

2.1 INTRODUÇÃO

O céu sempre fascinou os humanos. A regularidade dos movimentos do Sol e da Lua, a beleza distante das estrelas, os eventos efêmeros e os objetos que se movem entre os astros encantaram e perturbaram nossos ancestrais, desde a aurora da civilização.

A astronomia moderna, baseada na física e com o apoio da tecnologia, permite que o céu seja investigado em níveis sofisticados de detalhamento, privilégio das gerações atuais. Além disso, possibilita que a informação proveniente de corpos celestes seja analisada de maneira que o céu se transforme em um fascinante laboratório, onde processos físicos impossíveis de serem reproduzidos na Terra são observados, analisados e desvendados.

Neste capítulo serão abordados os instrumentos utilizados em astronomia para analisar a informação que chega até nós. Será examinada a natureza da luz, fonte da maioria das informações que recebemos sobre os corpos celestes. A luz, compreendida como radiação eletromagnética, chega até nós em diversas faixas de comprimento de onda: dos raios gama às ondas de rádio, passando pela faixa estreita da luz visível.

Aqui, vamos tratar da natureza da luz, além do conceito de espectro eletromagnético, com descrição da técnica denominada espectroscopia. Também serão consideradas as interações da atmosfera da Terra com a radiação que a atravessa.

Posteriormente, uma revisão dos conceitos fundamentais da óptica iniciará a descrição dos telescópios, instrumentos essenciais para a observação astronômica. Serão detalhados seus tipos principais, localização na Terra ou no espaço e a instalação de telescópios profissionais em grandes observatórios. Serão também descritas as técnicas de imagem que permitem o registro das observações, análise detalhada, armazenamento e divulgação.

Finalmente serão consideradas as técnicas de coleta de informações astronômicas que não dependem da radiação eletromagnética: dados obtidos por sondas espaciais ou a partir de meteoritos. Essas fontes fornecem informações importantes sobre a estrutura e composição do Sistema Solar. Detectores de neutrinos revelam informações sobre os processos de fusão nuclear que ocorrem em núcleos estelares, raios cósmicos produzidos em regiões remotas do Universo interagem com a atmosfera superior e podem ser detectados no solo. Para concluir, abordaremos a radiação gravitacional.

1- Rara foto de um arco-íris primário e secundário, com um terceiro ao fundo. Todos podem também ser vistos refletidos na água (crédito: NASA).



2.2 A NATUREZA DA LUZ

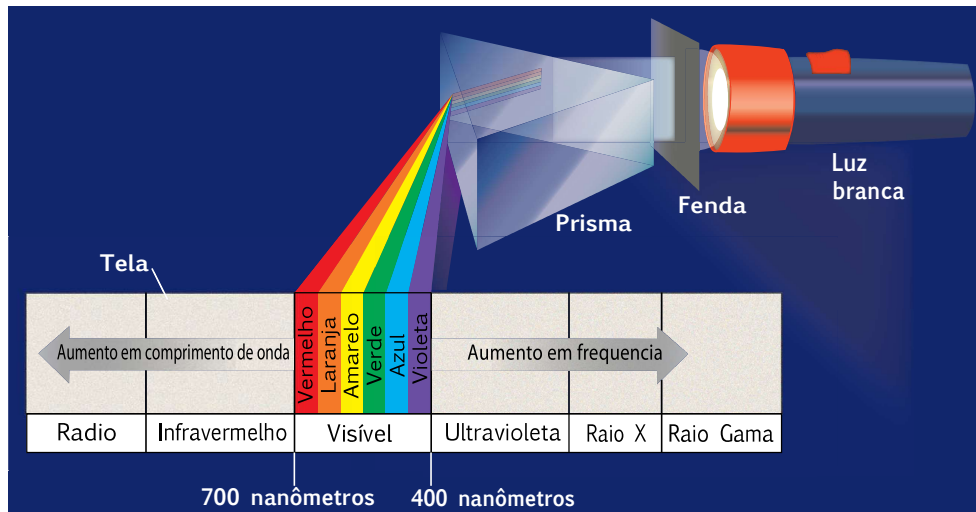
2.2.1 A LUZ COMO RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A luz foi objeto de discussão entre físicos e filósofos ao longo de séculos. Sua verdadeira natureza, onda ou partícula, foi tema de debates acalorados. Ainda na Antiguidade Clássica, o matemático Euclides, considerado o pai da geometria, descreveu as propriedades da luz, sua propagação em linha reta e as características da reflexão. Esses problemas foram considerados por pensadores tão distintos quanto o médico persa Ibn Sina (Avicena) e o filósofo francês René Descartes.

No final do século 17, a chamada teoria ondulatória da luz foi formulada por distintos cientistas europeus como Robert Hooke e Christiaan Huygens. Experimentos de difração da luz feitos por Thomas Young e mais tarde por Jean-Augustin Fresnel confirmaram que a teoria ondulatória poderia explicar diversos resultados experimentais. Em contraponto existia também uma teoria corpuscular para a luz. Isaac Newton acreditava que a luz era composta de pequenas partículas e fez diversos experimentos em óptica, publicados no livro *Opticks*, que saiu em 1704. O debate entre as duas hipóteses perdurou até meados do século 19, quando a teoria corpuscular clássica foi temporariamente descartada. Ela só retornou no século 20, pelas mãos de Albert Einstein, expressa no efeito fotoelétrico que rendeu a ele o Prêmio Nobel de Física em 1921.

A luz tem um comportamento surpreendente, a dualidade onda-partícula. Ela exhibe ao mesmo tempo propriedades ondulatórias como refração, difração e interferência, além de propriedades corpusculares como o efeito fotoelétrico, que depende exclusivamente da energia dos fótons incidentes, os “grãos” de luz.

Em 1845 o físico-químico inglês Michael Faraday (1791-1867) descobriu que o plano de polarização da luz é alterado na presença de um campo magnético. Esse resultado surpreendente inspirou o físico matemático também inglês James Clerk Maxwell (1831-1879) a investigar a natureza da luz como forma de radiação eletromagnética. Seus trabalhos resultaram numa descrição matemática rigorosa das propriedades da radiação eletromagnética, incluindo a luz, sintetizadas nas chamadas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos. As pre-



2- Faixas de energia da radiação eletromagnética

dições teóricas de Maxwell foram confirmadas experimentalmente pelo físico alemão Heinrich R. Hertz (1857-1894) por experimentos envolvendo a emissão de ondas de rádio. Ele demonstrou que as ondas eletromagnéticas comportam-se exatamente como a luz visível e exibem as mesmas propriedades como refração, difração, reflexão e interferência.

A partir dos resultados de Hertz foi possível incluir a descrição das propriedades da luz no corpo das propriedades das ondas eletromagnéticas: a luz é energia, e pode ser descrita com o mesmo instrumental matemático usado para tratar todas as faixas de energia da radiação eletromagnética, das altas energias como os raios gama e os raios X até as faixas de baixa energia como as ondas de rádio.

2.2.2 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Num arco-íris a decomposição da luz branca do Sol em suas componentes é um fenômeno natural provocado pela refração da luz em gotículas de água na atmosfera. Essa é uma visão simples e clara de como o espectro eletromagnético se divide dentro da faixa de energia que nossos olhos detectam.

Este efeito foi reproduzido pela primeira vez em laboratório por Newton ao redor de 1670: tomando a luz do Sol que entrava por uma fresta nas cortinas de seu laboratório e fazendo-a passar por um prisma, ele obteve a decomposição da luz em suas cores constituintes, no mesmo padrão de cores do arco-íris.

Agora, o espectro eletromagnético é dividido em faixas de energia e a luz visível é apenas uma delas. A figura 2 mostra as faixas de energia em que a radiação eletromagnética é dividida. Pode-se notar que a luz visível corresponde a apenas uma pequena faixa do espectro total.

A energia de um fóton é dada pela expressão:

$$E = h\nu \quad (1)$$

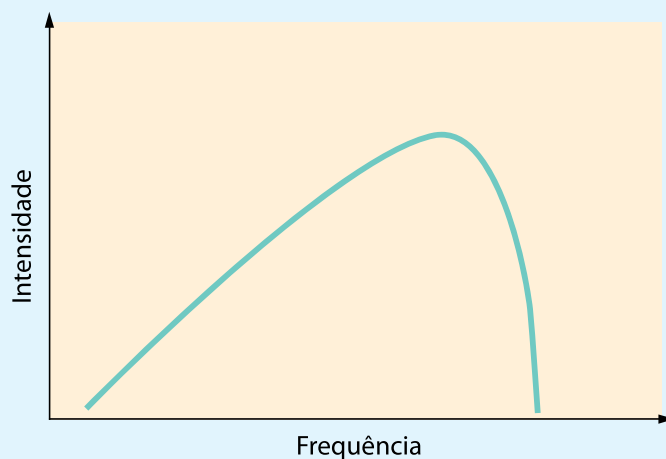
onde:

E : energia em joules (J)

h : constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ J.s

ν : frequência do fóton em hertz (Hz)

3- Distribuição da intensidade de radiação em função da frequência de um corpo negro (crédito: Chaisson & McMillan).



Analogamente, a energia pode ser expressa em termos do comprimento de onda da radiação em vez de sua frequência:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

onde:

E : energia em joules (J)

h : constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ J.s

c : velocidade da luz = 3×10^8 m/s

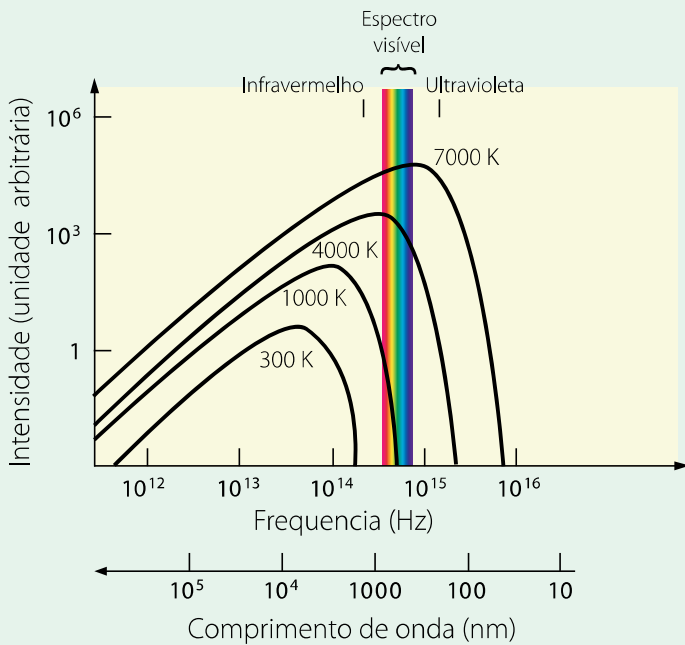
λ : comprimento de onda em metros (m)

Todas as fontes de luz emitem energia numa faixa de frequências (ou de comprimentos de onda). A distribuição espectral de energia de uma fonte define seu espectro eletromagnético. Todos os corpos emitem um espectro de radiação: a faixa das baixas frequências são as ondas de rádio como emissões de TV, rádio AM e FM, radar e micro-ondas. Próxima a elas está faixa da radiação infravermelha, percebida como calor e que é emitida pelos nossos corpos, por exemplo. Na faixa das altas energias, acima da luz visível, estão a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama.

2.2.3 A RADIAÇÃO TÉRMICA E O ESPECTRO DO CORPO NEGRO

Todos os corpos, sem exceção, emitem radiação. Isto não depende de seu tamanho ou forma, nem mesmo de sua temperatura, desde que esteja acima do chamado "zero absoluto", ou a $-273,15$ °C. Isso ocorre porque, do ponto de vista microscópico, a temperatura é uma medida da agitação de átomos e moléculas que compõem o corpo, e esse movimento não cessa. A temperatura de um corpo é a medida dessa energia interna: quanto mais quente o corpo, maior o movimento das partículas que o compõem.

Em 1900 o físico alemão Max Planck (1858-1947) definiu a lei que rege a emissão térmica, agora conhecida como curva de Planck ou curva de corpo negro. O termo "corpo negro" é um con-



4- Diversas curvas de corpo negro superpostas. Notar que as curvas correspondentes às temperaturas mais elevadas têm seus máximos em comprimentos de onda menores (ou frequências maiores) [crédito: Chaisson & McMillan].

ceito físico e define um objeto ideal, que absorve toda a radiação que incide sobre ele, sem refletir nada. Nessas condições, emite um espectro que depende apenas de sua temperatura efetiva.

O comprimento de onda do máximo de intensidade para uma curva de corpo negro é dado pela Lei de Wien, formulada em 1892 pelo físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928), uma ferramenta importante em astronomia. Ela permite obter a temperatura na superfície de uma estrela a partir da medida do comprimento de onda do máximo de intensidade. A Lei de Wien pode ser expressa como:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (3)$$

onde:

λ_{max} : comprimento de onda do máximo de intensidade, em metros

b : constante de deslocamento de Wien = 0.002897 m.K

T : temperatura em kelvins

Outra expressão útil em astronomia baseada nas propriedades da emissão térmica dos corpos é a Lei de Stefan-Boltzmann, que fornece o fluxo de energia por unidade de área de um corpo negro. Essa lei é muito utilizada em astrofísica já que as estrelas se comportam, aproximadamente, como corpos negros:

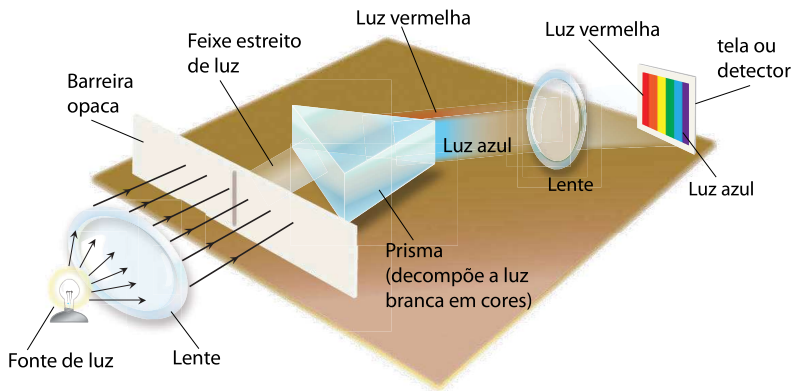
$$F = \sigma T^4 \quad (4)$$

onde:

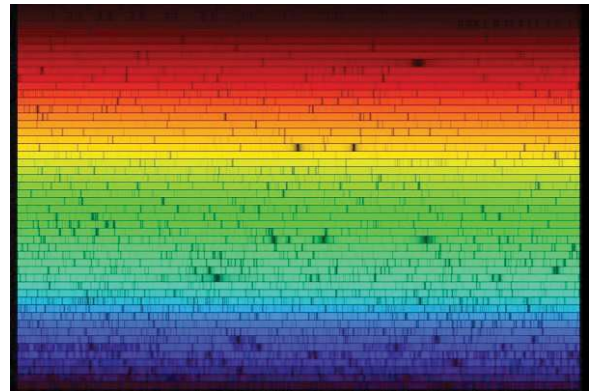
F : fluxo de energia por unidade de área de um corpo negro, por segundo

σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T : temperatura do corpo negro em kelvins



5- Esquema básico de um espectrógrafo (crédito: Chaisson & McMillan).



6- Espectro do Sol. A sequência de cores do azul ao vermelho representa a distribuição de cores da luz visível do Sol, divididas em cerca de 50 “fatias” horizontais, cada uma representando uma faixa de comprimentos de onda. As pequenas faixas escuras verticais são linhas ou bandas de absorção, cada uma delas provocada pela presença de um determinado íon ou molécula na superfície do Sol (crédito: Nigel Sharp – NOAO).

Lucas Xavier: Talvez vale apena eu citar em minha tese esta concepção de Comte. Assim, eu posso citar a importância da Feira de Ciências e tal. Solicitar um grupo da feira para fazer o experimento do espectrógrafo como o da FECITEC. Muito bom linkar história da ciência e experimento.

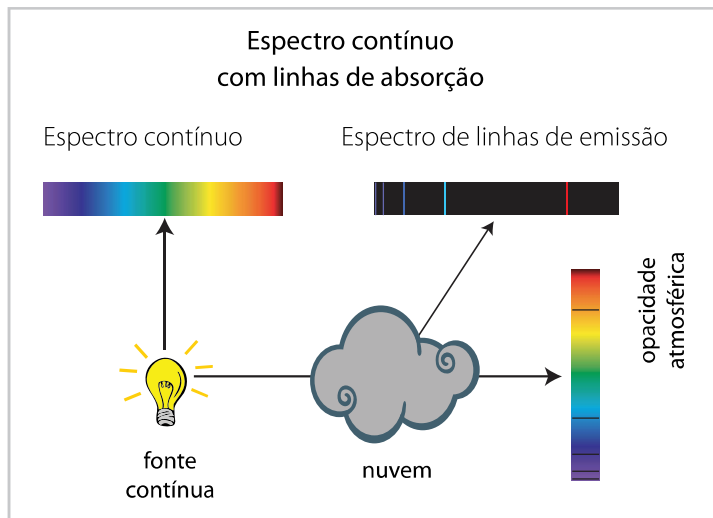
2.2.4 ESPECTROSCOPIA E AS LEIS DE KIRCHHOFF

A espectroscopia é uma das mais poderosas ferramentas astronômicas. Auguste Comte, fundador do Positivismo, considerou que a composição química das estrelas seria desconhecida para sempre já que não se poderia ir até uma delas e coletar material para essa demonstração. Hoje continua impossível, mesmo uma sonda, aproximar-se do Sol ou de qualquer outra estrela. Mas, usando espectroscopia, é possível conhecer a composição química delas com boa precisão.

A análise da composição química estelar é feita com um espectrógrafo, equipamento que decompõe a luz de forma análoga ao experimento clássico de Newton: a luz passa por uma fenda e, a seguir, por um sistema óptico onde é decomposta. Assim se chega à distribuição espectral de energia da fonte, com informação sobre a composição química já que distintos íons de cada substância presente no corpo emissor da luz deixam sua “impressão digital” no espectro emitido.

Espectros de estrelas como o Sol apresentam uma emissão contínua superposta com linhas de absorção. Já outros objetos astronômicos, como as nebulosas, mostram espectros bem diferentes: sua energia não é emitida num contínuo, mas em linhas de emissão bem determinadas. Em meados do século 19 o físico alemão Gustav Kirchhoff (1824-1887) realizou uma série de experimentos com sólidos e gases aquecidos em diferentes condições de temperatura e pressão e a partir dos resultados obtidos formulou três leis que descrevem o tipo de espectro emitido por uma fonte. Elas são conhecidas como Leis de Kirchhoff da espectroscopia:

1. Um sólido ou líquido aquecido, ou ainda um gás suficientemente denso, emite energia em todos os comprimentos de onda, de modo que produz um espectro contínuo de radiação.
2. Um gás quente de baixa densidade emite luz cujo espectro consiste apenas de linhas de emissão características da composição química do gás.
3. Um gás frio de baixa densidade absorve certos comprimentos de onda quando uma luz contínua o atravessa, de modo que o espectro resultante será um contínuo superposto por linhas de absorção características da composição química do gás.



7- Leis de Kirchhoff da espectroscopia

2.2.5 A ATMOSFERA DA TERRA E A INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO

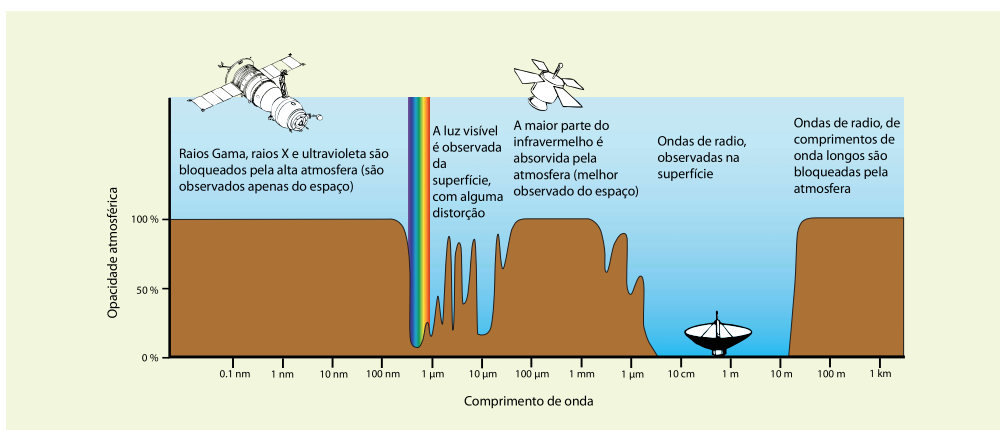
A atmosfera da Terra é uma mistura de gases que interage com a radiação que a atravessa de modo bem conhecido. A opacidade atmosférica define “janelas” de observação: alguns comprimentos de onda, em especial os raios X e os raios gama, são quase inteiramente absorvidos pela atmosfera. Foi essa característica que permitiu a evolução da vida já que essas faixas de radiação são nocivas às moléculas orgânicas.

Devido a essas propriedades de transmitância da atmosfera é fácil concluir a razão das observações astronômicas na faixa dos raios X e gama serem feitas por satélites.

Mas a opacidade é apenas uma das maneiras pelas quais a atmosfera interage com a radiação dos corpos celestes que atinge a Terra. Outra forma bem evidente de interação é a difusão atmosférica: na faixa da luz visível a atmosfera espalha preferencialmente comprimentos de onda mais curtos, ou seja, a luz azul, e deixa passar com mais eficiência os comprimentos de onda maiores, como o amarelo e o vermelho. Essa é a razão de o céu ser azul durante o dia.

Outra interação importante da atmosfera com a radiação é provocada pela turbulência. A atmosfera não é estática, o ar se desloca em células de convecção de diferentes tamanhos, desde pequenas estruturas com metros de diâmetro próximas ao solo até grandes formações, com quilômetros de diâmetro na atmosfera superior. O efeito dessa turbulência na visualização dos corpos celestes é a degradação da qualidade das imagens astronômicas. Em telescópios de pequeno porte, usados em astronomia amadora, a turbulência pode ser notada pelo “tremor” das imagens, que parecem oscilar quando observadas. Já nos grandes telescópios profissionais o mesmo efeito aparece na forma de perda de qualidade da imagem, que se tornam levemente borradas.

Além disso, mesmo a atmosfera tem uma determinada temperatura efetiva, e, portanto existe uma emissão atmosférica na forma da radiação de um corpo negro cujo máximo está no infravermelho. Devido a essa propriedade, as observações astronômicas nessa faixa são muito complexas e exigem refrigeração eficiente de todo o sistema de imageamento, incluindo a câmera, o detector e o próprio telescópio.

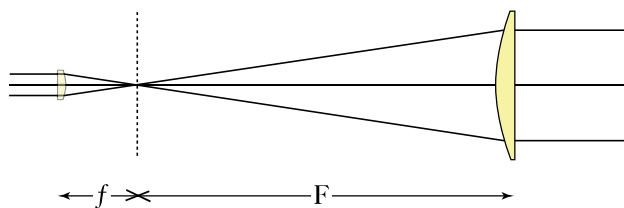


8- Opacidade da atmosfera da Terra em função do comprimento de onda da radiação. Pode-se ver que a atmosfera é totalmente opaca à radiação de alta energia (ultravioleta, raios X e gama), parcialmente transparente no visível e no infravermelho próximo, opaca na faixa das ondas de rádio milimétricas, transparente novamente na faixa das ondas métricas e novamente opaca para as ondas muito longas (crédito: NASA).

2.3 TELESCÓPIOS

2.3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Um telescópio é essencialmente um funil para coleta de luz: quanto maior sua área, maior a quantidade de luz recolhida, e dependendo da óptica, melhor as imagens obtidas. Existem diversos conceitos básicos de óptica envolvidos no funcionamento de um telescópio. Vamos examiná-los:



9- Diagrama básico de um telescópio. A luz entra pela lente convergente à direita, chega ao plano focal à distância F da objetiva e sai pela ocular da esquerda, cuja distância focal é f .

• Abertura

É o diâmetro da objetiva do telescópio no caso dos refratores. Ou o diâmetro do espelho primário no caso dos refletores.

• Resolução angular ou poder separador

Esse é o mínimo ângulo no céu que um telescópio consegue distinguir. Quanto maior a resolução angular, menores os detalhes de um objeto que o telescópio poderá resolver. Matematicamente, a