



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Ondas, Partículas e Luz

Raphael Guimarães Pontes
&
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Raphael Guimarães Pontes, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

Ondas, Partículas e Luz

Raphael Guimarães Pontes

Carlos Eduardo Aguiar

1 Brevíssima história da dualidade onda-partícula

A natureza da luz é um tema que historicamente dividiu cientistas e, antes desses, os filósofos naturais. Por exemplo, Isaac Newton e Christiaan Huygens, ambos no século XVII, propunham ideias completamente antagônicas: enquanto Newton trouxe a ideia da luz como sendo formada por corpúsculos em um de seus primeiros trabalhos, *Nova teoria sobre luz e cores*, de 1672, Huygens propôs a luz como uma onda em 1690, em seu *Tratado sobre a luz*.

Esse antagonismo perdurou até o século XIX, quando através do experimento crucial de Thomas Young, comumente chamado de “experimento da dupla fenda”, a questão foi decidida em favor da teoria ondulatória. Outro importante físico, James Clerk Maxwell, desenvolveu em 1865 uma teoria extraordinariamente bem sucedida na qual a luz é descrita como uma onda eletromagnética. Muitas observações empíricas sobre a luz foram explicadas pela teoria ondulatória de Maxwell.

No início do século XX, os trabalhos de Albert Einstein e vários fatos experimentais mostraram que em algumas situações a teoria ondulatória não era capaz de descrever o comportamento da luz. Nesses caso ela parecia comportar-se como sendo formada de partículas, mais tarde chamadas de fótons.

Dualidade onda-partícula é o nome dado a esse comportamento estranho; afinal, nada no nosso dia-a-dia é onda e partícula ao mesmo tempo. Vamos discutir essa situação na sequência deste texto. Para esclarecer a extensão do conflito gerado pelo comportamento dual da luz é importante que definamos

primeiro o que são ondas e o que são partículas aos olhos da física clássica e expliquemos porque são conceitos inconciliáveis nesse contexto.

2 Ondas

Quando se fala em ondas, muito provavelmente uma das primeiras imagens que nos vem à cabeça é algo parecido com a Figura 1.



Figura 1: Ondas na praia. Repare que as ondas atingem diferentes pontos da costa ao mesmo tempo.

E sem dúvida essa é uma boa imagem para que discutamos algumas características das ondas. Ao olhar para as cristas das ondas do mar é possível ver que elas atingem diversos lugares da costa ao mesmo tempo. Dizemos por isso que *ondas são extensas*.

Ainda outro exemplo pode ser visto na Figura 2. Observe que após serem geradas, as ondas circulares atingem diversos pontos do líquido ao mesmo tempo.

A segunda característica notável que podemos considerar nas ondas é que elas podem chegar simultaneamente a *um mesmo lugar* tendo seguido diferentes caminhos. Imagine uma onda que se desloca na superfície da água e, ao encontrar um obstáculo, se divide em duas partes que contornam o



Figura 2: Ondas na superfície da água. Outro exemplo onde vemos que uma onda pode atingir vários lugares simultaneamente.

objeto pelos dois lados e voltam a se reunir mais à frente, atingindo os mesmos pontos. Nas figuras abaixo damos alguns exemplos.

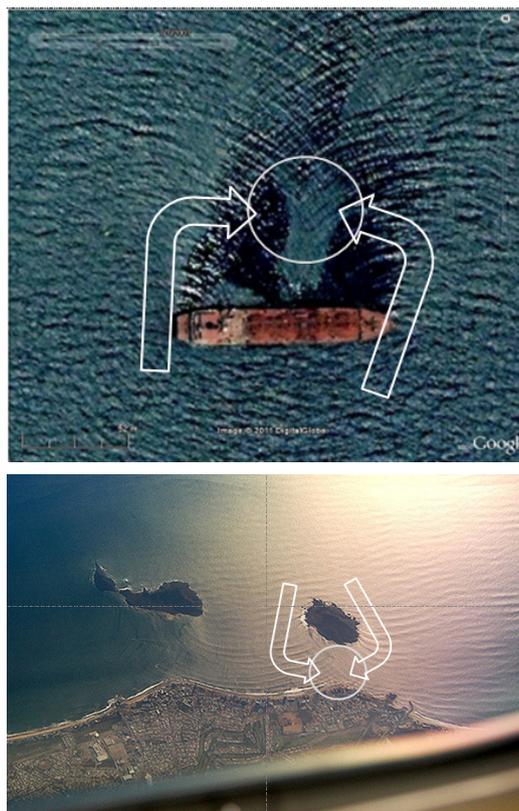


Figura 3: Exemplos de ondas que chegam em um mesmo ponto seguindo mais de um caminho.

O fato das ondas poderem ser separadas e recombinadas nos leva a uma terceira característica delas: a *superposição*. Diferentemente de uma bola de bilhar que quando se encontra com outra, colide e pode mudar de direção, não existe colisão quando falamos em ondas, como se pode ver na Figura 4.



Figura 4: Gotas de chuva caindo em uma poça. Observe como as diversas ondas geradas percorrem a superfície se superpondo umas com as outras.

O efeito da superposição é a soma dos efeitos que cada onda sozinha iria produzir em um determinado ponto. O efeito de cada onda pode ser positivo ou negativo – por exemplo uma onda no mar pode aumentar e diminuir a altura da água. Com isso, a superposição de duas ondas em um ponto pode gerar *reforço* (positivo + positivo ou negativo + negativo) ou *cancelamento* (positivo + negativo) dos efeitos individuais.

Na situação em que as ondas se reforçam, ilustrada na Figura 5, dizemos que as ondas estão *em fase*, ou seja, suas cristas (efeitos positivos) e vales (efeitos negativos) coincidem. O oposto disso, quando as cristas de uma onda coincidem com os vales da outra, resulta em ondas que estão *fora de fase* e, por conseguinte, no cancelamento delas, como mostrado na Figura 6. A esse reforço ou cancelamento de ondas superpostas chamamos *interferência*. No caso do reforço a interferência é dita *construtiva* e no cancelamento ela é *destrutiva*. É importante chamar atenção para o aspecto fundamental da interferência destrutiva: duas ondas superpostas podem resultar em *nenhuma perturbação* num dado local.

Interferências totalmente construtivas e totalmente destrutivas represen-

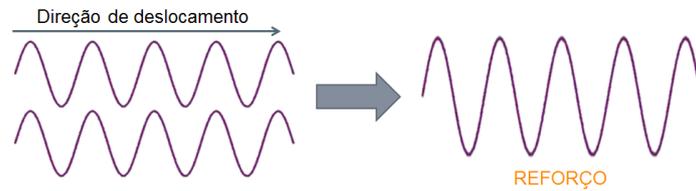


Figura 5: Exemplo de superposição reforçando o efeito de ondas que se encontram em um mesmo local, ou seja, interferência construtiva.

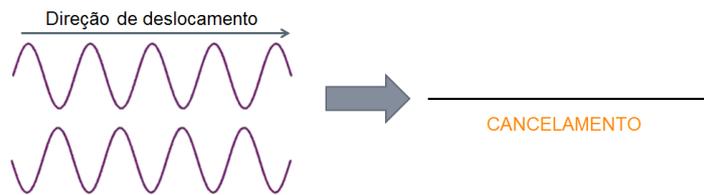


Figura 6: Exemplo de superposição cancelando o efeito de ondas que se encontram em um mesmo local, ou seja, interferência destrutiva.

tam casos extremos; existe na verdade uma infinidade de possibilidades de se superpor duas ondas resultando em reforços ou cancelamentos parciais. Por simplicidade usaremos os termos construtiva e destrutiva nesse contexto mais geral.

3 Partículas

A palavra *partícula* deriva do latim *particula* e significa pequena parte, corpúsculo, corpo diminuto. De um modo geral, chamamos de partícula pequenos objetos, cujos tamanhos são desprezíveis frente às dimensões e distâncias encontradas na situação de interesse. Por exemplo, quando analisamos a órbita da Terra em torno do Sol podemos considerar que nosso planeta é uma partícula. Por outro lado, no nosso dia a dia obviamente não seria apropriado considerar a Terra como um objeto pontual.

Algumas características das partículas são importantes para o nosso estudo. A primeira delas é que, por serem muito pequenas, *partículas são objetos localizados*, ocupam apenas um ponto no espaço. Isso significa que

uma partícula *só pode atingir um local num determinado instante* (ver Figura 7). Pelo mesmo motivo, se uma partícula atinge um dado local, ela não pode ter chegado ali seguindo dois caminhos diferentes *ao mesmo tempo*.

É importante notar a diferença entre esse comportamento e o das ondas: uma onda pode chegar a vários locais em um mesmo instante e, também, pode chegar a um mesmo local por vários caminhos.



Figura 7: Comportamento de uma partícula ao entrar em um cano com duas saídas: ela atinge apenas um único local em um determinado instante.

Mais uma característica das partículas, que as diferenciam das ondas, é que *partículas não sofrem interferência*: a soma de duas partículas nunca resulta em nenhuma partícula. Um exemplo disso pode ser observado na chuva (Figura 8). A soma de uma gota com outra nunca resultará em nenhuma gota, na melhor das hipóteses criará uma gota maior.



Figura 8: Gotas de chuva.

4 Ondas ou partículas?

Vimos nas seções anteriores que ondas e partículas têm propriedades muito distintas. Para facilitar a comparação dessas propriedades e diferenciá-las claramente, nós as resumimos na Tabela 1.

Ondas	Partículas
São extensas.	São localizadas.
Atingem vários locais em um dado instante.	Atingem somente um local em um dado instante.
Chegam a um dado local por vários caminhos.	Chegam a um dado local por um único caminho.
Sofrem interferência.	Não sofrem interferência.

Tabela 1: Propriedades básicas de ondas e partículas.

Vemos que as características de ondas e partículas são excludentes. Um sistema que se comporte como onda não pode comportar-se como partícula, e vice-versa. Pelo menos é o que esperamos.

5 Som: ondas ou partículas?

As propriedades esquematizadas na seção anterior podem ser utilizadas para investigar a natureza, ondulatória ou corpuscular, de fenômenos cotidianos. Vamos tomar o som como primeiro exemplo. O som que emitimos ao falar é formado por ondas ou partículas? Ao bater uma barra de ferro contra outra, o som que ouvimos é formado de ondas ou seriam partículas que se desprenderam das barras por causa da batida?

De modo geral, podemos nos perguntar: *o que seria o som, ondas ou partículas?* Para investigar essa questão, começaremos com um experimento simples: faremos o som passar por um *divisor de feixe*. Apesar do nome complicado, o divisor de feixe é um instrumento fácil de entender. Você pode vê-lo na Figura 9: trata-se basicamente de três tubos conectados por uma junção T . O som que entra por um dos tubos é dividido em duas partes na

junção e sai pelos dois outros tubos. Como o que é dividido por esse aparato é um som, vamos chamá-lo de *divisor de som*.

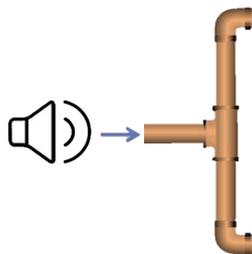


Figura 9: O divisor de som.

5.1 Experimento com o divisor de som

Dependendo de sua natureza – onda ou partícula – o som se comportaria de formas distintas ao atravessar o divisor. Se ele for uma onda, poderia sair simultaneamente pelos dois tubos à direita, como mostra a Figura 10. Chegar a dois (ou mais) lugares ao mesmo tempo é uma característica das ondas, como já discutimos (ver Tabela 1).

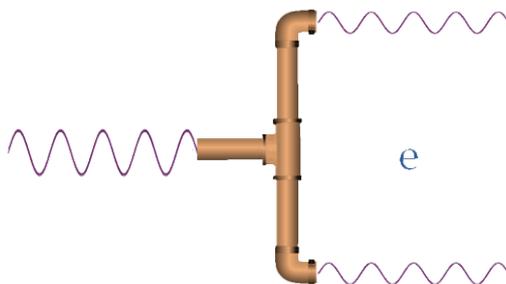


Figura 10: Comportamento do som, caso ele fosse composto por ondas.

Por outro lado, se o som for constituído de partículas, cada uma delas sairá ou por um ou por outro dos tubos à direita, como está representado na Figura 11. Partículas são localizadas e por isso seguem apenas um caminho, podendo atingir somente um local em um dado instante. Essa é uma das características das partículas que ressaltamos na Tabela 1.

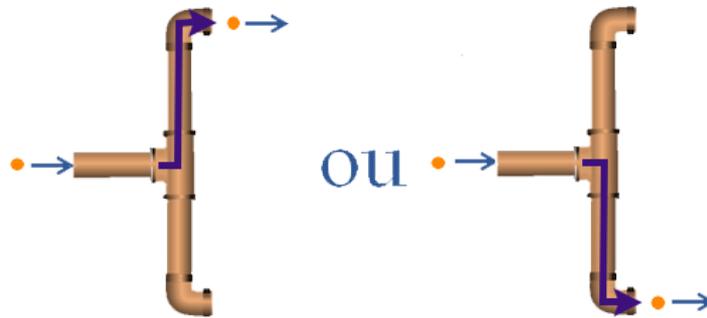


Figura 11: Comportamento do som muito fraco, caso ele fosse composto por partículas. Apenas uma partícula por vez passaria pelo divisor.

Assim, em princípio parece fácil distinguir se o som tem comportamento de onda ou de partícula. O experimento que propomos é o seguinte: murmure algo na entrada do divisor de som e pergunte a duas pessoas com ouvidos próximos às saídas se elas escutaram o que você disse. Se o som for uma onda, as duas pessoas irão ouvir o que dissemos (veja a Figura 10). Se for um conjunto de partículas, o comportamento pode ser bem diferente. Isso ocorre se o som for tão fraco que apenas uma dessas partículas percorre o divisor por vez. Nesse caso o som emitido não será percebido simultaneamente pelos dois ouvintes: quando um escuta a partícula sonora o outro não ouve nada (veja a Figura 11). Chamamos esse efeito de *antico incidência*.

O resultado do experimento descrito acima é o esperado. *As duas pessoas na saída do divisor sempre escutam o som ao mesmo tempo, não importa quão fraco ele seja (a menos de questões de acuidade auditiva).*

O resultado obtido nos garante que o som é uma onda? Talvez não. Se tivéssemos observado *antico incidência* nos sons de saída, poderíamos garantir que o som é composto de partículas. Infelizmente o oposto não é verdadeiro; a observação da *coincidência* não prova que o som seja uma onda. Podemos não ter sido capazes de produzir um som tão fraco que deixasse passar pelo divisor apenas uma partícula por vez. Se nossa voz corresponde sempre a muitas partículas, mesmo quando fraca, podemos esperar que aproximadamente metade dessas partículas siga um caminho no divisor e a metade restante tome o outro caminho. Essa situação está descrita na Figura 12.

As alternativas encontradas no experimento do divisor de feixe estão re-

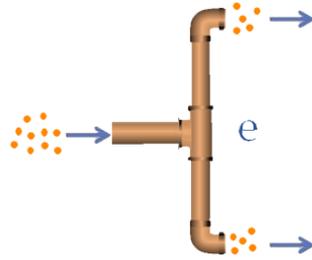


Figura 12: Comportamento do som forte, caso ele fosse composto por muitas partículas. Metade das partículas sairia por um tubo e metade pelo outro.

sumidas na Tabela 2. Vemos claramente que um resultado conclusivo só seria possível com a observação da anticoincidência. Como observamos a coincidência, não podemos decidir apenas com esse experimento se o som é onda ou partícula.

	onda	uma partícula de cada vez	muitas partículas ao mesmo tempo
coincidência	✓		✓
anticoincidência		✓	

Tabela 2: Possíveis resultados do experimento com o divisor de feixe.

5.2 O interferômetro sonoro

Embora a experiência com o divisor não tenha revelado qual é a natureza do som, há outra maneira de distinguir ondas de partículas: a observação de interferência. Como já discutimos, ondas que chegam a um mesmo local por caminhos diferentes podem se cancelar ou reforçar, em processos que chamamos de interferência destrutiva ou construtiva. Por outro lado, duas partículas que chegam simultaneamente a um mesmo local por caminhos diferentes jamais são “canceladas”: 1 partícula mais 1 partícula é sempre igual a 2 partículas, nunca 0 partículas.

Um aparato que divide um som em dois feixes que seguem caminhos diferentes e se reencontram mais à frente está representado na Figura 13. A montagem desse aparato consiste essencialmente na junção de dois divisores de feixe semelhantes ao discutido na seção anterior. O primeiro divide o som

em dois caminhos e o segundo, funcionando em sentido reverso ao primeiro, reagrupa os dois feixes em uma única saída. Esse instrumento é chamado de *interferômetro*. Os dois ‘braços’ do interferômetro (os dois caminhos do som) podem ter tamanhos diferentes. A diferença de caminhos é ajustada variando a distância d mostrada na Figura 13.

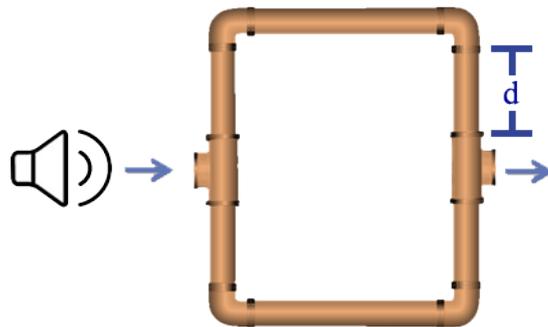


Figura 13: O interferômetro sonoro. A diferença de caminhos entre os braços superior e inferior pode ser ajustada variando a distância d .

Se o som que entra no interferômetro é composto de partículas, sempre as veremos sair em mesmo número pelo lado direito. Conforme vimos, partículas não sofrem interferência. Em cada braço o número delas é cerca da metade das que entraram no aparelho e ao se reencontrarem na saída a quantidade inicial é recomposta. A Figura 14 ilustra essa situação.

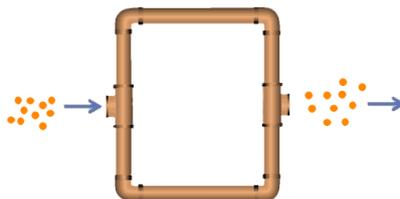


Figura 14: Comportamento esperado ao jogar partículas no interferômetro.

Em contraponto, se o som for uma onda, ao entrar no interferômetro ele pode ou não sair pelo lado oposto. Essas situações, que correspondem à interferência construtiva ou destrutiva, estão ilustradas na Figura 15. O caso da interferência destrutiva é particularmente notável: som mais som produziria silêncio!

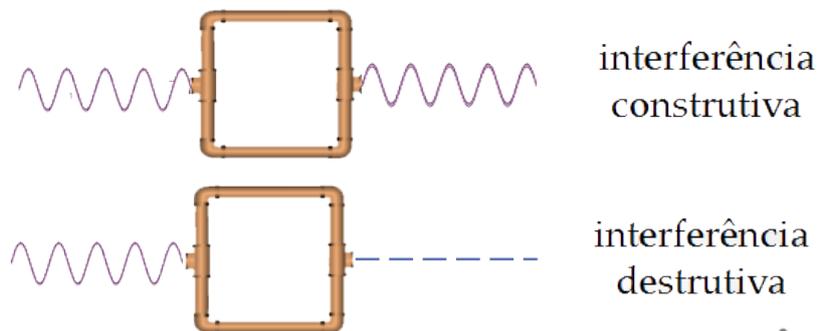


Figura 15: Interferência construtiva e destrutiva, caso o som seja uma onda

Os possíveis resultados desse experimento podem ser vistos de maneira resumida na Tabela 3 (compare com a Tabela 2 para o divisor de feixe).

	onda	partícula
interferência observada	✓	
interferência não observada		✓

Tabela 3: Possíveis resultados do experimento com o interferômetro sonoro.

A experiência é executada da seguinte maneira. Um som agudo e contínuo é gerado na entrada do interferômetro¹. Então, alterando o tamanho de um dos braços (a distância d na Figura 13) e procuramos por situações que possam ser caracterizadas como interferência destrutiva, ou seja, há som na entrada mas não se ouve nada na saída.

O resultado do experimento revela essas situações. Para alguns tamanhos do braço pode-se perceber que nenhum som (ou muito pouco) sai do interferômetro, apesar da intensidade sonora na entrada ser alta. Isso pode ser notado com os próprios ouvidos²; um registro mais permanente pode ser obtido gravando o som para várias diferenças de caminho. Um exemplo de gravação está na Figura 16, que mostra o gráfico da amplitude da onda sonora para diferentes distâncias. Regiões de interferência destrutiva estão

¹Aplicativos para *smartphones* e computadores ou até mesmo páginas na internet podem ser utilizados para produzir o som, que é levado ao interferômetro com auxílio de fones de ouvido. A frequência do som que usamos foi da ordem de 2 kHz.

²Em ambientes grandes pode ser útil empregar amplificadores portáteis como os usados por professores ao dar aulas.

indicados pelas setas.

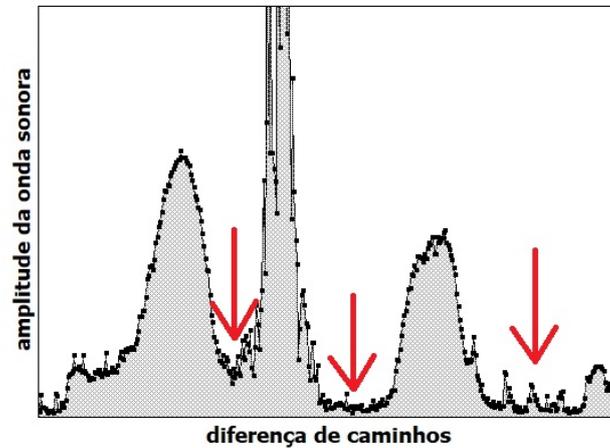


Figura 16: Amplitude da onda sonora para diferentes tamanhos de um braço do interferômetro. As setas indicam pontos de interferência destrutiva.

O resultado do experimento nos leva a concluir sem dúvidas que o *som é uma onda*. Se o som fosse composto de partículas não observaríamos fenômenos de interferência.

6 Luz: a dualidade onda-partícula

Com a experiência adquirida no estudo da natureza do som, podemos realizar uma investigação semelhante em outro fenômeno natural, a luz. A pergunta se repete: a luz é formada por ondas ou por partículas? Responderemos a essa questão realizando experimentos similares aos anteriores. Infelizmente os experimentos com a luz não são tão fáceis de realizar quanto os do som, pois exigem equipamentos sofisticados. Por isso recorreremos a simulações em computador desses experimentos.

6.1 O divisor de luz

No caso do som, nosso primeiro experimento envolveu um divisor de feixe sonoro. Faremos o mesmo no caso da luz, começando por um experimento com um divisor de feixe luminoso (um *divisor de luz*). Um esquema desse

divisor está mostrado na Figura 17. Ele é basicamente um espelho semitransparente (um *semi-espelho*) que separa a luz incidente sobre ele em uma parte refletida e outra transmitida, ambas de mesma intensidade. Na Figura 17 há um segundo espelho, esse completamente refletor, cuja função é tornar paralelos os feixes refletido e transmitido.

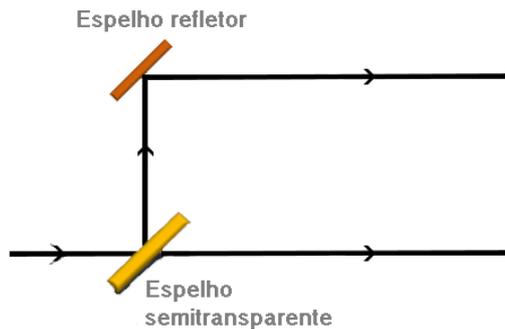


Figura 17: Esquema de um divisor de luz. Esse é essencialmente um espelho semitransparente que separa o feixe incidente em dois feixes de igual intensidade, um refletido e outro transmitido.

Semi-espelhos não são tão estranhos quanto parecem, qualquer vidro é capaz de realizar algo parecido. Uma vitrine de loja, por exemplo, permite que a gente veja o interior da loja e às vezes nosso reflexo também, dependendo da iluminação. Entretanto, nem sempre as intensidades refletida e transmitida por um vidro comum são iguais.

No caso da luz ser composta de partículas, o comportamento esperado está representado na Figura 18. Esse comportamento, assim como no caso som, se baseia nas características das partículas clássicas que já discutimos e que se encontram resumidas na Tabela 1. Como metade da luz é refletida e a outra metade é transmitida, e como partículas seguem apenas um caminho, ao encontrar o semi-espelho uma partícula possui 50% de chance de ser refletida e 50% de ser transmitida.

Por outro lado, no caso da luz ser composta de ondas, o que esperamos é que a onda incidente seja dividida em duas partes, uma que é refletida e outra que é transmitida pelo semi-espelho, como ilustrado na Figura 19. Cada uma dessas partes possui metade da intensidade luminosa da luz incidente.

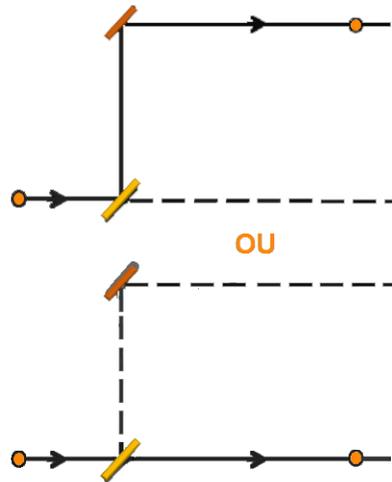


Figura 18: Comportamento da luz no divisor, no caso dela ser composta por partículas. Cada partícula ou é refletida ou é transmitida.

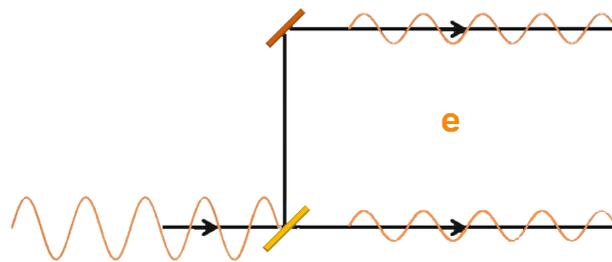


Figura 19: Comportamento da luz no divisor no caso dela ser composta por ondas.

Vamos analisar o experimento com auxílio de uma simulação computacional, mostrada na Figura 20. Essa simulação foi desenvolvida por nós e pode ser acessada do seu computador ou *smartphone* através do link <https://bit.ly/2YsoGng>.

No canto superior esquerdo da tela da simulação existem duas opções: “Fóton” e “Laser”. Elas representam dois tipos de fontes de luz que podemos utilizar na simulação. Se selecionarmos a opção “Laser”, utilizaremos em nosso experimento uma fonte de luz *intensa*.

O feixe de luz proveniente da fonte Laser, ao atingir o semi-espelho, é separado em duas partes de igual intensidade que chegam ao detectores 1

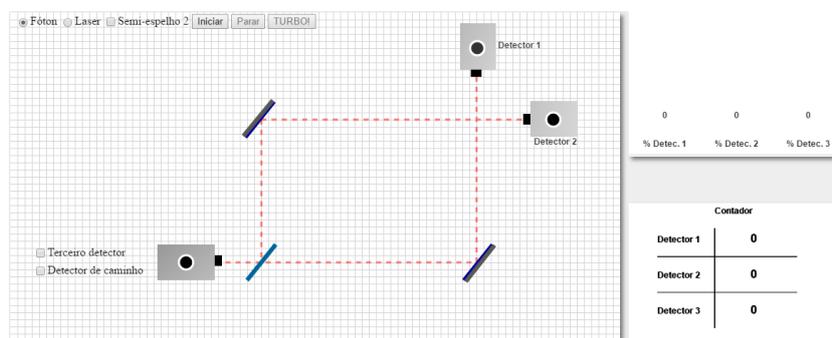


Figura 20: Simulação computacional do divisor de luz. Os círculos pretos na fonte e nos detectores são lâmpadas que, se acesas, indicam a atividade desses instrumentos.

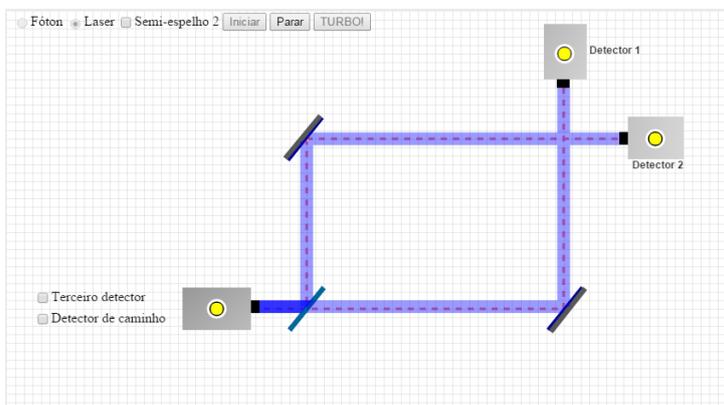


Figura 21: Comportamento da luz no divisor de feixe ao utilizar a fonte “Laser”. Repare que a luz chega simultaneamente aos dois detectores, como indicam as ‘lâmpadas’ amarelas acesas. A lâmpada acesa na fonte indica que essa está ligada.

e 2 simultaneamente. Na Figura 21 a ‘lâmpada’ amarela acesa nos dois detectores indica que ambos estão recebendo luz no mesmo instante. Embora esse resultado seja semelhante ao comportamento descrito na Figura 19, como já discutimos no caso do som ele não garante que a luz seja um fenômeno ondulatório. Ainda existe a possibilidade da fonte de luz ser tão intensa que muitas partículas são emitidas ao mesmo tempo. Nesse caso o semi-espelho separaria essas partículas em dois grupos aproximadamente iguais que chegariam nos detectores praticamente no mesmo instante. Como vimos na Tabela 2 a observação de coincidência nos dois detectores é ambígua: tanto

partículas (em grandes números) quanto ondas levam ao mesmo resultado.

Uma fonte de luz *muito fraca* remediará o problema; nesse caso a observação de anti-coincidência garantiria que luz é composta de partículas (veja novamente a Tabela 2). Na simulação essa fonte de baixíssima intensidade corresponde à opção “Fóton” (explicaremos o que esse nome significa a seguir). Na prática essa é uma fonte sofisticada – não é uma simples lâmpada fraca – e representa uma das principais dificuldades para a reprodução desse experimento em um laboratório didático.

Quando executamos a simulação com a fonte Fóton, o resultado que encontramos é a anti-coincidência: a luz nunca chega aos dois detectores no mesmo instante. Isso é ilustrado na Figura 22 que mostra apenas um dos detectores sendo acionado num dado instante. Como já discutimos (veja a Tabela 2), essa observação garante que a luz tem comportamento de partícula. Chamamos essas partículas de *fótons*, e daí deriva o nome da fonte utilizada. Para ser mais exato, essa fonte é chamada de fonte “fóton-a-fóton”, pois com ela sabemos que existe apenas um fóton por vez entrando no divisor de luz.

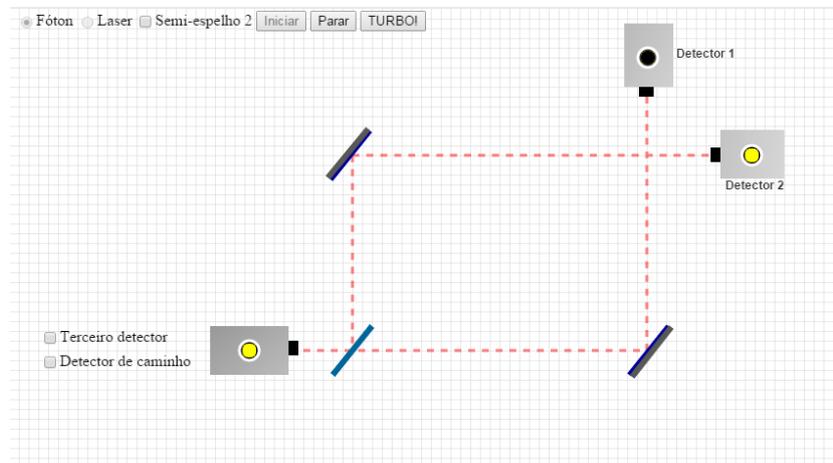


Figura 22: Comportamento da luz no divisor ao utilizar a fonte “Fóton”. Repare que, num dado instante, o detector 2 acusa a presença de luz e o detector 1 permanece no “escuro” (o inverso também ocorre), indicando a anti-coincidência.

Apesar da situação parecer resolvida – a luz tem comportamento de par-

tícula –, é interessante testar esse comportamento fazendo a luz fóton-a-fóton passar por um interferômetro. Do que sabemos sobre partículas, não esperamos observar quaisquer fenômenos de interferência, certo? Pelo menos é isso que está na Tabela 3. Entretanto, o resultado é surpreendente.

6.2 O interferômetro de luz

Na simulação, o divisor de feixe pode ser transformado em um interferômetro selecionando a opção “semi-espelho 2”, que introduz um segundo semi-espelho no ponto onde os dois feixes se cruzam, como se pode ver na Figura 23. Esse tipo de interferômetro é conhecido como “interferômetro de Mach-Zehnder” em homenagem aos cientistas que primeiro sugeriram e utilizaram o aparato.

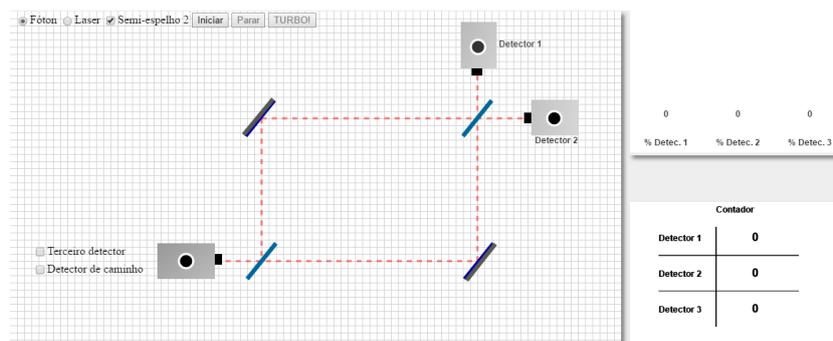


Figura 23: Simulação computacional do interferômetro de Mach-Zehnder.

De acordo com o resultado obtido anteriormente – que a luz se comporta como partícula, o fóton – não deveríamos encontrar nenhum fenômeno de interferência nesse novo experimento. A luz deveria chegar com igual probabilidade aos dois detectores, ora em um, ora noutro. Isso é ilustrado na Figura 24, que mostra os quatro caminhos que o fóton pode seguir no interferômetro. Esses caminhos são igualmente prováveis já que um fóton tem igual probabilidade (50%) de ser refletido ou transmitido pelos semi-espelhos. É fácil ver que, dessa forma, na metade das vezes os fótons irão para um detector e na metade restante irão para o outro.

O resultado do experimento computacional, contudo, é completamente contrário a essa expectativa: a luz chega *sempre* ao mesmo detector (no

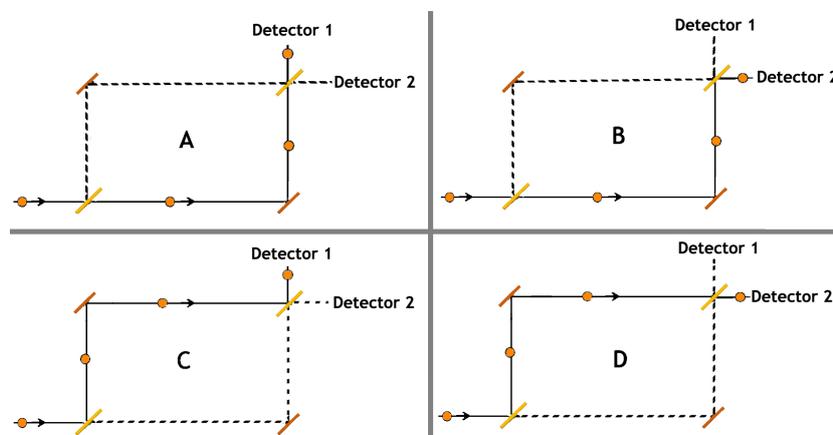


Figura 24: Comportamento esperado da luz no interferômetro, no caso dela se comportar como partícula. A probabilidade do fóton seguir um dos 4 caminhos (indicados como *A*, *B*, *C* e *D*) é 25%. Como os caminhos *A* e *C* levam ao detector 1, a probabilidade de um fóton chegar a esse detector deveria ser 50%. Da mesma maneira, a probabilidade de chegar ao detector 2 (caminhos *B* e *D*) também seria 50% .

caso, o detector 2). Isso é impossível de compreender se a luz for composta de partículas, pois não existe nenhum motivo que as impeça de seguir dois dos quatro caminhos mostrados na Figura 24. O que impede os fótons que seguiram os caminhos *A* e *C* de chegarem ao detector 1? Por estranho que pareça, temos aqui algo que se assemelha a um fenômeno de interferência destrutiva: luz pelo caminho *A* mais luz pelo caminho *C* resulta em nenhuma luz (escuro) no detector 1. Essa interferência indica que a luz deveria ser um fenômeno ondulatório (vide Tabela 3).

De fato, o resultado do experimento no interferômetro é facilmente entendido se a luz for uma onda. Nesse caso é possível explicar o fato dela chegar persistentemente ao mesmo detector e nunca ao outro: são efeitos de interferência construtiva e destrutiva, respectivamente. Isso está ilustrado na Figura 25. O lado esquerdo da figura mostra o interferômetro completo e nele vemos que a onda luminosa proveniente da fonte é separada pelo primeiro semi-espelho em duas ondas de igual intensidade (a refletida e a transmitida) que se reencontram no segundo semi-espelho. O resultado desse reencontro é mostrado no detalhe à direita da Figura 25. Cada uma das ondas que

atingem o segundo semi-espelho (identificadas por linhas contínuas) é separada em duas outras ondas, uma refletida (linha contínua) e uma transmitida (linha tracejada). Essas últimas se superpõem duas a duas em cada saída, como mostra a Figura 25. Essa superposição de feixes é que gera a interferência das ondas. Ajustando o tamanho dos braços do interferômetro podemos obter, por exemplo, interferência destrutiva no detector 1 e construtiva no 2, como está na Figura 25 e como encontramos no experimento computacional.

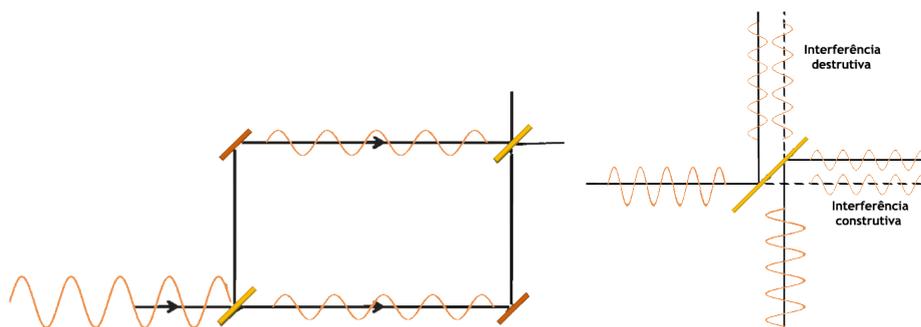


Figura 25: Comportamento de uma onda luminosa no interferômetro de Mach-Zehnder. A imagem à esquerda mostra a separação da onda incidente no primeiro semi-espelho. O detalhe à direita descreve a recombinação realizada pelo segundo semi-espelho e a consequente interferência nas saídas do instrumento.

Esse é um resultado *muito* surpreendente. Afinal, se no experimento com o divisor de luz havíamos chegado à conclusão que a luz é composta por fótons, como essas partículas podem agora apresentar comportamento típico de uma onda? Esses dois conceitos não eram incompatíveis?

A conclusão que se pode tirar desse comportamento estranho é que a luz não é nem onda nem partícula. Às vezes ela se comporta como onda, outras vezes como partícula, dependendo da situação em que se encontra. Não há nada na física clássica ou em nossa experiência cotidiana que apresente comportamento semelhante; não temos sequer uma palavra para descrever isso. O melhor que pudemos fazer foi inventar a expressão *dualidade onda-partícula*, que no fundo expressa o “estado de confusão” (nas palavras de Richard Feynman³) no qual fomos colocados pelos experimentos com a luz.

³Um dos mais importantes cientistas do século XX, ganhador do Prêmio Nobel de

Embora tenhamos encontrado a dualidade onda-partícula em experimentos com fótons, ela não se restringe somente a eles. Elétrons, prótons, nêutrons, átomos e moléculas também apresentam comportamento dual: em determinadas situações se apresentam como partículas (que é o que imaginávamos que fossem) e em outras como ondas.

Deve ser enfatizado que a expressão dualidade onda-partícula é apenas o nome que damos ao comportamento estranho da luz. Não é uma explicação desse comportamento, como muitas vezes vemos em materiais de divulgação científica e mesmo em livros didáticos. A explicação (ou descrição) desse comportamento é encontrada na mecânica quântica, a teoria que substituiu a física clássica no estudo do mundo microscópico.

7 Uma aplicação da dualidade: o experimento de Elitzur-Vaidman

O comportamento dual da luz não é apenas uma curiosidade científica. Ele nos permite realizar coisas que seriam impossíveis no contexto da física clássica. Um exemplo é o problema do *testador de bombas*, proposto em 1993 por dois físicos, A. Elitzur e L. Vaidman⁴.

Imagine uma coleção de bombas, algumas “boas” e outras “ruins”. Todas as bombas possuem um sensor de luz ultrasensível, capaz de detoná-las ao absorver um único fóton. Nas bombas boas o sensor funciona. Nas ruins ele tem um defeito: o fóton passa direto e a bomba não explode. O problema proposto por Elitzur e Vaidman foi: como preparar um lote contendo apenas bombas boas?

À primeira vista, nossa experiência cotidiana (“clássica”) indica que o único jeito de identificar uma bomba boa é incidir luz sobre ela e observar se irá explodir ou não. Isso aponta as bombas boas mas as inutiliza, pois todas serão explodidas. O que obteremos por esse processo será apenas um

Física em 1965.

⁴Um artigo de divulgação científica (infelizmente em inglês) sobre o assunto é *Quantum Seeing in the Dark*, de P. Kwiat, H. Weinfurter e A. Zeilinger. Está na revista *Scientific American* de novembro de 1996, pg. 72.

conjunto de bombas que já explodiram com bombas que jamais explodirão.

Existe, porém, uma maneira de resolvermos esse problema utilizando a dualidade onda-partícula. Vamos supor que uma dessas bombas é colocada num dos braços de um interferômetro de Mach-Zehnder, conforme vemos na Figura 26.

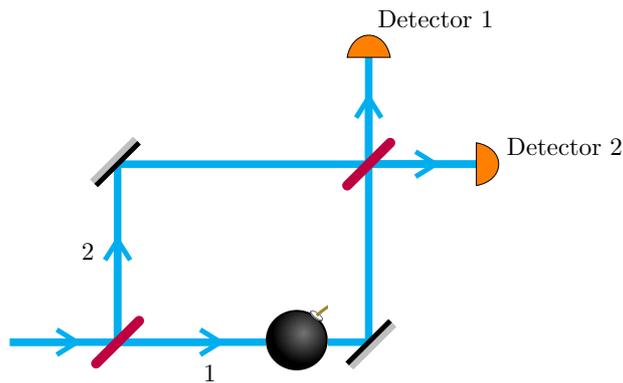


Figura 26: Representação da colocação de uma bomba em um dos braços do interferômetro de Mach-Zehnder. Conforme veremos, essa bomba poderá, ou não, representar um obstáculo ao caminho do fóton nesse braço.

Se a bomba for ruim ela não será vista pelos fótons e por isso não alterará em nada o funcionamento do interferômetro. Supondo que esse seja o mesmo aparato virtual utilizado na seção anterior, todos os fótons irão para o segundo detector, conforme vemos na Figura 27. Em suma, se a bomba for ruim o detector 1 não será acionado.

Caso a bomba esteja boa, ela obstrui um dos braços e impede o estabelecimento de interferências nos detectores. Com isso voltamos a uma situação em que a luz comporta-se como partículas, cujas trajetórias passam sucessivamente pelos dois divisores de feixe. Ao chegar ao primeiro semi-espelho o fóton terá 50% de chance de ser transmitido e ir diretamente para a bomba e explodi-la. Os outros 50% serão refletidos, seguindo pelo caminho livre sem explodir a bomba. Ao chegar ao segundo divisor de feixe metade desses fótons (25% do total) será transmitida em direção ao detector 2 e a outra metade (25% do total) será refletida para o detector 1.

Temos então duas situações. Caso a bomba esteja *ruim*, o detector 1

as quais o detector 1 foi acionado e teremos um lote de bombas boas. A Tabela 4 resume as alternativas que levaram a essa solução.

detector 1	detector 2	explosão
Se o fóton chega aqui, sabemos que bomba está boa e intacta.	Se o fóton chega aqui, não sabemos dizer se a bomba está boa ou ruim.	Se a bomba explode, ela era boa, mas agora é inútil.

Tabela 4: Possíveis resultados do teste de Elitzur-Vaidman e as conclusões que podemos tirar deles.

Esse processo não parece muito eficiente pois, como vemos da Figura 28 e correspondente discussão, apenas 25% das bombas boas produzem um sinal no detector 1. Metade (50%) das bombas boas é detonada, e 25% geram um sinal no detector 2, que não as identifica como necessariamente boas. Entretanto, essa eficiência deve ser contrastada com a do método “clássico” que é 0%, ou seja, nenhuma bomba boa ficaria intacta. A dualidade onda-partícula nos permitiu realizar algo que parecia impossível do ponto de vista clássico, separar um lote contendo apenas bombas boas. Além disso a eficiência da identificação pode ser melhorada testando novamente as bombas que levaram o detector 2 a disparar⁵.

É interessante notar que obtemos a informação que uma bomba é boa sem interagir com ela (do contrário ela explodiria); o fóton que “descobre” que a bomba é boa não passa pelo caminho que ela ocupa. Essa *medida sem interação* seria impossível na física clássica mas já foi realizada em laboratório⁶.

⁵É fácil ver que repetindo o teste sempre que houver dúvida podemos identificar $1/3$ das bombas boas, pois $1/4 + 1/4^2 + 1/4^3 + \dots = 1/3$.

⁶O experimento está descrito no artigo *Interaction-free Measurement*, de P. Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger e M. Kasevich, publicado em 1995. Está na revista *Physical Review Letters*, vol. 74, pg. 4763.

8 O caminho do fóton

A expressão “dualidade onda-partícula” contradiz a si própria: os conceitos clássicos de onda e partícula não são intercambiáveis. Seu uso reflete a surpresa que sentimos ao descobrir que sistemas microscópicos não podem ser definidos por esses conceitos. As limitações desse uso manifestam-se, por exemplo, quando tentamos explicar porque a luz se comportou como onda ou como partícula em determinado experimento. Quase sempre essa explicação é *a posteriori*, baseada no resultado do experimento. Entretanto, como veremos a seguir, há uma forma mais produtiva de explicar ou mesmo prever o comportamento da luz, baseada na distinguibilidade ou indistinguibilidade dos caminhos que ela percorre na situação considerada.

Para entender o que queremos dizer, voltemos ao interferômetro de Mach-Zehnder e à discussão em torno da Figura 24. Lá vimos que um fóton pode chegar a um dos detectores por dois caminhos – os caminhos B e D levam ao detector 2 e A e C ao detector 1. A ideia clássica de partícula diz que um fóton que chegou ao detector 2, por exemplo, fez isso percorrendo um único caminho, *ou B ou D* (veja as propriedades de partículas listadas na Tabela 1).

Como a noção de partícula mostrou-se incapaz de descrever o resultado do experimento, tivemos que abandoná-la e recorrer ao modelo ondulatório. Esse último descreveu o resultado experimental como um efeito de interferência, que só ocorre porque uma onda pode percorrer dois caminhos simultaneamente, no caso os dois braços do interferômetro. Se a luz percorresse apenas um dos braços, como faria uma partícula, não haveria interferência.

Com o que sabemos até agora, se não tivéssemos conhecimento do resultado final seria difícil prever qual dos dois modelos, onda ou partícula, deveria ser utilizado. É aqui que o conceito de indistinguibilidade de caminhos mostra sua utilidade. O experimento em que tivemos que adotar o modelo ondulatório corresponde à situação em que os caminhos tomados por uma partícula seriam indistinguíveis. Se um fóton chega, por exemplo, ao detector 2, não há nada no experimento que nos permita saber se ele percorreu o caminho B ou o caminho D . A indefinição do caminho parece

estar associada à observação da interferência e, de fato, esse é um resultado geral: se o experimento não produzir informação que permita distinguir qual caminho a luz tomou, encontraremos fenômenos de interferência, ou seja, a luz se comportará como uma onda o faria.

O contrário também é verdade. Se o experimento criar registros do caminho seguido pela luz, ela se comportará como partícula. Podemos ver isso adicionando ao interferômetro de Mach-Zehnder um “detector de caminho”. Na nossa simulação esse detector consiste de uma “mola” acoplada a um dos espelhos do interferômetro, como mostra a Figura 29. Vamos supor que essa mola seja ultrasensível, capaz de registrar a reflexão de um único fóton. O novo detector torna possível distinguir o caminho seguido pelo fóton. Se a mola for colocada em vibração, o caminho será aquele que passa pelo espelho a ela acoplado (o braço inferior do interferômetro na Figura 29); caso contrário, o caminho só poderá ser o outro (o braço superior).

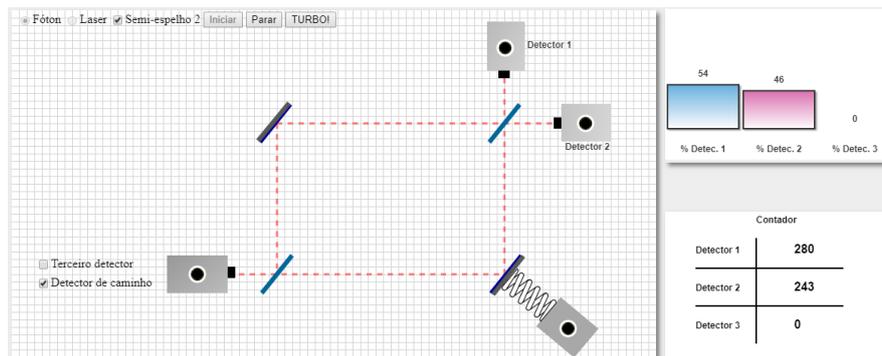


Figura 29: O interferômetro de luz com o detector de caminho acoplado ao espelho do caminho 1.

Quando realizamos a experiência com o detector de caminho do fóton, a interferência que havíamos observado anteriormente desaparece. Os fótons chegam em igual número aos dois detectores, sempre em anticoincidência. Não há mais uma interferência que os impeça de chegar ao detector 1. Isso pode ser visto no gráfico de barras apresentado no canto direito da Figura 29, que indica a porcentagem de fótons que chegaram em cada detector (cerca de 50%).

Esse resultado apresenta uma faceta muito interessante da dualidade

onda-partícula: sua relação com a dicotomia indistinguibilidade-distinguibilidade de caminhos. Quando trabalhamos com o interferômetro, ou seja, quando em princípio não possuíamos informação sobre qual caminhos o fóton percorreu, encontramos um comportamento que caracterizamos como ondulatório. Quando introduzimos o detector de caminho essa informação passou a existir e a luz apresentou comportamento semelhante ao de partículas.

Em resumo, isso significa que se um resultado pode ser obtido de duas maneiras diferentes e *indistinguíveis*, observaremos algo que podemos chamar de interferência (ou melhor, “interferência quântica”). Se essas duas maneiras forem *distinguíveis*, não haverá interferência.

Esses resultados colocam em uma nova perspectiva a dualidade onda-partícula. Experimentos de “qual-caminho” como o que acabamos de descrever sugerem que outra dualidade, distinguível *versus* indistinguível, possa ser mais útil e reveladora⁷.

⁷Outros experimentos, como o de “escolha retardada” e o “apagador quântico”, mostram a mesma coisa. Mais detalhes sobre esses experimentos podem ser encontrados na monografia de H. Lima, *Experimentos de Escolha Retardada* (IF-UFRJ, 2013), disponível em <http://www.if.ufrj.br/~carlos/trablicen/hugo/monografiaHugoFinal.pdf>