

Capítulo 2

ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

FRANCISCO JOSÉ JABLONSKI

f.jablonski@gmail.com

Sumário

2	Astrofísica Observacional	9
2.1	O Espectro Eletromagnético	9
2.1.1	O que quer dizer espectro eletromagnético	9
2.1.2	Espectro sonoro (ou acústico)	10
2.1.3	O espectro eletromagnético (EM)	12
2.1.4	Espectro de ondas gravitacionais	21
2.2	Efeitos de diluição de ondas e radiação	23
2.2.1	O meio ambiente e o espectro acústico	23
2.2.2	A atmosfera da terra e o espectro eletromagnético	25
2.3	Detectores e telescópios	28
2.3.1	Detectores de ondas sonoras	28
2.3.2	Detectores e telescópios para ondas eletromagnéticas	28

Lista de Figuras

- 2.1 O "espectro" do rei Hamlet. 9
- 2.2 O espectro acústico de um piano na 4^a oitava. 11
- 2.3 As ondas acústicas correspondentes ao espectro sonoro da figura 2.2 11
- 2.4 O espectro de ondas acústicas no Sol e em Alfa do Centauro (<https://www2.hao.ucar.edu/hao-science/sun-dynamo-0>) . . . 12
- 2.5 O espectro da emissão das rádios na região de FM. Fonte: autor 13
- 2.6 O espectro eletromagnético. Note as unidades, 1 nm = 0,000000001 metros, ou $10^{-9} m$. Fonte: <https://commons.wikimedia.org> 15
- 2.7 O primeiro exoplaneta imageado diretamente, na estrela 2M1207, com o exoplaneta 2M1207b (mais vermelho) próximo. Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/2M1207> 17
- 2.8 O espectro eletromagnético aproximado de estrelas a diferentes temperaturas. Obtido em: <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/Blackbody+Radiation>
- 2.9 O espectro real de alguns tipos de estrelas. A temperatura diminui de baixo para cima, mais ou menos seguindo a cor dominante das estrelas. Compare com a figura 2.8. <http://www.jb.man.ac.uk/distance/life/sample>

2.10	Um sistema binário com a representação do deslocamento Doppler da linha espectral de um mesmo elemento à medida que as estrelas se movem em órbita. Fonte: http://astro.if.ufpr.br/bin/binarias.htm . 21	21
2.11	A primeira detecção de ondas gravitacionais. Os gráficos em vermelho e azul referem-se aos dois observatórios separados de 4000 quilômetros. Os painéis de baixo mostram como a frequência das oscilações foi mudando com o tempo. Fonte: Wikipedia. 22	22
2.12	A diluição da energia da onda (por unidade de comprimento) com a distância à fonte. 24	24
2.13	A diluição da energia (por unidade de área) com a distância à fonte. De: http://projetosfisicaexperimental.blogspot.com.br/2016/03/leido-inverso-do-quadrado-da-distancia.html 24	24
2.14	O caminho mais longo produz atenuação da luz ao atravessar a atmosfera terrestre. Fonte: autor 26	26
2.15	As janelas de observação a partir do solo. Obtido em: http://www.lna.br/museuvirtual/evolucao.html 27	27
2.16	Uma das 50 antenas do radiotelescópio BINGO, em construção na DAS/INPE. Fonte: L. Reitano. 30	30
2.17	Exemplo de uma câmara pinhole, ilustrando a determinação da intensidade e direção da radiação eletromagnética. 31	31
2.18	Passo a passo de como construir uma câmara pinhole. Obtida em https://www.jornalufgonline.ufg.br/n/30640-camera-pinhole 32	32
2.19	O telescópio ProtoMirax para raios X, com o padrão de aberturas na parte superior. Fonte: autor. 33	33

2.20	Esquema de um telescópio simples. Fonte: autor.	33
2.21	O telescópio de 1,6-m de diâmetro do Laboratório Nacional de Astrofísica, no Pico dos Dias, Sul de Minas Gerais. Fonte: autor.	34
2.22	Visão artística de como será o GMT, com abertura de 26-m de diâmetro. Fonte: https://www.gmto.org/	35

2.1 O Espectro Eletromagnético

2.1.1 O que quer dizer espectro eletromagnético

Hamlet é o nome da peça muito famosa escrita por William Shakespeare. A cena inicial é impressionante: Os guardas de um castelo na Dinamarca vêm o espectro do Rei 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, adultério, a caveira de um alegre bobo da corte desenterrada no momento oportuno e, claro, um *espectro* fantasmagórico. No cinema, uma das montagens mais famosas tem Mel Gibson no papel de Hamlet. A cena inicial mostra o espectro do velho Rei sob a 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 sessões 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 vigésima nona tecla da esquerda para a direita (tecla lá, 4ª oitava), o som produzido é uma vibração de 440 ciclos por segundo¹. Tecnicamente, dizemos que a frequência da onda sonora correspondente ao lá₄ é 440 Hertz ou 440 Hz. As outras teclas nesta mesma oitava dão sons de dó₄ 262 Hz, ré₄ 294 Hz, mi₄ 330 Hz, fá₄ 349 Hz, sol₄ 392 Hz, si₄ 494 Hz. Para obter as frequências das notas nas outras oitavas do piano, é só lembrar que de uma oitava para a oitava seguinte a frequência dobra. Assim, o dó₅ tem 524 Hz de frequência.

A figura 2.2 mostra o espectro acústico do piano em torno da 4ª oitava. O eixo horizontal representa as frequências, 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 lá₄.

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 a nota lá executa $440/100 = 4,4$ oscilações.

Exercício: Tente imaginar como seria o espectro sonoro de uma apresentação ao vivo da sua banda favorita de rock.

¹Note que existe uma convenção em que esta nota está na terceira oitava, mas isto é irrelevante aqui.

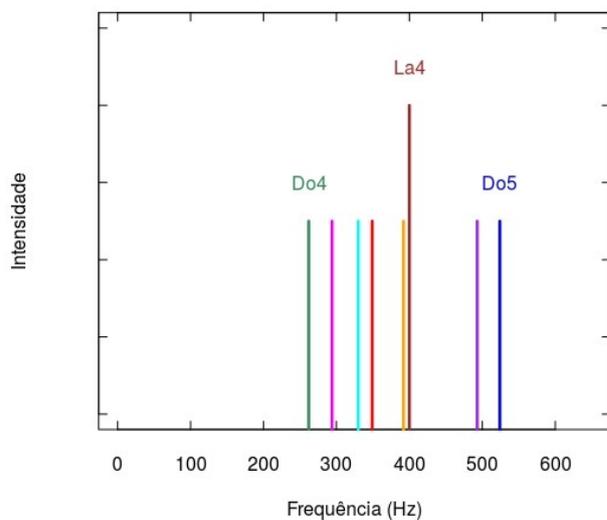


Figura 2.2: O espectro acústico de um piano na 4^a oitava.

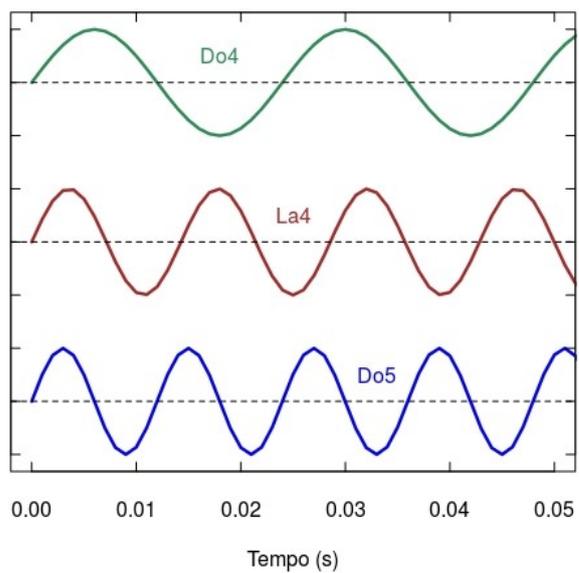


Figura 2.3: As ondas acústicas correspondentes ao espectro sonoro da figura 2.2

A figura 2.4 mostra um outro exemplo de espectro acústico: tanto o nosso Sol quanto a vizinha Alfa do Centauro oscilam num conjunto de frequências entre 4 – 6 minutos, como se fossem enormes sinos vibrando continuamente.

O estudo das frequências de vibração das estrelas chama-se *Astrosismologia* e permite conhecer detalhes muito finos da estrutura interna delas.

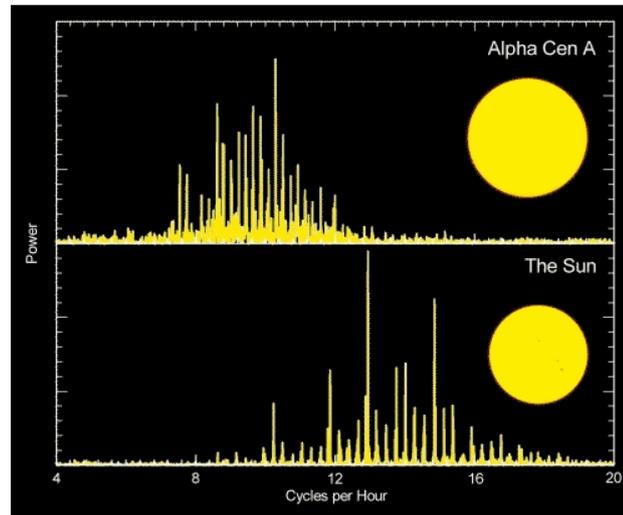


Figura 2.4: O espectro de ondas acústicas no Sol e em Alfa do Centauro (<https://www2.hao.ucar.edu/hao-science/sun-dynamo-0>)

2.1.3 O espectro eletromagnético (EM)

Agora fica mais fácil visualizar o que é espectro eletromagnético (EM). É um conceito semelhante ao mostrado nas figuras 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 uma rádio transmite em AM na frequência de 780 quilo-hertz, 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.

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 a frequências onde operam as emissoras de FM. A figura 2.5 ilustra o espectro das rádios FM. Note que algumas são

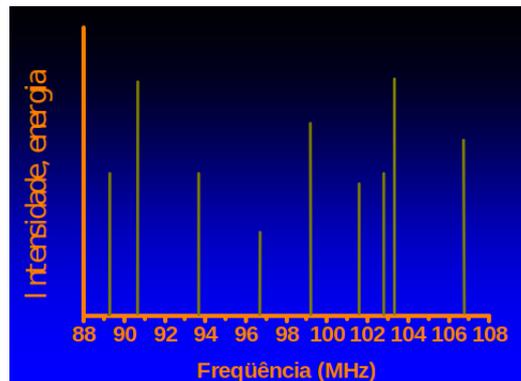


Figura 2.5: O espectro da emissão das rádios na região de FM. Fonte: autor mais fortes que outras. Telefones celulares operam em frequências de quase 1 bilhão de Hertz (1 giga-hertz ou 1 GHz).

Neste ponto, é interessante lembrar de duas equações que são muito usadas em física, engenharia e astronomia:

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

$$\text{comprimento de onda (metros)} = \frac{\text{velocidade da luz (m/s)}}{\text{frequência (Hz)}} \quad (2.1)$$

Numa forma mais compacta, utilizando símbolos matemáticos podemos escrever:

$$\lambda = c/\nu \quad (2.2)$$

Exemplo: O que meu pai queria dizer quando falava que ouvia uma certa rádio na faixa de 49 metros?

Resposta: Estava querendo dizer que essa rádio, transmitindo em 6,1 MHz, emite ondas eletromagnéticas cujos picos de intensidade são afastados uns dos outros por uma distância igual a:

$$\text{comprimento de onda} = 300.000.000/6.100.000 \simeq 49 \text{ m} \quad (2.3)$$

A equação 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:

$$\text{Energia (Joule)} = 6,6 \times 10^{-34} \times \text{frequência (Hz)} \quad (2.4)$$

ou, em forma matemática:

$$E = h \nu \quad (2.5)$$

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

Exercício: 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:

$$\frac{660.000}{6,6 \times 10^{-34} \times 10^6} = 10^{33} \text{ pacotes!!} \quad (2.6)$$

A figura 2.6 identifica outras formas com que a radiação eletromagnética aparece na Natureza. 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 Hz = 10^3 Hz, 10000 Hz (10 kHz) = 10^4 Hz, 1 GHz = 10^9 Hz. A luz que nos ilumina tem frequência entre 10^{14} e 10^{15} Hz.

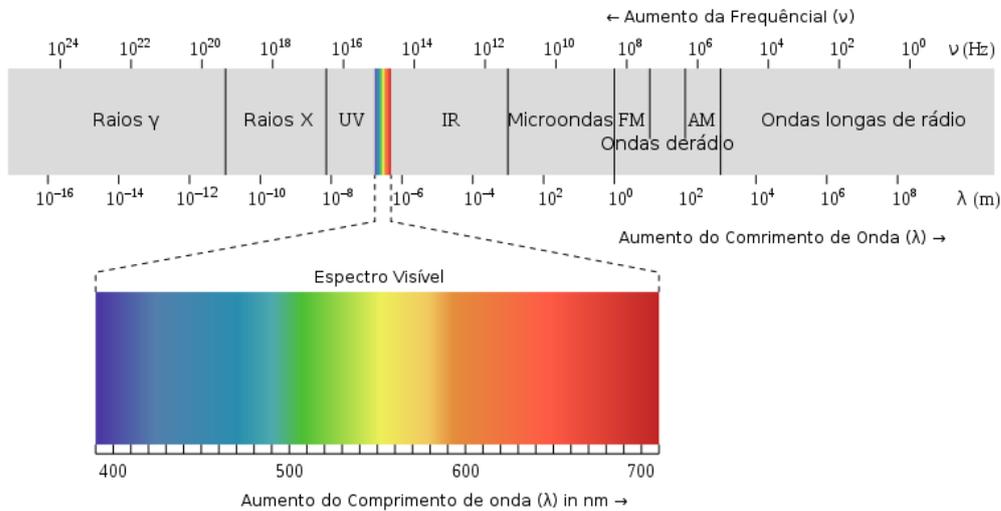


Figura 2.6: O espectro eletromagnético. Note as unidades, 1 nm = 0,000000001 metros, ou $10^{-9} m$. Fonte: <https://commons.wikimedia.org>

O espectro emitido por uma fonte de radiação eletromagnética não pre-

cisa ser confinado a frequências bem definidas, como mostrado na figura 2.2 e 2.5. A maioria dos objetos no céu emite em faixas amplas de frequência. Tecnicamente isso se chama 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 2.8 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. Isso é expresso matematicamente pelas leis the Stefan-Boltzmann,

$$\text{Energia total} = \sigma T^4, \quad (2.7)$$

e lei de Wien,

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \mu\text{m}, \quad (2.8)$$

onde σ é a *constante de Stefan* e T sempre dada em graus K, ou seja, graus C + 273.

A característica da lei de Wien de que o espectro tem um máximo que se desloca para comprimentos de onda mais longos à medida que a temperatura diminui é muito importante no contexto dos *exoplanetas*. Hoje, há quase 4000 exoplanetas conhecidos. São planetas em torno de outras estrelas. No entanto, apenas 19 foram imageados diretamente até hoje. A razão para isso é que a energia luminosa emitida pela estrela e pelo são muito diferentes, o planeta sendo milhões de vezes mais fraco. Uma característica que ajuda, por outro lado, é a temperatura. Os planetas têm temperaturas muito mais

baixas (a Terra, por exemplo, 300 K). Significa que observando no infravermelho, o contraste aumenta muito em favor do planeta, e em alguns casos é possível vê-los. A figura 2.7 mostra uma imagem do primeiro exoplaneta detectado numa imagem direta. Note como ele, apesar de ser mais fraco, é muito mais vermelho que a estrela, de modo que mesmo ela sendo muito mais brilhante permite vê-lo claramente.

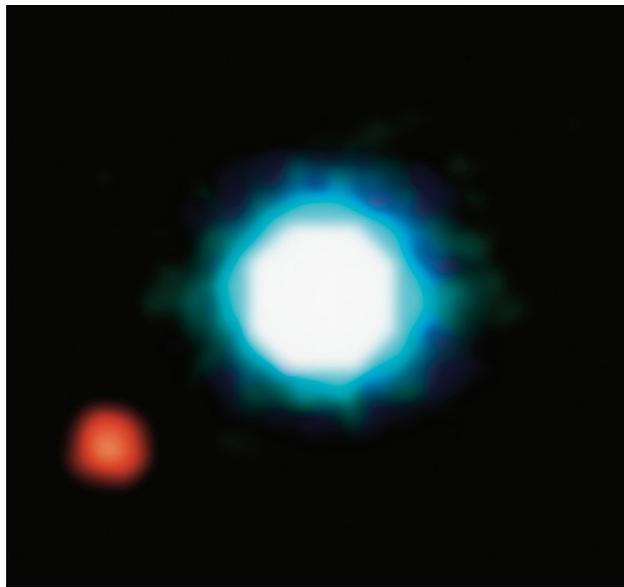


Figura 2.7: O primeiro exoplaneta imageado diretamente, na estrela 2M1207, com o exoplaneta 2M1207b (mais vermelho) próximo. Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/2M1207>

Os espectros reais diferem dos espectros mostrados na figura 2.8 pela presença de absorções e emissões causadas por distintos elementos químicos que compõem as estrelas.

A figura 2.9 ilustra o fato de que o espectro das estrelas não é exatamente como a idealização da figura 2.8. A sequência mostra, de baixo para cima

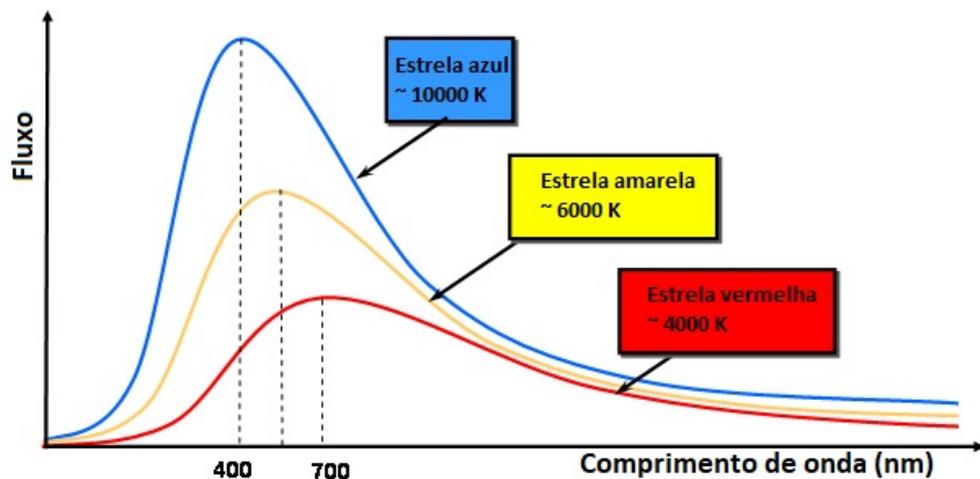


Figura 2.8: O espectro eletromagnético aproximado de estrelas a diferentes temperaturas. Obtido em: <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/Blackbody+Radiation>

estrelas muito quentes (a temperatura pode chegar a dezenas de milhares de graus), enquanto as mais frias têm apenas alguns mil graus. Para referência, o nosso Sol, uma estrela G2, possui temperatura na superfície de aproximadamente 5700 graus Kelvin. É interessante notar que a forma geral desses espectros é semelhante aos da figura 2.8, mas com algumas diferenças importantes. Uma delas é que os espectros estelares possuem *linhas espectrais*. Por exemplo, as linhas em 6563 Å (656.3 nm) e 4861 Å (486.1 nm) são provenientes do hidrogênio na atmosfera dessas estrelas. A presença das linhas espectrais é muito importante, pois permite que saibamos de que material uma estrela é feita e também saber as condições em que este material se encontra. As estrelas mais frias na figura 2.9, especialmente as de tipo K e M, possuem uma outra propriedade interessante: elas apresentam compostos na forma de moléculas em suas atmosferas. Isso faz com que os espectros difiram muito mais dos espectros de corpos negros mais quentes.

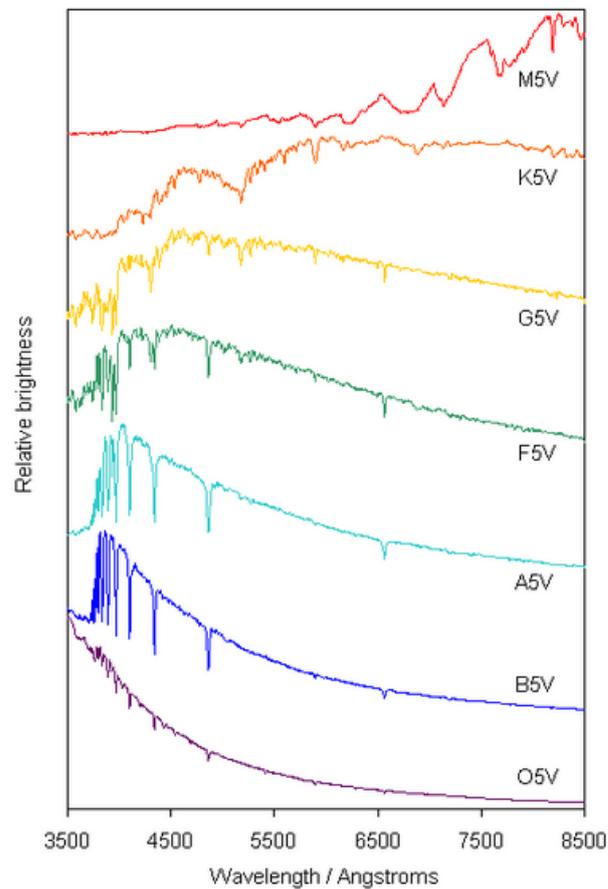


Figura 2.9: O espectro real de alguns tipos de estrelas. A temperatura diminui de baixo para cima, mais ou menos seguindo a cor dominante das estrelas. Compare com a figura 2.8. <http://www.jb.man.ac.uk/distance/life/sample/stars/index.html>

Outro aspecto de grande importância relacionado com a presença de raias bem definidas no espectro das estrelas diz respeito ao *estado de movimento* das estrelas. Da mesma forma como as ondas acústicas têm a frequência modificada quando se afastam ou se aproximam do observador, as ondas eletromagnéticas sofrem o mesmo efeito, ou seja, estão sujeitas ao *efeito*

Doppler. Esse efeito tem uma expressão bem simples,

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (2.9)$$

aqui, v é a velocidade com que a estrela está se afastando ou se aproximando de nós, c é a velocidade da luz, λ_0 é o comprimento de onda da raia espectral em repouso (ou seja, tal qual mediríamos no laboratório) e λ é o comprimento de onda observado para a mesma radiação. Note que foi usando essa expressão que Edwin Hubble descobriu a *expansão do Universo*, na década de 1920.

Outra aplicação importante da equação 2.9 é na determinação das massas das estrelas em sistemas binários. A figura 2.10 ilustra uma binária em três momentos: à esquerda, quando a componente vermelha se *afasta* de nós com maior velocidade. À direita, quando ela se *aproxima* de nós com maior velocidade. Note que o movimento oposto ocorre com a componente azul. No painel do centro, embora as componentes estejam se movendo, não há movimento na nossa direção. A abreviação CM refere-se à posição do centro de massa do sistema. Agora veja o que ocorre com as linhas espectrais (de um mesmo elemento) para ambas as componentes. No painel da esquerda, com a estrela vermelha se afastando de nós, a linha se desloca para comprimentos de onda maiores (veja Eq. 2.9). No painel da direita, o oposto: a linha se desloca para o azul. Para a outra estrela, ocorre o oposto. A Eq. 2.9 nos permite obter as velocidades máximas de afastamento e aproximação. O valor médio delas (ignorando o sinal) vai ser v_{verm} e v_{azul} . A relação entre as

massas das componentes (m_{verm} , m_{azul} e as velocidades é bem simples,

$$\frac{v_{verm}}{v_{azul}} = \frac{m_{azul}}{m_{verm}}. \quad (2.10)$$

Com algumas informações adicionais, pode-se obter os valores das massas individuais. Em alguns casos, a precisão na determinação das massas é melhor que 1%!

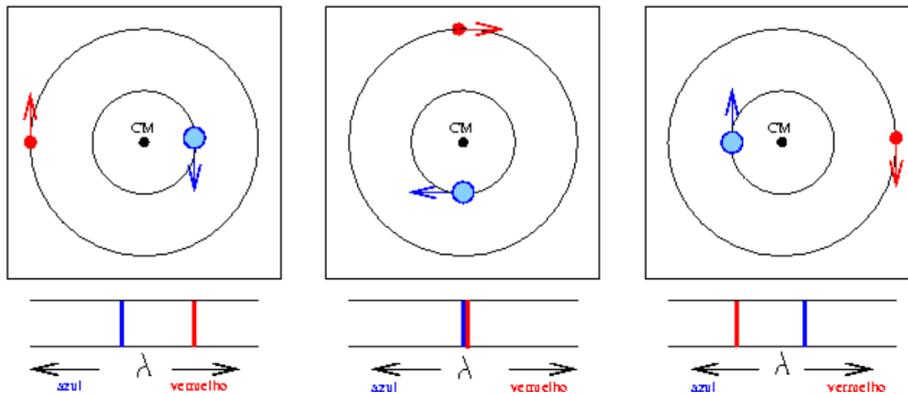


Figura 2.10: Um sistema binário com a representação do deslocamento Doppler da linha espectral de um mesmo elemento à medida que as estrelas se movem em órbita. Fonte: <http://astro.if.ufpr.br/bin/binarias.htm>.

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 aceleradas, são produzidas por *massas* em movimento acelerado. Uma fonte importante de ondas gravitacionais são os sistemas binários envolvendo estrelas, estrelas compactas e buracos negros. 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 sexta potência da frequência com que o sistema binário gira.

Em 14 de setembro de 2015, as ondas gravitacionais foram observadas diretamente pela primeira vez. Foram geradas por uma colisão entre dois buracos negros. Essas ondas levaram 1.3 bilhões de anos para chegar até a Terra. A detecção de ondas gravitacionais (figura 2.11) é uma das maiores conquistas da humanidade, uma vez que esse fenômeno tem amplitude extremamente pequena. Enquanto as ondas sonoras podem facilmente ser medidas em escalas de milímetros ou mais, uma onda gravitacional apresenta amplitude muito menor que as dimensões de um *núcleo atômico*.

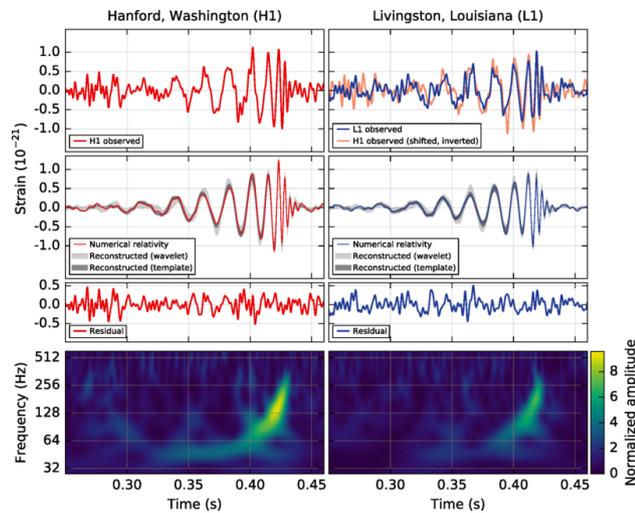


Figura 2.11: A primeira detecção de ondas gravitacionais. Os gráficos em vermelho e azul referem-se aos dois observatórios separados de 4000 quilômetros. Os painéis de baixo mostram como a frequência das oscilações foi mudando com o tempo. Fonte: Wikipedia.

Atualmente, pode-se dizer alguma coisa sobre como é o *espectro de on-*

das gravitacionais. Acredita-se que as oscilações ocorridas no Big Bang, ou seja na formação do Universo, estejam até hoje permeando o que se chama de espaço-tempo. Além disso, fenômenos transientes como o da figura 2.11 deixam sua assinatura por curtos intervalos de tempo, enquanto a superposição da emissão das fontes binárias na Galáxia deve produzir um espectro contínuo que nas próximas décadas será objeto de intensos estudos.

2.2 Efeitos de diluição de ondas e radiação

2.2.1 O meio ambiente e o espectro acústico

É uma experiência bem comum a percepção de 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 silencioso que seja o ambiente. A razão é explicada na figura 2.12, 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 interceptada pelo barco diminui, e ele chacoalha menos. Você pode provar facilmente, considerando o lago uma superfície bidimensional (2-D) onde a onda se propaga, que a energia por unidade de comprimento recebida por um observador distante cai com o *inverso da distância*. De modo geral, a energia recebida por um detector qualquer *diminui com a distância à fonte*. Se a fonte emite em *todas as direções no espaço* (3-D), a energia diminui com o *quadrado* da distância à fonte. Isso é ilustrado em forma gráfica na figura 2.13.

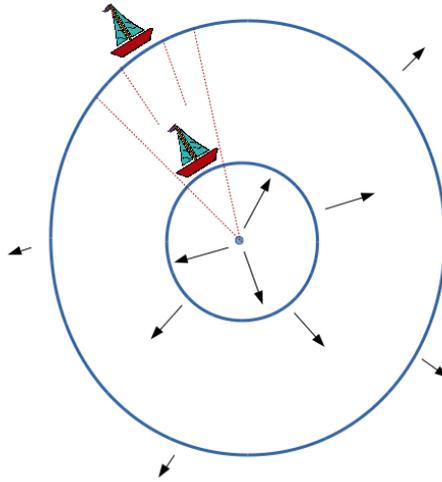


Figura 2.12: A diluição da energia da onda (por unidade de comprimento) com a distância à fonte.

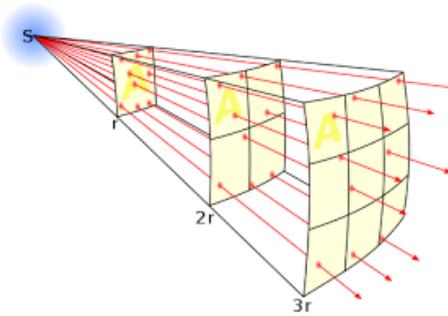


Figura 2.13: A diluição da energia (por unidade de área) com a distância à fonte. De: <http://projetosfisicaexperimental.blogspot.com.br/2016/03/leido-inverso-do-quadrado-da-distancia.html>

O observador perspicaz percebe também que as intensidades de 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 a Terra é

$$\left(\frac{\text{distância [Alfa Centauri]}}{\text{distância [Sol]}} \right)^2 = \left(\frac{4 \times 10^{16} \text{ m}}{1,5 \times 10^{11} \text{ m}} \right)^2 = 7 \times 10^{10} \quad (2.11)$$

70 bilhões de vezes menor que a energia recebida de nosso Sol.

A radiação eletromagnética também é absorvida pela atmosfera terrestre. 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 pôr do sol é muito mais fácil fazê-lo. Ao entardecer a luz tem que atravessar um caminho muito mais longo dentro da atmosfera e sofre maior atenuação. Veja esquematicamente na figura 2.14 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 mais 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 em 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. Algumas molé-

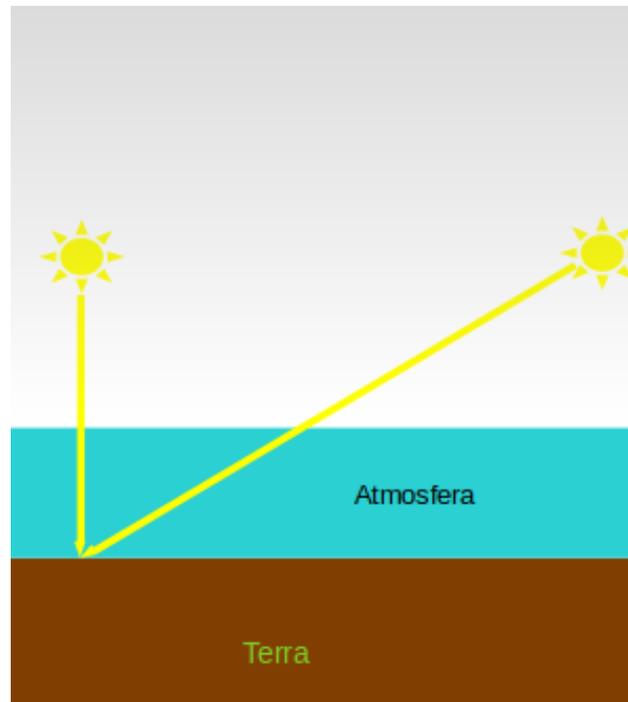


Figura 2.14: O caminho mais longo produz atenuação da luz ao atravessar a atmosfera terrestre. Fonte: autor

culas 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 lado, a própria atmosfera impede que observemos do solo certas frequências do espaço eletromagnético, emitidas pelos corpos celestes. Isso ocorre no ultravioleta, raios X, raios gama, infravermelho e rádio. A figura 2.15 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 cerca de 99% da atmosfera.

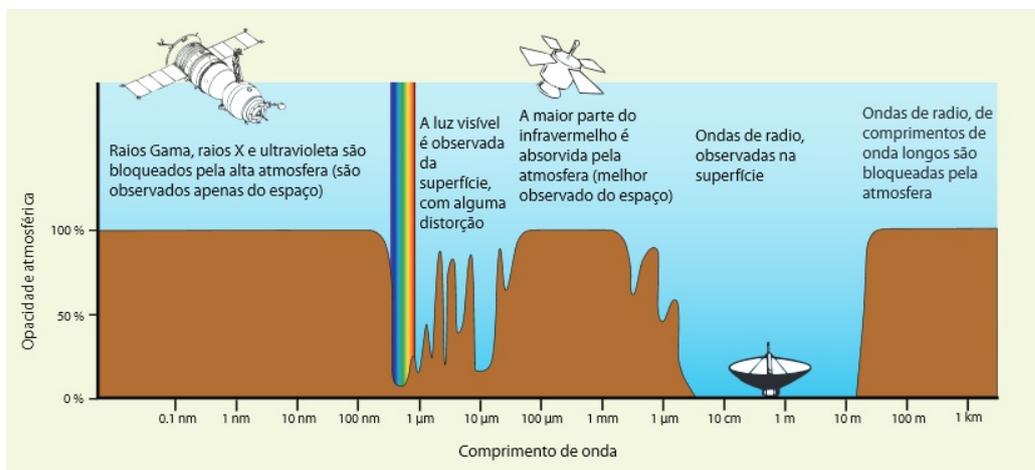


Figura 2.15: As janelas de observação a partir do solo. Obtido em: <http://www.lna.br/museuvirtual/evolucao.html>

2.3 Detectores e telescópios

2.3.1 Detectores de ondas sonoras

O nosso tímpano, que é uma parte do ouvido, é um detector de ondas sonoras. 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. A vibração no tímpano é processada pelo nosso cérebro que analisa o espectro de frequências. Combinando o sinal de dois detectores (uma orelha de cada lado da cabeça) o cérebro é capaz de saber a orientação da fonte de sons. Caso o detector perca a sensibilidade, como acontece à medida que as pessoas vão envelhecendo, é possível realizar uma compensação aumentando a área coletora de ondas acústicas, por exemplo com o uso de um funil. Outra maneira de resolver o problema é usar um amplificador eletrônico para aumentar a intensidade dos sons.

Embora o ouvido humano seja um detector magnífico, ele é superado por detectores como os microfones que podem registrar sons de frequências mais altas e mais baixas do 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 Detectores e telescópios para ondas eletromagnéticas

O detector mais aprimorado que possuímos é o olho. A combinação olho e cérebro faz simultaneamente uma análise do espectro da luz e sua distribuição

especial 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 detectores 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 rádio observatório que possui uma antena parabólica de 13 metros de diâmetro capaz de observar ondas de rádio em frequências de dezenas de giga-hertz. O maior radiotelescópio do mundo atualmente está na China, e tem uma antena de 500 metros de diâmetro. A figura 2.16 mostra uma configuração para detecção de ondas de rádio que foi projetada e construída na Divisão de Astrofísica do INPE: é uma das 50 antenas do experimento BINGO, que estudará a radiação dos estágios iniciais da formação do universo.

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 webcam 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 e intensidade da fonte emissora de luz.



Figura 2.16: Uma das 50 antenas do radiotelescópio BINGO, em construção na DAS/INPE. Fonte: L. Reitano.

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 no fato de que em Astronomia, é quase a regra estarmos na situação do surdo, não por falta de sensibilidade no detector, uma vez que os mais elaborados sistemas de amplificação são utilizados, mas porque as fontes celestes de radiação são extremamente fracas. A única maneira de remediar é aumentar a quantidade de radiação coletada. 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, infravermelha, para raios X e ondas gravitacionais.

A figura 2.17 mostra esquematicamente o "telescópio" mais simples que pode ser construído, com instruções mais detalhadas na figura 2.18. Ele funciona muito bem para luz e é capaz de registrar imagens. O único requisito é que as dimensões da abertura sejam pequenas, porém algumas vezes maiores que o comprimento de onda da radiação.

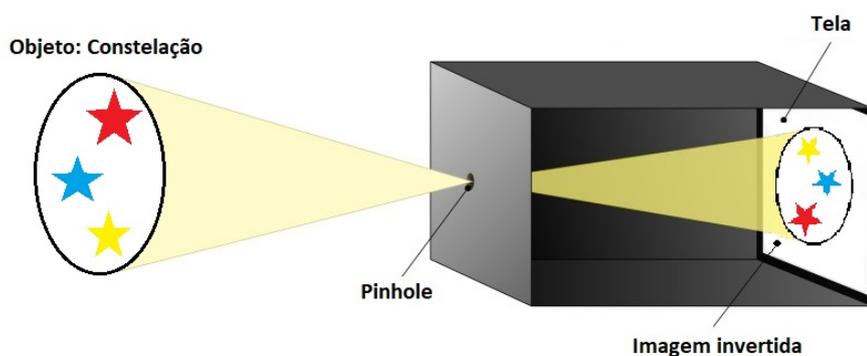


Figura 2.17: Exemplo de uma câmara pinhole, ilustrando a determinação da intensidade e direção da radiação eletromagnética.

Esse tipo de montagem já teve muita popularidade em um contexto não científico. Antes do advento da fotografia as "câmeras obscuras" eram utilizadas para projetar imagens em vidros despolidos (foscas) 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 detector, mais detalhes o instrumento é capaz de discernir. A maior desvantagem desse tipo de "telescópio" é que a área coletora é muito pequena. A figura 2.18 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

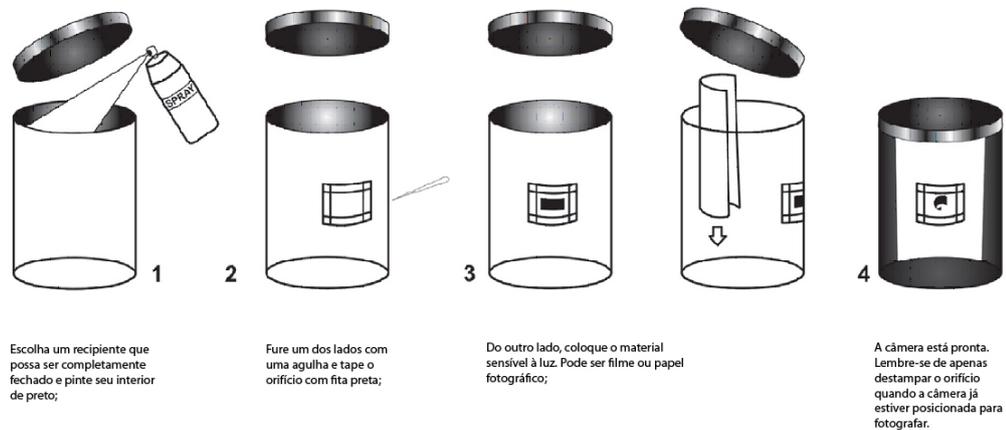


Figura 2.18: Passo a passo de como construir uma câmera pinhole. Obtida em <https://www.jornalufgonline.ufg.br/n/30640-camera-pinhole>

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 câmera 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. A figura 2.19 mostra o telescópio ProtoMirax com o padrão de aberturas já instalado na parte superior.

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. 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 figura 2.17, mantendo a capacidade de separar raios vindos de direções diferentes. Nas lojas de lembranças é fácil encontrarmos lupas que



Figura 2.19: O telescópio ProtoMirax para raios X, com o padrão de aberturas na parte superior. Fonte: autor.

podem ser usadas como lentes (o termo técnico é *objetiva*) para um telescópio simples. A figura 2.20 ilustra como montar.

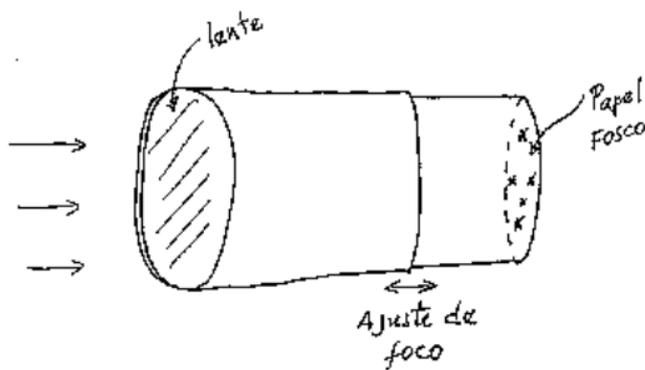


Figura 2.20: Esquema de um telescópio simples. Fonte: autor.

Para determinar o comprimento do canudo que compõe a parte externa do telescópio meça primeiro a distância da lente em que uma cena bem iluminada forma uma imagem bem definida. Se você utilizar dois canudos de diâmetros diferentes, 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". Se tivesse um detector CCD ou CMOS teria uma câmara digital.

O telescópio de 1,6 metros de diâmetro no Laboratório Nacional de Astrofísica, em Brasópolis MG (figura 2.21, 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

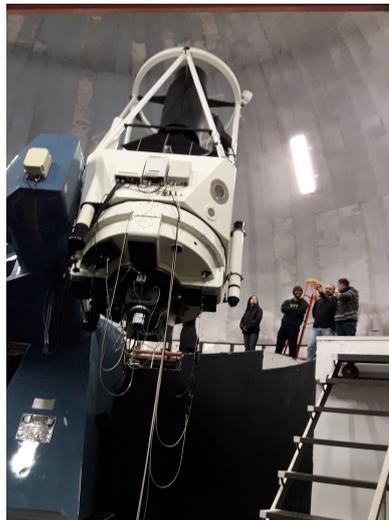


Figura 2.21: O telescópio de 1,6-m de diâmetro do Laboratório Nacional de Astrofísica, no Pico dos Dias, Sul de Minas Gerais. Fonte: autor.

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, Canadá, Chile, Argentina e Brasil. Um dos telescópios opera nos andes chilenos e o outro numa montanha de 4200 metros de altitude no Havaí. O telescópio GMT (do ingles *Giant Magellan Telescope*, figura 2.22), que vai

operar dentro de alguns anos nos andes chilenos e no qual os astrônomos do estado de São Paulo têm participação, possui um espelho composto que é equivalente a uma abertura de 26 metros de diâmetro! Astrônomos da DAS/INPE participam desse projeto.

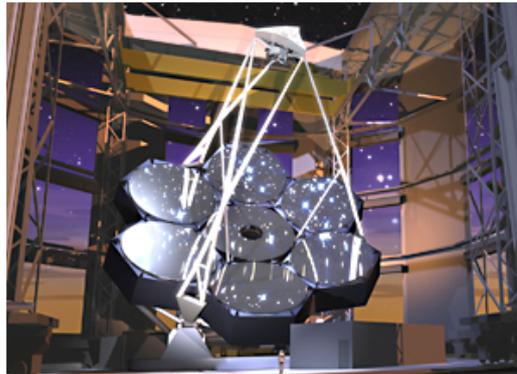


Figura 2.22: Visão artística de como será o GMT, com abertura de 26-m de diâmetro. Fonte: <https://www.gmto.org/>

Exercício: Quantas vezes mais luz o telescópio do Projeto GMT é capaz de captar com relação ao telescópio instalado em Brasópolis?

Resposta: A capacidade de captar radiação é proporcional à área. A área de um círculo é proporcional ao diâmetro ao quadrado. Então:

$$\frac{\text{Área GMT}}{\text{Área Brasópolis}} = \left(\frac{26}{1,6} \right)^2 = 264 \text{ vezes mais luz!} \quad (2.12)$$