

A NATUREZA DA LUZ

O texto a seguir foi traduzido e adaptado do Livro Optics, de Benjamim Crowell. A versão original, em inglês, está disponível no site: www.lightandmatter.com e pode ser obtida gratuitamente.

A NATUREZA DA LUZ

A relação de causa efeito na visão

Muitas pessoas nunca pensaram cuidadosamente sobre a luz e a visão e mesmo pessoas muito inteligentes que refletiram sobre esse assunto, como os gregos, árabes e chineses, formularam teorias sobre a luz e a visão, quase todas erradas, mas que permaneceram por milhares de anos.

Uma das coisas que os pensadores antigos pensaram corretamente foi a distinção entre objetos que emitem luz e objetos que não o fazem. Quando você avista uma folha em uma árvore, existem coisas diferentes que participam e cumprem sua função; a folha, o olho e o sol. Porém objetos luminosos, como o sol, uma chama ou uma lâmpada, podem ser vistos sem a presença de um terceiro objeto.

Como vemos objetos luminosos? De acordo com o filósofo grego Pitágoras (560 DC), e Empedocles de Acragas(492 DC) quando você olha para um chama, tanto a chama como o seu olho emitem alguma *coisa* misteriosa, que colidem e assim tornam a chama visível. Essa teoria podia ser aplicada também para explicar como vemos objetos não luminosos, como uma folha. A *coisa* misteriosa emitida pelos seus olhos e pela fonte de luz (a vela ou sol), ao colidir estimula a folha a expressar a sua natureza verde, ou sua “verdeza”, permitindo assim que ela seja vista.

Essa teoria traz um certo desconforto, pois sugere que o verde da folha existe apenas para a conveniência do nosso olhar, implicando em um uma precedência humana sobre os fenômenos naturais. Atualmente esperamos que exista uma relação de causa e efeito na visão, no sentido oposto, isto é, com a folha produzindo alguma coisa em nosso olho, ao invés do nosso olho produzir alguma coisa na folha. Mas como explicar tudo? A maneira mais usual de distinguir causa e efeito é determinar o que acontece primeiro, porém o processo de visão acontece tão rapidamente que torna-se difícil determinar a ordem em que as coisas acontecem. Certamente, não existe um intervalo de tempo suficientemente grande entre o momento que você move sua cabeça e o momento em que você vê o mesmo movimento na sua imagem refletida no espelho.

Atualmente dispomos de câmeras fotográficas que fornecem uma prova experimental de que não é preciso que o nosso olho emita alguma coisa para que a folha se torne verde. Uma câmera pode obter uma fotografia de uma folha, e ela terá a cor verde, mesmo que ninguém esteja olhando para ela. O fato da folha ser verde, ou a “verdeza” da folha, independe de ela estar sendo fotografada por uma câmera, observada por uma pessoa ou por um inseto. Isso sugere que a cor é a causa e alguma coisa acontecendo na câmera fotográfica ou no olho é o efeito.

A luz é uma *coisa* que viaja de um ponto para outro.

Um outro ponto que poucas pessoas consideram é se a chama de uma vela afeta o seu olho diretamente ou se ela envia luz que penetra no seu olho. Novamente, a rapidez do efeito torna difícil saber o que realmente está acontecendo. Se alguém atira uma pedra em você, você é capaz de perceber a pedra na sua trajetória até atingir o seu corpo. Ao invés de ser atingido diretamente pelo braço da pessoa que atirou a pedra, a pedra atinge seu corpo, em uma ação à distância. No caso da luz, não é tão fácil identificar se a chama atinge diretamente seu olho ou se existe alguma coisa saindo da vela e indo em direção ao seu olho, em uma ação à distância.

A Física Newtoniana inclui tanto ações por contato, como a força de atrito e a força normal, como ações à distância, como a força gravitacional que faz com corpos caiam atraídos pela Terra, ou que os planetas se movam através do espaço devido a interação com o Sol.

No caso da luz, uma evidência de que a chama da vela emite uma coisa que chega ao seu olho, e que se trata de uma ação à distância, é que a posição aparente da vela pode ser alterada se substâncias transparentes são colocadas entre seu olho e a vela. Esse resultado sugere que essa *coisa* pode ter seu percurso desviado.

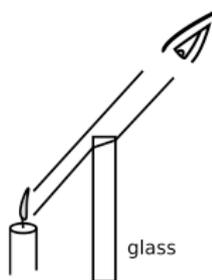


Figura 1: A inserção do vidro entre o olho e a vela causa um deslocamento na posição aparente da vela. Esse mesmo efeito se observa quando um copo de água é introduzido entre a vela e o olho.

Uma maneira mais convincente de decidir se a vela age diretamente sobre a visão ou à distância é determinar o tempo necessário para que a *coisa* emitida pela vela atinja seu olho. Na física newtoniana, considera-se que a ação à distância ocorre instantaneamente, ou seja com velocidade infinita. Pode-se tentar determinar a velocidade da luz, se ela existe, e isso foi tentado por Galileo. O seu experimento consistia em colocar duas pessoas muito afastadas, cada uma com uma lanterna. A primeira pessoa descobre a sua lanterna e quando a segunda recebe o sinal, descobre também a sua lanterna e assim por diante, marcando-se o tempo entre o envio do sinal e o recebimento do sinal. Galileo não obteve sucesso nesse experimento, pois o intervalo de tempo entre esses eventos é muito pequeno comparado com as limitações dos reflexos humanos.

A primeira pessoa a demonstrar que a velocidade da luz é finita e fornecer um valor estimado, foi Ole Roemer, em uma série de medidas por volta do ano de 1675. Roemer observou Io, uma das luas

de Júpiter, durante vários anos. Cada volta de Io em torno de Júpiter leva sempre o mesmo tempo, portanto o período da sua órbita pode ser considerado como um marcador de tempo, um relógio preciso e distante. Usando um pêndulo, Roemer passou a medir o tempo de duração de um ciclo de Io, em torno de 42,5 horas, visto da Terra, com o objetivo de verificar se este permanecia constante ou mudava um pouco, dependendo da distância entre os planetas.

Supondo que a velocidade da luz seja finita, o ciclo de Io pareceria ser menor quando a Terra estivesse mais próximo de Júpiter, e pareceria maior quando os planetas estivessem mais afastados. Com essa estratégia Roemer encontrou uma variação na velocidade orbital aparente de Io, e percebeu que as eclipses de Io (o momento em que Io passa pela frente ou por trás de Júpiter, visto da Terra), sofriam um atraso de 7 minutos quando a Terra estava mais afastada de Júpiter e uma antecipação de 7 minutos quando os planetas estavam mais próximos.

Baseado em suas medidas, Roemer estimou que a velocidade da luz seria de 2×10^8 m/s. A incerteza no valor estimado deve-se, em parte, à incerteza no valor médio do raio da órbita da Terra, além da imprecisão na determinação de intervalos de tempo usando pêndulos.

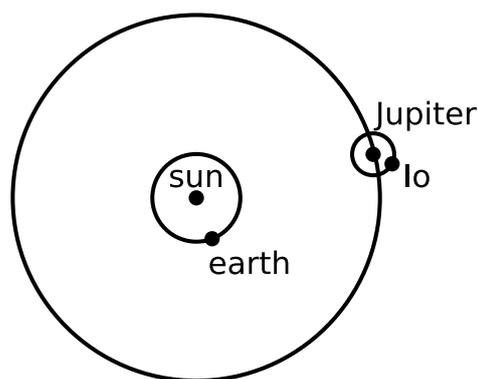
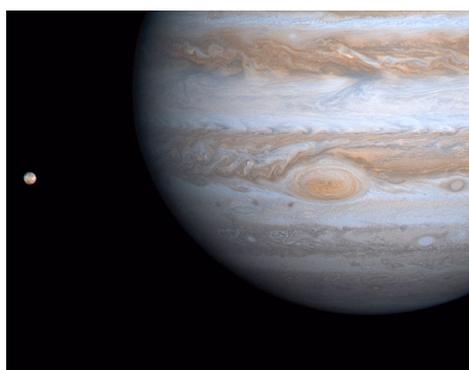


Figura 2: (a) Imagem da lua de Júpiter Io. (b) Representação esquemática da Terra se movendo em direção à Júpiter e Io. Quando a distância entre os planeta está diminuindo a luz partindo de Io leva menos tempo para atingir a Terra, e ela parecerá mais rápida. Seis meses mais tarde, a Terra estará se afastando de Júpiter, a Terra estará do lado oposto do Sol, e o movimento de Io em torno de Júpiter parecerá mais lento.

A Luz pode viajar no vácuo

A luz e o som guardam muitas semelhanças entre si. Por exemplo, a luz e o som são tipicamente emitidos em todas as direções, e a propagação de ambos envolve fenômenos ondulatórios. O som produz oscilações na pressão do ar (ou do meio pelo qual ele se propaga), e

por isso é necessário a presença de partículas de ar ou de um meio material que oscilam com a passagem do som. A diferença fundamental entre a luz e o som é que a luz pode ser propagar no vácuo, desde o Sol até a Terra, por exemplo, por meio de oscilações do campo eletromagnético. Sem dúvida, as velocidades de propagação do som e da luz são muito grandes comparadas com um automóvel, um trem, ou um avião, porém a velocidade da luz é tão grande que nos parece infinita.

Questões para discussão:

1. Se você observa um relâmpago e um trovão, você pode dizer a que distância eles foram produzidos? Para isso quais são suas hipóteses?
2. Sugira maneiras pela qual poderia se testar se fenômenos como raios X ou raios cósmicos são formas de luz.
3. Por que Roemer precisava conhecer apenas o raio da órbita da Terra e não o de Júpiter no seu método para determinar a velocidade da luz?

A INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA

Absorção da luz

A razão pela qual você sente o sol aquecendo sua pele é que a luz do sol é absorvida e a energia da luz está sendo transformada em calor. O mesmo acontece com a luz de algumas lâmpadas, como as lâmpadas de filamento, por exemplo, que produzem aquecimento do ar ao seu redor. Esse processo de aquecimento por absorção é completamente diferente do processo de aquecimento por condução, que acontece quando encostamos em um objeto aquecido. O calor só pode ser conduzido através da matéria, e acontece sempre no sentido de transferir calor do corpo mais quente para o corpo mais frio. O processo de aquecimento por absorção, entretanto, pode produzir aquecimento em um corpo que já está quente, elevando ainda mais sua temperatura. Uma lâmpada de filamento pode produzir aquecimento em um corpo, mesmo quando a temperatura do corpo é superior a do bulbo da lâmpada.

Como enxergamos objetos não luminosos

Nem toda a energia da luz que atinge um objeto é absorvida e transformada em calor. Uma parte da energia é refletida e isso nos leva à questão de como é possível enxergar objetos que não emitem luz. De modo geral, ao serem perguntadas como enxergamos uma lâmpada a maioria das pessoas responde que o bulbo da lâmpada emite luz e que essa luz atinge nossos olhos. Porém, se a pergunta for, como enxergamos um livro que não emite luz, a maioria das pessoas dirá que, para basta iluminar o ambiente onde está o objeto e isso permita que ela veja o livro. Não há menção à luz entrando nos seus olhos.

A maioria das pessoas não concordaria se você dissesse a ela que a luz da lâmpada ou do sol, iluminando o ambiente foi refletida pelo objeto até os seus olhos, porque em geral o conceito de reflexão está associado à espelhos, e o livro não é um espelho. A reflexão está, de modo geral, associada à formação de uma imagem refletida, o que não acontece quando olhamos para o livro, ou para um pedaço de papel.

Imagine que você está vendo sua imagem refletida em uma superfície de águas calmas. Você consegue ver uma imagem perfeita do seu rosto, e dos objetos ao seu redor. Agora se um vento leve agita a superfície da água, essa imagem começa a ficar trêmula, e não é mais possível definir detalhes, mas talvez o seu cérebro ainda é capaz de reconstruir a imagem do seu rosto, um pouco em pedaços, como em quadro de Picasso. Se o vento torna-se muito forte, e superfície da água fica muito enrugada, já não será mais possível reconhecer uma imagem, e ao invés disso seu cérebro diz que você está olhando para a superfície de água enrugada.

A reflexão que ocorre em um espelho ou na superfície lisa da água é chamada de reflexão especular, enquanto a reflexão que acontece na superfície da água agitada pelo vento é chamada de reflexão difusa. Esses dois efeitos são ilustrados na figura 3. A reflexão especular nos permite ver a imagem do objeto refletido por uma superfície e a reflexão difusa é o que nos permite enxergar objetos que não emitem luz. As linhas retas com setas representam os raios de luz e o sentido em que eles viajam.

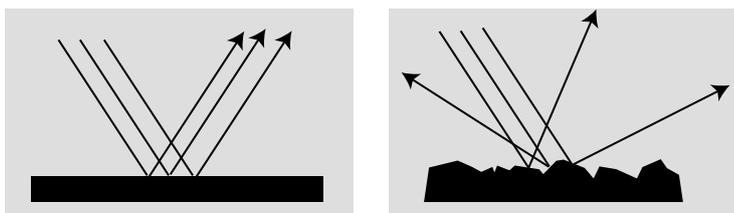


Figura 3: Reflexão especular em uma superfície bem polida e lisa (à esquerda) e reflexão difusa que ocorre em uma superfície irregular ou rugosa (à direita).

Quando você se senta para ler um livro, é a luz do sol, que entra pela janela, ou que vem de uma lâmpada no teto que ilumina o livro, e a luz refletida de maneira difusa pelo livro alcança seu olho. Isso é possível mesmo em um dia nublado, ou se a lâmpada não estiver dirigida diretamente para o livro. As diferenças entre o branco, os vários tons de cinza e o preto dependem da porcentagem de luz que é absorvida pelo objeto e da porcentagem de luz que ele reflete.

Medidas numéricas da intensidade luminosa

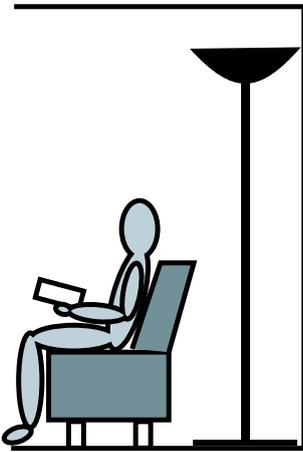
A intensidade do som, assim como a da luz está ligada à energia transportada pelo som, ou pela luz, por unidade de tempo e por unidade de área, e em unidades do Sistema Internacional é expressa em W/m^2 . A nossa sensação fisiológica para a intensidade do som não é linear, isto é, se existem três fontes sonoras, A, B e C, com intensidade de $1 nW/m^2$, $10 nW/m^2$, e $100 nW/m^2$, respectivamente, nós temos a sensação que o aumento de B para C é o mesmo que de A para B, e não 10 vezes maior. O nosso ouvido tem uma sensação que é proporcional ao logaritmo da intensidade, e a escala mais conveniente para descrever a intensidade do som é o Bell, (ou decibell, que é um Bell dividido por 10). A nossa sensação fisiológica para a intensidade de luz também é logarítmica. Essa é uma grande vantagem, pois os nossos ouvidos e nossos olhos são sensíveis a uma larga escala de intensidade de sinal.

Questões para discussão:

1. Em um quarto com as janelas fechadas existe uma pequena fresta que permite a passagem de luz que ilumina uma certa área no piso. Em algumas situações é possível distinguir o feixe de luz que

atravessa a fresta até o chão. O que é necessário para que isso aconteça? Explique suas hipóteses.

2. Em filmes de ficção científica, uma espaçonave no espaço envia feixes de laser em direção a outra nave inimiga e os feixes são mostrados, como linhas brilhantes cruzando o espaço. Por que isso não está correto cientificamente?



3. Na figura ao lado um homem está sentado em uma poltrona lendo um livro. A iluminação do ambiente é feita por uma lâmpada dirigida para o teto da sala. Represente graficamente como é possível que o homem enxergue as páginas do livro, uma vez que o livro não é um objeto luminoso.

MODELOS DE LUZ

Já usamos uma representação de raios de luz como linhas retas, o que parece natural uma vez que sabemos que a luz se propaga pelo espaço a partir de uma fonte luminosa, e que pode ser desviado pela reflexão em superfícies lisas ou irregulares, como mostrado na figura 3. Essa é um modelo simples para representar a luz, mas não é o único. A luz é na verdade uma onda eletromagnética, que se propaga pelo espaço, mas em algumas situações, podemos representar essa onda como se propagando na direção dos raios, que são as linhas retas. Algumas propriedades da luz, tais como refração e reflexão podem ser tratadas de maneira simples utilizando esse modelo, que é chamado de modelo de raio. Outras propriedades, entretanto, como as diferentes cores da luz, a difração, e a interferência requerem que a luz seja tratada como uma onda.

Quando estudamos a interação da luz com as partículas que formam a matéria; isto é com os átomos e com as partículas que formam o átomo, é necessária uma abordagem completamente nova. A luz passa a ser tratada como constituída de partículas, que transportam energia e se comportam de acordo com as leis da mecânica quântica.

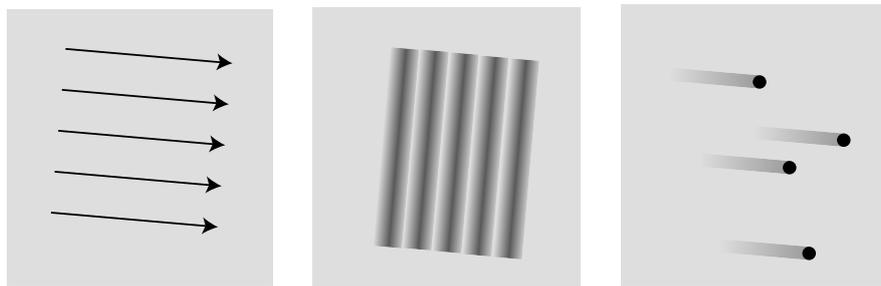


Figura 4: Para descrever a luz podemos utilizar três modelos diferentes. À esquerda, o modelo de raios de luz, ao centro o modelo de onda, com as frentes de onda representadas por linhas retas, e com direção de propagação perpendicular a essas linhas. No terceiro modelo, á direita, a luz é representada por partículas que transportam energia.

O modelo de raio de luz, é genérico, e será usado para descrever os fenômenos de reflexão e refração, em um contexto, onde estamos interessados em descrever o caminho da luz, os desvios que podem ocorrer ao atingir uma superfície ou passar de um meio para outro. O modelo ondulatório será utilizado para descrever os fenômenos de difração e interferência, e em alguns casos combinamos os dois modelos. O limite entre eles parece muito tênue, e é verdade, que quando a luz passa pela abertura de uma câmera fotográfica ou encontra um obstáculo com dimensões maiores que o comprimento de onda da luz, os efeitos de difração e interferência estão presentes, mas são tão pequenos que podem ser

desprezados, e o modelo de raios é mais útil. Quando a dimensão dos obstáculos ou aberturas presentes no caminho da luz tiverem dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz, ou seja, dimensões da ordem de poucos micrometros, (10^{-6} m) esses efeitos, tornam-se apreciáveis e para entendê-los é preciso invocar as propriedades de ondas, juntamente com o modelo de raios.

Na escala atômica, ou seja, dimensões de nanômetros (10^{-9} m), são necessários os modelos de partícula e o modelo de onda para descrever os efeitos que se observam quando a luz interage com as partículas que formam o átomo. Esse tratamento pode parecer incompatível, afinal a luz é uma onda ou uma partícula? É as duas coisas ao mesmo tempo, e para descrever o comportamento dessas partículas é necessário uma nova teoria.

Diagrama de raios de luz

Mesmo sem saber exatamente como usar o modelo de raios para calcular numericamente alguma coisa, podemos utilizá-lo para entender como se forma a sombra de uma árvore, ou a imagem de um objeto visto por uma lupa, ou como enxergamos um peixe sob a superfície da água. Essas situações são ilustradas abaixo, na figura 5.

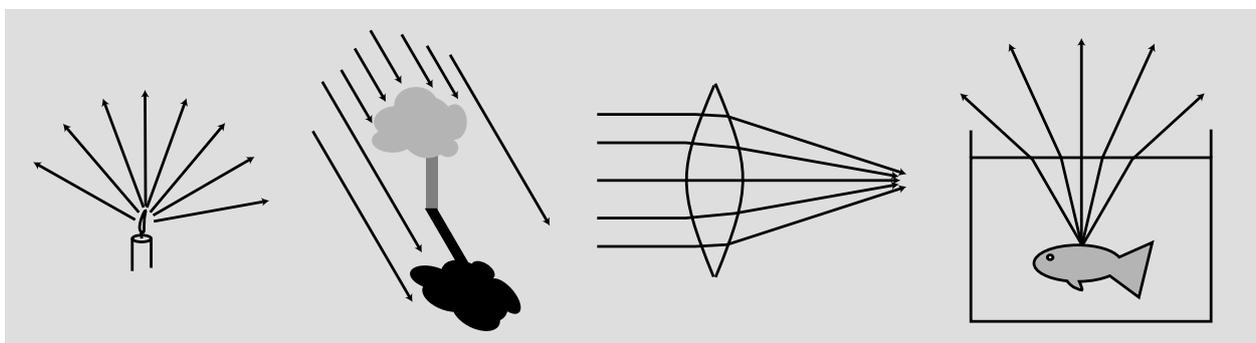


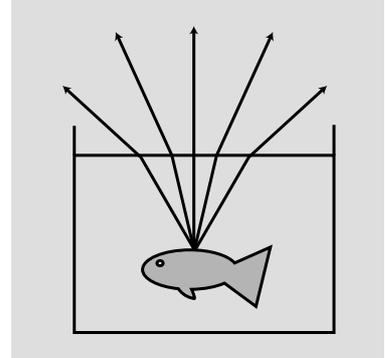
Figura 5: Alguns diagramas de raios.

Os raios partindo do peixe, não significam que o peixe emita luz, mas representam raios de luz, que atingem o peixe e que são refletidos pela superfície do peixe e partem em direção ao nosso olho, sofrendo um desvio ao mudarem da água para o ar. Um feixe de luz não está restrito ao número finito de linhas retas desenhadas representando os raios de luz, no entanto, escolhemos um número finito para representá-los, partindo de um mesmo ponto do objeto, e divergindo. Os raios refletidos na superfície do peixe, em um mesmo ponto, podem partir em diferentes direções, pois a direção em que são refletidos, depende da direção do raio que partiu da fonte luminosa e atingiu o peixe.

É preciso um certo cuidado para não encarar os raios de luz como objetos, como por exemplo, dizer que os raios se quebram quando passam de um meio para outro. Os raios de luz são apenas uma representação do caminho percorrido pela luz, e não uma entidade física, que pode ser torcida ou quebrada.

Questões para discussão

1. No diagrama ao lado determine a posição aparente do peixe.

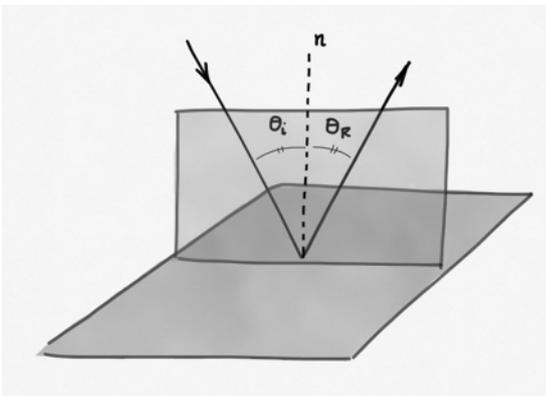


Geometria da reflexão especular

Para mudar a direção de movimento de um objeto material, pode-se aplicar uma força. Será que existe alguma maneira de exercer uma força sobre um feixe de luz? Os experimentos mostram que campos elétricos e magnéticos não conseguem defletir um feixe de luz, portanto, aparentemente, a luz não possui carga elétrica. A luz também não possui massa, e até o século 20, acreditava-se que não poderia ser desviada por campos gravitacionais, porém isso mudou com as previsões de Einstein, e observações posteriores mostraram que, de fato, campos gravitacionais intensos podem mudar trajetória da luz. Mas existe uma maneira mais simples de mudar a direção de propagação de luz, e isso acontece quando a luz atravessa lentes ou é refletida por espelhos.

O mecanismo físico envolvido na reflexão da luz na superfície de um espelho ou de uma superfície metálica é extremamente complexo. O campos elétrico e o campo magnético que formam a onda luminosa aceleram os elétrons na superfície do espelho. A energia luminosa é momentaneamente transformada em energia cinética extra do elétrons, que como são acelerados, logo passam a irradiar luz, convertendo essa energia cinética extra em energia luminosa. Esse processo poderia ser caótico, mas surpreendentemente, os elétrons movem-sem juntos para produzir um novo feixe de luz refletido, que segue algumas regras simples:

- i. o ângulo de reflexão é o mesmo do raio incidente,
- ii. o raio refletido está no mesmo plano contendo o raio incidente e a normal à superfície. Esse plano é chamado de plano de incidência.



Os ângulos de incidência θ_i e de reflexão θ_r são medidos a partir da normal, que é a linha perpendicular (\mathbf{n}) à superfície no ponto onde o raio incide, como mostrado na figura 6. A reflexão ocorre apenas na interface entre dois meios, e pode ocorrer também na interface com um meio menos denso. De fato, se você está mergulhando, ao olhar para a superfície da água logo acima, você poderá ver sua imagem refletida.

Figura 6: Geometria da Reflexão especular

Reversibilidade dos raios de luz

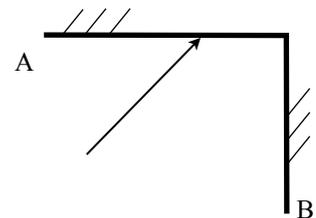
O fato de que a reflexão especular ocorre com ângulos iguais de incidência e reflexão mostra que existe uma simetria e o sentido do raio pode ser invertido. Esse não é um detalhe de menor

importância, mas uma manifestação de uma propriedade muito importante de leis físicas que não distinguem passado e futuro. As trajetórias dos planetas ou de partículas são completamente reversíveis. Esse tipo de simetria, chamada simetria temporal, é característica de qualquer processo que não envolva calor. Os planetas, por exemplo, movem-se no espaço vazio e não estão sujeitos á atrito, portanto não existe dissipação de calor. Por outro lado, um livro deslizando em uma superfície está sujeito a atrito, e o seu movimento cessa quando sua energia cinética inicial é convertida em calor. Esse processo não pode ser revertido, isto é, não se observa o livro espontaneamente perdendo calor para transformar essa energia térmica em energia cinética.

Na reflexão a luz obedece a simetria temporal, porém isso não se verifica no processo de absorção. A luz do sol absorvida pela sua pele produz calor, porém você não passa a brilhar, retirando calor do seu corpo para transformar em energia luminosa. A pele das pessoas emite luz infravermelho, o que não significa que o processo seja reversível. Mesmo absorvendo luz no infravermelho, uma pessoa não passa a brilhar emitindo luz no espectro visível. Essa falta de simetria temporal relacionada a processos envolvendo calor, estão relacionadas às leis da Termodinâmica.

Questões para discussão

1. Se um vetor velocidade de um raio de luz tem componentes c_x e c_y , o que acontece com o raio refletido por uma superfície que está ao longo do eixo y .
2. No diagrama ao lado, o que acontece com o vetor velocidade do raio de luz que atinge a superfície de um espelho, A e depois o espelho B?



O princípio do menor tempo para reflexão

Apresentamos acima uma explicação para a reflexão, sofisticada no nível atômico e uma descrição geométrica que não é suportada por leis fundamentais. Há ainda uma terceira abordagem para descrever a interação da luz com a matéria, que é bastante profunda e elegante, bastante enfatizada pelo físico Richard Feynman, que é conhecida como princípio do tempo mínimo, ou ainda princípio de Fermat.

Partiremos da suposição de que a propagação da luz não depende de modo algum de interações com a matéria. No vácuo, a luz move-se em linha reta. Em outras palavras; entre todos os possíveis caminhos que a luz poderia tomar entre dois pontos quaisquer P e Q, o único caminho fisicamente possível é o caminho que leva o menor tempo para ser percorrido.

O que acontece na reflexão? Se a luz está indo de um ponto para outro, e sofre reflexão, o caminho que leva o menor tempo é o caminho em que os ângulos de incidência e reflexão são iguais. A prova é fácil quando os pontos de partida e chegada são equidistantes da superfície refletora, baseando-se apenas na simetria da Figura 7 (a). Toma-se um ponto C, à mesma distância de B, da superfície, como mostrado na Figura 7 (b), e prolonga-se a linha que parte de A até C, do lado oposto da superfície refletora. Essa reta corta a superfície refletora no ponto Q, o e o caminho representado pela linha AQC que tem o mesmo comprimento que a linha AQB.

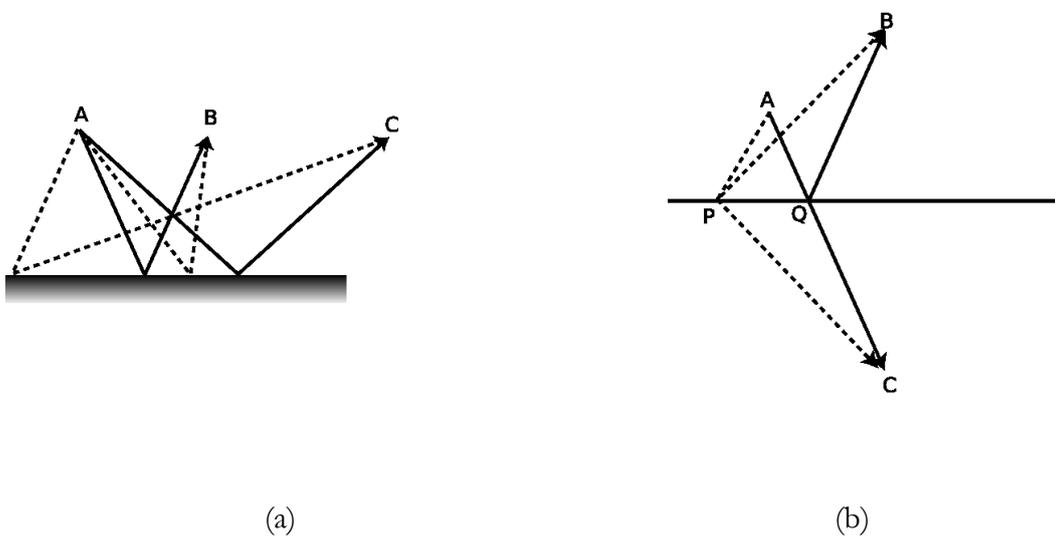


Figura 7: Um raio de luz parte de A e chega a B, sendo refletida por uma superfície. À direita, os pontos A e B estão equidistantes, e à esquerda, não. As linhas cheias representam os caminhos que satisfazem o princípio de menor tempo, enquanto as linhas tracejadas representam caminhos possíveis, mas não fisicamente aceitáveis.

Esse princípio aplica-se não somente a reflexão da luz, mas também explica o desvio que a luz sofre ao passar de um meio para outro, e embora seja muito elegante, parece um pouco assustador pensar que o raio de luz é inteligente, e planeja cuidadosamente a sua rota entre dois pontos de forma a economizar tempo, como se soubesse previamente para onde está indo. E e mudássemos ligeiramente a inclinação do espelho para enganar a luz? A resposta é que o princípio do menor tempo é um atalho par certos resultados que serão obtidos posteriormente, utilizando o modelo ondulatório para a luz.