

*Instituto de Física
USP*

Física V - Aula 09

Professora: Mazé Bechara

Material para leitura complementar ao

Tópico II – na Xerox do IF

1. **Produção e Transformação de Luz; Albert Einstein (1905); Artigo 5 do Livro “O ano Miraculoso de Einstein” (tradução dos 05 artigos de Einstein publicados em 1905). Introdução de leitura indispensável**
2. **A Natureza do Fóton; Serge Reynaud; Scientific American Brasil – tradução da edição francesa da revista. (Xerox colorida).**
3. **Contando Fótons de Luz; Jean-Michel Courty e Nicolas Treps; Scientific American Brasil – tradução da revista francesa. (Xerox colorida).**

AVISO

1. ***Guia ao tópico II na página da disciplina***

Aula 09 – O conceito de corpo negro e a radiança espectral do corpo negro no contexto da Física Clássica, a determinação de Rayleigh e Jeans

1. O que são corpos opacos, a relação entre a radiação emitida e absorvida por corpos opacos em equilíbrio termodinâmico. O corpo negro, o corpo opaco ideal.
2. As grandezas relevantes e observadas na emissão de radiação eletromagnética por um corpo opaco ideal, o corpo negro: radiança espectral, ou intensidade espectral e **radiança total ou intensidade total**.
3. Características experimentais e leis empíricas da radiação de corpo negro (e de todos os corpos opacos): Lei de Stefan – Boltzmann para a intensidade (radiança) total emitida pelo corpo negro, a Lei de deslocamento de Wien e a radiança espectral.
4. Aplicação das leis empíricas: a emissão da superfície do Sol.
5. A interpretação das condições da radiação na cavidade e uma forma para chegar no valor quantitativo da radiação no seu interior e que sai dela, quando possível.
6. A **expressão de Rayleigh e Jeans**. Comparação com os resultados experimentais e a chamada "**catástrofe do ultravioleta**".

Radiação de corpo negro e de qualquer corpo opaco, na mesma temperatura T

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 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: $a_1/\epsilon_1 = a_2/\epsilon_2 = 1$ (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.

O “Corpo Negro”

1. É chamado de **Corpo Negro** é o corpo opaco ideal, no equilíbrio termodinâmico, e portanto, com coeficiente de absorção $a=1$ e 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!).
3. É observado que todo corpo opaco, na mesma temperatura, emite um espectro praticamente proporcional ao do corpo negro, e o índice de proporcionalidade é o coeficiente de emissão menor do que 1.

O “Corpo Negro”

1. Atente às grandezas que se observa:
2. a intensidade da radiação emitida por unidade de frequência ou radiança espectral.
3. A intensidade total da radiação eletromagnética emitida.
4. Observe que a radiação eletromagnética emitida veio do interior do corpo na temperatura T ,

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:

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

- Média temporal da energia eletromagnética dU_{EB} emitida pelo corpo negro ($\epsilon=1$) 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**

A intensidade ou radiança total de um corpo negro - definição

- A radiança Total é a soma das radianças espectrais em todos os comprimentos de onda ou frequências

$$R_T = \left\langle \frac{dU_{EB}}{dA dt} \right\rangle_t$$

- Média temporal da energia eletromagnética dU_{EB} emitida pelo corpo negro ($\varepsilon=1$) com qualquer comprimento de onda λ ou frequência, por unidade de área e de tempo.

Unidades das radianças espectrais e total no sistema universal

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

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

No denominador da equação acima: m^2 se relaciona ao elemento de área do corpo, e o m (em separado) a um elemento $d\lambda$, é portanto tem “tamanhos” em metros distintos.

- **Unidade da radiança espectral em função da frequência:**

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

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

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

II.1 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

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

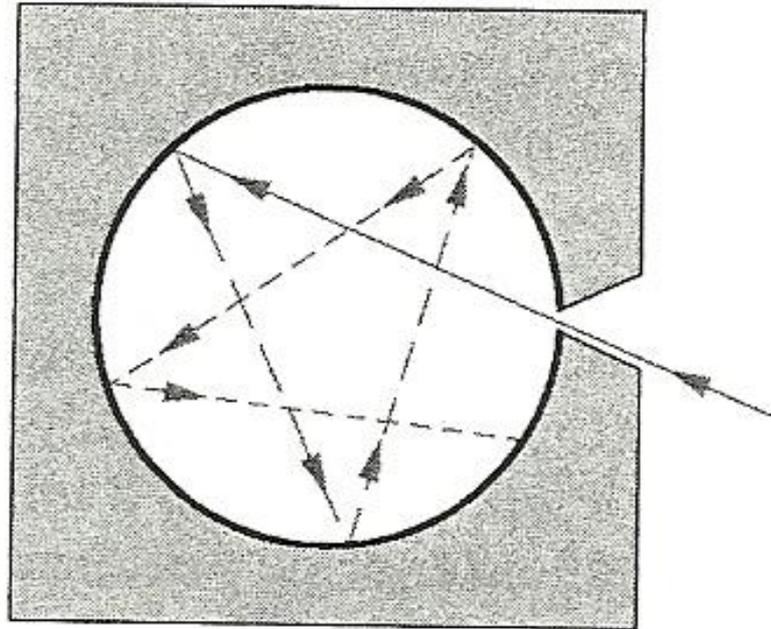


Fig. 3-8 Uma cavidade com um pequeno furo se comporta como um buraco negro ideal. A probabilidade de que um raio que entra na cavidade torne a sair pelo furo antes de ser absorvido pelas paredes é extremamente pequena.

A lei (empírica) de Stefan - Boltzmann(*)

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

- $R_T = \langle dU_{EB}/dt dA \rangle_t = 5,7075 \times 10^{-8} T^4 \text{ W/m}^2$

- (*) 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.

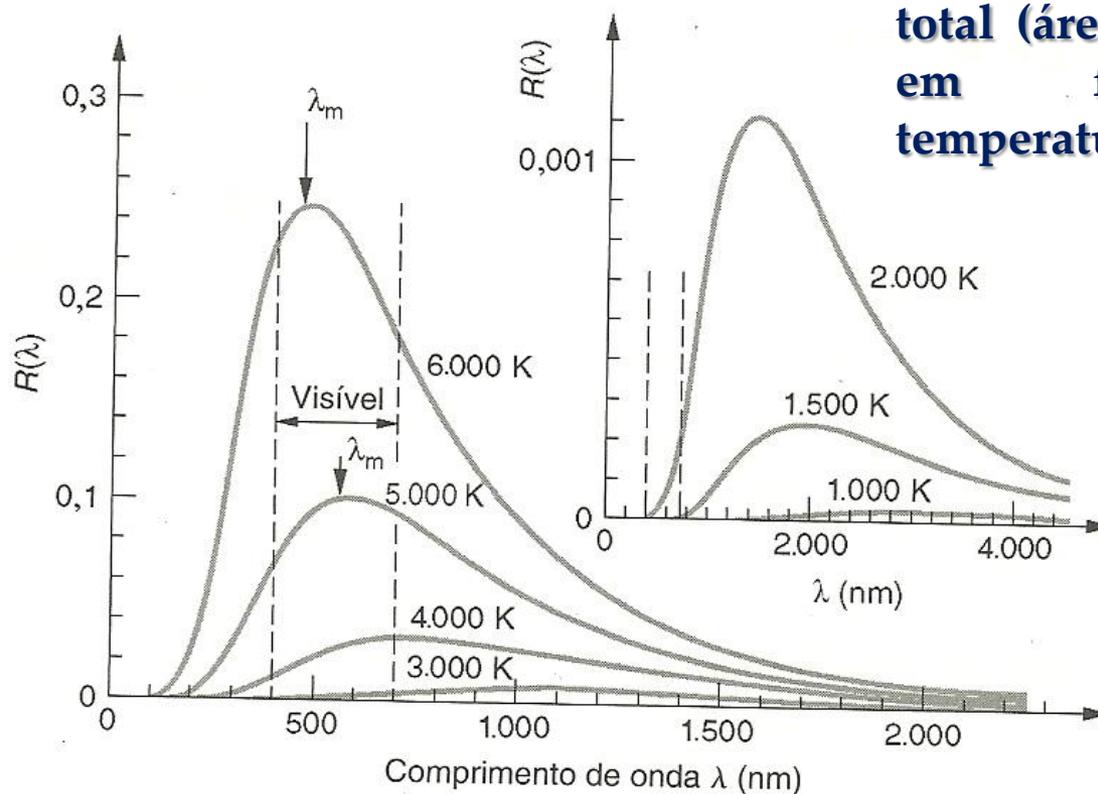
- Qualquer corpo opaco emite a intensidade total proporcional à do corpo negro:

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

Comportamento da radiança espectral experimental (versus λ)

84 Quantização da Carga, Luz e Energia

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



Lei de deslocamento de Wien (1893)

- Lei de emissão para qualquer corpo na temperatura T: a maior intensidade, ocorre para um comprimento de onda que obedece a relação

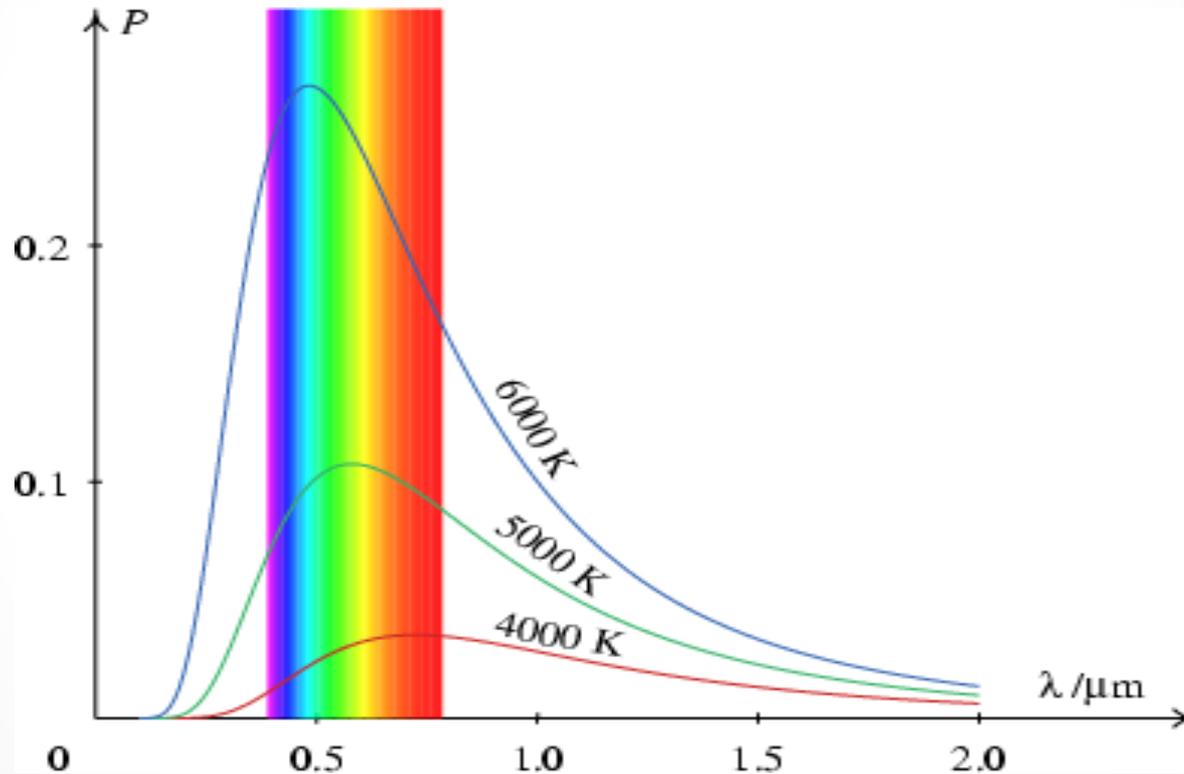
$$\lambda_{+p} T = 2,898 \times 10^{-3} mK$$

- Como é o máximo de uma **distribuição de intensidades**, este comprimento de onda é o comprimento de onda mais provável.

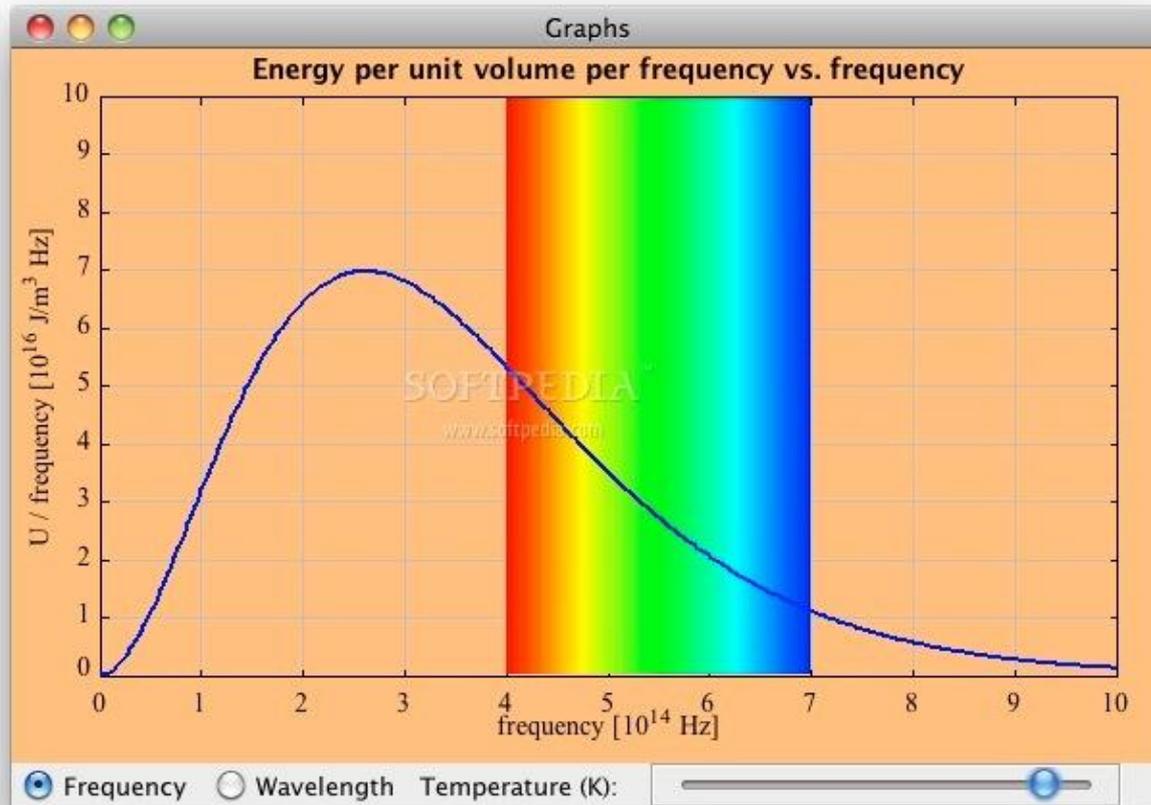
A radiança total - grandeza relevante na radiação do Corpo Negro (forno ideal)

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).**

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.

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

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

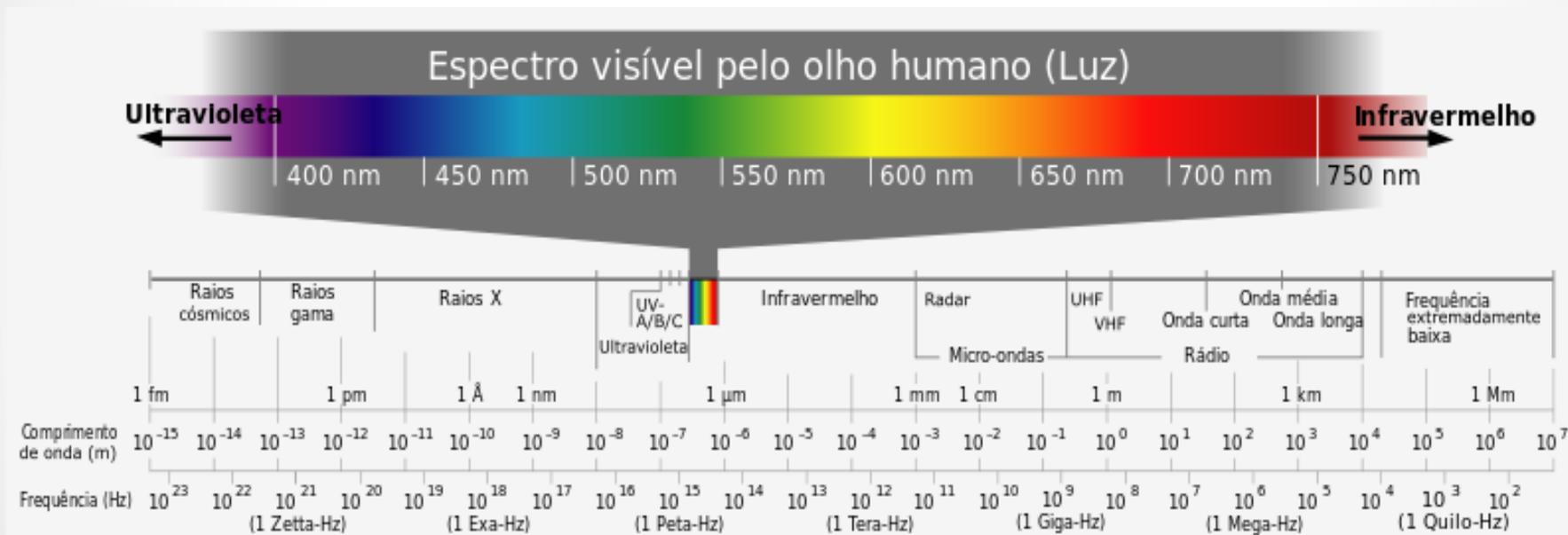
- A **radiança total de um corpo opaco na temperatura T** é proporcional à radiança total na mesma temperatura:

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

*Obs. Experimentalmente, com maior precisão, se observa **uma pequena dependência do coeficiente de emissão com a frequência.***

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

O espectro de radiação eletromagnética e os nomes conforme a frequência



Este espectro ilustrativo pode dar a impressão que apenas a frequência define o nome da radiação. Na verdade na literatura científica é o frequência e também a origem da radiação, nos casos de raios-X, raios- γ e raios cósmicos.

Radiação do Sol – Aplicação

mãos à obra!

O Sol visto da Terra é amarelo.

Dados conhecidos: $R_S=6,96 \times 10^8 \text{m}$; $d_{TS}=1,49 \times 10^{11} \text{m}$;
 $R_T=6,4 \times 10^6 \text{m}=6400 \text{km}$

- Supondo que o Sol é um corpo negro e que na sua superfície o comprimento de onda mais provável emitido é de 5000 angstroms
- (a) Faz sentido, no contexto do eletromagnetismo clássico, supor que o Sol tem o comprimento de onda mais provável em 5000 angstroms? Justifique.
- (b) Determine a temperatura da superfície do Sol.
- (c) Determine a potência irradiada pela superfície do Sol.
- (d) Determine a potência do Sol que chega na superfície da Terra.
- (e) Como mudariam as suas respostas anteriores se o Sol não for um corpo negro? Justifique.

A radiança espectral co corpo negro segundo a Física Clássica

- 1. 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) .**
- 2. 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).**

II.1 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

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

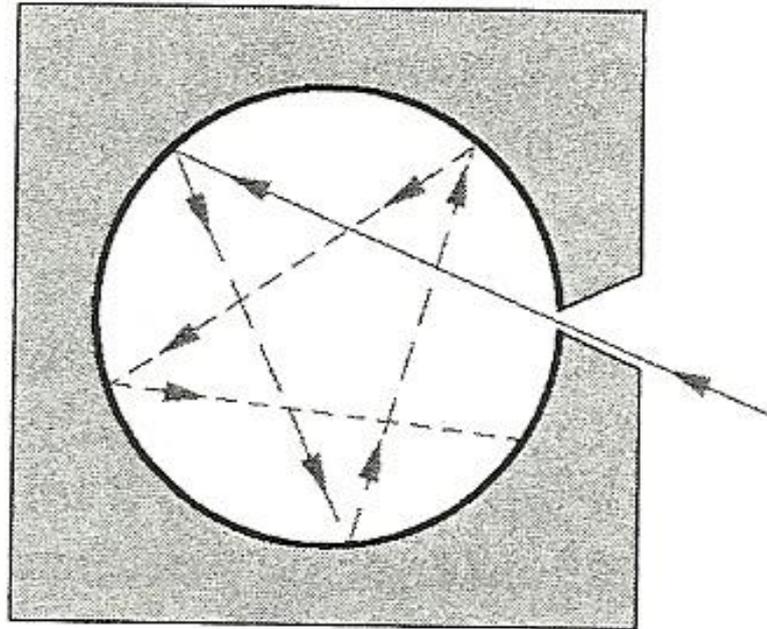


Fig. 3-8 Uma cavidade com um pequeno furo se comporta como um buraco negro ideal. A probabilidade de que um raio que entra na cavidade torne a sair pelo furo antes de ser absorvido pelas paredes é extremamente pequena.

A radiança espectral da cavidade no sólido - corpo negro

- **Idéias básicas para se chegar na expressão clássica de Rayleigh e Jeans com base no eletromagnetismo e na mecânica estatística:**
 1. **As ondas eletromagnéticas no interior da matéria estão associadas às oscilações harmônicas das cargas na matéria.**
 2. **Quando o sistema está isolado e no equilíbrio termodinâmico, as ondas na cavidade cessam o trânsito de energia eletromagnética na fronteira entre a cavidade e o material isolado na temperatura T .**

O fenômeno da radiança espectral do corpo negro

3. Nesta condição as ondas eletromagnéticas da cavidade (e no interior da matéria) são estacionárias, pois não há energia eletromagnética transitando na interface, o que significa que a energia eletromagnética da matéria para a cavidade é igual a da cavidade para a matéria, o que zero os campos elétrico e magnético da onda na fronteira em qualquer instante.
4. Como as ondas estacionárias estão associadas às emissões das oscilações de cargas no interior da matéria, a energia média das ondas estacionárias é igual a energia média de cada componente da oscilação harmônica na matéria na temperatura T . Tal energia pode ser calculada na mecânica estatística clássica de Boltzmann e é kT
5. É a onda que está na cavidade que é emitida, quando se abre um pequeno orifício para esta emissão da cavidade isolada.

A radiança espectral do corpo negro

- **Consequências do entendimento explicitado nas transparências anteriores - continuação:**
 1. Sabendo calcular **a densidade de ondas eletromagnéticas estacionárias no eletromagnetismo de Maxwell**, e a média das energias de oscilação na mecânica estatística de Boltzmann, chega-se à densidade da radiação na matéria/cavidade.
 2. Sabendo a relação entre a radiação eletromagnética no interior da cavidade, com a intensidade que sai do corpo, quando aberta a condição de sair, sem interferir no equilíbrio termodinâmico, **é possível determinar a radiança espectral no contexto clássico**, e comparar com o comportamento experimental!

A radiança espectral nas teorias da Física Clássica

- **Relação** entre a **intensidade espectral emitida $R_T(\nu)$** com a **densidade volumétrica espectral da radiação que no interior da cavidade**
 - **Mostra-se que: $R_T(\nu) = c\rho_T(\nu)/4$**
- **$\rho_T(\nu)$ é a densidade volumétrica espectral de energia eletromagnética no interior da cavidade**, ou seja, a energia eletromagnética por unidade de volume dV e por unidade de frequência $d\nu$ no interior da cavidade.
- **Sugestão: faça análise dimensional para conferir a relação entre radiança espectral e densidade volumétrica de energia**