

Capítulo 4

RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A luz emitida pelos objetos astronômicos é o elemento chave para o entendimento da Astrofísica. Informações a respeito da temperatura, composição química, e movimento de tais objetos são obtidas a partir do estudo e interpretação da radiação por eles emitida.

Essa radiação é chamada eletromagnética por se tratar do transporte de energia por meio de flutuações dos campos elétrico e magnético. A luz, ou radiação eletromagnética, pode ser observada sob diferentes formas ou seja, em diferentes faixas espectrais: visível, infravermelho, ultravioleta, ondas rádio, etc.

Antes de iniciarmos o nosso estudo de astrofísica estelar é importante que se entenda a natureza da radiação eletromagnética. Dessa forma, veremos nesse capítulo os seguintes tópicos:

- A natureza da luz: ondulatória e quântica.
- Efeito Doppler
- Espectro Eletromagnético
- Fluxo e Luminosidade

Bibliografia:

- Zeilik & Smith, 1987 “Introductory Astronomy & Astrophysics” (cap. 8)
- Chaisson & McMillan, 1998 “Astronomy: a beginner’s guide to the Universe” (cap. 2)
- W.Maciel, 1991 “Astronomia e Astrofísica” – IAG/USP, (cap.8)

A Natureza da Luz

A luz se desloca no espaço por meio de ondas eletromagnéticas, que não necessitam de um meio físico para serem transportadas, e portanto diferem dos outros exemplos de ondas encontrados na natureza, como ondas na água, ondas sonoras, sísmicas, etc.

Apesar dessa diferença fundamental, vamos ilustrar o nosso estudo com um exemplo bem conhecido: o efeito de uma pedra sendo atirada num lago tranqüilo. Ondas serão formadas e uma folha que estiver nas proximidades vai se deslocar, seguindo um movimento ondulatório, que pode ser expresso por $h = H \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]$.

A propagação ao longo de uma dada direção é representada esquematicamente na Figura 1:

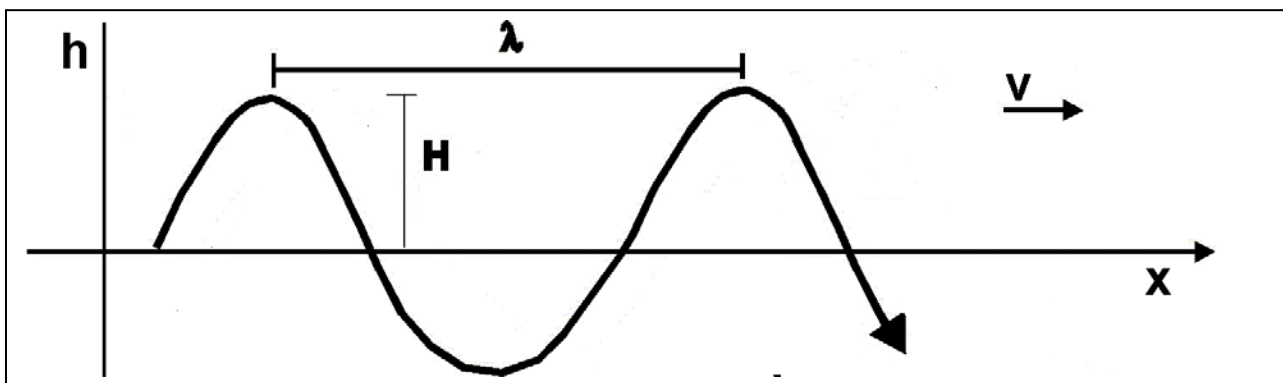


Figura 1. Propagação de uma onda de amplitude H , velocidade v , e comprimento da onda λ .

No tempo inicial ($t=0$) a expressão para a altura será: $h = H \sin\left[\frac{2\pi x}{\lambda}\right]$, sendo que na posição inicial ($x=0$) a altura é zero. O primeiro máximo será atingido em $x = \frac{\lambda}{4}$, quando a altura coincide com a amplitude ($h=H$). Vamos então estabelecer uma expressão genérica. Fixando $x = \frac{\lambda}{4}$, teremos: $h = H \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\lambda}{4} - vt\right)\right]$, ou seja, à medida que t aumenta, o movimento corresponde a uma **oscilação** de amplitude H . Os máximos de altura ($h=H$) deverão ocorrer em $t=0$ e novamente quando $t = \frac{\lambda}{v}$, definindo-se assim o **período de oscilação**, enquanto que a **frequência** de oscilação é dada por: $\nu = \frac{v}{\lambda}$.

A velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas (variação do campo elétrico \vec{E} e do campo magnético \vec{B}) no vácuo é a velocidade da luz c (da ordem de 300 000 Km/s). Quando se refere ao deslocamento da luz, sua frequência é expressa por $\nu = c/\lambda$.

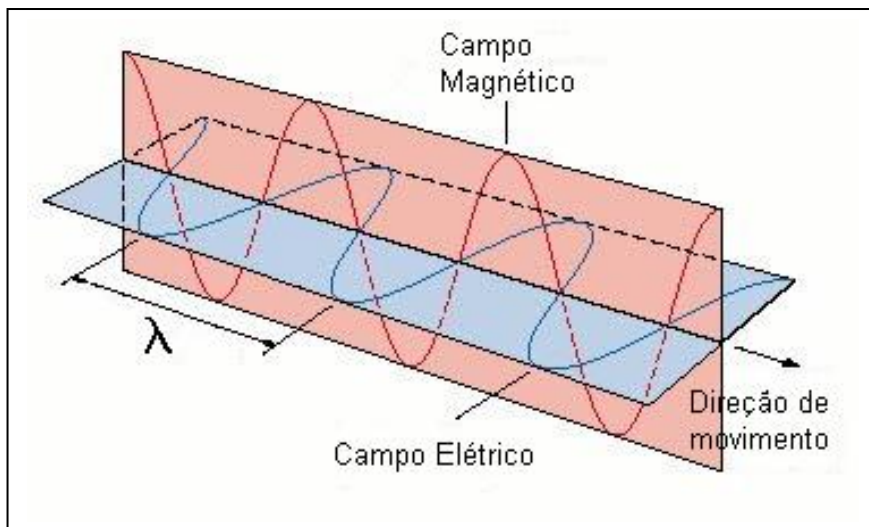
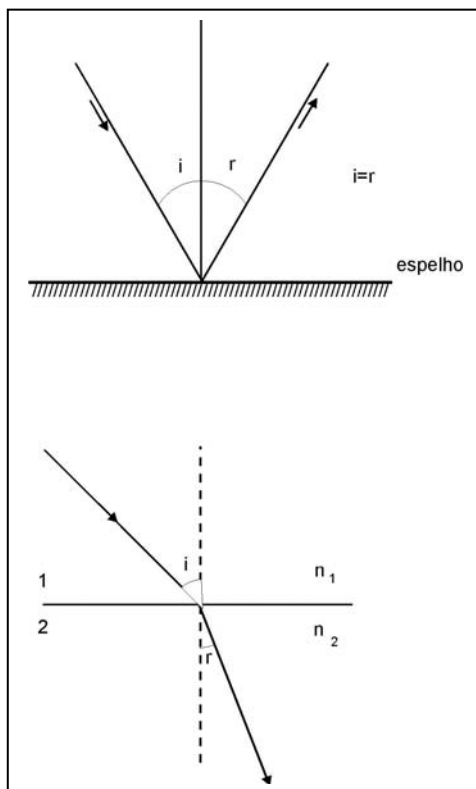


Figura 2. Campos elétrico e magnético vibram em planos perpendiculares entre si. Juntos, eles formam uma onda eletromagnética que se move através do espaço à velocidade da luz.

A direção de oscilação de \vec{E} , juntamente com a direção de propagação definem o plano de polarização. A polarização é bastante importante na Astrofísica porque nos permite conhecer o meio por onde a radiação se propaga. Um exemplo é a polarização interestelar causada por grãos de poeira.

A luz pode apresentar reflexão e refração, difração e interferência. Vamos relembrar algumas dessas propriedades das ondas.



Ao incidir num espelho, como ocorre nos telescópios refletores, a luz sofre **reflexão**. Em relação à normal ao espelho o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão ($i=r$),

Nos casos em que a luz se propaga atravessando diferentes meios, como no exemplo dos telescópios refratores, ela sofre **refração**, mudando de velocidade em função dos diferentes índices de refração (n). Considerando o caso em que $n_2 > n_1$, temos a relação:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r, \text{ conhecida por lei de Snell.}$$

Figura 3. Exemplos do caminho da luz em telescópios refletores e refratores.

A velocidade da luz em diferentes meios é dada por $v = c/n$. No vácuo, por exemplo, $n = 1$; no ar $n = 1,0003$; e no vidro $n = 1,5$. Como o índice de refração depende do comprimento de onda (λ), quando a luz branca atravessa um prisma ela é decomposta. Esta é a base da espectroscopia, cuja aplicação em Astrofísica é de grande importância.

A radiação eletromagnética sofre **difração** ao encontrar um obstáculo de contornos definidos. Quando ondas difratadas convergem e se sobrepõem, ocorre o fenômeno da **interferência**.

Efeito Doppler

Quando a fonte emissora de luz se movimenta em relação ao observador, ocorre uma modificação no comprimento de onda (ou frequência), um fenômeno conhecido por **efeito Doppler**.

Considere uma fonte em repouso, emitindo luz a um comprimento de onda λ_0 .

Se a fonte se aproximar do observador, o comprimento de onda observado será menor ($\lambda_1 < \lambda_0$). Se λ diminuir, a frequência (ν) aumenta.

Por outro lado, se a fonte se afastar do observador o comprimento de onda observado será maior ($\lambda_2 > \lambda_0$). Nesse caso, a frequência observada será menor que a emitida.

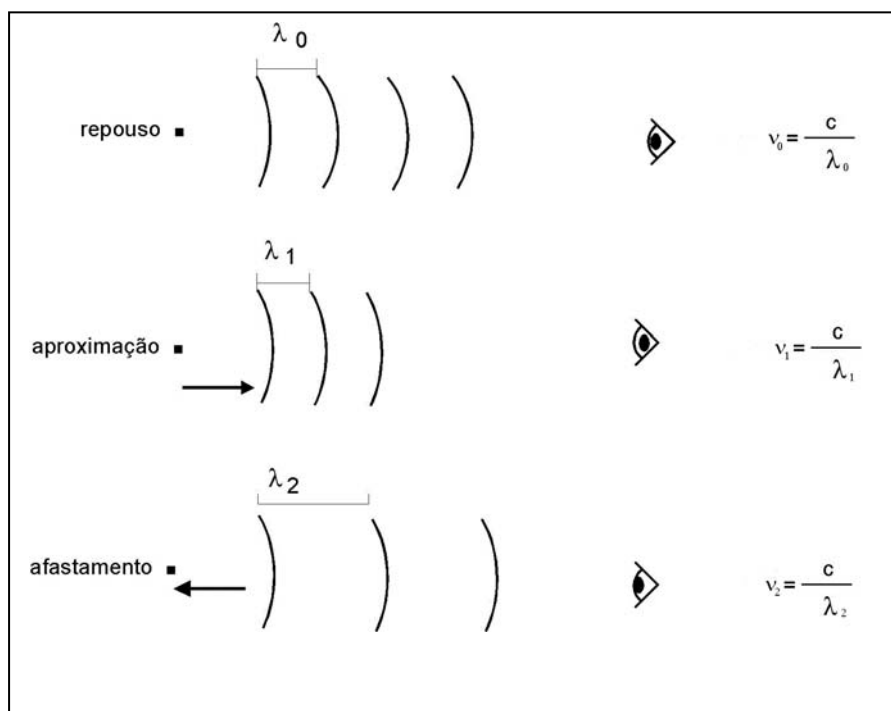
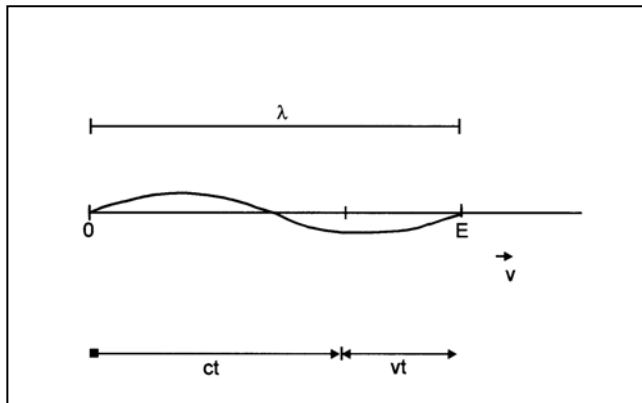


Figura 4. Efeito Doppler observado em função do movimento da fonte emissora

Consideremos agora um caso válido para velocidades não-relativísticas ($v \ll c$): uma fonte **E** se afastando de um observador a uma velocidade **v** e frequência de emissão ν_0 .

No tempo $t = \frac{1}{\nu_0}$ (período de oscilação), o comprimento de onda observado será:



$$\lambda = (c + v) t$$

$$\lambda = c \left[1 + \frac{v}{c} \right] t$$

$$\lambda = c \left[1 + \frac{v}{c} \right] / \nu_0$$

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \frac{v}{c} \right]$$

Figura 5. Comprimento de onda observado no caso de uma fonte emissora em afastamento.

Para determinar o quanto o comprimento de onda observado (λ) desviou-se do emitido (λ_0), calculamos $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left(\frac{v}{c} \right)$, resultando na expressão que define o deslocamento Doppler: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$.

No caso de objetos em afastamento, observa-se $\lambda > \lambda_0$ (portanto $v < v_0$) dizemos que ocorreu um **desvio para o vermelho** (*redshift*), cor que corresponde às menores frequências na região do visível no espectro eletromagnético, relacionado ao afastamento do objeto. No caso em que $\lambda < \lambda_0$ (frequências maiores), temos o **desvio para o azul** (*blueshift*), que corresponde à aproximação do objeto.

Natureza quântica da luz

Além dos fenômenos puramente ondulatórios, ocorrem também outros processos, como a interação da radiação com a matéria na forma de átomos ou moléculas. Tais processos requerem que a radiação eletromagnética tenha características de pacotes discretos ou *quanta* (plural de *quantum*) de energia. No caso da luz visível, os quanta são chamados fótons, com sua energia dada por $E = h\nu$, onde $h = 6,63 \cdot 10^{-27}$ erg s (constante de Planck).

Espectro Eletromagnético

A luz das estrelas nos chega em forma de ondas eletromagnéticas, e essa radiação pode ser estudada em função de sua intensidade, numa dada faixa de comprimentos de onda, ou na forma de luz dispersada num espectro.

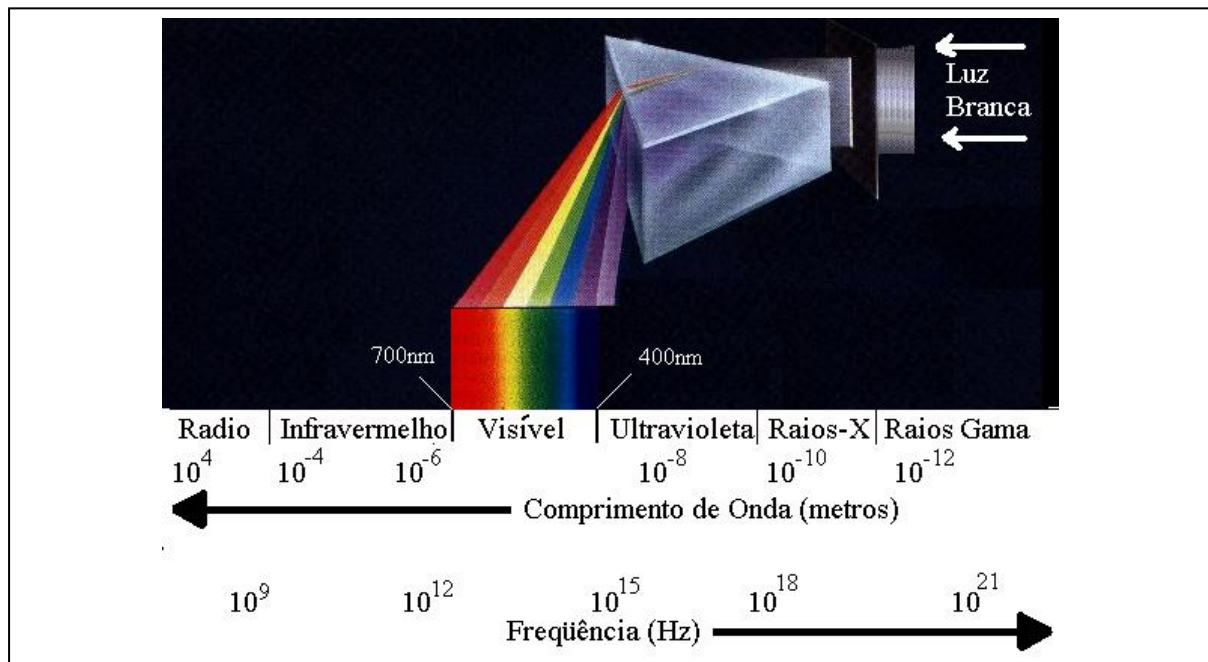


Figura 6. A luz branca, quando atravessa um prisma é decomposta em diferentes cores (vermelho, laranja, amarelo, verde, azul e violeta) da faixa visível.

O espectro eletromagnético na chamada faixa do visível cobre comprimentos de onda desde o violeta: 3900 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 0,1 \text{ nm}$) até o vermelho: 7200 \AA , a qual corresponde à radiação da luz solar, que pode ser decomposta em diferentes frequências.

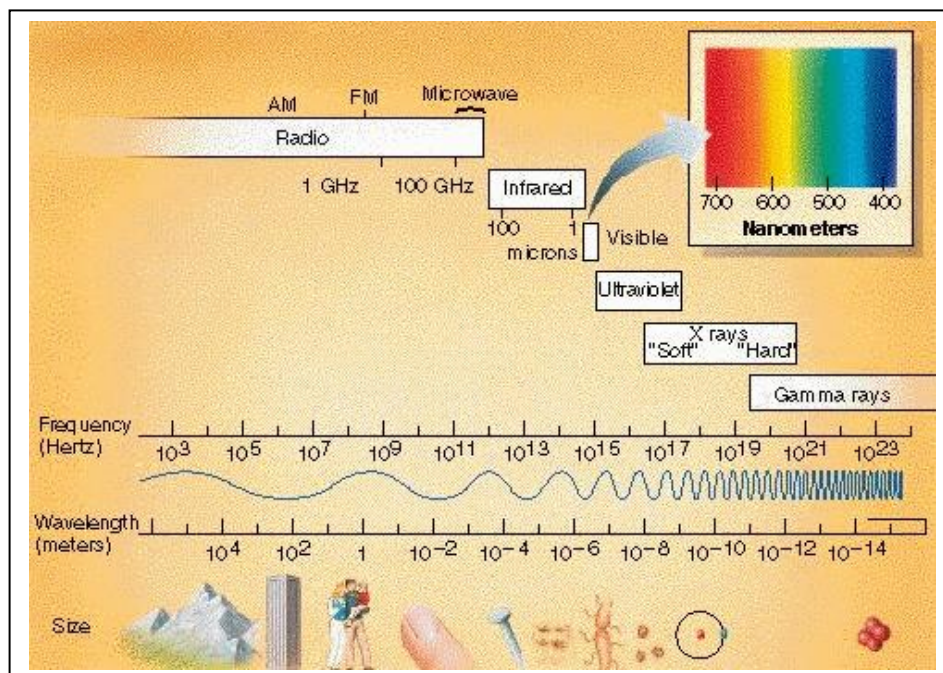
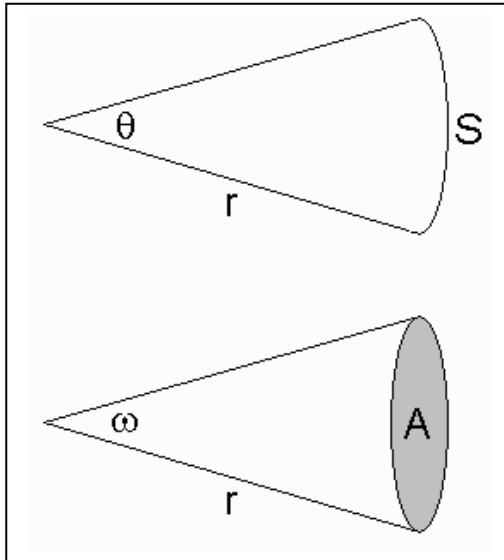


Figura 7. O espectro eletromagnético completo.

Faixa	Rádio	IV	Visível	UV	Raios-X	Raios-γ
λ (m)	10^5 10^{-1}	10^{-4} 10^{-5}	10^{-6}	10^{-7} 10^{-8}	10^{-9} 10^{-11}	10^{-12} 10^{-15}
Instrumento	Radiotelescópios	CCD		Satélites ou balões		

Fluxo e Luminosidade

Antes de descrevermos os principais parâmetros fotométricos, vamos relembrar alguns conceitos geométricos. Define-se ângulo sólido de um feixe de radiação em função da área A interceptada pelo feixe numa superfície esférica de raio r .



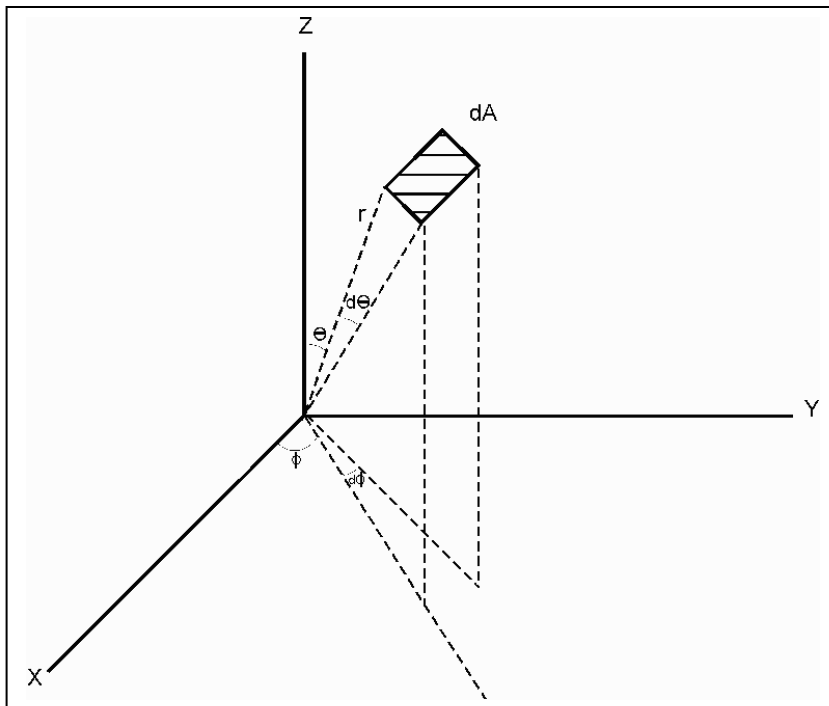
Da mesma forma que o ângulo de abertura entre duas linhas retas pode ser dado por: $\theta = S / r$ onde θ é medido em radianos ($\theta = 2\pi$ rad, se θ compreender toda circunferência ; perímetro = $2\pi r$),

podemos dizer que o ângulo sólido ω será a medida da abertura de um cone, dada por: $\omega = A / r^2$ onde ω é medido em esteradianos.

Se ω compreender toda a esfera $\Rightarrow \omega = 4\pi$ rad²
(área de superfície = $4\pi r^2$)

Figura 8. Medida de um ângulo de abertura θ em função do arco interceptado S ; medida de um ângulo sólido ω em função da área interceptada A .

Apresentando o ângulo sólido em coordenadas esféricas, temos:



área elementar
 $dA = (r d\theta) (r \sin\theta d\phi)$

ângulo sólido elementar
subtendido pela área dA :
 $d\omega = \sin\theta d\theta d\phi$

Figura 9. Medida de um ângulo sólido em coordenadas esféricas.

Considerando um elemento de área Δa , formando um ângulo θ com a normal, temos que a intensidade específica I_ν depende da posição, direção e do tempo.

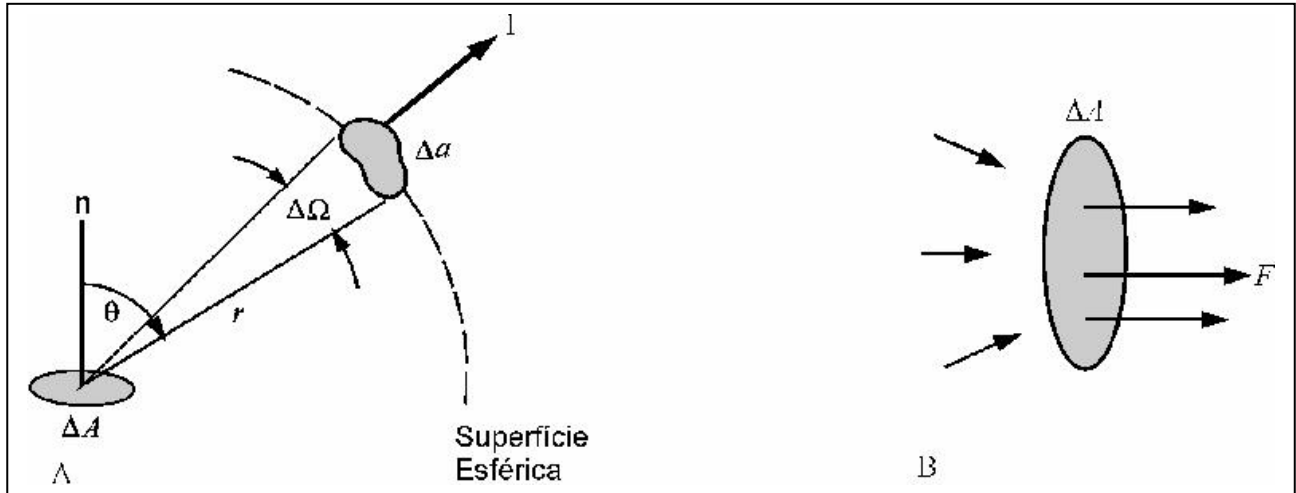


Figura 10. (A) Intensidade de energia por uma unidade de área ΔA da fonte emissora, que atravessa um elemento de área Δa . (B) Fluxo integrado resultante.

A intensidade (I) depende da direção e sua medida é definida como a *quantidade de energia emitida por unidade de tempo Δt , por unidade de área da fonte ΔA , por unidade de intervalo de freqüência $\Delta\nu$, por unidade de ângulo sólido em uma dada direção*:

$$dE = I_\nu \cos\theta dA d\nu d\omega dt$$

nas unidades: $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$.

A intensidade específica I_ν pode ser definida por intervalo de comprimento de onda λ sendo: $I_\nu d\nu = I_\lambda d\lambda$.

A intensidade *integrada* (compreende fótons de todas as freqüências) é dada por $I = \int I_\nu d\nu$.

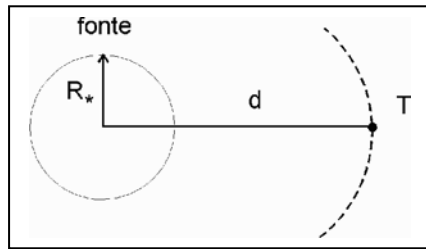
O fluxo é o parâmetro que se relaciona diretamente com a medida da energia coletada. O fluxo (F) de energia que chega numa superfície (ou num detector) é a *quantidade de energia por unidade de tempo que passa através de uma unidade de área da superfície por unidade de intervalo de freqüência*, dada por: $F_\nu = \frac{\text{energia}}{\Delta A \Delta t \Delta \nu}$, com unidades $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$.

O fluxo F_ν à uma dada freqüência, corresponde à soma das intensidades integradas em todo ângulo sólido:

$$F_\nu = \int I_\nu \cos\theta d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_\nu \cos\theta \sin\theta d\theta d\Phi.$$

O fluxo integrado em todas as freqüências será: $F = \int F_\nu d\nu$.

A intensidade aparente da luz emitida por uma fonte também depende da distância da fonte, pois quanto mais distante mais *fraca* ela deve aparecer.



Veamos o exemplo de uma estrela esférica de raio R_* , localizada a uma distância d do observador. A luminosidade L_* , que representa a energia total emitida em todas as direções, é representada pela potência irradiada $L = \frac{\Delta E}{\Delta t}$.

Figura 11. Luminosidade de uma estrela depende de seu raio e da distância até o observador.

O fluxo emitido na superfície da estrela $F(R_*)$ é expresso em termos de energia total por unidade tempo, por unidade de superfície: $F(R_*) = \frac{L_*}{4 \pi R_*^2}$.

A uma distância d , a luminosidade é dada por $L_* = 4 \pi d^2 F(d)$, desta forma, o fluxo observado é

$$F(d) = \left(\frac{R_*}{d} \right)^2 F(R_*).$$

EXERCÍCIOS

- (1) Considere uma onda produzida em um lago, cuja velocidade de deslocamento é de 20 cm/s. A distância entre dois máximos (cristas) é de 4 cm. Qual a frequência de oscilação dessa onda?
- (2) Dada a velocidade da luz $c = 3 \cdot 10^5$ km/s e a constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-27}$ erg · s, Calcule a frequência (em Hz) e a energia (em eV) para cada comprimento de onda, referente a diferentes regiões espectrais (1 eV = $1,60184 \cdot 10^{-12}$ erg):

Região	λ	ν (Hz)	E (eV)
Raios-X	3 Å		
Ultravioleta	200 Å		
Visível	5000 Å		
Infravermelho	25 μm		
Rádio	15 m		

- (3) A que comprimentos de onda serão observadas as seguintes linhas espectrais:
 - (a) A linha emitida a 500 nm por uma estrela se aproximando de nós a uma velocidade de 60 Km/s
 - (b) A linha de Ca II (comprimento de onda de laboratório 397 nm) emitida por uma Galáxia se afastando a 30000 km/s.
- (4) Uma nuvem de hidrogênio neutro (HI) emite a linha rádio de 21 cm (a frequência de repouso é 1420,4 MHz) enquanto se move com velocidade de afastamento de 150 km/s. A que frequência essa linha será observada?