

LUZ E ÁTOMOS

Amâncio Friaça (IAG/USP)

Considérations philosophiques sur l'ensemble de la science astronomique.

L'astronomie est jusqu'ici la seule branche de la philosophie naturelle dans laquelle l'esprit humain se soit enfin rigoureusement affranchi de toute influence théologique et métaphysique, directe ou indirecte; ce qui rend particulièrement facile de présenter avec netteté son vrai caractère philosophique. Mais, pour se faire une juste idée générale de la nature et de la composition de cette science, il est indispensable, en sortant des définitions vagues qu'on en donne encore habituellement, de commencer par circonscrire avec exactitude le véritable champ des connaissances positives que nous pouvons acquérir à l'égard des astres.

Parmi les trois sens propres à nous faire apercevoir l'existence des corps éloignés, celui de la vue est évidemment le seul qui puisse être employé relativement aux corps célestes; en sorte qu'il ne saurait exister aucune astronomie pour des espèces aveugles, quelque intelligentes qu'on voulût d'ailleurs les imaginer; et, pour nous-mêmes, les astres obscurs, qui sont peut-être plus nombreux que les astres visibles, échappent à toute étude réelle, leur existence pouvant tout au plus être soupçonnée par induction. Toute recherche qui n'est point finalement réductible à de simples observations visuelles nous est donc nécessairement interdite au sujet des astres, qui sont ainsi de tous les êtres naturels ceux que nous pouvons connaître sous les rapports les moins variés. Nous concevons la possibilité de déterminer leurs formes, leurs distances, leurs grandeurs et leurs mouvemens; tandis que nous ne saurions jamais étudier par aucun moyen leur composition chimique, ou leur structure minéralogique, et, à plus forte raison, la nature des corps organisés qui vivent à leur surface, etc. En un mot, pour employer immédiatement les expressions scientifiques les plus précises, nos connaissances positives par rapport aux astres sont nécessairement limitées à leurs seuls phénomènes géométriques et mécaniques, sans pouvoir nullement embrasser les autres recherches physiques, chimiques, physiologiques, et même sociales, que comportent les êtres accessibles à tous nos divers moyens d'observation.

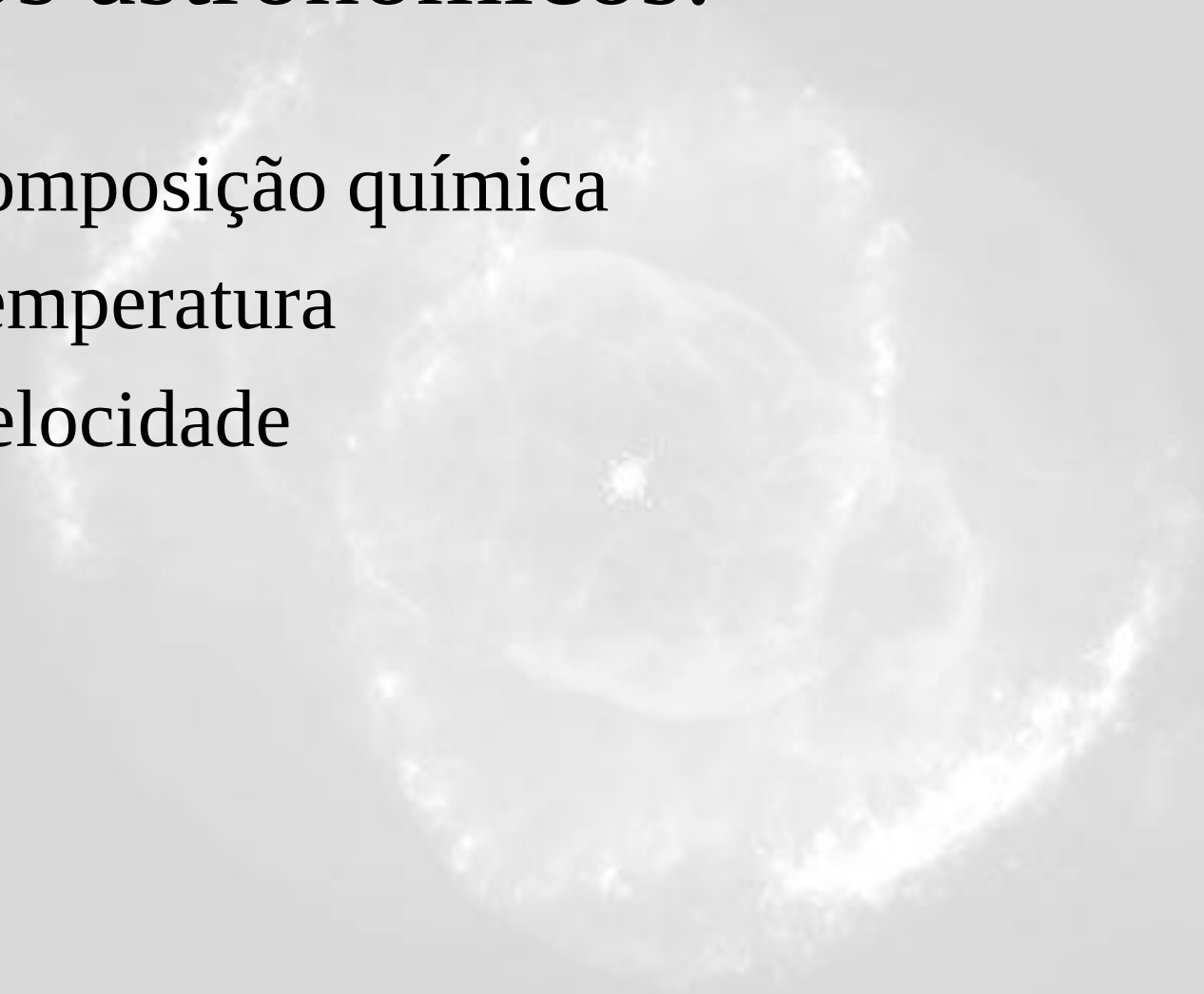
Auguste Comte, 1835. *Cours de Philosophie Positive*, 19^{ème} leçon



Mas, de fato...

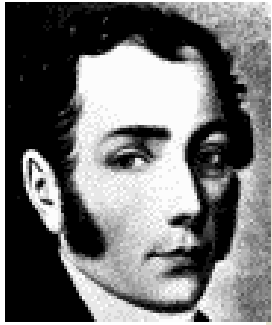
...o espectro permite revelar para os corpos astronômicos:

- Composição química
- Temperatura
- Velocidade

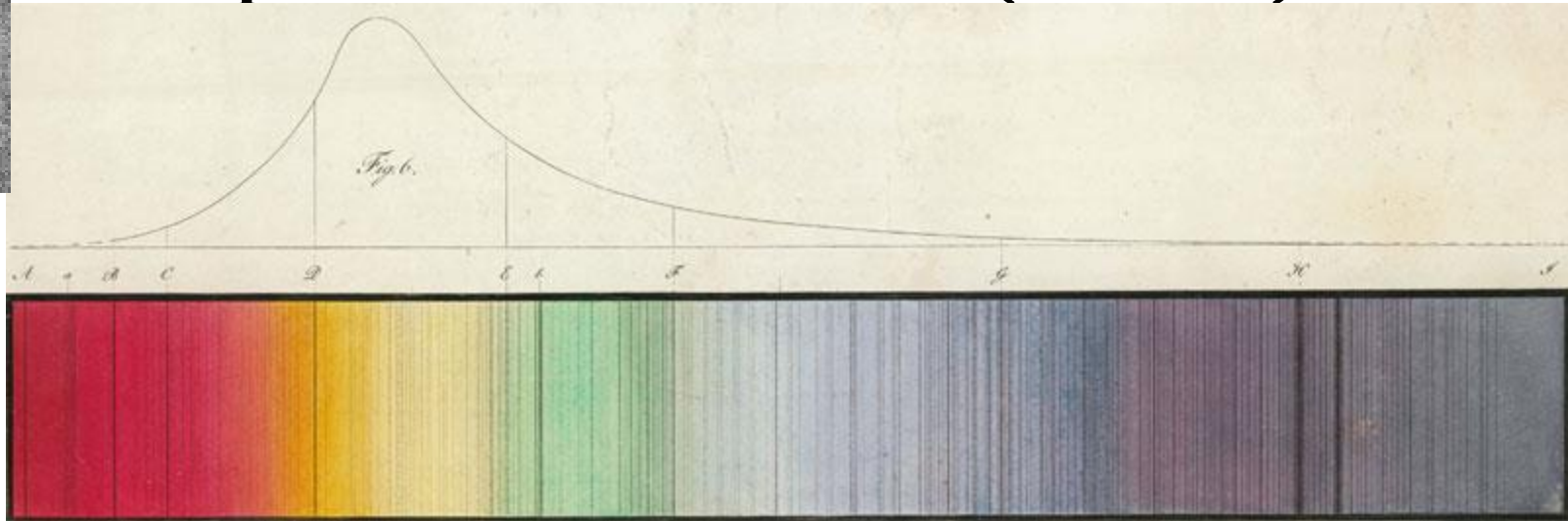




Espectroscopia



Joseph Fraunhofer (1817)



- Durante um levantamento topográfico, ao calibrar as características ópticas das lentes do instrumento, observou linhas escuras superpostas à variação de cor contínua em todo o espectro do sol.
- Posteriormente, descobriu linhas escuras também no espectro de estrelas e notou que algumas das linhas das estrelas estavam ausentes no sol e vice-versa. (Isto indicava claramente que nem todas as linhas eram de origem terrestre.)
- Herschel considerou que as linhas de Fraunhofer poderiam tanto ser causadas pela absorção de gás frio na terra como na atmosfera do sol.

Uma Descoberta Totalmente Inesperada

(1859)



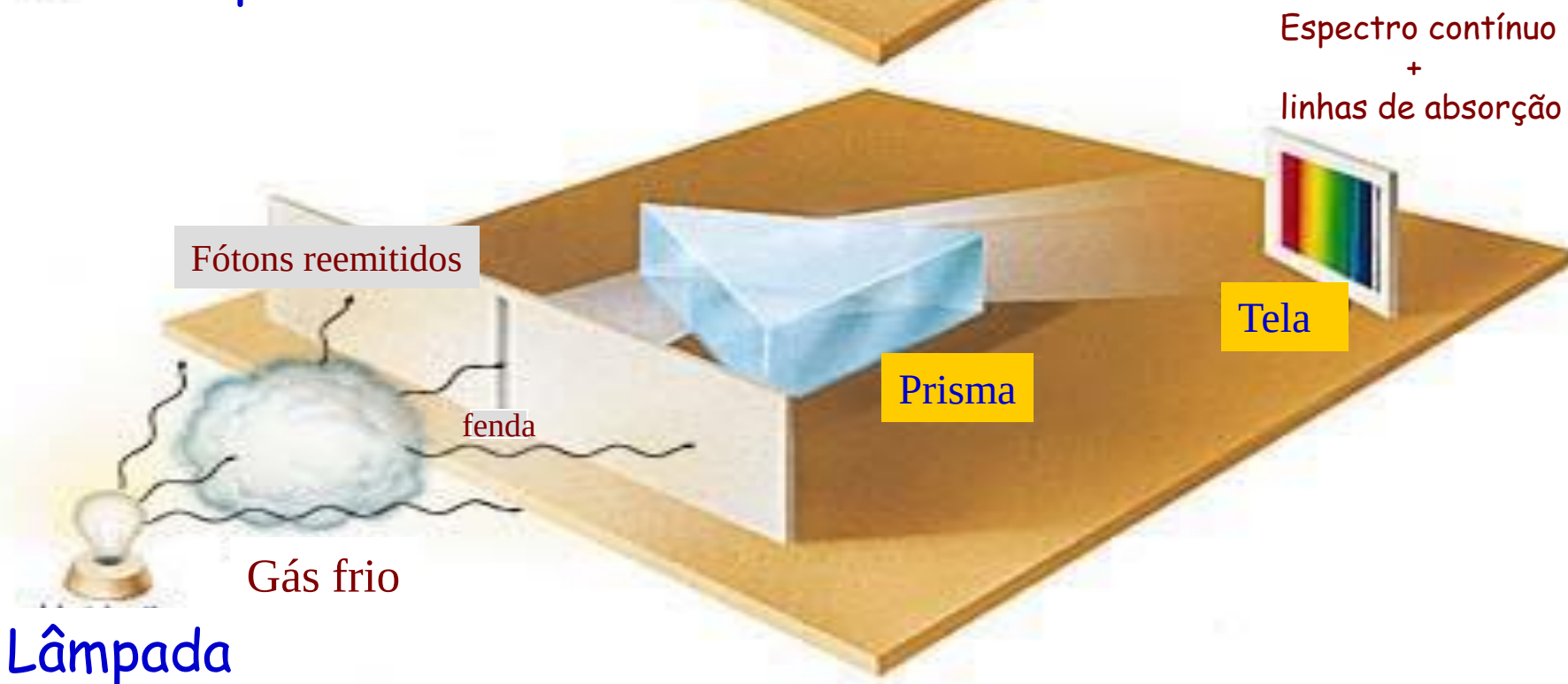
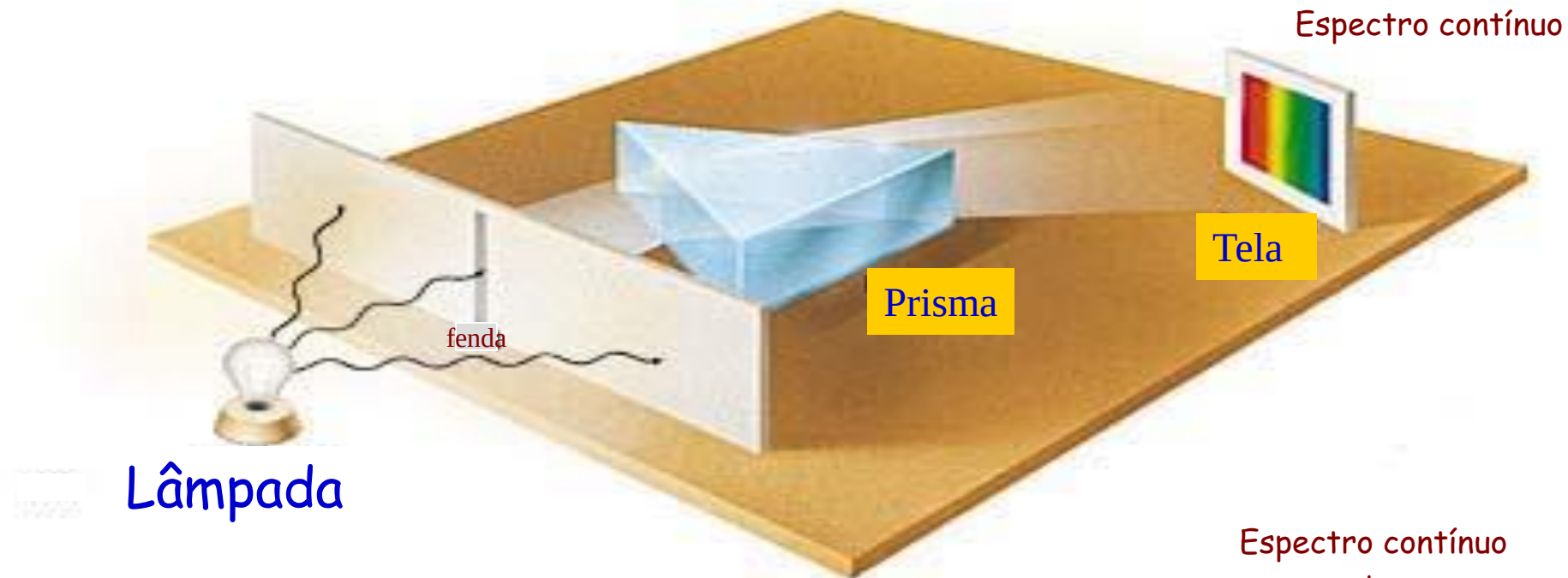
*Gustav Kirchhoff (esquerda)
e Robert Bunsen*

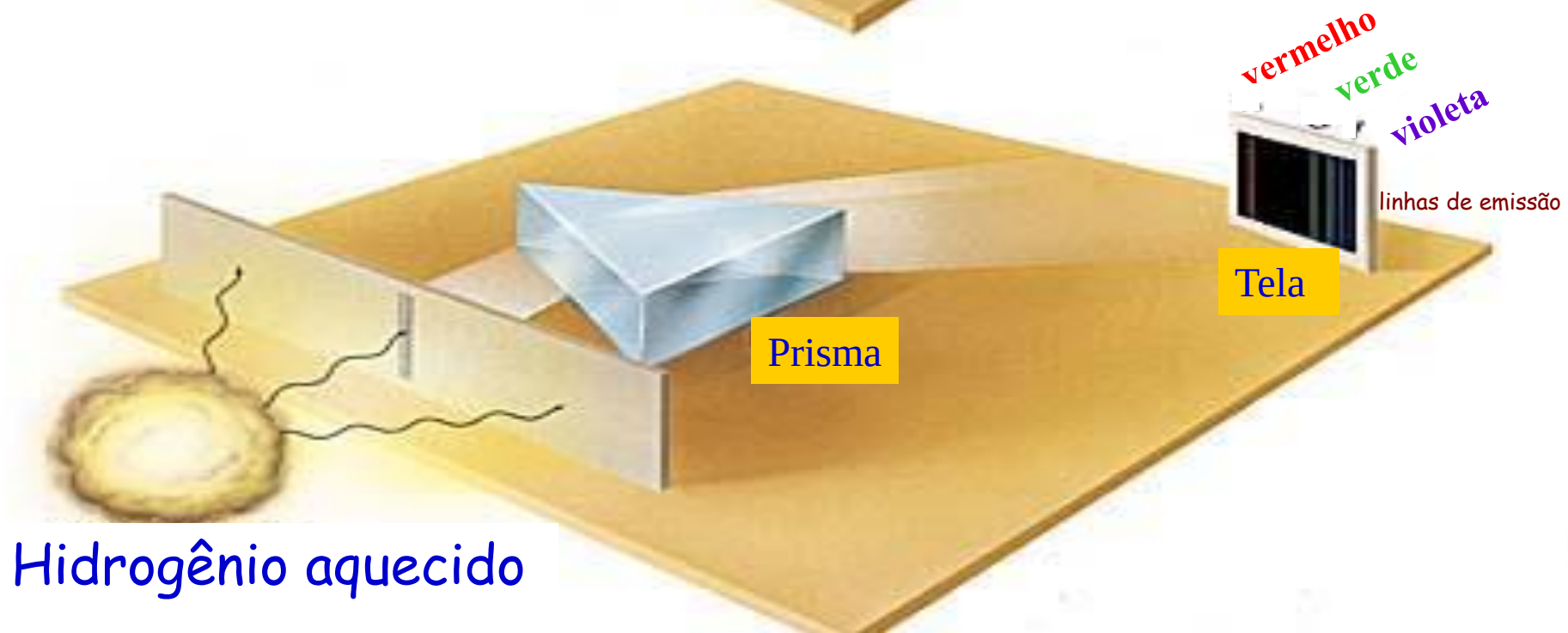
A causa das linhas de Fraunhofer: os elementos químicos!!!

- Bunsen desenvolveu um poderoso queimador a gás (o “bico de Bunsen”)
- Kirchhoff fez “uma descoberta totalmente inesperada.”
- Quando certas substâncias químicas foram aquecidos bico de Bunsen, aparecia linhas brilhantes características.
- Em alguns casos, estes eram exatamente nos mesmos pontos no espectro que as linhas escuras de Fraunhofer.
- As linhas brilhantes eram luz proveniente um gás quente, enquanto que as linhas escuras resultavam da absorção de luz por um gás mais frio acima da superfície do sol.



A espectroscopia
torna visíveis os átomos





Leis de Kirchhoff

Nos anos 1860, Gustav Kirchhoff formula as leis que resumem os 3 tipos de espectro possíveis:

- 1ª: **Um sólido ou líquido**, ou um **gás suficientemente denso**, emite energia em todos os comprimentos de onda, de modo que produz um **espectro contínuo** de **radiação**. (Fig.1)
- 2ª: Um **gás quente de baixa densidade** emite luz cujo espectro consiste apenas de **linhas de emissão** características da composição química do gás. (Fig.2)
- 3ª: 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. (Fig.3)

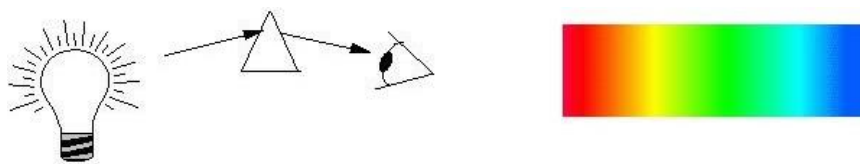


Fig.1

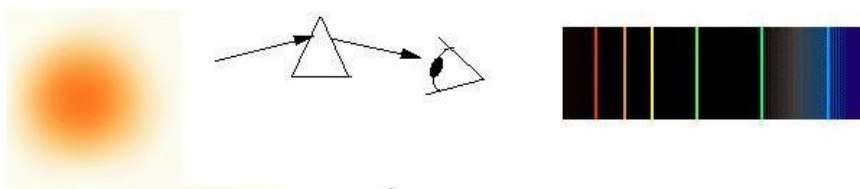


Fig.2

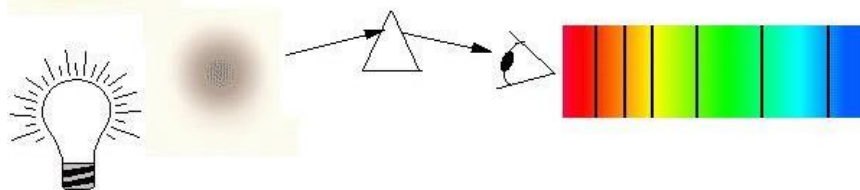


Fig.3



Hidrogênio



Sódio



Hélio



Neonio

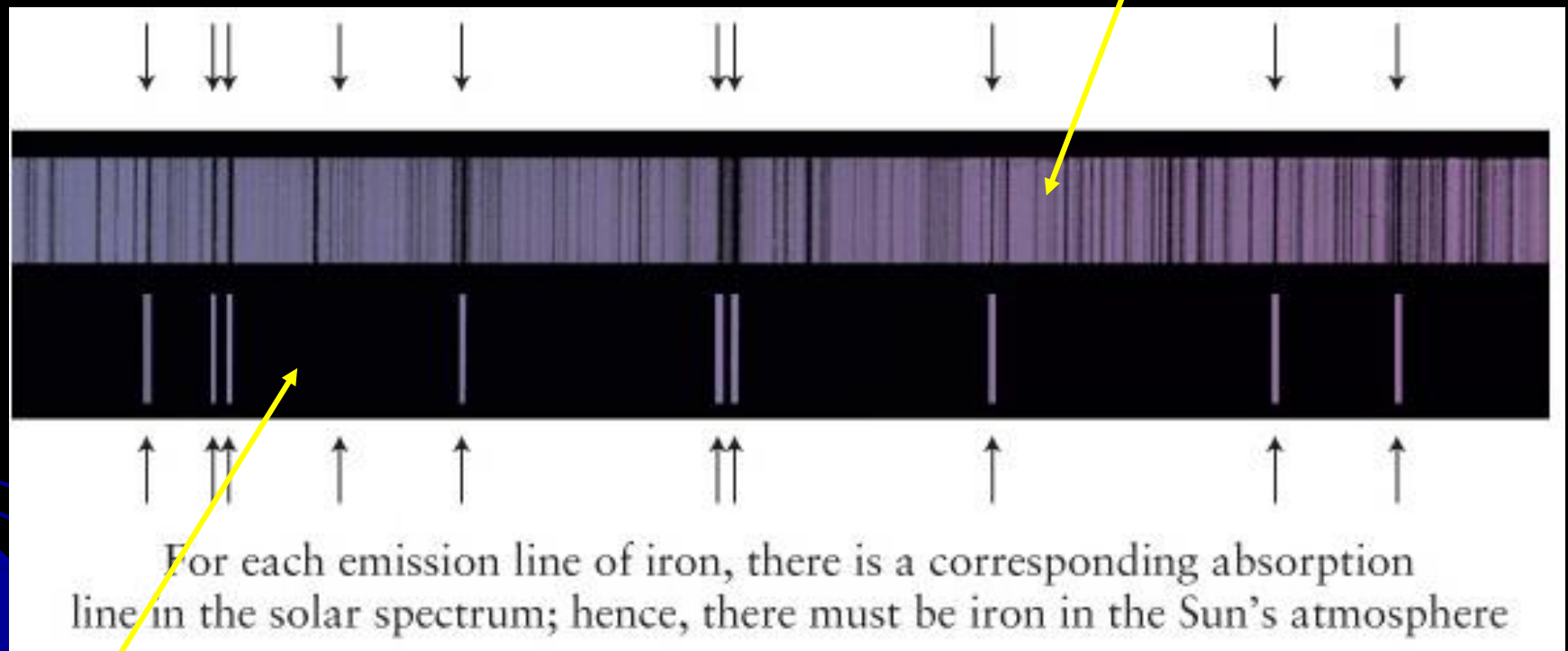


Mercúrio *spectro de emissão de alguns elementos conhecidos*



Espectroscopia Astronômica

Espectro de Absorção do Sol



Espectro de emissão das linhas do ferro em laboratório na Terra

O Grande Projeto de Kirchhoff e Bunsen

Cada elemento químico produz um espectro único.

Isto proporciona uma espécie de “impressão digital” que pode confirmar a presença desse elemento.

Kirchhoff e Bunsen reconheceram que esta poderia ser uma poderosa ferramenta para “a determinação da composição química do Sol e as estrelas fixas.”

Ao longo da década de 1860, Kirchhoff conseguiu identificar cerca de 16 elementos químicos diferentes entre as centenas de linhas que ele registrou no espectro do sol.

A partir desses dados, Kirchhoff pode especular sobre a composição química do Sol, bem como a sua estrutura.

Se tivéssemos de ir para o sol, e trazer algumas porções dele e analisá-las em nossos laboratórios, não poderíamos examiná-las com mais precisão do que podemos por este novo modo de análise de espectro.

-Warren de la Rue, 1861

Esquemas de classificação estelar baseados nos espectros

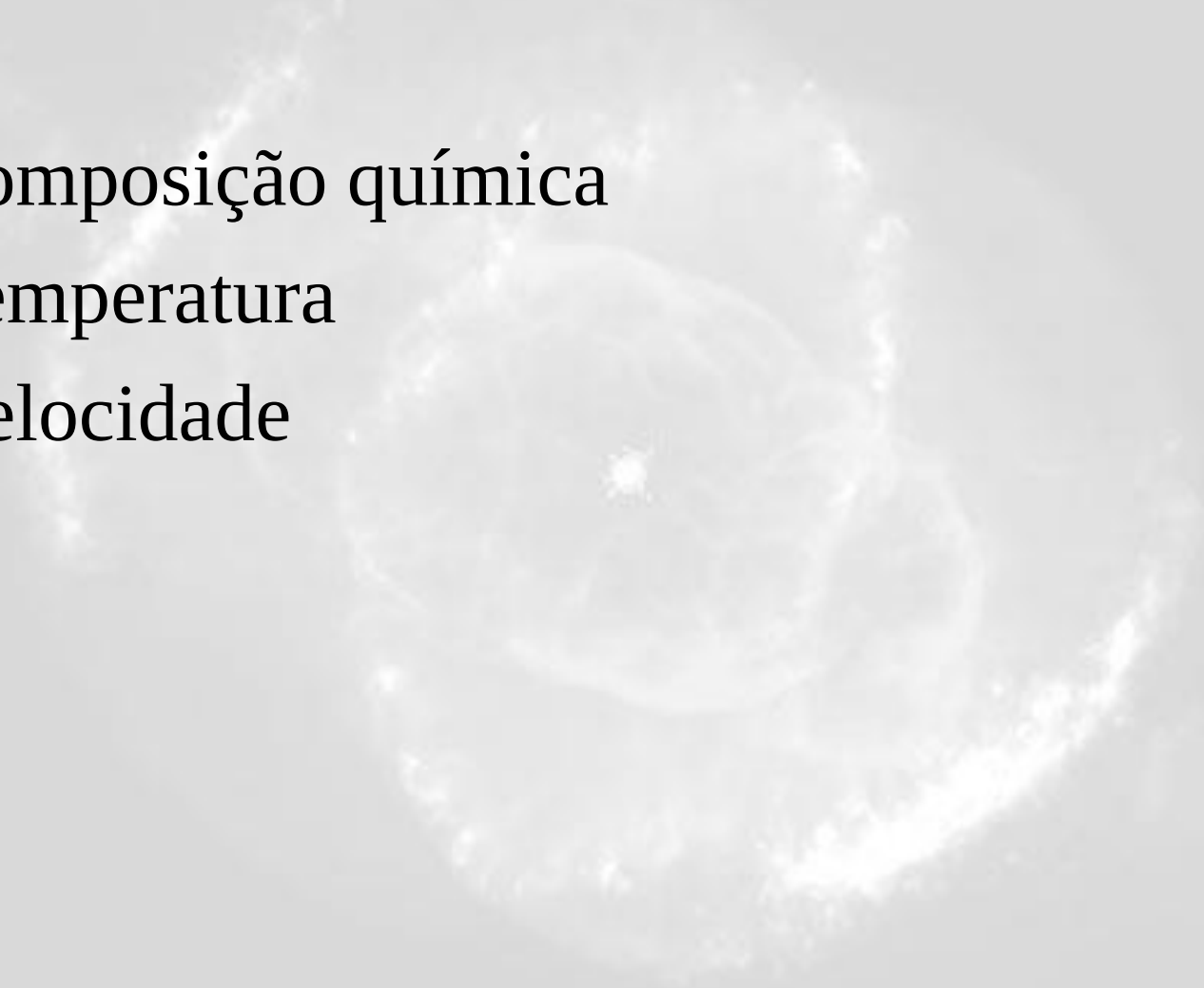
- Programa de William Huggins (1862-)
- Programa de Angelo Secchi (1862-)
- Identificação das principais linhas espectrais pelas letras usadas por Fraunhofer
- Três classes principais: estrelas azuis e brancas, amarelas (ou do tipo solar estrelas), e vermelhas. E a cor se relaciona com a temperatura.
- Primeiro uso de fotografia pra obter espectros estelares (Henry Draper, 1872)
- Em 1885, Edward C. Pickering do Harvard College Observatory de início a um ambicioso programa de classificação espectral estelar utilizando espectros registrados em placas fotográficas.
- Em 1890, um catálogo de mais de 10.000 estrelas havia sido preparado que as agrupava em treze tipos espectrais.
- Annie Jump Cannon expandiu o catálogo para nove volumes e mais de um 250 mil estrelas em 1924, e desenvolveu um sistema de dez tipos espectrais – O, B, A, F, G, K, M, R, N, S – adotado amplamente pela comunidade astronômica em 1922.

La détermination des températures est probablement la seule à l'égard de laquelle la limite précédemment établie pourra paraître aujourd'hui trop sévère. Mais, quelques espérances qu'ait pu faire concevoir à ce sujet la création si capitale de la thermologie mathématique par notre immortel Fourier, et spécialement sa belle évaluation de la température de l'espace dans lequel nous circulons, je n'en persiste pas moins à regarder toute notion sur les véritables températures moyennes des différens astres comme devant nécessairement nous être à jamais interdite. Quand même toutes les influences thermologiques proprement dites, relatives aux échanges de chaleur entre les divers corps célestes, auraient été mathématiquement analysées, ce qui d'ailleurs me semble peu admissible, la question renfermerait toujours un élément qui doit être éternellement inconnu, et qui cependant est peut-être prépondérant pour certains astres, l'état interne de chacun d'eux, et, dans beaucoup de cas, la manière non moins inconnue dont la chaleur est absorbée par son atmosphère. Ainsi, par exemple, la tentative de Newton, pour évaluer la température de la comète de 1680 à son périhélie, était certainement illusoire; car un tel calcul, refait même aussi convenablement qu'il peut l'être aujourd'hui, apprendrait, tout au plus, quelle serait la température de notre terre si, sans rien changer à sa constitution actuelle, on la supposait transportée dans cette position: ce qui, vu les différences physiques et chimiques, peut s'écarter extrêmement de la température effective de la comète.

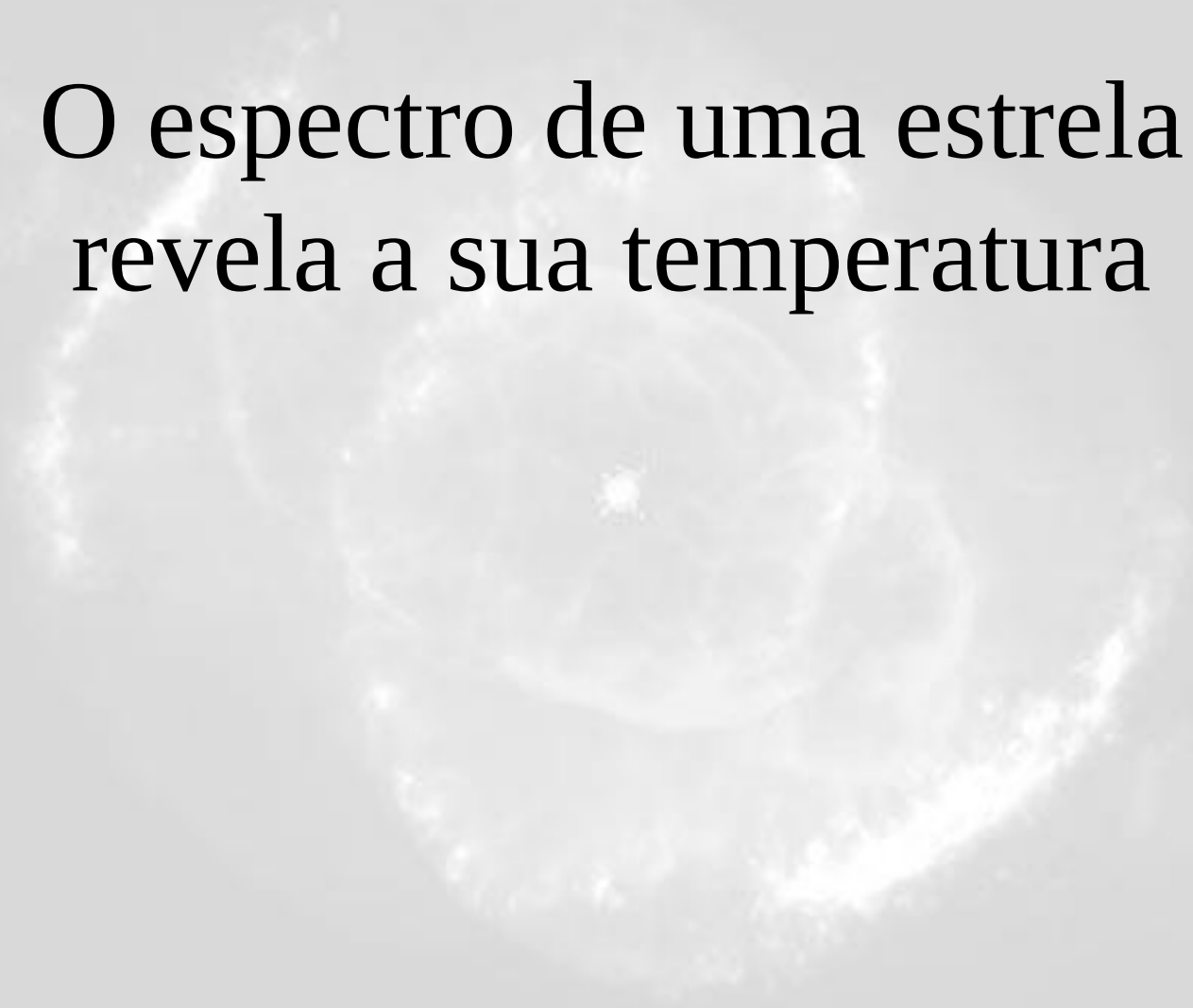
Auguste Comte, 1835. *Cours de Philosophie Positive*, 19^{ème} leçon

...o espectro permite revelar para os corpos astronômicos:

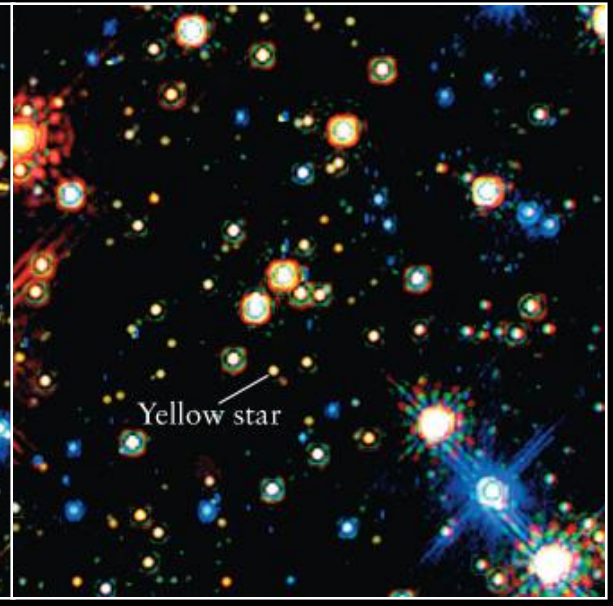
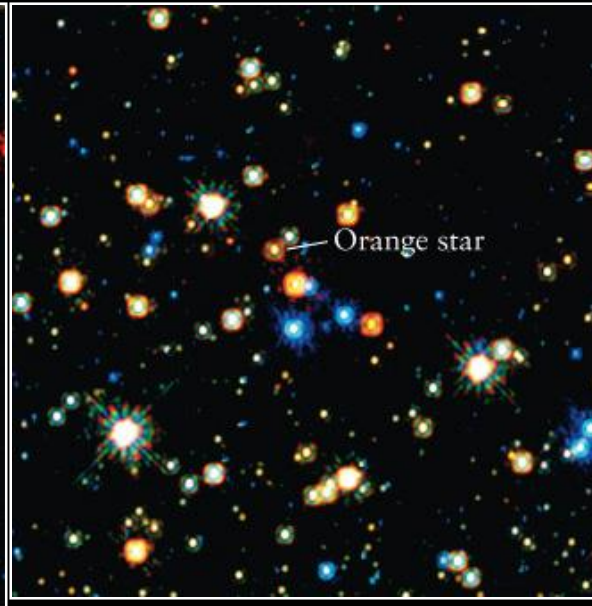
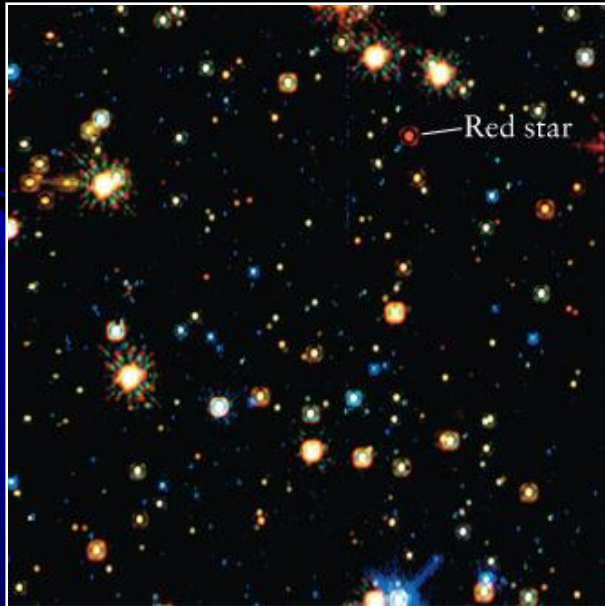
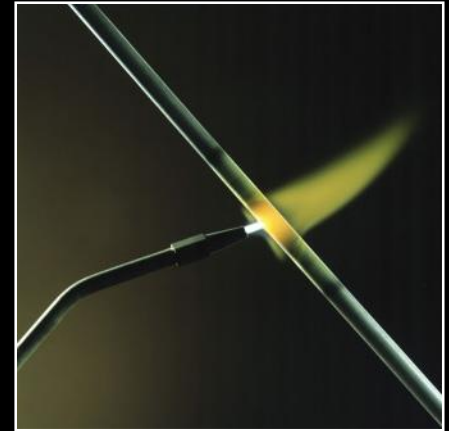
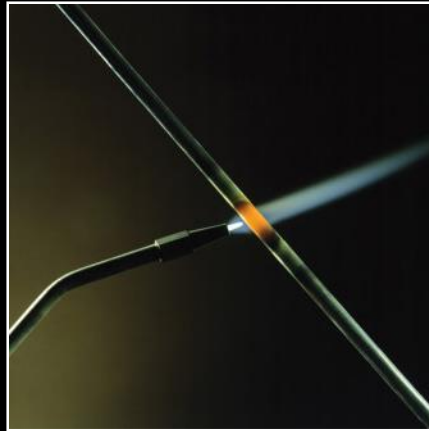
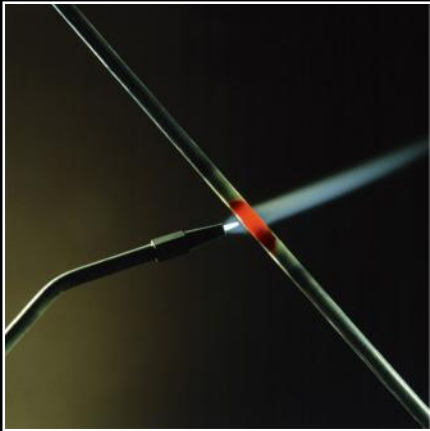
- Composição química
- Temperatura
- Velocidade



O espectro de uma estrela
revela a sua temperatura

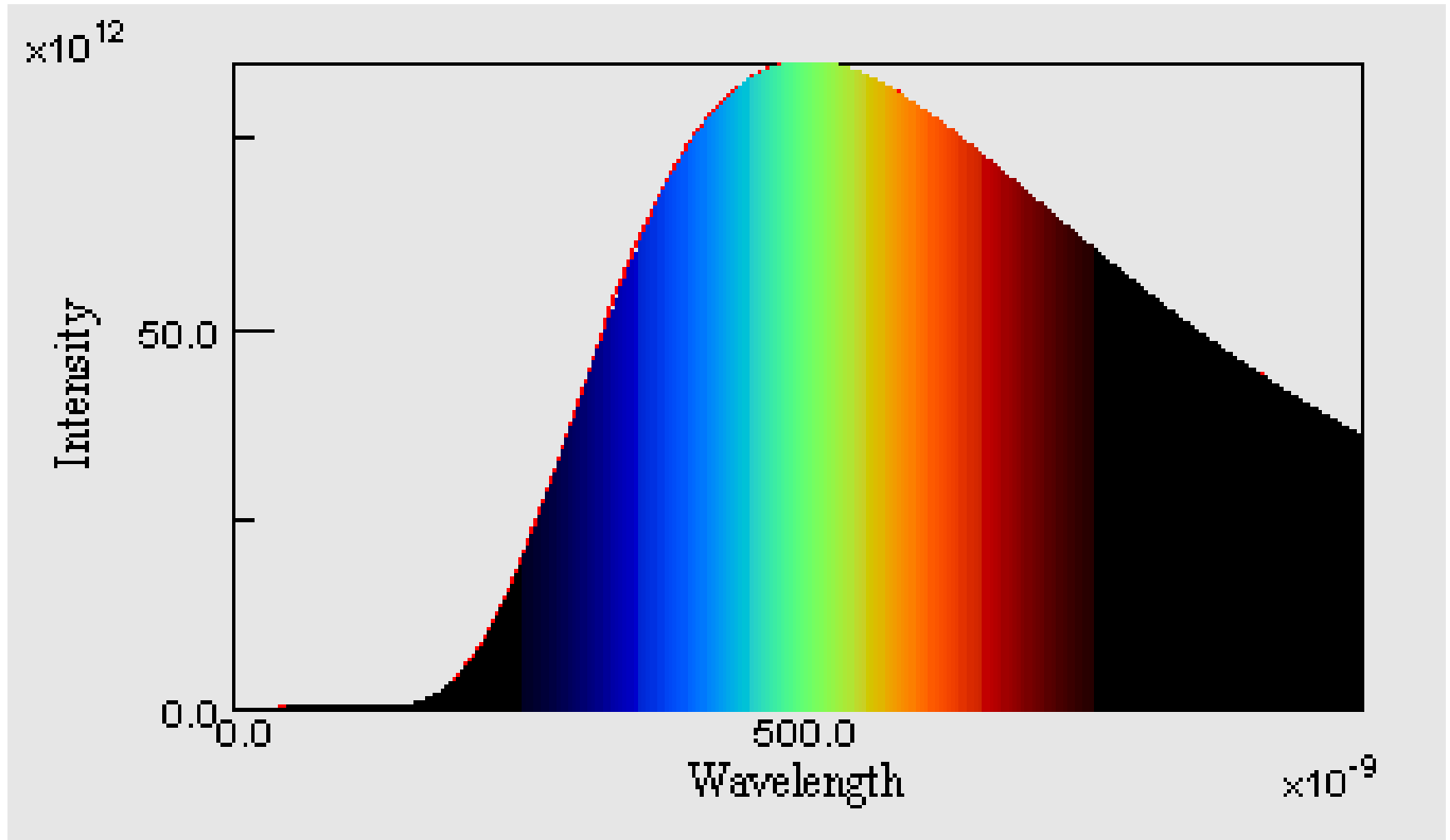


Diferentes cores indicam diferentes temperaturas



Radiação de Corpo Negro

Radiação de Corpo Negro

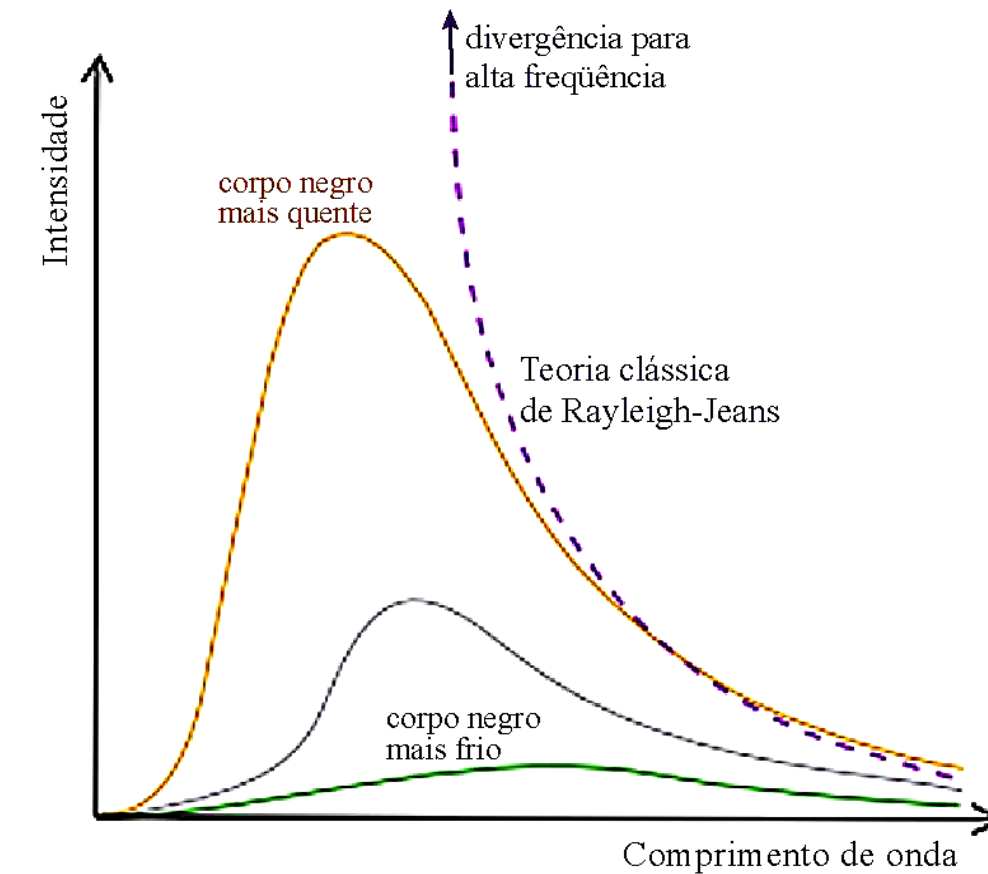


Radiação de Corpo Negro

- Em 1792, Thomas Wedgewood observa em um forno que a temperatura está relacionado com a cor da luz emitida por um objeto aquecido.
- No final do séc. XIX surge o conceito do corpo negro: um objeto (abstrato) que absorve toda a radiação e não emite nem reflete nada.
 - Na prática o objeto emite radiação e a distribuição desta radiação depende apenas da temperatura do objeto.
- Em 1898, Wilhelm Wien propôs uma lei de distribuição da intensidade da radiação de corpo negro para altas frequências, mas que falha em comprimento de onda longo.
- Lord Rayleigh e James Jeans obtêm uma lei válida para baixa frequência, mas que leva à “catástrofe do ultravioleta” (diverge para pequenos comprimentos de onda).

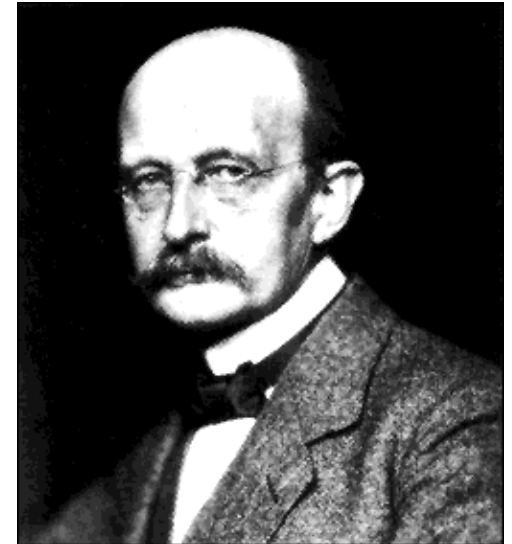
Radiação de Corpo Negro

- A teoria clássica do final do século XIX não consegue explicar a radiação do corpo negro



A Lei de Planck (14/12/1900)

- A luz (energia) é quantizada ... $E = hf$
- O espectro do corpo negro explicado!



The Planck Radiation Law

$$I_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kt} - 1)}$$

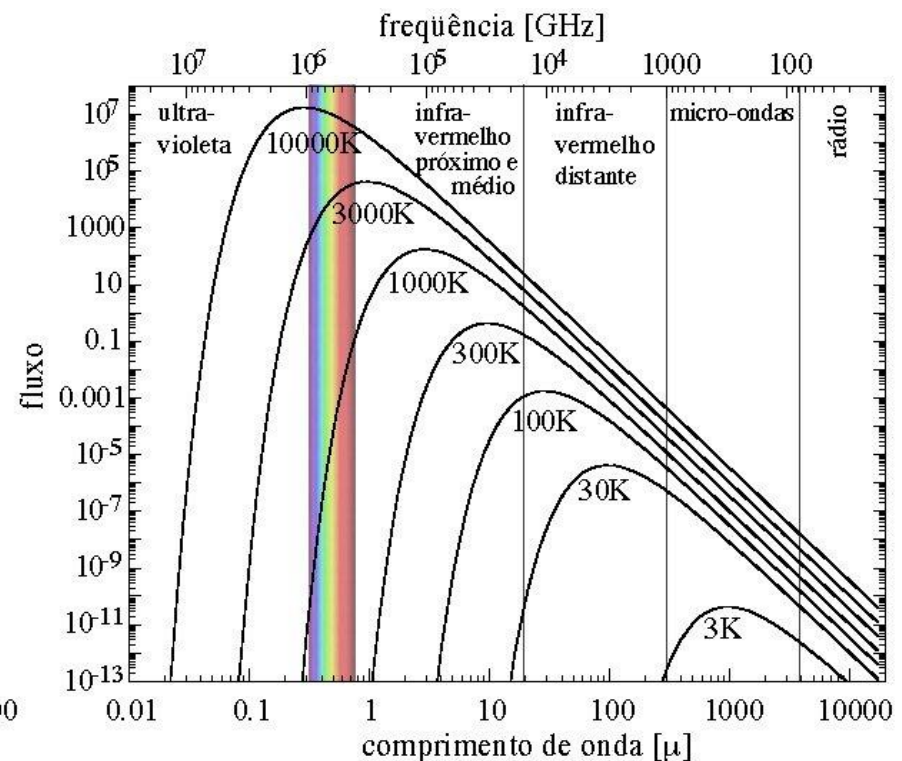
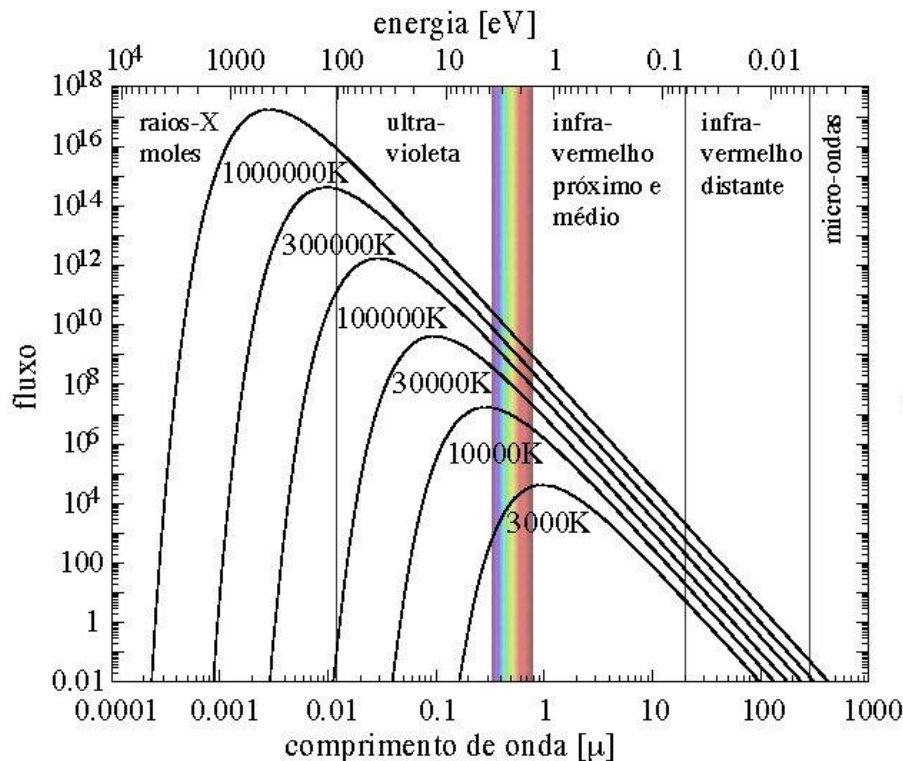
intensity of radiation emitted as a function of wavelength and temperature.

Radiação de Corpo Negro

- Em 1900, utilizando a teoria quântica, Max Plank descobre a distribuição de corpo negro, conhecida como lei de Planck.
- Intensidade, $I(\nu, T)$ corresponde ao espectro de corpo negro para uma dada temperatura.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

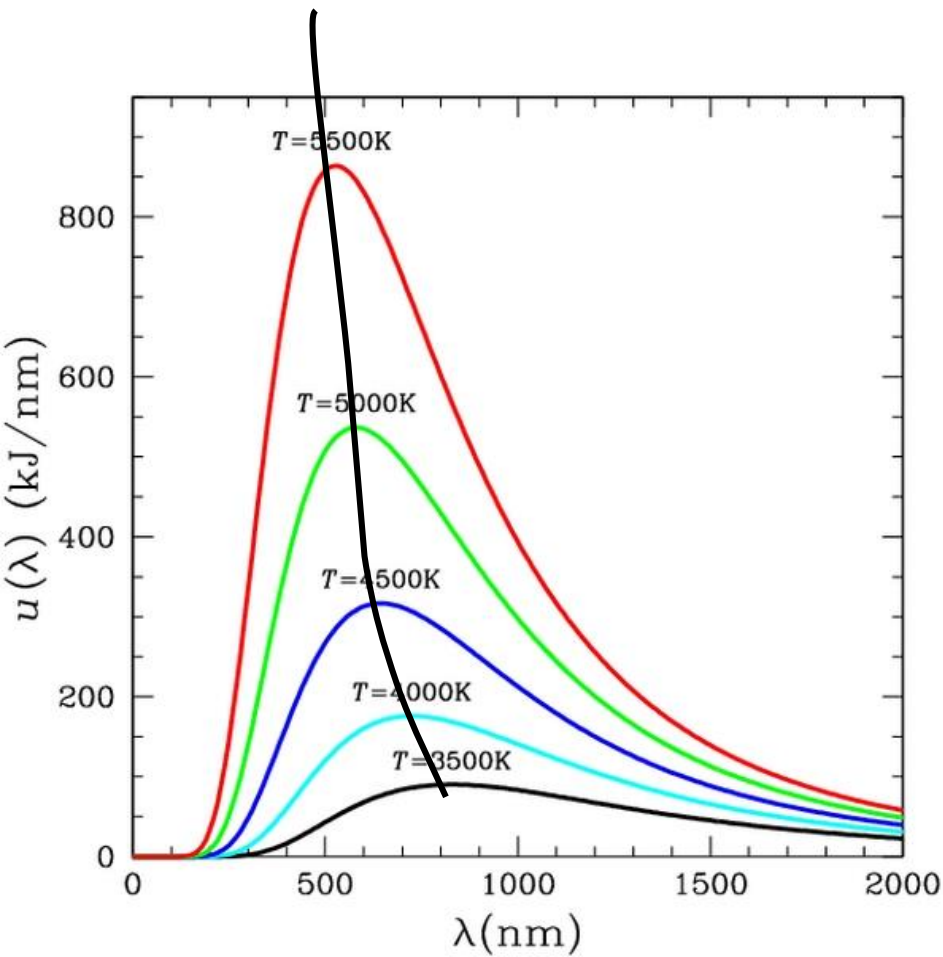
$$I_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$



Radiação de Corpo Negro

- **Lei de Wien** (descoberta em 1893): relação entre o comprimento de onda para a emissão máxima e a temperatura do corpo negro.

$$T \times \lambda_{\max} = 0,2898 \text{ K} \times \text{cm}$$



- Por exemplo:
 - $T = 50000 \text{ K}$
 $\lambda_{\max} = 580 \text{ \AA}$
 - $T = 5800 \text{ K}$
 $\lambda_{\max} = 5000 \text{ \AA}$
 - $T = 310 \text{ K} (37^\circ\text{C})$
 $\lambda_{\max} = 9,3 \text{ }\mu$
 - $T = 2,7 \text{ K}$
 $\lambda_{\max} = 1,1 \text{ mm}$

Radiação de Corpo Negro

- Em 1879, Joseph Stefan descobre empiricamente a relação entre a energia emitida por um corpo negro e sua temperatura
- Em 1884, Ludwig Boltzmann demonstra esta lei.
- **Lei de Stefan-Boltzmann:** $\varepsilon = \sigma T^4$

ε é a energia emitida por unidade de tempo (potência) por unidade de superfície.

$\sigma \rightarrow$ constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \times 10^{-8} \text{ watt m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

- Por exemplo:
 - $T = 5800 \text{ K}$ (Sol) $\rightarrow \varepsilon = 6417 \text{ watt/cm}^2$ (corresponde p/ o Sol $3,9 \times 10^{26} \text{ watt}$)
 - $T = 310 \text{ K}$ (37°C) $\rightarrow \varepsilon = 524 \text{ watt/metro}^2$
 - $T = 2,7 \text{ K}$ (radiação cósmica de fundo) $\rightarrow \varepsilon = 3 \text{ watt/ km}^2$ ($6,7 \times 10^{48} \text{ watt p/ RCF}$)

Radiação de Corpo Negro

- Lei de Stefan-Boltzmann: $\varepsilon = \sigma T^4$

ε é a energia emitida (potência) por unidade de superfície.

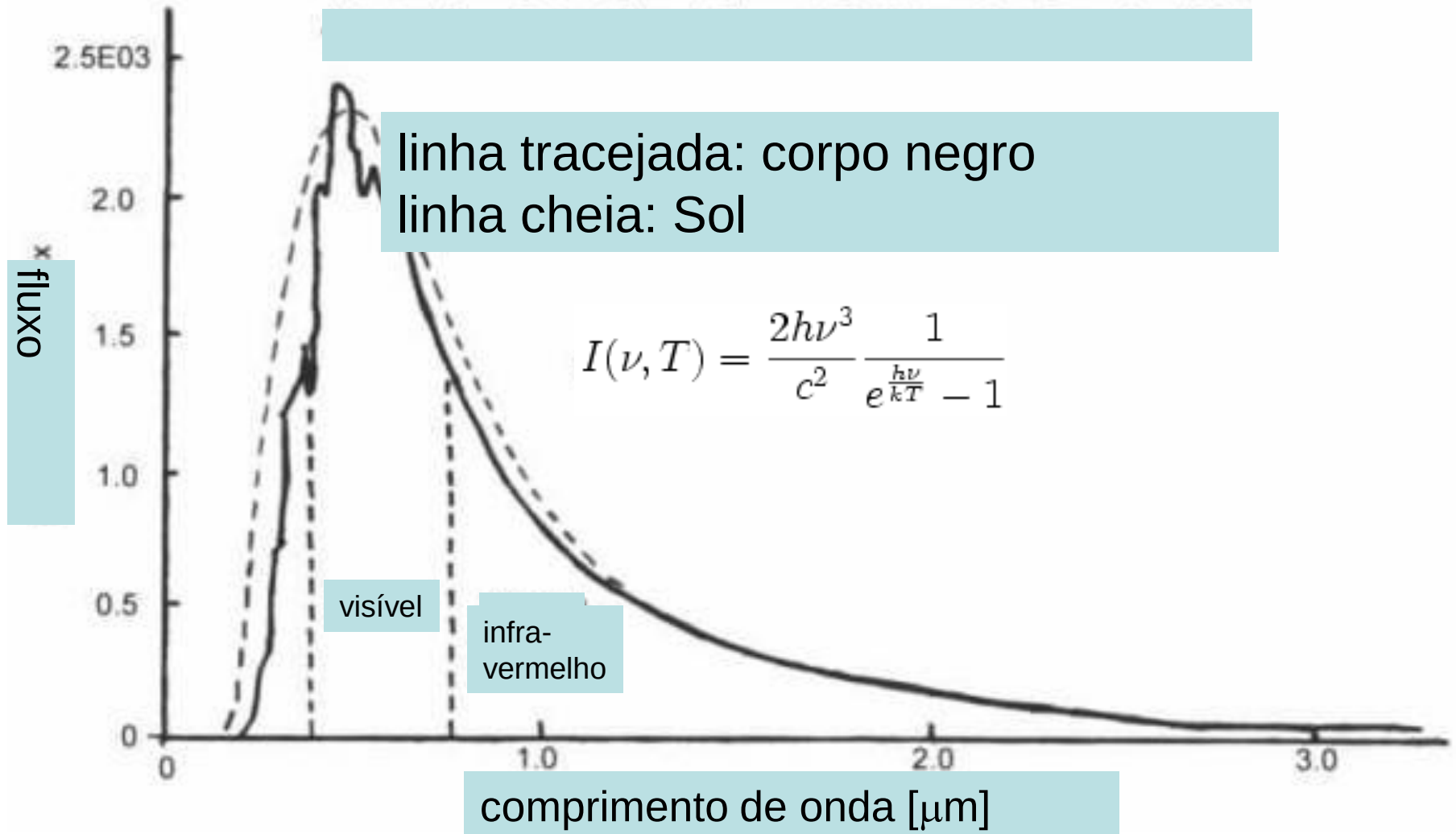
$\sigma \rightarrow$ constante de Stefan-Boltzmann
 $= 5,67 \times 10^{-8} \text{ watt m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

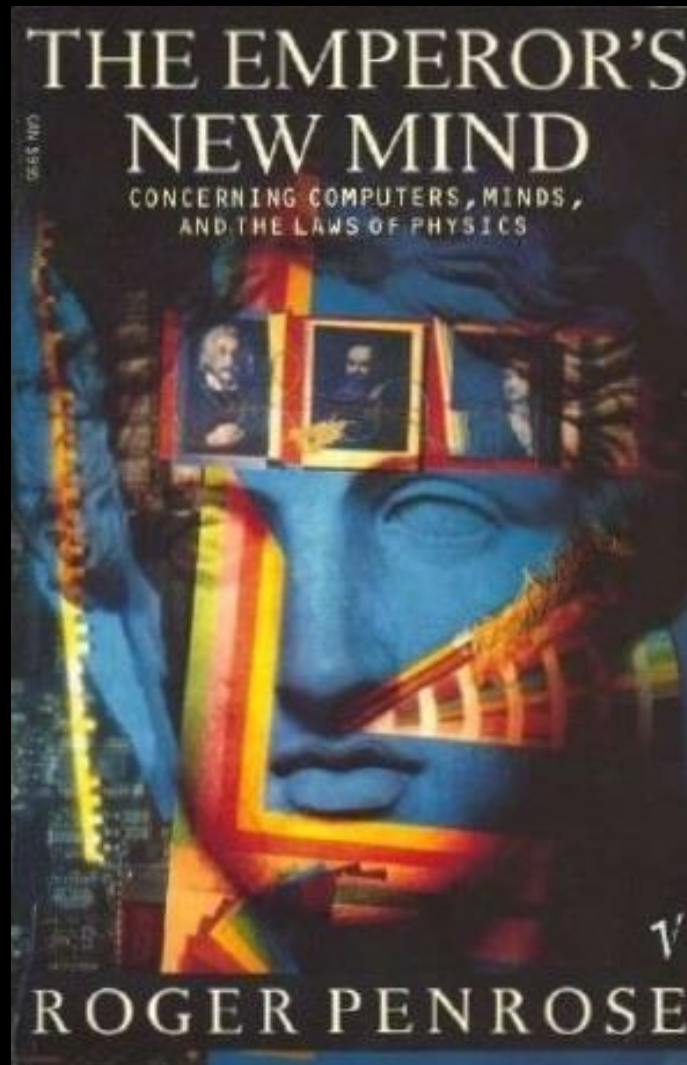
- Luminosidade: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$
Temperatura efetiva do Sol: $T = 5875 \text{ K}$

- A Lei de Stefan-Boltzmann permite conhecer o raio de uma estrela R_*
 $T_*, L_* \rightarrow R_* = (L_* / 4\pi \sigma)^{1/2} / T_*^2$

- Estrelas NÃO “corpos negros” perfeitos

- Por exemplo, o Sol:





As investigações sobre a luz têm sido o principal motor da ciência

Velocidade da Luz

Na Idade Média, já se colocam questões se a luz se propaga instantaneamente, e, consequentemente sua velocidade **é infinita**, ou tem uma velocidade determinada e sua velocidade **é finita**

Isaac Beeckman, em 1629, realiza o primeiro experimento para responder a esta questão, ainda precário, envolvendo detonação de explosivos e uma sequência de espelhos para verificar se ocorreriam diferenças nos “flashes” de luz → **inconclusivo!**

Galileu, em 1638 realiza outro experimento utilizando 2 lanternas a 1 milha de distância para verificar se haveria atraso perceptível entre as duas → também **inconclusivo!**

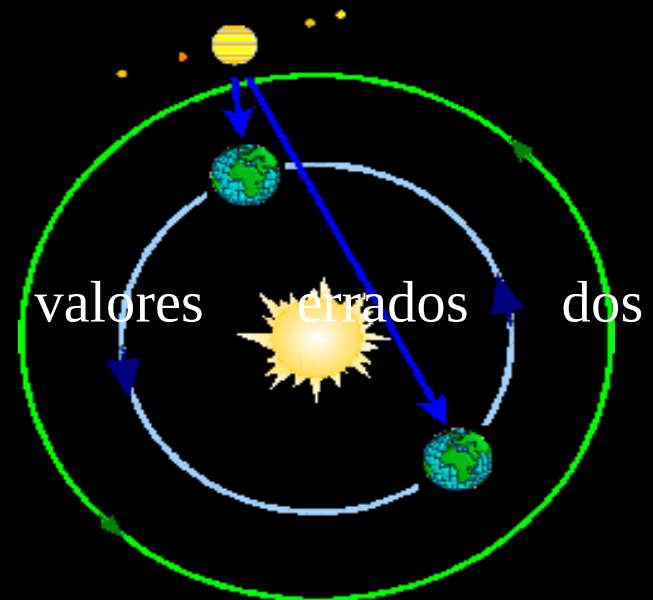
Roemer, em 1676 utiliza a observação de **eclipses das luas de Júpiter, como se resume a seguir.**

Ele notou que os tempos de eclipses discordavam das previsões de Cassini, variando em 22 minutos em um período de seis meses.

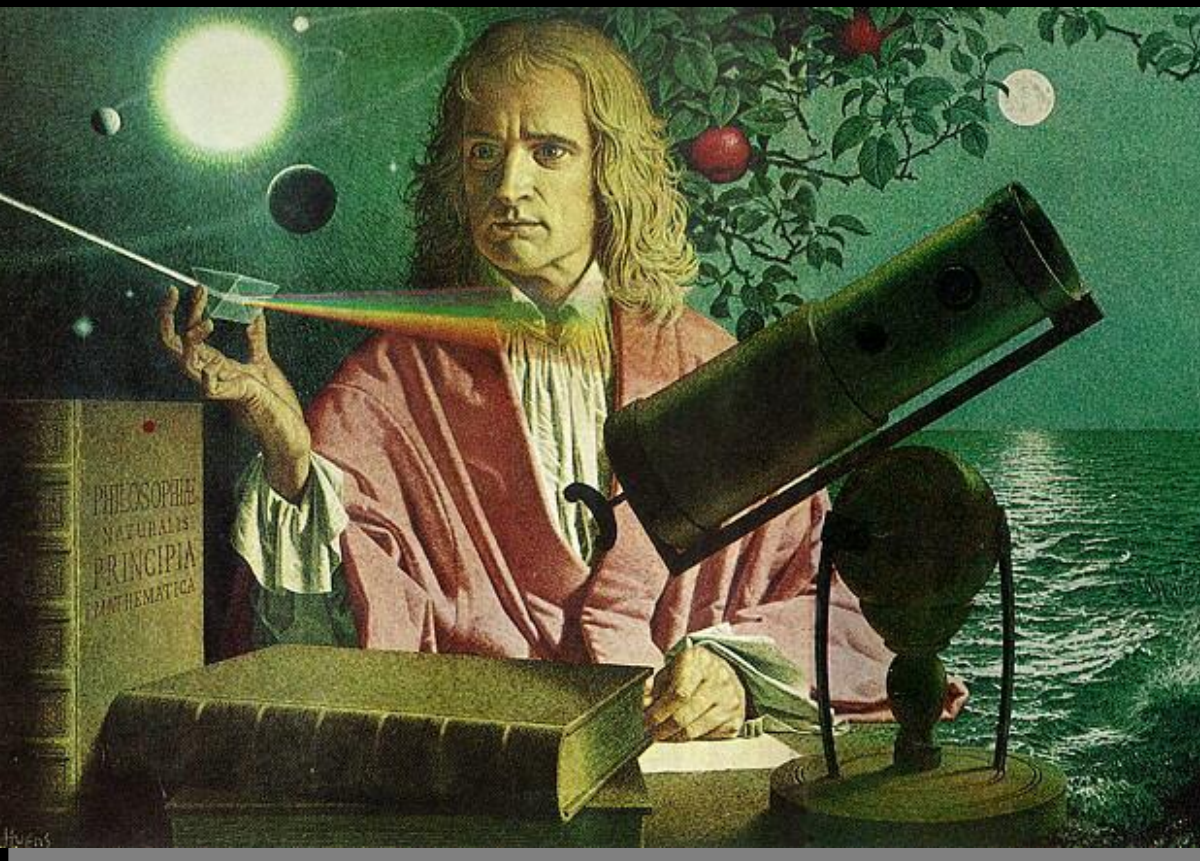
Constata que a **diferença de tempo** era devido ao tempo necessário para a luz se propagar e, portanto, a **velocidade era finita!** Esta diferença de tempo levava a um valor da velocidade da luz de 220 mil km/h.

Sabemos que o valor é da ordem de 300.000 km/h.

O erro de Roemer é atribuído aos diâmetros de órbita da Terra e Júpiter

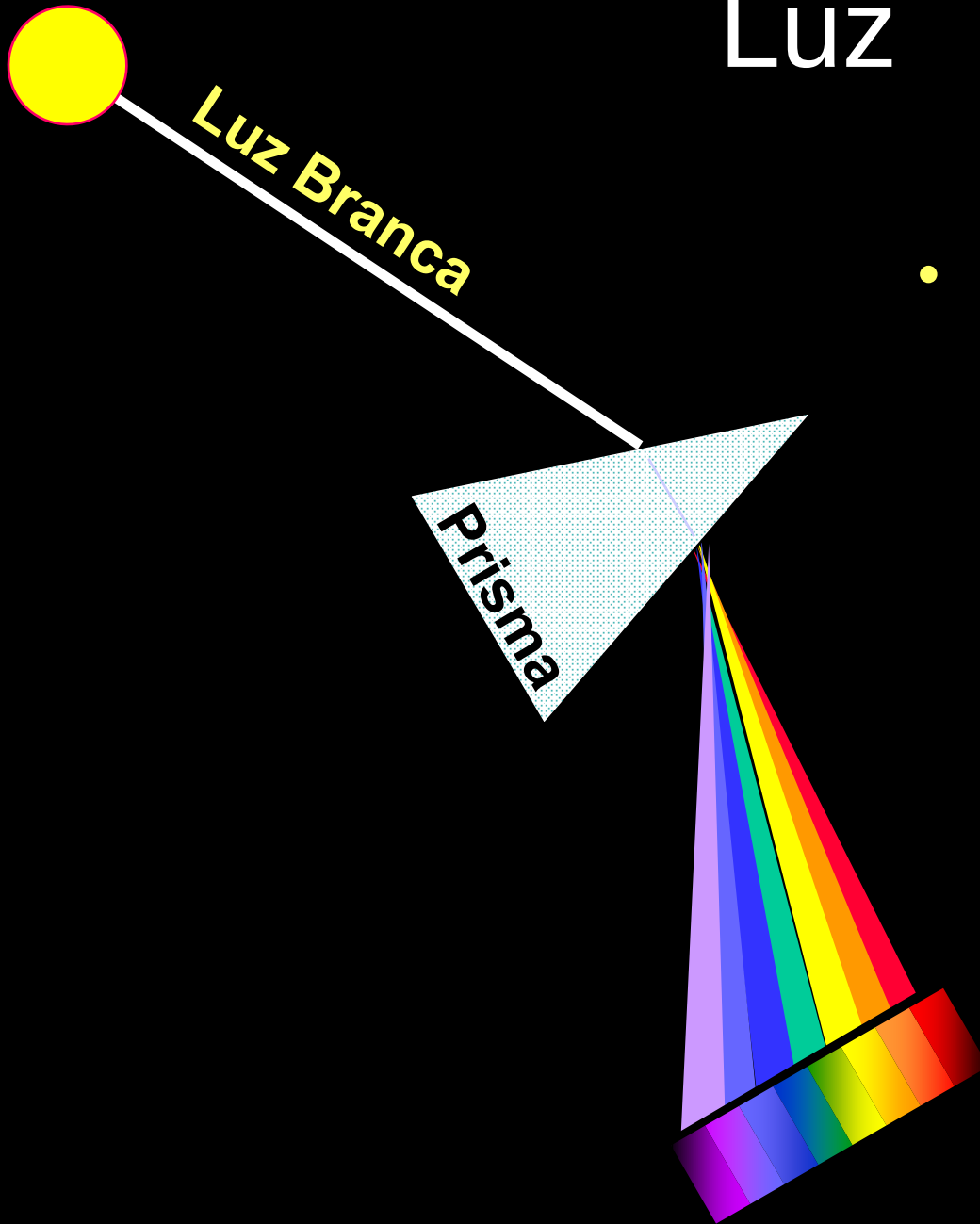


Natureza da Luz – Onda vs. Partícula



- **Duas visões do século XVII:**
 - Isaac Newton acreditava que a luz era composta de partículas
 - Christian Huygens acreditava que a luz era uma onda

Luz



- **Decomposição da luz**
 - Um prisma separa a luz branca nas cores do arco-íris.

Espectro contínuo

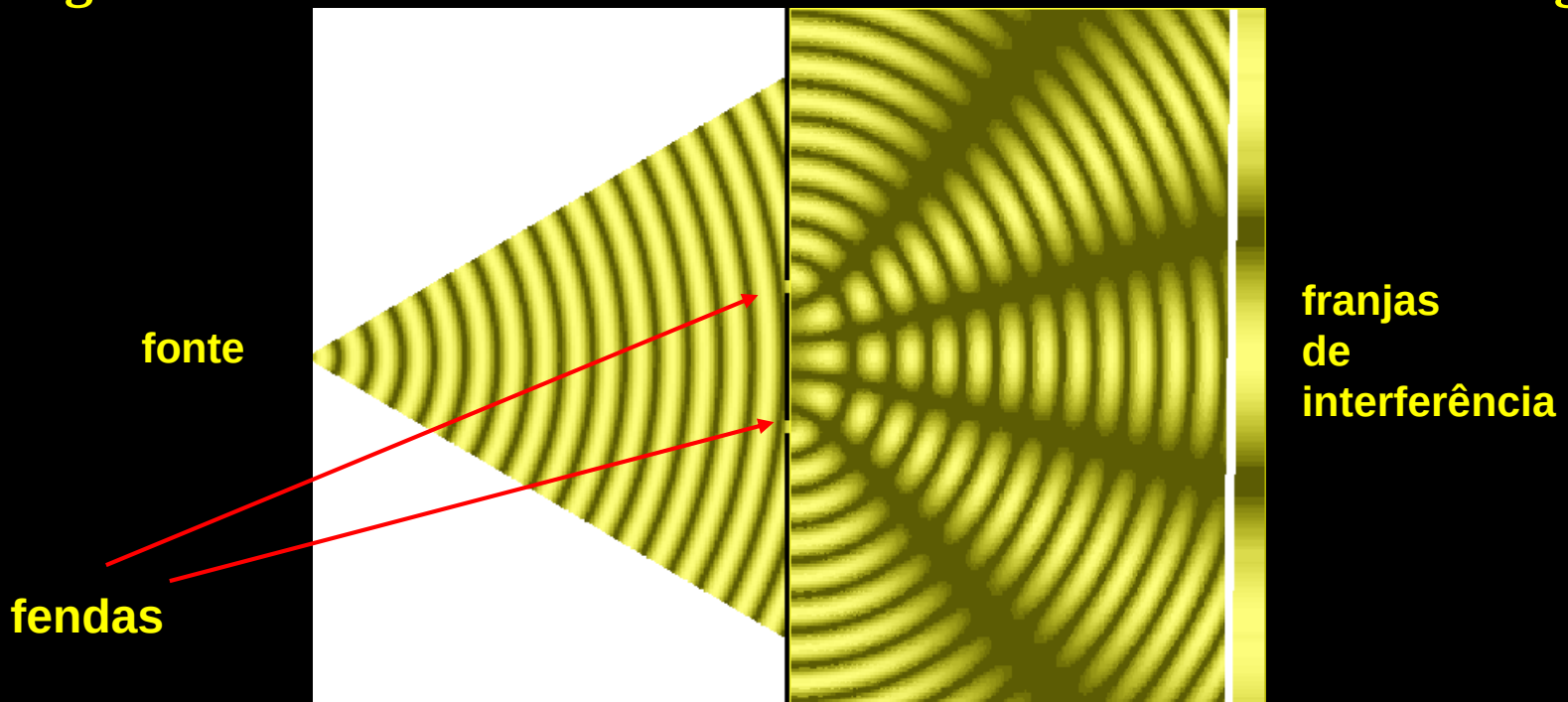
Uma questão de honra para os defensores da teoria ondulatória da luz:

Qual o comprimento de onda de cada cor?

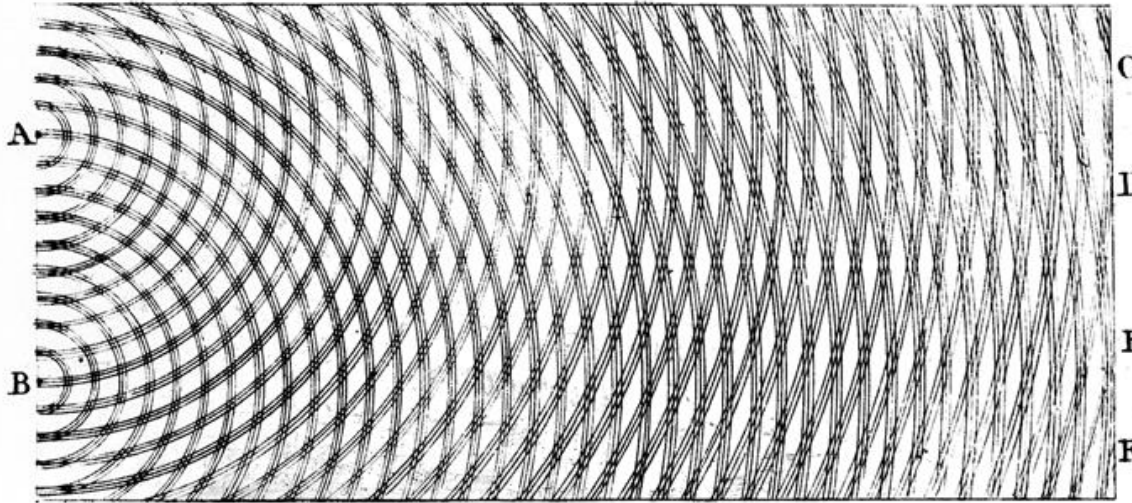
Só foi respondida em 1801!

Século XIX: A Luz é Onda

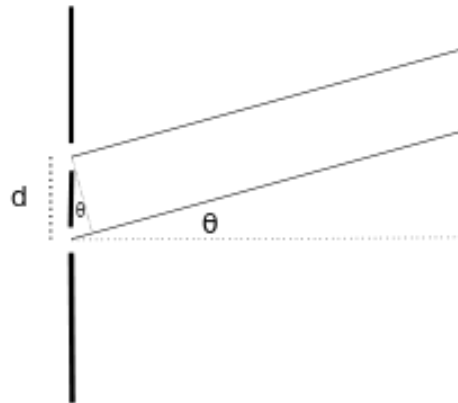
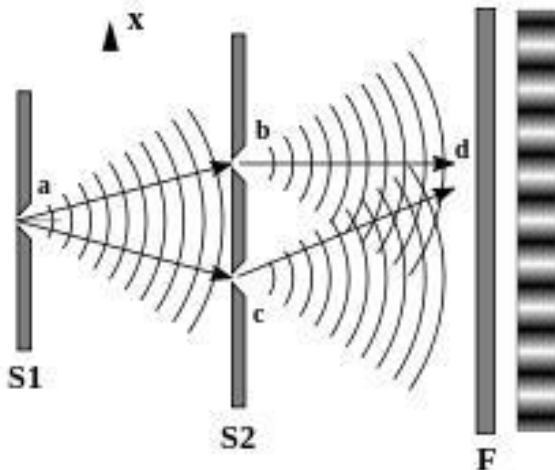
- A natureza corpuscular da luz prevaleceu, graças a Newton, até o início do século XIX.
- Thomas Young (1801) realiza a experiência da fenda dupla, mostra o fenômeno de interferência da luz e conclui sobre sua natureza ondulatória.
- Augustin-Jean Fresnel confirma mais tarde resultados de Young.



Natureza ondulatória da luz (Young 1801)



Qual o comprimento de onda de cada cor?



$$\theta_f \approx \lambda/d$$

Violeta: $\lambda=400$ nm

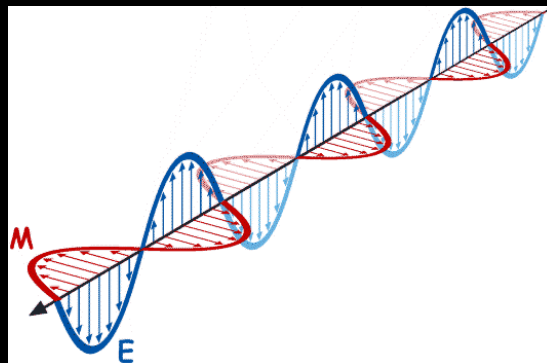
Vermelho: $\lambda=700$ nm

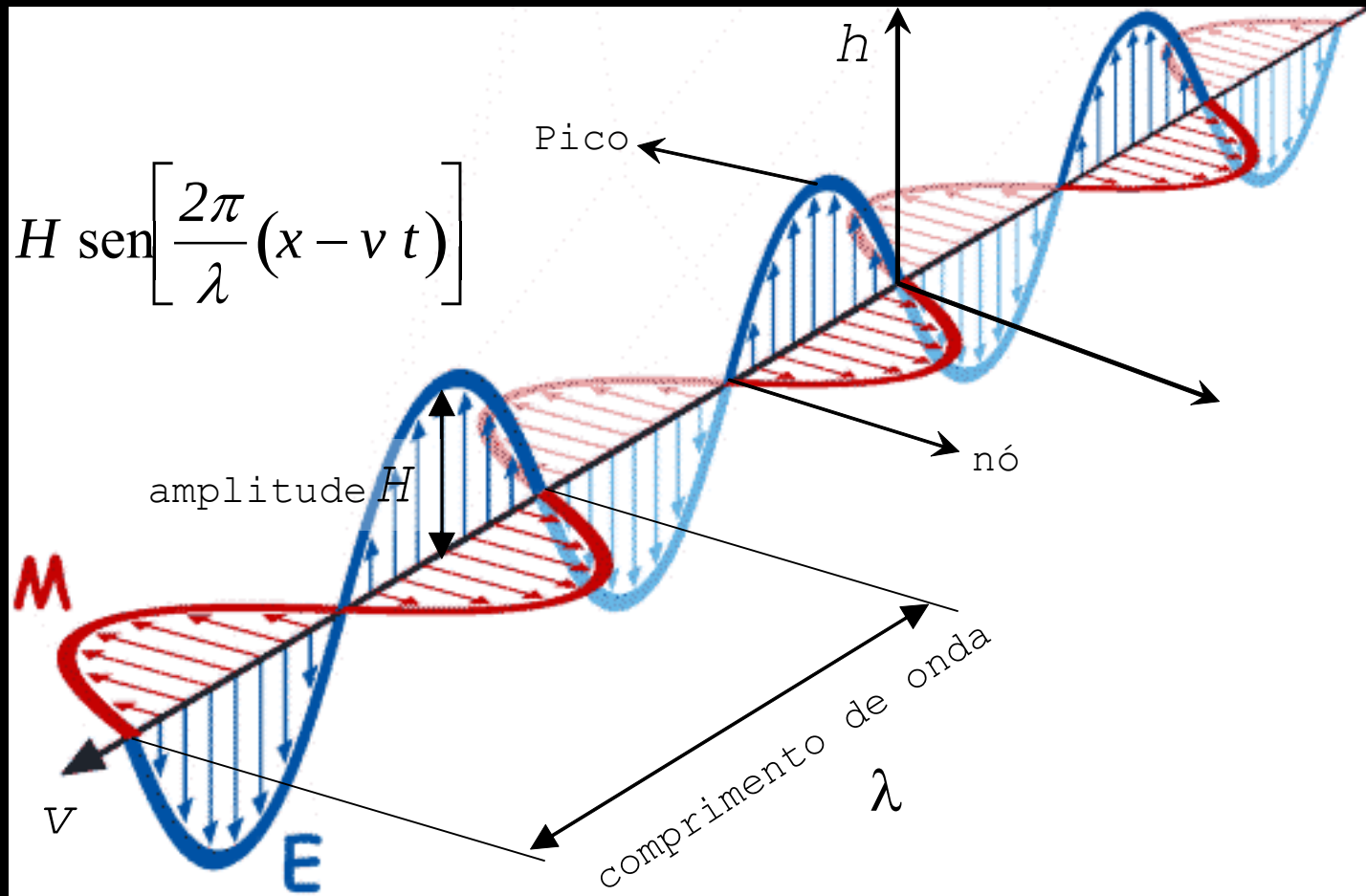
Radiação eletromagnética

- **Nos anos 1860, James Clark Maxwell unifica o magnetismo com a eletricidade em uma única teoria: Eletromagnetismo**
- **Maxwell mostra que uma solução de suas equações corresponde a uma onda eletromagnética.**
 - **estas ondas, descobre Maxwell, se propagam com a velocidade da luz.**
 - **A velocidade da luz no vácuo, c , é uma constante da natureza e seu valor é 299.792,458 km/s**
- **A luz é reconhecida como uma radiação eletro-magnética.**
- **Em 1889, Heinrich Hertz produz ondas eletro-magnéticas em laboratório.**
 - **São as ondas de rádio.**

Radiação eletromagnética

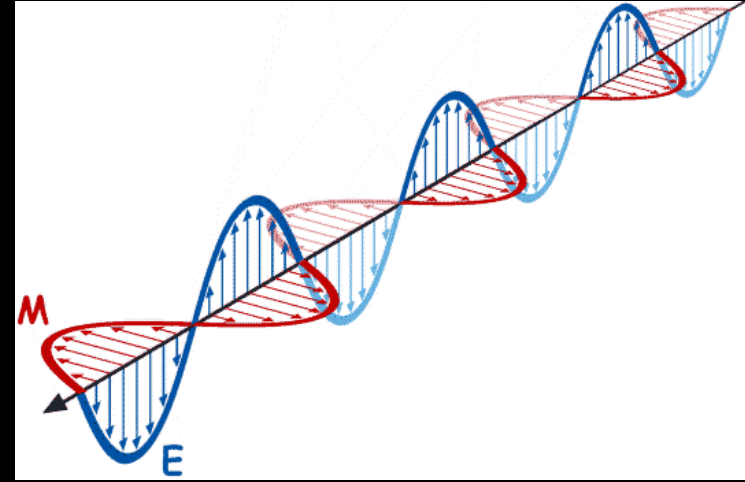
- Uma carga em repouso gera um campo elétrico em sua volta.
- Se esta carga estiver em movimento, o campo elétrico, em uma posição qualquer, estará variando no tempo e gerará um campo magnético que também varia com o tempo.
- Estes campos, em conjunto, constituem uma onda eletromagnética, que se propaga mesmo no vácuo.





Ondas eletromagnéticas

- **Variáveis básicas:**
 - λ : comprimento de onda
 - ν : frequência
 - v : velocidade de propagação
- **Para radiação eletromagnética:**
 - $v = c$ (velocidade da luz)
 - $\lambda \times \nu = c$



. λ é medido em unidade de comprimento:

μ = micrômetro = 10^{-6} m

nm = nanômetro = 10^{-9} m

Å = Angstrom = 10^{-10} m

. ν é medida em unidade de frequência, i.e., [1/tempo]
Hertz, megahertz, gigahertz, terahertz etc...

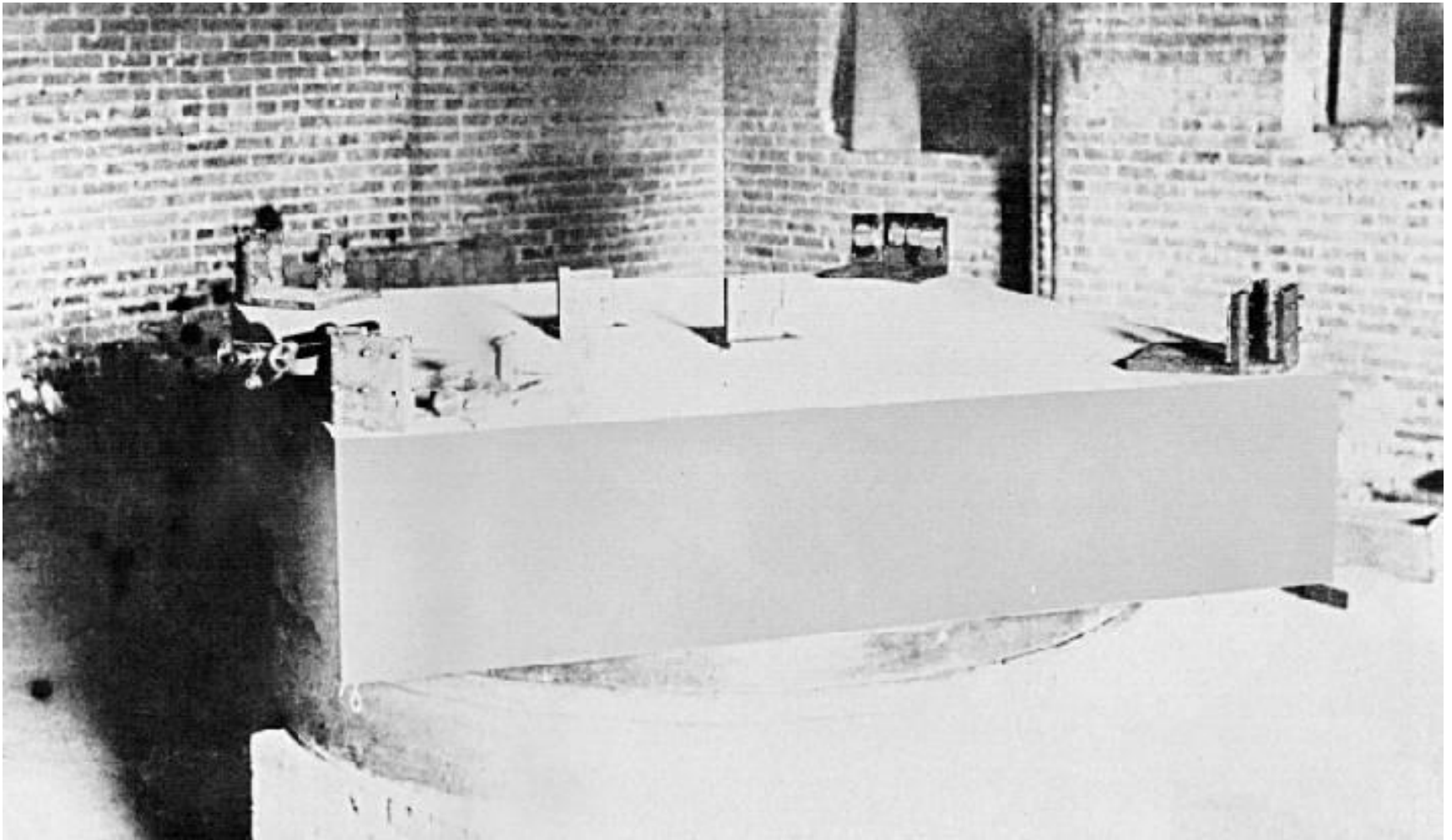
O que é o Mundo?

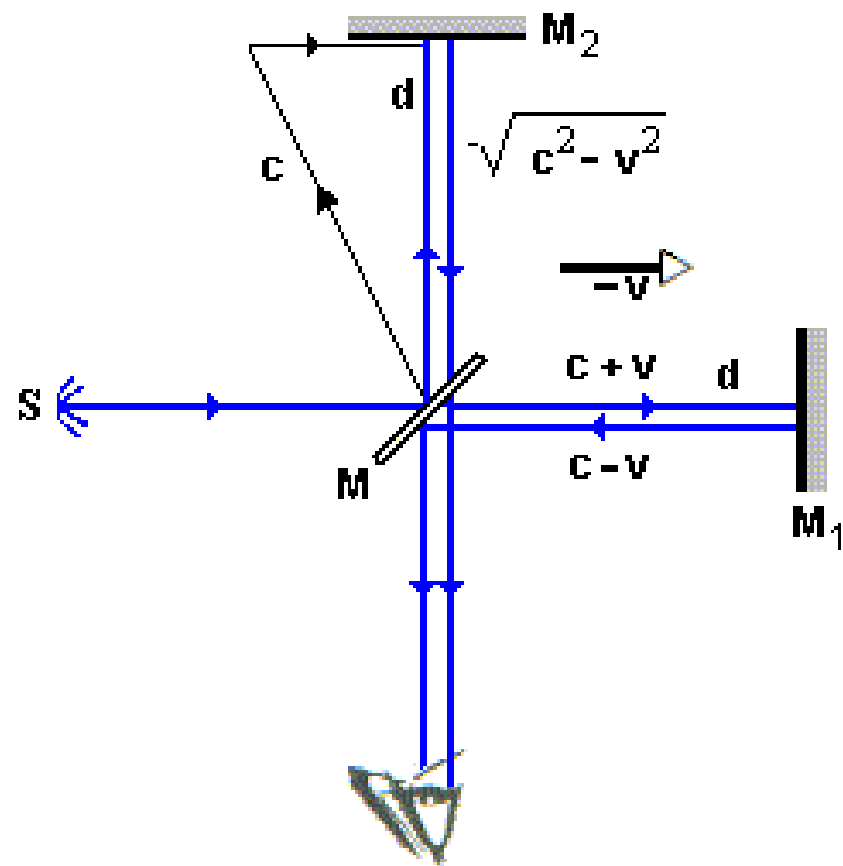
- O mundo clássico (antes de 1900)
consistia de :
 - ondas
 - partículas
 - forças

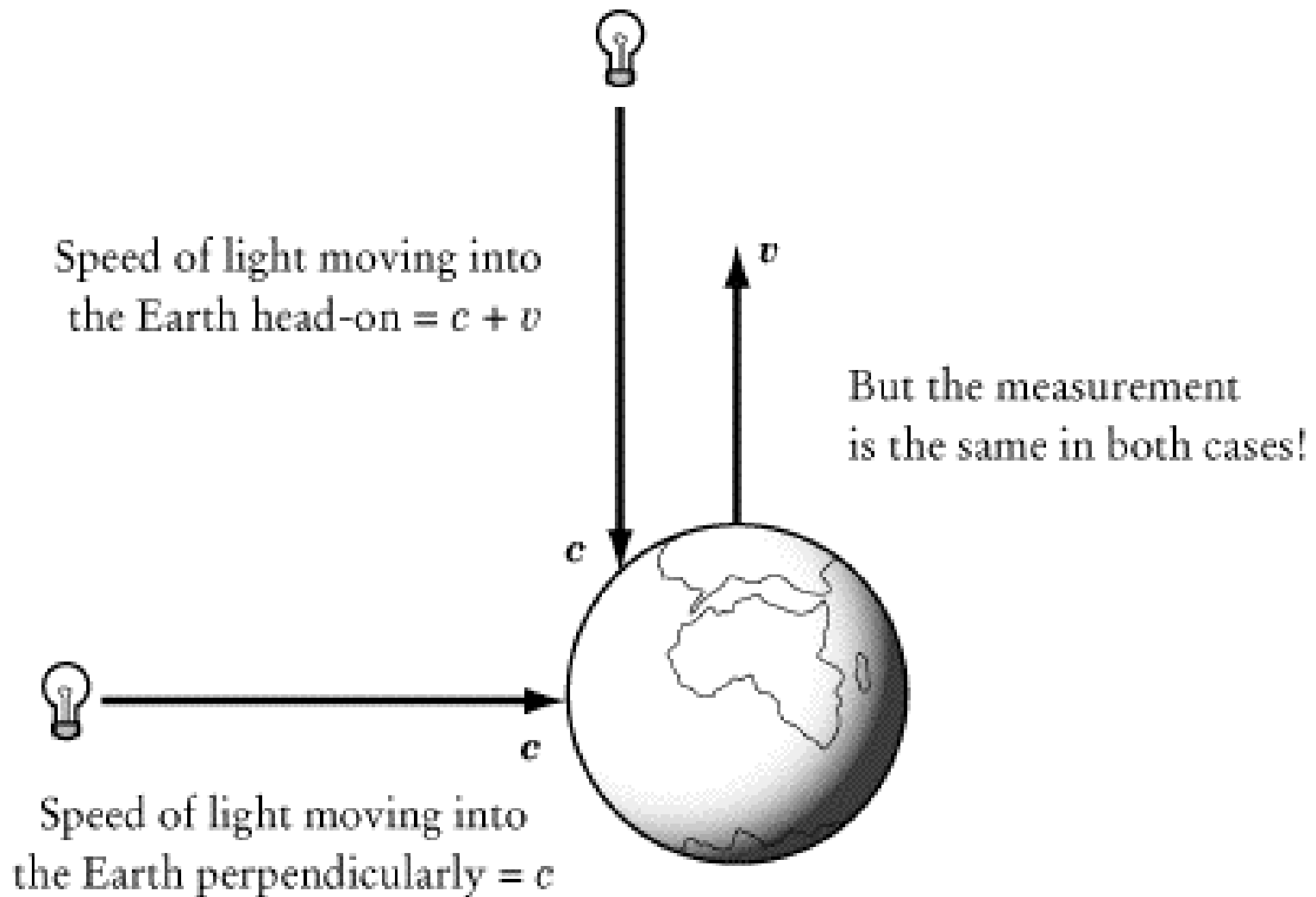
Tudo no Lugar !!! (antes de 14/12/1900)

- Exceto pelas *duas nuvenzinhas escuras* de Lord Kelvin (1900):
 - Experimento de Michelson-Morley
 - Radiação de Corpo Negro

Experimento de Michelson-Morley (1887)







A Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento (Einstein, 1905)

891

3. Zur *Elektrodynamik bewegter Körper*; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

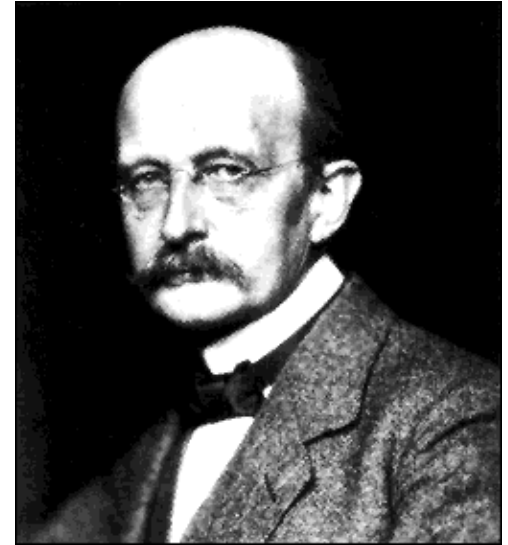
A Velocidade da Luz (no vácuo)
é uma constante da natureza

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

A Lei de Planck (14/12/1900)

- A luz (energia) é quantizada ... $E = hf$
 h = constante de Planck = $6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- O espectro do corpo negro explicado!



The Planck Radiation Law

$$I_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kt} - 1)}$$

intensity of radiation emitted as a function of wavelength and temperature.

A Constante de Planck
é uma constante da natureza

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$h = 6,626 \times 10^{-27} \text{ erg.s}$$

Mundo clássico: sem h

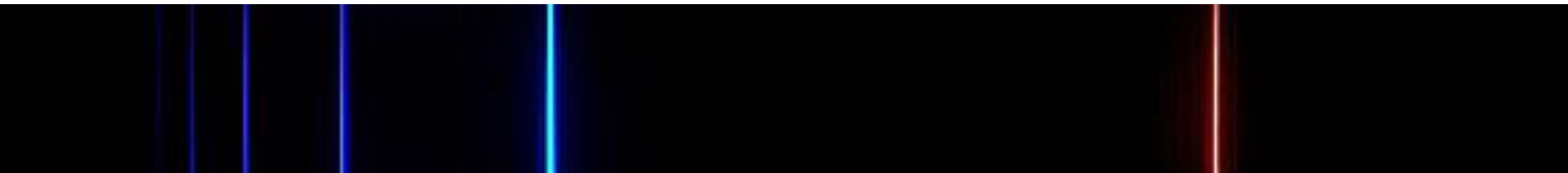
Mundo quântico: com h

$$E = mc^2 \text{ (clássico)}$$

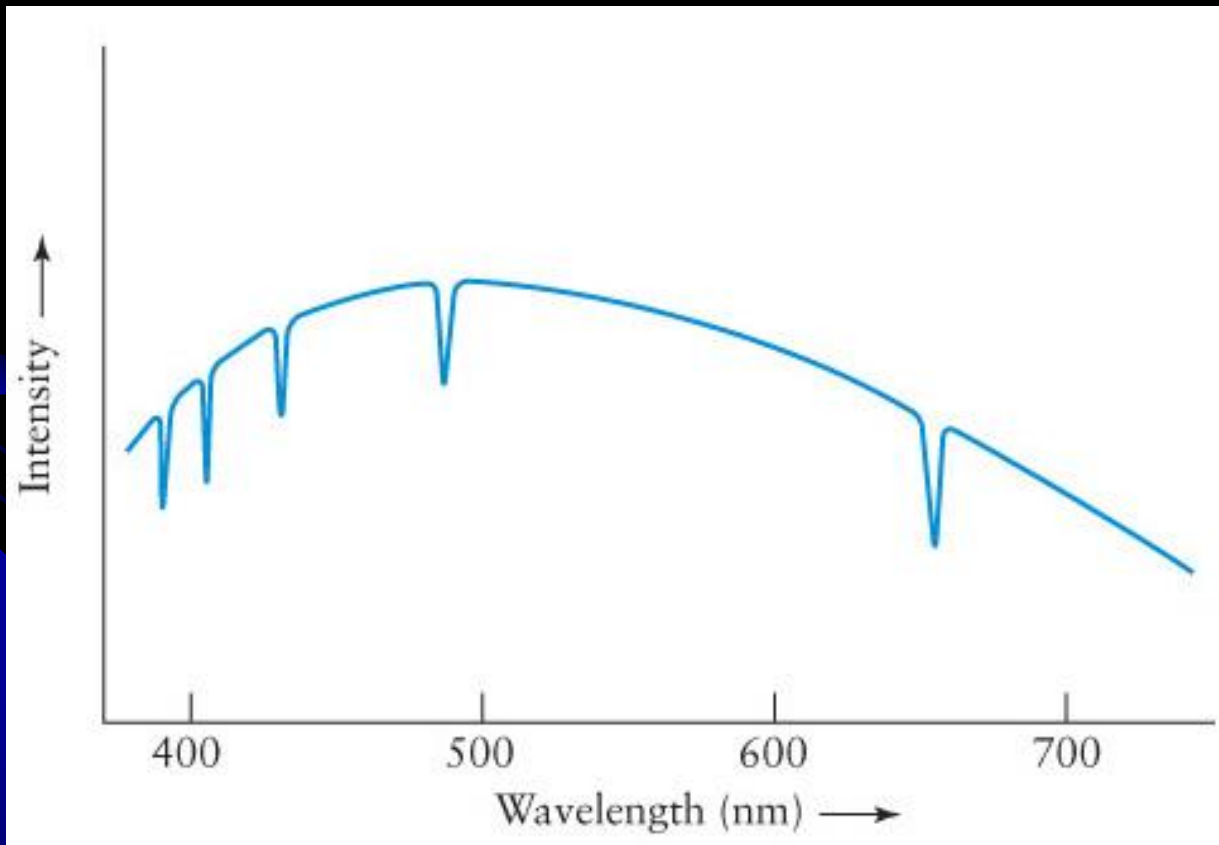
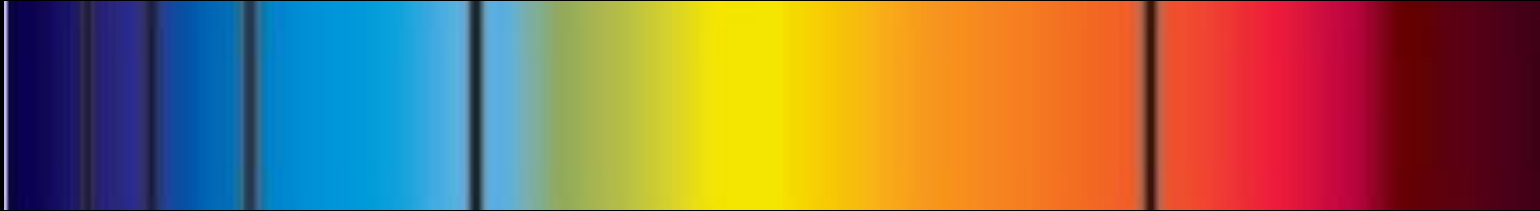
$$E = h f \text{ (quântico)}$$

Mas havia mais coisas fora do lugar

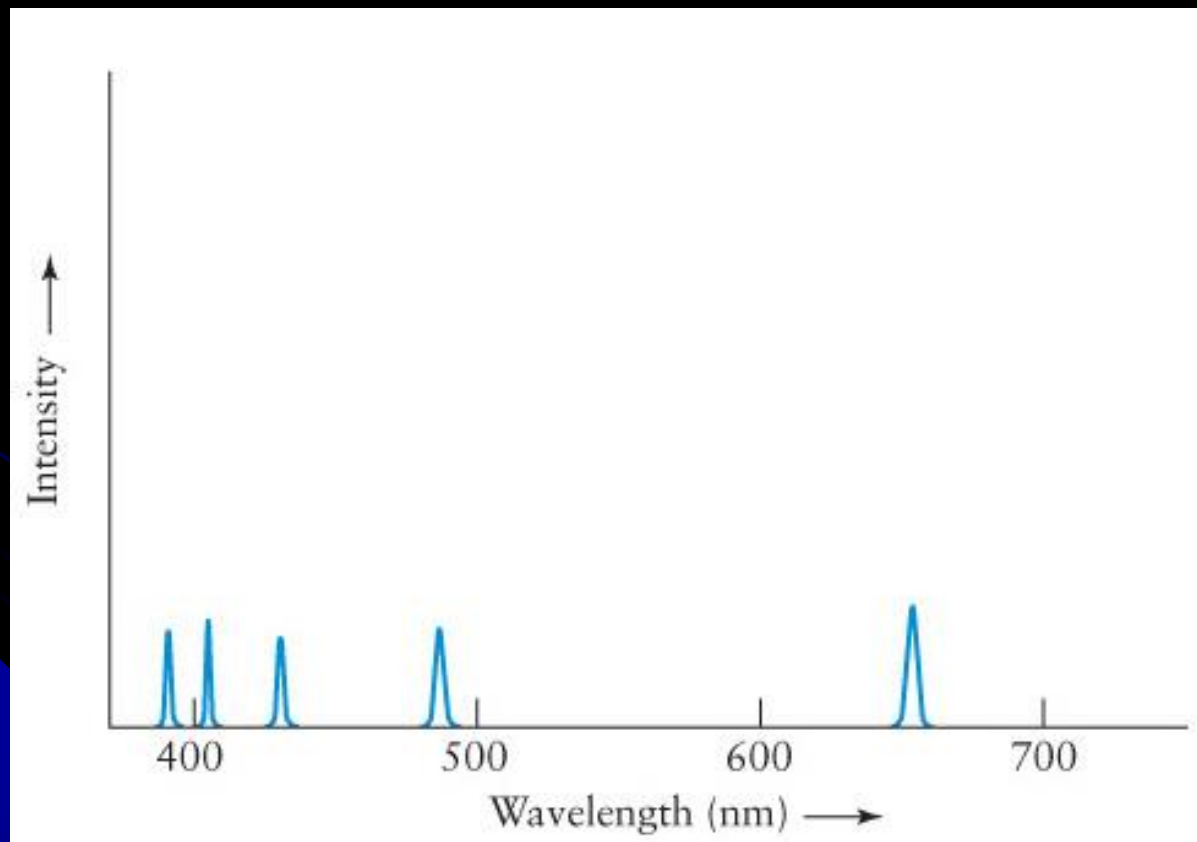
- Como explicar os espectros dos elementos?
 - Em particular a série de Balmer (1885) das linhas de emissão do hidrogênio
 - $\lambda = B \left(\frac{m^2}{m^2 - n^2} \right) = B \left(\frac{m^2}{m^2 - 2^2} \right)$, onde $B=364.50682$ nm
 - $\frac{1}{\lambda} = \frac{4}{B} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, $n>2$ (Rydberg 1888)



Espectro de absorção do hidrogênio gasoso



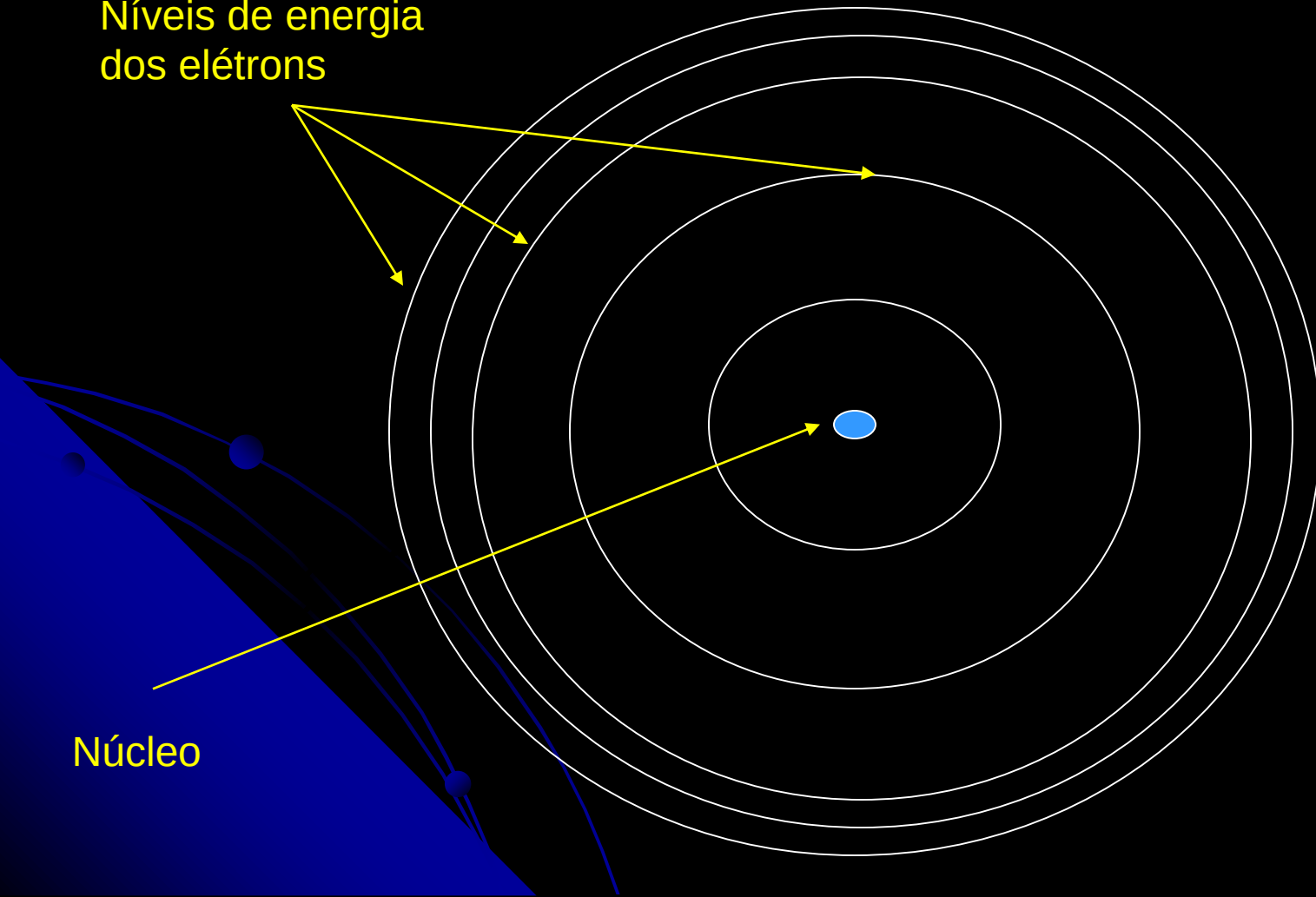
Espectro de emissão do hidrogênio gasoso

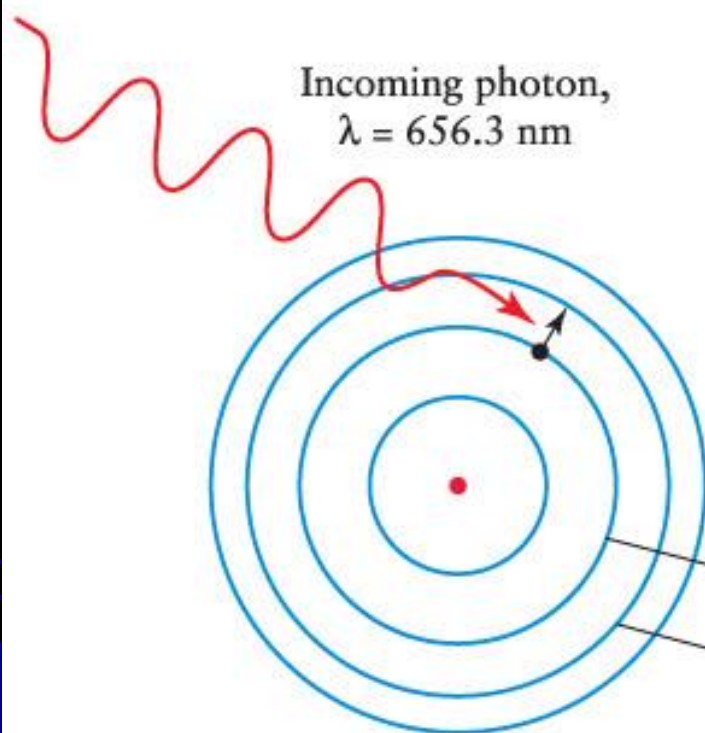
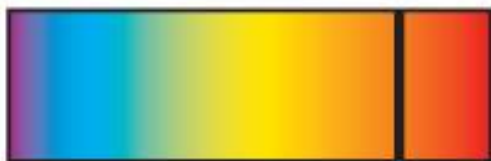


Modelo Atômico para o Espectro

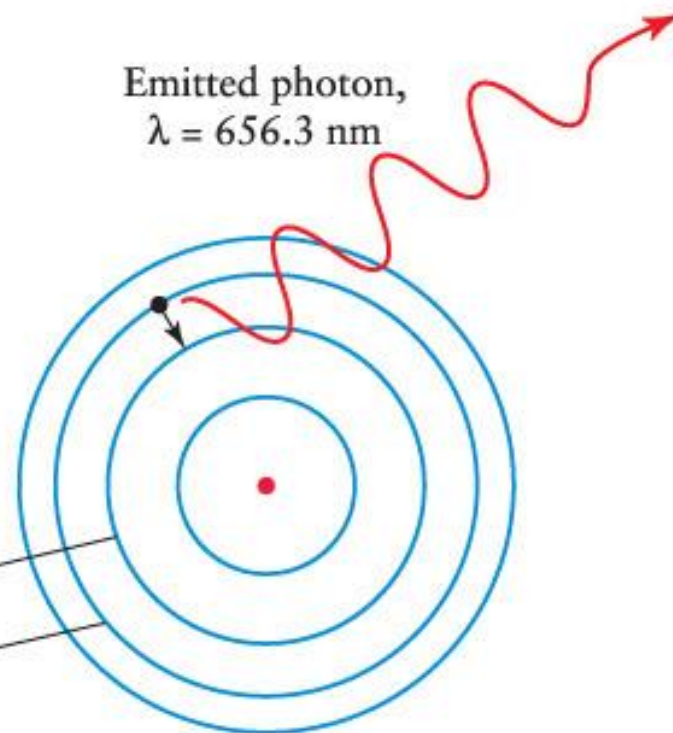
Níveis de energia
dos elétrons

Núcleo



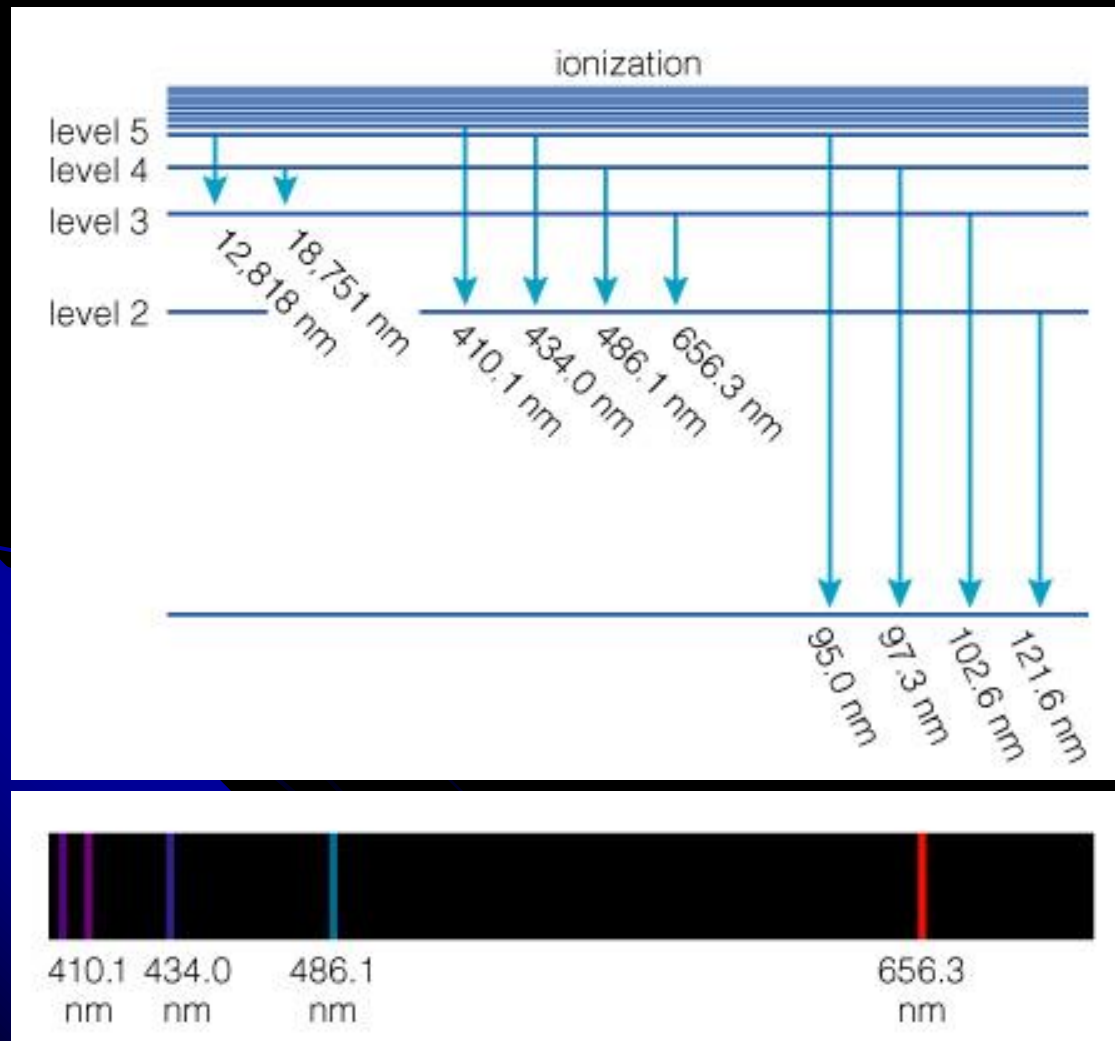


- a Atom absorbs a 656.3-nm photon; absorbed energy causes electron to jump from the $n = 2$ orbit up to the $n = 3$ orbit



- b Electron falls from the $n = 3$ orbit to the $n = 2$ orbit; energy lost by atom goes into emitting a 656.3-nm photon

Assinaturas químicas

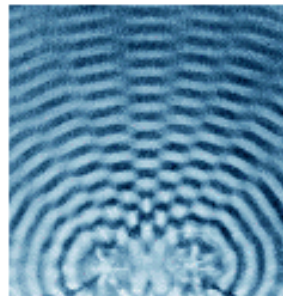
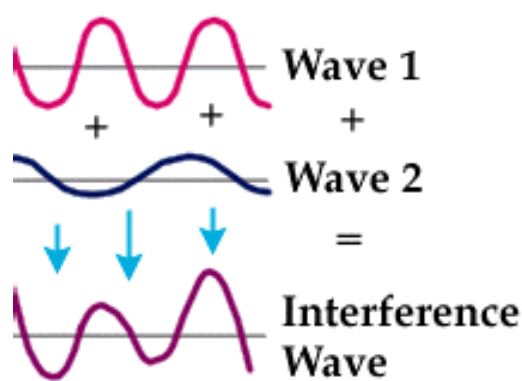


- Transições eletrônicas para estados de energia inferiores produzem um padrão característico de linhas de emissão.

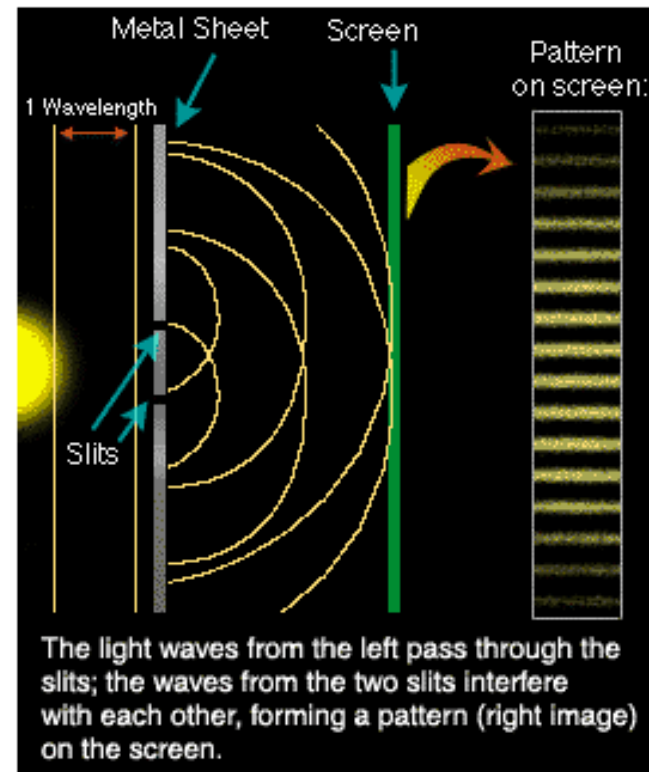
Complementaridade Onda-Partícula

A Luz é uma Onda

(Young 1801)

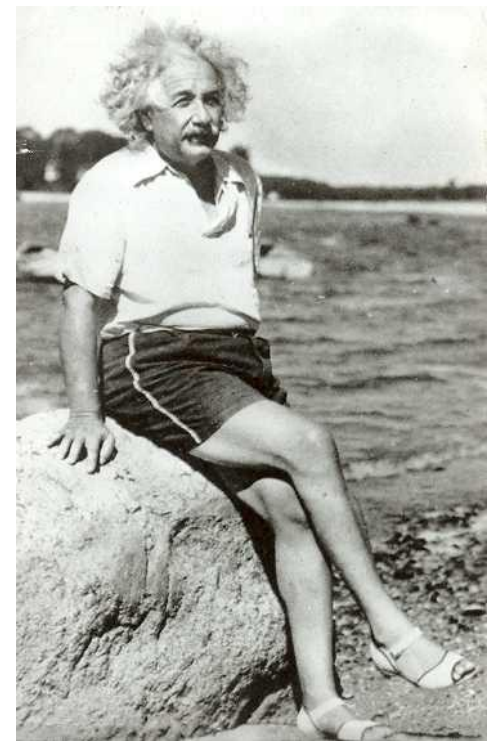


The interference of water waves coming from two sources.



Mas... a Luz é uma Partícula

O Efeito Fotoelétrico explicado (1905)



- Evidência que a luz se comporta como partícula, dependendo do arranjo experimental
 - Surge o conceito do *fóton*
 - Mas a luz também se comporta como onda!!!
- ⇒ *complementaridade* (onda-partícula)

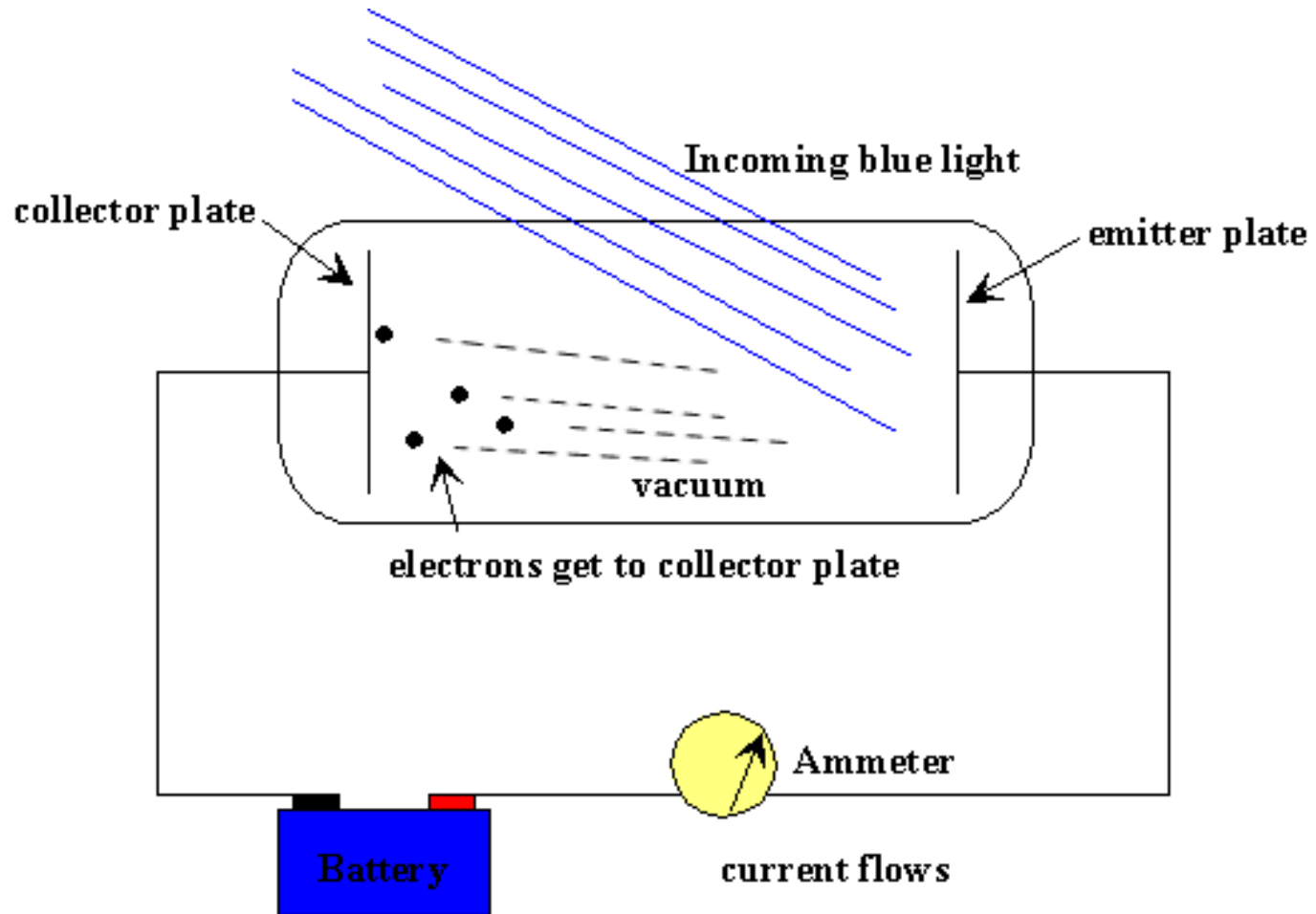
6. *Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwell'schen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

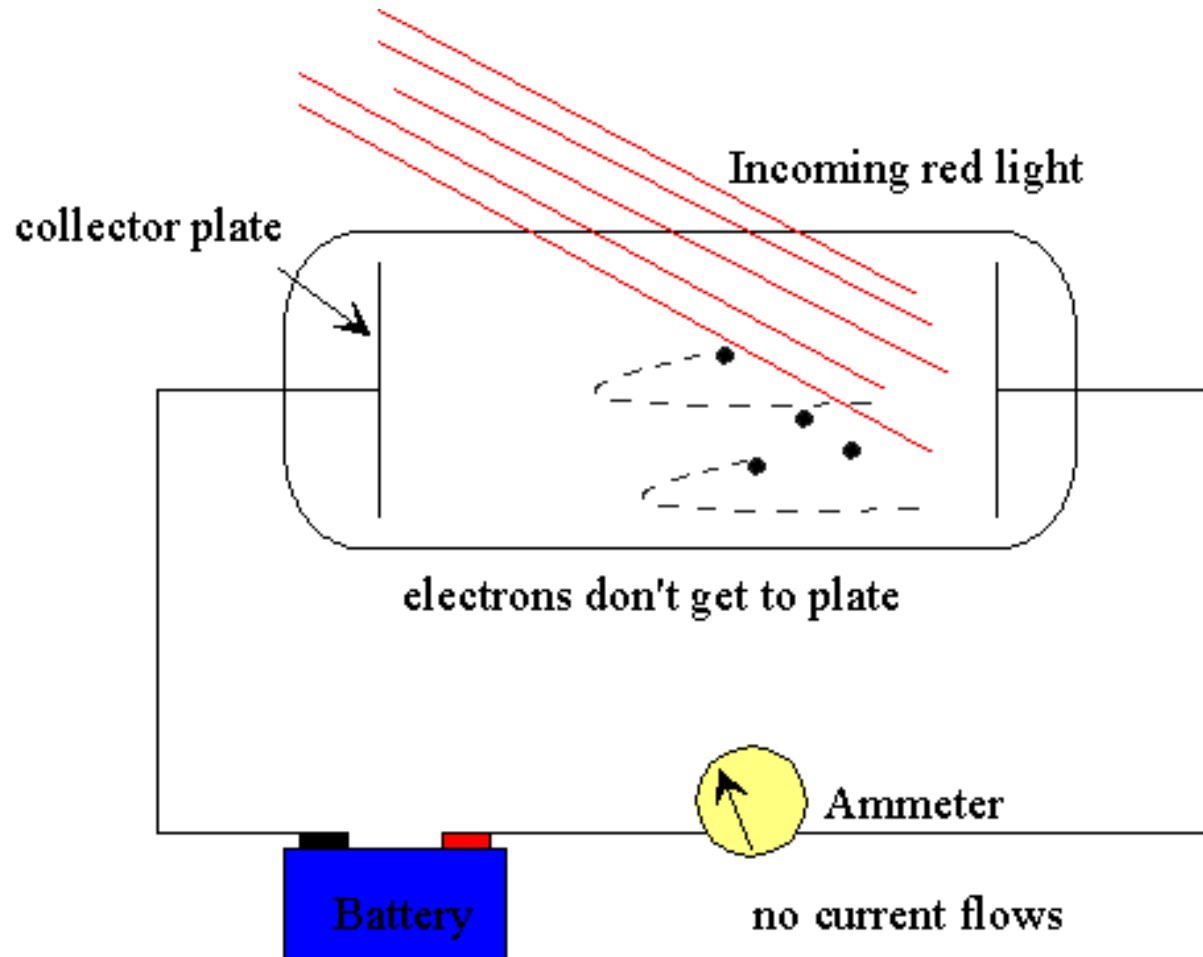
A Produção e Transformação da Luz segundo um Ponto de Vista Heurístico (Einstein, 1905)

O Efeito Fotoelétrico



Luz Azul: flui corrente elétrica

O Efeito Fotoelétrico



Luz Vermelha: não flui corrente elétrica

Fótons

- Quantum de energia = fóton
- Energia do fóton é proporcional à frequência da radiação eletromagnética:
 - $\text{energia} = \text{freq} \times h$ ou $E = h \nu$
- h é a constante de Planck
 - $h = 6,62607 \times 10^{-34}$ joule $\times$ segundo
 - $= 6,62607 \times 10^{-27}$ erg $\times$ segundo

Exemplo luz verde:

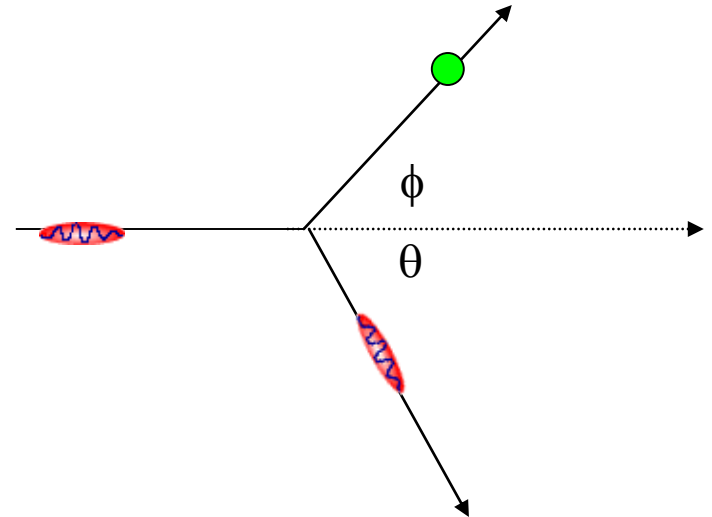
- $\lambda = 510$ nm ou 5100 Å ou $0,00051$ mm
- $\nu = 5,878 \times 10^{14}$ Hz ou 587.828 THz (THz=TeraHz= 10^{12} Hz)
- $E = 3,895 \times 10^{-12}$ erg ou $9,3 \times 10^{-20}$ calorias ou $2,43$ eV

eV = eletron-volt= $1,6022 \times 10^{-19}$ joule

= energia de um elétron que passa por uma diferença de potencial de 1 volt

Ondas podem se comportar como Partículas

- **Além do Efeito Fotoelétrico**
a **natureza corpuscular** da luz é revelada por outros fenômenos
- **Espalhamento Compton**
de um fóton (p.ex. raio-X ou raio gama) por uma partícula carregada (p.ex. elétron) no qual a energia do fóton se reduz ao ser transferida em parte ao elétron (1923)
- Distinto do **Espalhamento Thomson**, que é apenas clássico (não aparece h)
- **Espalhamento Compton Inverso**
ocorre quando a partícula carregada tem alta energia e transfere parte de sua energia ao fóton, aumentando sua energia
(importante em astrofísica: raios-X de discos de acreção de buracos negros e efeito Sunyaev-Zel'dovich em aglomerados de galáxias)



$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Partículas podem se comportar como Ondas

- O Príncipe Louis de Broglie fez essa previsão ousada em 1924
- O comprimento de onda de de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- Confirmada por Davisson and Germer (1927)
- Permitiu a construção do *microscópio eletrônico*.



“Experimento da Fenda Dupla” válido para a luz e para eletrons

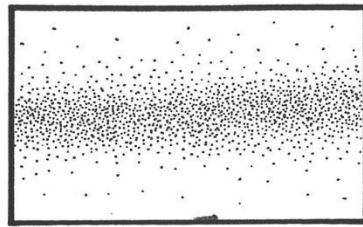
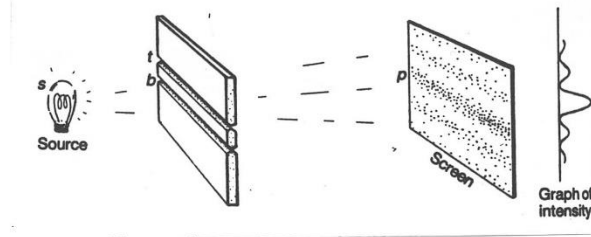


Fig. 6.4. Pattern of intensity at the screen when just one slit is open – a distribution of discrete tiny spots.

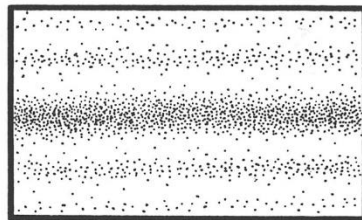


Fig. 6.5. Pattern of intensity when both slits are open – a wavy distribution of discrete spots.

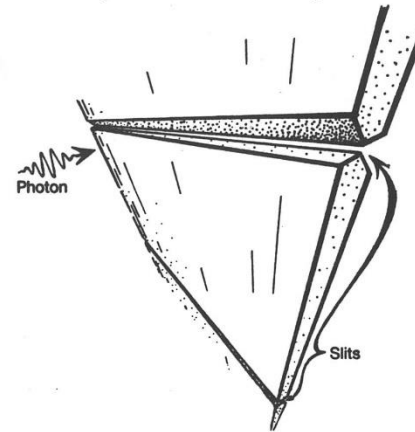


Fig. 6.6. The slits from the photon's point of view! How can it make any difference to it whether the second slit, some 300 'photon sizes' away, is open or closed?

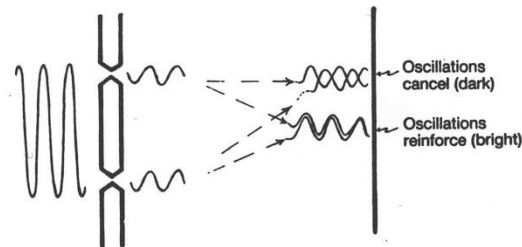


Fig. 6.7. With a purely wave picture we can understand the pattern of bright and dark bands at the screen (although not the discreteness) in terms of interference of waves.

Equacionando a dualidade

- Uma onda “é uma partícula”

E

Uma partícula “é uma onda”

- A Equação de Schroedinger
(1925/1926)
Mecânica Matricial de Heisenberg
(1925)
- O Universo é fundamentalmente
borrado



É o Heisenberg – Eu acho,

Com certeza, *Sei lá...*

O Princípio da
Incerteza

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$



“Toda filosofia se resume a duas coisas: curiosidade e miopia: o problema é que queremos ver mais longe do que enxergamos.”

Bernard le Bovier de Fontenelle (século XVII)

O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Penetra a atmosfera?



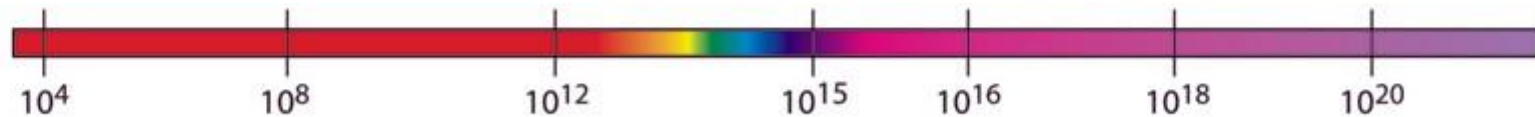
Comprimento de onda (λ) - em metros



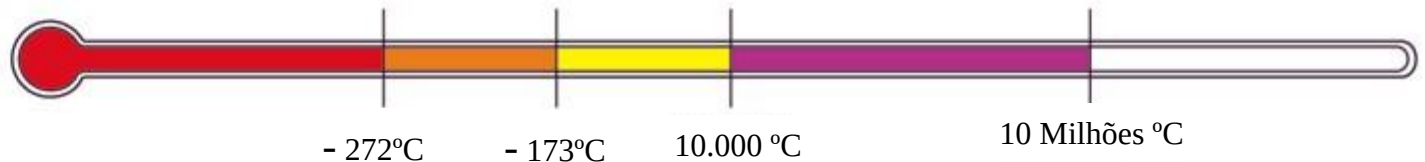
Do tamanho de...



frequência - em Hertz



Temperatura - em Celsius



Luz Visível

0.7 to 0.4 μm

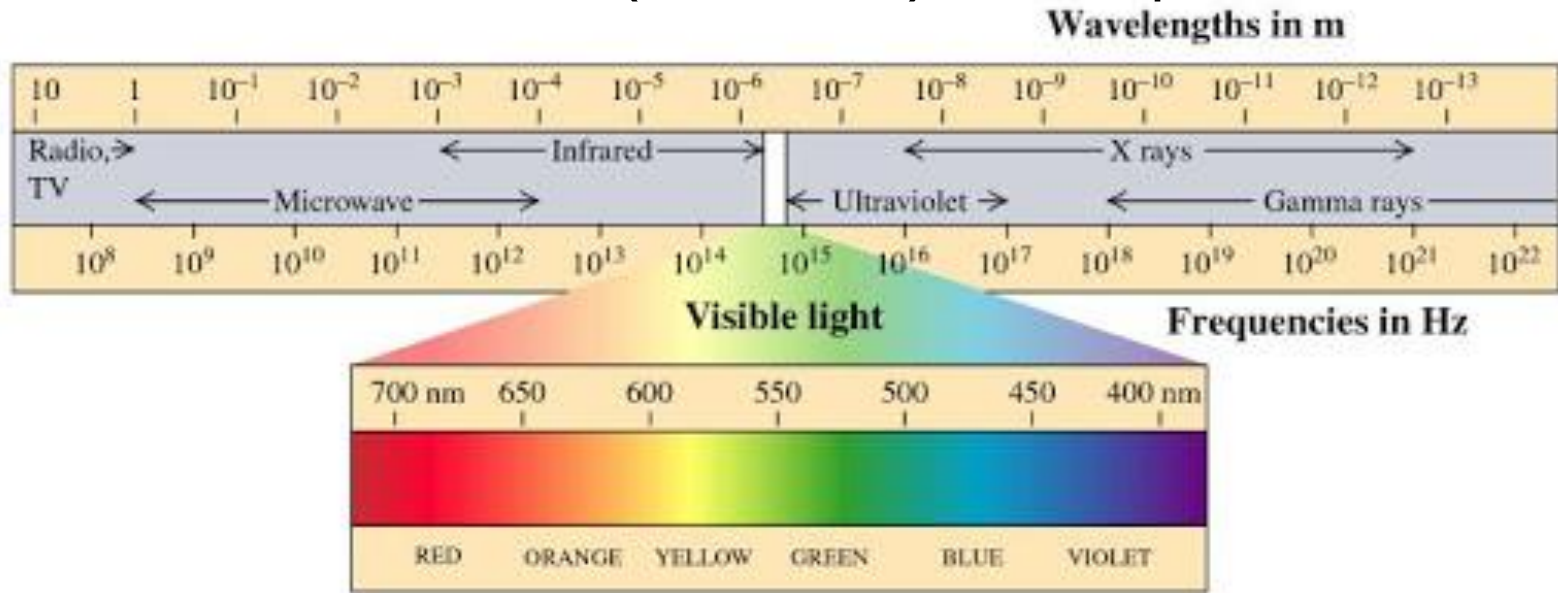
Nossos olhos são sensíveis a essa região do espectro

Vermelho-Laranja-Amarelo-Verde-Azul-Índigo-Violeta

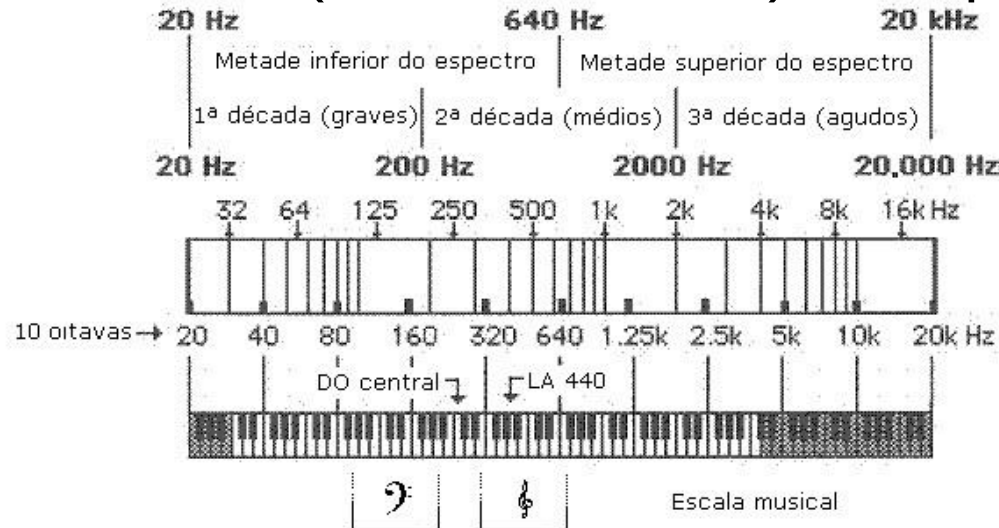


Luz vs. Som – Nossa Miopia Espectral

Menos de uma oitava (fator de 2) em frequência é visível

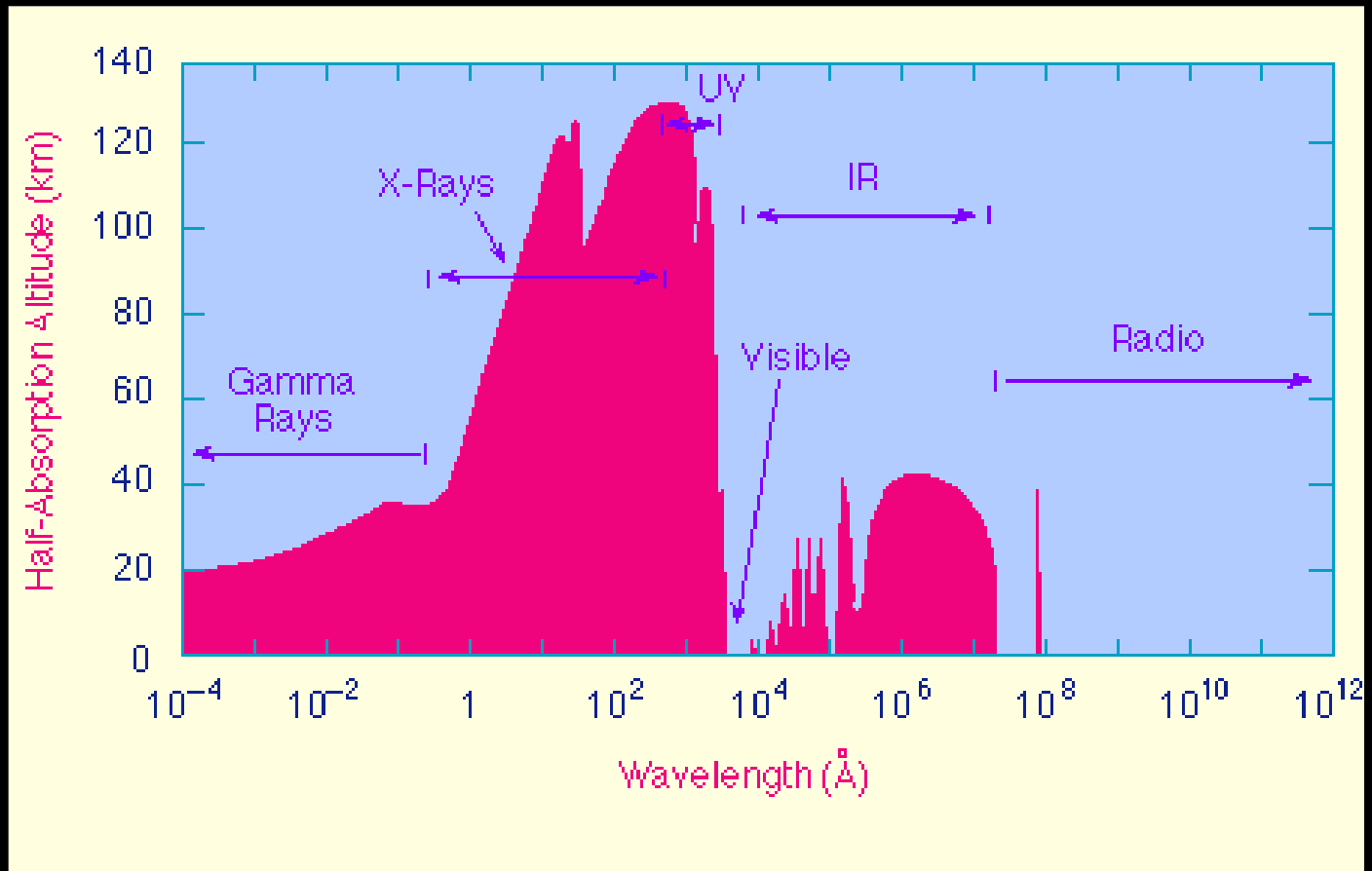


Som: 10 oitavas (fator $2^{10} \sim 1000$) do espectro audível

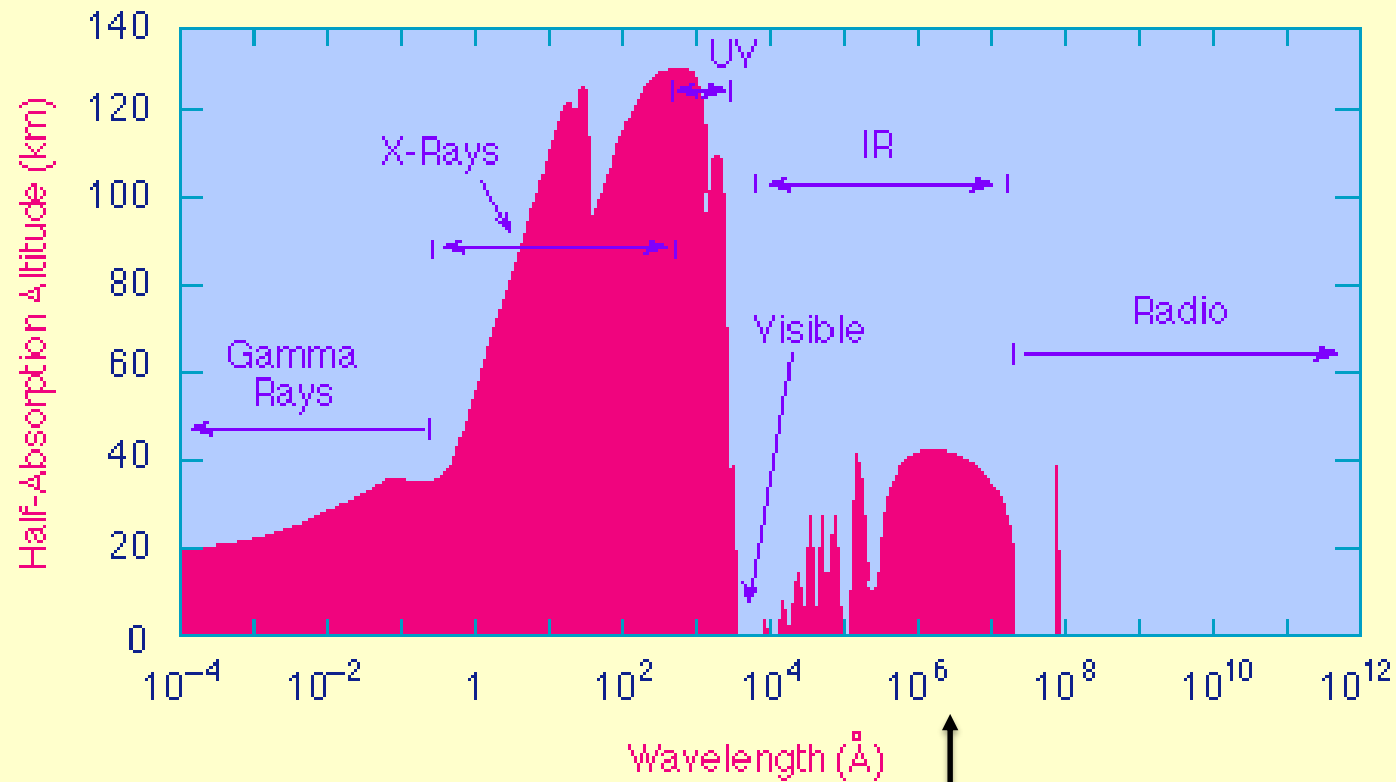


Janelas atmosféricas no espectro eletromagnético

- A atmosfera terrestre absorve a radiação ao longo do espectro EM.
- É evidente a janela no visível e a transparência da nossa atmosfera em rádio.
- Observações em raios X e UV por exemplo devem ser feitas através de satélites, para evitar a absorção dessas radiações pela nossa atmosfera.



Astronomia Espacial no Infravermelho



Evitando o bloqueio atmosférico no IV Médio

Spitzer

Diâmetro: 0,85 m



Satélite Herschel

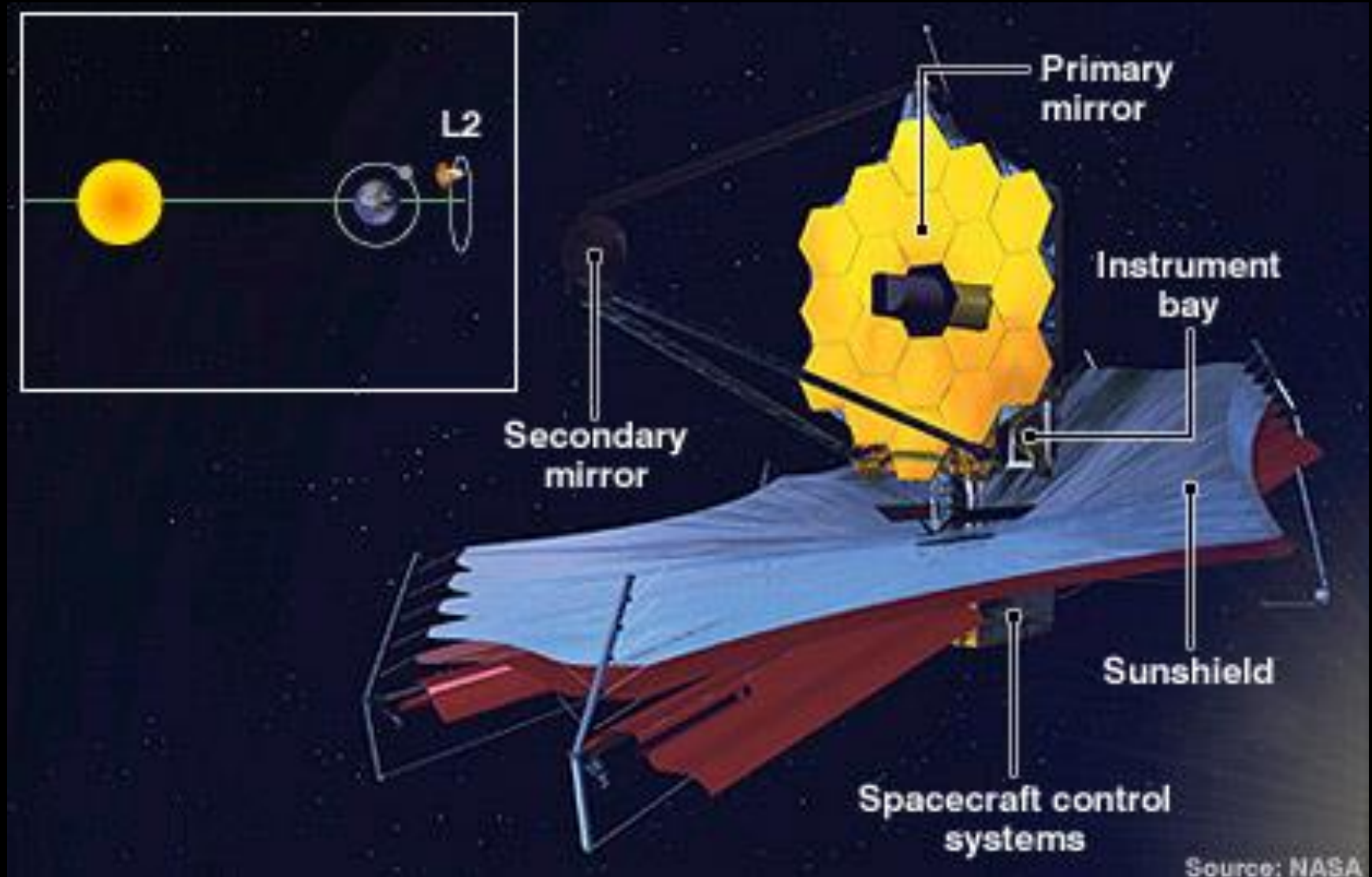
Diâmetro: 3,5 m



James Web Space Telescope

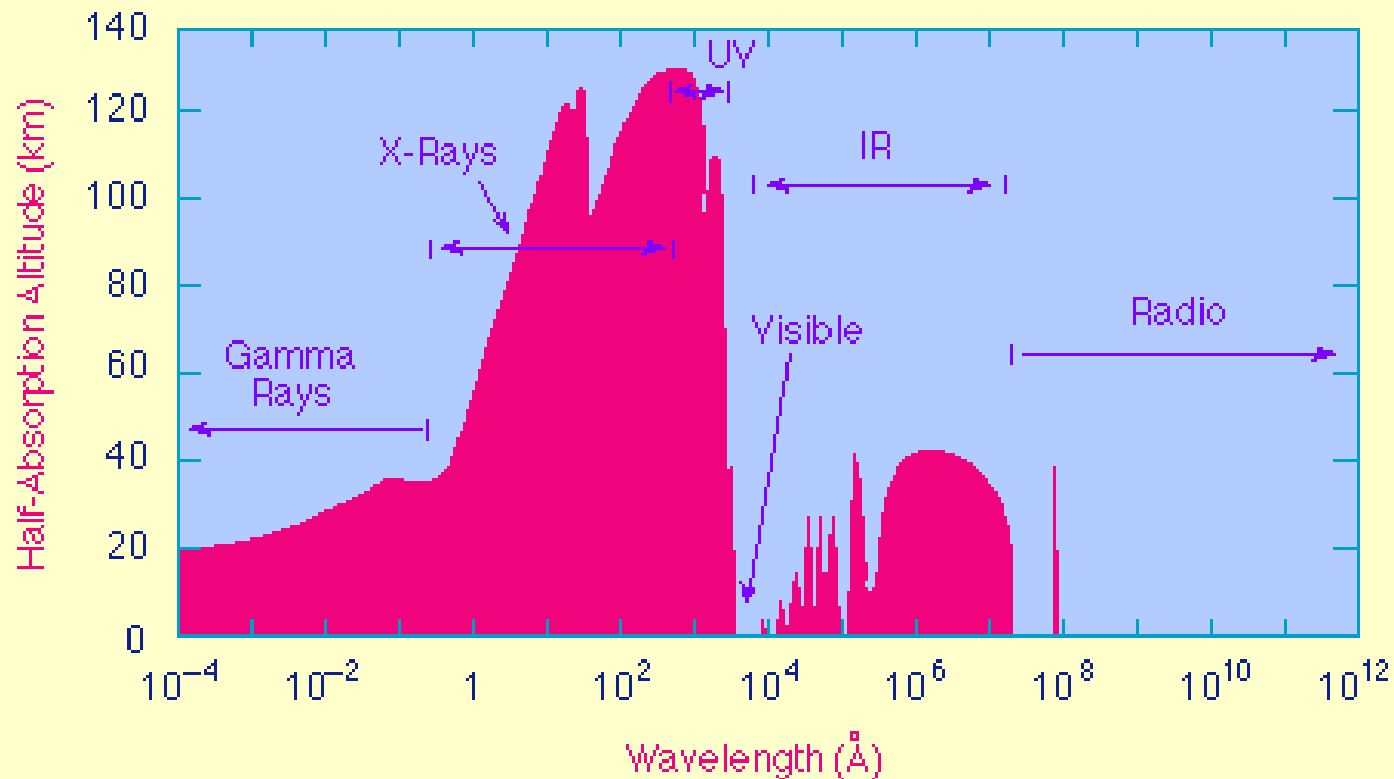
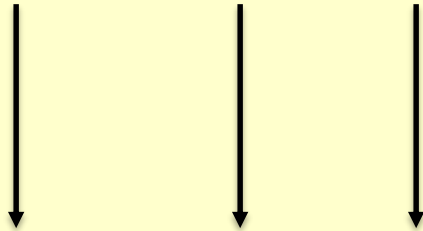
Diâmetro: 6,5 m

Lançamento: 2021

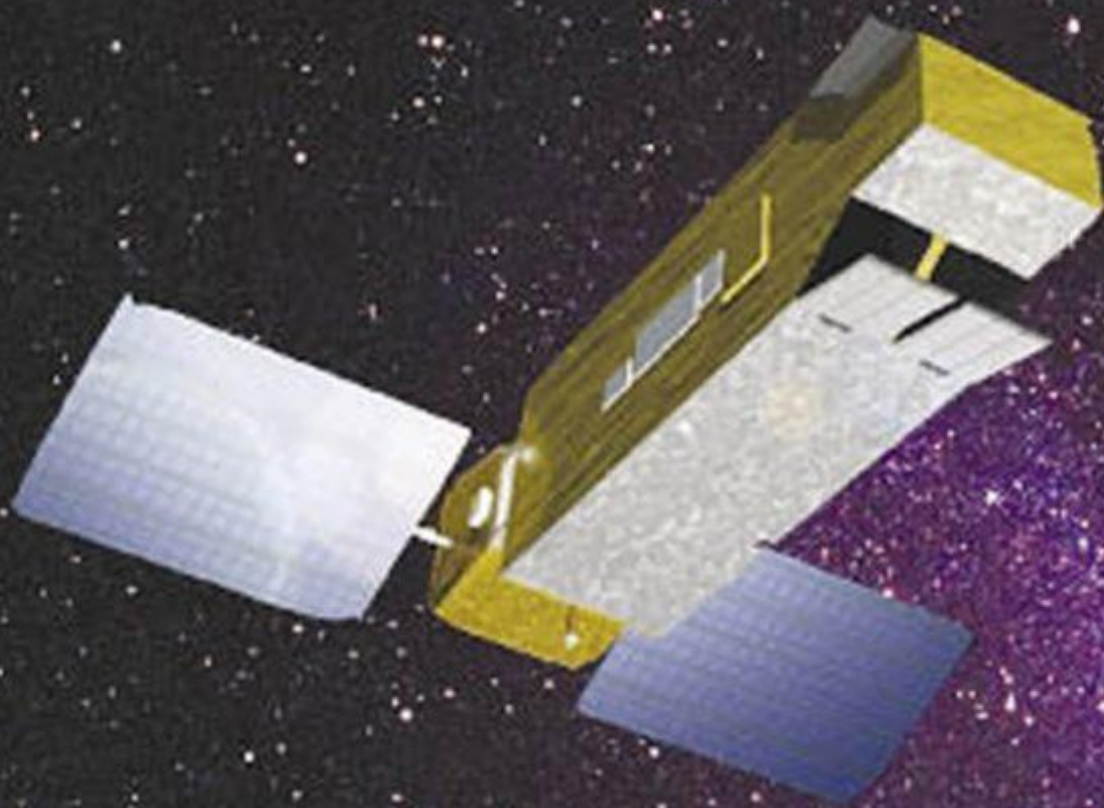


Astronomia Espacial em Altas Energias (curtos comprimentos de onda)

raios γ raios-X UV



Astronomia Espacial de Ultravioleta



FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer)

Astronomia Espacial de Raios-X



XMM-Newton



Chandra

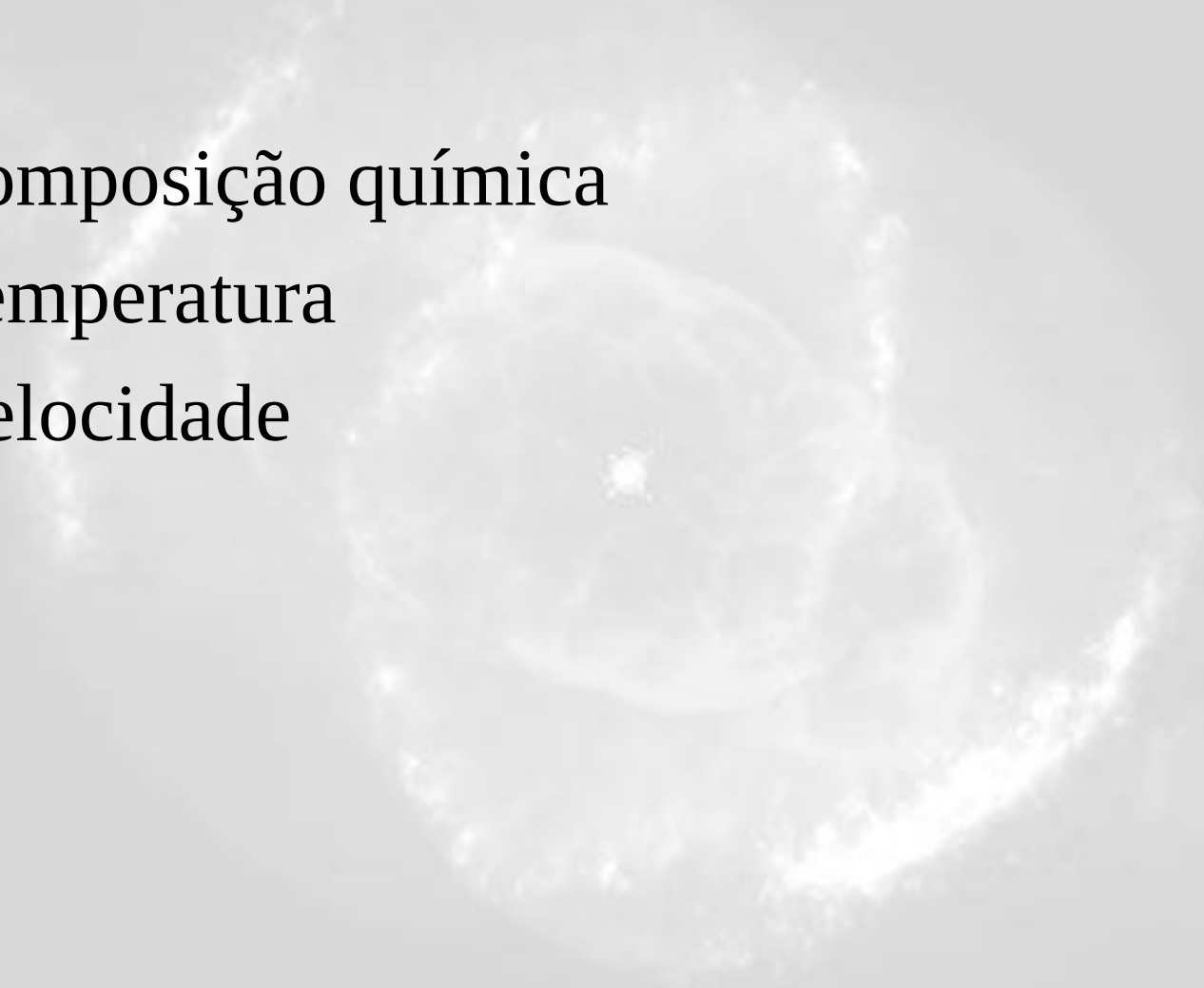
Astronomia Espacial de Raios Gama



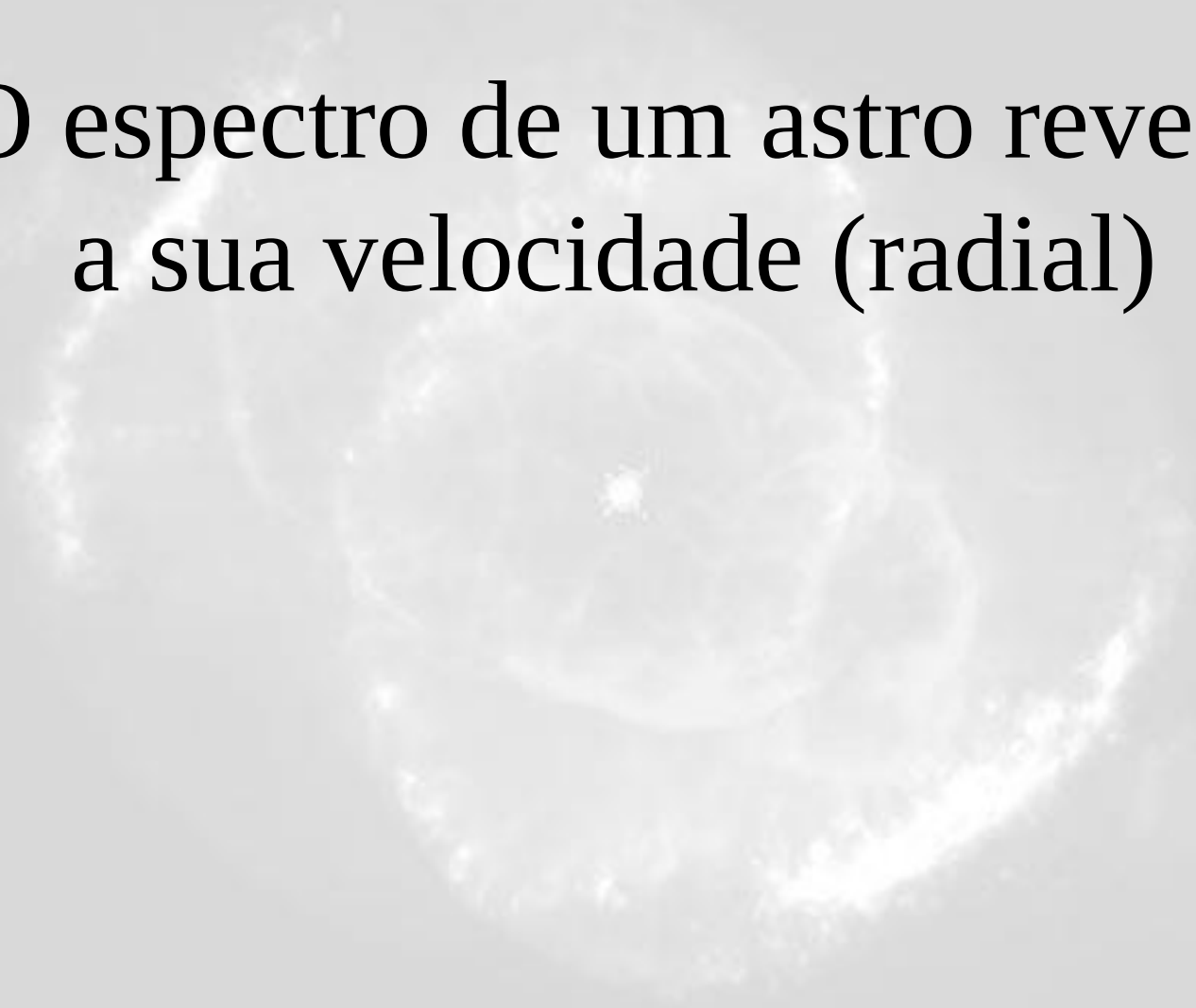
Fermi-GST

...o espectro permite revelar para os corpos astronômicos:

- Composição química
- Temperatura
- Velocidade



O espectro de um astro revela
a sua velocidade (radial)



Efeito Doppler



• 1842 - Efeito Doppler

$$z = \frac{\text{desvio para o vermelho}}{\text{velocidade da fonte}} = \frac{\text{velocidade da fonte}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{ref fonte}}}{\lambda_{\text{ref fonte}}}$$

$C = 300\,000 \text{ km/seg}$

Válido para v muito menor que c

Christian Doppler

Efeito Doppler

Fonte emissora desloca-se em relação ao observador.

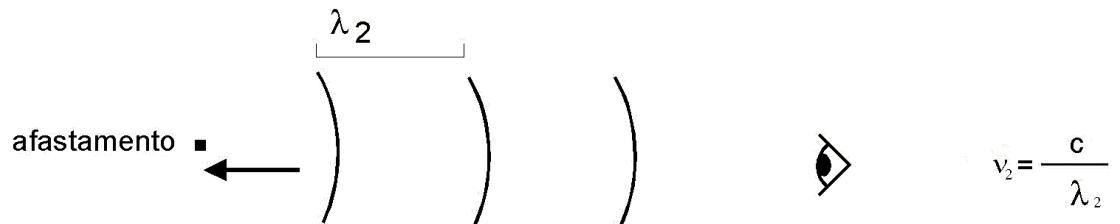
Fonte em repouso,
emitindo luz a um
comprimento de onda λ_0 .



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

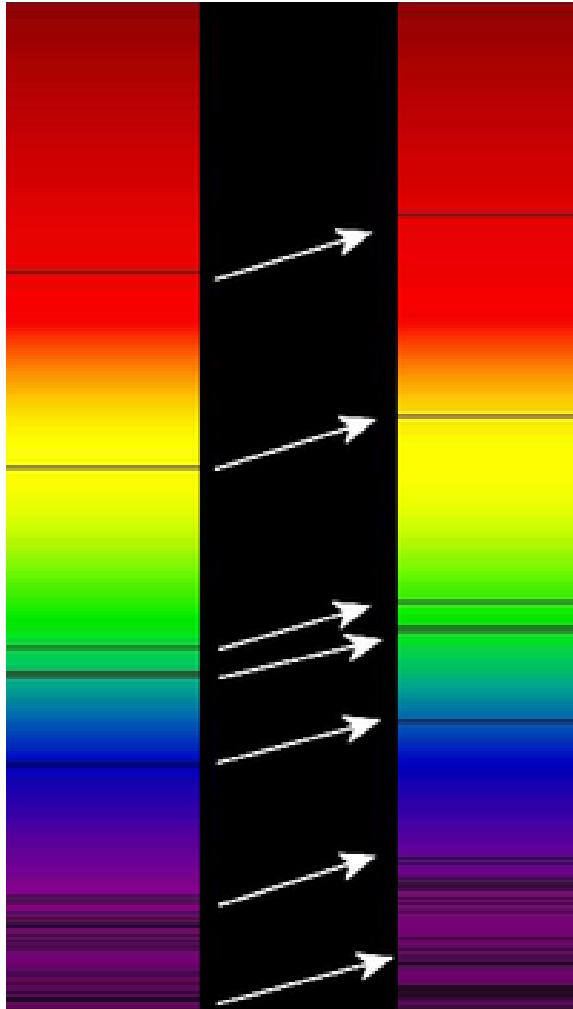


Fonte afasta-se:
comprimento de onda
observado será maior
($\lambda_2 > \lambda_0$).



Para velocidades não-relativísticas (fonte com $v \ll c$)

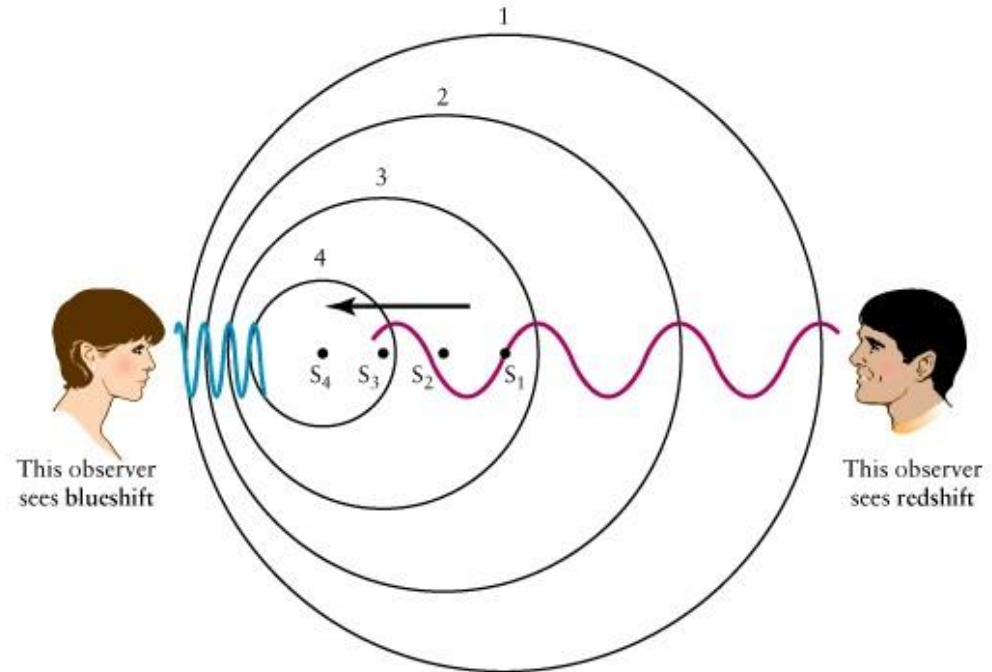
repouso afastamento



$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left(\frac{v}{c} \right)$$

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

redshift (desvio para o vermelho*)
* “vermelho”=longos comprimentos de onda



Efeito Doppler relativístico

(quando $v \ll c$ NÃO é válido)

A Teoria da Relatividade Restrita fornece a expressão exata para o efeito Doppler para velocidade v , quando v está ao longo da linha de visada:

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

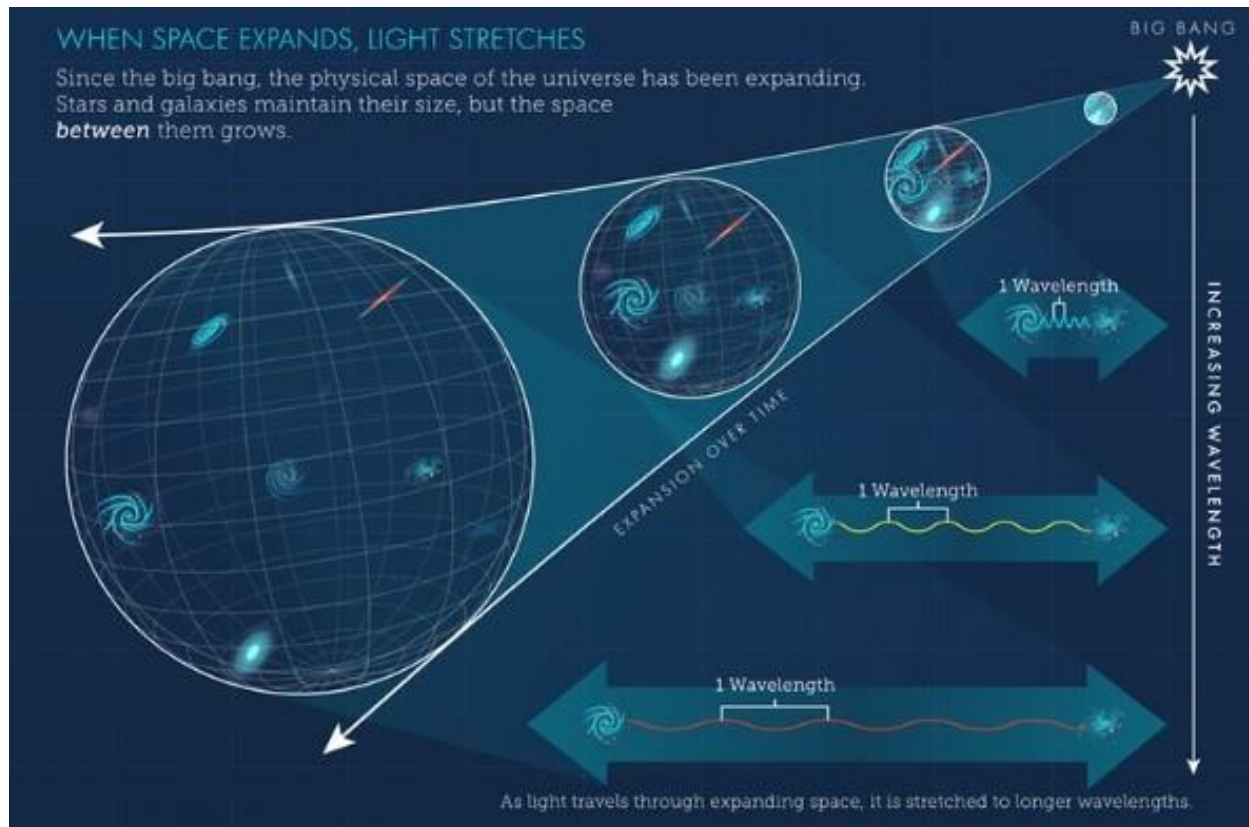
$z = 1 \Rightarrow v = 3/5 c = 0.6 c$ (60% da velocidade da luz)
e NÃO que $v=c$!!!

Efeito Doppler cosmológico

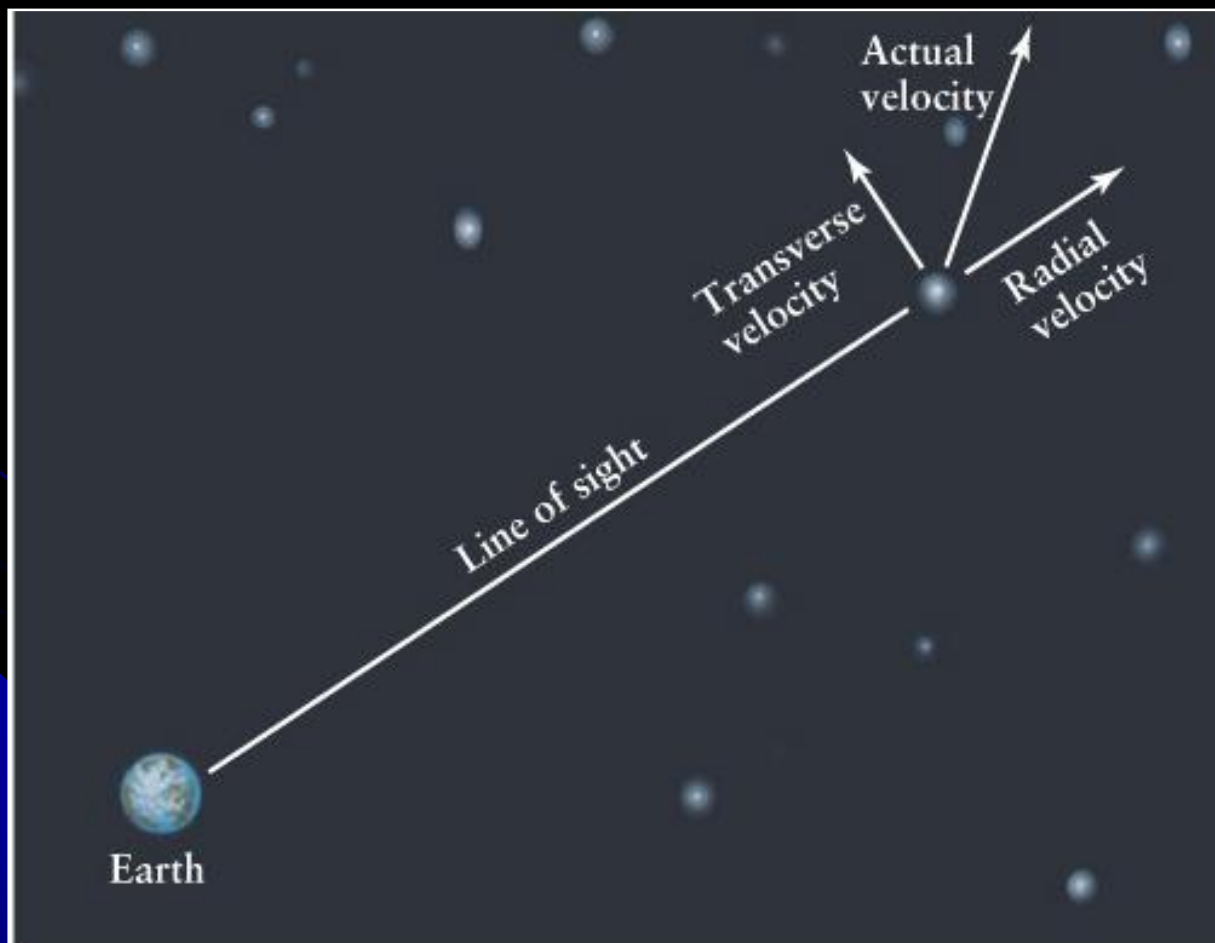
Pelas equações cosmológicas da *Teoria da Relatividade Geral*, as frentes de onda da luz acompanham a expansão do Universo, e o redshift dá o fator de expansão do Universo desde o tempo de emissão da luz t_e até o tempo atual t_0

$$\frac{R(t_0)}{R(t_e)} = (1 + z)$$

$z = 1 \Rightarrow$ o Universo se expandiu um fator $(1+z) = 2$ desde a emissão da luz



O efeito Doppler nos informa apenas sobre a parte radial do movimento do objeto em relação a nós (ou em aproximação ou em afastamento)



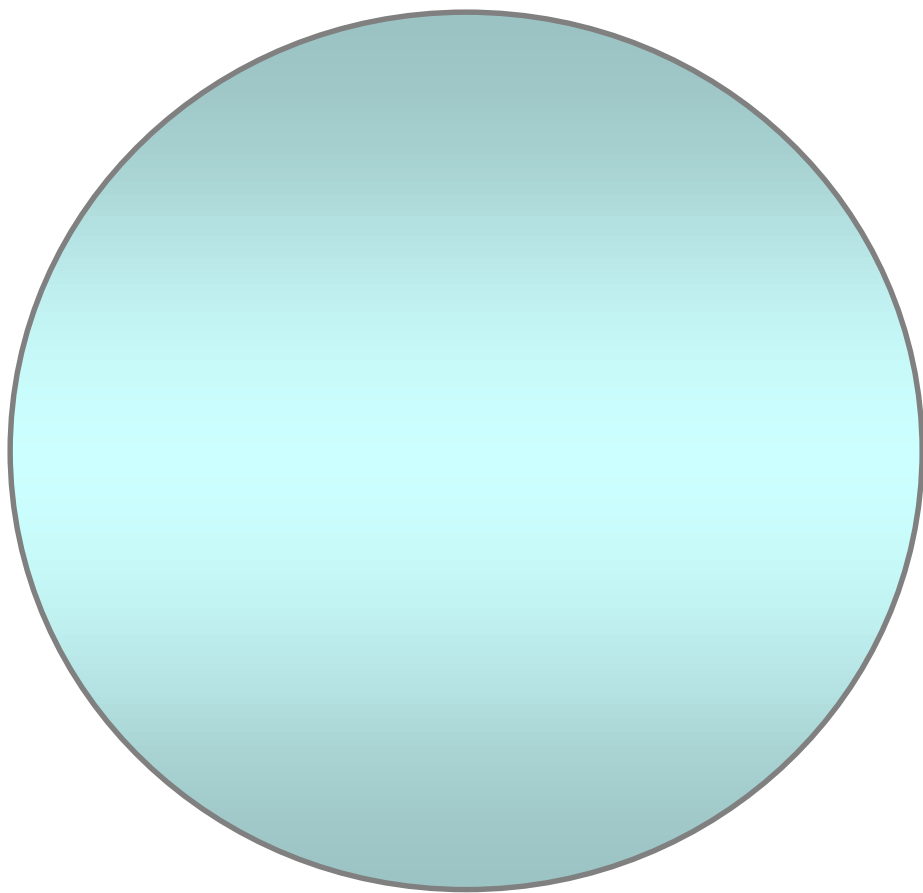
Luminosidade x Fluxo



Estudo da Esfera

Área do círculo = πr^2

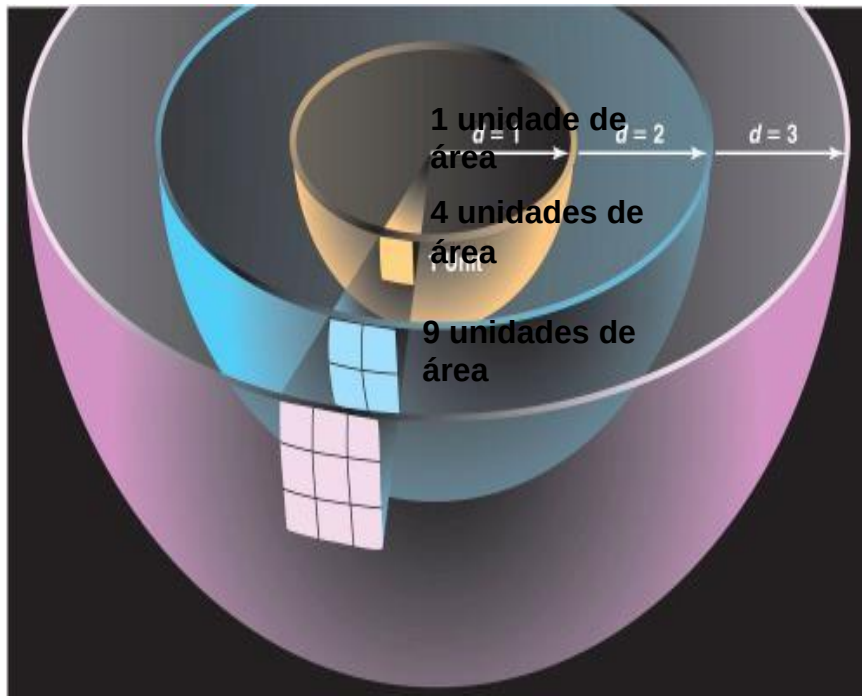
Área da esfera = $4 \pi r^2$



Luminosidade e Fluxo

A radiação produzida pela fonte emissora se propaga no espaço em todas as direções e a medida que se afasta da fonte, a **Luminosidade (L)**, medida em W, se distribui ao longo de uma área maior e assim é diluída.

A quantidade que chega até os telescópios e que é medida e depende da distância (d) da fonte e é o **Fluxo (F)**, medido em W m^{-2}



© 2007 Thomson Higher Education

Lei do Inverso do Quadrado da Distância

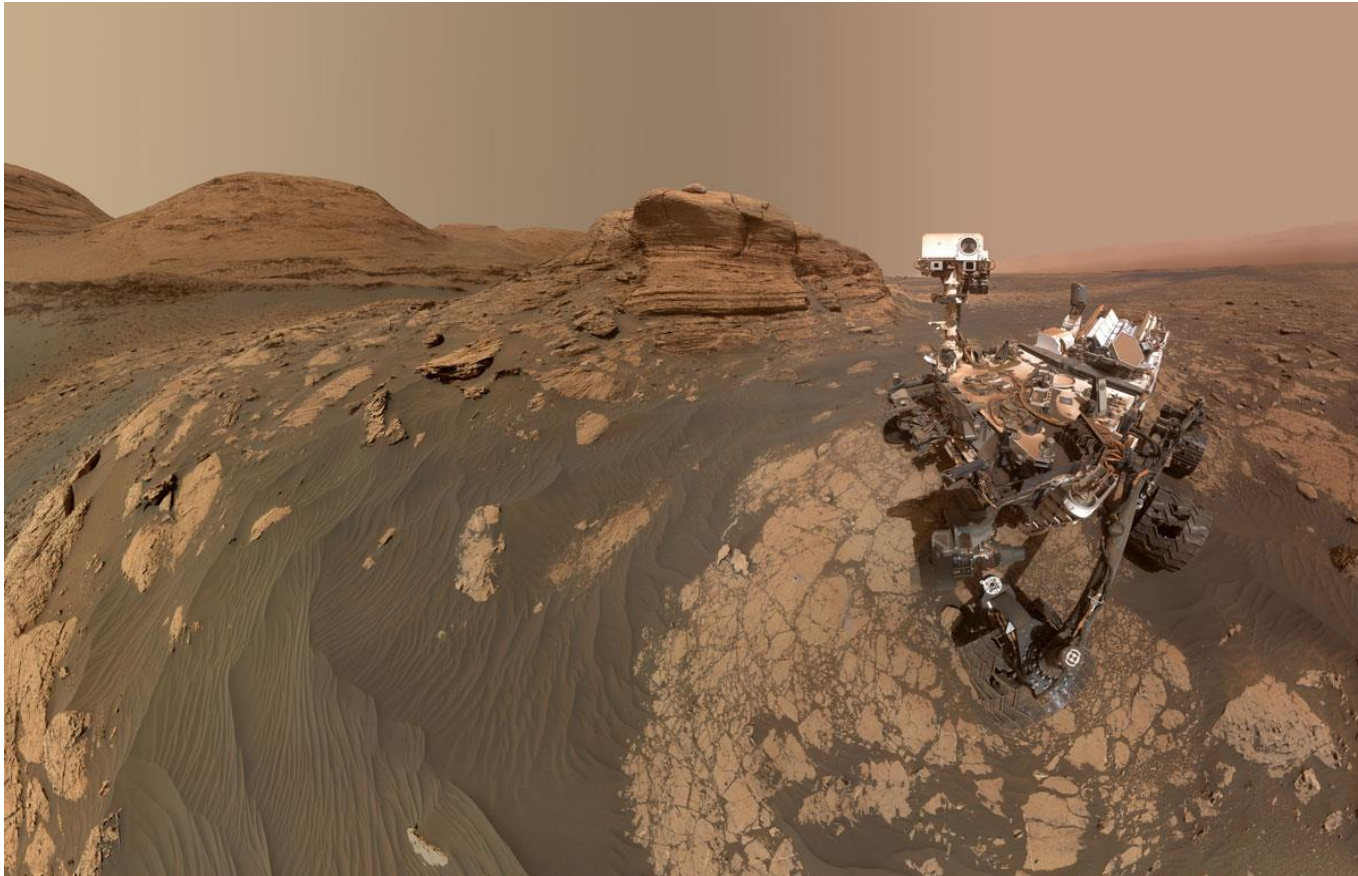
$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (\text{W m}^{-2})$$

Case: Fluxo solar na Terra e em Marte

$$F_{\text{Terra}} = F_0 = 1370 \text{ W/m}^2 \quad d_0 = d_{\text{Terra}} = 1 \text{ UA}$$

$$d_{\text{Marte}} = 1.52 \text{ UA}$$

$$F_{\text{Marte}} = F_0 (d_0/d_{\text{Marte}})^2 = 593.0 \text{ W/m}^2$$



Luminosidade (ou Potência) vs Fluxo (ou Brilho)

Luminosidade ou Potência (W ou ergs s⁻¹)

Grandeza intrínseca da fonte, e fornece a energia emitida em todas as direções por unidade de tempo = **potência emitida em unidades de Watts**.

É uma grandeza que não depende da distância

Brilho ou Fluxo – (W /cm² ou ergs s⁻¹ cm⁻²)

Grandeza observada e medida nos detetores de telescópios. Fornece a energia por unidade de tempo e por unidade de superfície.

É uma grandeza que depende da distância.

.

Escala de Magnitudes: quantificando o brilho de um astro

Hiparco (190-120 a.C.) classificou, **a olho nú**, o grau de intensidade luminosa (magnitude) de algumas estrelas, e **cria uma escala de comparação de brilho** das estrelas – uma escala de magnitudes, que era baseada na seguinte definição

As estrelas **mais brilhantes** , que aparecem no céu logo ao entardecer, são de **1ª magnitude**.
As estrelas **mais fracas** , que surgem quando o céu está bem escuro, são de **6ª magnitude**.

Modernamente, a escala de Hiparco ganhou uma forma logarítmica, a escala de magnitudes.

No século XIX, verificou-se que estrelas de 1ª magnitude (m_1) apresentavam cerca de 100 vezes o fluxo de estrelas de 2ª magnitude (m_2).

$$m_1=1, m_2=6 \rightarrow F_1/F_2=100$$

Pode-se converter a escala de fatores F_1/F_2 numa escala linear de magnitudes pelo **logaritmo**:

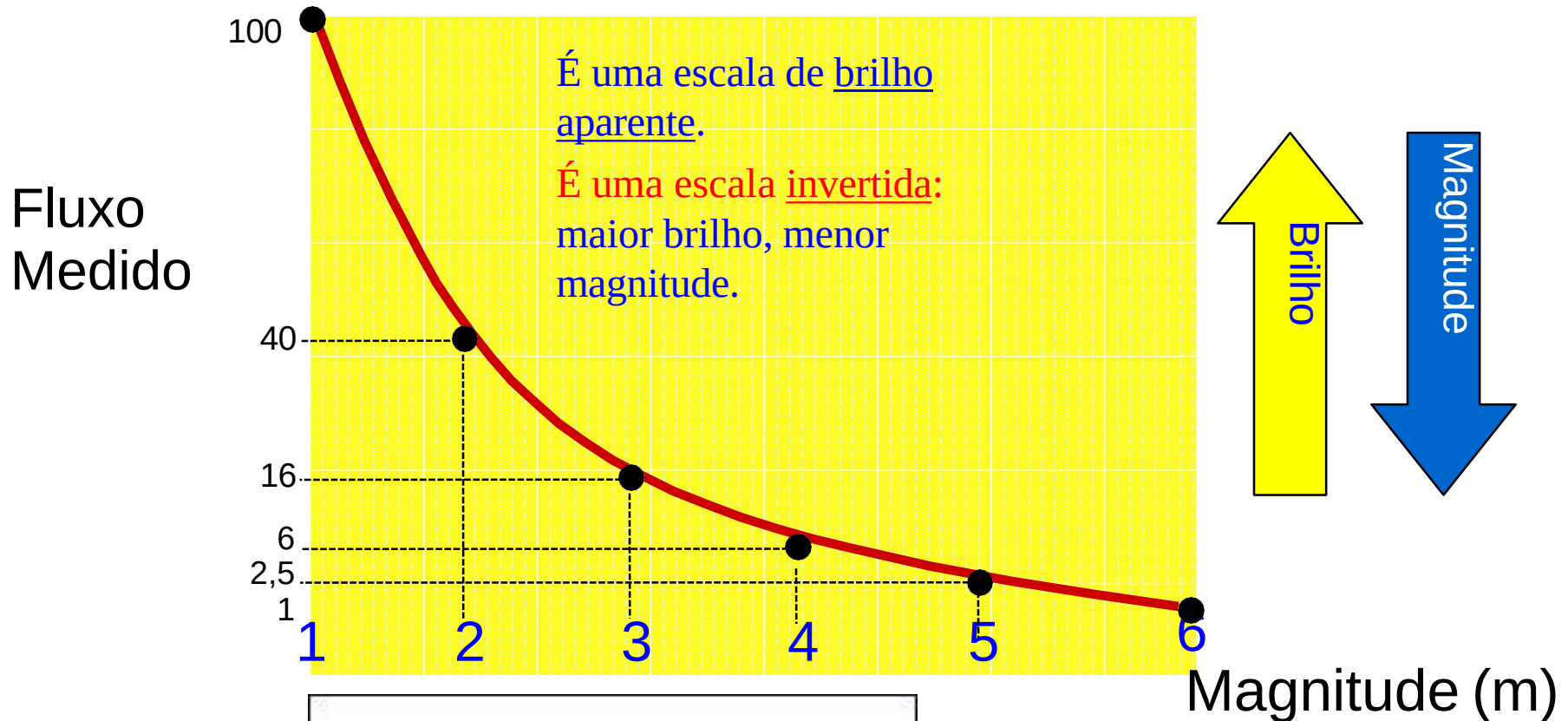
$$m=C \log(F) +c$$

$$m_1-m_2=C \log(F_1) -C \log(F_2) \Rightarrow m_1-m_2=C \log(F_1/F_2) \Rightarrow 1-6=C \log(100) \Rightarrow -5=2C \Rightarrow C= -2.5$$

$$m= -2.5 \log(F)+c$$

Magnitude Aparente – (m)

... o olho humano tem uma **resposta logarítmica** ao brilho.
A escala de magnitude usada hoje é descendente direta da escala de Hiparco.



$$m = -2.5 \log_{10} F + c$$

onde:

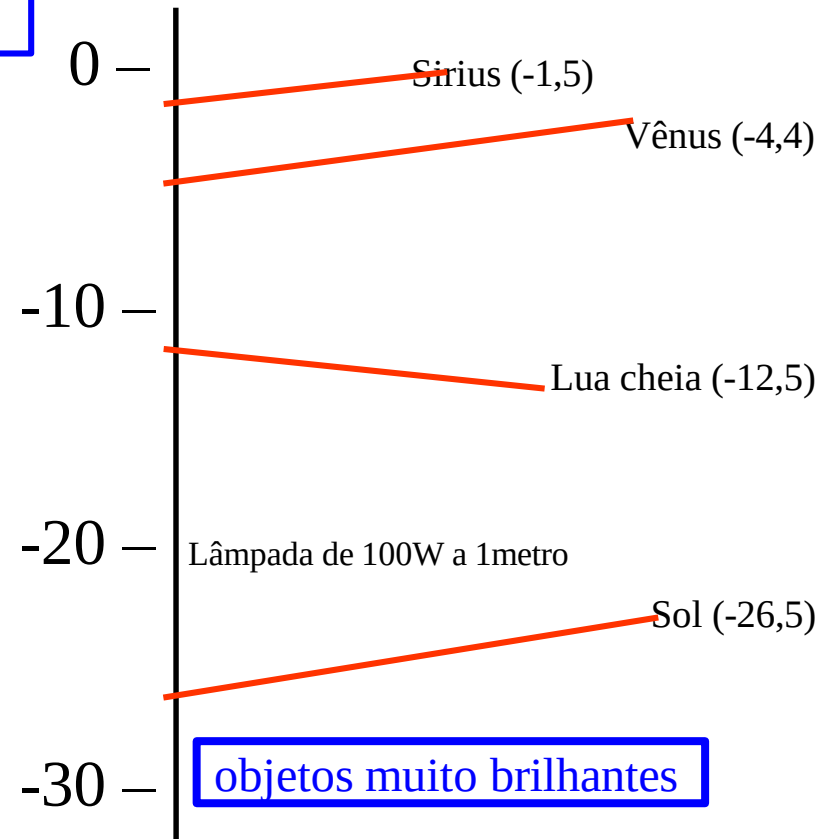
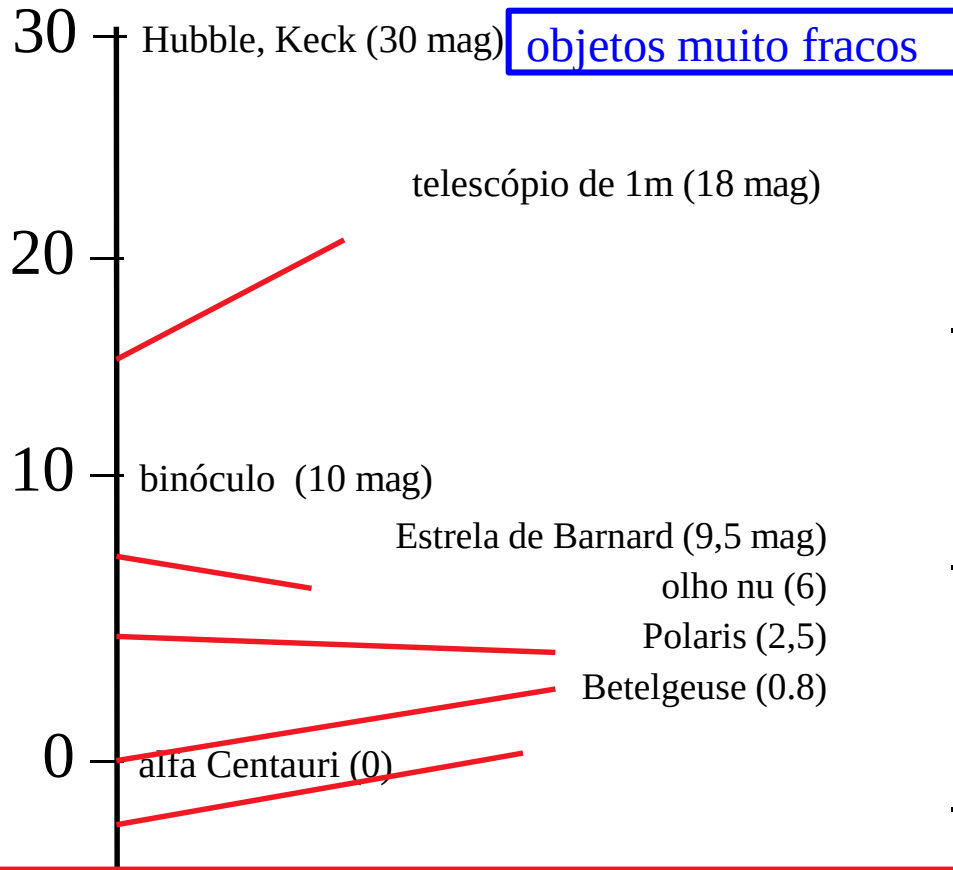
m = Magnitude aparente ou visual

F = Luminosidade recebida pelo fotômetro

C = Constante que define o zero na escala

O sinal negativo é para impor a relação inversa entre magnitude e brilho, ou seja, a magnitude aumenta quando o fluxo diminui.

Limites Inferior e Superior de Magnitude Aparente - (m)



Exemplos de magnitude correspondem ao brilho (fluxo) que observamos.

- Sol = $-26,75$ Lua cheia = -12 Vênus = $-4,4$
- Vega (α Lira) = 0 Sirius = $-1,6$ Plutão = $+15$
- lâmpada de 100 W a 1 metro de distância = -21
- limite do olho nu = $+6$
- limite de um telescópio de 1 metro = $+18$;
- limite do telescópio Hubble (2,5 m no espaço) e do Keck (10m) = 30

O objeto mais fraco observado hoje tem $m=31$ mag. É da ordem de 109 vezes mais fraco que a estrela mais fraca observada a olho nú

ATENÇÃO!

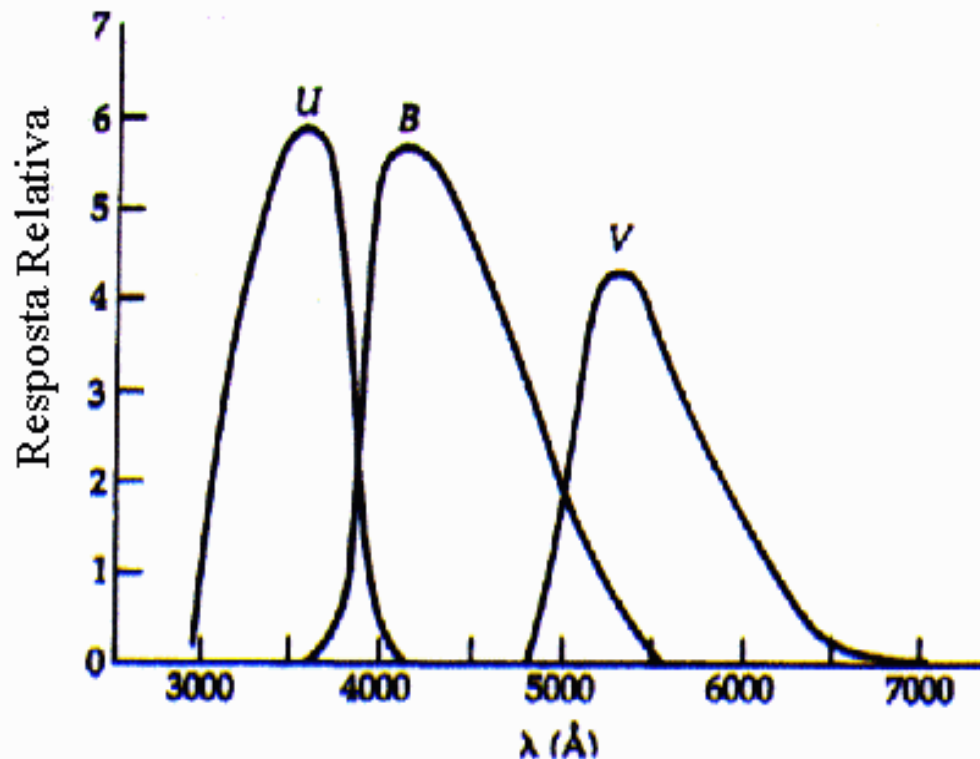
- A medida do fluxo (ou brilho) pode ser realizada através de técnicas de fotometria....
- O fluxo, é uma quantidade medida em telescópios, que depende da distância.
- O brilho ou fluxo dos astros é **expresso por um número** em termos de um **“Sistema de Magnitudes”**
- > Se conhecermos a distância, podemos determinar a luminosidade (L) a partir da magnitude aparente (m) ou do fluxo (F).
- O Sistema de Magnitudes moderno é baseado em observações fotométricas precisas, e segue a sensibilidade da visão humana, que é **logarítmica !**

Bandas Fotométricas

Filtros projetados para transmitir uma **faixa de frequências** (bandas) entre 2 intervalos de corte e que rejeita frequências fora desta banda definida. Filtram a luz de uma estrela (ou astro), deixando passar apenas bandas específicas do espectro eletromagnético.

Ex: Sistema fotométrico Johnson: bandas **U** ($= 3500 \text{ \AA}$), **B** ($= 4500 \text{ \AA}$) e **V** ($= 5500 \text{ \AA}$)

Definidas em função das magnitudes aparentes



U ($=m_u$), **B** ($=m_B$) e **V** ($=m_V$) representam as magnitudes aparentes (m_U , m_B , m_V) nas bandas do ultravioleta, azul e visível, respectivamente.

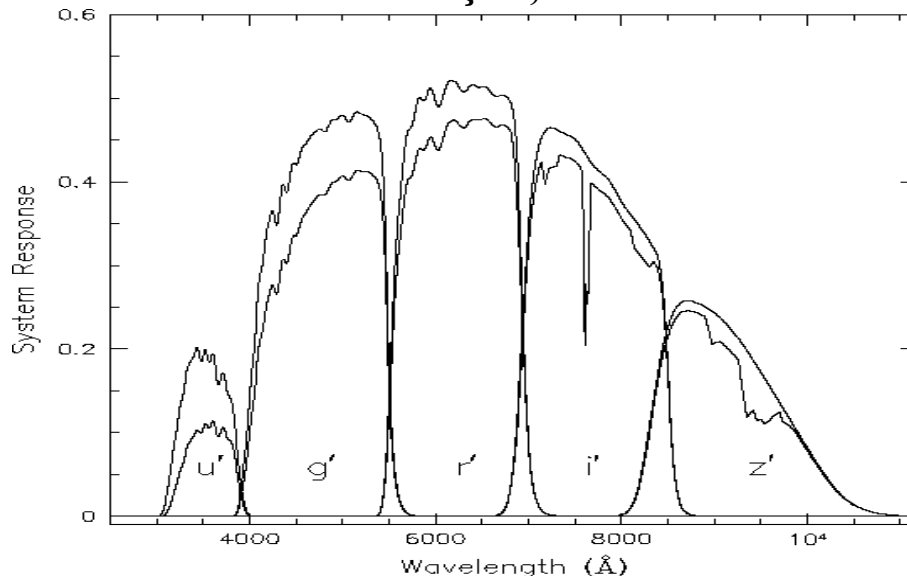
Os sistemas fotométricos também se estendem para outras faixas espectrais como o vermelho (R, I) e o infravermelho (J, H, K, L, M..)

Índice de Cor ou Cor

Índice de cor quantifica a **cor** de uma estrela usando medidas de magnitude em dois comprimentos de onda ou filtros: o filtro B, por exemplo, que só permite a passagem de luz no domínio azul do espectro e o filtro V, que transmite apenas a luz no domínio de comprimento de onda consistente com o verde-amarelo.

A diferença de magnitudes aparentes B-V, por exemplo, quantifica a importância relativa desses dois domínios do espectro para o fluxo total da estrela. Podemos usar também U-B, V-R, H-K, $g'-r'$, etc...

— → **Por convenção, fazemos: banda mais azul – banda mais vermelha**



Quanto maior o valor da cor, ou índice de cor, diz-se que o objeto é mais vermelho (no jargão astronômico, mais “vermelho” significa maior emissão em comprimentos de onda maiores)