

Exposição de experiências sobre a luz *

Jaime E. Villate

*Departamento de Física
Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto*

Exposição na Biblioteca da FEUP

21 de Abril a 13 de Junho de 2005

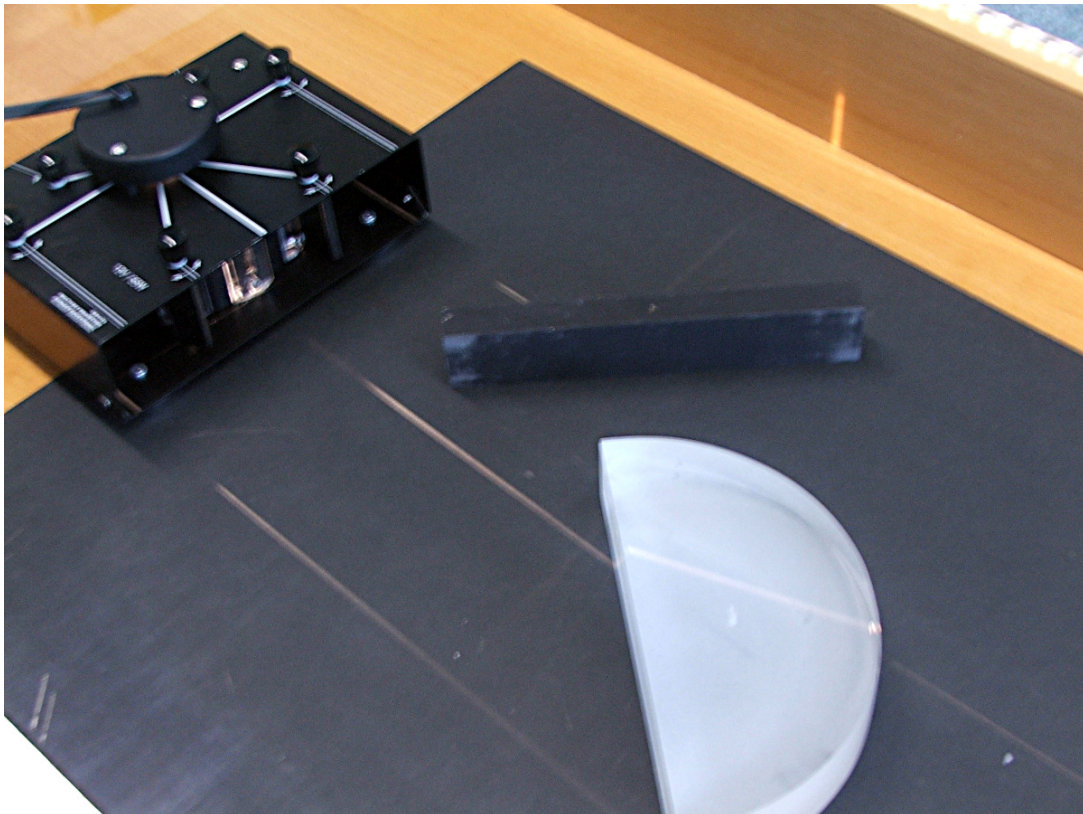


*Este documento é publicado sob os termos da licença [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

A luz é um fenómeno que tem atraído a atenção de vários cientistas ao longo da história. A explicação física da luz deu origem a duas teorias rivais, fonte de animados debates na comunidade científica. Só em 1905 as duas teorias seriam finalmente conciliadas com o trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico, que é um dos acontecimentos comemorados no **Ano Mundial da Física - 2005**.

As experiências na exposição seguem o percurso das teorias da luz, desde Newton (século XVII) até Einstein (século XX).

1 Reflexão e refração da luz



Quando colocamos uma barreira com uma fenda em frente de uma fonte de luz, unicamente os raios de luz que passam pela fonte e pela fenda conseguem ultrapassar a barreira. É assim que se consegue produzir um feixe de luz fino.

Esse facto serve como argumento a favor da **teoria corpuscular da luz**, que admite que a luz é formada por pequenas partículas disparadas em linha reta desde a fonte.

Num espelho plano, um raio de luz é refletido de forma que o os raios incidente e refletido fazem o mesmo ângulo com a perpendicular à superfície. Esse é o comportamento esperado para um sistema de partículas disparadas contra uma superfície rígida.

Na **refração** da luz, a luz passa de um meio para outro diferente. Nesse caso os ângulos que os raios incidente e refratado fazem com a perpendicular à fronteira

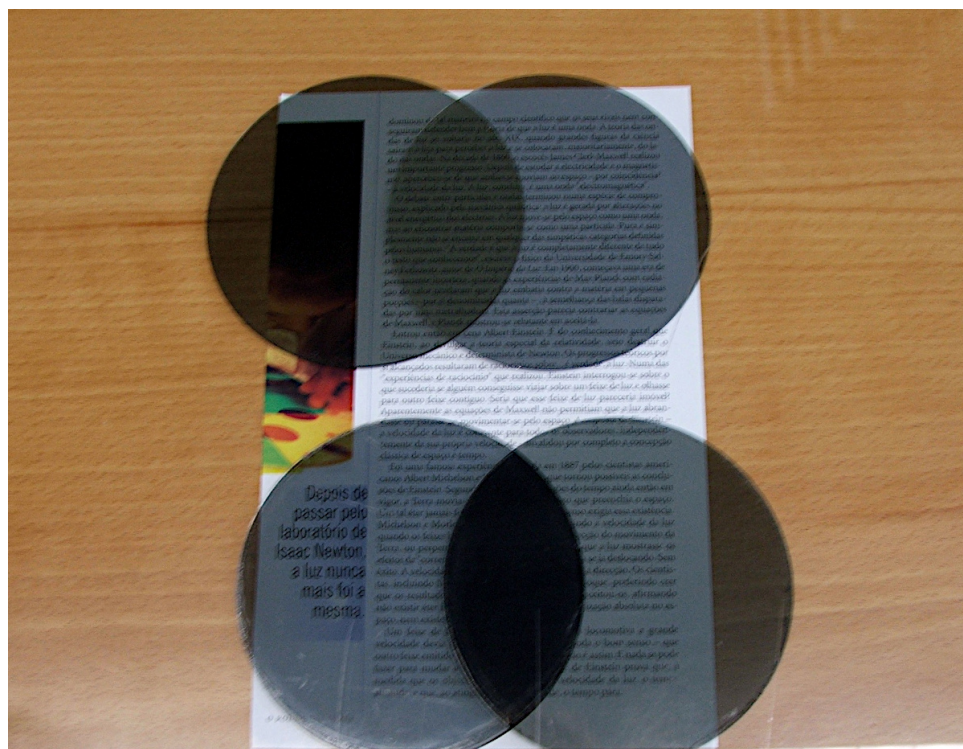
entre os meios já não são iguais. A relação entre esses ângulos depende dos meios. A teoria corpuscular da luz consegue explicar o fenómeno da refração, admitindo que a velocidade da luz nos dois meios é diferente.

A **teoria ondulatória** da luz também consegue explicar a criação de um feixe de luz, embora o argumento não seja tão intuitivo como no caso da teoria corpuscular. As ondas também verificam as leis da reflexão e da refração.

No caso da refração há uma diferença importante entre as previsões das duas teorias. Quando a luz passa do ar para a água, o raio refratado aproxima-se da normal à superfície. Segundo a teoria corpuscular, isso implica uma velocidade da luz maior no vidro do que no ar. Na teoria ondulatória, esse facto implica uma velocidade da luz menor no vidro do que no ar.

Na época de Newton não era fácil medir com precisão a diferença da velocidade da luz no vidro e no ar, e o prestígio de Newton fez com que fosse dada maior credibilidade à teoria corpuscular de Newton do que à teoria ondulatória de Huygens (século XVII). Hoje em dia sabemos que a velocidade da luz no vidro é de facto menor do que no ar, como previsto pela teoria ondulatória.

2 Polarização da luz



A polarização da luz mostra o seu carácter ondulatório. Alguns cristais têm a propriedade de **polarizar** a luz: só deixam passar a parte da onda que oscila num determinado plano. A luz que atravessa um filtro polarizador oscila num único plano.

Se colocarmos um segundo filtro polarizador a seguir ao primeiro, e os planos de polarização dos dois filtros coincidirem, a luz atravessará os dois filtros, ficando polarizada nesse plano. Mas se os planos dos dois filtros forem perpendiculares, nenhuma parte da luz polarizada pelo primeiro filtro conseguirá passar através do segundo (não se conseguirá ver nenhuma imagem através dos filtros).

A luz também é polarizada quando é refletida numa superfície. Se observamos a luz refletida numa superfície através de um filtro polarizador, o reflexo desaparecerá se o plano de polarização do filtro for perpendicular à superfície refletora. Os cristais líquidos podem mudar o seu eixo de polarização quando por eles circula corrente elétrica. Esse é o princípio usado nos ecrans de calculadoras e de telemóveis.

A polarização da luz explica-se facilmente admitindo que a luz é uma **onda transversal** (oscila em planos perpendiculares à direção de propagação).

Mas na época de Newton e Huygens, esse argumento foi usado de facto contra a teoria ondulatória. Segundo Huygens, a luz era uma onda que se propagava num meio (o hipotético **éter**) de forma análoga ao som que se propaga no ar. Mas uma onda que se propague num meio, de forma análoga ao som no ar, deverá ser uma **onda longitudinal** (oscila no sentido da propagação) e não uma onda transversal. Concluía assim Newton que a teoria de Huygens não podia ser válida.

3 Difração da luz



As experiências que usou Fresnel como argumento forte a favor da teoria ondula-

tória (fim do século XVIII e início do século XIX) foram, a **interferência** entre dois raios de luz, quando a luz passa por dois orifícios, e a **difração**.

Quando duas ondas emitidas em dois pontos são sobrepostas, obtém-se um **padrão de interferência**: zonas fixas onde a onda resultante tem sempre um valor máximo ou mínimo. No caso da luz, esses padrões de interferência são observados como riscas claras e escuras.

A difração é a tendência que têm as ondas a se “dobrarem” contornando obstáculos. Nas áreas de contraste entre luz e sombra, numa imagem, aparecem padrões de interferência que são um sinal claro da difração da luz.

Esses dois fenômenos, interferência e difração, são próprios do movimento ondulatório e não acontecem no caso de feixes de partículas. Assim, a interferência e a difração da luz corroboram o seu caráter ondulatório.

4 Interferômetro de Michelson



No fim do século XIX, após o trabalho de Maxwell na teoria eletromagnética, ficou estabelecido que a luz é uma **onda eletromagnética**. Nomeadamente, uma combinação de campos elétrico e magnético variáveis, de forma que a variação de cada um deles induz o outro, produzindo campos que podem perdurar mesmo na ausência de cargas ou correntes elétricas.

Um dos grandes êxitos da teoria eletromagnética de Maxwell foi conseguir reproduzir o valor medido da velocidade da luz, a partir dos valores das constantes elétricas

e magnéticas medidas em experiências de eletromagnetismo.

Mas como os campos elétrico e magnético não são iguais em diferentes referenciais em movimento, a velocidade da luz não podia ser a mesma em todos os referenciais. Também parece óbvio que se nos deslocarmos em relação ao meio em que uma onda se propaga, observaremos uma velocidade de propagação diferente; assim, a velocidade de uma onda é diferente em diferentes referenciais.

Os físicos do século XIX acreditavam na existência de um espaço absoluto (o hipotético éter) onde as leis de Maxwell são válidas. A velocidade constante obtida a partir das equações de Maxwell seria a velocidade de propagação da luz nesse espaço absoluto. A medição da velocidade da luz em diferentes referenciais deveria permitir determinar a **velocidade absoluta** desses referenciais.

Muitas experiências foram feitas, usando luz proveniente das estrelas ou luz produzida por fontes na Terra. Todas essas experiências falhavam na detecção de qualquer modificação da velocidade da luz; não era possível observar diferenças na velocidade da luz quando a fonte e/ou o observador estavam em movimento. Por cada nova experiência que fracassava, aparecia uma nova teoria que admitia que o éter era arrastado parcialmente pela fonte ou pelo observador em movimento. O arraste do éter não parecia seguir nenhuma regra simples que pudesse ser determinada sem ambiguidade, mas parecia apenas um artifício que precisava ser ajustado para cada experiência.

A atividade de investigação intensa nessa área levou Michelson a conceber vários dispositivos experimentais para detectar variações na velocidade da luz num referencial em movimento. A evolução desses dispositivos levou-o ao desenvolvimento do interferómetro designado de Michelson, onde é possível eliminar de forma mais clara qualquer efeito do arraste do éter.

No interferómetro de Michelson, um feixe de luz é separado em dois feixes perpendiculares, por meio de um espelho semitransparente que reflete parte da luz e deixa passar outra parte. Os dois feixes, provenientes da mesma fonte, são refletidos por dois espelhos fazendo com que regressem novamente ao espelho semitransparente, misturando-se novamente para produzir um padrão de interferência que pode ser observado.

A distância percorrida pelos dois feixes pode ser ajustada com precisão. Uma pequena variação no tempo que demora um dos feixes a percorrer o seu percurso, pode ser observada através da deslocação do padrão de interferência. Se a velocidade da luz fosse diferente em diferentes direções (devido ao movimento da Terra), quando se rodasse o interferómetro o padrão de interferência deveria deslocar-se.

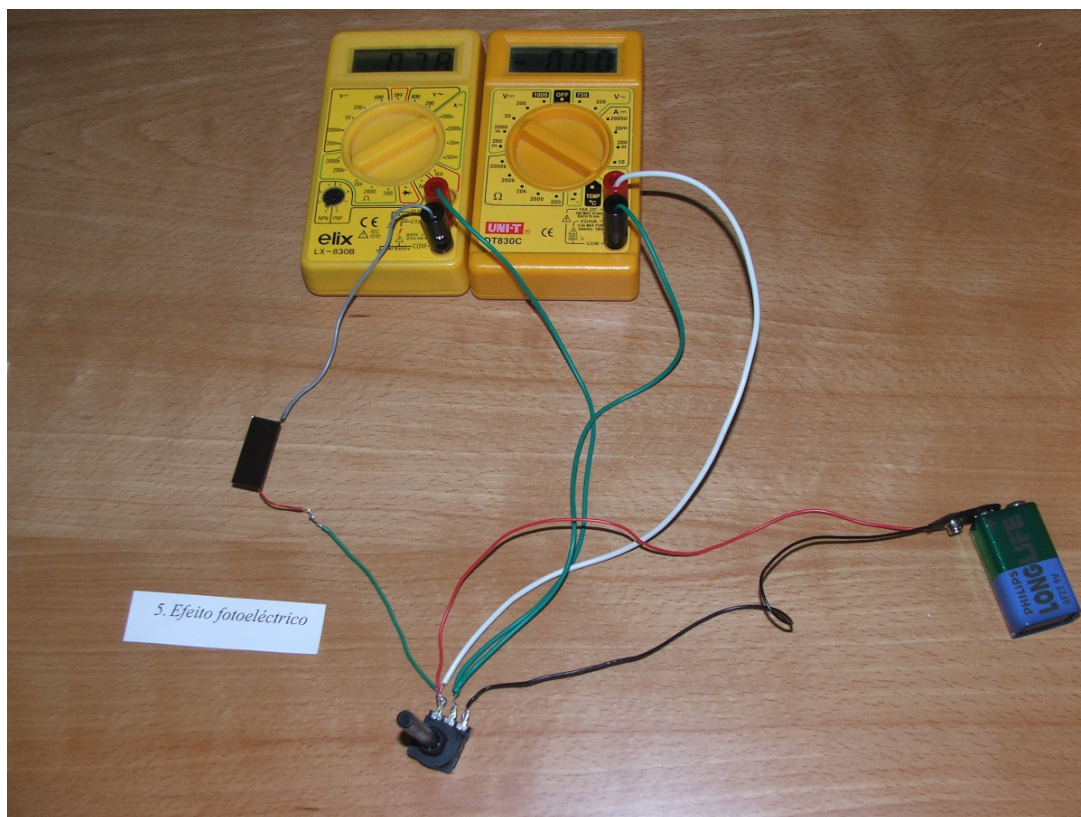
Michelson e Morley realizaram essa experiência sem observar nenhum efeito da translação da Terra na velocidade da luz. O que observaram foi que a velocidade da luz era a mesma em todas as direções. Lorentz explicava esse resultado admitindo uma contração do éter no sentido do movimento da Terra. Mas não foi possível encontrar uma causa e um mecanismo passíveis para essa contração.

Em 1905, Einstein publica a sua **teoria da relatividade**, segundo a qual a velocidade da luz deverá ser igual em qualquer referencial. Uma das consequências desse princípio é que tempo e distância não são grandezas absolutas, como aponta

o nosso sentido comum, mas podem ter valores diferentes para diferentes observadores. Não existe nenhum espaço absoluto nem nenhum éter.

Partindo de apenas dois princípios simples: as leis da física são as mesmas para qualquer observador e a velocidade da luz é constante, Einstein obteve as mesmas equações de Lorentz. Mas a contração da distância e a dilatação do tempo são efeitos relativistas reais, com muitas consequências que já têm sido observadas experimentalmente, e não apenas uma contração do éter como acreditava Lorentz.

5 O efeito fotoelétrico



A teoria da luz de Maxwell, em que a luz é simplesmente uma onda eletromagnética, abria a possibilidade de serem produzidos outros tipos de ondas eletromagnéticas a partir de circuitos elétricos. Hertz, no fim do século XIX, foi a primeira pessoa a ter sucesso nessa área. Durante as suas experiências, Hertz observou que a luz produzida por uma faísca num circuito podia induzir uma corrente elétrica em outros circuitos afastados que usava para detetar as ondas eletromagnéticas.

Uns poucos anos mais tarde, com a descoberta do eletrão por parte de Thomson, ficou claro que o efeito observado por Hertz, designado de **efeito fotoelétrico**, era devido ao escape de alguns eletrões num metal, quando é atingido por luz.

A energia eletromagnética da luz é absorvida pelos eletrões no metal, fazendo com que alguns deles saltem para fora do metal. O problema que ninguém conseguia explicar no início do século XX era porquê a energia dos eletrões libertados por efeito

fotoelétrico não aumenta quando aumenta a intensidade da luz, mas sim aumenta em função da frequência da luz incidente. De facto há uma frequência limiar da luz por baixo da qual não ocorre efeito fotoelétrico.

A energia dos eletrões libertados por efeito fotoelétrico pode ser medida ligando à célula fotoelétrica uma fonte externa, que contrarie a força eletromotriz da célula fotoelétrica, de modo que a corrente no circuito seja nula.

Em 1905, quando já não restavam dúvidas acerca da natureza ondulatória da luz, Einstein publicou um artigo onde explica perfeitamente o efeito fotoelétrico, admitindo que a luz fosse composta por corpúsculos —**fotões**— com energia diretamente proporcional à frequência da luz.

Na teoria dos fotões, a energia que transporta a luz não varia em forma contínua, mas sim de forma discreta; podem ser emitidos 1, 2, 3, etc. fotões, mas não uma fração deles. Essa teoria explicava também o sucesso da hipótese de Planck (1900), quem para poder explicar o espectro de luz produzido por um objeto quente, admitiu que a energia da radiação do objeto só podia ter valores discretos: um **quantum** de energia.

Os trabalhos de Planck e de Einstein dariam origem à **física quântica**. Na física quântica todos os objetos físicos são tanto ondas como partículas (dualidade onda-partícula). A energia passa de um lugar para outro como se fosse uma onda, mas é absorvida ou produzida de forma discreta, como se tratasse de partículas.

Ao final a luz, tal como qualquer tipo de matéria, é tanto onda como partícula. Isso é o que acontece no mundo submicroscópico, mas ao nível macroscópico da nossa experiência quotidiana aparece uma distinção clara entre ondas e partículas.