VI. CUANDO LA RADIACIÓN SE SIENTE CALIENTE

6 – 1. Radiación electromagnética

Todo cuerpo, por el solo hecho de estar a una temperatura superior a 0 *K* emite radiaciones electromagnéticas. Las radiaciones electromagnéticas se pueden considerar como perturbaciones ondulatorias transversales que se propagan en el vacío a 2,998 x 10^8 *m/s*, velocidad que se indica con c_0. Las radiaciones electromagnéticas se suelen agrupar por nombres comunes: luz visible, rayos ultravioleta, rayos infrarrojos, microondas, rayos *X*, etc. En un medio dado, toda radiación electromagnética puede caracterizarse por su velocidad, su longitud de onda y su amplitud. La velocidad con que se propaga una radiación electromagnética en un medio dado depende de la naturaleza del medio. Así, en el agua la velocidad de dichas ondas es un 75 % de la velocidad que tienen en el vacío. La longitud de onda, parámetro que se indica con la letra griega λ, es la distancia que media entre dos crestas consecutivas de la onda. La amplitud es la elongación máxima de la onda en la dirección perpendicular a su propagación.

La frecuencia de una onda, que se indica con la letra griega ν, es la relación entre la velocidad de propagación de la onda y su longitud de onda. Las unidades SI son $Hz \equiv s^{-1}$.

Si una onda de longitud de onda λ y frecuencia ν se propaga en un medio homogéneo con velocidad c, la relación entre estas magnitudes está dada por

$$\lambda\nu = c \qquad (6 - 1)$$

El conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas ordenadas en función creciente de sus longitudes de onda constituye el llamado *espectro electromagnético*. En la Figura 6 - 1, se esquematiza el espectro electromagnético.

En un medio homogéneo e isótropo las radiaciones se desplazan en forma rectilínea. Esas líneas de propagación se denominan usualmente "rayos". Un conjunto de rayos comprendidos en un intervalo estrecho de longitudes de onda se llama "haz de radiación".

Los cuerpos no sólo emiten radiaciones electromagnéticas sino que también las absorben. Si bien en Física se recurre a la abstracción de "fuentes puntuales" de radiación, tales fuentes no existen en la naturaleza. Tampoco existen "haces monocromáticos", es decir haces de radiación de una única longitud de onda, aunque se consideran como tales haces en los cuales las longitudes de onda varían en un rango relativamente estrecho. Los haces de radiación tampoco son exactamente paralelos, aunque para cortos desplazamientos entre colimadores apropiados se los puede considerar como tales.

6 - 2. La energía de la radiación electromagnética.

Una de las propiedades más importantes de la radiación electromagnética es la de transportar energía. Desde principios del siglo XX se acepta que la energía asociada a estas radiaciones está "cuantizada" de modo que una onda electromagnética se comporta como un haz de pequeñísimos "paquetes" de energía llamados *cuantos de energía* o *fotones*, siendo la energía de cada uno de ellos

$$E = h\nu \qquad (6 - 2)$$

donde ν es la frecuencia de la radiación y h una constante, llamada *constante de Planck* cuyo valor es 6,626 x 10^{-34} *J.s*

La combinación de las ecuaciones (6 - 1) y (6 - 2), permite expresar la relación entre la energía de un fotón y su longitud de onda

$$E = h.c/\lambda \qquad (6 – 3)$$

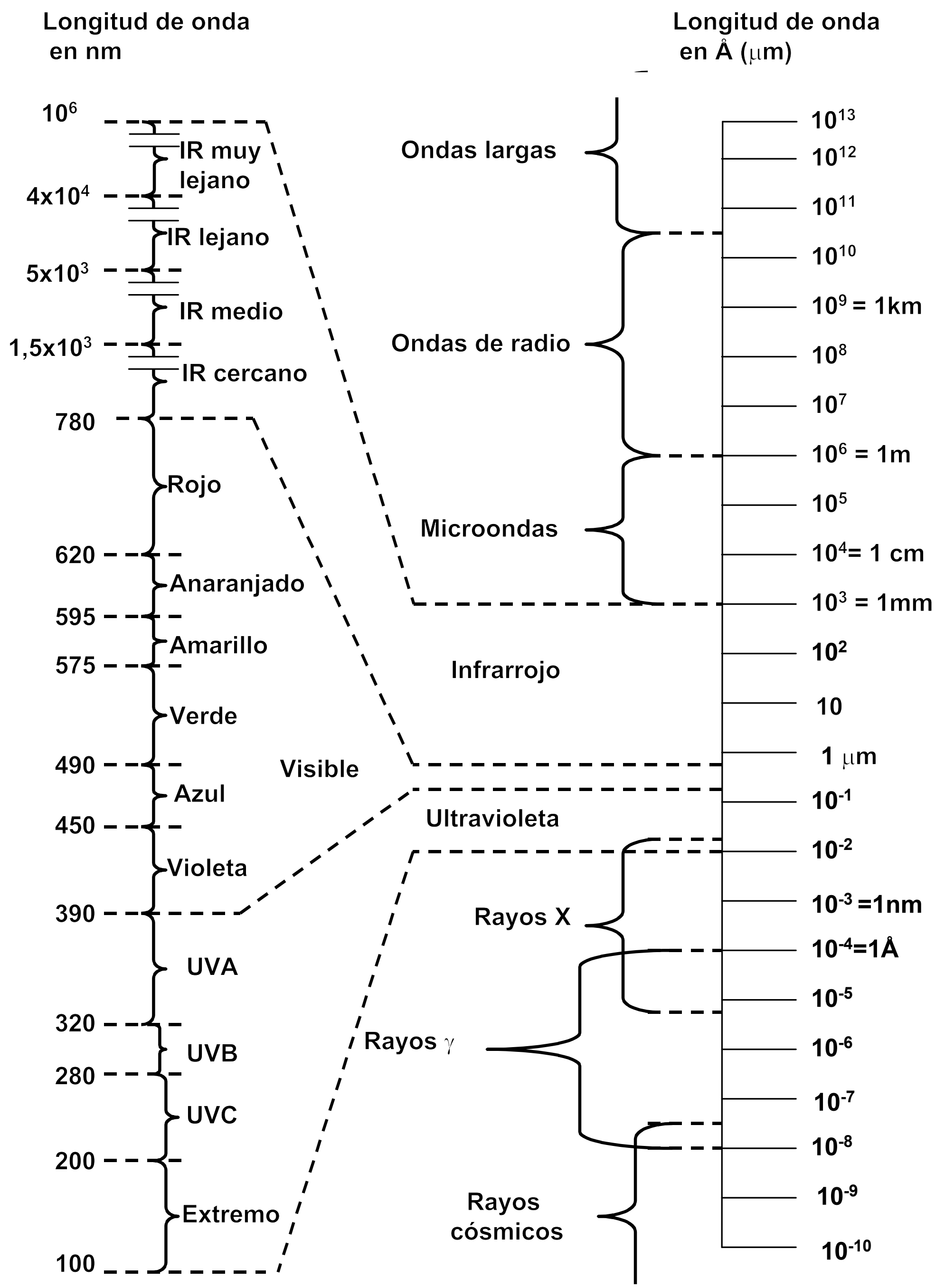

Figura 6 – 1. Espectro electromagnético

Ejemplo 6.1.

Una radio de frecuencia modulada emite un haz de radiación electromagnética cuya frecuencia media es de 103,6 *MHz*. Calcular la longitud de onda y la energía de un fotón de esa radiación.

Solución

A partir de la expresión

$\lambda\nu = c$

y sabiendo que la velocidad de la luz en el vacío es

$$c_0 = 2{,}998 \times 10^8\ m\ s^{-1}$$

Encontramos que

$$\lambda = c_0/\nu = 2{,}998 \times 10^8/103{,}6 \times 10^6 = 2{,}894\ m$$

La energía de un fotón de esa radiación será

$$E = h\nu = 6{,}626 \times 10^{-34} \times 103{,}6 \times 10^6 =$$

$$= 6{,}865 \times 10^{-26}\ J.$$

Ejemplo 6.2

Los llamados *hornos a microondas* poseen un dispositivo llamado *magnetrón* que emite un haz de radiación electromagnética de frecuencia media 2450 *MHz*. La radiación de esta frecuencia provoca la vibración de las moléculas de agua presentes en los alimentos que se desean calentar. La energía de vibración se transforma en energía térmica lo que hace elevar la temperatura del alimento. Obviamente, una pequeña parte de la energía absorbida es transferida — por conducción y/o convección — por el alimento al recipiente que lo contiene.

En un horno de esta clase se introduce un recipiente que contiene 80 *mL* de agua y que se encuentra a 15,0 ºC Calcular la temperatura que alcanza el agua cuando absorbe 2x10^3 moles de fotones de 2450 *MHz* suponiendo que la energía transferida al recipiente por conducción hacen que éste tenga un *equivalente en agua* de 10*g*.

Solución

La energía asociada a un mol de fotones de esa frecuencia es

$$E = Nh\nu = 20\ N_A h\nu$$

$$= 2000 \times 6{,}022\times10^{23} \times 6{,}626\times10^{-34}\times 2{,}450\times10^9$$

$$= 1955{,}2\ J$$

Como el equivalente en agua del recipiente es 10*g*, todo ocurre como si esa energía hubiese sido absorbida por 90*g* de agua. Siendo el calor específico del agua igual a 4,184 Jg^{-1} ºC^{-1}, resulta que la variación de temperatura será

$$\Delta T = E / m\ c_{H_2O}$$

$$= 1955{,}2 / (90 \times 4{,}184) = 5{,}2\ ºC$$

Por lo tanto, la temperatura máxima que alcanza el recipiente con el agua será 15,0 + 5,2 = 20,2 ºC

Cuando sobre un cuerpo incide radiación electromagnética puede ocurrir que parte se refleje sobre su superficie, parte se refracte y lo atraviese o que parte sea absorbida. El término *absorción* se refiere a la transferencia de energía de un campo electromagnético a una entidad molecular o iónica.

La energía total emitida, transferida o recibida como radiación de todas las longitudes de onda en un período definido de tiempo se llama *energía radiante*. La energía radiante que es absorbida por un cuerpo, al ser transferida a éste, puede producir un cambio químico (por ejemplo la activación de la fotosíntesis por la radiación ultravioleta) una transición física (fusión, vaporización, cambio de estructura molecular, etc.), la emisión de una corriente eléctrica (por ejemplo en las células fotoeléctricas) o, simplemente, incrementar la temperatura del cuerpo.

Cuando la energía radiante penetra en un cuerpo pueden darse dos fenómenos: la absorción o la trans-

transmisión de la radiación. El término *transmisión* se refiere a que la radiación atraviesa todo el cuerpo y sale del mismo manteniendo el mismo rango de longitudes de onda.

Aquellos cuerpos que transmiten radiación electromagnética de un determinado intervalo de longitudes de onda se dicen *transparentes* para dicha radiación.

Existen cuerpos en los cuales la transmisión va acompañada por la absorción de una fracción de la radiación. Tales cuerpos se dicen *semitransparentes* para la radiación incidente.

Otros cuerpos absorben la totalidad de la radiación que ingresa a través de su superficie exterior. Tales cuerpos se dicen *opacos* para la radiación incidente.

Además de recibir energía radiante del medio que los circunda los cuerpos también emiten energía radiante. Si por efecto de la absorción de esa energía no se producen cambios químicos, eléctricos o transiciones físicas, al cabo de un tiempo se alcanzará un equilibrio dinámico caracterizado por una constancia de la temperatura de todos los cuerpos que intercambian energía radiante. Cuando se alcanza dicho estado debemos admitir que la cantidad de energía absorbida es igual a la cantidad de energía emitida. Esta es la razón por la cual todos los cuerpos que se encuentren dentro de un recinto adiabático alcanzan la misma temperatura aunque se haya hecho el vacío y no estén en contacto.

Hay dos factores importantes en el proceso de absorción de energía radiante:

a) La longitud de onda de la radiación incidente. Así por ejemplo, hay vidrios que absorben la radiación ultravioleta pero dejan pasar la visible o la infrarroja.

b) La forma de la superficie del cuerpo absorbente. Un trozo de plata perfectamente pulida reflejará gran parte de la energía luminosa que sobre él incida. Pero la misma masa, reducida a polvo absorbe buena parte de la radiación del mismo intervalo de longitudes de onda.

En rigor, no existen cuerpos absolutamente permeables a la energía radiante. Tales cuerpos se llamarían *diatermanos*, como tampoco existen cuerpos que absorban la *totalidad* de la radiación incidente cualquiera sea la longitud de onda o la temperatura. Tales cuerpos se llamarían *cuerpos negros*. Sin embargo, en el laboratorio se puede fabricar un dispositivo que absorba la *casi* totalidad que la radiación que recibe. Básicamente, se trata de un cuerpo hueco de material refractario recubierto interiormente de negro de humo. Este cuerpo se mantiene termostatizado a temperatura constante y tiene un pequeño orificio de superficie ΔS. La radiación que absorbe o emite es equivalente a la de un cuerpo negro de superficie ΔS que esté a la misma temperatura (Figura 6 -2)

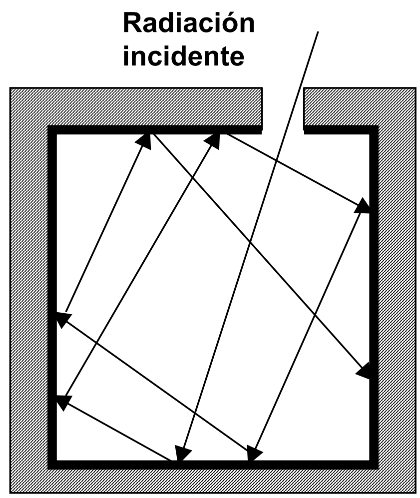

Figura 6 – 2. Esquema de la absorción de radiación electromagnética por un cuerpo negro

La radiación que penetra en el dispositivo a través del orificio de superficie ΔS incide sobre la capa de negro de humo. Buena parte de esta radiación es absorbida y una pequeña fracción es reflejada hacia otro punto de la pared interior donde se vuelve a producir el mismo proceso. Al cabo de un cierto número de absorciones y reflexiones, la energía radiante encerrada en el recinto es completamente absorbida. Para compensar la pequeña fracción de energía que atraviesa la pared del dispositivo (ya que no existe aislante perfecto) se coloca el dispositivo en un recinto termostatizado a la misma temperatura que el interior de modo que la radiación que emite a través de las paredes exteriores se compensa con la que absorbe del entorno.

6 - 3. Potencia radiante

Se designa con el término *potencia radiante* (P) a la potencia emitida, transferida o recibida como radiación. Las unidades SI son $J\,s^{-1} = W$.

Como la energía de un haz de radiación electromagnética depende de las frecuencias de las radiaciones que lo integran se suele utilizar el término *potencia radiante espectral* (P_λ) para identificar a la potencia radiante emitida o transferida por una radiación de una determinada longitud de onda λ.

Ejemplo 6.3.

Se dispone de un horno a microondas de 900 W de potencia máxima. Calcular cuanto tiempo se demora en calentar 100 g de agua de 18,0 a 90,0 ºC a potencia máxima suponiendo que sólo el 82% de la radiación emitida a 2450 MHz se transforma en calor.

Solución

Considerando que el calor específico del agua líquida es constante e igual a 4,184 $J\,g^{-1}\,{}^{\circ}C^{-1}$, la energía que requiere absorber esa masa de agua para incrementar su temperatura en 72 ºC es

$$E = c_{H_2O} m \Delta t$$

$$= 4,184 \times 100 \times 72 = 30124,8\ J$$

Pero como sólo se utiliza el 82% de la energía para incrementar la temperatura del agua, la energía total que debe producir el horno es

$$E_{total} = E/0,82 = 36737,6\ J$$

Como a potencia máxima el horno suministra 900 J por segundo, el tiempo requerido será

$$\Delta\tau = 36737,6 / 900 = 40,8\ s$$

---

6 – 4. Emisión de energía radiante por una superficie.

Para cuantificar los efectos de la radiación que *emiten* los cuerpos, se suelen utilizar varias magnitudes. Entre ellas podemos mencionar:

6 – 4. a. Radiancia

Cuando una superficie emite radiación electromagnética lo hace en cierto rango de frecuencias y en todas direcciones (Figura 6 – 3).

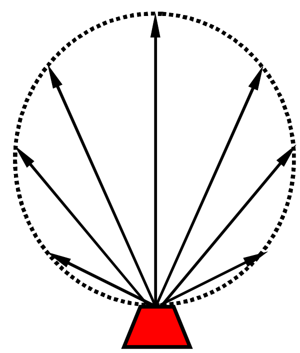

Figura 6 – 3. Distribución direccional de la radiación

Supongamos que a través de una superficie se *emite* un haz de radiaciones electromagnéticas. Si el área de la superficie es lo suficientemente pequeña y sólo tomamos en cuenta una trayectoria relativamente pequeña de ese haz, podríamos considerar, con bastante buena aproximación, que en esa trayectoria las radiaciones electromagnéticas son *paralelas*

Se llama radiancia (L) *de una superficie a una magnitud que resulta del cociente entre la potencia radiante, P, que sale de, o pasa a través de, un elemento infinitesimal de superficie en una dirección dada desde la fuente y el área del elemento proyectada ortogonalmente en un plano normal a la dirección del haz*

Si indicamos con θ al ángulo que forman el haz supuesto paralelo de radiación emitida y la normal al plano de la superficie dS a través de la cual se emite la radiancia L vendrá dada por

$$L = \frac{dP}{dS\cos\theta} \qquad (6-4)$$

Las unidades de L en el SI son $W\,m^{-2}$. La radiancia de una superficie depende de su naturaleza, de su forma o estado de subdivisión, de la temperatura y de las longitudes de onda de la radiación.

Dado que la radiancia depende de la potencia radiante y ésta, a su vez, depende de la longitud de onda de la radiación, habrá que especificar a qué longitud de onda se produce la radiancia emitida a través de cada superficie. La radiancia para una determinada longitud de onda λ se suele indicar con L_λ. Resulta evidente que la radiancia L para todo el intervalo de longitudes de onda que atraviesan la superficie emisora será

$$L = \int L_\lambda d\lambda \qquad (6-5)$$

A L_λ se la suele llamar también *radiancia espectral en la longitud de onda* λ.

Debemos hacer notar que no existen en la naturaleza fuentes puntuales de radiación electromagnética y que es prácticamente imposible lograr que un haz de radiación sea *exactamente* paralelo. Aún en los mejores láseres se verifica una ligera divergencia del haz de radiación.

Consideremos ahora un haz de radiación divergente, que luego de atravesar una superficie de área S_1 por un punto x recorre una cierta longitud dl (Figura 6 – 4). El frente del haz no es una superficie plana sino una porción de una superficie esférica $d\sigma$. La relación entre el área de superficie $d\sigma$ y el cuadrado de la longitud dl nos da el valor del ángulo sólido ω ocupado por el haz

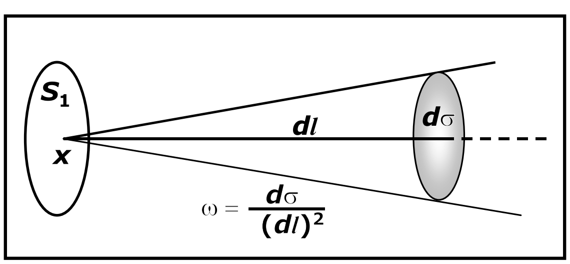

Figura 6 - 4

Recordemos que si bien los ángulos se expresan en radianes (*rad*), los ángulos sólidos se expresan en esterradianes (*sr*). Como la superficie de una esfera de radio r es $4\pi r^2$ el ángulo sólido de una esfera es

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

Para un haz *divergente* propagándose en un cono elemental de ángulo sólido dω que contiene a la dirección de propagación del haz (Figura 6 – 5), la radiancia es

$$L = \frac{d^2P}{d\varpi\, dS\cos\theta} \qquad (6-6)$$

En este caso, las unidades de L en el SI son $Wm^{-2}sr^{-1}$.

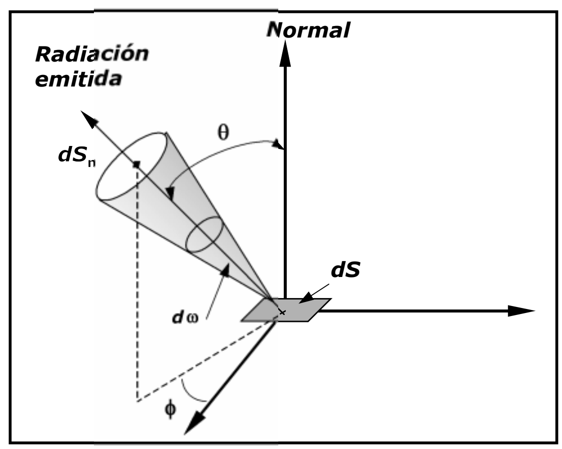

Figura 6 -5. Emisión de energía radiante desde un área elemental dS en un ángulo sólido $d\omega$ subtendido por dS_n en un punto sobre dS

6 – 4. b. Exitancia radiante

Los efectos direccionales de la radiación se pueden explicitar introduciendo el concepto de *exitancia radiante*, antiguamente llamado *emitancia radiante.*

Se le da el nombre de exitancia radiante (M) (antes emitancia radiante) de una superficie a una magnitud escalar cuyo módulo viene dado por el cociente entre la potencia radiante, P, emitida por un elemento de superficie que contiene al punto de la fuente bajo consideración y el área (S) de dicho elemento: (dP/dS)

En otras palabras, la exitancia radiante es una magnitud que viene medida por la energía radiante emitida por todo el intervalo de longitudes de onda perpendicularmente a través de la unidad de superficie emisora en la unidad de tiempo.

La exitancia radiante depende de los mismos factores que la radiancia. En el S.I. se expresa en *watt.m*$^{-2}$.

Si observamos las ecuaciones (6 – 5) y (6 – 6) resulta evidente que

$$M = \int L_\lambda \cos\theta \, d\varpi \, d\lambda \qquad (6-7)$$

Es decir, la exitancia radiante se obtiene integrando la *radiancia espectral* sobre el ángulo sólido y el intervalo completo de longitudes de onda que emite la superficie.

La exitancia es un verdadero "flujo" de energía, ya que "flujo" se utiliza generalmente en el sentido de la velocidad de transferencia de fluido, partículas o energía a través de una superficie dada". No obstante ello, el término "flujo de energía radiante" (Φ) ha sido adoptado por la IUPAC y por la IUPAP como equivalente de *potencia radiante.* Para evitar confusiones, preferiremos utilizar este último término cada vez que corresponda.

Al tratar de especificar cierta dirección de propagación de la radiación emitida por una superficie, conviene utilizar coordenadas esféricas en lugar de coordenadas cartesianas. Esto es, se especifican la distancia al foco emisor (r) y los ángulos cenital (θ) y azimutal (ϕ) (Figura 6 – 6)

Si se hace coincidir el sistema de coordenadas polares esféricas con un punto del foco emisor se encuentra que a una cierta distancia r del foco existe una relación entre el ángulo sólido ω que abarca todas las direcciones radiales que interesa estudiar y el área del casquete esférico dS delimitado por dicho ángulo. Esa relación es

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} \qquad (6-8)$$

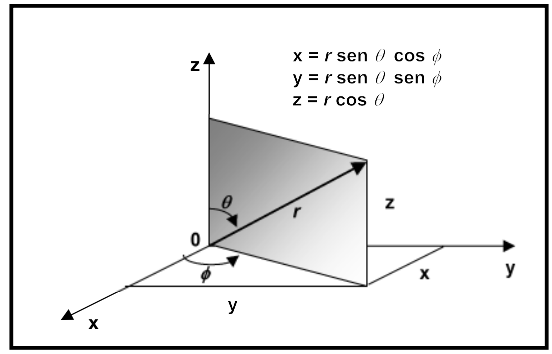

Figura 6 – 6. Sistema de coordenadas polares esféricas

En general interesa comparar la emisión de energía radiante a través de una superficie determinada con la de un cuerpo negro ideal en las mismas condiciones. Para ello se define el llamado *coeficiente de emisividad* (e), aunque sería más apropiado llamarlo *exitancia relativa*. El coeficiente de emisividad de la superficie del cuerpo en cuestión viene dado por la relación

$$e = \frac{M}{M_N} \qquad (6-9)$$

En esta expresión, M es la exitancia radiante de la superficie considerada y M_N a la exitancia radiante del cuerpo negro en las mismas condiciones.

Obviamente, e es un número y por lo tanto independiente de las unidades en que se midan las exitancias radiantes. En la tabla de la Figura 6 - 7 se dan los valores de coeficientes de emisividad de algunos materiales entre 20 y 200 ºC con λ 555 - 560 *nm*.

6 – 4. c. Intensidad radiante

Otra de las magnitudes que se refiere a la energía radiante emitida por una superficie es la *intensidad radiante* (I)

Se llama intensidad radiante a la relación entre la potencia radiante emitida en una dirección determinada por una fuente o un elemento de la fuente en un cono infinitesimal que contiene la dirección dada y el ángulo sólido del cono ($dP/d\omega$)

En otras palabras, la intensidad radiante mide la potencia radiante, P, por unidad de ángulo sólido, ω.

Las unidades en el SI de la intensidad radiante son $W\,sr^{-1}$.

Cuando se especifica la intensidad radiante que corresponde a una longitud de onda determinada λ, se habla de *intensidad radiante espectral de la longitud de onda* λ. Esta expresión se indica con I_λ

Para todo el intervalo de longitudes de onda en que la superficie emite energía radiante es

$$\boldsymbol{I = \int I_\lambda d\lambda}$$

Material	coeficiente de emisividad
Agua	0,96
aluminio altamente pulido	0,02 –0,03
aluminio, hoja brillante	0,06 – 0,07
cinc recién esmerilado	0,20 – 0,24
cobre empañado	0,05 – 0,06
cobre pulido	0,026 – 0,028
cromo, pulido	0,05 – 0,07
hierro galvanizado	0,23 – 0,28
hierro oxidado	0,8 – 0,9
madera cepillada	0,8 – 0,9
negro de humo	0,98
oro, altamente pulido	0,01 – 0,02
plata pulida	0,020 – 0,022
Teflón	0,85
vidrio común liso	0,90 – 0,95

Figura 6 - 7 Coeficientes de emisividad de algunos materiales

6 – 5. Recepción de energía radiante por una superficie

Hemos visto algunas de las magnitudes que se refieren a la energía radiante que una superficie emite. Existen varias magnitudes que cuantifican la energía radiante que *incide* sobre una superficie.

6 – 5.a. Irradiancia

Entre las magnitudes referidas a la radiación que incide sobre una superficie debemos destacar la *irradiancia*, antiguamente llamada *poder absorbente.*

Se llama irradiancia a la relación entre la potencia radiante, P, de todas las longitudes de ondas incidentes sobre un elemento infinitesimal de superficie que contiene el punto considerado; y el área del elemento (dP/dS)

Las unidades en el SI son $W\,m^{-2}$. La irradiancia depende de los mismos factores que la radiancia.

De manera análoga a la que hemos usado en la definición de radiancia espectral en la longitud de onda λ, se define *irradiancia espectral en la longitud de onda* λ (E_λ) como la irradiancia para una determinada longitud de onda λ. Resulta evidente que la irradiancia E para todo el intervalo de longitudes de onda que atraviesan la superficie emisora será

$$\boldsymbol{E = \int E_\lambda d\lambda} \qquad (6-10)$$

Si llamamos θ, al ángulo que forman el haz, que se puede considerar paralelo, de radiación incidente y el plano de la superficie *S* sobre la que la radiación incide, la irradiancia *E* vendrá dada por

$$E = \frac{dP}{dS\cos\theta} \tag{6 – 11}$$

Es conveniente comparar la irradiancia *E* sobre la superficie de un cuerpo con la de un cuerpo negro E_N en las mismas condiciones. A la relación

$$a = \frac{E}{E_N} \tag{6 – 12}$$

se la suele llamar *coeficiente de absorción* (*a*). Es preferible llamar a esa relación *irradiancia relativa* ya que no toda la radiación que incide sobre una superficie es absorbida, reservando el uso de "coeficiente de absorción" para el logaritmo del cociente entre la potencia radiante emitida y la absorbida dividida por el camino óptico que recorre la radiación en el interior de un cuerpo.

6 - 5.b. Densidad de energía radiante

Las radiaciones electromagnéticas tienen una velocidad finita que depende de la naturaleza del medio a través del cual se propagan. La relación entre la energía transportada por un haz de radiación y el volumen que ocupa dicho haz al atravesar un medio en un cierto intervalo de tiempo nos da la *densidad de energía radiante* en ese lapso.

Consideremos un haz de radiación que se propaga en forma *paralela* a través de un medio isótropo con velocidad *c*. En un intervalo $d\tau$ el haz recorre una longitud *dl* dado por la relación

$$dl = c\, d\tau$$

Sea *dS* el área de superficie que atraviesa el haz. En consecuencia, en el intervalo $d\tau$ el haz ocupa un volumen *dSdl*. Si llamamos *dU* a la energía transportada por el haz durante ese intervalo, la potencia radiante *dP* será

$$dP = \frac{dU}{d\tau}$$

Si llamamos U_n a la densidad de energía

$$U_n = \frac{dU}{dV} = \frac{dU}{dSdl}$$

$$= \frac{dU}{dS\, c d\tau}$$

Siendo $dU/d\tau$ la potencia radiante y dP/dS la radiancia (*L*)

$$U_n = \frac{L}{c}$$

(densidad de energía radiante de un haz paralelo)

Para un haz divergente, la densidad de energía radiante se obtiene a partir de la ecuación (6 – 6)

$$\frac{dP}{dS} = L\cos\theta\, d\varpi$$

o

$$\frac{dU}{d\tau\, dS} = L\cos\theta\, d\varpi$$

En esta expresión θ es el ángulo que forma la dirección central del haz con la normal a la superficie de la cual el haz surge y $d\omega$ es el ángulo sólido subtendido por la superficie a la que el haz llega al cabo de un tiempo $d\tau$ y el punto en que se origina el haz y como $d\tau = c\, dl$ resulta

$$\frac{dU}{dl\, dS} = \frac{L}{c}\cos\theta\, d\varpi$$

Siendo $dl\, dS = dV$ y $dU/dV = U_n$

$$U_n = \frac{L}{c}\cos\theta\, d\varpi$$

6 – 6. Reflectividad (ρ)

Suele ocurrir que cuando un haz de radiación incide sobre una superficie, se transmita sólo una fracción de la misma y otra se refleje. La fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie se llama *reflectividad*. Esta propiedad depende tanto de la dirección de la radiación incidente como de la reflejada. Las superficies se pueden idealizar como *difusas* o *especulares*. Cuando incide una radiación sobre una superficie difusa la intensidad de la radiación reflejada es la misma en todas las direcciones. En cambio en las superficies especulares el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

6 – 7. Absorbancia (A)

Se designa con el nombre Absorbancia (A) al logaritmo decimal del cociente entre la *potencia radiante espectral* de la radiación monocromática incidente ($P = \int_\lambda I_\lambda d\lambda$) y la potencia radiante de la radiación transmitida (P_λ):

$$A = \log (P_{\lambda incidente} / P_{\lambda transmitida}) = \log T$$

En disolución, la absorbancia es el logaritmo decimal del cociente entre la *potencia radiante espectral* de la luz transmitida a través del medio de referencia y la de la luz transmitida a través de la muestra, ambas observadas en cubetas idénticas. T es la *transmitancia* (interna). Esta definición supone que toda la luz incidente es transmitida o absorbida, siendo despreciables la reflejada y la difundida[1]

Tradicionalmente se ha utilizado la *intensidad radiante (espectral)*, I, en lugar de la *potencia radiante*, P_λ, que es la forma aceptada actualmente. (Los términos: extinción, densidad óptica y la voz inglesa "absorbancy" ya no deben usarse).

6 – 8. Transmisividad y radiosidad

Se llama *transmisividad* a la fracción de la radiación que atraviesa un cuerpo semitransparente y es transmitida por el mismo y *radiosidad* a la relación entre la radiación que incide sobre un cuerpo y la suma de la radiación reflejada y emitida por el mismo.

6 – 9. Ley de Kirchhoff

La experiencia demuestra que entre la exitancia radiante M de una superficie y la irradiancia E de la misma existe cierta relación. Supongamos que varios cuerpos pequeños, A_1, A_2, A_3 (Figura 6 - 8) se encuentran dentro de la cavidad de un cuerpo negro C, que se mantiene a una temperatura determinada T, y que en el interior del cuerpo negro se ha hecho el vacío, es decir, que los cuerpos antedichos solamente pueden intercambiar energía entre sí o con las paredes de C mediante emisión y absorción de radiación electromagnética. La experiencia demuestra que, al cabo de un cierto tiempo, en tal sistema de cuerpos se establece el equilibrio térmico, es decir, que todos los cuerpos alcanzan la misma temperatura T, igual a la de las paredes de C. Siendo cuerpos diferentes tendrán exitancias radiantes diferentes. La única explicación posible para que un cuerpo alcance el equilibrio térmico teniendo una exitancia radiante mayor que otro (u otros) es que tenga una irradiancia mayor que el resto. De manera que, de la posibilidad del establecimiento del equilibrio térmico entre cuerpos que sólo pueden intercambiar energía por medio de la emisión y de la absorción de radiación se deduce la necesidad de que exista proporcionalidad entre las exitancias radiantes y las irradiancias de los cuerpos. Gustav Robert Kirchhoff[2] demostró que esta proporcionalidad debe cumplirse separadamente para cada intervalo de longitudes de onda.

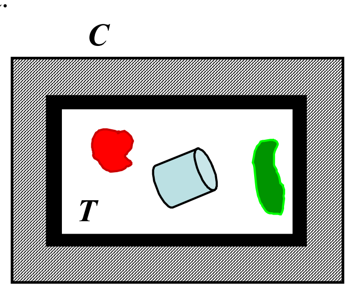

Fig. 6 - 8. Cuerpos dentro de una envoltura a temperatura constante T.

[1] *Nota.* El término inglés 'scattering' se traduce como *difusión* y no como *dispersión,* porque este último ha sido ya utilizado para definir un fenómeno óptico diferente.

[2] **Gustav Robert Kirchhoff** (1824 – 1887) Físico y químico alemán. Profesor de las Universidades de Heidelberg y de Berlin. Se destacó por sus teorías sobre electricidad y Termodinámica.

Si los cuerpos A_1, A_2, A_3, …, se caracterizan respectivamente por las exitancias radiantes M_1, M_2, M_3, ..., y las irradiancias relativas al cuerpo negro a_1, a_2, a_3, , ..., a la misma temperatura y longitud de onda se cumple

$$\frac{M_1}{a_1} = \frac{M_2}{a_2} = \frac{M_3}{a_3} = ... = cte$$

Esto es

Para toda superficie, la relación entre la exitancia radiante y la irradiancia relativa al cuerpo negro (antes coeficiente de absorción), medidos a una misma temperatura y para la misma longitud de onda, es una constante

Para el cuerpo negro en las mismas condiciones

$$\frac{M_1}{a_1} = \frac{M_2}{a_2} = \frac{M_3}{a_3} = ... = \frac{M_N}{a_N} \tag{6 - 13}$$

Como por definición $a_N = 1$, se deduce que la constante a que hace referencia el enunciado es la exitancia radiante del cuerpo negro (M_N). Por lo tanto para cualquier superficie

$$a = \frac{M}{M_N} \tag{6 - 14}$$

Si comparamos la (6 - 14) con la (6 - 9) encontramos que, para los mismos valores de λ y T

$$e = a \tag{6 - 15}$$

Esto implica que cualquier superficie emite radiación en relación a su capacidad para absorberla. Este fenómeno se conoce como *inversión del espectro*. El cuerpo negro, por ser el mejor absorbente es el mejor emisor, de allí que en los textos se lo denomine también *radiador integral*.

De la ley de Kirchhoff se deducen algunas conclusiones interesantes:

Ningún cuerpo podría alcanzar por radiación una temperatura infinita ya que ello implicaría la absorción sin emisión.

Ningún cuerpo puede llegar al 0 K por emisión de radiación ya que sería imposible evitar la absorción.

El calor transmitido por radiación y por unidad de tiempo depende no solo de la temperatura, área y naturaleza de la superficie del cuerpo sino también de la temperatura naturaleza y superficie de los cuerpos circundantes.

6 - 10. Superficies grises

El problema de analizar el intercambio de energía radiante entre superficies se simplifica notablemente si podemos suponer que la energía radiante que emite un cuerpo a través de su superficie tiene el mismo valor cualquiera sea la dirección en que se emite y cualquiera sea la longitud de onda de las mismas.

Se llaman *superficie gris* a la superficie de un cuerpo cuya exitancia radiante es la misma para todas las longitudes de ondas y todas las temperaturas. De acuerdo con la (6 - 15), esta constancia de e implica también la constancia de a. El valor práctico de un cuerpo gris radica en que puede aplicársele todas las propiedades que se encuentren para el cuerpo negro con sólo multiplicar su valor por e (o por a)

6 - 11. Ley de Stefan - Boltzmann

En 1878, Josef Stefan[3] midió la intensidad espectral de energía radiante $J_{\lambda T}$ (a veces llamada poder emisivo total) de varios cuerpos a distintas temperaturas. A diferencia de la exitancia, intensidad espectral de energía radiante $J_{\lambda T}$ viene dada por la energía radiante total emitida por un cuerpo, por segundo y por metro cuadrado *en todas direcciones*. Stefan halló que esta energía crece con la temperatura y es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Algunos años después, su discípulo Ludwig Boltzmann estableció que ese resultado es sólo válido para el cuerpo negro y lo dedujo teóricamente, por lo que esa generalización se denomina *ley de Stefan - Boltzmann*

En símbolos esta ley se expresa

[3] **Josef Stefan** (1835 – 1893). Físico austriaco. Profesor de Física Teórica de la Universidad de Viena.

$$J_{\lambda.T(N)} = \frac{\Delta E}{\Delta S \Delta \tau} = \sigma_N T^4 \qquad (6 - 16)$$

donde σ_n es el *coeficiente de radiación total* del cuerpo negro cuyo valor es

$$\sigma_N = 4,879 \times 10^{-8} \frac{kcal}{m^2 h\, K^4} =$$

$$= 5,670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \qquad (6 – 17)$$

Debe hacerse una distinción entre M_N y σ_n ya que la exitancia radiante del cuerpo negro da la energía emitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie en una dirección dada y para un intervalo de longitudes de onda mientras que el coeficiente de radiación total se refiere a la energía emitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie en *todas las direcciones* y para *todas las longitudes de onda*.

Sobre la base de lo dicho anteriormente, para los cuerpos grises se acepta

$$\sigma = e\sigma_N \qquad (6 - 18)$$

Por lo tanto, se considera que la radiación integral de un cuerpo gris vale

$$J_{\lambda.T} = \frac{\Delta E}{\Delta S \Delta \tau} = e\sigma_N T^4 \qquad (6 - 19)$$

Sobre esta relación se basa el funcionamiento de los pirómetros comentados en el Capítulo 2.

6 - 12. Distribución espectral de la radiación. Ley de Wien

La radiación que emite un cuerpo negro no está distribuida uniformemente en el espectro. A una determinada temperatura, el cuerpo negro emite radiaciones en un intervalo muy amplio de longitudes de onda. Si bien ese cuerpo puede absorber radiaciones de todas las longitudes de onda que sobre él incidan, cuando emite, las radiaciones tienen distintas intensidades según sus longitudes de onda. En 1893, Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien[4] (Willy, para los amigos) propuso, sobre la base de consideraciones termodinámicas, que cuando un cuerpo caliente emite energía radiante a una determinada temperatura, la longitud de onda a la cual la intensidad de la energía es máxima ($\lambda_{máx}$) y la temperatura absoluta a la cual se emite son inversamente proporcionales. Es decir

$$\lambda_{máx}\, T = b \qquad (6 - 13)$$

Expresión que se conoce como *ley de desplazamiento de Wien*:

La longitud de onda a la cual corresponde el máximo de intensidad espectral de energía es inversamente proporcional a la temperatura absoluta a la cual dicha radiación se emite.

El valor numérico de la constante b es

$$b = 2,8978 \times 10^{-3}\ m\ K$$

La deducción de Wien fue corroborada por Otto R. Lummer[5] y Ernst Pringsheim[6] quienes, en 1900, realizaron experimentos muy cuidadosos para estudiar la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro. Para ello utilizaron un horno de paredes interiores recubiertas de negro de humo que tenía un pequeño orificio por el cual salía la radiación a estudiar. Representando gráficamente la intensidad espectral de la radiación en función de las longitudes de onda emitidas se obtienen curvas características para cada temperatura como las que se representa en la Figura 6 – 9

Al observar el gráfico de la Figura 6 – 9 encontramos que para cada isoterma hay un valor de longitud de onda para la cual la intensidad espectral de la energía radiante tiene un valor máximo y que esos máximos se desplazan hacia el ultravioleta a medida que aumenta la temperatura, cumpliendo con la relación propuesta por Wien.

[4] **Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien** (1864 – 1932). Físico alemán. Profesor de la Universidad de Würtzburg. Premio Nobel de Física 1911.

[5] **Otto Richard Lummer** (1860 – 1925) Físico alemán nacido en Jena. Profesor en el Physikalische Technische Reichsanstalt de Berlin Se especializó en Óptica y Termodinámica.

[6] **Ernst Pringsheim** (1859-1917) Físico alemán nacido en Breslau. Fue profesor en la Universidad de Berlin. Sus trabajos sobre radiación condujeron al desarrollo de la Mecánica Cuántica.

Ejemplo 6.4.

El espectro del Sol muestra una intensidad máxima a una longitud de onda de 501,5 *nm*. Suponiendo que el Sol radia como un cuerpo negro, calcular la temperatura media de la superficie solar y la intensidad espectral de energía radiante (poder emisivo total).

Solución:

Empleando la expresión matemática de la ley de Wien tenemos que

$$T = \frac{b}{\lambda_{máx}}$$

$$= \frac{2{,}8978 \times 10^{-3}\, m.K}{501{,}5 \times 10^{-9}\, m} = 5{,}778 \times 10^{3}\, K$$

La intensidad espectral de energía radiante, o poder emisivo total, será

$$J_{\lambda.T(N)} = \sigma_N T$$

$$= 5{,}670 \times 10^{-8} \times \left(5{,}778 \times 10^{3}\right)^{4}$$

$$= 6{,}32 \times 10^{7}\, \frac{W}{m^{2}}$$

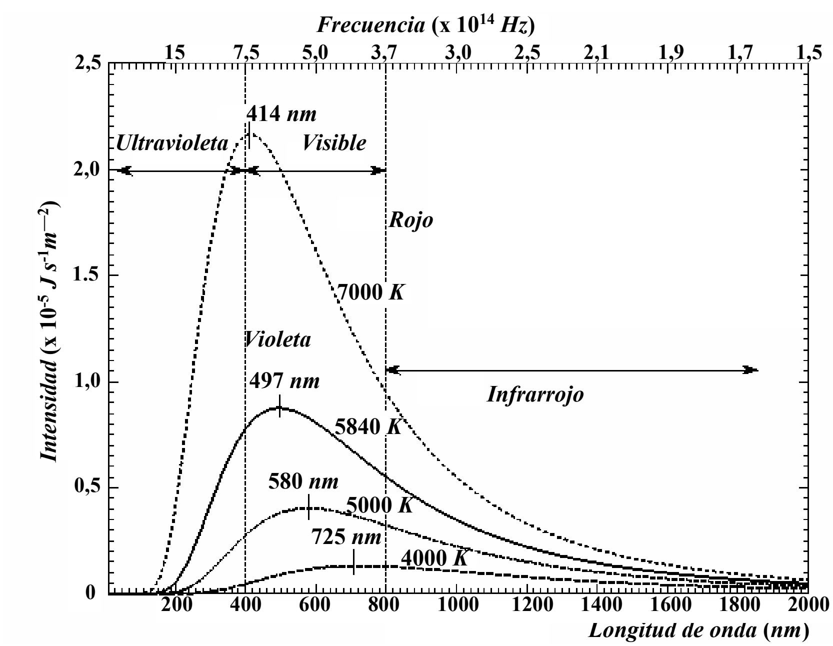

Figura 6 – 9. Distribución de la intensidad espectral de energía radiante en función de las longitudes de onda a distintas temperaturas

En 1900, Max Karl Ernst Ludwig Planck[7], basándose en la suposición que los átomos constituyentes de un cuerpo negro actúan como dipolos oscilantes cuya frecuencia de oscilación solo puede tomar valores discretos, realizó un desarrollo teórico para deducir la energía promedio de un oscilador ($\bar{\varepsilon}$) de esas características encontrando que la misma es

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{exp(h\nu / k_B T) - 1} \qquad (6-20)$$

h se conoce hoy en día como constante de Planck (6,6256 x 10^{-34} $J.s$) y k_B es la constante de Boltzmann (1,3805 x 10^{-23} $J\,K^{-1}$)

A partir de la energía del oscilador, Planck dedujo que la energía emitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie en *todas las direcciones* y para *todas las longitudes de onda*, representada por el poder emisivo total ($J_{\lambda,T}$), debería cumplir con la ecuación

$$J_{\lambda.T} = \frac{2\pi\nu}{\lambda^3}\frac{h\nu}{exp(h\nu / k_B T) - 1} \qquad (6-21)$$

La relación entre la energía radiante encerrada en la cavidad y el volumen de la misma da la llamada *densidad de energía* [$U(\lambda T)$].

Para la densidad de la energía radiante de un cuerpo negro en función de la longitud de onda y de la temperatura, Planck obtuvo la expresión

$$U(\lambda,T) = \frac{8\pi\nu^2}{c_0^3}\frac{h\nu}{exp(h\nu / k_B T) - 1} \qquad (6-22)$$

Expresión en la c_0 es la velocidad de la luz en el vacío (2,998 x 10^8 $m.s^{-1}$).

Siendo $\nu\lambda = c_0$, la (6 – 21) puede escribirse de la forma

$$J_{\lambda.T} = \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5}\frac{1}{exp(hc_0 / \lambda k_B T) - 1} \qquad (6-23)$$

O haciendo

$$2\pi h c_0^2 = K' \quad \text{y}$$

$$\frac{1}{exp(hc_0 / \lambda k_B T) - 1} = f(\lambda,T)$$

En la que el valor de K' es 3,7417 x 10^{-16} $W\,m^2$, la (6 - 23) puede escribirse

$$J_{\lambda.T} = \frac{K'}{\lambda^5} f(\lambda,T)$$

De acuerdo con la ley de desplazamiento de Wien, la intensidad espectral de energía radiante para la longitud de onda máxima a cada temperatura será

$$J_{\lambda.T\,máx} = \frac{K'}{\lambda_{máx}^5} f(\lambda_{máx},T)$$

En estas condiciones

$$f(\lambda_{máx},T) = \frac{1}{exp(hc_0^2 / \lambda_{máx} k_B T) - 1} = \frac{1}{exp(hc_0^2 / b k_B) - 1} = K''$$

El valor numérico de K'' es 7,0243 x 10^{-3}.

Reemplazando $\lambda_{máx}$ por b/T

$$J_{\lambda.T\,máx} = \frac{T^5 K'}{b^5} K''$$

O, haciendo $K'K''/b^5 = B$

$$J_{\lambda.T\,máx} = BT^5 \qquad (6-24)$$

Siendo B = 1,2862 x 10^{-5} $W\,m^{-3}\,K^{-5}$

La (6 – 24) fue predicha por Wien en 1896 y puede enunciarse:

El valor máximo de la intensidad de energía en el espectro de radiación térmica del cuerpo negro es proporcional a la quinta potencia de la temperatura absoluta.

Ejemplo 6.5.

El espectro de la radiación que emerge de la cavidad de un cuerpo negro muestra una longitud de onda máxima de 820 *nm*. Si el poder emisivo total de ese cuerpo negro fuese el doble ¿Cuál sería su temperatura y cuál su longitud de onda máxima?

Solución:

De acuerdo con la ley de Wien

$$\lambda_{máx}\, T = b$$

Por lo tanto

$$T_1 = \frac{b}{\lambda_{max\,1}} = \frac{2{,}8978\times 10^{-3}}{820\times 10^{-9}} = 3533{,}9\ K$$

Aplicando la ley de Stefan-Boltzmann

$$\sigma_N T_2^4 = 2\sigma_N T_1^4$$

$$T_2 = T_1\sqrt[4]{2} = 3533{,}9\times\sqrt[4]{2} = 4202{,}5\ K$$

A partir del valor de T_2 se obtiene

$$\lambda_{max\,2} = \frac{b}{T_2} = \frac{2{,}8978\times 10^{-3}}{4202{,}5} = 689{,}5\ nm$$

6 - 13. Ley del cuadrado inverso

El producto del poder emisivo total de un cuerpo negro por el área de su superficie, define una propiedad del mismo llamada *luminosidad* (L)

$$L = A\sigma T^4$$

La luminosidad de un cuerpo decrece con la distancia. Por lo tanto, la irradiancia que provoca un cuerpo negro sobre una superficie también decrece con la distancia. La relación entre la irradiancia E sobre una superficie y la distancia d al cuerpo negro emisor viene dado por la *ley del cuadrado inverso*:

$$E = \frac{L}{4\pi d^2}$$

En particular, si el cuerpo negro es esférico $A = 4\pi r^2$ y la irradiancia viene dada por

$$E = \sigma T^4\frac{r^2}{d^2}$$

Ejemplo 6.5.

El Sol puede considerarse un cuerpo negro esférico de 696000 *km* de radio que se encuentra a una distancia promedio de 149,6 x 10^6 *km* de la Tierra. Sobre la base de la temperatura promedio de su superficie (Ejemplo 6.1) calcular la irradiancia sobre la superficie terrestre.

Solución:

$$E = 5{,}670\times 10^{-8}\times\left(5{,}778\times 10^3\right)^4\left(\frac{6{,}96\times 10^8}{1{,}496\times 10^{11}}\right)^2$$

$$= 1368\ W/m^2$$

Esta relación se denomina *constante solar* y corresponde a la radiación solar que se recibe en la capa superior de la atmósfera terrestre sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol y a la distancia media entre el Sol y la Tierra. El valor hallado es precisamente el valor promedio anual determinado mediante satélites.

6 - 14. Transmisión de calor por radiación

Analicemos el caso de dos cuerpos a distintas temperaturas y con distintas superficies que intercambian calor por radiación suponiendo que el medio en el que se encuentran no es absorbente. El caso más sencillo es suponer que el cuerpo 1 es gris y que está rodeado por un cuerpo 2 negro.

En un intervalo de tiempo $\Delta\tau$ el cuerpo 1 emite $\sigma_N\, e\, S_1\, T_1^4$. El cuerpo 2 por ser negro, no refleja la radiación que recibe del cuerpo 1. El cuerpo 1 absorbe del cuerpo negro $\sigma_N\, e\, S_1\, T_2^4$.

Por lo tanto, la velocidad de transmisión de calor será

$$\frac{Q}{\Delta\tau} = \sigma_N e S_1 \left(T_1^4 - T_2^4\right) \qquad (6 - 25)$$

Para superficies geométricas concéntricas, como podrían ser cañerías coaxiales cilíndricas, etc., se puede generalizar

$$\frac{Q}{\Delta\tau} = \sigma_N e_{1,2} S_1 \left(T_1^4 - T_2^4\right) \qquad (6 - 26)$$

En la práctica, la (6 - 26) se escribe

$$\frac{\Delta Q}{\Delta\tau} = \alpha_R S_1 \left(t_1 - t_2\right) \qquad (6 - 27)$$

en la que α_R viene dado por

$$\alpha_R = \sigma_N e_{1,2} \frac{T_1^4 - T_2^4}{t_1 - t_2}$$

Los valores del cociente de las diferencias de temperaturas se encuentran tabulados.

La ventaja de emplear la (6 - 27) radica en que es una expresión del mismo tipo que la correspondiente a la transmisión por convección. Siendo t_1 la temperatura del cuerpo que irradia y t_2 la de los cuerpos que lo rodean. En la mayoría de los casos t_2 es la temperatura ambiente. Si bien la atmósfera es diatermana, su temperatura puede considerarse como la media de las temperaturas de los cuerpos que rodean al que emite.

6 - 15. Transmisión por radiación y convección

Si un cuerpo de superficie S_1 está a la temperatura t_1 y se encuentra en un ambiente a la temperatura t_2 tal que $t_1 > t_2$, transmitirá calor por *conducción* a través de los soportes o apoyos, por *convección* y por *radiación*.

El calor total transmitido por estas dos últimas maneras será

$$\frac{Q}{\Delta\tau} = \bar{h} S_1 \left(t_1 - t_2\right) + \alpha_R S_1 \left(t_1 - t_2\right)$$

$$\frac{Q}{\Delta\tau} = \left(\bar{h} + \alpha_R\right) S_1 \left(t_1 - t_2\right) \qquad (6 - 28)$$

donde $\bar{h}$ es el coeficiente medio de convección y α_R el de radiación.

Referencias Bibliográficas

Incropera F. P. – Dewitt, D. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons. New York . (2000)

Krasnoschiokov, E.A. – Sukomiel, A.S., *Problemas de termotransferencia*. Editorial Mir. Moscú. (1977)

McCabe, W.L. - Smith, J.C. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química.* Ed. Reverté. Barcelona. (1967)

Poulikakos, D. *Conduction Heat Transfer*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J. (1994)

Siegel, R. – Howell, J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 2ª edición. McGraw-Hill. New York, (1981)

Zemansky, M. W. - Dittman R.H. *Heat and Thermodynamics* 7th. edition McGraw Hill College Division. N.Y. (1996)

AUTOEVALUACIÓN DE CONTENIDOS CONCEPTUALES

6 - 1. A qué se llama "espectro electromagnético"
6 - 2. ¿Qué relación existe entre la energía de un fotón y la frecuencia con que se emite?
6 - 3. Explique porqué no existen verdaderas fuentes puntuales
6 - 4. Explique porqué no existen verdaderos haces monocromáticos.
6 - 5. ¿Qué es un cuerpo negro? ¿Cómo puede obtenerse un cuerpo que se asemeje a un cuerpo negro?
6 - 6. ¿Cómo se define "potencia radiante"? ¿De qué depende?
6 - 7. ¿Qué entiende por radiancia espectral en la longitud de onda λ?
6 - 8. ¿A qué se llama exitancia radiante?
6 - 9. ¿Cómo define irradiancia?
6 - 10. ¿Cuál es la expresión de la densidad de energía radiante para un haz paralelo?
6 - 11. Defina los siguientes términos: reflectividad, absorbancia, trasmisividad y radiosidad.
6 - 12. ¿Qué establece la ley de Kirchhoff?
6 - 13. ¿A qué se llama "superficie gris"?
6 - 14. ¿Qué establece la ley de Stefan – Boltzmann para la radiación del cuerpo negro?
6 - 15. ¿Qué establece la ley de Wien?
6 - 16. En 1905, John William Strutt, 3er. Barón Rayleigh, y James Jean propusieron la siguiente expresión para la densidad de la energía radiante de un cuerpo negro en función de la longitud de onda y de la temperatura

$$U(\lambda, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c_0^3}$$

Represente U (λ, T) en función de la frecuencia. Compare ese gráfico con el de la Figura 6 – 9. ¿Qué conclusiones extrae de la comparación?
6 - 17. ¿A qué se llama luminosidad?
6 - 18. ¿Qué establece la "ley del cuadrado inverso"? ¿En qué casos se aplica?
6 - 19. ¿Cuál es la expresión general para la transmisión de calor por radiación entre superficies geométricas concéntricas?

Es tarea fácil hacer que las cosas se vuelvan complejas, pero es tarea compleja el volverlas sencillas.

AUTOEVALUACIÓN DE CONTENIDOS PROCEDIMENTALES

6 - 1. El índice de refracción del cuarzo es 1,48 ¿Cuál es la velocidad de la luz en el interior de un cristal de cuarzo?
6 - 2. Mediante un sistema colimador apropiado se logra emitir un haz de luz paralelo a través de una superficie de 30 mm^2 formando un ángulo de 45º con la misma. Calcular la radiancia de esa superficie sabiendo que la potencia radiante que emite es 6,63 *W*.
6 - 3. Un haz de radiación electromagnética divergente se propaga con un ángulo sólido de 1/5 π *sr* a partir de una placa cuyo área de superficie es 16 mm^2 y emite una potencia de 2,2 *W*. Calcular la variación de la radiancia cuando la dirección de propagación del haz cambia de 60º a 90º.
6 - 4. Para un intervalo pequeño de longitudes de onda el valor de L_λ es prácticamente constante y la radiancia en ese intervalo se puede tomar como $L_\lambda\Delta\lambda$. Calcular la exitancia radiante de la superficie del ejercicio anterior cuando la dirección de propagación del haz es de 45º.
6 - 5. Una barra de grafito es calentada mediante una resistencia eléctrica hasta alcanzar una temperatura de 840 *K*. A esa temperatura se comporta como un cuerpo negro siendo su exitancia radiante de 2,87 x 10^5 $W\,m^{-2}$ Envolviendo a la barra hay un cilindro de cobre pulido cuyo coeficiente de emisión es 0,27. Calcular la exitancia radiante del cilindro de cobre cuando se alcanza el equilibrio térmico.
6 - 6. A través de un cilindro de 1 *mm* de radio se emite un haz paralelo de radiación electromagnética cuya potencia radiante es de 12 *W*. Calcular la densidad de energía radiante en ese cilindro.
6 - 7. Calcular la intensidad espectral de energía radiante de un cuerpo gris cuyo coeficiente de emisión es 0,55 que se encuentra a 600 *K*.
En 1896, Wien propuso la siguiente ecuación para la intensidad espectral de la radiación del cuerpo negro

$$J_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5} exp(-c_2/\lambda T)$$

Demuestre que para longitudes de onda altas esta expresión es análoga a la ley de Planck.

6 - 8. Explique por qué habiendo estrellas de distintos colores, no se observan estrellas verdes.

6 - 9. Las medidas de los máximos de la distribución de la intensidad espectral de un cuerpo negro a distintas temperaturas muestran máximos a 9,92 μm; 3,59 μm; 1,97 μm; 1,42 μm y 949 *nm* a las respectivas temperaturas de 300, 800, 1500, 2000 y 3000 *K*. Usando estos datos calcule el valor experimental de la constante de Wien y su indeterminación.

6 - 10. Una persona sale de la ducha y se seca. La emisividad de la piel de esa persona es 0,70, el área de su superficie corporal es 1,68 m^2 y la temperatura media de la piel es de 35,8 ºC ¿Cuál es la velocidad neta cedida por la persona desnuda a la habitación por radiación si la temperatura del ambiente es de 24 ºC?

6 - 11. La hoja de una planta promedio tiene una capacidad calorífica equivalente a una lámina de agua de 0,2 *mm* de espesor. Supongamos que la hoja está ubicada perpendicularmente a los rayos del sol y que la intensidad de la radiación es de alrededor de la mitad de la parte superior de la atmósfera, digamos 700 W/m^2 y que la hoja absorbe, además de la solar, toda la radiación del ambiente que sobre su superficie incide. El espesor de la hoja es tan delgado que podemos suponer que la temperatura en ambas caras es la misma: 25 ºC. Calcular a qué velocidad [en $kg/(m^2\ s)$] debe evaporar agua para mantener su temperatura constante $L_{2,3\ agua} = 2260\ kJ/kg$

6 - 12. La temperatura media de la piel de una persona sana es 35,8 ºC, pero cuando tiene fiebre, la temperatura de su piel puede alcanzar un valor promedio de 38 ºC. Suponiendo que la piel es una superficie gris de e = 0,85 ¿qué exceso de energía radia por hora estando con fiebre?

6 - 13. Los dispositivos para la detección automática aun en la oscuridad de personas captan la radiación infrarroja que emite el cuerpo humano. Si la temperatura corporal oscila entre los 34 y los 38 ºC, ¿Cuál es el intervalo de frecuencias que capta el dispositivo?

6 - 14. En 1965, Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron la llamada “radiación del fondo cósmico” resultante de la explosión que se cree que originó el Universo (en 1978 recibieron el Premio Nobel de Física por ese descubrimiento) La radiación de fondo cósmico corresponde a una temperatura de (2,73 ± 0,06) *K*. Calcular el valor de la longitud de onda para cual la intensidad espectral de la energía radiante tiene un valor máximo a esa temperatura.

6 - 15. La temperatura media de la superficie terrestre está en el orden de los 25 ºC ¿cual sería la temperatura si en el momento de formarse el sistema solar la constante solar fuese un 10% menor que la que realmente es (1368 W/m^2)?

6 - 16. La intensidad espectral de Sirio es 8,8 veces la del Sol. Sabiendo que la temperatura de la superficie solar es 5778 *K*, calcule a) la temperatura de Sirio; b) Encuentre la longitud de onda a la cual la emisión de luz de esa estrella es máxima; c) ¿De que color se verá esa estrella?

6 - 17. Una sonda espacial destinada a estudiar la corona solar está provista de placas fotovoltaicas que funden a 1737 ºC. Calcular la distancia mínima (R_0) a la que se podrá acercar la sonda al Sol. Datos: constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5{,}670 \times 10^{-8}\ Wm^{-2}K^{-4}$; temperatura de la superficie solar $T_{Sol} = 5778\ K$; radio del Sol $r_{Sol} = 7 \times 10^8$ m (Considerar que tanto el Sol como las placas de la sonda se comportan como cuerpos negros).

6 - 18. El filamento de una lámpara es de carbono y su temperatura es de 2980 ºC. ¿Emitirá luz blanca? Justifique su respuesta.

6 - 19. ¿Cuántos fotones de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 *nm* existen en un cuerpo negro esférico de diámetro interno 1 *cm* que se encuentra a 2000 *K*? Sugerencia: Utilice la ecuación de distribución de Planck y divida por la energía del fotón (hc/λ) para encontrar una expresión en términos de densidad de fotones por unidad de ancho de banda e integre sobre el rango de longitudes de onda.