

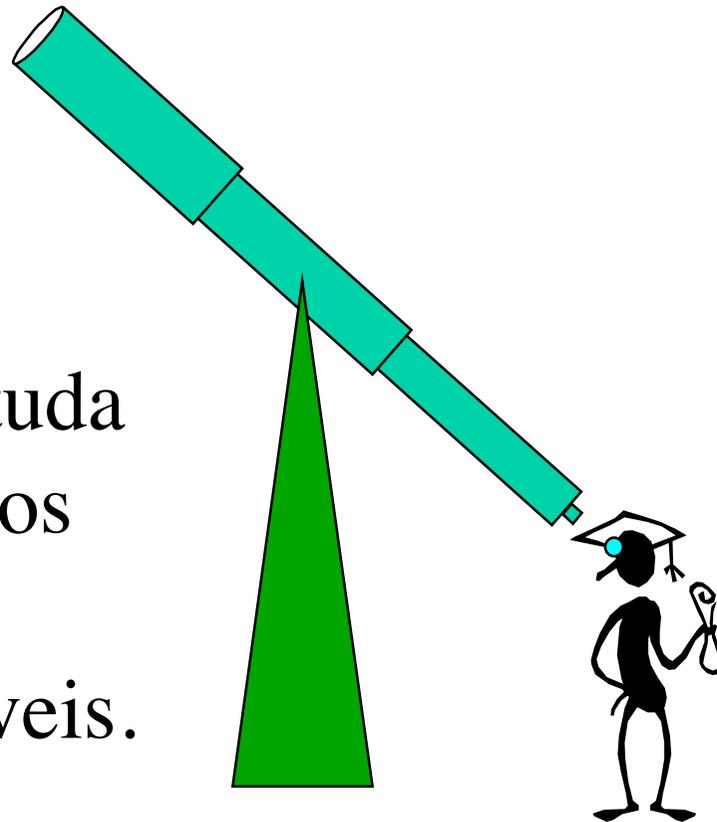
# Aula 5

## Radiação Eletromagnética



# Astrofísica

É o ramo da astronomia que estuda os **astros** usando os conhecimentos **científicos** disponíveis.





# Astrofísica

Quais as fontes de informações disponíveis para os astrofísicos?

## 1) Amostras:

- meteoritos
- missões de coleta (humanas ou robóticas)
- raios cósmicos



Bendegó (peso: 5630kg)



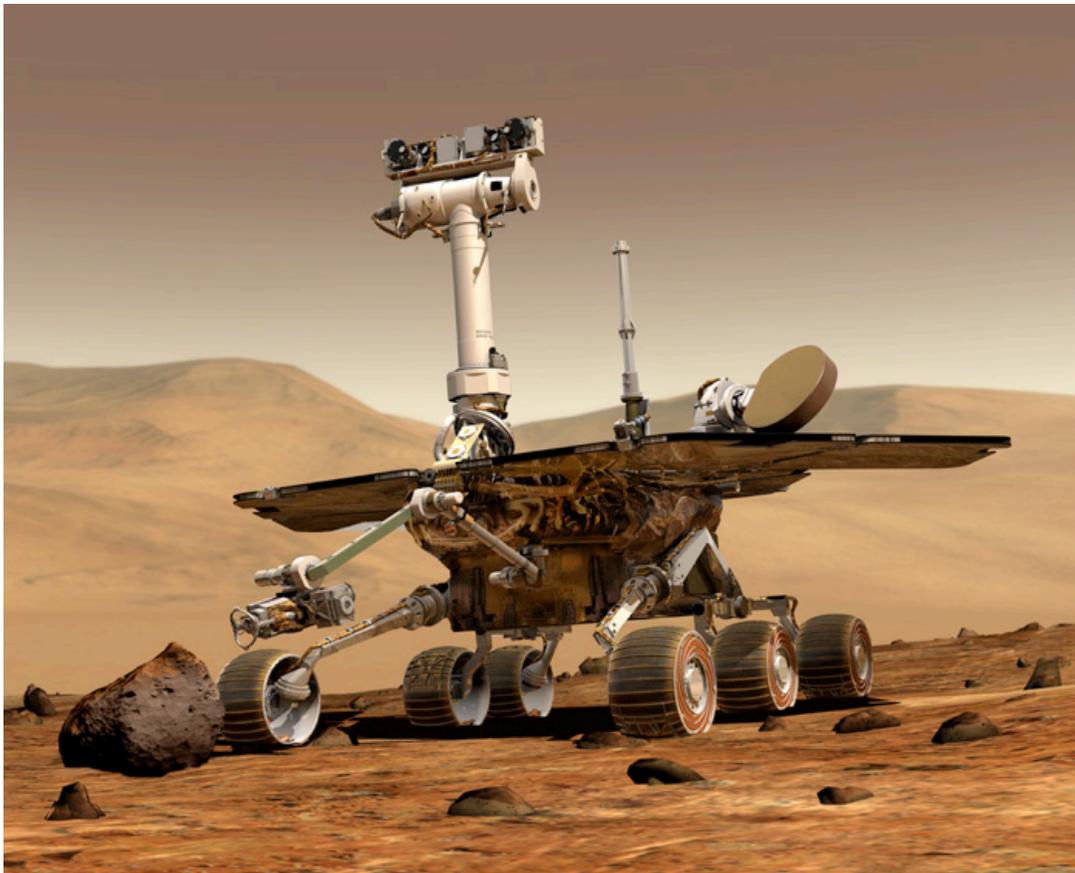


# Astrofísica

Quais as fontes de informações disponíveis para os astrofísicos?

## 2) Sondagem:

- missões espaciais que coletam dados *in loco*



Robô *Spirit* na superfície de Marte (concepção artística)



# Astrofísica

A sonda Voyager é o objeto humano mais distante (110 UA) e veloz (17 km/s!) até o momento. Está saindo do Sistema Solar...

Mesmo com essa velocidade, ela demoraria **100.000 anos** para chegar até a estrela mais próxima (Proxima Centauri, a 4 anos-luz)

Portanto, além de corpos do Sistema Solar para os quais podemos enviar sondas espaciais, como podemos estudar os astros e determinar informações como:

- composição química;
- temperatura
- velocidade
- distância





# Astrofísica

**Quais as fontes de informações disponíveis para os astrofísicos?**

### **3) Radiação eletromagnética:**

- única fonte de informação a respeito de objetos além do Sistema Solar!
- pilar fundamental da astrofísica.

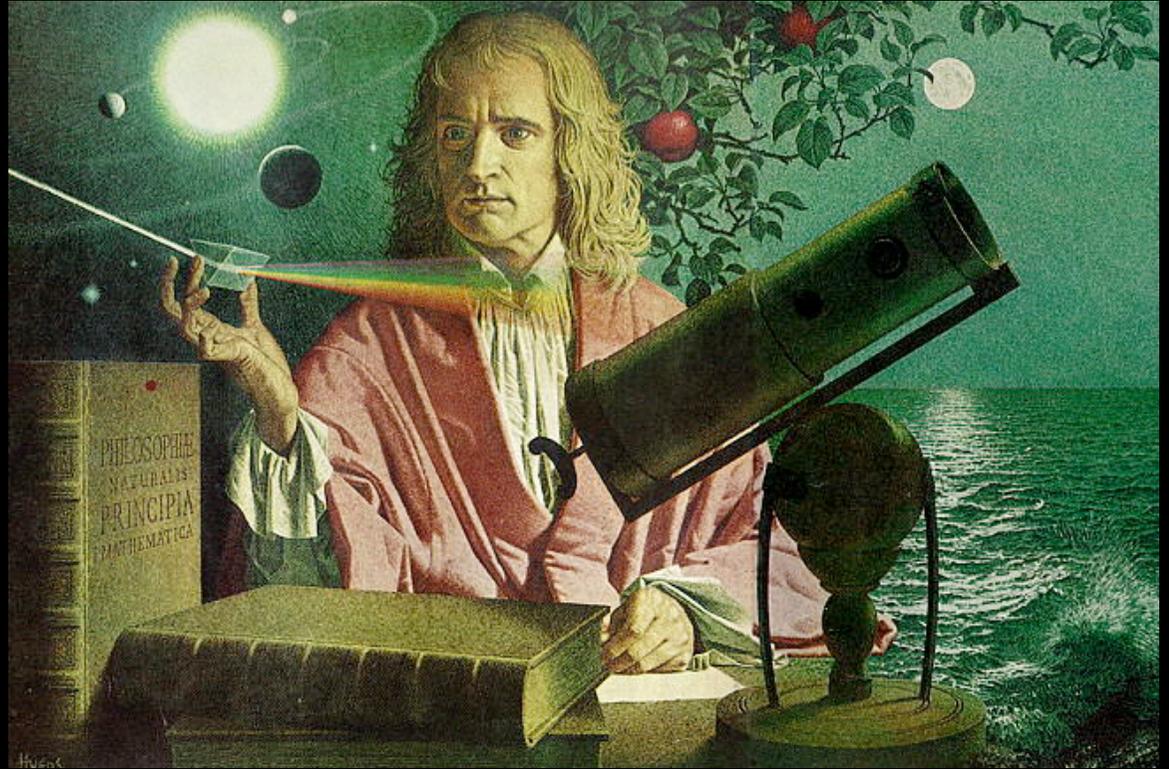


Observatório do Pico dos Dias  
(Minas Gerais, Brasil)

# Histórico

Em 1665 Isaac Newton mostrou que a luz branca, ao atravessar um prisma, decompõe-se em diversas cores

O estudo da natureza da luz foi um dos grandes “motores” da física moderna.



Duas visões do século XVII:

- Isaac Newton acreditava que a luz era **composta de partículas**
- Christian Huygens acreditava que a luz era uma **onda**

# Histórico

## Experiência da Fenda Dupla de Young

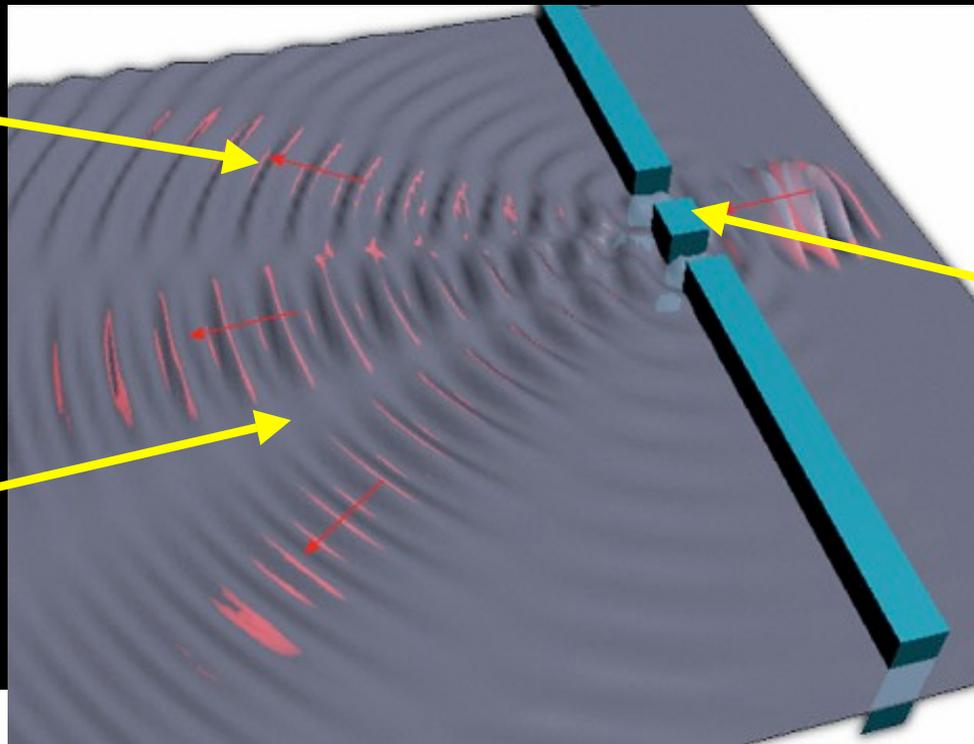
- Em 1803, Thomas Young conduziu um clássico experimento que demonstrou a **natureza ondulatória da luz**
- Analogia com ondas na superfície da água passando por duas fendas:



Thomas Young

interferência  
construtiva

interferência  
destrutiva



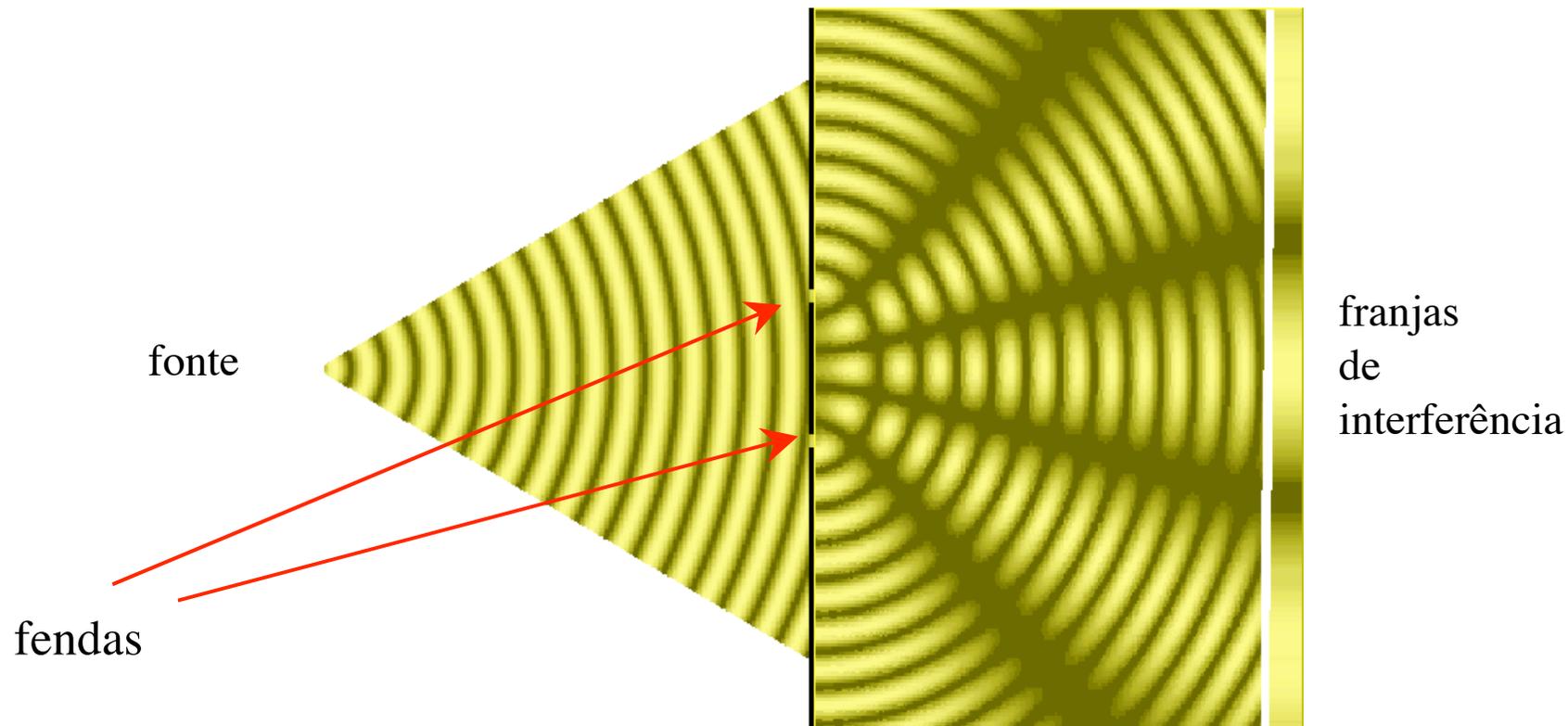
difração

# Luz: Difração e Interferência

**Thomas Young** realiza a experiência da fenda dupla com a luz, mostra o fenômeno de **interferência** e conclui sobre sua **natureza ondulatória**.

Tal como água: ondas de luz quando encontram obstáculo (fenda): **difratam**

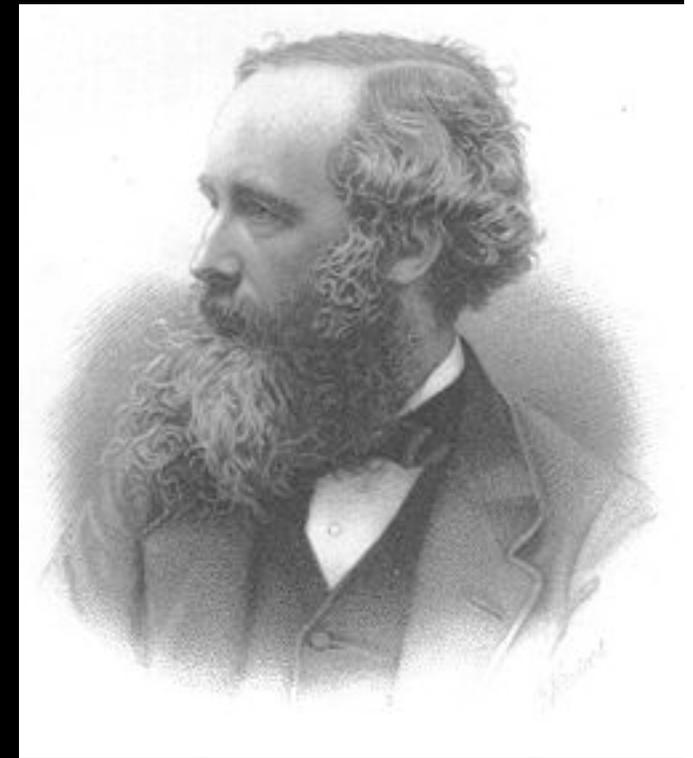
Quando convergem e encontram outras ondas: **interferem**



# Histórico

## James Clerk Maxwell

- Desenvolveu, no século XIX, a teoria moderna do **eletromagnetismo**
- **Alguns conceitos:**
  - o Carga elétrica (ex. elétron, próton) é a origem da força elétrica
  - o Corrente elétrica é a origem da força magnética
  - o Carga elétrica gera um *campo elétrico* e uma corrente elétrica gera um *campo magnético*
  - o Em física, a palavra “campo” é usada para descrever a ação das forças que um objeto exerce sobre objetos distantes (Ex: o *campo gravitacional* do Sol)

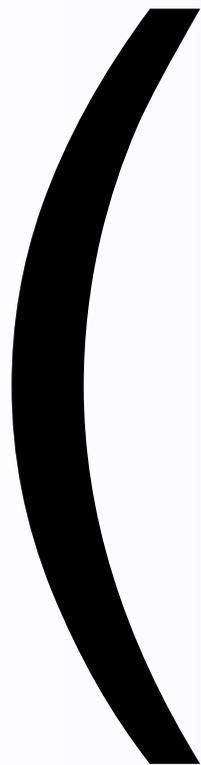


James C. Maxwell

# Histórico

## James Clerk Maxwell

- Em sua teoria, Maxwell demonstrou haver uma **profunda relação entre os campos elétricos e magnéticos**.
- Por exemplo, um campo magnético variável gera uma corrente elétrica e, portanto, um campo elétrico variável.
- Maxwell analisou o que ocorreria se uma carga elétrica fosse colocada em um movimento oscilatório e descobriu que tal carga gera um **padrão de ondas elétricas e magnéticas** que viaja rapidamente pelo espaço
- Ao calcular a velocidade de propagação destas ondas ele verificou que era igual à **velocidade da luz** (!)
- Portanto, Maxwell demonstrou que a **luz é uma forma de onda eletromagnética**



Abrindo um parêntese

Tudo bem, ondas eletromagnéticas são geradas por cargas elétricas em oscilação.

Mas onde encontramos tais cargas oscilatórias na natureza?

**Resposta: em todo lugar!**

Os átomos e moléculas de nossos corpos estão em oscilação neste momento (conceito de calor e temperatura)

Isso quer dizer que estamos emitindo ondas eletromagnéticas, assim como todos os demais corpos do universo cuja temperatura seja maior que 0 K.

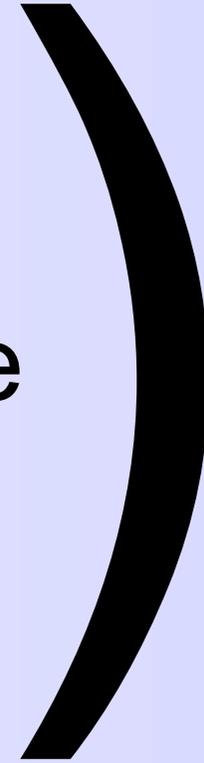


Imagem em *luz visível*  
Trata-se de luz ambiente, refletida  
em direção à câmera

Imagem em *luz infravermelha*  
Trata-se de radiação emitida pelo  
corpo da pessoa  
(Note que essa radiação passa pelo  
plástico preto)



fechando o parêntese



# Conclusão

A luz é uma onda, certo?

Na verdade, a luz é **onda E partícula!**

**Dualidade onda-partícula.**

**Aguardem...**

# Natureza da Luz: seu caráter ondulatório

## Onda eletromagnética:

luz são ondas que **não precisam de meio físico** para serem transportadas (diferente de ondas sonoras, ondas sísmicas, etc.)

## Caráter ondulatório:

Similar à pedra lançada na água. Esta forma ondas circulares que “perturbam” um folha próxima. Portanto, ondas transportam **energia** do lugar onde pedra foi lançada até o local da folha



## Onda não é objeto físico:

a água não viajou da pedra até a folha – superfície da água oscilou à medida que ONDA passava

## O que se moveu?

Onda é o padrão de movimento, o **sobe-e-desce oscilatório** que se move através da superfície da água

# Grandezas que Caracterizam uma Onda

➤ Direção de propagação

➤ Amplitude e fase da oscilação

➤ Comprimento de onda ( $\lambda$ )

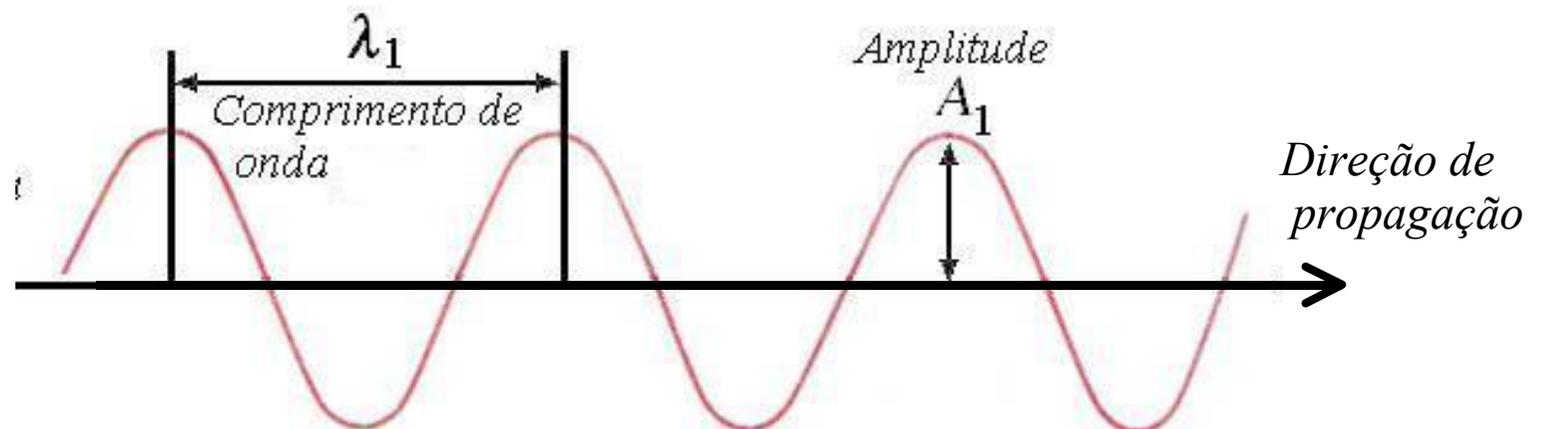
*definido como a distância entre duas cristas de onda.*

**Unidade:** m, mm,  $\mu\text{m}$ , nm,  $\text{Å}$  ( $= 10^{-10}$  m)

➤ Frequência ( $\nu$ )

*definida como o número de cristas de onda que cruzam certo ponto por unidade de tempo*

**Unidade:** Hz ( $= 1/\text{s}$ ), kHz, MHz, GHz



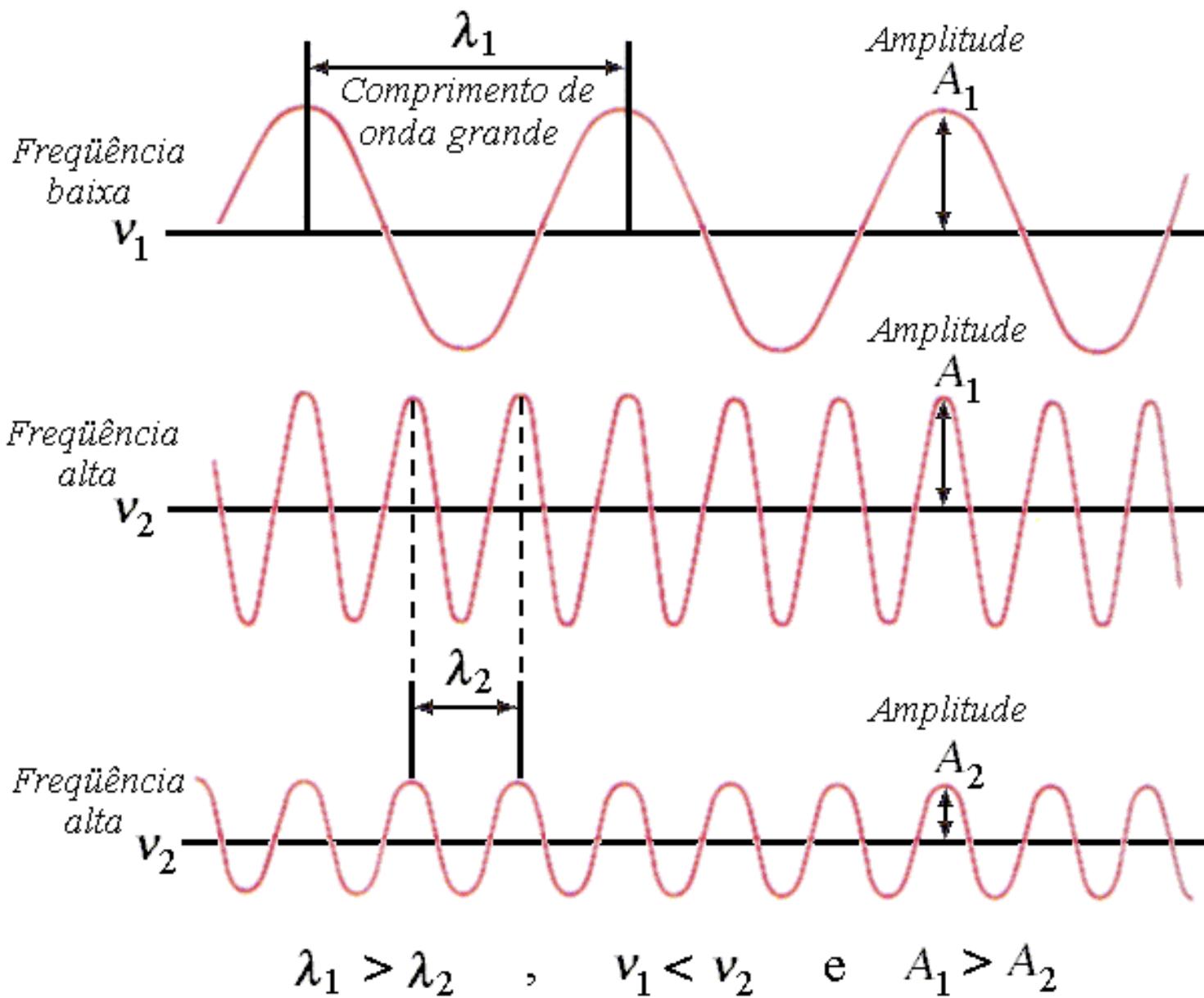
# Relação entre Comprimento de Onda e Frequência

- Existe uma relação entre a frequência e o comprimento de onda pois as ondas eletromagnéticas têm sempre a mesma velocidade
- **Truque da análise dimensional:** qual única fórmula possível que relaciona a velocidade de propagação [m/s] com o comprimento de onda [m] e a frequência [Hz = 1/s]?

$$c = \lambda \nu$$

$c$ : velocidade da luz no vácuo

# Ondas eletromagnéticas



# Velocidade da Luz

**A velocidade da luz foi medida pela 1ª vez em 1675 por Ole Roemer**

Ele utilizou observações dos eclipses das luas de Júpiter:

Os eclipses ocorriam antes do previsto quando a Terra estava mais próxima de Júpiter e após o previsto quando a Terra estava mais longe.

Diferença devido ao tempo necessário para a luz se propagar deste Júpiter até a terra

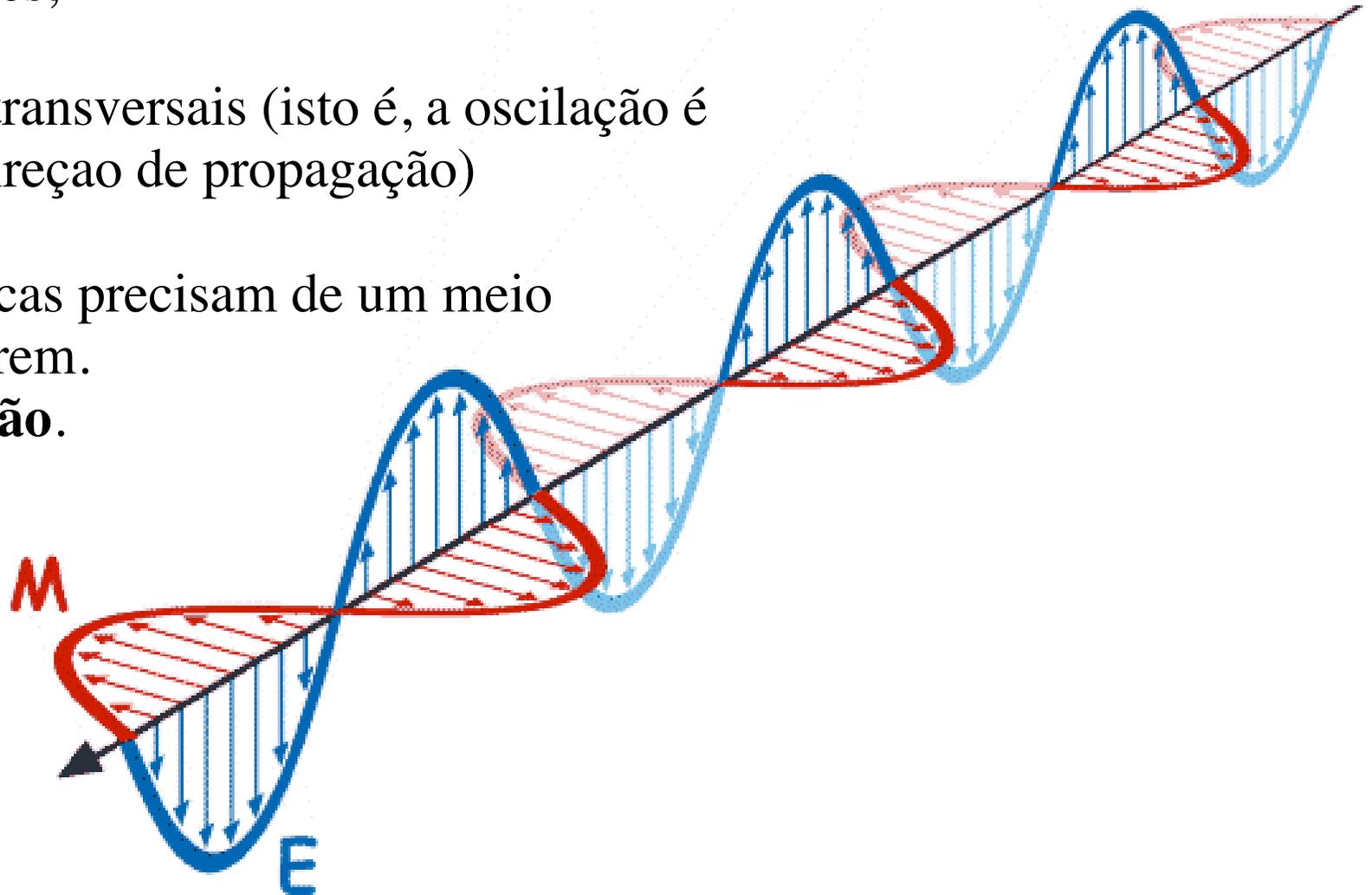
**Hoje, a velocidade da luz no vácuo,  $c$ , é uma constante da natureza e seu valor é**

$$c = 299.792,458 \text{ km/s}$$

# Radiação eletromagnética

**Resumindo:** onda EM é uma oscilação dos campos elétrico e magnético que se propaga no vácuo a uma velocidade constante,  $c$

- os planos de oscilação dos campos elétrico e magnético são perpendiculares;
- as ondas são transversais (isto é, a oscilação é ortogonal à direção de propagação)
- ondas mecânicas precisam de um meio p/ se propagarem.  
**Ondas EM não.**

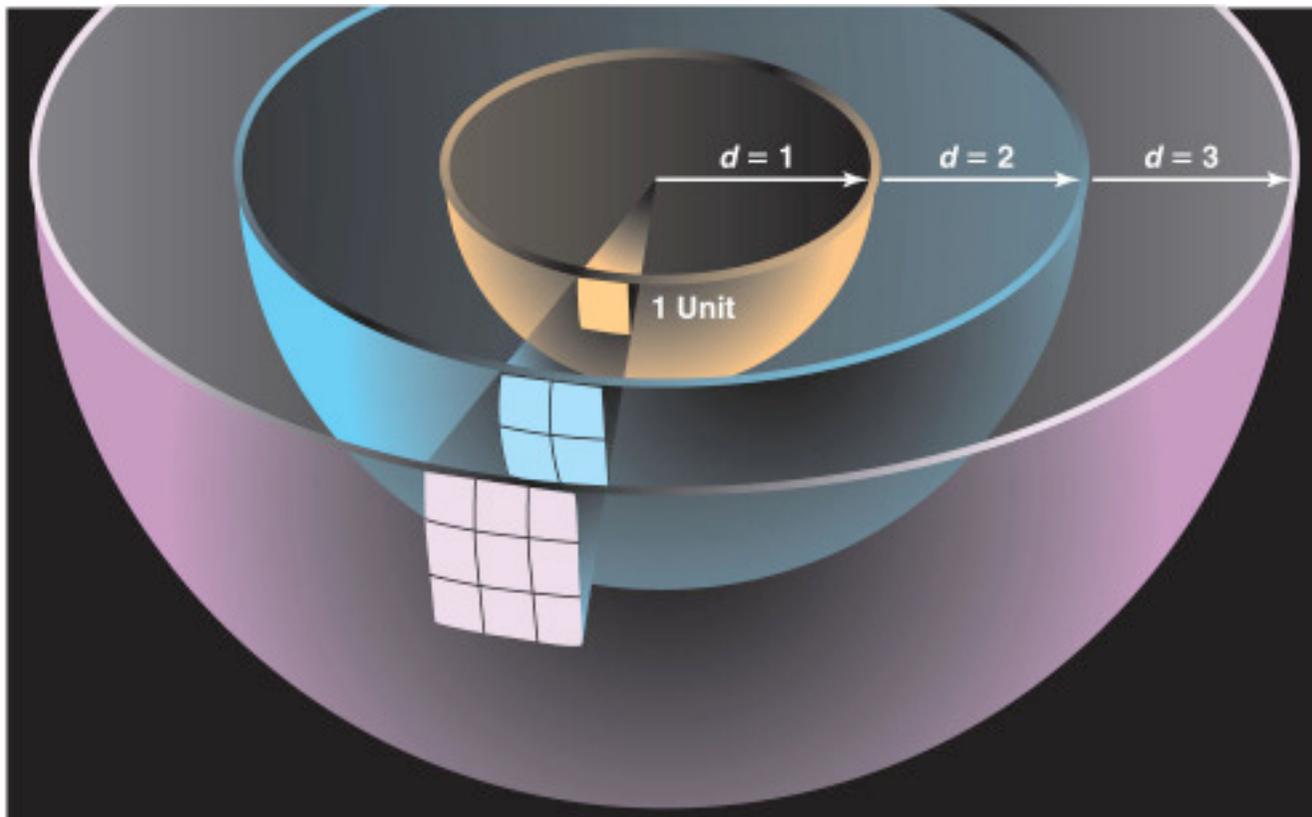


propagação com a  
velocidade da luz

# Propagação da Luz

A luz emitida de uma fonte, como uma lâmpada incandescente ou uma estrela, propaga-se **igualmente para todas as direções**.

Isso significa que, à medida que a luz se afasta da fonte, ela espalha-se ao longo de uma superfície cada vez maior



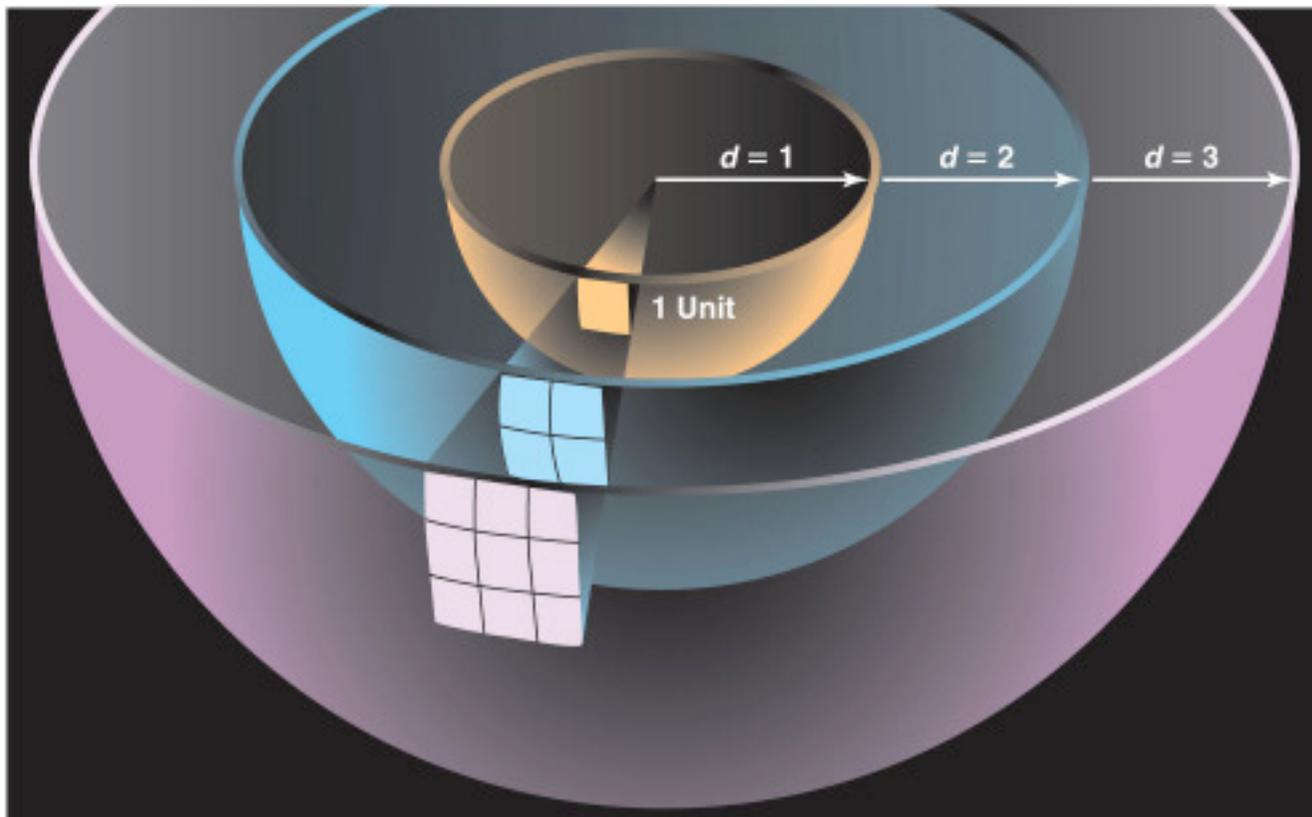
# Propagação da Luz

Esta superfície (= área) cresce com o quadrado da distância:

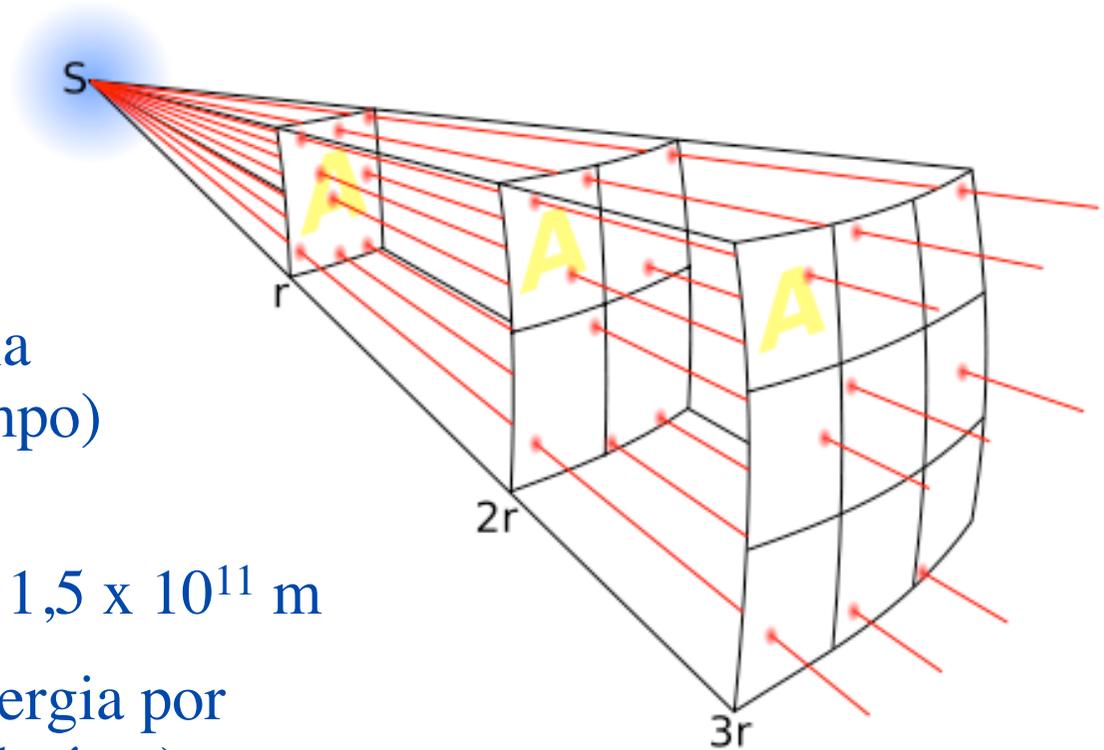
$$A = 4\pi d^2$$

Portanto, o *fluxo luminoso* (energia por unidade de área) diminui com o *quadrado da distância à fonte*

→ lei do inverso do quadrado da distância



# Propagação da Luz



## Exemplo:

A **luminosidade** (ou seja, energia total emitida por unidade de tempo) do Sol é  $L = 3,9 \times 10^{26} \text{ W}$

A distância Terra-Sol é  $1 \text{ UA} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$

Portanto, o **fluxo de energia** (energia por unidade de tempo por unidade de área) que atinge a superfície terrestre é

$$F = L / (4\pi d^2)$$

$$F = 1379 \text{ W/m}^2$$

E para os demais corpos do Sistema Solar? Lista 2...

# Propagação da Luz

A lei do inverso do quadrado da distância é fundamental em astrofísica.

Por exemplo, suponhamos que a luminosidade de um determinado astro seja conhecida:  $L_{\text{astro}}$

Utilizando um instrumento chamado **bolômetro**, medimos o fluxo luminoso (somado para os comprimentos de onda) que chega até nós:  $F_{\text{astro}}$

Com essas duas informações, calcula-se a **distância ao astro**

$$d_{\text{astro}} = \sqrt{\frac{L_{\text{astro}}}{4\pi F_{\text{astro}}}}$$

Parte importante da pesquisa astrofísica consiste na identificação e calibração das chamadas **velas-padrão**, objetos cuja luminosidade intrínseca é conhecida. Tais velas-padrão são fundamentais para o estabelecimento das **escalas de distância do Universo** (aula 10).

# A Natureza Corpuscular da Luz: Fóton

Quando luz interage com a matéria (átomos ou moléculas) ela comporta-se ora como onda (como vimos) ora como partícula.

Exemplo clássico: o **efeito fotoelétrico**. A luz ao incidir sobre um metal pode fazer com que um elétron seja ejetado do mesmo (células fotoelétricas baseiam-se neste princípio)

Esse efeito só pode ser compreendido se a luz for tratada como uma partícula: **quantum de luz ou energia = fóton**

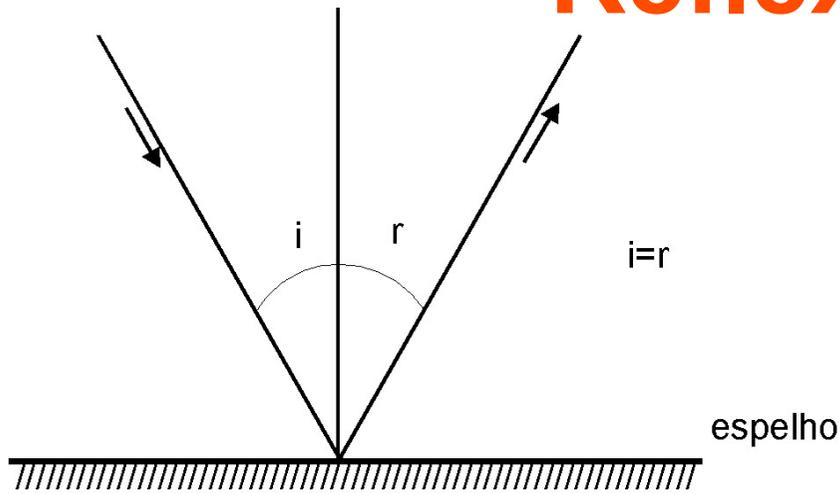
A energia do fóton é proporcional à frequência da radiação eletromagnética:

$$\text{energia} = \text{frequência} \times h \quad \text{ou} \quad E = h \nu$$

onde  $h$  é a constante de Planck:

$$h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{ joule} \times \text{segundo}$$

# Reflexão e Refração



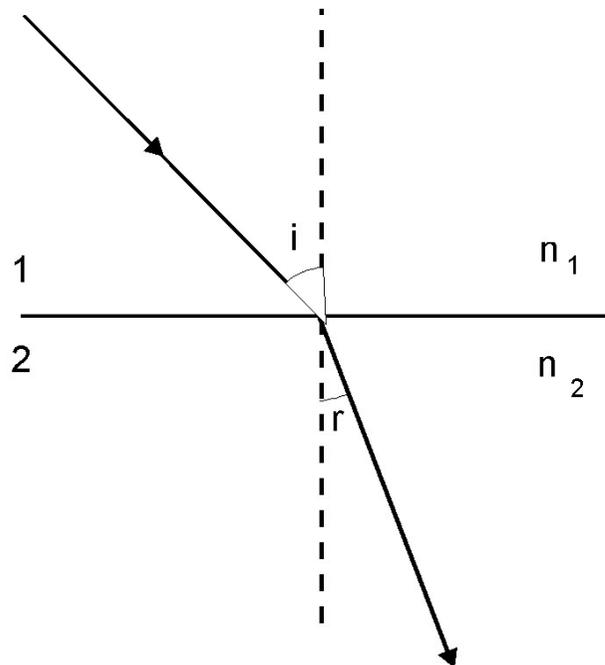
## Reflexão:

luz ao incidir em espelho

ângulo de incidência = ângulo de reflexão

## Refração:

Quando a luz propaga atravessando diferentes meios, ela sofre refração, mudando de velocidade em função dos diferentes **índices de refração ( $n$ )**.



Se  $n_2 > n_1$ , temos:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

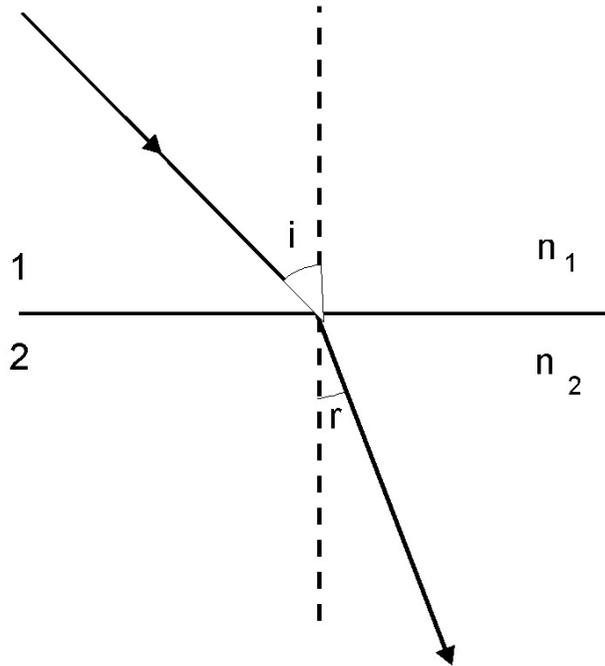
→ lei de Snell-Descartes → luz é **distorcida ou refratada:**

Exemplos do caminho da luz em **telescópios** refletores e refratores.

# Velocidade da Luz em diferentes meios

Refração:

$$v = c/n$$



Vacuo:  $n = 1$

Ar:  $n = 1,0003$

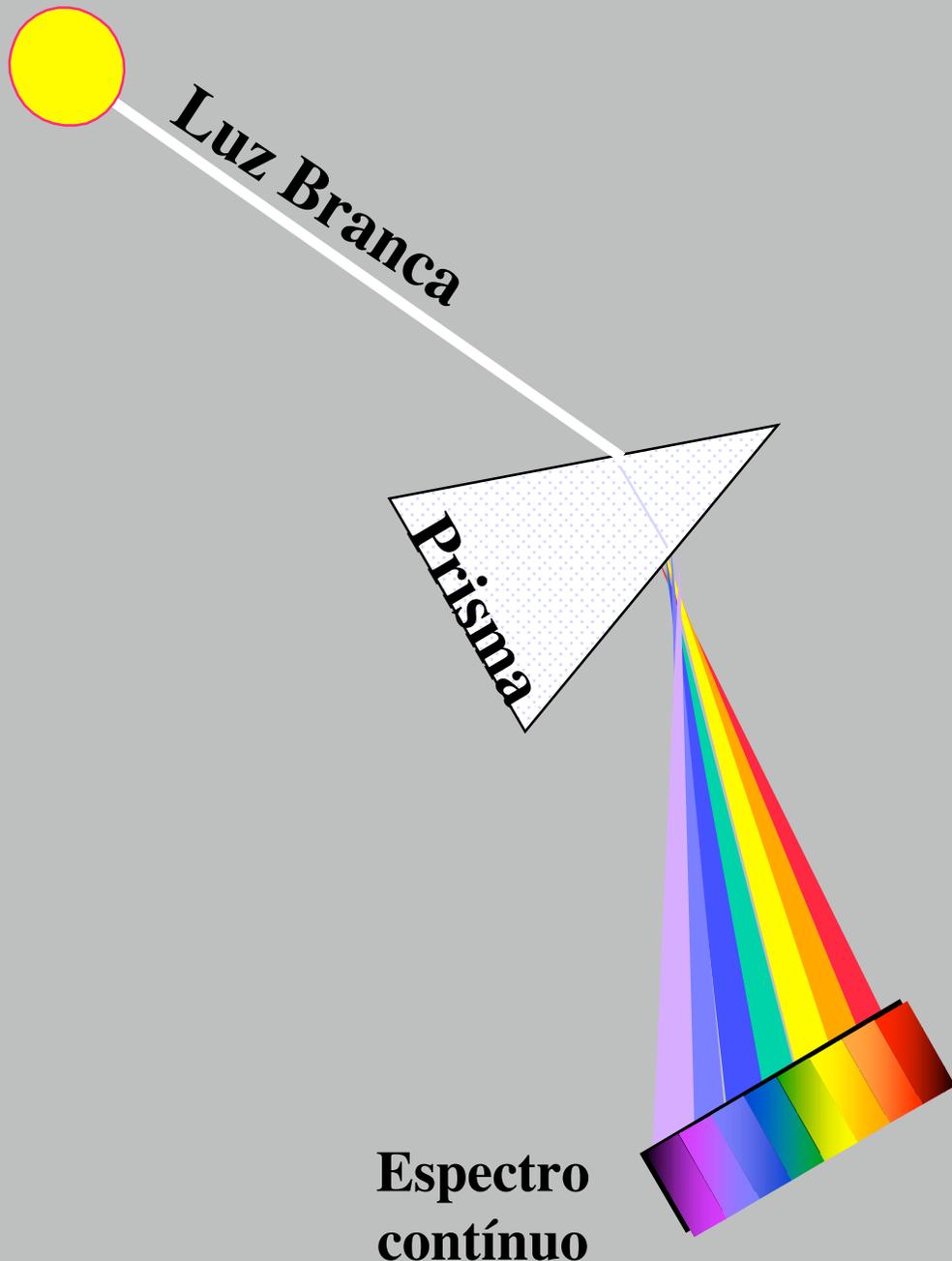
Vidro:  $n = 1,5$

Índice de refração depende de \_:

$$n = n(\_)$$

→ Quando luz **BRANCA** (mistura de cores) atravessa **PRISMA**:  
decomposta em vários \_s (diferentes cores)

# Decomposição da Luz Visível



Um prisma é capaz de separar a luz branca nas cores do arco-íris

O que diferencia cada cor?  
Sua frequência e comprimento de onda.

Vermelho:  $\lambda = 630-740$  nm

Laranja:  $\lambda = 590-630$  nm

Amarelo:  $\lambda = 560-590$  nm

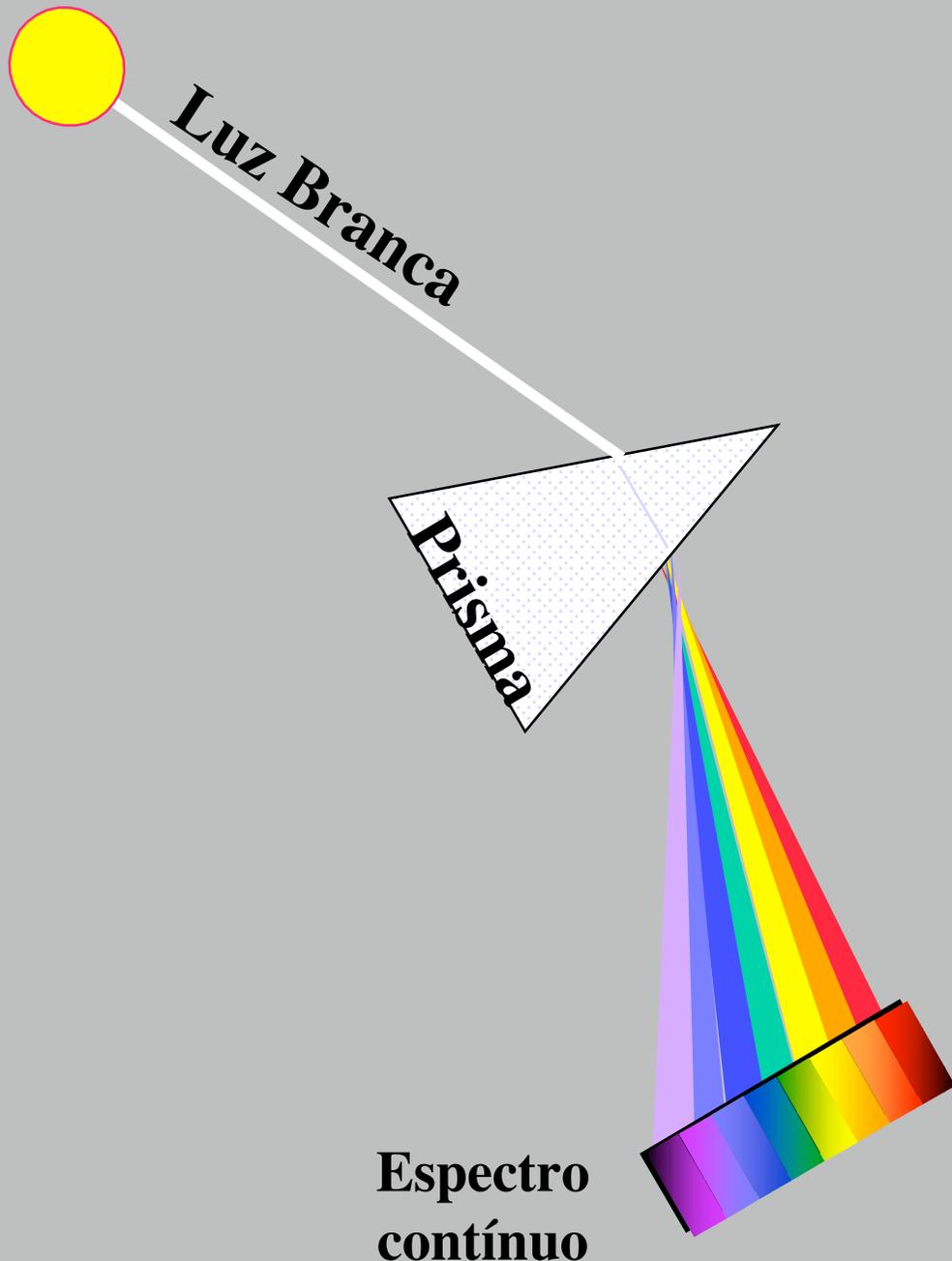
Verde:  $\lambda = 500-560$  nm

Azul:  $\lambda = 480-500$  nm

Anil:  $\lambda = 440-480$  nm

Violeta:  $\lambda = 380-440$  nm

# Decomposição da Luz Visível



Vermelho:  $\lambda = 630-740$  nm

Laranja:  $\lambda = 590-630$  nm

Amarelo:  $\lambda = 560-590$  nm

Verde:  $\lambda = 500-560$  nm

Azul:  $\lambda = 480-500$  nm

Anil:  $\lambda = 440-480$  nm

Violeta:  $\lambda = 380-440$  nm

**Pergunta: qual cor correspondem os fótons mais energéticos?**

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

**Portanto, quanto maior  $\lambda$ , menor a energia.**

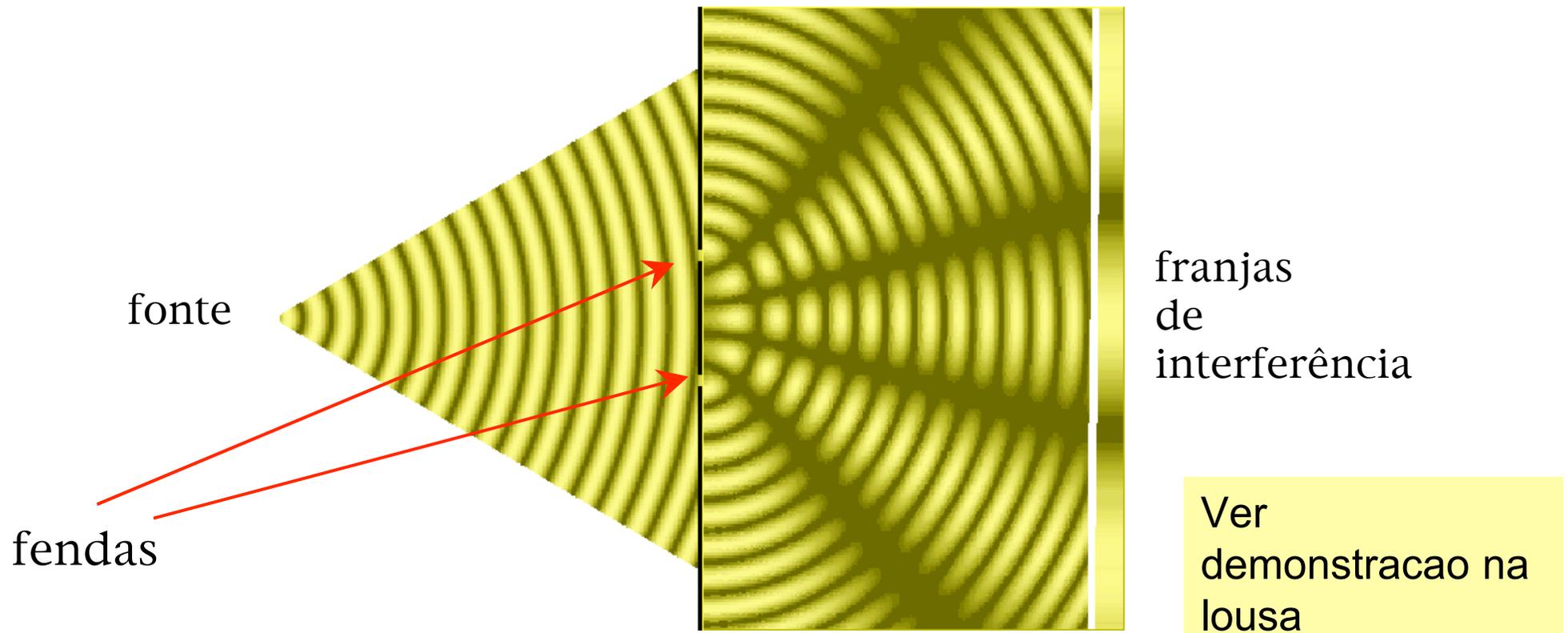
**Resposta: violeta**

# Luz: Difração e Interferência

**Thomas Young** realiza a experiência da fenda dupla, mostra o fenômeno de **interferência** da luz e conclui sobre sua natureza ondulatória.

Tal como água: ondas de luz quando encontram obstáculo (fenda): **difratam**

Quando convergem e encontram outras: **interferem**



# Luz: Difração

Intensidade da radiação (I) da luz difratada (que passa pela fenda):

$$I \propto E^2$$

$$E = E_0 \operatorname{sena}$$

**E:** intensidade do campo elétrico

Pode-se demonstrar que a largura angular do primeiro máximo:

$$\theta = \lambda / D$$

**$\lambda$ :** comprimento de onda da radiação

**D:** tamanho da abertura da fenda

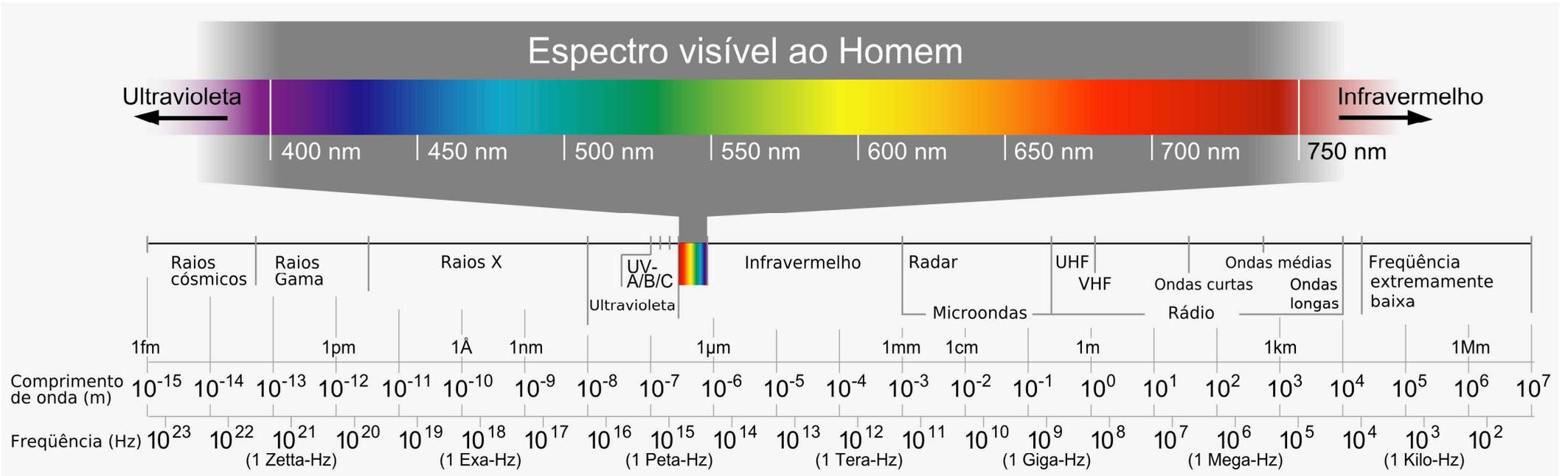
**$\theta$**  → nenhuma imagem ótica pode ser <  **$\theta$**  : limite de difração

Ex.: telescópio com abertura (fenda) de diâmetro  $D=1\text{m}$  vendo luz de  $\lambda = 5000 \text{ \AA} = 500 \times 10^{-9} \text{ m}$

# Espectro Eletromagnético

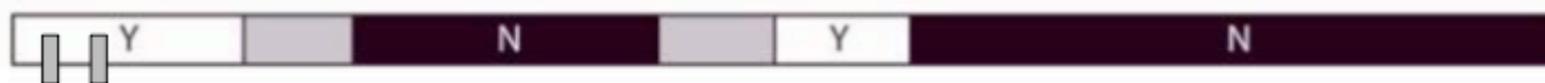
A radiação eletromagnética pode ter comprimentos de onda que vão desde **quilômetros** até a **dimensão do núcleo atômico**

A cada faixa do **espectro eletromagnético** dá-se um nome diferente, de acordo com suas propriedades. Por exemplo, chama-se de luz visível a radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 380 e 740 nm



# O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

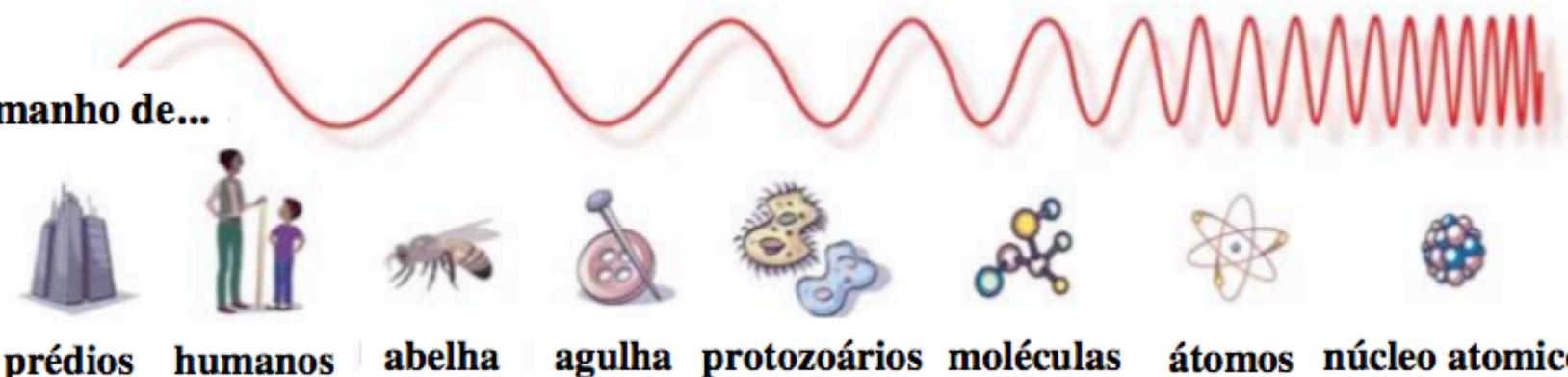
Penetra a atmosfera?



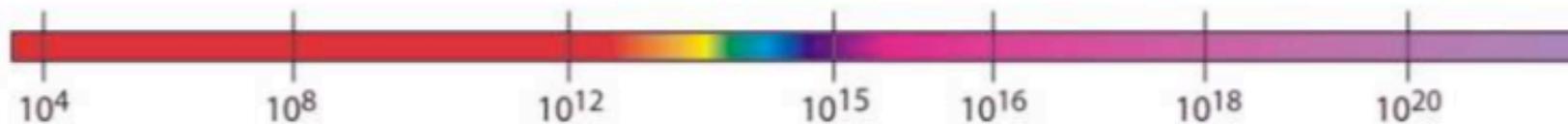
Comprimento de onda ( $\lambda$ ) - em metros



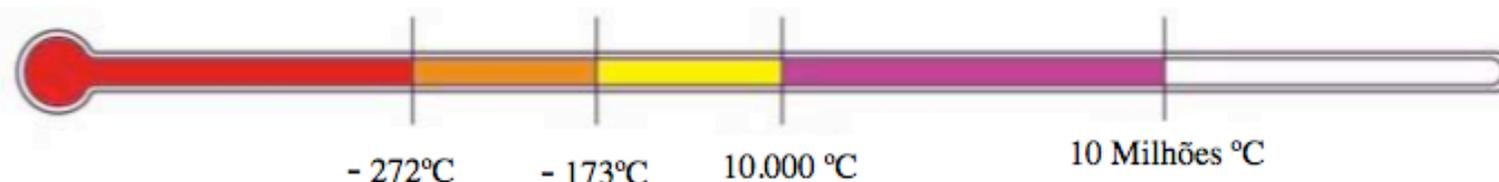
Do tamanho de...



freqüência - em Hertz



Temperatura - em Celsius



# Espectro Eletromagnético

**Baixas frequências** ( $\lambda$  grandes, baixas energias): à esquerda da luz visível

**Rádio** (AM, FM, TV)

**Microondas** (essencial para o café da manhã...)

**IV:** percebemo-lo como calor

**Altas frequências** ( $\lambda$  pequenos, altas energias): à direita do visível:

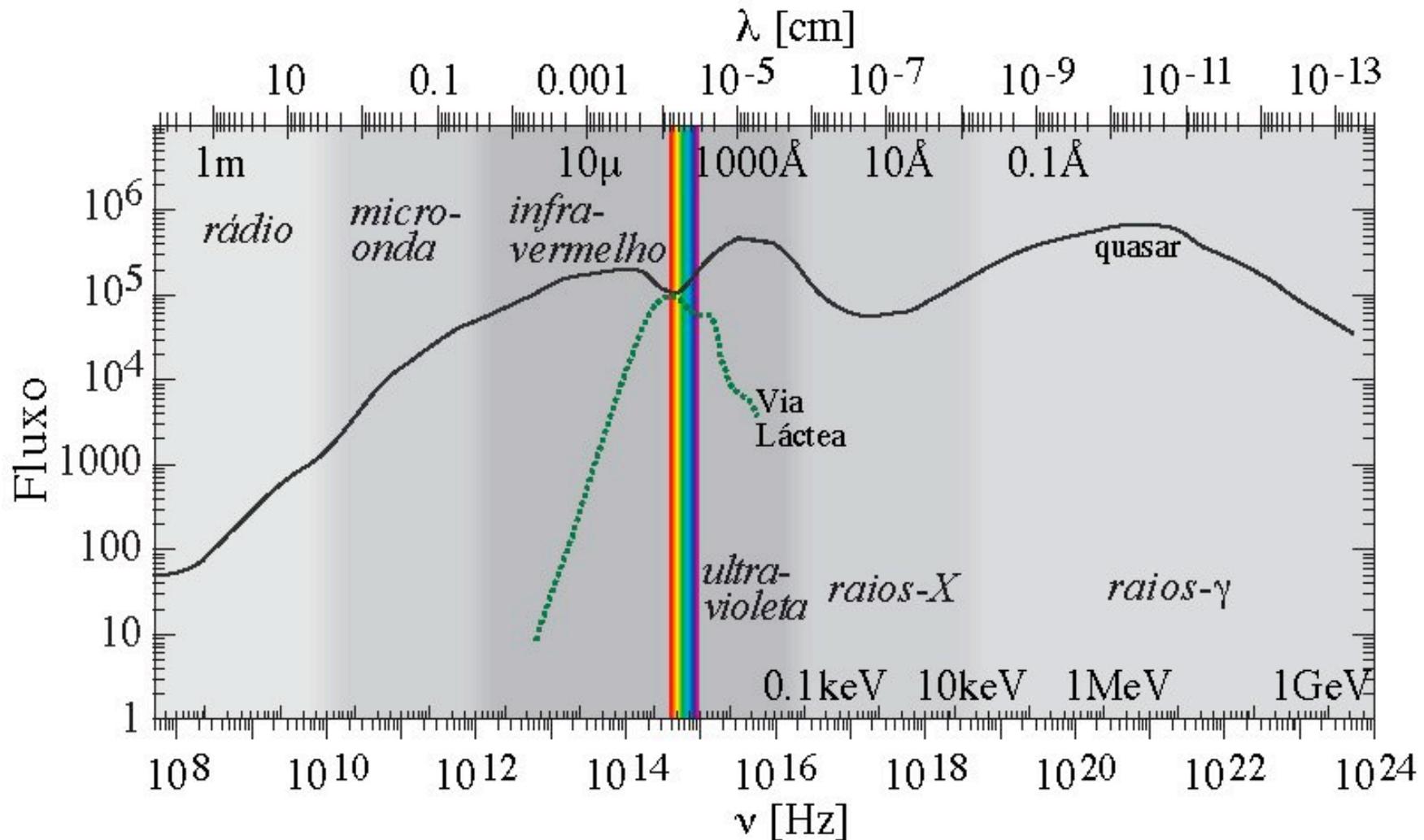
**UV:** bronzeamento e queimaduras solares.

Lâmpadas UV são usadas para esterilizar materiais

**raios-X:** penetram tecido humano

**raios- $\gamma$ :** menores  $\lambda$ s, associados a radio-atividade, danosos a células vivas

# Espectro Eletromagnético



Informação sobre as propriedades físicas dos astros são obtidas direta ou indiretamente de seus espectros: temperaturas, densidades e composições

# Rádio e microondas

AM: 500–1700 kHz

FM: 87–108 MHz

TV (VHF): 30–300 MHz

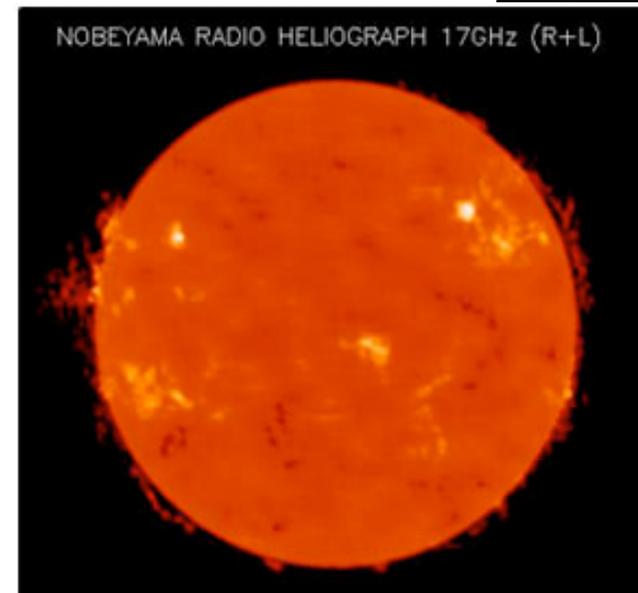
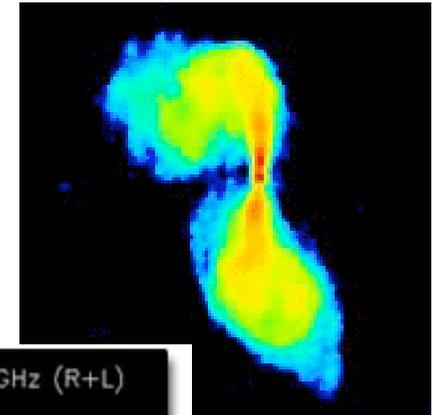
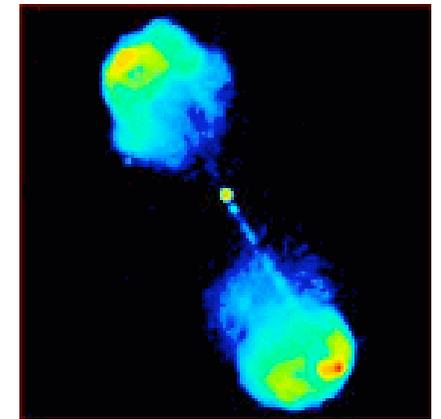
TV (UHF), celular: 300–3000 MHz

Hidrogênio neutro: 1400 MHz (21 cm)

Monóxido de carbono (CO): 115, 230, 345 GHz

Radiação cósmica de fundo (max): 220 GHz

Sol é a mais forte fonte de rádio do céu



# Infravermelho

IV distante (*do visível*): 20–300  $\mu\text{m}$  (0,02–0,3 mm)

Ex: emissão de poeira interestelar fria

IV médio: 1,4–20  $\mu\text{m}$

Ex: emissão de poeira circunstelar quente

IV próximo: 0,7–1,4  $\mu\text{m}$

Ex: emissão de galáxias distantes, estrelas de baixa massa

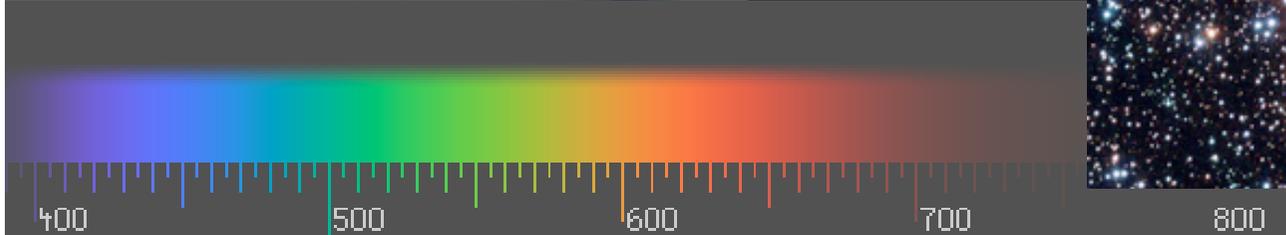
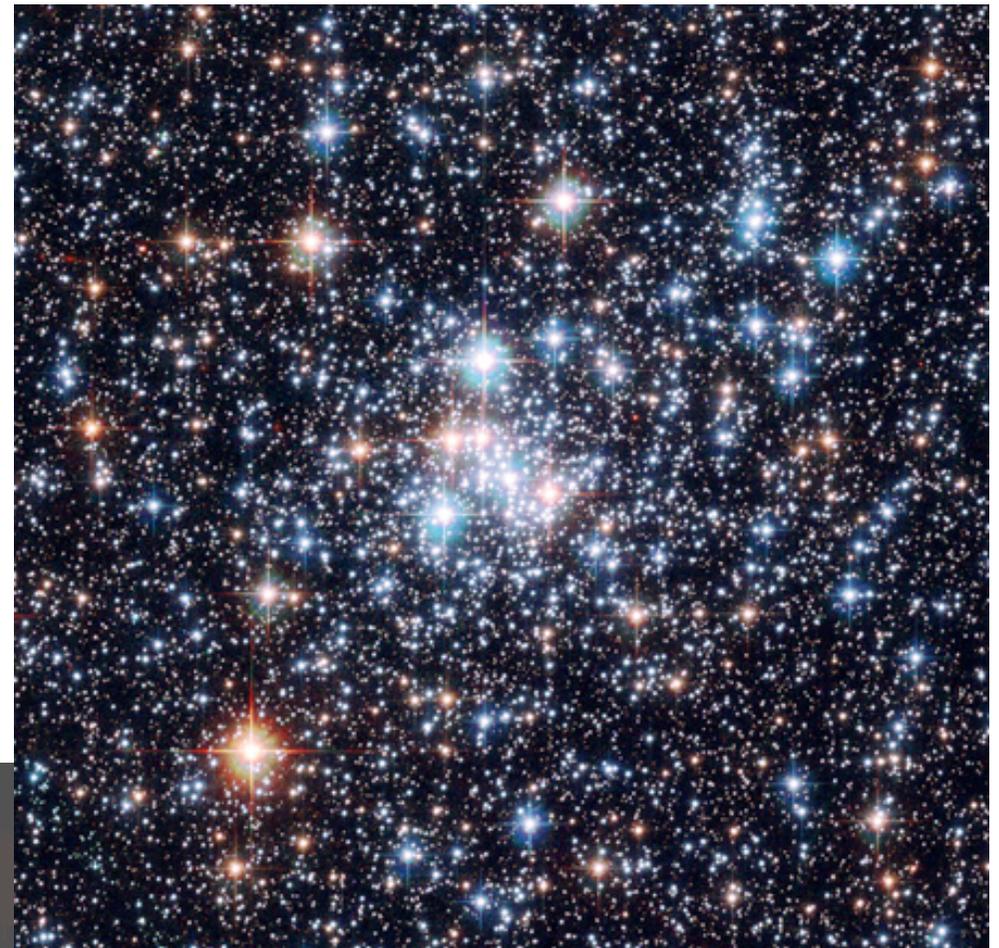
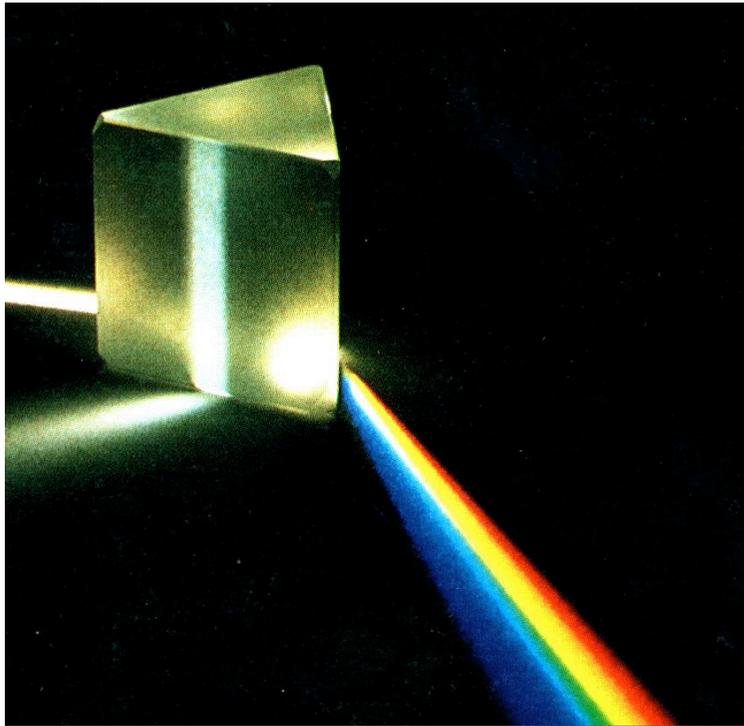


# Visível

emissão de estrelas e nebulosas.

380 – 740 nm

Historicamente, é a principal região do espectro eletromagnético para a astronomia



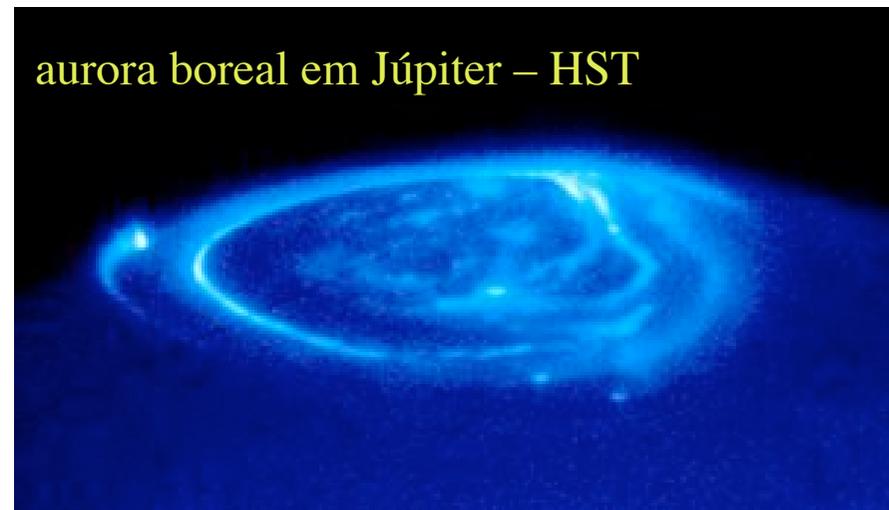
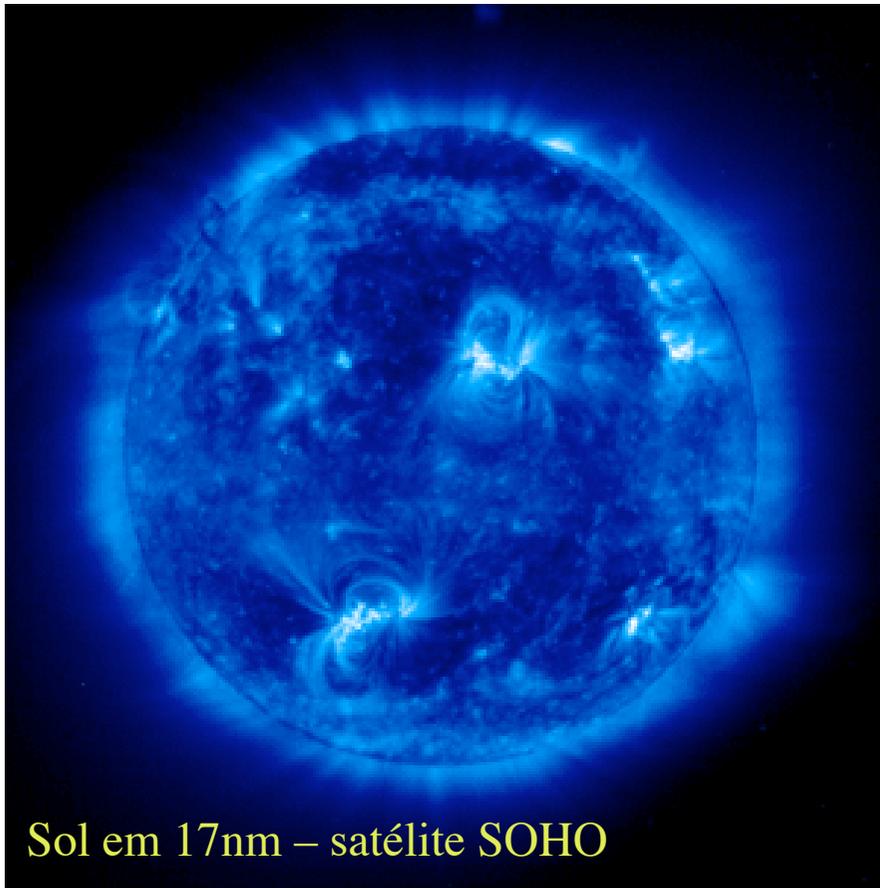
# Ultravioleta

UV próximo:  $\lambda=200\text{--}380\text{ nm}$

regiões de formação estelar, núcleos ativos de galáxias,  
estrelas quentes (massivas)

UV distante:  $\lambda=10\text{--}200\text{ nm}$

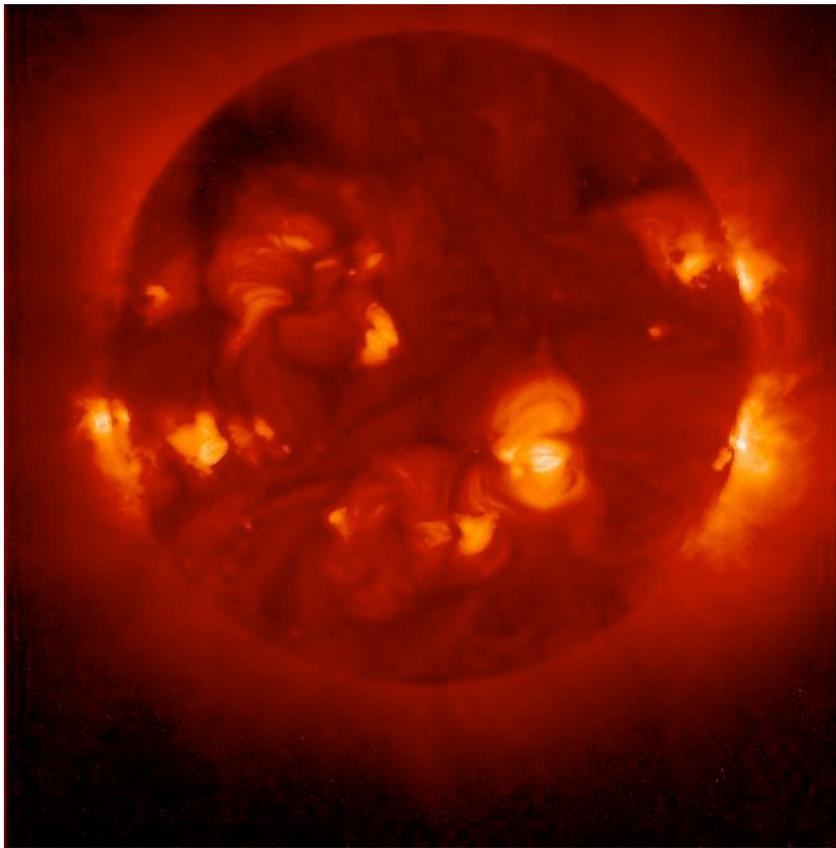
núcleos ativos, gás quente extra-galáctico



# Raios-X

$$\lambda = 0,01 - 10 \text{ nm}$$

núcleos ativos de galáxias, gás intra-aglomerado de galáxias cuja temperatura é de milhões de graus



O Sol em raios-X

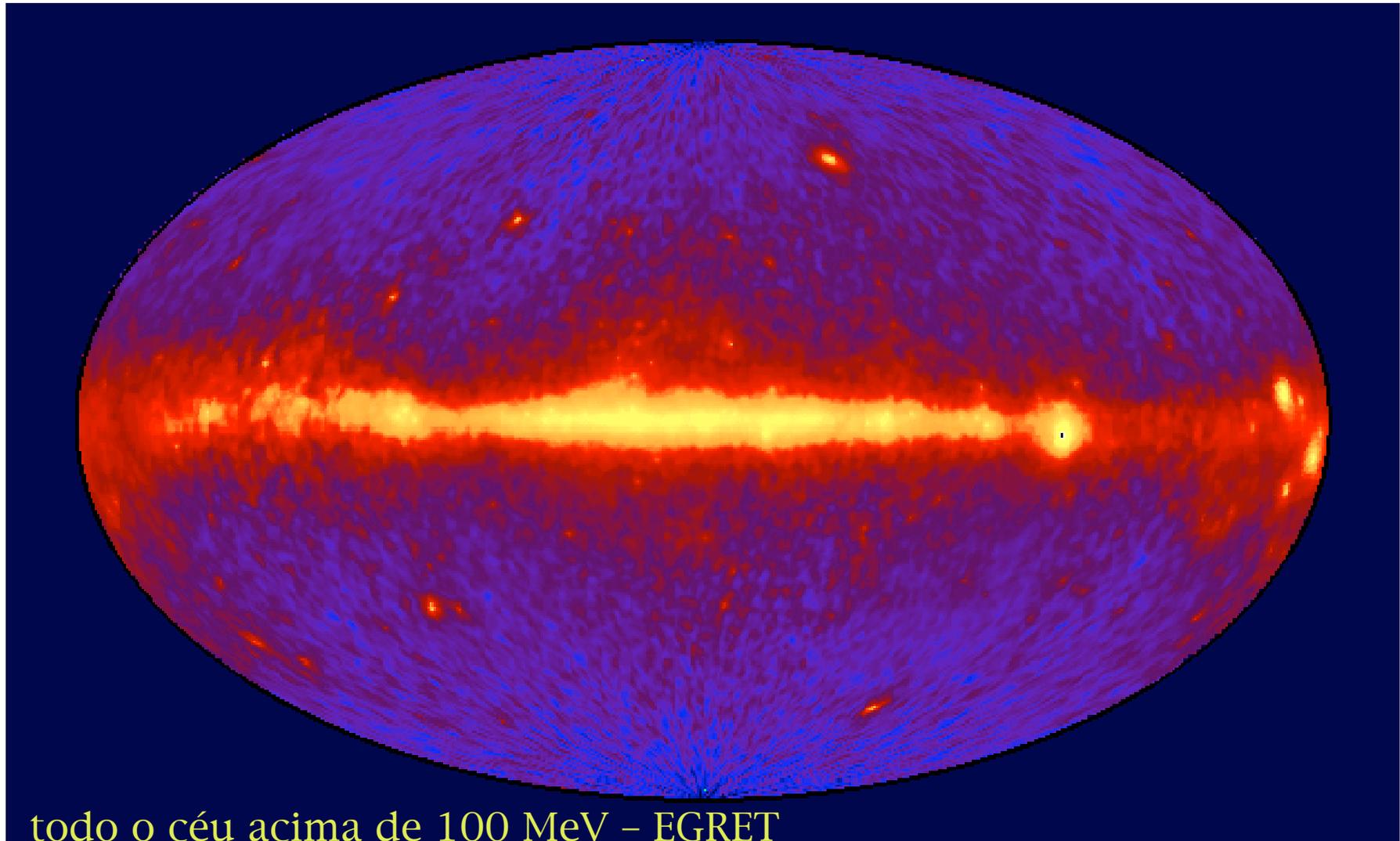


aglomerado de galáxias 1E 0657-56 – Chandra

# Raios- $\gamma$

$\lambda < 0,01$  nm

Ex: explosões de supernovas, decaimento radiativo



# Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético

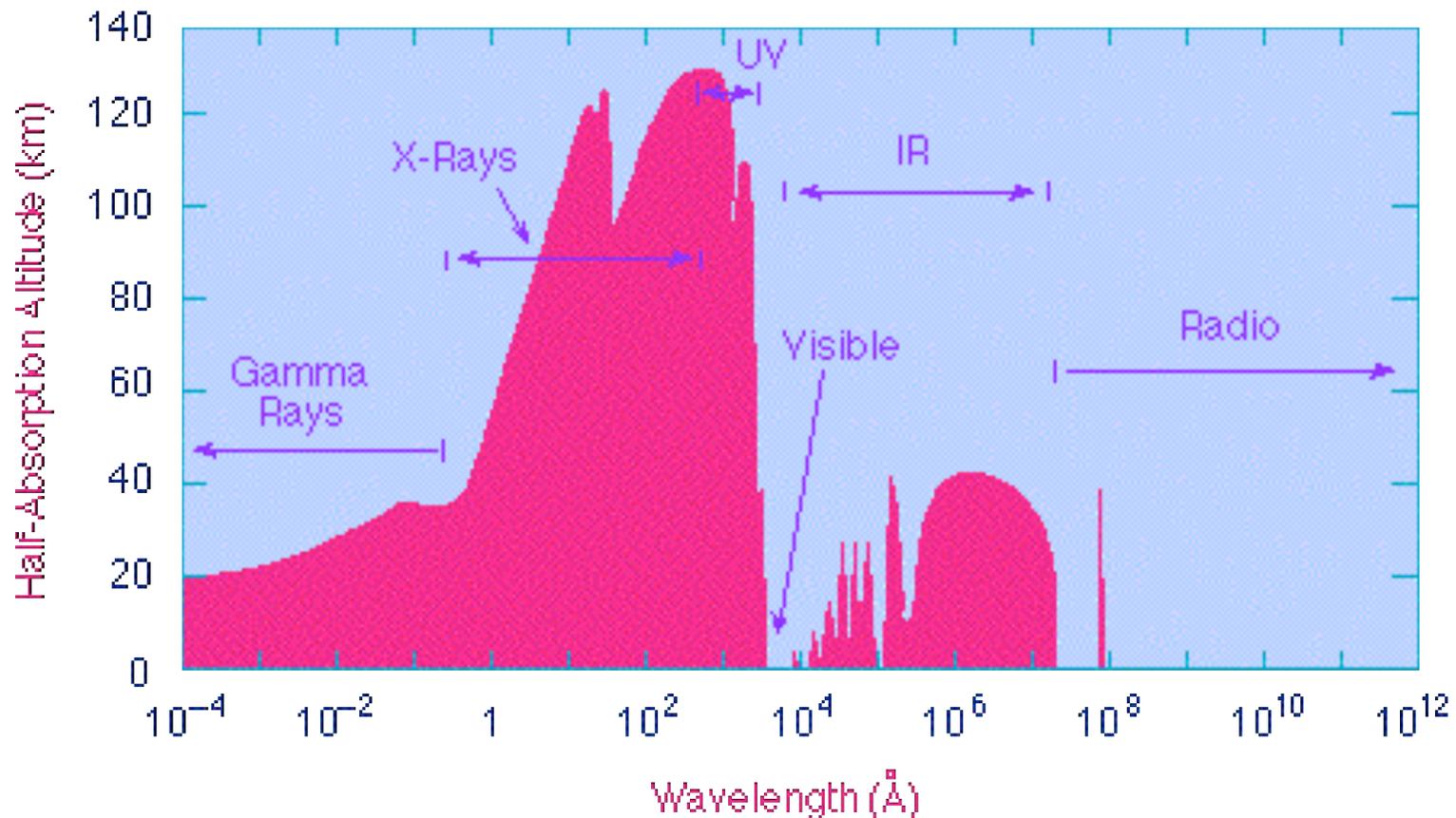
A atmosfera terrestre absorve a radiação em algumas regiões do EM

Onde atmosfera é **TRANSPARENTE** à radiação: **JANELAS ATMOSFÉRICAS**

**visível e rádio:** atmosfera é transparente:: podemos observar Universo desde a superfície da Terra

**IR:** parcialmente transparente

**UV, raios-X e raios-γ:** atmosfera é opaca. Neste caso, as observações devem ser feitas por satélites no espaço



# Radiação e Temperatura

Vimos que alguns corpos emitem radiação no visível (Sol), outros emitem no infravermelho (nós...).

O que determina o comprimento de onda da radiação que um corpo emite?

**Sua temperatura.**

Vimos que a radiação EM origina-se de cargas em movimento. Quanto maior a temperatura de um corpo, mas rápido é o movimento e maior a frequência da radiação emitida.

# Radiação de Corpo Negro

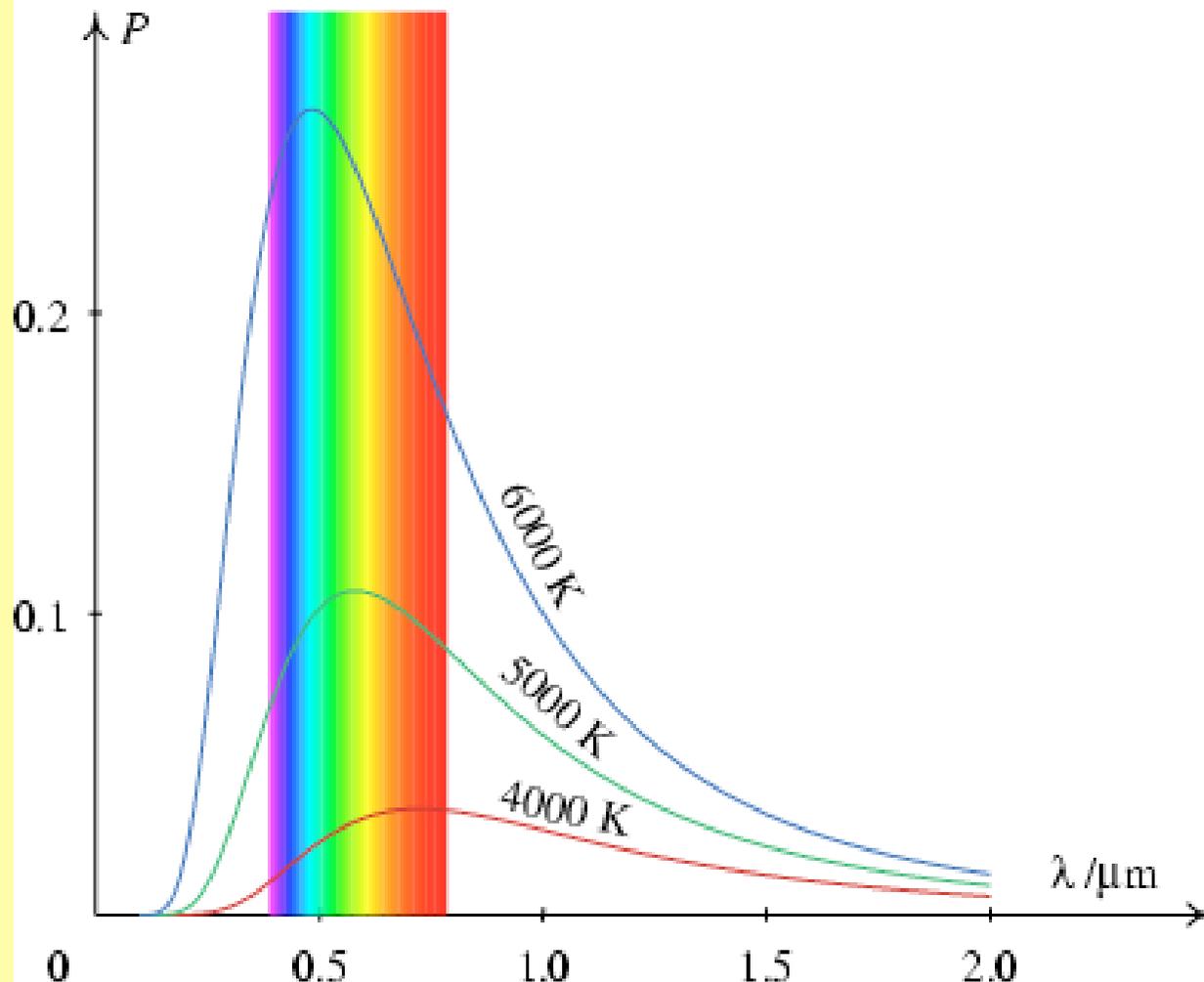
Um dos maiores problemas para a física do século XIX foi explicar a chamada **radiação de corpo negro**.

Corpo negro é um objeto idealizado que absorve toda a energia que incide sobre ele e a reemite na forma de **radiação eletromagnética (radiação térmica)**.

Um forno e uma **estrela** são boas aproximações para um corpo negro.

# Radiação de Corpo Negro

Fluxo luminoso emitido por corpos negros a diferentes temperaturas:



## Propriedades:

- o Espectro contínuo (ou seja, um corpo negro emite em todos os comprimentos de onda)
- o Maior energia emitida quanto maior  $T$
- o Quanto maior  $T$  menor o comprimento de onda do pico de emissão
- o Exemplo:
  - metal morno: IV
  - metal quente: vermelho
  - metal muito quente: azul

# Radiação de Corpo Negro

## Lei de Wien

O comprimento de onda correspondente ao pico de emissão de um corpo negro é dado por

$$\lambda_{\max} = 2,9 \times 10^6 / T \text{ [nm]}$$

As estrelas emitem um espectro parecido (mas não igual) a de um corpo negro. **Portanto, a cor de uma estrela é um “termômetro” para medir sua temperatura!**

## Lei de Stephan-Boltzman

A energia total emitida por um corpo negro é dada por

$$E \propto \sigma T^4$$

onde  $\sigma$  é uma constante.

# Radiação de Corpo Negro

## Exemplos

Qual o máximo de emissão do espectro (contínuo) de um corpo negro à temperatura de:

(a)  $T = 27^{\circ}\text{C} = 300 \text{ K} \Rightarrow \lambda_{\text{max}} = 2,9 \times 10^6 / 300 = 9700 \text{ nm}$  (infravermelho)

(b)  $T = 5800 \text{ K} \Rightarrow \lambda_{\text{max}} = 2,9 \times 10^6 / 5800 = 500 \text{ nm}$  (visível)

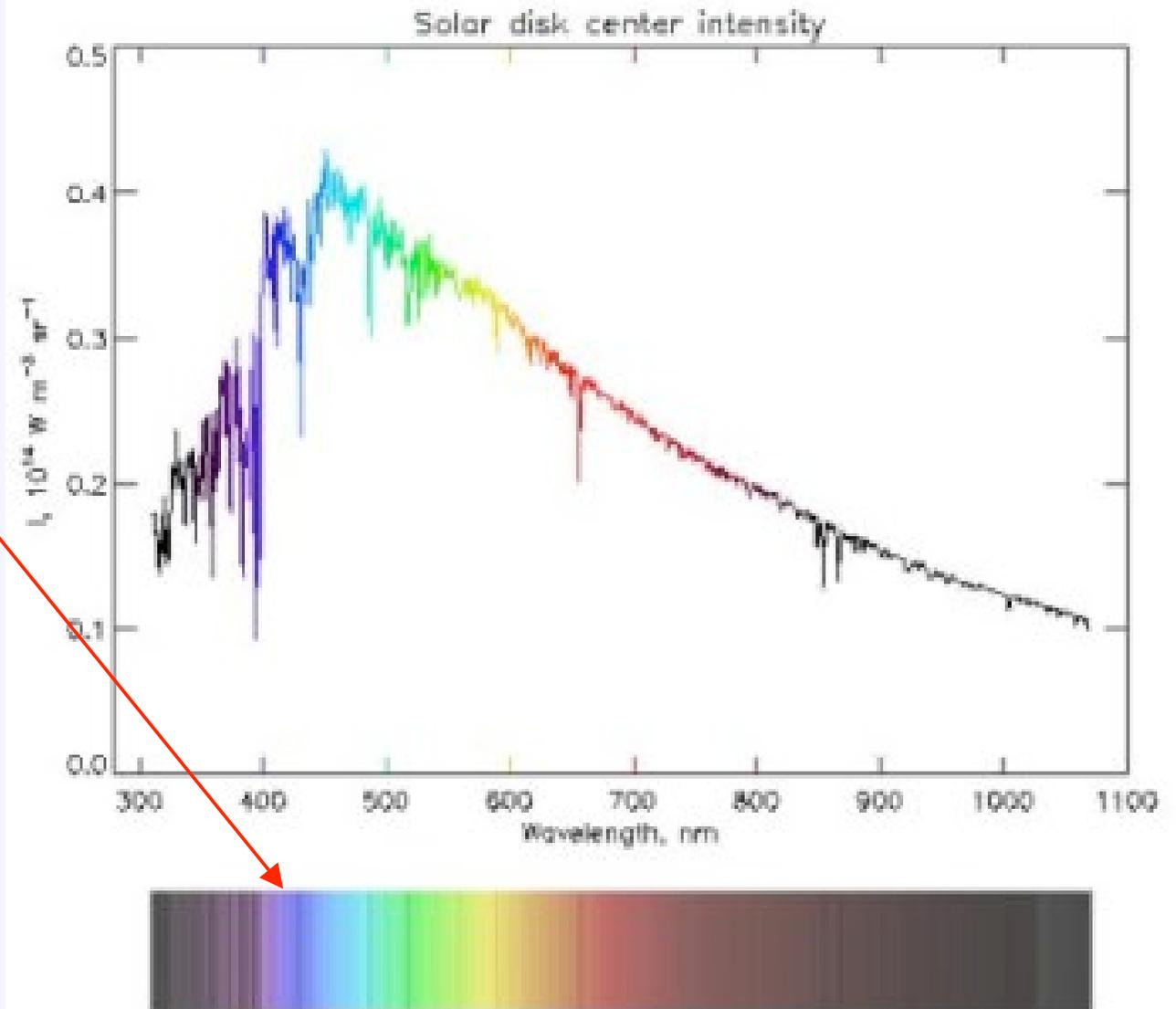
(c)  $T = 10\,000 \text{ K} \Rightarrow \lambda_{\text{max}} = 2,9 \times 10^6 / 10\,000 = 290 \text{ nm}$  (UV)

# Espectroscopia

## Espectro do Sol

Lembra muito a forma de um espectro de corpo negro, mas o que são essas linhas escuras?

Para entendê-las, precisamos antes estudar as **leis de Kirchhoff**



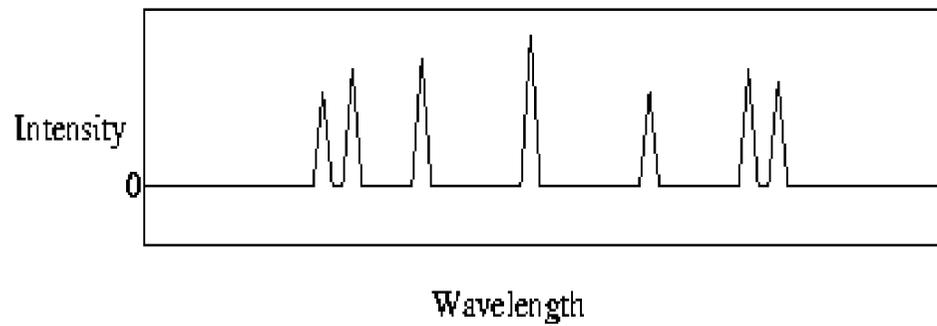


Em 1856, os alemães Robert Bunsen (1811-1899) e Gustav Kirchhoff (1824-1877) começaram a analisar o espectro de diversas substâncias quando colocadas numa chama.

Os espectros observados tinham linhas espectrais brilhantes e cada **elemento químico apresentava um conjunto de linhas característico**.

Observando-se quais linhas estavam presentes num espectro, era possível identificar a composição química do material.

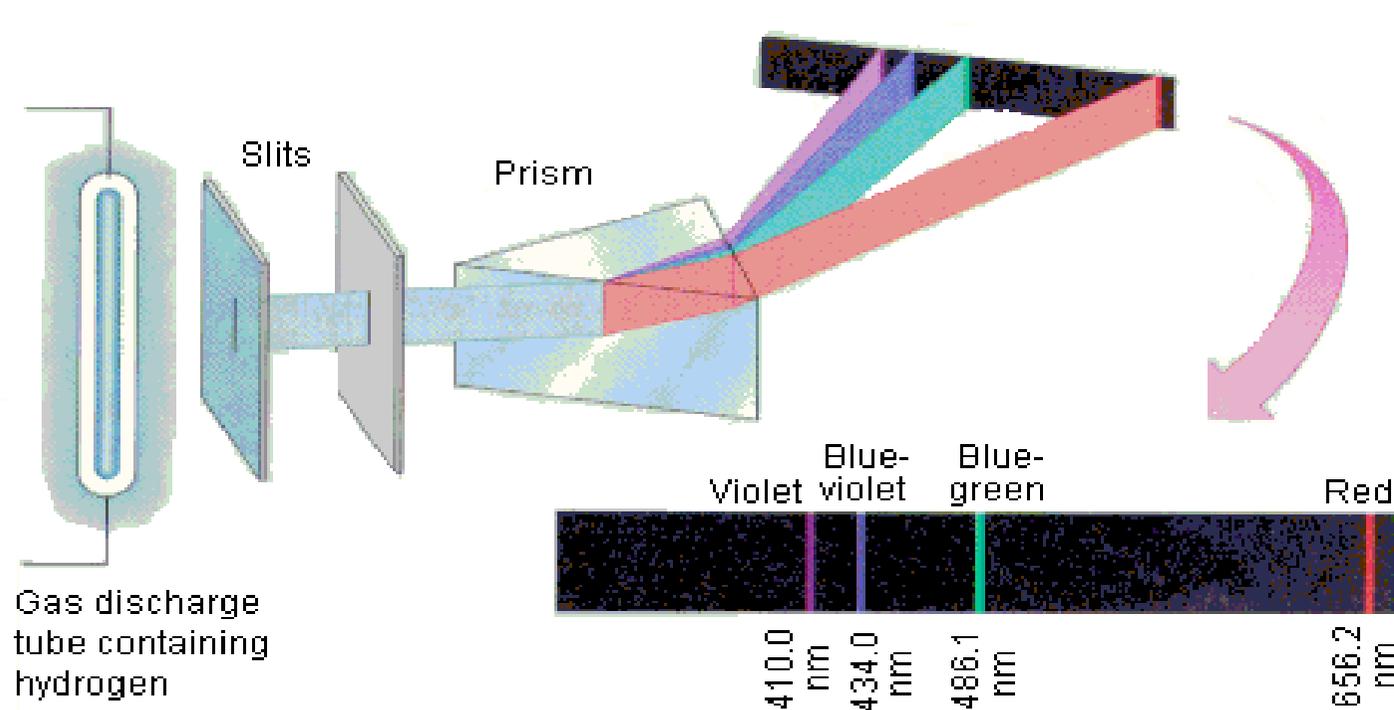
# *Espectros de emissão*



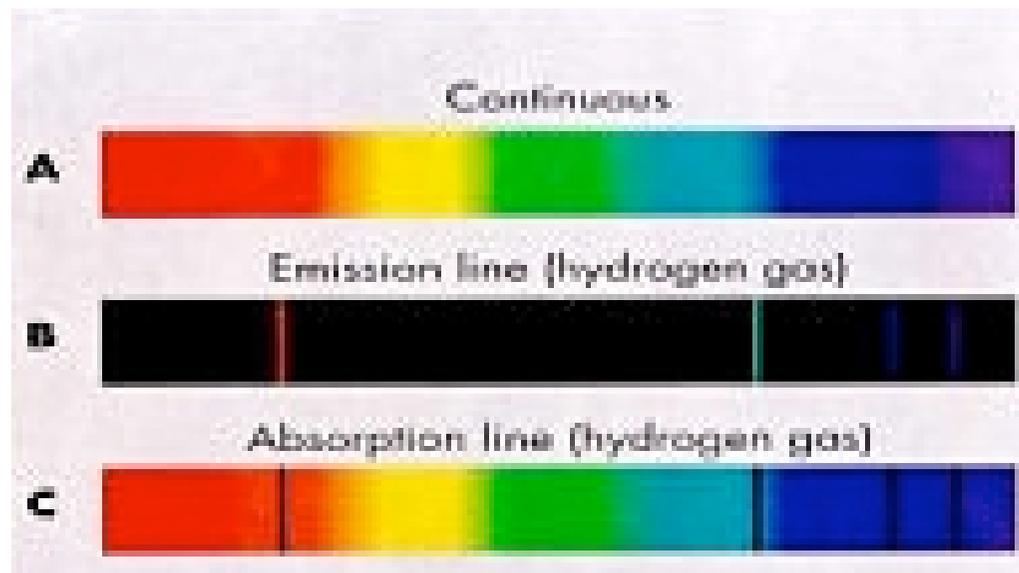
# As leis de Kirchhoff

Kirchhoff realizou diversas experiências, analisando o espectro emitido por objetos incandescentes.

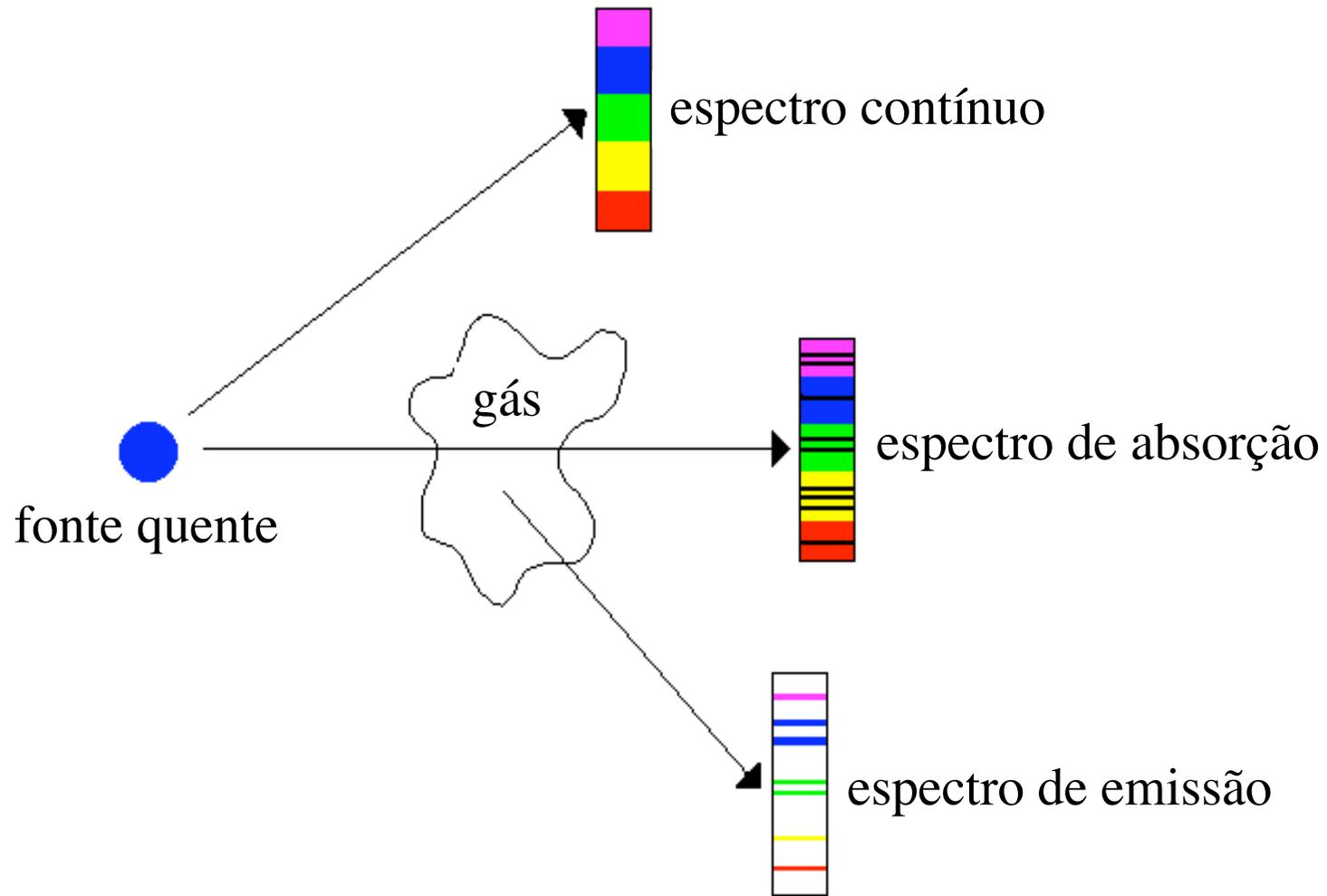
Baseando-se em suas observações, ele elaborou um conjunto de três leis empíricas que descrevem o tipo de espectro observado.



- 1) Um sólido, líquido ou gás a alta pressão incandescente emite um espectro contínuo (nosso conhecido corpo negro)
- 2) Um gás quente a baixa pressão produz um espectro de emissão de linhas, cujos comprimentos de onda dependem da composição química do gás.
- 3) O espectro contínuo, emitido por um objeto incandescente, ao passar por um gás mais frio apresentará linhas de absorção correspondentes à composição química deste último.

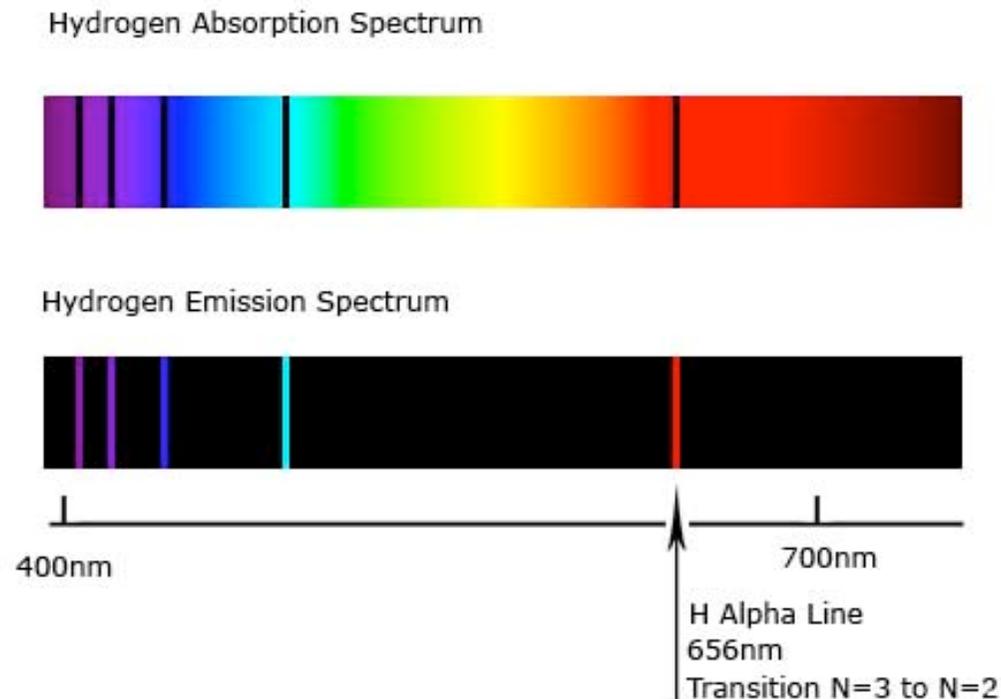


# *Leis de Kirchhoff*



A posição (comprimento de onda) das linhas espectrais de emissão ou absorção dependem da **composição química** do material.

Um dado objeto astronômico pode ter um espectro de emissão ou absorção, de acordo com as leis de Kirchhoff, mas o comprimento de onda dessas linhas é o mesmo em qualquer lugar do Universo.



# Espectros contínuos

São emitidos por substâncias sólidas, líquidas ou por um gás a alta pressão.



# Espectros de emissão

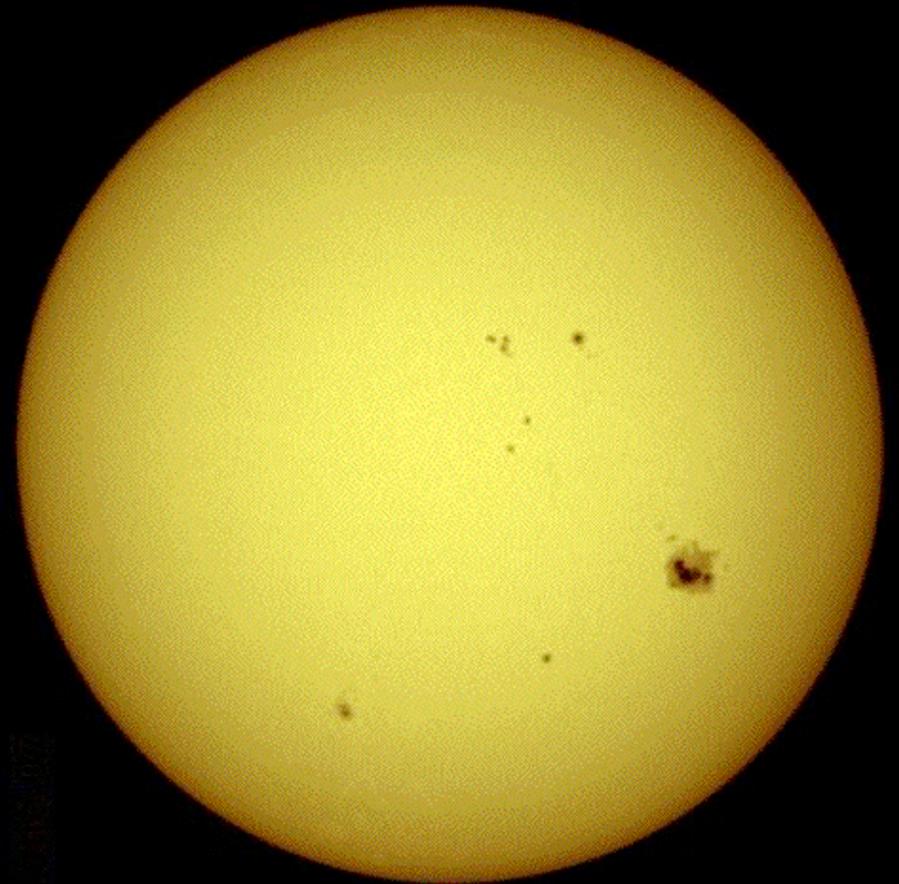
São emitidos por um gás incandescente a baixa pressão, cujos átomos foram excitados por algum processo físico.



# Espectros de absorção

A radiação, ao passar através de um gás frio passará a ter linhas de absorção características desse gás.

No Sol (e demais estrelas) as camadas externas são mais frias que as internas, o que gera linhas de absorção.

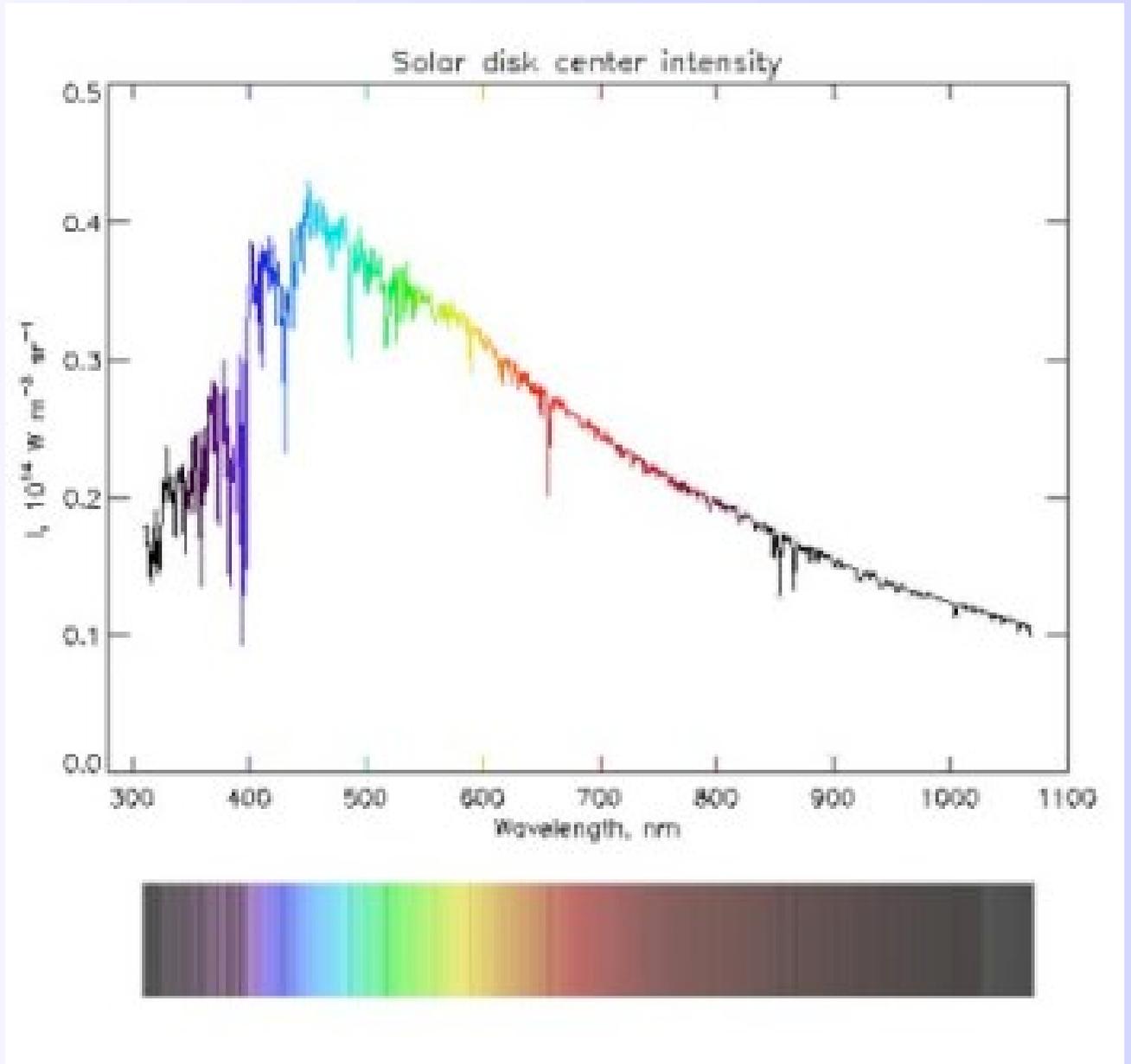


# Espectroscopia

## Espectro do Sol

No espectro do Sol, as **raias escuras** são portanto **linhas de absorção de diferentes elementos na fotosfera solar**

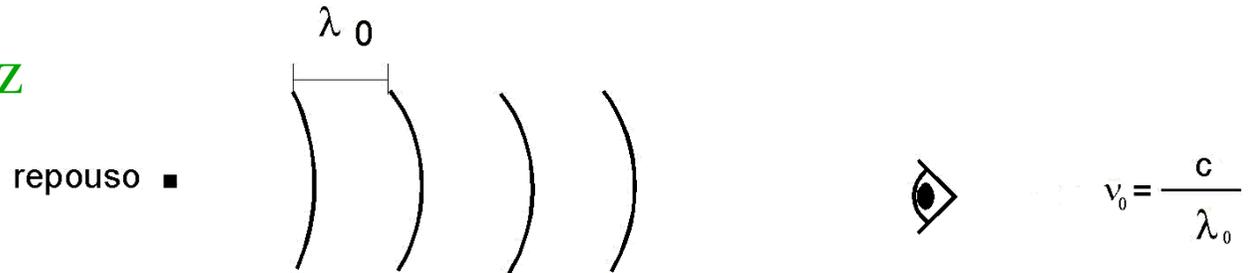
O elemento Hélio foi descoberto no espectro do Sol por Pierre Janssen antes mesmo de ser encontrado na Terra



# Efeito Doppler

Ocorre quando a Fonte emissora desloca-se em relação ao observador.

Fonte em repouso, emitindo luz  
a um comprimento de onda  $\lambda_0$ .



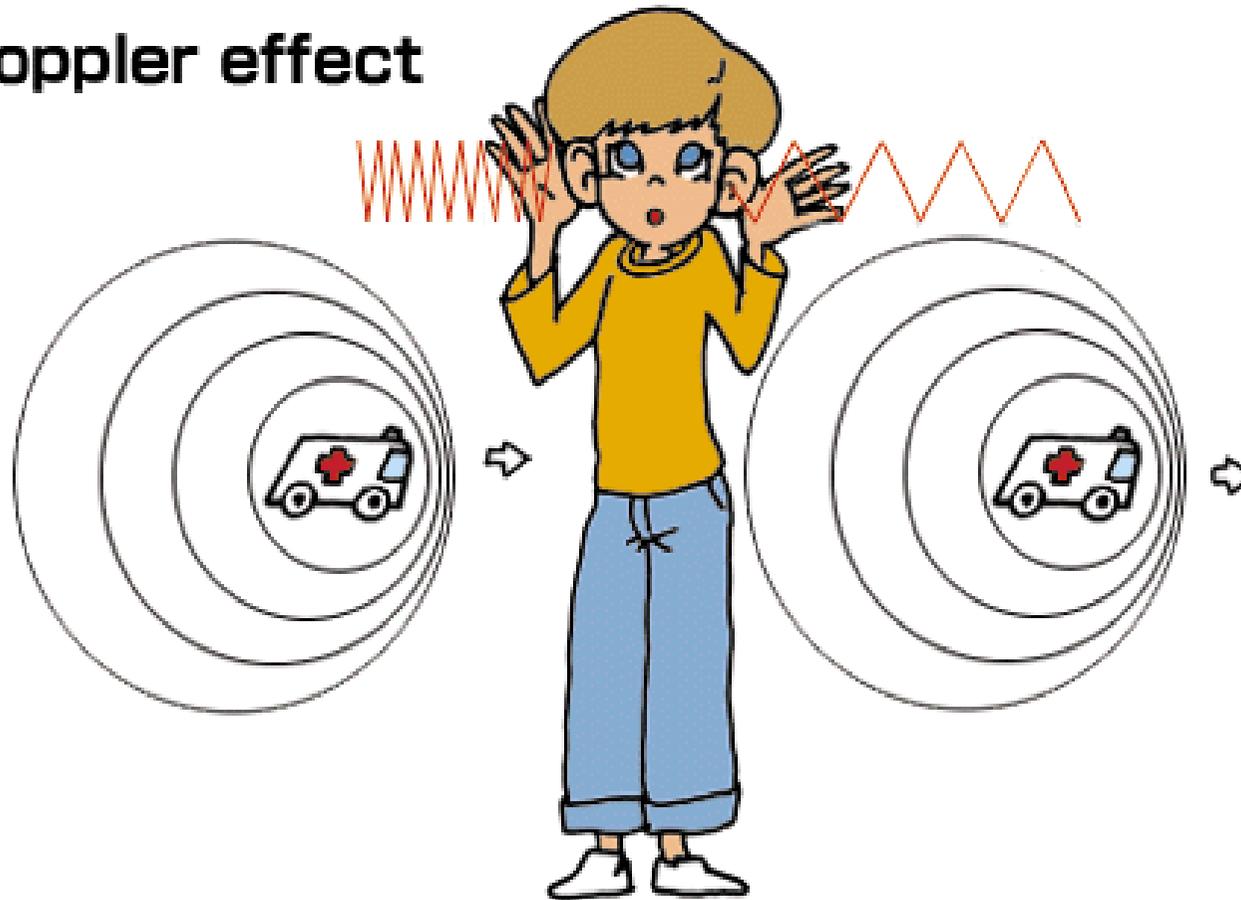
Fonte aproxima-se do  
observador: comprimento de  
onda observado será menor  
( $\lambda_1 < \lambda_0$ ).



Fonte afasta-se: comprimento  
de onda observado será maior  
( $\lambda_2 > \lambda_0$ ).



## Doppler effect

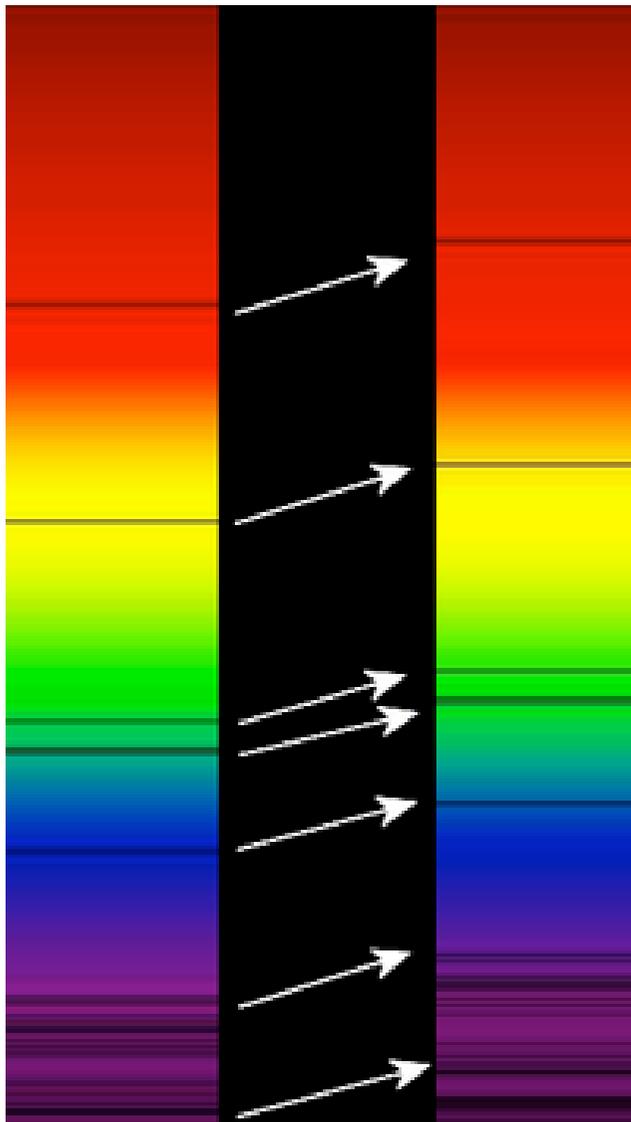


Fonte aproximando-se: comprimento de onda **menor**, frequência **maior**

Fonte afastando-se: comprimento de onda **maior**, frequência **menor**

# Efeito Doppler

repouso                      afastamento



$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

**Portanto:**

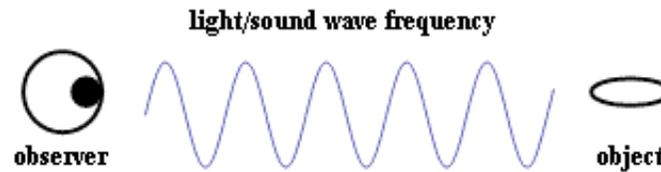
Se  $v > 0$  (fonte se afastando de nós)  
 $\Delta\lambda > 0$

**Desvio para o vermelho!**

Se  $v < 0$  (fonte se aproximando de nós)  
 $\Delta\lambda < 0$

**Desvio para o azul!**

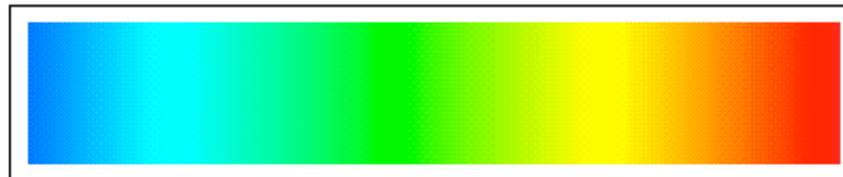
# Exemplo: *fonte que se afasta do observador*



original spectrum



shifted spectrum



*Comprimento de onda*



As **linhas espectrais** também têm seu comprimento de onda alterado pelo efeito Doppler

Fonte se **aproxima** do observador: desvio para o azul (blueshift)

Fonte se **afasta** do observador: desvio para o vermelho (redshift)



**UNSHIFTED**

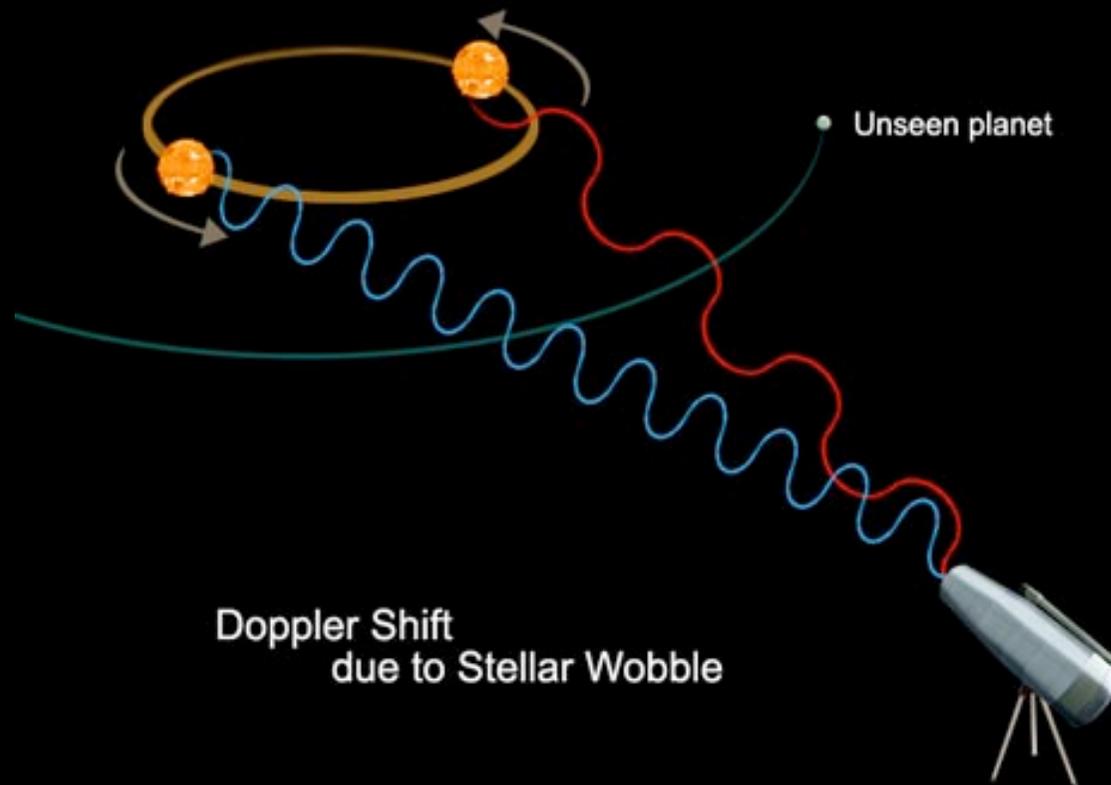


**REDSHIFTED**



**BLUESHIFTED**

# Exemplo: detecção de exoplanetas através do efeito Doppler



# Espectroscopia

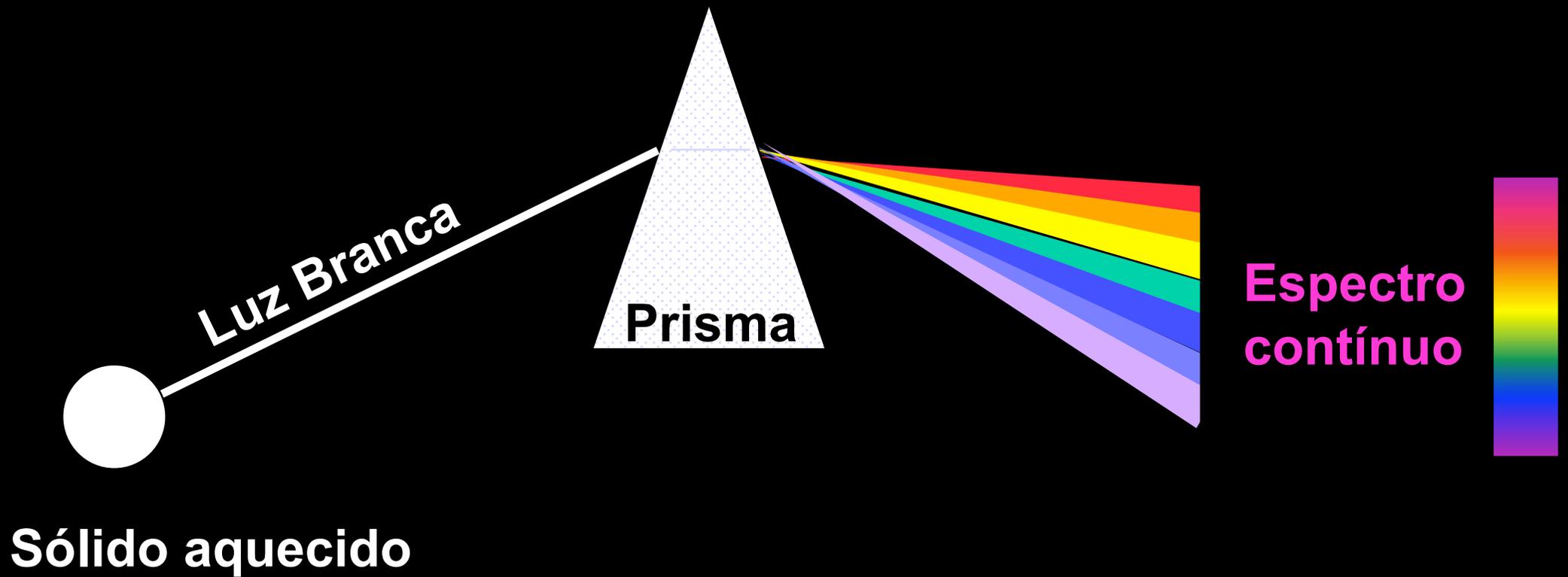
## **Conclusão:**

a espectroscopia é uma das principais ferramentas da astrofísica. A análise do espectro de um astro permite obter:

- o sua composição química (linhas espectrais)
- o sua temperatura (cor)
- o sua velocidade radial (efeito doppler)

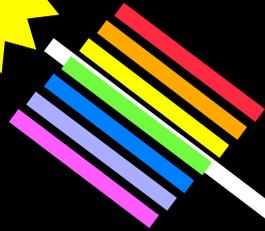
Porque o céu é azul ?

# Decomposição da Luz





# Cor do céu



O céu, visto da Terra, é azul porque nossa atmosfera dispersa, predominantemente, o azul, que é a cor que vemos ao olhar para o céu

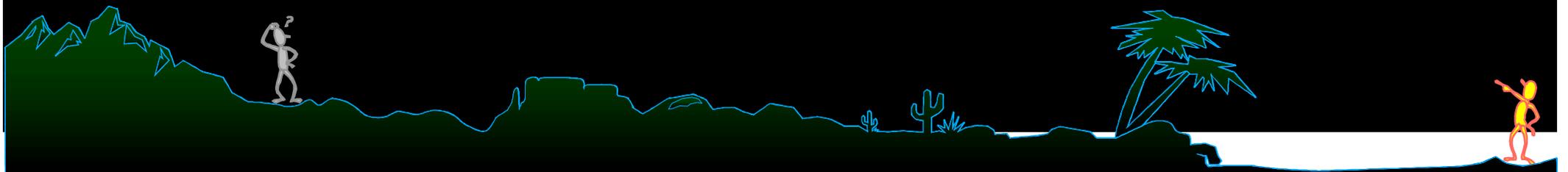
“Limite” da atmosfera



Espalhamento da Luz pelas moléculas do ar  
(Espalhamento Rayleigh  $\sim \lambda^{-4}$ )

# Cor do céu à noite

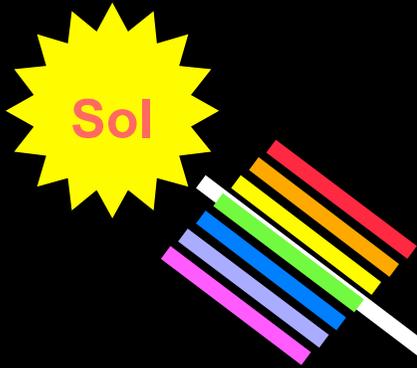
**O céu noturno, visto da Terra, é preto porque não há luz solar suficiente chegando ao local para que a dispersão possa ser notada**



Porque o por-do-sol é avermelhado?

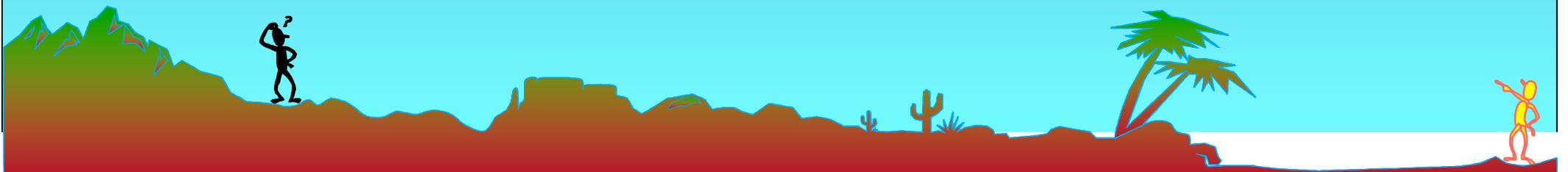
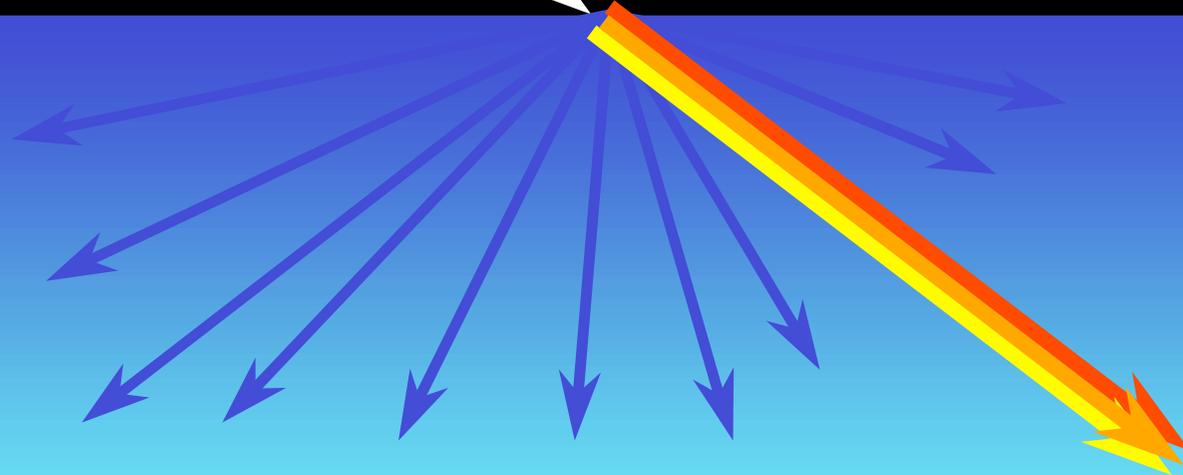


# Por-do-sol



No por-do-sol, a luz atravessa uma quantidade de ar muito maior, e os efeitos do espalhamento tornam-se mais importantes

“Limite” da atmosfera



# Cor do céu visto da Lua?



**Como basicamente não há atmosfera na Lua, não há dispersão da luz solar: logo, o céu parece preto**

## **Agradecimento:**

Parte dos slides desta apresentação foram gentilmente fornecidos pela profa. Elisabete Gouveia dal Pino (IAG/USP) e pelo prof. Roberto Ortiz (EACH/USP)