

A luz em bolas

Todo o grupo de amigos estava reunido na praia. Enquanto alguns conversavam, Ernesto lia atentamente.

- Olha como o Sol está hoje! Quanta luz! – disse Roberto.
- É, mas não vamos ficar aqui. Vamos jogar bola! – disse Gaspar.
- Vamos pegar uma onda! – disse Alberta.
- Bola!
- Onda!

– E você, Ernesto? O que você acha? Bola ou onda?

Ernesto, sem desviar muito do livro que lia concentradamente, disse:

– Segundo o Einstein, ora é uma coisa, ora é outra!

– Acho que você tomou sol demais. O que é isso que você está falando? – perguntou Roberto.

– Da luz! É claro! Estou falando sobre a natureza da luz. É esse texto. É a peça de teatro que vamos fazer para falar sobre a luz. O Einstein achava que a luz pode ser tanto uma partícula como uma onda. Se vocês estiverem interessados, podem me ver na apresentação. A peça é a história de um entrevistador que tinha uma nave que podia caminhar pelo tempo. Então ele reúne cientistas de várias épocas, que falam sobre a luz. Eu vou ser o entrevistador na peça.

– Mas, agora, sou por uma onda!

A velocidade da luz

No dia da apresentação, Ernesto, todo empolgado, está no palco, sentado numa cadeira giratória. Ao redor dele, muitos cientistas sentam-se lado a lado. Ernesto, agindo como entrevistador, inicia uma espécie de debate, dirigindo-se aos cientistas:

Entrevistador – Meus caros senhores, estamos aqui para entender melhor **o que é a luz**. Tentamos reunir todos vocês e contar com a colaboração de cada um, vindos de épocas tão diferentes, para que isso se torne possível. Inicialmente vamos falar sobre a velocidade da luz. Em seguida, discutiremos o que é, realmente, a luz. Se é que isso é possível. Esperemos que esse debate possa trazer luz ao nosso problema. Podemos começar com o senhor Galileu. Por favor, professor, o que o senhor tem a nos dizer sobre a velocidade da luz? Quais as suas pesquisas nesse campo? Quais os resultados? Em seguida, podemos fazer um pequeno debate.



Galileu – Em primeiro lugar, eu gostaria de agradecer o convite que me foi feito. Gostaria também de afirmar que sou o primeiro a responder, mas não fui o primeiro a me preocupar com a velocidade da luz. Creio que os que vão dar seus depoimentos em seguida poderão contribuir mais do que eu.

Bem, o que eu fiz foi o seguinte:

Eu estava interessado em saber a velocidade da luz. Então, uma noite, subi no alto de um morro. Enquanto isso, meu assistente subia um morro um pouco distante (Figura 1). Tanto eu como ele estávamos com lanternas. Nós já sabíamos que a velocidade da luz é maior do que a do som, pois, durante uma tempestade, primeiro vemos o raio e só depois ouvimos o trovão.

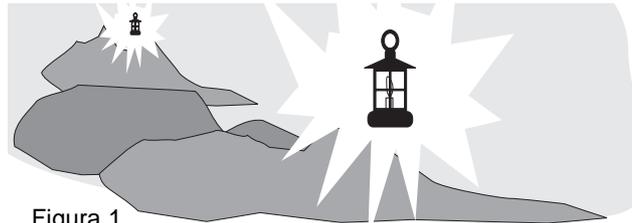


Figura 1

De início, as duas lanternas estavam cobertas. Então, eu descobria a minha e começava a contar o tempo. Quando meu assistente via a luz da minha lanterna, descobria a dele. Quando eu via a luz, marcava o tempo gasto. Descobrimos que a velocidade da luz ou é infinita ou é muito grande, pois ela ia e voltava num tempo quase nulo.

Entrevistador – Alguém quer acrescentar algo, ou fazer alguma questão?

Newton – É com muito orgulho que me dirijo ao senhor Galileu, pois foi ele um dos que contribuíram enormemente para que meu trabalho fosse coroado de êxito. São algumas perguntas simples. Em primeiro lugar, como é que o senhor media os tempos? Depois, eu queria fazer um depoimento e mais uma pergunta. Pelos meus cálculos, a velocidade da luz no ar – pois o senhor estava tentando medir a velocidade da luz no ar – é finita. Ela é muito grande, mas é finita. Porém, eu estou convencido de que a velocidade da luz em outros meios é diferente. Eu creio que na água, que é um meio mais denso, ela é maior ainda. É a mesma coisa que ocorre para o som. Nos metais, o som se propaga mais rapidamente do que no ar. É dessa maneira que podemos explicar a refração. As partículas da água, por exemplo, atraem as partículas da luz que estão andando numa direção, fazendo com que a direção mude (Figura 2). Quanto mais denso o meio, maior o desvio. O que o senhor acha?

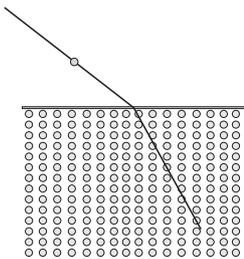


Figura 2

Nesse instante quase começa um tumulto entre os participantes. Todos queriam falar ao mesmo tempo, obrigando o entrevistador a intervir.

Entrevistador – Vamos dar a palavra novamente ao senhor Galileu. Por favor, professor.

Galileu – Meu caro Newton, na minha época, como você sabe, os relógios ainda não estavam bem desenvolvidos e éramos obrigados a marcar o tempo usando algo que conseguisse produzir intervalos de tempos iguais. Eu usei, freqüentemente, as batidas do meu coração. No experimento que eu descrevi, meu coração bateu apenas uma vez entre a ida e a volta da luz. Quanto a medir a velocidade da luz em outros meios, ou pensar a respeito, quero que outros desta sala possam contribuir. Eu vejo que o senhor Fermat está ansioso por falar.

Fermat – Eu quero discordar do senhor Newton. Eu também tenho uma teoria que pode descrever como a luz vai de um ponto a outro. Ela usa o princípio do caminho mínimo. Vou dar um exemplo para aclarar as coisas.

Vamos imaginar um pássaro que esteja sobre um muro numa posição A. Ele quer ir até o chão e voar, em seguida, para um ponto B numa árvore. Qual a trajetória mais curta? Dentre todas as que podemos escolher, a mais curta é aquela na

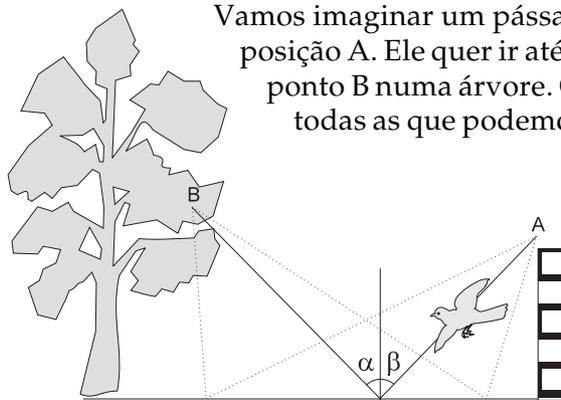


Figura 3

qual os ângulos α e β são iguais. Exatamente como na reflexão. Com a refração acontece a mesma coisa. Ou seja, a luz anda pelos caminhos mais curtos. E mais: na minha opinião, nos meios mais densos a velocidade é **menor** do que no ar.

Mais uma vez os participantes tentam se manifestar ao mesmo tempo, obrigando o entrevistador a intervir.

Entrevistador – Eu gostaria que algum dos participantes mostrasse algum experimento sobre a velocidade da luz. Alguém dos presentes?

Roëmer e Fizeau levantam as mãos.

Entrevistador – Senhor Roëmer, por favor!

Roëmer – Eu estava estudando os eclipses dos satélites de Júpiter. A rotação dos satélites em torno do planeta tem, segundo as leis de Kepler, um período constante. Os satélites, por sua vez, são eclipsados por Júpiter. Essas ocultações, se a velocidade da luz fosse infinita, deveriam ocorrer com um período igual àquele do satélite (Figura 4). Acontece que, quando medi o tempo entre os aparecimentos do satélite S, após ocultações sucessivas, descobri que esses tempos eram maiores quando Júpiter estava mais longe da Terra (em T_2) e menores quando estava mais próximo (em T_1). Conclui que isso era devido ao fato de que a luz deve percorrer ora uma distância maior, ora uma distância menor. Entre o maior valor do período (quando Júpiter estava mais afastado da Terra) e o menor período (quando Júpiter estava mais próximo da Terra) houve uma diferença de 22 segundos. Daí conclui que a luz gasta 22 segundos para atravessar uma distância igual ao diâmetro da órbita da Terra. Assim, pude determinar a velocidade da luz.

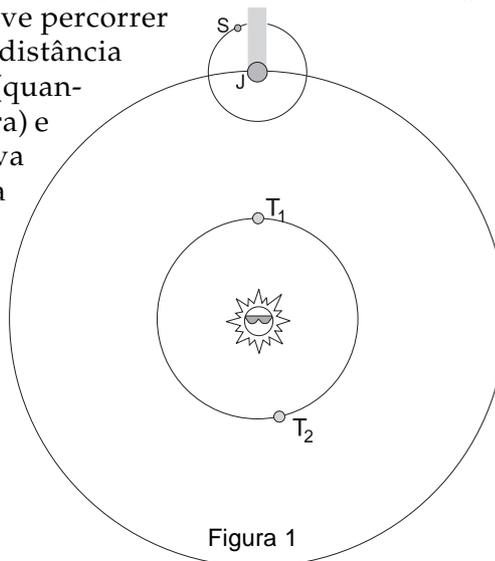


Figura 1

Entrevistador – Obrigado, senhor Roëmer. Vamos agora ver o que o senhor Fizeau tem a nos contar. Senhor Fizeau, por favor.

Fizeau – Na realidade eu fiz algo próximo ao que fez nosso mestre Galileu. Eu também tinha uma fonte de luz e essa luz era mandada de volta por um espelho. Eu também tinha um intervalo entre “luz acesa” e “luz apagada”. Construí uma roda dentada, como se fosse uma engrenagem, e mandava um feixe de luz que passava entre os dentes da roda. Essa luz chegava até um espelho que estava a uma distância de uns 8 km da lâmpada e voltava até a roda (Figura 5).

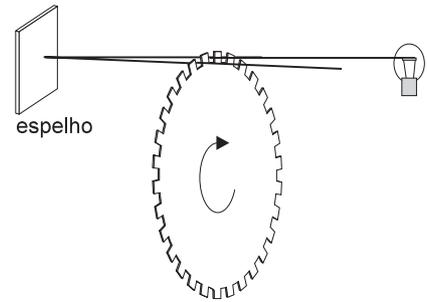


Figura 5

A luz, então, era interrompida de tempos em tempos pelos dentes. Ela passava por um dos espaços entre os dentes, chegava ao espelho, era refletida e voltava à roda dentada. Se a velocidade da roda fosse muito baixa, a luz chegaria até o espelho e passaria ainda pelo mesmo furo. Porém, se a velocidade da roda fosse maior, quando a luz voltasse poderia encontrar um dente. Então, não conseguiríamos ver a luz. Se a velocidade fosse aumentada ainda mais, a luz, agora, poderia passar pelo furo seguinte. Novamente poderíamos ver a luz. Aumentando-se mais uma vez a velocidade, teríamos novo dente interceptando a luz, e assim por diante. Assim, tudo estava determinado. Se eu soubesse qual a velocidade de rotação da roda dentada na qual houve a primeira ocultação da lâmpada (ou a segunda, a terceira etc.), eu poderia calcular a velocidade da luz, pois sabia a distância entre a roda e o espelho. Foi assim que eu procedi.

Entrevistador – Obrigado, senhor Fizeau. Alguém quer fazer algum comentário? Não? Eu gostaria de acrescentar que o método empregado pelo senhor Fizeau foi usado até o princípio deste século (1902) e o valor obtido para a velocidade da luz, dessa maneira, foi:

$$(299.901 \pm 104) \text{ km/s}$$

A natureza da luz

Entrevistador – Vamos agora passar a um ponto um pouco mais polêmico. O que é a luz? Alguém quer iniciar? Senhor Newton? Por favor. O que é, então, a luz para o senhor?

Newton – Como eu já comecei a dizer, creio que a luz é constituída de pequenas partículas que são emitidas pelos corpos. Essas partículas têm tamanho e formas diferentes. Quando vemos, num pedaço de vidro, várias cores, estamos vendo, no fundo, partículas de diferentes tamanhos que causam, aos nossos olhos, as diferentes sensações de cores. Contudo, sei de pessoas como o senhor Huygens, que infelizmente não está presente, que acreditam que a luz seja uma vibração, um fenômeno ondulatório, que a luz é algo que se parece com o som. A essas pessoas eu pergunto: se a luz é uma onda, por que ela anda sempre em linha reta e não contorna os obstáculos? Por que não ocorre o fenômeno da **difração**, por que a luz não contorna os objetos? As ondas no mar contornam as pilastras que estiverem dentro do mesmo. As ondas sonoras também contornam os objetos, ou seja, apresentam o fenômeno da **difração**. Tanto é que conseguimos ouvir o que uma pessoa fala mesmo que entre ela e nós exista um obstáculo. Ao que tudo indica, não temos difração para o caso da luz.

Entrevistador – Mas, senhor Newton, vamos voltar um pouco à sua teoria. Existem cristais que, quando são atravessados pela luz, produzem uma diminuição na intensidade da luz que os atravessa. Se colocarmos um segundo cristal do mesmo tipo num certo ângulo, uma quantidade apreciável de luz vai passar.

Se prosseguirmos girando esse segundo cristal, a intensidade da luz cai quase até zero.

O senhor pode não estar a par, mas atualmente conseguimos fabricar um plástico que tem as mesmas propriedades dos cristais que o senhor conhece. Nós chamamos esses plásticos de **polaróides**. Como o senhor explicaria o comportamento da luz ao atravessar esses cristais ou os nossos polaróides? Como é que as partículas de luz às vezes passam pelo cristal e às vezes, não?

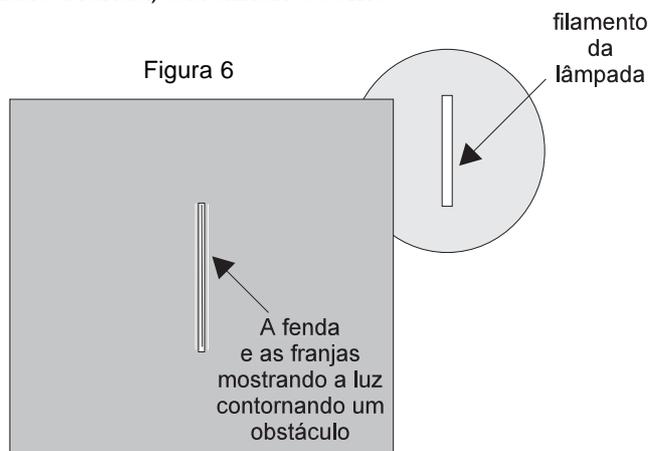
Newton – Já afirmei anteriormente que a luz é formada por partículas de diferentes formas. Talvez elas sejam um pouco achatadas e consigam passar pelo cristal. Ainda não sei ao certo. Mas não é esse argumento que vai me fazer acreditar que a luz seja uma onda. Ainda não vi luz contornando um obstáculo, como fazem as ondas! Quanto às explicações dadas pelo senhor Huygens para o comportamento da luz ao atravessar esses cristais, usando seu modelo ondulatório, creio que não são melhores que as minhas.

Entrevistador – Senhor Newton, alguém pede um aparte. Trata-se do senhor Young. O que o senhor deseja colocar, senhor Young?

Young – Eu gostaria de defender a mesma posição do senhor Huygens, isto é, que a luz é uma onda. Na realidade, eu utilizei os seus princípios para realizar o meu experimento.

Em primeiro lugar, eu gostaria de dizer que é possível constatar que a luz contorna os obstáculos. Podemos mostrar a **difração** da luz. Isso pode ser feito por qualquer pessoa. Se fizermos um corte bem fino numa folha de metal e apontarmos essa fenda para o filamento de uma lâmpada, veremos uma parte clara e, ao lado, umas franjas claras e escuras. Essas franjas mostram que a luz está se desviando de uma trajetória retilínea e contornando a fenda, exatamente como outras ondas fazem.

Entrevistador – Eu quero aproveitar a oportunidade e dizer aos participantes que a folha de metal pode ser o papel de alumínio usado na cozinha. Nele podemos fazer um corte, usando um estilete ou uma lâmina de barbear, e, em seguida dirigir essa fenda para o filamento de uma lâmpada (Figura 6). Se o filamento for reto, os resultados serão melhores. Podemos mesmo usar duas lâminas de barbear, uma ao lado da outra, formando a fenda. Senhor Young, desculpe minha intromissão. Continue, por favor.



Young – Seguindo as idéias de Huygens, eu fiz passar a luz do Sol por um orifício que representei por F na Figura 7.

Como considero que a luz é uma onda, eu representei as partes mais altas da onda, ou seja, as cristas das ondas, por círculos concêntricos. As partes mais baixas da onda, os vales, estão entre os círculos que desenhei.

Logo em seguida, essa luz passava por outros dois orifícios F_1 e F_2 . No primeiro dos orifícios, a luz deve ter sofrido uma difração, uma mudança na sua trajetória. Caso contrário, não conseguiria atingir as fendas F_1 e F_2 . Como explicava o senhor Huygens, a fenda F vai agir como se fosse uma nova fonte mandando luz para todas direções. E essa luz, ao atingir as fendas F_1 e F_2 , fará com que essas fendas se tornem novas fontes, mandando luz em todas direções.

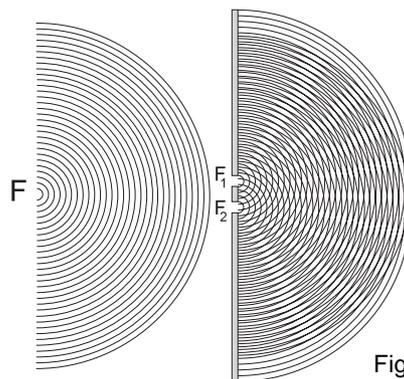


Figura 7

Fiz então novos círculos concêntricos, agora com centro em F_1 e F_2 . E é agora que temos mais uma confirmação de que a luz é uma onda. A luz que sai de F_1 **interfere** com a que sai de F_2 , ou seja, vão existir pontos nos quais a intensidade da luz vai ser aumentada e outros nos quais pode ser até anulada. Nos pontos em que duas cristas se encontram, a intensidade é reforçada, enquanto que, quando uma crista encontra um vale, a intensidade da luz pode até ser anulada.

Se olharmos a Figura 7, colocando-a na altura dos olhos, podemos perceber que existem regiões mais escuras e mais claras. O que se passa na figura é o mesmo que ocorre na realidade. Vão aparecer linhas de interferência. Isto, meu caro Newton, é uma prova de que a luz é uma onda. E as cores são apenas ondas com comprimentos de onda diferentes, não partículas de tamanho diferente, como o senhor afirmou. A luz vermelha tem um grande comprimento de onda, enquanto que na luz violeta o comprimento de onda é pequeno.

Newton – Mas, então, como o senhor explicaria o caso da luz atravessando certos cristais, quando chega até a haver extinção da intensidade luminosa? Eu recordo que o senhor Huygens, que mais uma vez lamento que não esteja presente, não conseguiu, com sua teoria ondulatória, explicar o fato. É verdade que eu mesmo reconheço que a minha teoria não consegue dar conta do recado. O senhor tem algo para nos contar? Sua teoria é diferente daquela do senhor Huygens?

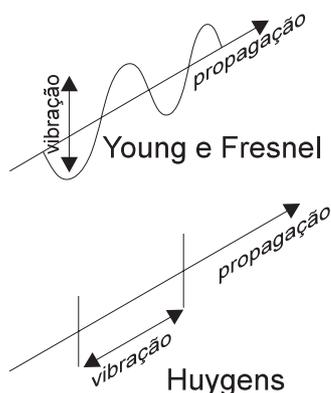


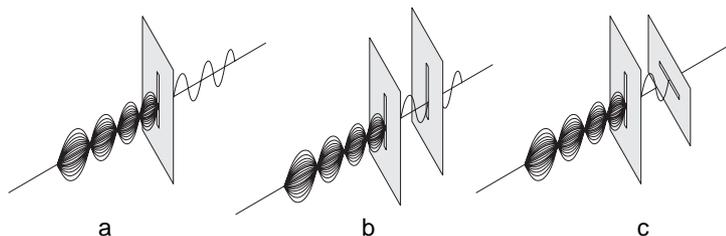
Figura 8

Young – A diferença entre a teoria do senhor Huygens e aquela que desenvolvi com meu grande amigo Fresnel é que, para o senhor Huygens, a luz vibra na mesma direção em que caminha. Exatamente como faz o som. Para nós, a luz vibra numa direção perpendicular àquela em que caminha (Figura 8). Com essa teoria podemos explicar o comportamento da luz nos cristais que o senhor mencionou, ou nos polaróides citado por nosso entrevistador.

Na Figura 9a temos luz incidindo num polaróide. A luz vibra em todas direções. Quando chega ao polaróide, somente a luz que estiver vibrando em certa direção consegue passar (Figura 9b). O polaróide só permite a passagem da luz

que vibra numa certa direção. A luz, ao sair do polaróide, está **polarizada**. Ela está vibrando apenas numa direção. Se outro polaróide for colocado na mesma direção, toda luz passará. Mas, se o polaróide for girado 90° , nenhuma luz conseguirá passar. Isso é, brevemente, o que eu queria dizer.

Figura 9



Entrevistador – Parece que a teoria corpuscular que o senhor Newton tem defendido está perdendo bastante terreno. Ao que parece, a luz é mesmo um fenômeno ondulatório. Existe alguém que queira defender a teoria corpuscular ou acrescentar algo mais à teoria ondulatória? Vejo que o senhor Maxwell quer dar sua opinião.

Maxwell – Eu apenas queria acrescentar que, quando estava estudando ondas eletromagnéticas, descobri que a velocidade delas é igual à velocidade da luz. Meu colega Hertz produziu ondas de rádio que também são ondas eletromagnéticas, que têm também a velocidade da luz. Dessa maneira eu concluí que a luz também é uma onda eletromagnética, como são, por exemplo, as ondas de rádio. Como essas ondas vibram perpendicularmente à direção em que se propagam, eu fico no time do senhor Young.

Nesse momento entram Einstein e o produtor do programa.

Entrevistador – Senhor Einstein, estávamos à sua espera. Gostaríamos de contar com sua participação nos debates.

Einstein – Desculpem-me, mas não resisti. Ao chegar aqui, num tempo que para mim é o futuro, quis ver as coisas que tinham sido produzidas da minha época para cá. Acabei vendo quase toda a discussão pela TV. Quando vi o depoimento do senhor Galileu, imaginei: “Se ele fez tudo aquilo com a cabeça e o coração, imagine se ele tivesse um computador!” Na realidade, até eu fiquei com um pouco de inveja.

Agora eu gostaria de dar o meu depoimento. Talvez os ânimos fiquem menos exaltados.

Na minha época era conhecido o fato de que, quando a luz incide em determinados metais, ela é capaz de arrancar elétrons desses metais. Chamamos esse fenômeno de **efeito fotoelétrico**. Uma coisa que me intrigava era que a energia com a qual os elétrons saíam não dependia da quantidade de luz que caía sobre a placa de metal. Assim, uma lâmpada vermelha muito intensa poderia não conseguir arrancar elétrons do metal, enquanto que uma luz violeta, de baixa intensidade, conseguia. O ponto crucial era, então, o comprimento de onda.

Resolvi então usar o mesmo raciocínio que meu colega Planck tinha usado: o fato de que a energia se manifesta apenas em quantidades que são sempre um múltiplo de uma certa quantidade muito pequena, um pacotinho

de energia. Eu resolvi então usar o mesmo raciocínio para o efeito fotoelétrico e consegui resolver o problema. A energia luminosa também vem em pequenas porções, em pequeno pacotes, os chamados **quantum** de energia. E quem carrega essa energia é uma **partícula** que chamamos de **fóton**.

Mais uma vez os participantes querem se manifestar todos ao mesmo tempo. Newton está radiante com o fato de a luz poder ser uma partícula. Para controlar a situação, o entrevistador intervém.

Entrevistador – Meus caros, vamos deixar o professor acabar sua intervenção. O senhor está afirmando então que, apesar de todas as evidências de que a luz é uma onda, como os fenômenos de interferência etc., a luz é uma partícula?

Einstein – Na realidade, a luz se comporta ora como, partícula ora como onda. Talvez seja essa dupla natureza da luz o que fez com que as discussões hoje fossem tão acaloradas. **Partícula e onda**. Eis o que é a luz!

Entrevistador – Bem, eu gostaria de agradecer a todos participantes por esse debate, que nos mostrou que as explicações na Ciência não são eternas e que discussões como as de hoje podem nos auxiliar a entender a Natureza. Obrigado.



Nesta aula você aprendeu que:

- inicialmente pensava-se que a luz fosse uma partícula;
- mais tarde, a luz foi interpretada como uma onda;
- nos dias de hoje admite-se que a luz tanto pode assumir um caráter ondulatório como pode ser considerada uma onda.
- Mas você aprendeu, principalmente, que as idéias na Ciência são mutáveis, e que não existem certezas eternas.

Exercício 1

Galileu afirmou que usou as batidas do coração para tentar medir a velocidade da luz. Sabendo-se que a luz tem uma velocidade de 300.000 km/s e supondo que o coração de Galileu batesse com uma frequência de 72 batidas por minuto, qual a distância que a luz percorreria entre duas batidas?



Exercício 2

Newton estava equivocado quanto à velocidade da luz nos meios que eram chamados “mais densos”. Atualmente, sabemos que o índice de refração de um meio com relação a outro é a razão das velocidades da luz nesses dois meios. Assim, o índice de refração da água com relação ao ar é definido por:

$$n_{\text{água}} = \frac{\text{velocidade da luz no ar}}{\text{velocidade da luz na água}}$$

Ora, se para Newton a velocidade da luz no ar era menor do que a velocidade da luz na água, o índice de refração da água com relação ao ar era menor que 1. Isso significaria que um raio de luz, ao passar do ar para a água, iria se afastar da normal, o que é experimentalmente incorreto. Será que Newton desconhecia esse fato?