

Lâmpada

Parte 3 – Emissividade

Aula 11

Prof. Henrique Barbosa

Edifício Basílio Jafet - Sala 100

Tel. 3091-6647

hbarbosa@if.usp.br

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

Na primeira semana...

- Fizeram o gráfico di-log 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.

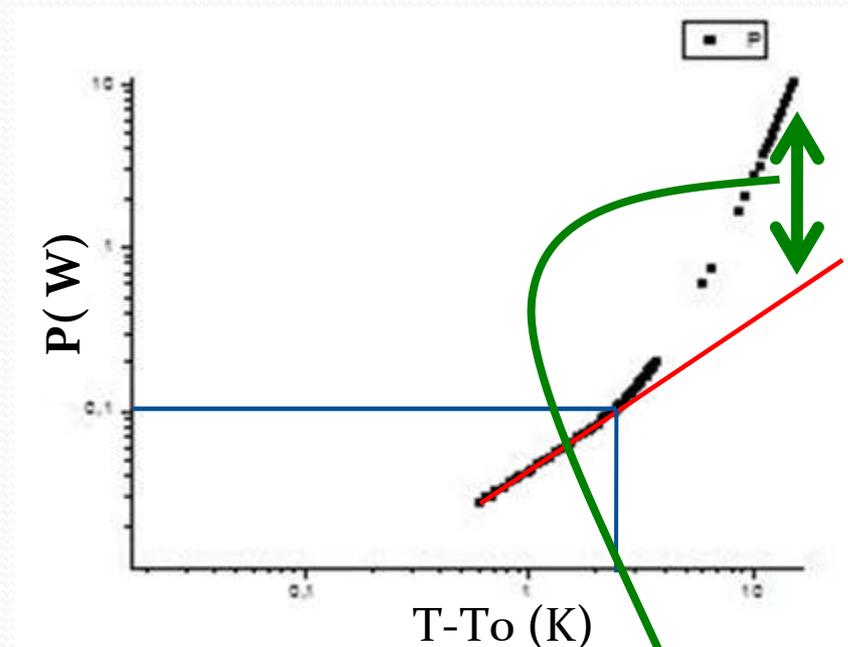
Potência perdida por convecção

- 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)

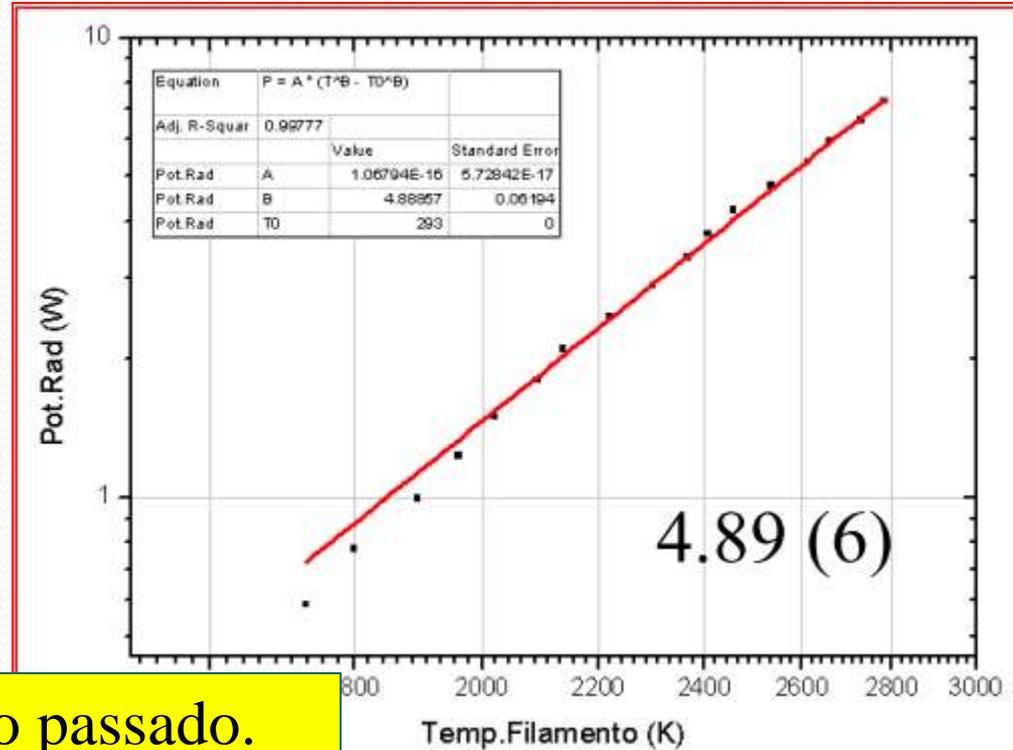
Potência Irrradiada

- Para altas temperaturas

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

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

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

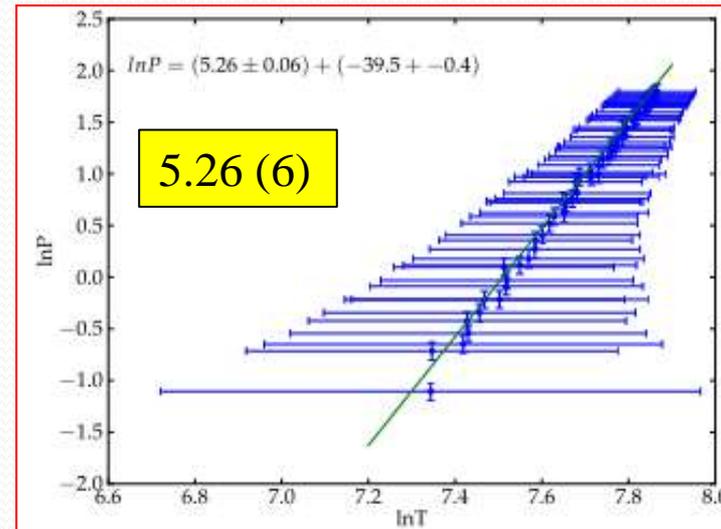
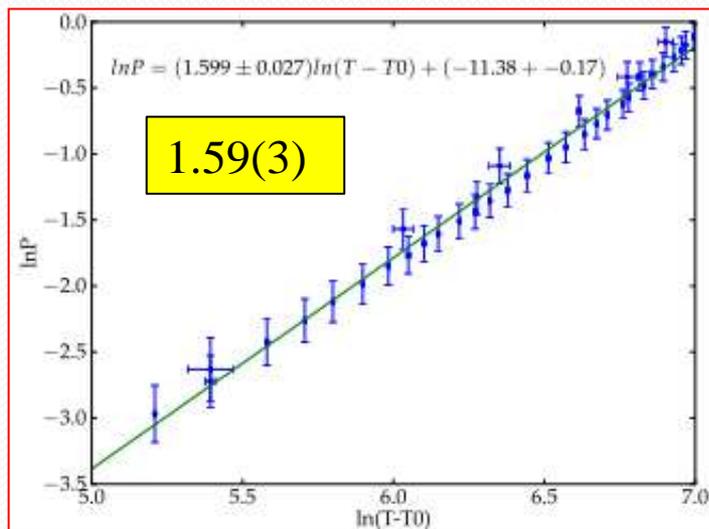
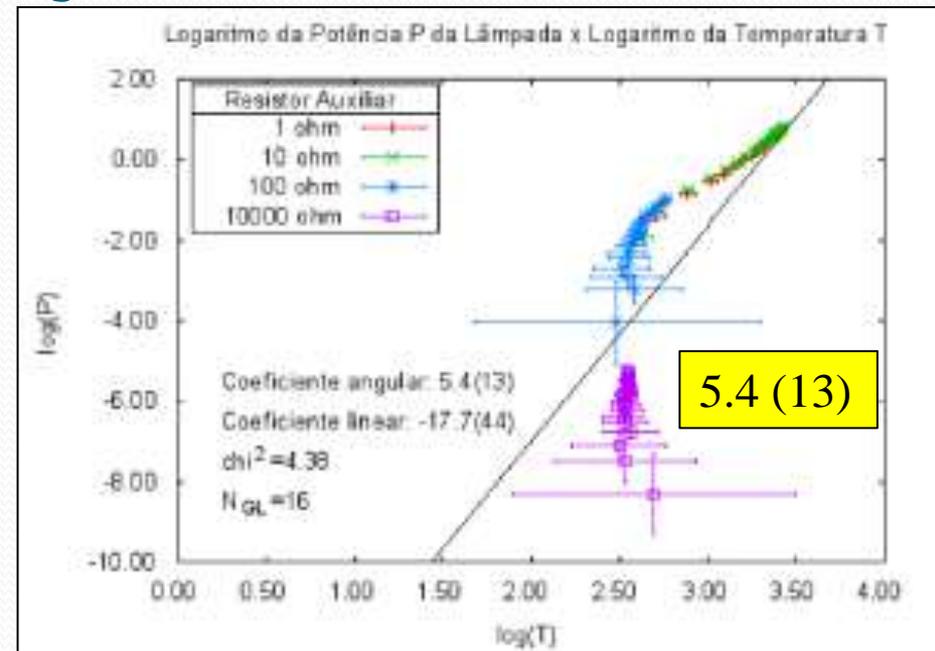
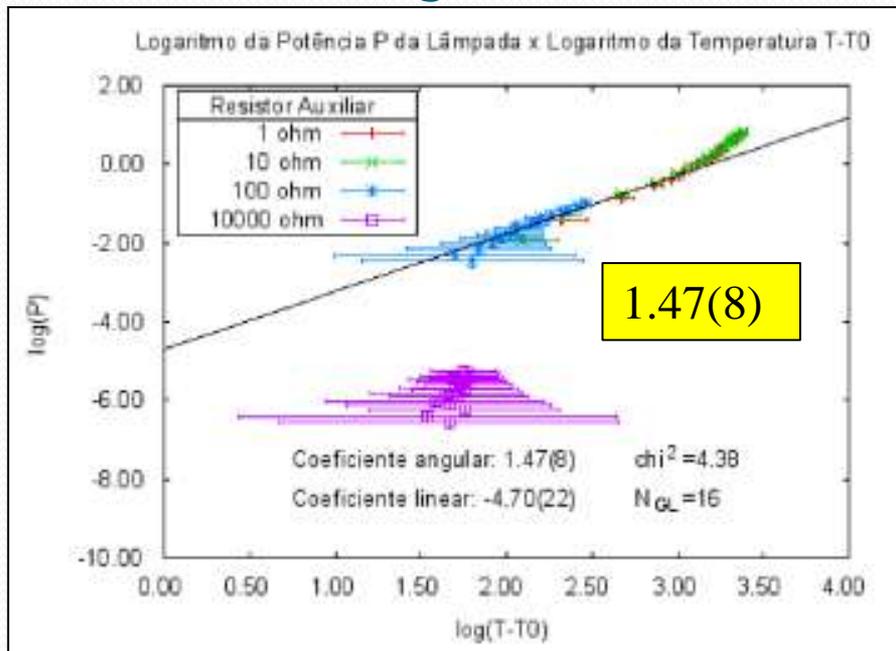


Este resultado é do ano passado. Vocês provavelmente irão encontrar resultados semelhantes, ou seja, um coeficiente angular incompatível com 4...

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?

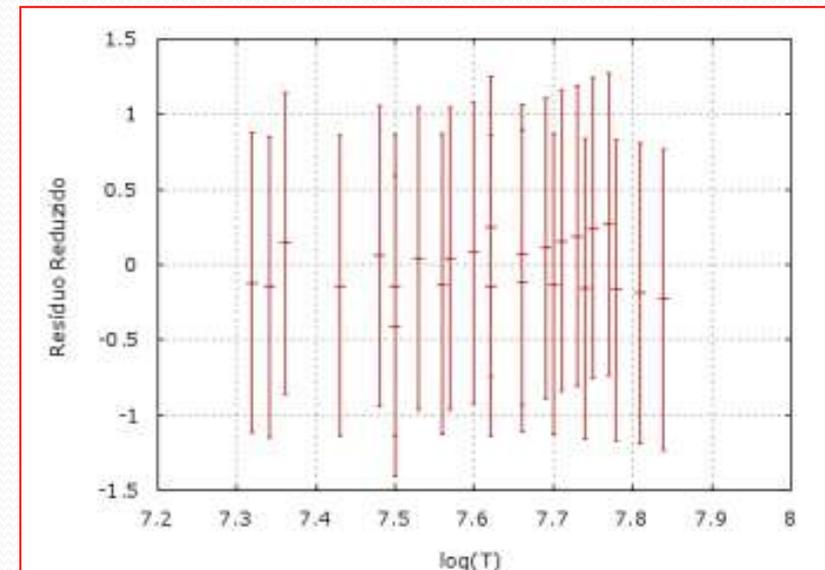
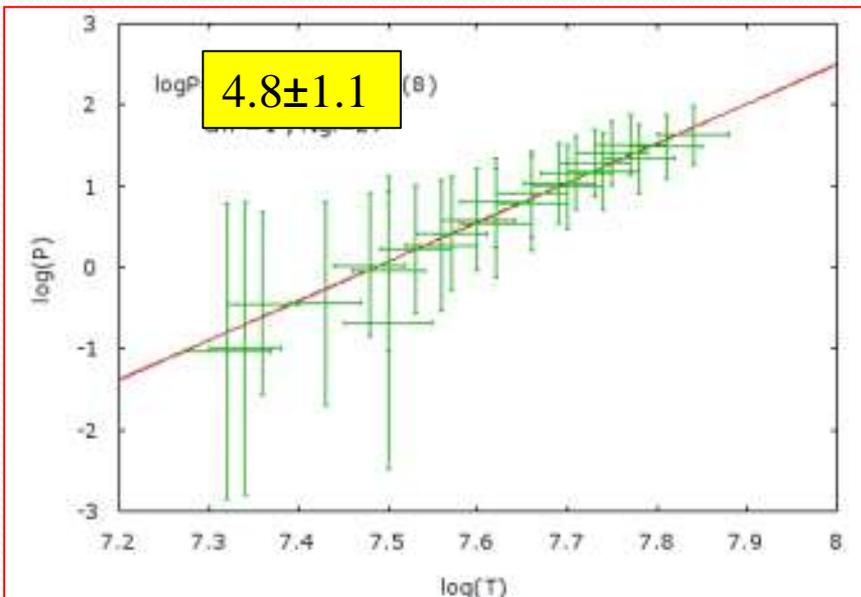
Convecção e Radiação



Radiação

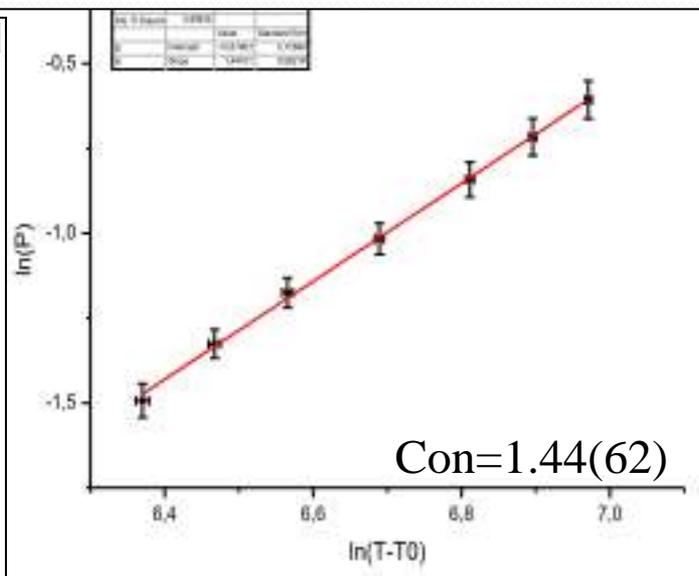
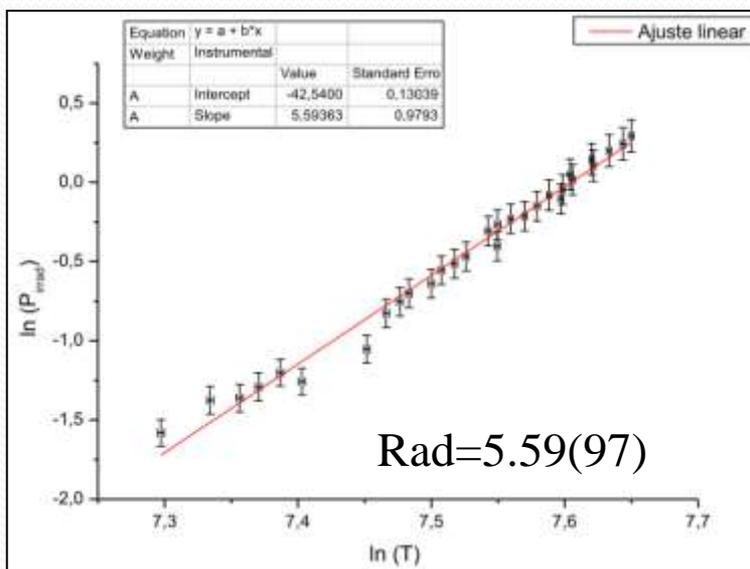
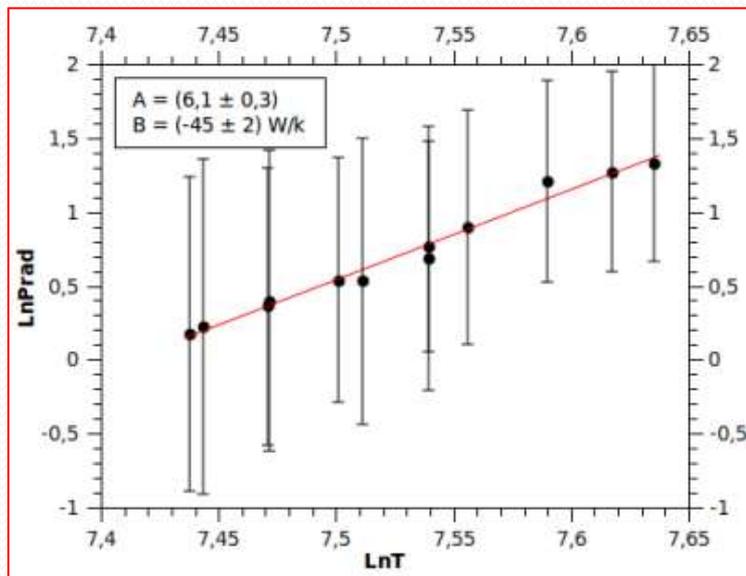
Para descartar essa parcela de P_c , primeiramente fizemos um ajuste dlog de $P_c \times T - T_0$, em que T_0 é a temperatura ambiente e P_c a potência de convecção. Como feito na [2], foi visível a região dos dados em que predomina o regime de convecção, de modo a ter sido fácil selecionar a faixa de valores em que predomina a dissipação de potência por radiação e extrapolá-la.

O ajuste obtido foi: $\log(P_c) = (1,44 \pm 0,08) \log(T - T_0) + (-10,4 \pm 0,4)$. Subtraída a potência atribuída à convecção, obtivemos aquela irradiada, $P = P_c - P_c$, fizemos o ajuste pretendido e graficamo-lo, obtendo as figuras abaixo.



elevadas. Comparando com os valores levantados por outros grupos, estima-se que, na realidade, o coeficiente angular dos valores obtidos para as lâmpadas em questão seja mais próximo efetivamente de 5 do que de 4.

Radiação e Convecção



Coeficientes dos ajustes

Convecção	Radiação	Semana passada (sem descontar a convecção)
1.44 (8)	4.8 (11)	
1.47 (8)	5.4 (13)	3.7 (15)
	6.1 (3)	4 (1)
1.441 (62)	5.59 (97)	
1.599 (27)	5.26 (6)	3.44 (5)
1.66 (5)	5.191 (26)	4.0 (15)
		3.762 (14)

1.5 (1)

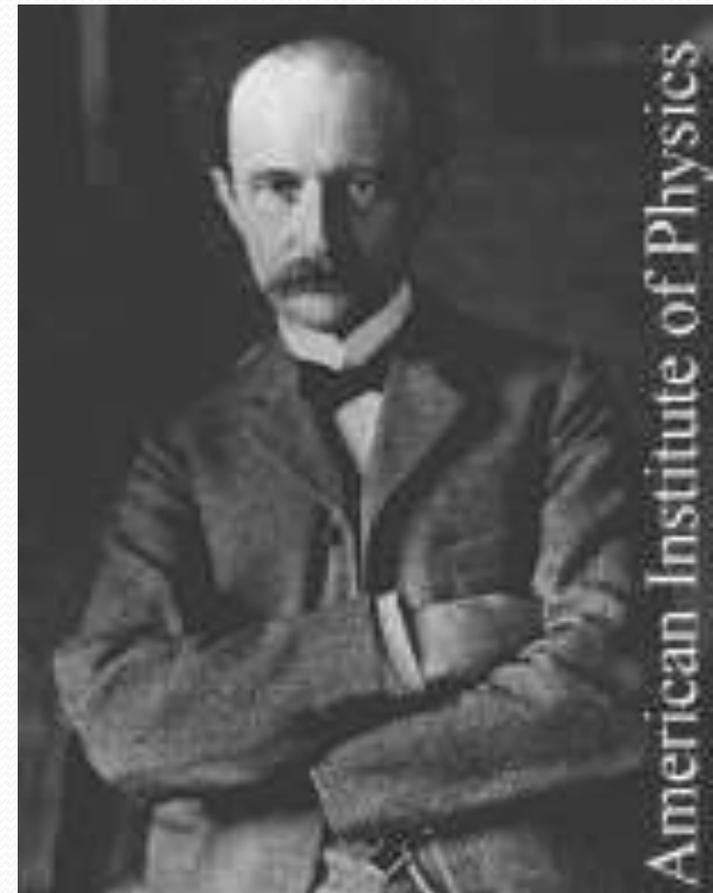
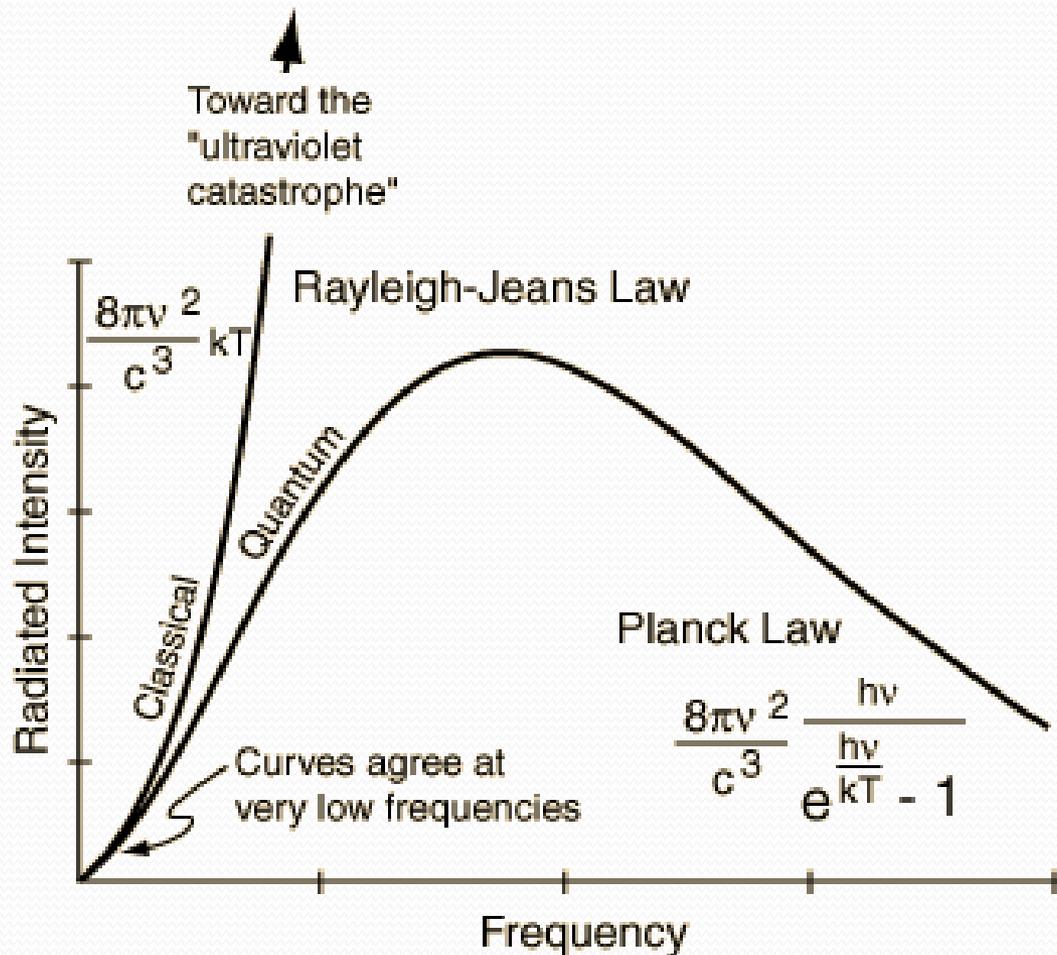
5.4 (4)

3.8 (2)

Desvio da média maior que os erros individuais! Significa que há um erro sistemático não considerado....

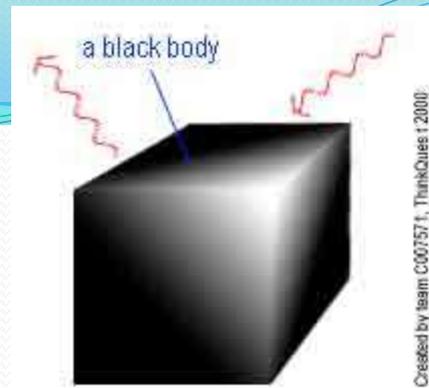
Pot ~ **T⁵** significa que a emissividade deve ser proporcional a temperatura!

Um pouco de física quântica



Corpo negro: definição

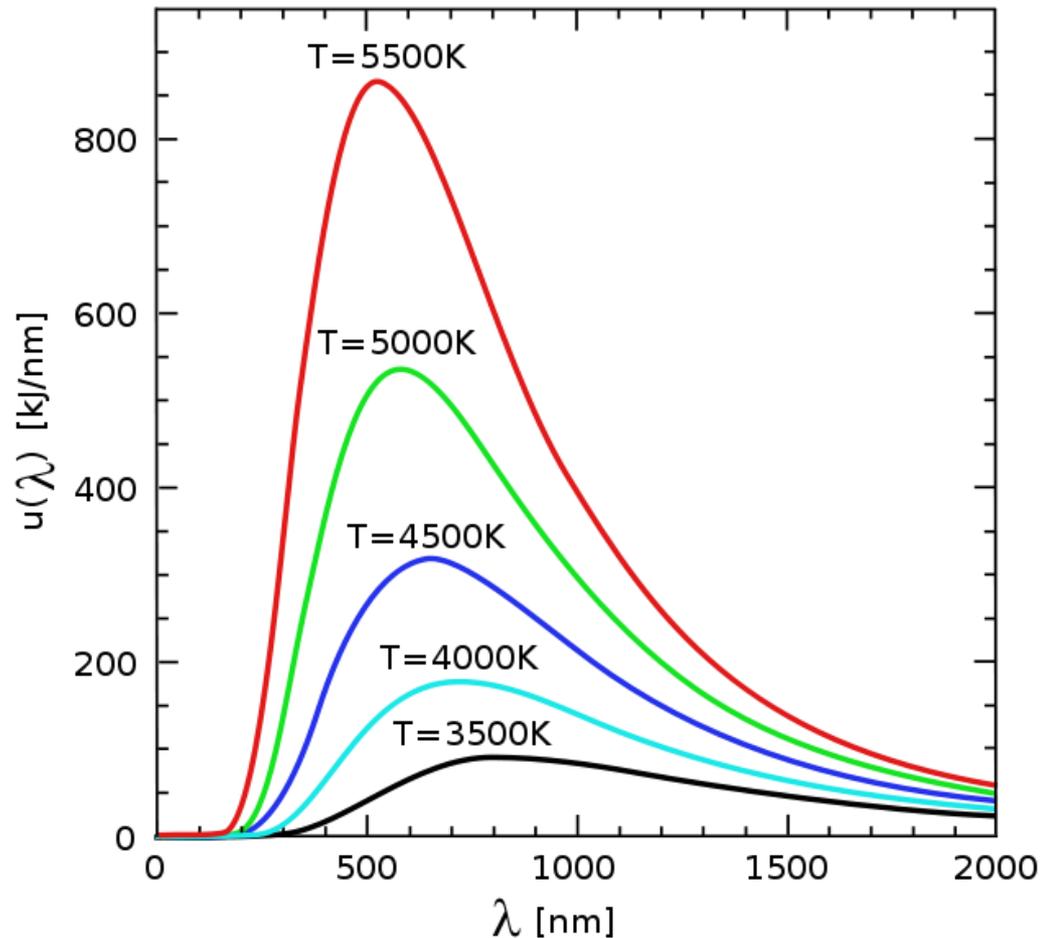
- Os corpos em equilíbrio emitem e recebem simultaneamente radiação do meio:
 - a radiação incidente pode ser refletida ou absorvida
 - a forma do espectro da radiação térmica emitida por um corpo depende de suas características físicas.
- Há um tipo de corpo quente que emite espectros de caráter universal: **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

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



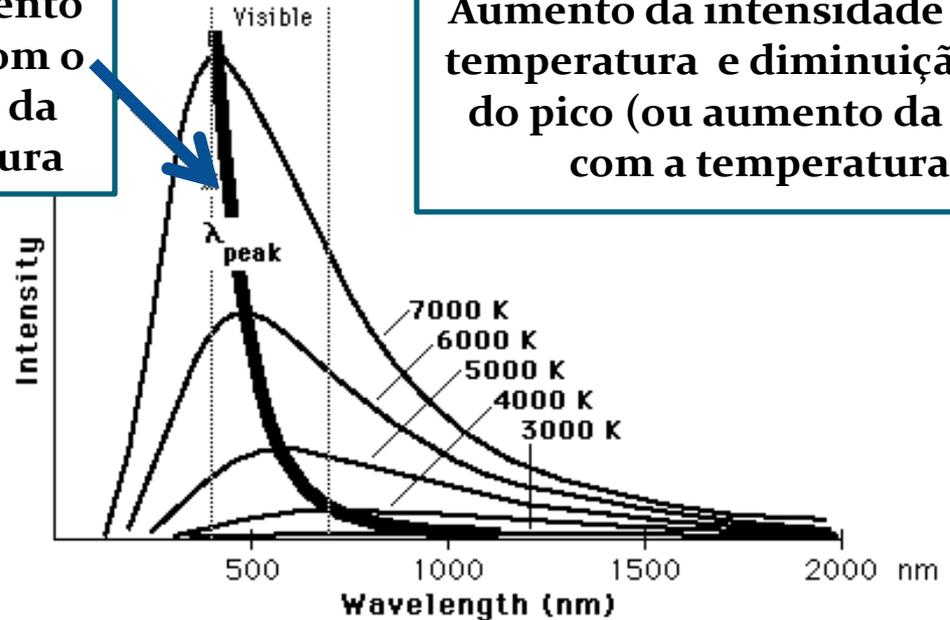
A lei do deslocamento de Wien

- 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

Aumento da intensidade com a temperatura e diminuição do λ do pico (ou aumento da freq) com a temperatura



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

Atividades da Semana – Parte 2

Wien:

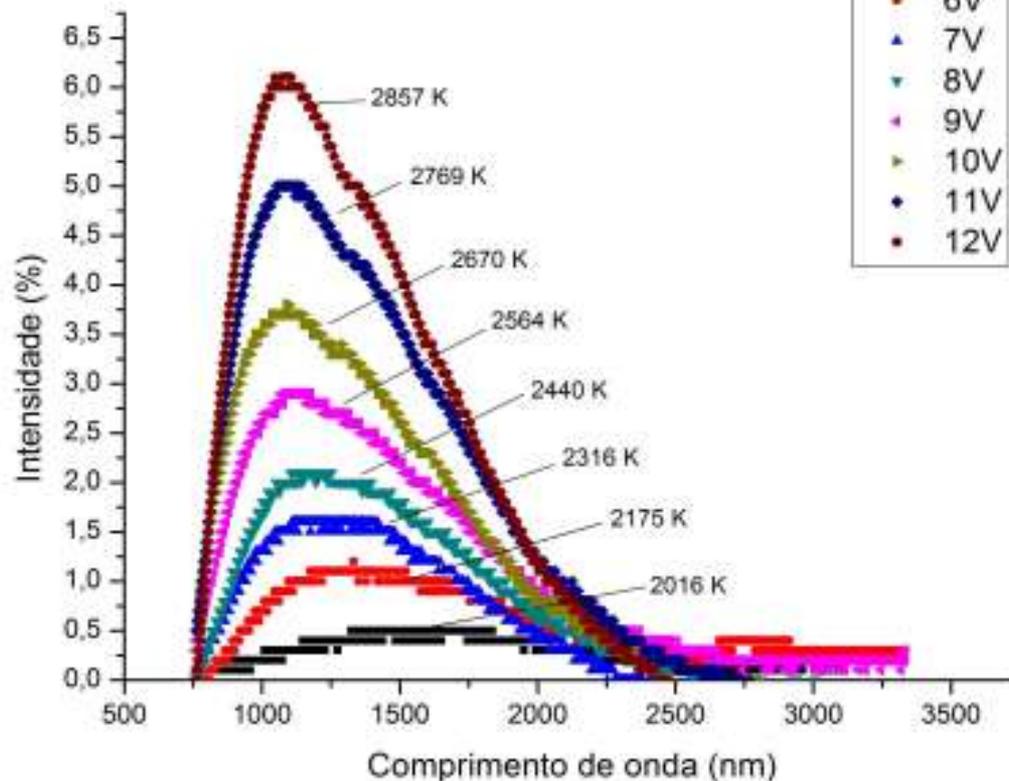
- Dos espectros medidos, determine λ_{\max}
- De R/R_0 determine a temperatura
- Verifique se a lei de Wien $\tau = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K} / \lambda_{\max}$ é válida.
 - Será que 3 pontos são suficientes? Lembre-se de comparar a curva teórica com os dados experimentais!
- Compare e discuta

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.

Lei de Wien

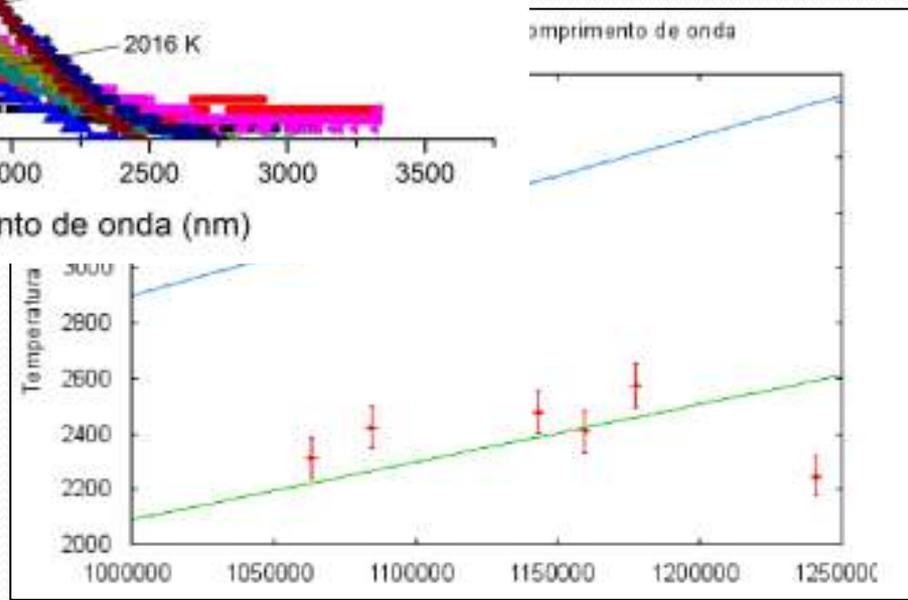
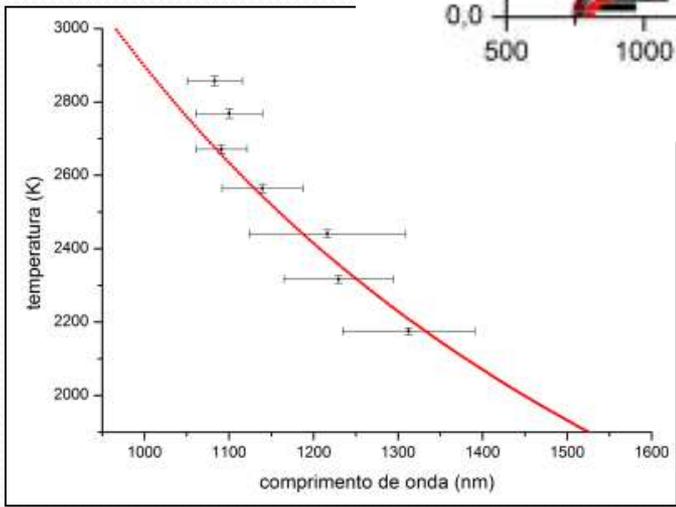
T (K)	λ
2029(8)	
2143(8)	
2245(8)	
2340(9)	



- 5V
- 6V
- 7V
- 8V
- 9V
- 10V
- 11V
- 12V

$T\lambda_{max} (m.K)$
$(2,19 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$
$(2,23 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$
$(2,07 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$
$(2,13 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$
$(2,15 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$
$(2,26 \pm 0,09) \cdot 10^{-3}$

$m)$	z
0,17	6.1
0.17	6.5
0.19	6.0
0.17	6.7



Coeficiente na Lei de Wien

Coef. Wien
[10^{-3} m K]

2.17 (3)

1.877 (25)

1.75 a 1.86 (19)

2.0 (8)

2.67 (28)

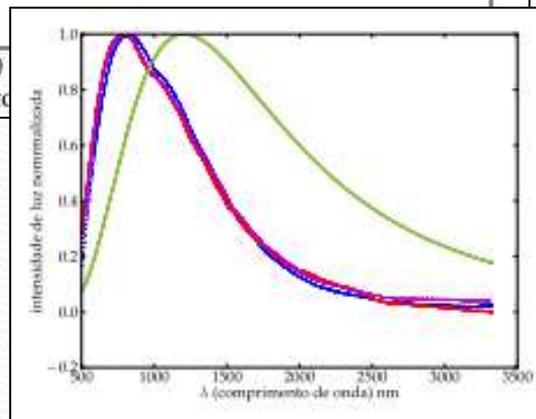
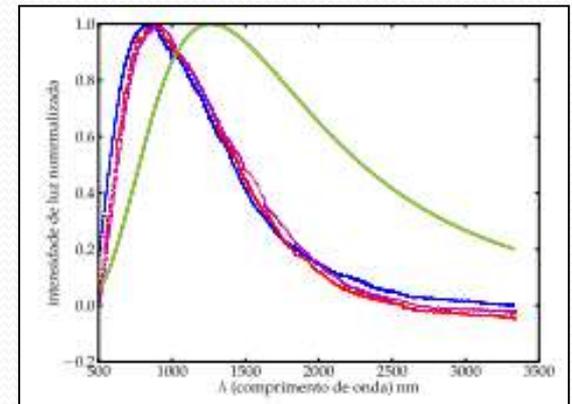
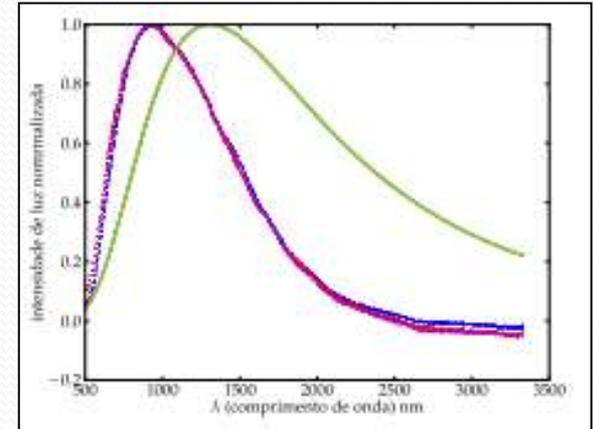
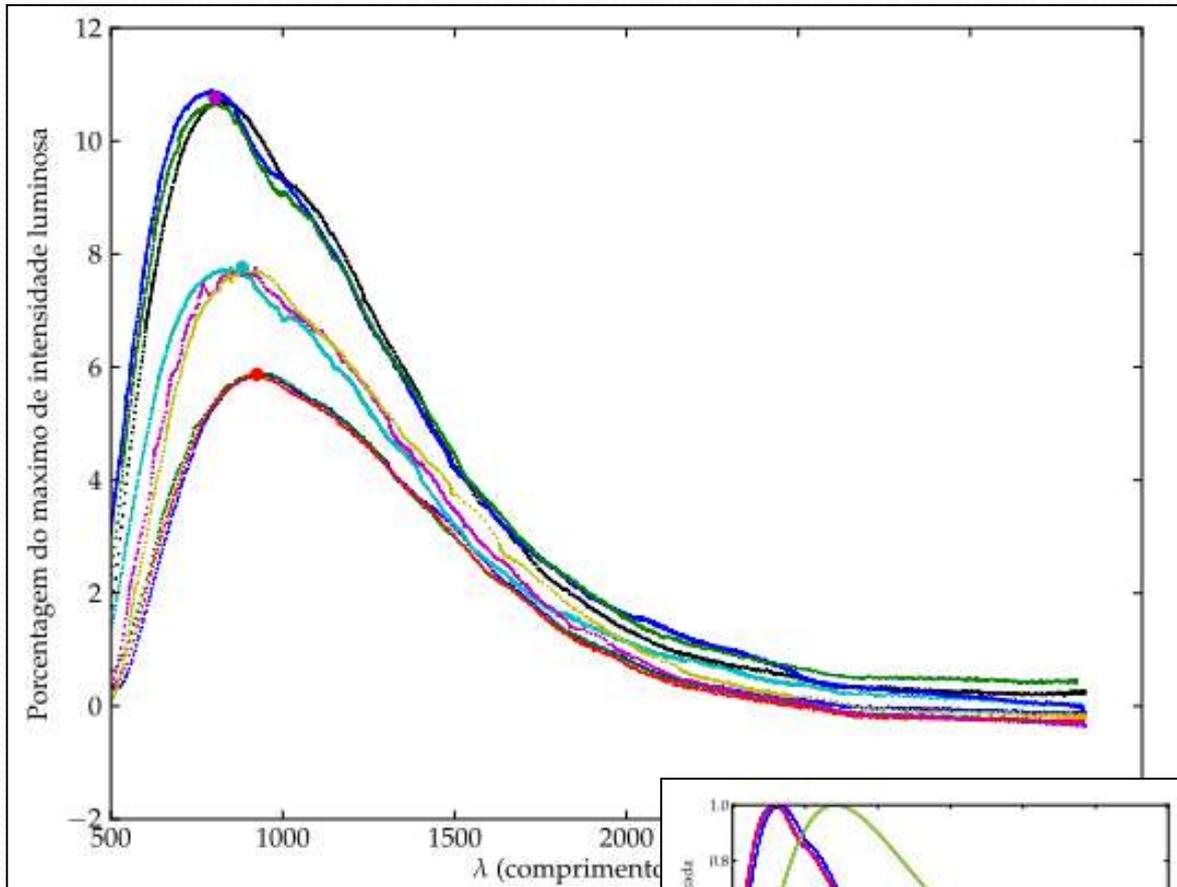
$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2,8977685 \cdot 10^{-3}}{T}$$

Atividades da Semana – Parte 3

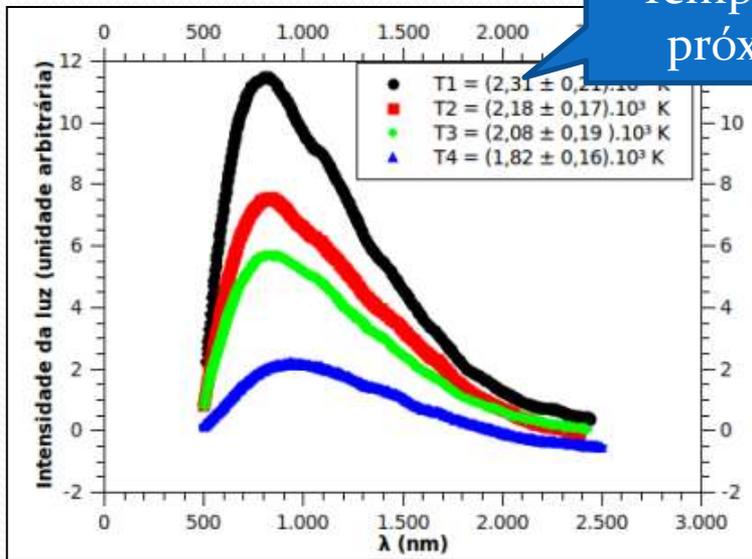
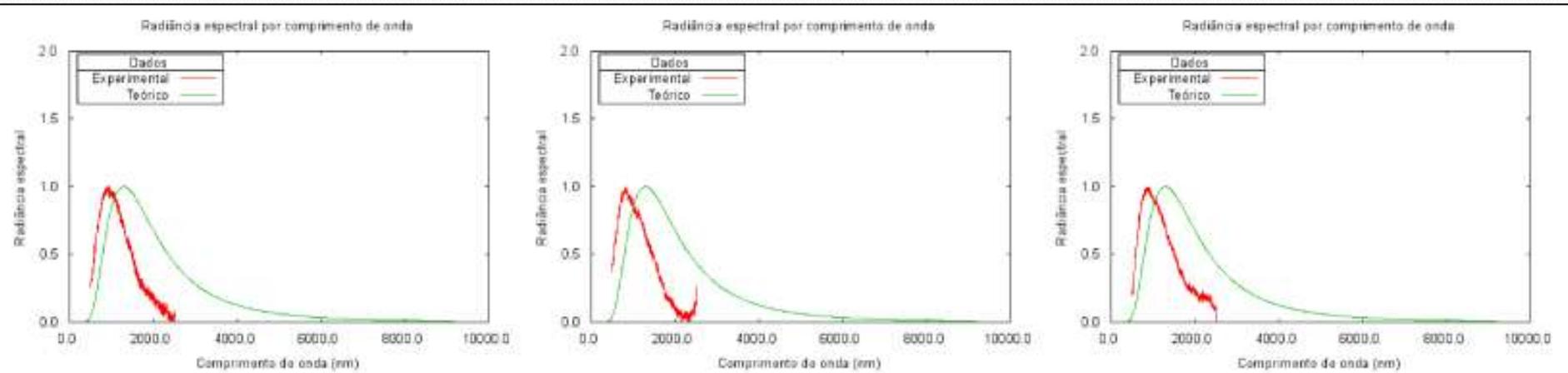
Espectro

- 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?~~~~

Espectro Teórico x Experimental

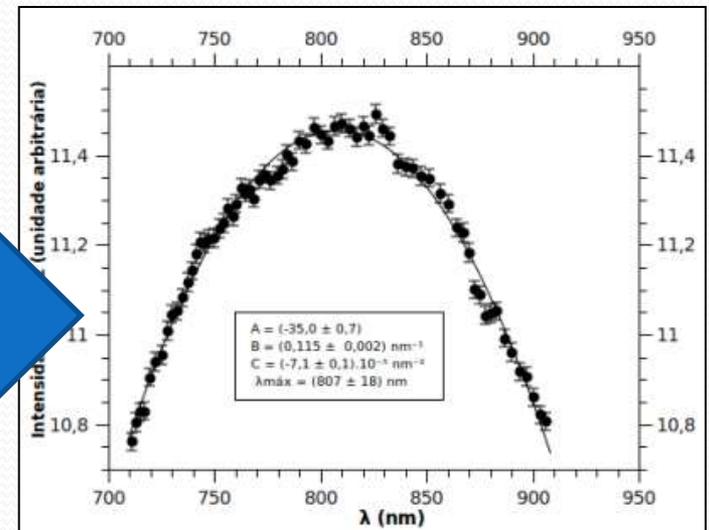


Espectro Teórico x Experimental



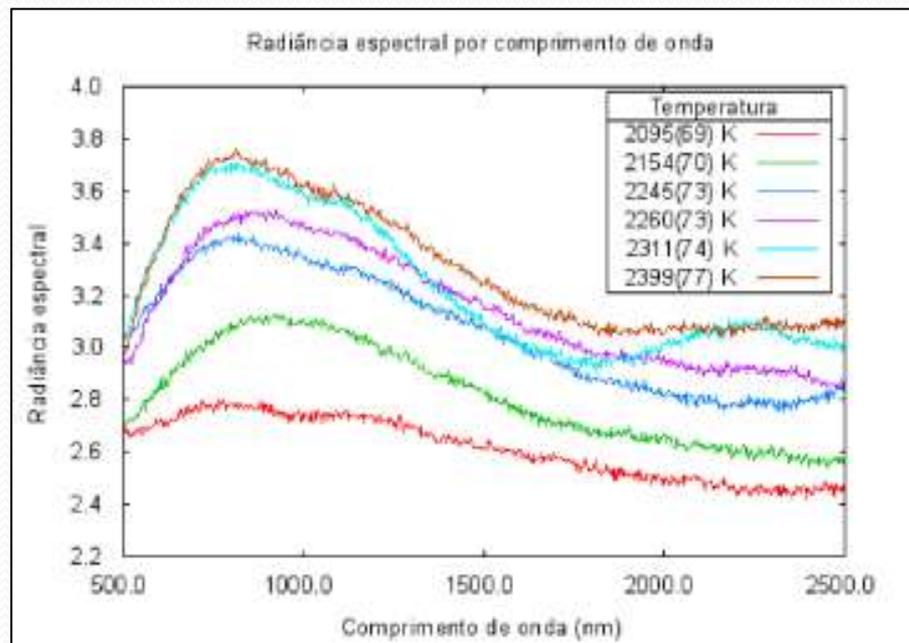
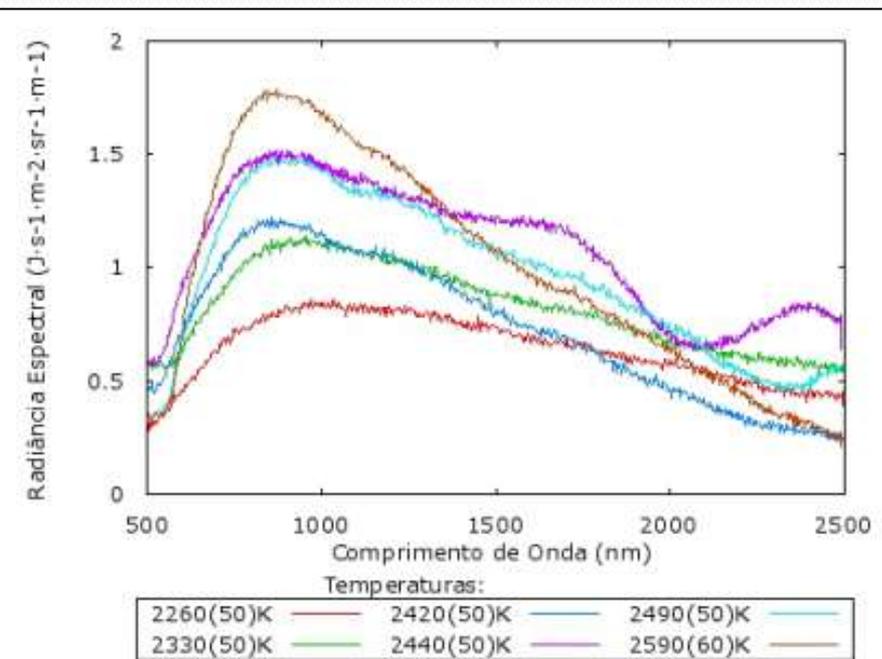
Temp. muito próximas!

Ajuste para encontrar o máximo

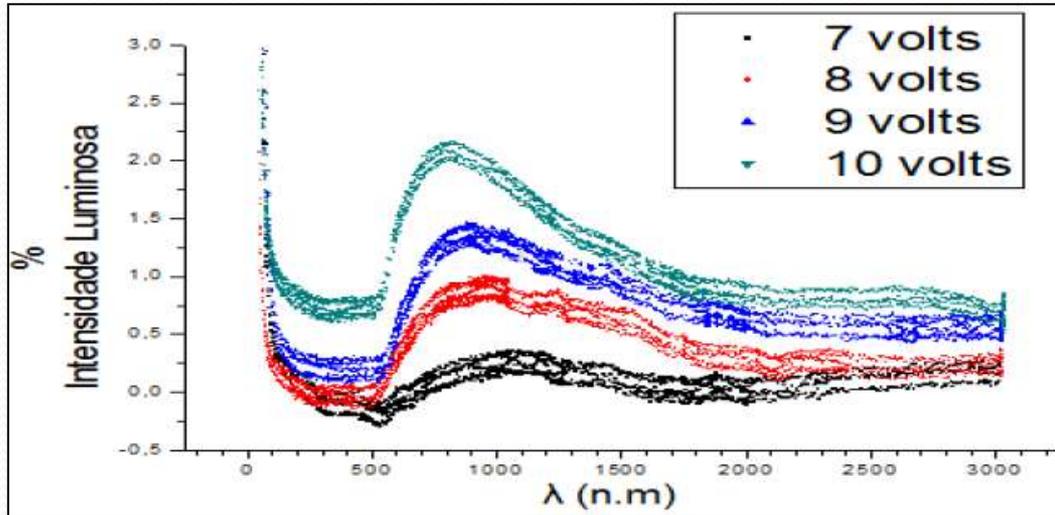


Alguns problemas

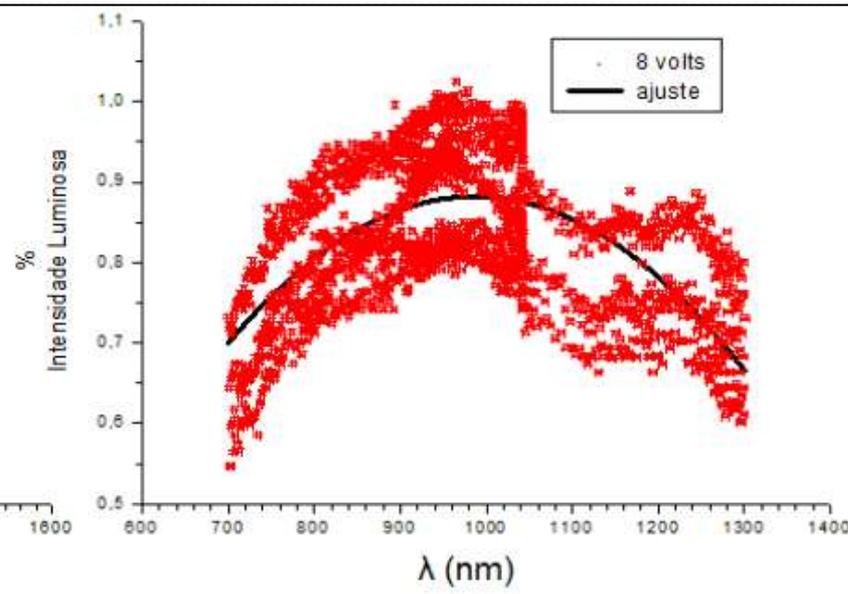
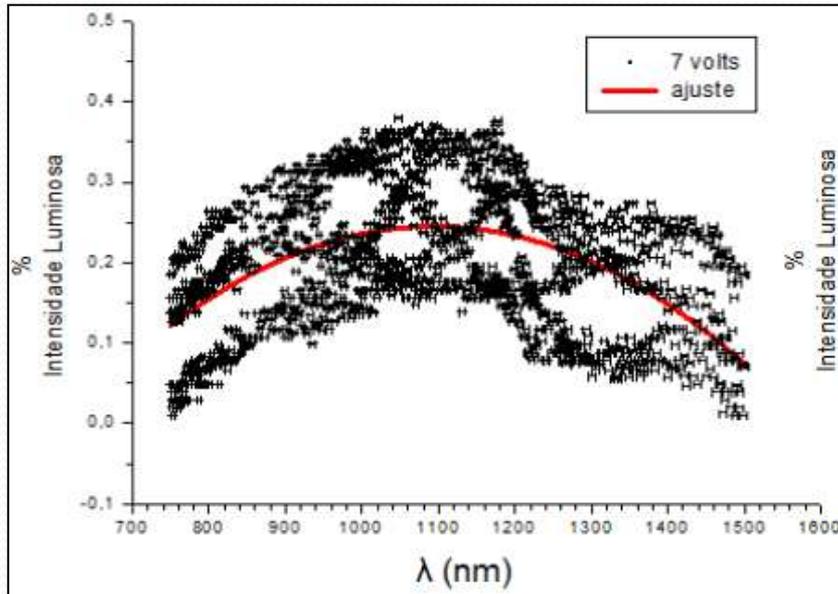
- Estes dois grupos mediram varias temperaturas, mas todas muito próximas!
 - 2260K e 2590K
 - 2095K e 2399K
- A sugestão era para variar entre 1800 e 3000...



Medidas com ruído

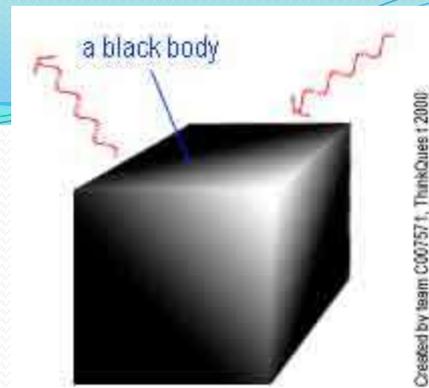


Para diminuir o ruído
vocês podiam mexer
na sensibilidade do
sensor e na freq. de
amostragem



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

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.)

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

- **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

Corpo negro: definição



- A emissividade (ϵ):

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

- 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

Derivação da Lei de Wien

- A lei de Wien está embutida na lei de radiação de Planck, que nos diz que a intensidade irradiada vale:

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{para o máximo:} \quad \frac{dI}{d\lambda} = 0$$

- A constante não importa, então:

$$0 = \frac{-5}{\lambda^6} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} + \frac{-1}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-2} e^{\frac{hc}{\lambda kT}} (-1) \frac{hc}{\lambda^2 kT}$$

- Como:

$$\begin{cases} \lambda \neq 0 \\ \lambda \neq \infty \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} x &= hc / \lambda kT \\ e^x &= \frac{5}{5 - x} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} x &= \frac{hc}{\lambda kT} = 4.965... \\ \lambda T &= 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Emissividade

- Ou seja, a constante da lei de Wien supõe um corpo negro perfeito.
- Se a intensidade observada for:

$$I_{obs}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot I_{planck}(\lambda, T)$$

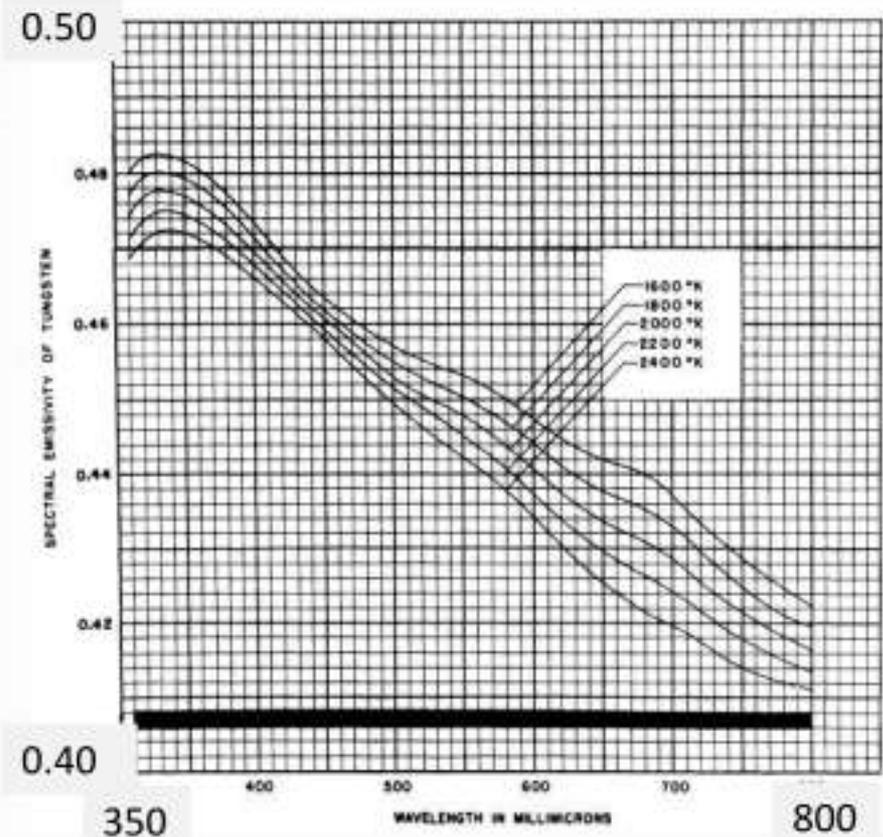
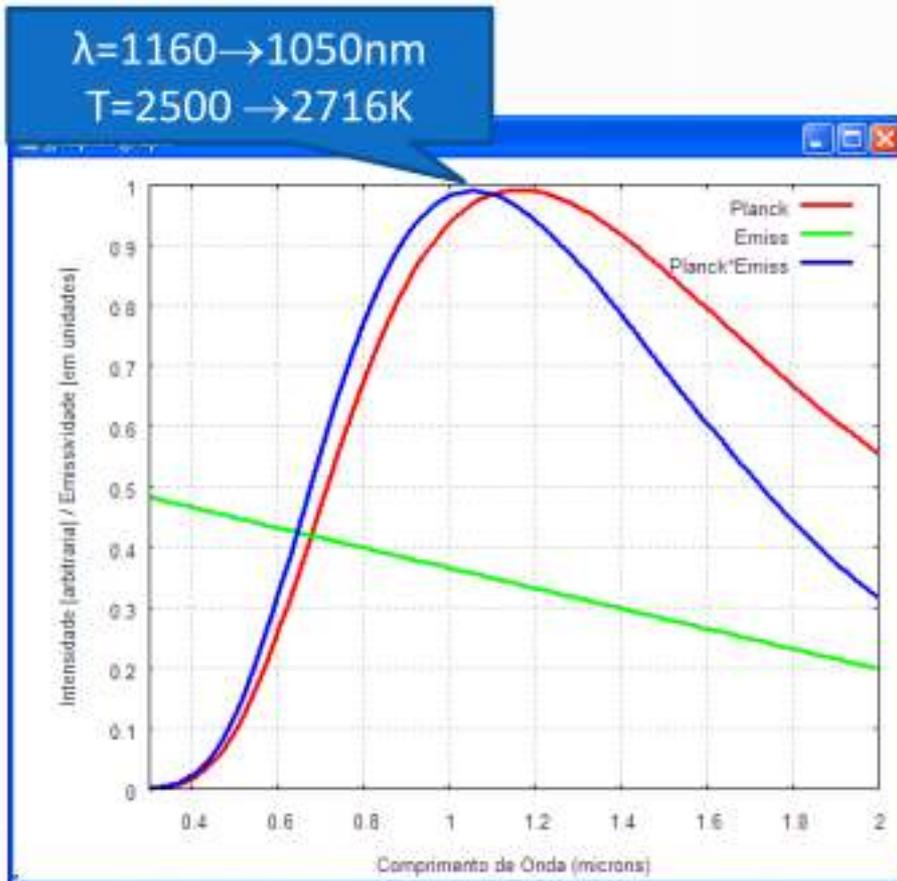
- Então a derivada

$$\frac{dI_{obs}}{dT} = \frac{d\varepsilon}{dT} I_{planck} + \varepsilon \frac{dI_{planck}}{dT}$$

- ... vai se anular para um valor diferente de λ

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!



Atividades da Semana

Espectro integrado

- Estime as áreas sob as curvas da semana passada e veja se elas são proporcionais a T^4 .
- Estime a porcentagem de radiação emitida pela lâmpada está na região visível do espectro
 - A lâmpada é um bom iluminador? Comente.

Espectro

- Faça o gráfico da razão entre o espectro experimental e a curva de Planck e estude a emissividade em função de λ e T

Detector

- O nosso sensor de infra-vermelho é perfeito? **Não!** Se sua sensibilidade depender de λ e/ou T o que vai acontecer?
 - Procure a resposta espectral do sensor no site da Pasco e tente fazer a correção necessária!



Estatística – Parte 1

Erros Estatísticos x Sistemáticos

Incertezas

- Incertezas estatísticas são aquelas que variam aleatoriamente com a medida.
- Incertezas sistemáticas são aquelas que estão relacionadas ao método empregado na medida e análise e não possuem caráter aleatório.
- É mais fácil caracterizar incertezas em tipo A e B
 - A – aquelas avaliadas estatisticamente
 - B – aquelas avaliadas de outra forma
- A incerteza de uma medida é a combinação dos dois tipos

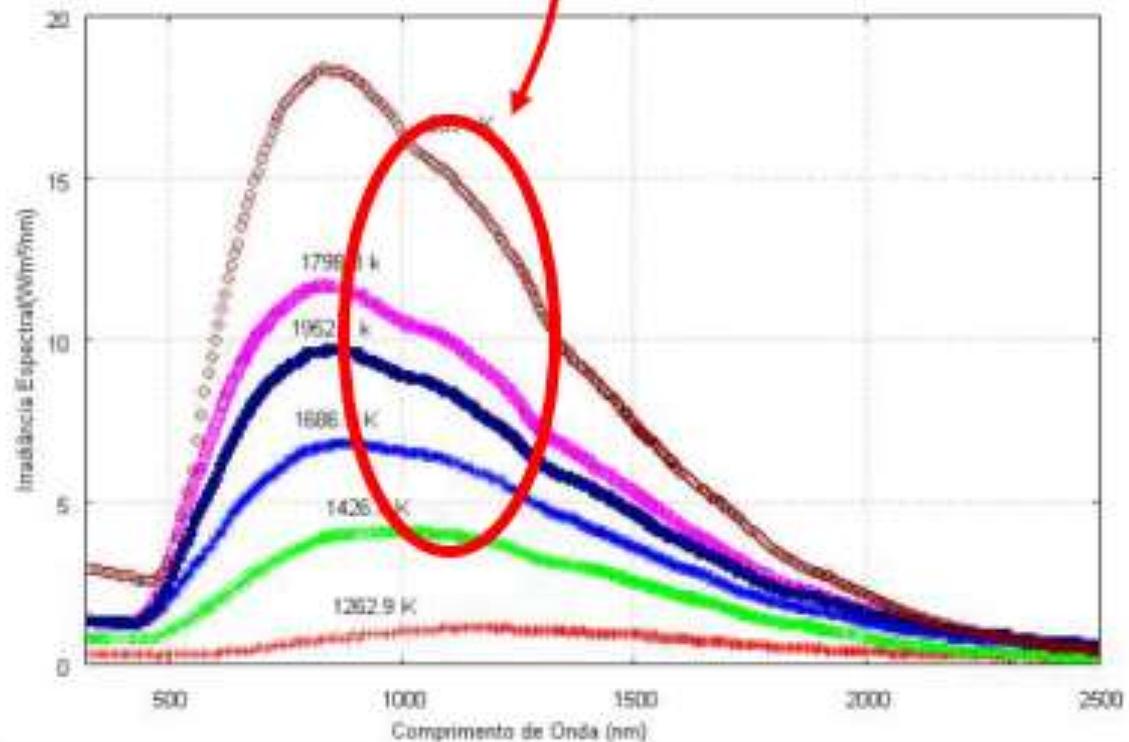
$$\sigma^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2$$

- Em “papers” mais elaborados (exemplo):

$$V = 1.35 \pm 0.02(est) \pm 0.23(sis)$$

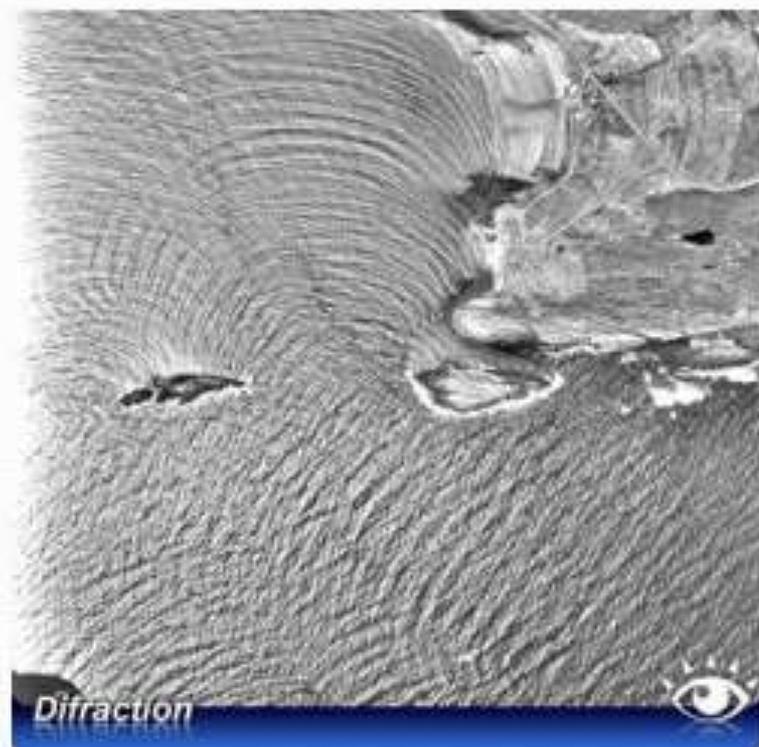
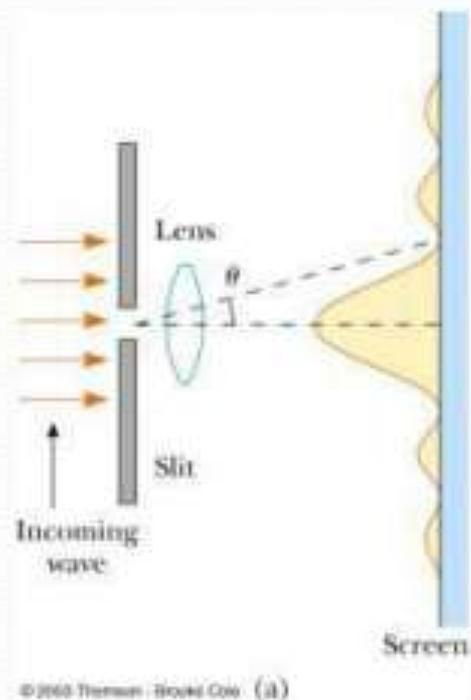
Erro sistemático

- Todos os espectros medidos apresentavam um segunda corcova aparentemente pequena
 - Qual é a origem desse “segundo pico”?
- O problema é a maneira que usamos para separar a luz:
 - Um rede de difração



Difração

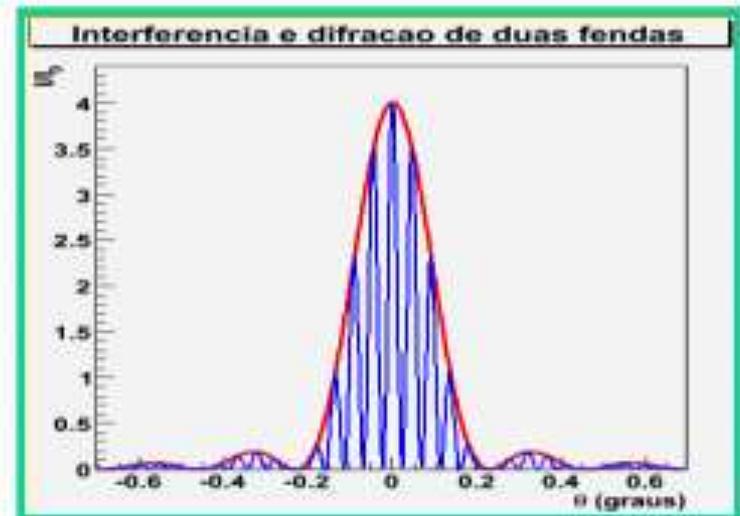
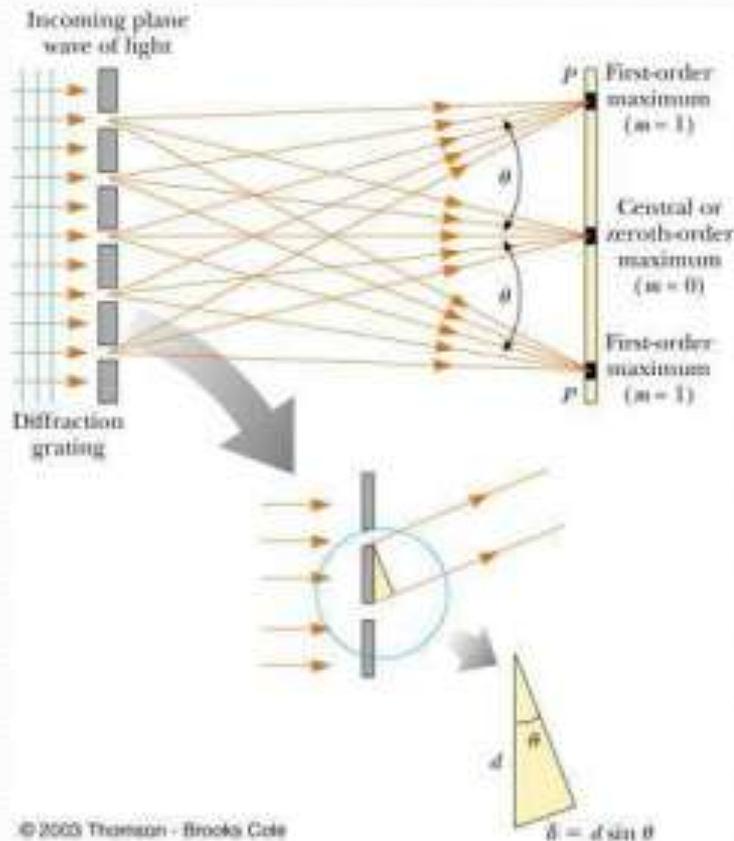
- Com a luz é uma onda, quando ela passa por uma fenda de tamanho parecido com seu comprimento e onda, ocorre difração.



- É o mesmo que acontece com ondas no mar

Sistema de Fendas

- Quando temos duas ou mais fendas e a luz que passa por eles é coerente (está em fase, etc...), além da difração vai ocorrer interferência



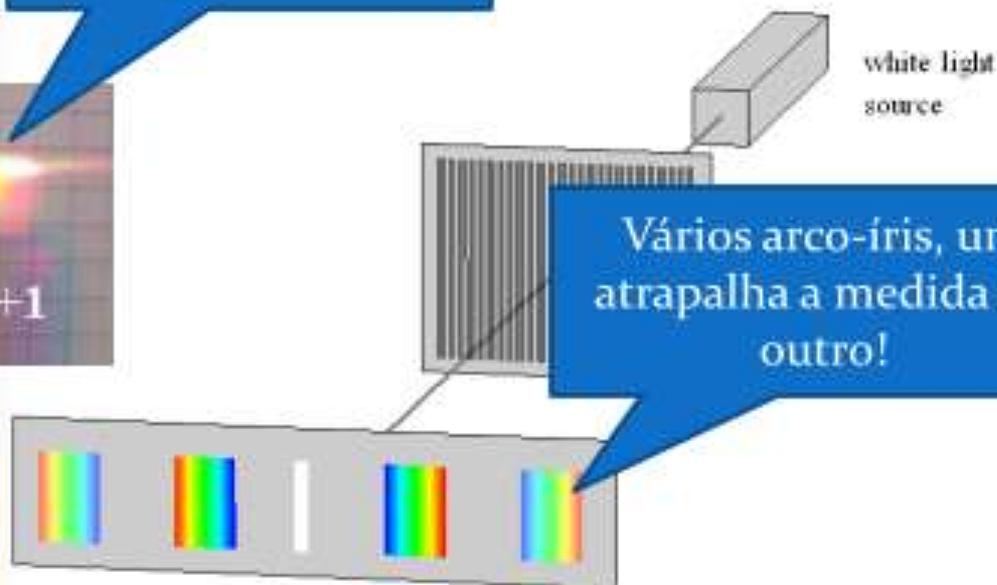
Interferência quer dizer que as duas ondas (luz) vão se somar ou se destruir, dependendo da diferença de fase.

Grade de Difração

- Numa grade de difração, temos muitas fendas por milímetros... É mais complicado, mas é o mesmo princípio de funcionamento.

Tem uma parte da luz que passa direto (aquele máximo para $\lambda \rightarrow 0$)

E os "arco-íris" para os dois lados

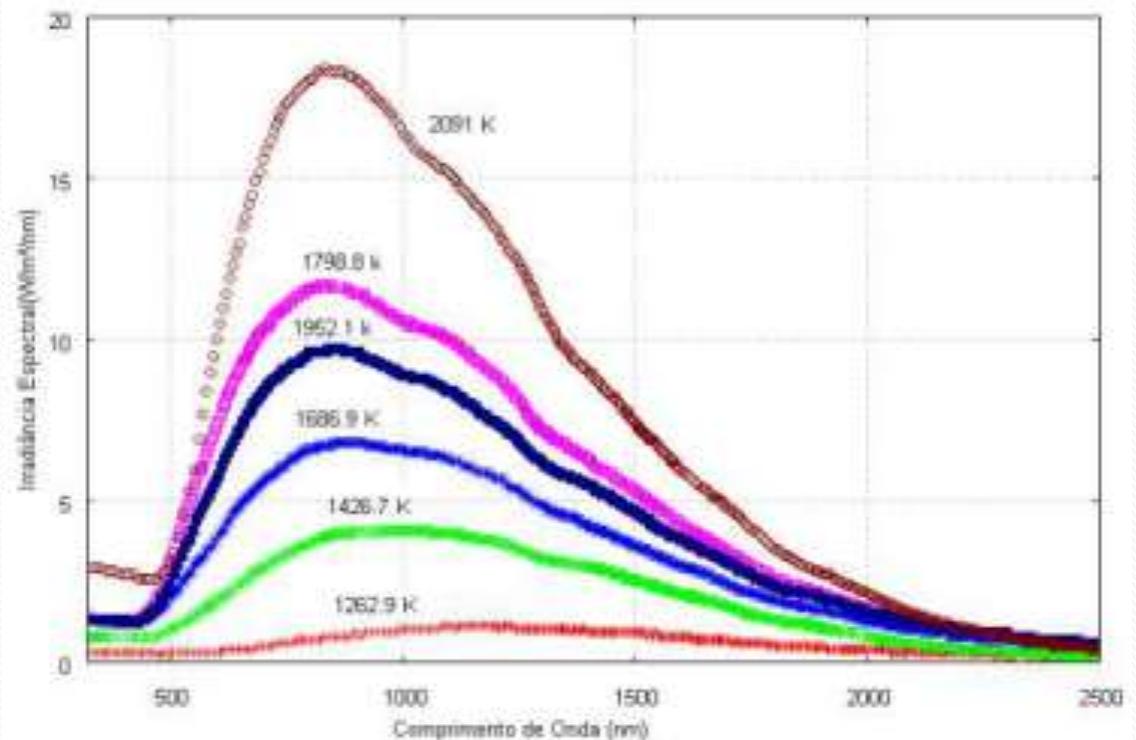


No visível pareciam separados, mas no infravermelho estavam sobrepostos!!

Erro sistemático

- Como os espectros estavam sobrepostos, não tinha outro jeito de fazer a medida, a não ser medir a soma dos dois!
- Em física 4 vocês vão aprender que o máximo de cada ordem cai com $1/m^2$. Ou seja, o 2º máximo vale 25% do primeiro

Isso significa que cometemos um erro sistemático de 25% na área total do gráfico!!



Exemplo 2: O método experimental

- Qual a dependência dos coeficientes da convecção com os pontos que eu escolho para fazer o ajuste?

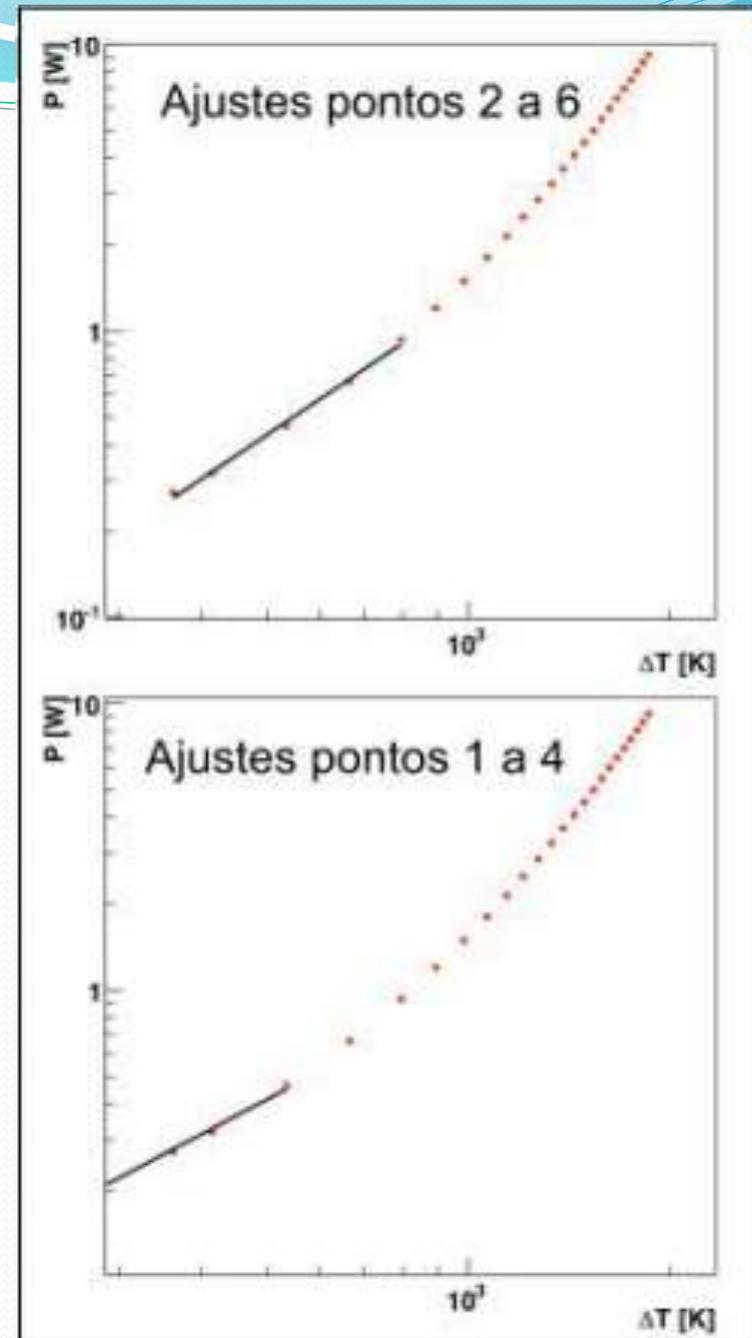
$$P_{conv} = C\Delta T^\alpha$$

- C e α mudam muito? É significativo? Como isso afeta a incerteza na potência de irradiação?

Incerteza em α

- $\alpha_{1-4} = 1,23 + 0,02$
- $\alpha_{2-4} = 1,39 + 0,05$
- $\alpha_{1-5} = 1,35 + 0,02$
- $\alpha_{2-5} = 1,30 + 0,02$
- $\alpha_{1-3} = 1,16 + 0,03$
- $\alpha_{1-6} = 1,40 + 0,01$
- $\alpha_{2-6} = 1,57 + 0,02$

- Desvio padrão dos valores acima = 0,13
 - 5 vezes maior que a incerteza de um dos ajustes



Conclusões

- Não existem apenas incertezas estatísticas (fáceis de lidar), existem também as sistemáticas.
- As conclusões de um resultado experimental (ou teórico) dependem fortemente de quanto a gente confia neles.
 - Incertezas são tão importante quanto as medidas efetuadas
- Exercitem avaliações de incertezas, tanto estatísticas quando sistemáticas