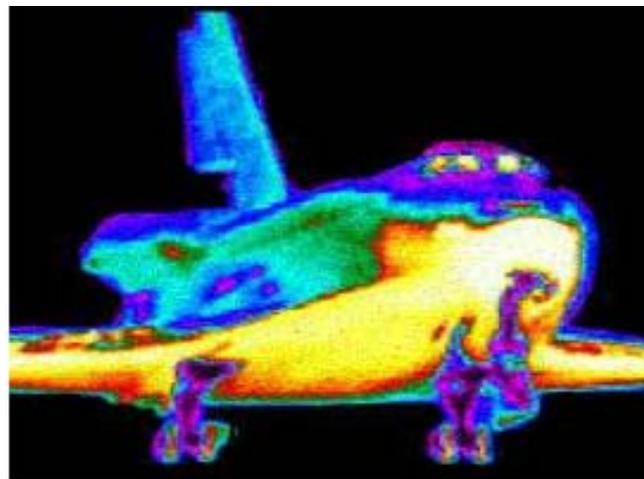


8.4 – Termômetros de Radiação

Todos os tipos de medidores de temperatura discutidos até aqui necessitam que o sensor estivesse em contato físico com o corpo cuja temperatura se deseja medir.

Além disso, a temperatura é medida quando o elemento sensor atinge a condição idealizada de equilíbrio térmico com o corpo ou sistema que se mede.



Fotografias
com câmeras
térmicas

Isto implica em dois aspectos da medição por contato:

a) o termômetro sempre interfere com o meio que se mede, afetando sua temperatura, isto é, a temperatura medida nunca é exatamente a real.

b) que o termômetro deve ser capaz de suportar a temperatura envolvida em uma dada medição, o que efetivamente representa outro problema prático muito grande no caso da medição de temperatura de corpos muito quentes.

Um terceiro tipo de problema acontece quando deseja-se medir a temperatura de um corpo, ou superfície móvel, e o termômetro não está “embarcado”.

Isto é, como medir a temperatura de corpos sólidos em movimento, usando sensores de contato externos ao sistema em movimento?

Neste caso, dispor-se de um método de medida que não requer contato físico (medição sem interferência) é fundamental.

Este tipo de termômetro pode também ser usado para realizar uma varredura da distribuição de temperatura do corpo sem contato ou interferência.

Os instrumentos desenvolvidos para se resolver problemas desse tipo, medir sem interferir, medir temperaturas elevadas e medir objetos em movimento, à distância, empregam sensores de radiação.

8.4.1 - Radiação

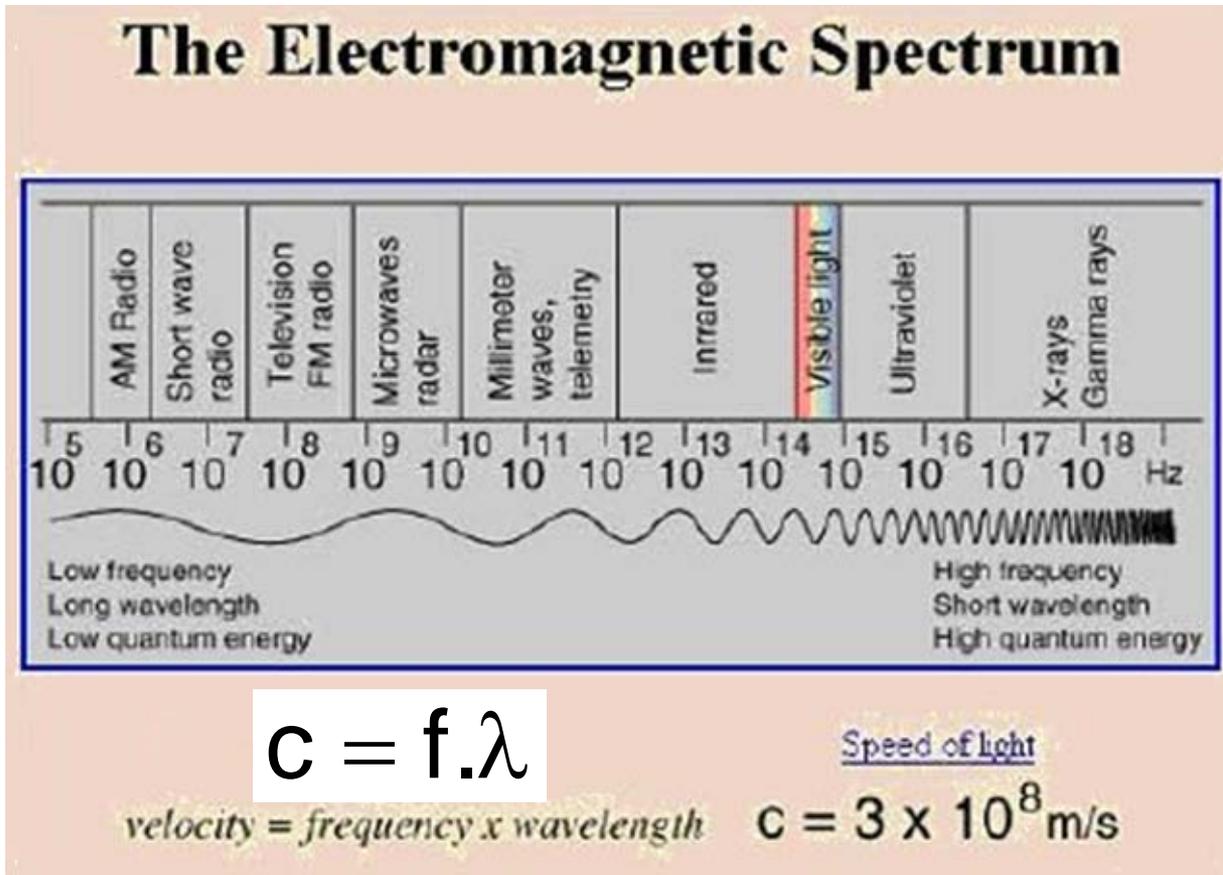
Radiação é emissão de energia pela matéria, e sua transmissão não exige a presença de qualquer meio material.

Com relação à natureza desta transmissão, sabe-se que a Mecânica Quântica prevê que a radiação é dual, isto é, pode ser tratada como onda, propagação de ondas eletromagnéticas e, ao mesmo tempo, propagação de matéria, as partículas denominadas de fótons.

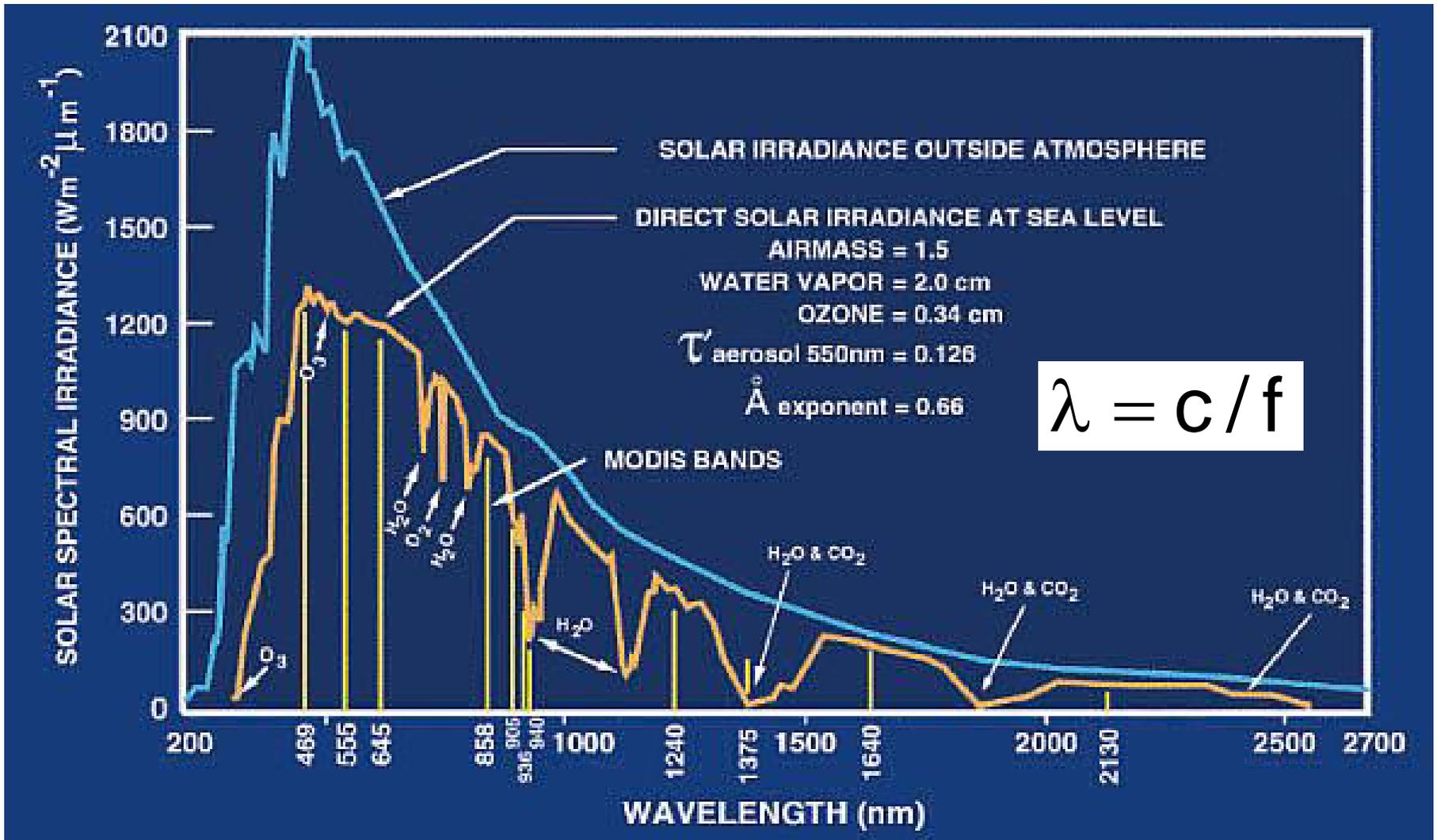
A radiação térmica se distingue de outros tipos de radiação, como ondas de rádio e raios-x, pelo fato destas não se propagarem como consequência da temperatura do corpo.

8.4.1.1 - Espectro eletromagnético

O espectro, isto é, a banda de comprimento de ondas, ou frequências, da radiação térmica vai de $0,1 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ ($3 \times 10^{15} \text{ Hz}$ e $3 \times 10^{12} \text{ Hz}$, respectivamente).



A banda entre $0,4$ microns ($4,28 \times 10^{14} \text{ Hz}$) e $0,7$ microns ($7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$) é o espectro visível.



$$\lambda = c / f$$

Comprimento de onda (m) = $\frac{\text{Velocidade da luz (m/s)}}{\text{Frequência (Hz=1/s)}}$

Escala de ondas eletromagnéticas (fótons)

| Oitava (n) | Hz (1/s) | wavelength (m) | wavelength (nm) | wnumb (cm-1) | |
|------------|------------------------------|------------------|-----------------|---------------|--|
| 41 | 2.199.023.255.552 | 1,364E-04 | 136.424 | 73 | Calor ou ondas infra-vermelho |
| 42 | 4.398.046.511.104 | 6,821E-05 | 68.212 | 147 | |
| 43 | 8.796.093.022.208 | 3,411E-05 | 34.106 | 293 | |
| 44 | 17.592.186.044.416 | 1,705E-05 | 17.053 | 586 | |
| 45 | 35.184.372.088.832 | 8,527E-06 | 8.527 | 1.173 | |
| 46 | 70.368.744.177.664 | 4,263E-06 | 4.263 | 2.346 | |
| 47 | 140.737.488.355.328 | 2,132E-06 | 2.132 | 4.691 | |
| 48 | 281.474.976.710.656 | 1,066E-06 | 1.066 | 9.382 | Luz visível |
| 49 | 562.949.953.421.312 | 5,329E-07 | 533 | 18.765 | |
| 50 | 1.125.899.906.842.620 | 2,665E-07 | 266 | 37.530 | |
| 51 | 2.251.799.813.685.250 | 1,332E-07 | 133 | 75.060 | Ondas ultra- violetas |
| 52 | 4.503.599.627.370.500 | 6,661E-08 | 67 | 150.120 | |
| 53 | 9.007.199.254.740.990 | 3,331E-08 | 33 | 300.240 | |
| 54 | 18.014.398.509.482.000 | 1,665E-08 | 17 | 600.480 | |
| 55 | 36.028.797.018.964.000 | 8,327E-09 | 8 | 1.200.960 | |
| 56 | 72.057.594.037.927.900 | 4,163E-09 | 4 | 2.401.920 | |

8.4.1.2 - Emitância espectral de corpo negro

O radiador térmico ideal é chamado de corpo negro. Este corpo absorveria toda a radiação nele incidente e, para uma dada temperatura, emitiria o máximo possível de radiação térmica.

A **emitância espectral** de um corpo negro é dada pela **lei de Planck** :

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot [e^{(C_2/\lambda T)} - 1]}$$

$E_{\lambda,b}(\lambda, T)$ = A emitância espectral (intensidade da radiação hemisférica) [W/m².μm]

$$C_1 = 2\pi hc = 3,742 \cdot 10^8 \text{ [W.}\mu\text{m}^4/\text{m}^2]$$

$$C_2 = hc/k = 1,4387 \cdot 10^4 \text{ [}\mu\text{m}^4/\text{K]}$$

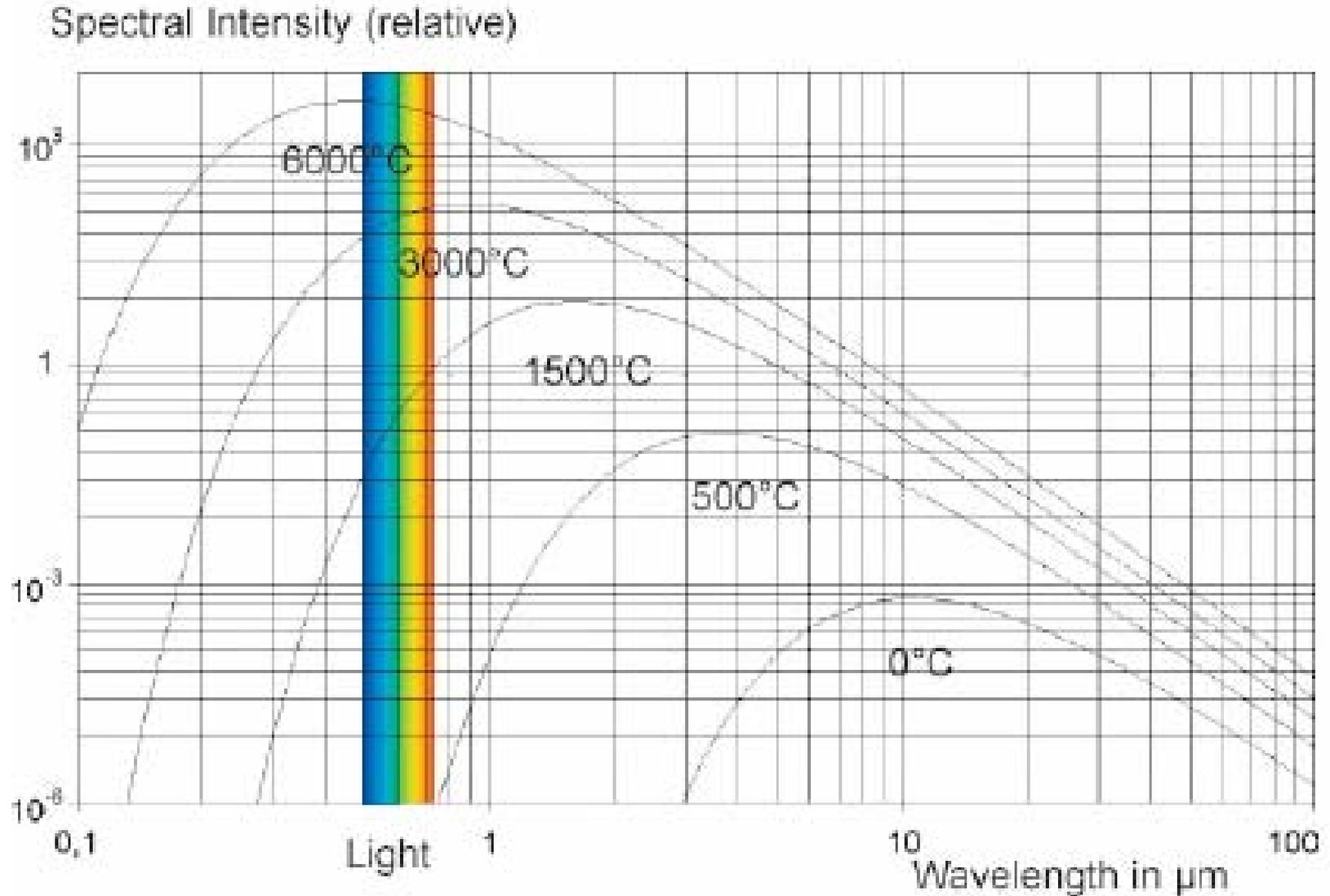
λ = Comprimento de onda da radiação [μm]

T = Temperatura absoluta do corpo negro [K]

A quantidade $E_{\lambda,b}$ é a radiação emitida por uma superfície plana para o hemisfério (isto é, 180° sobre ela) por unidade de comprimento de onda, no comprimento de onda λ .

Ou seja, um corpo negro a uma certa temperatura emite alguma radiação por unidade de comprimento de onda em todos os comprimentos de onda de zero ao infinito, mas não a mesma quantidade de radiação em cada comprimento de onda.

A figura abaixo mostra a emitância espectral do corpo negro, para algumas temperaturas inferiores a 6000 °C.



Podem ser observadas algumas características importantes:

1. A radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda.
2. Em qualquer comprimento de onda, a intensidade da radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura.
3. As curvas exibem picos (intensidades máximas de radiação) em certos comprimentos de onda, sendo que estes picos se deslocam para a esquerda (comprimentos de onda menores) à medida que a temperatura aumenta.
4. A área sob cada curva é a emitância total do corpo negro, que aumenta rapidamente com o aumento da temperatura.

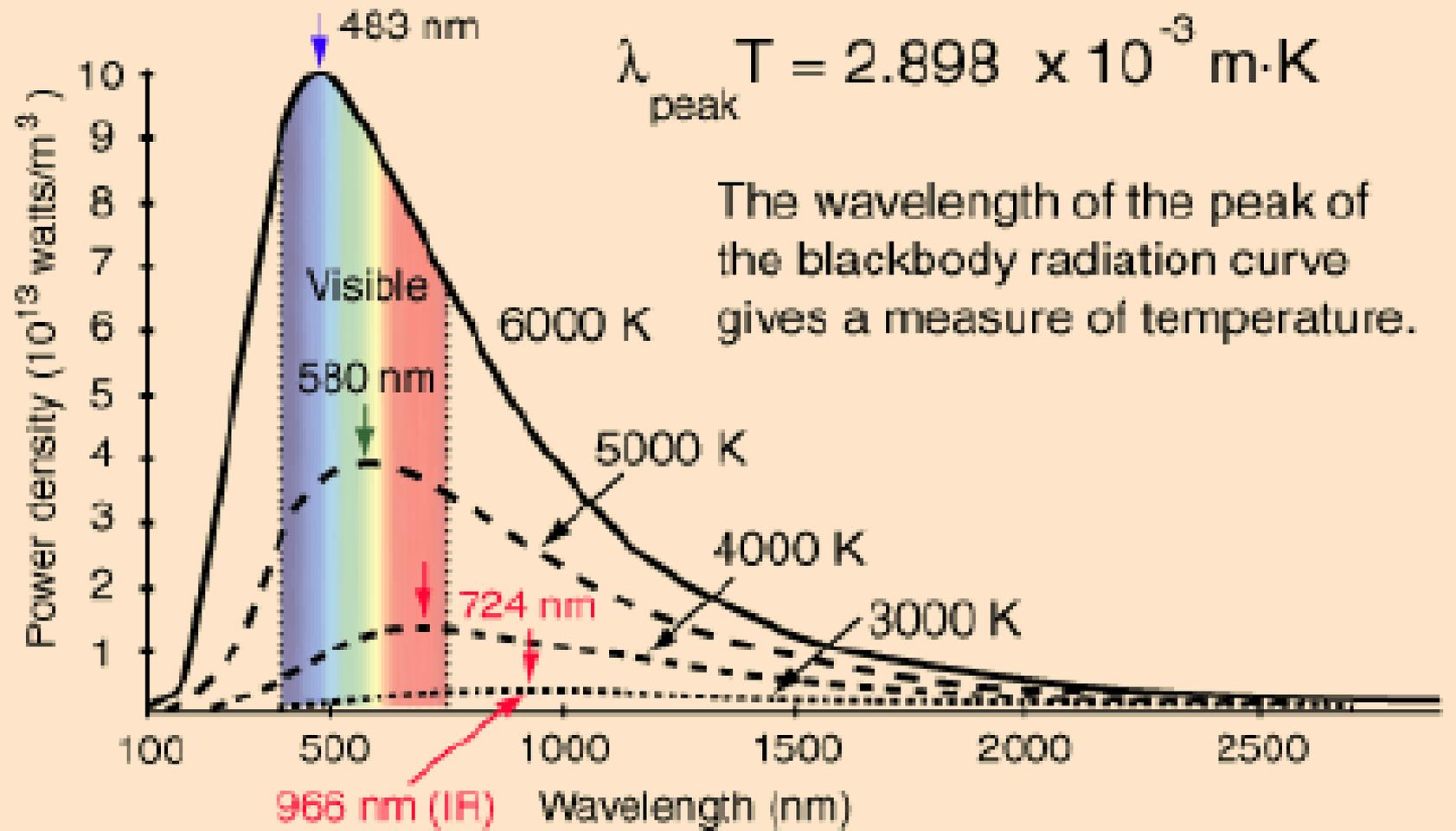
8.4.1.3 - Lei de deslocamento de Wien

A **lei do deslocamento de Wien**, o deslocamento do pico da distribuição da emitância espectral, permite calcular o comprimento de onda correspondente à intensidade de radiação máxima, λ_{max} , para uma dada temperatura.

$$\lambda_{\text{MÁX}} \cdot T = 2.897,8 \quad [\mu\text{m.K}]$$

O deslocamento destes pontos de máximo explica a mudança na cor de um corpo ao ser aquecido.

Primeiramente o corpo se torna vermelho escuro, depois laranja e então branco.



8.4.1.4 - Lei de Stefan-Boltzmann

A radiação térmica total emitida pelo corpo negro é dada pela **Lei de Stefan-Boltzmann**

$$E_b = \sigma T^4$$

$E_b(T)$ = A emitância total [W/m²]

$\sigma = 5,669 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

T = Temperatura absoluta do corpo negro [K]

Embora o corpo negro seja uma idealização física e matemática, é possível construir radiadores reais cujo comportamento se aproxima muito do comportamento do corpo negro.

Estas fontes de radiação são necessárias para a calibração de medidores de temperatura por radiação.

Por outro lado, os corpos cuja temperatura deseja-se medir no dia-a-dia podem desviar-se substancialmente do comportamento do corpo negro.

8.4.1.5 - Emissividade do corpo real

A razão entre as emitâncias real e de corpo negro é o que se denomina de emissividade do corpo real.

Vários tipos de emissividade foram definidos, em função de interesses específicos. A emissividade pode ser ***spectral hemisférica***, total, hemisférica seletiva, etc.

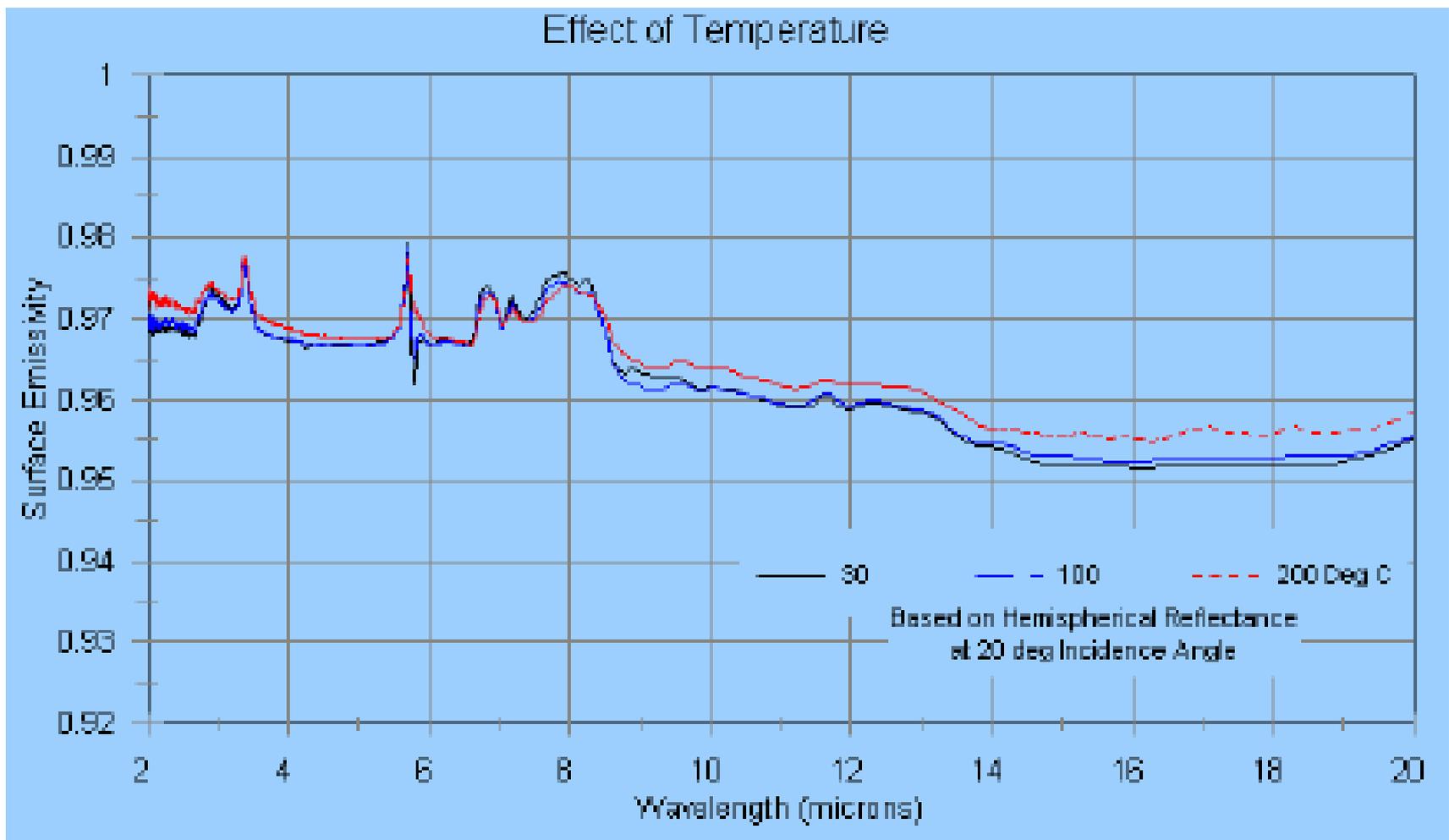
A definição mais básica é a da emissividade espectral hemisférica, $E_{\lambda, T}$, de um corpo ***real*** à temperatura T.

Admitamos que ela possa ser medida utilizando filtros, de modo a que somente a emitância em um comprimento de onda se propague. São os chamados filtros ópticos seletivos. A emissividade espectral hemisférica é definida por:

$$\varepsilon_{\lambda, T} = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda, b}(\lambda, T)} < 1$$

Portanto, a emissividade é uma quantidade adimensional, sempre menor do que 1,0 para corpos reais.

Note também que, no caso mais geral, é função de λ e T . (eventualmente, numa pequena faixa limitada de λ e T , pode ter valor semelhante e constante, mas não é o caso geral).



Emissividade espectral de superfície: dependência com λ e T.

Como muitos sensores de radiação operam em faixas restritas de comprimentos de onda, define-se a emissividade hemisférica seletiva.

$$\epsilon_{\lambda_1-\lambda_2,T} = \frac{E_{\lambda_1-\lambda_2,T}}{E_{b,\lambda_1-\lambda_2,T}}$$

Se um sensor de radiação tiver sido calibrado contra um corpo negro, o conhecimento do valor correto da emissividade do corpo não-negro cuja temperatura se quer medir permite o cálculo da sua emitância total e, portanto, da sua temperatura:

$$T = \left(\frac{E}{\epsilon\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

| Material | Emissividade |
|-----------------------------|--------------|
| Anodize Black | 0.88 |
| Magnesium Oxide White Paint | 0.90 |
| Anodized Aluminum | |
| Black | 0.82 |
| Gold | 0.82 |
| Aluminum | |
| Aluminum Highly Polished | 0.039-0.057 |
| Aluminum Commercial Sheet | 0.09 |
| Aluminum Heavily Oxidized | 0.20-0.31 |
| Aluminum Surface Roofing | 0.216 |

| Material | Emissividade |
|-------------------------------------|--------------|
| Stainless Steel | |
| Polished | 0.11 |
| Machined | 0.14 |
| Sandblasted | 0.38 |
| Silver - Pure, Polished | 0.020-0.032 |
| Brick | |
| Red, Rough, no Gross irregularities | 0.93 |
| Fireclay | 0.75 |
| Concrete Tiles | 0.63 |
| Glass | |

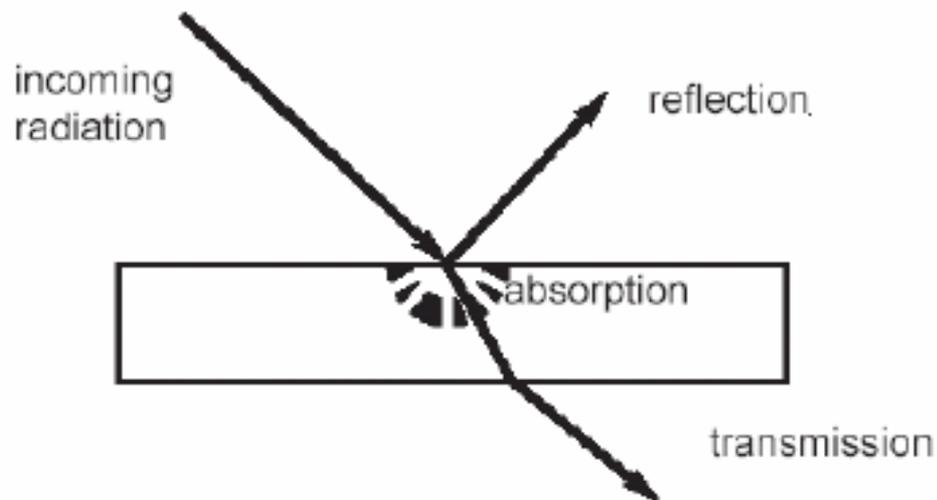
Infelizmente, a emissividade de um material não é uma propriedade simples de ser obtida já que depende do tamanho do corpo, formato, rugosidade, ângulo de observação, etc.

Estes fatores levam a incertezas nos valores numéricos da emissividade que são um dos maiores problemas nas medidas de temperatura com sensores de radiação.

Quando a radiação térmica incide sobre uma superfície, ela pode ser absorvida, refletida ou transmitida.

As propriedades correspondentes a estes fenômenos são a absorptividade, α , a refletividade, ρ , e a transmissividade, τ , relacionadas por :

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$



Para a maioria dos corpos sólidos $\tau = 0$, de modo que

$$\alpha + \rho = 1$$

Para uma superfície cinzenta, pode-se mostrar que

$$\alpha = \epsilon$$

Quando ρ e/ou τ for diferente de zero, erros de medida podem ocorrer.

Os sensores de radiação comerciais normalmente incluem um ajuste para a emissividade com uma faixa de variação de 0,2 a 1,0.

Portanto, se a emissividade do material for conhecida, pode-se corrigir a medida facilmente.

A técnica mais confiável para a determinação da emissividade para este fim requer a calibração do sensor de radiação através de medidas independentes da temperatura do corpo, por exemplo por meio de um termopar.

Uma vez que a emissividade pode variar com a temperatura, esta calibração deve ser feita em toda faixa de temperaturas de aplicação do instrumento.

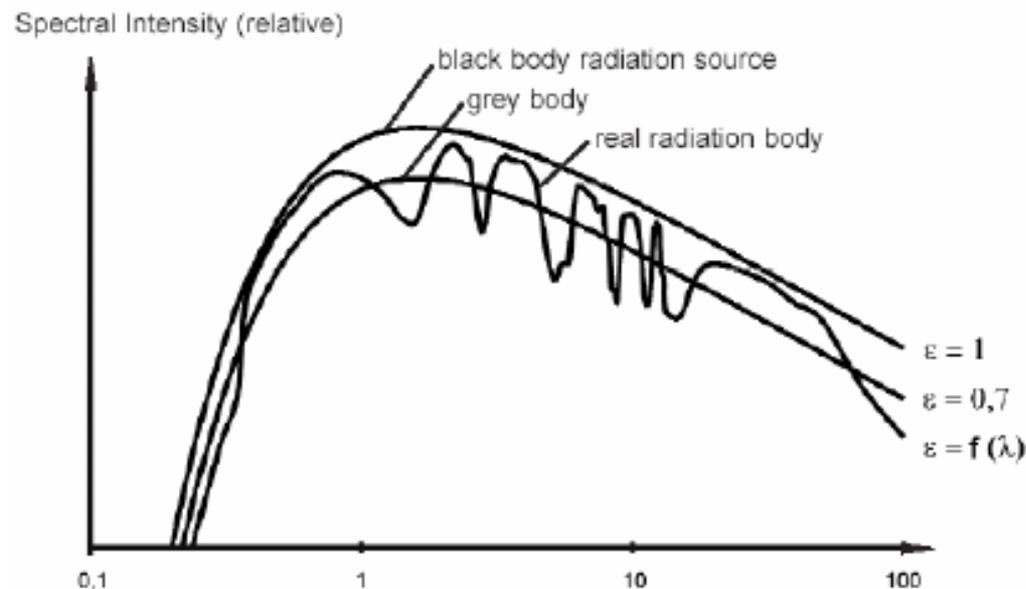


Figura 3.40 - Emissividade espectral de corpos negros, corpos cinzentos e corpos reais (qualitativo).

Uma outra fonte de erro nas medidas são as perdas de energia ao se transmitir a radiação do objeto ao detector.

Geralmente, o caminho óptico consiste de algum gás (normalmente ar) e vários tipos de lentes.

No ar atmosférico, a atenuação da radiação é devida principalmente à absorção pelo vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio bem como pelo espalhamento causado por partículas de poeira e gotículas d'água.

Como estes efeitos dependem do comprimento de onda, um sensor de radiação pode ser projetado para operar dentro de faixas de comprimento de onda não afetadas.

Entretanto, uma vez que as perdas radiantes dependem diretamente do caminho óptico atravessado, não é possível calibrar o sensor para uso em aplicações diversas.

Tendo estudado os fundamentos da radiação, podemos agora estudar técnicas específicas de medida da temperatura de um corpo pela medida da radiação por ele emitida.

Estas técnicas podem ser divididas em dois grupos:

- pirometria óptica;
- determinação da emitância.

Seja primeiramente a medida da temperatura por meio da pirometria óptica.

A figura a seguir mostra esquematicamente o pirômetro óptico de filamento, que é a forma clássica deste tipo de instrumento.

Trata-se do “termômetro de radiação” mais preciso, sendo usado na elaboração da Escala Prática Internacional de Temperaturas para medidas acima de 1063 °C.

O pirômetro óptico ou termômetro de brilho de radiação monocromática, como é também chamado, baseia-se no princípio de que, para um dado comprimento de onda λ , a intensidade da radiação (“brilho”) varia com a temperatura conforme vimos.

Assim, a imagem do objeto alvo é superposta sobre aquela do filamento de tungstênio aquecido.

Esta lâmpada de tungstênio, que é muito estável, é calibrada previamente de modo que, conhecendo-se a corrente através dela, a temperatura do filamento pode ser determinada facilmente.

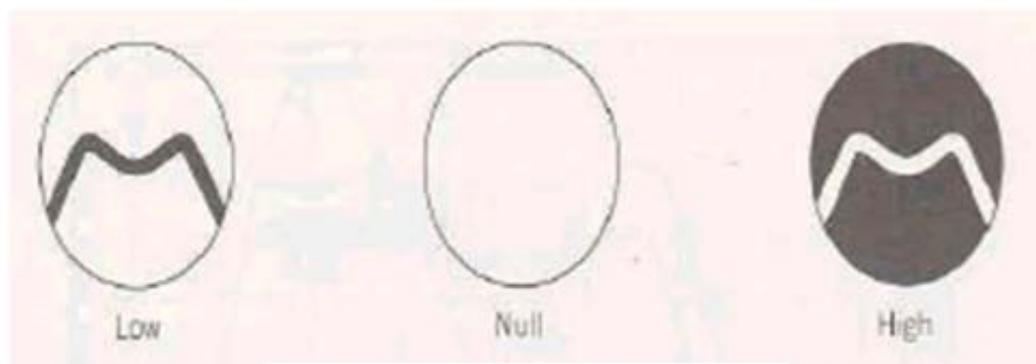
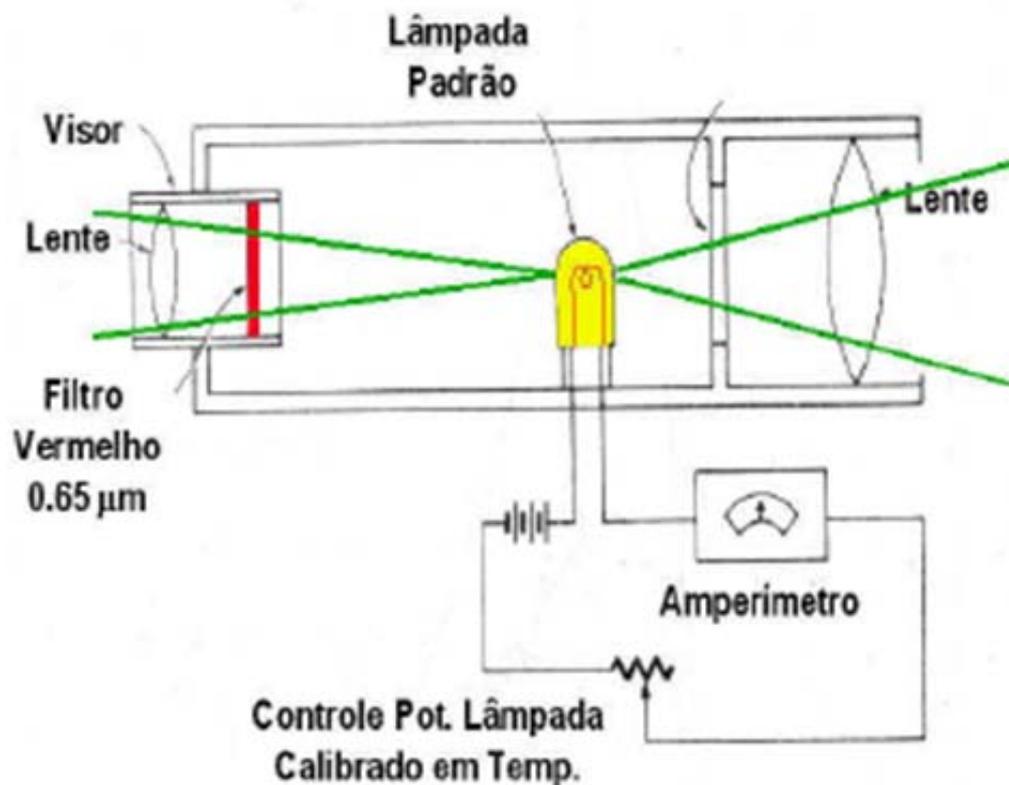
Esta calibração é feita comparando-se visualmente o brilho da radiação de um corpo negro de temperatura conhecida com o bulbo do filamento.

Um filtro vermelho, que deixa passar somente comprimentos de onda em uma faixa muito estreita em torno de $0,65 \mu\text{m}$, é colocado entre o observador e as imagens do filamento e do objeto alvo.

A função deste filtro de absorção é reduzir a intensidade da radiação incidente de modo que a lâmpada possa ser operada a baixas potências.

O filtro monocromático auxilia ainda o operador a comparar os brilhos do filamento e do objeto já que elimina os efeitos de cor.

O observador ajusta então a corrente na lâmpada até que imagem do filamento desapareça sobre a imagem do objeto alvo, condição em que a temperatura do filamento é comparada à do objeto.



Pirômetro ótico de fio.

Neste ponto, deve-se ressaltar que se o objeto alvo for um corpo negro ($e = 1$), não há erro na medida já que o filamento foi calibrado contra um corpo negro de temperatura conhecida.

Entretanto, para corpos não-negros deve-se conhecer e a fim de se corrigir a leitura.

Os erros causados pela imprecisão em ϵ e n não são muito grandes para um pirômetro óptico relativamente a outros “termômetros de radiação” pelo fato deste instrumento ser sensível a apenas uma faixa estreita de comprimentos de onda.

Isto é, é necessário conhecer a emissividade do corpo apenas nesta faixa de comprimentos de onda, o que reduz a incerteza.



The new DFP 2000 from Spectrodyne, Inc. is a rugged, light weight, state of the art disappearing filament optical pyrometer built to provide many years of dependable service. The DFP 2000 is based on the disappearing filament principle - where the brightness of a hot target is matched by the brightness of a calibrated lamp filament - to achieve highly accurate measurements.

Pirômetro de fio

O segundo grupo de técnicas de medida envolve a determinação da radiação total emitida pelo corpo (e então chama-se de método de determinação da emitância) e o cálculo da sua temperatura.

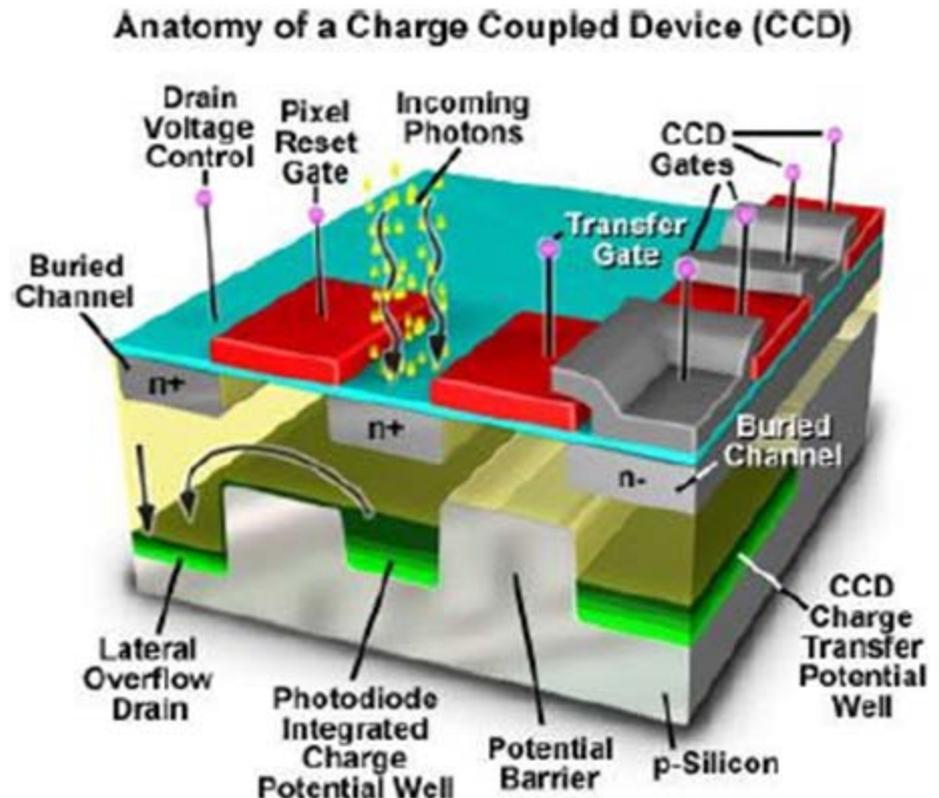
Portanto, é necessário mais uma vez conhecer a emissividade do objeto. A temperatura aparente de corpo negro do objeto medido é calculada fazendo-se $\varepsilon = 1$, isto é :

$$T_b = \left(\frac{E_b}{\sigma} \right)^{1/4}$$

Há vários métodos para se medir a radiação térmica emitida por um corpo.

Em todos eles, a radiação emitida é focada sobre algum tipo de detector de radiação que produz um sinal elétrico.

Estes detectores podem ser classificados como detectores de fótons (um CCD, Charged Coupled Device, por exemplo, tão usado hoje em dia em câmeras digitais) ou térmicos.



Em suma, a radiação incidente (fótons) libera elétrons na estrutura do detector e produz um efeito elétrico mensurável.

Este fenômeno ocorre em uma escala de tempo atômica ou molecular, contrariamente à escala de tempo macroscópica envolvida nos fenômenos de aquecimento e resfriamento de detectores térmicos.

Como consequência, é possível obter tempos de resposta muito mais curtos.

Por outro lado, os detectores de fótons têm uma sensibilidade variável com o comprimento de onda. Isto é, devem ser fabricados e aplicados para aplicações específicas.

A determinação da emitância pode ocorrer também através do efeito direto de aquecimento de uma superfície.

Aí temos os detectores térmicos, como os pireliômetros (radiação solar direta), os piranômetros (radiação total, direta mais difusa), os pirgeômetros (radiação infravermelha), os bolômetros, entre outros.