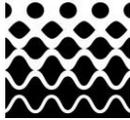




UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

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



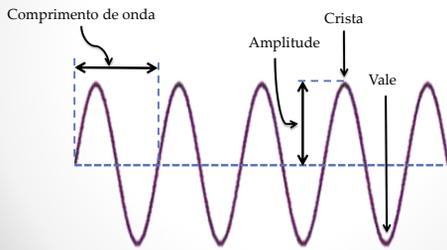
1. Ondas

- Ondas se superpõem.



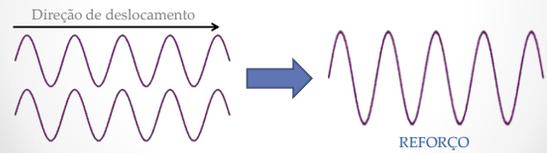
1. Ondas

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

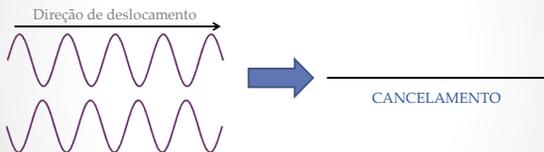


1. Ondas

- 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 partícula + 1 partícula = 2 partículas **SEMPRE**
1 partícula + 1 partícula = 0 partículas **NUNCA**

Primeiro Módulo

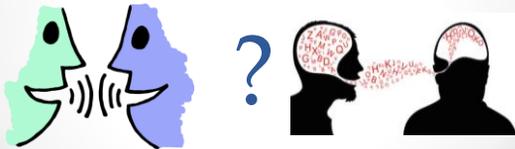
Terceira parte

Som
(onda ou partículas?)

3. Som

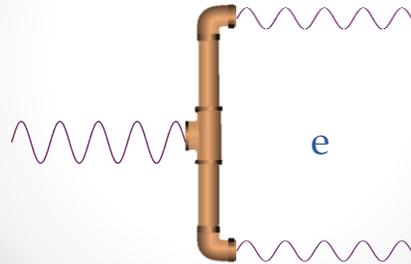
- O que seria o som, então?

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!



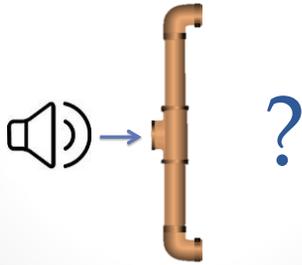
3.1 Divisor de som

- 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?

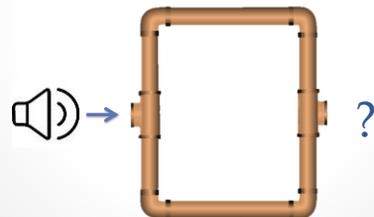


3.2 Interferômetro sonoro

- 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?

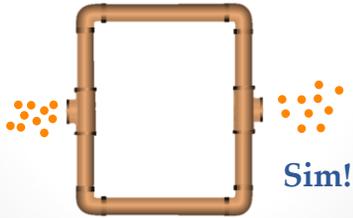
3.2 Interferômetro sonoro

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



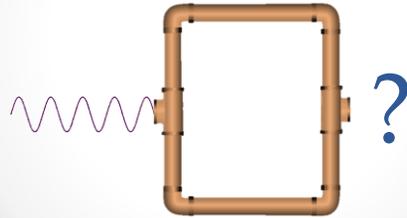
3.2 Interferômetro sonoro

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



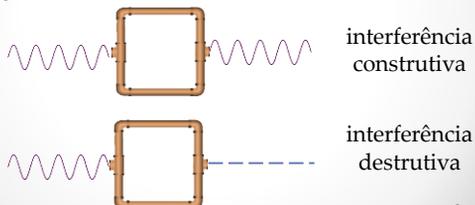
3.2 Interferômetro sonoro

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



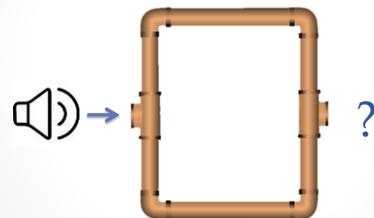
3.2 Interferômetro sonoro

- 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

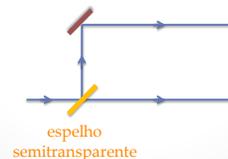
Luz (onda ou partículas?)

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.

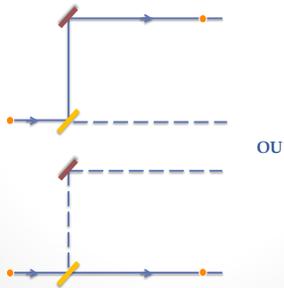
4.1 Divisor de luz

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



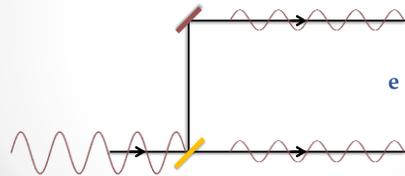
4.1 Divisor de luz

- Caso a luz fosse uma partícula:



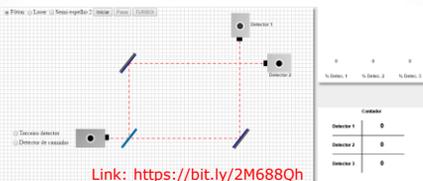
4.1 Divisor de luz

- 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

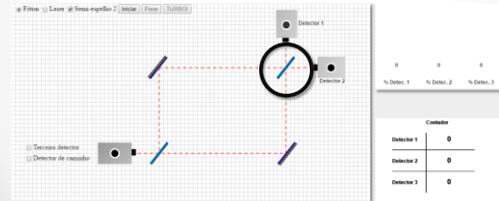
- Vejamos na prática, então...

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.

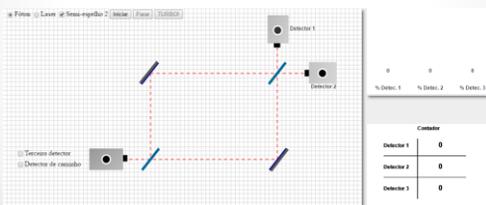
4.2 O interferômetro de luz

- 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...

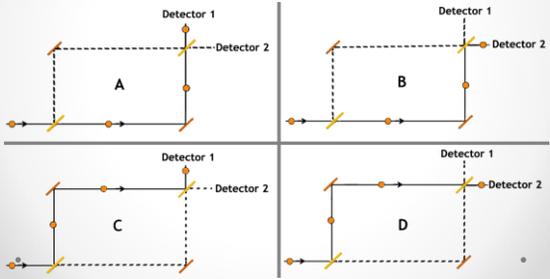


4.2 O interferômetro de luz

- 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:

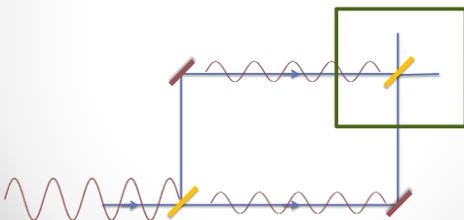


4.2 O interferômetro de luz

- 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.

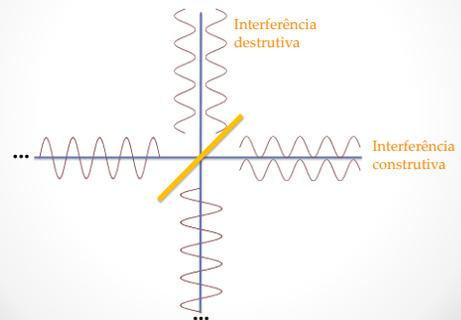
4.2 O interferômetro de luz

- 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?



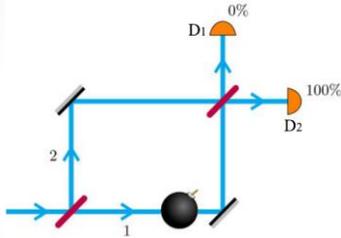
5. A dualidade na “prática”

- Se pensarmos “classicamente”, basta iluminarmos as bombas; dessa forma diferenciaremos as boas das ruins sem muita dificuldade.
- Mas, também não sobrá **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.

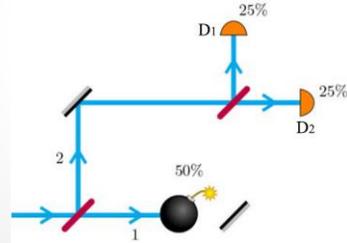
5. A dualidade na “prática”



- 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\$ 49,90
Por: **R\$ 37,90**
em até 1x de R\$ 37,90 sem juros