

## Produtos e Materiais Didáticos

# Dualidade onda-partícula: um objeto de aprendizagem baseado no interferômetro de Mach-Zehnder

(*Wave-particle duality: a learning object based on the Mach-Zehnder interferometer*)

Michel Betz<sup>1</sup>, Ismael de Lima e Gabriel Mussatto

*Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil*

Recebido em 1/10/2008; Revisado em 17/4/2009; Aceito em 24/4/2009; Publicado em 16/9/2009

Apresentamos um recurso eletrônico destinado a apoiar o ensino e facultar o estudo independente da dualidade onda-partícula na física quântica. Seguindo outros autores, escolhemos o interferômetro de Mach-Zehnder como ilustração conveniente dos conceitos. O material está organizado em “objeto de aprendizagem”, cujo elemento central é uma animação interativa e comentada. Textos auxiliares apresentam o formalismo matemático subjacente bem como informações de caráter histórico, epistemológico e experimental. Três níveis de descrição são considerados sucessivamente na animação. O primeiro mostra o feixe na aproximação da óptica geométrica, enquanto o segundo analisa os aspectos puramente ondulatórios. O terceiro nível apresenta a visão corpuscular quântica, introduzindo pacotes de ondas associados a fótons individuais e explicitando a relação entre contagem e função de onda. A inserção de um detector num dos braços do instrumento permite discutir a clássica questão do caminho seguido pelo fóton. A animação apresenta visualizações dos ingredientes que fundamentam as descrições teóricas, tais como frentes de onda, deslocamentos de fase, sobreposições e separações de pacotes em componentes. Levando ao pé da letra a interpretação mais usual da mecânica quântica, exibimos na tela do computador o “colapso do estado” induzido pela observação. Acreditamos que tais visualizações teórico-conceituais complementam proveitosamente a simulação realista do dispositivo experimental desenvolvida por outros autores.

**Palavras-chave:** objeto de aprendizagem, dualidade onda-partícula, interferômetro de Mach-Zehnder.

We present an electronic resource aimed for supporting the teaching and allowing the independent study of wave-particle duality in quantum physics. Following other authors, we choose the Mach-Zehnder interferometer as a convenient illustration of the concepts. The material is organized as a “learning object”, the central element of which is an interactive and commented animation. Auxiliary texts present the underlying mathematical formalism as well as information of historical, epistemological and experimental nature. Three levels of description are considered successively in the animation. The first shows the beam in the approximation of geometric optics, while the second analyzes the purely ondulatory aspects. The third level presents the quantum-corpuscular view, introducing wave packets associated with individual photons and displaying the relation between counting and wave function. Inserting a detector in one arm of the instrument allows the discussion of the classical issue of the path followed by the photon. The animation presents visualizations of the ingredients which underlie theoretical descriptions, such as wave fronts, phase shifts, superpositions, and separations of wave packets into components. Taking literally the most usual interpretation of quantum mechanics, we exhibit on the computer screen the “state collapse” induced by observation. We believe that such theoretic-conceptual visualizations usefully complement a realistic simulation of the experimental device developed by other authors.

**Keywords:** learning object, wave-particle duality, Mach-Zehnder interferometer.

## 1. Introdução

A mecânica quântica constitui-se num farol indispensável para a visão atual do mundo físico. Como principal alicerce da descrição da estrutura da matéria, ela sustenta grande parte da pesquisa produzida nos nossos tempos. Inúmeras tecnologias modernas fazem uso de fenômenos que só podem ser compreendidos

à luz desta teoria. Por ser frequentemente percebida como misteriosa, ela também exerce um inegável fascínio sobre pessoas não especialistas, ou até completamente leigas. Por todas estas razões, o ensino da mecânica quântica, em especial no nível introdutório, tem sido objeto de constantes discussões e numerosas sugestões [1].

Contudo, a alfabetização em física quântica es-

<sup>1</sup>E-mail: betz@if.ufrgs.br.

barra em consideráveis dificuldades. O formalismo matemático necessário para o desenvolvimento da teoria faz uso incontornável de números complexos, espaços vetoriais, operações não-comutativas, e outras ferramentas sofisticadas. Mais crucialmente talvez, como nela lidamos com processos físicos em escalas muito pequenas, falta-nos a intuição que podemos ter, por exemplo, dos movimentos dos corpos rígidos ou das trocas de calor. Embora claramente formulada e amplamente comprovada experimentalmente, a mecânica quântica é muitas vezes rotulada de “incompreensível” [2] ou “paradoxal”.

Com a disseminação dos computadores de mesa na maioria das instituições de ensino e em muitos lares, novas opções de procedimento didático tornam-se possíveis. Imagens estáticas podem ser substituídas por animações bem mais ricas em informação. Em especial no ensino-aprendizagem de conceitos relativos a entidades e fenômenos físicos que estão além da nossa percepção direta, é natural recorrer a animações de computador na tentativa de tornar tais conceitos mais palpáveis.

Central na mecânica quântica, a dualidade onda-partícula desafia o entendimento. Separadamente, ondas e partículas são elementos familiares da nossa realidade. Mas como pode a mesma entidade ser onda e partícula? Em que sentido ela é onda, e em que sentido partícula? Estas questões permeiam qualquer introdução à física quântica.

O experimento de duas fendas [2] constitui-se no quadro canônico para a apresentação da dualidade e a análise das questões associadas. No nível clássico, ele é usualmente familiar, no mínimo a quem possui noções de óptica ondulatória. Pode-se aproveitar este ponto de partida para encaminhar a discussão em termos de fótons. Mas tratando-se de um recurso principalmente conceitual, pode-se igualmente considerar elétrons, começando com projéteis clássicos e “descobrimo” o aspecto ondulatório na figura de interferência formada pela distribuição de impactos. Porém, a necessidade de lidar com a sobreposição de ondas esféricas dificulta a análise matemática. Correspondentemente, não é fácil programar uma animação razoavelmente precisa de tais ondas, mesmo limitando-se a ondas circulares em propagação no plano da tela do computador.

O interferômetro de Mach-Zehnder tem sido utilizado por vários autores [3] como instrumento pedagógico no ensino dos conceitos da mecânica quântica. A principal vantagem é que, numa abordagem simplificada, pode-se assumir ondas planas em cada trecho do aparato. A discussão dos fenômenos de interferência pode ser feita simplesmente em termos de defasagens introduzidas por reflexão e passagem por um meio material.

Uma animação [4] da passagem da luz pelo interferômetro, disponível na rede Internet, apresenta a visão ondulatória na forma de pacotes de ondas es-

quemáticos. Já na visão corpuscular quântica, o fóton é visto entrando no aparato e sendo detectado na saída, mas o mistério - na forma de um ponto de interrogação aparecendo no meio da tela - é total a respeito daquilo que ocorre dentro do aparato.

Uma excelente simulação [5, 6] do interferômetro de Mach-Zehnder, também disponível na rede Internet, oferece uma visão tridimensional de uma bancada sobre a qual o usuário pode dispor filtros e contadores. O ponto de vista pode ser modificado por rotação do dispositivo. Este recurso tem sido traduzido para a língua portuguesa e aprimorado de várias maneiras por um grupo de pesquisadores [7] que incentivam a sua utilização no ensino brasileiro. A intenção dos autores é manifestamente de permitir ao aluno realizar experimentos virtuais como se ele estivesse no laboratório. Para tanto, o nível de descrição dos fenômenos de interferência vai além do mencionado acima e mostra os anéis formados sobre a tela de observação por raios não paralelos ao eixo do aparato. O preço a pagar é uma complexidade matemática essencialmente igual à do experimento de duas fendas. Aliás, foi demonstrado por estes autores [8] que o padrão de interferência observado no interferômetro de Mach-Zehnder é equivalente àquele produzido por duas fontes puntiformes coerentes.

Dada a qualidade deste simulador, pode-se perguntar qual a motivação para o desenvolvimento de outras animações. Encontramos tal motivação exatamente na distância, já mencionada, entre o formalismo matemático da mecânica quântica e a observação no laboratório. Neste, conta-se partículas ou observa-se a figura formada por seus impactos sobre uma tela. Já os ingredientes básicos da teoria são ondas de probabilidade, pacotes formados de tais ondas e sobreposições lineares de tais pacotes. Além disto, a discussão, inevitável na física quântica, do efeito da observação sobre o estado do sistema requer a intromissão de um terceiro ingrediente: a *interpretação*. Pode-se definir informalmente uma interpretação como uma ponte conceitual estabelecida entre os elementos da teoria e os fatos experimentais. Em especial na mecânica quântica, a interpretação deve explicitar a relação entre a obtenção de um dado resultado numa medida, ou observação, e a atribuição de um estado, ou mais precisamente uma função de onda, ao sistema. Existem várias interpretações [3] compatíveis com os dados e internamente consistentes, embora bastante diversas conceitualmente. Focamos no nosso trabalho a mais usual, conhecida como interpretação de Copenhague ou de Bohr e von Neumann [9, 10, 11]. Apenas mencionamos aqui as principais alternativas: a interpretação dos muitos universos ou do estado relativo [12, 13], e a interpretação da onda piloto ou das variáveis escondidas [14, 15]. O leitor poderá encontrar breves descrições destas interpretações, assim como outras referências, no material de apoio incluído no nosso objeto de apren-

dizagem.

É possível utilizar o simulador acima referido para ilustrar uma comparação entre interpretações da mecânica quântica [16]. Porém, o simulador é “neutro” em relação à interpretação, já que ele reproduz o que pode de fato ser observado no laboratório. Portanto, com este recurso, a comunicação de uma interpretação particular é apenas verbal (através de um texto que acompanha o programa), e não visual.

Por estas razões, acreditamos que o simulador realista [5, 7] pode ser proveitosamente complementado por animações de caráter principalmente teórico e conceitual, que procurem exibir na tela do computador – mesmo se de forma bastante simplificada – as entranhas da teoria e as peculiaridades associadas a uma dada interpretação.

O principal objetivo do presente trabalho é, portanto, de oferecer outra animação do interferômetro, que não se constitui num simulador, pois certamente não dará ao usuário a ilusão de estar no laboratório, mas distingue-se pelas seguintes características:

- *Exibição dos ingredientes da teoria* - Na nossa animação, o interferômetro é representado de maneira meramente esquemática, com propagação unidimensional em cada parte do instrumento. Em contrapartida, procuramos mostrar na tela do computador, não apenas aquilo que o experimentador observa, ou seja, a emissão pela fonte e a medição por detectores, mas também e principalmente aquilo que a teoria afirma estar acontecendo na propagação da luz pelo dispositivo inteiro. Na visão puramente ondulatória, a animação mostra a propagação das frentes de onda e as suas reflexões. É visível também a modificação do comprimento de onda na passagem pela lâmina introduzida num dos braços do instrumento para produzir uma defasagem controlável. Na descrição em termos de fótons, é mostrada a divisão do pacote de ondas em duas partes propagando-se separadamente em cada braço e na saída do aparato, cada parte correspondendo a uma fração da probabilidade unitária total.
- *Visualização de uma interpretação específica* - Explícitamos o “colapso” do estado no ato da medida, ou seja, a redução do pacote a uma única componente de probabilidade unitária. Ao assim fazer, estamos apresentando de maneira literal uma interpretação específica da teoria quântica, a interpretação de Copenhague. Evidentemente, o aluno-usuário está convidado a questionar o que ele observa sobre a tela do computador e a meditar sobre a distinção entre fato e interpretação.
- *Comparação de representações em escalas diferentes* - A propagação da luz no instrumento

é mostrada em três níveis de descrição: óptica geométrica, ondas planas monocromáticas e pacotes associados a fótons individuais. Além de discutir no material de apoio a relação entre eles, disponibilizamos um recurso visual na forma de uma lupa, que permite ao usuário observar os níveis ondulatório e corpuscular-quântico “abaixo” do nível geométrico. Evidentemente, tal artifício não teria seu lugar numa simulação realista dos procedimentos experimentais, mas acreditamos que, além de propiciar algum divertimento, ele facilita a compreensão.

- *Integração ao programa de explicações e orientações* - A utilização do software Flash da Adobe-Macromedia nos permite incorporar convenientemente ao programa textos explicativos curtos e sugestões de uso das animações que ficam automaticamente atualizados e apresentados na tela quando o aluno-usuário passa de uma visualização para outra.

Dois documentos mais extensos acompanham o programa, completando o objeto de aprendizagem. O primeiro esmiúça os detalhes da descrição matemática da propagação na luz em cada parte do aparato, considerando sucessivamente ondas planas e pacotes de ondas. O segundo contém algumas informações pertinentes a respeito de aspectos experimentais, assim como um breve apanhado das interpretações da mecânica quântica, destinado a fornecer uma orientação ao leitor interessado em consultar a literatura sobre este vasto tema. A leitura destes textos não é indispensável para compreender o conteúdo das animações.

## 2. Descrição do interferômetro

Utilizamos as convenções indicadas na Fig. 1 para referenciar as várias partes do interferômetro. Este é constituído de dois espelhos semi-refletores  $S_1$  e  $S_2$  e de dois espelhos totalmente refletores  $E_1$  e  $E_2$ . O feixe incide a  $45^\circ$  sobre todos os espelhos. Braços paralelos do aparato devem ter igual comprimento (entre espelhos).

Na saída do aparato estão colocados dois detectores  $D_1$  e  $D_2$ . Opcionalmente, pode-se colocar num dos caminhos do feixe um terceiro detector  $D_3$  e/ou uma lâmina transparente  $L$ . Os detectores atuam como medidores de intensidade ou como contadores de fótons, conforme o caso.

Supomos que os espelhos semi-refletores são simétricos e não absorvem a luz. Neste caso, mostra-se [17] que a componente de luz refletida sofre um deslocamento de fase de  $\pi/2$  ou  $\lambda/4$ , sendo  $\lambda$  o comprimento de onda. No caso de um espelho totalmente refletor, o deslocamento de fase depende do tipo de espelho [18]. Porém, como no interferômetro de Mach-Zehnder cada componente do feixe sofre necessariamente uma (e apenas uma) tal reflexão, basta que os dois espelhos sejam

do mesmo tipo para que se torne irrelevante o deslocamento de fase por eles introduzido. Para simplificar, supomos que cada espelho totalmente refletor também introduz um deslocamento de fase igual a  $\pi/2$ .

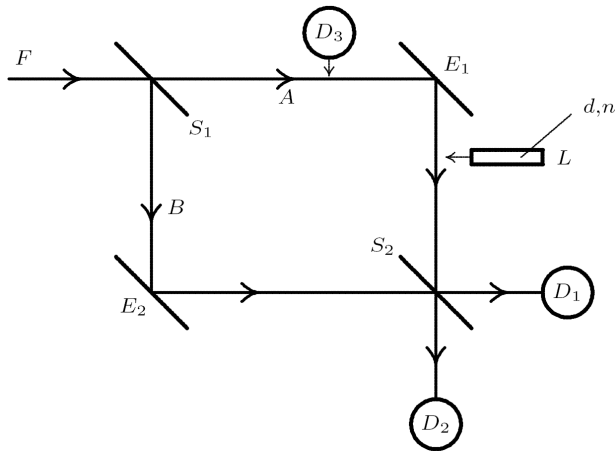


Figura 1 - Esquema do interferômetro.

Não consideramos efeitos de polarização neste trabalho. Deve-se supor portanto que a luz, produzida pela fonte Laser  $F$  já está num estado de polarização bem definido na entrada do aparato.

### 3. Organização do objeto de aprendizagem

O objeto de aprendizagem apresenta-se sobre a tela do computador como mostrado na Fig. 2. A animação encontra-se na metade direita da interface e o texto associado na metade esquerda. Debaxo de cada animação estão fornecidas algumas dicas de uso. Em caso de dúvida, o usuário pode abrir uma janela auxiliar oferecendo uma ajuda mais completa. Através do menu “extras”, ele pode a qualquer momento ter acesso ao formalismo matemático e consultar informações adicionais.

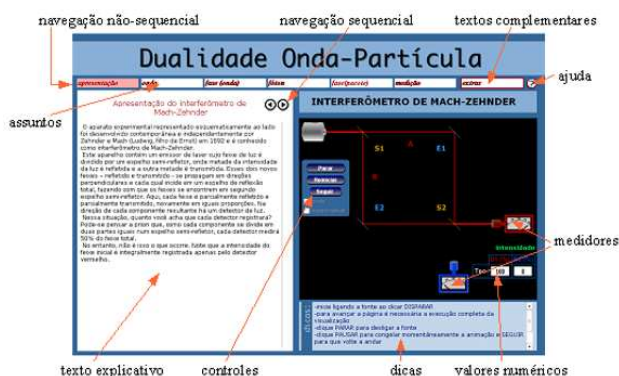


Figura 2 - Organização do objeto na tela.

Os seis primeiros botões da barra de menu correspondem a seis visualizações distintas que descrevemos

em mais detalhes na próxima seção. Como os assuntos abordados formam uma sequência, julgamos conveniente obrigar o aluno-usuário a percorrê-la sem pulos para a frente num primeiro estudo. Por isso, uma visualização só será habilitada caso a anterior já tiver sido executada. Evidentemente, está sempre permitido revisar um assunto já estudado, e após ter percorrido toda a sequência, pode-se rodar as animações em qualquer ordem.

## 4. Sequência de visualizações

Comentaremos agora brevemente cada visualização, destacando os aspectos que julgamos essenciais e mostrando algumas capturas de tela. Caso o leitor tiver ao seu alcance um computador ligado à rede Internet, poderá proveitosamente acessar o endereço [19] e executar as animações à medida que as apresentaremos.

### 4.1. Óptica geométrica

A primeira animação apresenta o feixe como uma linha contínua percorrendo o aparato, como visto na Fig. 2. Aqui como nas visualizações subsequentes, utilizamos o grau de opacidade (índice  $\alpha$  no linguajar da computação gráfica) para indicar a intensidade relativa dos feixes. Após divisão pelo primeiro espelho semi-refletor, cada componente do feixe possui 50% da intensidade total.

No texto que acompanha esta animação, pergunta-se ao aluno qual a sua expectativa a respeito das intensidades medidas. Apenas na base da divisão de um feixe incidente sobre um espelho semi-refletor em duas componentes de igual intensidade, o aluno provavelmente apostaria em 50% da intensidade inicial em cada medidor. Ao rodar a animação, ele constata que o detector  $D_1$  mede 100% da intensidade e o detector  $D_2$  nada. Evidentemente, para entender este resultado, é necessário analisar o aspecto ondulatório, o que encaminha o usuário para a próxima animação.

### 4.2. Interferência construtiva e destrutiva

Inicialmente, a segunda animação reproduz a primeira, mas o usuário dispõe de um recurso adicional: uma lupa que ele pode colocar em cima do feixe contínuo para verificar que este é na verdade um trem de ondas planas [veja a Fig. 3]. Clicando um botão, ele pode passar para a visão ondulatória completa, na qual as defasagens por  $\lambda/4$  introduzidas pelas reflexões são visíveis.

Para entender o resultado já observado na animação anterior, o aluno é convidado a contar o número de reflexões sofridas por cada componente do feixe, atribuindo uma defasagem de  $\lambda/4$  a cada uma delas. As ondas que alcançam o detector  $D_1$ , seguindo os caminhos  $A$  e  $B$  na Fig. 1, ambas sofrem duas reflexões. Portanto, acabam em concordância de fase e interferem

construtivamente. Já as ondas que alcançam o detector  $D_2$ , seguindo estes dois caminhos, sofrem uma e três reflexões, respectivamente. Portanto, acabam defasadas por  $\lambda/2$  e interferem destrutivamente. Assim fica claro porque a intensidade inicial está inteiramente recebida pelo detector  $D_1$ .

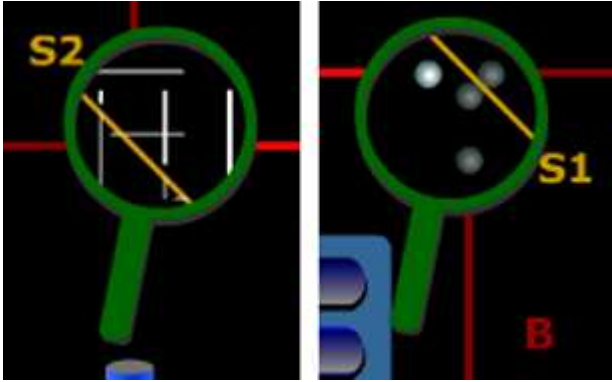


Figura 3 - A lupa permite enxergar os aspectos ondulatórios e corpusculares do feixe.

### 4.3. Controle da defasagem

Uma vez percebido o papel das interferências entre as componentes do feixe que percorrem cada braço do aparato e alcançam cada detector, o aluno desejará naturalmente estudar situações que generalizam a anterior. Para tanto, ele precisa de um recurso para controlar a diferença de fase entre as componentes. Isto é facilmente realizado introduzindo-se num dos braços uma lâmina feita de um material refrator.

É sabido que num meio material de índice de refração  $n$ , a velocidade da luz é  $c/n$ , sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo. O índice de refração do ar é praticamente igual à unidade, mas em meios materiais transparentes sólidos ou líquidos, é em geral significativamente maior. Já que a frequência  $f$  da onda não é afetada pelo material, este ocasiona uma modificação do comprimento de onda de  $\lambda$  para  $\lambda'$  dado por

$$\lambda' = \frac{c}{nf} = \frac{\lambda}{n}. \quad (1)$$

Correspondentemente, o número de onda muda de  $k$  para

$$k' = \frac{2\pi}{\lambda'} = nk. \quad (2)$$

Portanto, a presença de uma lâmina de material de espessura  $d$  ocasiona um deslocamento de fase dado por

$$\phi = (k' - k)d = (n - 1)kd. \quad (3)$$

Já que uma defasagem de  $2\pi$  corresponde a um comprimento de onda, podemos interpretar este resultado como um deslocamento ou atraso espacial das frentes de onda por

$$\varphi = \frac{\lambda}{2\pi}\phi = (n - 1)d. \quad (4)$$

Com a lâmina inserida num dos dois caminhos seguidos pelo feixe, as componentes que antes chegavam em fase no detector  $D_1$  agora chegam defasadas por  $\phi$  e verifica-se facilmente que a intensidade medida por este detector é

$$I_1 = I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2}, \quad (5)$$

onde  $I_0$  é a intensidade da fonte. As componentes que antes chegavam defasadas por  $\pi$  no detector  $D_2$  agora chegam defasadas por  $\pi + \phi$  e a intensidade medida por segundo detector é evidentemente

$$I_2 = I_0 \cos^2 \frac{\pi + \phi}{2} = I_0 \sin^2 \frac{\phi}{2}. \quad (6)$$

Antes de disparar a animação, o aluno pode ajustar o valor de  $d$  no intervalo  $[\lambda, 2\lambda]$  e o valor de  $n$  no intervalo  $[1, 2]$ . O programa mostra o valor de  $\varphi$  correspondente, calculado usando a Eq. (4). As intensidades correspondentes são apresentadas na tabela e nos mostradores [veja a Fig. 4]. O aluno atento poderá observar que o espaçamento entre as frentes de onda diminui na travessia da lâmina, conforme previsto pela Eq. (1).

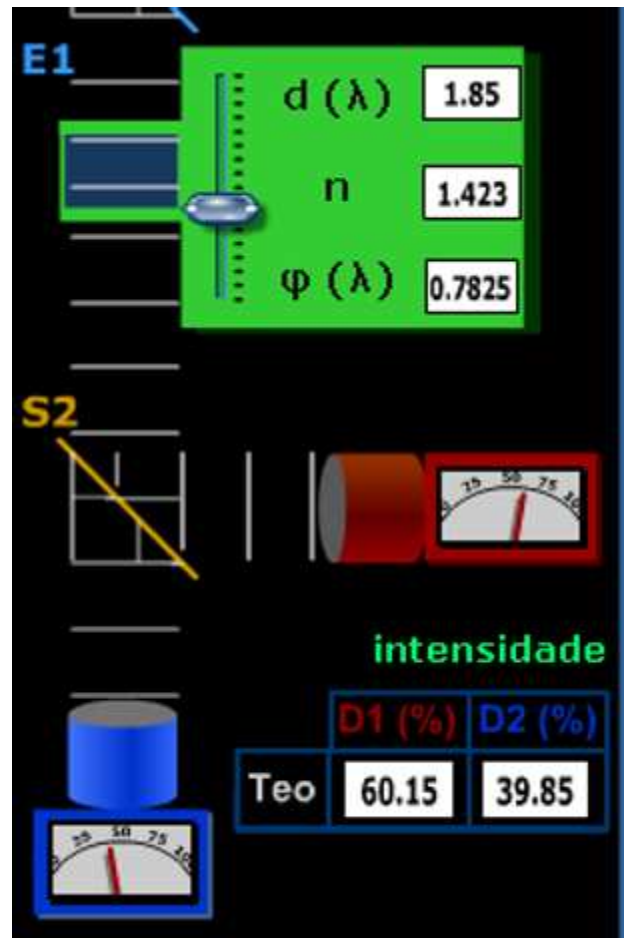


Figura 4 - Uma lâmina de espessura  $d$  e índice de refração  $n$  introduz uma defasagem  $\varphi$ .

#### 4.4. Fótons

Passa-se então ao estudo da visão quântica da radiação, na qual os aspectos corpusculares e ondulatórios estão ambos presentes. De novo, apresenta-se inicialmente a visão da óptica geométrica, com o recurso da lupa que, ao ser colocada em cima do feixe, tornará evidente o aspecto corpuscular quântico [veja a segunda parte da Fig. 3]. Associamos um pacote de onda de pequena extensão a cada fóton e representamos cada componente (aproximadamente) localizada por uma bolinha, cuja opacidade indica a probabilidade associada.

A representação de um estado monofotônico por uma função de onda não está livre de dificuldades [20] e tem sido criticada [21]. Porém, algumas propostas podem ser encontradas na literatura [22, 23]. Incluímos no material de apoio uma formulação simplificada, considerando apenas um pacote de ondas planas em movimento unidimensional, sujeitas numa reflexão à defasagem já discutida no quadro da teoria ondulatória clássica. Fornecemos também algumas informações a respeito do procedimento experimental utilizado para produzir estados monofotônicos [24].

Nas animações mostrando fótons, os medidores analógicos de intensidade colocados na saída do aparato são substituídos por contadores. Foi acrescentado um contador próximo à fonte para que o usuário possa conferir a contagem total. O aluno tem a opção de disparar os fótons um de cada vez clicando com o *mouse*, ou de deixar o programa injetar repetidamente fótons separados por um pequeno intervalo de tempo.

Ao encontrar o primeiro espelho semi-refletor o pacote incidente divide-se em duas componentes de pesos iguais (probabilidade 50%). Na primeira visualização no nível quântico, estas componentes propagam-se livremente pelos braços do aparato e ao reencontrarem-se no segundo espelho semi-refletor, recombina-se para rumar ao detector  $D_1$ . O detector  $D_2$  não registra nenhuma contagem. Assim, o aluno verifica, agora a nível quântico, os fenômenos de interferência construtiva e destrutiva já observados no nível clássico.

#### 4.5. Contagens e probabilidades

Na segunda visualização com fótons, aparece num dos braços do interferômetro a lâmina transparente, cuja espessura e cujo índice de refração podem ser ajustados pelo usuário. Como antes, limitamos a espessura máxima  $d_{max}$  da lâmina a dois comprimentos de onda. Estamos agora referindo-nos ao comprimento de onda médio  $\bar{\lambda}$  das ondas que constituem o pacote. Para que este seja razoavelmente localizado, a sua extensão deve ser bem maior que  $\bar{\lambda}$ . Como na animação o pacote é visível mas pequeno, segue que tanto  $\bar{\lambda}$  quanto  $d_{max}$  são invisíveis na mesma escala. Por esta razão, o aluno deve agora fazer uso da lupa para enxergar a lâmina.

Ao modificar as propriedades da lâmina, o aluno constata que a defasagem introduzida por esta deter-

mina as contagens relativas em  $D_1$  e  $D_2$ . A tabela colocada na proximidade dos detectores mostra a evolução destas contagens com a acumulação de eventos. O aluno pode verificar que elas aproximam-se, com flutuações cada vez menores, dos valores teóricos das probabilidades, dados evidentemente pelas Eqs. (5) e (6) (com  $I_0 = 1$ ) e também mostrados na tabela [veja a Fig. 5].

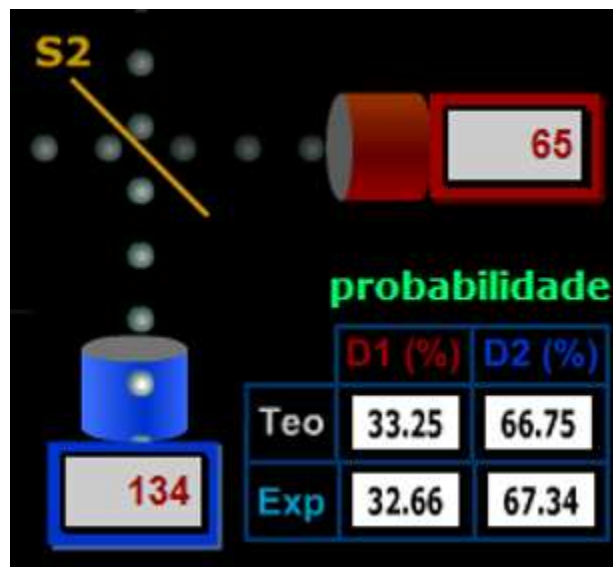


Figura 5 - Contagens de fótons e probabilidades teóricas.

Assim, o aluno pode familiarizar-se com o caráter repetitivo de um experimento quântico e compreender o significado estatístico da teoria. A opção de fluxo contínuo na animação é conveniente para acumular, sem demasiado tédio, um número de eventos suficiente para uma análise estatística confiável. O aluno pode, por exemplo, deixar o programa rodar enquanto ele lê o texto explicativo ou consulta o material de apoio.

#### 4.6. Observação e colapso do pacote de onda

Nas discussões conceituais da física quântica, surge inevitavelmente a questão do efeito da observação sobre o estado do sistema. No caso do interferômetro, como no caso do experimento de duas fendas, há dois caminhos possíveis entre a emissão pela fonte e a detecção final. Qual destes dois caminhos um determinado fóton segue?

Esta pergunta só fará sentido se ela puder ser respondida experimentalmente. Para tanto, coloca-se mais um detector, que denominamos  $D_3$ , no braço  $A$  do aparato. Supomos que este detector não absorve o fóton, apenas observa a sua passagem. Assumimos também que a sua eficiência é de 100%, ou seja, nenhum fóton escapa da observação. Se o detector  $D_3$  registra o fóton, deduz-se que este passou pelo braço  $A$ ; caso contrário, conclui-se que o fóton passou pelo braço  $B$ .

O que o aluno observa sobre a tela do computador pode ser visto na Fig. 6. Após passar por  $S_1$  mas antes de alcançar o detector  $D_3$ , o pacote está dividido em duas componentes de peso estatístico (opacidade na visualização) 50% cada. Se o detector registra o fóton, a componente no braço  $A$  passa a ter peso de 100% e a componente no braço  $B$  some. Se o detector não registra o fóton, apenas a componente no braço  $B$  permanece, com peso 100%.

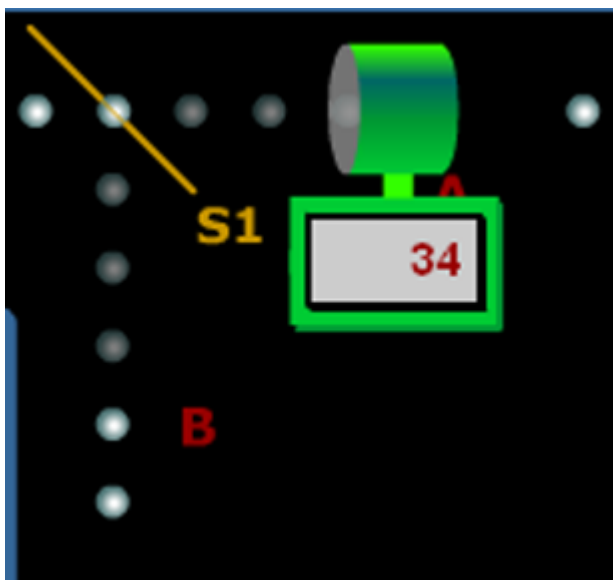


Figura 6 - Colapso do pacote de onda.

Assim, está representado explicitamente o famoso “colapso do pacote de onda” induzido pela observação. É a nossa esperança que, com a ajuda do texto explicativo que acompanha esta visualização, o usuário possa perceber a sua necessidade lógica, pelo menos no quadro conceitual da interpretação a mais usual da mecânica quântica. Acreditamos porém que o aluno será inevitavelmente levado a questionar a realidade deste processo, em especial no que diz respeito ao efeito “a distância” da não-detecção do fóton. Talvez inconformado, ele poderá buscar mais informação sobre interpretações no material auxiliar e nas referências ali contidas.

Após a observação pelo detector  $D_3$ , apenas uma das componentes do pacote sobrevive. Portanto, não há mais interferência e ao atingir o espelho semirefletor  $S_2$ , o pacote divide-se em duas partes de pesos iguais, que alcançam  $D_1$  e  $D_2$ , respectivamente. Estes dois detectores registram na média a metade do número total de fótons. Este resultado não é afetado pela lâmina transparente, que apenas introduz uma fase global não-observável.

No fim do texto associado a esta animação, chama-se a atenção do usuário para a ocorrência do colapso do pacote de ondas também nas detecções finais dos fótons. Aliás, uma pessoa observadora talvez já terá reparado este aspecto na visualização anterior, onde ele

também ocorre.

## 5. Avaliação pelos alunos

No intuito de fazer uma primeira avaliação da eficácia do material, este foi utilizado numa aula presencial da cadeira de introdução à física quântica da Licenciatura em Física da UFRGS. Além das reações e perguntas dos alunos durante a apresentação, procurou-se obter algum retorno através de um questionário que foi distribuído aos alunos. Embora o número de questionários recolhidos tenha sido insuficiente para um estudo sistemático, podemos destacar algumas tendências.

O recurso da lupa para explicitar a relação entre os níveis de descrição revelou-se bastante útil. A possibilidade de enxergar as descrições ondulatória e corpuscular “por baixo” da visão geométrica agradou aos alunos. A lupa, usada em conjunção com o ajuste da espessura da lâmina, também ajudou na percepção das escalas respectivas do comprimento de onda e do tamanho do pacote, embora nem todos os alunos tenham entendido esta relação. Talvez porque, por evidentes razões práticas, não foi explicitada na visualização a composição do pacote como sobreposição de ondas planas.

Na descrição corpuscular quântica, a relação entre o aspecto ondulatório e o aspecto corpuscular quântico parece ter sido geralmente compreendida. O papel da interferência na recomposição do pacote de onda foi aparentemente bem aceito. A interpretação das intensidades em termos de contagens de fótons também foi corretamente entendida. Nenhum aluno interpretou erroneamente a divisão do pacote como a quebra do fóton em dois pedaços.

Mais surpreendentemente talvez, a visualização “textual” do colapso do pacote de onda na medida não suscitou rejeição. Foi aceita como uma mera consequência da aquisição de informação na medida, confirmando que os alunos interpretam corretamente o pacote de onda em termos probabilísticos, e não como um objeto sobre o qual a medida poderia atuar misteriosamente a distância.

Deve-se ressaltar porém que, por estarem cursando a disciplina em questão, os alunos já tinham adquirido previamente certos conceitos de física quântica. Possivelmente, as reações de pessoas totalmente leigas seriam bem diferentes. Também não possuímos dados que permitam avaliar a eficiência do nosso recurso para o estudo individual.

## 6. Perspectivas

Apresentemos um “objeto de aprendizagem” destinado a introduzir, de maneira acessível, a dualidade onda-partícula. O interferômetro de Mach-Zehnder foi escolhido como sistema para ilustração e visualização dos conceitos. A interpretação de Bohr e von Neumann foi

adotada na discussão, crucial na mecânica quântica, do papel da observação. A animação que constitui o elemento principal do recurso procurou explicitar na tela aquilo que “passa pela cabeça do físico teórico” quando ele tenta visualizar a evolução e a observação de um sistema quântico. Temos argumentado que tal visualização complementa a simulação daquilo que de fato se observa no laboratório.

Como possível extensão deste trabalho, poderia-se pensar em considerar mais de uma interpretação, incluindo na discussão uma comparação entre elas. É difícil imaginar como apresentar, sobre a tela do computador, uma visualização da interpretação dos múltiplos universos [12, 13]. Por ser mais próxima da física clássica, a interpretação de Bohm e de Broglie [14, 15], também conhecida como interpretação da onda piloto, poderia ser mais tratável deste ponto de vista. Possivelmente, a interpretação das histórias consistentes [25] também seria manejável. Como já frisamos, seja qual for a interpretação abordada, alguma “transposição didática” [26], sempre sujeita a crítica, será necessária na sua apresentação visual.

Embora o interferômetro de Mach-Zehnder, tratado de maneira idealizada no nível de ondas planas e pacotes em movimento unidimensional, como fizemos, tem o mérito da simplicidade, ele não permite a visualização de uma distribuição contínua de probabilidade e do padrão de franjas induzido nesta pela interferência. Acreditamos que o sistema o mais simples que possa ser considerado para a ilustração de tais aspectos seria o tradicional experimento de duas fendas, numa idealização planar. Estamos presentemente desenvolvendo um “objeto de aprendizagem”, semelhante àquele apresentado aqui, mas baseado neste dispositivo.

## Agradecimento

Este projeto recebeu o apoio da Secretária de Ensino a Distância da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através do Edital EAD 05-2005.

## Referências

- [1] I.M. Greca e M.A. Moreira, *Investig. Ens. Ciências* **6**, 29 (2001).
- [2] R.P. Feynman, R.B. Leighton and M. Sands, *Lições de Física de Feynman* (Bookman, Porto Alegre, 2008), v. 3.
- [3] O. Pessoa Jr, *Conceitos de Física Quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2005), 2ª ed.
- [4] F. Embacher, *Der Elitzur-Vaidmann-Bombentest*, <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/>, Viena, Austria (2004).
- [5] A. Huber, *Quantum Eraser*, <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/>, Munique, Alemanha (2001).
- [6] R. Müller and H. Wiesner, *Am. J. Phys.* **70**, 200 (2002).
- [7] F. Ostermann, S.D. Prado e T. dos S. F. Ricci, *Física na Escola* **7**, 22 (2006).
- [8] T.F. Ricci, F. Ostermann e S. D. Prado, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **29**, 79 (2007).
- [9] N. Bohr, *Atomic Theory and the Description of Nature* (Cambridge University Press, Cambridge, 1934).
- [10] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, 1955).
- [11] Para uma explicitação didática dos postulados assumidos por esta interpretação, veja C. Cohen-Tannoudji, B. Diu and F. Lalöe, *Quantum Mechanics* (Hermann, Paris, 1977).
- [12] B.S. De Witt and N. Graham (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton Series in Physics, Princeton, 1973).
- [13] F. Freitas e O. Freire Jr., *Rev. Bras. Ens. Fis.* **30**, 2307 (2008).
- [14] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 166 (1952).
- [15] Para uma apresentação acessível desta interpretação e uma análise crítica do contexto histórico associado, veja J.T. Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony* (The University of Chicago Press, Chicago, 1994).
- [16] F. Ostermann e S. D. Prado, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **27**, 193 (2005).
- [17] A. Zeilinger, *Am. J. Phys.* **49**, 882 (1981).
- [18] K.P. Zetie, S. F. Adams and R.M. Tocknell, *Phys. Educ.* **35**, 46 (2000).
- [19] M. Betz, I. de Lima e G. Mussatto, <http://www.if.ufrgs.br/~betz/dualidade/>, Porto Alegre, Brasil (2008).
- [20] T.D. Newton and E.P. Wigner, *Rev. Mod. Phys.* **21**, 400 (1949).
- [21] D.G.C. Jones, *Eur. J. Phys.* **15**, 170 (1994).
- [22] T. Inagaki, *Phys. Rev. A*, **49**, 2839 (1994).
- [23] I. Bialynicki-Birula, *Coherent and Quantum Optics VII* (Plenum Press, New York, 1996), p. 313.
- [24] C.K. Hong and L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 58 (1986).
- [25] R.B. Griffiths, *Consistent Quantum Theory* (Cambridge University Press, Cambridge, 2002).
- [26] G. Brockington e M. Pietrocola, *Investig. Ens. Ciências* **10**, 387 (2005).