



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7177-PUD/38

CAPÍTULO 2
ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

Francisco José Jablonski^{*}

e-mail: chico@das.inpe.br

INPE
São José dos Campos
2003

ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

LISTA DE FIGURAS	2-5
2.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	2-7
2.1.1 O QUE QUER DIZER ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO?.....	2-7
2.1.2 ESPECTRO SONORO (OU ACÚSTICO)	2-8
2.1.3 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	2-9
2.1.4 ESPECTRO DE ONDAS GRAVITACIONAIS	2-13
2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E SEUS EFEITOS SOBRE O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	2-14
2.2.1 O MEIO AMBIENTE E O ESPECTRO ACÚSTICO.....	2-14
2.2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	2-15
2.3 DETETORES E TELESCÓPIOS	2-17
2.3.1 DETETORES DE ONDAS SONORAS	2-17
2.3.2 DETETORES E TELESCÓPIOS PARA ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	2-18

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - O ESPECTRO DO REI HAMLET.	2-7
FIGURA 2.2 - O ESPECTRO ACÚSTICO DE UM PIANO EM TORNO DA 3ª OITAVA.	2-8
FIGURA 2.3 - AS ONDAS ACÚSTICAS CORRESPONDENTES AO ESPECTRO SONORO DA FIGURA. 2.2.	2-9
FIGURA 2.4 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO NA REGIÃO DE FM.....	2-10
FIGURA 2.5 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	2-11
FIGURA 2.6 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO DE MATERIAIS A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	2-12
FIGURA 2.7 - A DILUIÇÃO DA ENERGIA DA ONDA COM A DISTÂNCIA À FONTE.....	2-14
FIGURA 2.8 - A ATENUAÇÃO DA LUZ DENTRO DA ATMOSFERA TERRESTRE.....	2-16
FIGURA 2.9 - AS JANELAS DE OBSERVAÇÃO A PARTIR DO SOLO.....	2-17
FIGURA 2.10 - UM DETETOR DE ONDAS ACÚSTICAS.....	2-17
FIGURA 2.11 - AUMENTANDO A SENSIBILIDADE DO DETETOR DE ONDAS SONORAS..	2-18
FIGURA 2.13 - UM TELESCÓPIO PARA DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIÇÃO DE FONTES CELESTES.	2-21

2.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.1.1 O QUE QUER DIZER ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO?

Hamlet é o nome de uma peça muito famosa escrita por William Shakespeare. A cena inicial é impressionante: os guardas de um castelo na Dinamarca vêem o *espectro* do rei Hamlet vagando pelas ameias durante a noite. A explicação para o aparecimento do fantasma fornece o enredo da peça, que contém sete mortes a golpes de espada, envenenamentos e afogamentos, loucuras verdadeiras e simuladas, um adultério, a caveira de um alegre bobo da corte desenterrada no momento oportuno e, é claro, um *espectro* fantasmagórico. No cinema, uma das montagens recentes tem Mel Gibson no papel de Hamlet. A cena inicial mostra o *espectro* do velho rei sob forma fosforescente e transparente.

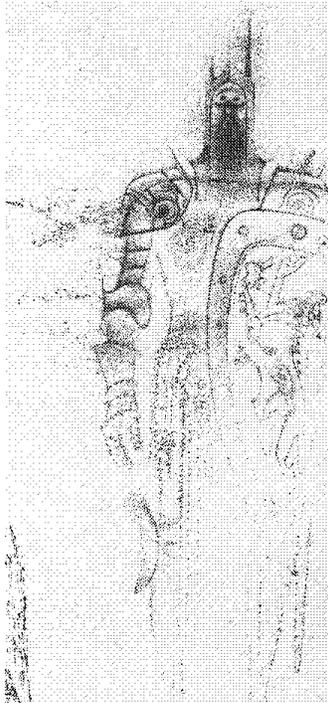


FIGURA 2.1 - O ESPECTRO DO REI HAMLET.

Quando falamos em **espectro eletromagnético**, não estamos falando de fantasmas. Ao contrário, falamos de algo bem concreto. Nas próximas seções você verá o que os dois conceitos têm em comum e, principalmente, no que são distintos.

2.1.2 ESPECTRO SONORO (OU ACÚSTICO)

Quem resiste apertar pelo menos uma tecla estando perto de um piano? Se apertarmos a 29ª tecla da esquerda para a direita (tecla lá, 3ª oitava), o som produzido é uma vibração de 440 ciclos por segundo. Mais tecnicamente, dizemos que a **freqüência** da onda sonora correspondente ao lá₃ é 440 Hertz, ou 440 Hz. As outras teclas nesta mesma oitava dão sons de 262 Hz (dó₃), 294 Hz (ré₃), 330 Hz (mi₃), 349 Hz (fá₃), 392 Hz (sol₃), 494 Hz (si). Para obter as freqüências das notas nas outras oitavas do piano, é só lembrar que de uma oitava para a oitava seguinte a freqüência dobra. Assim, o dó₄ tem 524 Hz de freqüência.

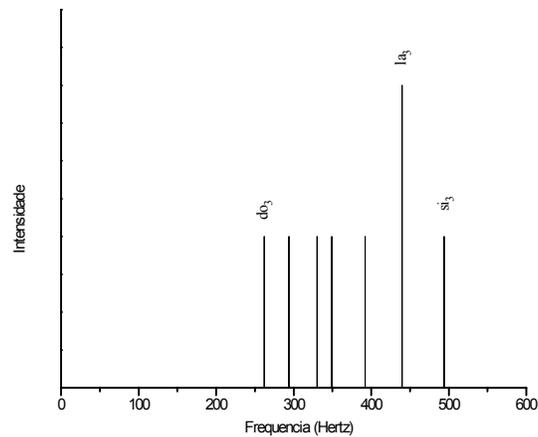


FIGURA 2.2 - O ESPECTRO ACÚSTICO DE UM PIANO EM TORNO DA 3ª OITAVA.

A Figura 2.2 mostra o espectro acústico do piano em torno da 3ª oitava. O eixo horizontal representa as freqüências, o eixo vertical, a intensidade do som. Note que se você golpear mais forte uma das teclas, o piano soará mais alto. Isso está representado na figura para a nota lá₃. A Figura 2.3 mostra o que aconteceria se tivéssemos um aparelho capaz de registrar a vibração das cordas do piano em um centésimo de segundo. Note que nesse intervalo de tempo o lá₃ executa $440/100 = 4,4$ oscilações.

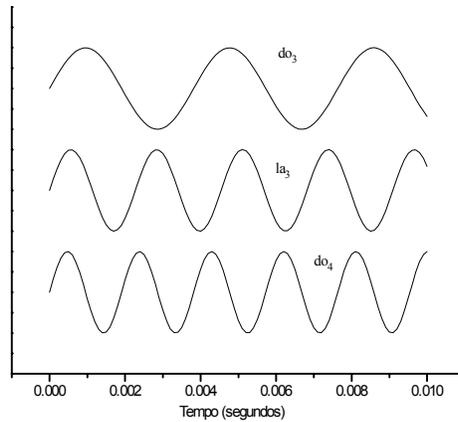


FIGURA 2.3 - AS ONDAS ACÚSTICAS CORRESPONDENTES AO ESPECTRO

SONORO DA FIGURA. 2.2.

Exercício: Tente imaginar como seria o espectro sonoro de uma apresentação ao vivo do Guns'n'Roses.

2.1.3 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Agora fica mais fácil visualizar o que é espectro eletromagnético. É um conceito semelhante ao mostrado nas Figs. 2.2 e 2.3, com a diferença que as vibrações não são mecânicas, como as das cordas do piano, mas vibrações **elétricas e magnéticas**. Quando dizemos que a rádio Tabajara transmite em AM na frequência de 780 quilohertz, estamos dizendo que na antena transmissora dessa rádio, existe corrente elétrica viajando de um lado para outro com frequência de 780 mil ciclos por segundo! Essa vibração produz ondas eletromagnéticas que deixam a antena e se propagam pelo espaço. Um receptor de rádio é capaz de captar essas ondas, de modo análogo ao nosso ouvido, que é capaz de captar o som do piano mesmo que estejamos longe dele.

Na Figura 2.4 é mostrado esquematicamente o espectro eletromagnético na faixa de FM em São José dos Campos. Note que foram deixadas muitas emissoras de fora, querendo expressar um profundo desejo de que não existissem.

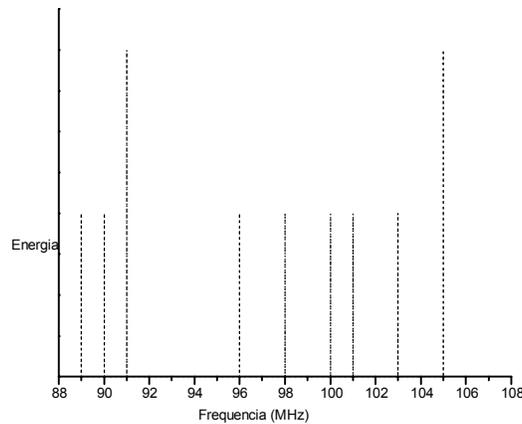


FIGURA 2.4 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO NA REGIÃO DE FM (88 A 108 MHz).

Do mesmo modo que para as ondas sonoras, a frequência das ondas eletromagnéticas também varia. E muito. Por volta de 1 milhão de Hertz temos as rádios AM. Entre 88 milhões de Hertz (de forma mais compacta, 88 Megahertz ou 88 MHz) e 108 MHz temos as frequências onde operam as emissoras de FM. Telefones celulares operam em frequências de quase 1 bilhão de Hertz (1 Gigahertz ou 1 GHz). A Figura 2.5 identifica outras formas de radiação eletromagnética. Note que nessa figura foi usada uma forma compacta de expressar os números enormes que aparecem quando falamos da frequência das ondas eletromagnéticas. A lógica é simples, veja: $1000 \text{ Hz} = 10^3 \text{ Hz}$, $10000 \text{ Hz} (10 \text{ kHz}) = 10^4 \text{ Hz}$, $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$, $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$. A luz que nos ilumina tem frequência entre 10^{14} e 10^{15} Hz .

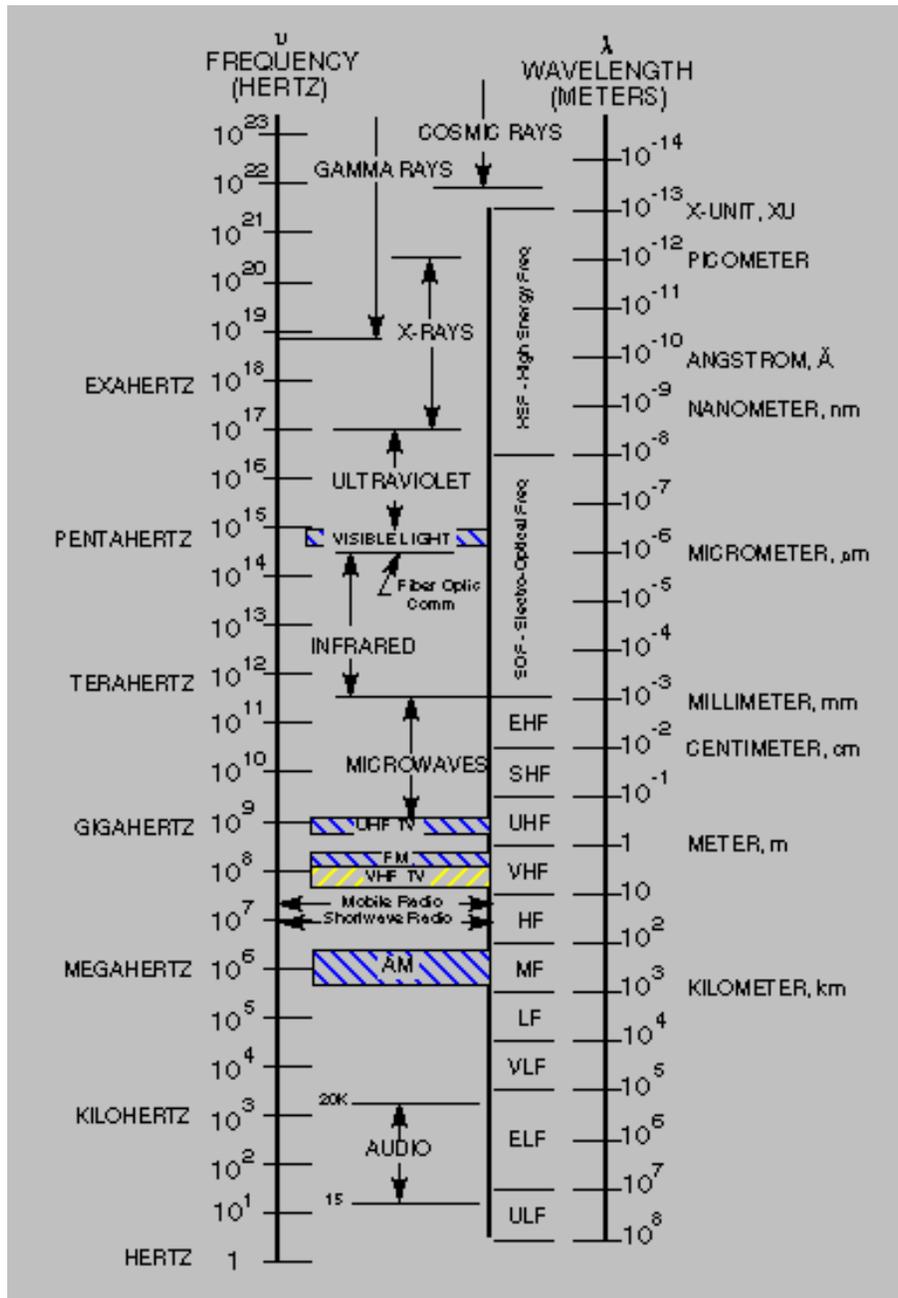


FIGURA 2.5 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.

O espectro emitido por uma fonte de radiação eletromagnética não precisa ser confinado a frequências bem definidas, como mostrado na Figura 2.4. A maioria dos objetos no céu emite em faixas amplas de frequência. Tecnicamente isso se chama de espectro “contínuo”. A analogia com o piano seria a seguinte: essas fontes se comportam como se fossem um piano eletromagnético de um número enorme de teclas, todas elas sendo tocadas ao mesmo tempo.

A Figura 2.6 mostra uma boa aproximação ao que é o espectro eletromagnético das estrelas: quanto maior é a temperatura mais energia é emitida por unidade de área e mais deslocado para o azul é o máximo do espectro. Os espectros reais diferem dos espectros mostrados na Fig. 2.6 pela presença de absorções e emissões localizadas devido aos elementos químicos que compõem as estrelas.

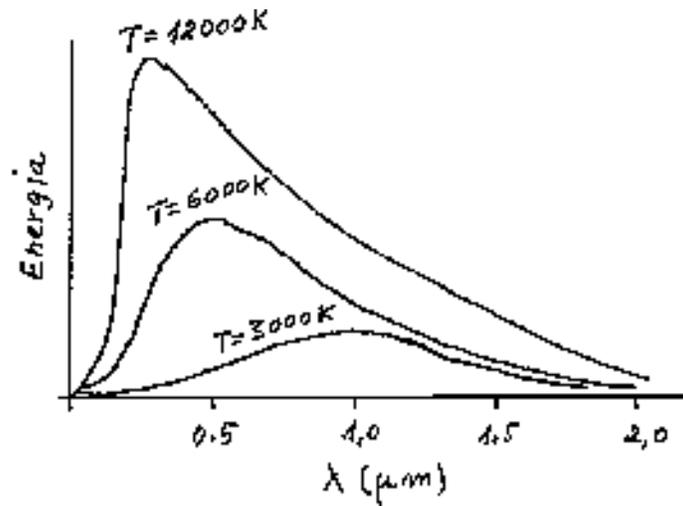


FIGURA 2.6 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO DE MATERIAIS A DIFERENTES TEMPERATURAS.

Para quem gosta de saber coisas mais avançadas, aqui vão duas fórmulas que são muito usadas em Física, Engenharia e Astronomia:

1) Relação entre a distância entre uma vibração e outra (comprimento) da onda eletromagnética e a frequência:

$$\text{comprimento de onda (metros)} = \text{velocidade da luz (m/s)} / \text{frequência (Hz)}$$

Numa forma mais compacta, usando símbolos matemáticos, podemos escrever:

$$\lambda = c / \nu \quad (2.1)$$

Exemplo: O que meu pai queria dizer quando dizia que ouvia a Rádio Gaúcha na faixa de 49 metros?

Resposta: Estava querendo dizer que essa rádio, transmitindo em 6 MHz, emite ondas eletromagnéticas cujos picos de intensidade são afastados uns dos outros por uma distância igual a

$$\text{comprimento de onda} = 300.000.000 / 6.000.000 = 49 \text{ m}$$

A fórmula acima contém uma informação muito importante: toda onda eletromagnética se propaga à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km/s, ou 3×10^8 m/s.

2) Energia das ondas eletromagnéticas

Uma das grandes descobertas da Física é a de que podemos entender as ondas eletromagnéticas como “pedacinhos” de onda (pacotes de onda) cada um carregando uma certa quantidade de energia:

$$\text{Energia (Joule)} = 6.6 \times 10^{-34} \times \text{frequência (Hz)}$$

ou, em forma matemática,

$$\mathbf{E = h \nu} \quad \mathbf{(2.2)}$$

sendo h o símbolo para a **constante de Planck**.

Exemplo: A Rádio Bandeirantes irradia 660 kW de energia em ondas eletromagnéticas na frequência de 1 MHz. Quantos “pacotinhos” de radiação eletromagnética isso dá por segundo?

Resposta: 660 kW é o mesmo que 660.000 Joule/segundo. Então o número de pacotes é

$$660.000 / (6.6 \times 10^{-34} \times 10^6) = 10^{33} \text{ pacotes !!!}$$

2.1.4 ESPECTRO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Existe um outro tipo de onda na natureza que é diferente das ondas sonoras e das ondas eletromagnéticas. São as **ondas gravitacionais**. Elas também se propagam com a velocidade da luz, mas em vez de serem produzidas por cargas elétricas em movimento, são produzidas por **massas em movimento**. Essas ondas ainda não foram detectadas diretamente, mas isso deverá acontecer nas próximas décadas. Uma fonte importante de ondas gravitacionais são os sistemas binários do tipo Terra-Lua ou estrela-estrela. Pode-

se dizer que a nossa Galáxia é um imenso piano com alguns bilhões de teclas, cada uma delas constantemente apertadas produzindo ondas gravitacionais cuja frequência é proporcional à frequência com que a binária gira. O estudo do espectro das ondas gravitacionais é um dos desafios para os astrofísicos do século 21.

2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E SEUS EFEITOS SOBRE O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.2.1 O MEIO AMBIENTE E O ESPECTRO ACÚSTICO

Os moradores da Vila São Benedito que tentaram ouvir as músicas cantadas por Chitãozinho e Xororó durante o Vale Rodeio perceberam que a intensidade do som diminui muito à medida que o observador se afasta da fonte sonora. É muito difícil ouvir um piano a um quilômetro de distância, por mais quieto que seja o ambiente. A razão é explicada na Fig. 2.7, em que uma pedra é jogada num lago e um barquinho, colocado à diferentes distâncias, é chacoalhado pela onda que se propaga. Note que quando o barco está distante, a fração do círculo interceptado pelo barco diminui. De modo geral, a energia recebida por um detetor de ondas **diminui com a distância à fonte**. Se a fonte emite em **todas as direções no espaço**, a energia **diminui com o quadrado da distância à fonte**.

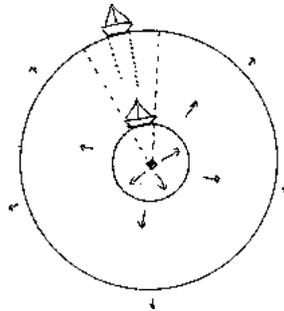


FIGURA 2.7 - A DILUIÇÃO DA ENERGIA DA ONDA COM A DISTÂNCIA À FONTE.

O observador perspicaz percebe também que certas frequências sonoras são mais atenuadas que outras. Isso quer dizer que devem existir outros fatores que produzem diminuição da intensidade das ondas. Um deles é a **absorção**. Um exemplo de absorção

entre o observador e a fonte de ondas sonoras é uma parede. No caso de edifícios de apartamentos, nem sempre a absorção suprime completamente o som.

2.2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

As ondas eletromagnéticas sofrem efeitos parecidos com os descritos para as ondas sonoras. Para começar, a quantidade de energia que chega até nós cai com o quadrado da distância. Veja Alfa Centauri, por exemplo. É uma estrela mais ou menos como o Sol, mas pelo fato de estar a 4,3 anos luz de distância, a quantidade de energia que chega até nós é

$$(\text{distância [Alfa Centauri]}/\text{distância [Sol]})^2 = (4 \times 10^{16} \text{ m}/1,5 \times 10^{11} \text{ m})^2 = 7 \times 10^{10}$$

ou seja, 70 bilhões de vezes menor que a recebida de nosso Sol.

A radiação eletromagnética também é absorvida pela atmosfera. No caso da luz, isso é bem fácil de ver com o seguinte exemplo. Ao meio-dia, não conseguimos olhar para o Sol (mesmo que conseguíssemos, não seria saudável fazê-lo). Mas ao por-do-Sol, é muito fácil fazê-lo. É que ao entardecer a luz tem que atravessar um caminho muito mais longo dentro da atmosfera e sofre maior atenuação. Veja esquematicamente na Figura 2.8 como isso acontece. A luz também sofre atenuação diferente em frequências diferentes. A luz vermelha é menos atenuada que a luz azul, de modo que vemos o Sol avermelhado ao entardecer porque só a luz vermelha chega até nós. O principal processo físico em jogo nesse caso é o **espalhamento**, que explica também a cor azul do céu sem nuvens. A luz pode ser atenuada também por **absorção pura** em raios atômicas ou bandas moleculares. Nesse caso, as frequências envolvidas são muito bem definidas e representam uma espécie de “impressão digital” do átomo ou molécula que a produziu.

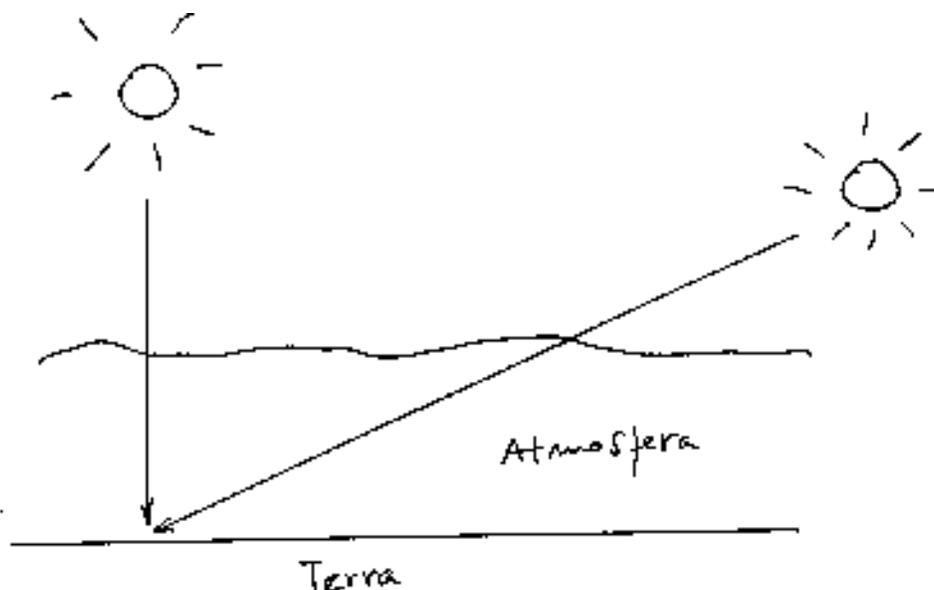


FIGURA 2.8 - A ATENUAÇÃO DA LUZ DENTRO DA ATMOSFERA TERRESTRE.

Algumas moléculas na nossa atmosfera absorvem quase toda a radiação que chega de fora em certas faixas de frequência, de modo que muito pouco chega até o chão. Isso tem importância vital para os seres que povoam a Terra. A molécula composta por três átomos de Oxigênio (chamada Ozônio) bloqueia a luz ultravioleta que em excesso, é mortal aos seres vivos (os dentistas usam lâmpadas ultravioleta para desinfetar suas ferramentas de trabalho). Há uma grande preocupação hoje em dia com os efeitos da destruição da barreira protetora de Ozônio que envolve a Terra, em virtude de reações químicas com produtos produzidos pelo homem.

Se por um lado estamos vivos porque a atmosfera da Terra nos protege das radiações nocivas, por outro, a própria atmosfera impede que observemos do solo certas frequências do espectro eletromagnético, emitidas pelos corpos celestes. Isto ocorre no ultravioleta, raios X, raios-gama, infravermelho e rádio. A Figura 2.9 mostra as “janelas” no espectro eletromagnético pelas quais podemos observar o Universo a partir de observatórios no chão. Para observar a radiação eletromagnética nas regiões absorvidas pela atmosfera a única solução é colocar o “observador” fora dela! Essa é uma das razões pelas quais o Telescópio Espacial Hubble foi colocado em órbita. O

INPE opera um centro de lançamento de balões que consegue levar instrumentos a mais de 40 km de altura, deixando para trás 99% da atmosfera.

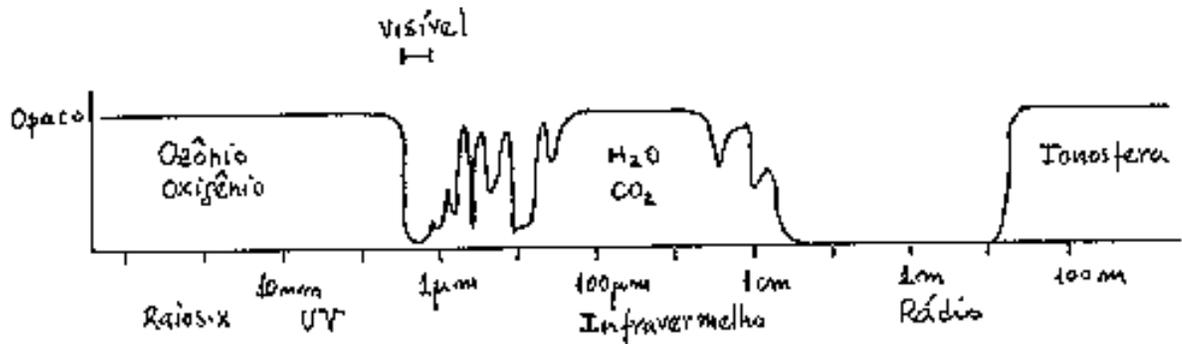


FIGURA 2.9 - AS JANELAS DE OBSERVAÇÃO A PARTIR DO SOLO.

2.3 DETETORES E TELESCÓPIOS

2.3.1 DETETORES DE ONDAS SONORAS

A Figura 2.10 mostra um detetor de ondas sonoras, o ouvido. Note que a orelha não tem um papel significativo na detecção dos sons. É o ouvido, em particular o tímpano, que tem essa função. O tímpano é uma espécie de membrana, como a membrana de um tambor, que vibra quando atingida pelas compressões de ar produzidas por ondas sonoras.

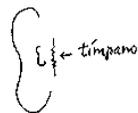


FIGURA 2.10 - UM DETETOR DE ONDAS ACÚSTICAS.

A vibração do tímpano é processada pelo nosso cérebro que analisa o espectro de frequências. Combinando os sinais de dois detetores (um ouvido de cada lado da cabeça) o cérebro é capaz de saber a orientação da fonte de sons. Caso o detetor perca a

sensibilidade, como ocorreu com o meu avô à medida que foi envelhecendo, é possível realizar uma compensação como a mostrada na Figura 2.11 (a). O objetivo desse aparelho é aumentar a área coletora de ondas acústicas. Uma outra solução para o mesmo problema é mostrada na Fig. 2.11 (b): em vez de aumentar a área coletora, o sinal recebido é *amplificado* por um circuito eletrônico.

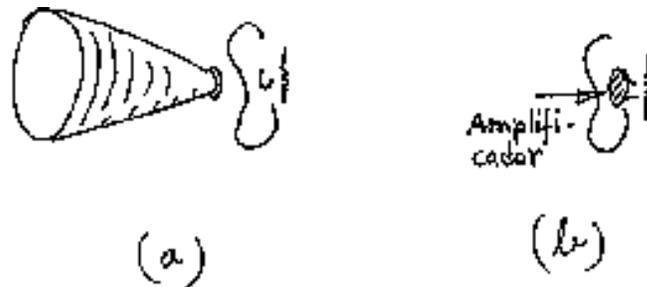


FIGURA 2.11 - AUMENTANDO A SENSIBILIDADE DO DETETOR DE ONDAS SONORAS.

Embora o ouvido humano seja um detetor magnífico, ele é superado por detetores como os microfones que podem registrar sons de frequências mais altas e mais baixas que as que conseguimos ouvir. Podem registrar também intensidades sonoras maiores e menores do que as que conseguimos captar com o ouvido.

2.3.2 DETETORES E TELESCÓPIOS PARA ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

O detetor mais aprimorado que possuímos é o olho. A combinação olho+cérebro faz simultaneamente uma análise do espectro da luz e sua distribuição espacial e de intensidade. O olho produz imagens. O princípio de detecção é baseado em células especializadas que enviam sinais elétricos ao cérebro quando são atingidas por luz.

Como vimos antes, o espectro eletromagnético cobre uma vasta faixa de frequências. O princípio de detecção pode ser diferente para diferentes frequências. Nos detetores de ondas de rádio, por exemplo, o que se mede é o deslocamento de cargas elétricas num condutor, na presença da onda eletromagnética. Esse condutor se chama antena e pode ter formas variadas, mas o objetivo é sempre o mesmo, oferecer uma área exposta à

onda eletromagnética. Quanto maior a área da antena, mais energia eletromagnética pode ser captada. O INPE opera um rádioobservatório que possui uma antena parabólica de 13 metros de diâmetro capaz de observar ondas de rádio em frequências de dezenas de gigahertz.

Nas frequências correspondentes à luz visível, os detectores são capazes de registrar os pacotes individuais de energia associados às ondas eletromagnéticas. Esses pacotes são chamados de **fótons**. O detector que existe dentro de uma câmara de videocassete tem semelhança com o detector no nosso olho, ou seja, é capaz de registrar e discriminar luz de frequências diferentes, e pelo fato de ser dividido em muitas células básicas, pode fornecer informação da direção da fonte emissora de luz.

Mas, para que então precisamos de telescópios? Não bastaria o detector sozinho para registrar a intensidade, frequência e direção da radiação eletromagnética? A resposta está relacionada com o exemplo da Fig. 2.11 (a). Em Astronomia é quase a regra estarmos na situação do surdo -- não por falta de sensibilidade do detector, uma vez que os mais elaborados sistemas de amplificação (Fig. 2.11b) são utilizados -- mas porque as fontes celestes de radiação são extremamente fracas. A única maneira de remediar é aumentar a área coletora de radiação. Esses aparelhos se chamam genericamente de **telescópios** ou **antenas**, conforme a faixa do espectro que estiver sendo estudada. Na Divisão de Astrofísica do INPE existem pesquisas em andamento utilizando telescópios para ondas de rádio, para luz visível, para raios X e até mesmo para ondas gravitacionais!

A Figura 2.12 ilustra os problemas que encontramos quando tentamos determinar a intensidade, e direção da radiação eletromagnética com um mesmo instrumento.

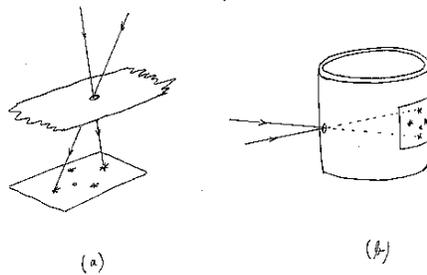


FIGURA 2.12 - DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

A Fig. 2.12 (a) mostra o “telescópio” mais simples que pode ser construído. Ele funciona tanto para ondas de rádio quanto para luz, raios X ou raios gama. O único requisito é que as dimensões da abertura sejam bem maiores que o comprimento de onda da radiação. Esse tipo de montagem já teve muita popularidade em um contexto não científico. Antes do advento da fotografia as “câmaras obscuras” eram utilizadas para projetar imagens em vidros despolidos (foscos) e servir de guia para o artista na pintura de panoramas. Quanto menor for a razão entre o tamanho da abertura e a distância ao detetor, mais detalhe o instrumento é capaz de discernir. A maior desvantagem desse tipo de “telescópio” é que a área coletora é muito pequena. A Fig. 2.12 (b) mostra como você pode montar uma câmara escura para demonstração em sala de aula. Lembre que para esse tipo de aparelho funcionar bem é importante que a tela semitransparente receba o mínimo possível de luz externa. Na Divisão de Astrofísica do INPE está sendo construído um telescópio de raios X que utiliza o princípio de funcionamento da câmara escura. Para melhorar sua capacidade de captar energia o anteparo de entrada contém uma grande quantidade de furos e as imagens completamente embaralhadas que são projetadas na tela de saída são separadas através de um programa no computador.

Galileo Galilei foi o responsável pela divulgação de uma invenção que resolveu os problemas de registrar a direção de chegada da luz e ao mesmo tempo, captar o máximo de luz possível. Trata-se do uso de uma *lente*. A lente é capaz de ter uma área coletora muito maior que a da abertura circular mostrada na Fig. 2.12, mantendo a capacidade de

separar raios vindos de direções diferentes. Nas lojas de “1,99” você pode comprar uma lupa de plástico que permite fabricar o telescópio mostrado na Figura 2.13.

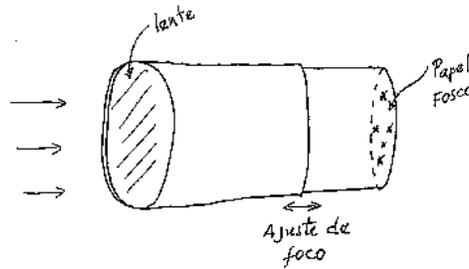


FIGURA 2.13 - UM TELESCÓPIO PARA DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIAÇÃO DE FONTES CELESTES.

Para determinar o comprimento do canudo que compõe a parte externa do telescópio, meça primeiro a distância da lente em que uma fonte de luz (lâmpada dentro de casa) forma uma imagem bem definida. Se você utilizar dois canudos, um podendo se deslocar com relação ao outro, pode focalizar precisamente seu instrumento. Se em vez do papel semitransparente você tivesse um filme fotográfico na parte posterior do dispositivo, o aparelho se chamaria “câmara fotográfica”.

O telescópio de 1,6 m de diâmetro no Laboratório Nacional de Astrofísica, em Brazópolis, MG, funciona exatamente segundo o mesmo princípio, apenas que em vez de uma lente para focalizar a luz, possui espelhos. Os espelhos são vantajosos porque não absorvem luz como as lentes, e podem ser construídos com dimensões muito grandes. O Brasil é sócio, com uma fração de 2,5% do capital, de dois telescópios de 8 metros de diâmetro cada um. Trata-se do Projeto Gemini que envolve os Estados Unidos, Inglaterra, Chile, Argentina e Brasil. Um dos telescópios funcionará nos Andes chilenos e o outro numa montanha de 4200 m de altitude, no Havaí.

Exercício: Quantas vezes mais luz um telescópio do Projeto Gemini é capaz de captar com relação ao telescópio instalado em Brazópolis?

Resposta: A capacidade de captar radiação é proporcional à área. A área de um círculo é igual a $0,787 \times (\text{diâmetro})^2$. Então,

$$\text{Gemini} / \text{Brazópolis} = 0,787 \times 8^2 / (0,787 \times 1,6^2) = 25 \text{ vezes mais luz.}$$