

**BLOCO XI - DUALIDADE ONDA-PARTICULA**

Neste bloco, discutiremos o interferômetro de Mach-Zhender e os resultados experimentais que mostram quatro possíveis interpretações da natureza da luz. Ao final desta unidade apresentaremos uma discussão sobre a realidade na ciência.

**Objetivos gerais**

Conhecer e compreender quatro interpretações para a teoria ondulatória da luz: ondulatória, corpuscular, da complementaridade e dualista-realista

**Conteúdo**

- Interferômetro de Mach-Zehnder.
- Interpretações para a natureza da luz

**Quadro Sintético**

ATIVIDADE	MOMENTOS	TEMPO
1 - Analogia com a pessoa fóton	Interpretação do texto do dialogo entre um crente da teoria corpuscular de Newton e um crente da teoria de Huygens do livro “Evolução da Física” de Eisntein e Infeld.	1 aula
	Apresentação da analogia que será feita como uma situação preparatória para a compreensão da experiência que feita para definir a natureza da luz.	1 aula
	Os alunos observam o comportamento da pessoa-foton e o professor fica atento para recolher as hipóteses que forem aparecendo.	
	O professor retoma as observações e sistematiza as hipóteses dos alunos, preparando para a analogia.	
2 - Interferômetro de Mach Zender	Retomada da analogia da aula anterior usando o power point. Apresentar o interferômetro de Mach-Zhender, e os resultados experimentais iniciais e para um só fóton, e as interpretações dos resultados visando determinar a natureza da luz.	1 aula
	Os alunos assistem à apresentação e participam do diálogo mantido com o professor	
3 - Exercícios	Apresentação das questões e entrega do texto de apoio, deixando claro o caráter das questões serem opinativas e que o certo ou errado está de acordo com a argumentação e não por existir uma resposta certa.	1 aula
	Os alunos respondem individualmente as questões, assistidos pela professora.	
<b>TOTAL DE AULAS</b>		<b>4 aulas</b>

**DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES**

### Atividade 1 – Analogia com a pessoa fóton - Parte I

**Objetivo:** Retomar a discussão sobre a natureza da luz: é onda ou partícula?

**Conteúdo:** Conceitos clássicos de onda e partícula

**Recursos de Ensino:** *Teoria Corpuscular x Teoria Ondulatória (Recurso de Ensino 1)*

**Dinâmica da Aula:**

- A aula começa com dois alunos realizando uma leitura dramática do diálogo Huygens-Newton do livro “Evolução da Física”, um texto contando o debate histórico sobre a incompatibilidade dos conceitos clássicos de partícula e onda na Física.
- Em seguida questionar os alunos sobre como esse impasse pode ser resolvido. Espera-se que os alunos proponham que se faça uma experiência que comprove o que é a luz.

### Atividade 1 – Analogia com a pessoa fóton - Parte II

**Objetivo:** Elaborar hipóteses sobre uma analogia que facilitará a compreensão das experiências usando o interferômetro de Mach-Zehnder.

**Conteúdo:** Elaboração de explicações e argumentação a partir de resultados experimentais

**Recursos de Ensino:** Roteiro da Atividade *Analogia com Pessoa-Fóton* e os materiais listados (**Recurso de Ensino 2**).

**Dinâmica da Aula:**

- O professor apresenta a analogia como uma situação preparatória para a compreensão de uma experiência feita para definir a natureza da luz. Ele deve deixar bem clara a situação e as condições de contorno para facilitar a comparação com o interferômetro e trabalhar a analogia com seriedade para que não ocorra perda de significado.
- Os alunos observam o comportamento da pessoa-fóton. O professor deve ficar atento para recolher as hipóteses que surgirem, quais observações eles estão fazendo e que conclusões estão tirando.
- O professor retoma as observações e sistematiza as hipóteses dos alunos, preparando para a analogia.

### Atividade 2 - Interferômetro de Mach-Zehnder

**Objetivo:** Entender os resultados experimentais e as diferentes interpretações dos resultados que levaram à idéia da dualidade onda-partícula, quebra do modelo da Física como ciência pronta, em que tudo está bem determinado e resolvido.

**Conteúdo:** As quatro interpretações quânticas para a luz e seus limites na explicação dos resultados experimentais.

**Recursos de Ensino:** Sala de aula, lousa, giz e apresentação no PowerPoint *Atividade da Pessoa-Fóton (Anexo I)*.

**Dinâmica da Aula:**

- Retomar a analogia e as discussões da aula anterior usando o PowerPoint. Apresentar o interferômetro de Mach-Zehnder, os resultados experimentais iniciais e as interpretações dos resultados. Depois os resultados para um só fóton e interpretações dos resultados visando determinar a natureza da luz.

### Atividade 3 - Exercícios

**Objetivo:** Verificar a compreensão do conceito de ciência, como o aluno se sente diante dessa situação e qual o modelo para a luz que eles consideram melhor e se sabem justificar sua resposta.

**Conteúdo:** interpretações quânticas para a luz e conceitos de onda e partícula

**Recursos de Ensino:** Texto *Dualidade Onda-Partícula* e *Questões (Recurso de Ensino 3)*.

**Dinâmica da Aula:**

- Leitura e discussão do texto *Dualidade Onda-Partícula*
- Os alunos respondem as questões individualmente. O professor deve salientar o caráter opinativo das questões, pois não por existir uma resposta certa ou errada, o que é necessário nessa atividade é a argumentação dos alunos.

Recurso de Ensino 1

**TEORIA CORPUSCULAR X TEORIA ONDULATÓRIA**

De acordo com Huygens, a luz é uma onda, uma transferência de energia e não de substância. Vimos que a teoria corpuscular explica muitos dos fatos observados. Será a teoria ondulatória também capaz de fazê-lo? Temos de fazer novamente as perguntas que já foram respondidas pela teoria corpuscular, para ver se a teoria ondulatória pode sair-se igualmente bem.

Fá-lo-emos aqui sob a forma de (...) um diálogo entre N e H, sendo N um crente da teoria corpuscular de Newton e H um crente da teoria de Huygens. Nenhum dos dois tem permissão para usar argumentos criados depois de o trabalho dos dois grandes mestres ter sido concluído.

**N:** Na teoria corpuscular, a velocidade da luz tem um significado bem definido. É a velocidade com a qual os corpúsculos caminham no espaço vazio. Que significará ela na teoria ondulatória?

**H:** Significa a velocidade da onda de luz, está claro. Toda onda que se conhece se espalha com alguma velocidade definida, o mesmo devendo fazer a onda de luz.

**N:** Isso não é tão simples quanto parece. As ondas sonoras se espalham no ar, as ondas do oceano na água. Toda onda tem de ter um meio material no qual caminhe. Mas a luz atravessa o vácuo, o mesmo não se dando com o som. Supor-se uma onda no espaço vazio não é, na realidade, supor-se onda alguma.

**H:** Sim, trata-se de uma dificuldade, embora não seja nova para mim. O meu mestre pensou nisso cuidadosamente e decidiu que a única saída é admitir-se a existência de uma substância hipotética, o éter, um meio transparente que permeia todo o universo. O universo está, por assim dizer, imerso no éter. Uma vez tenhamos a coragem de introduzir esse conceito, tudo o mais se torna claro e convincente.

**N:** Mas faço objeção a tal suposição. Em primeiro lugar, ela introduz uma nova substância hipotética, e já temos substâncias em demasia em Física. Há ainda outra razão contra ela. Por certo você não duvida de que temos de explicar tudo em termos de mecânica. Que dizer do éter, nesse sentido? Estará você capacitado para responder à questão sobre como o éter é formado por suas partículas elementares e como ele se revela em outros fenômenos?

**H:** Sua primeira objeção é certamente justificada. Mas, introduzindo o éter destituído de peso e algo artificial, livramo-nos imediatamente dos corpúsculos de luz, muito mais artificiais. Temos apenas uma substância "misteriosa", em vez de um número infinito delas, correspondente ao grande número de cores do espectro. Não acha que isso seja de fato um progresso? Pelo menos todas as dificuldades são concentradas em um só ponto. Não mais necessitamos da suposição fictícia de que as partículas pertencentes a cores diferentes caminhem com a mesma velocidade no espaço vazio. O seu segundo argumento também é verdadeiro. Não podemos dar uma explicação mecânica do éter. Mas não há dúvida alguma quanto a que o estudo futuro dos fenômenos óticos e talvez de outros revelará a sua estrutura. No momento, devemos aguardar outras experiências e conclusões, mas finalmente estaremos, confio, capacitados para esclarecer o problema da estrutura mecânica do éter.

**N:** Deixemos a questão de lado por enquanto, pois não pode ser solucionada. Eu gostaria de ver como a sua teoria explica, mesmo que desatendamos às dificuldades, os fenômenos que são tão claros e compreensíveis à luz da teoria corpuscular. Tome-se, por exemplo, o fato de os raios de luz caminharem em linha reta in vácuo ou no ar. Um pedaço de papel colocado diante de uma vela produz uma sombra distinta e precisamente esboçada na parede. As sombras nítidas não seriam possíveis se a teoria ondulatória da luz fosse correta, pois as ondas se curvariam ao redor das bordas do papel e, assim, borrariam a sombra. Uma pequena embarcação não é um obstáculo para as ondas do mar, como você sabe; elas simplesmente se curvam ao redor da mesma, não projetando uma sombra.

**H:** Esse argumento não é convincente. Considere ondas curtas em um rio chocando-se com o lado de uma embarcação grande. As ondas que se originam em um dos lados da embarcação não serão vistas do outro lado. Se as ondas forem suficientemente pequenas e a embarcação suficientemente grande aparece uma sombra muito distinta. É bem provável que a luz parece caminhar em linha reta somente pelo fato de o seu comprimento de onda ser muito pequeno em comparação com o tamanho dos obstáculos comuns e das aberturas usadas nas experiências. Possivelmente não ocorreria sombra alguma se pudéssemos criar uma obstrução suficientemente pequena. Encontraríamos grandes dificuldades experimentais na construção de aparato que mostraria e a luz é capaz de se curvar. Não obstante, se tal experiência pudesse ser realizada, seria crucial na decisão entre a teoria ondulatória e a teoria corpuscular da luz.

**N:** A teoria ondulatória poderá conduzir a novos fatos no futuro, mas não sei de quaisquer dados experimentais que a confirmem convincentemente. Não vejo razão alguma para não acreditar na teoria enquanto

não fôr definitivamente provado pela experiência que a luz pode ser curvada, pois aquela teoria me parece mais simples e, portanto, melhor do que a teoria ondulatória.

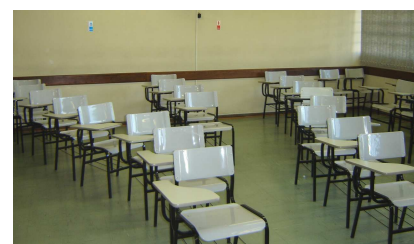
*Trecho extraído de:  
A Evolução da Física  
Albert Einstein e Leopold Infeld  
Pág. 91 à 94  
Zahar Editores, 1962*

## Recursos de Ensino 2

### ROTEIRO DA ATIVIDADE “ANALOGIA COM PESSOA-FÓTON”

#### Materiais

- Uma pessoa desconhecida dos alunos enrolada num lençol, da cabeça aos pés de modo que não possa ser identificada, nem pelo sapato.
- Carteiras dispostas em forma de Y. Cada braço do Y representará um banheiro.
- “Placas” de banheiro feminino e masculino
- Giz e lousa



#### Procedimento

- 1 - Professor propõe o problema: determinar o sexo da pessoa não identificada através do seu comportamento, explicando que essa situação é uma metáfora para ajudar na compreensão da natureza da luz. As explicações do comportamento da pessoa dadas pelos alunos durante a experiência devem ser anotadas na lousa.
- 2 - A pessoa começa o movimento caminhando para um dos banheiros. Volta e vai para o outro banheiro, repetindo o movimento de maneira aleatória sem que haja um padrão em suas escolhas, não sendo possível determinar seu sexo.
- 3 - Afinal é homem ou mulher? O professor fecha uma das entradas por exemplo o banheiro feminino e pede para os alunos observarem o comportamento da pessoa-fóton.
- 4 - A pessoa se dirige para o banheiro que está livre três ou quatro vezes.
- 5 - O professor inverte a situação dos banheiros, isto é fecha agora o banheiro masculino, e compara as explicações desse arranjo com as do anterior.
- 6 - A pessoa-fóton repete o comportamento do item 4.
- 7 - O professor propõe que se coloque uma “câmera escondida” na frente de um dos banheiros deixando as duas passagens livres.
- 8 - A pessoa se dirige para o banheiro que está com a câmera três ou quatro vezes.
- 9 - O professor coloca a “câmera” no outro banheiro.
- 10 - A pessoa-fóton repete o comportamento do item 8.
- 11 - O professor coloca uma “câmera” em cada banheiro.
- 13 - A pessoa-fóton repete o comportamento do item 2.

## Recurso de Ensino 3

### DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Ao estudarmos o efeito fotoelétrico, ficou uma dúvida quanto à natureza da luz: afinal, a luz é uma onda, como vimos nas explicações sobre a cor dos corpos, os espectros e a interferência, ou a luz é uma partícula, chamada fóton, como vimos na explicação do efeito fotoelétrico?

Antes de conhecermos as experiências que se fez em Física para tentar resolver esse problema, pensemos primeiro numa metáfora, que visa facilitar nosso raciocínio, para entendermos o que foi feito e pensado pelos cientistas.

#### O Que Estava em Baixo do Lençol?

Consideremos a seguinte “situação/experimento”, em que, a partir do comportamento de uma pessoa, tentaríamos descobrir qual é o seu sexo.

Para isso, observaríamos o comportamento da pessoa ao ir ao banheiro, supondo que um homem usa o banheiro masculino e uma mulher o banheiro feminino. Para isso, escolhemos um lugar onde o caminho para chegar a cada banheiro corresponde a um braço de uma bifurcação. Podemos imaginar que não podemos ver a pessoa quando escolhe e percorre o caminho, apenas uma luz indica qual o banheiro que está sendo usado:

**1° passo:** Deixamos a pessoa escolher livremente o caminho até o banheiro:

O que observamos: A pessoa vai às vezes ao banheiro masculino, às vezes ao feminino, ou seja, se mostra ora como homem, ora como mulher, sem que haja algum privilégio de uma ou outra escolha.

**2° passo:** Fazemos com que a pessoa só tenha um caminho a seguir, o do banheiro feminino, fechando a possibilidade de ir ao banheiro masculino:

O que observamos: A pessoa se mostra apenas como mulher, isto é, usa apenas o banheiro feminino.

**3° passo:** Fazemos agora com que a pessoa só tenha um caminho a seguir: o do banheiro masculino, fechando a possibilidade de ir ao banheiro feminino:

O que observamos: A pessoa se mostra apenas como homem, isto é, usa apenas o banheiro masculino.

**4° passo:** A pessoa agora pode escolher livremente o caminho a seguir, como foi feito no 1° passo, porém dessa vez há uma câmera escondida na frente da porta de um dos banheiros, o masculino:

O que observamos: A pessoa se mostra apenas como homem, isto é usa apenas o banheiro que tem a câmera escondida.

**5° passo:** O mesmo do anterior, só que colocando a câmera escondida na porta do banheiro feminino:

O que observamos: A pessoa se mostra apenas como mulher, isto é usa apenas o banheiro que tem a câmera escondida.

Fazendo algumas hipóteses que justifiquem esse comportamento, o que podemos afirmar sobre o sexo da pessoa?

**1** - A pessoa era um transexual ou homossexual, e por isso ia aos dois banheiros, indiferentemente.

**2** - A pessoa era um homem. Foi ao banheiro feminino quando o banheiro masculino estava fechado porque estava “apertado”

**3** - A pessoa era uma mulher, foi ao banheiro masculino porque estava “apertada”.

**5** - A pessoa era hermafrodita

**4** - Não era uma pessoa, era um robô.

Cada uma dessas interpretações de qual seria o sexo da pessoa a partir de seu comportamento é boa para explicar o que aconteceu, porém todas elas falham em algum ponto. Por exemplo, nenhuma delas explica bem porque a pessoa ia para o banheiro em que a câmera estava escondida.

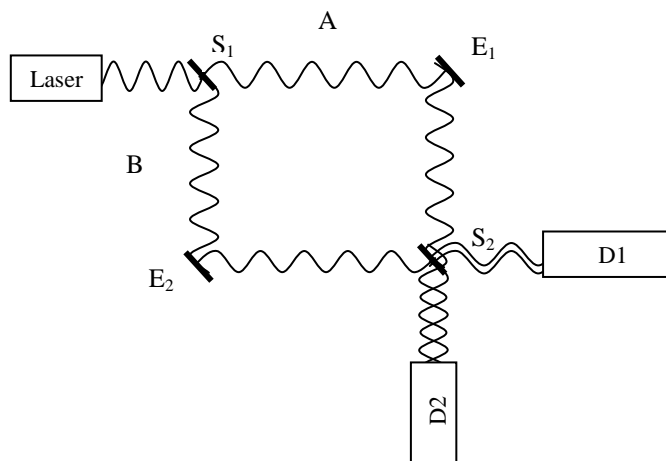
No nosso mundo, aspectos antagônicos podem conviver tranquilamente, podem coexistir sem maiores problemas.

No mundo da física as coisas são bem diferentes: as duas formas de apresentar as “coisas” da física são onda e partícula. São formas opostas que não podem, na física clássica, pertencer simultaneamente ao mesmo objeto.

### O Interferômetro de Mach–Zehnder

Tendo em mente essa metáfora, vamos agora conhecer um experimento feito pelos físicos para determinar a verdadeira natureza da luz: onda ou partícula.

O experimento é feito com uma fonte de luz (laser), dois vidros semi-refletores ( $S_1$  e  $S_2$ ), dois espelhos ( $E_1$  e  $E_2$ ) e dois detectores ( $D_1$  e  $D_2$ ), como mostra a figura a seguir:



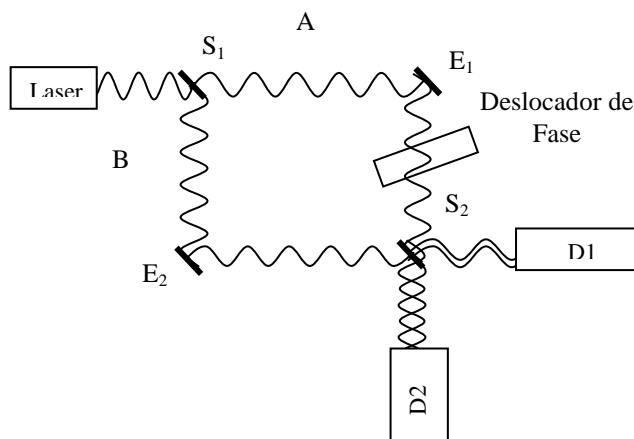
Os vidros semi-refletores são como os vidros de uma janela em que à noite você pode ver a imagem do interior da sala refletida no vidro, e ao mesmo tempo ver o que está na rua, ou seja, parte da luz é refletida e parte é transmitida.

A fonte envia um feixe de luz sobre o vidro semi-refletor  $S_1$ , que dividirá esse feixe em duas partes: um feixe segue a direção horizontal, que corresponde ao caminho A, que foi transmitido, e outro feixe, que reflete, seguindo a direção vertical, caminho B.

Após serem refletidos pelos espelhos  $E_2$  e  $E_1$ , os feixes se recombinaem (interferem) no vidro semi-refletor em  $S_2$ .

A parte refletida do feixe se combina com a parte transmitida, seguindo a direção I e chegando ao detector. O mesmo acontece com a outra parte.

Podemos também inserir um deslocador de fase, que é uma lâmina de vidro transparente, que vai reduzir a velocidade da luz ao atravessá-la. Variando a inclinação dessa lâmina, podemos aumentar ou diminuir o caminho seguido pela luz dentro da lâmina, modificando o tempo que leva para ir de  $S_1$  até  $S_2$ . Com isso podemos criar interferências destrutivas ou construtivas, revelando a natureza ondulatória da luz.



Agindo assim, observamos interferência destrutiva no caminho II e nada no detector 2, e temos uma interferência construtiva no caminho I e o detector 1 mede a chegada da luz.

Como a interferência é um fenômeno tipicamente ondulatório, podemos dizer que a luz se comporta como onda.

Mas algo muito interessante acontece quando a fonte emite um único fóton, ao invés de um feixe de luz.

A pergunta é: depois que o fóton passa por  $S_1$ , mas antes de incidir em  $S_2$ , em qual caminho ele se encontra, em A ou em B?

Podemos supor que o fóton esteja em A. Podemos fazer isso retirando o semi-refletor  $S_1$ .

Assim o fóton incide em  $S_2$  e pode ser detectado em  $D_1$  (50% de probabilidade) ou em  $D_2$  (também com 50%)

Podemos supor que o fóton se encontra em B. Fazemos isso substituindo o espelho semi-refletor  $S_1$  por um espelho. Assim temos também 50% de chance de detectá-lo em  $D_2$ .

Como o fóton tem 50% de chance de ser detectado em  $D_2$  seguindo pelo caminho A e 50% seguindo pelo caminho B, então se ele está em A ou B (que é a nossa pergunta), ele tem 50% de chance de chegar em  $D_2$ .

Mas não é isso o que acontece!! Ou seja, ao invés de 50 % de chance do fóton chegar em  $D_2$  temos 0% : o fóton não chega ao detector  $D_2$ , por mais que seja repetida a experiência!

Como vimos, um fóton deveria ser uma partícula, que é localizada e segue uma trajetória bem definida, mas o experimento mostrou que isso não acontece. O fóton não seguiu uma trajetória que pode ser definida. Assim como vocês criaram interpretações para explicar a verdadeira natureza da pessoa debaixo do lençol, os cientistas também se viram obrigados a interpretar esses resultados inesperados.

Veremos as principais delas:

### 1. Interpretação ondulatória:

Um fóton é uma onda, um “pacote de onda”. Com isso, talvez o fóton possa se dividir em dois “meios-fótons” ao chegar em  $S_1$  e esses se recombinariam em  $S_2$ , como prevê a física clássica.

Porém nenhum experimento feito até hoje foi capaz de detectar um “meio-fóton”...

### 2. Interpretação corpuscular:

O fóton é uma partícula. Esse experimento que mostramos não é bem explicado por essa interpretação. Uma saída possível é dizer que a lógica existente no mundo quântico é uma lógica diferente do mundo macroscópico.

Com isso, o “ou” seria diferente e uma coisa poderia ser e não ser ao mesmo tempo.

### 3. Interpretação dualista realista:

A luz é um objeto quântico, que é composto por duas partes: o fóton e sua onda associada. Assim, o fóton segue uma trajetória, A ou B, mas sua onda se divide em duas partes, seguindo por A e B ao mesmo tempo.

A partícula seria como um surfista, que só navega onde há onda. Como as ondas se cancelam próximas ao detector  $D_2$ , o fóton é obrigado a seguir para  $D_1$ .

### 4. Interpretação da complementaridade:

Um fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular, nunca os dois ao mesmo tempo.

O experimento que vimos é um fenômeno ondulatório, já que não segue um caminho bem definido. Assim, não faz sentido perguntar onde está o fóton.

## Vamos Tornar Isso Tudo Ainda Mais Interessante...

Essa é uma outra versão do experimento que vimos até agora. É a mesma aparelhagem utilizada até aqui, mas o semi-refletor  $S_2$  foi retirado. Assim, se o fóton chegar em  $D_1$ , podemos dizer que ele estava em B. se chegar em  $D_2$  ele veio por A. Temos agora um fenômeno corpuscular:

Vamos ver como as diferentes interpretações analisam esse fenômeno:

### 1. Interpretação ondulatória:

Após atravessar  $S_1$  o pacote de onda se divide em duas partes. Ao chegar em  $D_1$ , a outra parte desaparece instantaneamente!

Acontece o chamado “colapso de onda”. Quando uma é detectada, a probabilidade de se detectar a outra é imediatamente reduzida a zero!!!

### 2. Interpretação corpuscular:

Aqui esta interpretação é muito boa. Sua explicação é direta: a partícula seguiu o caminho A e chegou em  $D_2$ , ou segue outro caminho e chega em  $D_1$ . Não precisa nenhum artifício como a idéia de colapso.

### 3. Interpretação dualista realista:

Após  $S_1$ , a partícula segue o caminho A ou B, mas existiria sua onda associada que seguiria os dois caminhos ao mesmo tempo, pois essa se dividiu em duas partes.

Ao chegar em  $S_2$ , as ondas se combinam e onde “sobrar” onda, a partícula navega, chegando em  $D_2$ . Porém, o que acontece com a parte da onda que segue para  $D_1$ , já que nada é detectado?

Para resolver esse problema essa interpretação lança a idéia de “onda vazia”, uma onda que não carrega energia alguma e que não pode ser detectada. Einstein chamava essa onda de “onda fantasma...”. Essa criação de objetos “inexistentes” nas teorias físicas é muito criticada pelos cientistas.

### 4. Interpretação da complementaridade:

Agora essa interpretação considera o fenômeno como corpuscular. Depois de realizada a medição, viu-se que o fóton seguiu um caminho bem definido, sendo assim, um fenômeno associado à partícula. Para essa interpretação, só se pode falar sobre a natureza da luz após realizar uma medição. Até medir, não faz sentido perguntar o que ela é.

*Texto adaptado de:  
Conceitos de Física Quântica  
Oswaldo Pessoa Jr.  
Livraria da Física, 2003*

### QUESTÕES

1 - Preencha o quadro sistematizando as quatro interpretações para a natureza da luz.

	Ondulatória	Corpuscular	Complementaridade	Dualista-Realista
A luz é...				
Explicação da experiência do interferômetro				
Explicação para um fóton				

2 - Por que você acha que existem tantas interpretações diferentes para a natureza da luz?

3 - Como você associa esse experimento com a atividade da pessoa escondida pelo lençol?

4 - A partir do que viu aqui, como você acha que é a natureza da luz? Qual das quatro interpretações mais o agrada? Por quê?

5 - De acordo com a interpretação da complementaridade, pode-se pensar o seguinte: Se um átomo existe somente quando olhamos para ele, o meu corpo é feito de átomo, será que meu pé existe quando não estou olhando para ele?