

Leonardo Bueno | Mayara Palmieri | Walter Mendes Leopoldo

# Fisistória

Guia de Experimentação





# ***FISISTÓRIA: Guia de Experimentação***

**Leonardo Bueno**

Bacharelado em Física pela Universidade de São Paulo

**Mayara Palmieri**

Licencianda em Física pela Universidade de São Paulo

**Walter Mendes Leopoldo**

Licenciando em Física pela Universidade de São Paulo

PRIMEIRA EDIÇÃO  
São Paulo, junho de 2015





Car@ coleg@,

Este Guia de Experimentação tem como objetivo trazer propostas de experimentos que possam ser realizadas de forma concomitante ao desenvolvimento de determinados assuntos tratados em sala de aula.

Os experimentos foram escolhidos atendendo a alguns critérios, como relevância do seu desenvolvimento, praticidade de manuseio em sala de aula e concordância com sua teoria.

Ainda que as atividades estejam contidas neste material em uma sessão distinta, as mesmas são apresentadas de forma completamente dialógica com os textos.

Assim como todo o material, o Guia de Experimentação consiste em sugestões de atividades experimentais a serem trabalhadas ficando sempre a cargo de vocês desenvolver ou não estas propostas.

*Leonardo, Mayara e Walter*



# ***SUMÁRIO***

|   |    |
|---|----|
| <b>Atividade 1</b> – Inventando um Modelo: Experimento da Caixa Preta     | 9  |
| <b>Atividade 2</b> – O Aquecedor Solar: Experiência de Absorção e Emissão | 13 |
| <b>Atividade 3</b> – O Aquecedor Solar: Experiência de Absorção e Emissão | 15 |



# Atividade 1 – Inventando um Modelo

## Experimento da Caixa Preta

A atividade envolvendo a caixa preta pode ser aplicada de distintas formas nos mais diversos temas. O objetivo dessa atividade é instigar o aluno ao tentar propor modelos que descrevam um determinado sistema físico. Os alunos devem ser expostos a um experimento no qual possam observar o comportamento de um sistema, porém seu mecanismo de funcionamento permanece oculto (Caixa Preta) até o momento final da atividade. Um exemplo simples será apresentado no decorrer do texto, mas vale ressaltar as inúmeras aplicações de experimentos como esse.



Ao propor um modelo a respeito do sistema, o aluno remete àquilo que lhe foi ensinado durante a aula teórica regular, faz associação a respeito de seu conhecimento prévio e somente após estruturar seu conhecimento com sua proposta final é levado pelo docente a construção do conhecimento físico que a atividade deseja proporcionar.

### Como fazer?

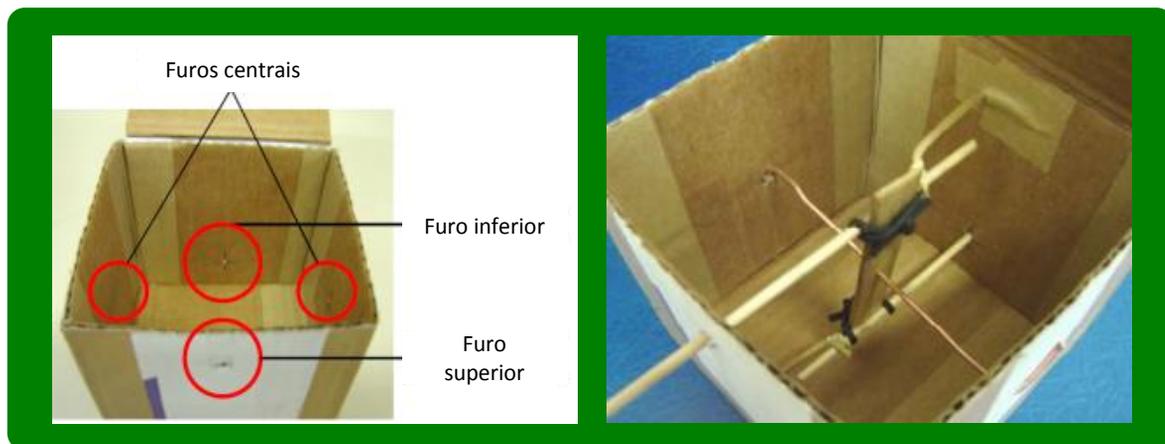


Para confeccionar sua própria caixa preta utilize:

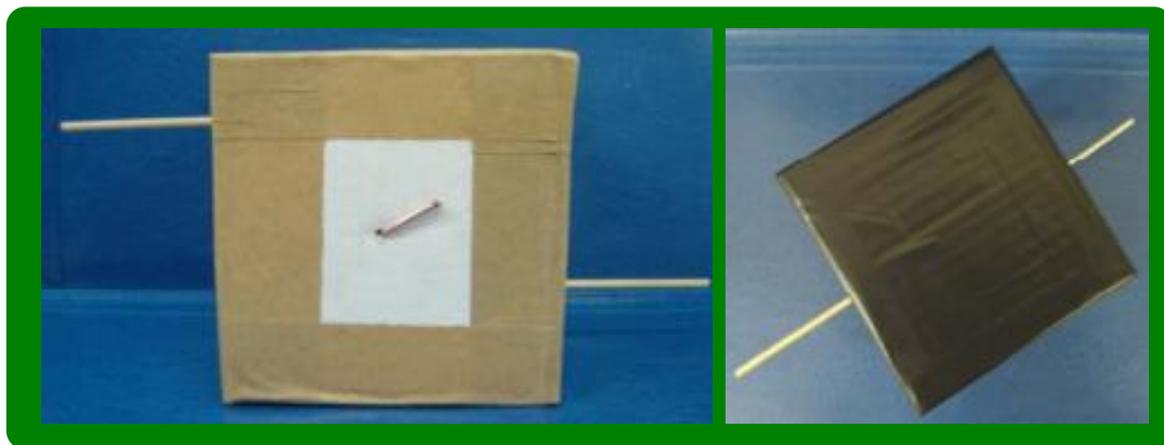
- Uma caixa de papelão pequena;
- Elásticos;
- Dois palitos de churrasco sem as pontas;
- Um palito de sorvete;
- Arame ou fio grosso;
- Fita adesiva;
- Papel ou tinta preta.

Faça um furo no centro do palito de sorvete e corte suas pontas de modo que seu comprimento fique um pouco menor que a altura da caixa. Em seguida, amarre um palito de churrasco em cada ponta do palito de sorvete utilizando um elástico. Corte um pedaço de fio grosso, ou arame, maior que a largura da caixa e passe pelo centro do palito de sorvete.

Faça dois furos na mesma altura em duas laterais opostas da caixa para encaixar o arame. Em outra lateral, faça um furo para o palito de churrasco superior e na lateral oposta um outro furo para o palito inferior. Encaixe o mecanismo dentro da caixa e, utilizando elástico e fita adesiva, prenda a parte menor dos palitos de churrasco nas laterais da caixa.



Agora mova um dos palitos para ver como o outro se comporta. Caso esteja funcionando tudo bem, feche a tampa, cubra sua caixa com papel ou tinta preta.



### Discussões

A atividade em sala de aula começaria com uma proposta de atividade, de modo que os alunos possam criar livremente modelos que descrevam o funcionamento do mecanismo presente na caixa. É importante deixar que os alunos manuseiem a caixa, sem deixar que ela abra ou que em algum momento um dos alunos possa ver o sistema interno a cavidade escura. Nesse momento é interessante iniciar uma discussão com os alunos e deixar que, entre eles, haja discussão a respeito dos modelos propostos. Cada aluno ou grupo de alunos deve então entregar um projeto escrito que explique o funcionamento da caixa, por mais absurdas que as idéias possam parecer.

Uma vez recebidos os projetos, é interessante que o docente discuta com a sala quais as limitações de cada um dos modelos e se são plausíveis ou não. Outra atividade que pode ser aplicada com o mesmo sistema é propor que os alunos construam suas próprias caixas pretas de acordo com seus projetos. Caso algum seja funcional do mesmo modo que o do professor, discutir com os alunos se o fato de o comportamento ser semelhante garante o mesmo sistema de funcionamento da caixa.

Para aprofundar as discussões acerca de modelos na ciência, recomendamos que leia o texto “*O que são Modelos?*” do Núcleo de Pesquisa em Inovação Curricular (NuPIC), disponível em: <http://goo.gl/FiBP6s>

---

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<http://goo.gl/FiBP6s>, acesso em 15 de maio de 2015, às 14:47

<http://goo.gl/qnLyxV>, acesso em 15 de maio de 2015, às 15:30



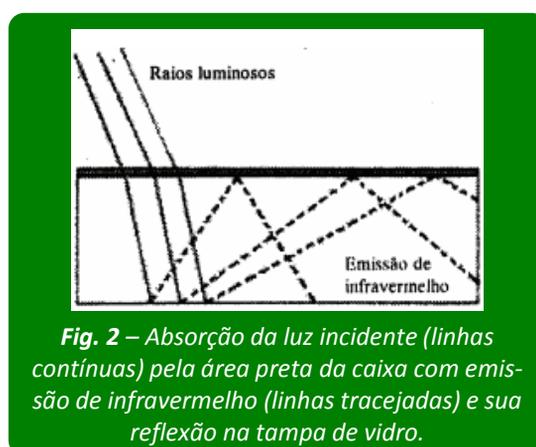
## ***Atividade 2 – A Aquecedor Solar*** **Experimento de Absorção e Emissão**

O experimento a seguir mostra como funciona o aquecimento de água usando energia solar (Figura 1). A caixa de madeira tem uma tampa de vidro, e o seu interior é todo preto. Coloque um termômetro dentro da caixa e ilumine a tampa com uma lâmpada incandescente.

Os raios luminosos, após atravessarem vidro, são absorvidos pelas paredes e pelo fundo da caixa, que por sua vez emitem radiação – a maior contribuição encontra-se na faixa do infravermelho. O vidro reflete praticamente toda a radiação infravermelha, que fica, portanto, “aprisionada” dentro da caixa. Com isso, a temperatura no interior dela aumenta e isto pode ser verificado acompanhando-se a temperatura registrada pelo termômetro. Esse processo é ilustrado na Figura 2. Se, nesse momento, for passada água à temperatura ambiente através de uma serpentina de cobre colocada dentro da caixa, a água esquentará, já que o cobre é um material que permite uma troca eficiente de calor. Basta então armazenar a água aquecida em um reservatório térmico, semelhante a uma garrafa térmica, e está pronto um aquecedor solar.



**Fig. 1** – Esquema de um aquecedor solar simples com vista de cima.



**Fig. 2** – Absorção da luz incidente (linhas contínuas) pela área preta da caixa com emissão de infravermelho (linhas tracejadas) e sua reflexão na tampa de vidro.

Esse mesmo experimento demonstra porque o interior dos carros se torna um “forno” quando eles ficam expostos ao sol com as janelas fechadas e também ilustra o “efeito estufa”. Esse efeito está relacionado com o aquecimento de nosso planeta devido

ao aumento da emissão de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) por veículos motorizados, fábricas e queimadas.

O  $\text{CO}_2$  faz o papel do vidro, de modo que o aumento da sua quantidade na atmosfera implica no aumento da temperatura da Terra (caixa de madeira) devido à incidência de luz solar (lâmpada incandescente).

---

#### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALADARES, E. C. ; MOREIRA, A. M.; *Ensinando Física Moderna para o segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 15, n.2, p. 121-135, 1998. Disponível em: <https://goo.gl/JHCGhS>. Acesso em 12 de junho de 2015, às 15:42

## Atividade 3 – Interferômetro de Mach-Zehnder

Temos como objetivo desta atividade a elaboração do aparato conhecido como interferômetro de Mach-Zehnder (TMZ) é empregado a fim de obter uma releitura mais moderna do experimento de duas fendas de Young, o qual possibilita uma discussão qualitativa a respeito da dualidade partícula-onda. Por ser pouco abordado em livros didáticos, o TMZ é pouco conhecido por profes-

sores do Ensino Médio. A montagem do equipamento não requer muito detalhe, sendo possível a realização do experimento no tempo convencional de uma aula de 50 minutos. Com intuito de auxiliar o professor, também é indicado um software que simula o experimento e pode ser executado em computadores diversos.

A Figura 1 representa esquematicamente o aparato experimental envolvido no TMZ. As componentes são dois divisores de feixe BS1 e BS2 (semi-espelhos), que refletem 50% do feixe e transmitem o restante, dois espelhos de reflexão total M1 e M2, dois detectores e um laser.

Nesse experimento, um feixe de luz oriundo do laser é dividido em dois feixes A e B por meio de um semi-espelho BS1 (cada uma dessas componentes apresenta idealmente 50% da amplitude da radiação original).

Cada componente é então refletida por um espelho (M1 para A e M2 para B) e então subdividida pelo divisor BS2 em duas subcomponentes. Essas, por sua vez, são superpostas antes de atingirem os detectores/anteparos 1 ou 2.

Vamos assumir que cada espelho de reflexão total não altera a intensidade do feixe, mas causa mudança de fase de 180 graus, correspondendo a uma diferença de caminho de metade do comprimento de onda associado àquele feixe. No caso do divisor

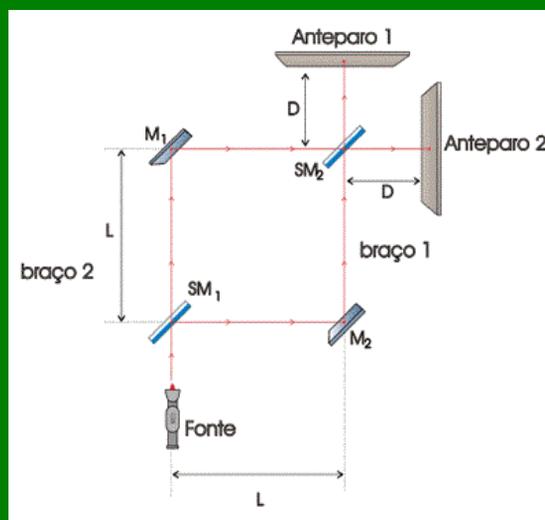
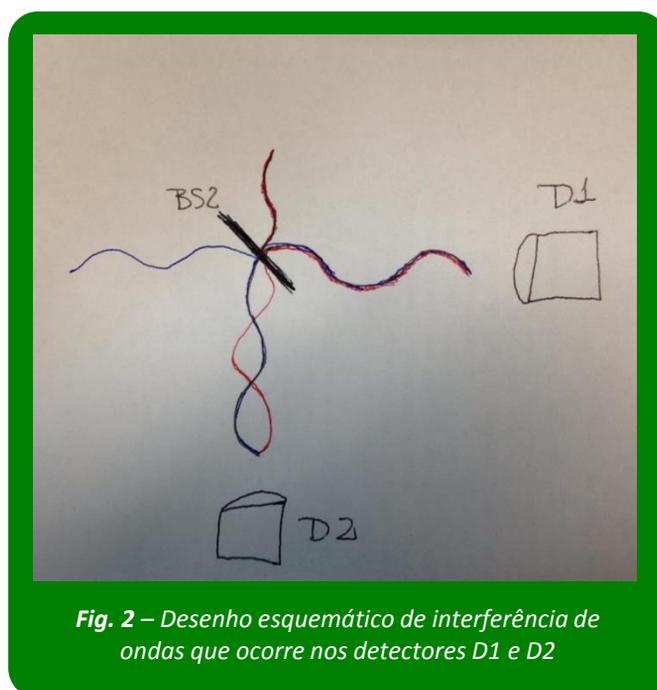


Fig. 1 Esquema de um interferômetro de Mach-Zehnder

de feixes, a mudança de fase induzida é de 90 graus, o que corresponde a uma alteração de um quarto de comprimento de onda na diferença de caminho.

Os feixes de luz que atingem o Anteparo 1 foram ambos refletidos duas vezes (a componente A por M1 e BS2 e a componente B por M2 e BS2), mantendo-se em fase e, portanto, interferindo construtivamente. Já no caso do Anteparo 2, há diferença de fase de 180 graus entre os feixes A (refletido por M1) e B (refletido por BS1, M2 e BS2). Nesse anteparo, as ondas interferem destrutivamente, portanto a intensidade do feixe observada no Anteparo 1 é maior do que no Anteparo 2 (no caso ideal a intensidade observada no primeiro detector é igual a 100% daquela do feixe original, enquanto nada observa-se no segundo anteparo).



*Fig. 2 – Desenho esquemático de interferência de ondas que ocorre nos detectores D1 e D2*

Até o presente momento levamos em consideração a natureza ondulatória da radiação eletromagnética gerada na fonte laser. O mesmo experimento pode também ser analisado do ponto de vista de partículas, onde consideramos o feixe de luz como um conjunto de pacotes (fótons) de energia. Para trabalharmos nesse regime, seria necessário um aparato experimental mais avançado no sentido de detecção e geração do feixe, porém as componentes permanecem as mesmas. Dessa forma, pretendemos tratar aqui da interpretação desse experimento no regime quântico.

Para entendermos como esse experimento funciona no regime da mecânica quântica, precisamos reduzir a intensidade do feixe gerado no laser, além de usar

detetores capazes de integrar e manter a contagem de cada choque individual por um fóton. Os custos empregados para implementação dessa demonstração seriam mais elevados, portanto caso o professor não tenha acesso ao material necessário, pode utilizar um software de livre acesso mencionado na seção **Montagem do Equipamento**.

O comportamento observado para o sistema operando em baixas intensidades é exatamente o mesmo daquele no tratamento ondulatório: todos os fótons incidem no detetor D1, e nenhum em D2! Se pensarmos em termos de trajetórias, podemos nos questionar por qual caminho (A ou B) o fóton rumou. Para contornar essa questão, vamos fazer alguns experimentos mentais:

1) Supondo que o fóton se encontra em **A, e não em B**: podemos apenas remover o semi-espelho S1, de forma que o fóton proveniente da fonte será refletido por M1 e dividido em BS2. Dessa forma, o observado é a detecção do fóton em D1 **ou** D2, com 50% de probabilidade cada. Caso mudemos a trajetória escolhida para o fóton, os mesmos 50% seriam observados em cada detetor.

2) Se o fóton estiver em **A ou em B**, ainda detetariamos fótons em D2, com probabilidade 50%. No entanto, quando tratamos do experimento a partir de uma visão ondulatória, observamos 0% de intensidade em D2! O problema com esse exercício é postular uma trajetória bem definida para os fótons. Sabemos que não podemos medir com total precisão a posição e a velocidade de uma partícula como o fóton e, nesse caso, sabemos qual sua velocidade (razão entre as distâncias envolvidas no aparato e o tempo entre geração e detecção do fóton) e, portanto, temos total incerteza ao determinar sua posição. Algumas discussões podem emergir dessa manobra, sendo algumas discutidas na seção **Discussões acerca da atividade**.

## Montagem do equipamento

Nessa seção tentamos explicar para o professor quais são os materiais necessários para montagem do experimento, com indicações de onde obter os mesmos, sem envolver gastos excessivos. A idéia é também indicar a montagem do aparato experimental, levando em consideração alguns detalhes. Caso o professor julgue necessário

um complemento visual, sugerimos alguns vídeos disponíveis no youtube.com que trazem a montagem do aparato durante uma aula de pós-graduação no Instituto de Física da Universidade de São Paulo em 2012. O link para a primeira parte do vídeo (são seis no total) é: <https://goo.gl/YpNdW3>

## Discussões

Naturalmente a discussão que surge quando analisamos o IMZ diz respeito à maneira como interpretar o experimento. Podemos adotar uma noção ondulatória e resolver a questão de acordo com a observação do padrão de interferência formado nos detetores, ou então pensar em partículas associadas a uma trajetória e, nesse caso, não podemos inferir se a trajetória que o fóton percorreu foi A ou B.

Uma interpretação dada por Osvaldo Pessoa (PESSOA JR, O. 2003) para o postulado de Bohr da **dualidade partícula-onda** é:

*Um sistema quântico ou exhibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.*

Esse mesmo autor trata de quatro maneiras distintas que podemos utilizar para resolver o impasse imposto no IMZ, quando alteramos a forma de medir - passamos de um fenômeno ondulatório para corpuscular:

- i) *Interpretação Ondulatória.* Após atravessar BS1, o pacote de onda associado ao fóton se divide em dois, o que pode ser expresso por uma função de onda do tipo  $\varphi_A + \varphi_B$ . Porém, ao detectar-se o fóton em D1, por exemplo, a probabilidade de detecção em D2 torna-se nula instantaneamente! O estado inicial é reduzido, neste caso, para  $\varphi_B$ . Como, nessa interpretação, o estado corresponde a uma onda de probabilidade “real”, conclui-se que ocorreu um processo de colapso do pacote de onda.
- ii) *Interpretação Corpuscular.* Neste caso a explicação é direta: a partícula seguiu uma das trajetórias possíveis, indo parar em D1 ou D2. Não é preciso falar em colapso.
- iii) *Interpretação Dualista-realista.* Esta visão considera que, após S1, a partícula seguiu uma das trajetórias A ou B, incidindo então no detetor correspondente.

Mas existiria também uma onda associada, que se dividiu em duas partes. A parte não detectada constituiria uma “onda vazia” que não carrega energia e não pode ser detectada. Há quem critique essa proliferação de entidades (as ondas vazias), mas em experimentos simples isso não leva a nenhuma consequência observacional indesejável.

- iv. *Interpretação da complementaridade.* Completada a medição, essa interpretação considera como sendo corpuscular. O fóton pode assim ser considerado uma partícula que seguiu uma trajetória bem definida. Tal inferência com relação à trajetória passada do quantum detectado é conhecida como “retrodição” (seção XI.7 da referência).

As possíveis discussões levantadas a partir da observação do Interferômetro de Mach-Zehnder são inúmeras e vão muito além daquelas discutidas nesse capítulo. Durante o decorrer desse volume, o professor será indicado, por muitas vezes, a retomar a discussão desse experimento e adaptá-lo aos temas que seguem. Além disso, sugerimos que o professor realize uma busca na bibliografia indicada ao final do capítulo para ampliar o número de assuntos que pode abordar com essa mesma atividade.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RICCI, T. F.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; *O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica.* Rev. Bras. Ensino Fís. [online]. 2007, vol.29, n.1, pp. 79-88.

Disponível em: <http://goo.gl/Ugzaog>. Acesso em 06 de junho de 2015, às 17:22

PEREIRA, A. P. de; CAVALCANTI, C. J. H.; PESSOA JR, O.; OSTERMANN, F.; *Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica.* Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 29, p. 831-863, 2012, disponível em <https://goo.gl/u4eLiy>. Acesso em 16 de junho de 2015, às 13:30.

PESSOA JR., O.; *Conceitos de Física Quântica*, vol. 1. São Paulo: Livraria da Física, 2003. v. 1. p. 1-22.