

## 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:**

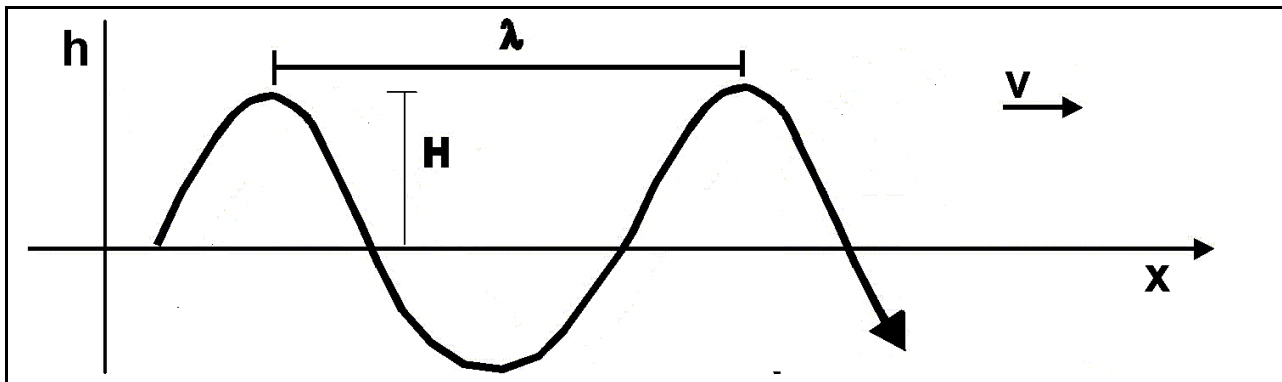
- Zeilik & Smith, 1987 “Introductory Astronomy & Astrophysics” (cap. 8 )
- Chaisson & McMillan, 1998 “Astronomy: a beginner’s guide to the Universe” (cap. 2)
- W.Maciel, 1991 “Astronomia e Astrofísica” – IAG/USP, (cap.8)

## 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  $h = H \operatorname{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]$ .

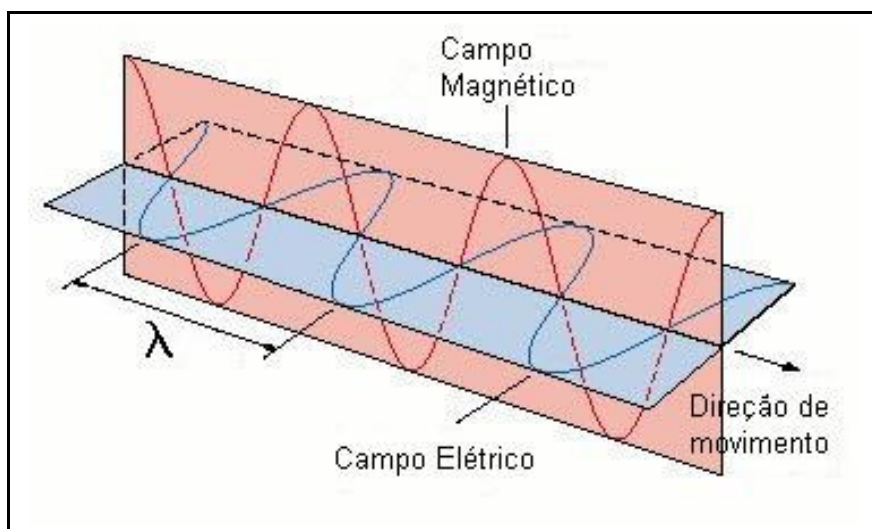
A propagação ao longo de uma dada direção é representada esquematicamente na Figura 1:



**Figura 1.** Propagação de uma onda de amplitude  $H$ , velocidade  $v$ , e comprimento da onda  $\lambda$ .

No tempo inicial ( $t=0$ ) a expressão para a altura será:  $h = H \operatorname{sen}\left[\frac{2\pi x}{\lambda}\right]$ , 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:  $h = H \operatorname{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\lambda}{4} - vt\right)\right]$ , 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 **freqüência** de oscilação é dada por  $\nu = \frac{v}{\lambda}$ .

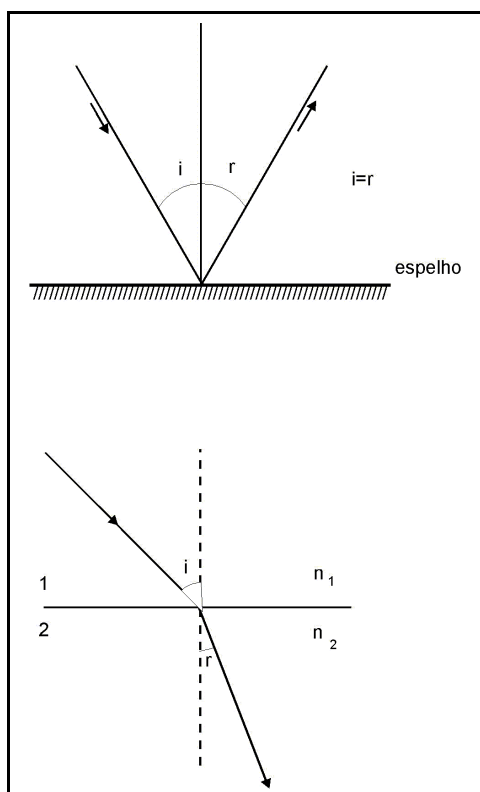
A velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas (variação do campo elétrico  $\vec{E}$  e do campo magnético  $\vec{B}$ ) no vácuo é a velocidade da luz  $c$  (da ordem de 300 000 Km/s). Quando se refere ao deslocamento da luz, sua frequência é expressa por  $v = c/\lambda$ .



**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:

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

**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 ( $\lambda$ ), 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**.

## 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).

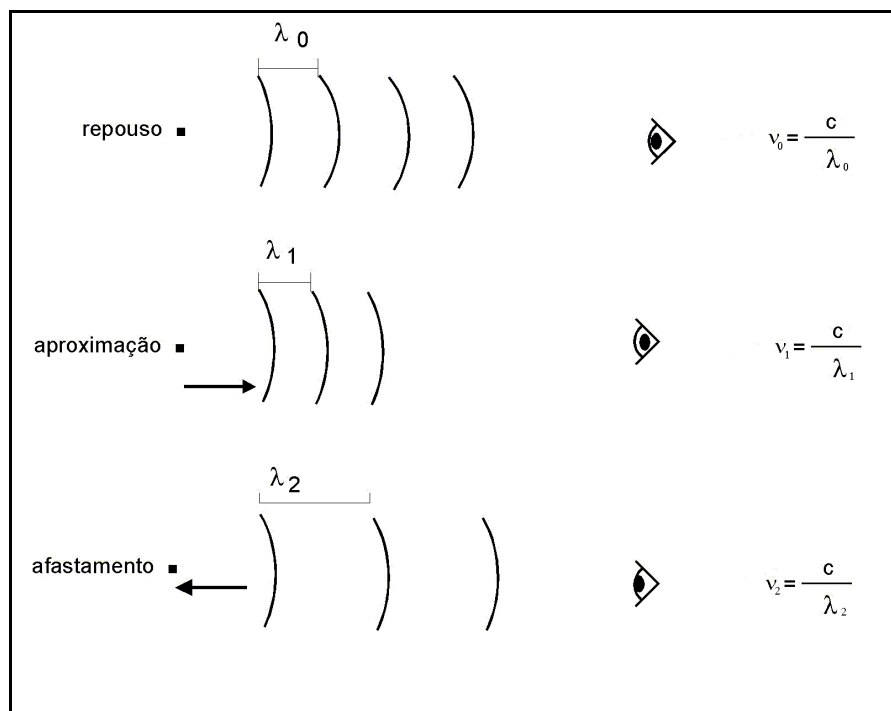
## Efeito Doppler

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  $\lambda_0$ .

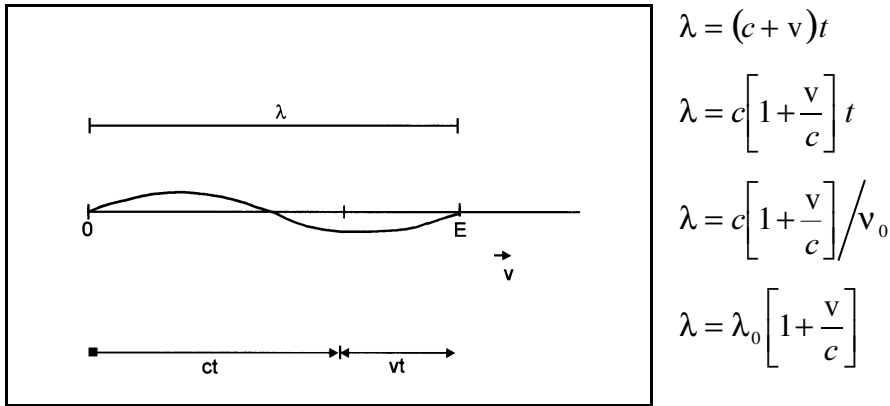
Se a fonte se aproximar do observador, o comprimento de onda observado será menor ( $\lambda_1 < \lambda_0$ ). Se  $\lambda$  diminuir, a frequência ( $\nu$ ) aumenta.

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



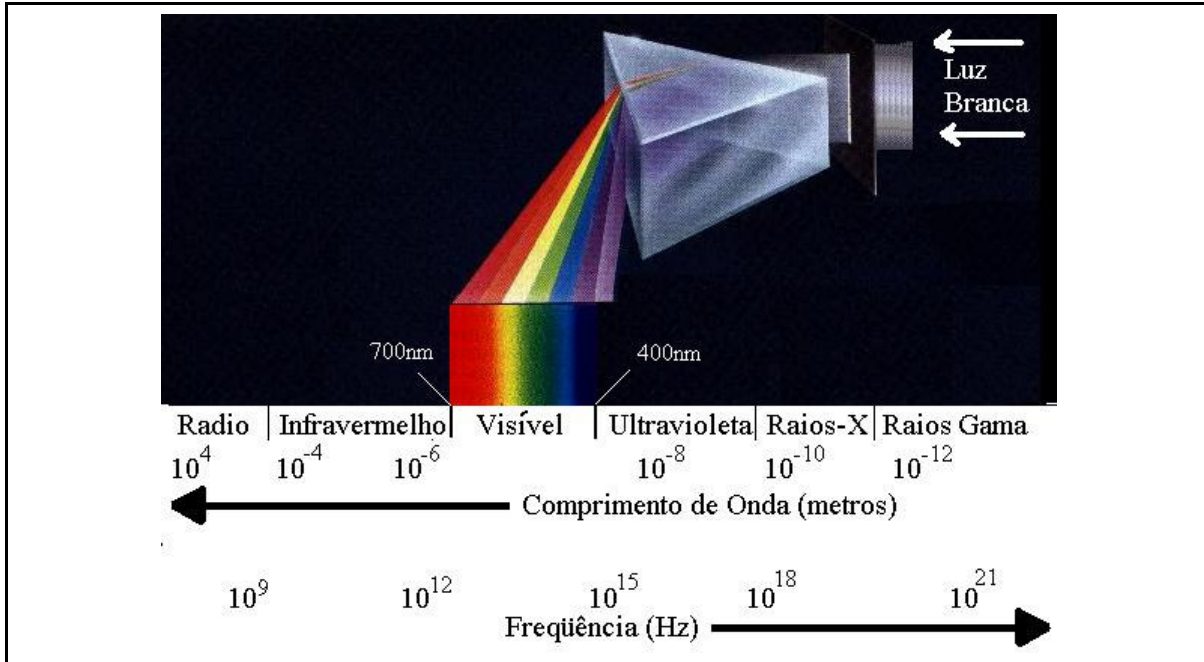
**Figura 5.** Comprimento de onda observado no caso de uma fonte emissora em afastamento.

Para determinar o quanto o comprimento de onda observado ( $\lambda$ ) desviou-se do emitido ( $\lambda_0$ ), 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  $\nu < \nu_0$ ) dizemos que ocorreu um **desvio para o vermelho** (*redshift*), cor que corresponde às menores freqüências na região do visível no espectro eletromagnético, relacionado ao afastamento do objeto. No caso em que  $\lambda < \lambda_0$  (freqüências maiores), temos o **desvio para o azul** (*blueshift*), que corresponde à aproximação do objeto.

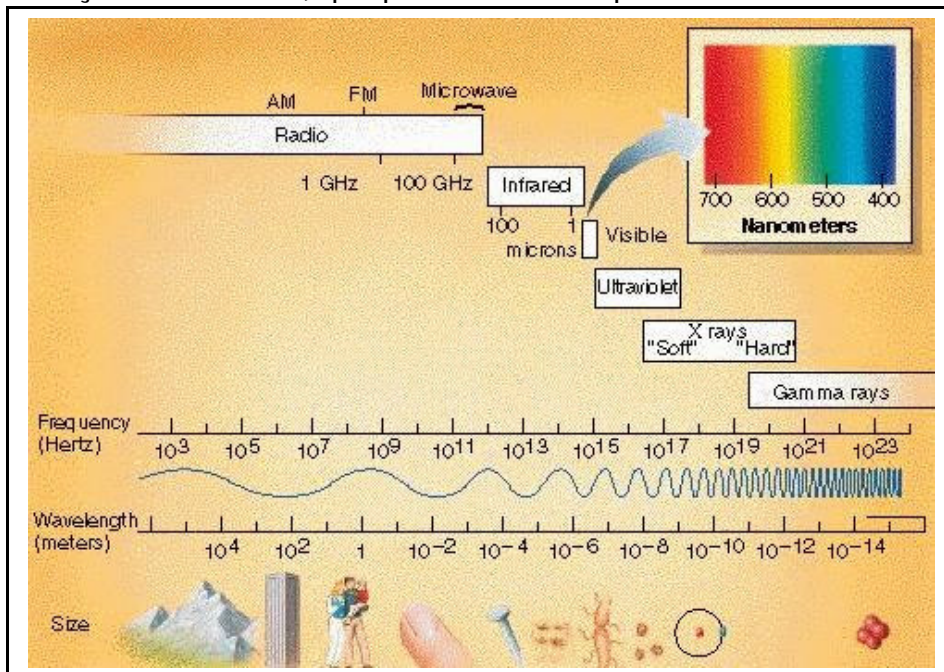
## Espectro Eletromagnético

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:  $3900 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 0,1 \text{ nm}$ ) até o vermelho:  $7200 \text{ \AA}$ , a qual corresponde à radiação da luz solar, que pode ser decomposta em diferentes frequências.

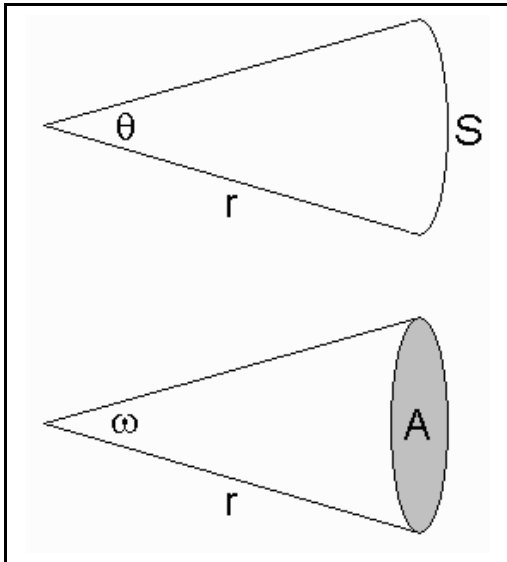


**Figura 7.** O espectro eletromagnético completo.

Faixa	Rádio	IV	Visível	UV	Raios-X	Raios- $\gamma$
$\lambda$ (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**.



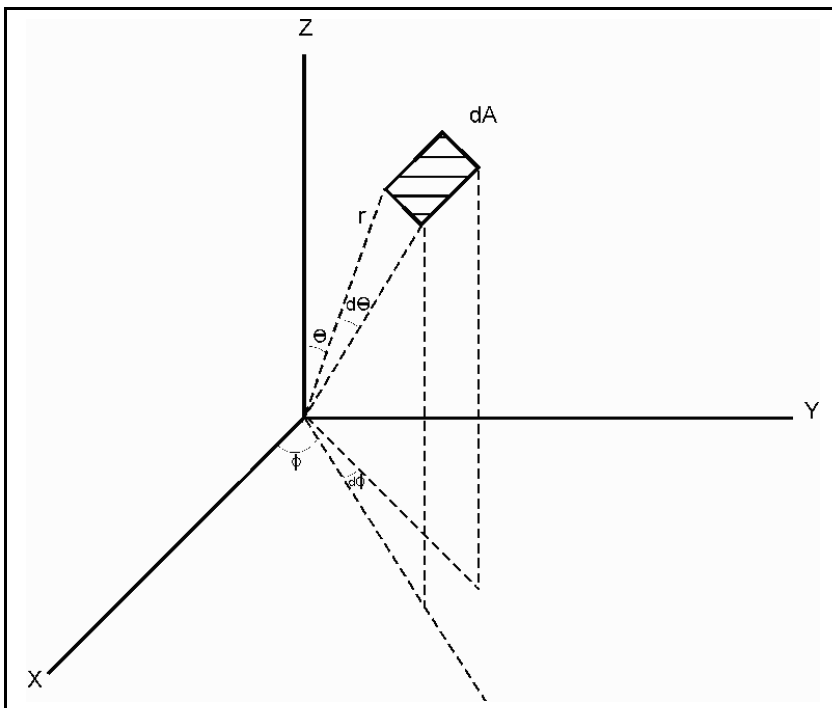
Da mesma forma que o ângulo de abertura entre duas linhas retas pode ser dado por:  $\theta = S / r$  onde  $\theta$  é medido em radianos ( $\theta = 2\pi$  rad, se  $\theta$  compreender toda circunferência ; perímetro =  $2\pi r$ ),

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

Se  $\omega$  compreender toda a esfera  $\Rightarrow \omega = 4\pi$  rad<sup>2</sup>  
(área de superfície =  $4\pi r^2$ )

**Figura 8.** Medida de um ângulo de abertura  $\theta$  em função do arco interceptado S; medida de um ângulo sólido  $\omega$  em função da área interceptada A.

Apresentando o ângulo sólido em coordenadas esféricas, temos:

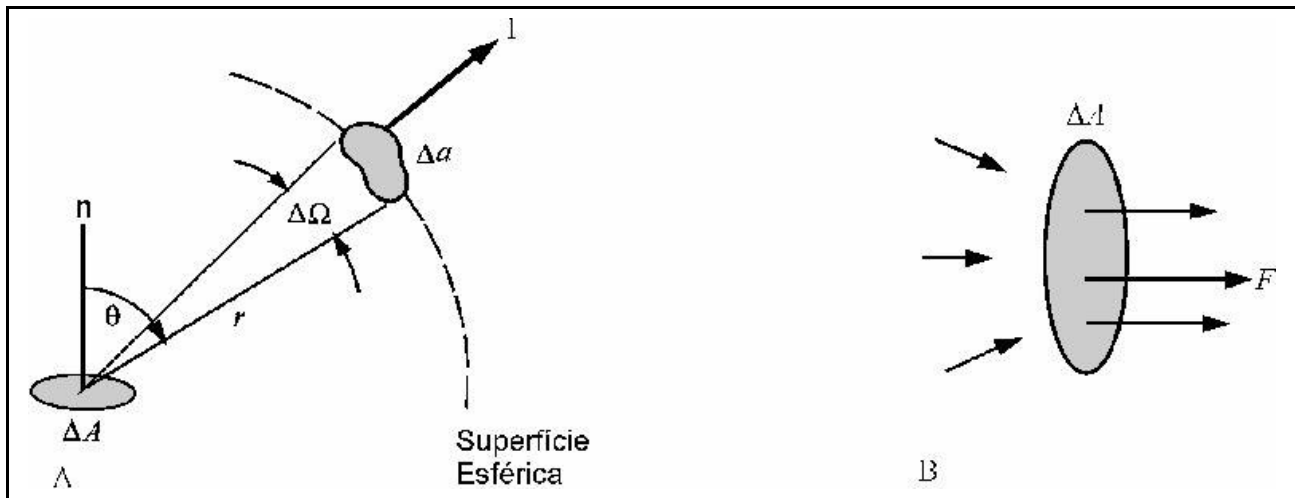


área elemental  
 $dA = (r d\theta) (r \text{sen}\theta d\phi)$

ângulo sólido elemental  
subtendido pela área dA:  
 $d\omega = \text{sen}\theta d\theta d\phi$

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

Considerando um elemento de área  $\Delta a$ , formando um ângulo  $\theta$  com a normal, temos que a intensidade específica  $I_\nu$  depende da posição, direção e do tempo.



**Figura 10.** (A) Intensidade de energia por uma unidade de área  $\Delta A$  da fonte emissora, que atravessa um elemento de área  $\Delta a$ . (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  $\Delta t$ , por unidade de área da fonte  $\Delta A$ , 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*  $I_\nu$  pode ser definida por intervalo de comprimento de onda  $\lambda$  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 detetor) 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  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$ .

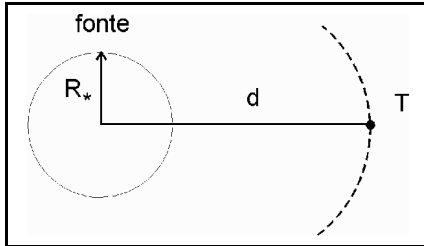
O fluxo  $F_\nu$  a uma dada freqüência, corresponde à soma das intensidades integradas em todo ângulo sólido:

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

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



O fluxo da luz emitida por uma fonte também depende da distância da fonte, pois quanto mais distante mais *fraca* ela deve aparecer (diminuindo com o inverso do quadrado da distância, como veremos abaixo).



Vejamos 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	$\lambda$	$\nu$ (Hz)	E (eV)
Raios-X	3 Å		
Ultravioleta	200 Å		
Visível	5000 Å		
Infravermelho	25 $\mu$ m		
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?