

Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 06

Professora: Mazé Bechara

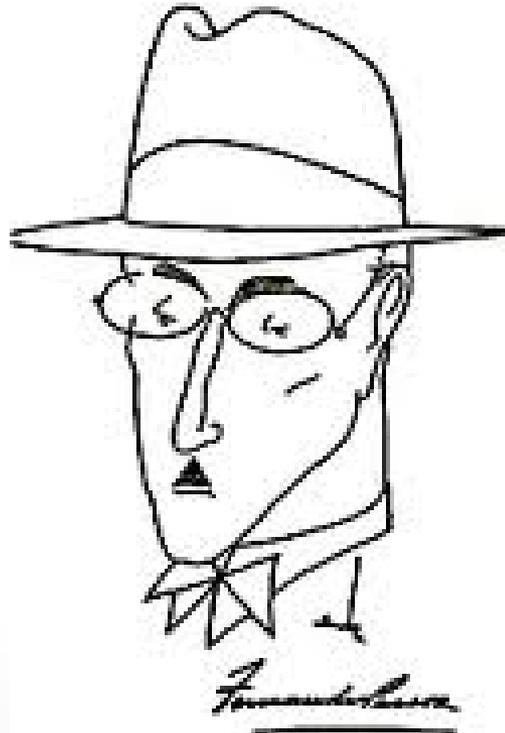
Aula 6 – AVISOS

1. Sessão de monitoria da **próxima quarta-feira: discussão sobre o projeto para o ensino médio.** Venham com leitura cuidadosa sobre o ele.
2. Na aula de sexta-feira: **atividades em aula sobre onda eletromagnética.**

Atividades preparadas especialmente para quem cursa eletromagnetismo paralelamente com Física Moderna I, e para quem já cursou, mas se sente paralelo com ele, ou seja, sem ter se encontrado com seus conceitos.

Iniciando a Física Quântica...

- Aos caros alunos uma **Mensagem** de **Fernando Pessoa** por ocasião de sua iniciação no conhecimento de Física Quântica.



Tópico II: Fenômenos físicos e o caráter dual da radiação eletromagnética: onda e partículas – os fótons.

Tempo previsto: ~07 aulas

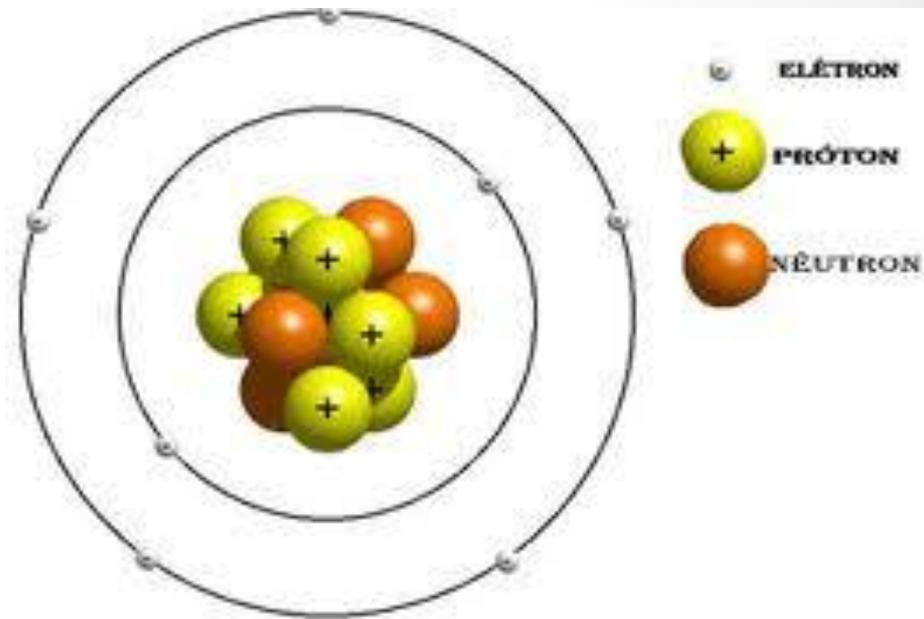
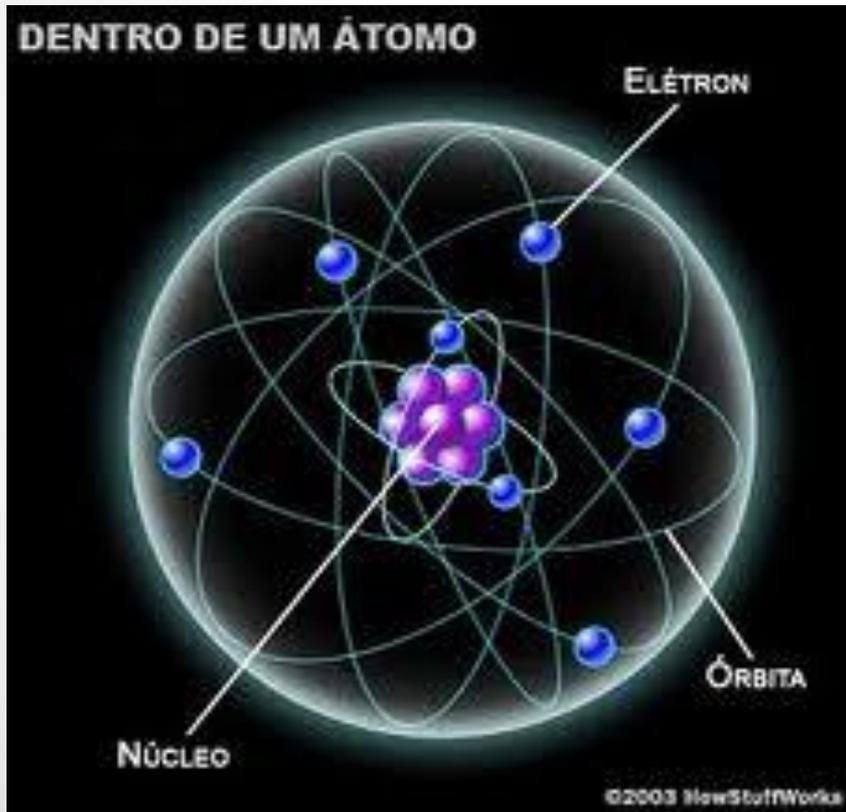
- **Objetivos:** repensar o caráter ondulatório da luz e entender a natureza da luz segundo a Física contemporânea.
- **Como?**
- Compreendendo **a Radiação do Corpo Negro** e como Planck introduz a quantização na Física para descrever perfeitamente este fenômeno.
- Entendendo o caráter corpuscular da luz, com os seus fótons, e a compatibilidade com sua natureza ondulatória.
- **Compreendendo fenômenos** que só podem ser totalmente descritos usando o caráter corpuscular da radiação: **efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton, a produção de raios-X, a criação e a aniquilação de matéria: um par de partícula e sua anti-partícula.**

Aula 06 – Radiação do “Corpo Negro”

- 1. A emissão de um corpo em equilíbrio térmico ou o da cavidade em um sólido que é um “corpo negro” - o forno ideal e os fornos reais. Porque emitem e como emitem.**
- 2. Uma aplicação usando as leis empíricas: a emissão da superfície do Sol.**
- 3. A onda no interior da cavidade de um sólido em equilíbrio com a matéria na temperatura T – ondas estacionárias.**

O átomo: constituinte básico da matéria: massas e cargas quantizadas

se átomos têm cargas e estão acelerando e desacelerando na matéria, há emissão de ondas eletromagnéticas, diria Maxwell.



II.1 RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

(um forno ideal (100% eficiente) - coeficiente de absorção = coeficiente de emissão = 1) *Não é contraditório. Entenda isto!*

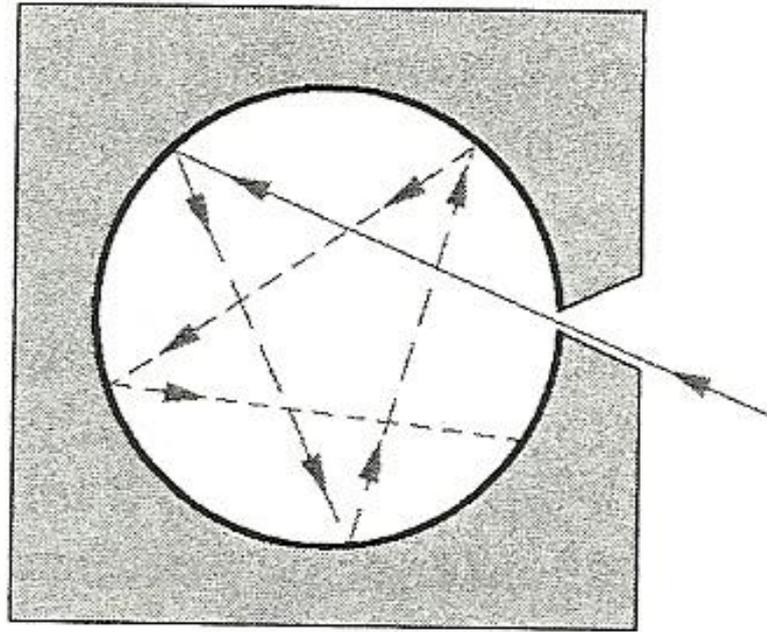


Fig. 3-8 Uma cavidade com um pequeno furo se comporta como um buraco negro ideal. A probabilidade de que um raio que entra na cavidade torne a sair pelo furo antes de ser absorvido pelas paredes é extremamente pequena.

Comportamento “experimental” da intensidade espectral versus λ (também chamada radiança espectral)

84 Quantização da Carga, Luz e Energia

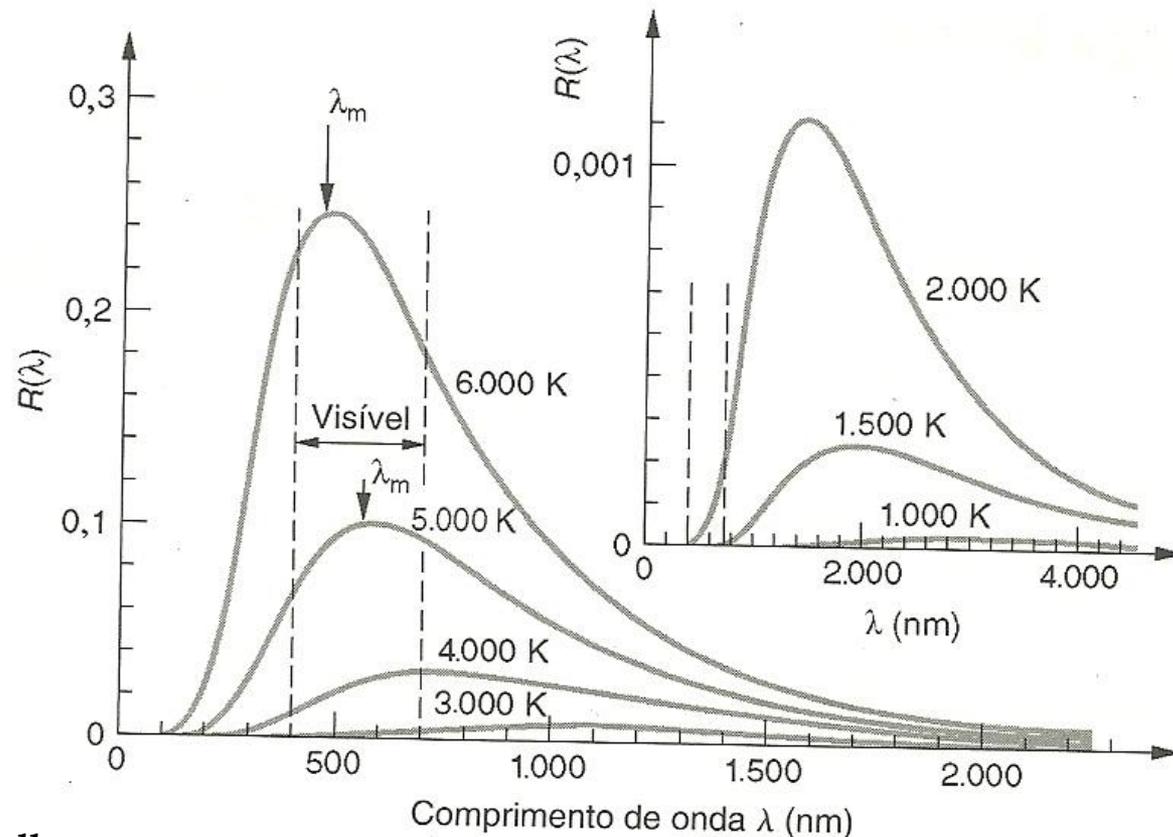
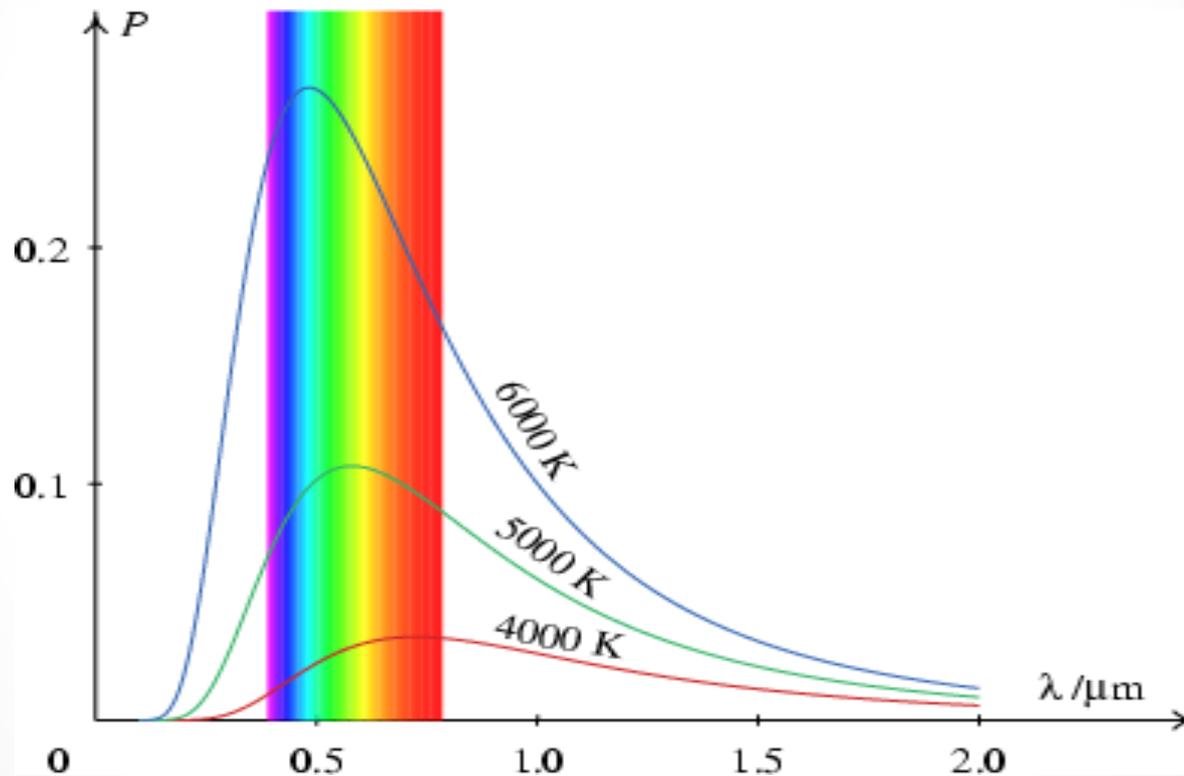


Figura do Tipler & Llewellyn

Corpo negro: radiação emitida



Radiação cósmica de fundo

- Este tema deu dois prêmios Nobel de Física: 1978 e 2006

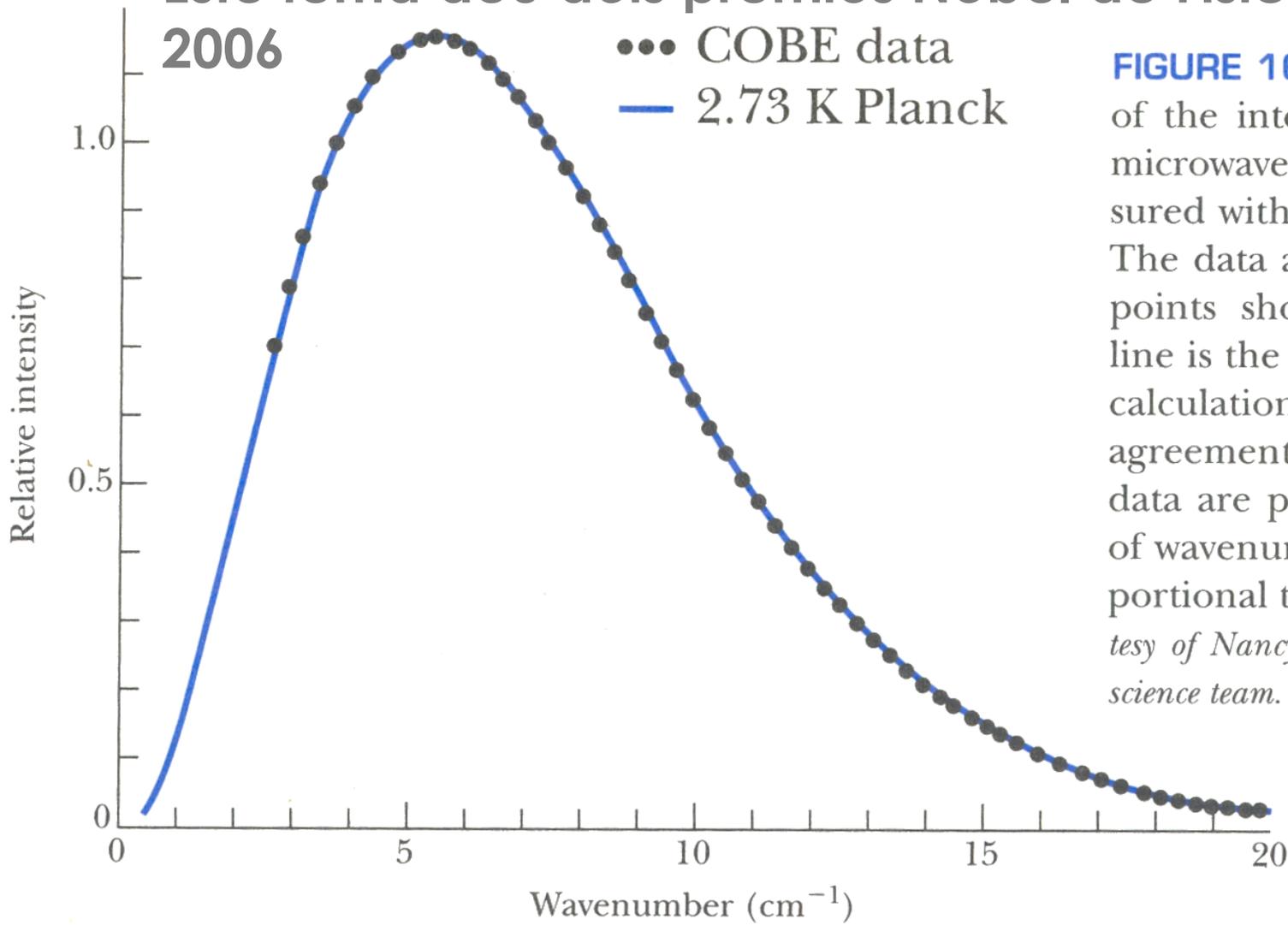


FIGURE 16.15 The spectrum of the intensity of the cosmic microwave background as measured with the COBE satellite. The data are smaller than the points shown, and the solid line is the blackbody radiation calculation for 2.73 K. The agreement is spectacular. The data are plotted as a function of wavenumber (inversely proportional to wavelength). *Courtesy of Nancy Burgess, NASA COBE science team.*

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

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

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

- Intensidade de onda: 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:**

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

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

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

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

- 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)
- 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 .
- R_T pode portanto ser determinado a partir da determinação da área sob a curva da radiança espectral.
- 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).

Lei (empírica) de deslocamento de Wien mediu e concluiu...

$$\lambda_{\max} = \frac{0.0028976m}{T}$$

A lei de Stephan - Boltzmann(*)

- Radiança total = $R_T = 5,7075 \times 10^{-8} T^4 \text{ W/m}^2$
- O valor da radiança total R_T pode ser medido pela área sob a curva da radiança espectral $R_T(\nu)$ na temperatura T .
- (*) Stephan a estabeleceu empiricamente ou seja, a partir de medidas. Boltzmann chegou a ela no contexto teórico da termodinâmica.

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

- A Radiança espectral de qualquer corpo na temperatura T é proporcional a radiança do corpo negro, sendo o coeficiente de emissão 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 na temperatura T é proporcional à radiança total na mesma temperatura:

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

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 Moderna e comprove a afirmação acima !

Radiação do Sol – Aplicação – *mãos à obra!*

O Sol visto da terra é amarelo-alaranjado.

- Supondo que o Sol é um corpo negro e que na sua superfície o comprimento de onda mais provável emitido por ela é de 5000angstrons
- **(a) determine a temperatura** da superfície do Sol. **Comente a plausibilidade** da proposta de comprimento de onda mais provável.
- **(b) Determine a potência irradiada pela superfície do Sol.**
- **(c) Determine a potência do Sol que chega na superfície da Terra.**
- **(d) Como mudariam as suas respostas se o Sol não for um corpo negro? Justifique.**
- Dados conhecidos: $R_S=6,96\times 10^8\text{m}$; $d_{TS}=1,49\times 10^{11}\text{m}$; $R_T=6,4\times 10^6\text{m}=6400\text{km}$

Cálculo da radiança espectral

- **Idéias básica de Rayleigh e Jeans:**
- **(1) A energia eletromagnética na cavidade é de ondas estacionárias, pois no equilíbrio termodinâmica não há energia eletromagnética transitando na interface entre a cavidade e o material isolado na temperatura T.**
- Justificativa: Se não há energia transitando, então os campos elétrico e magnético nesta superfície fronteira é nula em qualquer instante, e portanto a onda no interior da cavidade é onda tridimensional estacionária, como manda o eletromagnetismo de Maxwell.
- (2) As ondas na cavidade estão associadas às oscilações de cargas no interior da matéria. Portanto, a energia de cada onda estacionária pode ser considerada a média da energia das oscilações das cargas na matéria na temperatura T. Tal energia pode ser calculada na mecânica estatística clássica de Boltzmann.
- **Consequências: (i) a densidade volumétrica espectral de energia $\rho_T(\lambda)$ é igual à densidade de ondas eletromagnéticas estacionárias $dN_{EB}(\lambda)/dVd\lambda$ vezes a energia $\varepsilon(\lambda)$ das ondas estacionárias com comprimento de onda entre λ e $\lambda+d\lambda$.**
- **(ii) Sabendo calcular a densidade de ondas eletromagnéticas estacionárias com o eletromagnetismo de Maxwell, e a média das energias de oscilação na mecânica estatística de Boltzmann, chega-se à radiança espectral experimental!**