Propiedades radiativas de cuerpos opacos

El comportamiento ideal del CN sirve como estándar, contra el cual se compara el comportamiento de cuerpos reales

El comportamiento real se expresa por una serie de propiedades definidas en relación al CN

En general, las propiedades son emisividades, absortividades y reflectividades.

De las emisividades y absortividades habrá versiones

- ✓ Direccional espectral
- ✓ Direccional total
- ✓ Hemisférica espectral
- ✓ Hemisférica total

Con estas propiedades se pueden formular varias formas de leyes de Kirchoff, algunas con restricciones (sin restricciones para propiedades direccionales espectrales y con mayores restricciones mientras más agregada sea la propiedad).

De las reflectividades, en cambio, habrá una mayor cantidad de versiones, dado que los cuerpos pueden reflejar en más de una dirección.

No haremos un cubrimiento exhaustivo de todas las propiedades, sino más bien selectivo, para mostrar las dependencias principales.

Luego de las definiciones, daremos una breve visión de las propiedades reales de las superficies, con propósito de comprender las aplicaciones de éstas en fenómenos de radiación.

EMISIVIDADES

Emisividad expresa que tan bien un cuerpo emite en comparación con un CN.

(Razón entre las capacidades emisivas de una superficie real y la de un CN).

En general, dependerá de la T superficial del cuerpo, del rango de longitud de onda, y del ángulo de emisión.

Una forma simple de describir este comportamiento es el concepto de cuerpo gris (grey en UK, gray en USA). En este cuerpo la intensidad espectral hemisférica y el poder emisivo espectral hemisférico, son submúltiplos de los correspondientes a cuerpo negro, como lo muestra la siguiente figura.

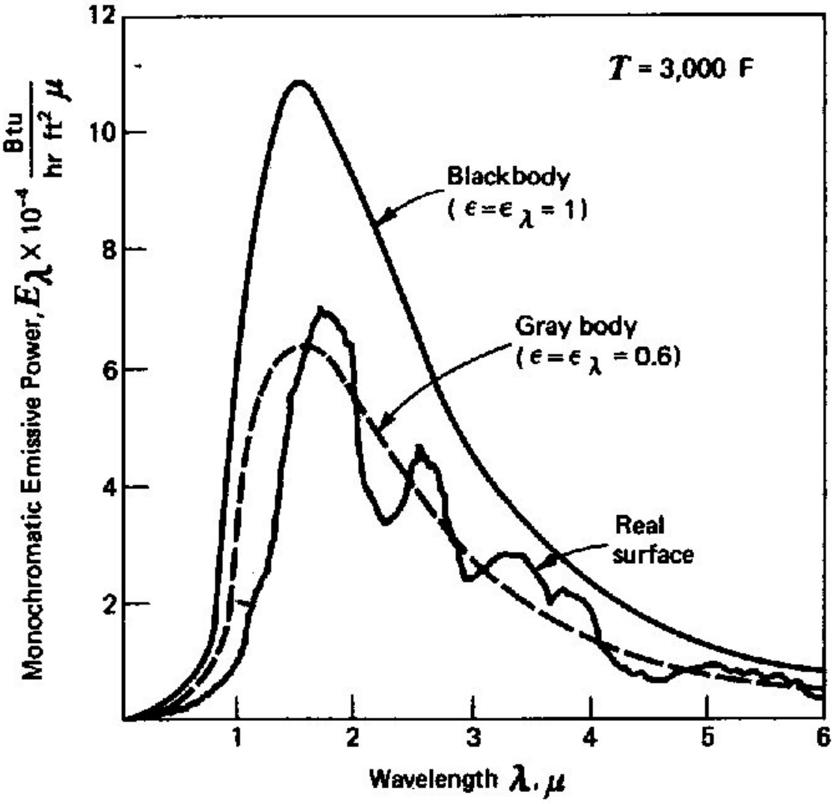


Fig. 5-9. Comparison of emissive power of black and gray bodies with that of a real surface.

Como el factor que relaciona los poderes emisivos de los cuerpos negro y gris es constante, estos tienen una emisividad espectral y total independiente de la longitud de onda.

Las propiedades direccionales del cuerpo gris se suponen idénticas a las del cuerpo negro. Sin embargo, puede haber inconsistencias si se examina con detalle los argumentos termodinámicos en que se basó la descripción de propiedades del CN, como en seguida detallaremos.

Emisividad direccional espectral $\varepsilon'_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T_A)$

La intensidad de radiación es la energía por unidad de tiempo emitida en una dirección (especificada por sus ángulos) por unidad de área proyectada normal a la dirección, por unidad de ángulo sólido y por unidad de intervalo de longitud de onda.

Al basar la intensidad en el área proyectada, su valor tiene el mismo para todas direcciones.

A diferencia de la intensidad de radiación de un CN, la intensidad emitida por un CNN depende de la dirección (especificada por dos ángulos). También depende de las variables de las que sí dependía la intensidad de CN, es decir, longitud de onda y temperatura.

Entonces podemos definir esta propiedad como:

$$\varepsilon'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)=\frac{i'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)}{i'_{\lambda b}(\lambda,T_A)}=\frac{e'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)}{e'_{\lambda b}(\lambda,\theta,T_A)}$$

Esta es la emisividad más básica y fundamental, porque incluye las dependencias de longitud de onda, dirección, y temperatura.

Para calcular los factores del denominador, hay que usar la intensidad espectral de cuerpo negro.

Emisividad direccional total $\varepsilon'(\theta,\varphi,T_A)$

Para obtener un promedio de esta propiedad integramos la radiación emitida en una dirección sobre todas las longitudes de onda

$$e'(\theta,\varphi,T_A)=\int_0^{\infty}e'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)d\lambda$$

Similarmente, sabemos que el poder emisivo total direccional de un CN es:

$$e'_b(\theta,T_A)=\int_0^{\infty}e'_{\lambda b}(\lambda,\theta,T_A)d\lambda=\frac{\sigma T_A{}^4}{\pi}\cos\theta$$

La emisividad buscada es la razón entre ambas propiedades totales:

$$\varepsilon'(\theta,\varphi,T_A)=\frac{e'(\theta,\varphi,T_A)}{e_b'(\theta,T_A)}=\pi\int_0^{\infty}e'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)d\lambda/\sigma T_A^4\cos\theta$$

Otra forma en que se puede poner la emisividad espectral total es en términos de la espectral direccional:

$$\varepsilon'(\theta,\varphi,T_A)=\pi\int_0^{\infty}\varepsilon'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)e'_{\lambda b}(\lambda,\theta,T_A)d\lambda/\sigma T_A^4\cos\theta$$

Emisividad espectral Hemisférica $\varepsilon_{\lambda}(\lambda,T_A)$

Se considera el promedio obtenido al integrar las magnitudes espectrales direccionales sobre todas las direcciones en un hemisferio centrado en un área dA.

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T_A) = \frac{e_\lambda(\lambda, T_A)}{e_{\lambda b}(\lambda, T_A)} = \frac{1}{\pi}\int \varepsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T_A)\cos\theta d\omega$$

Esta integral se realiza sobre un hemisferio completo.

Emisividad Total Hemisférica $\varepsilon\ (T_A)$

Aquí la definición es más simple porque no hay dependencia angular:

$$\varepsilon\ (T_A) = \frac{e(T_A)}{e_b(T_A)}$$

Hay muchas formas de expresar estas propiedades en términos de las precedentes. Por ejemplo, en términos de la emisividad hemisférica espectral:

$$\varepsilon\ (T_A) = \frac{e(T_A)}{e_b(T_A)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda, T_A) e_{\lambda b}(\lambda, T_A) d\lambda}{\sigma T_A^{\ 4}}$$

Absortividad

Se define como la fracción de la energía incidente sobre un cuerpo que es absorbida por el cuerpo.

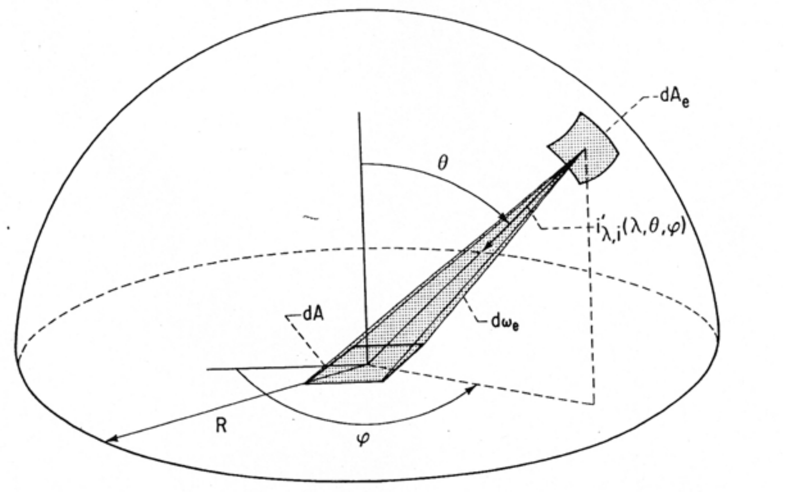
La radiación incidente es el resultado de las condiciones existentes en la *fuente* de la radiación incidente.

Su distribución espectral es independiente de la temperatura y de la naturaleza física de la superficie absorbente.

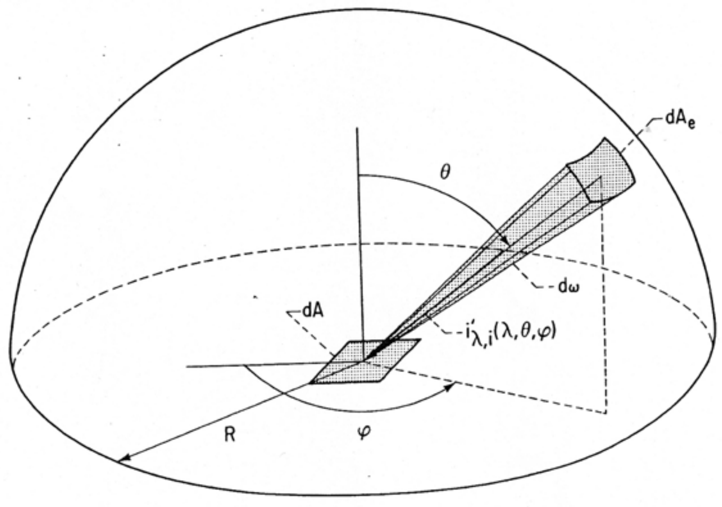
Se introducen complejidades adicionales porque se debe considerar las características espectrales y direccionales de la radiación incidente.

Absortividad espectral direccional $\alpha'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T_A)$

Consideremos la energía incidente en un elemento de superficie dA desde una dirección especificada por los dos ángulos.
Atraviesa normalmente el area dAe, en la superficie de un hemisferio de radio R centrado en dA.



(a)



(b)

Se explica con las figuras precedentes.

Representa la energía incidente $i'_{\lambda i}\,(\lambda,\theta,\varphi)$ procedente de una dirección particular, que es absorbida.

La energía incidente se expresa:

$$d^3Q'_{\lambda i}(\lambda,\theta,\varphi)=i'_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)dA_e d\omega_e d\lambda=i'_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)dA_e d\lambda\frac{dA\cos\theta}{R^2}$$

el factor con coseno es el ángulo sólido subtendido por dA visto desde dAe.

Esta ecuación se puede expresar en términos del ángulo sólido de la segunda figura ($d\omega$). Entonces:

$$d^3Q'_{\lambda i}(\lambda,\theta,\varphi)=i'_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)dAd\omega\cos\theta d\lambda$$

La energía que es absorbida es dependiente no solo de la longitud de onda y de la dirección sino también de la temperatura de la superficie que absorbe. Esta energía es:

$$d^3Q'_{\lambda a}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)$$

Con lo cual:

$$\alpha'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)=\frac{d^3Q'_{\lambda a}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)}{d^3Q'_{\lambda i}(\lambda,\theta,\varphi)}=\frac{d^3Q'_{\lambda a}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)}{i'_{\lambda i}(\lambda,\theta,\varphi)dA\cos\theta d\omega d\lambda}$$

Ley de Kirchhoff

Relaciona las capacidades aborbentes y emisoras de un cuerpo.

La ley puede tener varias condiciones necesarias impuestas, dependiendo de si se consideran propiedades
Espectrales
Totales
Direccionales
Hemisféricas

Se considera el cuerpo dA en una cavidad isoterma negra a la misma temperatura del cuerpo.

La energía emitida por dA en la correspondiente dirección

$$d^3Q'_{\lambda e}=i'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)dA\cos\theta d\omega d\lambda=\varepsilon'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)i'_{\lambda b}(\lambda,T_A)dA\cos\theta d\omega d\lambda$$

La intensidad de la energía incidente en dA desde una dirección (cualquiera) de la cavidad será la misma ya que es radiación de cuerpo negro $i'_{\lambda b}(\lambda,T_A)$.

Para mantener un balance de energía las energías absorbidas y emitidas dadas por las ecuaciones anteriores deben ser iguales. Esto implica igualar las absortividades y emisividades:

$$\alpha'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)=\varepsilon'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)$$

Esta relación se cumple sin restricciones.

También podemos definir:

Absortividad direccional total $\alpha'\ (\theta,\varphi,T_A)$

Es la razón entre la energía, de todas las longitudes de onda, que es absorbida desde una dirección dada a la energía incidente en esa dirección.

Se obtiene integrando propiedades más elementales de la manera siguiente:

$$\alpha'\ (\theta,\varphi,T_A)=\frac{\int_0^{\infty}\alpha'_{\lambda}(\lambda,\theta,\varphi,T_A)i'_{\lambda i}(\lambda,\theta,\varphi)d\lambda}{\int_0^{\infty}i'_{\lambda i}(\lambda,\theta,\varphi)d\lambda}$$

En virtud de la ley de Kirchoff, en la ecuación anterior se puede reemplazar la absortividad por una emisividad.

Absortividad espectral hemisférica $\alpha_{\lambda}(\lambda,T_A)$

Es la fracción de la energía espectral que es absorbida de la incidente desde todas las direcciones de un hemisferio que rodea al cuerpo.

Absortividad total hemisférica $\alpha\ (T_A)$

Es la fracción que es absorbida por dA proveniente de todas las direcciones del hemisferio y en el rango completo de longitudes de onda.

Anexo
Sumario de Leyes de Kirchhoff

Table 3-2 Summary of Kirchhoff's-law relations between absorptivity and emissivity

Type of quantity	Equality	Restrictions
Directional spectral	$\alpha'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T_A) = \epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T_A)$	None
Directional total	$\alpha'(\theta, \varphi, T_A) = \epsilon'(\theta, \varphi, T_A)$	Incident radiation must have a spectral distribution proportional to that of a blackbody at T_A, $i'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) = C(\theta, \varphi)i'_{\lambda b}(\lambda, T_A)$; or $\alpha'_\lambda(\theta, \varphi, T_A) = \epsilon'_\lambda(\theta, \varphi, T_A)$ are independent of wavelength (directional-gray surface)
Hemispherical spectral	$\alpha_\lambda(\lambda, T_A) = \epsilon_\lambda(\lambda, T_A)$	Incident radiation must be independent of angle, $i'_{\lambda,i}(\lambda) = C(\lambda)$; or $\alpha'_\lambda(\lambda, T_A) = \epsilon'_\lambda(\lambda, T_A)$ do not depend on angle (diffuse-spectral surface)
Hemispherical total	$\alpha(T_A) = \epsilon(T_A)$	Incident radiation must be independent of angle and have a spectral distribution proportional to that of a blackbody at T_A, $i'_{\lambda,i}(\lambda) = Ci'_{\lambda b}(\lambda, T_A)$; or incident radiation independent of angle and $\alpha'_\lambda(\theta, \varphi, T_A) = \epsilon'_\lambda(\theta, \varphi, T_A)$ are independent of λ (directional-gray surface); or incident radiation from each direction has spectral distribution proportional to that of a blackbody at T_A and $\alpha'_\lambda(\lambda, T_A) = \epsilon'_\lambda(\lambda, T_A)$ are independent of angle (diffuse-spectral surface); or $\alpha'_\lambda(T_A) = \epsilon'_\lambda(T_A)$ are independent of wavelength and angle (diffuse-gray surface)