



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: Uma Abordagem Fenomenológica**

Raphael Guimarães Pontes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

# **Ondas, Partículas e Luz: Uma Abordagem Fenomenológica**

Raphael Guimarães Pontes

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

---

Prof. Carlos Eduardo Aguiar (Presidente)

---

Prof. Jorge Simões de Sá Martins

---

Prof. Carlos Farina de Souza

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

P813o Pontes, Raphael Guimarães  
Ondas, Partículas e Luz: Uma Abordagem Fenomenológica / Raphael Guimarães Pontes. – Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2019.  
viii, 170 f. : il. ; 30 cm.  
Orientador: Carlos Eduardo Aguiar.  
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2019.  
Referências Bibliográficas: f. 167-170.  
1. Ensino de Física. 2. Física Quântica. 3. Dualidade onda-partícula. I. Aguiar, Carlos Eduardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Ondas, Partículas e Luz: Uma Abordagem Fenomenológica.

## **Agradecimentos**

A meus pais, irmãos, e familiares próximos (de sangue ou não...), que mesmo nem sempre compreendendo os momentos de reclusão, foram de extrema necessidade para me manter no caminho reto.

À minha namorada, Gracielle, pela parceria e amor inestimáveis.

Aos meus amigos, pelas conversas, dicas, cafés e risadas sem fim nas horas precisas.

À minha colega de turma, Jordette Fandi, pela gentileza de ceder seu tempo e seus alunos para que esse trabalho pudesse prosseguir.

Ao amigo Marcelo Fonte Boa, por comprar e investir nessa ideia, cedendo também seu tempo e suas visões. Agradeço a generosa acolhida para que o trabalho fosse finalizado.

Ao meu orientador, Carlos Aguiar, pelo incentivo, pelos cortes, pelo olhar crítico mais do que necessário, pela paciência e pelo tempo investido. Sem ele, esse trabalho não seria possível.

Aos professores, novos e antigos, com os quais convivi nas aulas do mestrado. Um pouco de cada um se encontra nesse trabalho.

À Dilma, nossa querida secretária, e à coordenadora Marta Barroso me desculpo pelos entraves e contratempos e agradeço profundamente a presteza em resolvê-los.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001

## RESUMO

### **Ondas, Partículas e Luz: Uma Abordagem Fenomenológica**

Raphael Guimarães Pontes

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Apresentamos uma proposta para o ensino da dualidade onda-partícula e da natureza da luz. A abordagem sugerida é essencialmente fenomenológica e não exige instrução prévia em física ondulatória ou mecânica da partícula, sendo acessível a um amplo espectro de estudantes pré-universitários. Aplicações da proposta a esses estudantes são relatadas e analisadas.

Palavras chave: Ensino de Física, Física Quântica, Dualidade onda-partícula.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

## ABSTRACT

### **Waves, Particles and Light: A Phenomenological Approach**

Raphael Guimarães Pontes

Supervisor: Carlos Eduardo Aguiar

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

We present a teaching sequence on the nature of light and wave-particle duality. The approach is essentially phenomenological and doesn't require previous instruction on wave theory or particle mechanics, being accessible to a wide range of pre-college students. Applications of the teaching sequence to these students are reported and analysed.

Keywords: Physics education, Quantum physics, Wave-particle duality.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ensino e aprendizagem de Mecânica Quântica</b>	<b>6</b>
2.1	A física quântica nos grandes projetos de ensino . . . . .	6
2.1.1	PSSC . . . . .	7
2.1.2	Nuffield . . . . .	10
2.1.3	Harvard Project Physics . . . . .	12
2.2	Porque e como introduzir a física quântica no ensino médio . .	15
2.3	Alguns resultados da pesquisa em ensino de mecânica quântica	17
2.3.1	Dificuldades de aprendizagem . . . . .	17
2.3.2	Estratégias instrucionais . . . . .	19
2.3.3	O papel de simulações . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Uma proposta para o ensino da dualidade onda-partícula</b>	<b>26</b>
3.1	Uma sequência de ensino-aprendizagem sobre a dualidade onda-partícula . . . . .	27
3.1.1	Ondas e partículas . . . . .	27
3.1.2	A natureza do som . . . . .	28
3.1.3	A natureza da luz . . . . .	31
3.1.4	Aplicação prática da dualidade onda-partícula . . . . .	34
3.1.5	O caminho do fóton: distinguibilidade e indistinguibilidade . . . . .	35
3.2	Subsídios da pesquisa em ensino à sequência didática proposta	36
<b>4</b>	<b>Ondas, partículas e luz</b>	<b>38</b>
4.1	Brevíssima história da dualidade onda-partícula . . . . .	39
4.2	Ondas . . . . .	39
4.3	Partículas . . . . .	43
4.4	Ondas ou partículas? . . . . .	44
4.5	Som: ondas ou partículas? . . . . .	45
4.5.1	Experimento com o divisor de som . . . . .	45

4.5.2	O interferômetro sonoro . . . . .	48
4.6	Luz: a dualidade onda-partícula . . . . .	51
4.6.1	O divisor de luz . . . . .	51
4.6.2	O interferômetro de luz . . . . .	55
4.7	Uma aplicação da dualidade: o experimento de Elitzur-Vaidman	59
4.8	O caminho do fóton . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Aplicações da sequência didática</b>	<b>66</b>
5.1	Primeira aplicação . . . . .	66
5.2	Segunda aplicação . . . . .	71
5.2.1	Análise das respostas do pré-teste . . . . .	72
5.2.2	Análise das respostas do pós-teste . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Roteiro didático: Ondas, Partículas e Luz</b>	<b>83</b>
<b>B</b>	<b>Manual de utilização do interferômetro virtual</b>	<b>112</b>
<b>C</b>	<b>Uma aula sobre ondas e partículas</b>	<b>120</b>
<b>D</b>	<b>Questionários</b>	<b>137</b>
<b>E</b>	<b>Respostas dos alunos aos questionários</b>	<b>145</b>
E.1	Primeira aplicação . . . . .	145
E.2	Segunda aplicação . . . . .	153
E.2.1	Pré-teste . . . . .	153
E.2.2	Pós-teste . . . . .	163
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>167</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A mecânica quântica ocupa posição central na Física de hoje. Ela desempenha papel fundamental no desenvolvimento de inúmeras áreas de pesquisa e sua influência estende-se bem além da Física, alcançando ciências como a Química e a Biologia. Além disso, propostas tecnológicas revolucionárias como o transistor e a computação quântica tiveram origem em nosso conhecimento da teoria quântica. Por esses e outros motivos a discussão sobre a inclusão de temas de física quântica nos currículos do ensino médio não é nova, embora ainda haja polêmica sobre como isso deva ser realizado.

O ensino de física quântica já faz parte dos currículos escolares de diversos países [1]. No anos 60, os grandes projetos educacionais como o *Physical Science Studies Committee* (PSSC) e o *Harvard Project Physics*, ambos nos Estados Unidos, e o *Nuffield Science Teaching Project* no Reino Unido, continham elementos de mecânica quântica, mostrando a preocupação com a introdução de tais temas em etapas pré-universitárias. Entretanto, pesquisas sistemáticas sobre o ensino e aprendizagem de mecânica quântica só tiveram início bem mais tarde, por volta dos anos 1980 [2,3].

Também datam dessa época as primeiras polêmicas sobre o ensino introdutório de física quântica. Um exemplo foi o debate que ocorreu em 1989 entre Eugen Merzbacher, então presidente da *American Physical Society* e Arnold Arons, um dos pioneiros da pesquisa em ensino de física nos EUA e autor de um livro clássico na área, *Teaching Introductory Physics*. Em

um comentário convidado no *American Journal of Physics* [4], Arons criticou duramente grupos de físicos que trabalhavam criando abordagens para o ensino de física moderna, principalmente pelo fato de supostamente estarem se baseando nas pesquisas em ensino quando, evidentemente, estavam caminhando em sentido contrário. Arons diz que as propostas desses grupos eram baseadas na ilusão de que a pesquisa em ensino de Física revelaria métodos extremamente eficientes de ensinar conceitos abstratos, de modo que se levasse menos tempo para apresentá-los, possibilitando assim que se pudesse acrescentar ainda mais conteúdos em um tempo menor. Ao contrário, afirmava Arons, as pesquisas tendem a mostrar que os alunos necessitam de mais tempo do que o usualmente dado e mais experiências verbais e fenomenológicas para que possam dominar conceitos básicos e inseri-los em suas linhas de raciocínio.

A crítica de Arons não foi bem recebida por Merzbacher, que enviou à mesma revista comentários sobre a modernização dos currículos introdutórios [5]. Merzbacher diz que muitos físicos viam com bons olhos os projetos criticados por Arons, em especial aqueles professores que estavam nas “trincheiras”, muito mais preocupados em debater *como* aplicar conteúdos de física quântica em cursos introdutórios do que discutir *se* deveria haver uma estrutura correta de aplicação desses temas.

Uma discussão mais recente e igualmente interessante foi a realizada por Marcelo Alonso de um lado e Rainer Müller e Hartmut Wiesner de outro, em cartas ao editor da *American Journal of Physics* [6, 7]. A discussão é sobre quais aspectos da física quântica devem ser abordados em uma etapa introdutória. Alonso pensa que é muito mais interessante para os alunos de um curso superior de Física dar ênfase inicialmente às aplicações da mecânica quântica a problemas concretos de física atômica, nuclear, molecular e de estado sólido, deixando aspectos conceitualmente mais sofisticados para discussão nos anos posteriores. Nas palavras do autor: “*Aprender primeiro em que a mecânica quântica é boa, e somente depois analisar suas implicações epistemológicas.*”.

Em contraponto, Müller e Wiesner defendem a ideia de que, mais do que apenas para um curso superior de Física, a introdução à física quântica deve

ser planejada para alunos que não serão físicos ou engenheiros. Dentro dessa linha, os autores dizem que a questão a ser respondida deve ser: “*Quais são as ideias fisicamente importantes da mecânica quântica que um advogado ou um médico devem saber?*”. Eles ressaltam que uma das funções da escola é dar acesso aos estudantes à nossa atual compreensão de mundo. Tendo a física quântica alterado essa visão de maneira decisiva, é exatamente a apresentação de aspectos epistemológicos que se torna relevante aqui.

Em seu livro *Teaching Introductory Physics* [8], Arons faz algumas sugestões. Para ele é plenamente compreensível que se queira acrescentar temas de física moderna em estágios cada vez mais iniciais. Contudo, sob a luz do que se sabe sobre desenvolvimento cognitivo e formação de conceitos, ele pensa que dificilmente se construiria um conhecimento genuíno, que fosse além da memorização cega de termos como “quark”, “glúon”, “função de onda” etc. A melhor saída seria então focar em temas que envolvam a Física do início do século XX: elétrons, fótons, a estrutura atômica e até mesmo noções iniciais e qualitativas de relatividade. Muito embora a escolha de apresentar esses temas em um curso introdutório signifique ter que sacrificar outros tópicos considerados importantes, isso pode ser atenuado através do uso do que Arons chama de narrativa (*story line*). Em suas palavras:

[...] se deseja-se ensinar, por exemplo, o átomo de Bohr, deve-se identificar quais os conceitos fundamentais e tópicos de mecânica, eletricidade e magnetismo que são necessários para a compreensão dos experimentos e dos raciocínios que nos levaram aos conceitos de elétron, núcleo atômico e fóton [...]

Sugestões muito interessantes sobre o ensino de física moderna também foram feitas por Gil-Pérez e Solbes [9]. Em um artigo que será detalhado no próximo capítulo, esses autores enfatizam a necessidade de integrar as abordagens da física clássica e física moderna como forma de mostrar aos alunos os limites da primeira e a necessidade da última, contrastando os respectivos paradigmas científicos. Segundo eles, essa prática leva não apenas a uma melhor aprendizagem da física moderna, mas também a uma compreensão mais profunda da própria física clássica.

Nesta dissertação propomos uma sequência didática sobre a dualidade onda-partícula, um dos temas centrais da física quântica. O desenvolvimento da sequência segue o conceito de narrativa proposta por Arons e as ideias de Gil-Pérez e Solbes sobre o confronto de paradigmas. A sequência foi planejada para alunos do ensino médio mas, como não depende de instrução prévia em física ondulatória ou mecânica da partícula, é possível aplicá-la até mesmo a alunos dos anos finais do ensino fundamental.

O desenvolvimento da sequência didática é o seguinte. Inicialmente, apresentamos as características fundamentais do que chamamos, em nosso dia-a-dia, de onda e partícula. Mostramos que, nesse contexto, onda e partícula são conceitos inconciliáveis. Em seguida discutimos que, apesar dessas diferenças, nem sempre é fácil descobrir se um determinado fenômeno está relacionado a ondas ou partículas. O primeiro exemplo que apresentamos é o do som. Realizando experimentos com um divisor de feixe e um interferômetro sonoro, investigamos se o som no ar seria um fenômeno ondulatório ou corpuscular. O experimento com o divisor, que poderia mostrar que o som tem características de partícula, revela-se inconclusivo. Por sua vez, o experimento com o interferômetro mostra a existência de interferência sonora, o que nos permite afirmar que o som é uma onda.

Na etapa seguinte fazemos análise semelhante para o caso da luz. Novamente, baseamos a investigação em experimentos com um divisor de feixe e com um interferômetro. Com a luz esses experimentos seriam muito difíceis de realizar em ambientes escolares e por isso recorreremos a simulações computacionais desenvolvidas por nós. O resultado das simulações é que o divisor de feixe mostra que a luz é composta de partículas e o interferômetro mostra que ela é uma onda.

Enfatizamos aos alunos que esse resultado representa a descoberta de uma limitação fundamental da física clássica. Na visão clássica de mundo não há nenhum sistema que seja onda e partícula ao mesmo tempo; em nosso dia-a-dia esses conceitos são excludentes. O fato da luz apresentar um comportamento “dual” mostra que descobrimos algo novo, surpreendente e muito importante. Isso é ilustrado mostrando que a dualidade onda-partícula permite resolver um problema que seria insolúvel pela física clássica, o analisador

de bombas de Elitzur-Vaidman.

A sequência didática termina com a apresentação da visão de Feynman da dualidade onda-partícula (ou melhor, da interferência quântica), baseada na indistinguibilidade de alternativas clássicas. Essa formulação é mais profunda e produtiva que a usualmente encontrada em textos introdutórios: “às vezes é onda, às vezes partícula”.

A dissertação está organizada da seguinte maneira. No Capítulo 2 fazemos uma revisão de como a física quântica, em particular a dualidade onda-partícula, foi abordada nos grandes projetos educacionais dos anos 1960: *PSSC*, *Nuffield* e *Harvard Physics Project*. Em seguida discutimos algumas das referências que nos foram úteis para o desenvolvimento da proposta didática. Também apresentamos nesse capítulo alguns dos principais resultados da pesquisa em ensino de mecânica quântica. No Capítulo 3, descrevemos as linhas gerais da sequência didática que propomos. Sempre que possível situaremos nossas escolhas em termos dos resultados de pesquisa discutidos no Capítulo 2. No Capítulo 4 apresentamos a sequência didática propriamente dita, na forma do texto completo a ser utilizado por professores e alunos. No Capítulo 5 discutimos aplicações da sequência proposta a grupos de estudantes. Também apresentamos os questionários que utilizamos e analisamos algumas das respostas dos alunos. No Capítulo 6 fazemos as considerações finais deste trabalho e tecemos comentários sobre desenvolvimentos futuros.

O Apêndice A contém o texto da sequência didática, o mesmo que está no Capítulo 4 porém de forma destacável do restante da dissertação (com capa própria, numeração independente, etc.). O manual da simulação computacional utilizada na sequência didática está no Apêndice B. Nos Apêndices C e D estão os *slides* utilizados durante as apresentações da sequência didática e os questionários entregues aos alunos. No Apêndice E, por fim, estão todas as respostas dadas pelos alunos aos questionários.

## Capítulo 2

# Ensino e aprendizagem de Mecânica Quântica

Neste capítulo discutiremos a introdução de elementos da mecânica quântica nos currículos do ensino pré-universitário. Inicialmente, faremos uma breve revisão dos grandes projetos educacionais da década de 1960, que foram pioneiros na disseminação em larga escala desses temas nos ambientes escolares. Em seguida apresentaremos trabalhos de pesquisa (alguns recentes, outros nem tanto) envolvendo o ensino de física moderna. Esses trabalhos foram de grande utilidade quando desenvolvemos nossa sequência didática.

A introdução de temas de física quântica no ensino médio tem pontos em comum com o ensino de mecânica quântica nas etapas iniciais do ensino universitário. Por isso alguns resultados de pesquisas em ensino realizadas em cursos introdutórios universitários podem ser aproveitados também no ensino médio, conforme veremos.

### 2.1 A física quântica nos grandes projetos de ensino

Nesta seção analisaremos como foi feita a introdução a tópicos de física quântica nos projetos educacionais *Physical Science Study Committee* (PSSC), *Nuffield Physics* e *Harvard Project Physics*. Esses projetos certamente não fo-

ram os primeiros a introduzir esses temas no ensino pré-universitário, mas representaram aplicações em larga escala que pavimentaram o caminho para desenvolvimentos posteriores nessa área.

Como veremos a seguir, o PSSC, nos Estados Unidos, e o Nuffield, na Inglaterra, são projetos que focam muito no aspecto experimental da física, enquanto o projeto Harvard apresenta uma abordagem pautada mais na análise e apresentação histórica dos eventos. Os temas tratados nos três projetos são semelhantes, quase sempre utilizando o efeito fotoelétrico como ponto de partida. O projeto Harvard é o único que chega a discutir temas mais complexos como o princípio da incerteza.

Esses projetos atenderam a uma demanda já existente por parte dos professores de física da época, de inclusão de temas mais modernos, mas foram impulsionados mesmo (em especial, o PSSC) pela corrida espacial e a necessidade de desenvolvimento tecnológico trazida pela Guerra Fria. Embora estejam datados em termos de motivação e abordagem, eles ainda são a base da maioria das apresentações atuais da física quântica no ensino médio.

### 2.1.1 PSSC

Ao ler o livro-texto desenvolvido no projeto PSSC [10] podemos ver que já em sua primeira parte existem dois capítulos que se dedicam a explicar os conceitos de átomos e partículas. Neles são apresentadas evidências experimentais que historicamente nos levaram a esses conceitos, incluindo uma discussão dos espectros atômicos, temas que podemos considerar como parte de uma introdução à física moderna. A estrutura atômica é abordada novamente, em maior detalhe, mais para o final do livro. No capítulo 32, denominado “Explorando o átomo”, os autores discutem o experimento de Rutherford e o modelo atômico resultante. Eles apresentam o conceito de átomo com núcleo positivo e órbitas ‘planetárias’ estáveis para os elétrons. Ao final trazem questionamentos sobre a validade desse modelo, baseados na ideia que, pela física clássica, elétrons acelerados deveriam emitir radiação, perdendo energia durante o processo e comprometendo a estabilidade das órbitas de Rutherford. É ressaltado que essa falha, dentre outras apresentadas pelos autores dentro

do capítulo 32, não pode ser resolvida apenas por uma alteração no modelo atômico. A revisão deve ser mais profunda. É dessa forma que os autores do PSSC iniciam as discussões dos capítulos posteriores, 33 e 34, os dois últimos da parte IV do livro. É neles que existe uma discussão realmente pautada em temas da física quântica. É importante enfatizar que estes assuntos são introduzidos de maneira a ressaltar a diferença e necessidade do paradigma quântico em relação ao clássico.

O capítulo 33, “Fótons e ondas de matéria”, discute a natureza da luz. A seção inicial do capítulo descreve uma variação do experimento de Millikan, onde uma lâmpada à arco voltaico emite luz em alta frequência na direção de uma câmara contendo gotículas suspensas no ar entre duas placas carregadas.

Se a luz se comporta como uma onda ao atingir as gotículas suspensas no ar, o efeito cumulativo da incidência dessa onda faz com que elétrons sejam expulsos das gotículas e essas, ficando carregadas, sejam atraídas por uma das placas, sendo esse o gatilho para que saibamos que elétrons foram removidos pela luz incidente. Nessa situação, é esperado que a luz leve um certo tempo para retirar elétrons das gotículas. Uma luz fraca levará um tempo longo para remover os elétrons e uma luz forte um tempo mais curto, mas de qualquer forma os elétrons não sairão instantaneamente.

No entanto, o resultado é surpreendente. O que acontece de fato é que algumas gotículas perdem elétrons instantaneamente. Até mesmo a ação de uma luz muito fraca pode fazer com que elétrons sejam ejetados imediatamente. Os autores esclarecem então que tal situação nos leva a crer no fato de que a luz é “granular” e não uma onda como se pensava. Esses pequenos grãos ou pacotes são as partículas de luz, os fótons.

Mais à frente é ressaltado que, embora seja composta de fótons, a luz ainda se encontra sujeita a fenômenos de interferência, ou seja, essas partículas apresentam também comportamento ondulatório, uma dualidade inconcebível no contexto da física clássica.

A seção seguinte trata do efeito fotoelétrico em superfícies metálicas e traz para discussão a influência do comprimento de onda da luz (sua cor, se visível) na emissão de elétrons. A montagem experimental tradicional é descrita e é ressaltada a existência de um limiar de frequências abaixo

do qual não é possível arrancar elétrons da superfície, qualquer que seja a intensidade da luz. Acima desse limiar, que depende do material, mesmo uma luz muito fraca é capaz de remover elétrons. Esse efeito é explicado a partir da relação entre a energia do fóton e frequência da luz, o que leva à equação de Einstein para o efeito fotoelétrico. A relação entre o momentum do fóton e o comprimento de onda da luz também é apresentada, e aplicada ao efeito Compton. Finalmente, ondas de matéria são tratadas, completando a introdução à dualidade onda-partícula.

O último capítulo, 34, trata o átomo como um sistema quântico e busca responder ao questionamento sobre a validade do modelo de Rutherford deixado ao final do capítulo 32. Inicialmente discute-se o experimento de Franck-Hertz e os autores esclarecem como, a partir desse momento, a excitação atômica passou a ser compreendida como um processo que se dá em níveis de energia discretos, e não de maneira contínua como se pensava anteriormente. O fenômeno de excitação atômica e a consequente emissão de luz quando o átomo volta ao seu estado fundamental também é discutido e apresentado como mais uma evidência experimental da quantização da energia.

Na seção seguinte o espectro de absorção é apresentado em detalhe, desde como se dá um experimento típico até quais consequências podem ser inferidas a partir dos resultados observados. É esclarecido que cada átomo possui um espectro de absorção único, como uma impressão digital atômica. Na última discussão do capítulo, os autores propõem uma resposta para a indagação acerca do deslocamento do elétron em volta do núcleo atômico, através de uma analogia entre ondas de matéria e ondas estacionárias em cordas. A seção de conclusão faz um resumo do que foi visto, reafirmando a incapacidade da mecânica newtoniana de lidar com os fenômenos apresentados, sendo realmente necessário que se introduzam novos conceitos, que resultarão na mecânica quântica.

Também foram produzidos pelo PSSC três vídeos, *Photons*<sup>1</sup>, *Interference of Photons*<sup>2</sup> e *Photoelectric Effect*<sup>3</sup>, para ilustrar, como complemento didá-

---

<sup>1</sup>John King, MIT: <https://youtu.be/T1chKXkBBEE>

<sup>2</sup>John King, MIT: <https://youtu.be/NRd15PmvLPU>

<sup>3</sup>John Strong, Johns Hopkins Univ.: <https://youtu.be/wznHAnCintU>

tico, o comportamento dual da luz. Eles permitem que o professor apresente para os alunos experimentos cuja realização seria difícil em sala de aula.

O primeiro vídeo diz respeito aos fótons e nele os autores mostram um experimento tradicional sobre o efeito fotoelétrico, muito semelhante ao descrito no livro-texto, com a observação do limiar de frequências e da emissão imediata dos fotoelétrons. O segundo vídeo fala sobre interferência de fótons e nele é apresentado, durante a realização de um experimento de dupla fenda, o fato de que, mesmo utilizando uma fonte de luz muito fraca (supostamente “fóton a fóton”), ainda assim é possível encontrar um padrão de interferência típico de comportamento ondulatório. O efeito fotoelétrico volta a ser discutido, em maior detalhe, no terceiro vídeo, que mostra uma versão do experimento em que a radiação solar é utilizada para arrancar elétrons de folhas de diferentes metais ligadas a um eletroscópio.

### 2.1.2 Nuffield

No último livro do projeto Nuffield (nível O) [11] são abordados diversos temas de física moderna, como os experimentos de Millikan e Thomson, questões relativas à estrutura atômica e assim por diante. Nos fixaremos, no entanto, na análise do último capítulo, 11, denominado “Ondas e Partículas”, o único dedicado integralmente a temas de mecânica quântica. O capítulo se inicia fazendo referência ao fato da luz ser muito bem descrita pela teoria ondulatória, pelo menos até onde já havia sido estudada. Refração, reflexão, difração e interferência indicam (principalmente os dois últimos fenômenos) que a luz se comporta como onda. Em contrapartida, a quantização da carga elétrica e a relação carga-massa do elétron são apresentadas como indicação de que elétrons são partículas e não ondas.

A proposta do capítulo é contrastar esses dois grandes paradigmas clássicos, corpuscular e ondulatório, através de demonstrações experimentais envolvendo a interação de luz e elétrons com a matéria. A primeira demonstração discutida no capítulo (Demonstração 90) diz respeito ao efeito fotoelétrico. O aparato descrito consiste basicamente de uma placa polida de zinco conectada a um eletroscópio de folha de ouro e iluminada por luz ultravioleta.

O guia do professor (*Teacher's Guide*) sugere que na falta desse aparato em sala de aula, pode-se usar dois dos vídeos do PSSC já mencionados, *Photons* e *Photoelectric Effect*.

Continuando a discussão, os autores apresentam algumas características importantes do efeito fotoelétrico: a relação da frequência luminosa com a energia dos elétrons removidos, a existência de um limiar energético para que isso ocorra e a influência da intensidade luminosa. Os autores sugerem então que todos esses fatos experimentais podem ser explicados através do uso do conceito de fótons, as partículas de luz. Tanto no guia do professor, quanto no livro destinado aos alunos, a justificativa dada para os fótons serem a melhor explicação do efeito fotoelétrico baseia-se no tempo de emissão dos fotoelétrons. Algumas vezes, mesmo uma luz de baixíssima intensidade pode arrancar elétrons do metal de maneira instantânea. É mencionada também uma curiosidade associada ao efeito fotoelétrico: os antigos estúdios de revelação fotográfica usavam luz vermelha ou laranja, pois fótons com essas frequências não possuem a energia necessária para iniciar reações fotoquímicas no papel fotográfico.

A discussão seguinte, e que finaliza o capítulo 11, é sobre a validade do modelo atômico de Rutherford, que foi apresentado aos alunos no capítulo anterior. A discussão do problema desse modelo atômico e sua possível solução se dá de maneira semelhante à do PSSC. Ao apresentar o conceito de ondas de matéria (ou de de Broglie), os autores fazem um paralelo com modos normais de vibração para explicar a quantização das órbitas eletrônicas. É importante comentar que, ao contrário do PSSC, os autores alertam que a analogia com vibrações estacionárias pode fazer com que surjam visualizações errôneas sobre a órbita do elétron em torno do núcleo atômico. Nas palavras dos autores:

[...] De fato, essa onda estacionária não nos diz que o elétron deveria estar vibrando para cima e para baixo ou de um lado para o outro. Ela é um padrão útil que nos diz em qual local será mais provável encontrar o elétron. Em qualquer lugar que esse padrão “vibre” com amplitude alta, teremos um boa chance de encontrar o elétron. Em qualquer lugar onde haja baixa amplitude, teremos

pouca chance de achá-lo. A nova imagem dos átomos é uma de probabilidades, de apostas sobre em qual lugar haverá mais chance de encontrarmos um elétron – nunca sabendo exatamente onde ele estará. [...]

### 2.1.3 Harvard Project Physics

O livro utilizado pelo projeto Harvard [12] possui em sua penúltima unidade, a de número 5, uma série de capítulos onde são apresentados temas de física moderna. Diferentemente dos dois projetos anteriores, o Harvard inclui a discussão de temas de relatividade restrita (essencialmente,  $E = mc^2$ ).

O capítulo 17, que abre essa unidade, trata de discussões gerais sobre química: átomos, moléculas, a tabela periódica etc. O capítulo 18, denominado “Elétrons e quanta”, inicia a apresentação dos temas que de fato interessam à nossa análise. Os autores fazem uma descrição histórica do surgimento do conceito de elétron a partir dos estudos dos raios catódicos por Crooke dos experimentos de Thomson, que mostravam que os raios catódicos de diversos materiais eram iguais e compostos de partículas carregadas negativamente, bem como a obtenção da relação carga-massa para o elétron. Em seguida, é apresentado o experimento de Millikan e a medida da carga do elétron.

O efeito fotoelétrico é apresentado em detalhe e é utilizado pelos autores como argumento para o surgimento dos quanta de luz e de uma nova Física. Para isso, são descritas as características típicas do efeito e é mencionado que essas não são compreendidas através da física clássica. A explicação apresentada então é a noção de que a luz é constituída de fótons.

A parte final dessa seção apresenta a relação de Einstein entre a energia cinética máxima dos elétrons, a função trabalho do material e a energia quantizada dos fótons. Nela também é esclarecido que a explicação do efeito fotoelétrico não foi a primeira sugestão de que a energia da radiação eletromagnética seria quantizada. Os autores comentam, sem entrar em detalhes, que essa quantização já fora proposta por Max Planck para resolver a “catástrofe do ultra-violeta” da radiação do corpo negro.

A seção seguinte trata da descoberta dos raios X por Röntgen no final do

século XIX. E por fim o capítulo 18 termina apresentando o impasse que existia na formulação de um modelo atômico coerente com o que se sabia acerca dos átomos e elétrons no início do século XX. O capítulo 19, denominado “O modelo atômico de Rutherford-Bohr”, retoma a discussão sobre o modelo atômico. São apresentados os espectros de emissão e absorção dos gases e uma extensa discussão das ideias que levaram à apresentação do modelo atômico de Rutherford-Bohr. Ao final, os autores discutem as limitações do modelo, principalmente no que dizia respeito a átomos de muitos elétrons, mas enfatizam que esse representou um enorme progresso e fez grande sucesso, sendo bem aceito pela comunidade científica.

O capítulo 20, último da unidade 5, introduz algumas noções de relatividade restrita e de temas de física quântica. Existe nesse capítulo duas seções – “O comportamento corpuscular da radiação” e “O comportamento ondulatório das partículas” – cuja intenção é a de familiarizar os alunos com o conceito da dualidade onda-partícula. Para falar sobre o comportamento corpuscular da radiação, os autores optaram por descrever o efeito Compton observado com raios X. Já para a outra seção, os autores descrevem o conceito de ondas de de Broglie, ou “ondas piloto”, e demonstram como esse conceito pode auxiliar a resolver a questão das órbitas eletrônicas. É esclarecido pelos autores que tanto o que se conhecia naquela época como radiação quanto o que era chamado de partícula possuem característica dual e irão se comportar ou como onda ou como partícula dependendo do experimento que esteja sendo feito.

A seguir os autores expõem, sem entrar em maiores detalhes, as ideias de Schrödinger e como ele conseguiu traduzir matematicamente a natureza dual da matéria. É apresentado o nascimento da mecânica quântica em 1925, com as contribuições de Schrödinger, Born, Heisenberg, Bohr e Dirac. É também discutido que essa teoria respondia a questionamentos que não tinham solução satisfatória na velha teoria quântica e, por outro lado, não favorecia uma visualização intuitiva.

Para falar sobre o princípio da incerteza os autores optam por iniciar uma discussão a partir da noção clássica de medida, utilizando um exemplo sobre como podemos medir a posição e a velocidade de um carro. É explicado

porque ondas eletromagnéticas do espectro visível (ou de comprimentos de onda ainda menor) são melhores do que ondas de rádio, por exemplo, para medir a posição do carro e isso é utilizado como motivador para que se busque uma maneira de medir a posição e a velocidade de um elétron.

Os autores esclarecem que um sistema de medição da posição de um elétron, semelhante ao que foi utilizado para o carro, teria que fazer uso de radiação que possua comprimento de onda da ordem de  $10^{-10}\text{m}$ , que tem, por consequência, energia e momentum muito elevados. Esse processo pode informar a posição que o elétron ocupa, contudo traz o revés de dar ao elétron uma nova velocidade desconhecida. Dessa forma, é esclarecido o princípio da incerteza: quanto mais precisa for a nossa medida de posição (ou seja, quanto menor for o comprimento de onda da radiação utilizada), menos preciso será nosso conhecimento sobre a velocidade, é impossível saber ambas as grandezas com precisão ilimitada. A relação de incerteza de Heisenberg que rege esse comportamento também é apresentada.

Por fim, na última seção é discutido o tema da interpretação probabilística presente na mecânica quântica. Ao analisar o padrão de interferência gerado pela chegada da luz de uma estrela próxima e de uma muito distante, é dito que um grande número de fótons pode ser muito bem descrito pela distribuição de intensidade de onda, enquanto para um pequeno número deles a intensidade de onda não é útil para determinar o local exato para onde um único fóton irá. Sabe-se que esses fótons irão se concentrar nas áreas de maior intensidade, entretanto não se pode prever exatamente onde cada um chegará. É dito que essa confusão pode ser resolvida ao imaginar que a intensidade de onda em um dado local, representa a probabilidade do fóton ali chegar.

Acerca da dualidade onda partícula é dito:

[...] O sucesso da mecânica quântica enfatizou a importância da natureza dual da matéria e da radiação. Como uma partícula pode ser pensada como “realmente” tendo propriedades de onda? A resposta é que a matéria, particularmente em nível atômico, *não* precisa ser pensada como sendo “realmente” partícula ou “realmente” onda. Ideias de ondas e partículas, à parte do

mundo das coisas visíveis, simplesmente não se aplicam em escala atômica.

Para descrever algo que ninguém nunca viu ou será capaz de ver diretamente, seria surpreendente que se pudesse usar conceitos do mundo macroscópico sem nenhuma alteração. [...]

A unidade 6, última desse livro, trata sobre o núcleo atômico. São discutidas questões sobre radioatividade, isótopos, o núcleo atômico e alguns aspectos das forças nucleares e estabilidade nuclear. Embora todos esses tópicos envolvam diretamente física moderna, não nos aprofundaremos em sua análise, pois fogem do nosso foco que é a dualidade onda partícula.

## 2.2 Porque e como introduzir a física quântica no ensino médio

Conforme vimos na análise dos três grandes projetos educacionais, a introdução de elementos de física quântica nos currículos de ensino pré-universitário não é nova. Entretanto, ainda se discute os motivos para essa introdução e como ela deve ser integrada aos currículos existentes.

É possível enumerar diversas razões para que essa introdução seja feita [13]. Um artigo de Müller e Weisner [14] expõe a razão que consideramos fundamental:

[...] A mecânica quântica mudou permanentemente a imagem de mundo dos físicos. No início do século 20, o advento da relatividade e da mecânica quântica marcou não apenas o descobrimento de meras novas teorias, mas de um sistema conceitual completamente novo para todos os físicos. A relatividade mudou nossas ideias de espaço e tempo, e a mecânica quântica introduziu o indeterminismo, probabilidades e a não-localidade nos fundamentos da Física.

A mecânica quântica molda nossa visão de natureza em um jeito fundamentalmente novo. Pensamos que não apenas os físicos

deveriam ter o privilégio de compreender como o mundo funciona. Cidadãos egressos do ensino médio deveriam, no mínimo, ter a possibilidade de ter conhecimento da estranheza e da beleza dos fenômenos quânticos. [...]

Sobre a integração da física quântica (ou outros temas de física moderna) aos currículos já existentes, uma abordagem particularmente interessante para nós é a de Gil Pérez e Solbes [9]. Ao analisar 42 livros-texto espanhóis, esses autores constataram que a grande maioria não fazia referência ao caráter não linear do desenvolvimento da Física, aos problemas que geraram a crise no paradigma da física clássica e às diferenças conceituais profundas existentes entre a física clássica e a moderna. Os autores comentam que “*a física moderna é geralmente introduzida nos currículos escolares sem referência às dificuldades da física clássica, simplesmente justapondo os dois paradigmas ou até mesmo os misturando*”. Isso se traduziu em dados: um questionário aplicado a 536 alunos com idades entre 16 e 18 anos mostrou que cerca de 90% deles ignoravam ou não sabiam apontar uma crise no desenvolvimento científico da física clássica, ou até mesmo apontar diferenças entre a física clássica e a moderna.

Na visão de Gil Pérez e Solbes, uma boa aprendizagem dos conteúdos de física moderna pode ser benéfica não apenas para a compreensão desses temas, mas também daqueles que envolvem a física clássica, pois esta teria seus limites de validade clarificados e seus pressupostos devidamente diferenciados. Os autores esclarecem que se a física moderna foi construída em oposição ao paradigma clássico, sua aprendizagem significativa demanda uma abordagem que se assemelhe à sua construção.

Dessa maneira, a abordagem proposta por eles se inicia justamente com algumas questões que levam o aluno a refletir sobre o paradigma clássico e seus limites de validade, bem como o fato dele ter sido construído também em oposição a outro paradigma: a “física do senso-comum”. São apresentados alguns experimentos famosos, tal como o experimento Michelson-Morley, e seus resultados são discutidos. Na segunda parte, são feitas questões sobre o efeito fotoelétrico e a apresentação das dificuldades existentes na explicação

desse fenômenos em termos da física clássica. São discutidas nessa etapa também os conceitos de dualidade onda-partícula e de ondas de matéria.

Os autores relatam uma clara melhoria na compreensão dos conteúdos por parte dos alunos. Apenas uma pequena porcentagem continuou a ignorar a clara crise de paradigma existente entre os temas discutidos. Os resultados sugerem que os conceitos problemáticos que os alunos adquirem em cursos tradicionais de física se devem não às dificuldades que a física moderna traz, mas sim a orientações de ensino equivocadas.

## 2.3 Alguns resultados da pesquisa em ensino de mecânica quântica

Nesta seção trataremos de dois temas que têm sido estudados por pesquisas em ensino de mecânica quântica: as dificuldades de aprendizagem dos alunos e quais estratégias de ensino podem ser utilizadas nesse contexto. Nossa discussão se baseia essencialmente no artigo de revisão publicado por Krijtenburg-Lewerissa *et al* [1], que analisa 74 artigos publicados em busca de ferramentas de pesquisa, estratégias de ensino e dificuldades conceituais. Abaixo descreveremos os pontos que consideramos importantes para nosso trabalho.

### 2.3.1 Dificuldades de aprendizagem

Para responder à questão sobre quais dificuldades de aprendizagem os alunos encontram durante uma introdução à física quântica, Krijtenburg-Lewerissa *et al.* dividem o conteúdo em quatro grandes temas: dualidade onda-partícula, função de onda, átomos e comportamento quântico complexo. Essa divisão dos conteúdos foi gerada a partir de uma análise dos principais currículos introdutórios de mecânica quântica no mundo. Cada um desses temas agrupa tópicos com conteúdos relacionados; o tema da dualidade, por exemplo, trata sobre o comportamento dual de fótons e elétrons e sua manifestação no experimento de dupla fenda, no princípio da incerteza e no efeito fotoelétrico.

O foco desta dissertação é a dualidade onda-partícula, de modo que nos limitaremos a apresentar as dificuldades associadas ao tema. Segundo Krijtenburg-Lewerissa *et al.*, essas dificuldades podem ser associadas ao uso de uma de três descrições. A primeira é a descrição clássica, na qual os alunos descrevem objetos quânticos exclusivamente como partículas ou como ondas. A segunda é a descrição mista, na qual os alunos conseguem visualizar que comportamentos de onda e de partícula coexistem, mas ainda assim continuam a descrever os objetos em termos clássicos. E, por fim, a terceira é a descrição quase-quântica, na qual os alunos compreendem a coexistência dos comportamentos ondulatório e corpuscular em objetos quânticos, mas ainda possuem dificuldade em descrever eventos de uma maneira não-determinística.

A literatura analisada expõe algumas das diversas visualizações problemáticas que os alunos apresentam. É bastante comum, por exemplo, que os alunos visualizem elétrons exclusivamente como partículas e os fótons como bolas esféricas brilhosas com localização ou trajetória bem definida. Alguns alunos costumam considerar erroneamente o comportamento ondulatório dos elétrons como a representação de uma nuvem eletricamente carregada, outros consideram que esse comportamento ondulatório seja o efeito de uma onda piloto que faz o elétron oscilar em uma trajetória senoidal. Alguns autores relataram essa consideração da trajetória senoidal para os fótons também.

O entendimento que os alunos tiram do experimento de dupla fenda, como era de se esperar, possui estreita relação com o que foi compreendido por eles acerca da dualidade onda-partícula. Se os alunos, por exemplo, visualizam o fóton como uma partícula clássica, que segue uma trajetória retilínea bem definida e pode ser refletida pelas bordas das fendas, isso influencia diretamente a compreensão deles sobre esse experimento. Segundo Krijtenburg-Lewerissa *et al.*, é particularmente difícil para os alunos que não tiveram uma boa compreensão da dualidade onda-partícula, entenderem como os elétrons aparecem como pontos brilhantes na tela de detecção, mas apresentam um padrão de interferência na sua distribuição na tela em larga escala.

O princípio da incerteza pode ser categorizado em quatro etapas consecutivas de compreensão: a primeira é a ideia errada de que a incerteza na medida simultânea de determinadas grandezas é devido a um erro de medida

afetado por fatores externos; a segunda, também errada, é a de que essa incerteza se deve a uma falha do instrumento utilizado para a medição; a terceira, ainda errada, é a de que a incerteza se deve a uma perturbação na medida; e, por último, a quarta é a ideia correta de que a incerteza é uma propriedade intrínseca de sistema quânticos. Um bom número de artigos relataram que apenas uma pequena quantidade de alunos possuíam visões dentro da quarta categoria, que é a única correta.

O efeito fotoelétrico é um experimento que, diferentemente do experimento de dupla fenda, evidencia o caráter corpuscular da luz. McKagan *et al.* [15] apresentam, baseados em pesquisas em ensino, algumas das dificuldades que os alunos apresentam após terem tido aulas sobre o efeito fotoelétrico:

1. A crença de que a equação  $V = IR$  se aplica ao efeito fotoelétrico;
2. A inabilidade em diferenciar a intensidade da luz (e com isso, o fluxo de fótons) e a frequência da luz (e com isso, a energia do fóton);
3. A crença de que o fóton é um objeto carregado eletricamente;
4. A inabilidade em fazer previsões sobre o comportamento de um gráfico de  $I$  versus  $V$  para o efeito fotoelétrico;
5. A inabilidade de dar uma explicação para o efeito fotoelétrico que utilize o conceito de fóton.

Em resumo, McKagan *et al.* relatam que os estudantes não possuem os conhecimentos prévios sobre circuitos elétricos e o modelo clássico da luz, necessários para compreender o efeito fotoelétrico. Krijtenburg-Lewerissa *et al.* reafirmam essa conclusão, e acrescentam resultados de pesquisas mostrando alunos que acreditavam que o efeito observado era gerado por alguma espécie de reação química da luz com o elétron [16].

### 2.3.2 Estratégias instrucionais

Ao falar sobre as estratégias instrucionais, Krijtenburg-Lewerissa *et al.* expuseram somente aquelas que haviam sido testadas, implementadas e devi-

damente avaliadas em relação à sua eficiência educacional. Essas estratégias foram organizadas em quatro grupos: estratégias com foco na interpretação, nos modelos atômicos, na compreensão matemática ou conceitual e, por fim, estratégias que fazem uso de atividades.

Com relação às estratégias do primeiro grupo, é sabido que a mecânica quântica possui diversas interpretações, muitas das quais procuram criar imagens ou modelos mentais que auxiliem a compreensão dos fenômenos pouco intuitivos e conceitos abstratos estudados. A falta de consenso, inclusive sobre a necessidade de tais interpretações, torna controverso tratar esse tema em sala de aula e muitos professores optam por deixá-lo fora do conteúdo que está sendo ensinado. Nem sempre esta é uma boa opção. Por exemplo, Baily e Finkelstein [17] relatam que o tópico das interpretações da mecânica quântica, quando tratado de maneira superficial, geralmente leva-os a construir suas próprias interpretações dos fenômenos em questão, que tendem a ser muito voltadas para o viés da física clássica. Ao confrontar os resultados de três tipos de abordagens diferentes e analisar a diferença de resultados entre aquelas que colocaram a questão da interpretação física como foco e as que a deixaram subliminar, os autores propuseram um currículo para o ensino de mecânica quântica que trata explicitamente da questão das interpretações, compreendendo as diferentes perspectivas, suas vantagens e limitações. Os resultados obtidos por Baily e Finkelstein demonstram-se muito positivos.

Outro trabalho importante no que se refere à discussão das interpretações em sala de aula foi feito por Greca e Freire [18], no qual os autores fazem uso de uma abordagem baseada numa interpretação ‘pragmática’ do conceito de vetor de estado, semelhante à utilizada pelos físicos em suas atividades profissionais. Ao aplicar essa abordagem a três grupos de estudantes de engenharia, mais da metade deles alcançaram uma compreensão razoável dos conceitos básicos da mecânica quântica para o nível educacional em questão.

O segundo grupo de estratégias instrucionais é aquele cujo foco está nos modelos atômicos. Krijtenburg-Lewerissa *et al.* mostram trabalhos que indicam que a maioria dos alunos se prende ao modelo atômico de Bohr, o que é completamente condizente com sua a visão clássica de mundo e também com a maneira como esse conteúdo lhes é apresentado corriqueiramente –

nas aulas de Química, por exemplo. São apresentadas algumas estratégias para a solução dessa situação. Kalkanis *et al.* [19] desenvolveram um módulo instrucional aplicado ao átomo de hidrogênio, que foca na diferenciação entre os modelos clássico e quântico. O resultado da aplicação do módulo foi positivo, com a grande maioria dos alunos conseguindo descrever corretamente o átomo de hidrogênio e aplicar o conceito do princípio da incerteza dentro desse contexto. Também são apresentados por Krijtenburg-Lewerissa *et al.* outros trabalhos com resultados semelhantes, alguns inclusive focando no desenvolvimento histórico dos modelos atômicos, mostrando que focar em modelos atômicos é capaz de modificar concepções incorretas dos alunos.

O terceiro grupo de estratégias educacionais nos é particularmente interessante, pois seu foco está na compreensão matemática *versus* conceitual da mecânica quântica. Alunos pré-universitários e calouros de cursos de ciências exatas não possuem o conhecimento matemático necessário para estudar grande parte dos conceitos de mecânica quântica. Por isso é levantada a questão sobre quais elementos matemáticos são necessários para uma boa compreensão desses conceitos. Um estudo desenvolvido por Koopman *et al.* [20] nesse contexto, com alunos de um curso de química quântica, chegou à conclusão de que os conteúdos matemáticos são necessários mas não suficientes para uma boa compreensão conceitual do que está sendo apresentado.

Existe também um trabalho realizado por Papaphotis e Tsaparlis [21], com calouros universitários de ciências, sobre a química do ensino médio e visando analisar a relação entre as compreensões ‘algorítmica’ e conceitual do tema. O estudo organizou-se em um questionário com dois grupos de questões: 5 delas testavam a capacidade de aplicar procedimentos algorítmicos e 9 requeriam compreensão conceitual. Ao analisar o resultado do questionário, os autores puderam identificar que uma grande porção dos alunos (36,8%) respondeu apenas a questões algorítmicas. Somente uma pequena parte dos alunos apresentou ambas habilidades (6,4%) ou apenas a conceitual (3,2%). Do total, 16,8% não conseguiram responder nenhuma das questões. A conclusão tirada pelos autores é que a competência na solução de problemas de maneira algorítmica deve ser independente da competência em questões conceituais.

Outro trabalho, feito por Dangur *et al.* [22], investigou o efeito gerado por uma abordagem não matemática na compreensão dos alunos da estrutura atômica. Esse trabalho foi aplicado à 65 calouros voluntários do curso de química e 122 alunos de turmas de *honors courses*<sup>4</sup> do ensino médio. O módulo aplicado pelos autores é baseado em uma abordagem qualitativa dos conteúdos de química quântica, enfatizando aplicações práticas e a visualização de elementos como os orbitais atômicos. A avaliação foi feita através de pré e pós-questionários. Os autores notaram uma significativa melhora na compreensão textual e visual dos conceitos de mecânica quântica. Também foi observado, no pós-questionário, como a diferença de conhecimentos entre os alunos de ensino médio e da graduação foi diminuída em relação à encontrada no pré-questionário.

Em um segundo trabalho, feito pelo mesmo grupo de pesquisa [23], os autores observaram que os alunos de graduação que participaram do grupo de teste obtiveram resultados significativamente melhores em questões de compreensão textual e visual, do que os alunos egressos de cursos tradicionais de mecânica quântica. Esse fato sugere, positivamente, que uma abordagem de ensino de mecânica quântica que seja conceitual, não-matemática, pode levar à compreensão satisfatória de muitos tópicos.

Ainda dentro da divisão feita por Krijtenburg-Lewerissa *et al.* para as estratégias instrucionais, está o quarto e último grupo, o das estratégias que fazem uso de atividades. Esta é uma categoria voltada para estratégias de ensino baseadas no que chamamos de aprendizagem ativa. Os autores dão diversos exemplos aonde atividades de aprendizagem ativa para aulas de mecânica quântica foram utilizados e renderam bons resultados quando comparados com aulas tradicionais. Tais atividades envolveram, por exemplo, a instrução por pares utilizada por Shi [24] com grupos de alunos de graduação. Os alunos do grupo de teste conseguiram atingir resultados significativamente maiores do que os alunos do grupo de controle, ensinados de maneira tradicional.

---

<sup>4</sup>*Honors courses* referem-se a turmas de ensino médio, de acesso opcional, com alto nível de exigência e conteúdo curricular mais extenso. Essas turmas geralmente são reservadas aos alunos que mais se destacam em determinadas matérias.

Um trabalho feito por Muller *et al.* [25] explora um lado um tanto diferente. Neste trabalho avaliou-se quão bem 40 alunos de graduação poderiam aprender sobre tunelamento quântico ao assistir ao vídeo de um diálogo entre um tutor e um estudante que incorporava diversos conceitos alternativos comuns ao tópico. Um segundo vídeo também foi produzido, apresentando uma exposição tradicional do tema, sem fazer menção a nenhuma concepção alternativa. Ao analisar os resultados do pós-teste foi possível constatar que os alunos que assistiram ao primeiro vídeo obtiveram resultados muito melhores do que aqueles que assistiram ao vídeo da exposição tradicional.

### 2.3.3 O papel de simulações

Existe atualmente uma quantidade numerosa de simulações computacionais de fenômenos ou experiências desenvolvidas para o ensino de mecânica quântica. Por ser um viés do ensino de mecânica quântica que possui estreita relação com o nosso trabalho, apresentaremos abaixo alguns dos projetos que fazem uso de simulações, descrevendo-os brevemente.

Em 2008, McKagan *et al.* apresentaram em seu artigo [26] 18 simulações computacionais sobre princípios fundamentais, experimentos famosos e aplicações de mecânica quântica, que foram desenvolvidas para serem integrantes do projeto “PhET” (Physics Education Technology, ou Ensino Tecnológico de Física), da Universidade do Colorado, que possui acesso gratuito.<sup>5</sup> Essas simulações foram desenvolvidas a partir de pesquisas anteriores feitas com alunos e buscaram levar em conta as dificuldades conceituais encontradas. Foram realizadas entrevistas com os alunos durante o período inicial de testes das simulações, de modo a avaliar não só a efetividade da aplicação mas também para buscar eventuais “falhas” nos programas. Os resultados mostraram que as simulações levaram a uma melhor compreensão do conteúdo abordado. Os autores ressaltam que isso ocorreu em especial para simulações do efeito fotoelétrico e do tunelamento.

No mesmo ano, Singh descreveu o desenvolvimento dos “QuILT” (Quan-

---

<sup>5</sup><https://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics/quantum-phenomena>

tum Interactive Learning Tutorial, ou, Tutorial de Aprendizagem Interativa de Quântica), voltados para alunos de graduação e cobrindo uma vasta quantidade de tópicos [27]. Como as simulações do PhET, esses tutoriais também foram desenvolvidos a partir das dificuldades dos alunos e consistem, usualmente, de um conjunto de atividades específicas: tarefas em sala, trabalho de casa e uso de aplicativos em Java. A avaliação do desempenho dos alunos era obtida a partir de pré e pós-testes e entrevistas individuais. Os tutoriais de Singh fazem uso de simulações computacionais advindas de diversas fontes, inclusive as do PhET. Trabalhos posteriores [28, 29] buscaram avaliar a efetividade dos tutoriais sobre o experimento de Stern-Gerlach e sobre medida quântica. Nos dois casos foram relatados melhores resultados no pós-teste, quando comparados com alunos do grupo de controle que foram ensinados do modo tradicional.

Outro trabalho importante é o de Kohnle *et al.* [30], no projeto “QuVis” (*Quantum Visualization Project*) da Universidade de St. Andrews.<sup>6</sup> Esse projeto consiste de uma coleção de simulações interativas ou de visualização, que tiveram seu desenho otimizado a partir de entrevistas com alunos. O seu foco, assim como os dois projetos que apresentamos acima, são alunos de graduação. Os autores analisaram o efeito que o uso das simulações teria na aprendizagem dos alunos e, ao aplicar um teste diagnóstico e realizar sua análise estatística, puderam constatar que houve uma melhora significativa nos resultados do teste entre os alunos que trabalharam com as simulações e os que não o fizeram.

Em um trabalho pioneiro realizado em 2002, Müller e Wiesner [14] desenvolveram um curso voltado para alunos de ensino médio que fazia uso direto de simulações computacionais, uma do interferômetro de Mach-Zehnder e outra do experimento de dupla fenda. Como resultado colhido desse curso, os autores identificaram que a maioria dos alunos adquiriram um domínio apropriado de conceitos de mecânica quântica e que muitas noções errôneas de alunos de cursos tradicionais não foram encontradas no grupo de teste, composto de 523 alunos. Uma adaptação da simulação do interferômetro foi desenvolvida por Ostermann *et al.* [31] e seu uso foi analisado em Pereira *et.*

---

<sup>6</sup>Acesso gratuito em <https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>

*al* [32].

Simulações também foram usadas por Michelini *et al.* [33], num trabalho com alunos de ensino médio sobre a interação da luz com polaroides e a lei de Malus. A estratégia empregada foi a PEC (previsão, experimento e comparação), onde o “experimento” é estudado virtualmente por simulações. Os autores analisaram os trabalhos produzidos pelos alunos em sala de aula e de um posterior grupo de discussão e constataram que por volta de 75% dos alunos tiveram seu aprendizado estimulado pela abordagem utilizada. A conclusão de Michelini *et al.* é que as simulações computacionais se mostram de grande valia para a criação de modelos fenomenológicos mais coerentes para os alunos, mas que essas simulações por si só não são suficientes para a construção de tais modelos.

Por fim, pensamos ser válido citar uma utilização lúdica das simulações, através da sua transformação em jogos. Gordon e Gordon desenvolveram um jogo computacional, para aplicação com alunos de graduação, que envolve o conceito do gato de Schrödinger, para dessa forma apresentar aos alunos alguns dos princípios da mecânica quântica [34]. Resultados colhidos da comparação de pré e pós-testes de um grupo de teste composto de 95 estudantes mostrou resultados positivos para a aplicação de jogos. Na mesma linha, o QuVis tem um interessante jogo sobre o detector de bombas de Elitzur e Vaidman<sup>7</sup>, tema que abordaremos mais à frente em nosso trabalho.

---

<sup>7</sup>[https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations\\_html5/sims/QuantumBombGame/Quantum\\_bomb.html](https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/QuantumBombGame/Quantum_bomb.html)

## Capítulo 3

# Uma proposta para o ensino da dualidade onda-partícula

*Not only is the universe stranger than we think, it is stranger than we can think.*

— W. Heisenberg, *Across the Frontiers*

De acordo com a física clássica, energia (ou, de forma geral, informação) pode ser transmitida de um ponto a outro de duas maneiras básicas e *excludentes*: ondas ou partículas. Por exemplo, duas pessoas podem comunicar-se trocando mensagens escritas ou conversando entre si. Não existem na nossa experiência cotidiana modos de comunicação que não sejam baseados ou na emissão e recepção de ondas ou na troca de objetos materiais (as partículas).

No início do século XX, entretanto, descobriu-se que a luz comportava-se de um modo estranho, ora apresentado características ondulatórias como interferência, ora características corpusculares como localização. A descoberta deixou os físicos perplexos, pois parecia impossível que algo pudesse ser ao mesmo tempo onda e partícula. Nas palavras de Feynman: *esse estado de confusão foi chamado dualidade onda-partícula* [35].

O objetivo desta dissertação é apresentar uma proposta para o ensino da dualidade onda-partícula, acessível a estudantes da escola média. Neste capítulo discutiremos apenas as linhas gerais da proposta. Sua apresentação detalhada, na forma de uma sequência didática, será objeto do Capítulo 4.

## 3.1 Uma sequência de ensino-aprendizagem sobre a dualidade onda-partícula

### 3.1.1 Ondas e partículas

A sequência didática proposta começa com a apresentação dos conceitos usuais (clássicos) de onda e partícula. Apenas os aspectos centrais dessas concepções, do ponto de vista da nossa discussão, são abordados. Com relação às ondas, enfatizamos que:

- são extensas, ou seja, chegam em vários lugares ao mesmo tempo;
- podem chegar simultaneamente a um mesmo ponto seguindo diferentes caminhos;
- se chegam a um mesmo ponto por diferentes caminhos, ondas apresentam superposição, podendo se cancelar ou reforçar nesse local (interferência destrutiva e construtiva).

Com relação às partículas, dizemos que:

- são localizadas, ou seja, só atingem um ponto num determinado instante;
- chegam a esse local seguindo apenas um caminho;
- se muitas partículas chegam a um mesmo local por diferentes caminhos, não apresentam interferência destrutiva ou construtiva.

Nas descrições acima concentramos nossa atenção apenas nos aspectos que tornam evidente a questão primordial: o fato de ondas e partículas serem descrições inconciliáveis de fenômenos naturais. Essa noção ajudará a tornar mais surpreendente o resultado final que obteremos para a luz. Deixamos de fora conceitos como comprimento de onda, frequência e amplitude para as ondas, ou energia e momentum das partículas, pois não são essenciais à sequência didática que propomos. Contudo, é claro que a discussão desses temas pode ser acrescentada sem problemas à sequência. Um benefício extra

do foco nesses aspectos essenciais é que torna-se possível abordar a dualidade onda-partícula mesmo com alunos que nunca tenham tido contato com física ondulatória ou mecânica da partícula.

### 3.1.2 A natureza do som

Após a apresentação dos conceitos clássicos de onda e partícula, discutimos como estabelecer se determinado fenômeno é ondulatório ou corpuscular. Inicialmente investigamos o caso do som. O primeiro passo na investigação é realizado com auxílio de um “divisor de feixe” sonoro, um aparato simples que pode ser construído com alguns canos, como mostrado na Figura 3.1. Essa montagem é chamada divisor de feixe porque o feixe sonoro que entra pelo lado esquerdo pode sair pelos dois braços à direita.

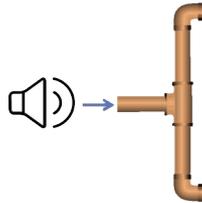


Figura 3.1: O divisor de feixe sonoro. O som que entra pelo lado esquerdo pode sair pelos dois braços à direita.

Se o som for um fenômeno ondulatório ele poderá atingir pontos diferentes no mesmo instante, ou seja, nada impede uma onda sonora de sair pelos dois braços simultaneamente (em “coincidência”), como ilustrado na figura 3.2.

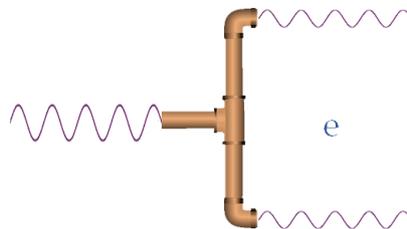


Figura 3.2: Comportamento do som no divisor de feixe, no caso dele ser um fenômeno ondulatório.

Por outro lado, se o som for um fenômeno corpuscular, cada partícula só poderá atingir um único ponto num determinado instante. Portanto, essa partícula sairá apenas por um dos braços do divisor de feixe, nunca pelos dois ao mesmo tempo. Essa “anticoincidência” está ilustrada na figura 3.3.

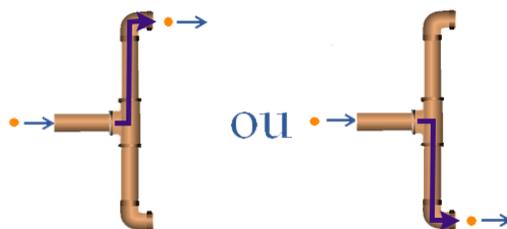


Figura 3.3: Comportamento do som muito fraco no divisor de feixe, no caso corpuscular.

Para sons muito fracos, a anticondência seria um sinal seguro de que temos um fenômeno corpuscular, pois apenas uma partícula entraria por vez no divisor de feixe. Para sons mais fortes, entretanto, o critério de anticondência é inconclusivo, pois se muitas partículas entrarem simultaneamente no aparato elas se dividirão estatisticamente entre os braços, gerando sinais coincidentes das duas saídas, como mostra a Figura 3.4.

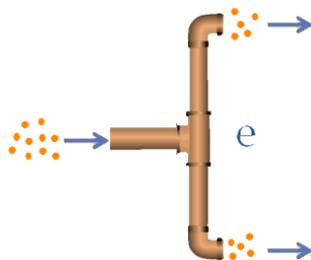


Figura 3.4: Comportamento do som forte no divisor de feixe, no caso corpuscular (forte significa muitas partículas).

As alternativas encontradas no experimento do divisor de feixe estão resumidas na Tabela 3.1.

A realização do experimento – um aluno falando na entrada do divisor e outros dois escutando nas saídas – sempre mostra, é claro, coincidência entre as saídas de som. Consultando a Tabela 3.1 vemos que esse resultado é

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

Tabela 3.1: Possíveis resultados do experimento com o divisor de feixe.

inconclusivo: não há garantia que o som seja um fenômeno ondulatório, pois existe a possibilidade de não termos produzido um som fraco o suficiente para que apenas uma partícula por vez entre no divisor.

Essa dúvida pode ser resolvida com um experimento capaz de observar fenômenos de interferência do som. A Figura 3.5 mostra o interferômetro sonoro que utilizamos para isso. Note que ele é constituído por dois divisores de feixe conectados. O tamanho de um dos ‘braços’, por exemplo o superior, pode ser alterado variando a distância  $d$  indicada na Figura 3.5. Após serem divididos na entrada do interferômetro, os sons percorrem os dois braços e são recombinados na saída do aparato. Esse interferômetro é conhecido como tubo de Herschel-Quincke [36].

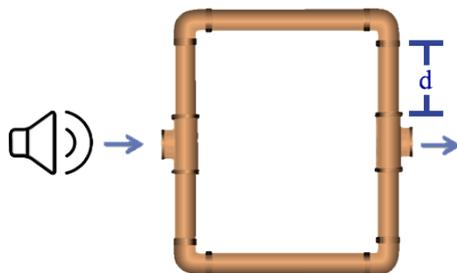


Figura 3.5: O interferômetro sonoro. Os sons que percorrem os dois braços são recombinados na saída do aparato.

Se o som for um fenômeno ondulatório devemos esperar efeitos de interferência na recombinação dos dois feixes sonoros. Em particular, para determinadas diferenças de tamanho entre os dois braços encontraremos interferência destrutiva, isto é, som mais som produzindo silêncio. Por outro lado, se o som tiver comportamento corpuscular, para qualquer tamanho dos braços a intensidade sonora na saída do interferômetro nunca será nula.

A realização do experimento mostra que é possível encontrar situações

nas quais praticamente nenhum som é registrado na saída do interferômetro, ou seja, há interferência destrutiva entre os sons que percorrem os dois braços e se recombina ao sair. Essa simples observação nos leva a concluir, sem qualquer dúvida, que o som é um fenômeno ondulatório, não sendo constituído por partículas. É mais simples procurar a interferência destrutiva que a construtiva nesse experimento, que é baseado na sensação auditiva: a primeira corresponde à ausência (ou quase) de som, algo de fácil percepção, enquanto a última representa um aumento de intensidade nem sempre identificável.

É interessante notar que o experimento poderia ter sido inconclusivo. De fato, se não tivéssemos observado a interferência não poderíamos afirmar que o som fosse um fenômeno corpuscular. Para uma onda sonora de comprimento de onda muito pequeno (muito menor que o diâmetro do tubo) seria muito difícil observar a interferência, numa situação análoga à da ótica geométrica no caso da luz. Isso pode ser visto na Tabela 3.2, onde estão as alternativas colocadas pelo experimento (compare com a Tabela 3.1 para o divisor de feixe). Portanto, o experimento deve ser planejado com tubos e comprimentos de onda capazes de revelar o caráter ondulatório do som.

	<b>onda:</b> $\lambda$ <b>pequeno</b>	<b>onda:</b> $\lambda$ <b>grande</b>	<b>partícula</b>
<b>interferência observada</b>		✓	
<b>interferência não observada</b>	✓		✓

Tabela 3.2: Possíveis resultados do experimento com o interferômetro sonoro.

### 3.1.3 A natureza da luz

Uma vez concluída a discussão sobre a natureza do som, o passo seguinte da sequência didática é uma investigação semelhante: a luz é um fenômeno ondulatório ou corpuscular? Nesse caso é difícil realizar em sala de aula experimentos como os anteriores. Para a luz, esses experimentos demandariam recursos difíceis de encontrar em uma escola. Por isso trabalhamos com simulações computacionais do divisor de feixe e do interferômetro. Escolhemos

utilizar um interferômetro de Mach-Zehnder nas simulações, um aparato não muito diferente do tubo de Quincke-Herschel e igualmente simples de compreender. As simulações foram desenvolvidas por nós e estão descritas no Apêndice B e na monografia [37]. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram o aspecto geral da interface do programa.

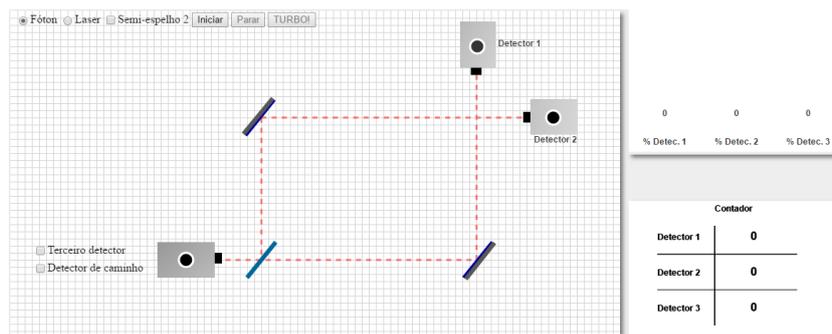


Figura 3.6: A simulação computacional do divisor de feixes.

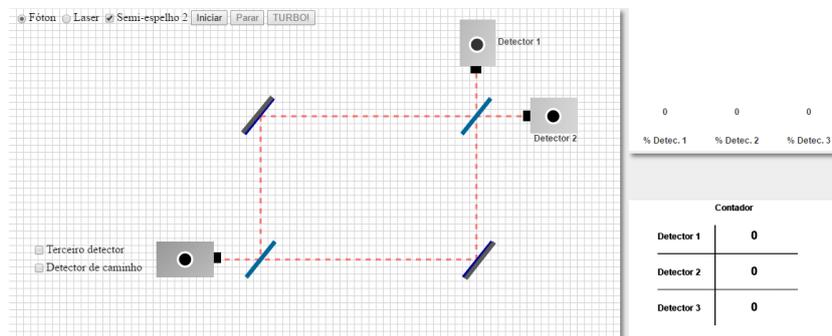


Figura 3.7: A simulação computacional do interferômetro de Mach-Zehnder. Perceba a adição do segundo semi-espelho no cruzamento dos feixes, logo antes dos detectores.

Como na investigação sobre o som, a discussão tem início com o divisor de feixe. No caso da luz este é um espelho semitransparente (um semi-espelho), que reflete 50% da luz incidente e deixa passar os outros 50%. Se a luz for um fenômeno ondulatório os dois detectores sinalizarão sua chegada simultaneamente (ou seja, em coincidência). Por outro lado, se a luz tiver comportamento corpuscular os dois detectores nunca responderão simultaneamente – ou um ou outro acusará a presença de luz (anticoincidência).

Iniciando a simulação com uma fonte forte de luz (a opção *laser* do programa), veremos que os detectores respondem em coincidência – ambos são permanentemente iluminados. Como já vimos no caso do som, isso não nos garante que a luz seja um fenômeno ondulatório. Para luz forte poderíamos ter muitas partículas distribuindo-se estatisticamente pelos dois braços do divisor e chegando simultaneamente aos detectores. A Tabela 3.1 da seção anterior mostra as alternativas existentes. No caso do som, essa ambiguidade nos levou diretamente ao experimento de interferência.

A simulação nos permite fazer uma investigação mais ampla, utilizando luz incidente de intensidade extremamente baixa (a opção *fóton* do programa)<sup>1</sup>. O que encontramos então é que somente um detector acusa a presença de luz por vez, nunca os dois ao mesmo tempo – ou seja, anticoincidência. De acordo com a perspectiva clássica, esse fato mostra que a luz é composta por partículas, chamadas fótons, que têm a propriedade esperada: seguem um caminho ou outro.

Podemos tentar confirmar essa conclusão fazendo a luz passar por um interferômetro: se ela realmente é uma partícula não deveríamos encontrar interferência construtiva ou destrutiva. Na simulação, o divisor de feixe é facilmente transformado em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder pela adição de um segundo semi-espelho no ponto onde os dois feixes se cruzam. O resultado deste segundo experimento, entretanto, é uma surpresa. Ainda utilizando a fonte de luz “fraca” (fóton a fóton), o que observamos é que a luz chega sempre ao mesmo detector, o outro fica sempre “no escuro”. Em outras palavras, há interferência construtiva no feixe que chega ao detector iluminado e destrutiva na direção do outro detector. Esse resultado não pode ser compreendido com o modelo corpuscular clássico: partícula + partícula = duas partículas, nunca zero partículas. Em contraponto, o comportamento observado pode ser facilmente explicado em termos da física ondulatória clássica em termos de interferência construtiva ou destrutiva dos feixes luminosos recombinados no segundo semi-espelho.

---

<sup>1</sup>Uma fonte fóton-a-fóton não é simplesmente uma fonte de luz comum cuja intensidade foi reduzida ao máximo possível. Tal fonte não emitiria necessariamente fótons únicos em uma dada direção, poderiam sair pares, trios, etc. Fontes de luz de fótons únicos só foram produzidas a partir da década de 1970 [38].

A conclusão que é possível extrair desses experimentos é que, diferentemente do som, a natureza da luz não pode ser descrita pelos paradigmas clássicos de onda e partícula – a luz às vezes se comporta como a primeira e outras vezes como a segunda, o que significa, no fundo, que ela não é nenhuma das duas. Esse fato experimental (ou melhor, o estado de confusão criado por ele [35]) recebe o nome de *dualidade onda-partícula*.

### 3.1.4 Aplicação prática da dualidade onda-partícula

A sequência didática prossegue apresentando uma aplicação “prática” desse comportamento estranho da luz: a ‘medida sem interação’ de Elitzur-Vaidman, mais conhecida como ‘testador quântico de bombas’ [39, 40]. Esse experimento foi proposto e realizado em meados dos anos 90 e faz uso da dualidade onda-partícula para realizar medidas sem qualquer interação com o objeto medido.

A situação proposta por Elitzur e Vaidman envolvia bombas ultrasensíveis que disparariam a qualquer interação com o exterior. O problema colocado por eles era separar um lote de bombas “boas” de um conjunto contendo bombas “boas” e “ruins” (que não explodiriam de nenhuma forma).

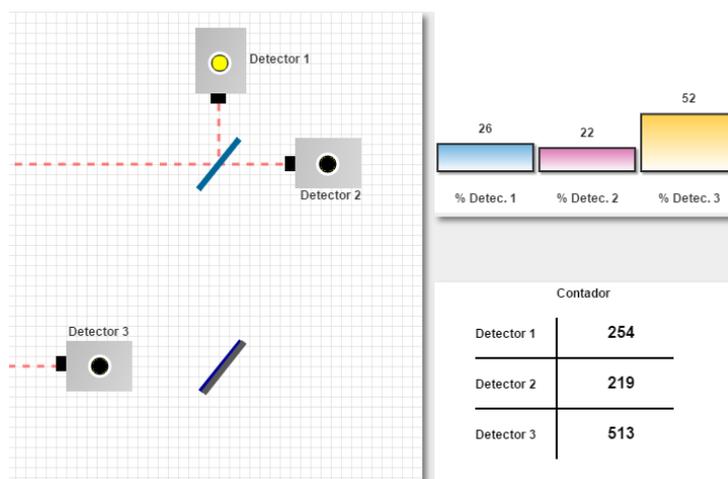


Figura 3.8: A introdução do terceiro detector na simulação computacional do interferômetro, fazendo o papel de uma bomba boa.

Esse problema é muito interessante pois não possui resposta nos termos

da física clássica. A dualidade onda-partícula fornece uma solução simples, que possibilita um novo contato dos alunos com o comportamento quântico da luz. A discussão pode ser realizada com auxílio do interferômetro virtual, no qual pode ser introduzido um detector em um dos braços (opção *terceiro detector*), conforme a Figura 3.8. O novo detector simula a presença de uma bomba boa no braço do interferômetro e o resultado da simulação mostra como é possível identificá-la sem explodi-la.

### 3.1.5 O caminho do fóton: distinguibilidade e indistinguibilidade

O estranho comportamento da luz pode ser apresentado aos alunos de outra perspectiva. Ao invés de descrevê-lo em termos da dualidade onda-partícula, podemos discutir a distinguibilidade ou indistinguibilidade dos caminhos da luz no interferômetro. Com isso, a questão da luz comportar-se como partícula ou onda num dado experimento pode ser colocada em termos da capacidade do experimento detectar o caminho seguido pelo fóton, um ponto de vista bem mais interessante.

O interferômetro virtual permite introduzir um detector capaz de determinar o caminho do fóton sem absorvê-lo (opção *detector de caminho*), conforme mostrado na Figura 3.9. O resultado da simulação, e de experimentos reais [41], mostra que a interferência é destruída pela identificação do caminho e, portanto, a luz passa a comportar-se como partícula.

Esse tópico é importante para desmistificar o papel usualmente atribuído à dualidade onda-partícula, quase sempre apresentada como um dos aspectos centrais da mecânica quântica, mesmo em alguns livros-texto. Experimentos de “qual-caminho” (*which-way*) como o que acabamos de descrever sugerem que outra dualidade, distinguível *versus* indistinguível, pode ser mais útil e reveladora.

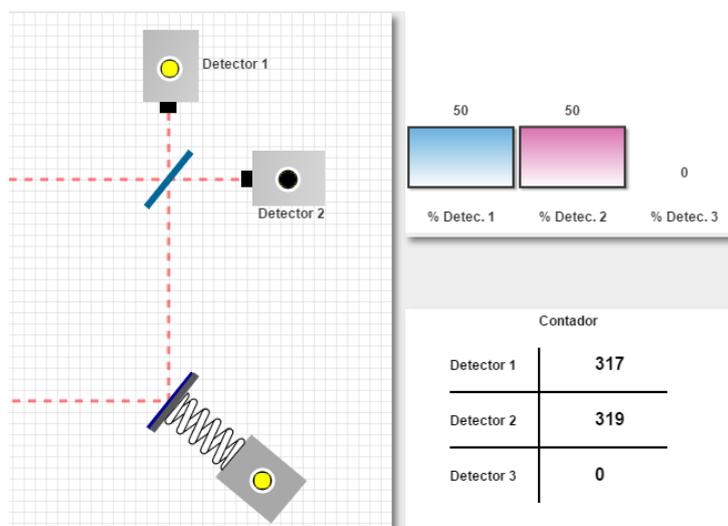


Figura 3.9: A simulação do interferômetro de Mach-Zehnder com um detector de caminho. O espelho em um dos braços é acoplado a uma mola ultrasensível e por isso vibra ao refletir um fóton, revelando o caminho que este seguiu após passar pelo primeiro semi-espelho.

### 3.2 Subsídios da pesquisa em ensino à sequência didática proposta

Embora o foco de nossa sequência didática seja a comportamento quântico da luz, iniciamos a discussão apresentando os aspectos centrais da caracterização clássica dos conceitos de onda e de partícula. Em seguida realizamos experimentos com o som e mostramos que este é um fenômeno ondulatório bem descrito no âmbito da física clássica. Essa introdução é necessária para que fique clara aos alunos a enorme diferença entre o comportamento da luz e o paradigma clássico. Nossa abordagem está de acordo com as ideias de Gil e Solbes [9], que propõem ensinar a física moderna enfatizando comparações com a física clássica, apresentando suas diferenças e consequentemente reforçando o conhecimento do aluno em ambas as partes.

A escolha de apresentar a dualidade onda-partícula através de experimentos com o divisor de feixe e o interferômetro de Mach-Zehnder também pode ser justificada com base em pesquisas. O efeito fotoelétrico é a opção mais comum para a introdução da dualidade, conforme vimos nos grandes projetos

educacionais, por exemplo. Contudo, os resultados encontrados por McKagan *et al.* [15] mostram que o efeito fotoelétrico costuma gerar mais confusão que entendimento quando utilizado como base dessas abordagens. A análise do circuito elétrico utilizado no experimento e os conceitos de física ondulatória envolvidos são, entre outros, elementos que dificultam a compreensão dos alunos, principalmente em cursos introdutórios. É interessante notar que uma apresentação do efeito fotoelétrico baseada no tempo de emissão dos elétrons, tal como a apresentada nos projetos *PSSC* e *Nuffield*, escapa dos entraves apontados por McKagan *et al.*

De qualquer forma, os experimentos de anticoincidência e de interferência lidam com elementos que podem ser expostos de forma muito simples: partículas clássicas seguem caminhos bem definidos, ondas clássicas apresentam interferência, etc. Com isso a dualidade onda partícula pode ser apresentada até mesmo a estudantes que não tenham passado por instrução formal em mecânica e física ondulatória.

A utilização de simulações computacionais em nossa sequência didática também possui respaldo nas pesquisas em ensino. Como vimos no Capítulo 2, Kohnle *et al.* [30], Müller e Wiesner [14], Michelini *et al.* [33], entre outros, apontam os benefícios de fazer uso destes elementos, quando comparados com métodos tradicionais de ensino. Em particular, o trabalho de Michelini *et al.* ressalta que simulações computacionais por si só não são suficientes como método didático, necessitam ser inseridas em um contexto mais amplo, tal como o que esse trabalho apresenta. Embora tenha surgido da necessidade de apresentar em sala de aula experimentos de difícil realização, o uso da simulação desenvolvida por nós também pode ser vista como um facilitador do processo de ensino-aprendizagem.

## Capítulo 4

# Ondas, partículas e luz

Neste capítulo apresentamos em detalhe a sequência didática sobre a dualidade onda-partícula que propomos para alunos do ensino médio. Isso é feito na forma de um material instrucional que pode ser utilizado diretamente por professores e alunos. Iniciamos com uma breve história das ideias sobre a natureza da luz. Em seguida descrevemos as características essenciais de ondas e partículas, enfatizando suas diferenças. Esses conceitos são utilizados para investigar experimentalmente se o som é onda ou partícula. A conclusão é a esperada: o som é um fenômeno ondulatório. O próximo passo é a repetição do mesmo estudo no caso da luz. Desta vez o resultado é surpreendente: às vezes a luz se comporta como onda, outras vezes como partícula – essa é a dualidade onda-partícula. Após discutir o quanto esse comportamento é estranho, mostramos que mesmo assim ele pode ter consequências práticas interessantes; por exemplo, obter informações sobre um objeto sem ter qualquer interação com ele. Finalizamos com uma discussão sobre o que ocorre quando tentamos descobrir qual foi o caminho seguido pela luz para ir de um ponto a outro. Isso nos leva a um entendimento mais profundo da dualidade da luz em termos da indistinguibilidade dos caminhos.

Para facilitar seu uso este capítulo está reproduzido no Apêndice A, com numeração própria de páginas, figuras e tabelas, sem referências a publicações científicas e com alguns comentários técnicos retirados.

## 4.1 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.

## 4.2 Ondas

Quando se fala em ondas, muito provavelmente uma das primeiras imagens que nos vem à cabeça é algo parecido com a Figura 4.1.



Figura 4.1: 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 4.2. Observe que após serem geradas, as ondas circulares atingem diversos pontos do líquido ao mesmo tempo.



Figura 4.2: Ondas na superfície da água. Outro exemplo onde vemos que uma onda pode atingir vários lugares simultaneamente.

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

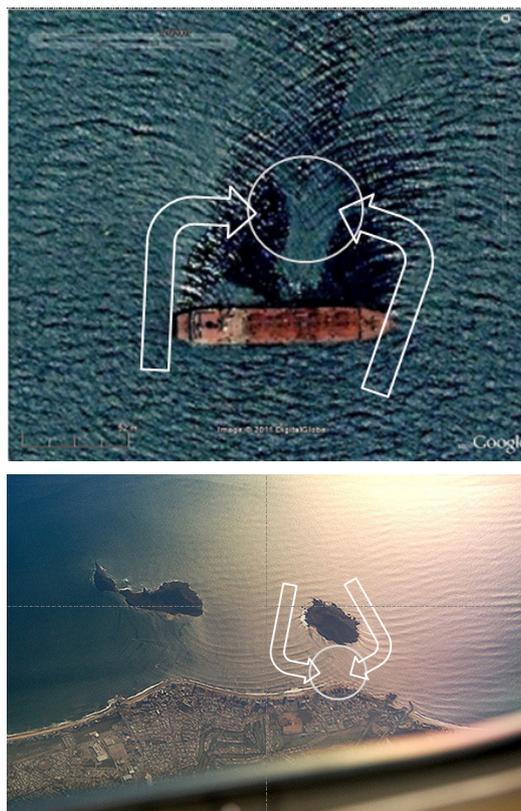


Figura 4.3: Exemplos de ondas que chegam em um mesmo ponto seguindo mais de um caminho.

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 4.4.

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



Figura 4.4: Gotas de chuva caindo em uma poça. Observe como as diversas ondas geradas percorrem a superfície se superpondo umas com as outras.

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 4.5, 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 4.6. 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.

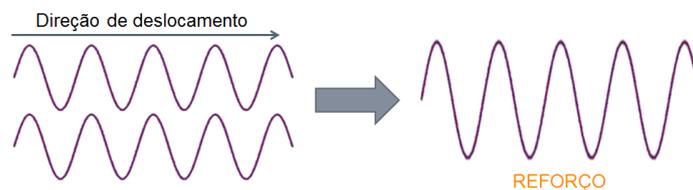


Figura 4.5: Exemplo de superposição reforçando o efeito de ondas que se encontram em um mesmo local, ou seja, interferência construtiva.

Interferências totalmente construtivas e totalmente destrutivas representam casos extremos; existe na verdade uma infinidade de possibilidades de

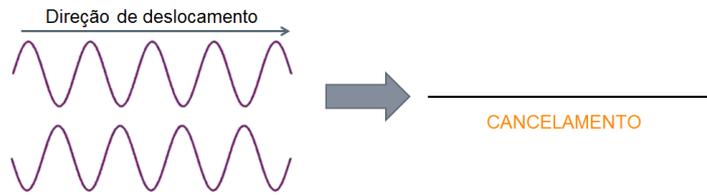


Figura 4.6: Exemplo de superposição cancelando o efeito de ondas que se encontram em um mesmo local, ou seja, interferência destrutiva.

se superpor duas ondas resultando em reforços ou cancelamentos parciais. Por simplicidade usaremos os termos construtiva e destrutiva nesse contexto mais geral.

### 4.3 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 4.7). 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.

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

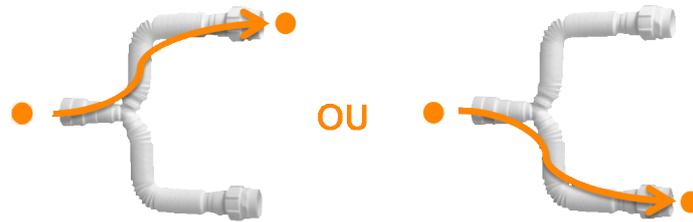


Figura 4.7: Comportamento de uma partícula ao entrar em um cano com duas saídas: ela atinge apenas um único local em um determinado instante.

chuva (Figura 4.8). A soma de uma gota com outra nunca resultará em nenhuma gota, na melhor das hipóteses criará uma gota maior.



Figura 4.8: Gotas de chuva.

## 4.4 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 4.1.

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.

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 4.1: Propriedades básicas de ondas e partículas.

## 4.5 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 4.9: 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*.

### 4.5.1 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 4.10. Chegar a dois (ou mais) lugares ao mesmo tempo é uma característica das

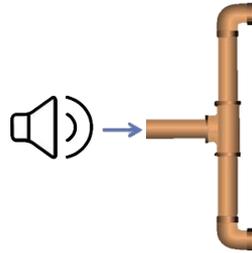


Figura 4.9: O divisor de som.

ondas, como já discutimos (ver Tabela 4.1).

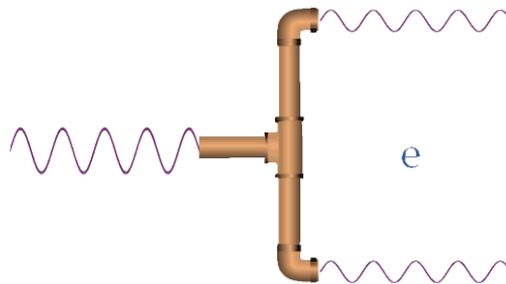


Figura 4.10: Comportamento do som, caso ele fosse composto por ondas.

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 4.11. 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 4.1.

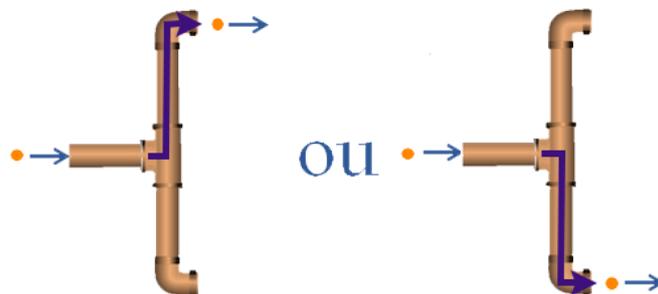


Figura 4.11: Comportamento do som muito fraco, caso ele fosse composto por partículas. Apenas uma partícula por vez passaria pelo divisor.

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 4.10). 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 4.11). Chamamos esse efeito de *anticoincidência*.

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 anticoincidência 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 4.12.

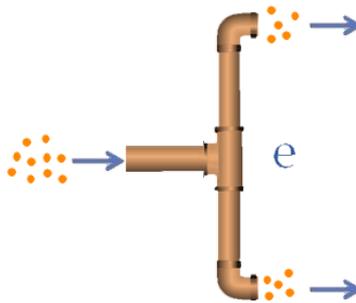


Figura 4.12: Comportamento do som forte, caso ele fosse composto por muitas partículas. Metade das partículas sairia por um tubo e metade pelo outro.

As alternativas encontradas no experimento do divisor de feixe estão resumidas na Tabela 4.2. 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.

	<b>onda</b>	<b>uma partícula de cada vez</b>	<b>muitas partículas ao mesmo tempo</b>
<b>coincidência</b>	✓		✓
<b>anticoincidência</b>		✓	

Tabela 4.2: Possíveis resultados do experimento com o divisor de feixe.

### 4.5.2 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 4.13. 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 4.13.

Se o som que entra no interferômetro é composto de partículas, sempre as veremos sair em mesmo número pelo lado direito. Conforme vimos, partículas

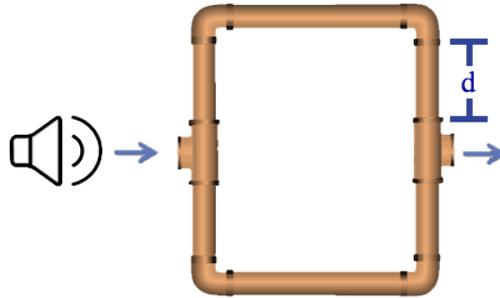


Figura 4.13: O interferômetro sonoro. A diferença de caminhos entre os braços superior e inferior pode ser ajustada variando a distância  $d$ .

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 4.14 ilustra essa situação.

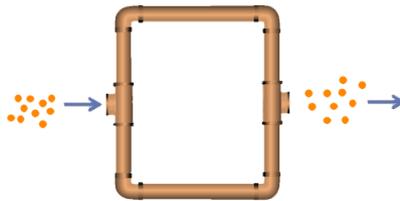


Figura 4.14: Comportamento esperado ao jogar partículas no interferômetro.

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 4.15. O caso da interferência destrutiva é particularmente notável: som mais som produziria silêncio!

Os possíveis resultados desse experimento podem ser vistos de maneira resumida na Tabela 4.3 (compare com a Tabela 4.2 para o divisor de feixe)<sup>1</sup>.

A experiência é executada da seguinte maneira. Um som agudo e contínuo

<sup>1</sup>Na verdade há uma terceira possibilidade, discutida no Capítulo 3 (ver Tabela 3.2). Se o comprimento de onda for muito pequeno seria difícil observar efeitos de interferência e poderíamos cair numa indefinição entre onda e partícula semelhante à do experimento anterior. Como normalmente o comprimento de onda do som audível é da ordem do tamanho do interferômetro, essa possibilidade não deve ocorrer e por simplicidade optamos por não discuti-la no presente contexto.

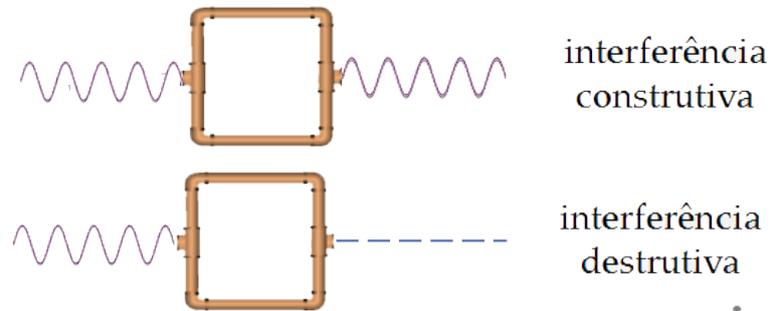


Figura 4.15: Interferência construtiva e destrutiva, caso o som seja uma onda

	onda	partícula
<b>interferência observada</b>	✓	
<b>interferência não observada</b>		✓

Tabela 4.3: Possíveis resultados do experimento com o interferômetro sonoro.

é gerado na entrada do interferômetro<sup>2</sup>. Então, alterando o tamanho de um dos braços (a distância  $d$  na Figura 4.13) 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 ouvidos<sup>3</sup>; um registro mais permanente pode ser obtido gravando o som para várias diferenças de caminho. Um exemplo de gravação está na Figura 4.16, que mostra o gráfico da amplitude da onda sonora para diferentes distâncias. Regiões de interferência destrutiva estão indicados pelas setas.

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.

<sup>2</sup>Aplicativos 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.

<sup>3</sup>Em ambientes grandes pode ser útil empregar amplificadores portáteis como os usados por professores ao dar aulas.

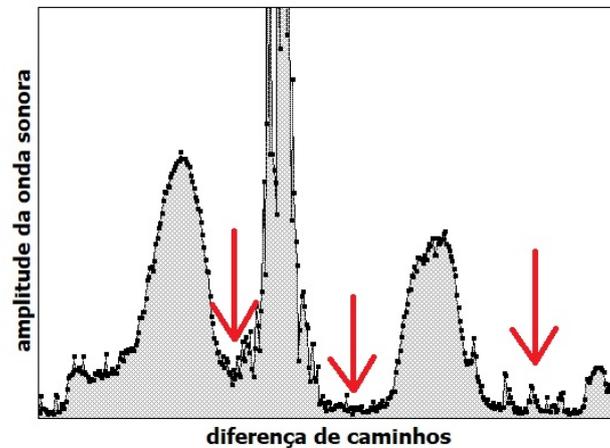


Figura 4.16: Amplitude da onda sonora para diferentes tamanhos de um braço do interferômetro. As setas indicam pontos de interferência destrutiva.

## 4.6 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.

### 4.6.1 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 4.17. 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 4.17 há um segundo espelho, esse completamente refletor, cuja função é tornar paralelos os feixes refletido e transmitido.

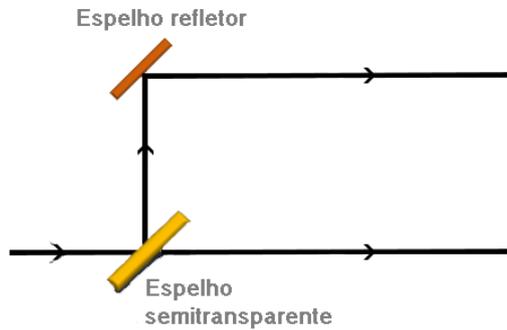


Figura 4.17: Esquema de um divisor de luz. Esse é essencialmente um espelho semitransparente que separa o feixe incidente em dois feixes de igual intensidade, um refletido e outro transmitido.

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.

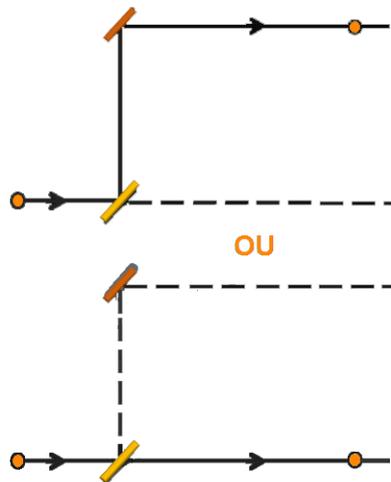


Figura 4.18: Comportamento da luz no divisor, no caso dela ser composta por partículas. Cada partícula ou é refletida ou é transmitida.

No caso da luz ser composta de partículas, o comportamento esperado está representado na Figura 4.18. Esse comportamento, assim como no caso som, se baseia nas características das partículas clássicas que já discutimos e

que se encontram resumidas na Tabela 4.1. 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 4.19. Cada uma dessas partes possui metade da intensidade luminosa da luz incidente.

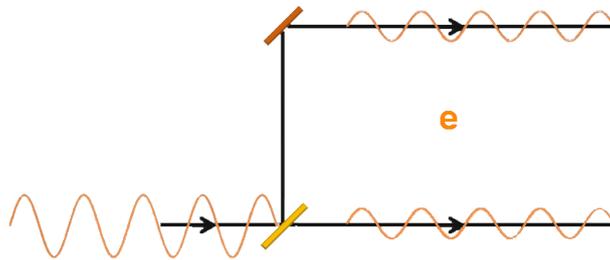


Figura 4.19: Comportamento da luz no divisor no caso dela ser composta por ondas.

Vamos analisar o experimento com auxílio de uma simulação computacional, mostrada na Figura 4.20. Essa simulação foi desenvolvida por nós [37] e pode ser acessada do seu computador ou *smartphone* através do link <https://bit.ly/2YsoGng>.

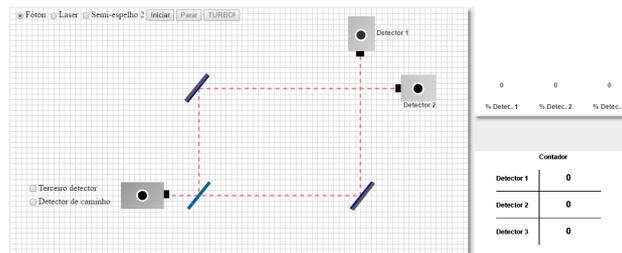


Figura 4.20: Simulação computacional do divisor de luz. Os círculos pretos na fonte e nos detectores são lâmpadas que, se acesas, indicam a atividade desses instrumentos.

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 aos detectores 1 e 2 simultaneamente. Na Figura 4.21 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 4.19, 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 aos detectores praticamente no mesmo instante. Como vimos na Tabela 4.2 a observação de coincidência nos dois detectores é ambígua: tanto partículas (em grandes números) quanto ondas levam ao mesmo resultado.

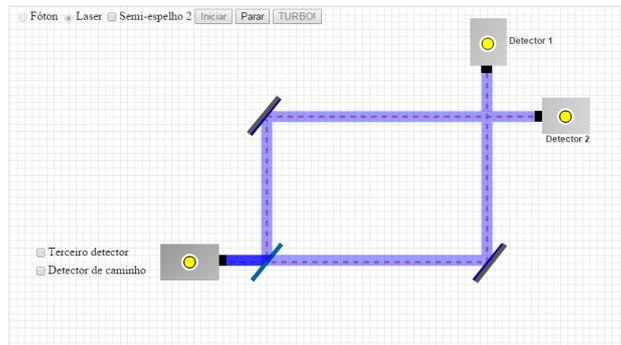


Figura 4.21: Comportamento da luz no divisor de feixe ao utilizar a fonte “Laser”. Repare que a luz chega simultaneamente aos dois detectores, como indicam as ‘lâmpadas’ amarelas acesas. A lâmpada acesa na fonte indica que essa está ligada.

Uma fonte de luz  *muito fraca* remediaria o problema; nesse caso a observação de anti-coincidência garantiria que luz é composta de partículas (veja novamente a Tabela 4.2). 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 4.22 que mostra apenas um dos detectores sendo acionado num dado instante. Como já discutimos (veja a Tabela 4.2), 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.

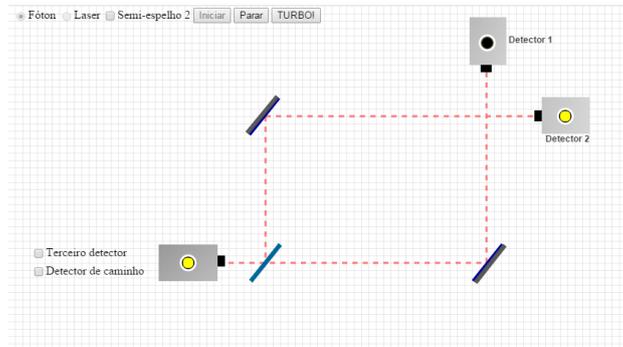


Figura 4.22: Comportamento da luz no divisor ao utilizar a fonte “Fóton”. Repare que, num dado instante, o detector 2 acusa a presença de luz e o detector 1 permanece no “escuro” (o inverso também ocorre), indicando a anti-coincidência.

Apesar da situação parecer resolvida – a luz tem comportamento de partícula –, 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 4.3. Entretanto, o resultado é surpreendente.

### 4.6.2 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

4.23. Esse tipo de interferômetro é conhecido como “interferômetro de Mach-Zehnder” em homenagem aos cientistas que primeiro sugeriram e utilizaram o aparato.

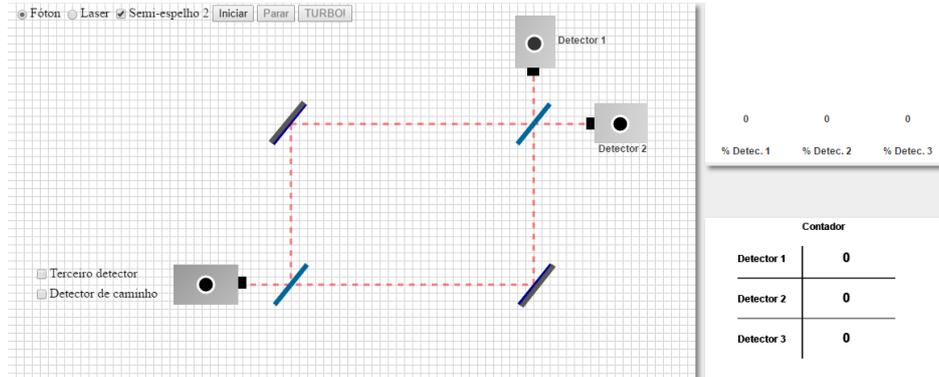


Figura 4.23: Simulação computacional do interferômetro de Mach-Zehnder.

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 4.24, 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 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 4.24. 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 4.3).

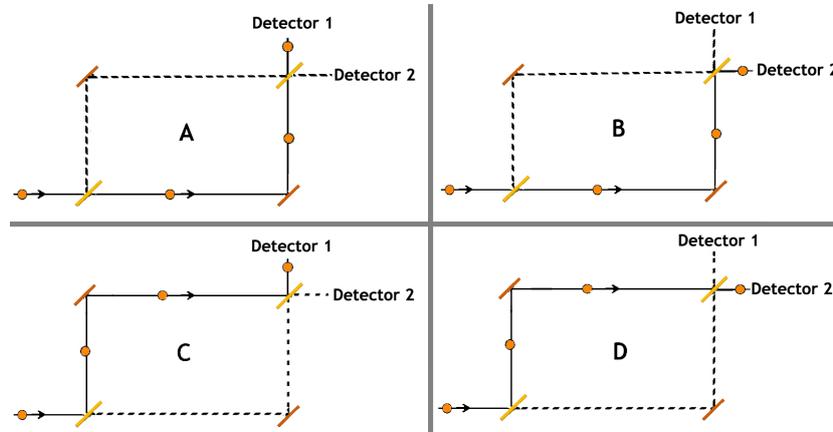


Figura 4.24: Comportamento esperado da luz no interferômetro, no caso dela se comportar como partícula. A probabilidade do fóton seguir um dos 4 caminhos (indicados como *A*, *B*, *C* e *D*) é 25%. Como os caminhos *A* e *C* levam ao detector 1, a probabilidade de um fóton chegar a esse detector deveria ser 50%. Da mesma maneira, a probabilidade de chegar ao detector 2 (caminhos *B* e *D*) também seria 50% .

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 4.25. 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 4.25. 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 4.25. 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 4.25 e como encontramos no experimento computacional.

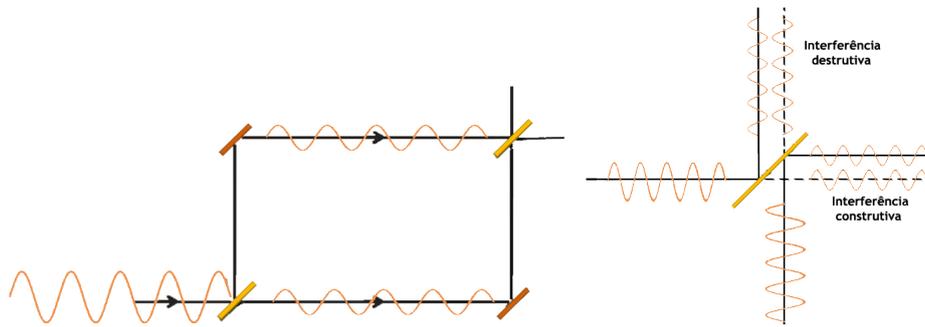


Figura 4.25: Comportamento de uma onda luminosa no interferômetro de Mach-Zehnder. A imagem à esquerda mostra a separação da onda incidente no primeiro semi-espelho. O detalhe à direita descreve a recombinação realizada pelo segundo semi-espelho e a consequente interferência nas saídas do instrumento.

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 Feynman<sup>4</sup>) no qual fomos colocados pelos experimentos com a luz.

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

<sup>4</sup>Um dos mais importantes cientistas do século XX, ganhador do Prêmio Nobel de Física em 1965.

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.

## 4.7 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. Vaidman<sup>5</sup>.

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 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 4.26.

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

---

<sup>5</sup>Um 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.

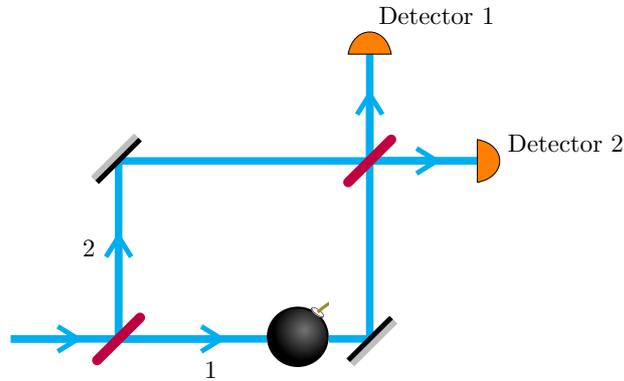


Figura 4.26: Representação da colocação de uma bomba em um dos braços do interferômetro de Mach-Zehnder. Conforme veremos, essa bomba poderá, ou não, representar um obstáculo ao caminho do fóton nesse braço.

mesmo aparato virtual utilizado na seção anterior, todos os fótons irão para o segundo detector, conforme vemos na Figura 4.27. Em suma, se a bomba for ruim o detector 1 não será acionado.

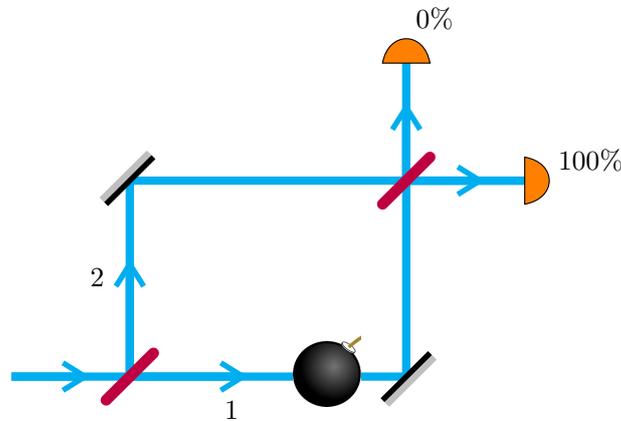


Figura 4.27: Bomba ruim no braço 1. Repare que ela é “invisível” para os fótons e portanto não afeta a interferência destrutiva no detector 1, que não será acionado.

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.

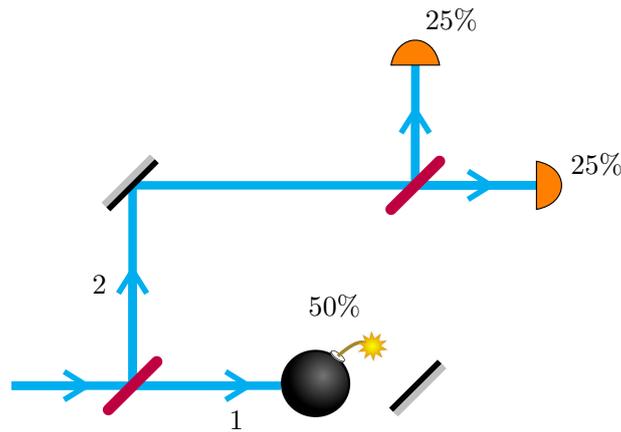


Figura 4.28: Bomba boa no braço 1. Repare que os fótons que chegam aos detectores passam por uma sequência de divisores de feixe.

Temos então duas situações. Caso a bomba esteja *ruim*, o detector 1 nunca dispara. Caso a bomba esteja *boa*, em 25% das vezes o detector 1 irá disparar sem que a bomba seja explodida.

Repare que o detector 1 somente disparará quando houver uma bomba boa no interferômetro. Mais ainda, nesse caso descobrimos que a bomba está boa sem explodi-la, pois o fóton não atingiria nenhum detector se tivesse explodido a bomba (o detonador funciona pela absorção do fóton). Portanto, resolvemos o problema de Elitzur e Vaidman: basta separar as bombas para as quais o detector 1 foi acionado e teremos um lote de bombas boas. A Tabela 4.4 resume as alternativas que levaram a essa solução.

Esse processo não parece muito eficiente pois, como vemos da Figura 4.28 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

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

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 disparar<sup>6</sup>.

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 laboratório<sup>7</sup>.

## 4.8 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

<sup>6</sup>É fácil ver que repetindo o teste sempre que houver dúvida podemos identificar 1/3 das bombas boas, pois  $1/4 + 1/4^2 + 1/4^3 + \dots = 1/3$ .

<sup>7</sup>O 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.

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 4.24. 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 4.1).

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 fará.

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 4.29. 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 4.29); caso contrário, o caminho só poderá ser o outro (o braço superior).

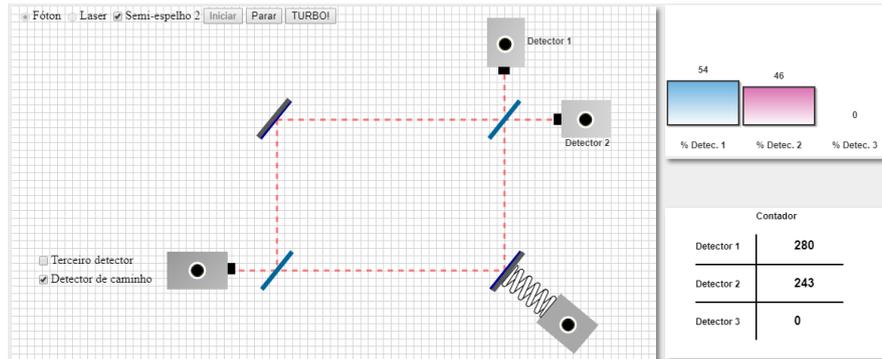


Figura 4.29: O interferômetro de luz com o detector de caminho acoplado ao espelho do caminho 1.

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 4.29, 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 reveladora<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup>Outros 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>

## Capítulo 5

# Aplicações da sequência didática

Neste capítulo descreveremos as aplicações que realizamos da sequência didática e analisaremos seus resultados com base nas respostas dos alunos a pré e pós-testes. As questões do pré-teste foram pensadas para fazer o aluno refletir com antecedência sobre os temas a serem tratados, motivando-os a acompanhar o desenvolvimento da discussão. As respostas ao pré-teste também foram úteis para orientar a preparação da aula, pois permitiram identificar dificuldades e interesses dos alunos. Por questão de espaço não apresentaremos aqui todas as respostas dadas pelos alunos, apenas mostraremos as que consideramos mais informativas. A lista completa de respostas está no Apêndice E.

Relataremos duas aplicações realizadas em locais diferentes. Na primeira, não foi possível realizar o pré-teste, tendo sido aplicado apenas o pós-teste ao final da aula. Na aplicação seguinte, como houve mais tempo para que a sequência fosse desenvolvida, tanto o pré quanto o pós-teste foram aplicados.

### 5.1 Primeira aplicação

A primeira aplicação da sequência didática foi realizada na forma de uma aula com duração de 1:30h, no Instituto de Física da UFRJ. A aula foi parte

de uma visita guiada ao Laboratório Didático do IF-UFRJ (Ladif), feita por alunos do curso normal (formação de professores do ensino fundamental) e alunos do ensino médio regular, todos de uma escola pública do município de Caxias, no Rio de Janeiro. Devido ao tempo curto optamos por aplicar apenas o pós-teste.

Os quase 40 alunos demonstraram interesse nos temas abordados e alguns participaram ativamente fazendo perguntas e dando respostas. Um dos pontos altos da aula foi a experiência com o interferômetro sonoro para a demonstração do som como um fenômeno ondulatório. Foi notória a surpresa dos alunos ao observarem que a intensidade sonora variava (chegando quase ao silêncio) com a simples mudança do comprimento de um dos braços do interferômetro.

A contradição que surge quando realizamos os experimentos do divisor de feixe e do interferômetro de Mach-Zehnder para a luz também foi um momento importante. Foi possível ouvir de alguns alunos frases indicando sua confusão com a situação exposta.

A observação das respostas dadas pelos alunos foram reveladoras e discutiremos algumas delas a seguir. A resposta ao questionário não era obrigatória e apenas 12 dos quase 40 alunos nos devolveram as questões. Para preservar o anonimato dos alunos, utilizamos numerações de 1 a 12 para fazer referência a suas respostas. Essa numeração não está relacionada ao grau de importância que atribuímos às respostas.

As questões do pós-teste contemplam os temas centrais que tratamos durante a aula:

1. O que você entende por partícula? Dê exemplos de objetos cotidianos que você chamaria de partícula.
2. O que você entende por onda? Dê exemplos de ondas que você encontra no dia a dia.
3. Quais as diferenças que você consegue identificar entre partículas e ondas?

4. Você se lembra de ter observado algum fenômeno de interferência em ondas? Se sim, descreva-o.
5. Qual a diferença entre interferência construtiva e destrutiva?
6. O som é formado por ondas ou partículas? Explique sua resposta.
7. E no caso da luz, ela é formada por ondas ou partículas? Explique sua resposta.

As respostas para a primeira questão (sobre partículas), em sua maioria, estavam de acordo com o que apresentamos durante a aula. Alguns alunos deram “respostas-padrão” decoradas – por exemplo, “coleção de massas, tomadas uma a uma” –, o que significa que já possuíam algum contato com a ideia de partículas. Duas respostas que pensamos serem interessantes por demonstrarem a tentativa dos alunos de usar conceitos vistos durante a aula foram:

Aluna 3: Partícula é algo pontual, que, se estiver em unidade não pode ser dividida para lugares diferentes. Ex: bola de gude, tampinha de garrafa, anel etc.

Aluno 12: Partícula é um corpo não divisível e quando há algum empecilho em sua trajetória ele não se propaga como onda. Objeto: bola de sinuca.

Na segunda questão (sobre ondas), houve uma uniformidade de respostas, onde é possível perceber a utilização de palavras-chave como “perturbação”, “interferência” e “divisão”. Embora a primeira esteja correta, a utilização dos termos “interferência” e “divisão” mostra que eles ajudam o aluno a construir um conceito de onda diferenciado da ideia de partícula. Algumas respostas que consideramos interessantes são:

Aluno 4: Que uma onda pode ser construtiva ou destrutiva. E que há interferência entre as ondas. Ex: o som, a onda do mar ou a própria luz

Aluno 12: Onda é um movimento causado por uma perturbação e, contrário da partícula, é divisível e ela pode se propagar,

ou seja, se uma madeira é um obstáculo para uma onda em um rio, em vez dela ser interrompida, ela se propaga através das suas vibrações. Ex: som.

O fato das respostas à terceira questão (diferença entre onda e partícula) apresentarem a palavra “interferência” quando os alunos fizeram referências às ondas indica que eles são capazes de identificar fenômenos de interferência como uma característica única das ondas, um ponto de aprendizagem vital para nossa sequência didática. Duas respostas que ilustram o que queremos dizer são as seguintes:

Aluna 2: Ondas podem vir a vários lugares ao mesmo tempo e podem ser divididas. Partículas não podem ser distribuídas, só se estiverem em grande quantidade. (a resposta do aluno é acompanhada de desenhos: uma onda e um conjunto de pontos)

Aluna 6: Na onda pode ocorrer interferências construtiva e destrutiva. As partículas mantêm um certo padrão.

A quarta pergunta (observação pessoal de interferência) foi uma das questões que mais confundiram os alunos. Grande parte dos alunos pensou que essa questão pedia para eles dizerem em quais partes da aula foram apresentados fenômenos de interferência, quando na verdade estávamos interessados em respostas que envolvessem o seu cotidiano. Uma análise do enunciado realmente revela essa interpretação dúbia. Porém, o resultado provavelmente mostra que os alunos não identificam fenômenos de interferência no seu dia-a-dia. Exemplos de respostas estão a seguir. Repare que o aluno 7 fez alusão direta ao interferômetro sonoro que ele chama de tubos sonoros (“tubo fechado” parece indicar a configuração inicial, de interferência construtiva, e “tubo aberto” o alongamento de um dos braços, que produz interferência destrutiva).

Aluna 6: Sim, no oceano. As ondas se sobrepõem as outras e as anulam.

Aluna 7: Tubos sonoros (não lembro o nome). Com o tubo fechado o som sai normalmente e quando abre o tubo o som vai diminuindo.

A questão de número 5 (diferença entre interferência construtiva e destrutiva) foi relativamente complicada de responder. Três dos 12 alunos a deixaram em branco embora quiséssemos apenas observar o que cada um conseguira captar sobre esse tema durante a aula. Duas respostas que demonstram que alguns alunos começaram a compreender os conceitos envolvidos são as seguintes:

Aluna 6: A construtiva se junta uma onda a outra para formar uma maior ainda. Enquanto a destrutiva, como o nome sugere, “destrói” a outra onda e a si mesma.

Aluna 7: Construtiva – É quando as ondas não tem diferença, ou seja, ocupam a mesma posição. Destrutiva – É quando tem diferença, as ondas ocupam uma posição ou outra, variando.

A penúltima questão do teste (som: onda ou partícula) apresentou uma boa quantidade de respostas corretas, o que mostra que a maioria dos alunos que responderam ao questionário conseguiu compreender qual o resultado final da busca pela natureza do som e, principalmente, qual a razão de podermos afirmar que esse é um fenômeno ondulatório. Duas respostas típicas foram:

Aluna 6: Por ondas. Porque, se fizermos um teste o expondo a duas saídas, ele pode gerar interferência destrutiva (característica das ondas).

Aluna 10: Onda. Porque ele faz uma interferência e transmite por vários lugares.

Por fim, a última questão é a que toca no ponto principal da aula, a dualidade onda-partícula. Embora não esperássemos que os alunos conseguissem captar completamente esse conceito em apenas 1:30h de aula, algumas respostas foram muito boas, como:

Aluno 1: A luz é uma entidade quântica, ou seja, pode ser tanto se comportar como onda quanto como partícula.

Aluna 2: A luz pode ser os dois. Ora pode se comportar como onda e também pode se comportar como partícula, depende da situação.

Aluno 12: No caso da luz ela pode ser tanto onda quanto partícula, depende somente do tipo de experimento que é realizado.

Digna de nota foi resposta dada pela Aluna 6:

Aluna 6: Pelos dois e nenhum ao mesmo tempo. A luz se comporta tanto como partícula como também onda, dependendo do teste. Então ela é os dois e nenhum, pois ambos são completamente distintos.

A aluna ilustra, em suas próprias palavras e de forma irretocável – “é os dois e nenhum” – , o estado de confusão em que ficamos quando tentamos encaixar a dualidade da luz nos conceitos clássicos.

As respostas dadas, e nossa própria percepção durante o encontro, indicam que é possível expor a alunos que tiveram pouco contato com a Física (vindos de escola normal e média) um dos temas mais complexos da ciência moderna, mesmo dispondo apenas de um tempo relativamente curto.

## 5.2 Segunda aplicação

A segunda aplicação de nossa sequência didática foi realizada durante um trimestre, com início em setembro de 2017, em uma escola privada do município de Niterói, no Rio de Janeiro. Colaborou para essa aplicação o professor Marcelo Fonte Boa, docente na referida escola. A aplicação aconteceu nos moldes de um curso extra-curricular e foi oferecido a alunos do 9º ano do ensino fundamental e dos três anos do ensino médio. Os alunos do 3º ano do ensino médio não participaram por conta da proximidade dos exames de acesso ao ensino superior.

O tempo disponível permitiu que aplicássemos tanto o pré-teste quanto o pós-teste, diferentemente do ocorrido no caso anterior. Ambos questionários são mais longos que o utilizado na primeira aplicação da sequência didática

mas cobrem essencialmente o mesmo os mesmos temas. Os testes não eram obrigatórios; dos 13 alunos que fizeram o curso, 12 responderam ao pré-teste e apenas 4 ao pós-teste. Atribuímos essa diferença à facilidade para “cobrar” o pré-teste, já que os alunos estavam na sala de aula durante sua aplicação. O pós-teste foi entregue após a conclusão do curso, o que dificultou o acesso aos estudantes. De qualquer forma, a taxa de retorno do pós-teste foi semelhante à da primeira aplicação da sequência.

### 5.2.1 Análise das respostas do pré-teste

As questões do pré-teste buscaram, como já mencionamos, motivar os alunos para o curso e ajudar o professor na preparação das aulas. O questionário foi o seguinte:

1. Suponha que você esteja do lado de fora de um quarto, cujas paredes e porta são bem finas, e tenha que passar um recado para uma pessoa que se encontra dentro desse quarto. Você acha mais fácil escrever um bilhete e passá-lo por debaixo da porta ou falar em voz “alta” o recado para a pessoa?
2. Qual a sua opinião sobre frase: “Quem escreve um bilhete necessariamente transfere a informação materialmente, mas quem fala não está materialmente transferindo-a.”
3. O que você entende por “matéria”? Dê exemplos de objetos que podemos considerar como “partículas materiais”.
4. O que você entende por “onda”? Dê exemplos de ondas que encontramos no dia a dia.
5. Quando duas bolas de gude idênticas são arremessadas com velocidades de mesmo valor uma contra a outra, no encontro elas colidem. Todavia, quando numa superfície de água produzimos duas “ondas” mandando uma em direção à outra, no encontro elas interferem enquanto

se cruzam, mas não observamos uma colisão. Como você distinguiria o fenômeno de colisão de partículas do fenômeno da interferência ondulatória?

6. Você já observou algum fenômeno de interferência ondulatória? Se sim, cite qual(is).
7. Já ouviu falar em interferência construtiva e destrutiva? Se sim, explique a diferença entre eles.
8. Explique o que é SOM para você. Dê exemplos de como podemos produzi-lo.
9. E a luz, explique o que é LUZ para você. Dê exemplos de como podemos produzi-lo.
10. Você conhece algum caso de ondas que atravessam a matéria? Se sim, qual(is)?

A análise das respostas revela aspectos importantes do pensamento dos alunos e de seu conhecimento prévio sobre a dicotomia do comportamento de onda e de partícula. Por exemplo, embora a maioria dos alunos tenha respondido a primeira questão (transporte de informação por ondas e partículas) com “falar em voz alta”, um dos alunos optou por “passar um bilhete”, *pois assim somente nós saberemos do assunto*, atestando, indiretamente, o conhecimento de que partículas seguem caminhos bem definidos e atingem somente um local em um instante de tempo, e que ondas são extensas e chegam a muitos pontos ao mesmo tempo.

Aluna 8: Falar em voz “alta”, pois quando falamos ondas são transmitidas podendo atravessar matérias (depende da largura), sendo as paredes e a porta bem finas, falar em voz “alta” seria mais fácil.

Aluno 9: Se o objetivo é passar a resposta com maior facilidade, falar em voz alta é a melhor opção. Porém se o objetivo

fosse passar a mensagem de maneiras mais clara, mandava uma carta (sem perder eficiência).

Aluno 10: Eu acho que é mais fácil escrever um bilhete e passa-lo por debaixo da porta, pois assim somente nós saberemos do assunto.

As respostas da segunda questão (transporte de informação e de matéria) mostram uma minoria dos alunos apresentando a concepção de que o som carrega partículas do ar ao se deslocar. A grande maioria, no entanto, concorda com a afirmativa do enunciado da questão.

Aluno 2: Depende de sua concepção de material. Porque você vibra suas cordas vocais e faz o som se propagar através do ar até chegar no ouvido da pessoa, e o ar tem massa. Então é relativo.

Aluna 7: Acho que quando se fala também envia objeto material, como partículas e vibrações.

A maioria das respostas da terceira questão (partículas e matéria) basearam-se no mesmo argumento para identificar objetos materiais: aquilo que podemos tocar. Já na questão 4 (ondas), ocorreram diversos desencontros conceituais. Alguns alunos não souberam responder, enquanto outros utilizaram exemplos e termos variados para tentar explicar o que pensavam serem as ondas, algumas vezes definindo-a como perturbação de um meio, em outras como deslocamento de partículas.

Aluno 1: Onda é o ato de algo se propagar pelo espaço de maneira progressiva e crescente, sendo emitida de um ponto e aumentando sua “abrangeência” à medida que percorre o espaço até “perder força”. Eletromagnéticas e mecânicas (etc?), como som, ondas de rádio, a luz, em alguns casos impacto.

Aluna 5: É um conjunto de coisas do mesmo tipo se movimentando em uma direção. Exemplo: ondas de rádio que saem dos nossos celulares, ondas na praia, ondas de radiação que vemos nos documentários que falam sobre guerras.

Aluna 8: São partículas que são transmitidas pelas radiações ou pelas ondas sonoras. Fala, os raios solares, rádio.

Na quinta pergunta (colisão e interferência) a maioria dos alunos expressou ideias semelhantes: para existir colisão, é necessário que haja matéria. Um dos alunos, que na questão anterior havia considerado ondas como propagadoras de matéria, não respondeu a essa questão, talvez por encontrar contradição em seus conceitos.

Aluno 6: Na colisão de partículas existe uma matéria se colidindo com outra, já na ondulatória só existem deformações no espaço.

Aluna 7: Não sei, mas acho que na colisão de partículas existe um choque entre os dois, ou seja, uma força é imposta sobre a outra e na interferência ondulatória não há um impacto elas apenas se atravessam.

Na questão 6 (observação de interferência no cotidiano) apenas 4 alunos afirmando terem observado interferência em ondas na água de uma piscina, ou em ondas eletromagnéticas como o sinal de internet *wi-fi*. A sétima questão (interferência construtiva e destrutiva) complementa a anterior e apenas um dos alunos que que responderam positivamente à questão anterior soube expôr em termos próprios, o que seria uma interferência destrutiva, embora não tivesse ouvido falar nisso anteriormente.

Aluno 2: Não. Mas estipulo que interferência destrutiva seja uma interferência que abale outra que esteja em seu caminho.

Na hora de responder à questão 8 (o que é som), todos os alunos descreveram o som ou como onda/vibração ou como um “algo indefinido” que conseguem ouvir.

Aluno 11: Som para mim é basicamente as vibrações produzidas por uma coisa ou algum objeto, podemos produzir isso ao interagir com o ambiente.

A nona questão (o que é luz) teve respostas bastante diversas. Um aluno associou a luz a reações químicas, outro à reflexão de feixes que o auxiliavam a ver as coisas, um aluno chegou até mesmo a mencionar fótons, o que indica que esse termo já o era previamente conhecido.

Aluno 2: Luz é o resultado de alguma reação química ou física que pode se propagar tanto no ar como no vácuo.

Aluno 6: A luz é uma radiação eletromagnética que anda em linha reta e é reflexível. Acho que com colisão de partículas.

Aluno 11: Para mim é o acúmulo de fótons refletidos que podem ser detectados por nossos olhos

Finalmente, a décima questão (passagem de ondas pela matéria), obteve uma boa quantidade de respostas positivas. Algumas respostas foram bem elaboradas, indo além do caso do som.

Aluno 10: Sim, as ondas radioativas, que dependendo do tipo de radiação, pode atravessar de plásticos a metais.

Aluno 12: Ondas de wi-fi passando pela parede para chegarem no telefone.

### 5.2.2 Análise das respostas do pós-teste

As questões do teste aplicado ao final das aulas são diferentes das do pré-teste, embora obviamente com aspectos paralelos:

1. Quais as diferenças que você consegue identificar entre partículas e ondas? Você percebe mudança na sua resposta do questionário anterior para esse?
2. O som é formado por ondas ou partículas? Explique.
3. Por que ao utilizar o interferômetro sonoro fomos capazes de ouvir o som aumentar ou diminuir quando mexíamos no tamanho de um dos braços? Você seria capaz de dizer o nome do fenômeno envolvido e porque a existência dele foi vital para descobrirmos a natureza do som?

4. Quando observamos o comportamento da luz na simulação computacional do divisor de luz com uma fonte muito fraca, ela apresentou comportamento de onda ou de partícula? Por quê? Você é capaz de dizer o que é um fóton?
5. Ao observar o comportamento da luz em uma simulação computacional do interferômetro de luz (que nada mais é do que o divisor de luz acrescido de um segundo espelho semitransparente, lembra?), a vimos apresentar um comportamento estranho: ela somente chegava a um dos detectores. Esse comportamento sugeria que a luz fosse onda ou partícula? Por quê?
6. É possível chegar a um consenso sobre a natureza da luz? Que nome damos ao seu comportamento estranho?

Conforme comentado, apenas 4 alunos responderam ao questionário. Mesmo assim foi interessante observar algumas evoluções conceituais entre os questionários inicial e final.

A primeira questão (diferenças entre ondas e partículas) retoma a discussão que as questões 1 e 2 do pré-teste faziam, mas agora de maneira a formalizar melhor a resposta. Embora os alunos tenham exposto poucas características de ondas e partículas, um dos conceito-chave das aulas (interferência) apareceu nas três respostas.

Aluna 8: Ondas sofrem interferência (ondas de sobreposição ou anulatórias) e as partículas colidem.

Aluno 10: As ondas se anulam e as partículas se chocam.

Aluno 11: Partículas só seguem um caminho para chegar a um local, e não se interferem, ao contrário de ondas que pode chegar a um local seguindo diferentes caminhos ao mesmo tempo, e podem ter uma interferência construtiva ou destrutiva. Mudou desde o primeiro questionário.

As respostas dadas à segunda questão (o que é som, semelhante à questão 8 do pré-teste) também foram muito interessantes, em especial pela referência

direta do aluno 11 à experiência feita em sala. A aluna 8, que não havia conseguido responder à questão do pré-teste, agora conseguiu justificar a afirmação de que o som é formado por ondas. As referências a som alto e baixo parecem estar relacionadas ao experimento de interferência realizado em sala de aula.

Aluna 8: O som é formado por ondas. O som pode sofrer interferência. Ora ele está mais alto ou mais baixo.

Aluno 10: O som é uma onda, pois nós conseguimos aumentar ou diminuir o volume do som.

Aluno 11: Por ondas, pois ele sofre interferência, como foi mostrado no experimento durante a aula.

Aluno 13: Ondas. Esta conclusão, resumidamente falando, se baseia na característica de interferência e anulação de ondas por outras ondas.

A terceira questão trata do experimento com o interferômetro sonoro. O aluno 13 demonstra em sua resposta que captou os conceitos básicos, apesar da confusão entre intensidade e frequência. As respostas dos outros 3 alunos também foram satisfatórias.

Aluna 8: Ondas. Sobreposição.

Aluno 10: Pois o som é uma onda; É a superposição que é característica de ondas.

Aluno 11: Era o fenômeno de interferência, foi decisivo pois por causa dele fomos capazes de determinar que o som é uma onda. Quanto mais mexíamos no aparelho, mais interferência ele sofria.

Aluno 13: Pois ao mexer no braço do aparelho, as ondas iam se anulando ou se somando, diminuindo e aumentando a frequência ondulatória, e logo, o som. A superposição, pois se fosse partículas as mesmas se chocariam.

Para iniciar as questões sobre a luz, a quarta questão pergunta sobre o experimento do divisor de feixe luminoso. Todos os alunos ‘acertaram’

essa questão, embora somente o aluno 11 tenha conseguido respondê-la por completo. O aluno 13 deu uma resposta interessante, embora sem entender que com muitas partículas o experimento seria inconclusivo e não apontaria apenas para o aspecto ondulatório.

Aluno 11: Apresentou um comportamento de partícula, pois em um momento chegava a um local e em outro momento chegava ao outro. O detector liberava pequenos feixes de luz individualmente.

Aluno 13: Partícula, porque a luz se apresenta como partícula quando testada como partícula, mas ao ser emitida em maior quantidade demonstra característica de onda.

A quinta questão (comportamento da luz no interferômetro) mostrou-se difícil aos alunos, talvez por exigir uma explicação da interferência construtiva e destrutiva nos diferentes detectores. A resposta dada pelo aluno 11 ilustra essa dificuldade.

Aluno 11: O detector liberava um feixe constante de luz, e a luz com o espelho apresentava um comportamento de onda, se reforçando pós espelho, e os feixes seguiam os 2 caminhos ao mesmo tempo.

Na sexta questão (a natureza da luz) todas as quatro respostas apontavam para a impossibilidade de descrever a luz unicamente como onda ou partícula. Interessante notar como o aluno 11 mesmo não lembrando a expressão dualidade onda-partícula, conseguiu intuí-la a partir das duas opções possíveis.

Aluna 8: Não.

Aluno 10: Não.

Aluno 11: Não tecnicamente, pois em determinados experimentos e situações ela apresenta um comportamento de partícula (fóton) e em outros ela apresenta um comportamento de ondulatório. Não lembro muito bem o nome do comportamento, mas diria que seria partícula-onda, ou alguma mistura disso.

Aluno 13: Não. Comportamento de onda e partícula.

O pequeno número de respostas ao pós-teste não permite fazer uma avaliação do aproveitamento geral dos alunos. A percepção pessoal que tivemos, derivada do contato direto com os alunos, foi que a primeira parte do curso – ondas, partículas e a natureza do som – teve boa recepção. A segunda parte, sobre a natureza da luz, parece ter sido mais difícil para os estudantes. Mas é importante ressaltar que tanto a percepção pessoal quanto as respostas ao pós-teste indicam que uma parte dos alunos apresentou uma evolução conceitual significativa.

# Capítulo 6

## Considerações finais

A introdução de elementos de mecânica quântica no ensino médio é um tema ainda em aberto. Essa inserção não é uma ideia nova; conforme vimos, já nos anos 50 ela foi realizada nos Estados Unidos em larga escala. Contudo, ainda hoje é difícil encontrar acordo sobre quais temas devem ser tratados, qual a profundidade conceitual da abordagem e em que momento ela deve ser feita.

Esta dissertação apresentou uma proposta de ensino de um tema específico, a dualidade onda-partícula. Esse é um aspecto central da física quântica, e embora a sequência didática que propomos o aborde com alguma profundidade, vimos que ele pode ser apresentado em qualquer etapa do ensino médio e mesmo a alunos ao final do ensino fundamental. Seguindo a ideia defendida por Gil Pérez (ver Capítulo 2), propomos que a dualidade onda-partícula seja apresentada em conjunto com os conceitos clássicos de partícula e onda. Nossa abordagem faz uso apenas dos aspectos mais fundamentais de ondas e partículas, sem recorrer a conceitos de dinâmica da partícula (força, momentum, energia, etc.) ou de teoria ondulatória (frequência, comprimento de onda, etc.). Nesse sentido a nossa proposta difere muito das abordagens da dualidade usuais no ensino médio, geralmente baseadas no efeito fotoelétrico e que, por isso, fazem uso intensivo desses (e outros) conceitos mais complexos.

As características descritas acima nos permitiram apresentar a dualidade

onda-partícula de forma acessível a um amplo espectro de estudantes e, ao mesmo tempo, abordá-la com certa profundidade. As aplicações que realizamos indicam que essa proposta dá bons resultados com públicos muito diversos: alunos de escola normal, do 9º ano, do ensino médio, de escolas públicas e privadas.

É claro que ainda há muito a ser feito, tanto no aperfeiçoamento da sequência didática quanto na avaliação de seu resultado. Trabalhos nesse sentido estão sendo planejados, mas nos parece evidente que o caminho proposto aqui é promissor.

## Apêndice A

### Roteiro didático: Ondas, Partículas e Luz



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 2018

# 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.

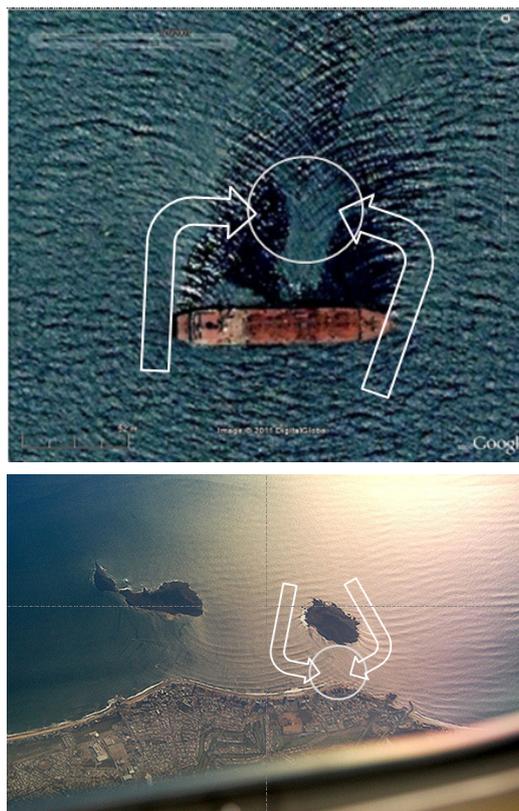


Figura 3: Exemplos de ondas que chegam em um mesmo ponto seguindo mais de um caminho.

O fato das ondas poderem ser separadas e recombinaadas 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-

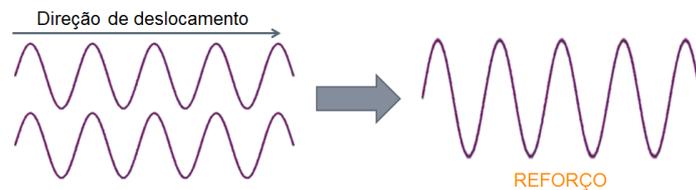


Figura 5: Exemplo de superposição reforçando o efeito de ondas que se encontram em um mesmo local, ou seja, interferência construtiva.

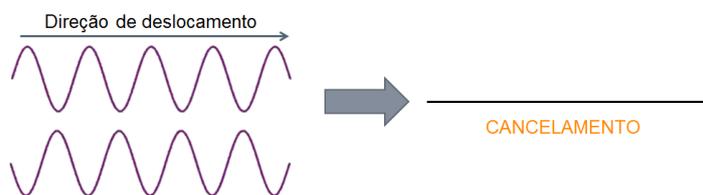


Figura 6: Exemplo de superposição cancelando o efeito de ondas que se encontram em um mesmo local, ou seja, interferência destrutiva.

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.

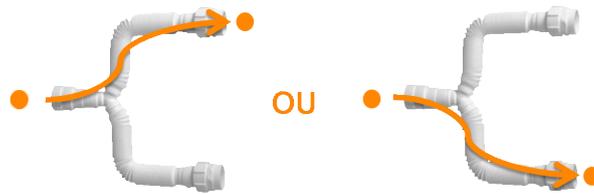


Figura 7: Comportamento de uma partícula ao entrar em um cano com duas saídas: ela atinge apenas um único local em um determinado instante.

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.

<b>Ondas</b>	<b>Partículas</b>
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*.

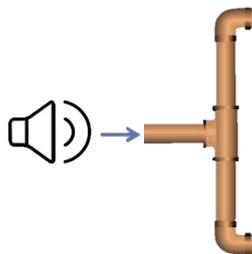


Figura 9: O divisor de som.

### 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).

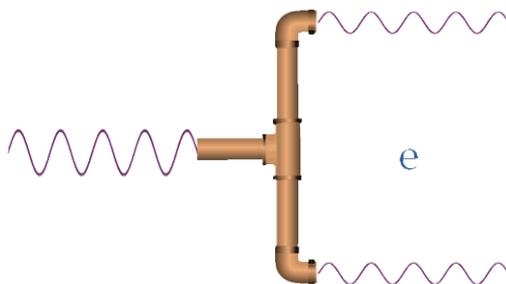


Figura 10: Comportamento do som, caso ele fosse composto por ondas.

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.

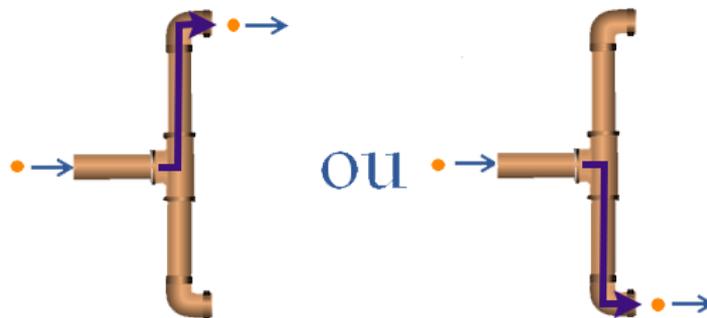


Figura 11: Comportamento do som muito fraco, caso ele fosse composto por partículas. Apenas uma partícula por vez passaria pelo divisor.

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-

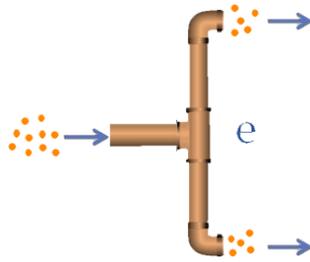


Figura 12: Comportamento do som forte, caso ele fosse composto por muitas partículas. Metade das partículas sairia por um tubo e metade pelo outro.

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.

	<b>onda</b>	<b>uma partícula de cada vez</b>	<b>muitas partículas ao mesmo tempo</b>
<b>coincidência</b>	✓		✓
<b>anticoincidência</b>		✓	

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.

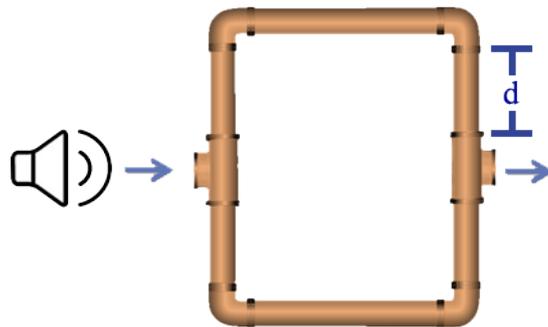


Figura 13: O interferômetro sonoro. A diferença de caminhos entre os braços superior e inferior pode ser ajustada variando a distância  $d$ .

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.

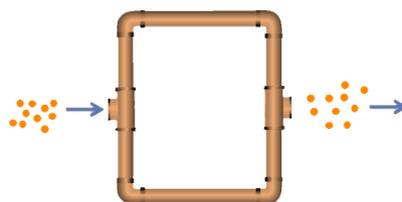


Figura 14: Comportamento esperado ao jogar partículas no interferômetro.

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!

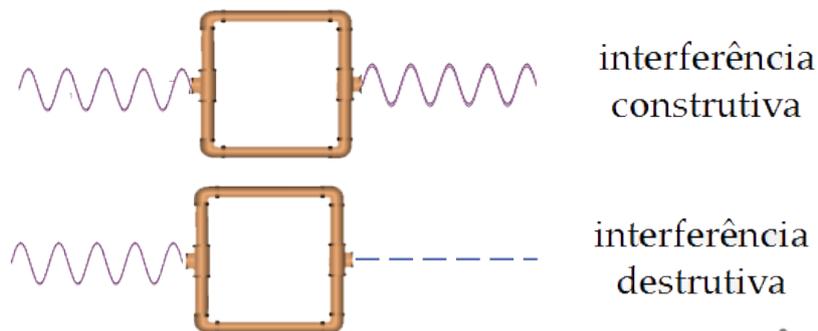


Figura 15: Interferência construtiva e destrutiva, caso o som seja uma onda

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

	<b>onda</b>	<b>partícula</b>
<b>interferência observada</b>	✓	
<b>interferência não observada</b>		✓

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 interferômetro<sup>1</sup>. 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 ouvidos<sup>2</sup>; 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

<sup>1</sup>Aplicativos 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.

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

indicados pelas setas.

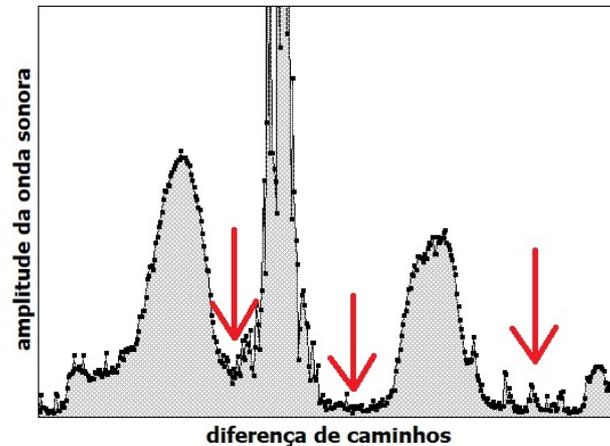


Figura 16: Amplitude da onda sonora para diferentes tamanhos de um braço do interferômetro. As setas indicam pontos de interferência destrutiva.

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.

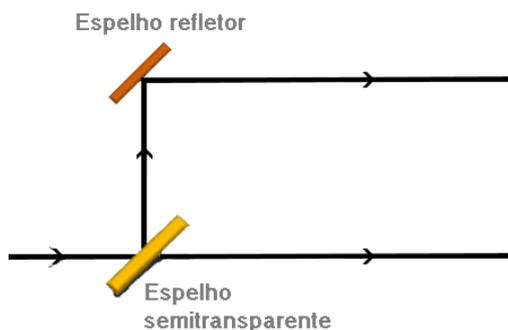


Figura 17: Esquema de um divisor de luz. Esse é essencialmente um espelho semitransparente que separa o feixe incidente em dois feixes de igual intensidade, um refletido e outro transmitido.

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.

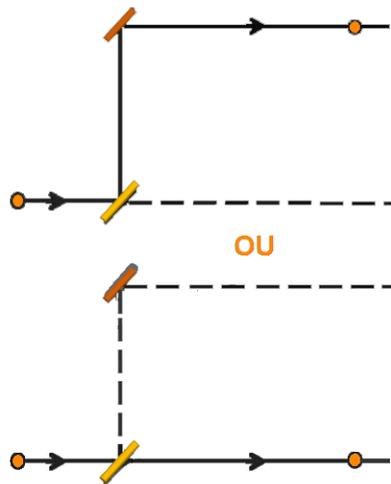


Figura 18: Comportamento da luz no divisor, no caso dela ser composta por partículas. Cada partícula ou é refletida ou é transmitida.

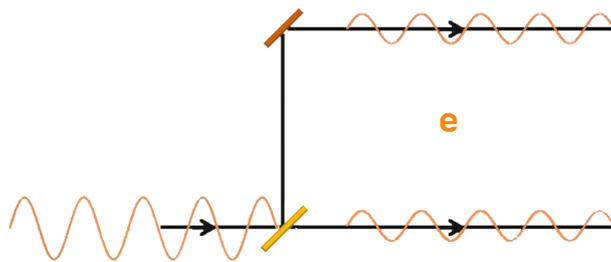


Figura 19: Comportamento da luz no divisor no caso dela ser composta por ondas.

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

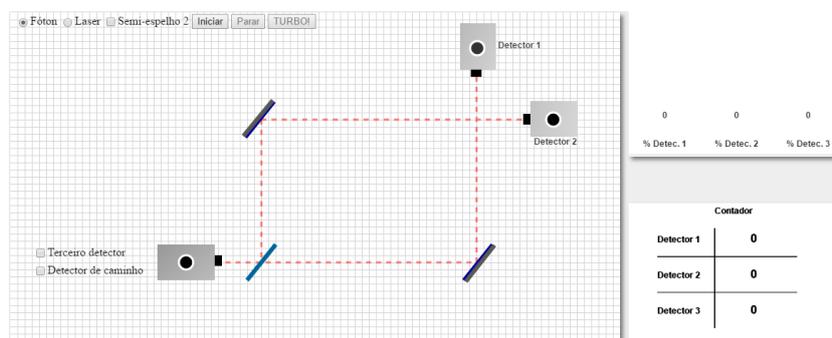


Figura 20: Simulação computacional do divisor de luz. Os círculos pretos na fonte e nos detectores são lâmpadas que, se acesas, indicam a atividade desses instrumentos.

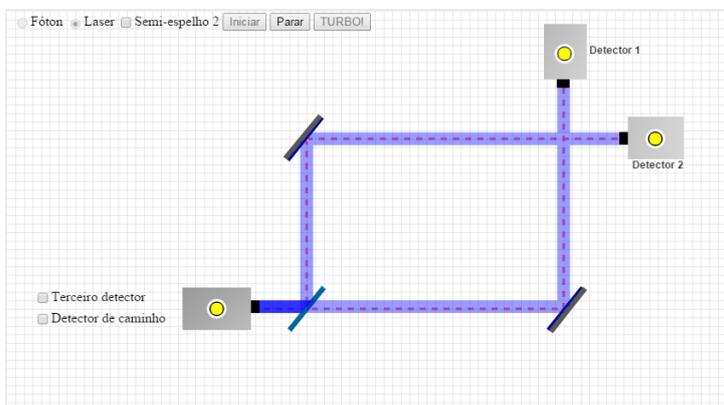


Figura 21: Comportamento da luz no divisor de feixe ao utilizar a fonte “Laser”. Repare que a luz chega simultaneamente aos dois detectores, como indicam as ‘lâmpadas’ amarelas acesas. A lâmpada acesa na fonte indica que essa está ligada.

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.

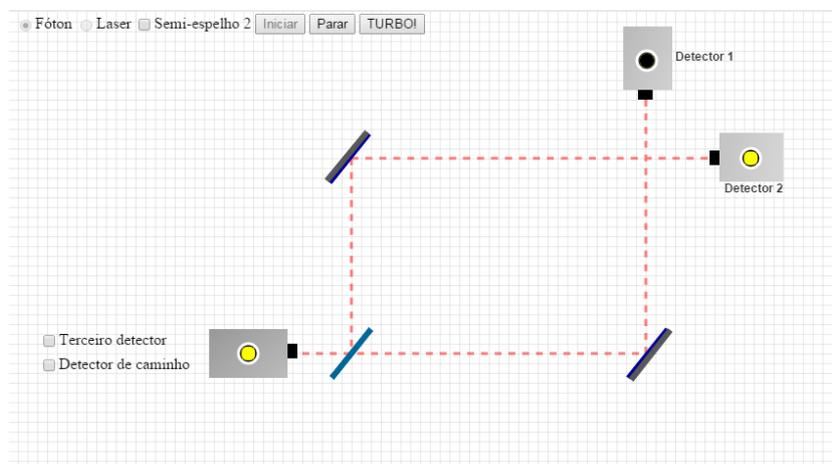


Figura 22: Comportamento da luz no divisor ao utilizar a fonte “Fóton”. Repare que, num dado instante, o detector 2 acusa a presença de luz e o detector 1 permanece no “escuro” (o inverso também ocorre), indicando a anti-coincidência.

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.

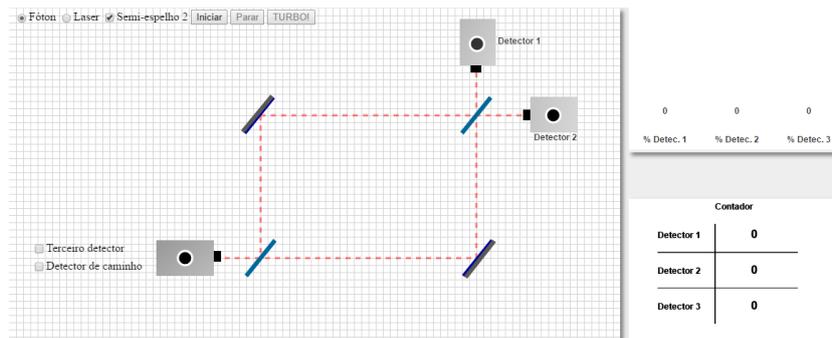


Figura 23: Simulação computacional do interferômetro de Mach-Zehnder.

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

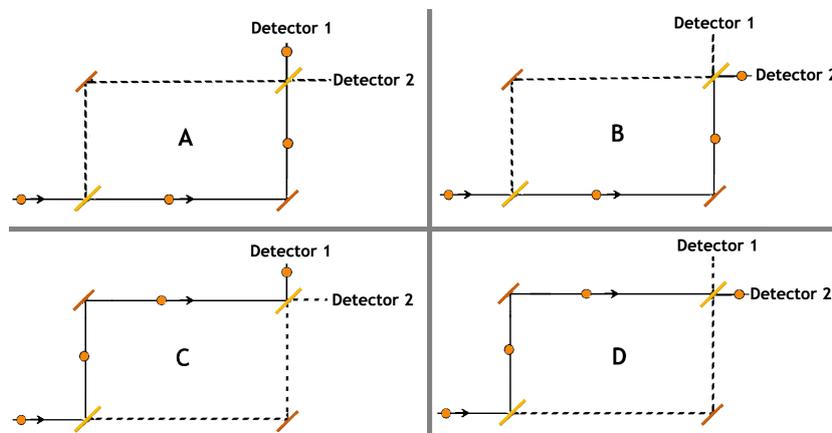


Figura 24: Comportamento esperado da luz no interferômetro, no caso dela se comportar como partícula. A probabilidade do fóton seguir um dos 4 caminhos (indicados como *A*, *B*, *C* e *D*) é 25%. Como os caminhos *A* e *C* levam ao detector 1, a probabilidade de um fóton chegar a esse detector deveria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

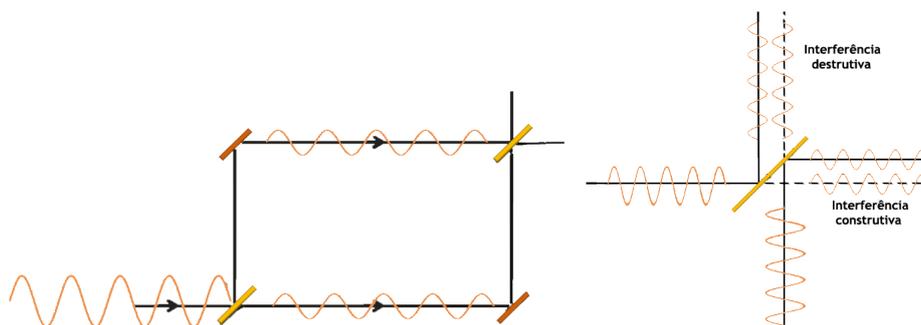


Figura 25: Comportamento de uma onda luminosa no interferômetro de Mach-Zehnder. A imagem à esquerda mostra a separação da onda incidente no primeiro semi-espelho. O detalhe à direita descreve a recombinação realizada pelo segundo semi-espelho e a consequente interferência nas saídas do instrumento.

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 Feynman<sup>3</sup>) no qual fomos colocados pelos experimentos com a luz.

<sup>3</sup>Um 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. Vaidman<sup>4</sup>.

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.

<sup>4</sup>Um 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.

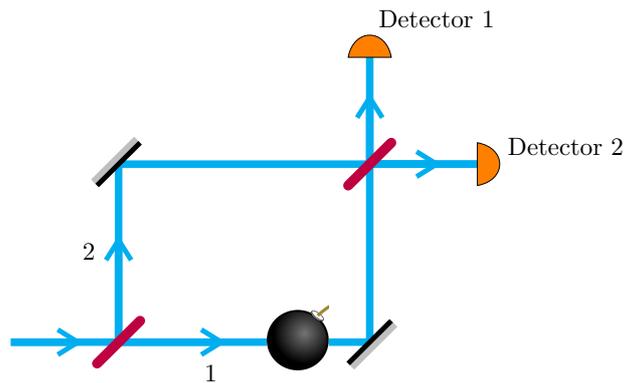


Figura 26: Representação da colocação de uma bomba em um dos braços do interferômetro de Mach-Zehnder. Conforme veremos, essa bomba poderá, ou não, representar um obstáculo ao caminho do fóton nesse braço.

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

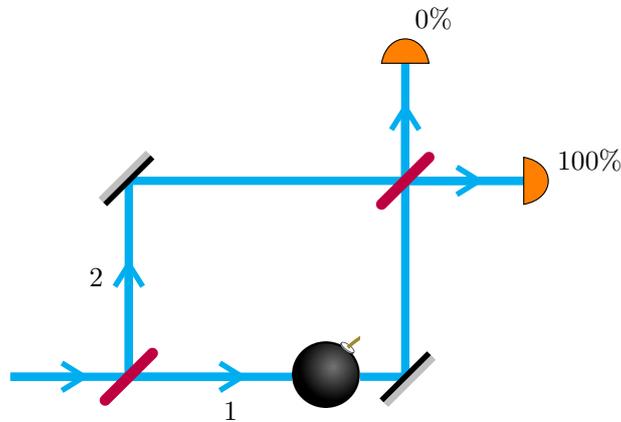


Figura 27: Bomba ruim no braço 1. Repare que ela é “invisível” para os fótons e portanto não afeta a interferência destrutiva no detector 1, que não será acionado.

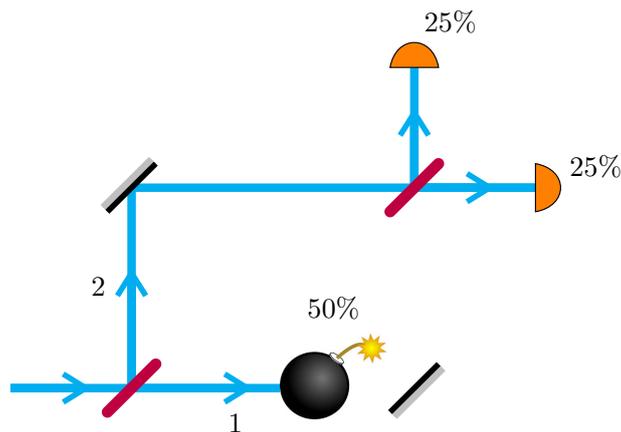


Figura 28: Bomba boa no braço 1. Repare que os fótons que chegam aos detectores passam por uma sequência de divisores de feixe.

nunca dispara. Caso a bomba esteja *boa*, em 25% das vezes o detector 1 irá disparar sem que a bomba seja explodida.

Repare que o detector 1 somente disparará quando houver uma bomba boa no interferômetro. Mais ainda, nesse caso descobrimos que a bomba está boa sem explodi-la, pois o fóton não atingiria nenhum detector se tivesse explodido a bomba (o detonador funciona pela absorção do fóton). Portanto, resolvemos o problema de Elitzur e Vaidman: basta separar as bombas para

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 disparar<sup>5</sup>.

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 laboratório<sup>6</sup>.

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

<sup>6</sup>O 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).

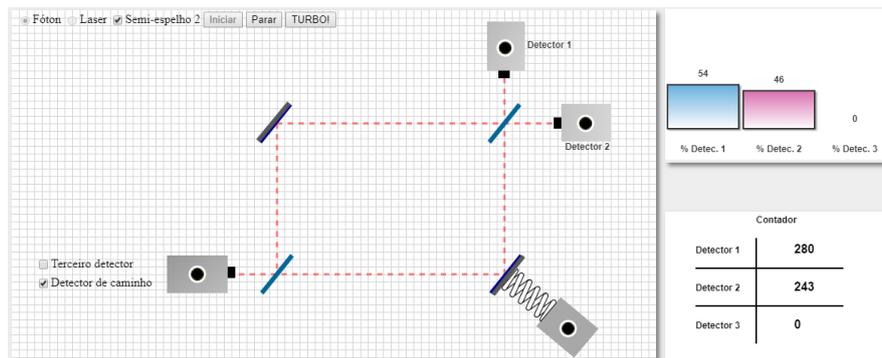


Figura 29: O interferômetro de luz com o detector de caminho acoplado ao espelho do caminho 1.

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 reveladora<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup>Outros 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>

## Apêndice B

### Manual de utilização do interferômetro virtual



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



## Interferômetro de Mach-Zehnder Virtual

### Manual de Utilização

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

# Interferômetro de Mach-Zehnder Virtual

## Manual de Utilização

Raphael Guimarães Pontes

Carlos Eduardo Aguiar

Neste manual descreveremos como utilizar a simulação computacional de um interferômetro de Mach-Zehnder que foi desenvolvida por nós. A simulação foi escrita em HTML5 e pode ser executada via internet em qualquer navegador moderno, através do link <https://bit.ly/2M688Qh>.

### 1 Divisor de feixe

A interface de abertura da simulação está mostrada na Figura 1 e apresenta o que chamamos de um divisor de feixe, um espelho semitransparente (ou ‘semi-espelho’) que reflete metade da luz que incide sobre ele e deixa passar a outra metade. No canto superior esquerdo estão as opções sobre o tipo de fonte luminosa: fóton a fóton ou laser. A opção de laser exibirá na tela feixes azuis cujos tons representam a intensidade da luz (Figura 2). Para a fonte de fóton a fóton, os caminhos acessíveis a cada fóton são indicados por linhas tracejadas (Figura 3).

Os feixes luminosos produzidos no divisor são dirigidos por espelhos até detectores de luz, também mostrados nas figuras 1 a 3. Na parte superior direita da simulação (ver Figura 1) existem barras de contagem que apresentam os dados coletados por esses detectores. As barras informam, para cada detector, a intensidade da onda no caso da fonte laser, ou a porcentagem do

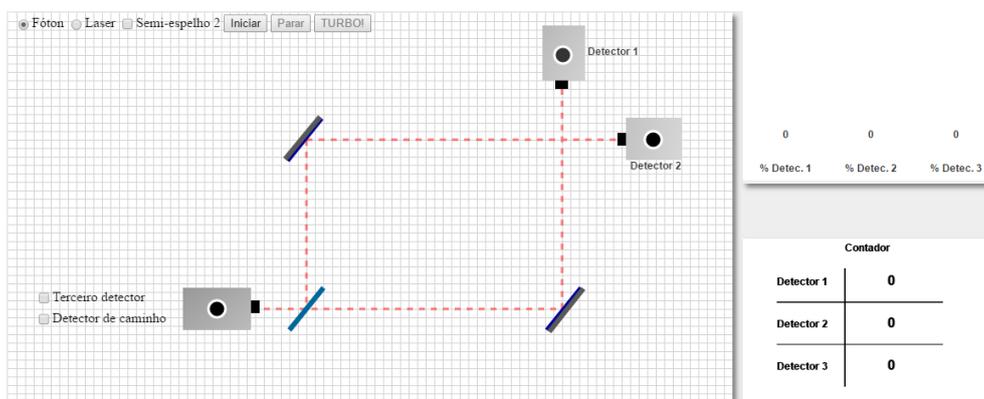


Figura 1: Interface inicial da simulação, mostrando a fonte luminosa, o divisor de feixe e dois detectores. Dois espelhos direcionam os feixes separados aos detectores.

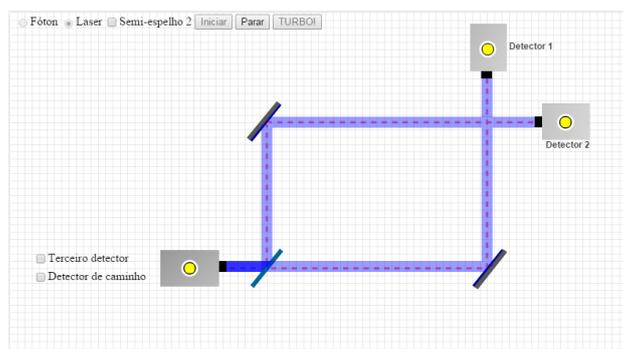


Figura 2: A simulação com a opção “laser” selecionada. Note que os dois detectores são acionados.

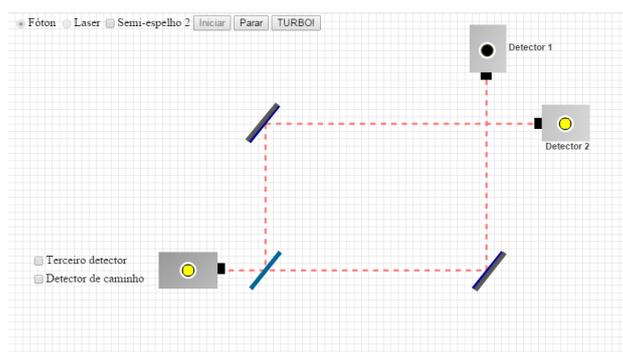


Figura 3: A simulação com a opção “fóton” selecionada. Note que apenas um detector é acionado.

número total de fótons no caso da fonte fóton a fóton. Abaixo das barras está uma tabela com os valores numéricos da contagem de fótons.

Os botões “Iniciar” e “Parar” fazem o que seus nomes indicam: iniciam e param a simulação. Ao lado deles está o botão “*TURBO!*”, que só funciona com a fonte fóton; ele acelera momentaneamente a taxa de emissão da fonte, de modo a aumentar o número de dados coletados e facilitar a análise da taxa de chegada de fótons em cada detector. A emissão de luz pela fonte é indicada pelo acendimento de uma lâmpada amarela no aparelho. Da mesma maneira, os detectores 1 e 2 registram a presença de luz através do acendimento da lâmpada amarela em cada um deles. As Figuras 2 e 3 ilustram o funcionamento da fonte e dos detectores.

Ao executar a simulação do divisor de feixe é importante notar que, com a fonte laser, os dois detectores sempre registram simultaneamente (em coincidência) a chegada de luz. Já com a fonte fóton a fóton, os dois detectores nunca disparam ao mesmo tempo (chamamos esse comportamento de anti-coincidência).

## 2 Interferômetro de Mach-Zehnder

A transformação do divisor de luz em um interferômetro de Mach-Zehnder é feita clicando na caixa de seleção “Semi-espelho 2”, ao lado das opções de fonte. Isso coloca um segundo divisor de feixe no ponto de interseção dos dois feixes produzidos pelo primeiro divisor. O novo elemento divide novamente cada um desses feixes e os superpõe em pares (transmitido+refletido), produzindo interferência na luz que segue para os detectores. A simulação descreve um interferômetro ‘balanceado’, o que significa que ele foi ajustado para que apenas o detector 2 receba luz (interferência construtiva) e o detector 1 permaneça no escuro (interferência destrutiva). As figuras 4 e 5 mostram a resposta dos detectores nesse interferômetro nos casos da fonte laser e da fonte fóton a fóton.

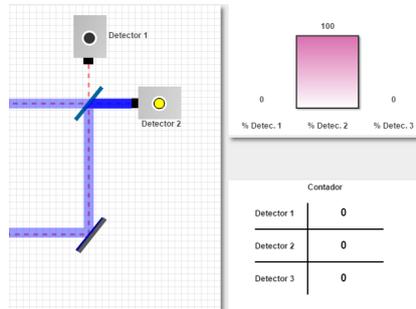


Figura 4: Introdução do segundo semiespelho, na opção “onda”.

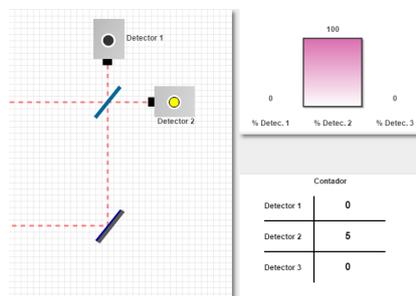


Figura 5: Introdução do segundo semiespelho, na opção “fóton”.

### 3 Outros detectores

Em muitas aplicações do interferômetro pode ser útil acrescentar mais detectores ao aparato. A simulação permite introduzir dois tipos de detectores, escolhidos com as caixas de seleção colocadas ao lado da fonte (ver Figura 1).

#### 3.1 Terceiro detector

A opção “Terceiro detector” coloca um detector idêntico aos já existentes (1 e 2) no braço inferior do interferômetro, como mostrado na Figura 6. Esse detector, como os outros dois, absorve a luz que chega a ele. Isso bloqueia o braço inferior, de modo que a luz chega aos detectores 1 e 2 apenas pelo braço superior do interferômetro. Com isso, há um único caminho que a luz pode seguir para ir da fonte a um dado detector.

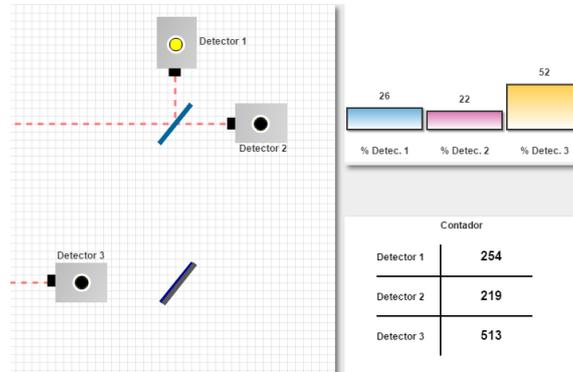


Figura 6: Um terceiro detector é inserido no interferômetro. Há um único caminho para a luz chegar a cada detector.

### 3.2 Detector de caminho

Um tipo diferente de detector é inserido no interferômetro se a opção “Detector de caminho” for marcada na caixa de seleção correspondente. Esse detector é interessante quando a fonte está no modo fóton a fóton, pois permite identificar o caminho de cada fóton. Ao contrário do detector 3, ele indica esse caminho sem destruir o fóton. O detector de caminho é representado esquematicamente na simulação por uma mola acoplada a um dos espelhos, como vemos na Figura 7. Esta mola é, supostamente, tão sensível que pode indicar a reflexão de um único fóton pelo espelho. É importante ter em mente que essa é uma representação didática, não realista, do detector.

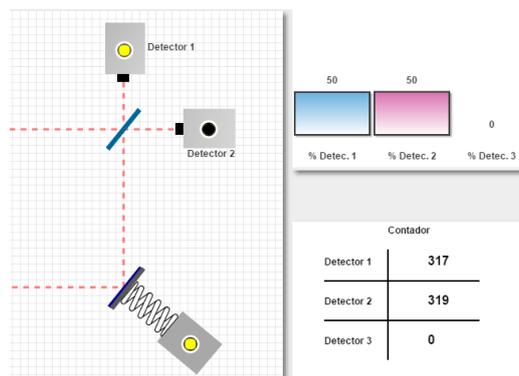


Figura 7: O detector de caminho no interferômetro. Há dois caminhos *distintíveis* para a luz chegar a cada detector.

Com esse detector temos uma configuração aparentemente semelhante à do interferômetro original: a luz (o fóton) tem dois caminhos para chegar a cada um dos detectores finais (1 e 2). Porém, há uma diferença importante; agora somos capazes de identificar o caminho que o fóton seguiu ao ir da fonte ao detector.

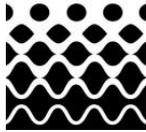
# Apêndice C

## Uma aula sobre ondas e partículas



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
Instituto de Física  
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

## A dualidade onda-partícula



Profº: Raphael Pontes

## Primeiro Módulo

Primeira parte

Ondas

### 1. Ondas

- Ondas são extensas, ou seja, uma onda chega em vários lugares ao mesmo tempo.



### 1. Ondas



## 1. Ondas

- Ondas podem chegar simultaneamente a um mesmo lugar por diferentes caminhos.



## 1. Ondas



## 1. Ondas



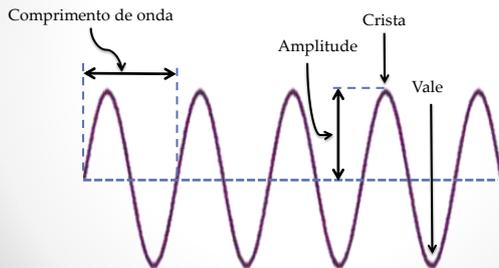
## 1. Ondas

- Ondas se superpõem.



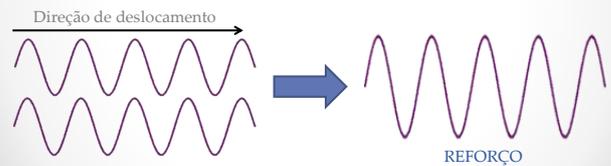
## 1. Ondas

- Alguns termos muito utilizados no estudo das ondas serão importantes nesse estudo, são eles:

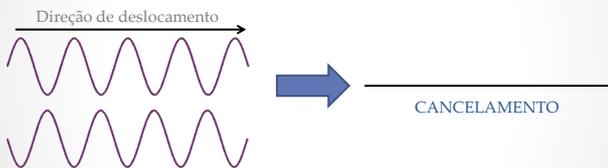


## 1. Ondas

- Ondas que chegam a um mesmo lugar por diferentes caminhos se superpõem, podendo se reforçar ou cancelar nesse processo



## 1. Ondas



## 1. Ondas

- Um bom exemplo de interferência de ondas está exposto no vídeo "*the original double slit experiment*" (o experimento de dupla fenda original) do canal de youtube **Veritassium**

## 1. Ondas

[veritasium-interferencia-lago.mp4](#)



## 1. Ondas

- O reforço ou cancelamento de ondas superpostas é chamado de **interferência**
- Nesse caso (reforço) a interferência é **construtiva** e no cancelamento ela é **destrutiva**

Duas ondas superpostas podem resultar em **nenhuma perturbação** num dado local.

1 onda + 1 onda = 2 ondas **NUNCA**  
1 onda + 1 onda = 0 ondas **SEMPRE**

## 1. Ondas

- É importante ressaltar que os casos de interferência *totalmente construtiva* e/ou *totalmente destrutiva* representam *casos extremos*, sendo possível que observemos também casos intermediários de interferência.
- Os casos extremos dependem de as ondas que se superpõem possuírem a mesma amplitude.

## Primeiro Módulo

### Segunda parte

### Partículas

## 2. Partículas

- Partículas são localizadas. Só atingem um local num determinado instante.
- Chegam a esse local seguindo apenas um caminho.



## 2. Partículas



## 2. Partículas

- Importante ressaltar que mesmo no caso de muitas partículas, elas **não apresentam interferência**.

$1 \text{ partícula} + 1 \text{ partícula} = 2 \text{ partículas}$	<b>SEMPRE</b>
$1 \text{ partícula} + 1 \text{ partícula} = 0 \text{ partículas}$	<b>NUNCA</b>

## Primeiro Módulo

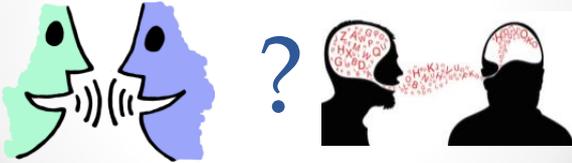
Terceira parte

Som  
(onda ou partículas?)

### 3. Som

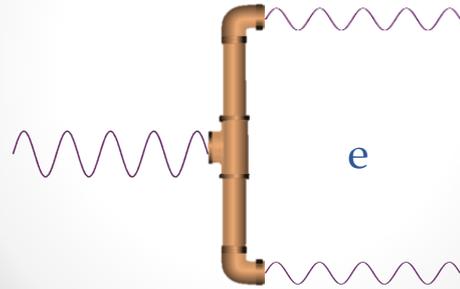
- O que seria o som, então?

Uma onda ou um conjunto de partículas?



### 3.1 Divisor de som

- Na teoria, se o som fosse uma onda o que iríamos observar em nosso divisor de som seria o seguinte:



### 3.1 Divisor de som

- Por outro lado, se fosse composto de partículas, o comportamento que esperaríamos observar seria o de som saindo por ambos os lados também!



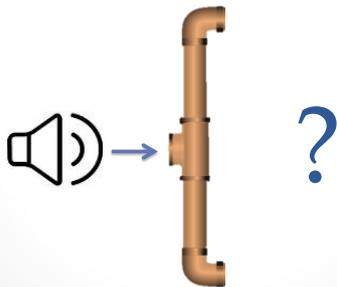
### 3.1 Divisor de som

- Contudo, se fosse possível que gerássemos um som fraco o suficiente para que apenas uma partícula por vez entrasse no divisor, veríamos:



### 3.1 Divisor de som

➤ Vejamos agora um experimento usando o divisor:



### 3.1 Divisor de som

➤ Já dá para concluir se o som é onda ou partícula?

Não, pois ambos os modelos conseguem explicar o que ocorreu, não é mesmo?

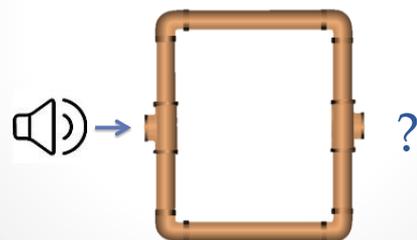


### 3.2 Interferômetro sonoro

- Embora a experiência anterior seja interessante, ela não nos permite decidir se o som é onda ou um conjunto de partículas.
- Todavia, existe uma outra maneira de usar o nosso divisor para verificar se o som é uma onda ou um conjunto de partículas.
- Vamos utilizar uma montagem que permita verificar se o som produz o fenômeno de **interferência**, pois ele é um fenômeno característico das ondas, lembra?

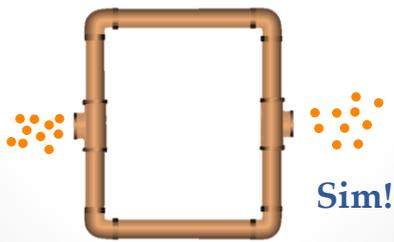
### 3.2 Interferômetro sonoro

- Nosso interferômetro consistirá em uma montagem relativamente simples através do “acoplamento” de dois divisores como ilustrado abaixo:



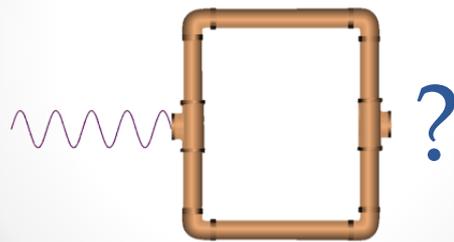
### 3.2 Interferômetro sonoro

- Jogando partículas em nosso interferômetro, **sempre** sairão partículas do outro lado?



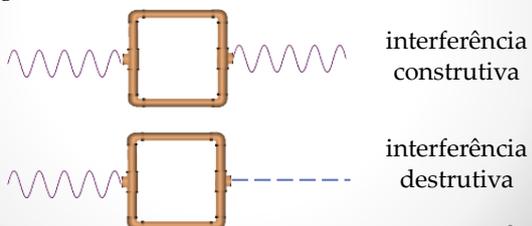
### 3.2 Interferômetro sonoro

- Jogando uma onda em nosso interferômetro, o que irá sair do outro lado?



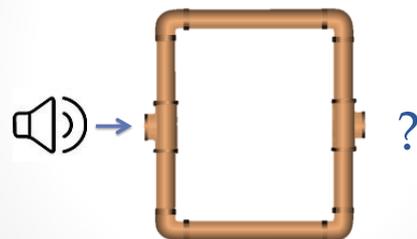
### 3.2 Interferômetro sonoro

- Quando uma onda entra no interferômetro, ela **poderá ou não** sair do lado oposto.
- A diferença entre os caminhos que ela percorre irá gerar diferentes resultados:



### 3.2 Interferômetro sonoro

- Vejamos o que acontece no experimento, então...



### 3.2 Interferômetro sonoro

- Podemos então concluir, **sem dúvidas**, que **o som é uma onda**.
- Conforme vimos, se o som fosse composto de muitas partículas, nunca observaríamos fenômenos de interferência em nossa última experiência.

## Segundo Módulo

### Primeira parte

## Luz (onda ou partículas?)

### 4. Luz

- E no caso da luz: seria ela um fenômeno ondulatório ou corpuscular?
- Existe uma maneira de respondermos a esse questionamento em uma experiência semelhante à anterior.

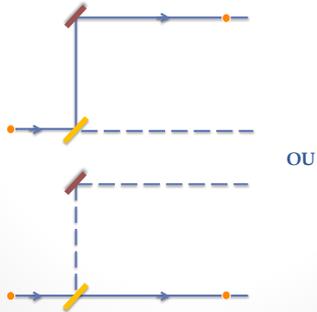
### 4.1 Divisor de luz

- A montagem abaixo será utilizada como **divisor de luz**.
- Ela faz uso de um espelho semitransparente que separa a luz em dois feixes.



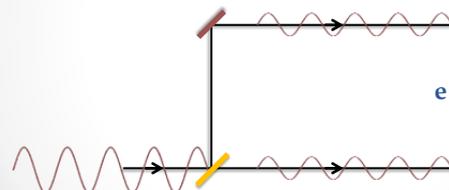
## 4.1 Divisor de luz

- Caso a luz fosse uma partícula:



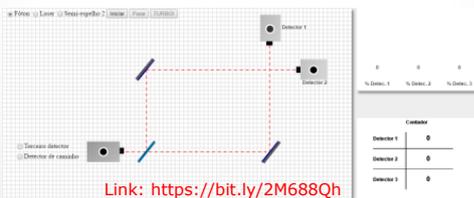
## 4.1 Divisor de luz

- Caso a luz fosse uma onda:



## 4.1 Divisor de luz

- A montagem da experiência, mesmo sendo semelhante a anterior, não é tão fácil de ser feita.
- Dessa forma, usaremos agora uma simulação computacional do experimento.



## 4.1 Divisor de luz

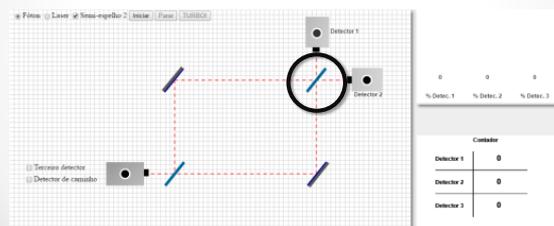
- Vejamos na prática, então...

## 4.1 Divisor de luz

- Se a luz é suficientemente fraca, ela nunca chega aos dois detectores ao mesmo tempo.
- Ora chega em um, ora chega no outro.
- Este resultado nos sugere que a luz é feita de partículas, os *fótons*.
- Vejamos entretanto o que acontece se fazemos a luz passar por um interferômetro.

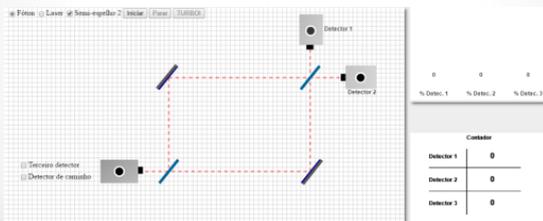
## 4.2 O interferômetro de luz

- A imagem abaixo ilustra o interferômetro de Mach-Zehnder



## 4.2 O interferômetro de luz

- Vejamos o que acontece quando fazemos os *fótons* passarem por essa montagem...

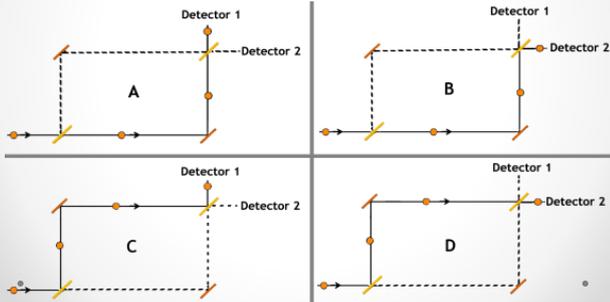


## 4.2 O interferômetro de luz

- A simulação nos apresentou um resultado surpreendente: não importa o tempo que esperemos, a luz somente chega a um dos detectores
- Estranho, não?

## 4.2 O interferômetro de luz

- Se chegamos a conclusão foi de que a luz era constituída de fótons, esperávamos observar uma das seguintes opções:

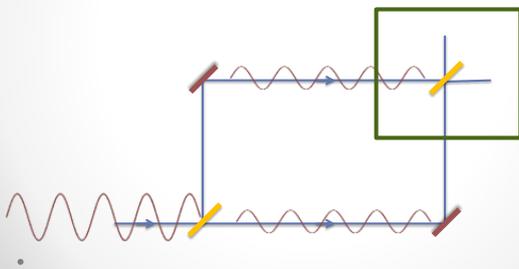


## 4.2 O interferômetro de luz

- O comportamento observado na simulação está em dissonância com que esperávamos.
- Contudo, ele pode ser explicado se utilizarmos uma análise **ondulatória** da luz, como veremos a seguir.

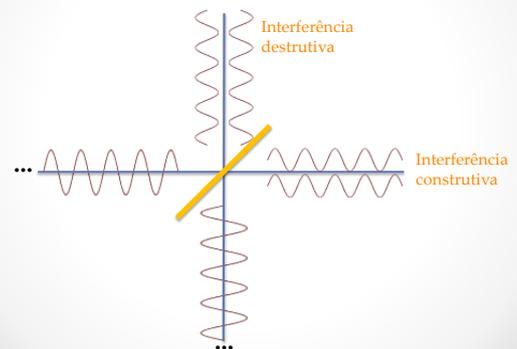
## 4.2 O interferômetro de luz

- Se ao invés do caso anterior, a luz for uma onda, esperamos encontrar o seguinte comportamento:



## 4.2 O interferômetro de luz

- Ao passar pelo segundo espelho semitransparente:



### 4.3 A dualidade onda-partícula

- Existe aqui um grande impasse:
  - Se no experimento do **divisor de luz** havíamos chegado a conclusão de que a luz é composta por **partículas**, os **fótons**,
  - Como essas partículas podem apresentar em um experimento de **interferência** comportamento típico de uma **onda**?

### 4.3 A dualidade onda-partícula

- Conclusão:

A luz se comportará como onda ou como partícula, a depender do tipo de experimento que realizamos com ela.

### 4.3 A dualidade onda-partícula

- Longe de ser uma solução para essa situação estranha que se apresenta, a dualidade mostra que a luz é algo que a física clássica não consegue descrever apropriadamente.
- Todas as partículas microscópicas (**elétrons**, **prótons**, **nêutrons**, **átomos** e até mesmo **moléculas**) apresentam comportamento semelhante: ora parecem **partículas**, ora parecem **ondas**.

## Segundo Módulo

### Segunda parte

## A dualidade onda-partícula na “prática”

## 5. A dualidade na “prática”

- A dualidade onda-partícula tem efeitos práticos que nos permitem fazer coisas que seriam **impossíveis** de realizar se a luz fosse **apenas partícula** ou **apenas onda**.

## 5. A dualidade na “prática”

- Posso um conjunto de bombas, algumas boas e outras ruins. Estas bombas são sensíveis o suficiente para serem acionadas com a incidência de apenas um fóton. Existe alguma maneira de separá-las, sem explodir todas as bombas boas?



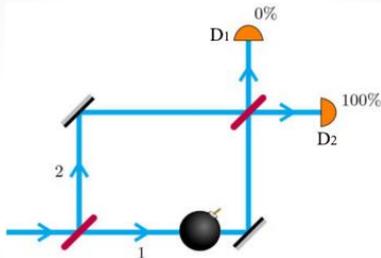
## 5. A dualidade na “prática”

- Se pensarmos “classicamente”, basta iluminarmos as bombas; dessa forma diferenciaremos as boas das ruins sem muita dificuldade.
- Mas, também não sobrará **nenhuma bomba boa**, pois todas serão explodidas.

## 5. A dualidade na “prática”

- Existe, porém, uma maneira de resolvermos esse problema utilizando o comportamento dual da luz que observamos anteriormente.
- Uma bomba “ruim” não é “vista” por um fóton. Por ser invisível, a colocação de uma bomba ruim em um dos braços do interferômetro não alterará em nada o seu funcionamento.

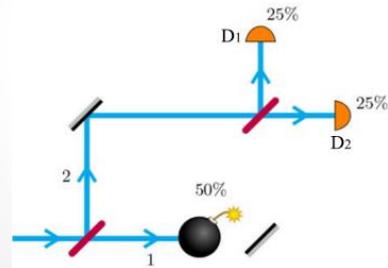
## 5. A dualidade na “prática”



- Repare que só chegam fótons em D2.
- D1 nunca dispara.

## 5. A dualidade na “prática”

- Uma bomba “boa”, por outro lado, representaria um bloqueio em um dos caminhos:



## 5. A dualidade na “prática”

- Repare que o detector D1 somente disparará quando houver uma **bomba boa** no interferômetro.
- Isso significa que **25% das bombas boas poderão ser identificadas** como boas e intactas.
- 50%, ou seja, a metade das bombas boas serão detonadas.
- Os 25% restantes, não saberemos dizer, pois D2 dispara para bombas boas e ruins.

## 5. A dualidade na “prática”

- Em resumo:

D1	D2	Explosão
Bomba boa e intacta	Boa ou ruim?	Bomba era boa, agora inútil

## 5. A dualidade na “prática”

- Explodir metade das bombas boas e manter apenas um quarto delas intactas, não parece um resultado muito animador
- Mas lembre-se que, aos olhos da física clássica, **nenhuma bomba iria sobrar**.
- De modo que pudemos obter informações sobre o estado de um objeto sem interagir diretamente com ele

## Sugestão de leitura



De: R\$ 69,90  
Por: **R\$ 37,90**  
em até 1x de R\$ 37,90 sem juros

# Apêndice D

## Questionários

## Questionário “Ondas, Partículas e Luz”

Tente responder as questões abaixo no espaço delimitado. Caso necessite de mais espaço utilize o verso da folha.

Nome: \_\_\_\_\_

Série: \_\_\_\_\_

1. O que você entende por partícula? Dê exemplos de objetos cotidianos que você chamaria de partícula.
2. O que você entende por onda? Dê exemplos de ondas que você encontra no dia a dia.
3. Quais as diferenças que você consegue identificar entre partículas e ondas?
4. Você se lembra de ter observado algum fenômeno de interferência em ondas? Se sim, descreva-o.

5. Qual a diferença entre interferência construtiva e destrutiva?

6. O som é formado por ondas ou partículas? Explique sua resposta.

7. E no caso da luz, ela é formada por ondas ou partículas? Explique sua resposta.

## Pré-teste sobre “Ondas, Partículas e Luz”

Tente responder as questões abaixo no espaço delimitado. Caso necessite de mais espaço utilize o verso da folha.

Nome: \_\_\_\_\_

Série: \_\_\_\_\_

1. Suponha que você esteja do lado de fora de um quarto, cujas paredes e porta são bem finas, e tenha que passar um recado para uma pessoa que se encontra dentro desse quarto. Você acha mais fácil escrever um bilhete e passá-lo por debaixo da porta ou falar em voz “alta” o recado para a pessoa?
2. Qual a sua opinião sobre frase: “Quem escreve um bilhete necessariamente transfere a informação materialmente, mas quem fala não está materialmente transferindo-a.”
3. O que você entende por “matéria”? Dê exemplos de objetos que podemos considerar como “partículas materiais”.
4. O que você entende por “onda”? Dê exemplos de ondas que encontramos no dia a dia.



10. Você conhece algum caso de ondas que atravessam a matéria? Se sim, qual(is)?

## Pós-teste sobre “Ondas, Partículas e Luz”

Tente responder as questões abaixo no espaço delimitado. Caso necessite de mais espaço utilize o verso da folha.

Nome: \_\_\_\_\_

Série: \_\_\_\_\_

1. Quais as diferenças que você consegue identificar entre partículas e ondas? Você percebe mudança na sua resposta do questionário anterior para esse?
2. O som é formado por ondas ou partículas? Explique.
3. Por que ao utilizar o interferômetro sonoro fomos capazes de ouvir o som aumentar ou diminuir quando mexíamos no tamanho de um dos braços? Você seria capaz de dizer o nome do fenômeno envolvido e porque a existência dele foi vital para descobrirmos a natureza do som?
4. Quando observamos o comportamento da luz na simulação computacional do divisor de luz com uma fonte muito fraca, ela apresentou comportamento de onda ou de partícula? Por quê? Você é capaz de dizer o que é um fóton?



# Apêndice E

## Respostas dos alunos aos questionários

Neste apêndice, traremos todas as perguntas e as respectivas respostas que conseguimos obter dos alunos aos quais nosso trabalho foi apresentado. As separamos por aplicação e por pré e pós-teste, quando possível.

### E.1 Primeira aplicação

1. O que você entende por partícula? Dê exemplos de objetos cotidianos que você chamaria de partícula.

Aluno 1: É a coleção de massas, tomadas uma a uma (ocupam determinado lugar no espaço). Ex: bola de baseball.

Aluna 2: É a coleção de massas, tomadas uma a uma (ocupam determinado lugar no espaço). Ex: bola de futebol, anel.

Aluna 3: Partícula é algo pontual, que, se estiver em unidade não ser dividida para lugares diferentes. Ex: bola de gude, tampinha de garrafa, anel etc.

Aluno 4: Que podemos unir partículas e não podemos “diminuir”. A partícula só pode ir a um lugar só. Ex: uma

gota de chuva.

Aluna 5: Pra mim a partícula é um de coisinhas que eu esqueci o nome, mas pra mim é o sol que tem partículas.

Aluna 6: Partículas são corpos muito pequenos. Ex: bolas de gude, água, etc.

Aluna 7: Minúsculos pedaços de matéria. Mas generalizando é algo muito pequeno. Bola de baseball, bola de gude, lâmpada, etc.

Aluna 8: É chamado de partícula a qualquer parte ou corpo muito pequeno de algo. Grão.

Aluna 9: Partículas são coisas físicas que podemos contar, é um objeto com massa e forma bem definida. Luz.

Aluna 10: Partícula é tudo aquilo que contém mais de uma interferência

Aluno 11: Eu entendo de partícula, que ela não pode se dividir para vários lugares ao mesmo tempo.

Aluno 12: Partícula é um corpo não divisível e quando há algum empecilho em sua trajetória ele não se propaga como onda. Objeto: bola de sinuca.

2. O que você entende por onda? Dê exemplos de ondas que você encontra no dia a dia.

Aluno 1: Um movimento causado por perturbação, e se propaga (propagam por todo o espaço) através de um meio. Ex: ondas de rádio e tv.

Aluna 2: Onda é algo que pode ser espalhado e que nunca está em unidade mas sim em quantidade e pode ser dividida por vários lugares. Ex: água, suco, etc.

Aluna 3: Onda é algo que pode ser espalhado e que nunca está em unidade mas sim em quantidade e pode ser dividida por vários lugares. Ex: água, suco, etc.

Aluno 4: Que uma onda pode ser construtiva ou destrutiva. E que há interferência entre as ondas. Ex: o som, a

onda do mar ou a própria luz.

Aluna 5: A onda é uma perturbação, como as ondas do mar, goteiras e possas de água.

Aluna 6: Ondas são “movimentos que sobem e descem”. Por exemplo, ondas do mar, do som, etc.

Aluna 7: Um movimento causado por uma perturbação através de um espaço. Quando joga uma pedra em um lago calmo, as ondas de rádio, ondas de televisão etc.

Aluna 8: Uma onda é um movimento causado por uma perturbação, e esta se propaga através de um meio. Ondas eletromagnéticas e ondas mecânicas.

Aluna 9: Perturbação num meio material contínuo de que são bons exemplos a onda na superfície da água.

Aluna 10: Onda é tudo aquilo que pode haver interferência, e não é composto por dois lados. A onda só sai por um lado. Som.

Aluno 11: Eu entendo de onda, que ela se divide para vários lugares ao mesmo tempo. Som, rádio, música.

Aluno 12: Onda é um movimento causado por uma perturbação e, contrário da partícula, é divisível e ela pode se propagar, ou seja, se uma madeira é um obstáculo para uma onda em um rio, em vez dela ser interrompida, ela se propaga através das suas vibrações. Ex: som.

3. Quais as diferenças que você consegue identificar entre partículas e ondas?

Aluno 1: Onda é uma perturbação que se propaga em um meio. Partículas é uma coleção de massas, tomadas uma a uma.

Aluna 2: Ondas podem vir a vários lugares ao mesmo tempo e pode ser dividida. Partículas não podem ser distribuídas, só se estiver em grande quantidade (a resposta é

acompanhada de desenhos: uma onda e um conjunto de pontos).

Aluna 3: Ondas podem ir a vários lugares ao mesmo tempo e pode ser dividida. Partículas não podem ser distribuídas, só se estiver em grande quantidade (resposta também acompanhada de desenhos).

Aluno 4: A onda pode cair em vários lugares ao mesmo tempo e a partícula em um lugar só.

Aluna 5: Com as partículas elas se movem para um lado só. E as ondas se movem para todos os lados.

Aluna 6: Na onda pode ocorrer interferências construtiva e destrutiva. As partículas mantêm um certo padrão.

Aluna 7: Nas ondas podem ter interferências. As partículas não se dividem.

Aluna 8: A diferença é que a partícula é composta por matéria mesmo que a massa seja quase desprezível. Já uma onda é uma perturbação periódica, ou seja, regular que transporta apenas energia.

Aluna 9: Partícula é composta pela matéria e a onda transporta apenas energia.

Aluna 10: A diferença que a partículas não faz interferência e pode ser transmitida com várias partículas. A onda faz interferência e só é transmitida por um lado.

Aluno 11: A diferença é que a partícula só vai ter um saída e não sofre interferência. Mas a onda tem várias saídas e sofre interferência.

Aluno 12: Partícula não é divisível, a onda é; Partícula não se propaga, a onda sim; A onda pode chegar em vários destinos ao mesmo tempo, a partícula não.

4. Você se lembra de ter observado algum fenômeno de interferência em ondas? Se sim, descreva-o.

Aluno 1: Som, porque se propaga tridimensionalmente no

espaço e quando dois objetos chegam ao mesmo tempo em um determinado local.

Aluna 2: Quando duas ondas chegam em um certo ponto do mesmo tempo, ocorria a interferência.

Aluna 3: Quando duas ondas chegam em um certo ponto do mesmo tempo, ocorria a interferência.

Aluno 4: —.

Aluna 5: Não lembro.

Aluna 6: Sim, no oceano. As ondas se sobrepõem as outras e as anulam.

Aluna 7: Tubos sonoros (não lembro o nome). Com o tubo fechado o som sai normalmente e quando abre o tubo o som vai diminuindo.

Aluna 8: Quando o encontro de duas ondas se propagam no mesmo meio.

Aluna 9: Encontro de duas ondas que se propagam no mesmo meio.

Aluna 10: Podemos observar duas interferência, a primeira quando ele coloca o som e afasta, como o som fica afastado e a outra quando ele tampa um lado e o som também interfere.

Aluno 11: Sim. Usaram dois tipos de interferência, uma eles afasta e a outra ele tapa, “bloqueia”, uma saída de som.

Aluno 12: Sim, ele era formado por um sifão em formato de Y e um som no microfone, ele funcionava de forma que quando botava o som no sifão, o som chegava do mesmo jeito, mas se fosse feito um alongamento em alguma parte das “sanfonas” do sifão o som diminuía.

5. Qual a diferença entre interferência construtiva e destrutiva?

Aluno 1: Interferência construtiva- quando ocorre máximo e máximo, tem uma amplitude duas vezes maior que

a amplitude original (se os pulsos tiverem a mesma amplitude e a mesma fase). Interferência destrutiva- se os pulsos tiverem a mesma amplitude em oposição de fase.

Aluna 2: —.

Aluna 3: —.

Aluno 4: Construtiva- uma onda se sobrepõe sobre a outra e se unem se tornando uma só. Destrutiva (*sem resposta*)

Aluna 5: Uma e que constrói e a outra se desfaz.

Aluna 6: A construtiva se junta uma onda a outra para formar uma maior ainda. Enquanto a destrutiva, como o nome sugere, “destrói” a outra onda e a si mesma.

Aluna 7: Construtiva- É quando as ondas não tem diferença, ou seja, ocupam a mesma posição. Destrutiva- É quando tem diferença, as ondas ocupam uma posição ou outra, variando.

Aluna 8: Construtiva- quando as ondas não tem diferença, quando a onda apresenta uma amplitude maior do que as ondas primárias. Destrutiva- É quando tem diferença, e é menor do que as duas ondas primárias.

Aluna 9: Construtiva é quando a onda apresenta uma amplitude maior do que a das ondas primárias e a destrutiva menor do que as duas ondas primárias.

Aluna 10: —.

Aluno 11: Construtiva faz uma nova onda, fazendo ela maior que a outra. Destrutiva é quando elas se juntam e se desfaz, se destrói.

Aluno 12: Na interferência construtiva as ondas se somam: isso acontece pois o vale e a crista das ondas é o mesmo. Já na interferência destrutiva elas se anulam: isso acontece, pois o vale e a crista é o contrário. (resposta acompanhada de diagramas de ondas se somando e se subtraindo).

6. O som é formado por ondas ou partículas? Explique sua resposta.

Aluno 1: Ondas, porque o som se propaga tridimensionalmente pelo espaço.

Aluna 2: Ondas. O som da onda pode sofrer fenômenos ondulatórios da reflexão, refração, difração, no caso se fosse partícula não poderia sofrer esses fenômenos.

Aluna 3: Ondas. O som da onda pode sofrer fenômenos ondulatórios da reflexão, refração, difração, no caso se fosse partícula não poderia sofrer esses fenômenos.

Aluno 4: O som é uma onda, pois se usarmos um cano com duas saídas em 2 ouvidos e falarmos “oi” as duas ouviram. Pois a onda pode se dividir.

Aluna 5: Por ondas pois são ondas sonoras e elas se espalham.

Aluna 6: Por ondas. Porque, se fizermos um teste expondo a duas saídas, ele pode gerar interferência destrutiva (característica das ondas).

Aluna 7: Ondas. Pois o som é descrito por um sequência de ondas sonoras, que são ondas de deslocamento.

Aluna 8: Ondas. Porque o som é reconhecido por uma sequência de ondas sonoras.

Aluna 9: O som é um tipo de onda (mecânica no caso), é formado a partir de perturbação.

Aluna 10: Onda. Porque ele faz uma interferência e transmite por vários lugares.

Aluno 11: Onda. Porque ela se divide para vários lugares diferentes ao mesmo tempo.

Aluno 12: Por ondas, pois diferente da partícula, a onda é divisível e quando utilizamos o aparelho utilizado na palestra (separador de som) vemos que as duas pessoas escutam a voz.

7. E no caso da luz, ela é formada por ondas ou partículas? Explique sua resposta.

Aluno 1: A luz é uma entidade quântica, ou seja, pode ser tanto se comportar como onda quanto como partícula.

Aluna 2: A luz pode ser os dois. Ora pode se comportar como onda e também pode se comportar como partícula, depende da situação.

Aluna 3: A luz pode ser os dois. Ora pode se comportar como onda e também pode se comportar como partícula, depende da situação.

Aluno 4: —.

Aluna 5: pra mim é partícula por que ela tem vários negocinhos na luz.

Aluna 6: Pelos dois e nenhum ao mesmo tempo. A luz se comporta tanto como partícula como também onda, dependendo do teste. Então ela é os dois e nenhum, pois ambos são completamente distintos.

Aluna 7: Os dois. Porque ela pode se comportar como onda num experimento e como partículas noutra.

Aluna 8: Ela pode ser das duas formas, como onda quanto como partícula.

Aluna 9: Ela pode tanto se comportar como onda quanto como partícula.

Aluna 10: A luz é formada pelo os dois, ou seja: onda e partícula. Pois o feixe da luz não chega no mesmo local junto, mas transfere energia por (*rasura*) local.

Aluno 11: Pelo os dois. Uma hora ela se manifesta como onda, e outras como partícula.

Aluno 12: No caso da luz ela pode ser tanto onda quanto partícula, depende somente do tipo de experimento que é realizado.

## E.2 Segunda aplicação

### E.2.1 Pré-teste

1. Suponha que você esteja do lado de fora de um quarto, cujas paredes e porta são bem finas, e tenha que passar um recado para uma pessoa que se encontra dentro desse quarto. Você acha mais fácil escrever um bilhete e passá-lo por debaixo da porta ou falar em voz “alta” o recado para a pessoa?

Aluno 1: Falar em voz alta, porque as paredes são finas e facilitam a propagação de voz. E quando você fosse escrever, “gastaria” mais tempo e energia, além de não poder utilizar o recurso da entonação de voz (recursos de linguagem falada).

Aluno 2: Eu acho que como as paredes são tão finas, as ondas sonoras passariam com mais facilidade, sem necessidade de passar um bilhete.

Aluno 3: Passar um bilhete por debaixo da porta, porque eu ver ter certeza de que a pessoa entendeu.

Aluna 4: Falar em volta “alta” o recado para a pessoa. Pois seria algo mais fácil porque eu teria que arranjar um papel e uma caneta, podendo gritar o que eu queria falar p/ ele.

Aluna 5: Falar em voz alta, porque eu acredito que dê para ouvir, justamente porque as paredes são finas.

Aluno 6: Eu acho que seria mais fácil falar em voz “alta”, porque não se perderia o tempo de escrever o bilhete e a resposta seria imediata.

Aluna 7: Escrever um bilhete e passa-lo pela porta, pois como a porta é bem fina é fácil de passar o bilhete por ela, sem a necessidade de gritar.

Aluna 8: Falar em voz “alta”, pois quando falamos ondas são transmitidas podendo atravessar matérias (depende da

largura), sendo as paredes e a porta bem finas, falar em voz “alta” seria mais fácil.

Aluno 9: Se o objetivo é passar a resposta com maior facilidade, falar em voz alta é a melhor opção. Porém se o objetivo fosse passar a mensagem de maneiras mais clara, mandava uma carta (sem perder eficiência).

Aluno 10: Eu acho que é mais fácil escrever um bilhete e passa-lo por debaixo da porta, pois assim somente nós saberemos do assunto.

Aluno 11: Eu preferiria falar mais alto, por conta das paredes serem finas, a vibração/som de minha voz, passará mais facilmente e a pessoa possivelmente conseguirá ouvir.

Aluno 12: Na minha opinião o mais fácil é gritar, tendo em mente que as paredes são finas.

2. Qual a sua opinião sobre frase: “Quem escreve um bilhete necessariamente transfere a informação materialmente, mas quem fala não está materialmente transferindo-a.”?

Aluno 1: Quem escreve o bilhete passa a informação através do recurso visual por um objeto “grande” - algum pedaço de papel. Mas já quem fala transmite através do recurso auditivo (sonoro), emitindo uma frequência que “vibrará” as partículas do ar e, posteriormente, as da parede e as do tímpano. Nesse caso essas partículas se tornam “mensageiras” e quem fala também envia um objeto material. Obs: linguagem hiper leiga.

Aluno 2: Depende de sua concepção de material. Porque você vibra suas cordas vocais e faz o som se propagar através do ar até chegar no ouvido da pessoa, e o ar tem massa. Então é relativo.

Aluno 3: Eu acho que está certa porque não conseguimos tocar na nossa fala e no bilhete conseguimos.

Aluna 4: Concordo com a frase, pois é exatamente o que ocorre nessa situação.

Aluna 5: Acho que é uma boa afirmativa. Porque é realmente isso que acontece. Quando você passa um bilhete você está passando um objeto material: o papel. Mas quando você fala é só o conhecimento.

Aluno 6: Concordo, pois a afirmativa mostra o óbvio.

Aluna 7: Acho que quando se fala também envia objeto material, como partículas e vibrações.

Aluna 8: Eu concordo com a frase, o bilhete precisa um objeto material o papel, na fala apenas transfere as ondas sonoras.

Aluno 9: Um objeto material é todo tipo de matéria palpável, por exemplo, bilhete. Mas a informação é absorvida de maneira diferente. Porém a fala são vibrações que se deslocam em meio material por exemplo o ar ou a água.

Aluno 10: Eu concordo, pois um objeto material é algo que você precisa tocar.

Aluno 11: É um pouco complicado, pois as vibrações emitidas por nossa fala não são tecnicamente um material físico, então eu diria que a frase está correta.

Aluno 12: Faz sentido, pois eu não considero ondas sonoras um objeto material.

3. O que você entende por “matéria”? Dê exemplos de objetos que podemos considerar como “partículas materiais”.

Aluno 1: Tudo aquilo que é constituído por de matéria. Tudo que foge ao lúdico e ao campo das ideias. Átomos, seus compostos e tudo que eles compõem, fótons, etc.

Aluno 2: Tudo que possui massa. Imagino que todas as partículas são “partículas materiais” pois todas possuem massa.

Aluno 3: Objeto material pode ser tocado. Papel, pedra, metal.

Aluna 4: Tudo aquilo que podemos utilizar para passar uma informação. Folha, papel, celular, quadro.

Aluna 5: Coisas palpáveis, nas quais eu posso fazer uso para alguma finalidade específica. Ex: Um lápis, um ventilador, uma bola de vôlei. Todos esses objetos são palpáveis e eu posso usá-los para algo específico. Com o lápis eu escrevo, com o ventilador eu me refresco e com a bola de vôlei eu me exercito.

Aluno 6: Para mim um objeto material é formado por átomos. Mas estudos recentes me fazer repensar este conceito como por exemplo um estudos que mostrava que dependendo do sentimento de uma pessoa a formação de um floco de neve perto dela era diferente, partículas materiais: um pedaço de papel e uma caneta.

Aluna 7: Qualquer objeto que possua átomos e não apenas que possamos toar e vier, mas também “objetos” considerados invisíveis a olho nu, como um mínimo grão.

Aluna 8: Algo que podemos ver, tocar: caneta, mesa, papel.

Aluno 9: Em minha opinião um objeto material é todo tipo de matéria palpável. Partículas materiais talvez sejam matéria muito pequenas para ser percebido.

Aluno 10: Eu entendo que é alguma coisa que podemos tocar.

Aluno 11: Objetos materiais ao meu ver inicial, são coisas/objetos aos quais você pode “tocar” e interagir assim como vê-lo. Uma cadeira, uma mesa, uma camisa, tudo isso e mais ao meu ver podem ser considerados objetos materiais.

Aluno 12: Objeto material seria algo que você pode tocar, como: uma cadeira ou um poste.

4. O que você entende por “onda”? Dê exemplos de ondas que encontramos no dia a dia.

Aluno 1: Onda é o ato de algo se propagar pelo espaço de maneira progressiva e crescente, sendo emitida de um ponto e aumentando sua “abrangência” à medida que percorre o espaço até “Perder força”. Eletromagnéticas e mecânicas (etc?), como som, ondas de rádio, a luz, em alguns casos impacto.

Aluno 2: —.

Aluno 3: Eu não sei explicar o que é uma onda.

Aluna 4: Onda sonora, magnética.

Aluna 5: É um conjunto de coisas do mesmo tipo se movimentando em uma direção. Exemplo: ondas d rádio que saem dos nossos celulares, ondas na praia, ondas de radiação que vemos nos documentários que falam sobre guerras.

Aluno 6: Eu não tenho um conceito definido de ondas, mas acho que é como se fosse uma deformação no espaço gerada pela liberação de energia, ondas no mar, onda de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz, ultravioleta, raios-x raios-gamma e o som.

Aluna 7: Qualquer tipo de vibração que chega aos nossos sentidos. Ondas sonoras, ondas marítimas e entre outras.

Aluna 8: São partículas que são transmitidas pelas radiações ou pelas ondas sonoras. Fala, os raios solares, rádio.

Aluno 9: Ondas sonoras, eletromagnéticas... que são parte delas se deslocam em matéria.

Aluno 10: Eu entendo que pode ser uma forma de frequência que o ser humano pode ou não ouvir, ondas de rádio.

Aluno 11: Um exemplo simples é o micro-ondas que muitas vezes se encontra em nossas casas, ele emite ondas de calor que ao entrar em contato com o alimento, o aquece, outro exemplo também é o rádio que trabalha com ondas de

rádio.

Aluno 12: Onda é um conceito de algo que segue um movimento (*o aluno fez o desenho de uma onda*), encontramos no dia-a-dia: a onda do mar, onda de rádio, onda sonora, onda do wi-fi, etc.

5. Quando duas bolas de gude idênticas são arremessadas com velocidades de mesmo valor uma contra a outra, no encontro elas colidem. Todavia, quando numa superfície de água produzimos duas “ondas” mandando uma em direção à outra, no encontro elas interferem enquanto se cruzam, mas não observamos uma colisão. Como você distinguiria o fenômeno de colisão de partículas do fenômeno da interferência ondulatória?

Aluno 1: Quando duas partículas iguais colidem em sentido oposto (mesma  $v$ ), as forças se anulam e os dois objetos entram em estado de repouso. Já as ondas quando se cruzam, elas apenas interferem (freiam) na propagação uma da outra. Mas isso não impede a continuação do “movimento”.

Aluno 2: Apenas repare se o corpo, onda ou matéria em questão continuou sua rota ou se foi interrompida ou abalada.

Aluno 3: Na colisão de partículas acontece alguma destruição ou colisão. Na interferência ondulatória não acontece nenhum tipo de destruição.

Aluna 4: Como no primeiro exemplo são duas matérias e se colidem, a colisão é muito maior. No segundo exemplo como são duas ondas, uma interfere a outra.

Aluna 5: Quando existe uma colisão de duas coisas, elas naturalmente se chocam e quebram, mas na interferência ondulatória elas acabam por se juntar uma onda na outra.

Aluno 6: Na colisão de partículas existe uma matéria se colidindo com outra, já na ondulatória só existem deformações no espaço.

Aluna 7: Não sei, mas acho que na colisão de partículas existe um choque entre os dois, ou seja, uma força é imposta sobre a outra e na interferência ondulatória não há um impacto elas apenas se atravessam.

Aluna 8: —.

Aluno 9: Creio eu que o tipo de matéria influencia em uma colisão ou seja sua estrutura molecular, quando duas partículas colidem criamos um efeito de “ação e reação”, ou seja elas ao invés de se anular no impacto vão se repelir, ou dependendo da velocidade, se quebrar ou até se fundir. Porém a água é um meio fluido e suas colisões se anulam por terem forças iguais.

Aluno 10: —.

Aluno 11: Partículas podem se chocar umas com as outras, já ondas podem passar através de outra.

Aluno 12: As partículas tem massa, portanto quando colidem essa massa interfere uma na outra. Já uma transferência ondulatória acontece quase que em outro plano, onde há muito espaço e as ondas não tem massa.

6. Você já observou algum fenômeno de interferência ondulatória? Se sim, cite qual(is).

Aluno 1: —.

Aluno 2: Creio que sim. Creio que as ondas como as ondas de rádio sejam um fenômeno de interferência ondulatória.

Aluno 3: Não.

Aluna 4: Não.

Aluna 5: Sim, no mar.

Aluno 6: Não.

Aluna 7: Não sei.

Aluna 8: —.

Aluno 9: ?.

Aluno 10: Não.

Aluno 11: O primeiro que pensei foi justamente ondas de água numa piscina, ao abrir os braços e forçarmos a se fechar na superfície da água, criará uma onda em cada braço e quando se chocam, se ambas estiverem com a mesma força, elas vão simplesmente se anular.

Aluno 12: Bom, creio que todo dia presenciamos interferência ondulatória aonde quer quer estejamos, com sinais de wi-fi, rádio etc.

7. Já ouviu falar em interferência construtiva e destrutiva? Se sim, explique a diferença entre eles.

Aluno 1: —.

Aluno 2: Não. Mas estipulo que interferência destrutiva seja uma interferência que abale outra que esteja em seu caminho.

Aluno 3: Não.

Aluna 4: Não.

Aluna 5: Não, nunca ouvi.

Aluno 6: Não.

Aluna 7: Não.

Aluna 8: —.

Aluno 9: ?.

Aluno 10: Nunca ouvi falar de nenhum dos dois.

Aluno 11: Nunca ouvi falar.

Aluno 12: —.

8. Explique o que é SOM para você. Dê exemplos de como podemos produzi-lo.

Aluno 1: —.

Aluno 2: Som é quando vibramos algum corpo e lhe reage com o ar em sua volta, fazendo ele se movimentar gerando

ondas e assim é possível interceptar com nossos aparelho auditivos.

Aluno 3: O som é tudo que nós podemos ouvir ou escutar. Falando, instrumentos musicais.

Aluna 4: Qualquer barulho que eu possa ouvir. Com a boia, batendo palma, som de uma guitarra ou violão...

Aluna 5: É o que eu posso ouvir.

Aluno 6: O som é uma onda vibratória que percorre pela matéria, com colisões de partículas que geram uma energia em forma de som.

Aluna 7: É uma forma que usamos para denominar as vibrações que chegam aos nossos ouvidos, por meio de algum material que a produza. Podemos produzi-lo causando impacto entre duas casas como quando batemos palma.

Aluna 8: —.

Aluno 9: Som são vibrações em certos tipos de matéria que se deslocam nas mesmas

Aluno 10: É quando os átomos ao nosso redor vibram em nosso ouvido, caixas de som, televisão, torcida do flamengo, etc.

Aluno 11: Som para mim é basicamente as vibrações produzidas por uma coisa ou algum objeto, podemos produzir isso ao interagir com o ambiente.

Aluno 12: O som é uma onda com certos padrões, para produzi-lo podemos bater em algo ou esticar e tocar em uma corda.

9. E a luz, explique o que é LUZ para você. Dê exemplos de como podemos produzi-la.

Aluno 1: —.

Aluno 2: Luz é o resultado de alguma reação química ou física que pode se propagar tanto no ar como no vácuo.

Aluno 3: A luz ilumina.

Aluna 4: Qualquer luminosidade que eu possa ver. Lâmpada, Sol, lanterna, vagalume...

Aluna 5: É o que reflete nas coisas para que eu possa enxerga-las.

Aluno 6: A luz é uma radiação eletromagnética que anda em linha reta e é reflexível, acho que com colisão de partículas.

Aluna 7: É uma vibração que em contato com nossos olhos nos permite ver as vibrações que cada coisa possui.

Aluna 8: —.

Aluno 9: Luz são partículas que se deslocam sem necessidade de matéria.

Aluno 10: Para mim a luz é a energia gerada por uma pilha ou pelo Sol, que pode gerar um feixe de luz, lanternas, lasers de filmes e de brinquedos, lâmpadas, etc.

Aluno 11: Para mim é o acúmulo de fótons refletidos que podem ser detectados por nossos olhos.

Aluno 12: A luz é um raio de várias cores emitido por alguma fonte de luz, podemos produzi-la com energia e um catalisador metálico com outra coisa metálica.

10. Você conhece algum caso de ondas que atravessam a matéria? Se sim, qual(is)?

Aluno 1: —.

Aluno 2: Quando você grita do lado de fora de um quarto, imagino que as ondas sonoras atravessaram a parede.

Aluno 3: Não.

Aluna 4: Ondas magnéticas.

Aluna 5: Sim, ondas de rádio, eu acho...

Aluno 6: Sim, raios gama e raios-x.

Aluna 7: Acho que as ondas sonoras, porém não com tanta facilidade, pois quando transmitida em grande escala pode atravessar alguns materiais.

Aluna 8: —.

Aluno 9: Ondas eletromagnéticas.

Aluno 10: Sim, as ondas radioativas, que dependendo do tipo de radiação, pode atravessar de plásticos a metais.

Aluno 11: Não sei ao certo, mas acho que ondas sonoras conseguem fazer isso!

Aluno 12: Ondas de wi-fi passando pela parede para chegarem no telefone.

### E.2.2 Pós-teste

1. Quais as diferenças que você consegue identificar entre partículas e ondas? Você percebe mudança na sua resposta do questionário anterior para esse?

Aluna 8: Ondas sofrem interferência (ondas de sobreposição ou anulatórias) e as partículas colidem.

Aluno 10: As ondas se anulam e as partículas se chocam.

Aluno 11: Partículas só seguem um caminho para chegar a um local, e não se interferem, ao contrário de ondas que pode chegar a um local seguindo diferentes caminhos ao mesmo tempo, e podem ter uma interferência construtiva ou destrutiva. Mudou desde o primeiro questionário.

Aluno 13: A onda se propaga em todas as direções e pode sofrer interferências de superexposição (*sic*). Já a partícula se propaga como unidade e pode ter seu trajeto impedido por outras partículas.

2. O som é formado por ondas ou partículas? Explique.

Aluna 8: O som é formado por ondas. O som pode sofrer interferência. Ora ele está mais alto ou mais baixo.

Aluno 10: O som é uma onda, pois nós conseguimos aumentar ou diminuir o volume do som.

Aluno 11: Por ondas, pois ele sofre interferência, como foi mostrado no experimento durante a aula.

Aluno 13: Ondas. Esta conclusão, resumidamente falando, se baseia na característica de interferência e anulação de ondas por outras ondas.

3. Por que ao utilizar o interferômetro sonoro fomos capazes de ouvir o som aumentar ou diminuir quando mexíamos no tamanho de um dos braços? Você seria capaz de dizer o nome do fenômeno envolvido e porque a existência dele foi vital para descobrirmos a natureza do som?

Aluna 8: Ondas. Sobreposição.

Aluno 10: Pois o som é uma onda; É a superposição que é característica de ondas.

Aluno 11: Era o fenômeno de interferência, foi decisivo pois por causa dele fomos capazes de determinar que o som é uma onda. Quanto mais mexíamos no aparelho, mais interferência ele sofria.

Aluno 13: Pois ao mexer no braço do aparelho, as ondas iam se anulando ou se somando, diminuindo e aumentando a frequência ondulatória, e logo, o som. A superposição, pois se fosse partículas as mesmas se chocariam.

4. Quando observamos o comportamento da luz na simulação computacional do divisor de luz com uma fonte muito fraca, ela apresentou comportamento de onda ou de partícula? Por quê? Você é capaz de dizer o que é um fóton?

Aluna 8: Partícula.

Aluno 10: De partícula, pois ela não tinha tanta energia para se locomover pelo 'espaço' que lhe foi dado.

Aluno 11: Apresentou um comportamento de partícula, pois em um momento chegava a um local e em outro momento

chegava ao outro. O detector liberava pequenos feixes de luz individualmente.

Aluno 13: Partícula, porque a luz se apresenta como partícula quando testada como partícula, mas ao ser emitida em maior quantidade demonstra característica de onda.

5. Ao observar o comportamento da luz em uma simulação computacional do interferômetro de luz (que nada mais é do que o divisor de luz acrescido de um segundo espelho semitransparente, lembra?), a vimos apresentar um comportamento estranho: ela somente chegava a um dos detectores. Esse comportamento sugeria que a luz fosse onda ou partícula? Por quê?

Aluna 8: “Onda.”

Aluno 10: “De partícula, pois dependendo da quantidade de partículas, ela pode ir para todos os lados ou só para um único lado.”

Aluno 11: “O detector liberava um feixe constante de luz, e a luz com o espelho apresentava um comportamento de onda, se reforçando pós espelho, e os feixes seguiam os 2 caminhos ao mesmo tempo.”

Aluno 13: “Partícula, pois se fosse onda se dividiria no espelho semitransparente.”

6. É possível chegar a um consenso sobre a natureza da luz? Que nome damos ao seu comportamento estranho?

Aluno 10: “Não.”

Aluno 13: “Não. Comportamento de onda e partícula.”

Aluna 8: “Não.”

Aluno 11: “Não tecnicamente, pois em determinados experimentos e situações ela apresenta um comportamento de partícula (fóton) e em outros ela apresenta um comportamento de ondulatório. Não lembro muito bem o nome do

comportamento, mas diria que seria partícula-onda, ou alguma mistura disso.”

# Referências Bibliográficas

- [1] K. Krijtenburg-Lewerissa, H. J. Pol, A. Brinkman, W. R. van Joolingen, *Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education*, Physical Review Physics Education Research, v. 13, n. 1, art. 010109 (2017).
- [2] L. C. McDermott, E. F. Redish, *Resource letter: PER-1: Physics Education Research*, American Journal of Physics, v. 67, p. 755 (1999).
- [3] I. M. Greca, M. A. Moreira, *Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da Mecânica Quântica introdutória*, Investigações em Ensino de Ciências, v. 6, n. 1, p. 29 (2001).
- [4] A. B. Arons, *Guest Comment: Proposed revisions of the introductory physics course*, American Journal of Physics, v. 57, p. 681 (1989).
- [5] E. Merzbacher, *Guest Comment: How shall we teach physics in the 21st century?*, American Journal of Physics, v. 58, p. 717 (1990).
- [6] M. Alonso, *Emphasize applications in introductory quantum mechanics courses*, American Journal of Physics, v. 70, n. 9, p. 887 (2002).
- [7] R. Müller, H. Wiesner, *Include interpretation in introductory quantum mechanics courses*, American Journal of Physics, v. 70, n. 9, p. 887 (2002).
- [8] A. B. Arons, *Teaching Introductory Physics*, cap. 10, Wiley (1997).
- [9] D. Gil, J. Solbes, *The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science*, International Journal of Science Education, v. 15, n. 3, p. 255-260 (1993).
- [10] Physical Science Studies Committee, *Physics*, ed. 1, Boston: D. C. Heath And Company (1960).
- [11] Eric M. Rogers, E. J. Wenham, *Nuffield Physics, Pupil's Text Year 5*, London: Longman Group for the Nuffield Foundation (1980).

- 
- [12] F. James Rutherford, Gerald Holton, Fletcher G. Watson, *Harvard Project Physics Text*, New York: Holt, Rinehart and Winston (1981).
- [13] F. Ostermann, M. A. Moreira, *Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”*, *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, p. 23 (2000).
- [14] R. Müller, H. Wiesner, *Teaching quantum mechanics on an introductory level*, *American Journal of Physics*. v. 70, n. 3, p. 200-209 (2002).
- [15] S. McKagan, W. Handly, K. Perkins, C. Wieman, *A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect*, *American Journal of Physics*, v. 77, n. 87 (2009).
- [16] J. Y. Oh, *Using an enhanced conflict map in the classroom (photoelectric effect) based on lakatosian heuristic principle strategies*, *International Journal of Science and Mathematics Educacion*, v. 9, p. 1135 (2011).
- [17] C. Baily, N. D. Finkelstein, *Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses*, *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, v. 11, p. 020124 (2015).
- [18] I. M. Greca, O. Freire, *Does an emphasis on the concept of quantum states enhance students’ understanding of quantum mechanics?*, *Science Education*, v. 12, p. 541-557 (2003).
- [19] G. Kalkanis, P. Hadzidaki, D. Stavrou, *An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts*, *Science Education*, v. 87, p. 257 (2003).
- [20] L. Koopman, N. Brouwer, A. Heck, W. J. Buma, *Remedial mathematics for quantum chemistry*, *Journal of Chemical Education*, v. 85, p. 1233 (2008).
- [21] G. Papaphotis, G. Tsaparlis, *Conceptual versus algorithmic learning in high school chemistry: the case of basic quantum chemical concepts. Part 1. Statistical analysis of a quantitative study*, *Chemical Education Research and Practice*, vol. 9, p. 332 (2008).
- [22] V. Dangur, S. Avargil, U. Peskin, Y. J. Dori, *Learning quantum chemistry via a visual-conceptual approach: students’ bidirectional textual and visual understanding*, *Chemical Education Research and Practice*, v. 15, p. 297 (2014).

- [23] Y. J. Dori, V. Dangur, S. Avargil, U. Peskin, *Assessing advanced high school and undergraduate students' thinking skills: The chemistry – from the nanoscale to microelectronics module*, Journal of Chemical Education, v. 91, p. 1306 (2014).
- [24] W. Z. Shi, *The effect of peer interactions on quantum physics: A study from China*, Journal of Baltic Science Education, v. 12, p. 152 (2013).
- [25] D. A. Muller, M. D. Sharma, J. Eklund, P. Reimann, *Conceptual change through vicarious learning in an authentic physics setting*, Instructional Science, v. 35, p. 519 (2007).
- [26] S. B. McKagan, K. K. Perkins, M. Dubson, C. Malley, S. Reid, R. LeMaster, C. E. Wieman, *Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics*, American Journal of Physics, v. 76, p. 406 (2008).
- [27] C. Singh, *Interactive learning tutorials on quantum mechanics*, American Journal of Physics, v. 76, p. 400 (2008).
- [28] G. Zhu, C. Singh, *Improving students' understanding of quantum mechanics via the Stern-Gerlach experiment*, American Journal of Physics, v. 79, p. 499 (2011).
- [29] G. Zhu, C. Singh, *Improving students' understanding of quantum measurement. II. Development of researchbased learning tools*, Physical Review Special Topics - Physics Education Research, v. 8, p. 010118 (2012).
- [30] A. Kohnle, D. Cassettari, T. J. Edwards, C. Ferguson, A. D. Gillies, C. A. Hooley, N. Korolkova, J. Llama, B. D. Sinclair, *A new multimedia resource for teaching quantum mechanics concepts*, American Journal of Physics, v. 80, p. 148 (2012).
- [31] F. Ostermann, S. D. Prado, T. S. F. Ricci, *Desenvolvimento de um software para o ensino de fundamentos de Física Quântica*, Física na escola, v. 7, n. 1, p. 22-25 (2006).
- [32] A. Pereira, F. Ostermann, C. Cavalcanti, *On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics*, Physics Education, v. 44, n. 3, p. 281-291 (2009).
- [33] M. Michelini, R. Ragazzon, L. Santi, A. Stefanel, *Discussion of a didactic proposal on quantum mechanics with secondary school students*, Nuovo Cimento C, v. 27, p. 555 (2004).

- [34] M. Gordon, G. Gordon, *Quantum computer games: Schrödinger cat an hounds*, Physics Education, v. 47, p. 346 (2012).
- [35] R. P. Feynman, *QED: The strange theory of light and matter* (Princeton U. Press, 1985).
- [36] G. W. Stewart, *The theory of the Herschel-Quincke Tube*, Physics Review, v. 31, p. 696-698 (1928).
- [37] R. G. Pontes, *Simulação Computacional do Interferômetro de Mach-Zehnder*, Monografia (Licenciatura em Física), Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 21-26 (2016).
- [38] J. F. Clauser, *Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect*, Physical Review D, v. 9(4), p. 853-860 (1974).
- [39] A. C. Elitzur, L. Vaidman, *Quantum mechanical interaction-free measurements*. Foundations of Physics, v. 23(7), p. 987-997 (1993).
- [40] P. G. Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog; A. Zeilinger, M. A. Kasevich, *Interaction-free Measurement*, Physical Review Letters, v. 74(24), p. 4763-4766 (1995).
- [41] P. Bertet, S. Osnaghi, A. Rauschenbeutel, G. Nogues, A. Auffeves, M. Brune, J. M. Raimond, S. Haroche, *A complementarity experiment with an interferometer at the quantum-classical boundary*, Nature, v. 411, p. 166-170 (2001).