

# Lâmpada

Parte 4 – Espectro

Aula 9

**Prof. Henrique Barbosa**

**Edifício Basílio Jafet - Sala 100**

**Tel. 3091-6647**

**[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)**

**<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>**

# Experiência 2: Lâmpada

Queremos entender como uma lâmpada incandescente funciona. Para isso teremos 4 semanas:

## 1. Circuitos de Corrente Contínua

- Como medir grandezas elétricas?
- Os instrumentos de medida influenciam no resultado de uma medida? Como escolher o instrumento certo?

## 2. Pilha e Lâmpada

- Como varia a tensão de uma pilha ou em uma lâmpada em função da corrente?

## 3. Potência de uma lâmpada

- Como varia a potência da lâmpada em função da temperatura do filamento?

## 4. Radiação emitida por uma lâmpada

- Como varia a radiação emitida pela lâmpada em função do comprimento de onda da luz?

# Tarefas da semana (1)

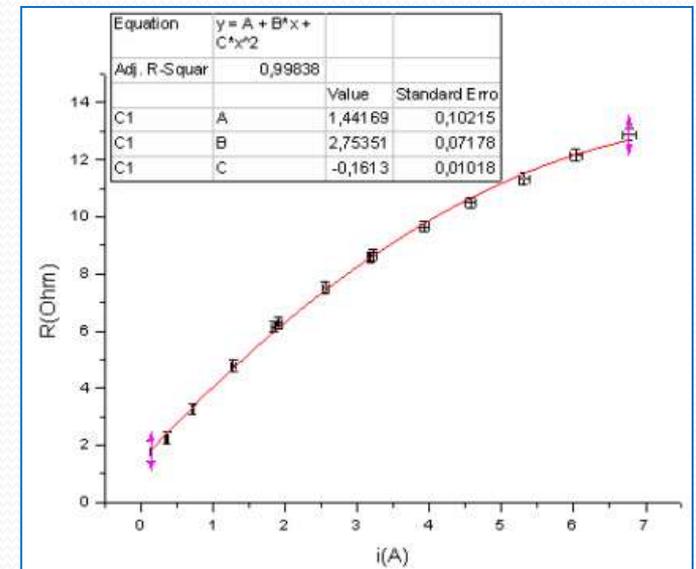
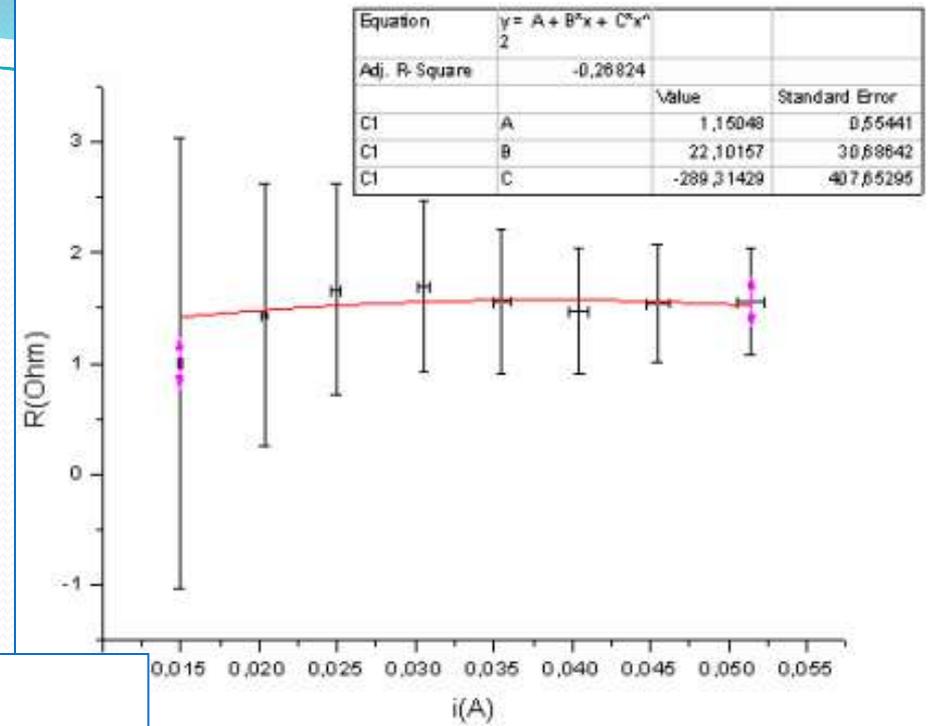
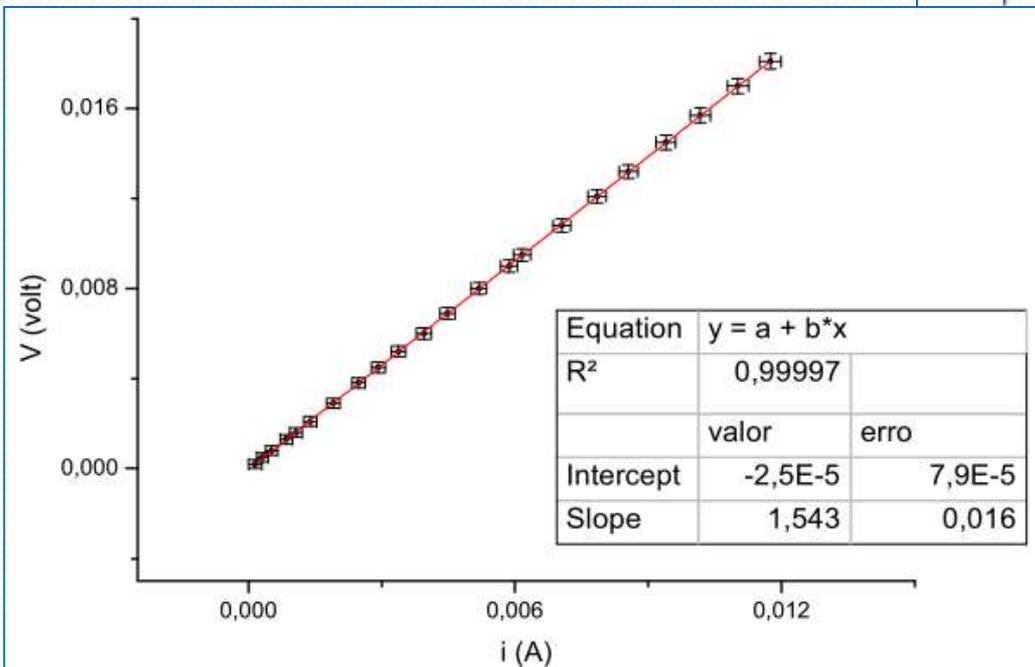
Vamos medir  $R_0$ . Mas como?

- Ohmímetro
  - A potência do ohmímetro é realmente baixa para assegurar que a lâmpada não esquentou?
- Extrapolação da curva para correntes muito pequenas
  - Da curva característica pode-se obter  $R \times i$  e extrapolar para  $i = 0$ .
  - Qual a precisão desse procedimento? Vocês já tem dados suficientes?
- Realizar medidas em correntes realmente baixas
  - Limitar a corrente utilizando resistores elevados entre **5 e 10 k $\Omega$** .
  - Qual a precisão desse método já que  $V_{\text{lâmpada}} \ll V_R$  ?

O valor esperado é **1.0-1.2 ohm**. Se seu valor for muito diferente, discuta!!  
... e depois use  **$R_0=1.1\text{ohm}$**  no cálculo da temperatura, para que os outros resultados não fiquem ruins.

# Extrapolando

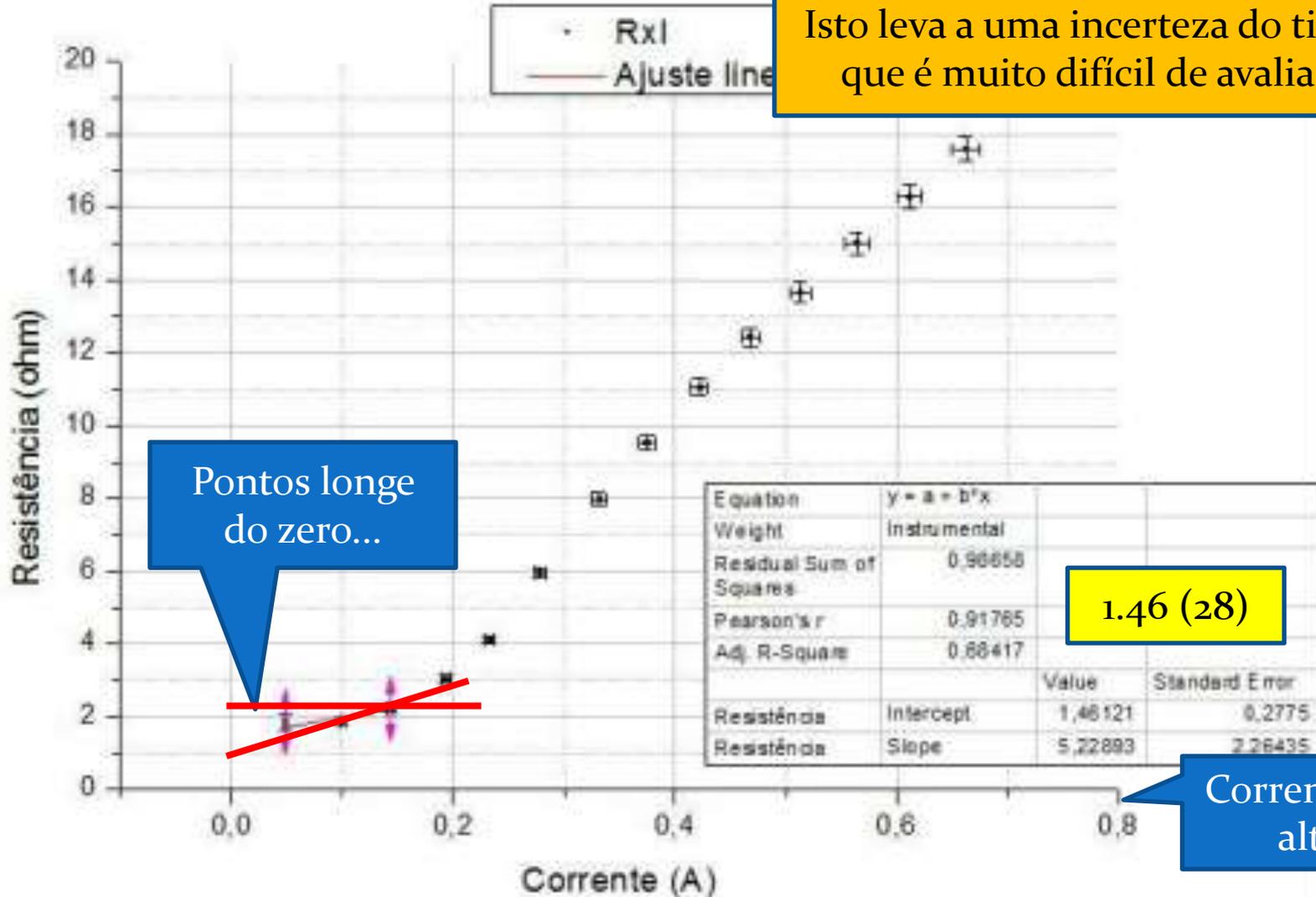
- Olhando  $V_{xi}$  parece uma reta... Precisava fazer  $R_{xi}$
- Ou medir com  $i \rightarrow 0$



# Cuidados....

Se este grupo tivesse incluí +1 ponto no ajuste, o resultado seria totalmente diferente!

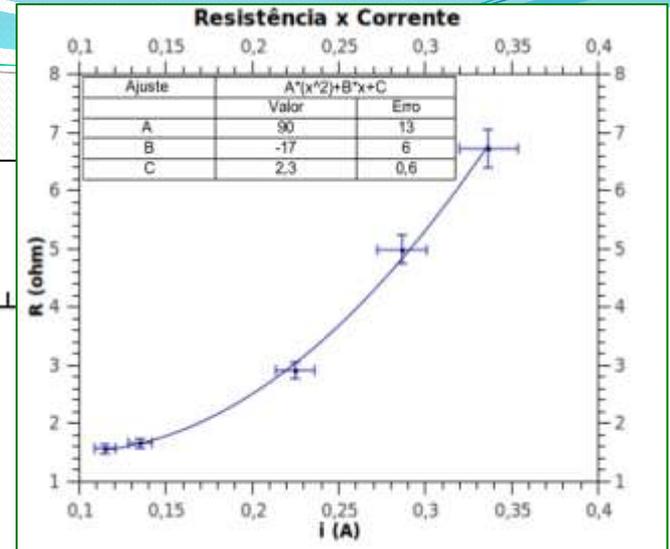
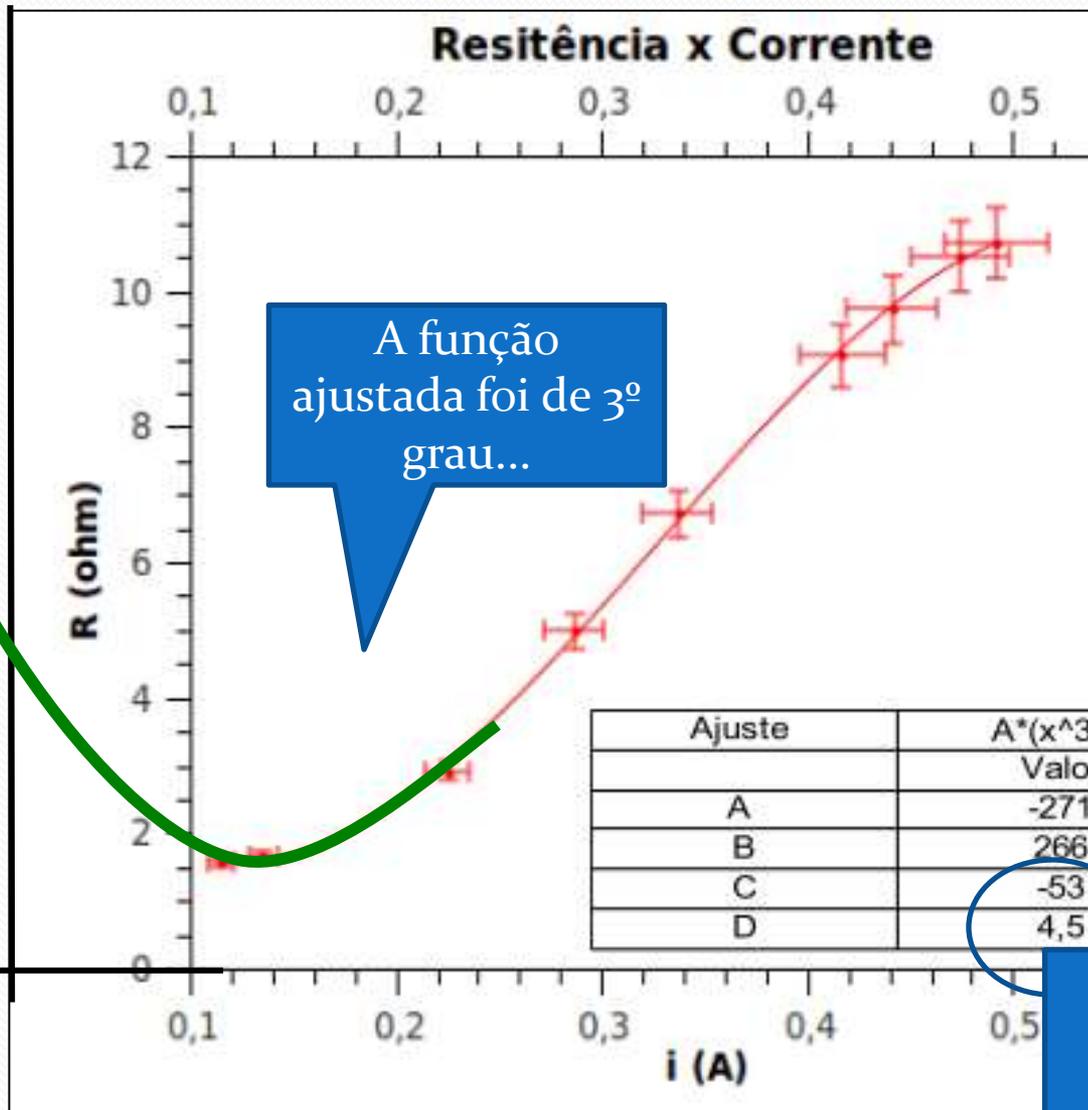
Isto leva a uma incerteza do tipo B que é muito difícil de avaliar...



Pontos longe do zero...

Corrente muito altas....

# Outro exemplo



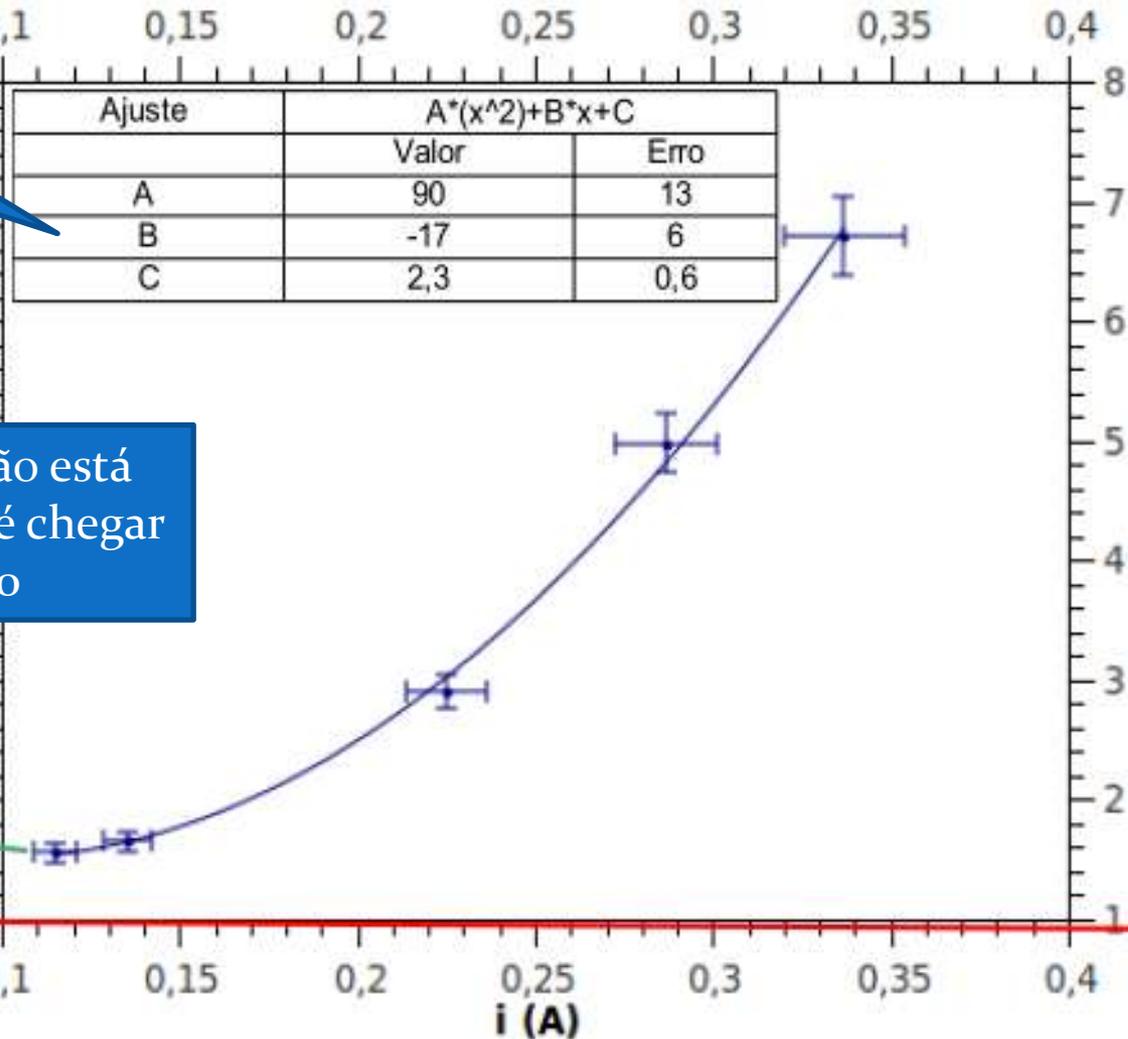
Faz sentido a incerteza e o valor do termo linear???

# Ainda o mesmo grupo

Dessa vez usaram  $x^2$  e apenas alguns pontos do início...

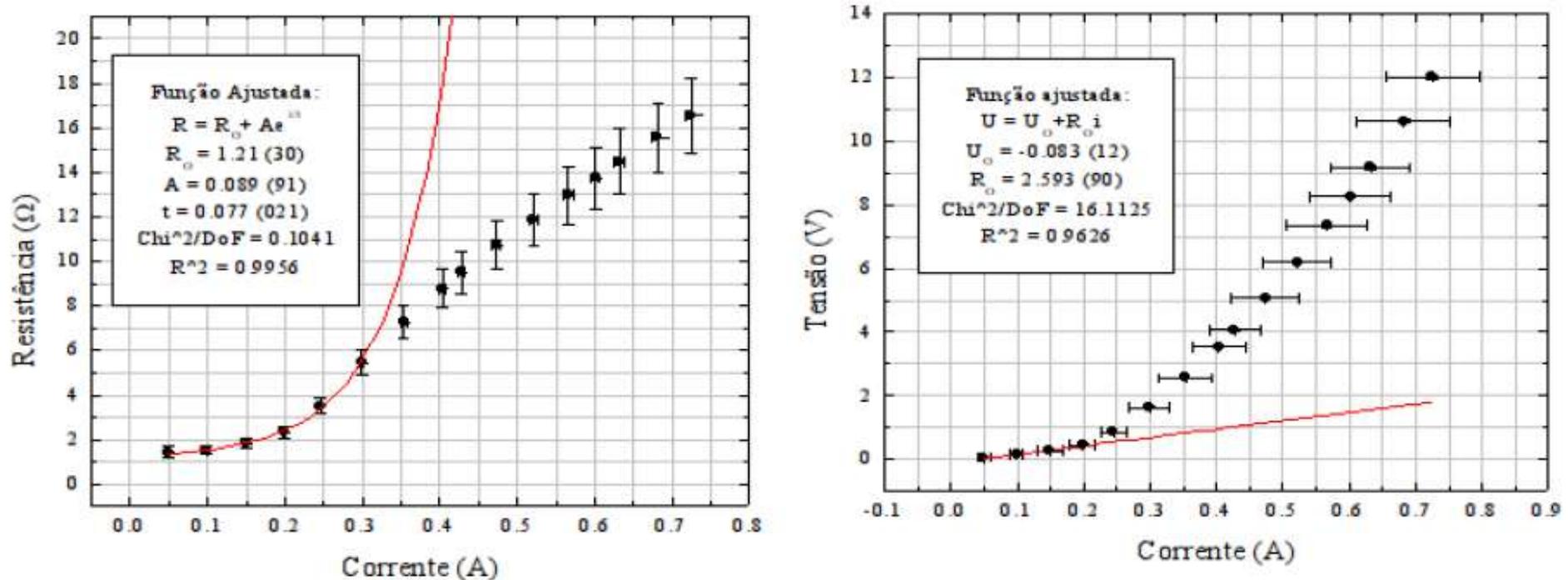
Mas a função está crescendo até chegar em 0,0

Resistência x Corrente



# Ok, então como extrapolar??

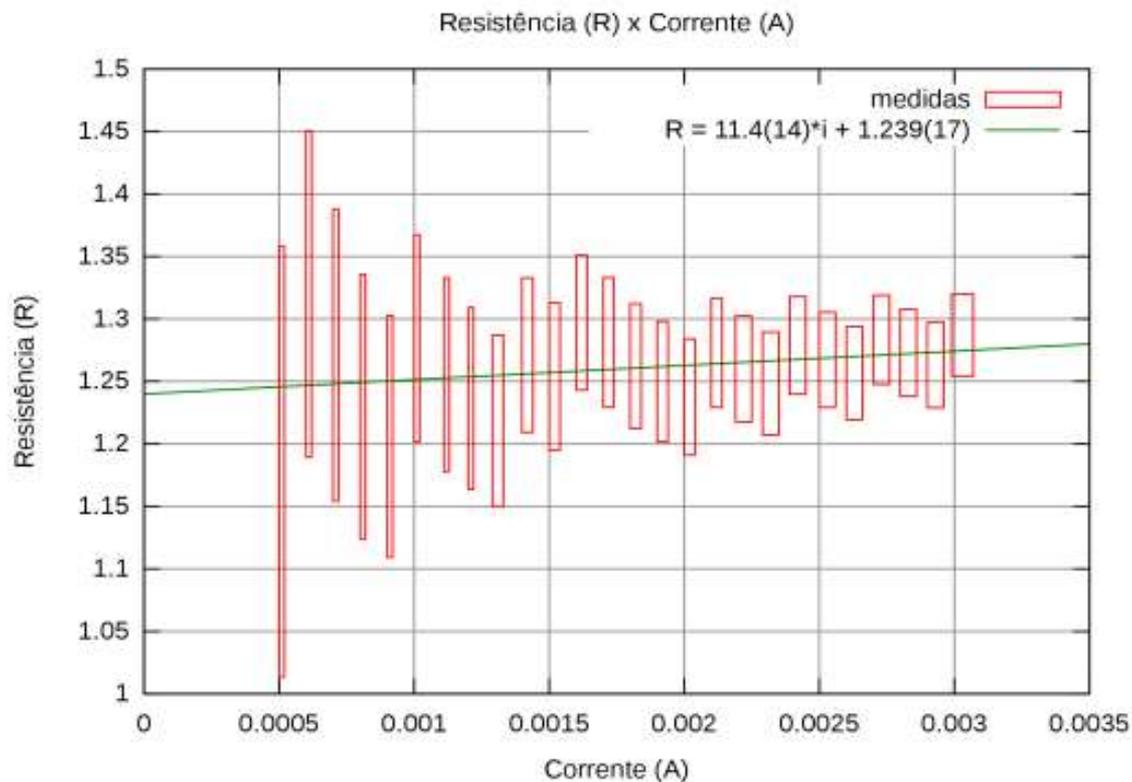
- Esse grupo extrapolou linear em  $V_{xi}$  (ruim... pois  $i \sim 100\text{mA}$ ), mas também ajustou uma exponencial (evita o problema do polinômio que faz a função crescer)



**Figura 1:** Extrapolação para  $R_0$  a partir do Gráfico  $R_{xi}$ , na esquerda e do gráfico  $V_{xi}$  na direita

# Boa análise

A partir da curva característica, foi construída a curva de Resistência ( $\Omega$ ) x Corrente (A) (figura 1). Com a extrapolação da curva para uma corrente nula, foi encontrado para a resistência do filamento para a temperatura ambiente (295,25(20)K),  $R_0 = 1.239(17)\Omega$ .



# Medidas de R0 (ohm)

	Multímetro	Extrapolação	$i \ll 1$
H1			1.32 (1)
H2	1.8 (1)	1.44 (10) 1.15 (55) 1.25 (3) 1.25 (37)	
H3	2.10 (2)	1.543 (16)	1.524 (55)
H4	1.50 (1)		1.239 (17)
H5	2.9 (3)	1.46 (28)	1.39 (1)
H6		2.3 (6) 4.5 (6)	1.34 (4)
H7		1.21 (30) 2.593 (90)	
H8	1.9 (3)	1.439 (3) 1.39 (1)	1.436 (1) 1.411 (9)
H9	1.60 (11)		1.449 (9)
H10	2.20 (1)	1.86 (12)	1.37 (1)

Quem ajustou um reta em  $V_{xi}$   
para  $i \sim 1$  a 10mA conseguiu  
1.45(5) ohm

Quem ajustou  $R_{xi}$  para  $i \sim 1$  a  
10mA e extrapolou conseguiu  
1.25(25)ohm

# Porque não dá certo com o multímetro??

Também medimos a voltagem que um ohmímetro aplica à resistência testada com um voltímetro. Quando invertemos os papéis dos multímetros, as leituras foram semelhantes. É curioso observar que a voltagem é maior nas escalas menores. Para uma resistência menor, a corrente resultante é maior, o que permitiria uma precisão melhor sem a necessidade de um aumento de tensão.

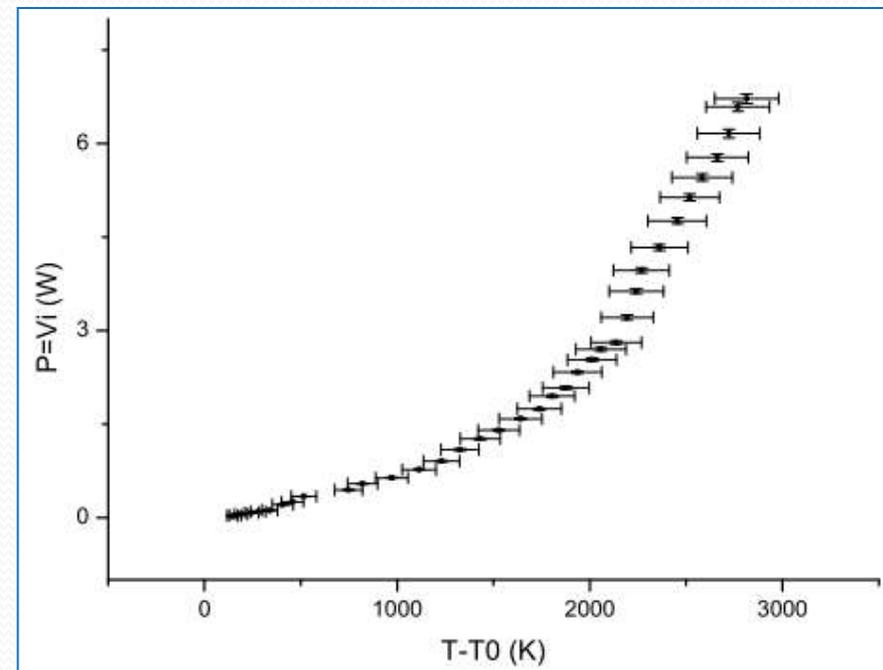
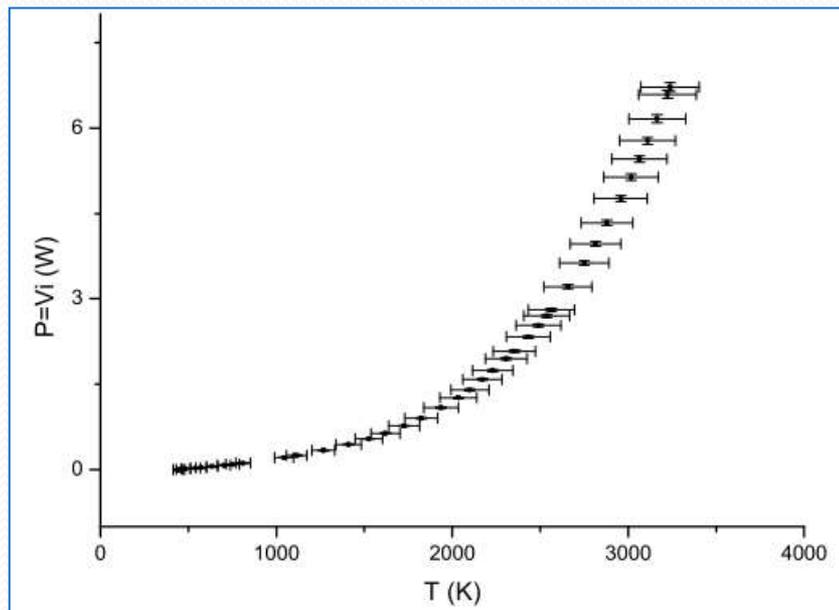
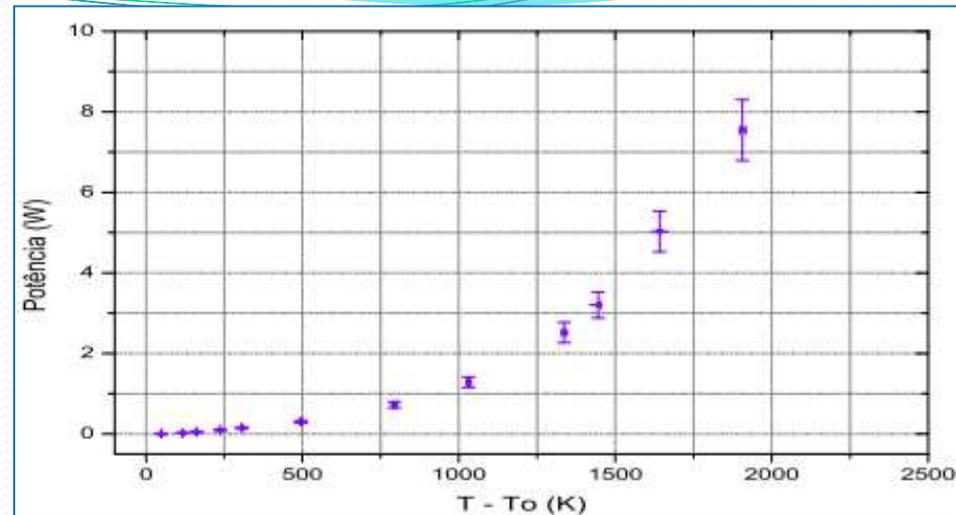
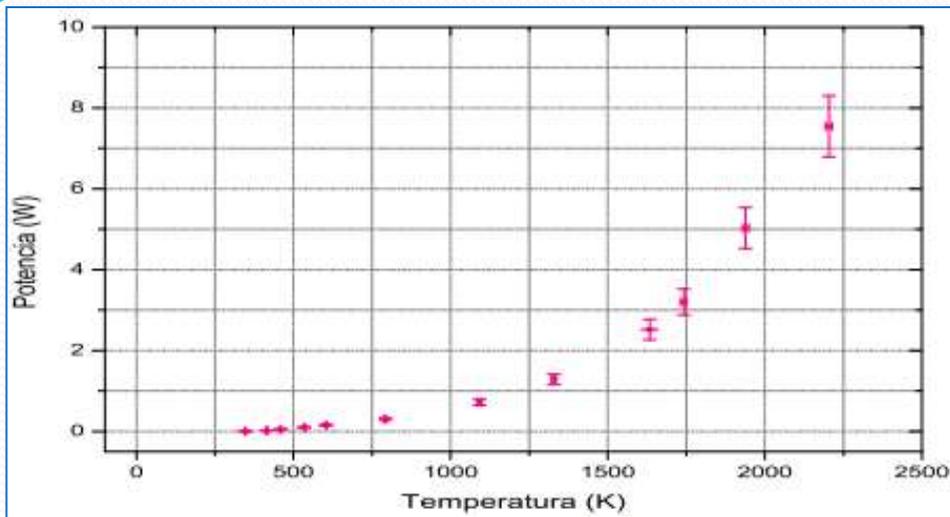
Tabela 1: voltagem aplicada pelo ohmímetro

Voltagem Aplicada (V)	Escala	Resistência Medida
0.660(13)	(20M $\Omega$ )	9.97M $\Omega$
1.212(7)	(2M $\Omega$ )	-
1.320(7)	(200k $\Omega$ )	-
1.332(8)	(20K $\Omega$ )	-
2.52 (2)	(2k $\Omega$ )	-
2.05 (2)	(200 $\Omega$ )	-

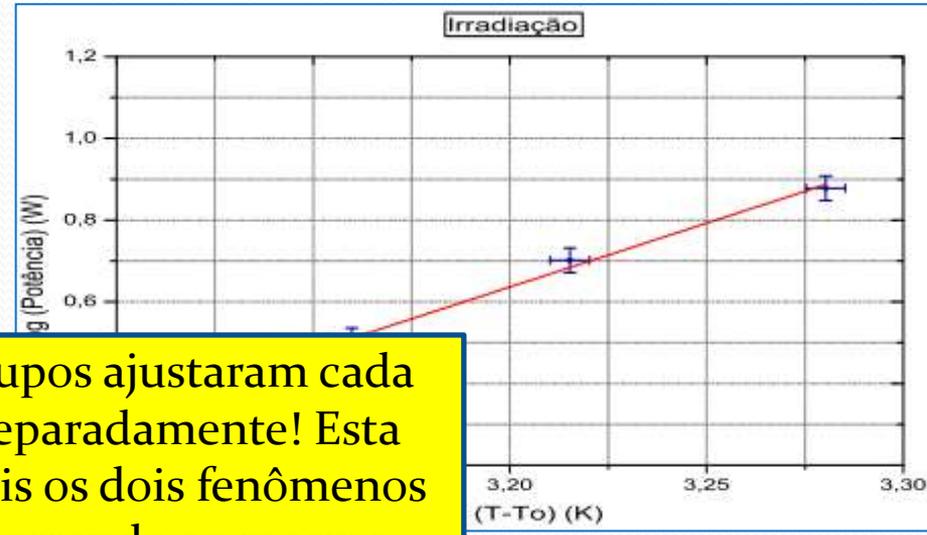
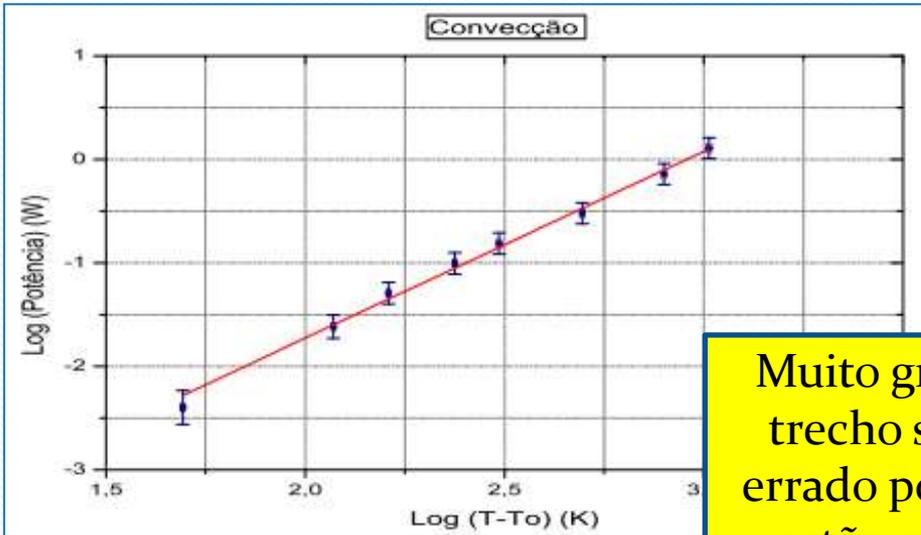
# Tarefas da semana (2)

- Usando os dados da semana passada e uma função apropriada, faça 2 gráficos: da potência ( $V \cdot i$ ) em função da temperatura,  $T$ , (calculada pelo  $R_0$ ) e outro da potência em função de  $(T - T_0)$ 
  - Vão precisar de pontos desde  $U = 12V$  até  $U \approx 0V$ , meçam novamente caso não tenha dados suficientes.
- Analise as 2 curvas e veja se é possível identificar as regiões onde predomina a convecção e onde predomina a irradiação
  - Qual é o valor do coeficiente angular?
  - Lembre-se da conservação de energia e das diferentes maneiras da lâmpada dissipar a energia recebida

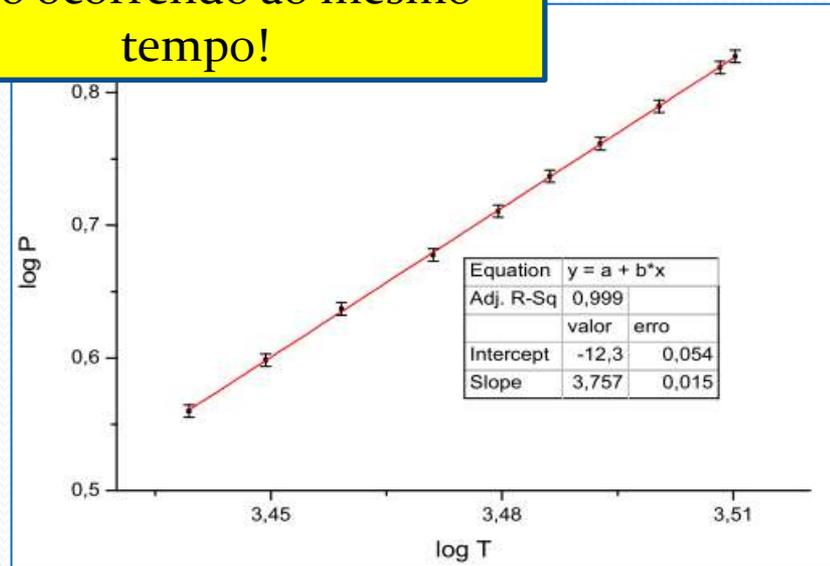
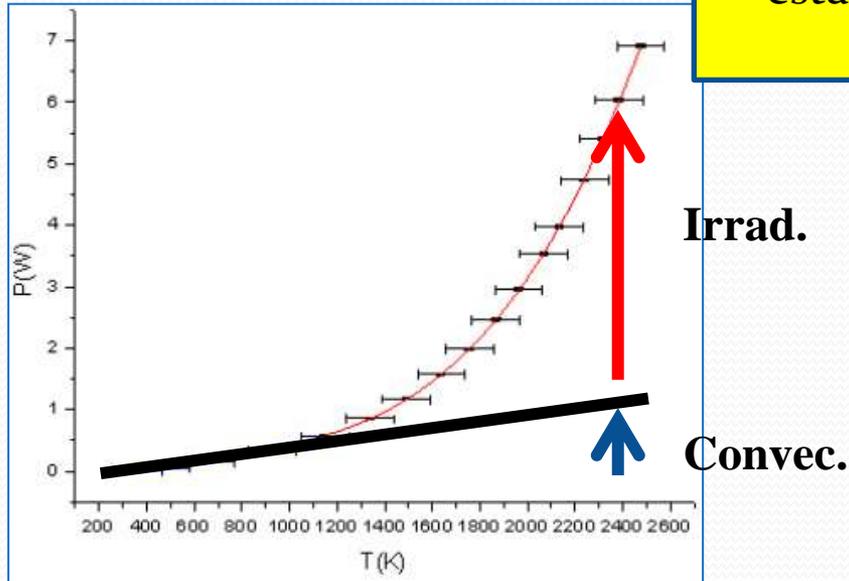
# Potência



# Ajustes da potência (por partes)



Muito grupos ajustaram cada trecho separadamente! Esta errado pois os dois fenômenos estão ocorrendo ao mesmo tempo!



# Tarefas da semana

Total - convecção,  
para calculo da  
irradiação

- Usando os dados da semana passada e uma função apropriada, faça 2 gráficos: da potência ( $V \cdot i$ ) em função da temperatura,  $T$ , (calculada pelo  $R_0$ ) e outro da potência em função de  $(T - T_0)$

Total, para calculo  
da convecção

- Vão precisar de pontos desde  $U = 12V$  até novamente caso não tenha dados suficientes.
- Analise as 2 curvas e veja se é possível identificar as regiões onde predomina a convecção e onde predomina a irradiação

- Qual é o valor de  $T_0$  e qual a diferença entre as duas maneiras de medir a temperatura?
- Lembre-se de que as curvas são diferentes e que a potência é diferente das maneiras de medir a temperatura.

Vocês precisam pensar no que estão medindo e porque!

# Maneira Correta

Primeiro ajustar a convecção no gráfico Ptotal x T-T0

o que mudaria se incluíssem +-1 ponto no ajuste??

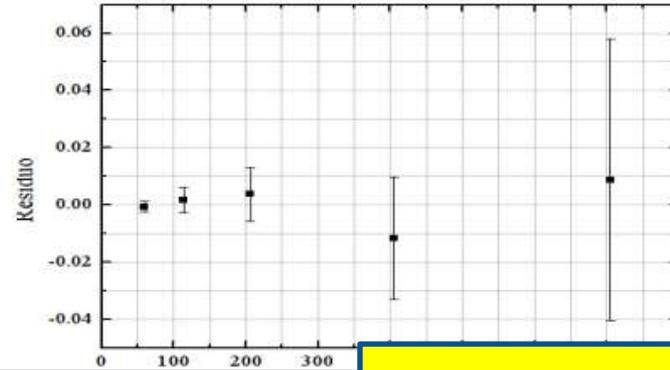
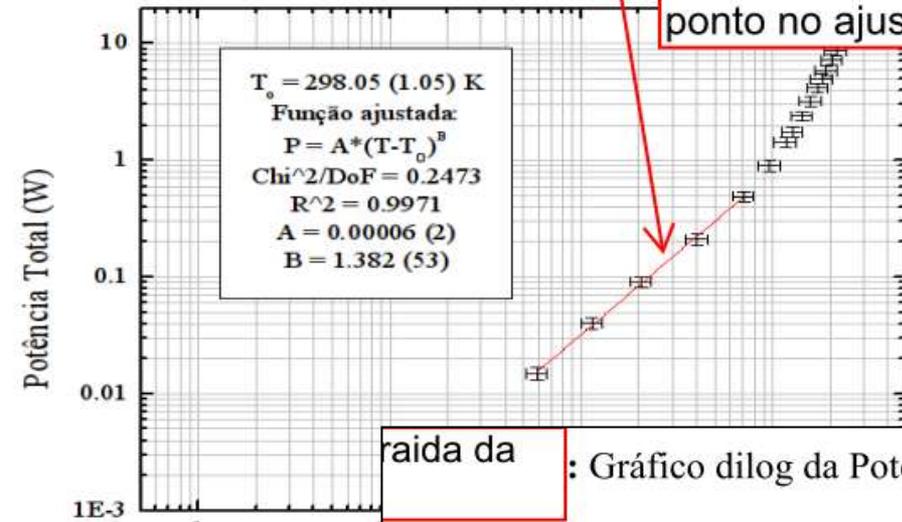
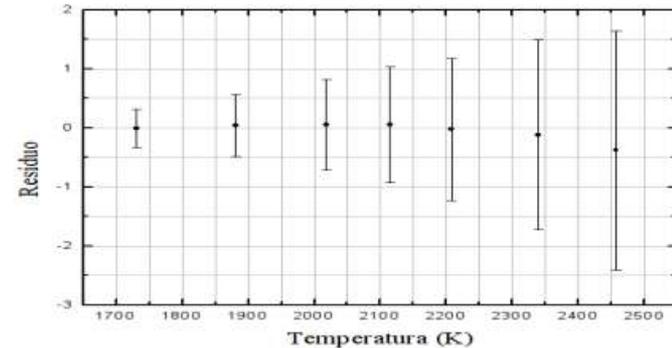
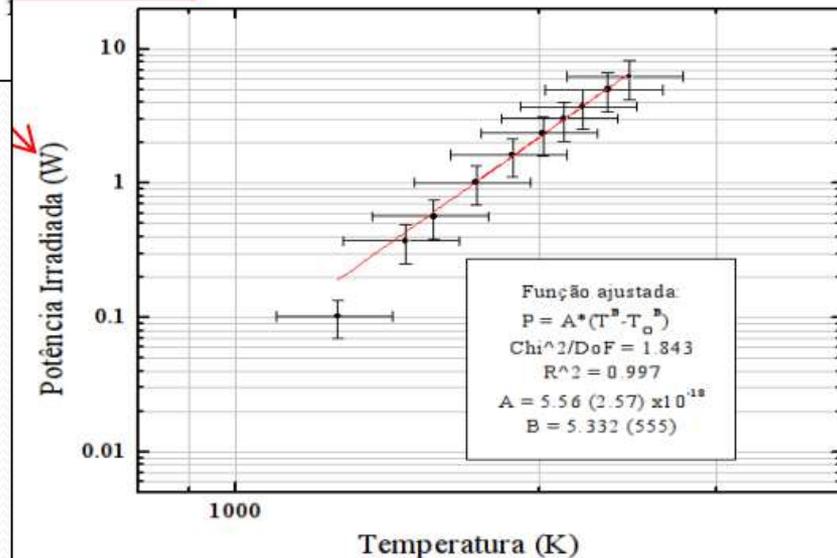


Gráfico dilog da Potência pela temperatura m

Primeiro ajustar a irradiação no gráfico PT-Convec x T

raida da



# Tarefas da semana (3)

- Usando os dados da medida de **P** e **T**, ajuste a função esperada:

$$P_{\text{total}} = A.\Delta T^{\alpha} + B.T^{\beta} + C$$

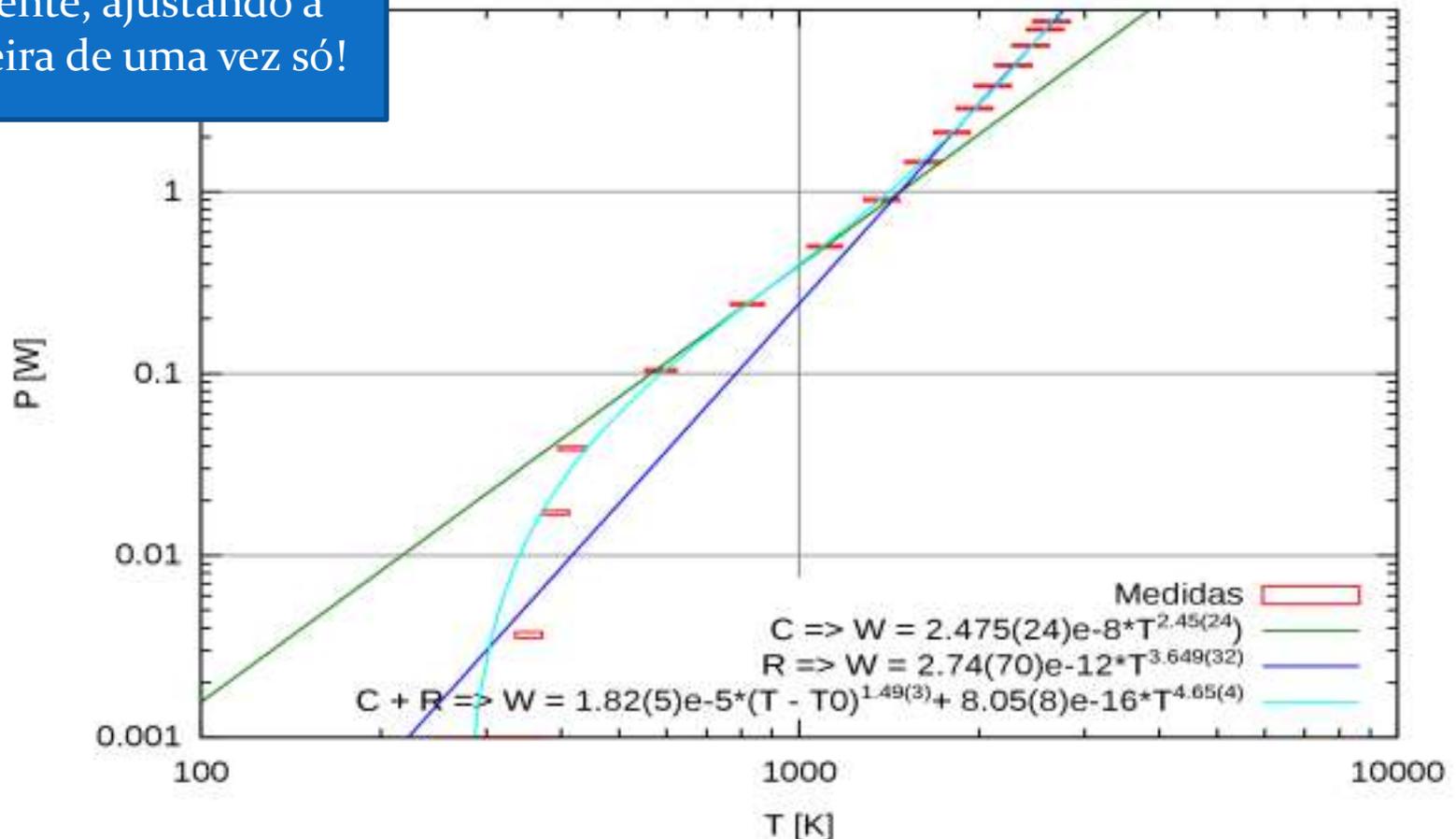
- Compare o coeficiente  **$\alpha$**  obtido com valores da literatura, como **1.38** medido por B.S.N. Prasad and Rita Mascarenhas, Am. J. Phys. 46, 420 (1978).
- Compare o coeficiente  **$\beta$**  obtido com o valor teórico esperado pela lei de Stefan-Boltzmann.
- Comente os resultados, principalmente se os coeficientes não derem compatíveis com os valores esperados.
  - Esquecemos algo que pode influenciar o resultado?

# O mais correto seria ajustar tudo de uma vez!

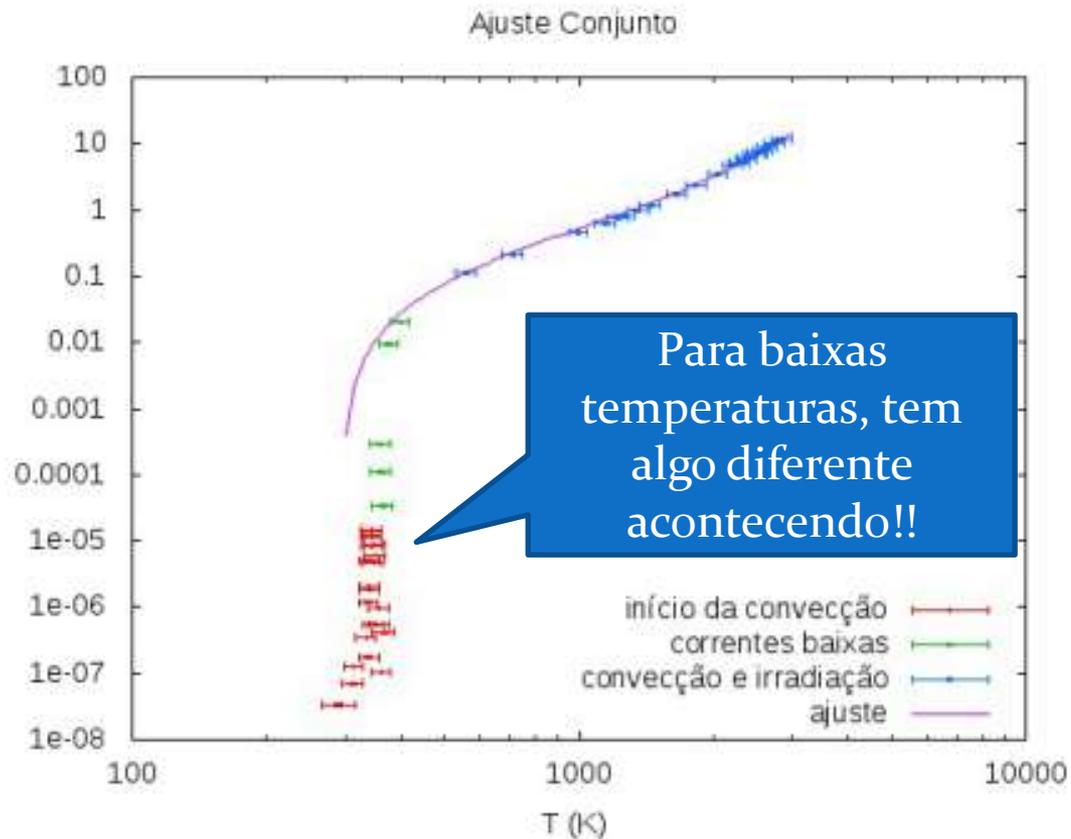
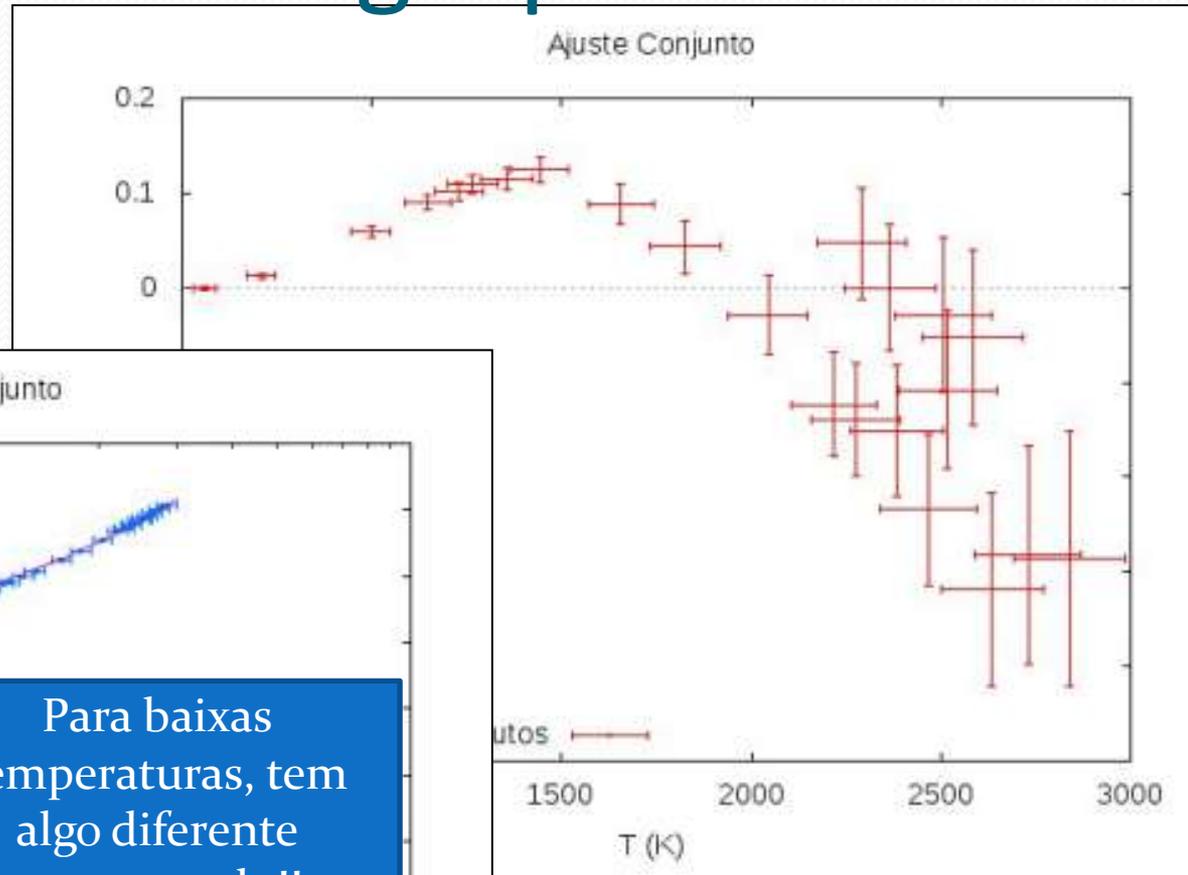
$$P = A\Delta T^\alpha + BT^\beta + C$$

Corretamente, ajustando a função inteira de uma vez só!

Curva de potência de uma lâmpada incandescente



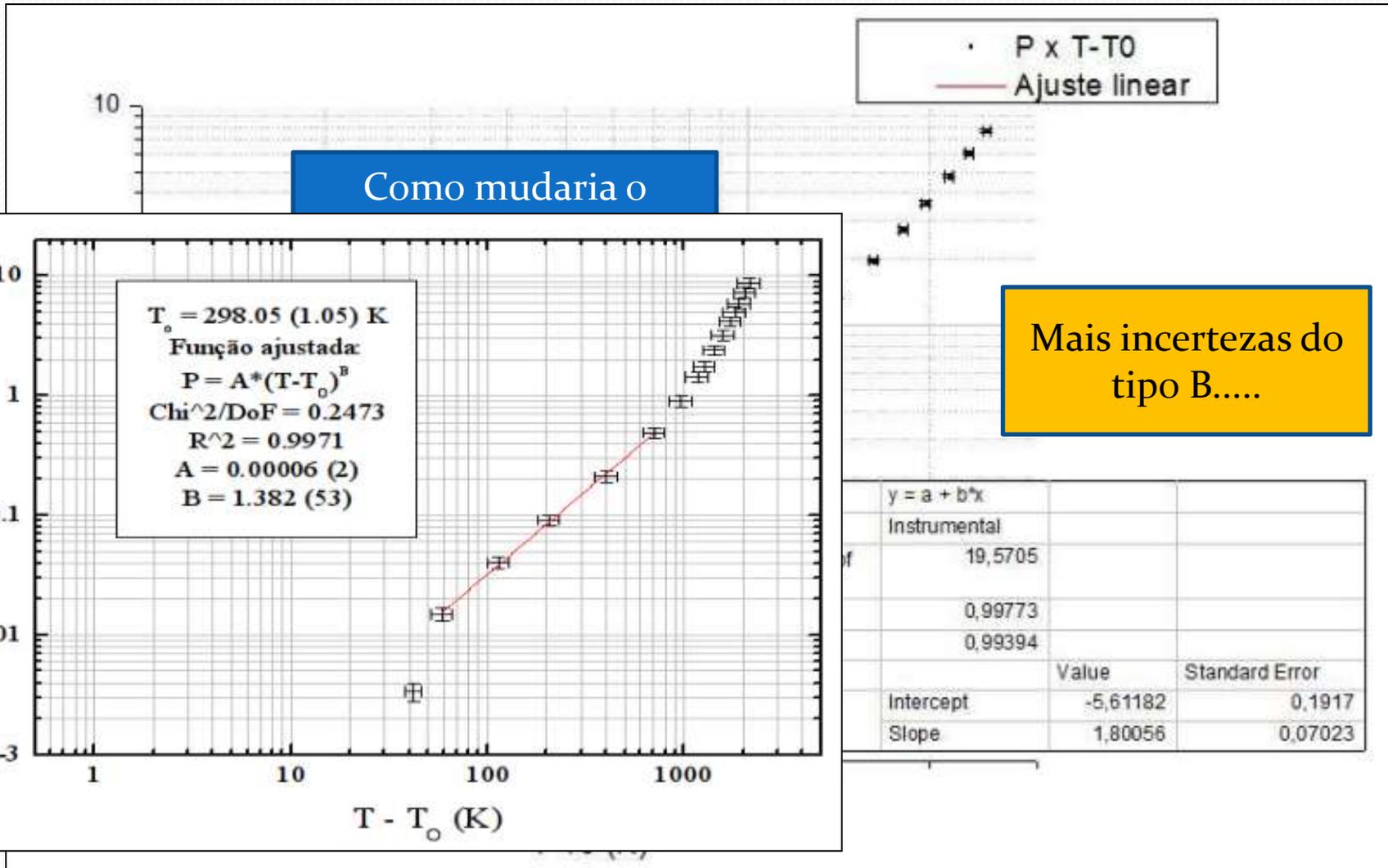
# Resultado de outro grupo



Para baixas temperaturas, tem algo diferente acontecendo!!

# Cuidado

- Usando resultado do mesmo grupo....



10

Como mudaria o

Potência Total (W)

10  
1  
0.1  
0.01  
1E-3

1 10 100 1000

T - T<sub>0</sub> (K)

T<sub>0</sub> = 298.05 (1.05) K  
 Função ajustada:  
 $P = A \cdot (T - T_0)^B$   
 Chi<sup>2</sup>/DoF = 0.2473  
 R<sup>2</sup> = 0.9971  
 A = 0.00006 (2)  
 B = 1.382 (53)

• P x T-T<sub>0</sub>  
 — Ajuste linear

Mais incertezas do tipo B....

# Resultados dos expoentes

	Alfa	Beta	
H1	1.80 (10)	3.12 (86)	Irradiação com T-To, sem descontar convecção
H2	1.45 (1)	3.91 (2)	sem descontar convecção
H3	1.739 (8)	3.757 (15)	sem descontar convecção
H4	1.49 (3)	4.65 (4)	OK
H5	<b>1.01 (21)</b>	<b>1.02 (38)</b>	OK, mas ajuste ficou muito ruim
H6	1.63 (56)	6 (2)	OK, mas T <sub>max</sub> =1900K
H7	1.382 (53) 0.301 (850)	5.332 (555) 3.918 (366)	Ajustes separados OK, mas incluíram ponto < convecção
H8	1.67(6)	3.66 (7)	Sem descontar a convecção
H9	1.496 (31) 1.5 (5)	5.00 (8) 5 (1)	Ajustes separados OK, mas ajuste não ficou muito bom
H10	1.00 (12)	3.83 (9)	

Sem descontar:  $3.8 \pm 0.09$   
Descontando:  $4.8 \pm 0.59$

# Experiência 2: Lâmpada

Queremos entender como uma lâmpada incandescente funciona. Para isso teremos 4 semanas:

1. Circuitos de Corrente Contínua
  - Como medir grandezas elétricas?
  - Os instrumentos de medida influenciam no resultado de uma medida? Como escolher o instrumento certo?
2. Pilha e Lâmpada
  - Como varia a tensão de uma pilha ou em uma lâmpada em função da corrente?
3. Potência de uma lâmpada
  - Como varia a potência da lâmpada em função da temperatura do filamento?
4. Radiação emitida por uma lâmpada
  - Como varia a radiação emitida pela lâmpada em função do comprimento de onda da luz?

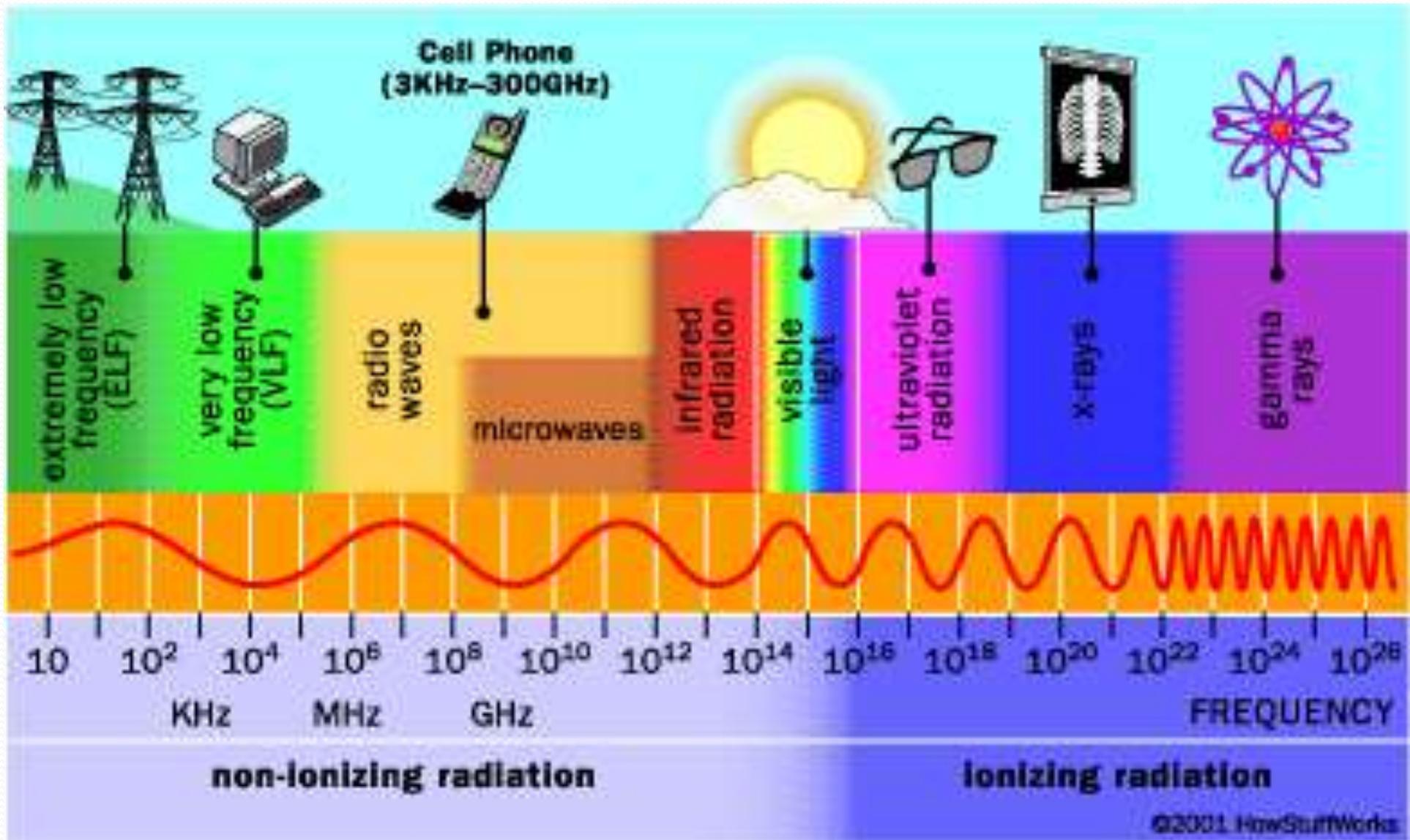
# Luz



- Luz é uma parte do espectro eletromagnético a qual o nosso olho é sensível
- Os objetos são visíveis ao olho humano porque:
  - Refletem a luz incidente
  - Emitem luz
- Nas temperaturas em que vivemos a maioria dos objetos são visíveis pela luz que refletem
- Em temperaturas suficientemente altas eles passam a ter luz própria

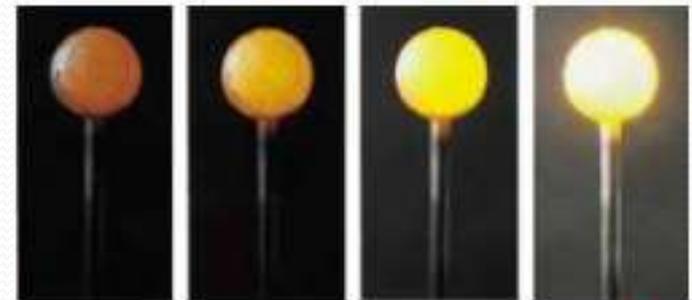


# Espectro Eletromagnético



# Radiação Térmica

- O objeto aquecido a uma temperatura relativamente baixa: irradia calor (Infra Ver.) que não é visível para nós
- Aumentando a temperatura a quantidade de radiação emitida aumenta rapidamente e se nota que a cor da luz emitida também muda
- Na verdade um objeto aquecido emite e absorve radiação térmica de todas as frequências, mas com o aumento da temperatura mais radiação é emitida e a frequência da radiação mais intensa aumenta



$T(K)$

# A lei de Stefan-Boltzman

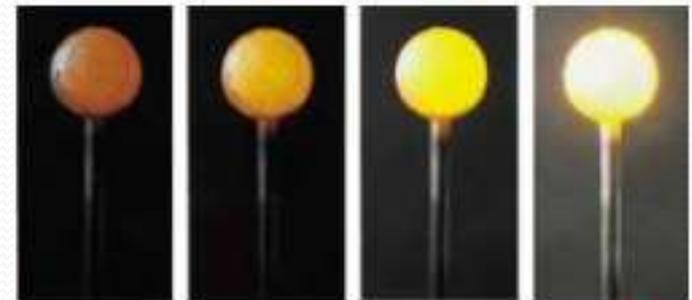
- Em 1879 J. Stefan verificou empiricamente que a potência emitida na forma de radiação por um objeto era proporcional à quarta potência de sua temperatura:



$$P_{rad} \propto T^4$$

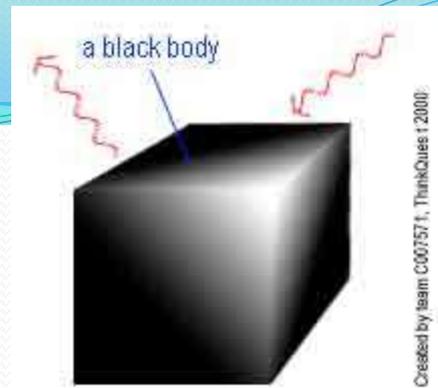
- $P_{rad}$  é a energia emitida por unidade de tempo, por unidade de área de um corpo a uma temperatura  $T$ .
- Em 1884 Boltzmann demonstrou essa lei teoricamente para o caso de um corpo negro.

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



# Corpo negro: definição

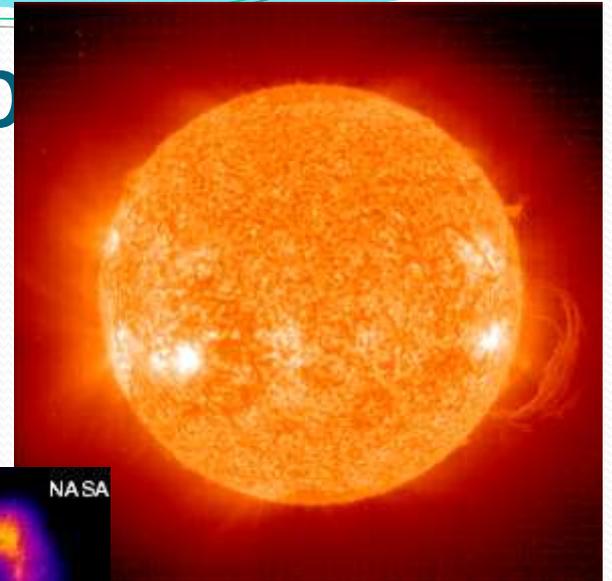
- Os corpos em equilíbrio emitem e recebem simultaneamente radiação do meio:
  - a radiação incidente pode ser refletida ou absorvida
  - a forma do espectro da radiação térmica emitida por um corpo depende de suas características físicas.
- Há um tipo de corpo quente que emite espectros de caráter universal: **o corpo negro ideal**.
- O corpo negro ideal não reflete radiação incidente: ele é um absorvedor perfeito.
  - Em equilíbrio as taxas de absorção e emissão são iguais, portanto ele é também um emissor perfeito.



**O corpo negro é uma idealização, mas uma idealização útil**

# Exemplos de “body” corp

- Visível:



- Infravermelho:



Humanos tem o pico  
em 930nm  
emitem tb n  
e ondas d



- Ultravioleta:



# Corpo negro

- **Nenhum objeto real é um corpo negro perfeito!**
  - **carvão negro** tem uma absorvidade (e emissividade) quase igual a **1**, mas somente para algumas frequências, que incluem a radiação visível → a absorvidade (e emissividade) é muito mais baixa no infravermelho distante.
  - **nós próprios**, nos comportamos quase como corpos negros perfeitos para a radiação infravermelha, mas certamente não para o caso de frequências mais altas.
- Será que a lâmpada se comporta como um corpo negro?
  - Para que faixa de frequência?

# Definição



- A emissividade ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \left( \frac{\text{quantidade de energia emitida por um corpo real}}{\text{quantidade de energia emitida por um corpo negro}} \right)_T$$

- importante: a definição é válida para corpos na mesma temperatura  $T$
- $\epsilon$  é um coeficiente adimensional .
- caracteriza a habilidade relativa da superfície de um corpo real (não negro) de emitir radiação.

# Emissividade e Absortância

- Um corpo a temperatura  $T$  em um meio a temperatura  $T_0$ .
  - Emite radiação para o meio mas também absorve radiação do próprio meio!
- Emissão de radiação (Lei de S.B.)

$$P_{rad}^{Emitida} = S\varepsilon\sigma T^4$$

- $\varepsilon$  é a emissividade do corpo e depende do material.  $\varepsilon = 1$  significa um corpo negro ideal.  $S$  é um fator geométrico.

$$P_{rad}^{Absorvida} = S\mu\sigma T_0^4$$

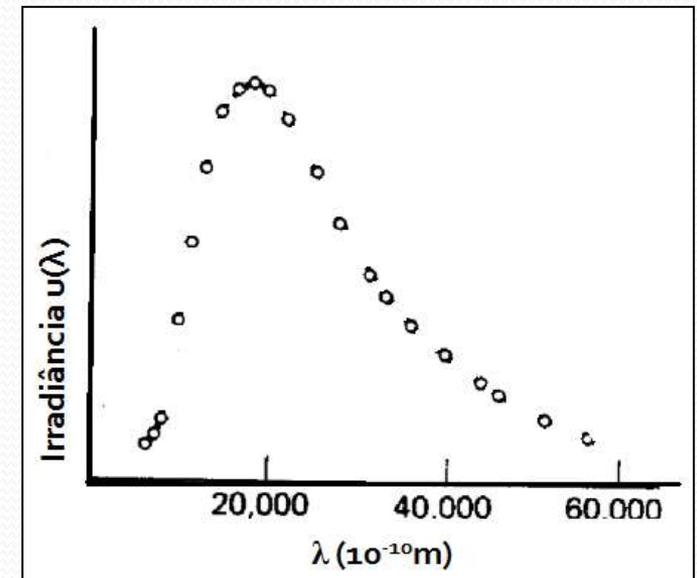
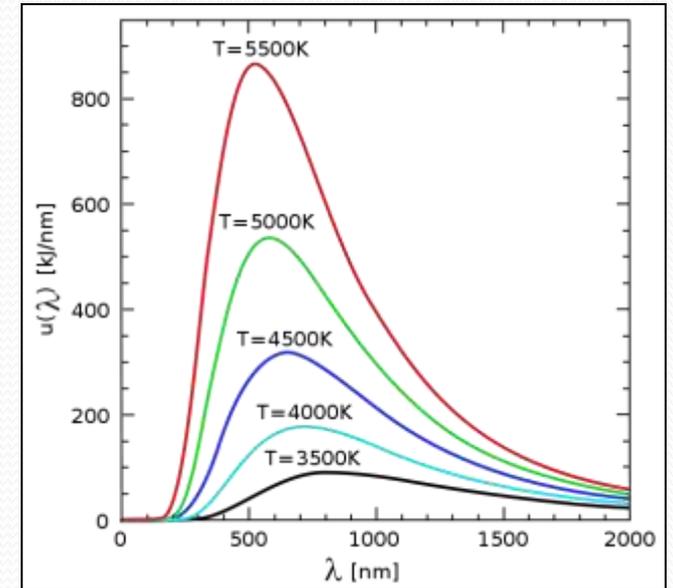
- Absorção de radiação do meio (Lei de S.B.)
  - $\mu$  é a absortância do corpo e depende do material.  $\mu = 1$  significa um corpo negro ideal.  $S$  é um fator geométrico

# Definição

- A **emissividade total** assume valores entre **0** e **1**.
  - Superfície perfeitamente refletora,  $\varepsilon=0$  (espelho perfeito)
  - Superfície perfeitamente absorvedora,  $\varepsilon=1$  (corpo negro ideal).
- A **absortividade total** também é uma quantidade adimensional e assume valores semelhantes à emissividade total.
- Em geral, a absortividade total e a emissividade total dependem da temperatura, isto é, são diferentes para temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  diferentes

# Radiação de corpo negro

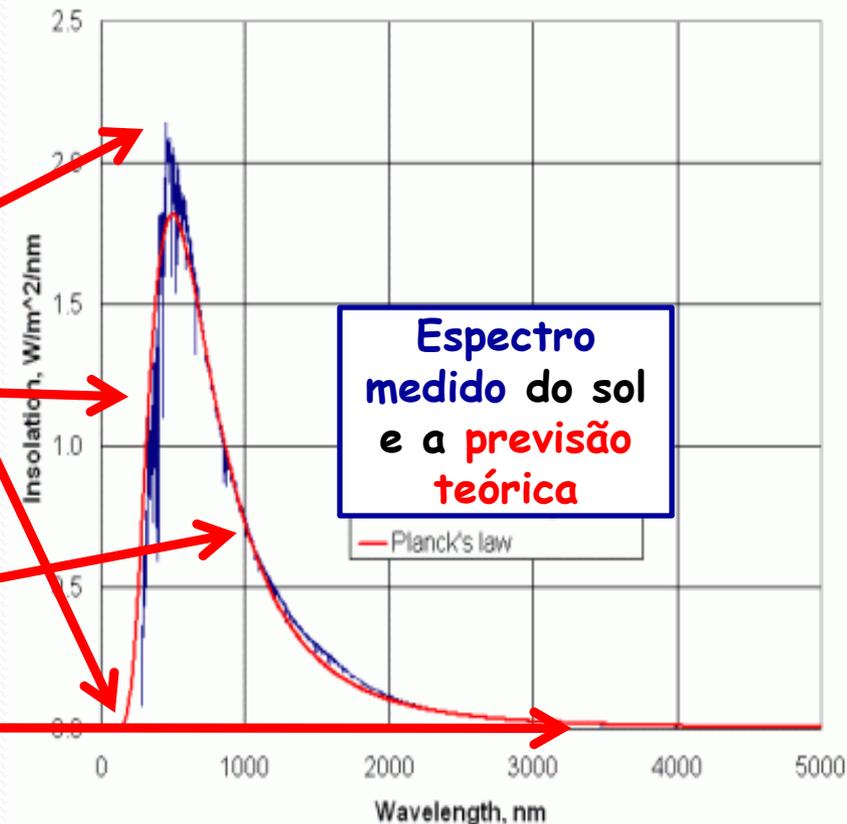
- Os corpos negros à mesma temperatura, independente de sua composição, emitem radiação com o mesmo espectro.
- A distribuição da radiação emitida em função da frequência depende só da temperatura do corpo
- Mas a física clássica falhava nesta explicação!!!



# Radiação de corpo negro: a teoria

- Como é a potência irradiada por um corpo negro a uma determinada temperatura?

- A potência irradiada é nula para comprimentos de onda muito pequenos
- Ela cresce rapidamente com o aumento do comprimento de onda
- Atinge um valor máximo para um determinado  $\lambda$
- Depois decaí mais lentamente à medida que o comprimento de onda cresce
- Aproxima-se de zero novamente quando  $\lambda$  se aproxima do infinito

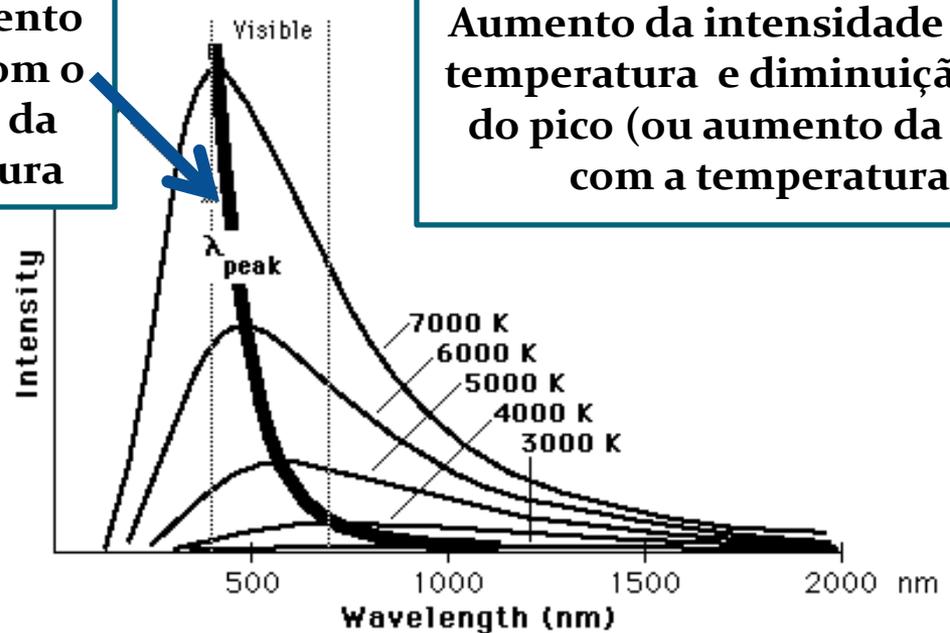


# A lei do deslocamento de Wien

- Em 1893 Wien deduziu usando termodinâmica para o corpo negro que o comprimento de onda (ou a frequência) do pico obedecia uma relação linear com a temperatura:
- $\lambda T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$



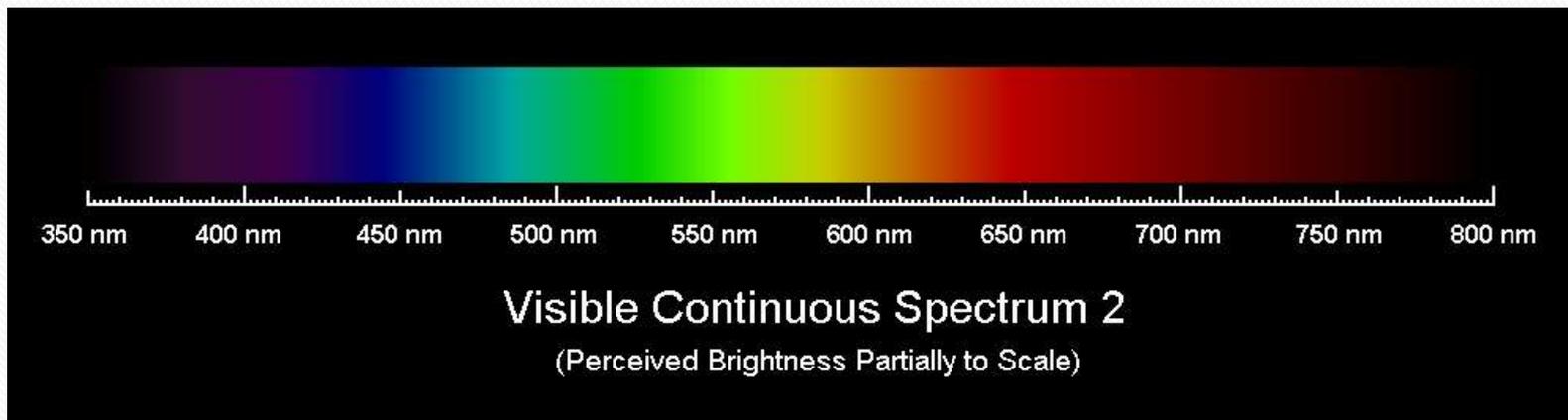
Diminuição de  $\lambda$  (ou aumento da freq) com o aumento da temperatura



Aumento da intensidade com a temperatura e diminuição do  $\lambda$  do pico (ou aumento da freq) com a temperatura

# Temperatura de um corpo negro

- Então, a lei do deslocamento de Wien permite encontrar a temperatura da superfície de um corpo negro:
  - Medindo a distribuição de radiância espectral, com o valor do comprimento de onda do pico, obtém-se a temperatura
- **Sol** :  $\lambda_{\max} = 550\text{nm}$  (amarelo esverdeado) »  $T=5700\text{K}$
- **Estrela Polar**:  $\lambda_{\max} = 350\text{nm}$  (ultravioleta) »  $T=8300\text{K}$

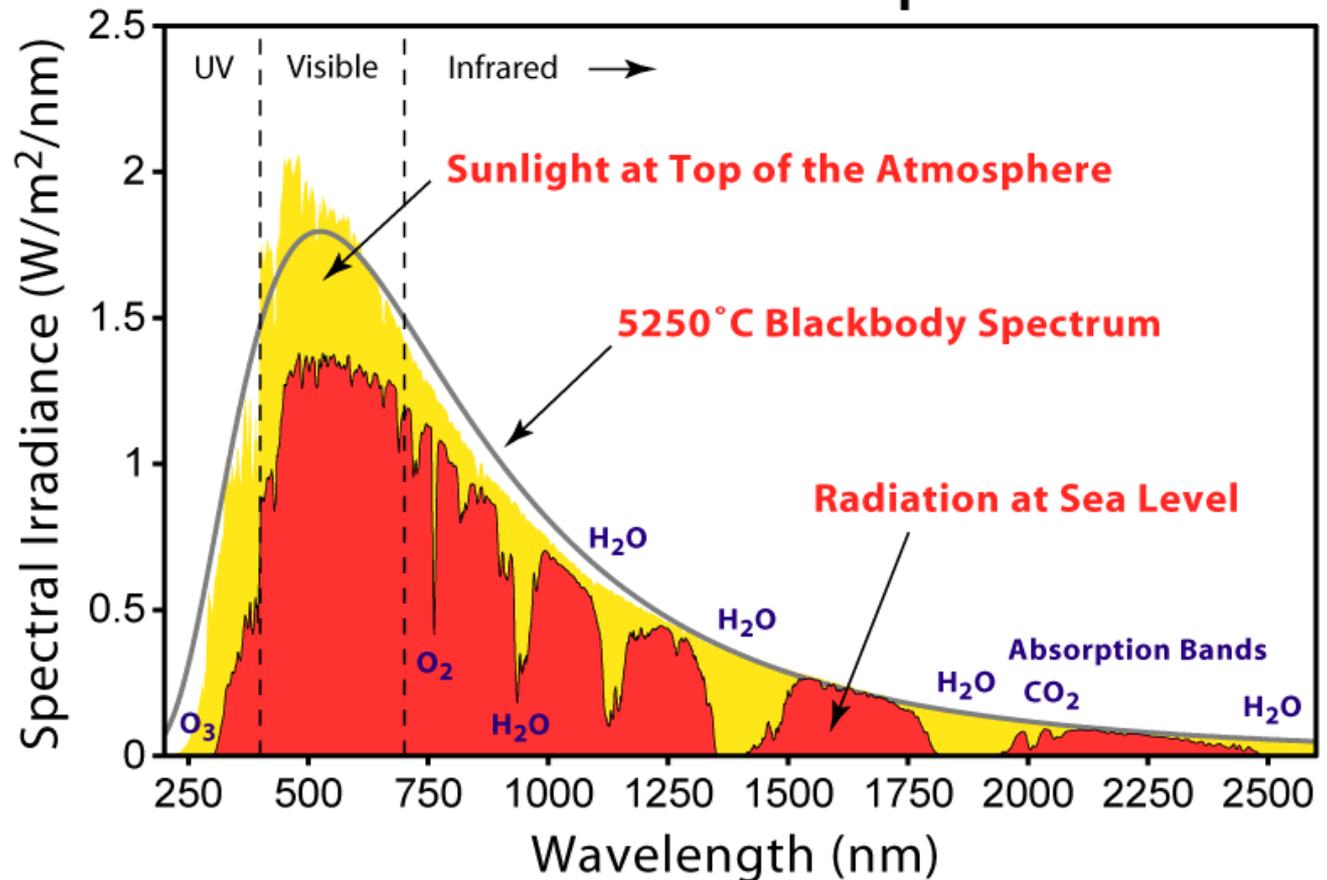


# O Sol é um corpo negro quase perfeito

- $\lambda_{\max} = 510\text{nm}$  (amarelo esverdeado) »  $T=5620^{\circ}\text{K}$



## Solar Radiation Spectrum



# Temperatura de um corpo negro

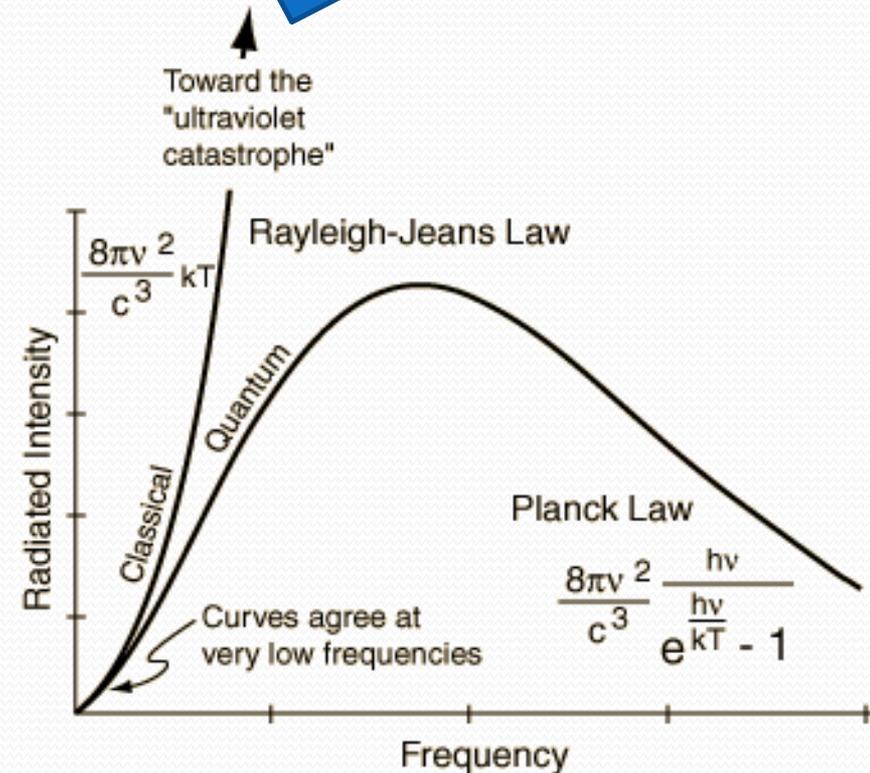
- **Estrela Polar:  $\lambda_{\text{max}}=350\text{nm}$  (início do ultravioleta) »  $T=8300^{\circ}\text{K}$**



# A distribuição de energia da radiação de corpo negro

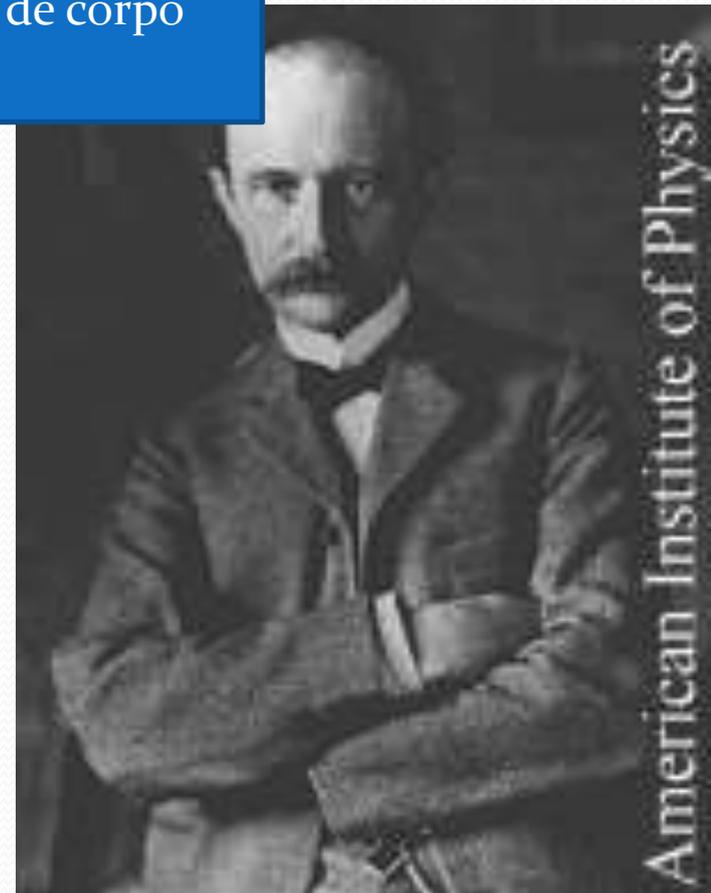
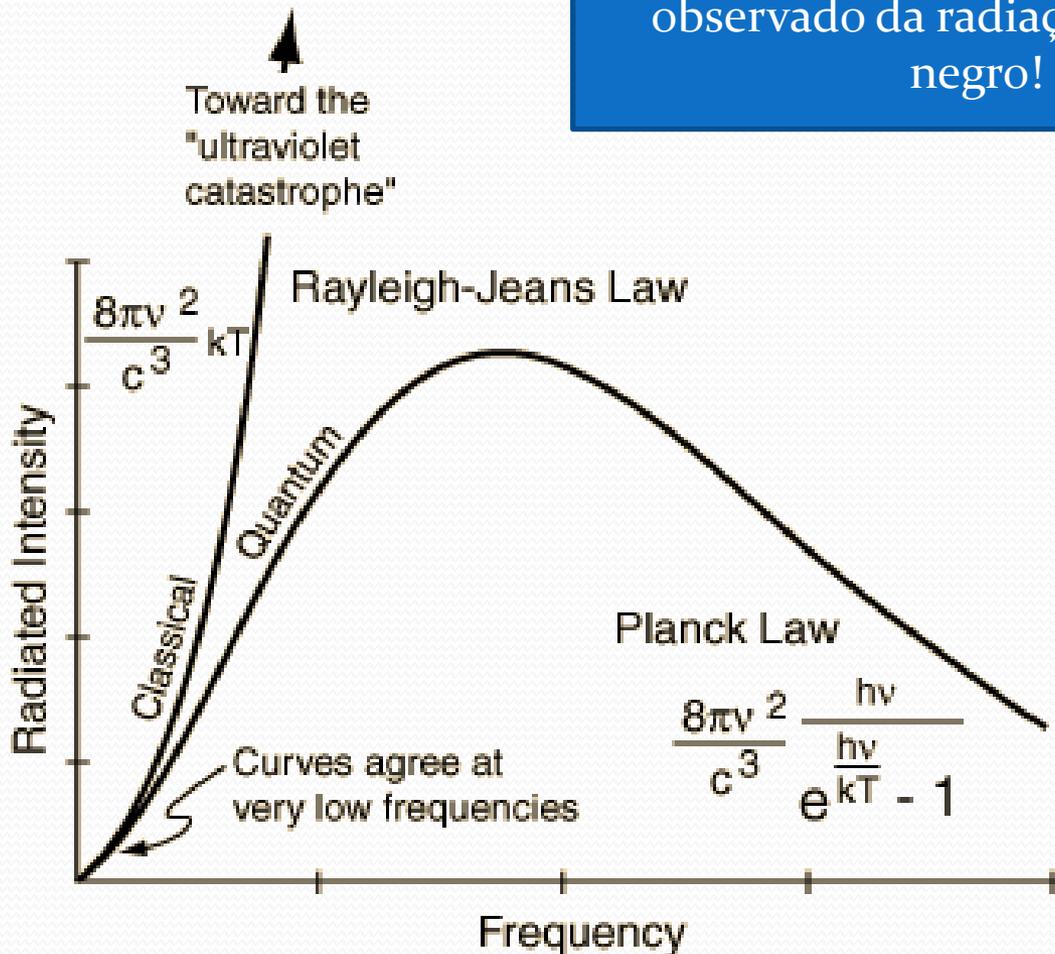
- No final do século XIX, com as melhorias no aparato experimental (O. Lummer, E. Pringsheim, H. Rubens e F. Kurlbaum), foi possível medir a potência (ou a radiância espectral  $R_\nu$ ) para um grande intervalo de frequências.
- Nessa época os físicos J.W.S. Rayleigh e J.H. Jeans fizeram o cálculo da distribuição de frequências da radiação de corpo negro, baseado em hipóteses da física clássica.

Totalmente discrepante da distribuição medida! Havia alguma concordância só para baixas frequências

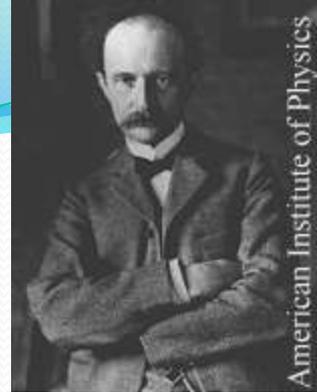


# Início da física quântica

Planck introduziu a idéia do fóton para conseguir explicar o espectro observado da radiação de corpo negro!



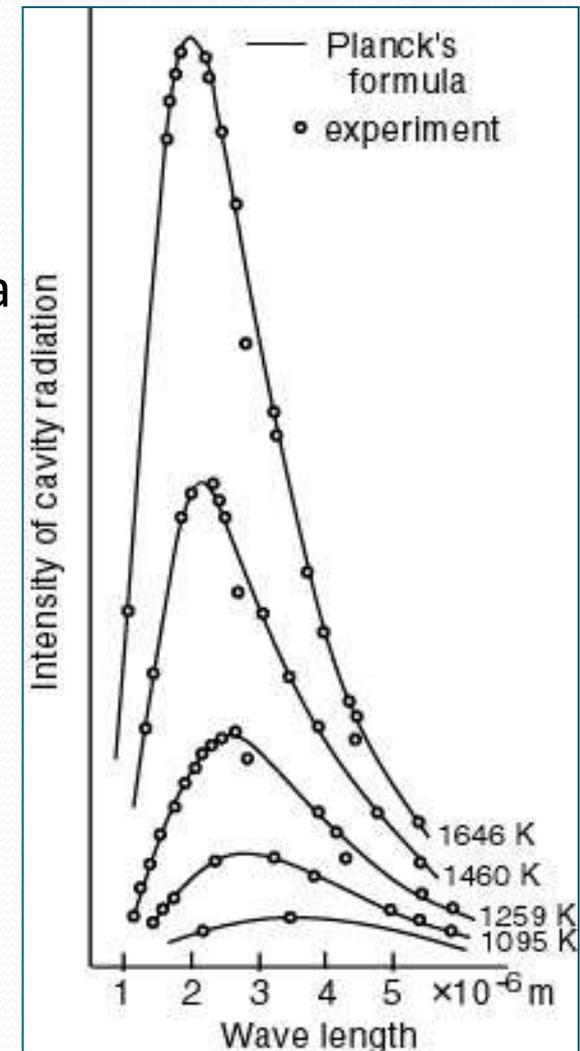
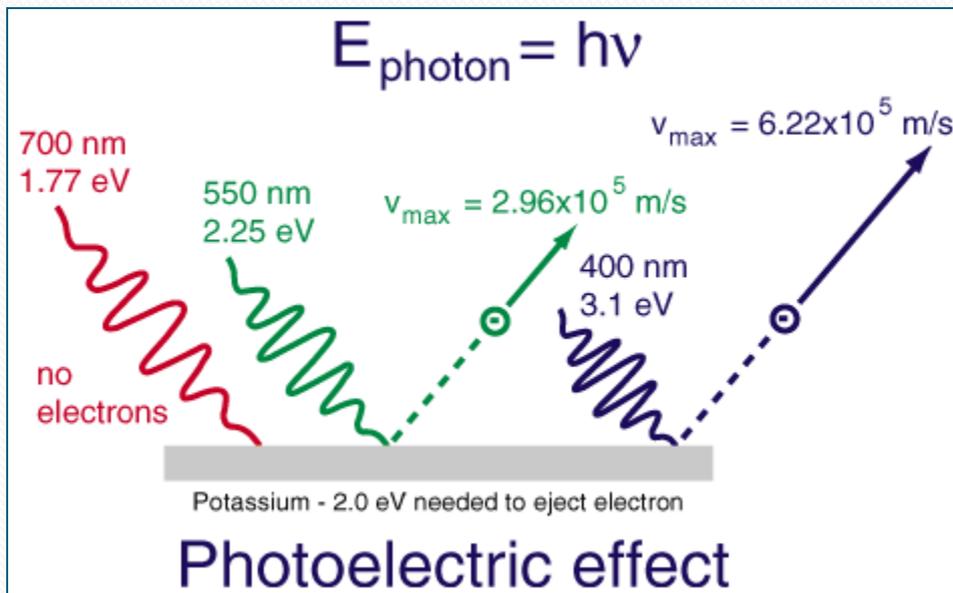
# A hipótese de Planck



- A ciência avança muitas vezes com revoluções, mas as pessoas têm, em geral, uma grande dificuldade em aceitar conceitos revolucionários.
- Na tentativa de explicar o comportamento da distribuição da radiação de corpo negro em função do comprimento de onda, em **1900**, Max Planck conseguiu reproduzir a forma da curva experimental considerando que **a energia associada à radiação de corpo negro** não era uma variável contínua (física clássica), mas **discreta**:
  - A energia radiante é emitida em pequenos “pacotes”, ou quanta (1 pacote= 1 quantum)
  - Cada quantum tem uma energia proporcional à frequência da radiação:  **$E=h\nu = hc/\lambda$**

# A fórmula de Planck

- A ideia da quantização da energia era tão revolucionária que o próprio Planck, na época em que a postulou não estava certo se ela era apenas um artifício matemático ou a descrição correta do fenômeno natural.
- A hipótese da quantização da energia não foi aceita até **1905** quando Einstein a usou para explicar o efeito fotoelétrico.



# A fórmula de Planck

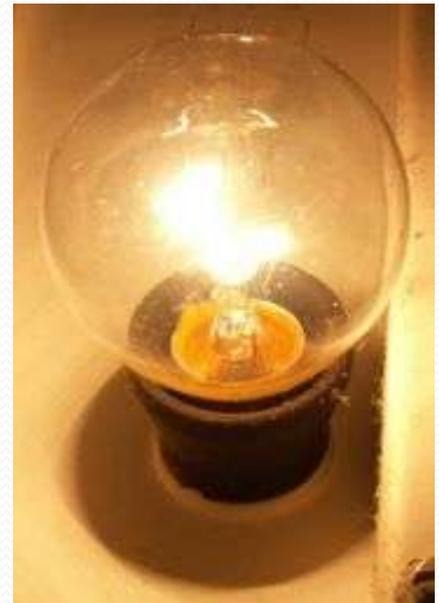
- A fórmula (ou Lei) de Planck descreve a intensidade de radiação (irradiância) emitida por unidade de área da superfície emissora, por unidade de ângulo sólido, por unidade de frequência de um corpo negro ideal a uma temperatura  $T$ :

$$I(\gamma, T) = \frac{2h\gamma^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\gamma}{kT}} - 1} \quad \text{ou} \quad I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

- A lei de Stephan ( $P_{\text{irr}} \propto T^4$ ) é obtida integrando-se a lei de Planck sobre todo o espectro de comprimentos de onda.
- A lei de Wien ( $\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$ ) é obtida calculando-se o máximo da equação de Planck: derivando-se a fórmula de Planck em função de  $\lambda$ :

$$\frac{dI(\lambda)}{d\lambda} = 0$$

Esta Semana:  
medida do espectro de emissão da  
lâmpada



# Vamos medir o espectro de emissão da lâmpada

- O espectro de emissão da lâmpada = irradiância em função do comprimento de onda para cada temperatura, pode ajudar na compreensão do que, de fato, o filamento emite:
  - o espectro pode ser medido no laboratório com um instrumento chamado de espectrofotômetro.
- Vamos medir o espectro de emissão da lâmpada como função do comprimento de onda (ou frequência) e comparar com a previsão de Planck.

# Resultados da Semana Passada

- O que já foi medido até agora:

- os gráficos:  $P \times T$  e  $P \times (T - T_0)$

- Ajustaram

$$P_{\text{total}} = A \cdot \Delta T^\alpha + B \cdot T^\beta + C$$

- e não obtiveram a dependência com  $T^4$

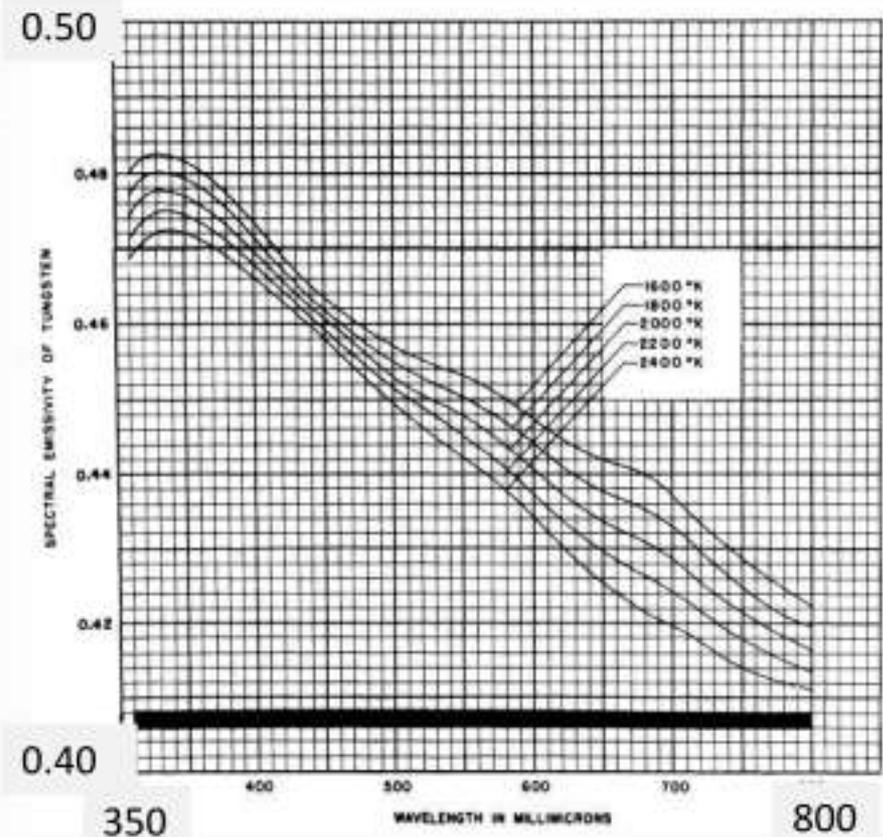
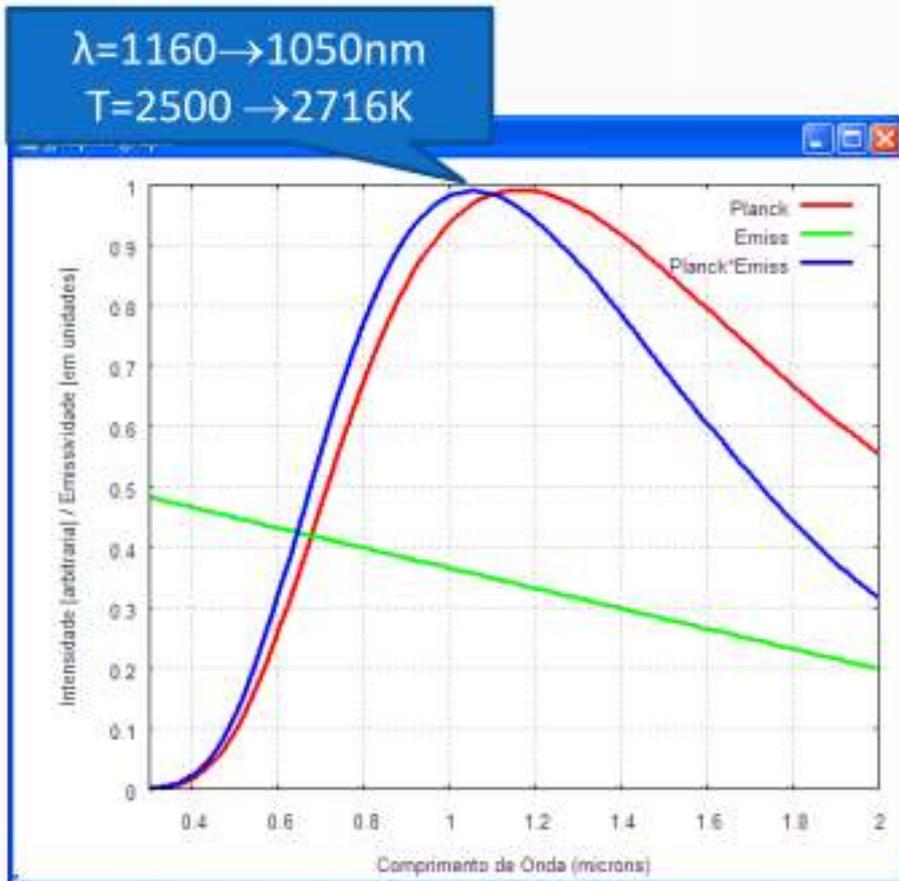
- Isso significa que:

- Ou a hipótese  $P = \text{cte} T^4$ , não é verdadeira.

- Ou esquecemos de considerar alguma coisa

# Emissividade do Tungstênio

- Neste trabalho do MIT de 1957 foi medido a emissividade do tungstênio. Eles encontraram que ela diminuía com o comprimento de onda e com a temperatura!



# Emissividade: pode ser medida

- A temperatura do filamento, neste caso, foi medida independentemente do comportamento da emissividade através do Espectro-pirômetro F.A.R.:
  - tendo  $T$  e o espectro emissão, se obtém a curva da emissividade como função de  $\lambda$ .

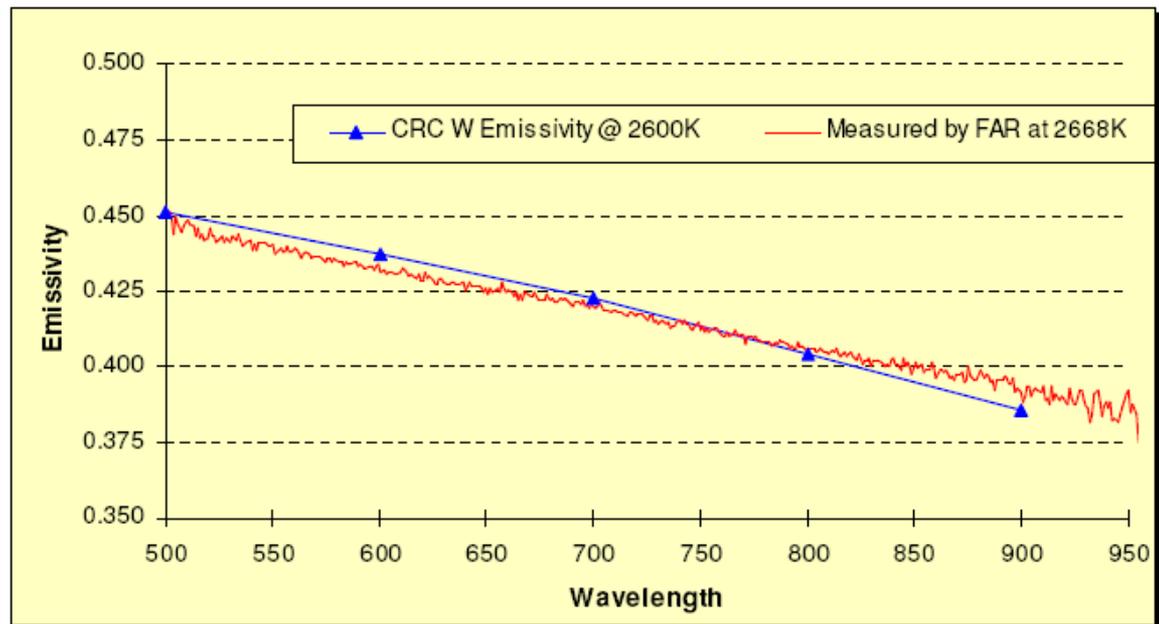


Figure 3. Emissivity as measured by a FAR SpectroPyrometer on a new Type A tungsten halogen projection lamp graphed on the same axes with one of the traces of Figure 2. FAR data normalized to CRC data at 750 nm.

# Emissividade: medida

- Como é praticamente impossível se prever a emissividade de um filamento de tungstênio como função de  $\lambda$ , (ela além de depender de  $T$ , também depende de características geométricas e de fabricação do filamento) o que fizemos foi adotar um trabalho que mediu a temperatura e o espectro de emissão para um filamento semelhante ao nosso:
  - Veja que ela depende de  $\lambda$ , mas não tem uma dependência acentuada da temperatura.

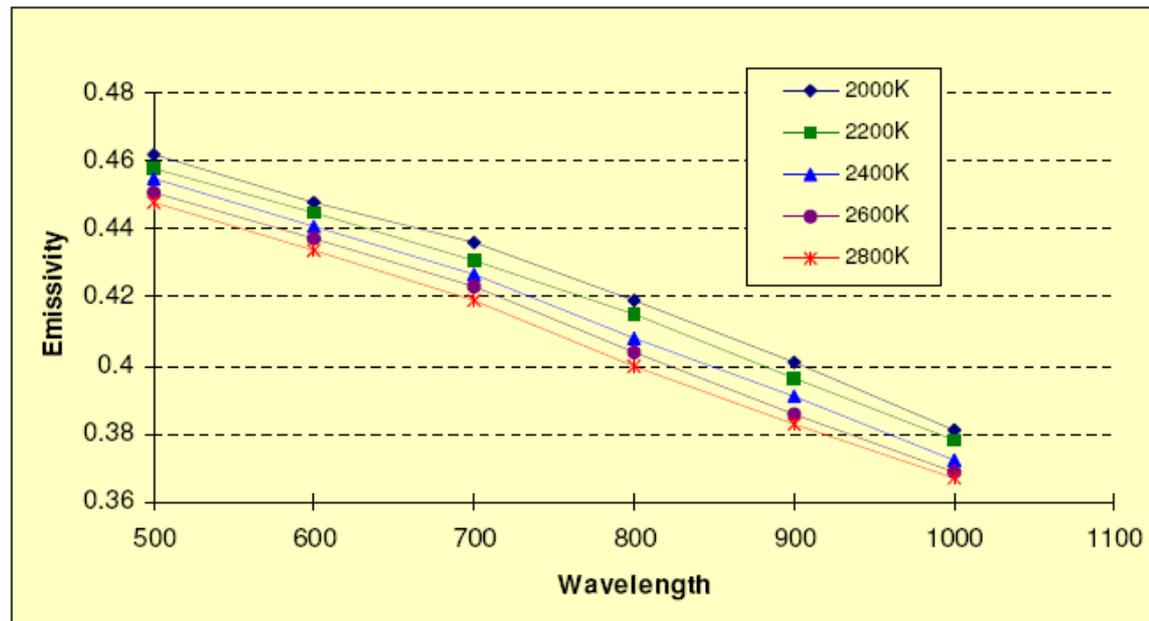


Figure 2. Data taken from CRC Handbook of Chemistry and Physics, 60<sup>th</sup> Ed., pp. E-381

# Entender a lâmpada

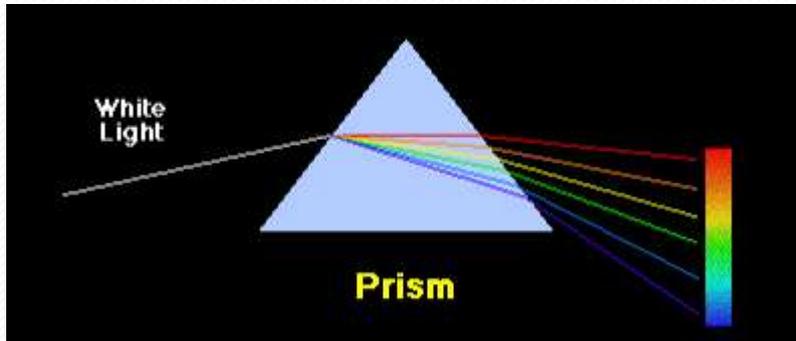
- Ou seja, a emitância do nosso material deve depender da temperatura, pois medimos uma variação de  $T^5$  ao invés de  $T^4$
- Como testar isso?
  - Vamos medir o espectro de emissão da lâmpada como função do comprimento de onda (ou frequência) e comparar com a previsão de Planck.
- Como medir o espectro de emissão da lâmpada?
  - Com um instrumento chamado **espectrofotômetro**.
  - O espectrofotômetro mede a energia irradiada em função do comprimento de onda (ou frequência)

# O que faz um espectrofotômetro?

- Os **espectrofotômetros**, além de fornecer a posição angular de cada componente, mede também a intensidade de cada linha.
  - O espectrômetro com o qual vamos realizar as medidas, utiliza um foto sensor que se acopla a um micro-computador através de uma interface, permitindo que os dados sejam armazenados no computador.
- Sistemas de análise espectral baseados em dispersão angular têm como característica mais importante a relação entre a posição angular e o respectivo comprimento de onda, ou seja,  $\theta$  e  $\lambda$ , que deve ser conhecida.
  - Em geral, a função  $\theta(\lambda)$  é determinada por meio de calibração utilizando um espectro conhecido.

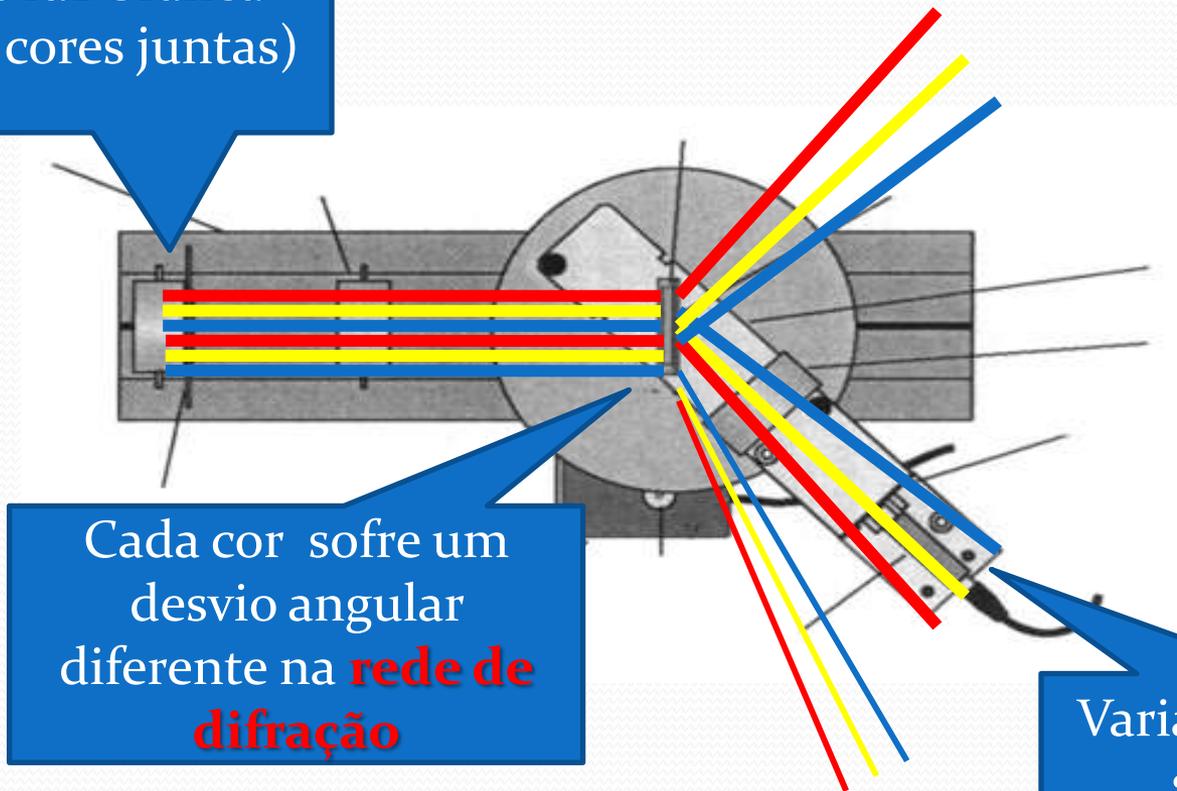
# O espectrofotômetro

- No caso desta experiência o elemento dispersor utilizado quanto para o espectrofotômetro é uma rede de difração de transmissão. A equação da rede para incidência perpendicular será discutida a seguir, assim como características principais do espectro.
- A irradiância,  $\mathbf{I}$ , é definida, em termos físicos, como a energia radiante média por unidade de área e por unidade de tempo.



# O espectrofotômetro: esquema

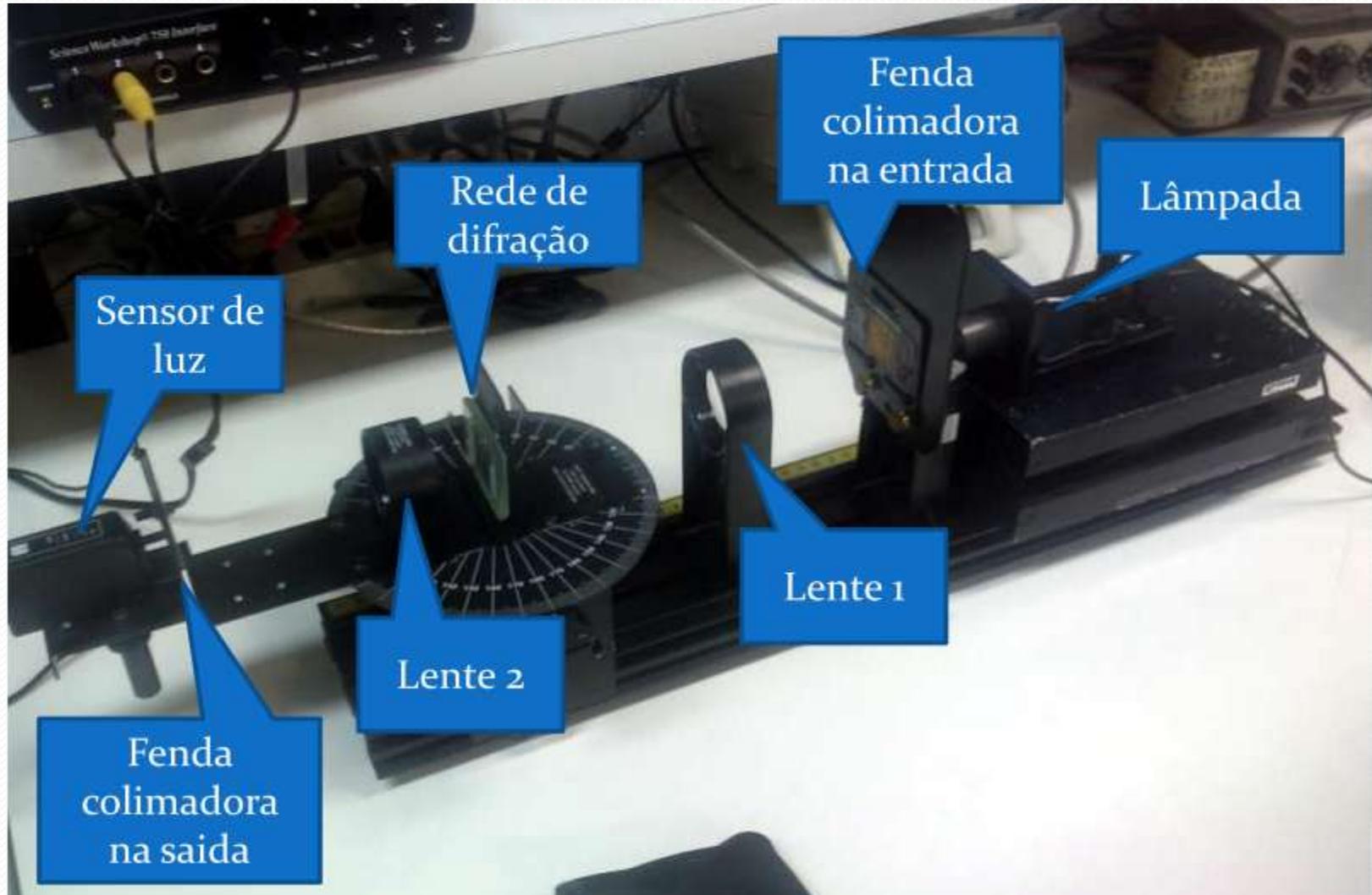
Feixe de luz branca  
(todas as cores juntas)



Cada cor sofre um  
desvio angular  
diferente na **rede de  
difração**

Variando a posição do  
sensor de luz,  
medimos a intensidade  
de cada cor  
separadamente

# Visão Geral do Espectrofotômetro



# Fenda de Entrada



# Rede de difração



E também  
centralizada com o  
eixo de rotação



A rede deve estar  
alinhada neste  
plano...

# Fenda de Saída



Usar a fenda larga na saída

Os arco-íris devem estar simétricos (sistema alinhado).

CUIDADO! A imagem central (fenda iluminada) deve estar em foco... Atenção para não focalizar no filamento.

Alinhar o máximo central (único feixe de saída com luz branca) em zero graus e também com a fenda de saída

# Circuito da Lâmpada



# Alinhando o Espectrofotômetro

- Para alinhar o instrumento: a imagem da fenda de entrada (luz branca) deve estar centrada na fenda de saída.
- A mesa que suporta a lâmpada deve estar em cima do trilho do instrumento.
- As fendas utilizadas são as maiores tanto na entrada quanto na saída.
- A lâmpada deve estar a 2 ou 3 cm da fenda de entrada.
- A rede de difração deve estar com a face virada para a lâmpada exatamente na linha)  $0^\circ \rightarrow 180^\circ$  ou os ângulos medidos terão um erro sistemático.

# Preparando a aquisição de dados

- Esse instrumento funciona com uma interface Pasco e o programa de aquisição **DataStudio**:
  - Ligue o **light sensor** no **canal A** da interface
  - Ligue o **rotary motion sensor** (ele vai automaticamente quando clica).
- Clique no **rotary motion** e abre-se a janela do **set up**:
  - ajuste a resolução do sensor de posição para **1440 divisão/grau**
  - ajuste a frequência de amostragem para **50Hz**.
- Com a função **calculate** definir o ângulo correto:
  - O instrumento dá o ângulo do pino, enquanto o disco calibrado dá uma volta, o pino gira **60** voltas, portanto o ângulo correto é a leitura do instrumento(ângulo do pino) dividido por **60**.
  - No **calculate** definir **ângulo=x/60**.
- Comece as medidas movimentando o braço do espectrofotômetro, onde está o **light sensor**, de forma contínua e pausada.

No site há um arquivo do DataStudio com estas configurações prontas!

# As medidas

- Medir o espectro da lâmpada para **no mínimo 3** temperaturas diferentes (por exemplo: 1800, 2400 e 3000K)
  - Para cada temperatura determinar a potência que deve ser aplicada à lâmpada através do gráfico de potência em função da temperatura obtido previamente.
  - Conhecido o valor da potência necessária, determinar o valor de tensão e corrente que deve ser aplicado à lâmpada para obter a temperatura desejada
- Ou então faça ao contrário: escolha 3 brilhos da lâmpada no “olhômetro” e use as medidas de  $V \times i$  para encontrar o resto (usando as medidas das semanas anteriores)

# Atividades da Semana – Parte 1

## Wien:

- Dos espectros medidos, determine  $\lambda_{\max}$  (como?)
- De  $R/R_0$  determine a temperatura
- Verifique se a lei de Wien  $\tau = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K} / \lambda_{\max}$  é válida.
  - Será que 3 pontos são suficientes? Lembre-se de comparar a curva teórica com os dados experimentais!
- Compare e discuta
- É preciso considerar a emissividade? Como modificar a lei de Wien neste caso?

# Atividades da Semana – Parte 2

## Espectro

- Faça o gráfico dos espectros medidos e compare (no mesmo gráfico) com a expectativa teórica
  - Use a fórmula de Planck da aula e lembre-se de normalizar as duas curvas pelo valor do máximo (a medida de intensidade do DataStudio não é absoluta e não temos os fatores geométricos da lâmpada)
- Faça um ajuste não linear entre seus dados experimentais e o produto da função de planck pela emissividade.
  - Como estamos usando um sensor infra-vermelho, cuja resposta só é linear acima de 700nm, exclua a região visível do ajuste
- Assim serão 3 “curvas” para cada temperatura: dados, planck, ajuste de planck\*emissividade

# Atividades da Semana – Parte 3

- Compare, comente e discuta, por exemplo:
  - Qual a diferença entre as posições dos máximos?
  - Como é a concordância para  $\lambda$ 's altos?
  - E para  $\lambda$ 's baixos?
- A dependência da emissividade com o comprimento de onda explica a discrepância observada para os  $\lambda_{\text{máx}}$  obtidos com a fórmula de Wien ?
- O filamento da lâmpada se comporta como um corpo negro?
  - é ideal ou mais ou menos? Quantifique o mais ou menos se for o caso.

# Atividades da Semana – Parte 4

- Estime a porcentagem de radiação emitida pela lâmpada
  - que está na região visível do espectro visível
  - e a que está na região do infravermelho do espectro.
  - DICA: Se a função ajustada representa bem os dados, você pode integrá-la, ao invés de integrar os dados!
- **A lâmpada é um bom iluminador?**
  - **Sim? Ou não? Porque? Esse porque**
  - **deve ser justificado quantitativamente!!**

Como estimar o erro na integral do espectro? E na estimativa da fração de luz no visível???

Spectra From Common Sources of Visible Light

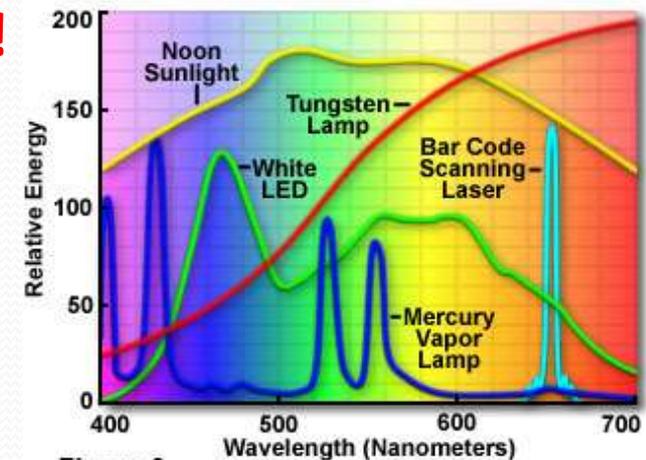


Figure 3

# Para facilitar:

- No desktop existe um arquivo chamado **Funções de corpo negro**, que contém uma planilha do Origin com os dados de emissividade (para **2400K**) como função de  $\lambda$ , a equação de Planck (para as **3** temperaturas medidas) e o produto da emissividade pela equação de Planck para os **3** casos:
- Lembre-se que tem no meu site uma série de tutoriais sobre ajuste de funções, inclusive não lineares! Inclusive usando o Origin!!!
- No site do labflex (e nos computadores do laboratório) há um arquivo do DataStudio preparado para aquisição com o espectro fotômetro.