

Instituto de Física
USP

Física V - 4300311

Aula 08

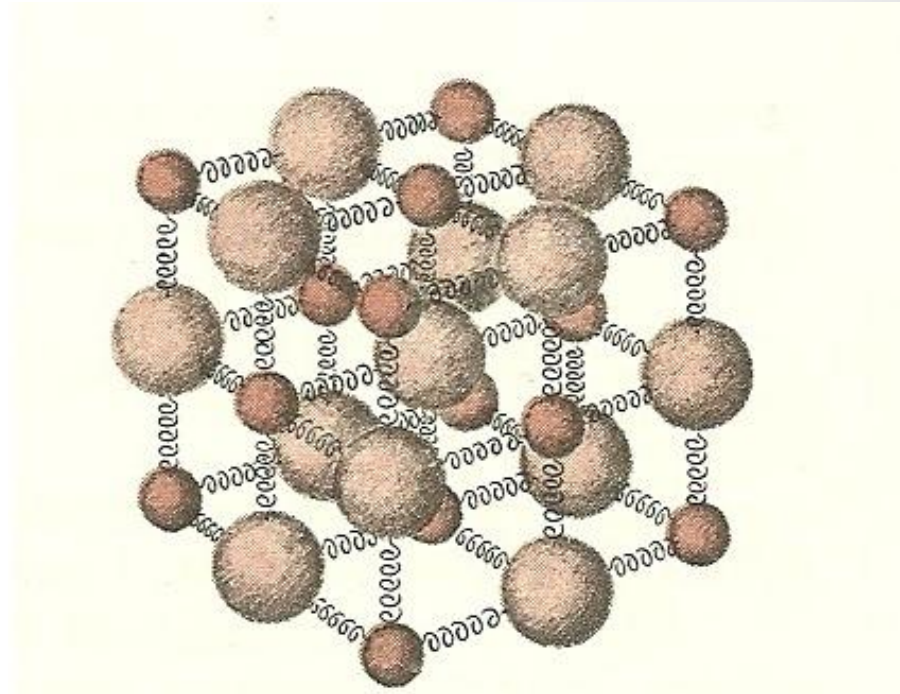
Professora: Mazé Bechara

Aula 08 – Oscilações nos sólidos e A Radiação do “Corpo Negro”

- i. **O Calor específico molar a volume constante dos sólidos condutores considerando o modelo de Drude para a condução elétrica.**
2. **Tudo o que você queria saber sobre temas do Tópico I mas AINDA não teve coragem de perguntar.**
3. **Conteúdo detalhado do Tópico II.**
4. **A emissão de energia eletromagnética por efeito de temperatura e a definição de corpo negro (os constituintes da matéria são neutros, mas têm cargas em movimentos com aceleração).**
5. **Características experimentais da radiação de corpo negro: Lei de Stefan – Boltzmann para a intensidade (radiança) total emitida pelo corpo negro, a Lei de deslocamento de Wien e a radiança espectral. Relação da emissão do corpo negro, ou forno ideal, com a de um forno real na mesma temperatura.**

Modelo mecânico de matéria sólida cristalina

- **QUESTÃO:**
- Este modelo é, no seu conhecimento, igual para sólidos não condutores e condutores?
- **EXPLIQUE**



Modelo de Drude para a condução elétrica (1902)

Energia dos íons e dos elétrons de condução:

$$\varepsilon_{ions} = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + \frac{1}{2}k_x x^2 + \frac{1}{2}k_y y^2 + \frac{1}{2}k_z z^2$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{2}m_e(v_{xe}^2 + v_{ye}^2 + v_{ze}^2)$$

A energia média do sistema de N íons + N elétrons pelo teorema de equipartição é dado por:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{9}{2}kT(?)$$

Este resultado não está de acordo com o experimental, que para todos os sólidos, condutores ou não tende a 3R. Falha na teoria de Boltzmann não se resolve só com a quantização da energia!

Chegou-se ao limite de validade da estatística clássica?! E agora?!

Limites da Mecânica estatística clássica

- *Resolvidos na Física no século XX com a Mecânica Estatística Quântica (veja Thornton & Rex, Cap. 9. Tratado na disciplina Física Moderna II)*
- ○ spin dos constituintes definem outras estatísticas (quânticas) para sistemas de muitas partículas, **que coincidem com a de Boltzmann em alguns limites.**
- A estatística para os íons está no limite de validade da estatística clássica.
- A estatística dos elétrons de Fermi-Dirac, apropriada para partículas de número quântico de spin semi-inteiro, nas condições normais de temperatura e pressão não estão no limite de coincidência com a estatística de Boltzmann.
- Segundo tal estatística, o movimento dos elétrons de condução ($s=1/2$) é de aproximadamente 0,007% do efeito do movimento dos íons (positivos) nos sólidos condutores. **Daí a concordância do resultado experimental nos sólidos isolantes, mas também dos condutores com a previsão clássica, dentro de 0,007%!**

Conteúdo detalhado do Tópico II

II.1 **A radiação de um corpo real por efeito de temperatura e a radiação do corpo negro:** resultados experimentais. O fracasso das previsões das teorias clássicas, eletromagnetismo e mecânica estatística clássica dos sólidos para descrever a emissão do corpo negro. A catástrofe do ultravioleta no tratamento teórico de Rayleigh e Jeans. **A proposta de Planck que permitiu a descrição das observações do corpo negro – o início da Física Quântica.**

II.2 A proposta do **caráter corpuscular da radiação eletromagnética por Einstein - os fótons.**

- Diferenças da quantização de Planck e de Einstein.
- O número de fótons por área e tempo que garante a compatibilidade entre as descrições ondulatória e corpuscular da radiação eletromagnética na intensidade da radiação eletromagnética monocromática e harmônica.

II.3 **Fenômenos que evidenciam o caráter corpuscular da radiação:**

- O **efeito fotoelétrico** com luz e ultravioleta;
- **Efeito Compton:** o espalhamento de raios-X e γ por matéria;
- A **produção e a aniquilação de pares** de partícula e sua antipartícula;
- O **espectro de raios-X** produzido na desaceleração de feixe de elétrons na matéria pesada.

II.4 **A absorção e espalhamento dos raios-X e gama pela matéria** – compatibilidade das descrições ondulatória e fotônica e o conceito de seção de choque. **A competição entre os fenômenos de absorção:** efeito fotoelétrico e produção de pares, **e de espalhamento:** sem (Thomson) e com (Compton) mudança no comprimento de onda. **A seção de choque de cada fenômeno e a total.**

Referências ao Tópico II (veja Guia de Trabalho)

- **Livros textos: Escolha! A leitura de pelo menos um deles é indispensável:**
 1. *Física Quântica* do Eisberg e Resnick; Editora Campus Caps. 1 e 2.
 2. *Notas de aulas* do Prof. Roberto Ribas (IFUSP), no seguinte endereço na Internet - <http://www.dfn.if.usp.br/~ribas/arquivos.html>; Caps. 2 e 3.
 3. *Modern Physics for scientists and engineers* de Thornton & Rex; Copyright © 2000 by Saunders College Publishing; Cap. 3;
-
- **Outros textos:**
 1. *Física Moderna* - Paul A. Tipler e Ralph A. Llewellyn (TL), terceira edição - traduzido para o português pela editora LTC, Cap. 3 (a partir do item 3.2);
 2. *Modern Physics* de Serway, Moses e Moyer; 2ª edição da Saunders College Publishing; Cap. 2.
 3. *Introduction to Atomic Physics* de Enge, Wehr e Richards, Copyright © 1972 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Cap. 3;
-

A Radiação do “Corpo Negro”

1.0 que é esta radiação de “corpo negro”?

2.Por que emite radiação?

3.Por que as aspas?

O que é a Radiação do “Corpo Negro”?

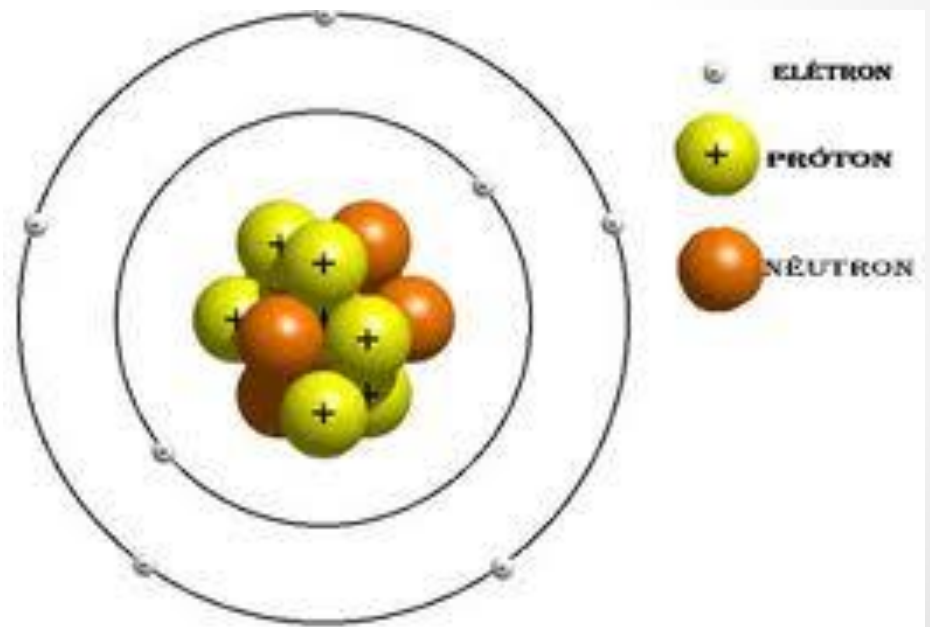
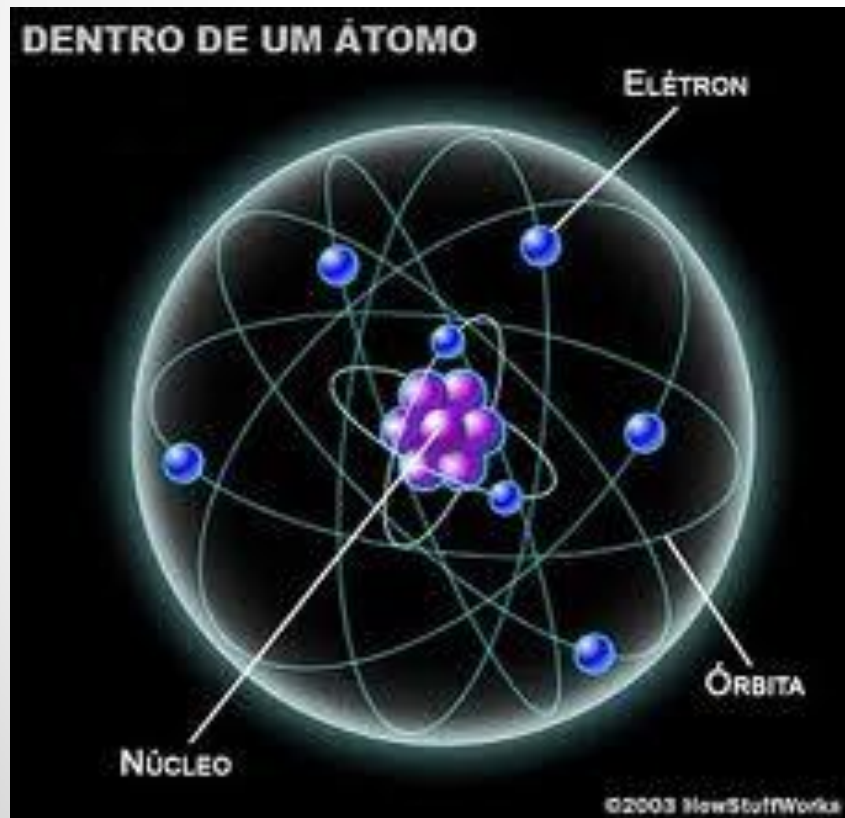
1. Radiação emitida por efeito de temperatura por um corpo perfeitamente opaco.

2. Porque os constituintes da matéria têm carga

3. Nem sempre é preto.

O constituinte básico da matéria tem massa e carga

Átomos têm cargas e estão acelerando e desacelerando na matéria. Há emissão de ondas eletromagnéticas, diria Maxwell.



O que é “Corpo Negro”

1. É chamado de Corpo Negro o melhor absorvedor e emissor possível, isso é, um corpo opaco (zero de transmissão em qualquer frequência), em equilíbrio termodinâmico, com coeficiente de absorção $\alpha=1$ e, portanto, de emissão ou emissividade $\varepsilon=1$.
2. Um forno perfeitamente vedado, é um exemplo de um “corpo negro” (e ele NÃO tem a cor preta!).

II.1 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

um forno ideal 100% eficiente– corpo opaco com coeficiente de absorção = 1 = coeficiente de emissão=1. *Entenda isto!*

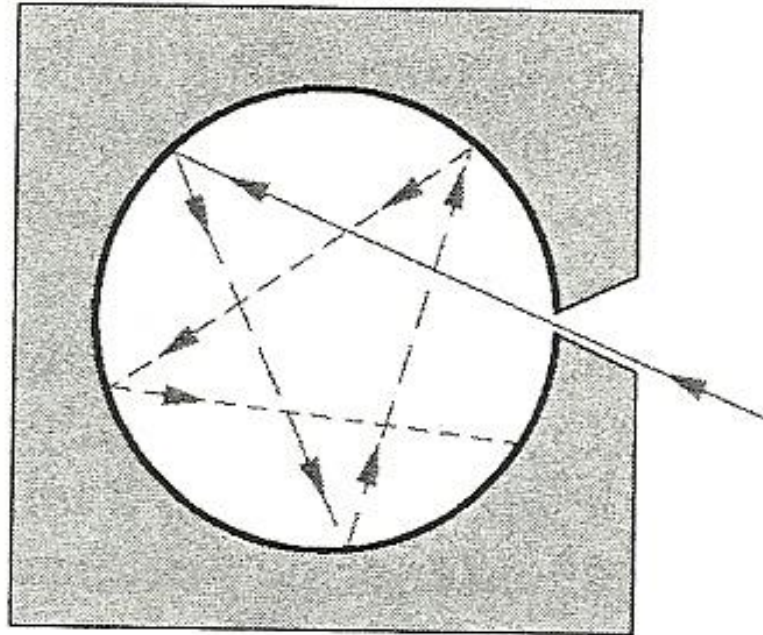


Fig. 3-8 Uma cavidade com um pequeno furo se comporta como um buraco negro ideal. A probabilidade de que um raio que entra na cavidade torne a sair pelo furo antes de ser absorvido pelas paredes é extremamente pequena.

Emissão de radiação (onda) eletromagnética por efeito de temperatura – algumas características

1. Qualquer corpo em uma dada temperatura emite radiação eletromagnética porque no seu interior há cargas (positivas e negativas) que aceleram e desaceleram constantemente.
2. **A chamada radiação de corpo negro é a emissão por efeito de temperatura de um corpo opaco e de coeficiente de absorção igual a 1.**
3. Um **corpo** é dito **opaco** se toda **a radiação eletromagnética que incide sobre ele é refletida ou absorvida**, e não há transmissão através do corpo. *Aqui entendido para qualquer frequência de onda, não só frequência luminosa.*

Emissão de radiação (onda) eletromagnética por efeito de temperatura

4. Quando um corpo opaco recebe energia eletromagnética ele pode refleti-la e absorvê-la, conservando a energia, ou seja:

$$I_{\text{inc}}(\lambda) = I_{\text{refl}}(\lambda) + I_{\text{abs}}(\lambda)$$

- $I_{\text{inc}}/I_{\text{inc}} = I_{\text{refl}}/I_{\text{inc}} + I_{\text{abs}}/I_{\text{inc}}$
- $1 = r + a$
- r = coeficiente de reflexão e
- a = coeficiente de absorção

5. Quando dois corpos opacos estão isolados e em equilíbrio térmico em um grande meio, o que um emite é igual ao que absorve; e isto vale para ambos, ou seja: $a_1/\varepsilon_1 = a_2/\varepsilon_2 = 1$ (Kirchhoff – 1859).

6. Assim um corpo opaco que é o melhor absorvedor quando recebe energia do meio exterior, é também o melhor emissor de radiação eletromagnética quando está emitindo radiação para o meio externo.

Características de emissão e absorção de energia eletromagnética dos corpos opacos

1. Os corpos claros refletem a maior parte da radiação incidente, já os escuros absorvem a maior parte, ou seja, os claros têm baixo coeficiente de absorção a e, portanto, de baixo coeficiente de emissão e , e alto coeficiente de reflexão r . Os corpos escuros têm alto coeficiente de absorção a (e portanto de emissão) e , e baixo coeficiente de reflexão r .
2. Nas temperaturas menores do que 600°C (872K) a radiação emitida por corpos opacos nas frequências da luz (comprimentos de onda maiores do que as visíveis) têm intensidades menores do que as que sensibilizam o olho humano. Por isso não os vemos com luz própria, mas sentimos na pele a radiação de grandes comprimentos de onda (maiores do que a da luz) que são chamadas de radiação (de frequência) térmica.

Características de emissão e absorção de energia eletromagnética por corpos opacos

3. Entre 600°C e 700°C o corpo aparece vermelho escuro (menor frequência visível) porque emite a maior intensidade da onda eletromagnética nessa frequência. Para temperaturas crescentes a partir de 700°C o corpo aparece vermelho claro e depois luminoso azulado (maiores frequências visíveis).

A lei de Stefan -Boltzmann()*

A Radiança total ou Intensidade total da radiação eletromagnética emitida pelo **corpo negro**:

- $R_T = 5,7075 \times 10^{-8} T^4 \text{ W/m}^2$
- (*) Stefan a estabeleceu empiricamente ou seja, a partir de medidas (1879) e Boltzmann chegou a ela no contexto teórico da termodinâmica (1884) .
- Intensidade total: média temporal da energia eletromagnética de qualquer frequência, emitida por unidade de área e de tempo pelo corpo negro.
- Qualquer corpo opaco emite a intensidade total proporcional à do corpo negro:

$$R_T = \epsilon 5,7075 \times 10^{-8} T^4 \text{ W/m}^2$$

Lei de deslocamento de Wien (1893)

- Lei de emissão para qualquer corpo na temperatura T:

$$\lambda_{+p} T = 2.898 \times 10^{-3} mK$$

Comportamento da radiação espectral experimental (intensidade versus λ)

84 Quantização da Carga, Luz e Energia

Observe nos gráficos:
o deslocamento de Wien
a Lei de Stefan-Boltzmann
da radiação total (área sob
a curva) em função
da temperatura

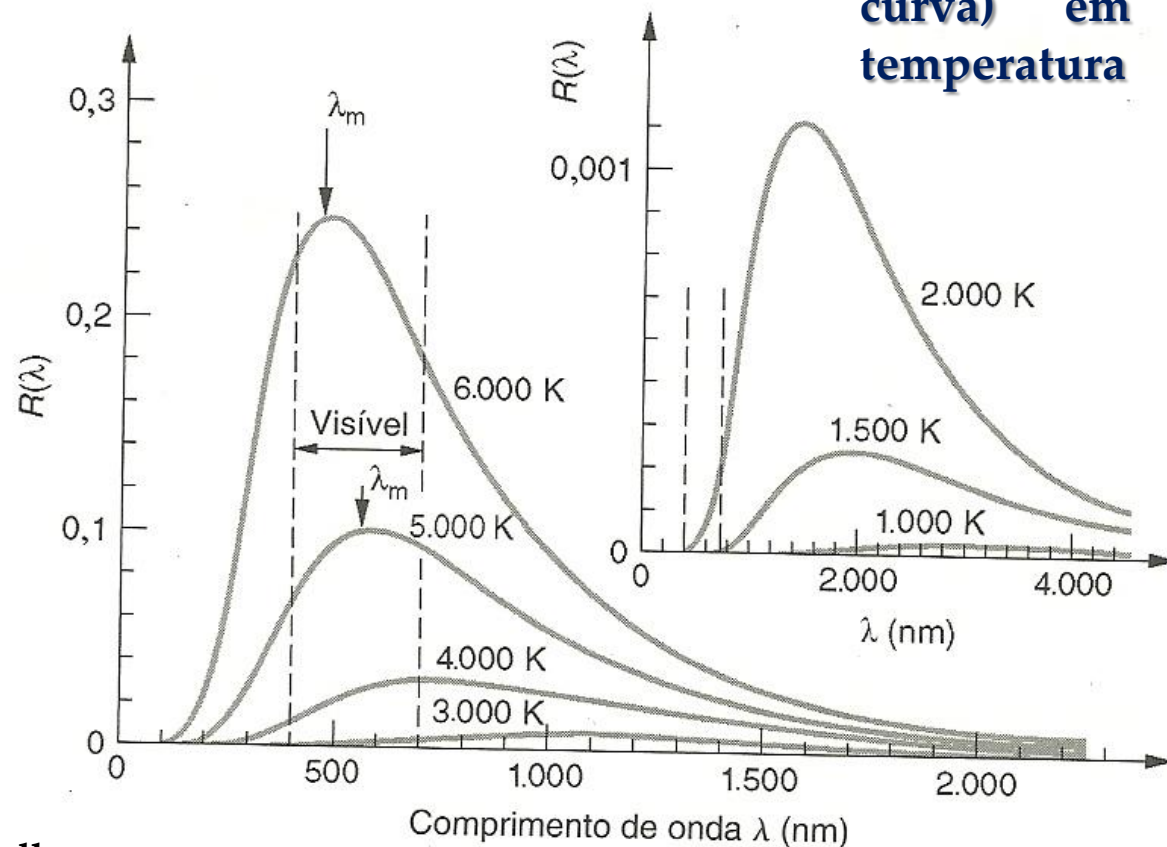


Figura do Tipler & Llewellyn

A intensidade ou radiança espectral de um corpo negro - definição

- A radiança espectral em função do comprimento de onda: $R_T(\lambda) =$ **distribuição espectral da intensidade** = intensidade de comprimento de onda entre λ e $\lambda+d\lambda$ por unidade de $d\lambda$ na temperatura T emitida da cavidade:

$$R_T(\lambda) = \frac{dI(\lambda)}{d\lambda} = \left\langle \frac{dU_{EB}(\lambda)}{dA dt d\lambda} \right\rangle_t$$

- Que é a média temporal da energia eletromagnética dU_{EB} emitida pelo corpo negro ($\varepsilon=1$) com comprimento de onda entre λ e o $\lambda+d\lambda$, por unidade de área dA , de tempo dt e de comprimento de onda $d\lambda$.

- A radiança espectral em função da frequência ($\lambda\nu=c$):

$$R_T(\nu) = \frac{dI(\nu)}{d\nu} = \left\langle \frac{dU_{EB}(\nu)}{dA dt d\nu} \right\rangle_t = \left\langle \frac{dU_{EB}(\lambda)}{dA dt d\lambda} \right\rangle_t \left| \frac{d\lambda}{d\nu} \right| = R_T(\lambda) \frac{c}{\lambda^2}$$

Vejam de novo aí o conceito de distribuição em outro contexto.

- **Observação importante: a distribuição de intensidades do corpo negro não é normalizada**

Unidades das radianças espectrais e total no sistema universal

- Unidade da radiança espectral em função do comprimento de onda:

$$[R_T(\lambda)] = \left[\frac{dI(\lambda)}{d\lambda} \right] = \left[\left\langle \frac{dU_{EB}(\lambda)}{dA dt d\lambda} \right\rangle_t \right] = \frac{W}{m^2 m}$$

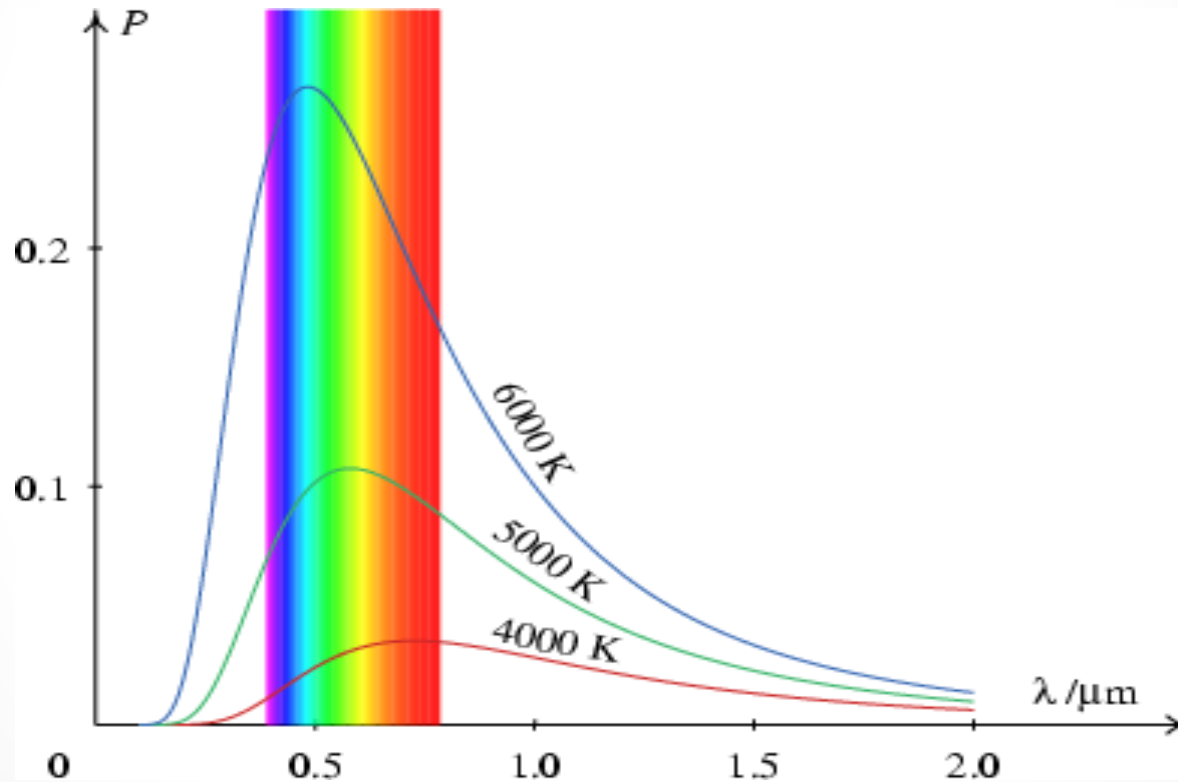
- Unidade da radiança espectral em função da frequência:

$$[R_T(\nu)] = \left[\frac{dI(\nu)}{d\nu} \right] = \left[\left\langle \frac{dU_{EB}(\nu)}{dA dt d\nu} \right\rangle_t \right] = \frac{W}{m^2 Hz}$$

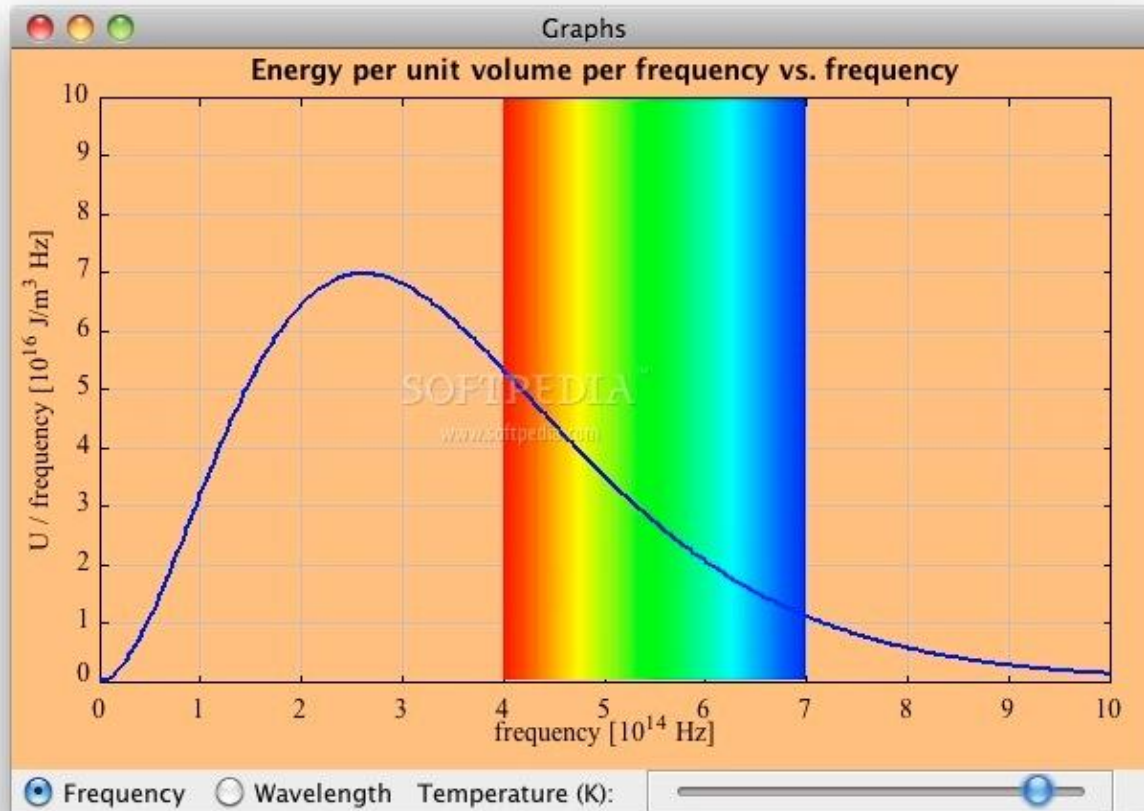
- Unidade da radiança total (todas as frequências/comprimentos de onda)

$$[R_T] = [I] = \left[\left\langle \frac{dU_{EB}}{dA dt} \right\rangle_t \right] = \frac{W}{m^2}$$

Corpo negro: radiação emitida versus o comprimento de onda



Corpo negro: radiação emitida versus a frequencia



Radianças de um corpo qualquer (coeficiente de emissão constante $\varepsilon < 1$) na temperatura T

- A Radiança espectral de qualquer corpo opaco na temperatura T é proporcional a radiança do corpo negro, sendo o coeficiente de emissão ε a constante de proporcionalidade.

$$R_T^\varepsilon(\lambda) = \varepsilon R_T(\lambda)$$

$$R_T^\varepsilon(\nu) = \varepsilon R_T(\nu)$$

- A radiança total de um corpo opaco na temperatura T é proporcional à radiança total na mesma temperatura:

$$R_T^\varepsilon = \varepsilon R_T$$

Obs. Se observa **experimentalmente uma pequena dependência do coeficiente de emissão com a frequência** o que “estraga” a universalidade do comportamento do corpo negro, **aqui adotado**.

*Faça o experimento eletivo no Laboratório de Física V (ou VI) e
comprove a afirmação acima !*

A radiança total - grandeza relevante na radiação do Corpo Negro (forno ideal)

1. A radiança total R_T é a intensidade espectral emitida pelo corpo negro ($\varepsilon=1$) em qualquer comprimento de onda (ou frequência) na temperatura T . Portanto ela independe do comprimento de onda (ou frequência).
2. R_T é, portanto, a média temporal da energia eletromagnética total dU_{EB} emitida pelo corpo negro com qualquer comprimento de onda na temperatura T , por unidade de área dA e de tempo dt .
3. R_T pode portanto ser determinado a partir da determinação da área sob a curva da radiança espectral.
4. Calcular a área sob uma curva, se conhecida sua expressão matemática, é calcular a integral da radiança espectral para todas as frequências (ou comprimentos de onda).
5. Calcular a partir de teorias a radiança espectral $R_T(\lambda)$ ou $R_T(\nu)$ permite conhecer todas as leis empíricas do corpo negro, incluída a da radiança total (Stefan-Boltzmann).

Radiação do Sol – Aplicação

mãos à obra!

O Sol visto da Terra é amarelo.

- Supondo que o Sol é um corpo negro e que na sua superfície o comprimento de onda mais provável emitido é de 5000 angstroms
- 1. Faz sentido, no contexto do eletromagnetismo clássico, supor que o Sol tem o comprimento de onda mais provável em 5000 angstroms? Justifique.
- 2. Determine a temperatura da superfície do Sol.
- 3. Determine a potência irradiada pela superfície do Sol.
- 4. Determine a potência do Sol que chega na superfície da Terra.
- 5. Como mudariam as suas respostas anteriores se o Sol não for um corpo negro? Justifique.
- Dados conhecidos: $R_s = 6,96 \times 10^8 \text{m}$; $d_{TS} = 1,49 \times 10^{11} \text{m}$;
 $R_T = 6,4 \times 10^6 \text{m} = 6400 \text{km}$

Radiação do Sol – Aplicação

mãos à obra!

