

## RADIAÇÃO TÉRMICA DE CORPO NEGRO

### I- Introdução

A inabilidade da mecânica clássica em explicar o resultado experimental da distribuição de energia no espectro de corpo negro originou o surgimento da teoria quântica proposta por Planck em 1900. Sendo o corpo negro considerado como um sistema ideal que absorve toda a radiação que nele incide.

- A teoria básica necessária ao entendimento da origem do espectro de radiação térmica emitida por um corpo negro pode ser vista nas referências (1) a (4).
- As definições e conceitos relativos às grandezas radiométricas necessárias ao cálculo do fluxo de energia radiante, incidente em um detector (termopilha), podem ser mais bem apreciados no anexo.
- A notação, aqui utilizada, para representar as grandezas radiométricas será aquela adotada no anexo. Assim, as definições das grandezas que mais nos interessa nesta prática:

a) Radiância,  $L_e$ , de um corpo (em um ponto  $P$  de sua superfície) a uma dada temperatura é o fluxo de energia radiante emitida por unidade de área e por unidade de ângulo sólido e segundo dada numa direção,  $\hat{n}$ , (ver fig. 1); onde  $d\Omega = \frac{dA_{det} \cdot \cos \phi}{r^2}$ .

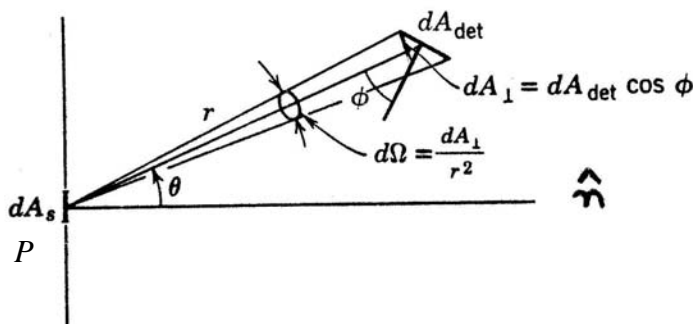


Figura 1:

Ou seja

$$d^2\phi = L_e(P, \hat{n}) dA_s \cos d\Omega \quad (1)$$

$L_e$  será medido em  $Wm^{-2} ster^{-1}$ .

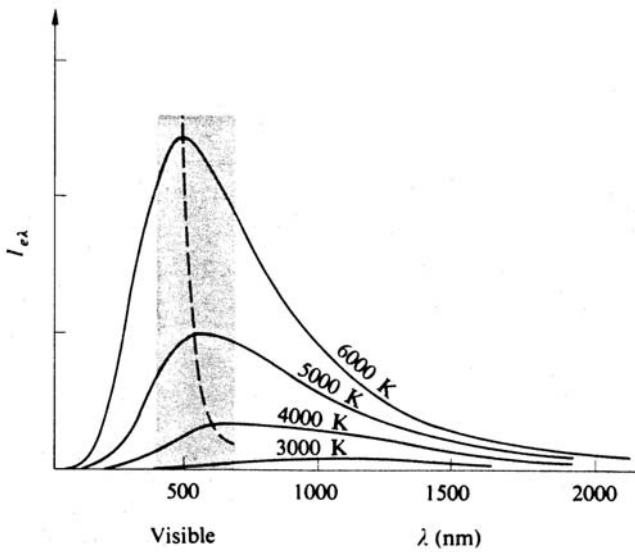
Se o elemento de área  $dA$  emitir isotropicamente no semi-espaço de  $2\pi ster$  (como é caso de corpo negro), dizemos que o mesmo é uma fonte de “Lambert” e, neste caso,  $L$  será uma constante independente de  $P$  e  $\hat{n}$ . É lógico que  $L$  possui uma distribuição espectral  $L_e = L_e(\lambda)$ .

b) Quando integrada em todo o semi-espaço de  $2\pi ster$ , a taxa de radiação emitida por unidade de área,  $M_e$ , se chamará agora de densidade espectral de fluxo ou excitância espectral e corresponde a potência emitida por unidade de área e por unidade de comprimento de onda, emitida pela superfície. A relação entre  $L_e$  e  $M_e$  será para fontes de “Lambert”:

$$M_e = \pi L_e \quad (2)$$

c) Para um corpo negro, a distribuição espectral de  $M_e$ ; isto é,  $M_e = M_e(\lambda)$  é dada pela fórmula de Planck:

$$M_e(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (3)$$



Onde:

$$C_1 = 2\pi^5 hc^2 = 3,7405 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

$$e \quad C_2 = \frac{ch}{k} = 1,43878 \times 10^{-2} \text{ mK}$$

A fig. 2 ilustra vários espectros de radiação térmica para diferentes temperaturas.

d) A lei de Stefan-Boltzmann é obtida, integrando-se a expressão anterior:

Figura 2:

$$M_e = \int_0^{\infty} M_e(\lambda) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (4)$$

Onde  $\sigma$ , a chamada constante de Stefan-Boltzmann tem o valor:

$$\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (5)$$

### Observação importante

A realização de um corpo negro ideal somente é possível, fazendo-se uma cavidade em um bloco de material não transparente a radiação térmica e cujas paredes (superfícies internas) estejam em equilíbrio térmico com as radiações eletromagnéticas, internas a cavidade.

Um pequeno furo permite a análise da distribuição espectral,  $M_e(\lambda, T)$ , da radiação emitida pela cavidade. Distribuição esta que depende exclusivamente da temperatura da cavidade (ou bloco).

Nenhum corpo material, a uma dada temperatura, se comporta rigorosamente como um corpo negro ideal. No entanto, para determinados materiais e determinadas faixas de temperaturas e para intervalos razoáveis de comprimentos de onda, a distribuição espectral (de várias superfícies emissoras) possui um comportamento similar (ou próximo) ao de um corpo negro ideal, a menos de um fator constante,  $0 < \varepsilon < 1$ , fator este que chamamos de emissividade,  $\varepsilon$ , do corpo (ou superfície).

Deste modo, poderemos escrever

$$M_e = \varepsilon \sigma T^4 \quad (6)$$

Quando a expressão (6) for razoavelmente obedecida, dizemos tratar-se de um “corpo cinza”. Rigorosamente,  $\varepsilon = \varepsilon(\lambda, T)$ . A tabela (1) mostra as emissividades de algumas substâncias.

**Tabela 1**

Emissividades típicas de materiais em diferentes estados e temperaturas					
Alumínio	(25 c)	0.02	Zinco - galvanizado	(40 c)	0.28
	(100 c)	0.03	- oxidado	(260 c)	0.11
Latão – não polido	(20 c)	0.07	- polido	(260 c)	0.02
Carbono – (filamento)	(260 c)	0.95	Asfalto	(40 c)	0.93
Cobre - oxidado	(40 c)	0.87	Tijolo - comum	(25 c)	0.93
- não polido	(40 c)	0.22	Cerâmica - alumina	(90 c)	0.90
- polido	(40 c)	0.03	Argila	(20 c)	0.39
- fundido	(1200 c)	0.13	Concreto		0.63 – 0.91
Ouro - polido	(40 – 260 c)	0.02	Vidro	(100 c)	0.76 – 0.82
Ferro - oxidado	(100 c)	0.74	Granito	(25 c)	0.45
- ferrugem	(25 c)	0.70	Gelo	(0 c)	0.97
- fundido	(1700 c)	0.45	Pinturas - coloridas	(24 c)	0.90 – 0.96
Níquel - polido	(40 c)	0.05	- alumínio		0.27 – 0.67
Platina	(40 c)	0.05	- branca	(93 c)	0.94
Prata - polida	(40 c)	0.01	Areia	(20 c)	0.76
Aço - polido	(40 c)	0.07	Xisto	(20 c)	0.69
- oxidado	(25 c)	0.80	Fuligem de carvão	(20 c)	0.95
Tungstênio - filamento	(40 c)	0.03	Madeira	(38 c)	0.91
	(540 c)	0.11			
	(2800 c)	0.35			

Um dos objetivos das experiências a serem realizadas consiste na verificação empírica daquela hipótese.

## **II-Objetivos**

- Estudar a dependência da taxa de radiação térmica, emitida por um sólido com a temperatura: verificação da lei de Stefan-Boltzmann.
- Comparar as emissividades de diferentes superfícies emissoras de radiação térmica.
- Estudar a dependência da taxa de radiação térmica (detectada por uma termopilha) com fatores geométricos: Radiometria.
- Entender os princípios de funcionamento de uma termopilha (detetor de radiação térmica).

## **III- Parte experimental**

### **A- Cubo de Leslie e montagem básica**

O cubo de Leslie será utilizado para verificar que a taxa de radiação térmica; ou melhor, a emissividade de um corpo, depende do estado de sua superfície.

O cubo de Leslie utilizado nesta experiência é construído de alumínio tendo quatro de suas faces tratadas da seguinte maneira: uma delas está “enegrecida”, outra, pintada com tinta “branca”, uma terceira é rugosa e a última polida, sendo aquecida internamente por uma lâmpada, (ver fig. 3).

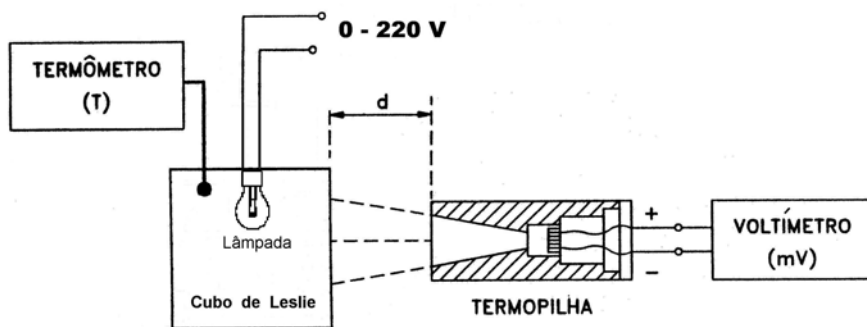


Figura 3:

A temperatura é lida utilizando um termômetro digital.

Uma fração da radiação térmica oriunda de uma das faces do cubo é detectada por uma termopilha cuja descrição e princípios de operação estão descritos no apêndice anexo.

Para evitar-se a influência da radiação ambiente (externas ao cubo) e coincidente na termopilha, recomenda-se colocá-la a uma distância,  $d$ , adequada, em frente à face do cubo a ser estudada, de modo que o ângulo sólido subtendido pela termopilha cubra apenas a face do cubo em questão.

#### B- Materiais a serem utilizados

- Cubo de Leslie
- Corpos esféricos: cromado e normal (sem cromado)
- Corpos de discos: cromado e normal (sem cromado)
- Termômetro
- Varivolt
- Pilha termo-elétrica segundo Moll (termopilha)
- Milivoltímetro ou voltímetro
- Fios e conectores

#### C- Procedimento

1. Para cada uma das quatro faces do cubo, posicionando o detector sempre na mesma distância  $d$  em cada caso, tabele as leituras (em mV) dadas pela termopilha e os correspondentes valores da temperatura para o intervalo de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ .  
Faça gráficos adequados (em um só papel) mostrando a dependência da voltagem, gerada pela termopilha, com a temperatura ( $T^4$ ); e verifique se a lei de Stefan-Boltzmann é obedecida, supondo-se que aquelas superfícies se comportem como “corpos-cinzas”. Utilizar os dados da termopilha que o fabricante oferece para determinar a radiação em  $\text{W}/\text{cm}^2$ .
2. Encontre as razões entre as emissividades das várias faces, relativamente à emissividade da face negra.
3. Utilize a expressão (3) e faça dois gráficos de  $M_e(\lambda)$  para as temperaturas extremas medidas (a mais alta e a mais baixa). Considerando que a termopilha somente responda no intervalo de  $150\mu$  a  $15\mu$ , determine, se houver, os percentuais de perda de detecção. Suponha que aquelas superfícies irradiem como “corpos-cinza”. Como este tipo de erro afetará seus resultados?

D- Estudo da Radiação Térmica emitida por sólidos com geometrias conhecidas: esferas ou discos

Procedimento

1. Utilizando duas esferas (ou placas circulares) de cobre, uma delas oxidada e a outra cromada, deduza uma expressão teórica que dê a voltagem,  $V$ , gerada pela termopilha em termos de variáveis geométricas e da emissividade,  $\epsilon$ , da superfície emissora. Suponha que os emissores térmicos se comportem como corpos “cinza” (isto é,  $\epsilon = \text{const}$ ) (ver fig. 4).

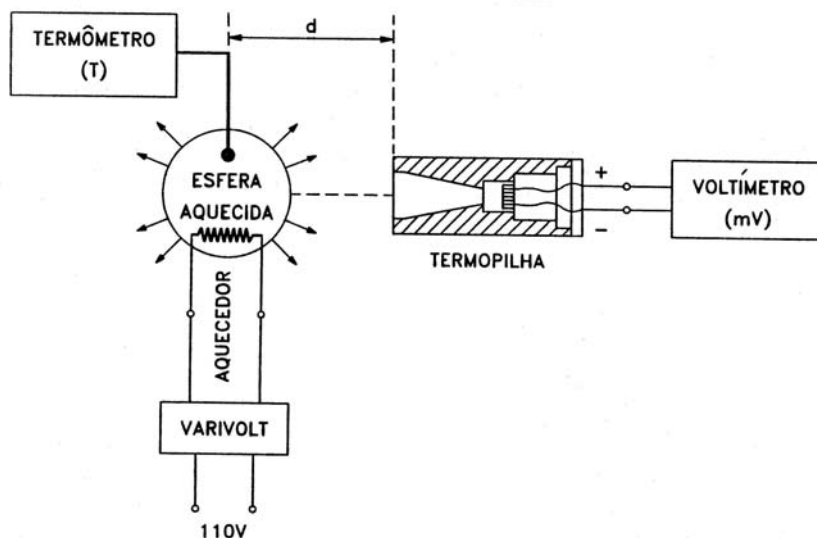


Figura 4:

termopilha e mantendo fixa a temperatura do corpo emissor. A partir do gráfico obtido para a esfera oxidada, determine o valor de sua emissividade, e a validade da expressão teórica obtida com relação variável  $d$  (distância entre o centro da esfera ou disco e a janela do detector).

4. Considere os valores obtidos com aqueles obtidos da literatura.

Questões

1. Mostre, qualitativamente, numa figura, a distribuição espectral da radiação térmica de um corpo negro a uma dada temperatura,  $T$  prevista por Planck; bem como o comportamento previsto classicamente por Rayleigh e Jeans.
2. Explique o que é um pirômetro ótico e como ele é utilizado para medir altas temperaturas (Faça um esquema ótico do mesmo).
3. (a) Explique, com poucas palavras, em que consiste o efeito Seebeck; no qual se baseia o princípio de operação de uma termopilha.  
(b) Seguindo o raciocínio descrito no apêndice anexo, justifique o fato de a voltagem,  $V$  gerada pela termopilha ser proporcional a  $(T^4 - T_0^4)$  onde  $T$  é a temperatura do corpo emissor e  $T_0$ , a temperatura ambiente.
4. Radiância do Sol e de um laser de He-Ne.

Um metro quadrado da superfície da terra recebe um fluxo de radiação de  $1,35 \text{ KW/m}^2$ . Pode-se calcular a radiância da superfície solar como está descrito no fascículo anexo da referência (5), obtendo-se  $L = 2 \times 10^7 \text{ (W/m}^2 \text{ ster)}$ .

Compare-a com a radiância de um laser de He-Ne, supondo-se uma potência de  $1 \text{ mW}$  e emitida por uma superfície de  $1 \text{ mm}^2$  em um ângulo de 4 minutos de arco ( $\sim 10^{-6} \text{ ster}$ ).

Compare também as densidades espectrais das radiâncias,  $L(\nu)$ , sabendo-se que o laser está limitado a uma banda espectral de  $\sim 1 \text{ mhz}$ , enquanto que o sol emite numa banda cerca de  $10^{15} \text{ S}^{-1}$ .

### Bibliografia

1. R. Eisberg, Fundamentos da Física Moderna (cap. 2). (IFSC 539/E36FF).
2. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, (cap. 1) (IFSC 530.12/E36F).
3. P.A. Tipler, R.A. Llewellyn, Física Moderna (IFSC)
4. P.A. Tipler, Física Volume 4, Ótica e Física Moderna (IFSC)
5. Fleury-Mathieu. Chaleur, Thermodynamique états de la matière (IFSC 530.07/F618P V.2) – (pág. 406, 412 e 423).
6. G. Bruhat, A. Kastler, Curso de Física Geral III Termodinâmica (pág. 67 – 83). Difusão Europeia do Livro (IFSC 536.7071/B892T ed V. I).

## ANEXO

### O Detetor de Radiação Térmica: A Pilha Termoelétrica de Moll

A figura 5 mostra um corte longitudinal de uma termopilha de Moll. Uma fração da radiação térmica proveniente de um corpo emissor, a temperatura  $T$ , é absorvida por um sensor enegrecido em forma de disco ( $\phi = 10\text{mm}$ ) no qual estão ancoradas 16 junções de pares termoelétricos (as outras junções estão em contato térmico com o corpo da termopilha, a temperatura ambiente,  $T_0$ ).

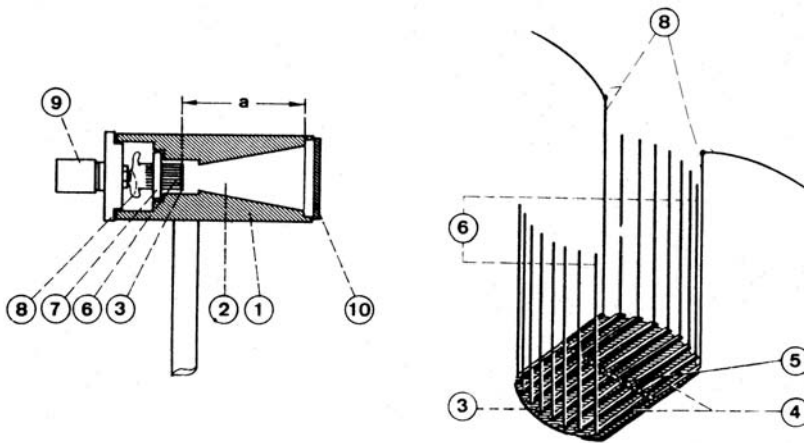


Figura 5:

O que nos interessa é entendermos o significado físico da voltagem,  $V$ , gerada pela termopilha; ou seja: “o que mede a termopilha?”

Consideremos o esquema montado na figura 6.

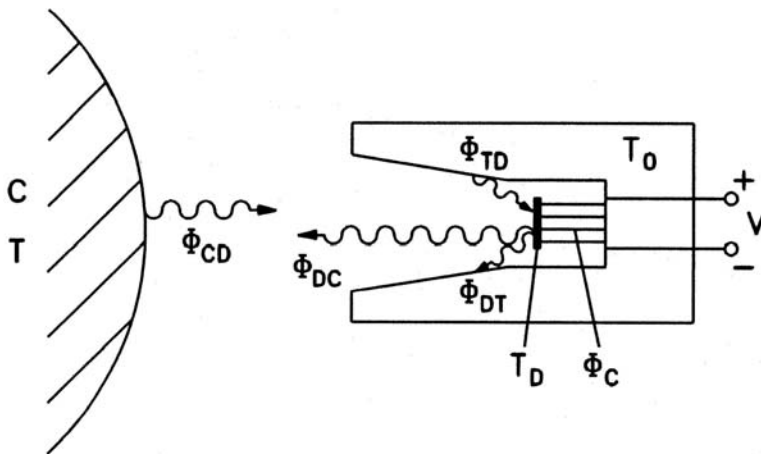


Figura 6:

Ao absorver a radiação incidente, o pequeno disco atingirá uma temperatura de equilíbrio,  $T_D = T_0 + \Delta T$ , gerando, entre os terminais da pilha, uma voltagem termoelétrica,  $V$ , devido ao efeito Seebeck.

Pode-se considerar todo o conjunto de termopares como uma associação em série de vários pares termoelétricos.

Numa situação de equilíbrio térmico, o disco “negro” trocará as seguintes taxas de energia térmica com sua vizinhança:

$\phi_{CD} = ET^4$  é o fluxo de radiação térmica, proveniente do corpo emissor,  $C$ , a temperatura  $T$ , que é absorvida pelo disco.

$\phi_{DC} = ET_D^4$  é o correspondente fluxo emitido pelo disco e

absorvido pelo corpo  $C$ .

$\phi_{DT} = c_1 T_D^4$ : fluxo emitido pelo disco e absorvido pelo corpo da termopilha (a temperatura  $T_0$ ).

$\phi_{TD} = c_1 T_0^4$ , fluxo emitido pelo corpo de termopilha e absorvido pelo disco.

As expressões acima são estritamente corretas apenas para superfícies de corpo negros ideais. Aqui, estamos considerando que as superfícies emissoras se comportem como superfícies de “corpos cinzentos”.

$\phi_c = k(T_D - T_0) = k\Delta T$  , perda térmica do disco, por condução, para o corpo da termopilha.

Como a voltagem,  $V$ , gerada pela termopilha, é proporcional a  $\Delta T$ , esse último termo pode ser escrito como:  $\phi_c = KV$  .

O balanço energético do disco será então descrito pela equação:

$$\phi_{CD} - \phi_{DC} + \phi_{DT} - \phi_{TD} - \phi_c = 0 \quad (7)$$

A constante  $E$  é a mesma para os dois primeiros termos. Para verificar-se este fato, basta observar que o fluxo de radiação trocados entre si pelo corpo e o disco deve ser nulo a temperatura ambiente. A mesma conclusão se chega para a constante  $c_1$  que aparece nos outros dois termos seguintes.

O aluno poderá mostrar que a voltagem gerada pela termopilha poderá ser expressa como:

$$V = K(T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

desde que: (a) faça  $T_D = T_0 + \Delta T$  ; (b) suponha que a temperatura do disco,  $T_D$ , esteja pouco acima da temperatura ambiente; isto é,  $\Delta T \ll T_0$  .

A expressão acima, mostra que a voltagem  $V$ , gerada pela termopilha, dará uma medida do fluxo de radiação que flui através da janela da mesma.

Os fabricantes fornecem o valor da constante que permite a conversão entre essas duas grandezas.

Para a termopilha utilizada no laboratório, esta constante vale: 0,16mV/mW.

Versão atualizada de outras apostilas: M. A. Aegerter, M. Siu Li, R. A. Carvalho.