

Evolução da Astronomia Moderna - 2

Efeito Doppler

Dualidade Onda-Partícula

Radiação Contínua

Nascimento da Física Quântica

IAGUSP

Sandra dos Anjos

<http://astroweb.iag.usp.br/~aga210/>

Ondas Eletromagnéticas

...quando a fonte está em movimento as ondas eletromagnéticas se modificam

Christian Doppler, em 1842, e Hippolyte Fizeau, em 1848, explicam a **mudança de frequência** de uma onda quando a **fonte está em movimento** em relação ao observador.

Este fenômeno ocorre também com ondas mecânicas (som, p.ex.) e ondas eletromagnéticas (luz, p.ex.).



Christian Andreas Doppler
(1803 - 1853)



Hippolyte Fizeau
(1819 - 1896)

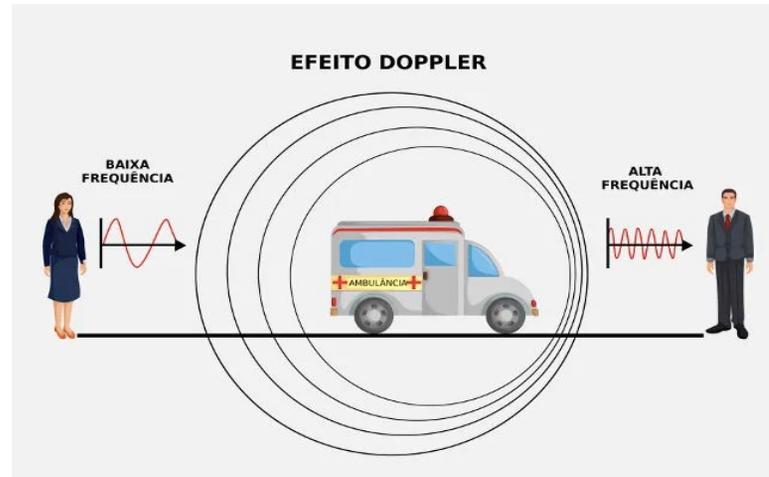
Exemplo cotidiano: sirene de um carro de polícia

Fonte se afasta

O som fica mais grave

Explicação:

Frequência (ν) diminui, comprimento de onda aumenta e como consequência o som fica mais grave.



Fonte se aproxima

O som fica mais agudo

Explicação:

Frequência (ν) aumenta, o comprimento de onda diminui e como consequência o som fica mais agudo.

Direção do movimento \longrightarrow

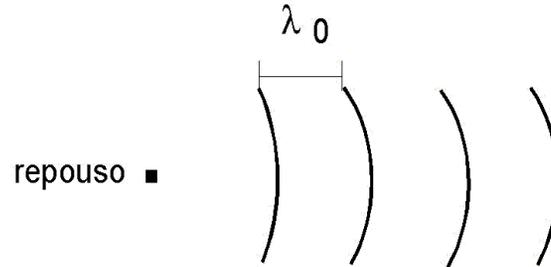
A equação $v = \lambda \cdot f$ é apresentada em um fundo de quadriculado. Acima da equação, um gráfico mostra uma onda senoidal com o eixo vertical rotulado "PRESSÃO" e o eixo horizontal rotulado "TEMPO". Abaixo da equação, setas apontam para os símbolos: λ (Comprimento de onda), v (Velocidade de onda) e f (Frequência).

Efeito Doppler

...vai ocorrer uma mudança na frequência e no comprimento de onda quando a fonte está em movimento....

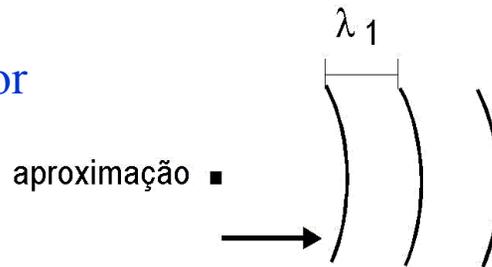
...Lembrando que: $c = \lambda v$

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



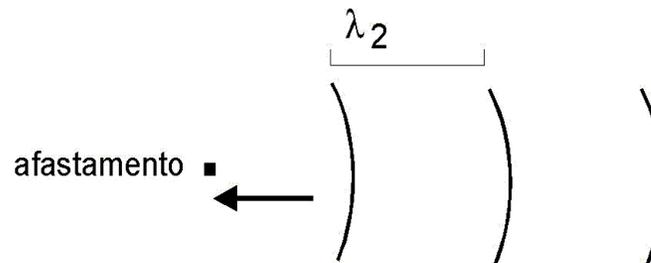
$$v_0 = \frac{c}{\lambda_0}$$

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



$$v_1 = \frac{c}{\lambda_1}$$

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



$$v_2 = \frac{c}{\lambda_2}$$

Uma curiosidade: **ouvindo** o Efeito Doppler

A compositora norte-americana **Adrienne Albert**, nascida em 1941, escreveu uma peça intitulada "Efeito Doppler", e conta como lhe surgiu a ideia: "A ideia de escrever uma peça, baseada nas constatações de um matemático austríaco que observou o aumento e a diminuição da altura do som quando a fonte e o observador se aproximavam ou se afastavam, surgiu-me durante uma viagem a Itália, ao ouvir as miríades de sirenes passando pelo meio de um trânsito tão intenso .

Doppler Effect

for Flute, Bassoon and Harp

♩ = 120
Con moto, A Roman Holiday
ADRIENNE ALBERT
Revised 07.06.2010

melody

Bassoon

6

12

17

https://www.youtube.com/watch?v=xqP_wYjCY_M

Efeito Doppler

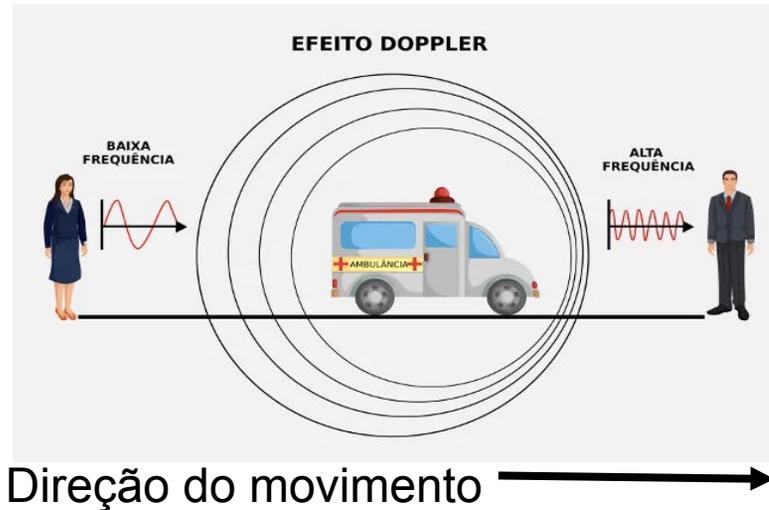
É a mudança na frequência ou no comprimento de onda, devido ao **movimento relativo** entre a **fonte** (λ_{obs} - **medido**) e o “**observador**” (λ_0 - **em repouso**, linhas de biblioteca ou de laboratório). Fenômeno que ocorre com o **som e a luz**

Fonte se afasta

Frequência (ν) **diminui**, comprimento de onda aumenta e como consequência o som fica mais grave.

No caso da luz ela ficaria mais vermelha

Sirene de um carro de polícia



Fonte se aproxima

Frequência (ν) **aumenta**, o comprimento de onda diminui e como consequência o som fica mais agudo.

No caso da luz, ficaria mais azul

A equação que permite obter a velocidade radial (v_r) é dada por :

$$\frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$$

Se v_r é **positivo**, a fonte está se afastando, pois o comprimento de onda observado é maior que o de repouso.

Se o **sinal é negativo** a fonte está se aproximando e o comprimento de onda diminui.

Ver simulação em <http://astro.unl.edu/classaction/light.html>

Efeito Doppler

Este fenômeno também ocorre com a luz.....

Se uma **fonte luminosa está em movimento**, ocorre uma mudança na frequência ou no comprimento de onda, devido ao **movimento relativo** entre a **fonte** (λ_{obs} - medido) e o “**observador**” (λ_0 - em repouso)

Fonte se afasta

Frequência (ν) diminui, comprimento de onda aumenta e como consequência o som fica mais grave.

No caso da luz ela ficaria mais vermelha



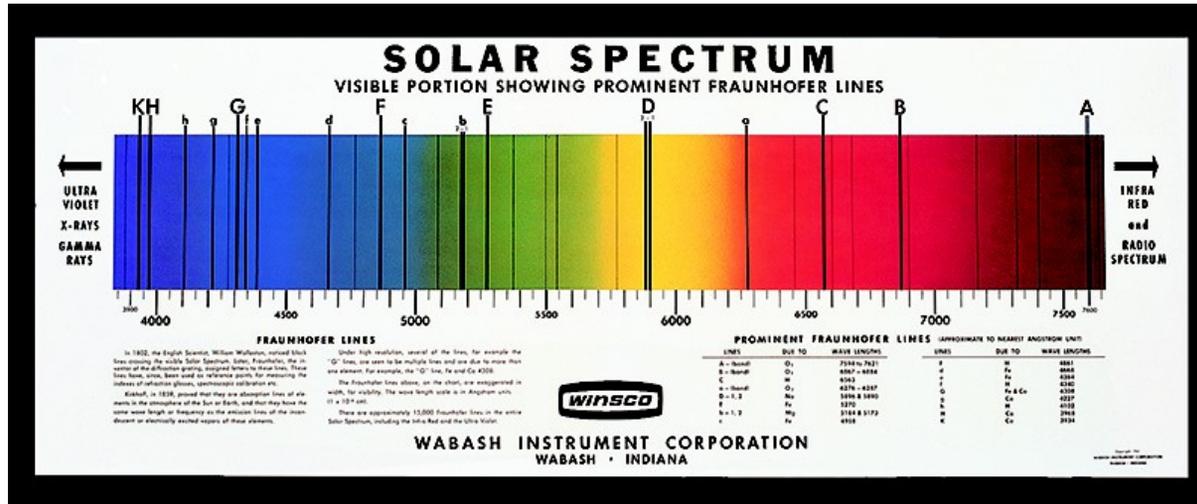
Fonte se aproxima

Frequência (ν) aumenta, o comprimento de onda diminui e como consequência o som fica mais agudo.

No caso da luz, ficaria mais azul



...e como identificar este fenômeno na Astrofísica?



Ⓐ Espectro da luz visível



Ⓑ Linhas de absorção



λ_0 - em repouso

Ⓒ Deslocamento para o vermelho



$(\lambda_{obs} > \lambda_0)$

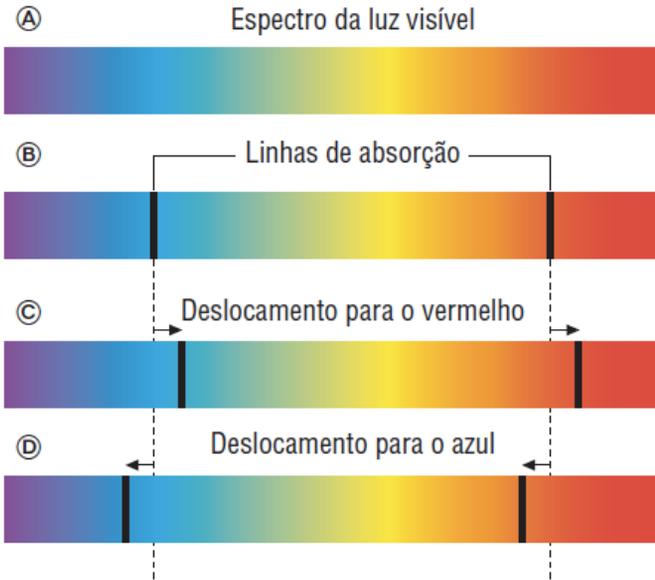
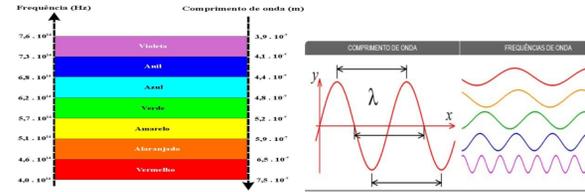
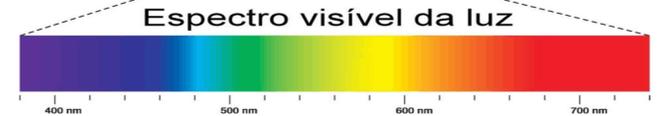
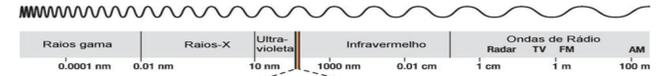
Ⓓ Deslocamento para o azul



$(\lambda_{obs} < \lambda_0)$

1. Uma abordagem histórica acerca do Espectro Eletromagnético:

1.1 - **Descoberta:** Durante muito tempo, a Luz visível era a única parte conhecida do espectro eletromagnético.



λ_0 - repouso

$(\lambda_{obs} > \lambda_0)$

$(\lambda_{obs} < \lambda_0)$

Quando a fonte de luz está parada as linhas escuras que se superpõem ao espectro contínuo se localizam em uma posição fixa e bem determinada, catalogadas e identificadas gerando o que chamamos de biblioteca de espectros. O Comprimento de Onda e, conseqüentemente, a Frequência das linhas escuras que aparecem são representadas em repouso - caso B

Se o **padrão de linhas** está deslocado para a região vermelha do espectro, a fonte está se **afastando**, por que o **comprimento de onda está aumentando** e a **frequência diminuindo em relação ao observador** - caso C - “red-shift”

Se o **padrão de linhas** está deslocado para a região azul do espectro, a fonte está se **aproximando**, por que o **comprimento de onda está diminuindo** e a **frequência aumentando** – caso D- “blue-shift”

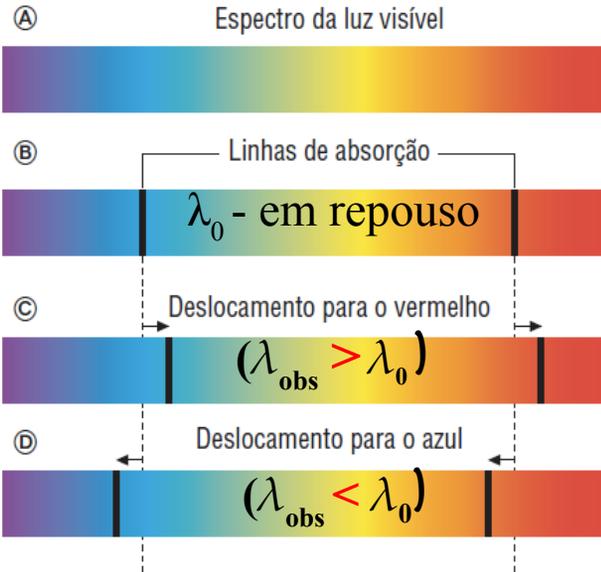


Interpretação

Fonte se afasta

Frequência (ν) diminui, comprimento de onda aumenta e como consequencia o som fica mais grave.

No caso da luz ela ficaria mais vermelha



Fonte se aproxima

Frequência (ν) aumenta, o comprimento de onda diminui e como consequencia o som fica mais agudo.

No caso da luz, ficaria mais azul

Este fenômeno permite obter a velocidade radial (v_r), dada pela equação a seguir e, por definição, o “redshift”(desvio para o vermelho) é representado por “z”

Se v_r é + \rightarrow fonte se afastando, pois $(\lambda_{obs} > \lambda_0)$

Se v_r é - \rightarrow fonte se aproximando, pois $(\lambda_{obs} < \lambda_0)$

$$\frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c} = z$$

Ex: um $z = 0,3$ significa um afastamento com 30% da velocidade da luz, ou seja, 90 000 km/s.

Mas a luz também tem propriedades de **partícula...**

Esta visão se desenvolve no início do século XX, dentro do Cenário de Construção da Física Quântica...

Como chegou-se a esta conclusão?

...a partir de alguns **experimentos que mostram as propriedades da radiação como partícula...vamos ver ->**

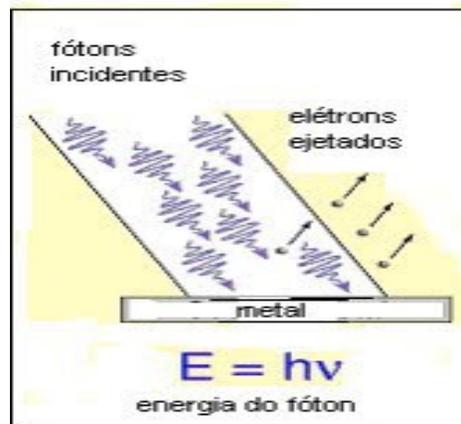
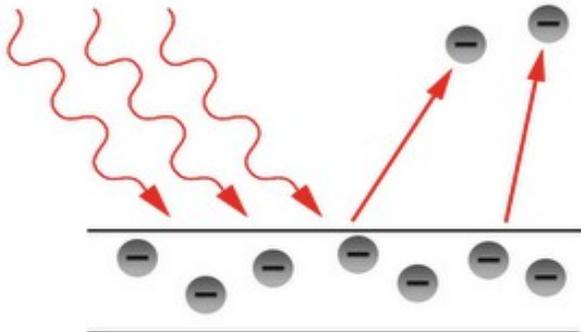
Experimentos que mostram o **comportamento da radiação como partícula**

Efeito Fotoelétrico (1905) - Einstein publica artigo intitulado: “Sobre um ponto de vista heurístico da criação e da conversão da luz” e, em 1924 ganha Prêmio Nobel de Física por este trabalho.

Mostra neste **experimento** que uma placa metálica ao ser incidida com feixe de luz provoca a expulsão de elétrons....

Influenciado pelas idéias de Planck (?!), interpreta que a energia que o fóton possui, ao ser transferida para a superfície, é convertida em energia cinética (eletron com velocidade) mais a função trabalho = energia utilizada para remover o elétron do átomo.

Fotons com energia (E) suficiente para arrancar os eletrons...



$$E_f = E_c + W$$

— Energia do fóton (J)
— Energia Cinética (J)
— Função Trabalho (J)

$$h \cdot \nu = \frac{mv^2}{2} + W$$

Depende só da frequência

Visão da Radiação como Partículas

Contém a hipótese do fóton: de que a luz se comporta como um gás de partículas livres chamadas Fótons, cada uma das quais carrega uma energia (E) igual a $E = h \cdot \nu$

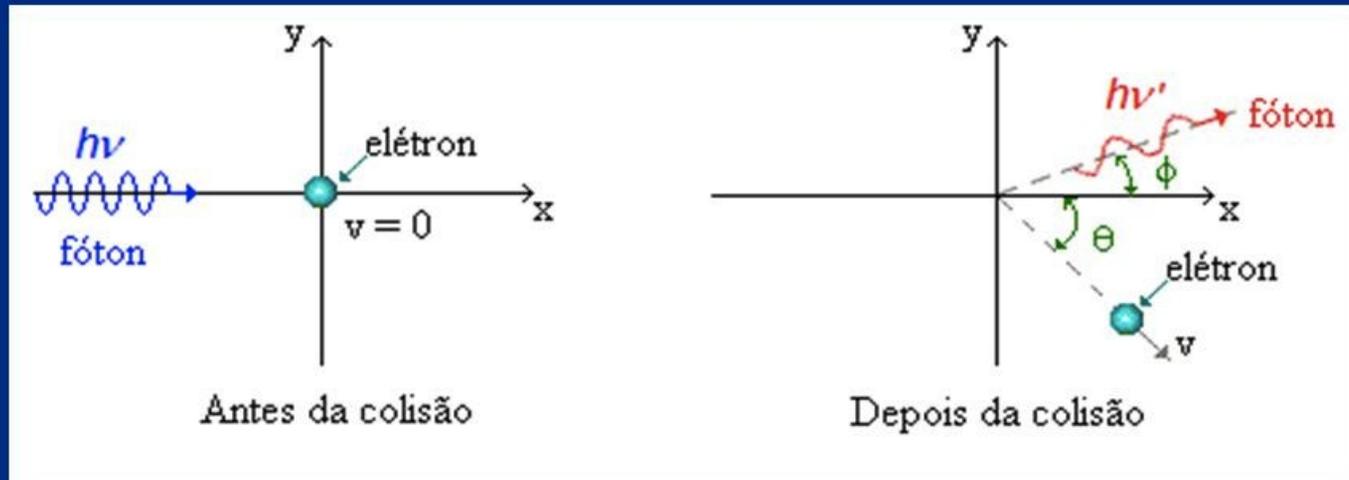
“Do ponto de vista histórico é neste artigo que nasce a **Teoria Quântica Moderna**, com a idéia de Campo Quântico, onde cada fragmento de matéria e energia é constituído por partículas, descritas por campos quantizados “ (Philip Anderson – em O legado Científico de Einstein, no livro “Os 100 anos da Teoria da Relatividade”.

Aceita que a luz também satisfaz as equações de onda de Maxwell, de onde surge a idéia de Dualidade Onda-Partícula....

Efeito Compton ou Espalhamento Compton

...outro experimento que mostra o comportamento da luz como partícula

- O **espalhamento Compton** acontece quando um fóton incidente **choca-se inelasticamente** com um elétron do átomo sendo espalhado possuindo energia **menor que a original**. A energia perdida é transferida para o elétron que é ejetado com ganho de **energia cinética**.



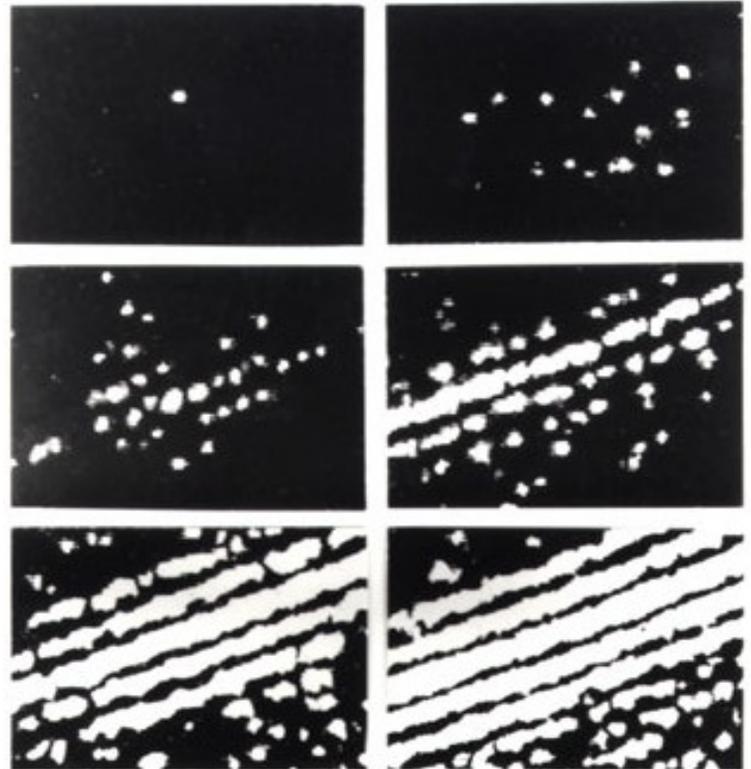
O caso do eletron...

...se a luz se comporta como partícula em certas situações, então o elétron também poderia se comportar como onda em certas situações..., como de fato se observa

- 1926, dualidade onda-partícula de Louis de Broglie (Prêmio Nobel).
- **Estende o caráter dual da luz para a matéria.**
- Elétrons, e outras partículas, se comportam como ondas.

Experiência de **interferência** com elétrons ao invés de luz, em 1976, feita pelo grupo de Bolonha, Itália.

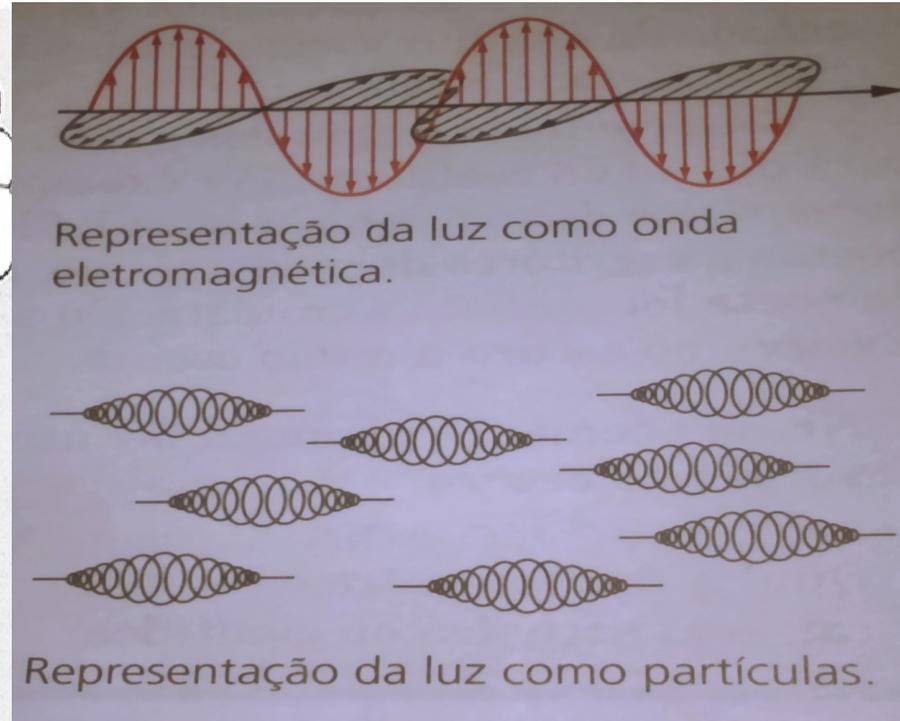
Um feixe de elétrons se comporta como um feixe de ondas, causando um padrão de interferência.



Dualidade Onda-Partícula

Pode viajar através do vácuo e carregar energia em discretas quantidades (pacotes de energia) chamadas “quanta”

Propriedades partícula-onda são combinadas no conceito moderno de “fóton” = “pacotes de ondas eletromagnéticas que tem energia fixada e viajam como partículas”



Fótons e Ondas Eletromagnéticas

...em síntese

As propriedades de onda-partícula são combinadas no conceito moderno de **fóton**.

Fótons podem ser interpretados como sendo pacotes de ondas eletromagnéticas que tem uma **energia fixada** e viaja como uma partícula.

Os campos elétrico e magnético em um fóton oscilam em fase, e em planos ortogonais um em relação ao outro

Energia (**E**) do fóton é proporcional à frequência (**ν**) da radiação eletromagnética ($E \propto \nu$) e pode ser obtida pela expressão abaixo, onde **h** é a constante de Planck:

$$E = h\nu, \text{ mas sabemos que } \nu = c/\lambda, \text{ portanto, } E = hc/\lambda$$

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

ou = $6,62607 \times 10^{-27}$ **erg** / segundo, e que **c** = 2.9979×10^8 m/s

Em Dezembro de 2015, no Ano Internacional da Luz, publica-se um artigo que [resume a história sobre o conceito do fóton](#) ao longo do século XX.

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 4, 4204 (2015)
www.sbfisica.org.br

No artigo intitulado “Uma nova luz sobre o conceito de fóton: para além de imagens esquizofrênicas” fica claro que não se sabe ainda qual a natureza dos fótons...

Revisitando o conceito de fóton no século XXI, Finkelstein ressaltou que os esforços não deveriam ser em busca da compreensão da natureza de um fóton, mas, sim, do que ele faz.

A sugestão é “definir o que os fótons são, se ainda desejar, pelo **o que eles fazem**”. Ou seja, o que deveria nos interessar é **o processo no qual o fóton faz parte**, e não o próprio objeto em si, uma vez que provavelmente nunca seremos capazes de visualizar um fóton.

[Assim sendo, conclui-se que a luz se comporta como onda quando se propaga, e como partícula quando interage com a matéria...](#)

Natureza da luz

....200 anos para responder a estas perguntas....

Experimentos realizados mostram evidências de natureza corpuscular e ondulatória

Thomas Young - 1801



Natureza ondulatória da Luz

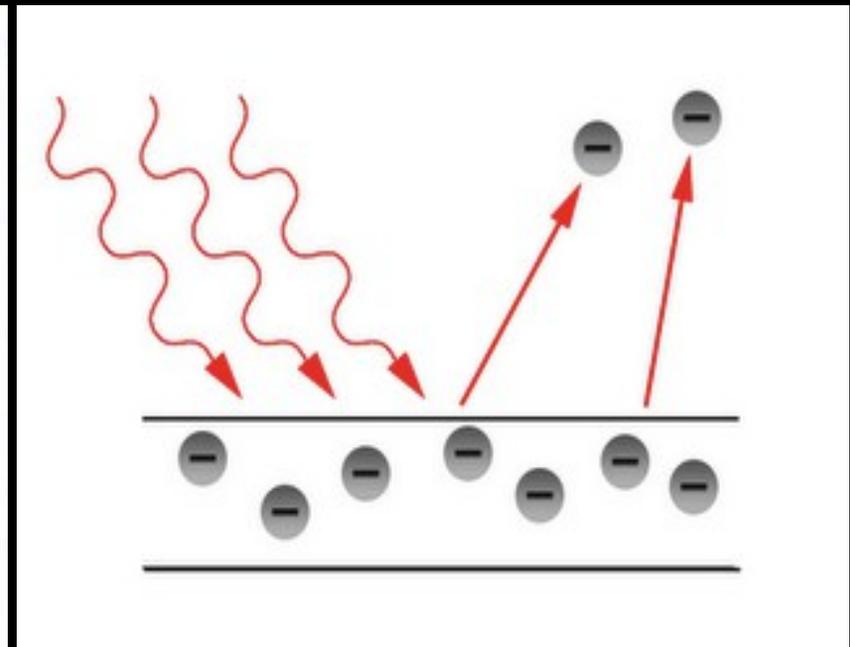
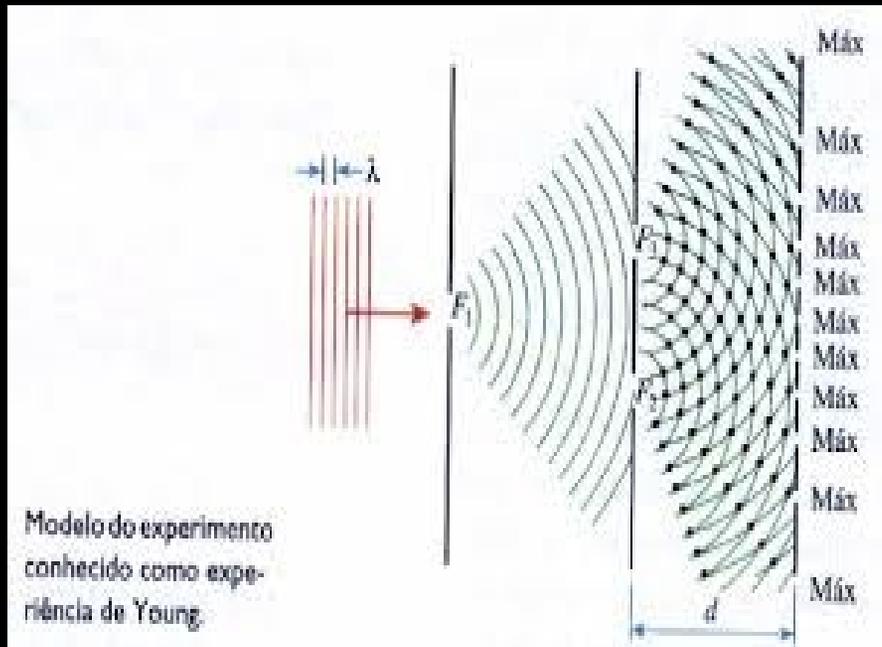
Efeito de Difração e Interferência da luz

Natureza da luz

Experimentos realizados mostram evidências de natureza corpuscular e ondulatória

Thomas Young - 1801

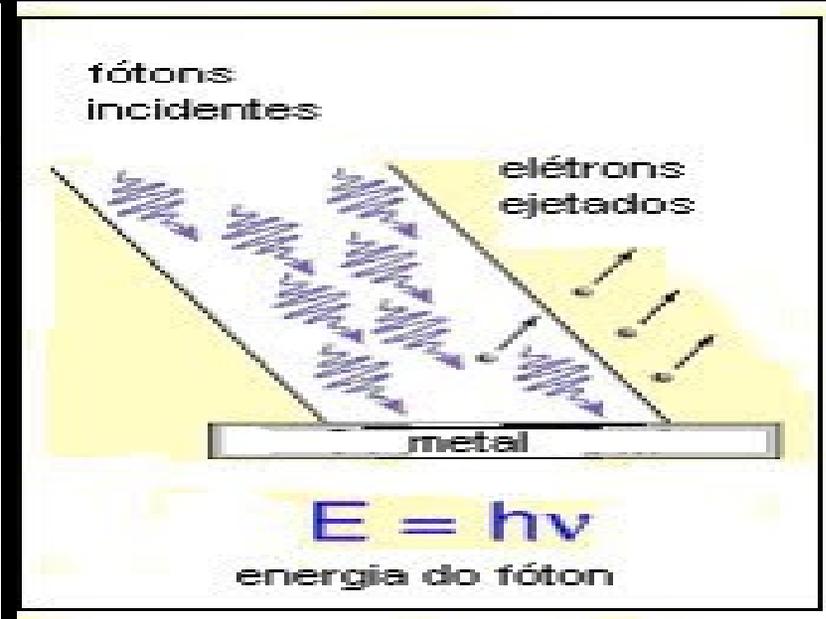
Einstein 1905



Difração e Interferência da luz

Efeito Fotoelétrico
verificado experimentalmente pelo físico americano Robert Millikan.

Conclusão: se comporta como **onda quando se propaga.....**e como **partícula quando interage com a matéria**



Louis de Broglie (Prêmio Nobel - 1926) mostra que o elétron também possui a **dualidade onda-partícula, estendendo o caráter dual da luz para a matéria.**

Elétrons, e outras partículas, se comportam como ondas.

Síntese

5 Propriedades Fundamentais das Ondas Eletromagnéticas

1. A luz que vem de uma fonte contém uma mistura de ondas com diferentes λ , ν , e diferentes direções de propagação...
2. Todas as ondas viajam a mesma **velocidade de propagação constante (c) no vácuo.**
3. A direção de propagação dos campos elétrico (E) e magnético (B), é **perpendicular um em relação ao outro.**
4. Direção da polarização é a mesma do campo elétrico (E).
5. Intensidade da onda depende da magnitude dos campos **B** e **E**.

Equações Básicas que relacionam as variáveis de uma onda eletromagnética

$$c = \lambda \nu \rightarrow \text{velocidade da luz}$$
$$\lambda = c/\nu \rightarrow \text{comprimento de onda}$$
$$\nu = c/\lambda \rightarrow \text{frequência}$$

$$\nu = \text{frequency}$$

Equação da energia de um fóton (partícula)

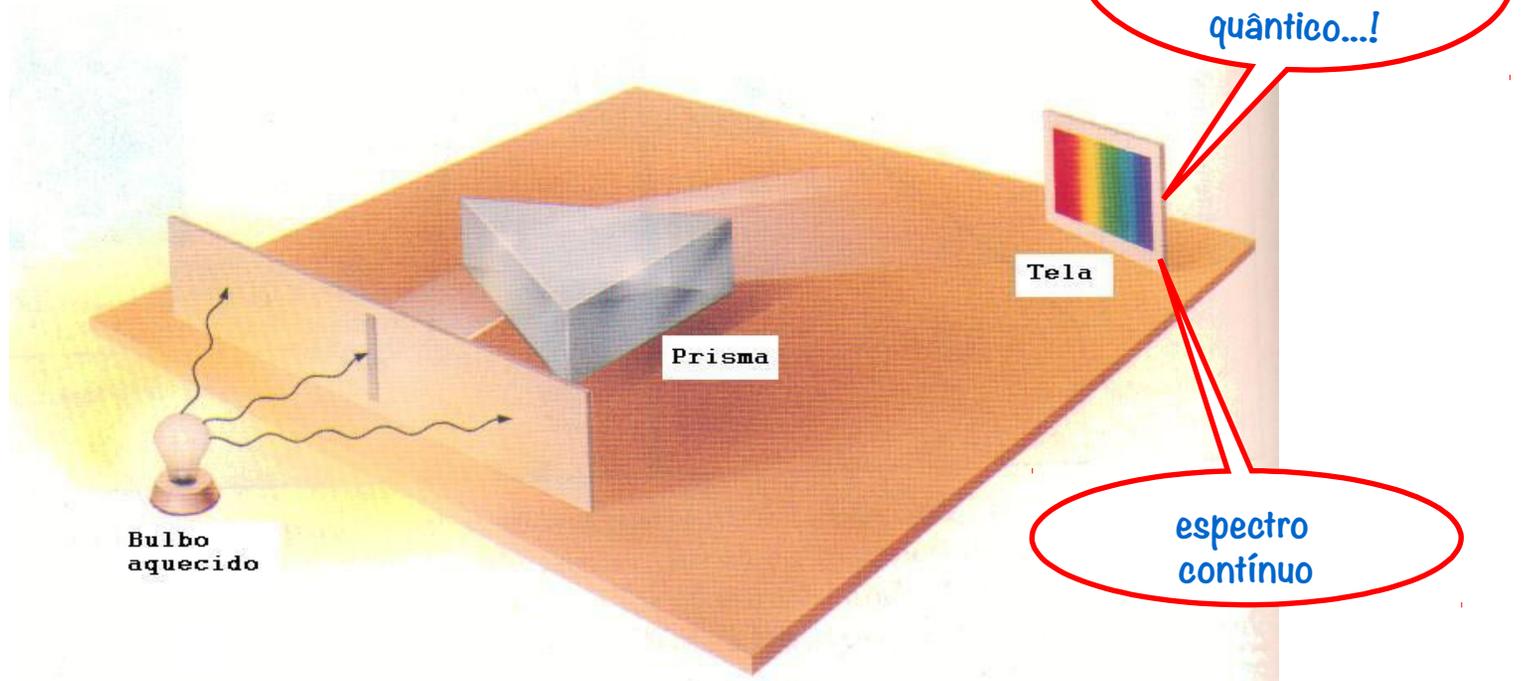
$$E = h\nu, \text{ mas } \nu = c/\lambda, \text{ então}$$
$$E = hc/\lambda, \text{ onde}$$

$$h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{ joule / segundo,}$$
$$= 6,62607 \times 10^{-27} \text{ erg / segundo, e}$$
$$c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Ainda restaria a explicação da natureza da formação do Arco-Iris... do que chamamos tecnicamente de Radiação Contínua

Restaria também encontrar uma expressão matemática que pudesse representar esta Radiação Contínua

Um Modelo para o Espectro Contínuo



Newton realizava experimentos que já mostravam que a luz branca ao passar por um prisma se decompõe nas cores do arco-íris, formando um **espectro contínuo**.

Como se forma este espectro contínuo? **Qual o modelo que explica este fenômeno?** Que tipo de **informação física** podemos obter a partir das cores?

Radiação de Corpo Negro ...ou radiação contínua, ou radiação térmica

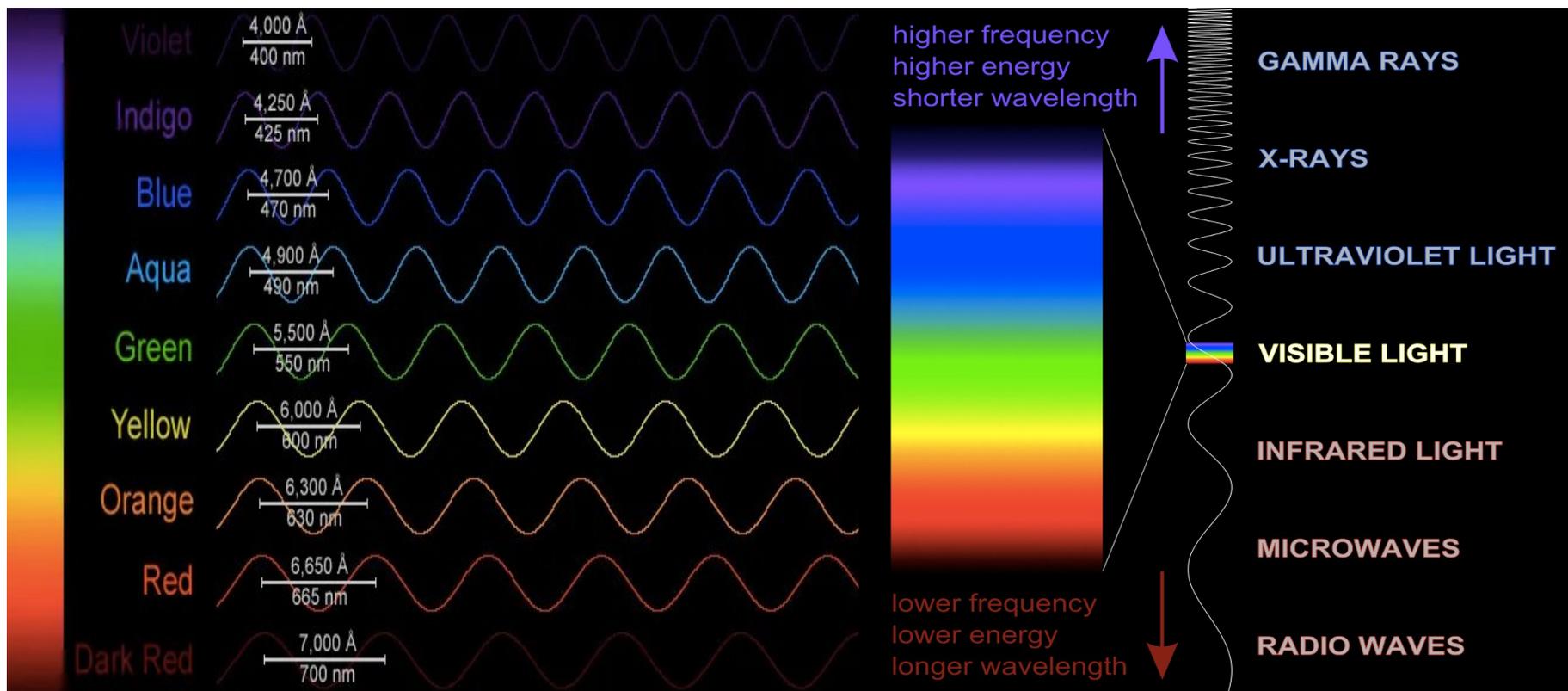


A correlação entre a **cor** da **luz emitida** por um **objeto quente** e sua **temperatura** foi observada pela 1ª vez em 1792, por **Thomas Wedgwood** (químico, ceramista) a partir de suas **observações em relação** a queima de cerâmica em um forno em sua fábrica.

A cor vermelha, por ex., sempre aparecia à mesma temperatura, independentemente do tamanho, forma e constituição do objeto.....

A explicação a este fato somente seria “entendida” no final do séc. XIX, com os estudos da radiação térmica por Kirchoff (1859), onde ele sugere o conceito teórico de **corpo negro**.

1800-1889: experimentos mostram que a luz se decompõem em outros comprimentos de onda (λ) além do visível, gerando o que chamamos de “Espectro Eletromagnético”



Experimentos mostram também que:

- 1- Qualquer objeto com temperatura **acima do zero absoluto** emite luz em todos os λ s, variando no grau de eficiência.
- 2- Existe uma correlação entre a **cor da luz** emitida por um objeto e sua **temperatura**

Corpo Negro Ideal

emitem radiação térmica na mesma medida que a absorve

Qualquer objeto constituído de matéria possui átomos e moléculas que **vibram** ou se **agitam** geram calor (ou energia térmica ou radiação térmica), e quando aceleradas, produzem radiação eletromagnética em vários comprimentos de onda.

Este estado de agitação de partículas, é definido como **Energia Cinética** (E_c), e o **valor médio da medida** deste estado de agitação define uma grandeza conhecida como **TEMPERATURA* (em Kelvin-K*)**.

Lembrem-se que vimos na aula anterior, que:

****Radiação** é o processo de transferência de energia através de ondas eletromagnéticas
...é consequência da oscilação dos campos elétrico e magnético gerada pelas cargas em movimento

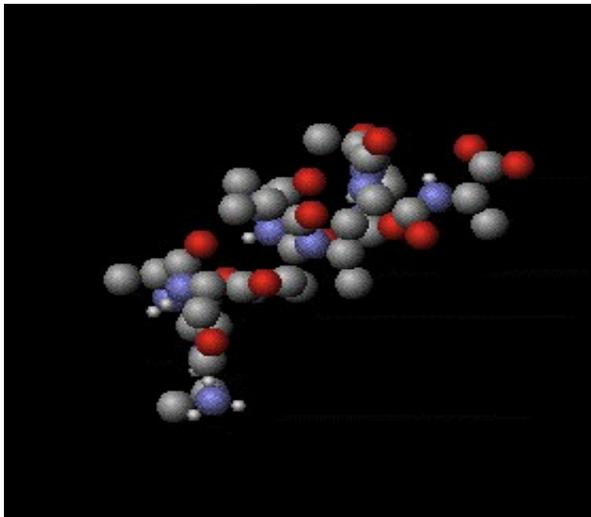
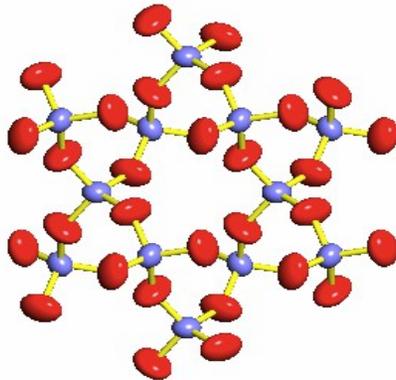
*Kelvin (K) é uma unidade de temperatura da base do Sistema Internacional de Unidades (SI).

Zero kelvin = 0 K -> zero absoluto, quando **param os movimentos moleculares.**

Conversão: $K = ^\circ C + 273,15$

Nas figuras abaixo se observa diferentes vibrações de átomos e moléculas nos corpos gerando calor

Quando acelerados, ocorre emissão de pacotes de fótons (ou radiação eletromagnética) com diferentes frequências.



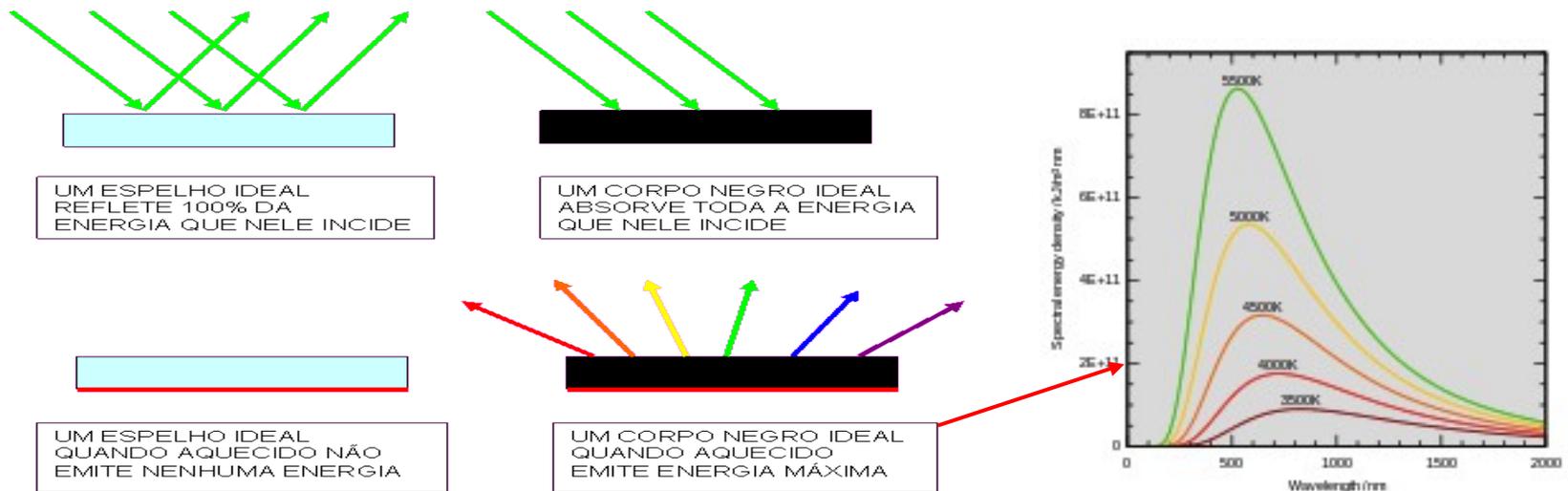
A **frequência média** dos fótons, define sua cor. Cuidado aqui....!

Corpo Negro

Estes experimentos levaram a introdução de um conceito de um **emissor ideal que seria um objeto que absorveria toda a luz incidente sobre ele e re-irradiaria toda esta energia.**

Como um **emissor ideal não REFLETE** luz ele aparece aos **nossos olhos como sendo negro, sem luz.** Define-se assim, um “**Corpo Negro**” ideal como sendo **aquele que, em equilíbrio termodinâmico (ET), emite radiação térmica na mesma medida que a absorve.**

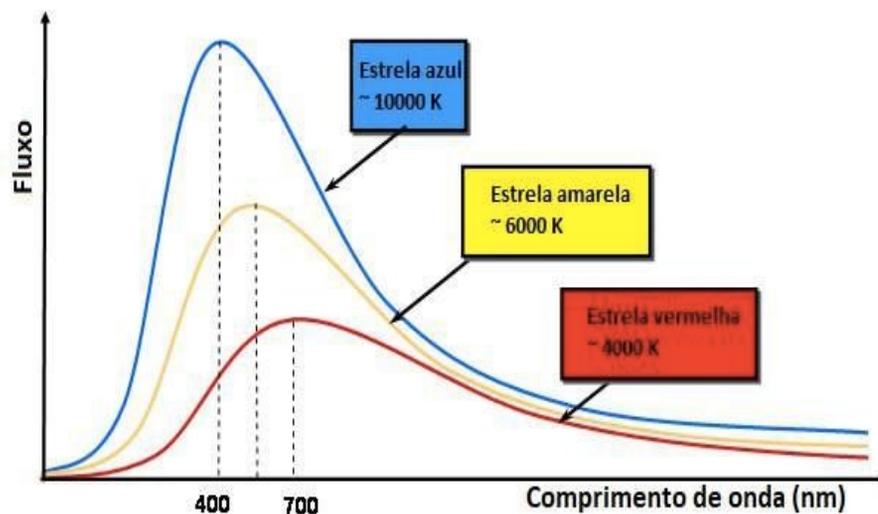
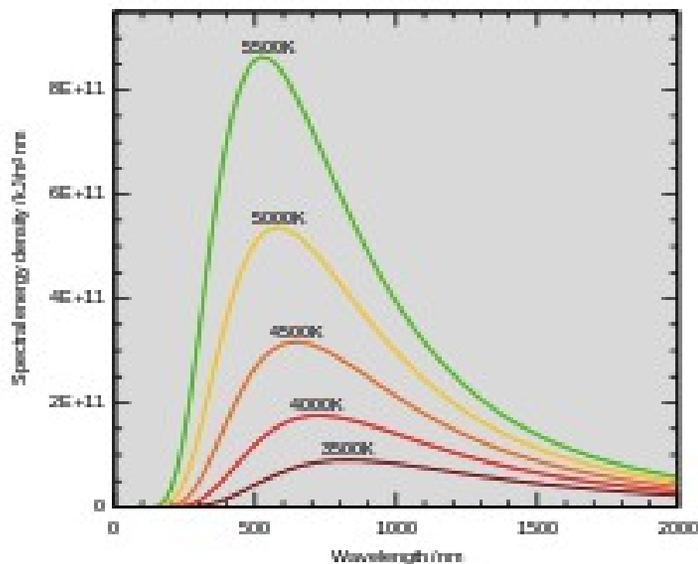
Um “**Corpo Negro**” ideal está em equilíbrio termodinâmico (ET) pois **emite radiação térmica na mesma medida que a absorve.** A radiação que ele emite é chamada de “**Emissão de Corpo Negro**”



A interpretação das diferentes Curvas de Corpo Negro (figs abaixo)...

Se a **temperatura** de um objeto aumenta, as vibrações também aumentam e o objeto emite mais energia por segundo, em **todos os Comprimentos de Onda**.

Quanto **maior a T** do Corpo Negro, **maior sua energia/segundo**, para todos os λ s. **Corpos Negros**, representados pelas curvas abaixo, de **mesma temperatura**, emitem radiação térmica com o **mesmo comportamento de espectro**.



Distribuição Espectral da Radiação de Corpo Negro em diferentes temperaturas (T), emitindo um “espectro contínuo” com energia em todos os comprimentos de onda.

Estrelas e planetas são Corpos Negros, em primeira aproximação...

Algumas considerações sobre “Corpo Negro” e “Radiação de Corpo Negro”

Dizemos que um **objeto é negro** se ele parece negro **na luz do dia**. Isto significa que o objeto não emite nenhum raio de luz que sensibilize nossos olhos

A luz que nossos olhos recebem a partir dos objetos que **não parecem negros na luz do dia** geralmente não é a luz que estes objetos emitem por conta própria, mas sim a **luz solar REFLETIDA** por estes objetos.

A luz solar aparece amarela para nós, mas a maioria dos objetos na Terra não aparecem amarelos apesar de nós vermos apenas a luz solar refletida por eles.

A razão disto é que qualquer objeto absorve parte da luz solar e apenas a parte que não é absorvida pode ser **refletida**.

Então...se um objeto **absorve** apenas luz azul, ele vai parecer a quem observa mais vermelho que o Sol. Se **absorve** mais vermelho, vai parecer mais azul...e assim por diante!

Se todos os comprimentos de onda forem fortemente absorvidos, então não vai sobrar luz a ser refletida para nossos olhos, e aí o objeto passa a ser negro !! O Corpo negro !!

Isto significa que todo Corpo Negro vai sempre parecer negro...?

Não....!

Um Corpo Negro pode gerar radiação por ele próprio, podendo ser bastante brilhante, embora absorva toda a luz que recebe de outras fontes de luz...

Exemplo:

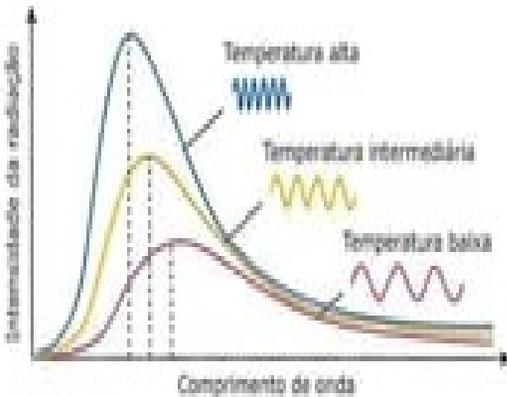
Uma placa quente sobre um **fogão apagado** esta vai parecer negra.

Se o fogão for ligado, a placa esquentará e vai emitir sua própria luz, vai brilhar intensamente, e a **placa não parecerá mais negro**, mesmo “desligando” todas as fontes de luz externas.

Se aumentarmos gradativamente a temperatura, o brilho vai mudando de cor, passando de vermelho a amarelo e azul quando a temperatura for muito alta.

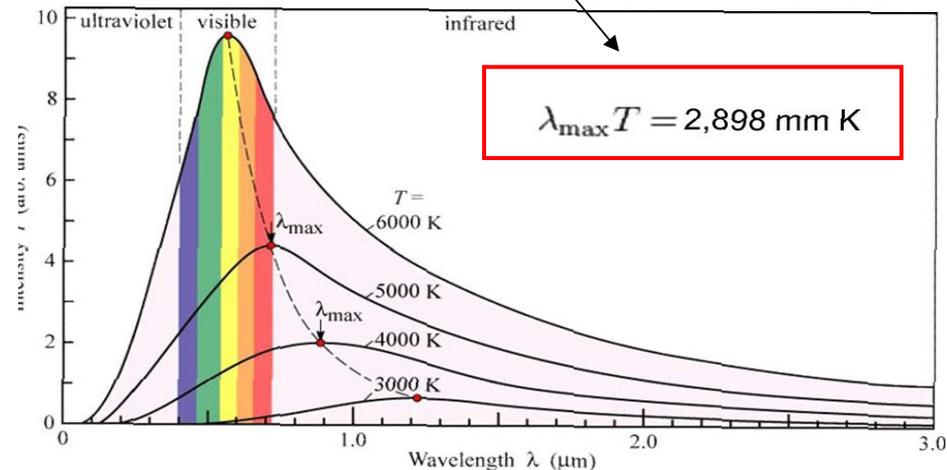
Propriedades da Radiação Térmica

Lei de Wien: O comprimento de onda do pico de intensidade (λ_{\max}) de uma fonte é inversamente proporcional a temperatura superficial (T_s) da fonte



O máximo do gráfico depende da temperatura da cavidade

As curvas obtidas tem sempre a mesma forma, independente do material que constitui a cavidade

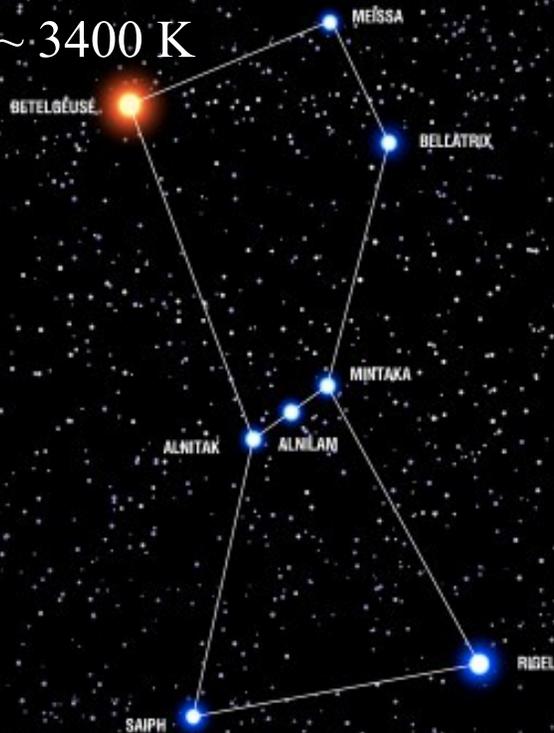


...ou Lei do deslocamento de Wien

Quanto maior é a Temperatura (T_s) do Corpo Negro, menor é o λ_{\max} , se deslocando para **comprimentos de onda menores** → maior sua energia/segundo, para todos os λ 's

As diferentes cores observadas nas estrelas **Rigel** e **Betelgeuse** na Constelação de Orion, por exemplo, refletem a diferença entre a temperatura superficial destas 2 estrelas

$T \sim 3400 \text{ K}$

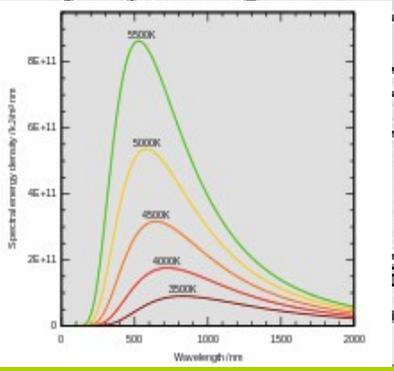


ORION CONSTELLATION

$T \sim 10100 \text{ K}$

Handwritten mathematical notes and diagrams surrounding the central figure:

- $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$
- $y = \cos x$
- $(\frac{a}{b})^n = \frac{a^n}{b^n}$
- $\Delta = b^2 - 4ac$
- $A = \pi r^2$
- $V_k = h!$
- $F = ma$
- $2 \sin^3 52^\circ - 1$
- $\cos 58^\circ = \cos 31^\circ$
- $y = \sin x$
- $y = 2 \sin 5$
- $A = 2; P = \frac{2\pi}{3}$
- $U(t) = U_1(t) - U_2(t)$
- $N = C \cdot \cos(\lambda)$
- $(a+b)(a-b) = a^2 - b^2$
- $x < 0$
- $x > 0$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^3}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^4}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^5}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^6}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^7}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^8}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^9}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{10}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{11}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{12}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{13}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{14}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{15}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{16}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{17}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{18}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{19}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{20}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{21}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{22}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{23}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{24}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{25}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{26}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{27}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{28}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{29}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{30}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{31}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{32}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{33}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{34}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{35}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{36}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{37}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{38}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{39}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{40}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{41}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{42}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{43}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{44}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{45}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{46}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{47}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{48}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{49}}$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^{50}}$



O comportamento destas curvas semi-empírica pode ser representado por uma expressão geral ?

Handwritten mathematical notes and diagrams surrounding the central text:

- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^2} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^3} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^4} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^5} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^6} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^7} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^8} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^9} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{10}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{11}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{12}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{13}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{14}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{15}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{16}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{17}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{18}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{19}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{20}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{21}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{22}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{23}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{24}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{25}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{26}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{27}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{28}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{29}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{30}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{31}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{32}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{33}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{34}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{35}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{36}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{37}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{38}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{39}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{40}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{41}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{42}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{43}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{44}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{45}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{46}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{47}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{48}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{49}} = 0$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x^{50}} = 0$

Desfecho de uma Era de Ouro

No final do Século XIX os físicos e astrofísico da época acreditaram que todos os princípios que governavam o mundo físico tinham finalmente sido descobertos.

Eles tinham uma visão de que toda a física clássica tinha florescido nos últimos 300 anos de avanços e por isto mesmo **Era de Ouro**.

Resultado das primeiras observações de Galileu, as Leis de Newton embasadas nos pilares da Conservação de Energia e Momentum, e finalmente iluminada pelas ondas eletromagnéticas de Maxwell.

Um legado determinístico da descrição do universo!

Os limites de conhecimento dos astros...

Auguste Comte, filósofo positivista francês.

Entre 1835-1842 declara sobre as estrelas que:

“Nós vemos como podemos determinar suas formas, suas distancias e seus movimentos, mas nunca poderemos saber nada sobre sua estrutura química e mineralogia”

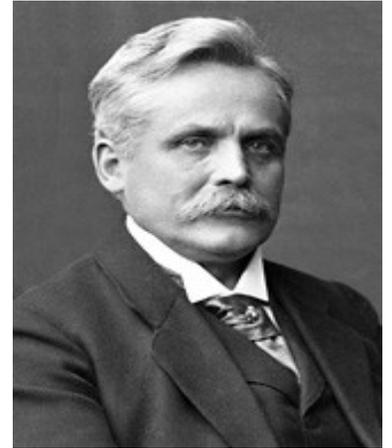
Para Comte a astronomia deveria se concentrar na geometria e na mecânica: “todo casamento com a física ou a química seria monstruoso”.

...estava enganado...!



Isidore Auguste Comte
(1798-1857)

Ajustes Matemáticos ao Comportamento Observado das Curvas de Corpo Negro



Wien e Lummer (1895) propõem que não existem Corpos Negros na natureza.

Wilhelm Wien (1864-1928)
Prêmio Nobel de Física 1911

Realizam um experimento e descobrem que Corpos Não-Negros **também obedecem a Lei do Deslocamento de Wien**, porém com valor da constante da fórmula diferente daquelas do Corpo Negro ideal, como se observa no slide anterior.

Este resultado permite viabilizar as medidas de temperatura dos corpos com a mesma fórmula de Wien...

Eles medem a “forma do espectro” e observam que a Lei era válida somente para altas frequências,..... **Mas falhava para baixas frequências !!**

Ajustes Matemáticos a Leis Empíricas

Lei de Rayleigh-Jeans

Lord Rayleigh e James Jeans obtêm uma lei (expressão matemática) que se ajusta aos "experimentos", **válida para baixa frequência** (ou elevados comprimentos de onda), mas que diverge para pequenos comprimentos de onda, ou altas frequências, e leva ao que se chama de **“catástrofe do ultravioleta”**.



Lord Rayleigh (1842-1919)



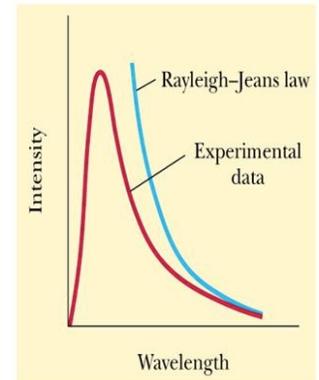
James Jeans (1877-1946)

Lei de Rayleigh-Jeans

Eq. 2

$$I(\lambda, T) = 2\pi ck_B T / \lambda^4$$

(Catástrofe do ultravioleta)



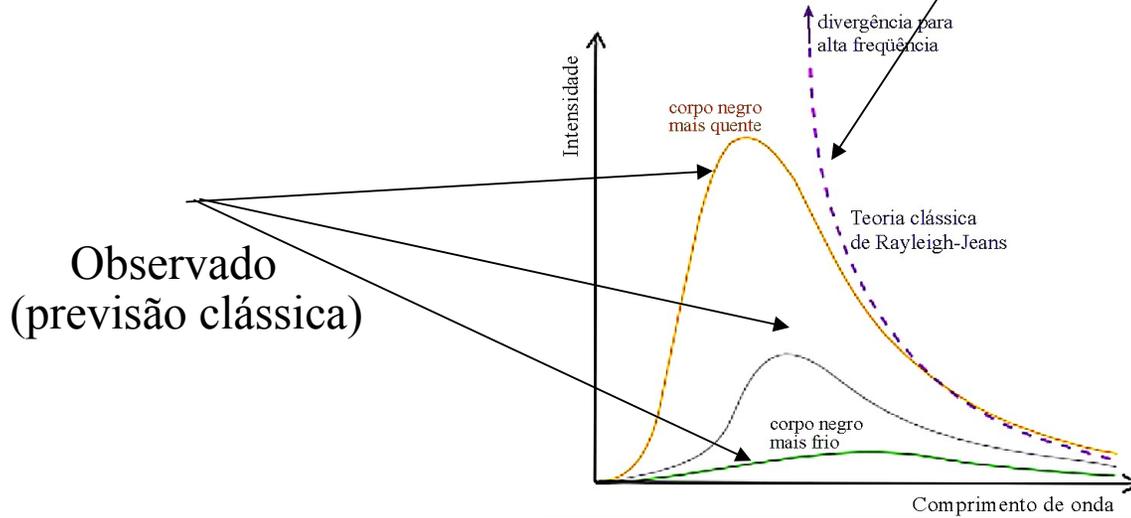


Lord Rayleigh (1842-1919)



James Jeans (1877-1946)

Os resultados **falhavam** para altas frequências



Lei de Rayleigh-Jeans

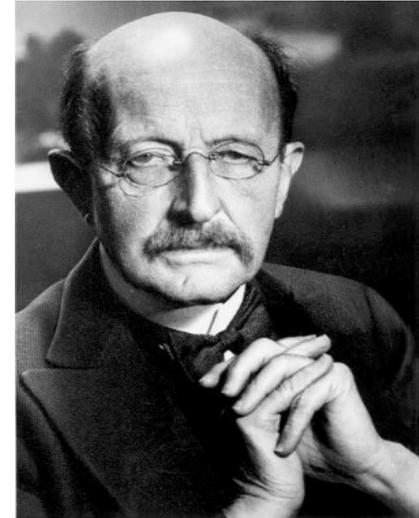
$$I(\lambda, T) = 2\pi c k_B T / \lambda^4$$

(Catástrofe do ultravioleta)

Um pequeno problema a ser resolvido.....!

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947)

Prêmio Nobel de Física em 1918.



No final de 1900 Planck descobre uma **fórmula empírica** que se ajusta aos Corpos Negros

$$E_{\lambda, T} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad \text{onde } C_1 \text{ e } C_2 \text{ são constantes.}$$

...para encontrar os valores das constantes C_1 e C_2 Planck considera o conceito de corpo negro e assume que a energia das oscilações são quantificadas

Assume que as ondas eletromagnéticas estacionárias não podem adquirir qualquer quantidade de energia arbitrária. Elas deveriam ter apenas valores de energia específica permitidas que fossem múltiplos inteiros de uma energia de onda mínima – **o quantum de energia: $E=h\nu$.**

Números inteiros eram fundamentais em todos os ramos da física onde fenômenos ondulatórios estavam presentes: elasticidade, acústica e óptica.

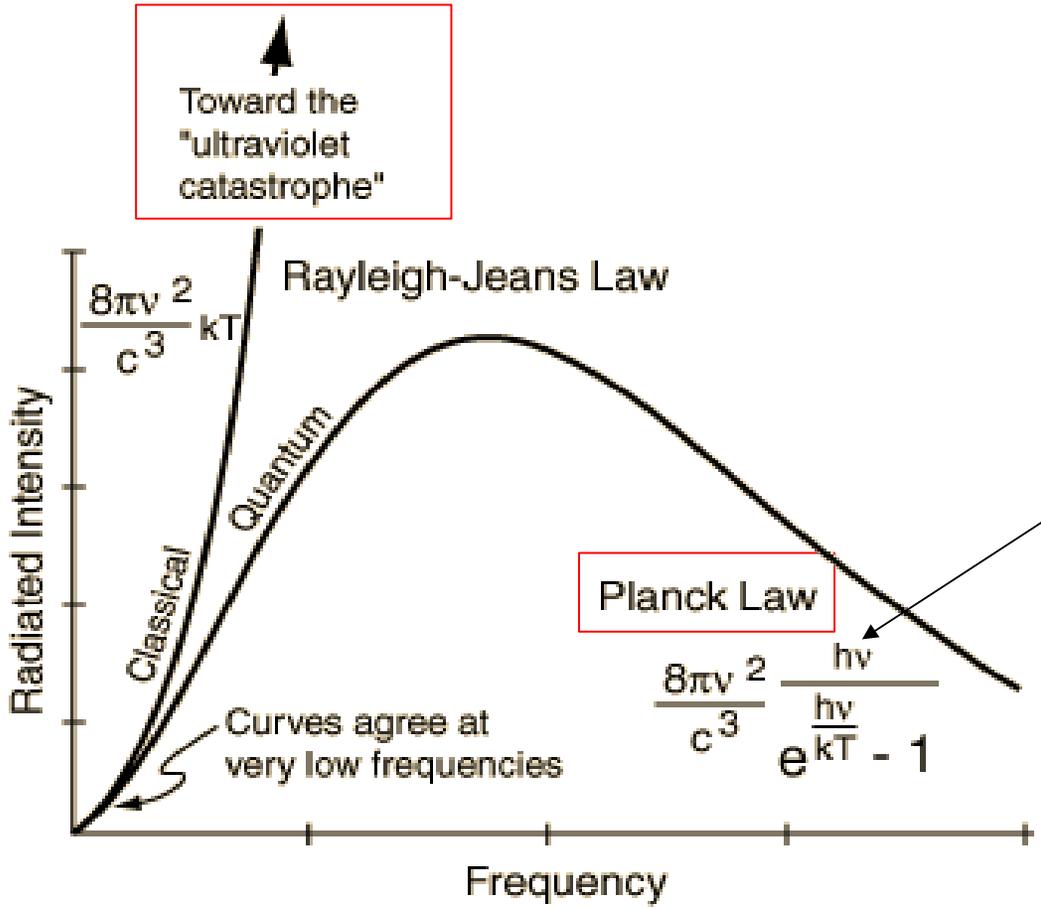
“Quantum de Energia” dado por: $E=h\nu$
 ...funcionou...!!

Expressão Clássica

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

Ctes C1 e C2 são substituídas pelos “quantum de energia”...

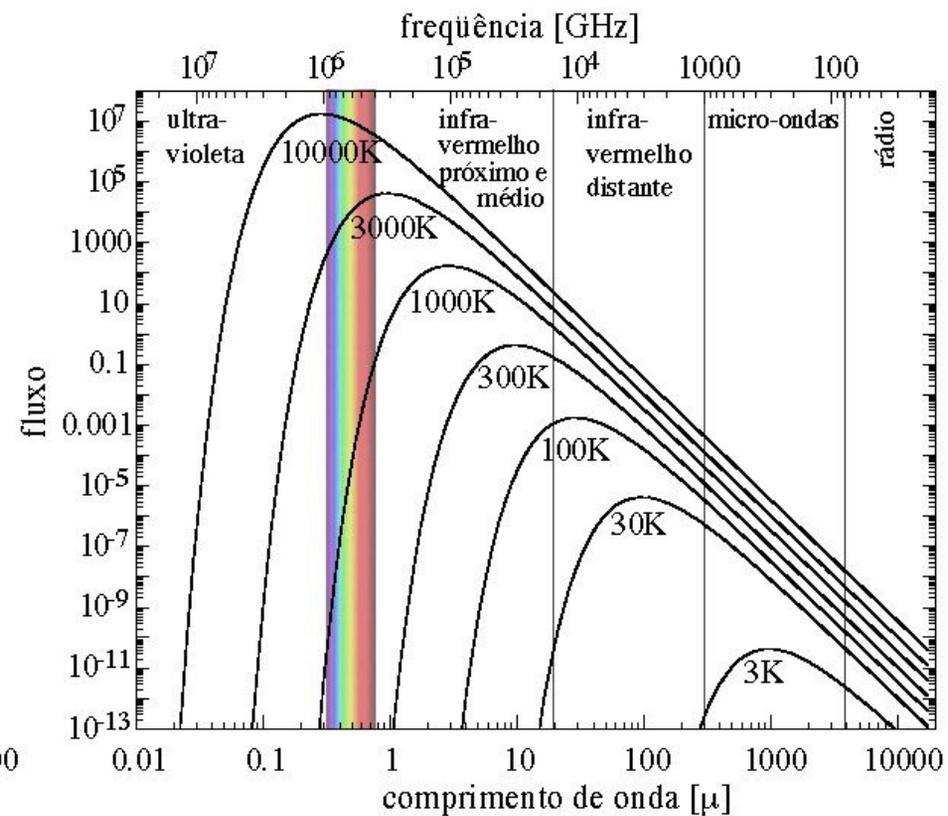
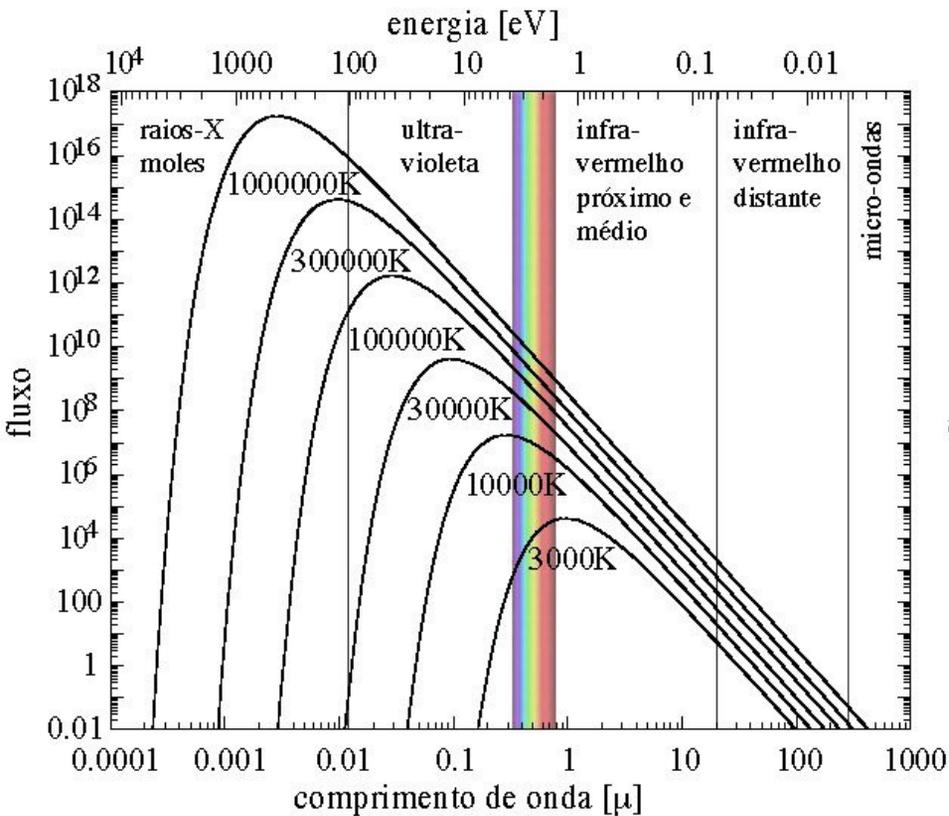
$h \rightarrow$ limita o quanto de energia as frequências de altas energias podem ter \rightarrow dá a escala de incerteza quântica, a escala de pixel da realidade



Radiação de Corpo Negro

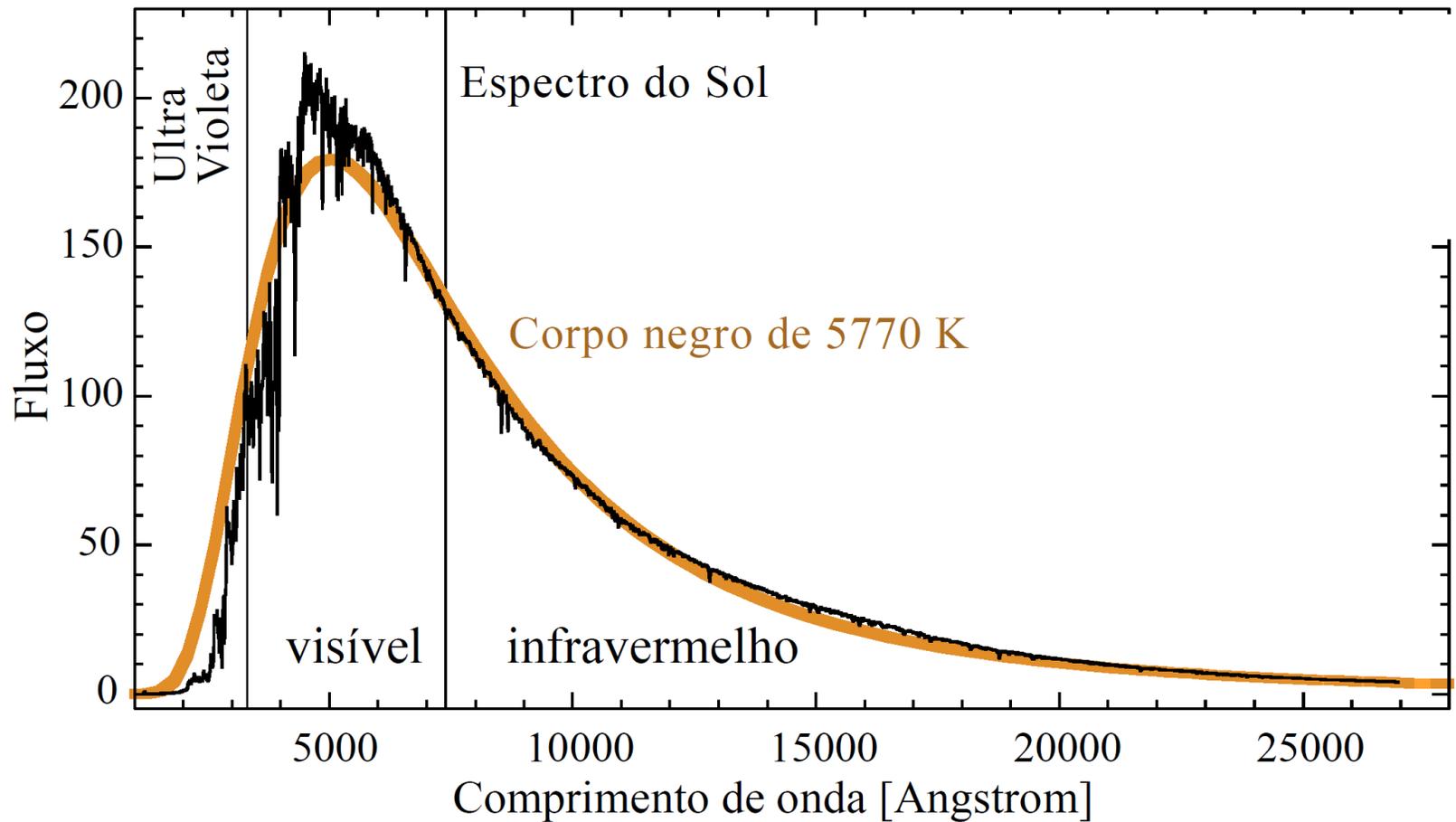
Intensidade, $I(\nu, T)$ corresponde ao espectro de corpo negro para uma dada temperatura.

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



O exemplo do Sol

Estrelas são exemplo de astros “quase corpos negros”



Lei de Stefan

Em 1879 **Joseph Stefan** descobre **empiricamente** uma relação entre a energia ou luminosidade emitida por um Corpo Negro de **área A** e temperatura (**T**), em Kelvin que é dada por

$$L = A \sigma T^4$$
 Lei de Stefan, onde σ uma constante



Joseph Stefan
(1835-1893)

Em 1884, **Ludwig Boltzmann** usando Leis da Termodinâmica e as Leis de Maxwell para pressão de radiação, calcula o valor da constante $\sigma = 5.670 \times 10^{-5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

conhecida como constante de Stefan-Boltzmann
Aplicando esta equação a uma situação real, uma estrela, cuja configuração geométrica é uma esfera de raio R e área de superfície $A = 4 \pi R^2$, obtem-se a Lei de Stefan-Boltzmann

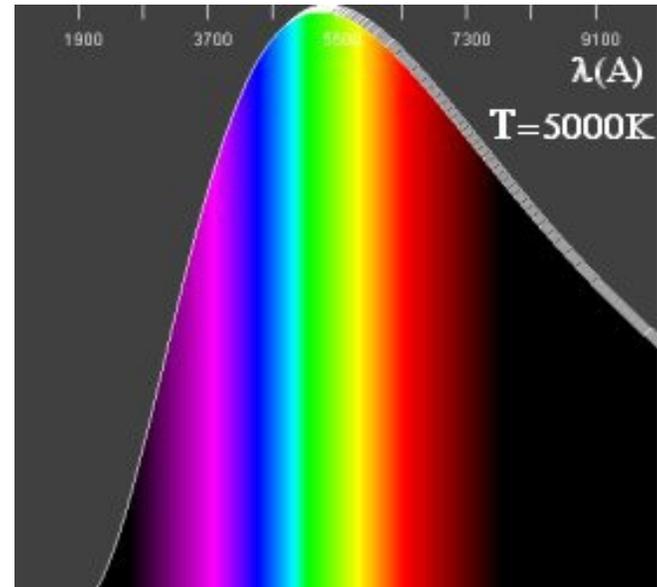
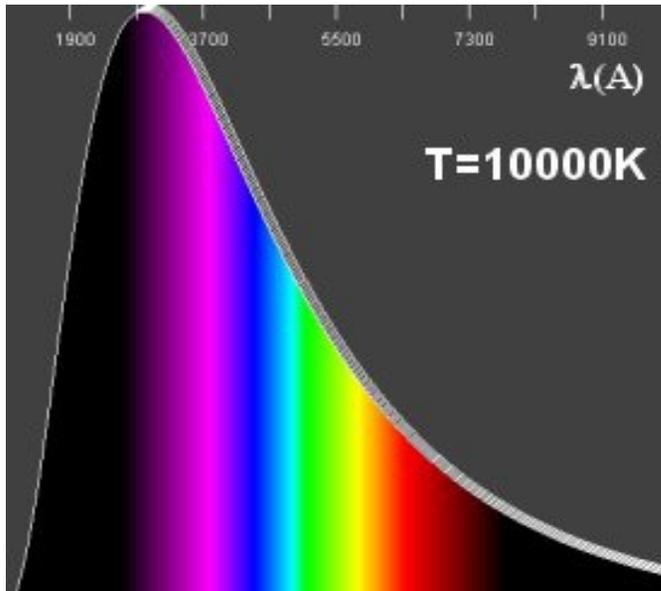
$$\text{Lei de Stefan-Boltzmann: } L = 4 \pi R^2 \sigma T_e^4$$

Como as estrelas não são Corpos Negros perfeitos, a temperatura na eq. acima é definida como sendo Temperatura Efetiva (T_e)



Aplicação na Astrofísica

Obtendo o espectro de uma estrela é possível obter sua Temperatura pela Lei de Wien



Lei de Wien $\rightarrow \lambda_{\text{máx}} \times T = 0,290 \text{ (cm.K)}$

Vimos que a luminosidade (**L**) de um “corpo negro” de **área A** e **temperatura T** é dada pela Lei de Stefan, $L = A \cdot \sigma T^4$, onde $A = 4\pi R^2$; $\sigma = c^{\text{te}} = 5,670 \times 10^{-5} \text{ (ergs}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{K}^{-4}\text{)}$

Conhecendo a **T** e sabendo a distância (**d**) de uma estrela, pode-se obter o raio ou tamanho da estrela pela aplicação da Lei de Stefan-Boltzman $L = 4 \pi R^2 \sigma T^4$

Nasce assim a teoria considerada pelos físicos a mais sofisticada da Física já produzida pela humanidade. A **Física Quântica**

Inteiramente fundamentada em uma linguagem matemática que aliada a conceitos físicos fornece um arcabouço capaz de determinar o comportamento de **sistemas em escala atômica...**

O legado determinístico da descrição do universo é abalado..!

No início dos anos 1905 Einstein revoluciona a física transformando a idéia de espaço e tempo, energia e matéria.

A visão da descrição rígida, mecânica, do universo pareceu uma ilusão e foi trocada por uma visão de leis de probabilidade e estatísticas.

Mas havia mais um problema relacionado com os espectros.....

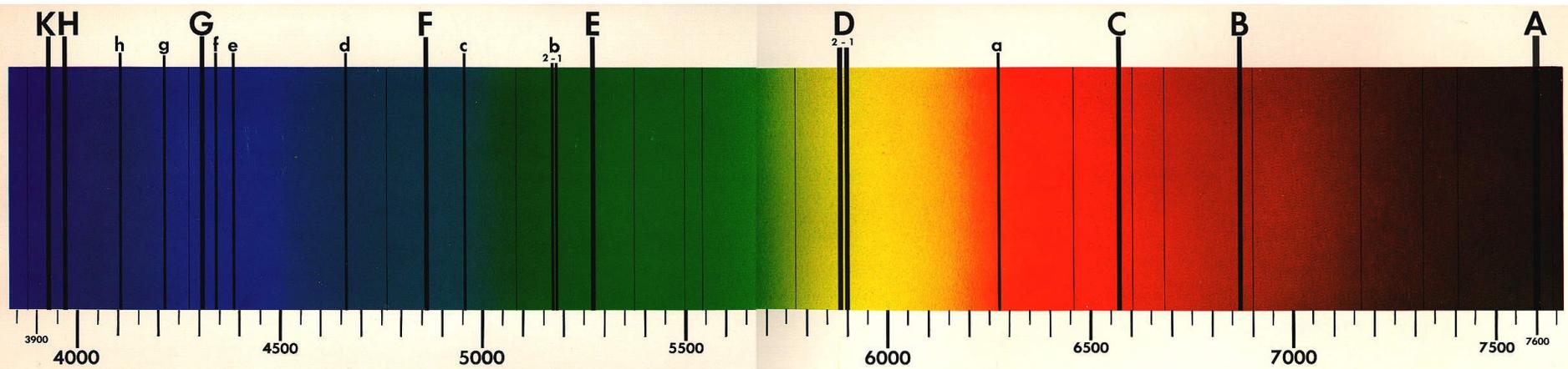
Espectro do Sol

...as linhas escuras



Em 1814, Joseph von Fraunhofer (1787-1826) obtém o espectro do Sol.

Este espectro é composto de um contínuo e de **linhas escuras**. Como explica-las?



Comprimento de onda em Angstrom