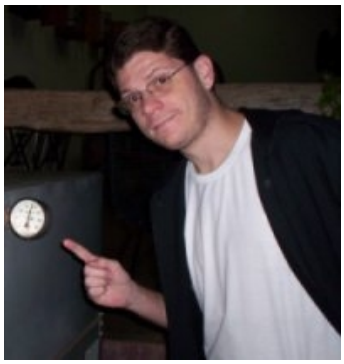
Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física Gleb Wataghin

Construção de uma Borracha Quântica



Aluno: Jorge H. Faccipieri Júnior (jorge.faccipieri@gmail.com) **RA:** 019220
Orientadora: Mônica A. Cotta

Coordenador: Prof. José J. Lunazzi

1. Resumo

O experimento consiste em apresentar certos efeitos quânticos como características de dualidade onda-partícula e de distinguibilidade de caminhos e partículas que não estamos acostumados a visualizar, utilizando-se de um *laser-pointer*, um fio fino e polarizadores. Houve uma grande preocupação em obter uma montagem constituída apenas de componentes de fácil acesso sem que fossem necessários grandes conhecimentos técnicos para sua construção.

2. Introdução

Nesse experimento estaremos tratando de conceitos que não são inteiramente satisfeitos pela Mecânica Clássica. Estaremos entrando nos domínios da Mecânica Quântica, estudando o comportamento de distinguibilidade de caminhos e partículas, que em nosso caso serão fótons.

Esses efeitos quânticos são mais evidentes quando são envolvidos sistemas de pequenas dimensões, como átomos, elétrons e fótons, o que torna um tanto quanto difícil de se visualizar tais fenômenos em nosso cotidiano. Mas o experimento da Borracha Quântica pode fazer isso e permite não só uma visualização, mas uma interação com o fenômeno que pode ser de grande utilidade educacional.

Com uma montagem relativamente simples e de baixo custo, um professor, tanto de nível médio quanto de nível universitário, pode levar esse experimento até seus alunos sem grandes esforços.

A montagem é semelhante ao experimento de duas fendas (ver **Apêndice C**); no nosso caso, porém temos inicialmente um fio fino que irá gerar uma imagem de interferência visível em um anteparo e serão usados filmes polarizadores para distinguir os caminhos pelos quais os fótons seguiram em diferentes configurações e como essa distinguibilidade de caminhos influencia seu comportamento.

Os autores do presente experimento são Rachel Hillmer, estudante, e Paul Kwiat, Professor-titular de Física da Universidade de Illinois, e este foi publicado na revista Scientific American Brasil do mês de junho de 2007.

3. Material Necessário

Os materiais e condições necessárias a realização do experimento são:

3.1 Quarto escuro e Anteparo

Essa condição se faz necessária para a melhor visualização dos padrões de interferência, franjas claras e escuras, gerados pelo fio, uma vez que esses terão sua intensidade reduzida devido à ação dos polarizadores.

O anteparo, posicionado a uns dois ou três metros de distância, será usado para visualizar as franjas do feixe do laser.

3.2 Filmes Polarizadores

Serão necessários para a construção do identificador de caminho e para a Borracha Quântica. Com dois pedaços de aproximadamente 4x1 cm já é possível fazer a montagem.

Detalhes sobre como obter esses filmes polarizadores serão tratados no **Apêndice B.**

3.3 *Laser-pointer*

Nessa montagem será usado um *laser-pointer* comum, 630-680nm, como os usados em apresentações.

Um detalhe importante sobre o laser que deve ser verificado é sobre sua polarização. Com a ajuda de um filme polarizador, verifique se o seu laser emite luz polarizada ou não. Isso pode ser feito colocando o filme no caminho do feixe do laser. Caso seu laser seja polarizado, quando o filme for rotacionado, a intensidade do feixe do laser dimininuirá muito para um determinado ângulo, caso contrário não teremos nenhuma alteração na intensidade. Sendo ele polarizado, este deve ser montado com sua polarização a 45° com relação à vertical (para garantir que teremos componentes verticais e horizontais de seu campo elétrico).

3.4 Fio fino

Quanto mais fino for o fio, melhores serão as franjas formadas. Mas, utilizar fios excessivamente finos pode dificultar muito a montagem do identificador de caminho, tratada mais a frente, pois este deve ser posicionado bem na frente da junção de dois filmes polarizadores.

O fio utilizado nesse experimento é aquele usado para fechar sacos plásticos, geralmente de pão de forma, de diâmetro 0,43mm. Outros tipos de fios foram testados numa faixa de 0,3mm a 0,5mm e todos funcionaram bem. Podem ser usados arames, grampos de papel desentortados e grafites de lapiseiras 0,5mm (este último tem a desvantagem de ser muito quebradiço)

3.5 Suportes

Serão usados para montar o laser, o identificador de caminhos e a borracha quântica em posições fixas. Esses podem ser de madeira, plástico ou até mesmo de um papel mais duro no caso do identificador de caminho e da borracha quântica.

4. Construção

Nessa seção será discutida, detalhadamente, a construção de cada item usado no experimento. Abaixo, temos um esquema simplificado da montagem experimental - figura 1.

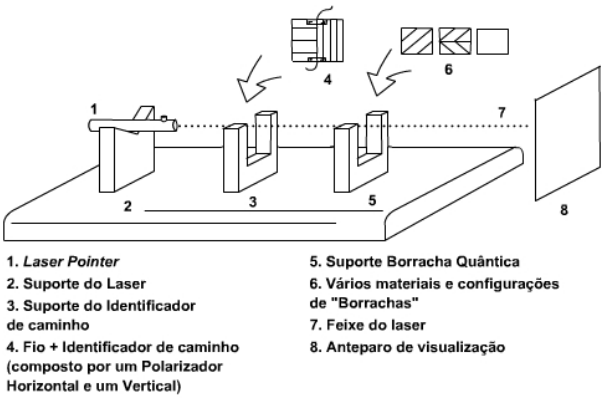


Figura 1 – Esquema simplificado da montagem da Borracha Quântica

4.1 O Laser

O *laser-pointer* utilizado foi modificado para aceitar um interruptor, para facilitar a demonstração do experimento e também para funcionar com três pilhas AA, que são de mais fácil acesso que as pilhas de relógio, mas o experimento funciona perfeitamente sem essas alterações. Para não fazer outro interruptor, você pode deixar o laser ligado com a ajuda de um pregador de roupas.

Para acomodar todo o conjunto de pilhas foi utilizado um berço para quatro pilhas AA que também foi modificado para executar uma ligação em série entre as três pilhas, essa modificação, deixando a

quarta pilha de fora, é necessária pois o diodo foi projetado para funcionar com 4,5 volts e ele é muito sensível a aumentos de voltagem e corrente. Esse conjunto foi montado em uma base fixa e o resultado pode ser visto abaixo – figura 2.

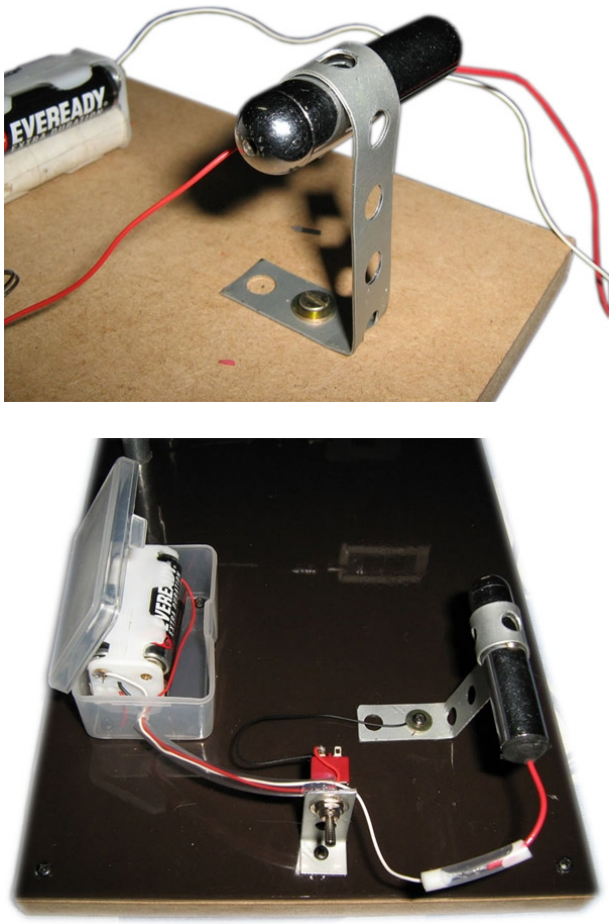


Figura 2 – Vistas do suporte do *Laser-pointer* com o berço de 4 pilhas AA em construção, acima, e em sua fase final com interruptor abaixo.

4.2 O Identificador de caminho

Para construir o identificador de caminho, usaremos os polarizadores citados mais acima e no **Apêndice B**.

Com um estilete, corte um desses polarizadores ao meio, rotacione um dos pedaços em 90° e junte novamente com o outro pedaço, como mostrado abaixo – figura 3.

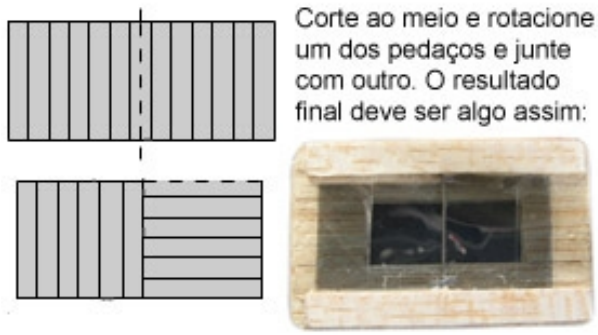


Figura 3 – Esquema de montagem do identificador de caminho e foto do modelo final já com fio.

Para deixá-lo mais firme, cole esse conjunto em uma moldura de madeira ou até mesmo de papelão.

Para finalizar, devemos prender o fio, bem esticado, ou o grafite 0,5mm na frente da junção dos dois filmes. Verifique se está bem na junção olhando o conjunto contra a luz e veja se consegue ver a junção dos filmes, caso apareça, ajuste a posição do fio até que não veja mais essa junção entre os filmes.

Terminado isso, seu identificador de caminho está pronto.

4.3 Borracha Quântica e Seletores de Caminho

Ambos podem utilizar o mesmo polarizador para funcionar. Eles se diferenciam apenas pelo ângulo em que são posicionados com relação à vertical. Portanto seria interessante fazer uma pequena marca no filme, para que se posso identificar facilmente qual seu ângulo de polarização.

Nos seletores de caminho, usamos sua polarização alinhada com a vertical e com a horizontal.

Na Borracha Quântica, usamos com sua polarização alinhada a 45° com a vertical.

Figura 4 – Borracha/Seletor de caminhos montado numa moldura nas fases iniciais do projeto.

4.4 Suportes

Para apresentações mais demoradas é interessante a construção de um suporte para acomodar o sistema todo e assim garantir a estabilidade da montagem durante sua apresentação.

Segue abaixo uma foto dos suportes utilizados, feitos com canos de alumínio e garras para prender os filmes.

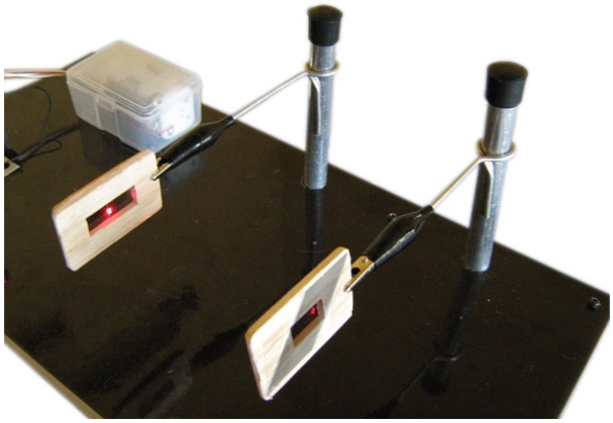


Figura 5 – Hastes que irão segurar as molduras com os filmes polarizadores.

5. Experimento

Depois de construídos os itens descritos anteriormente sua Borracha Quântica está pronta para funcionar. Agora discutiremos como cada um desses itens são utilizados na realização do experimento e como eles funcionam.

5.1 Visualizando a Interferência

Como passo inicial, posicionamos apenas o fio no caminho do feixe do laser para visualizar a aparência do referido padrão de interferência no anteparo, figura 6.

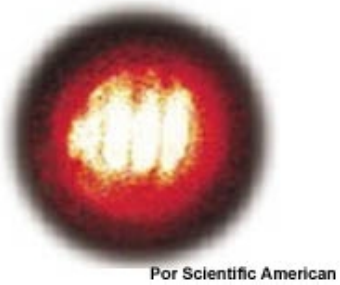


Figura 6 – Franjas de interferência geradas pelo fio no anteparo.

Esse padrão surge porque a luz que passa pelo lado direito do fio interfere com a luz que passa pelo lado esquerdo. Segurando um pedaço de papel logo depois (atrás) do fio, podemos ver duas regiões iluminadas pelo laser separadas pela sombra do fio. Essas duas regiões vão se expandindo e se sobrepondo até atingirem o anteparo. No anteparo, onde ocorre essa superposição dos fótons vindos de cada uma das duas regiões iluminadas é impossível determinar de qual região especificamente esse fóton veio, se foi da direita ou da esquerda, assim podemos considerar os fótons como ondas que interferem consigo mesmas.

Quanticamente temos que cada fóton passou pelos dois lados do fio ao mesmo tempo e a combinação desses dois caminhos formam o padrão de interferência, ou seja, a indistinguibilidade de caminhos é que gera esse efeito. É muito parecido com um experimento de dupla fenda, ver **Apêndice C.**

5.2 Usando o Identificador de Caminho

Agora, utilizamos o identificador de caminhos para destruir o padrão de interferência gerado pelo fio.

Simplesmente posicionando-o na frente do feixe do laser, mantendo o fio no centro do feixe, percebemos que as franjas de interferência que visualizamos anteriormente apenas com o fio são destruídas, dando origem a uma nova imagem, figura 7, sem a presença de qualquer franja.

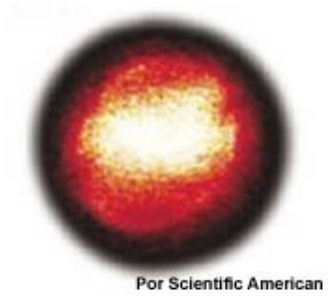


Figura 7 – Imagem sem franjas. Estas foram destruídas pelo identificador de caminho.

Isso acontece porque agora podemos identificar exatamente o lado pelo qual o fóton passou. Podemos fazer isso, pois o fóton que passou pela esquerda teve seu estado alterado, ou seja, ficou polarizado horizontalmente e o que passou pela direita ficou polarizado verticalmente – ver **Apêndice D**.

5.3 Seletores de Caminho

Com a ajuda de outro polarizador, colocado logo após o identificador de caminho, podemos selecionar os fótons de acordo com sua polarização e confirmar que realmente temos dois feixes com polarizações diferentes e perpendiculares.

Colocando esse novo polarizador orientado verticalmente, apenas os fótons polarizados verticalmente irão passar por ele e teremos uma nova imagem no anteparo. O mesmo pode ser feito para selecionar os fótons que foram polarizados horizontalmente. Isso seria equivalente a tampar uma das fendas em um experimento de dupla fenda, assim teríamos os fótons se comportando como partículas que passariam apenas por uma única fenda. Como resultado teremos as intensidades luminosas diferentes em cada lado – figura 8.

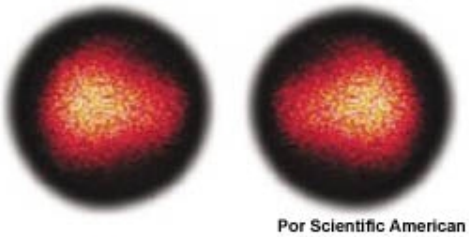


Figura 8 – Imagem resultante de um polarizador selecionando os fótons que passaram pelo lado esquerda e direito respectivamente.

5.4 Borracha Quântica em ação

Com o mesmo polarizador usado anteriormente para selecionar os feixes do laser podemos também restituir o padrão de interferência inicial. Fazemos isso rotacionando-o no sentido horário a 45° com relação à vertical.

O padrão de interferência reaparece. Isso acontece porque estamos apagando a informação sobre qual lado cada fóton passou, ou seja, estamos apagando o estado de polarização anterior dos fótons, daí o nome Borracha Quântica. Agora temos que cada fóton com polarização vertical tem 50% de chance de chegar ao anteparo por esse lado e o mesmo acontece com os do lado direito – ver Lei de Malus no **Apêndice A**. Nos dois casos os fótons adquirem uma mesma polarização, 45°, assim não temos como saber se um determinado fóton veio do lado esquerdo ou se veio do direito.

Fazendo a mesma coisa, mas rotacionando no sentido anti-horário, também restituímos o padrão de interferência, mas agora com as franjas claras deslocadas para a posição das

franjas escuras do caso anterior. De forma que a soma das duas imagens resultam na imagem inicial sem padrão de interferência (com apenas o identificador de caminho).

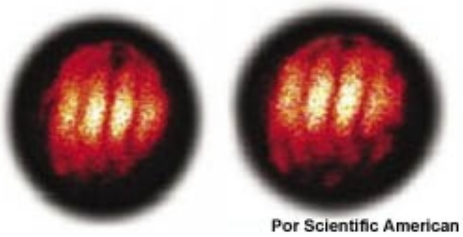


Figura 9 – Imagens de interferência complementares.

Com uma montagem híbrida, feita com dois polarizadores rotacionados em sentidos diferentes é possível visualizar os dois padrões de interferência ao mesmo tempo, desde que seja possível fazer porções do feixe do laser passar pelos dois polarizadores ao mesmo tempo.

Essa montagem, bem como sua imagem resultante são ilustradas logo abaixo.

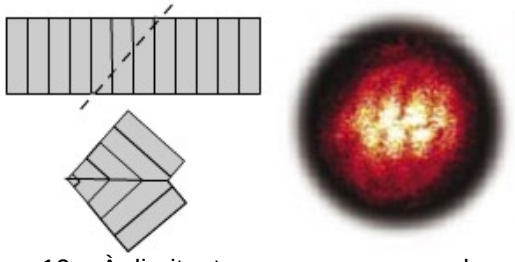


Figura 10 – À direita, temos um esquema de como os polarizadores devem ser juntados e à esquerda a imagem resultante da borracha híbrida.

6. Resultados

Nos primeiros testes o experimento não funcionou como o esperado, devido ao material utilizado. Diante da dificuldade de se encontrar filmes polarizadores de fácil acesso utilizamos lentes polarizadas de óculos de sol e estas se mostraram inadequadas, pois mesmo cortando-as em pedaços menores essas ainda possuíam uma curvatura que dificultava e muito a construção do identificador de caminho, principalmente no processo de junção dos filmes.

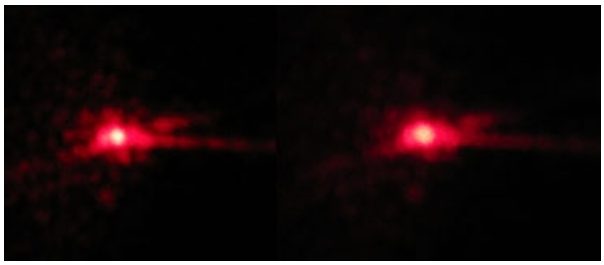


Figura 11 – Imagem dos primeiros testes com lentes de óculos polarizados. À direita com a borracha quântica funcionando, recuperando as franjas e na esquerda sem a borracha quântica.

Então, Prof. José J. Lunazzi, Coordenador da Disciplina, lembrou de que telas de LCD utilizam polarizadores para funcionar. Assim iniciei diversos testes com LCD's a fim de encontrar meios de extrair esses filmes e um método simples foi desenvolvido com sucesso e descrito no **Apêndice B**.

Com esses novos polarizadores, o experimento funcionou muito bem e conseguiu satisfazer todos os objetivos almejados desde sua idealização. Uma base desmontável foi construída a fim de facilitar seu transporte e armazenamento.

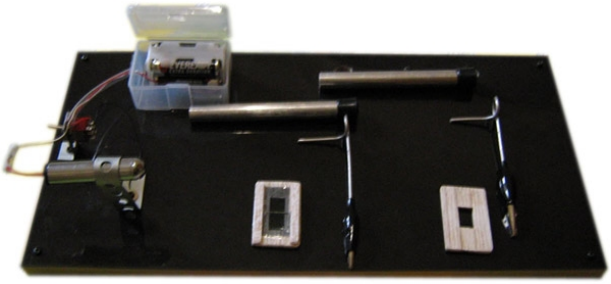


Figura 12 – Base completa e desmontada com o laser, conjunto de pilhas, interruptor, hastes, suportes e molduras com polarizadores.

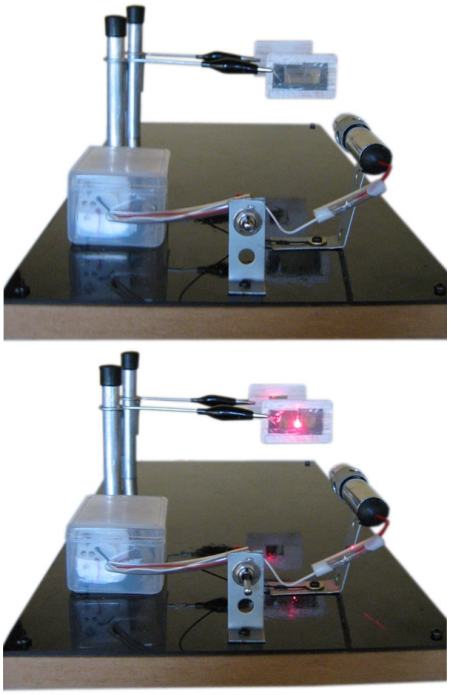


Figura 13 – Base montada e em funcionamento.

Também foram realizados testes com um laser de He-Ne, do Laboratório de Ensino de Física da Unicamp, que gerou ótimos resultados – Figura 14. Estes se devem a sua faixa mais estreita de comprimentos de ondas, centrada em 632,8nm, e por ser mais colimado que o laser de diodo.

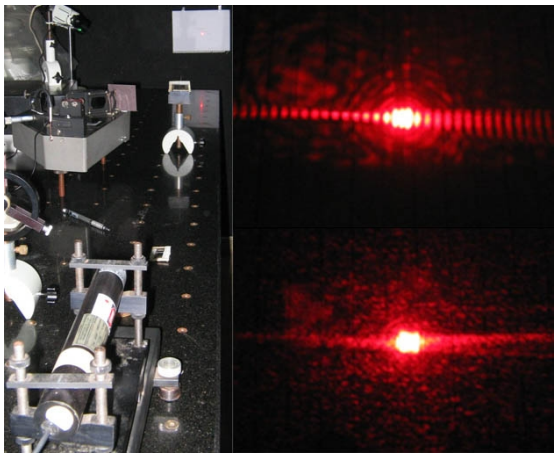


Figura 14 – Utilizando laser de He-Ne, lado esquerdo. À direita e acima, franjas geradas pelo fio. Abaixo e direita com as franjas destruídas pelo identificador de caminhos.

Com o *laser-pointer* as franjas são um pouco mais fracas, mas podem ser visualizadas facilmente, bem como as imagens dos seletores de caminho – figura 15 e 16.

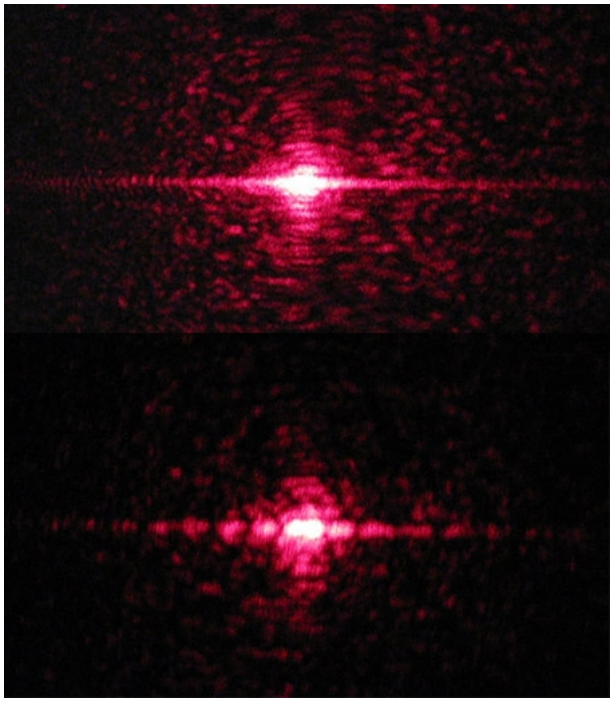


Figura 15 – Utilizando o *laser-pointer*, franjas destruídas pelo identificador de caminhos acima e com as franjas restituídas pela ação da borracha quântica abaixo.

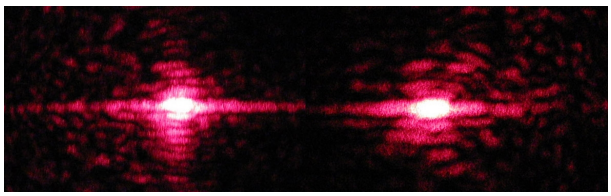


Figura 16 – Seletores de caminho atuando sobre o feixe vindo do identificador de caminhos.

7. Referências

- Artigo publicado na revista Scientific American Brasil, Nº 61 - Junho 2007
- Artigo publicado na Scientific American Internacional de maio de 2007. http://www.sciam.com/article.cfm?chanID=sa006&colID=1&articleID=DD39218F-E7F2-99DF-39D45DA3DD2602A1]

http://www.sciam.com/slideshow.cfm?articleID=DD39218F-E7F2-99DF-39D45DA3DD2602A1
- http://grad.physics.sunysb.edu/~amarch/
- http://grad.physics.sunysb.edu/~amarch/Walborn.pdf

Apêndice A – Polarização

A-1 Nível Médio

Todas as ondas eletromagnéticas, assim como a luz, são ondas transversais e podem ser interpretadas como duas componentes oscilantes: um campo elétrico e um magnético perpendiculares entre si e a sua direção de propagação.

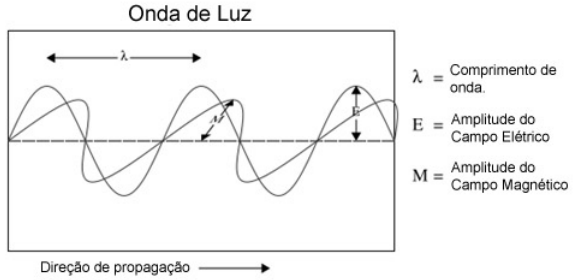


Figura A1 – Exemplo de onda eletromagnética evidenciando seus campos oscilantes e sua direção de propagação.

Um polarizador é um dispositivo que converte um feixe de luz não-polarizada ou de polarização mista em um feixe com um único estado de polarização, ou seja, polarizado em uma determinada direção. Portanto a polarização é uma propriedade das ondas eletromagnéticas que descreve a direção de oscilação do campo elétrico. Isso só se aplica a ondas transversais; em ondas sonoras, que são longitudinais, não ocorre tal efeito, pois a oscilação está na mesma direção de sua propagação.

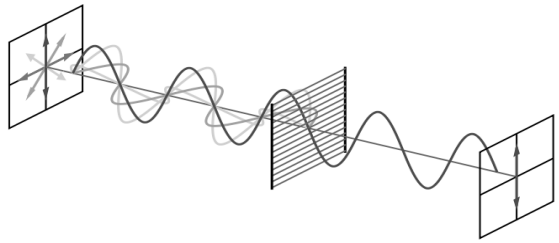


Figura A2 – Onda não polarizada, à esquerda, passando um filtro polarizador, no centro.

Sugestão de Experimento:

Um experimento bem simples que pode ser montado para ilustrar o fenômeno da polarização em sala de aula ou mesmo em casa é esquematizado abaixo:

Material necessário:

Uma corda, uma cadeira e duas vassouras.

Amarre a corda em algum objeto pesado, que em nosso exemplo seria uma cadeira e deixe a outra extremidade solta de modo que seja possível fazer o movimento descrito na Figura A3.

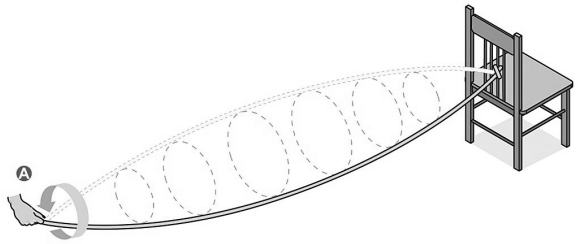


Figura A3 – Configuração inicial do experimento.

Agora utilizamos as vassouras para fazer um *polarizador*. Ele é feito colocado as vassouras paralelas entre si no meio da corda como ilustrado na Figura A4.

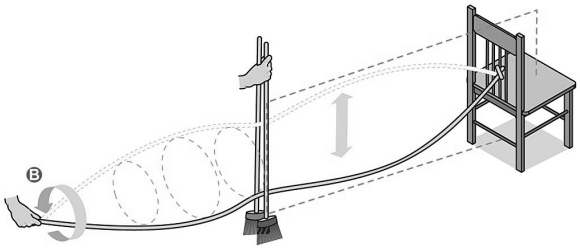


Figura A4 – Polarizador caseiro em funcionamento.

Como resultado, temos a primeira onda, não polarizada (ou ainda melhor, polarizada circularmente), sendo polarizada linearmente pelo conjunto de vassouras. Isso acontece porque as

vassouras deixam apenas a componente vertical da onda inicial continuar a se propagando na corda.

A-2 Nível Superior

Continuando com a visão clássica sobre a polarização, devemos lembrar que a polarização de um feixe de luz não-polarizado ou de polarização diferente implica em uma diminuição de sua intensidade luminosa.

Essa redução, pode ser interpretada da seguinte maneira: o polarizador permite apenas que uma determinada componente, ou seja, que uma projeção do campo elétrico passe por ele – figura A5.

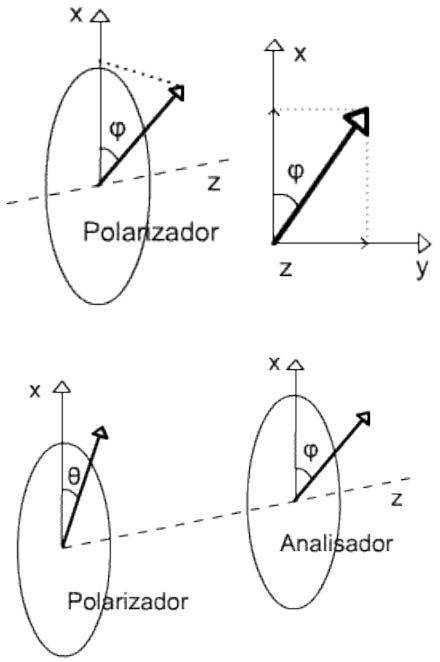


Figura A5 – Polarizador linear decompondo o campo elétrico no seu eixo de polarização acima e conjunto de polarizador analisador abaixo.

Observando a ilustração acima, fica evidentemente que essas projeções terão apenas módulos menores ou iguais que os iniciais para o caso de luz polarizada, que é o caso do presente experimento. Esse fenômeno é equacionado pela *Lei de Malus*:

$$I = I_0 \cos^2(\theta - \varphi)$$

Onde I é a intensidade final e I_0 é a intensidade inicial. Assim, vemos que toda a intensidade luminosa passará se θ e φ forem iguais e será toda bloqueada se θ e φ forem perpendiculares.

Agora vamos a interpretação corpuscular da luz, os fótons.

Sabemos que a intensidade do feixe é proporcional ao número de fótons, então a *Lei de Malus*, deve representar a fração do numero de fótons incidentes sobre o analisador que são transmitidos por ele. Não podemos deixar passar frações de fótons: ou o fóton passa ou não passa. Logo a *Lei de Malus* representa a probabilidade de que um fóton linearmente polarizado na direção θ atravesse o analisador com o eixo alinhado na direção φ.

$$\frac{I}{I_0} = P(\varphi, \theta) = \cos^2(\theta - \varphi)$$

Portanto não é possível predizer o que acontece com um único fóton ao passar por um polarizador, exceto para $\theta = \varphi$, onde a probabilidade seria igual a um, P = 1 e para $\theta = \varphi \pm \pi/2$, onde a probabilidade seria igual a zero, P = 0. Em todos os outros casos, teremos diferentes probabilidades do fóton passar ou não que dependem apenas dos ângulos θ e φ.

A-3 Aplicações

A polarização de ondas eletromagnéticas é um processo

amplamente utilizado nos dias atuais em vários instrumentos ópticos, de medida e de telecomunicações.

Uma de suas aplicações mais simples são os óculos de sol polarizados. Toda luz refletida por superfícies transparentes são totalmente ou parcialmente polarizadas paralelamente a superfície refletida (a menos do caso de incidência em 90°). Um óculos polarizador se torna muito útil para "filtrar" a luz que chega aos nossos olhos, facilitando a visualização de vários detalhes que passariam despercebidos.

Figura A6 – Comparação de imagens sem uso de filtros polarizadores, à esquerda e com filtros polarizadores, à direita.

Outra aplicação dos polarizadores são nas telas de LCD (*Liquid Crystal Displays*). Um LCD é constituído de um líquido polarizador da luz, eletricamente controlado, que se encontra comprimido dentro de celas entre duas lâminas transparentes polarizadoras. Os eixos polarizadores das duas lâminas estão alinhados perpendicularmente entre si. Cada cela possui contatos elétricos que permitem que um campo elétrico possa ser aplicado ao líquido lá dentro. O LCD utiliza a polarização da luz graças a filtros polarizadores e dupla refração de certos cristais líquidos em fase podendo-se fazer variar a orientação em função do campo elétrico aplicado.

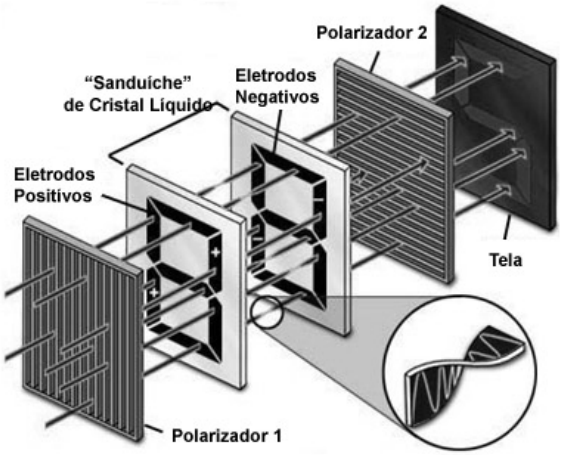


Figura A7 – Esquema de funcionamento de uma tela LCD.

As duas faces internas das placas de vidros comportam uma matriz de eletrodos transparentes, uma (preto e branco) ou três (cor) por pixel. A espessura do dispositivo e a natureza dos cristais líquidos são escolhidas de maneira a obter a rotação desejada do plano de polarização na ausência de tensão elétrica (90°). A aplicação de uma diferença de potencial mais ou menos elevada entre os dois eletrodos de um pixel provoca uma mudança de orientação das moléculas, uma variação do plano de polarização e por conseguinte uma variação da transparência do conjunto do dispositivo. Esta variação de transparência é explorada por uma retro-iluminação, reflexão da luz incidente ou projeção e esse efeito que permite visualizarmos os caracteres ou imagens numa tela de LCD.

Também podemos citar a fluorescência polarizada, que é uma técnica experimental com aplicações na farmacologia. Através desta técnica, pode-se detectar a presença de drogas ilícitas em medicamentos. O processo consiste em colocar uma pequena amostra do remédio num feixe de luz monocromática, que passa através de um

filtro polarizador vertical a fim de deixar a luz polarizada verticalmente antes de chegar à amostra. Com isto, somente as moléculas com orientação vertical absorvem a luz, passando para um estado excitado. Ao decaírem, estas moléculas emitem luz nos planos paralelos e perpendiculares ao feixe de ondas incidente, sendo suas intensidades (tanto paralela quanto perpendicular) medidas experimentalmente.

Deste modo, a fração entre a intensidade da luz polarizada verticalmente que incide na amostra e a intensidade da luz polarizada horizontalmente que sai da amostra é medida pela quantidade de moléculas que rotacionaram durante a excitação ótica.

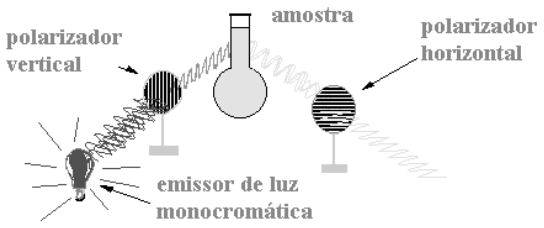


Figura A8 – Analise de substâncias por meio da polarização.

Essa luz polarizada, quando absorvida por uma molécula pequena, rotaciona essa molécula muito rapidamente, antes mesmo que a ela possa decair. Isso faz com que a luz emitida por ela fique com uma polarização diferente da inicial, devido a sua rotação. Já a mesma luz polarizada, quando absorvida por uma molécula grande, acaba sendo emitida ainda com a mesma polarização, pois a molécula grande não rotaciona tão rapidamente. Um detector pode mensurar essas diferenças de polarização e assim, através da construção de uma curva padrão para a amostra e sua subseqüente comparação com os gráficos de concentração versus polarização de drogas conhecidas, podemos determinar o tipo da droga que está presente na amostra.

Esses são apenas alguns exemplos, pois existem ainda muitas outras aplicações nas mais diversas áreas como: Geologia, Farmacologia, Astronomia, Fotografia e Química.

A-4 Referências

- Fundamentos da Física 4 – D. Halliday, R. Resnick, Vol. 4
- Curso de Física Básica 4 – H. Moysés Nussenzveig

- http://www.enzim.hu/~szia/cddemo/edemo0.htm
- http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/polarization.html
- http://www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/mopolfuncao.html
- http://wikipedia.org
- http://www.cdcc.sc.usp.br/ondulatoria/polariz.html
- http://www.abbottdiagnostics.com/Science/pdf/learning_immunoassay_02.pdf

Apêndice B – Como obter Filmes Polarizadores

Um dos materiais mais importantes na construção da borracha quântica são os filmes polarizados, portanto nessa seção serão abordadas diversas maneiras de como obter tais filmes para realizar o experimento.

As fontes mais acessíveis desse material são as telas ou mostradores digitais de LCD de aparelhos eletrônicos como: calculadoras, relógios, cd players, enfim praticamente qualquer aparelho digital possui tais telas. Também podem ser utilizadas lentes de óculos de sol polarizados.

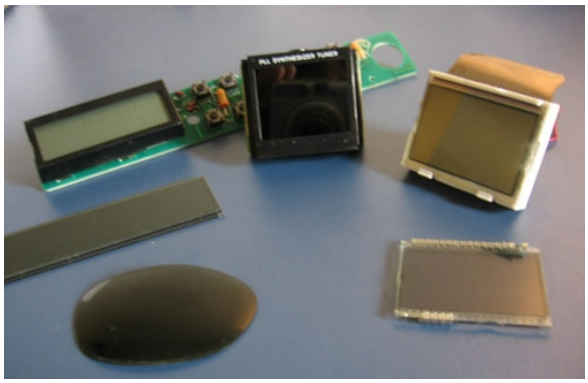


Figura B1 – Diferentes modelos de telas LCD e uma lente de óculos de sol polarizado

Conseguir esse tipo de material é relativamente fácil. Basta visitar uma loja de manutenção de eletro-eletrônicos e pedir por essas telas de LCD, que no caso de aparelhos quebrados seriam jogadas no lixo.

Existem basicamente dois modelos de telas:

O modelo mais simples consiste numa estrutura metálica ou plástica que segura a tela em cima de um suporte plástico. Desmontando essa estrutura a tela se destaca facilmente – Figura B2. No outro modelo temos a tela presa a placa de circuito impresso por meio de pinos metálicos. Pode-se soltar a tela partindo os pinos. Mas nessa configuração temos um adesivo colado na parte traseira de tela que deve ser retirado para que esta possa ser utilizada no experimento. Normalmente sobrará um resto de cola depositada na tela, onde estava o adesivo, esse excesso de cola deve ser retirado apenas com água e sem utilizar instrumentos pontiagudos que podem danificar o filme polarizador.

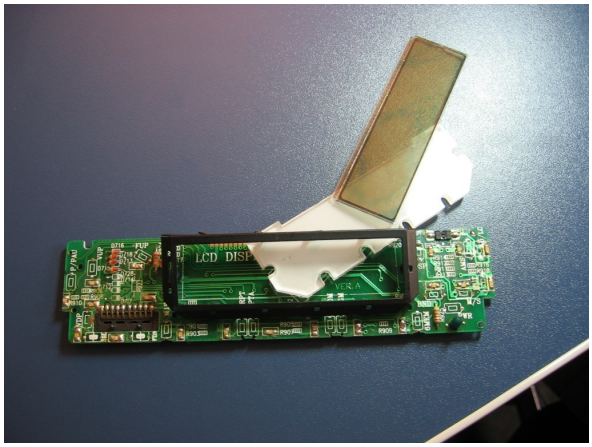
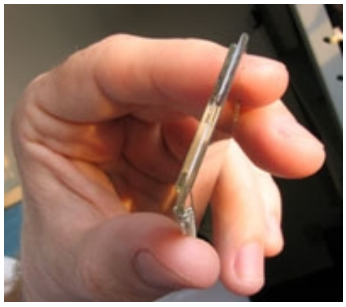


Figura B2 – LCD na configuração com estrutura metálica desmontado.

Para realizar o experimento, precisaremos de no mínimo quatro filmes polarizadores: um para polarizar a luz do laser a 45° com horizontal (no caso de lasers não polarizados isso é necessário para garantir que teremos uma componente vertical e uma horizontal no feixe que incidirá sobre o identificador de caminho), dois no identificador de caminho (perpendiculares entre si e com um fio fino logo a frente da junção) e outro polarizador para atuar como borracha quântica. Tanto o primeiro como o último não necessitam de nenhuma modificação para serem usados, mas o identificador de caminho sim.

Para montar o identificador de caminho é preciso juntar dois polarizadores com orientações perpendiculares e como as telas tem uma

borda de vidro não é possível montar esse identificador sem retirar os filmes polarizadores delas. Portanto devemos extrair o filme polarizador do vidro para poder então cortá-lo e fazer a junção.



O fato da tela ser composta pela junção de duas laminas de vidro, como mostrado ao lado pode sugerir que o filme polarizador esteja entre eles, mas não é isso que ocorre. Os filmes polarizadores não se encontram em seu interior, mas sim no exterior e ainda mais, existem não um, mas dois filmes polarizadores colados em cada lado do vidro. (ver **Apêndice A**, funcionamento do LCD).

Precisamos do filme intacto e para isso devemos retirá-lo com água. Mergulhando as telas de LCD em água por um ou dois dias já é possível descolar os polarizadores do vidro. Mas cuidado para não deixar os polarizadores por muito tempo na água depois de descolados, pois eles acabam se dissolvendo nela.

Figura B3 – Filme polarizador retirado de um LCD apenas com água.

Outras tentativas foram feitas usando solventes, esperando que estes não danificassem o filme. Em um primeiro teste mergulhamos o vidro com o filme colado em acetona e conseguimos soltá-lo depois de algumas horas. No entanto este ficou um pouco opaco, devido à corrosão, portanto o melhor método é utilizar água. Pode ser mais demorado, mas é o método que gera melhores resultados.

Apêndice C – Dualidade Onda-Partícula e Experimento de Young de duas fendas.

As teorias sobre a natureza da luz evoluíram de uma teoria corpuscular, capaz de explicar as leis básicas da ótica geométrica, à uma teoria ondulatória que explica os efeitos de interferência e difração da luz.

No entanto, as teorias do efeito fotoelétrico e do efeito Compton voltaram a apontar para características corpusculares da luz, levando a introdução de fótons. Também foram demonstrados que elétrons, considerados como partículas desde de sua descoberta, podiam difratar e interferir.

Nesse apêndice, vamos definir de forma mais precisa esse contraste entre o comportamento ondulatório e o corpuscular analisando o experimento de Young de duas fendas.

C-1 Experimento de Young com ondas clássicas.

Ondas clássicas, por exemplo: som, são produzidas por uma fonte puntiforme, coerente e incidem sobre um par de aberturas num anteparo e são detectados por sensores em um outro anteparo, mais atrás.

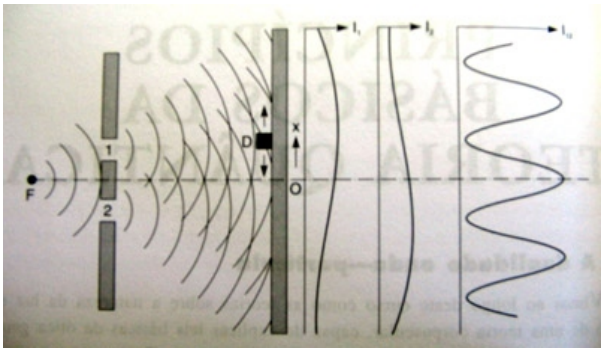


Figura C1 – Experimento de Young com ondas clássicas

Se apenas a fenda 1 estiver aberta, a intensidade detectada seria $I_1(x)$ e $I_2(x)$ no caso de apenas a fenda 2 estar aberta.

A experiência mostra interferência, quando 1 e 2 estão abertas, ou seja, a intensidade observada é:

$$I_{12}(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta$$

Onde Δ é a defasagem entre as duas contribuições.

Em geral, vemos que $I_{12} \neq I_1 + I_2$, onde a intensidade pode variar dependendo da interferência ser construtiva ou destrutiva.

Se fecharmos uma das fendas, o padrão de interferência é perdido.

C-2 Experimento de Young com partículas clássicas

Para simular uma fonte de partículas clássicas podemos imaginar uma metralhadora que dispara a uma razão constante e ao acaso e que suas balas podem ricochetear sem se fragmentarem.

Nesse caso, o anteparo onde iremos detectar o número de balas de acordo com a posição em x, pode ser considerado como uma caixa de areia, onde as balas ficariam e podiam ser contadas.

Quando temos as fendas 1 e 2 abertas a distribuição de balas encontradas é a soma das distribuições de quando apenas 1 está aberta e de quando apenas 2 está aberta.

Como as balas não podem se fragmentar, não vamos encontrar frações de balas na caixa de areia e também temos que cada bala passou ou pela fenda 1 ou pela fenda 2, e esses eventos

são independentes e mutuamente exclusivos.

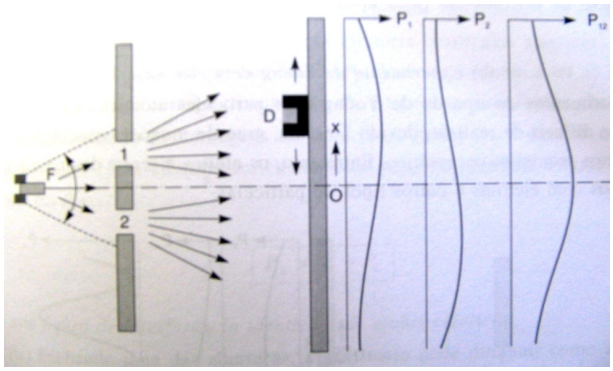


Figura C2 – Experimento de Young com partículas clássicas.

Logo, temos que $P_{12} = P_1 + P_2$, quando as duas fendas estão abertas.

C-3 Experimento de Young com elétrons

Para uma fonte F de elétrons, por exemplo um filamento aquecido e um anteparo com um detector D, as seguintes características são observadas:

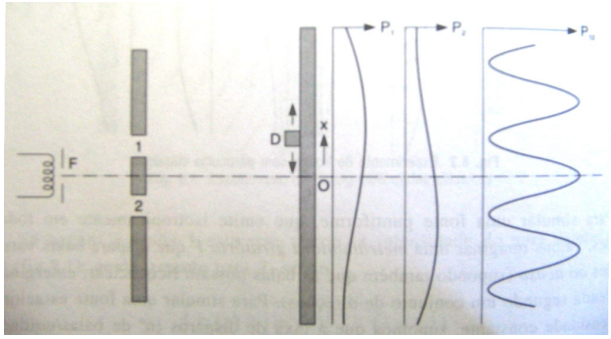


Figura C3 – Experimento de Young com elétrons.

(i) O detector só registra números inteiros de elétrons, nunca uma fração.
(ii) Para uma fonte suficientemente fraca, pode-se fazer com que os elétrons cheguem uma a um, como no caso da metralhadora onde eles chegam em pontos ao acaso.
(iii) Acumulando contagens de uma fonte muito fraca durante um tempo longo, obtêm-se franjas de interferência com $P_{12} \neq P_1 + P_2$, com uma figura idêntica a de ondas clássicas.

Portando temos características tanto de partículas clássicas como de ondas clássicas. A conclusão é:

Os elétrons, como outros partículas atômicas e subatômicas, não são nem partículas clássicas e nem ondas clássicas, embora mostrem algumas características de ambas.

C-4 Distinguibilidade

No caso anterior, bem como no caso do feixe do laser passando pelo fio, não podemos saber por qual lado o elétron ou o fóton passou. A indistinguibilidade de caminhos (e também a de partículas) é responsável pelo aparecimento das franjas de interferência.

Mesmo no experimento de Young com elétrons é possível determinar por qual fenda o elétron passou, assim como quando usamos o identificador de caminhos na Borracha Quântica.

Isso é feito utilizando uma fonte de luz que ilumina as fendas. Como partícula carregada, o elétron espalha a luz, e podemos verificar se o “flash” devido a sua passagem provém da fenda 1 ou da fenda 2. Assim, seria possível determinar por qual fenda o elétron realmente passou e destruir o padrão de interferência no anteparo.

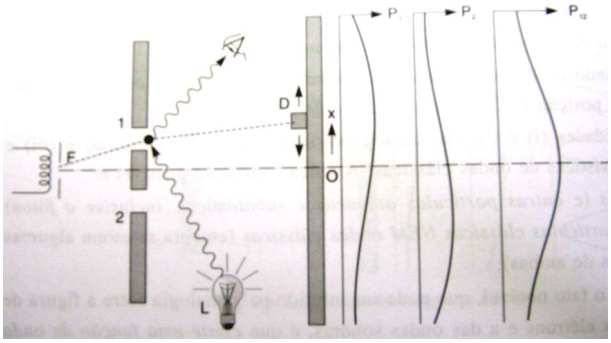


Figura C4 – Observação da fenda pelo qual o elétron passou.

A maneira como é feita a observação também afeta os resultados. O processo de observação gera uma perturbação e no presente experimento, essa perturbação provém do espalhamento de luz pelo elétron.

Tentativas de reduzir esse efeito podem gerar resultados interessantes. Existem dois parâmetros que podemos usar como controles para isso: a intensidade da luz e seu comprimento de onda. Classicamente, diminuir a intensidade equivaleria a diminuir o número de fótons que vão interagir com os elétrons. O resultado então é que diminuímos a probabilidade de que um elétron encontre um fóton ao passar, ou seja, a probabilidade de que o elétron encontre um fóton ao passar será menor que 1 e antes era igual a 1.

Assim teremos dois grupos de elétrons chegando ao anteparo: os que foram observados e os que passaram sem interagir com a luz. Portanto, quando mais diminuirmos a intensidade da luz, menos elétrons serão identificados e o padrão de interferência irá prevalecer.

Outra tentativa seria de diminuir o comprimento de onda (diminuir a energia dos fótons) e manter a intensidade da luz alta. Verifica-se que para λ suficientemente grandes, reaparecem os efeitos de interferência, mesmo com a intensidade elevada. Isso acontece quando λ é da ordem da distância entre as fendas, mas devido a propriedades ondulatórias da luz não podemos localizar uma partícula usando luz de comprimento de onde λ com precisão melhor do que λ. Novamente não vamos poder determinar por qual fenda a luz passou e a interferência reaparece, pois amplitudes de probabilidade associadas a duas possibilidades interferem quando são indistinguíveis e não interferem quando é possível distingui-las.

C-5 Referências

- Curso de Física Básica 4 – H. Moysés Nussenzveig
- http://en.wikipedia.org/wiki/Photon_dynamics_in_the_double-slit_experiment

Apêndice D – Leis de Fresnel-Arago

Há cerca de um século atrás, Fresnel e Arago investigaram a influência da polarização da luz nos seus padrões de interferência. Desse estudo resultaram as seguintes leis:

1) Duas ondas ortogonais, coerentes e linearmente polarizadas não interferem entre si.

2) Duas ondas paralelas, coerentes e linearmente polarizadas vão interferir da mesma forma que a luz natural.

3) Duas ondas ortogonais, não-coerentes de luz natural e linearmente polarizadas não vão interferir.

No caso do experimento da Borracha Quântica, podemos verificar 1), pois não temos interferência quando polarizamos as duas metades do feixe ortogonalmente e 2) quando temos interferência quando esses são repolarizados no mesmo eixo, ou seja, paralelamente.

D-1 Referências

http://scienceworld.wolfram.com/physics/Fresnel-AragoLaws.html

Demonstração experimental: http://www.labophysique.com/index.php?option=com_content&task=view&id=84&Itemid=50