

Laboratório de Física Moderna

Radiação de Corpo Negro

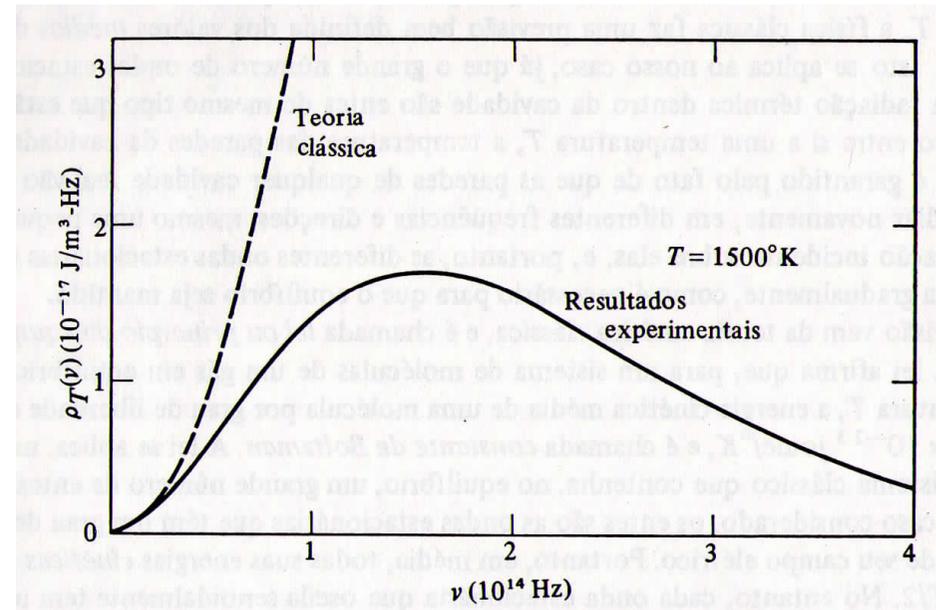
Marcelo Gameiro Munhoz
munhoz@if.usp.br

Contextualização

- Para iniciar nosso experimento, vamos compreender o contexto que o cerca
- Qual o tipo de fenômeno queremos estudar e por que ele é interessante?

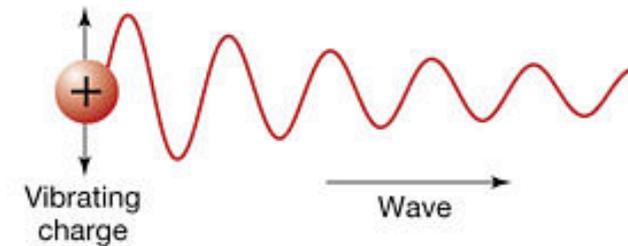
Radiação Térmica

- Ondas eletromagnéticas emitidas por todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto
- **Importância:** um dos grandes problemas em aberto da física clássica no final do século XIX



Radiação Térmica

- Isso ocorre devido ao movimento térmico de cargas elétricas que existem no interior dos corpos

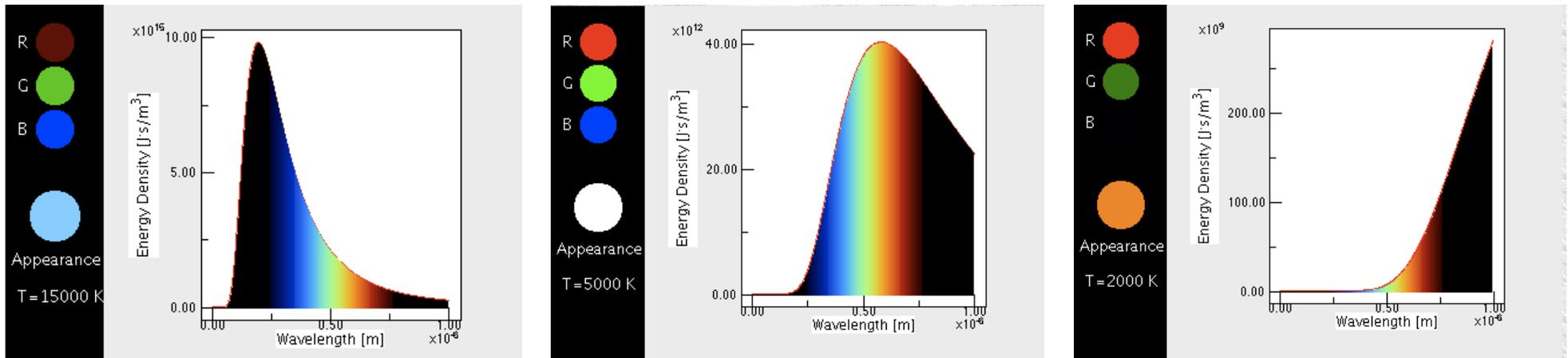


Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Espectro de frequência da radiação térmica

- A radiação emitida por um objeto com temperatura $T > 0 \text{ K}$ não apresenta apenas uma frequência (lembre-se das ondas eletromagnéticas), mas uma **distribuição** de frequências
- A “quantidade” de radiação emitida com cada valor de frequência é medida em energia por unidade de tempo (potência) por unidade de área, chamada de radiância espectral $R_T(\nu)$

Espectro de frequência da radiação térmica



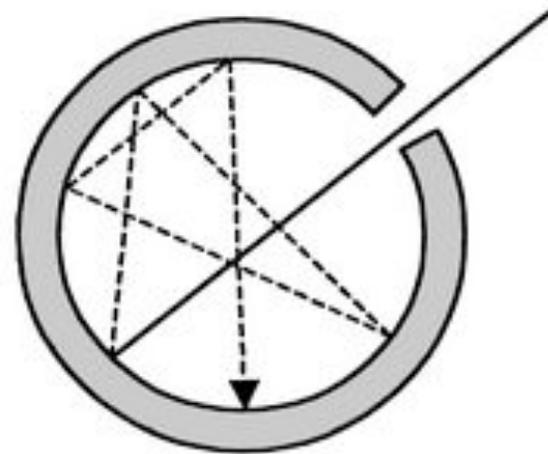
- A “quantidade” de radiação emitida com cada valor de frequência é medida em energia por unidade de tempo (potência) por unidade de área, chamada de radiância espectral $R_T(\nu)$

Corpo Negro

- Podemos considerar uma classe de objetos que emitem apenas a sua radiação térmica, isto é, absorve (não reflete) toda a radiação incidente e emite (não absorve) toda a radiação térmica produzida
- Este conceito é uma idealização!

Corpo Negro

- **Importância:** Todos os objetos que se comportam como um corpo negro devem emitir a mesma radiância espectral (universalidade) que depende da temperatura e não da forma ou material de que é feito. Portanto, ele permite o estudo da radiação térmica



Leis empíricas

- Lei de Stefan (1879)

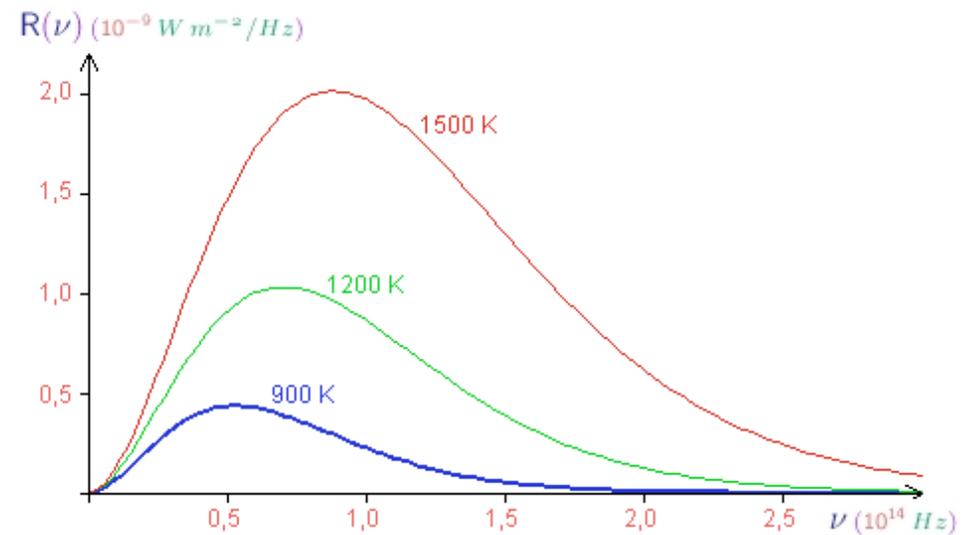
$$R_T = \sigma \cdot T^4$$

onde: $R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu$

- Lei do deslocamento de Wien

$$\nu_{max} \propto T$$

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898 \times 10^{-3} m \cdot K$$

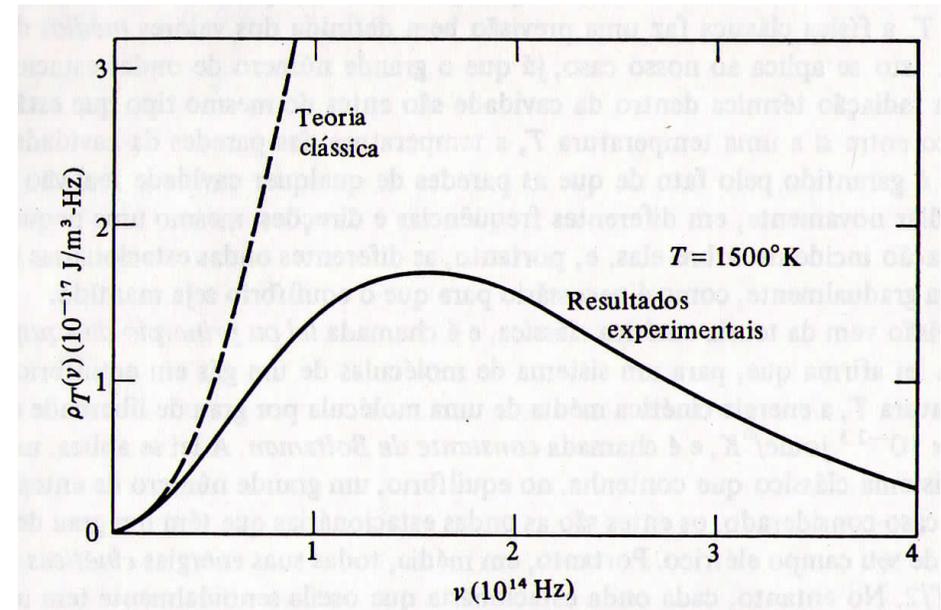


Lei de Rayleigh-Jeans

- Segundo a física clássica a radiância espectral de um corpo negro deveria ser dada por:

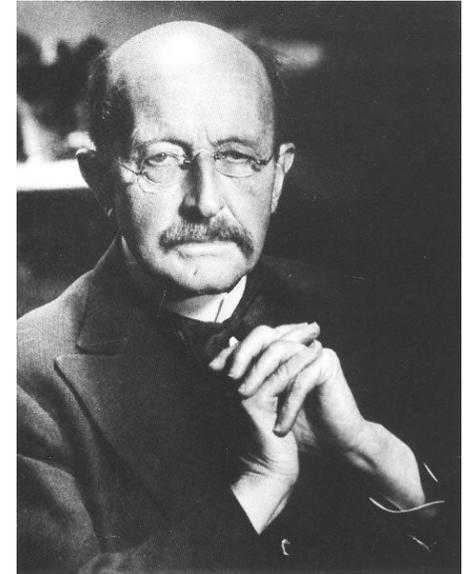
$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3} d\nu$$

- que, como já vimos, não descreve as medidas



Como resolver essa discrepância?

- Em 1900, Max Planck, que tinha contato com físicos experimentais que estudavam o problema da radiação do corpo negro, propõe um equação que descreve perfeitamente os dados...



Proposta de Planck

- Planck inicialmente supôs que as paredes da cavidade eram constituídas de “pequenos osciladores” que trocam energia com a radiação mantendo o equilíbrio térmico
- Planck fez a suposição que esses osciladores poderiam assumir apenas alguns valores específicos de energia:

$$E_1 = 0, E_2 = \Delta E, E_3 = 2 \cdot \Delta E, E_4 = 3 \cdot \Delta E, \dots$$

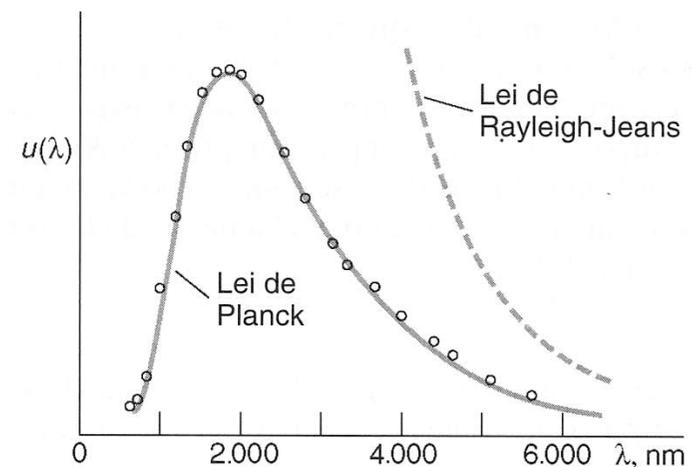
- Sua intenção era fazer com que $\Delta E \rightarrow 0$ para recuperar a distribuição contínua de energia da física clássica

Fórmula de Planck

- Porém, apenas mantendo essa quantização de energia que Planck consegue reproduzir os dados com a expressão:

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

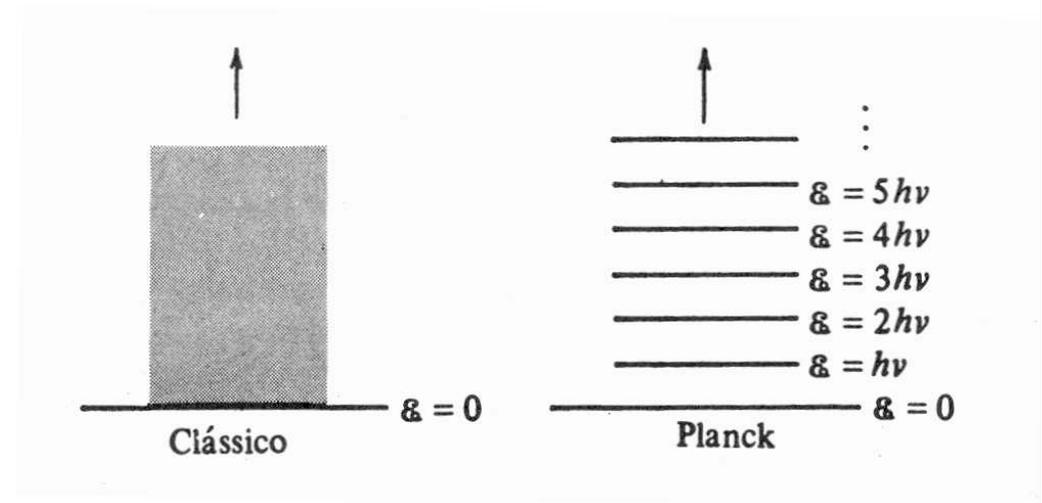
- onde:
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$



Implicações do resultado de Planck

- Qual o significado físico da hipótese de Planck?
- Ela impõem que os pequenos osciladores que constituem as paredes da cavidade e estão em equilíbrio com a radiação, só podem assumir certos valores discretos de energia:

$$E = nh\nu$$



Objetivos

- Verificar o ajuste da curva de Planck à radiância espectral emitida por uma lâmpada de filamento (corpo negro) e extrair a constante de Planck

Lâmpada de Filamento

- Lâmpada: filamento metálico envolto por um bulbo de vidro selado que contém um gás a baixa pressão.
- O filamento é um elemento resistivo não linear, que se aquece com a passagem da uma corrente elétrica (efeito Joule).
- O filamento mais comum é o de tungstênio, pois ele se aquece a uma temperatura suficientemente elevada para que luz visível seja emitida.



Corpo Negro: ideal × real

- A lâmpada é um corpo negro ideal? Existe um corpo negro ideal?
- Como lidar experimentalmente com um objeto que acreditamos se comportar como um corpo negro? O que devemos considerar ao realizar um experimento com um corpo negro?

Corpo Negro: ideal × real

- A emissividade total (ϵ) é uma quantidade adimensional que assume valores entre 0 e 1. Para uma superfície perfeitamente refletora, $\epsilon=0$ (espelho perfeito) e, para uma superfície perfeitamente absorvedora, $\epsilon=1$ (corpo negro ideal).
- A absortividade total também é uma quantidade adimensional e assume valores semelhantes à emissividade total. Mas, em geral, a absortividade total e a emissividade total dependem da temperatura.

Procedimento de Medida e Análise

1. Medir a temperatura de uma lâmpada de filamento
2. Medir a radiância espectral dessa lâmpada
3. Ajustar a curva de Planck à radiância espectral medida
4. Essa lâmpada é um corpo negro ideal? As condições experimentais são ideais?
 - Aplicar as correções que achar necessárias
5. Qual foi o resultado? O que podemos concluir do experimento?

Procedimento

I. Medir a temperatura de uma lâmpada de filamento

- Podemos obter a temperatura da lâmpada a partir da expressão:

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,24}$$

- onde:
 - R = resistividade do filamento na temperatura T
 - T_0 = temperatura da sala
 - R_0 = resistividade do filamento na temperatura T_0 .
Depende da fabricação da lâmpada, sendo a que utilizamos igual a $1\Omega(+/-)5\%$

Procedimento

I. Medir a temperatura de uma lâmpada de filamento

- Com a resistividade do filamento (medida) e a sua resistividade à temperatura ambiente (dada) determina-se a temperatura naquela condição
- Então, na verdade é preciso medir o valor de R para cada condição de tensão fornecida. Como?
- A partir de $R=V/i$, ou seja, medindo a tensão e a corrente na lâmpada para cada espectro medido.

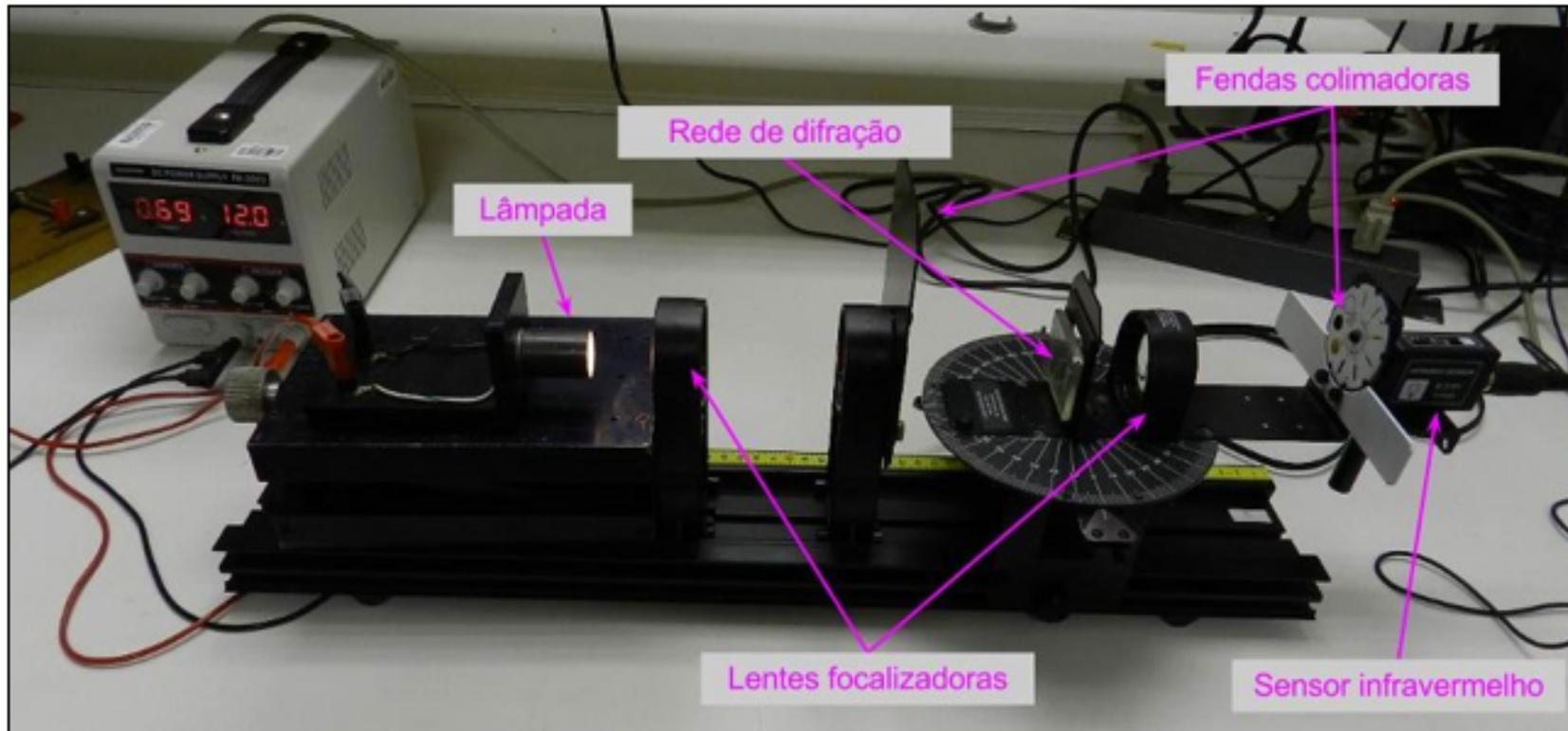
Procedimento

2. Medir a radiância espectral da lâmpada de filamento

- Vamos utilizar um instrumento chamado espectrofotômetro.
- O espectrofotômetro mede a energia irradiada em função do comprimento de onda (ou frequência)
- Como?

Procedimento

2. Medir a radiância espectral da lâmpada de filamento



- Atenção com o alinhamento e foco das lentes.
- Ajustar o ganho do sensor infravermelho para 10x.

Procedimento

2. Medir a radiância espectral da lâmpada de filamento

- Basicamente, utiliza-se a lei de Bragg para medir o comprimento de onda da radiação emitida a partir do ângulo em que ela é medida
- A energia da radiação é dada pelo sensor (em que unidade?)
- **Medir a radiância espectral para 5 temperaturas diferentes da lâmpada**

Análise

3. Ajustar a curva de Planck à radiância espectral medida

- Copiar os dados para uma planilha
- Transformar a medida de posição para comprimento de onda
 - $\theta = (x/60) * (\pi/180)$ em radianos
 - $\lambda = (0,001/300) * \sin(\theta)$ em metros

Análise

3. Ajustar a curva de Planck à radiância espectral medida

- Gerar o gráfico de intensidade \times comprimento de onda
- Usar o Webroot (opcional)
 - Salvar a planilha com as colunas de comprimento de onda e intensidade em formato txt
 - Abrir com o Webroot (<http://webroot.if.usp.br>)
 - Gerar o gráfico

Análise

3. Ajustar a curva de Planck à radiância espectral medida

- Ajustar a curva de Planck
 - No webroot a função de Planck em termos do comprimento de onda pode ser escrita como:
 - $$([0]*8*3.1416*[1]^3e8/(x*x*x*x*x))^1 / (\exp([1]*3e8/(x*[2]))-1)+[3]$$
 - onde: [0] é só uma normalização; [1] é a constante de Planck; [2] é kT e [3] é uma constante que representa o fundo

Análise

3. Ajustar a curva de Planck à radiância espectral medida

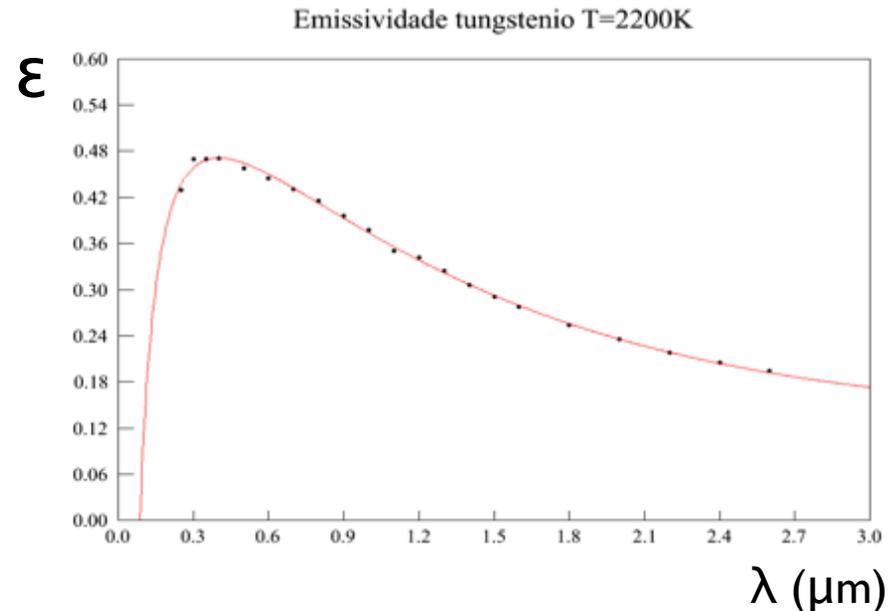
- Ajustar a curva de Planck
 - Inicialmente, sobreponha um gráfico dessa função para encontrar os parâmetros que mais se aproximam dos dados
 - Comece com: $[0]=1$, $[1]=6,6e-34$, $[2]=1,38e-23*T$, $[3]=$ valor para onde convergem os dados para valores alto de comprimento de onda
 - Procure modificar o primeiro parâmetro até obter uma curva parecida
 - Usando esse valores como “chute” inicial, faça o ajuste

Análise

4. Essa lâmpada é um corpo negro ideal?

As condições experimentais são ideais?

- A princípio, a emissividade da lâmpada, que representa a fração de radiação emitida em relação à radiação total produzida, para cada comprimento de onda é dada pela figura ao lado
- É preciso aplicar essa correção? Como determinar isso? E como aplicar a correção?



Curva ajustada na figura acima:

$$e(x) = 0.1402 + 0.703 \cdot \exp(-0.8457 \cdot x) - 0.0683/x$$

Análise

4. Essa lâmpada é um corpo negro ideal?

As condições experimentais são ideais?

- Como minimizar efeitos espúrios?
 - O espectrofotômetro mede apenas a radiação emitida pela lâmpada?
 - Podemos ajustar todo o espectro de radiância espectral? Por quê?
 - A abertura do sensor influencia no resultado?

Análise

5. Qual foi o resultado? O que podemos concluir do experimento?

- Ele é satisfatório?
- Como estimar as incertezas e considera-las na análise do resultado final?
- Como considerar os efeitos de fenômenos espúrios (isto é, aqueles que não queremos medir) neste experimento?

Sequência da Aula

- Familiarização com o equipamento
- Determinar a temperatura da lâmpada para um certo valor de tensão aplicada e medir a radiância espectral
- Ajustar a curva de Planck e extrair o valor da constante de Planck
- **Mostrar ao professor o valor obtido**
- Refletir sobre os resultados e decidir como proceder com as medidas e análise para outras temperaturas (5 no total)