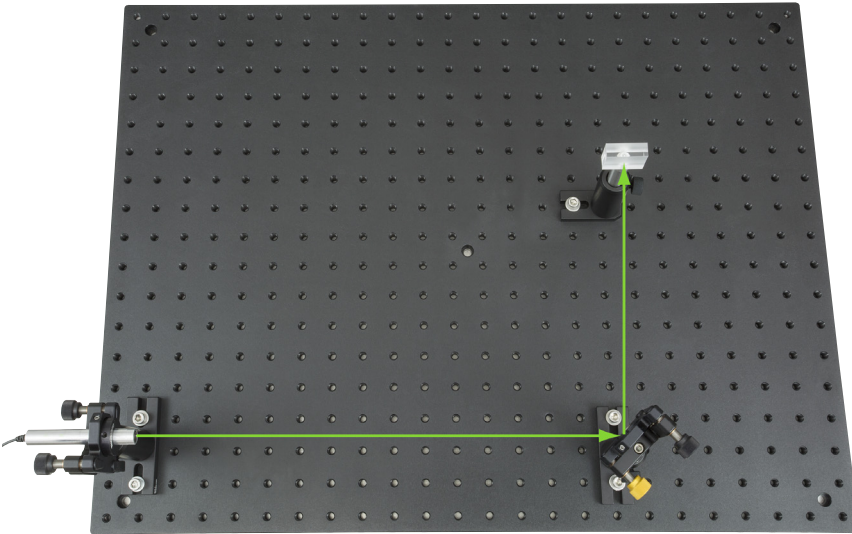


Figura 4 Ajuste do Laser

4.3.2. Espelhos e Divisores de Feixe

1. Ajuste o laser através dos parafusos de ajuste do suporte cinemático para certificar que está o mais horizontal possível. Movimente a ferramenta para alinhar desde o laser até o final da placa de ensaio óptico, observando a posição da marca do laser. Se ainda não tiver feito, ajuste a altura do alvo (cruz) para o centro do laser. Esta será a referência de altura para os demais componentes ópticos.
2. Parafuse um espelho na ponta da placa de ensaio óptico para que o laser possa ser refletido pelo mesmo em um ângulo de 90° . É ideal alinhar o feixe do laser às fileiras de orifícios da placa de ensaio, conforme demonstrado na Figura 4. Mover uma tela ao longo do percurso do feixe ajuda a atingir o ângulo de reflexão de 90° . Ajuste a altura dos suportes para que o feixe atinja o centro do espelho e corra paralelamente o mais próximo possível da superfície da placa de ensaio óptico (novamente, utilize a ferramenta para alinhar).

3. Coloque um dos divisores de feixe entre o laser e o primeiro espelho (caminho 1, conforme Figura 5 abaixo), para que o feixe seja dividido em dois feixes parciais perpendiculares.
4. O feixe que forma o caminho 2 deve ser refletido pelo segundo espelho, para que o feixe refletido corra paralelamente ao feixe do caminho 1, conforme a Figura 5 abaixo. Certifique-se de que as distâncias sejam quase a mesma em ambos os braços.

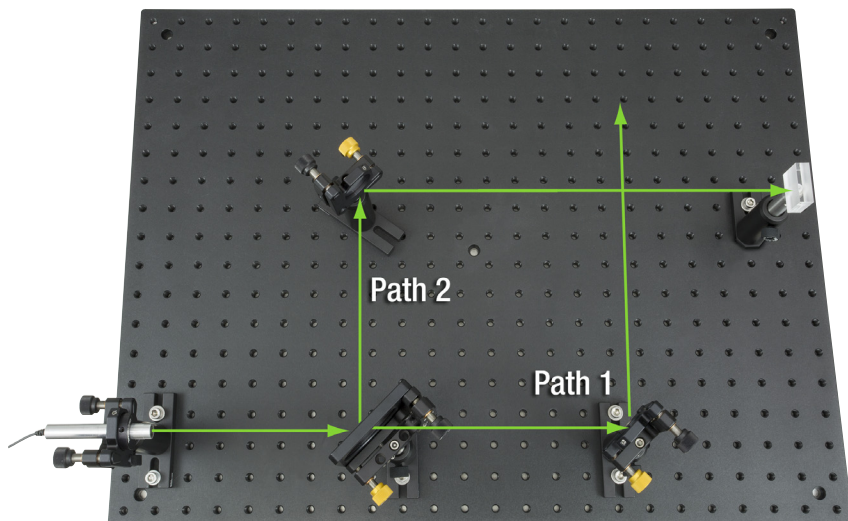


Figura 5 Ajuste do Espelho e Divisor de Feixe

5. Novamente certifique-se de que o feixe corre paralelo à fileira de orifícios e ajuste a altura dos componentes.
6. Insira o segundo divisor de feixe na interseção dos dois feixes parciais conforme ilustrado na Figura 6 abaixo. Fixe-o na placa de ensaio óptica com o garfo de aperto CF125. Certifique-se de que o feixe refletido também esteja na altura correta.

4.3.3. Telas e Alinhamento

7. Instale uma das telas de observação EDU-VS1(/M) relativamente próxima à parte de trás do divisor de feixe (tela 1, Figura 6 abaixo) e a outra a uma distância de cerca de 2 – 3 metros (ou uma distância maior, se for possível). O objetivo é sobrepor os dois feixes parciais para que possam interferir um ao outro.

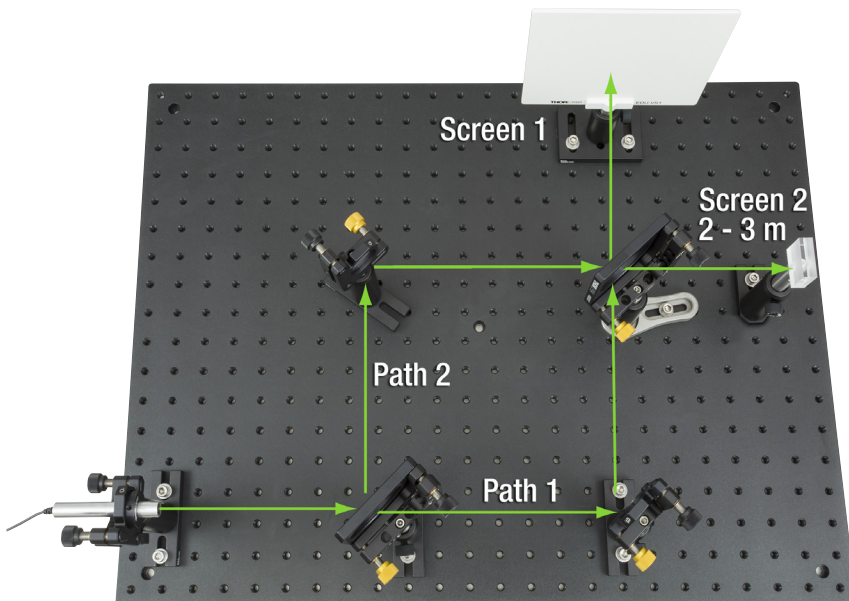


Figura 6 Telas e Alinhamento

8. Inicialmente, é provável que você veja dois pontos de laser nas telas. Posicione os pontos um acima do outro com a ajuda dos parafusos de ajuste finos nos suportes do espelho e do divisor de feixe.
Observação: Quando você ajustar os parafusos nos espelhos, o ponto de laser irá se movimentar em ambas as telas em direções opostas (ou seja, um ponto irá se movimentar para a direita e o outro para a esquerda). Ajustar os parafusos do segundo divisor de feixes resultará em movimento na mesma direção em ambas as telas.
9. Certifique-se de que os dois feixes estejam sobrepostos ao passar pelo divisor de feixe. Não é suficiente sobrepor os pontos só nas telas! Caso os feixes não fiquem sobrepostos suficientemente no divisor, mude a posição do espelho conforme seja necessário. Um padrão de interferência aparecerá unicamente quando os feixes ficarem bem sobrepostos no divisor e nas telas.

10. Há três formas possíveis para ajustar o interferômetro. Não há maneira ideal para proceder – escolha o seu método preferido.
 - a. Posicione os pontos de acordo com a etapa 8 até ficarem sobrepostos. Em seguida, expanda o feixe para obter o padrão em anel de interferência através do posicionamento da lente divergente LB1901 entre o laser e o primeiro divisor de feixe. Caso o padrão não apareça, incline e gire lentamente um dos espelhos. Se o padrão ainda não aparecer, as etapas de ajuste prévias devem ser repetidas.
 - b. Posicione os pontos conforme a etapa 8 até observar oscilação na intensidade dos pontos. Em seguida, expanda o feixe para obter o padrão em anel de interferência através do posicionamento da lente entre o laser e o primeiro divisor de feixe. Caso o padrão não apareça, incline e gire lentamente um dos espelhos. Se o padrão ainda não aparecer, as etapas de ajuste prévias devem ser repetidas.
 - c. Aplique a chamada “travessia por passarela”. Este método iterativo é um procedimento geral aplicado para alinhar feixe ópticos no qual dois suportes cinemáticos são usados para alinhar o laser em dois alvos. Os dois elementos cinemáticos são o primeiro divisor de feixes e um espelho de sua escolha. Os dois alvos são os pontos do laser no segundo divisor de feixes e em uma das telas. Aplique os seguintes passos:
 - i. Ajuste o primeiro divisor de feixes até que os dois pontos no segundo divisor de feixe se sobreponham tão bem quanto possível.
 - ii. Ajuste o espelho até que os pontos em uma das telas se sobreponham tão bem quanto possível.Estes dois passos devem ser repetidos até que os dois pontos dos feixes se sobreponham, tanto no divisor de feixes quanto na tela. Então, instale a lente entre o laser e o primeiro divisor de feixes.
11. Uma vez obtido um padrão de interferência (veja Figura 12 abaixo), coloque um polarizador em cada percurso. Com os planos de polarização paralelos, o padrão de interferência é observado, porém com planos perpendiculares, eles desaparecem (vide Capítulo 5). O terceiro polarizador (“borracha” com orientação de 45°) pode ser colocado diretamente em frente a uma das telas.

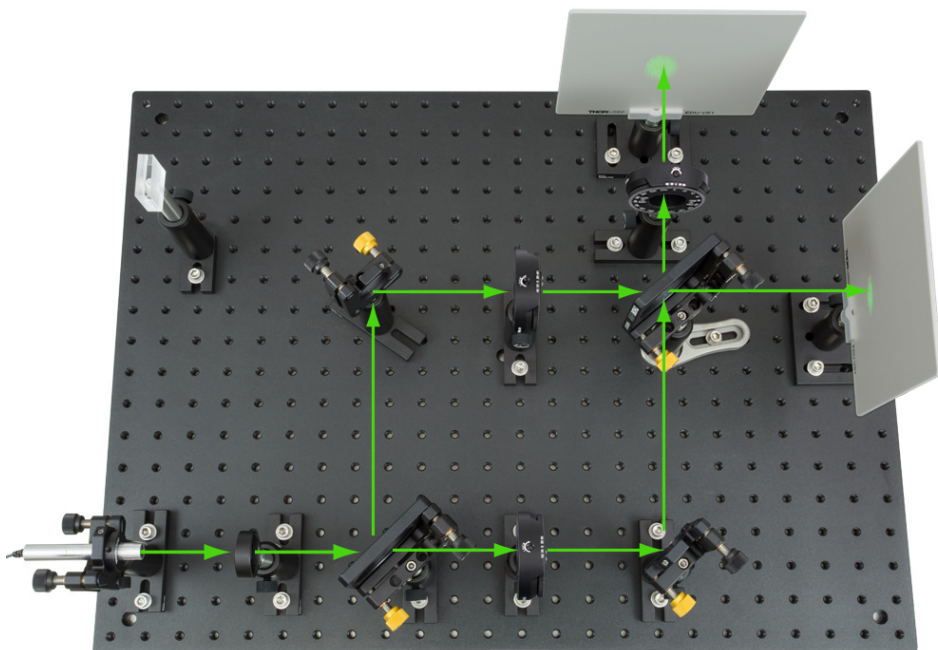


Figura 7 Instalação Final do Interferômetro

4.4. Observações Adicionais:

4.4.1. Complementaridade de Padrões e Deslocamentos de Fase

Os dois braços do interferômetro de Mach-Zehnder apresentam padrões de interferência complementares. Isto significa que se o padrão em uma das telas apresenta um ponto escuro, então na outra tela haverá um ponto claro no mesmo local (e vice-versa). A razão está no deslocamento de fase que ocorre no divisor de feixes, que iremos discutir na próxima seção.

Primeiro temos que examinar os divisores de feixe por si só: Eles são constituídos de um substrato de vidro e um revestimento reflexivo em um dos lados. Dependendo de qual lado do divisor de feixe o feixe reflete, pode haver um deslocamento de fase de um ângulo φ ou não. Quando a luz é refletida do lado de trás (ou seja, quando entra no vidro primeiro), então não há deslocamento de fase.

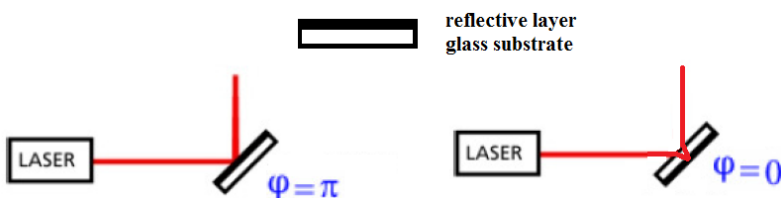


Figura 8 Deslocamento de Fase em um Divisor de Feixe Plano

Agora podemos investigar a diferença de fase na tela entre os dois braços do interferômetro:

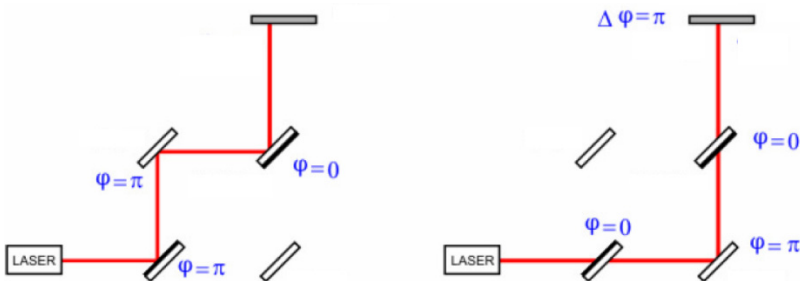


Figura 9 Diferença de Fase em uma Tela

Da mesma forma podemos obter a diferença de fase na outra tela:

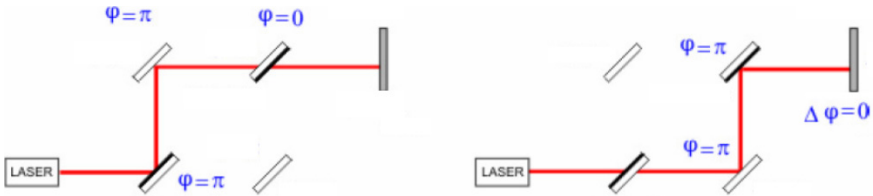


Figura 10 Diferença de Fase na Outra Tela

Assim, a diferença de fase entre as duas telas será sempre π (180°).

Nota: Nesta discussão, nós desprezamos a diferença de fase causada pelo próprio vidro (devido à velocidade da luz no meio). Aqui, nós apenas discutimos os deslocamentos de fase devido às reflexões. O deslocamento de fase devido ao meio introduz outro deslocamento na fase total, mas não muda o fato de os padrões nas telas serem complementares.

Nota: Você não deve se preocupar com a orientação do divisor de feixe quando está montando o experimento. Não importa em qual orientação eles estarão montados nos suportes (a diferença de fase relativa ainda será a mesma).

4.4.2. Padrão em Forma de Anéis

Conforme indicado acima, o padrão mais definido é obtido quando as distâncias dos dois braços do interferômetro são iguais. No caso em que um braço for bem maior do que o outro, um padrão de interferência ainda pode ser observado, mas o tamanho do mesmo é consideravelmente menor em comparação ao padrão com os braços ajustados otimamente. Nesta seção falamos brevemente da razão para esta observação e da razão pela qual vemos um padrão circular.

Quando os braços do interferômetro não são equidistantes (o que é sempre o caso já que é praticamente impossível alinhar o interferômetro com precisão nanométrica), há duas fontes de luz virtuais incidentes sobre a tela que correspondem aos diferentes caminhos da luz através do interferômetro. Se o caminho fosse estendido em uma dimensão, uma fonte de luz ficaria atrás da outra devido à diferença do comprimento dos braços do interferômetro.

Tal como acontece com todos os padrões de interferência (como no experimento de dupla fenda, por exemplo) pode-se determinar a diferença entre os caminhos desde o ponto A até o ponto X, e desde o ponto B até o ponto X, o que implica interferência construtiva ou destrutiva. Veja a Figura 11.

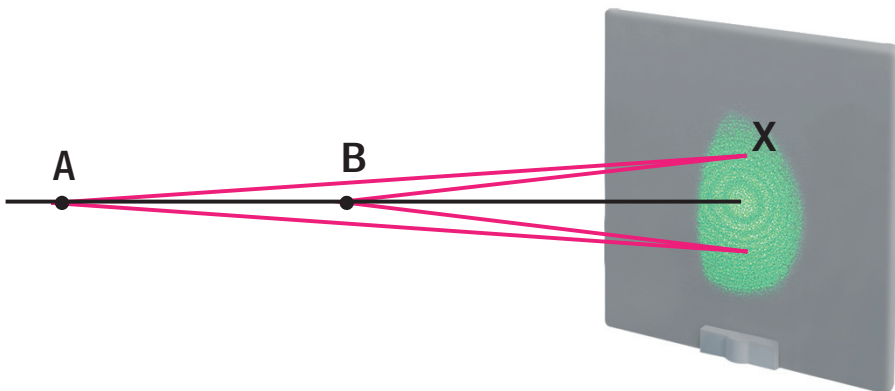


Figura 11 Explicação do padrão de interferência circular

Se os braços do interferômetro tiverem comprimentos bem diferentes, as duas fontes de luz virtuais ficarão igualmente separadas. Neste caso, uma mudança pequena na tela corresponde a uma grande mudança na diferença dos caminhos, o que resulta em um espaço menor entre as franjas de interferência. Isto justifica a diminuição do tamanho do padrão quando os braços têm comprimentos bem diferentes.

Este argumento aplica-se também para todos os pontos na tela. Devido a que a lente diverge o feixe de forma simétrica em torno do eixo óptico, o padrão precisa ser também simétrico, ou seja, concêntrico.

Capítulo 5 Experimento

Primeiro, deve-se enfatizar mais uma vez que este experimento representa uma analogia à verdadeira “borracha quântica” de fóton individual, uma vez que neste caso, também podem ser usados termos puramente clássicos. No experimento original com fóton individual, a física clássica acaba falhando. Apesar disto, o experimento pode ser descrito com os princípios e a terminologia da mecânica quântica.

A borracha quântica serve para ilustrar diversos princípios básicos e “mistérios” da mecânica quântica, tais como a complementaridade do processo de medição da mecânica quântica em conjunto com o fenômeno de interferência.

Os dois percursos possíveis no interferômetro representam duas possibilidades do movimento de um fóton. Os dois polarizadores são utilizados para marcar os percursos, o que os torna distinguíveis.

5.1. Experimento 1: Informações sobre o Percurso em Física Quântica

Coloque um polarizador em cada um dos braços do interferômetro e ajuste a polarização de ambos na mesma direção.

Ainda será possível ver anéis de interferência nas duas telas. Agora imagine que apenas um fóton passa através da instalação de cada vez. A expressão de que o fóton interfere “nele mesmo” é geralmente utilizada. A partir do ponto de vista da mecânica quântica, isto significa que o estado do fóton é uma superposição dos dois estados: “fóton no percurso 1” e “fóton no percurso 2”. A probabilidade dessas duas possibilidades é de 50%. O padrão de intensidade, que pode ser observado na tela após a passagem de muitos fótons através da instalação, ou seja, a probabilidade de distribuição destes fótons, emerge como um padrão de interferência (veja Figura 12). Não sabemos qual percurso o fóton realizou, uma vez que os dois fótons são indistinguíveis.

Então, gire um dos polarizadores a 90° . Os diferentes percursos no interferômetro são agora “marcados” pela polarização e então obtemos a informação sobre o percurso que o fóton realizou. Isto resulta no desaparecimento do padrão de interferência, uma vez que os dois percursos são agora distinguíveis. Uma distribuição suave de intensidade aparece na tela sem um padrão de interferência (veja Figura 13).

Se o padrão de interferência não desaparecer completamente quando os polarizadores estão orientados a 90° um do outro, a causa mais provável é que os mesmos não estão orientados perpendicularmente. Certifique-se de que os polarizadores estão corretamente posicionados em seu respectivo suporte (Capítulo 4.2, Montagem de Componentes).

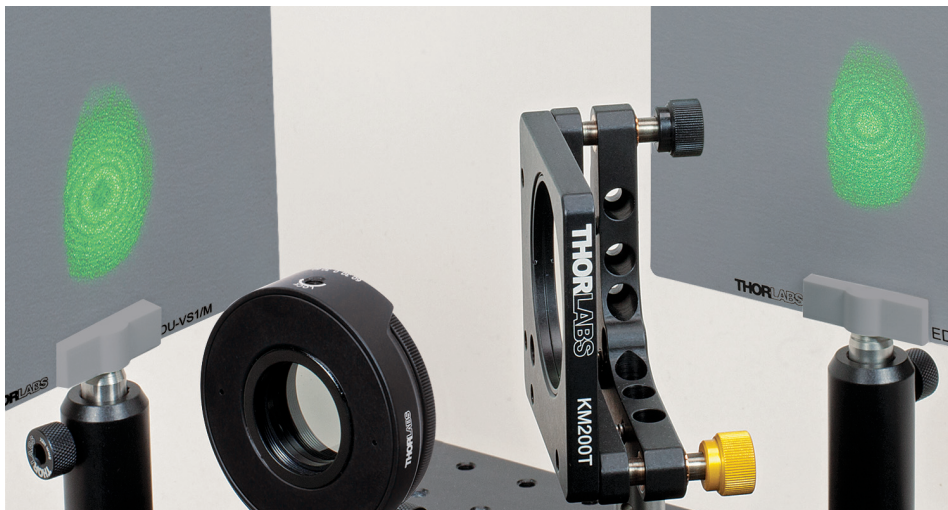


Figura 12 Padrões de Interferência

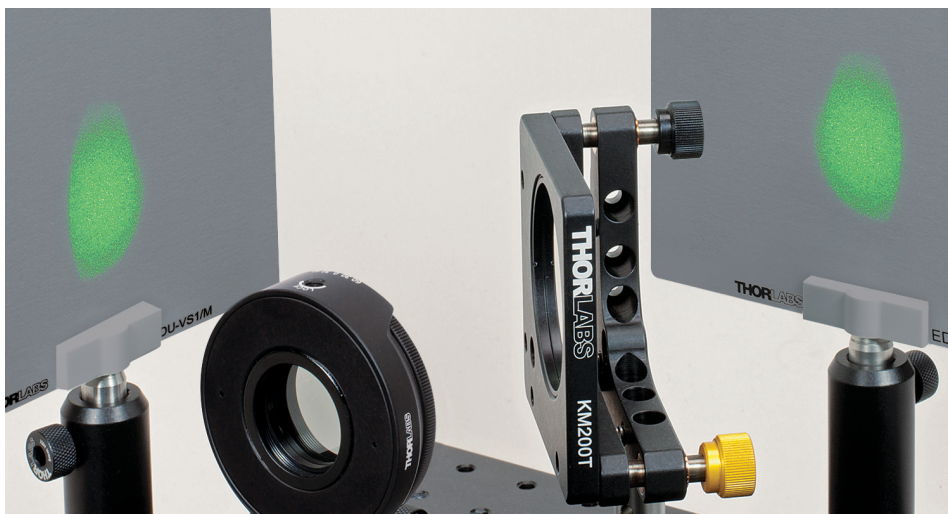


Figura 13 Desaparecimento do Padrão de Interferência

Pergunta:

Temos argumentado acima que a presença de um polarizador orientado em 0° em um braço e outro polarizador em 90° no outro braço resulta em um caminho definido e sem o padrão de interferência. Explicamos também que o fóton tem uma orientação de polarização de 0° ou de 90° ao chegar na tela/no detector, e conseqüentemente é possível determinar o caminho do mesmo. O mesmo acontece ao usar polarizadores em 0° e 80° ?

Resposta:

Pode-se estar inclinado a dizer “sim”, já que podemos assumir erradamente que o fóton com orientação de 80° na tela deve seguir o caminho do polarizador em 80° . Porém, há certa probabilidade de o fóton polarizado em 0° ser absorvido na tela com polarização de 80° , embora a probabilidade seja baixa. Portanto, a informação do caminho é indefinida. Em outras palavras: os dois possíveis caminhos (ou possíveis estados) sobrepõem-se, e encontramos um padrão de interferência de baixo contraste.

5.2. Experimento 2: Borracha Quântica

Neste experimento, os dois polarizadores na instalação devem ser primeiramente girados a 90° um em relação ao outro, conforme descrito acima, para que nenhuma interferência possa ser observada devido às informações do percurso. Então, o terceiro polarizador, a “borracha” é instalado entre o último divisor de feixe e uma tela. A borracha é voltada 45° dos outros dois polarizadores. O que pode ser observado na tela?

Como pode ser observado na Figura 14, um padrão de interferência aparece novamente. A Figura 14 demonstra a tela com a borracha de frente para a mesma do lado esquerdo e a tela sem a borracha do lado direito. Desta forma, um padrão de interferência é observado na tela esquerda, enquanto nenhum padrão é observado na tela direita.

Estas observações podem ser explicadas da seguinte forma: a borracha restaura a interferência novamente, uma vez que as informações sobre o percurso do fóton já não estão mais presentes. Todos os fótons, que atingem a tela, possuem uma polarização de 45° . Os fótons que atingem a outra tela sem a “borracha” ainda carregam esta informação sobre o caminho – pode-se determinar se eles passaram pelo percurso 1 (polarização de 0°) ou pelo percurso 2 (polarização de 90°). Portanto, nenhum padrão de interferência é observado na tela direita.



Figura 14 Tela Direita: Nenhum Padrão de Interferência. Tela Esquerda: Padrão de Interferência atrás da Borracha

5.3. Experimento 3: Experimento Intelectual

O físico John Wheeler criou o seguinte experimento intelectual: Imagine que você insira apenas a “borracha” na instalação com uma situação existente de não-interferência após o fóton (de acordo com o pensamento clássico) já ter “escolhido” um dos dois percursos possíveis no interferômetro. Qual resultado você espera – interferência ou não?

Começamos fazendo um esquema do interferômetro, com e sem o segundo divisor de feixe:

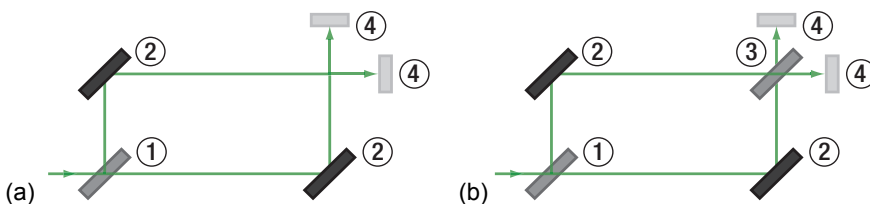


Figura 15 (a) Esquema do sistema sem o segundo divisor de feixe, (b) Sistema com o segundo divisor de feixe, (1) Primeiro divisor de feixe, (2) Espelho, (3) Segundo divisor de feixe, (4) Telas

Quando o fóton viaja através do sistema ilustrado na Figura 15(a), a informação do percurso é definida. Portanto, o padrão de interferência não é visualizado. Conforme explicado previamente, o sistema ilustrado na Figura 15(b) resulta em um padrão de interferência, pois o percurso é desconhecido. John Wheeler faz a seguinte pergunta: o

que acontece se enviarmos o fóton no sistema da Figura 15(a) e inserirmos o segundo divisor de feixe *depois* do fóton passar pelo primeiro divisor de feixe? Vamos observar um padrão de interferência? Temos um percurso definido ou não?

Em primeiro lugar, notamos que “depois do fóton passar pelo primeiro divisor de feixe” é uma formulação que podemos usar só na física clássica! A não ser que meçamos a posição do fóton, não podemos declarar nada sobre isto. Faz mais sentido dizer que “nós esperamos um certo tempo até que o fóton esteja (no sentido clássico) atrás do primeiro divisor de feixe.” Se pensarmos em termos de física clássica, teríamos que assumir que o fóton escolheu um dos percursos no primeiro divisor de feixe. Portanto, a inserção do segundo divisor de feixe não teria nenhum impacto, e não seria possível visualizarmos o padrão de interferência.

Porém, a física quântica nos dá uma surpresa. Ao inserir o segundo divisor de feixe, o padrão de interferência pode ser observado novamente! A conclusão é que um sistema quântico não tem que tomar a decisão entre propriedades de partícula e de onda até que o observador faça uma medição. Isto é válido mesmo se nós decidimos qual propriedade medir depois do experimento ter começado. Por esta razão, experimentos semelhantes ao proposto por Wheeler são denominados “experimentos de escolha atrasada” (ou “delayed-choice experiments”).

Este experimento já foi realizado e esta explicação foi confirmada (vide, por exemplo *Hellmuth, Walther, Zajonc, Schleich, Phys. Rev. A* **35**, 2532(1987)). Ele demonstra a natureza extremamente não-intuitiva da mecânica quântica e o processo de medição da mecânica quântica.

Capítulo 6 Dicas de Ensino

- **Alunos podem Instalar e Ajustar o Interferômetro.**

A borracha quântica, respectivamente o interferômetro de Mach-Zehnder, pode ser instalada e ajustada pelos próprios alunos. Entretanto, dependendo do experimento, o elevado grau de variabilidade é problemático nesta etapa – finalmente, qualquer espelho e qualquer divisor de feixe pode ser girado ou inclinado. A fim de simplificar a instalação e o ajuste, as cabeças dos parafusos dourados são fixadas em diversos manípulos ajustadores. Uma vez que o interferômetro for ajustado com sucesso, pode-se desmontá-lo e entregá-lo aos alunos para instalá-lo novamente com a limitação de que apenas os parafusos dourados devem ser girados. Desta forma, o ajuste é simplificado e o número de variáveis no experimento é minimizado.

- **Interpretação Clássica vs. Quântica**

O mal-entendido central, que ocorre em qualquer experimento com informações de percurso, deve-se à insistência na ideia clássica de que um fóton deve decidir sobre um percurso através do interferômetro. É importante ressaltar que este é o caso apenas se a respectiva medição for realizada – neste contexto, a importância do processo de medição na física quântica se torna clara.

- **Superposição dos Estados Quânticos**

A fim de facilitar a transição para o conceito de estados para os alunos, recomenda-se discutir o conceito de estados com base no Gato de Schrödinger. O sistema consiste em uma caixa, um gato e um veneno, que é liberado após o decaimento de um átomo radioativo (um processo aleatório). O sistema possui dois estados, enquanto a caixa está fechada: o veneno ainda não foi liberado e o gato continua vivo (estado 1) ou o veneno foi liberado e o gato está morto (estado 2). O aspecto central deste experimento intelectual é de que todos os estados do sistema existem simultaneamente e sobrepõem-se um ao outro. Entretanto, assim que a caixa é aberta, o sistema deve realizar a transição para *um* estado.

Portanto, o Gato de Schrödinger representa uma boa introdução ao conceito de estados. Além disso, este experimento intelectual também ajuda a entender a borracha quântica, uma vez que os dois estados existem aqui também, a saber os dois percursos possíveis do fóton através do interferômetro. Caso não seja realizada uma mediação explícita para determinar em qual braço do interferômetro o fóton está localizado (caso a “caixa” não seja aberta), os estados são sobrepostos e criam o padrão de interferência familiar.

- **O fóton interfere nele mesmo?**

Muitas vezes, a frase "o fóton interfere nele mesmo" é utilizada para descrever sucintamente este tipo de experimento. No sentido mais amplo, se alguém a utiliza ou não é uma questão didática de gosto. Entretanto, ao utilizar esta frase, deve-se estar ciente das implicações problemáticas: embora um fóton seja uma excitação elementar do campo eletromagnético, a frase sugere que ele é divisível e pode interferir nele mesmo. Porém, este não é o caso! Na verdade, é possível que os *estados* interfiram uns nos outros, o que pode ser descrito matematicamente e fisicamente por suas funções de onda. Ψ .

- **Densidade de Probabilidade**

Em muitos modelos didáticos, a densidade de probabilidade $|\Psi(x,t)|^2$ é utilizada como uma quantidade, a fim de explicar os processos físicos. Caso o desenvolvimento desta função seja considerado ao longo do tempo, um pacote de onda se propaga inicialmente do laser sobre o primeiro divisor de feixe. Aqui, $|\Psi|^2$ separa-se em duas partes, cada uma delas se propaga em um dos dois braços do interferômetro. Caso uma se aproxime do experimento com a borracha quântica neste método didático, deve-se ter o cuidado de enfatizar a indivisibilidade do fóton.

Caso contrário, há um risco de que os alunos associem a densidade de probabilidade com a posição do fóton – e, portanto, o fóton se torna divisível na mente do aluno.

Tópicos adicionais de física quântica

A discussão da borracha quântica com fótons individuais torna possível discutir muitos outros tópicos da física quântica. Exemplos do conteúdo são principalmente o entrelaçamento de fótons, a troca segura de dados por meio de comunicação quântica e a medição quântica livre de interferências ("testador de bomba").

Capítulo 7 Resolução de Problemas

- **Os pontos de laser se sobrepõem, mas não há interferência.**

Você pode observar oscilações na superposição? Se não, verifique se todos os componentes foram posicionados da forma mais precisa possível, incluindo um ângulo de feixe a 90° depois de todas as reflexões. A altura do feixe por cima da placa nos divisores de feixe, nos espelhos e nas telas é a mesma que está diretamente sobre o laser? Se essas condições existirem, você pode ter que simplesmente experimentar um pouco e mudar um ponto repetidamente sem perder totalmente a superposição.

- **Às vezes a interferência desaparece sem motivo aparente, sem que a instalação seja tocada.**

Mudanças de temperatura do material semiconductor no interior do laser podem conduzir a mudanças nos modos de laser. Coloque uma mão sobre o módulo de laser e aqueça-o um pouco - a interferência deve aparecer novamente.

- **Ao invés do padrão de interferência em forma de anel, observa-se um padrão de interferência em forma hiperbólica (conforme Figura 16 abaixo).**

Estas e outras distorções do padrão de interferência ocorrem principalmente quando a altura dos feixes ao longo dos dois braços do interferômetro não é exatamente a mesma. Certifique-se que a altura do feixe é a mesma em cada elemento óptico. Assegure também que o feixe é refletido em cada elemento em um ângulo de 90° . Infelizmente não há um procedimento operacional conhecido que mude o padrão de interferência da forma hiperbólica para círculos concêntricos.

Aviso importante:

Naturalmente, toda a física por trás do experimento com a borracha quântica, tanto a mecânica quântica como clássica, é válida mesmo se o padrão de interferência não demonstra anéis. Portanto, o experimento com a borracha quântica pode ser demonstrado e discutido com a mesma eficácia que o padrão de interferência apresentado na Figura 16.

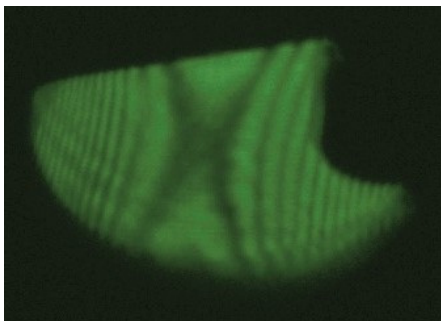


Figura 16 Padrões de Interferência Hiperbólica

Capítulo 8 Outras Ideias

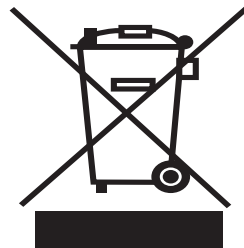
- Os componentes contidos neste kit podem também ser usados para montar um interferômetro de Michelson. Para isto, utilize apenas um divisor de feixes e coloque os dois espelhos de forma que reflitam o laser de volta ao divisor de feixes. Para uma descrição mais detalhada com imagens, consulte o manual do testador de bomba EDU-BT1(M).
- As seguintes ideias foram baseadas nos comentários enviados pelo Dr. Mark Colclough, Diretor do Laboratório de Aprendizagem e Ensino (Laboratory Learning and Teaching), da escola de Física e Astronomia, da Universidade de Birmingham, UK: Para obter medidas quantitativas do padrão de interferência ele usa uma tela de vidro esmerilhado no lugar de uma das telas de plástico fornecidas, e captura a imagem do padrão de interferência por uma webcam adicionada de uma lente de aumento. A Thorlabs oferece difusores de vidro esmerilhado desmontados que podem ser montados usando, por exemplo, um suporte para placas largas FP02. A câmera utilizada pelo Dr. Colclough é uma webcam C270 da Logitech (devido ao controle manual de exposição, lente removível e preço acessível). A análise das imagens, então, torna possível que os estudantes meçam quantitativamente o contraste entre as franjas em função da polarização, e comparem as franjas com a forma teórica.

Uma vez que esta montagem não foi testada por nós, não podemos garantir os resultados.

Capítulo 9 Regulamentação

Conforme exigência da WEEE (Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) da Comunidade Europeia e as correspondentes leis nacionais, a Thorlabs oferece a todos os usuários finais da CE a possibilidade de devolver as unidades no “fim da vida” sem incorrer em taxas de eliminação.

- Esta oferta é válida para equipamentos elétricos e eletrônicos da Thorlabs:
- Vendidos após 13 de agosto de 2005
- Marcados de forma correspondente com o logo do “latão” (vide à direita)
- Vendidos para uma empresa ou instituto dentro da CE
- Atualmente detidos por uma empresa ou instituto dentro da CE
- Ainda inteiros, não desmontados e contaminados



Uma vez que a diretiva WEEE é aplicável a produtos elétricos e eletrônicos operacionais, este serviço de devolução ao final da vida não serve para outros produtos Thorlabs, tais como:

- Produtos OEM puros, que significa montagens a serem construídas em uma unidade pelo usuário (por exemplo, cartões de condutor de laser OEM)
- Componentes
- Mecânica e óptica
- Partes restantes de unidades desmontadas pelo usuário (PCB's, caixas etc.).

Caso deseje devolver uma unidade Thorlabs para recuperação de resíduos, entre em contato com a Thorlabs ou seu revendedor mais próximo para mais informações.

9.1. O Tratamento de Resíduos é Sua Responsabilidade

Caso não devolva uma unidade no “fim da vida” para a Thorlabs, você deve entregá-la a uma empresa especializada em recuperação de resíduos. Não descarte a unidade em um latão de lixo ou em um local público de eliminação de resíduos.

9.2. Histórico Ecológico

Sabe-se que a WEEE polui o meio ambiente liberando produtos tóxicos durante a decomposição. O objectivo da diretiva europeia RoHS é reduzir o teor de substâncias tóxicas em produtos eletrônicos no futuro.

A intenção da diretiva WEEE é reforçar a reciclagem de WEEE. A reciclagem controlada do fim de vida dos produtos irá, assim, evitar impactos negativos sobre o meio ambiente.

Capítulo 10 Contatos Mundiais da Thorlabs



USA, Canada, and South America

Thorlabs, Inc.
sales@thorlabs.com
techsupport@thorlabs.com

UK and Ireland

Thorlabs Ltd.
sales.uk@thorlabs.com
techsupport.uk@thorlabs.com

Europe

Thorlabs GmbH
europe@thorlabs.com

Scandinavia

Thorlabs Sweden AB
scandinavia@thorlabs.com

France

Thorlabs SAS
sales.fr@thorlabs.com

Brazil

Thorlabs Vendas de Fotônicos Ltda.
brasil@thorlabs.com

Japan

Thorlabs Japan, Inc.
sales@thorlabs.jp

China

Thorlabs China
chinasales@thorlabs.com



THORLABS
www.thorlabs.com
