

LUZ E ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

1

Luiz Nunes de Oliveira

- 1.1** Introdução
- 1.2** Natureza
- 1.3** Origem
- 1.4** Características
 - 1.4.1** Velocidade
 - 1.4.2** Frequência e cor
 - 1.4.3** Polarização
 - 1.4.4** Intensidade
 - 1.4.5** Energia e quantidade de movimento
- 1.5** Conclusão

LICENCIATURA EM CIÊNCIAS · USP/UNIVESP

1.1 Introdução

De tudo o que é concreto ao nosso redor, nada é tão importante quanto a luz. Sem ela, não haveria vida, animal ou vegetal. A vida, para se manter, precisa de energia. Os animais retiram energia de uma cadeia alimentar, em cuja base estão as plantas, que extraem diretamente da radiação do Sol a energia de que precisam para crescer. Sem luz, as plantas morreriam por falta de fotossíntese, os animais herbívoros morreriam por falta de alimentação e, em seguida, os carnívoros também morreriam de fome.

A radiação provinda do Sol é também essencial porque aquece o nosso planeta. Sem ela, em pouco tempo, a Terra se converteria em uma esfera recoberta de gelo, mais fria do que o inverno antártico que conhecemos.

Além disso, da energia hoje consumida pela humanidade, quase 94% se deve à luz solar. As principais fontes de energia — o petróleo, o gás natural e o carvão — provêm principalmente de vegetais que se desenvolveram à luz do Sol e foram fossilizados em material rochoso acumulado abaixo da superfície. E também a lenha provém da fotossíntese. A chuva, que alimenta as hidrelétricas, resulta da evaporação da água aquecida pela luz do Sol. Os ventos, que movem moinhos, se devem ao desigual aquecimento das diferentes regiões da Terra pela luz solar. Em suma, exceção feita a usinas nucleares, geotérmicas e movidas por marés oceânicas, toda a energia que movimenta veículos e máquinas, e aquece e ilumina ambientes, nasceu no Sol e foi transportada para a Terra pela luz.

A luz, ademais, ativa o sentido da visão, sem o qual toda a vida animal seria muito diferente da que conhecemos. E, por fim, a luz nos oferece instrumentos para estudar o universo em que vivemos.

O mais importante desses instrumentos é o olho. Por meio dele, desde a Antiguidade remota, o homem se familiarizou com as estrelas e os planetas mais próximos de nós, assim como se acostumou com o ambiente ao seu redor. Depois, a Ciência desenvolveu o **telescópio**, que traz para perto o que está distante demais, o **microscópio**, que torna visível o que é pequeno demais para ser visto a olho nu; o **espectroscópio**, que divide a luz em cores e determina a intensidade de cada componente cromática; e o *laser*, fonte de luz monocromática, intensa e regular.

Na Antiguidade, a luz permitiu que a humanidade desenvolvesse um então revolucionário meio de comunicação — a escrita. Mais recentemente, o cinema, a televisão, os monitores de computadores e depois todo um conjunto de acessórios vieram juntar-se ao papel e à tinta para

permitir que imagens e dados fossem transmitidos e armazenados em velocidades que, há cem anos, pareceriam infinitamente grandes. A luz, em resumo, permite que vivamos e agrega enorme riqueza às nossas vidas.



Figura 1.1: Incidência da luminosidade.

a velocidade da luz foi deduzida inicialmente, identifique o valor atual da velocidade da luz, reconheça a natureza e características da luz, tais como velocidade, frequência, cor, polarização, intensidade, energia e quantidade de movimento.

Podemos imaginar que, desde o alvorecer da humanidade, houvesse curiosidade sobre a natureza da radiação luminosa. Pouco se conhecia sobre ela até que a Ciência moderna começasse a tomar corpo, mas a áurea de mistério que a cercava começou a ser removida ao mesmo tempo em que a Mecânica se desenvolvia.

Nesta aula, veremos o que é a luz, como ela se comporta e como a humanidade descobriu as equações matemáticas que descrevem a produção e a propagação da radiação luminosa. Assim, nossa intenção é que, com esta aula, você compreenda como

1.2 Natureza

A luz é uma onda. Até o século XVII, a maioria dos filósofos acreditava que, como a temperatura ou a umidade, a claridade fosse uma propriedade do ar e dos materiais transparentes, que crescia subitamente ao nascer do Sol ou ao se acender uma fogueira. Quando Römer mostrou que a luz avançava com velocidade finita, surgiram duas alternativas. O grande físico inglês **Isaac Newton** (1643–1727) entendia que um raio luminoso era um conjunto muito grande de partículas pequenas demais para serem vistas, as quais avançariam pelo espaço com velocidade c . Já, para o holandês **Christian Huygens** (1629–1695), a luz era uma onda que se propagava no vácuo com velocidade c .

Sabemos hoje que a velocidade da luz é aproximadamente 300.000 km/s.

Pela igualdade $c = \lambda v$, podemos encontrar o comprimento de onda sempre que a frequência for conhecida, ou, ao contrário, determinar a frequência a partir de uma medida do comprimento de onda.

Sabe-se hoje que a frequência da luz visível é muito alta, da ordem de 1×10^{15} Hz e costuma-se expressá-la em THz ($1\text{THz} = 1 \times 10^{12}$ Hz). Assim, encontramos frequências ν de centenas de THz. Resulta da **Equação 1.3** que λ é uma fração do micrão ($1\mu = 10^{-3}$ mm = 10^{-6} m). Para comparação, é bom lembrar que o diâmetro típico de um fio de cabelo é 50μ . O comprimento de onda da luz, portanto, é 100 vezes menor do que a menor distância que podemos ver a olho nu.

Isso é muito importante, porque λ define uma escala de distância. Quem for capaz de ver distâncias da ordem de λ poderá observar as oscilações da onda. Quem for capaz de ver distâncias muito maiores do que λ será incapaz de perceber os altos e baixos da ondulação e verá apenas uma perturbação contínua, da mesma forma que a passageira de um avião que examina um canal somente consegue ver uma massa verde, porque não distingue um pé de cana do espaço vazio entre ele e as plantas vizinhas.

Nos séculos XVII e XVIII, faltavam instrumentos capazes de medir distâncias inferiores a um micrão, e assim a disputa entre Newton e Huygens somente pôde ser arbitrada no século XIX. Em 1802, por meio de uma experiência que discutiremos na aula **Ondas eletromagnéticas**, o inglês Thomas Young (1773–1829) encontrou resultados que comprovaram a hipótese ondulatória de Huygens.

Seis décadas depois, o físico teórico escocês **James C. Maxwell** (1831–1879), após sistematizar e aperfeiçoar o que se conhecia sobre a eletricidade e sobre o magnetismo, derivou de seus próprios resultados uma equação equivalente à que descreve a propagação das ondas sonoras no ar. Ao resolver a equação, ele encontrou uma velocidade de propagação dependente do meio e que chegava a cerca de 300.000 km/s no vácuo. Maxwell concluiu que havia encontrado a expressão matemática que descreve a radiação luminosa e proclamou que a luz é uma onda eletromagnética.

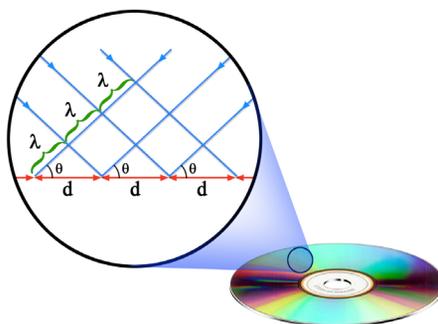


Figura 1.2: Difração da luz por um disco compacto (CD). A separação entre as marcas horizontais, na superfície do CD, é uniforme e pouco maior do que o comprimento de onda λ da luz. Quando o ângulo de incidência é tal que a distância entre frentes de onda refletidas é λ , os raios refletidos se reforçam e resultam em um feixe de grande intensidade. / Fonte: adaptado de USPSC.



Acesse o [link](#) para ver como as ondas sonoras, ondas na água e ondas eletromagnéticas se comportam quando encontram uma barreira.

1.3 Origem

Antes de Maxwell mostrar que a luz resulta de uma combinação entre a eletricidade e o magnetismo, uma pergunta embaraçava os que defendiam a hipótese ondulatória. Na primeira metade do século XIX, vários tipos de onda já haviam sido descobertos: o som, as ondas marítimas, as oscilações de uma corda, as vibrações do solo durante um terremoto e muitos outros tipos. Todas essas ondas são mecânicas e necessitam de um meio para se propagar. Não existe som, por exemplo, no vácuo.

A luz, no entanto, avança no vazio. Sabemos disso porque conseguimos ver o Sol e as estrelas. É até mais fácil ver as estrelas do alto de uma montanha, com menos ar acima de nós, do que ao nível do mar. “Muito bem,” perguntavam os que não gostavam da teoria ondulatória, “digamos que a luz seja uma onda. Nesse caso, alguma coisa precisa oscilar. Como entre o Sol e a Terra não existe nada para vibrar, a luz solar não deveria chegar até nós. Se ela chega, é porque é constituída de partículas, que avançam com mais facilidade no vácuo do que no ar.”

A descoberta de Maxwell eliminou essa objeção. Apesar de ser uma onda, a luz não precisa de um meio físico para se propagar, porque ela resulta da oscilação de campos elétricos e magnéticos, não da vibração de partículas materiais.



Assista ao [vídeo](#) e veja a produção de uma onda eletromagnética, pelo movimento acelerado de uma carga elétrica.



Figura 1.3: Amostra de propagação da luz.

Os campos são gerados pela aceleração de cargas elétricas, no espaço ou na superfície de materiais que conduzem a eletricidade. Como a frequência é muito alta, da ordem de 10^{15} Hz, a maneira mais fácil de se produzir luz é aquecer um material a temperaturas muito altas: nessas condições, os átomos que compõem o material se agitam, e a oscilação dos elétrons que os acompanham gera luz. É assim que o Sol, cuja superfície está a cerca de $6.000\text{ }^{\circ}\text{C}$, nos ilumina. Da mesma forma é gerada a luz em uma fogueira, na cabeça de um palito de fósforo, na chama de um fogão, em um ferro em brasa ou no filamento de uma lâmpada incandescente.

A luz pode também ser produzida por uma descarga elétrica em um gás, que acelera o movimento dos elétrons nos átomos que compõem o gás. Os raios e as lâmpadas fluorescentes são exemplos desse mecanismo de geração, como foi visto na aula sobre **Estrutura da Matéria**.

Um terceiro mecanismo foi sugerido pela descoberta de Maxwell. No final do século XIX, a humanidade começou a controlar a dinâmica dos elétrons para acelerá-los e produzir radiação eletromagnética. Produziu inicialmente ondas eletromagnéticas invisíveis, com frequências bem menores (ondas de rádio, por exemplo) ou bem maiores (raios X) do que a luz. No século XX, a Ciência e a Tecnologia avançaram rapidamente para explorar as outras frequências e para transformar as ondas eletromagnéticas em um componente essencial de nossas vidas.



Figura 1.4: Exemplo de geração de luz por uma descarga elétrica em um gás.



Veja a [simulação](#) onde você pode mexer o elétron na antena emissora para produzir uma onda eletromagnética e ver o que acontece com um elétron na antena receptora.

1.4 Características

Após a descoberta de Maxwell, vieram a Relatividade e a Mecânica Quântica. Com base nesses três avanços teóricos, a Ciência adquiriu domínio completo sobre as características e a natureza da radiação luminosa. Sabemos assim que a luz é uma onda que pode propagar-se tanto no vácuo quanto em meios materiais.

1.4.1 Velocidade

No vácuo, como já sabemos, a velocidade da luz é $c = 299.792.458$ m/s. Em outros meios, a velocidade é menor. A **Tabela 1.1** mostra vários exemplos, junto com o índice de refração n do material, definido como a razão c/v , entre as velocidades no vácuo e no meio. O índice de refração de um material transparente pode ser facilmente medido, porque ele define o desvio que um raio de luz sofre ao passar do vácuo para o meio.



Figura 1.5: Amostra de refração.

Tabela 1.1: Velocidade v da luz e índice de refração n de vários meios.

Meio	v (1000 km/s)	n
Ar	299,7	1,0003
Água	225	1,33
Vidro	170-200	1,5-1,75
Diamante	124	2,4

○○○○

Exercício Resolvido

Qual é o comprimento de onda da luz vermelha em um vidro com índice de refração $n = 1,5$, dado que o seu comprimento de onda no vácuo vale $\lambda = 700$ nm.

→ RESOLUÇÃO:

A relação entre os comprimentos de onda da luz vermelha no vidro (λ') e no vácuo (λ) vale

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n_v} = \frac{700 \text{ nm}}{1,5} \approx 467 \text{ nm}$$

○○○○

1.4.2 Frequência e cor

A luz ocupa uma minúscula fração do espectro eletromagnético, o conjunto de radiações eletromagnéticas que vão desde ondas de rádio com frequências baixas demais para despertar interesse prático até raios gama com frequências superiores a 10^{20} Hz, gerados em explosões nucleares.

Tabela 1.2: Comprimento de onda das várias cores, em nanômetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Cor	Comprimento de onda (nm)
Vermelho	650
Laranja	600
Amarelo	570
Verde	510
Azul	475
Violeta	400

A faixa de luz visível vai de 400 THz a 700 THz, intervalo que corresponde a comprimentos de onda entre 700 nm e 400 nm. A frequência da luz é percebida por nossos olhos como cor, o limite inferior definindo o vermelho, enquanto o superior define o violeta. A Tabela 1.2 mostra o comprimento de onda correspondente a cada cor. Nas pontas do intervalo, a visão

humana se torna menos eficiente. O comprimento de onda $\lambda = 700 \text{ nm}$, por exemplo, é percebido como um vermelho muito escuro. Abaixo de 400 nm (ultravioleta) ou acima de 750 nm (infravermelho), os olhos são totalmente insensíveis à radiação eletromagnética.

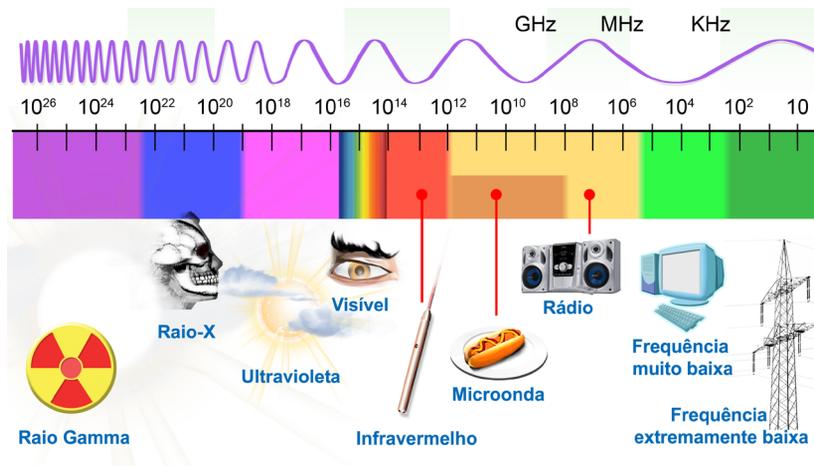


Figura 1.6: Espectro eletromagnético e a faixa do comprimento de onda da luz visível.



Para compreender melhor os comprimentos de onda da luz visível, acesse o [link](#) e faça a simulação.

○○○○

Exercício Resolvido

A luz azul tem comprimento de onda de 475 nm . Supondo que o meio é o vácuo, qual o valor de sua frequência?

→ RESOLUÇÃO:

Sabemos que o produto da frequência (ν) pelo comprimento de uma onda (λ) é constante e vale $v = \lambda\nu$. Como o meio é o vácuo, temos $c = \lambda\nu$. A velocidade da luz no vácuo é constante ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Assim, a frequência da luz azul vale, aproximadamente, 632 THz .

○○○○

1.4.3 Polarização

Como já vimos, a luz resulta da oscilação de campos elétrico e magnético. Os dois campos estão inter-relacionados: das equações de Maxwell resulta que a variação do campo elétrico

produz um campo magnético, ao mesmo tempo em que a variação do campo magnético gera um campo elétrico. Assim, é mais fácil fixar a atenção em um deles, e escolhemos o campo elétrico, cujos efeitos são mais facilmente visualizados.

Dizemos que existe um campo elétrico \vec{E} em um ponto P se uma carga elétrica muito pequena q , posicionada naquele ponto, ficar sujeita a uma força \vec{F} proporcional a q , isto é, se $\vec{F} = q\vec{E}$. Assim como as forças, o campo elétrico é um vetor: tem direção e intensidade. Por isso, há sempre duas direções associadas à radiação eletromagnética em um dado ponto do espaço:

1. a direção do campo elétrico E e
2. a direção em que a radiação avança.

Como mostra a **Figura 1.9**, o campo elétrico é sempre perpendicular à propagação. Se a propagação for vertical, por exemplo, o campo elétrico será horizontal. Assim como a direção de propagação, a direção do campo depende da origem da radiação. As fontes luminosas, normalmente, produzem radiação com campos elétricos igualmente distribuídos em todas as direções perpendiculares à propagação, isto é, produzem luz despolarizada.

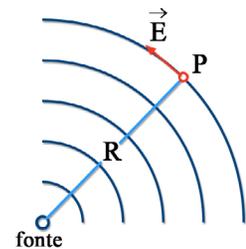
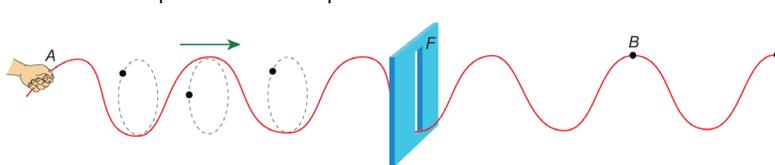


Figura 1.7: Campo elétrico devido a uma fonte de radiação eletromagnética. O campo elétrico é transversal, isto é, perpendicular à reta que o une à fonte.

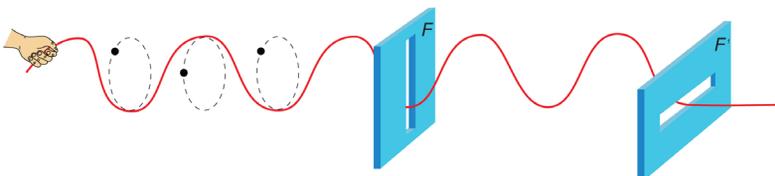


Para saber mais assista ao vídeo: <http://youtu.be/2or84FgFxA>

A figura abaixo mostra a onda produzida quando se movimenta a mão para cima, para baixo e para os lados. Ao passar pela fenda as oscilações correm apenas na vertical. Dizemos que a onda está polarizada



Se colocarmos outra fenda perpendicular à primeira, não haverá mais onda.



Certos materiais fazem o papel de polarizadores, deixando passar somente a componente do campo elétrico paralela a uma dada direção. A luz que emerge do polarizador é dita polarizada, porque o seu campo elétrico tem a direção definida pelo polarizador. Se mais à frente encontrar outro polarizador com a mesma direção de polarização, a luz polarizada irá atravessá-lo. Se encontrar outro polarizador com direção de polarização perpendicular à do campo elétrico, a luz será absorvida e não conseguirá atravessar o meio (**Figura 1.8**). Nos cinemas 3D, as imagens filmadas de dois pontos de vista diferentes são projetadas juntas, com polarizações diferentes. As lentes dos óculos que cada espectador utiliza são polarizadores que filtram a projeção, de forma que o olho esquerdo veja a imagem filmada de um ponto de vista e o olho direito veja a imagem filmada do outro. O resultado é o semelhante ao que se vê ao vivo: o olho direito vê o mundo a partir de um ponto de vista ligeiramente deslocado em relação ao do olho esquerdo. Assim, o espectador tem a impressão de estar vendo uma imagem tridimensional.

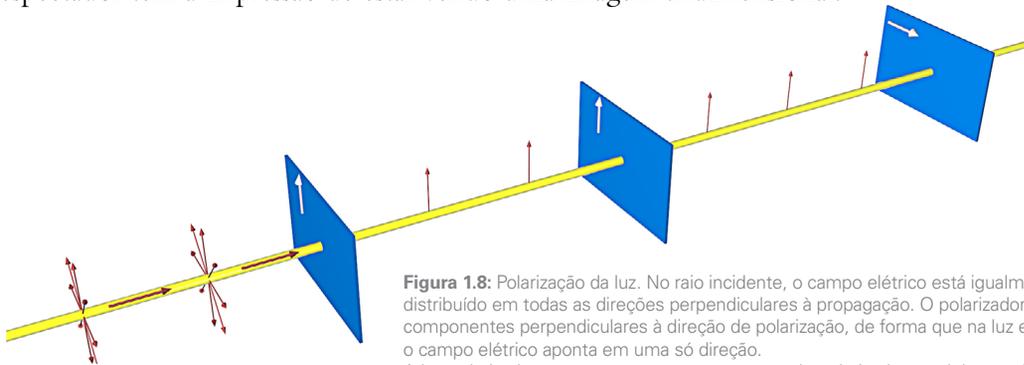


Figura 1.8: Polarização da luz. No raio incidente, o campo elétrico está igualmente distribuído em todas as direções perpendiculares à propagação. O polarizador elimina as componentes perpendiculares à direção de polarização, de forma que na luz emergente o campo elétrico aponta em uma só direção. A luz polarizada consegue atravessar um segundo polarizador paralelo ao primeiro, mas é bloqueada por um terceiro polarizador orientado perpendicularmente ao primeiro.

1.4.4 Intensidade

A intensidade ou módulo do campo elétrico controla a intensidade da radiação eletromagnética. Uma vez que o campo oscila rapidamente, o seu módulo varia cerca de 10^{15} vezes por segundo entre um valor máximo e zero. Na maioria dos casos, essa variação é rápida demais para ser observada, e o que se mede é o valor médio do módulo do campo elétrico.

A intensidade luminosa é proporcional ao quadrado desse valor médio. Assim, no final da tarde, quando o Sol desaparece no horizonte, o campo elétrico devido à radiação solar se torna muito fraco e somos obrigados a acender uma lâmpada para restaurar o campo elétrico em torno de nós e poder enxergar. Em uma máquina fotográfica digital, quando se aciona um botão, a luz é focalizada em uma célula no fundo da câmera. O campo elétrico resultante em cada ponto da célula ativa um mecanismo que registra na memória da máquina um número proporcional ao quadrado do campo

elétrico. No final do processo fica gravada na memória uma sequência de números, cada um dos quais é proporcional à intensidade da luz que alcançou um ponto da célula no momento da foto, isto é, fica gravada uma imagem digitalizada do que estava à frente da máquina naquele instante.

1.4.5 Energia e quantidade de movimento

No final do século XIX, quando não parecia mais haver qualquer dúvida sobre a natureza da luz, o alemão **Max K. E. L. Planck** (1858-1947) fez uma descoberta que acabou por trazer de volta as partículas de luz. Planck descobriu que, assim como a matéria, a energia da radiação eletromagnética é quantizada. Da mesma forma que, para aumentar a massa de um bloco de ouro temos de agregar um ou mais átomos — porque uma fração de átomo não é ouro —, para aumentar ou diminuir a energia da radiação temos de agregar um número inteiro de unidades, cada uma das quais é chamada de um *quantum* de energia.

Suponhamos que um certo volume V do espaço seja ocupado por radiação eletromagnética de frequência ν . A energia nele contida depende do campo elétrico que constitui a radiação. Até o final do século XIX, acreditava-se que o módulo do campo elétrico poderia ser variado arbitrariamente em qualquer ponto do espaço e que, portanto, a energia contida no volume V poderia ser aumentada ou diminuída ao gosto de quem controlasse o campo elétrico. Planck contestou essa noção: ele mostrou que a energia somente pode ser incrementada ou diminuída em degraus. O degrau ou quantum de energia ΔE é proporcional à frequência:

$$\Delta E = h\nu, \quad 1.1$$

onde $h = 6,63 \times 10^{-34}$ kgm²/s é a constante de Planck.

Algumas décadas foram necessárias até que se compreendessem as implicações da **Equação 1.4**. Nesse período, o físico americano **Arthur H. Compton** (1892-1962), ao estudar a aceleração de um elétron por raios X, chegou a um resultado igualmente surpreendente. Como esperado, verifica-se, experimentalmente, que o campo da radiação eletromagnética altera a velocidade da partícula carregada. Seria de se esperar, também, que a frequência da radiação não fosse afetada pela interação com o elétron, mas a experiência mostra que a frequência diminui e que a diminuição depende da direção em que o elétron é ejetado.

Compton mostrou que esse resultado é facilmente explicado quando se supõe que a luz carrega quantidade de movimento e que a variação da quantidade de movimento, assim como a variação da energia, é quantizada.

Suponhamos, para sermos específicos, que uma onda eletromagnética incida sobre um elétron com velocidade inicial nula ou muito pequena. O elétron poderá ser acelerado, de forma que sua velocidade passe a ser \vec{v}_f . Se a massa do elétron for denotada m_e , a variação de sua quantidade de movimento será

$$\Delta\vec{p} = m_e v_f, \quad 1.2$$

que é determinada quando se mede a velocidade final do elétron.

Se a radiação X incidente sobre o elétron tiver quantidade de movimento \vec{p}_i e se a quantidade de movimento for conservada, a quantidade de movimento da radiação após a interação será

$$\vec{p}_f = \vec{p}_i + \Delta\vec{p}. \quad 1.3$$

Portanto, conhecida a quantidade de movimento \vec{p}_i , ficará determinada a quantidade de movimento \vec{p}_f .

Embora a quantidade de movimento inicial não fosse conhecida, o cientista americano não teve dificuldade em obter seu módulo da Teoria da Relatividade Especial, que, como veremos na próxima aula sobre fótons, impõe uma relação simples entre a energia e a quantidade de movimento da luz:

$$E = pc. \quad 1.4$$

Assim, admitindo que a **Equação 1.4** descreve a energia de uma partícula de luz, Compton combinou-a com a **Equação 1.7** para chegar a:

$$p = \frac{h\nu}{c}. \quad 1.5$$

Sabemos, por outro lado, da **Equação 1.1**, que $c = \lambda\nu$. Assim a **Equação 1.8** pode ser escrita na forma

$$p = \frac{h}{\lambda}, \quad 1.6$$

igualdade que determina o módulo da quantidade de movimento \vec{p}_i na **Equação 1.6**.

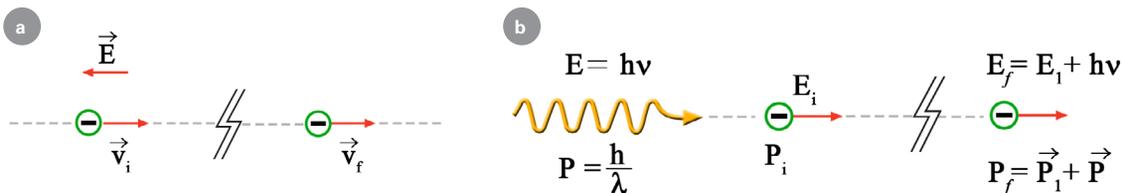


Figura 1.9: Descrições clássica e quântica da interação entre a radiação eletromagnética e um elétron. **(a)** Na imagem clássica, o elétron é acelerado pela força que recebe dos campos elétrico e magnético da radiação. **(b)** No tratamento quântico, o elétron absorve um fóton e assim recebe uma quantidade de movimento h/λ e uma energia $h\nu$.

O mesmo princípio quântico controla a transferência de outras grandezas físicas entre dois sistemas. Em particular, os autovalores da quantidade de movimento da radiação eletromagnética com comprimento de onda λ são dados pela **Equação 1.9**. A cada interação com a matéria, a radiação somente pode perder h/λ de quantidade de movimento. De novo, tudo se passa como se a luz fosse constituída de fótons com quantidade de movimento h/λ . A interação destrói o fóton e transfere h/λ de quantidade de movimento e $h\nu$ de energia para a matéria.



Exercício Resolvido

Uma lâmpada fluorescente emite 20 W de luz laranja ($\lambda = 600$ nm). Quantos fótons são emitidos por segundo?

→ RESOLUÇÃO:

A energia de 1 fóton vale $h\nu$. A energia de n fótons é, portanto, $n h\nu$. Lembrando que $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$, temos que, em 1 segundo, a energia emitida pela lâmpada é de 20 J. A partir da relação $c = \lambda\nu$, podemos escrever a energia de n fótons como $E_n = \frac{nhc}{\lambda}$. Assim, em 1 segundo, $6 \cdot 10^{19}$ fótons são emitidos. Os cálculos estão sumarizados a seguir.

$$E = h\nu \rightarrow 1 \text{ fóton}, \quad E_n = nh\nu \rightarrow \underline{n} \text{ fótons}$$

$$c = \lambda\nu \rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow E_n = \frac{nhc}{\lambda}$$

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} \rightarrow 20 \text{ W} = 20 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

$$n \frac{hc}{\lambda} = 20 \text{ J} \quad \begin{cases} n = ? \\ h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\ c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$\downarrow \\ n = 6 \cdot 10^{19} \quad \lambda = 600 \text{ nm} \quad (1 \text{ nm} = 1 \cdot 10^{-9})$$



1.5 Conclusão

Encontramos neste texto duas situações em que convém visualizar a luz como conjunto de fótons. A primeira prevalece quando a luz se propaga em ambientes definidos por distâncias muito superiores ao comprimento de onda. Estamos então, no domínio da ótica geométrica, uma condição muito comum, mesmo na vida moderna. Um projetista que pretende desenhar um novo conjunto de lentes para uma máquina fotográfica digital, por exemplo, pode esquecer que a luz é constituída por ondas e tratá-la como se cada feixe fosse composto de partículas com trajetórias retilíneas em meios uniformes.

Na segunda situação, quando a radiação interage com a matéria e transfere pouca energia, o conceito de fóton deixa de ser uma mera conveniência para emergir por imposição da Mecânica Quântica. Desse conceito extraímos rapidamente conclusões a que a Mecânica Clássica não poderia conduzir.

Considere, por exemplo, um turista deitado na praia sob o céu azul, de um meio-dia de verão. Sua pele está sendo bombardeada por um número muito grande de fótons cujas energias variam de $E_{\text{vermelho}} = h\nu_{\text{vermelho}} = 3 \times 10^{-19} \text{ J}$ a $E_{\text{violeta}} = h\nu_{\text{violeta}} = 5 \times 10^{-19} \text{ J}$. Uma vez que a energia que prende os elétrons aos átomos na pele é da ordem de 10^{-19} J , esse raciocínio é suficiente para mostrar que a luz do Sol pode arrancar alguns dos elétrons dos átomos da pele do turista, danificar processos bioquímicos fundamentais e provocar tumores.

Há uma terceira situação, no entanto, em que a radiação precisa ser vista como onda. Quando se analisa a propagação da radiação eletromagnética em regiões com obstáculos separados por distâncias comparáveis ou inferiores a λ é indispensável tratar a radiação como queria Huygens, pois a noção proposta por Newton conduzirá a conclusões incorretas.

O que virá depois...

Isso tudo deixa uma dúvida. Sabemos que distâncias comparáveis com λ exigem tratamento ondulatório e que a interação da radiação com a matéria recomenda que trabalhem com fótons. E se as duas situações prevalecerem, se a luz interagir com blocos de matéria com dimensões comparáveis ao comprimento de onda? Bem, nesse caso precisamos combinar ondas com fótons. Pode parecer impossível, mas é relativamente simples, como veremos na próxima aula.



Agora é sua vez..

Acesse o Ambiente Virtual de Aprendizagem e realize a(s) atividade(s) proposta(s).