

Lâmpada

Parte 2 – Espectro

Aula 10

Prof. Henrique Barbosa

Edifício Basílio Jafet - Sala 100

Tel. 3091-6647

hbarbosa@if.usp.br

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

Problema a ser investigado

- Quando utilizamos uma lâmpada transferimos potência elétrica ($P = V i$) para a lâmpada.
- Como esta potência é utilizada?
 - Existe uma relação entre a potência e o aquecimento da lâmpada?
 - Isso pode alterar as características elétricas da lâmpada, como a resistência?
- Como é a luz emitida por uma lâmpada?

Atividades da Semana (parte 1)

- Medir a curva característica de uma lâmpada comum de automóvel
 - Valores nominais: 10 W, 12V
 - Qual circuito (1 ou 2) é mais adequado? Discuta.
 - Levantar a curva característica desde tensões baixas na lâmpada até a tensão de operação (na lâmpada).
- Qual é a potência na qual a lâmpada começa a emitir luz? Discuta, levando em consideração a subjetividade dessa medida.
- Como a resistência depende da potência fornecida? Compare com o esperado nominalmente.

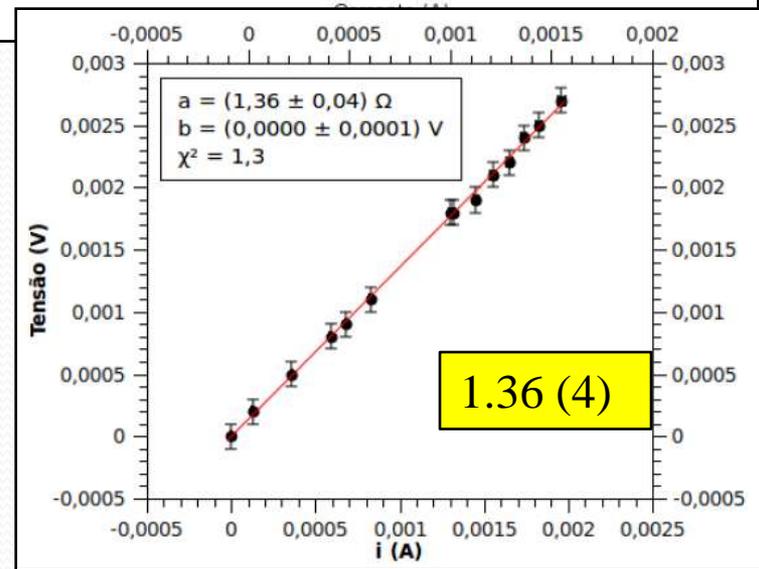
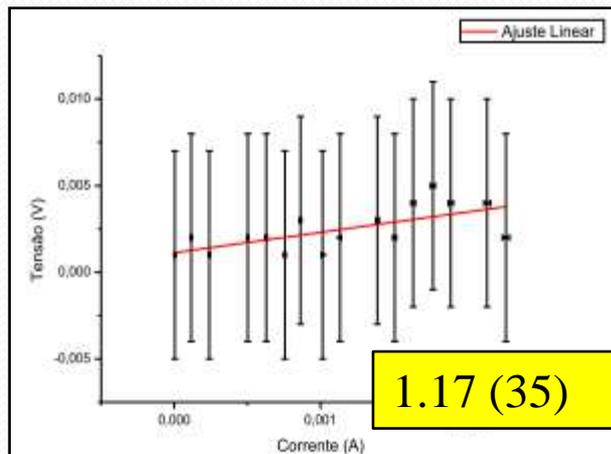
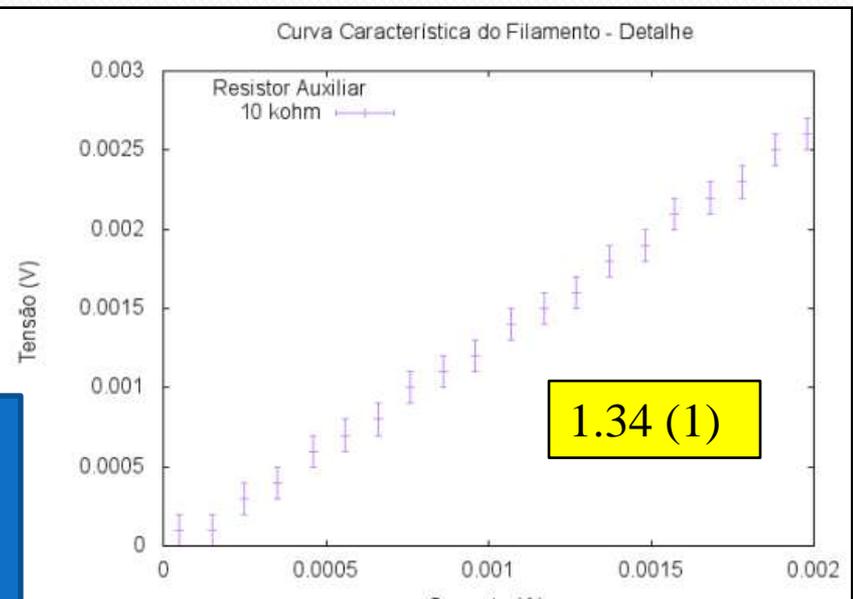
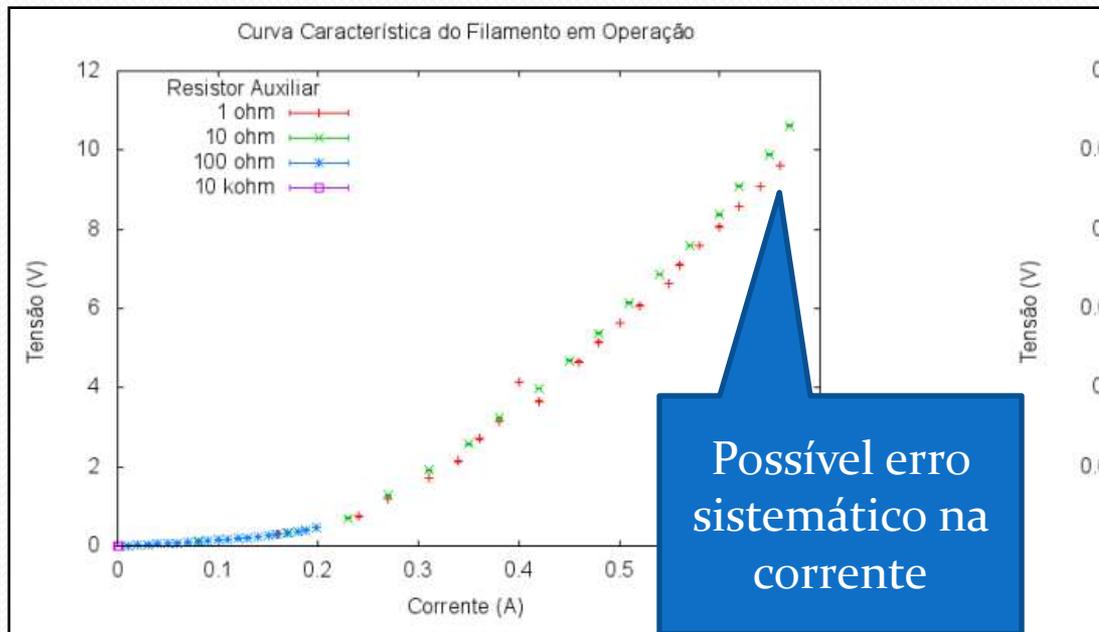
Tarefas da semana (2)

Como medir R_0 ?

- 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?
- Realizar medidas em correntes realmente baixas
 - Como limitar a corrente?
 - Utilizando um resistor elevado entre **5** e **10 k Ω** .
 - 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 use **$R_0=1.1\text{ohm}$** no cálculo da temperatura, para que os outros resultados não fiquem ruins.

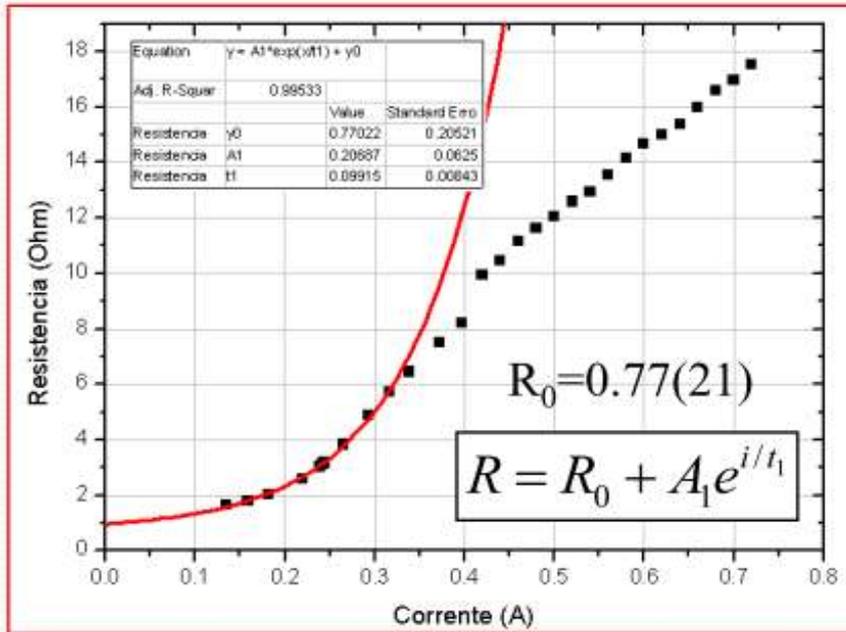
R_0 (ohm) com corrente baixa



R_0 (ohm) - Comparação

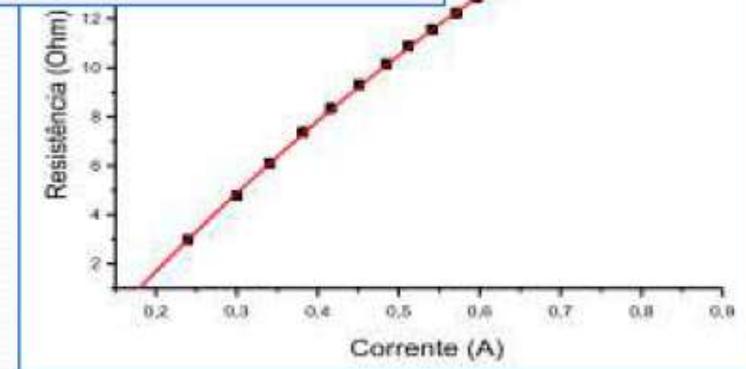
Multímetro	Extrapolação	Baixa corrente	Grupo	
2.50 (2)		1.34 (1)	H1	
2.50 (2)		1.37 (5)	H2	
	Porque ninguém fez ??	1.36 (4)	H3	
			H4	
		1.17 (35)	H5	
1.7 (3)			1.35 (4)	H6
2.0 (3)			1.393 (9)	H7
2.50 (2)		1.07 (1)	H8	
			H9	
			h10	
			H11	

R_0 com Extrapolação (ano passado)



$$R = V / i$$

A menor corrente foi de 150mA...
a extrapolação fica ruim, não dá
pra ver o trecho linear.
Não conseguiram extrapolar...

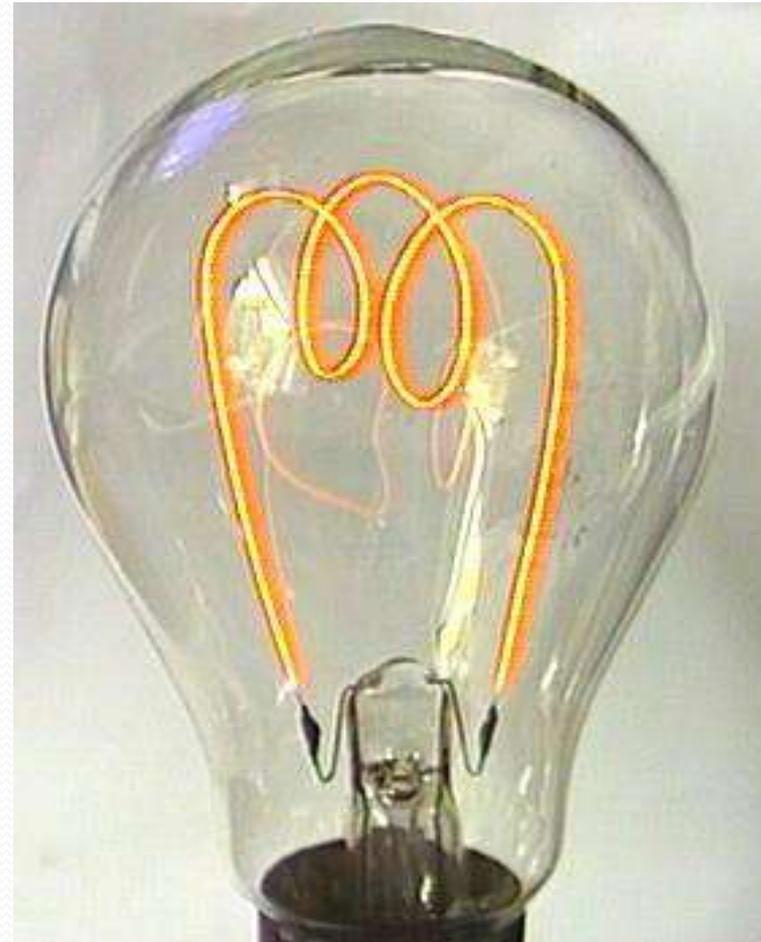


Outra maneira era calcular a resistência e tentar encontrar uma função para extrapolar para $i=0$
Cuidados

- A função escolhida deve ser adequada ao nosso modelo físico: R diminui se i diminui

Troca de calor em uma Lâmpada

- Filamento aquecido + gás
 - Irradiação do filamento aquecido
 - Condução pelo filamento/suporte
 - Convecção no gás
- Como investigar estas hipóteses?
 - Medindo potência em função da temperatura da lâmpada
 - O que nós esperamos desta curva?
- O que é esperado para condução, convecção e irradiação?



Condução

- Lei de Fourier para condução de calor
 - Transferência de energia entre moléculas de um corpo devido à diferença de temperatura
 - Fluxo de calor é proporcional à diferença de temperatura

$$\vec{q} = -k \vec{\nabla} T \xrightarrow{1D} q = -k_x \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

\vec{q} = fluxo de calor [W/ ²]

k = condutividade do material

Convecção

- A potência perdida por convecção é mais significativa para temperaturas mais baixas. Nessas temperaturas, a lâmpada também emite no infravermelho, mas a convecção predomina.
- Foi medido empiricamente e se verifica que:

$$P_{convec} \propto (T - T_0)^\alpha$$

- Onde **T** é a temperatura do filamento, **T₀** é a temperatura ambiente e o coeficiente α é da ordem de 1,38.
 - B. S. N. Prasad and Rita Mascarenhas, Am. J. Phys. 46, 420 (1978).
- Para temperaturas mais altas, a emissão por radiação deve predominar

Radiação

- Um corpo a temperatura **T** em um meio a temperatura **T₀**.
 - Emite radiação para o meio mas também absorve radiação do próprio meio!
- Emissão de radiação (Lei de S.B.)

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

- **ε** é a emissividade do corpo e depende do material. **ε = 1** significa um corpo negro ideal. **S** é um fator geométrico.

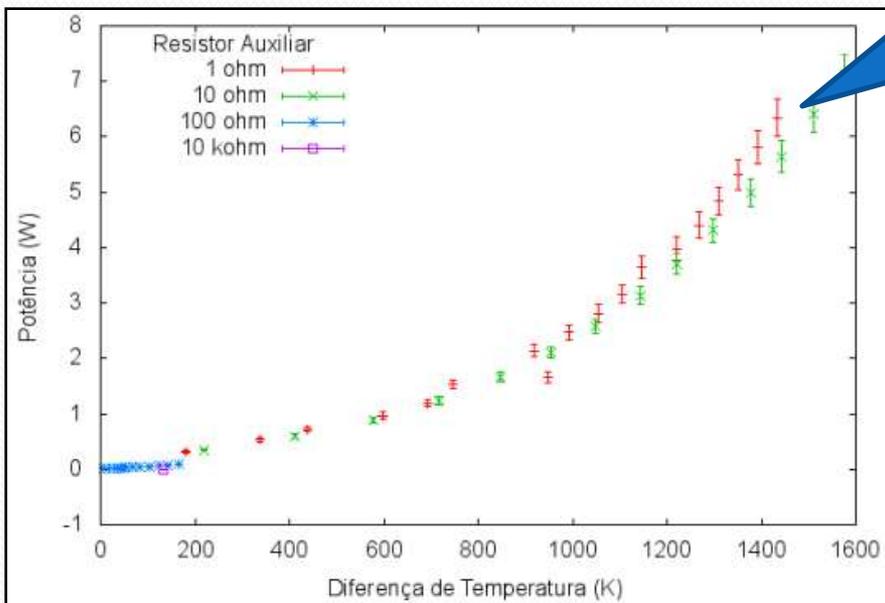
$$P_{rad}^{Absorvida} = S \mu \sigma T_0^4$$

- Absorção de radiação do meio (Lei de S.B.)
 - **μ** é a absorptância do corpo e depende do material. **μ = 1** significa um corpo negro ideal. **S** é um fator geométrico

Tarefas da semana (3)

- Fazer 2 gráficos: da potência em função da temperatura, T , e outro da potência em função de $(T-T_0)$ e ver qual é o valor do coeficiente angular.
 - Analise as 2 curvas e veja se é possível descobrir a relação funcional de $P \times T$ e $P \times (T-T_0)$.
 - Comente os resultados, dá para justificar os comportamentos observados?
 - Compare seus resultados com a previsão acima e com os resultados de seus colegas.
- Lembre-se da conservação de energia e das diferentes maneira da lâmpada dissipar a energia recebida

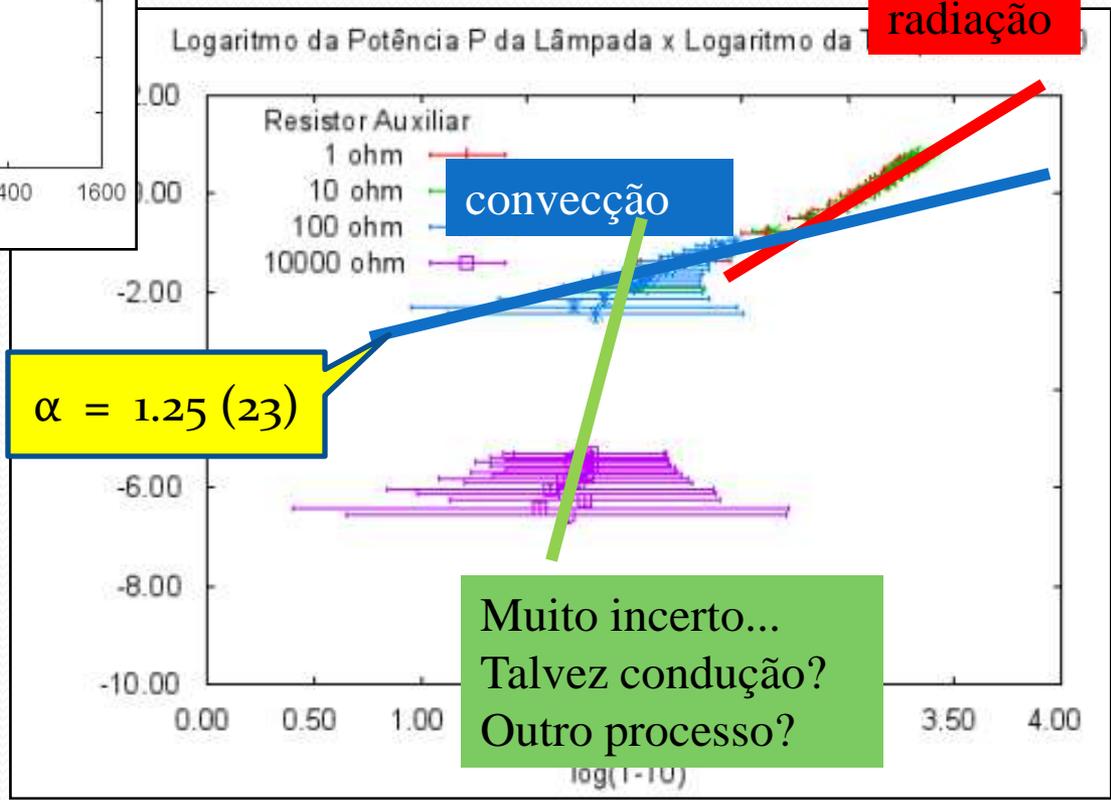
Potência x $T-T_0$



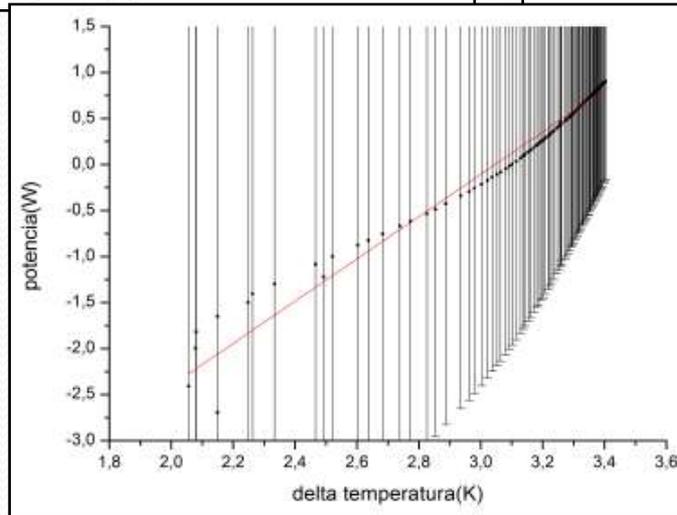
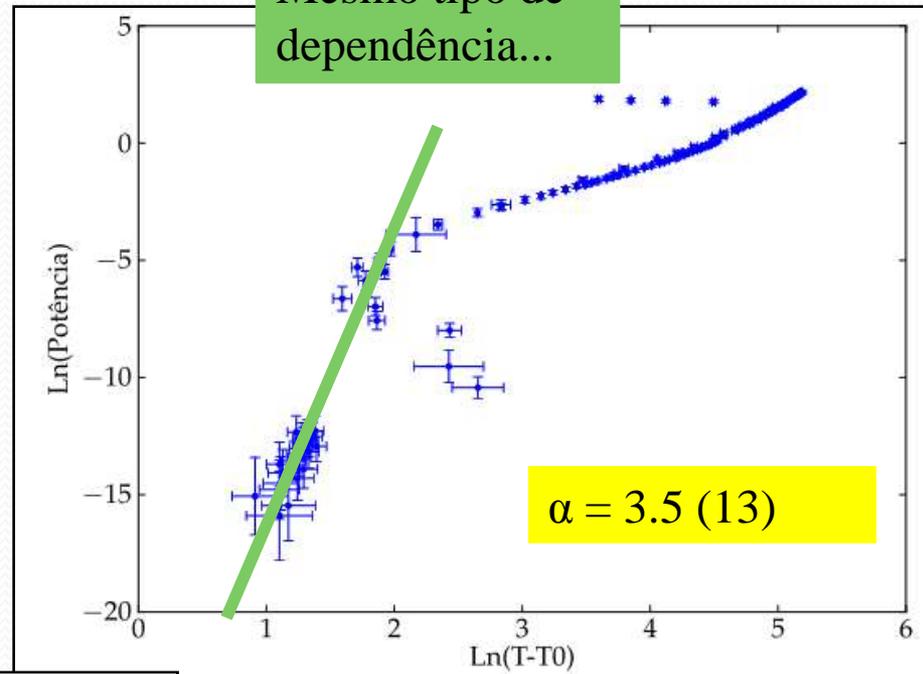
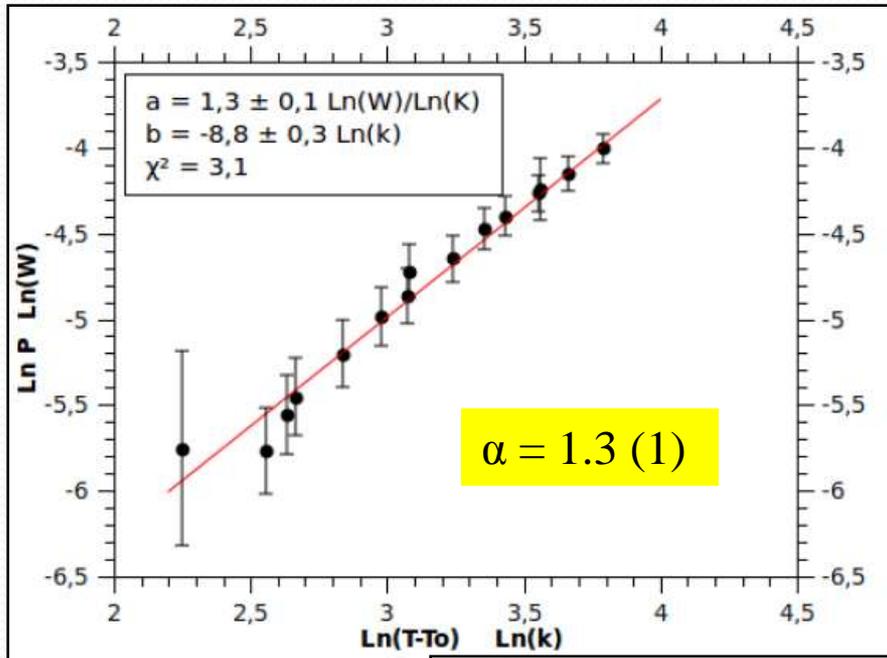
Mesmo grupo, mesmo viés na corrente....

Era preciso olhar em log-log para ver o que estava acontecendo

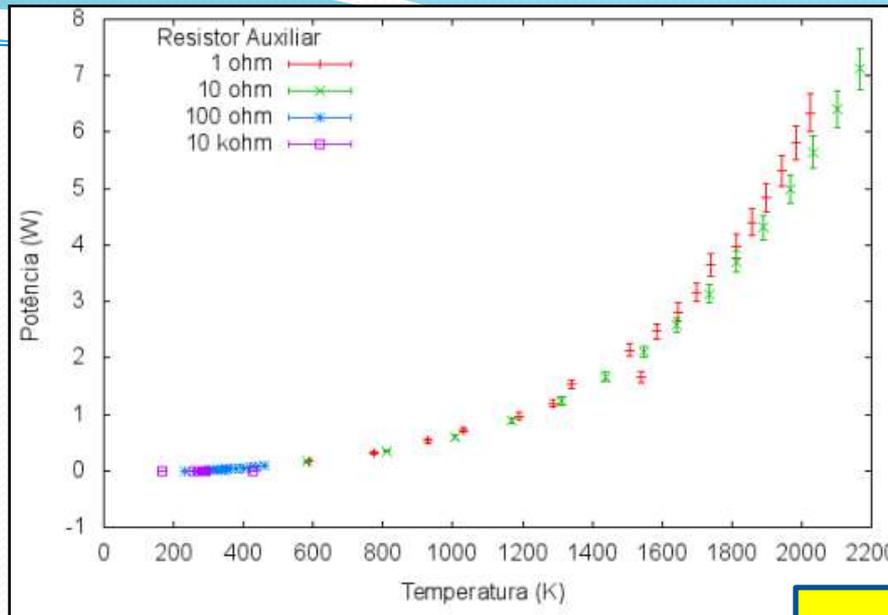
$\alpha = 1.25$ (23)



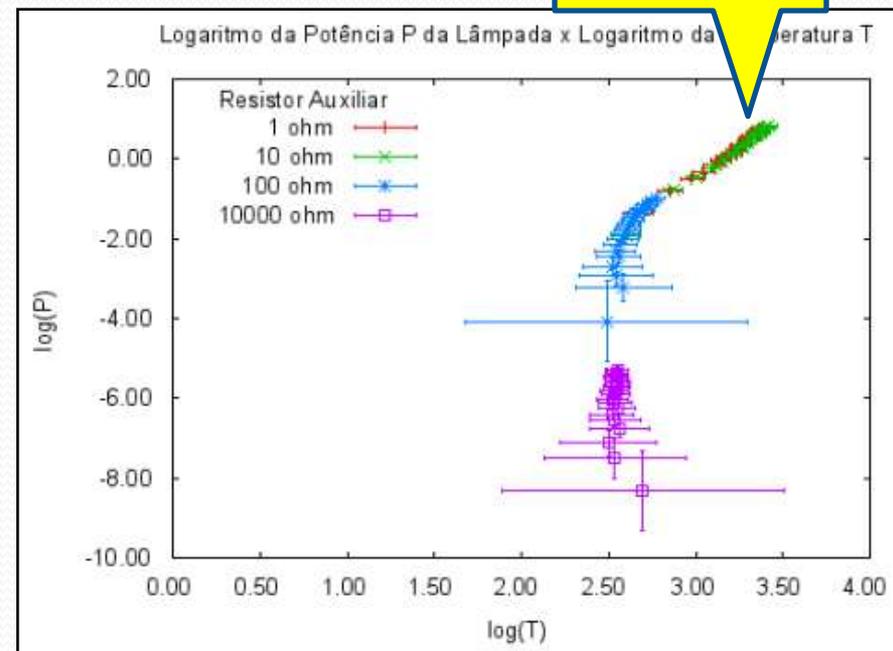
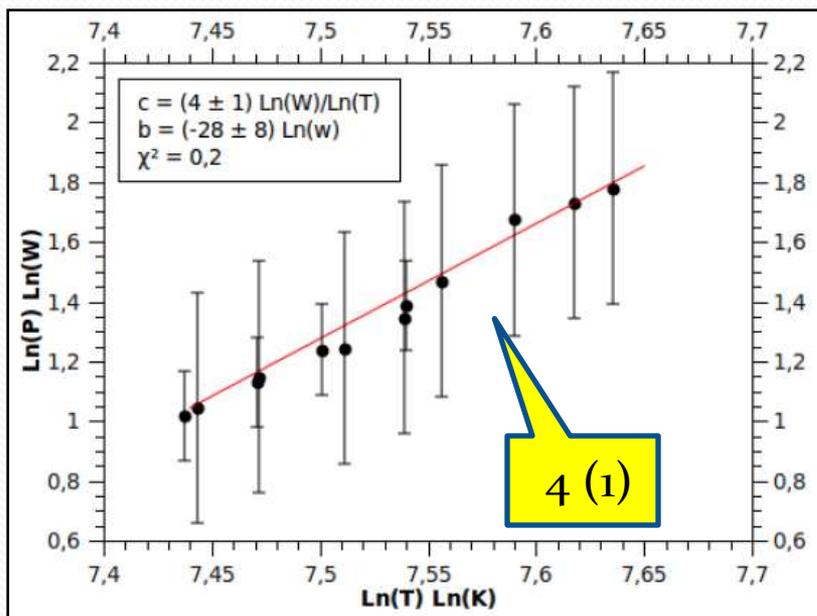
$\ln P \times \ln (T-T_0)$



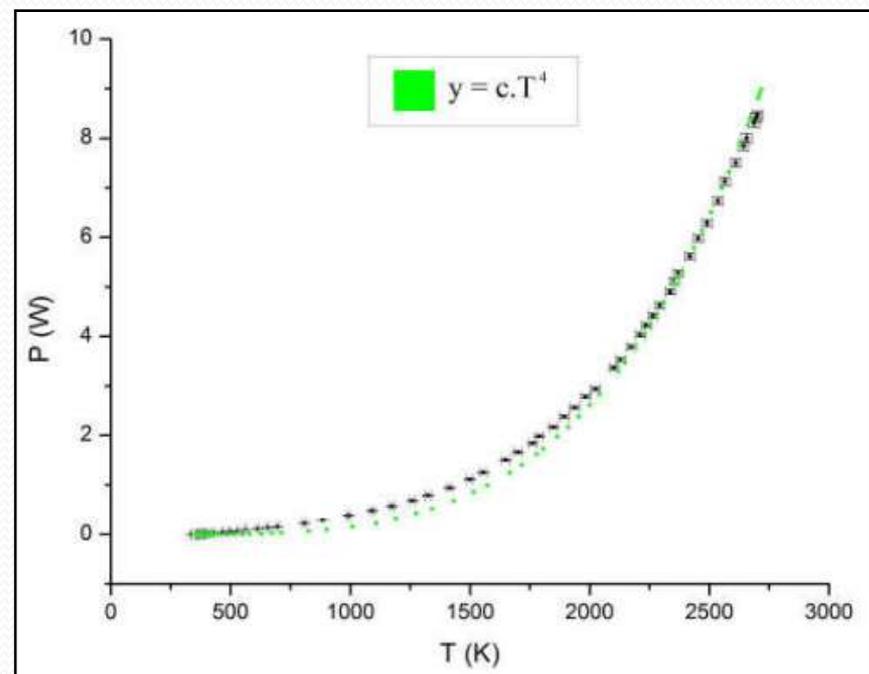
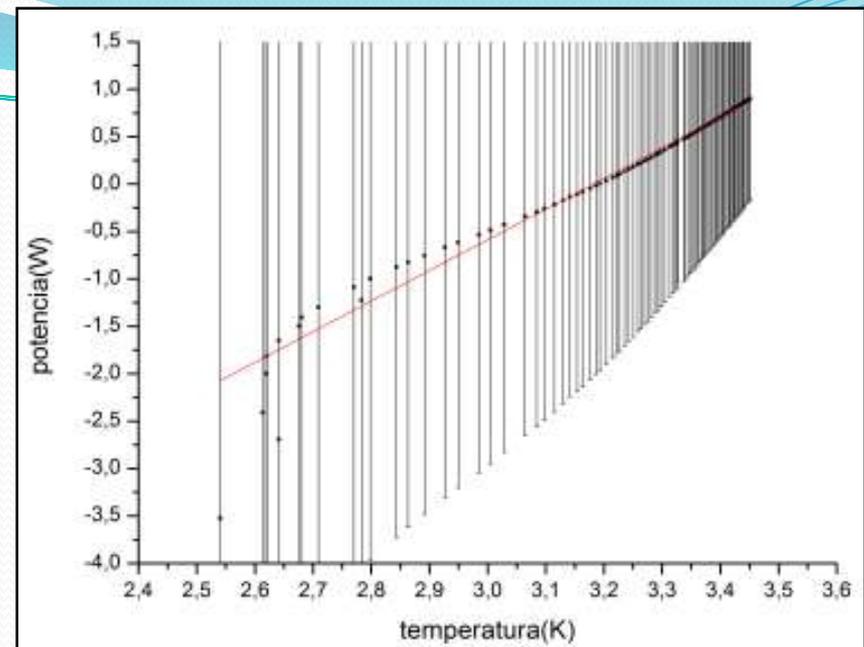
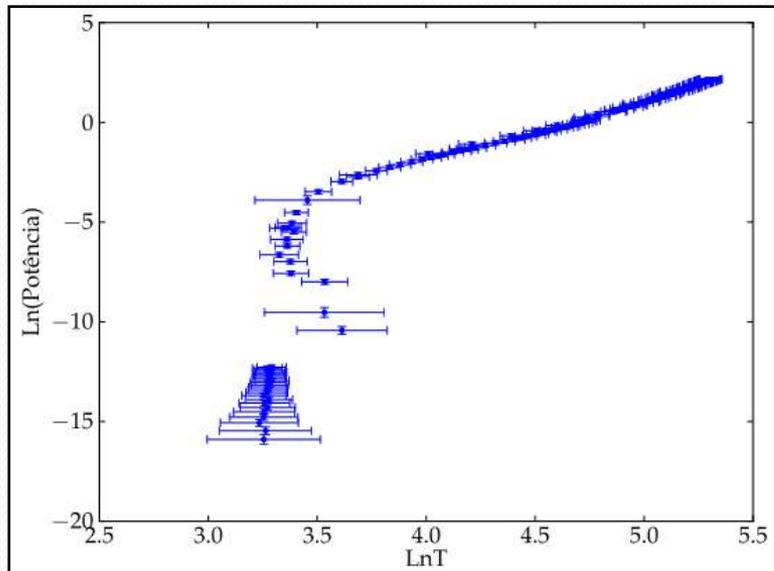
Potência x T



3.7 (15)



Potência x T



Balanço de Energia

- A potência elétrica transferida de um circuito para o filamento de uma lâmpada, percorrido por uma corrente i e sob tensão V é dada por:

$$P = V i$$

- A energia correspondente a essa potência se transforma em calor no filamento e, em **regime estacionário**, é **totalmente** perdida por condução, convecção e irradiação.
- Podemos usar argumentos físicos e SUPOE que a condução seja baixa, ou seja:

$$P_{\text{total}} \approx P_{\text{convecção}} + P_{\text{irradiação}}$$

- Assim, temos que:

$$P_{\text{total}} = A.\Delta T^\alpha + B.T^4 - C.T_0^4$$

Alguns grupos se adiantaram...

$(T-T_0)^{\alpha}$	ΣT^4
1.25 (23)	3.7 (15)
1.3 (1)	4 (1)
1.44 (6)	3.44 (5)
3.5 (13)	4.0 (15)
1.73 (3)	3.762 (14)

Os grupos que se adiantaram esqueceram de **descontar a convecção** para encontrar apenas a fração da potência perdida sob a forma de radiação!

O que já mediram

- Fizeram o gráfico diplota de P_{XT} e $P_X(T-T_0)$, só que essa potência é a potência fornecida pelo circuito e não a potência que o filamento da lâmpada irradia, porque vimos que ele perde uma parte por convecção.
- Então é necessário avaliar quanto vale a fração da potência fornecida que é perdida por convecção P_{conv} , para obter a potência que o filamento da lâmpada de fato irradia, P_{irr} , e então, verificar se a lâmpada pode ser descrita como um corpo negro.
 - Em temperaturas mais baixas a lâmpada também emite no infravermelho, mas a convecção predomina.
 - Para temperaturas mais altas, a emissão P_{rad} predomina, mas não é o único termo importante.

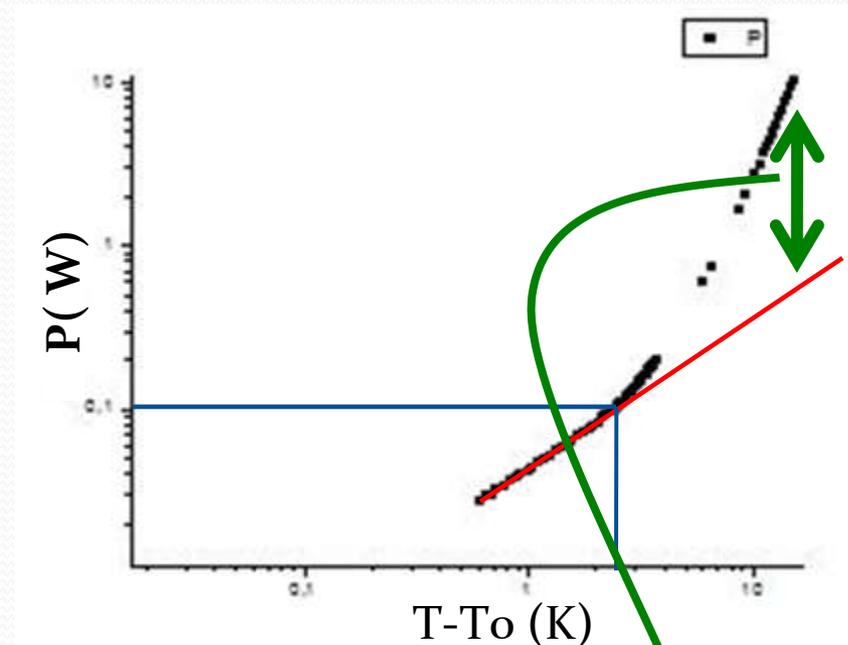
Potência perdida por convecção

- Para baixas temperaturas a potência irradiada é desprezível

$$P \approx P_{conv} \propto (T - T_0)^n$$

$$\text{Log}(P) \propto n \log(T - T_0)$$

- Do ajuste da parte linear da curva obtemos n



Subtraindo a potência perdido por convecção (extrapolação do ajuste) da potência total obtemos a potência irradiada (para altas temperaturas)

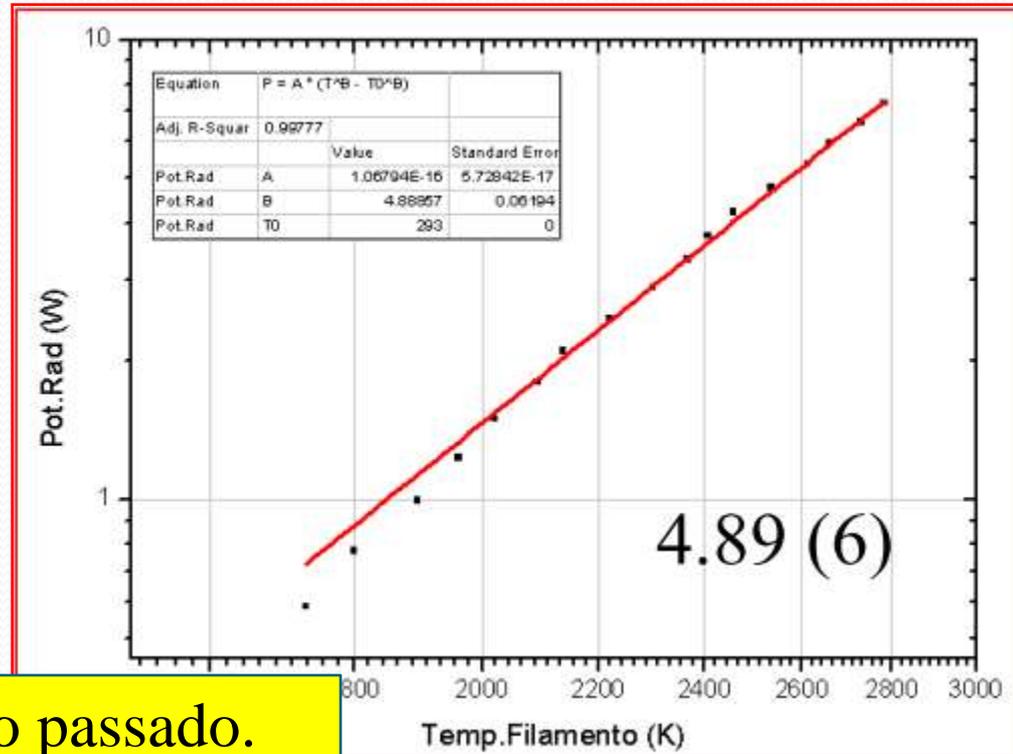
Potência Irrradiada

- Para altas temperaturas

$$P - P_{conv} = P_{rad} = \sigma T^4$$

$$\text{Log}(P_{rad}) = \text{cte} + 4 \log(T)$$

- Do ajuste podemos verificar se o expoente é realmente 4.



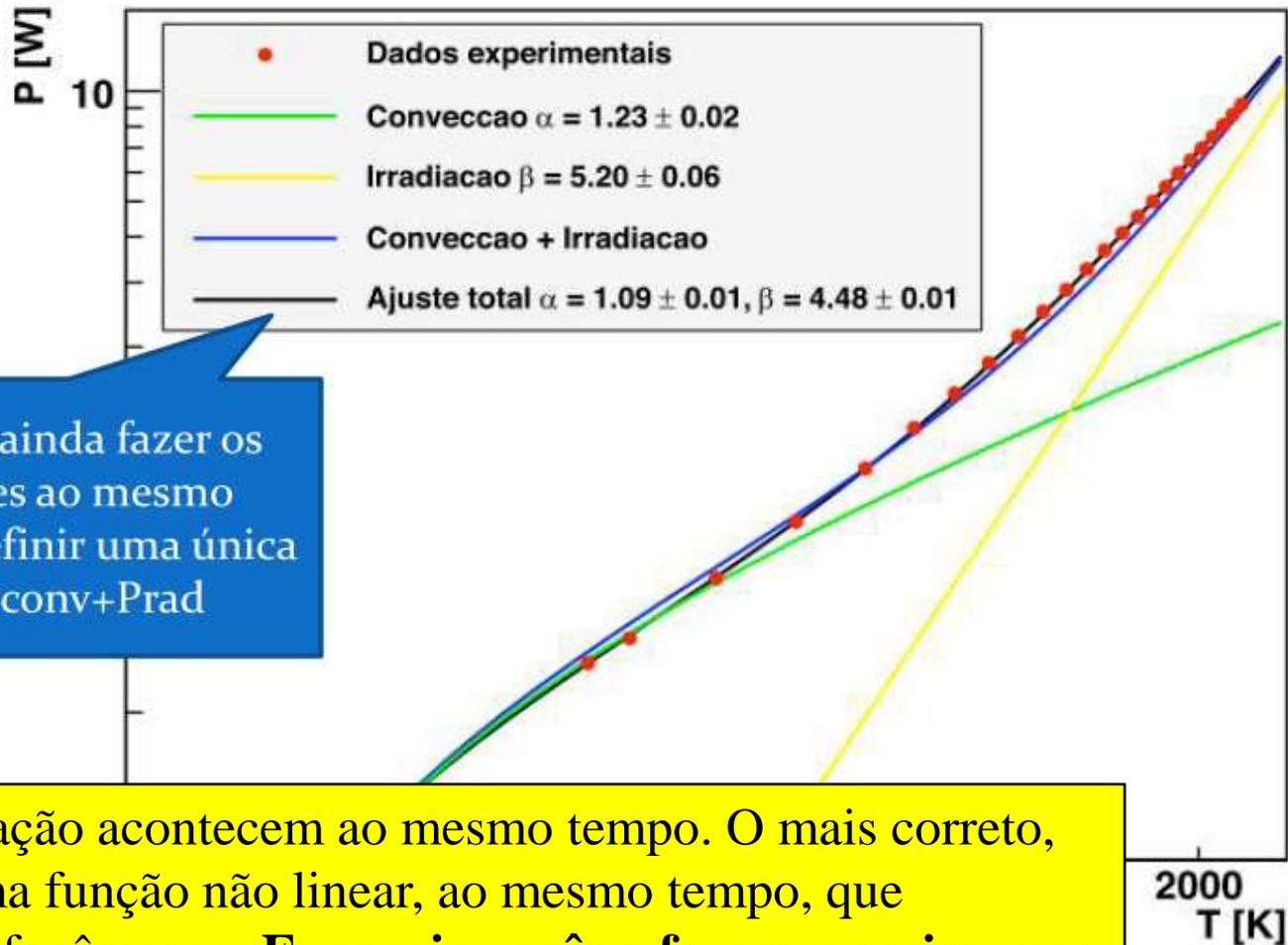
Este resultado é do ano passado. Vocês provavelmente irão encontrar resultados semelhantes, ou seja, um coeficiente angular incompatível com 4...

Atividade da Semana – Parte 1

- Usando os dados da semana passada e uma função apropriada, ajuste uma curva à região onde está havendo convecção (lembre-se, em função de $T-T_0$).
 - Compare o coeficiente angular (em log-log) obtido com valores da literatura, como **1.38** medido por B.S.N. Prasad and Rita Mascarenhas, Am. J. Phys. 46, 420 (1978).
- Subtraia a convecção e faça o gráfico apenas da potência irradiada, também em log-log.
 - Ajuste a curva apropriada (em função de T)
 - Compare o coeficiente angular obtido com o valor teórico esperado.
- Não deu compatível com 4 (Stefan-Boltzmann), deu? Porque não? O que esquecemos que pode influenciar o resultado?

Os dois ajustes ao mesmo tempo...

Curva de potencia de uma lampada incandescente

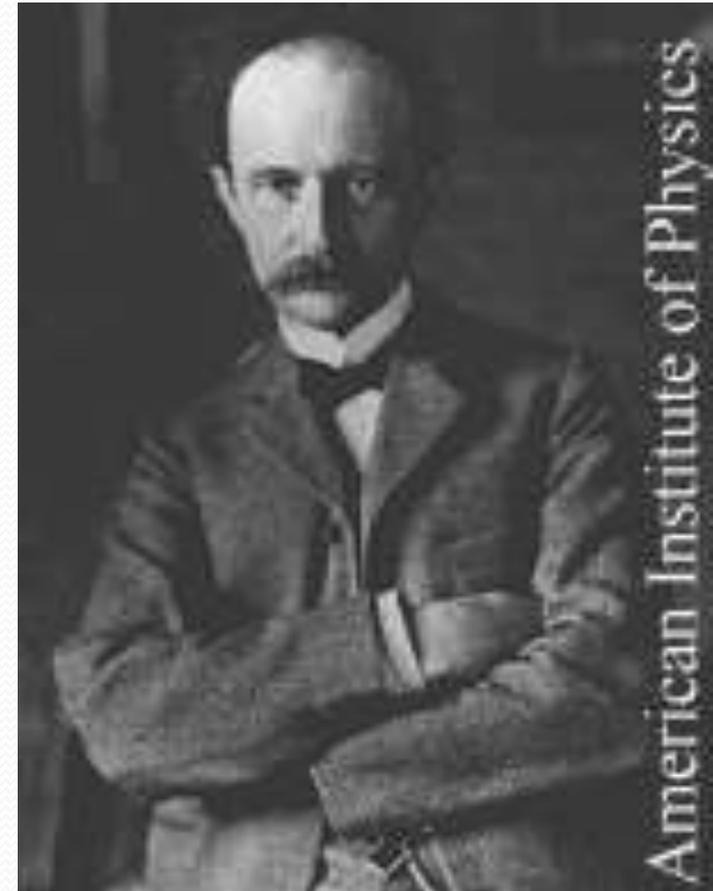
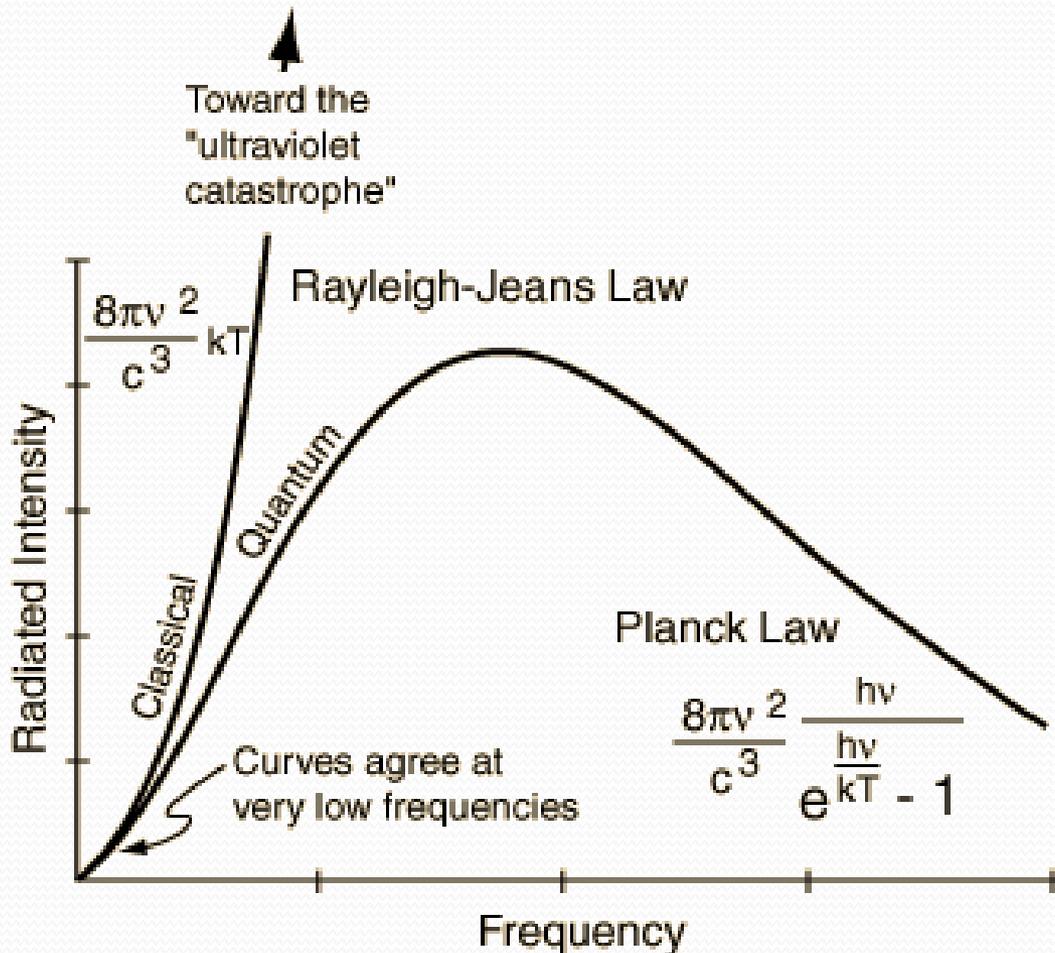


Era melhor ainda fazer os dois ajustes ao mesmo tempo, i.e, definir uma única função $P_{conv+Prad}$

A convecção e a radiação acontecem ao mesmo tempo. O mais correto, então seria ajustar uma função não linear, ao mesmo tempo, que representasse os dois fenômenos. **Encorajo vocês a fazerem assim, mas se não conseguirem pode fazer com a subtração mesmo.**

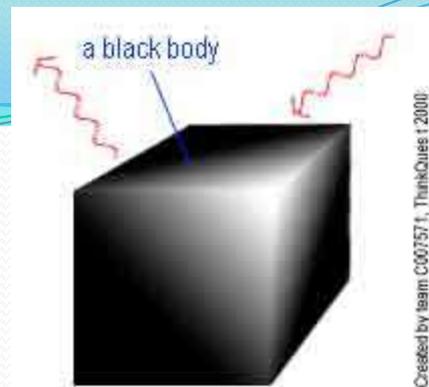
AULA DE HOJE

Um pouco de física quântica



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

Corpo negro: definição



- A emissividade (ϵ):

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

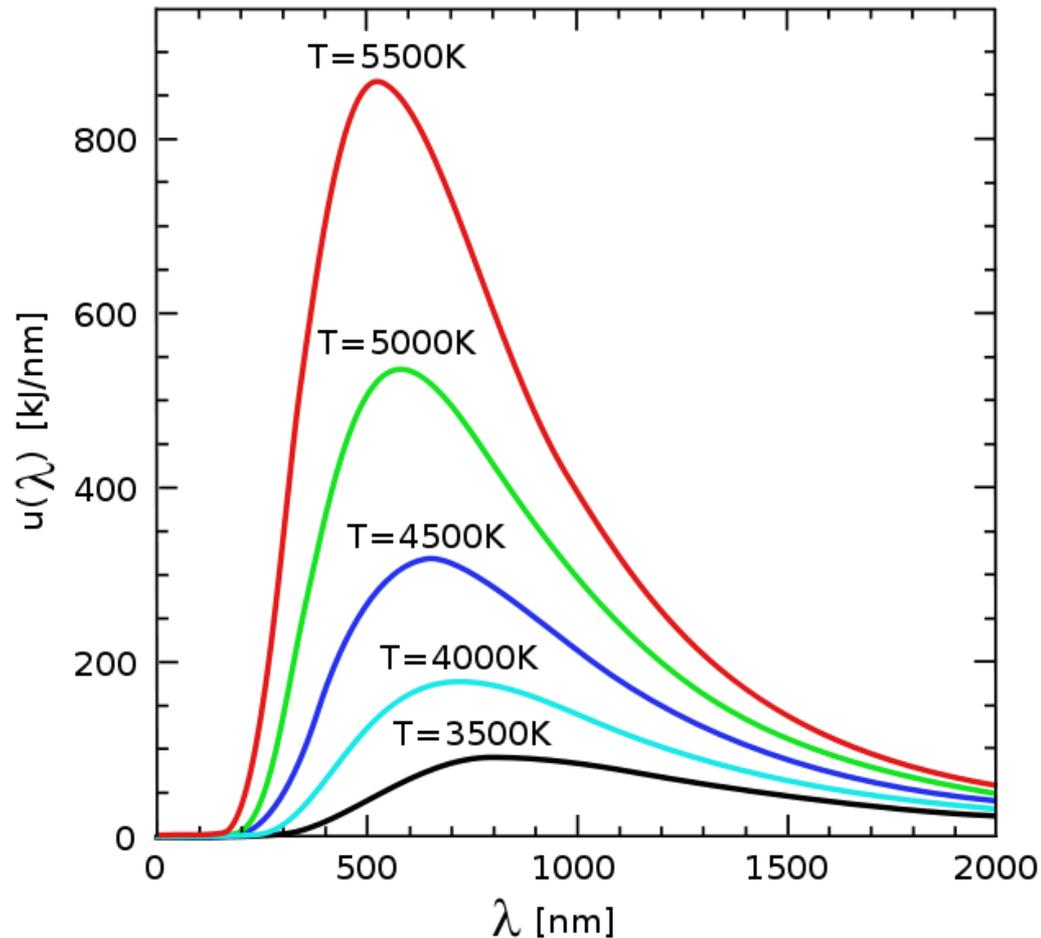
- importante: a definição é válida para corpos na mesma temperatura T
- ϵ é um coeficiente adimensional .
- caracteriza a habilidade relativa da superfície de um corpo real (não negro) de emitir radiação.

Corpo negro: 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

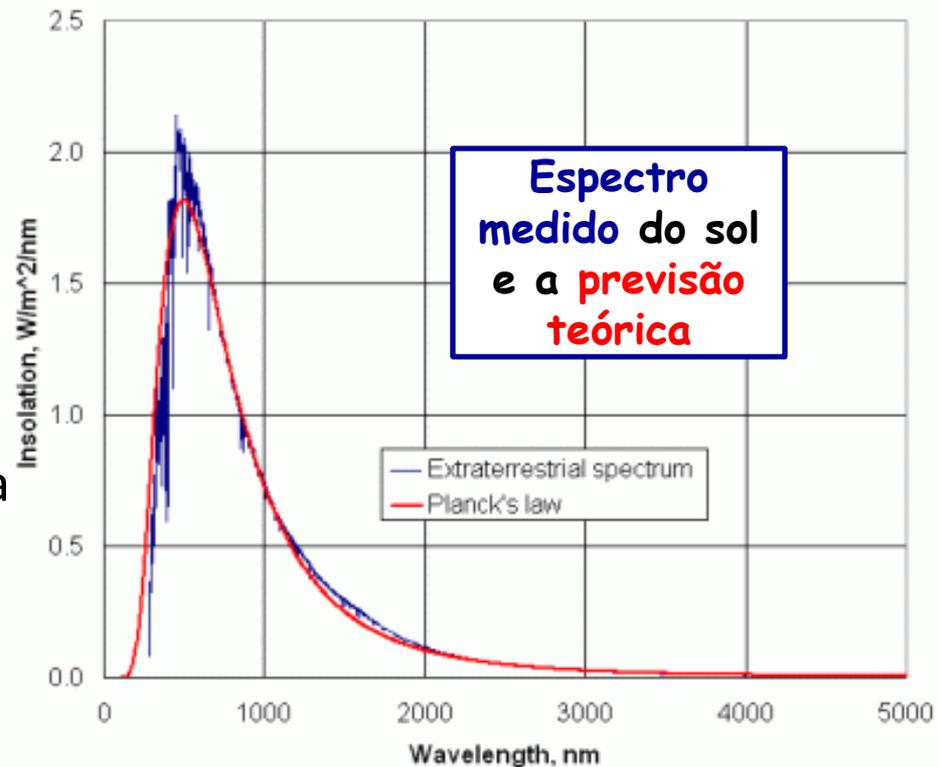
Radiação de corpo negro

- Os corpos negros à mesma temperatura, independentemente de sua composição, emitem radiação com o mesmo espectro.
- A distribuição da radiação emitida em função da frequência depende só da temperatura do corpo



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 uma determinado λ
- Depois decai mais lentamente à medida que o comprimento de onda cresce
- Aproxima-se de zero novamente quando λ se aproxima do infinito



A lei de Stefan-Boltzman



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

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

- P_{rad} é a energia emitida por unidade de tempo, por unidade de área de um corpo a uma temperatura T .
- A é a área do emissor
- ε é a sua emissividade



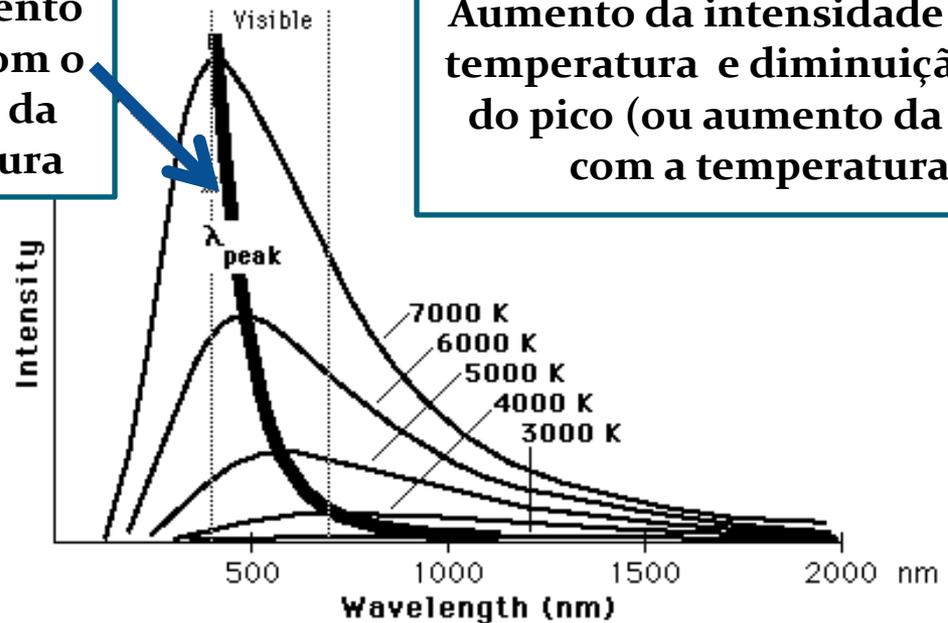
- Em 1884 Boltzman provou essa lei teoricamente para o caso de um corpo negro.
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ é a cte. de Stefan-Boltzman

A lei do deslocamento de Wien

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

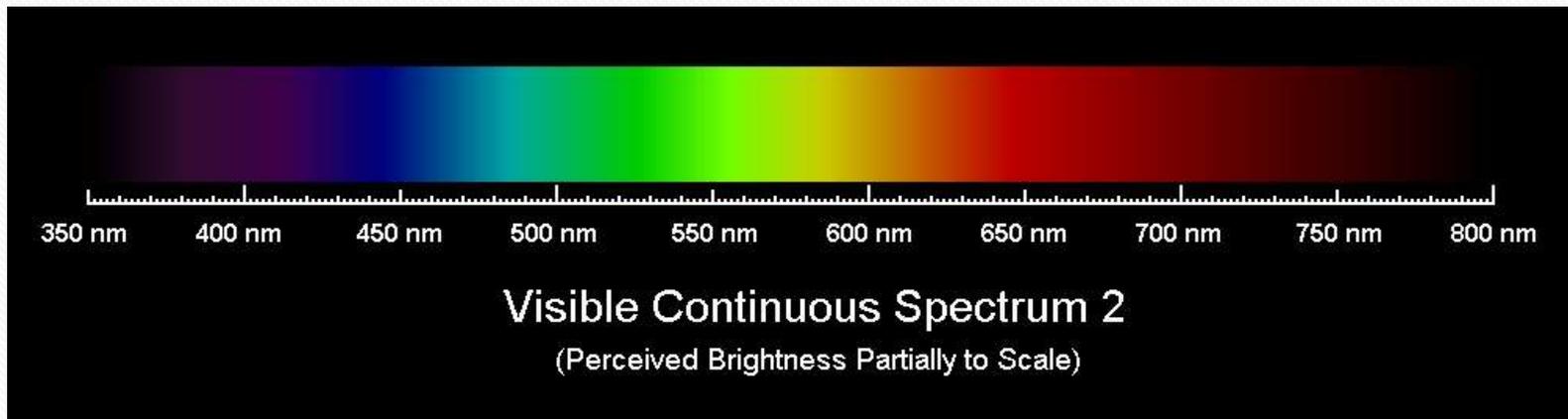


Diminuição de λ (ou aumento da freq) com o aumento da temperatura



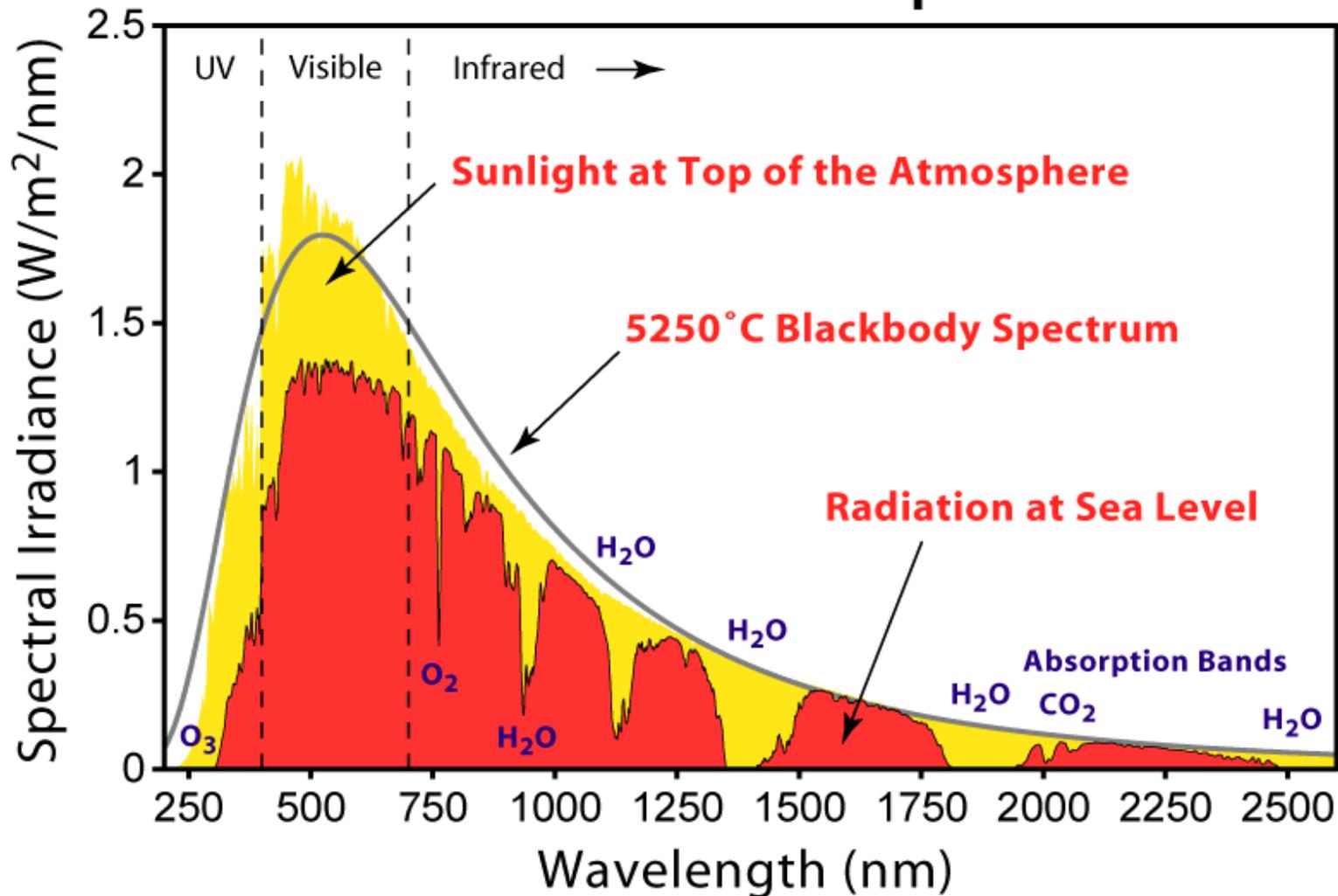
Temperatura de um corpo negro

- 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

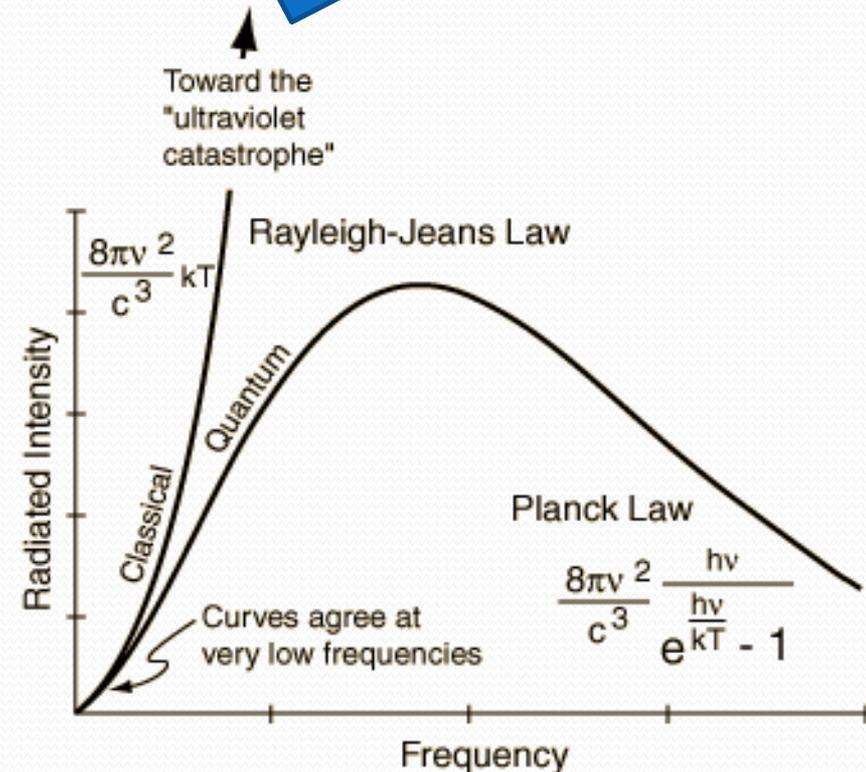
Solar Radiation Spectrum



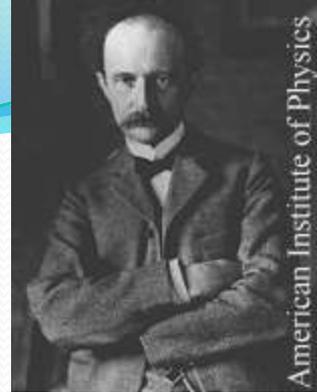
A distribuição de energia da radiação de corpo negro

- 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_ν) 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



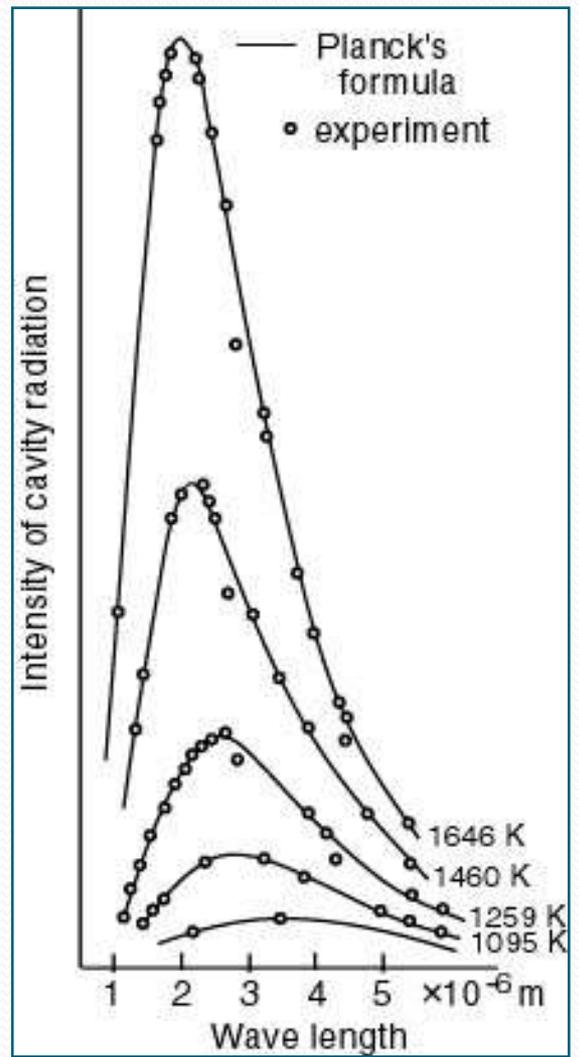
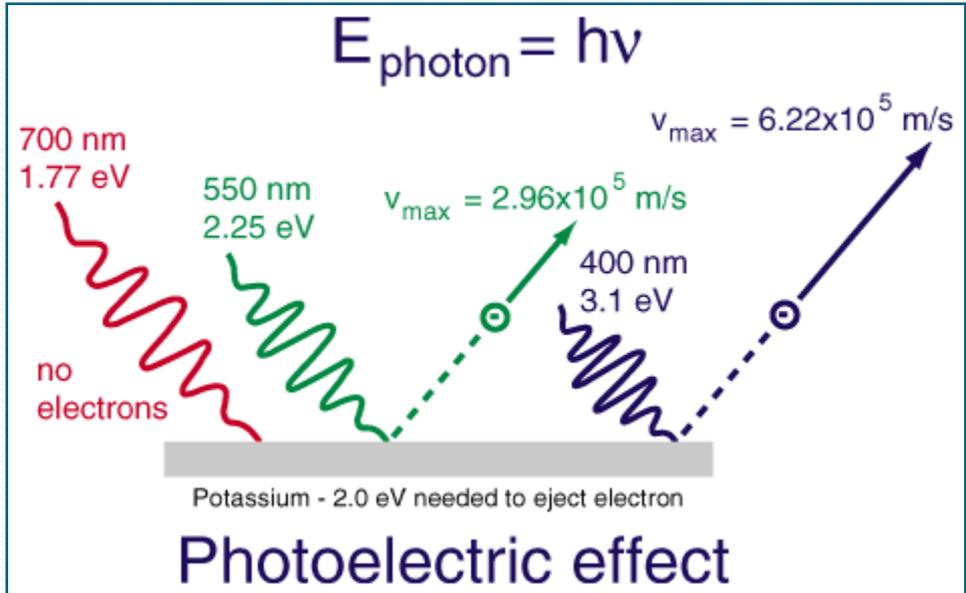
A hipótese de Planck



- 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 :

$$I_{\nu, T} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{ou} \quad I_{\lambda, T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

- 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 λ :

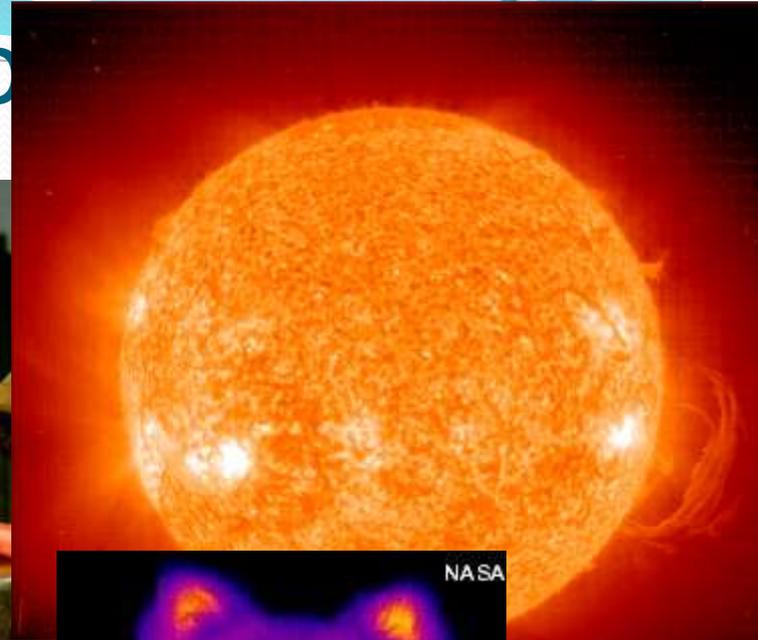
$$\frac{dI_{\lambda}}{d\lambda} = 0$$

Corpo negro

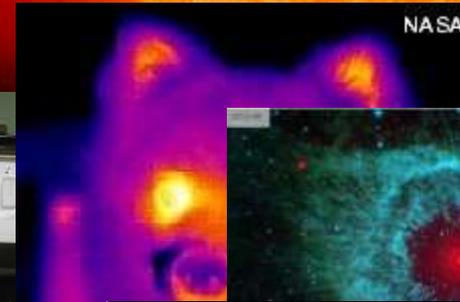
- Nenhum objeto real é um corpo negro perfeito!
 - **carvão negro** tem uma absorptividade (e emissividade) quase igual a 1, mas somente para algumas frequências, que incluem a radiação visível
→ a absorptividade (e emissividade) é muito mais baixa no infravermelho distante.
 - A pele dos seres humanos é quase um corpo negro perfeito 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?

Exemplos de “bons” co

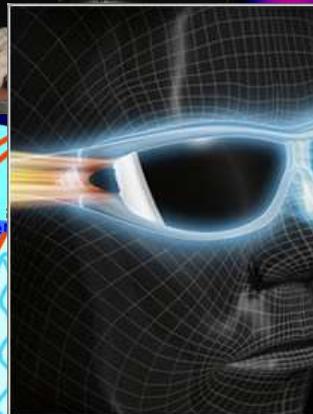
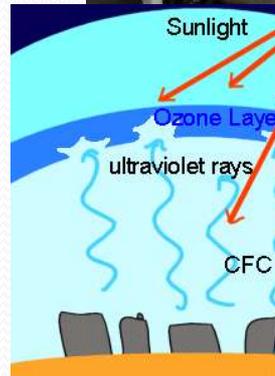
- Visível:



- Infravermelho:



- Ultravioleta:

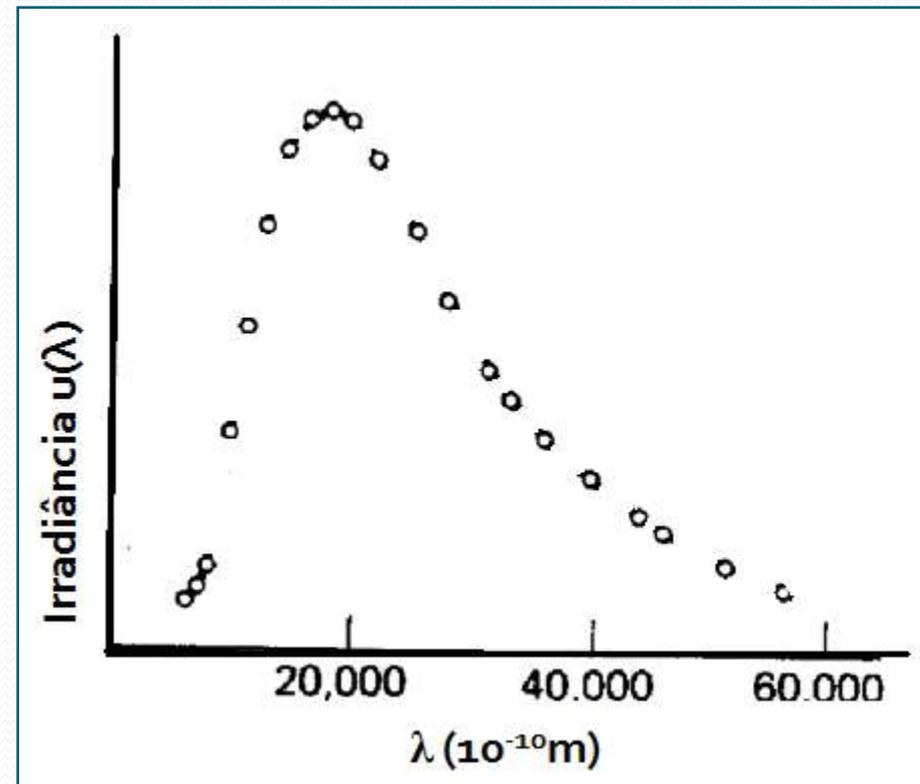


Radiação de corpo negro

- A forma do espectro medido experimentalmente é característica para um corpo negro perfeito.
- A lâmpada aparentemente não é um corpo negro perfeito. Porque?
- Porque não obedece:

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

com $\varepsilon=1$



Para entender o comportamento da lâmpada

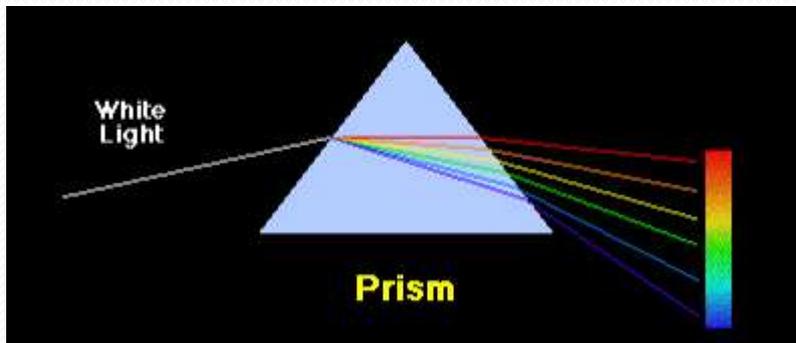
- Ou seja, a emitância do nosso material deve depender da temperatura, pois medimos uma variação de T^5 ao invés de T^4
- Como testar isso?
 - Vamos medir o espectro de emissão da lâmpada como função do comprimento de onda (ou frequência) e comparar com a previsão de Planck.
- Como medir o espectro de 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, θ e λ , que deve ser conhecida.
 - Em geral, a função $\theta(\lambda)$ é determinada por meio de calibração utilizando um espectro conhecido.

O espectrofotômetro

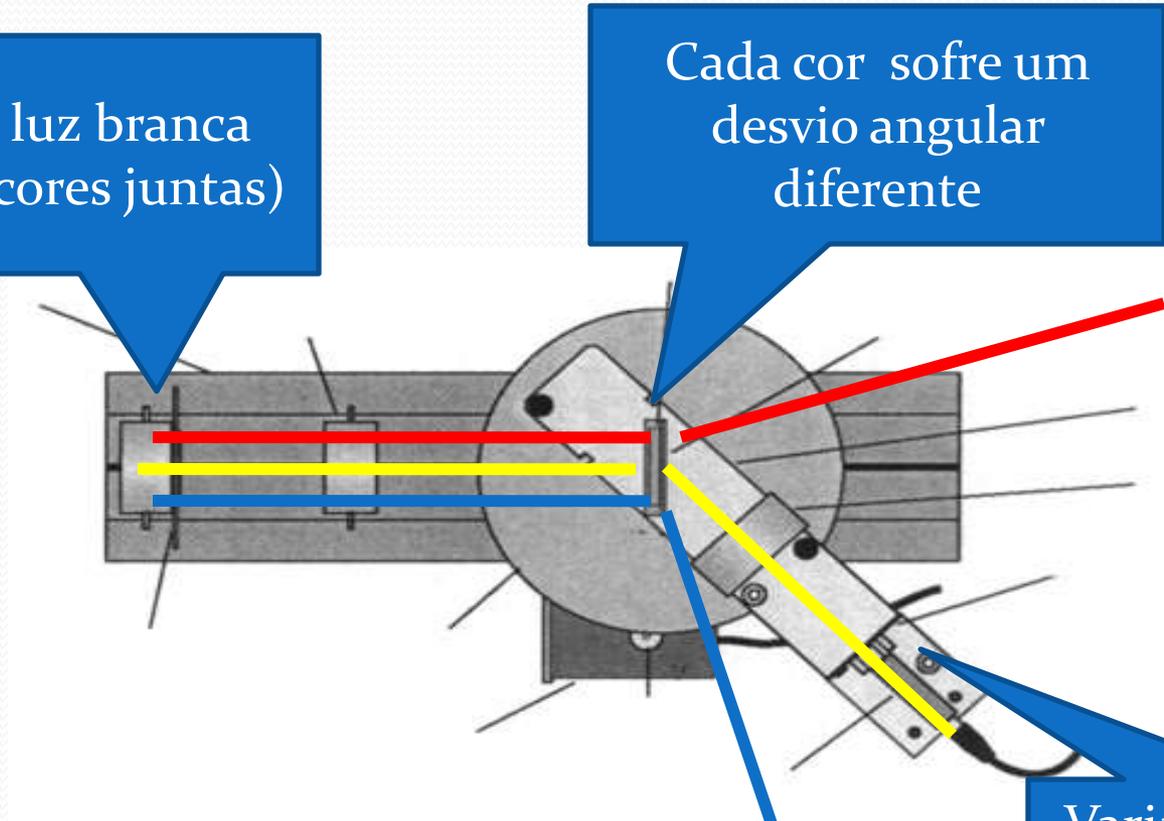
- No caso desta experiência o elemento dispersor utilizado quanto para o espectrofotômetro é uma rede de difração de transmissão. A equação da rede para incidência perpendicular será discutida a seguir, assim como características principais do espectro.
- A irradiância, \mathbf{I} , é definida, em termos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



O espectrofotômetro: esquema

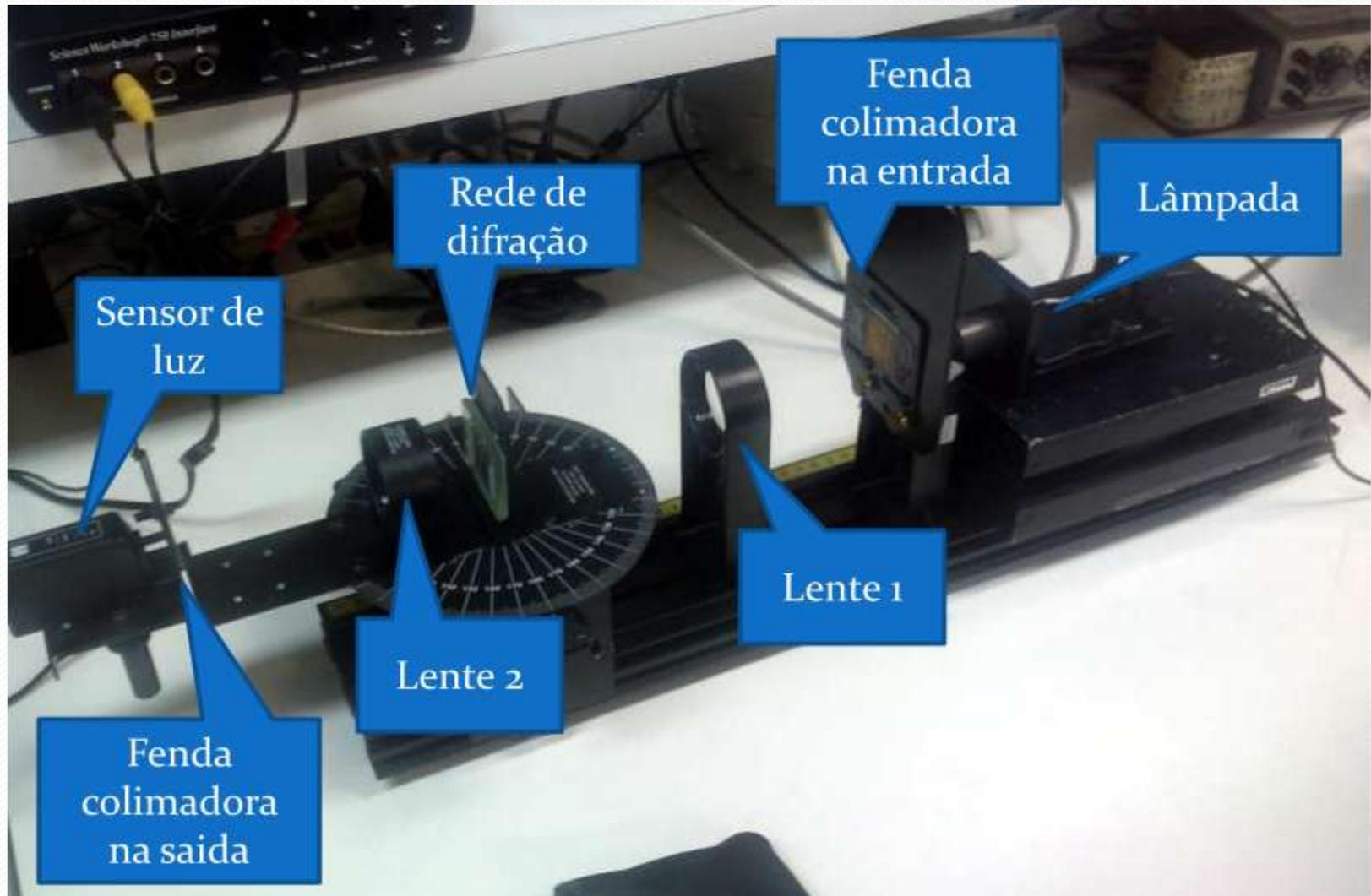
Feixe de luz branca
(todas as cores juntas)

Cada cor sofre um
desvio angular
diferente



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

Visão Geral do Espectrofotômetro



Fenda de Entrada



Rede de difração

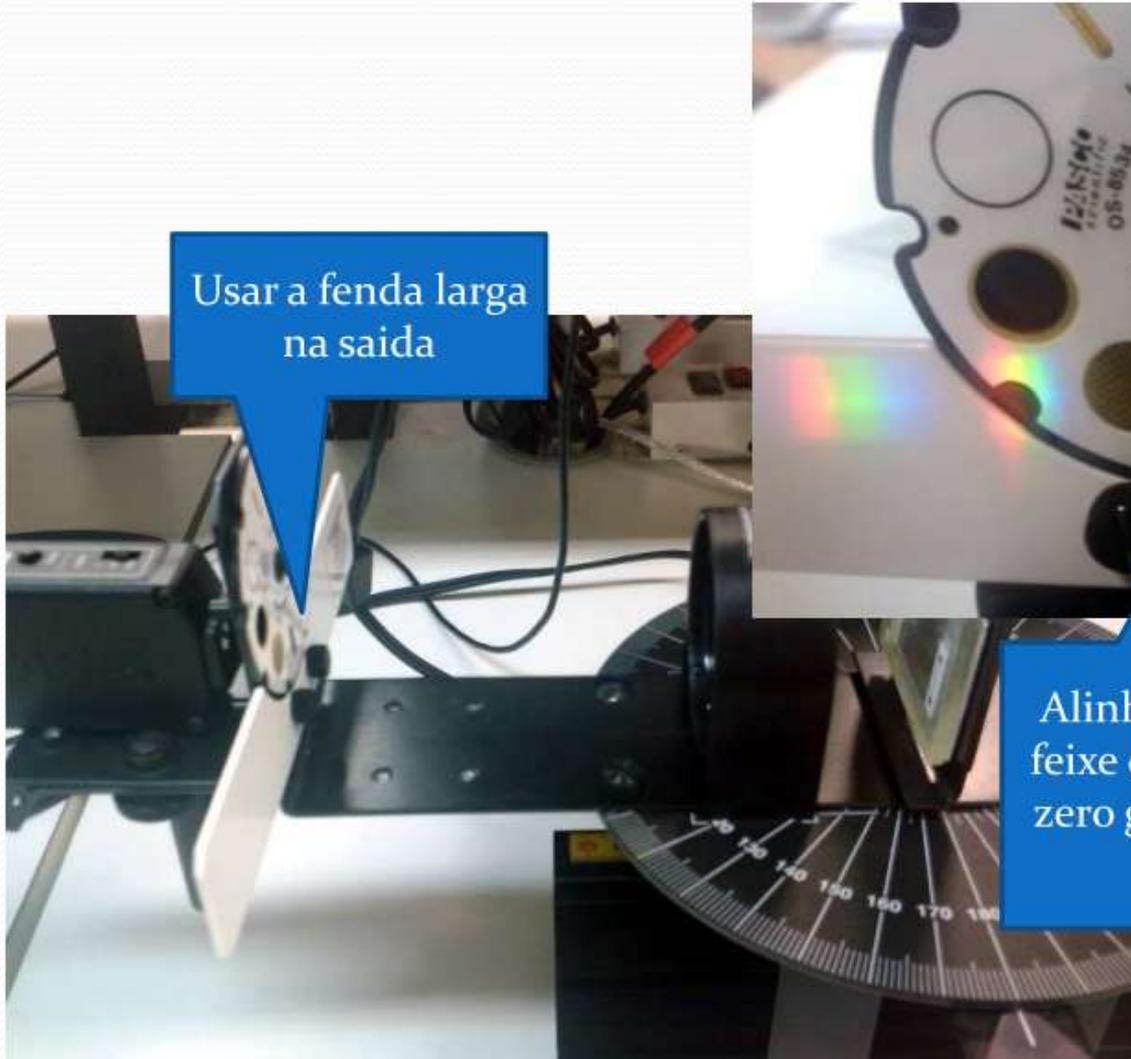


E também
centralizada com o
eixo de rotação



A rede deve estar
alinhada neste
plano...

Fenda de Saída



Usar a fenda larga na saída



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

Circuito da Lâmpada



Ainda precisamos do
circuito da lâmpada,
pois queremos medir a
potência ao mesmo
tempo que medimos o
espectro

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 2

Wien:

- Dos espectros medidos, determine λ_{\max}
- 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

Espectro integrado

- Estime a área sob as curvas e veja se ela é proporcional a T^4 .
- Estime a porcentagem de radiação emitida pela lâmpada está na região visível do espectro
 - A lâmpada é um bom iluminador? Comente.

Atividades da Semana – Parte 3

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 o gráfico da razão entre os dois espectros (experimental e teórico) e estude o comportamento da emissividade em função do comprimento de onda e da temperatura
 - Como se compara com os valores disponíveis na literatura?