DGTIC

Facultad de Química

Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación

CURSO:
TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

Doctor Rafael Fernández Flores

Trabajo realizado con el apoyo del
Programa UNAM-DGAPA-PAPIME
PE110517

INTRODUCCIÓN AL TRANSPORTE DE ENERGÍA POR RADIACIÓN

PROBLEMA

Todos los objetos, por razón de su temperatura, radian energía.

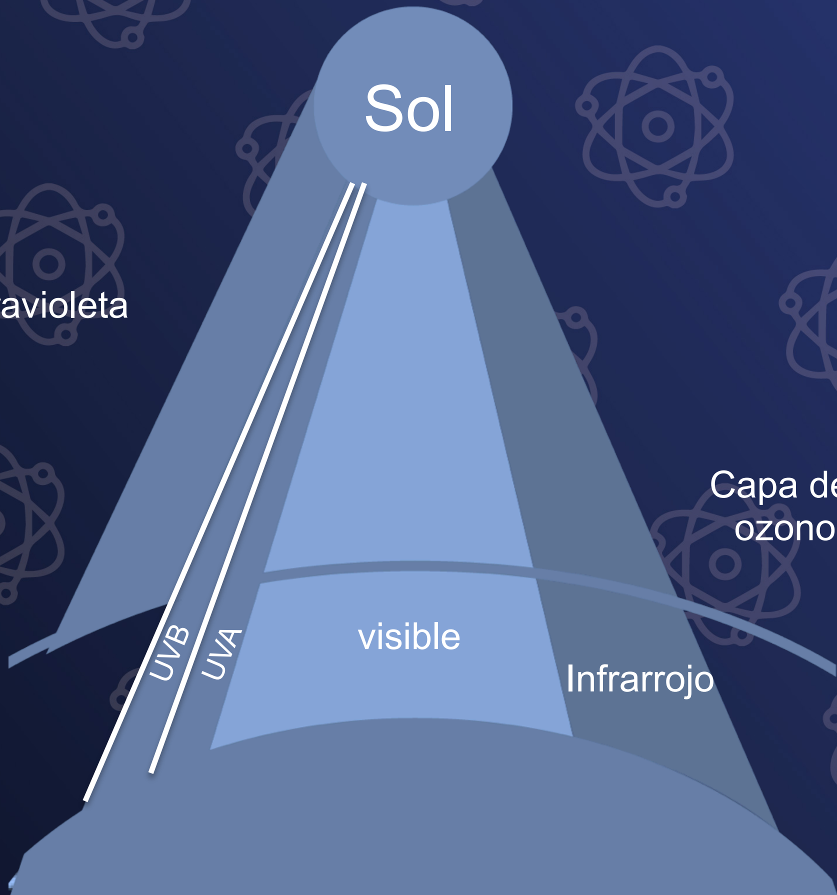
¿Cómo se distribuye la energía radiada en las diferentes frecuencias?

OBJETIVOS

1. Conocer qué es la transferencia de energía por radiación.
2. Entender el concepto de *cuerpo negro* y *cuerpo gris*.
3. Conocer la distribución de Planck
4. Saber calcular la cantidad de energía radiada en una zona dada del espectro
5. Usar la ley de Wien para calcular la longitud de onda del máximo de la distribución

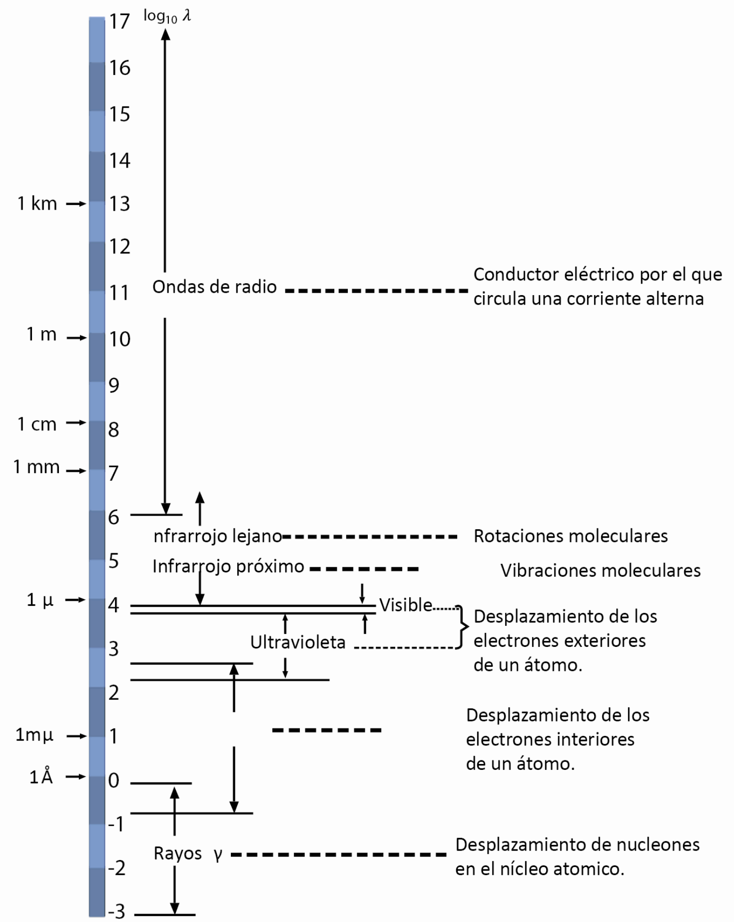
MENÚ

- **¿QUÉ ES LA RADIACIÓN?**
- **PLANK Y LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA**
- **LEY DE WIEN**



La energía asociada a las ondas electromagnéticas.

¿QUÉ ES LA RADIACIÓN?

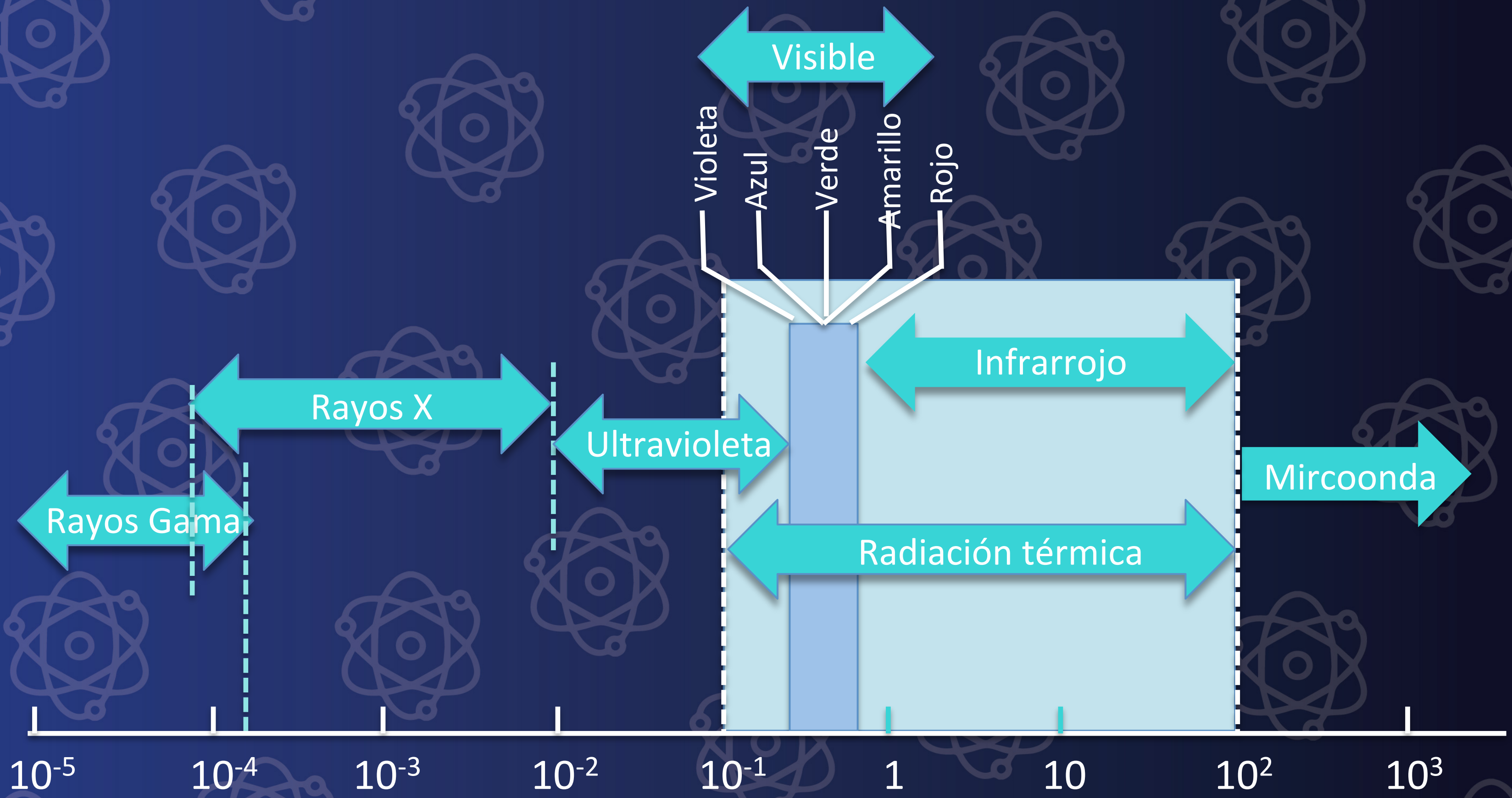


$$C = \lambda\nu$$

El espectro de radiación térmica es parte del espectro electromagnético.

EMPECEMOS CON EL ESPECTRO DE RADIACIÓN TÉRMICA…

LA RADIACIÓN TÉRMICA OCURRE EN CIERTAS FRECUENCIAS

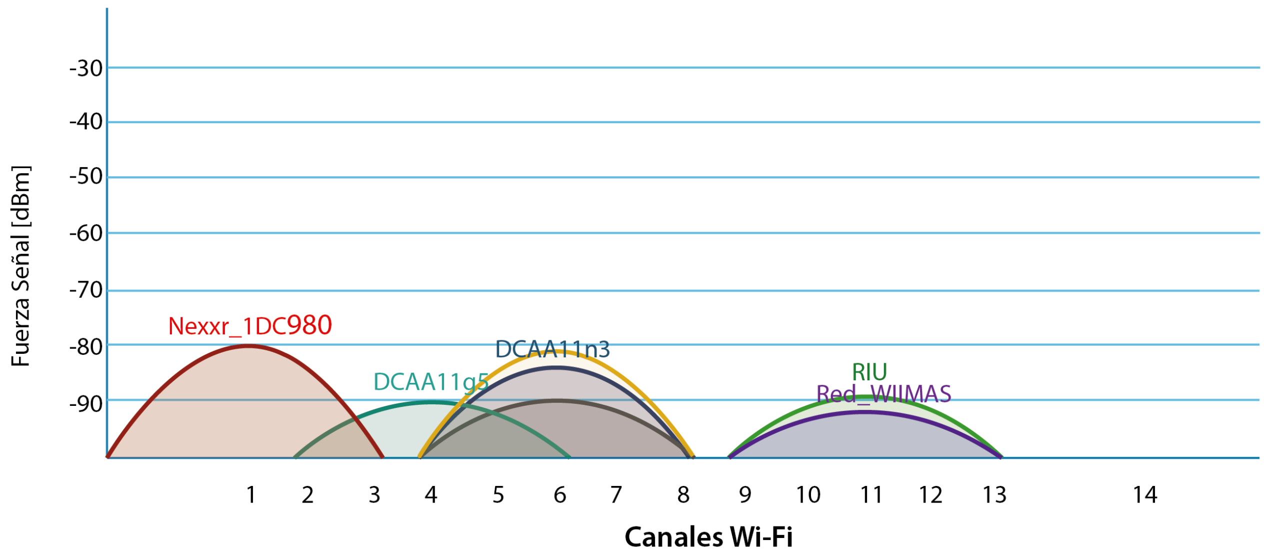


EL ESPECTRO VISIBLE.

1	Color	Rango Inf (nM)	Rango Sup (nM)	Λ media (Nm)	Frecuencia (THz)
2	Rojo	625	740	682.25	439.56
3	Naranja	590	625	607.5	493.83
4	Amarillo	565	590	577.5	519.48
5	Verde	520	565	542.5	553.00
6	Azul	450	500	475	631.58
7	Añil	430	450	440	681.82
8	Violeta	380	430	405	740.74
9					

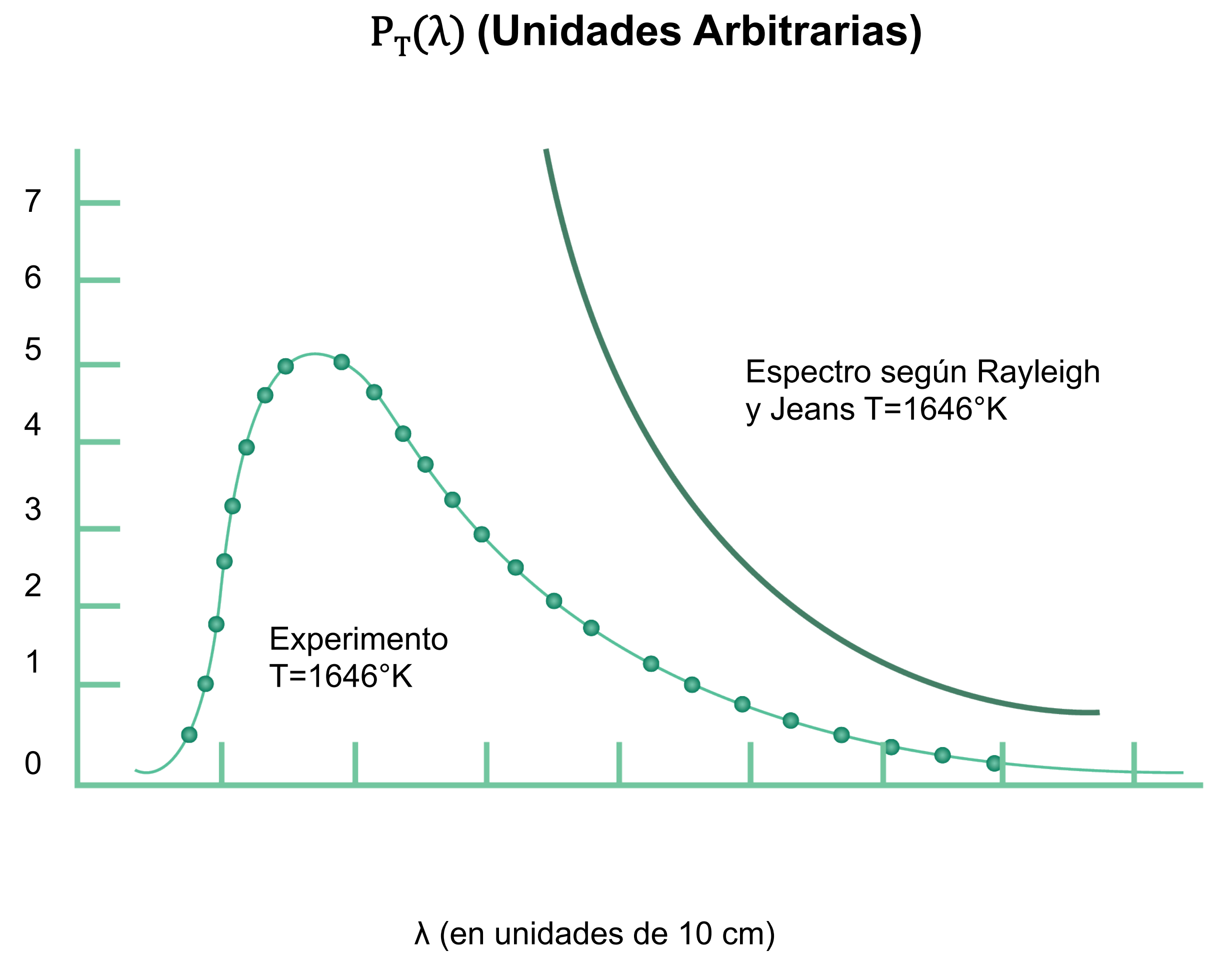
ACTIVIDAD

- Utilizar los datos de la tabla anterior para calcular la velocidad de la luz en el vacío.
- ¿Qué longitud de onda tiene una radiación de 2.4 Ghz (Wi-Fi) ?
- ¿En qué parte del espectro se ubica?



¿EL COLOR DE LA RADIACIÓN INDICA TEMPERATURA?

EL ESPECTRO DE RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO.



Distribución de la energía radiada por un cuerpo a temperatura T según la longitud de onda. Es decir, según el color (en la parte visible del espectro).

En 1900 Max Planck propone una fórmula para explicar el espectro de radiación de cuerpo negro.

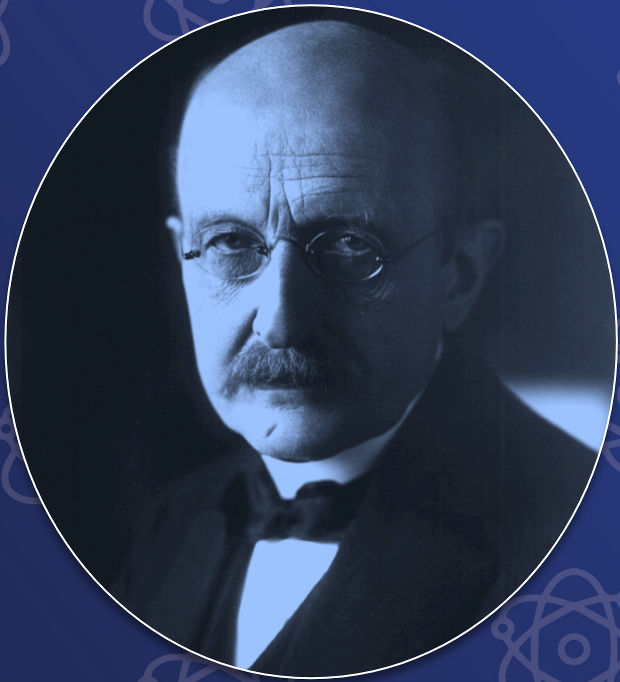
Esa hipótesis es la de la cuantización de la energía y dio origen a toda una nueva rama de la física: La mecánica cuántica.

¿Qué es el cuerpo negro?

¿Qué es el espectro de radiación de cuerpo negro?

¿Cuál fue la hipótesis de Planck?

¿Qué repercusiones tiene la hipótesis de Plank en el estudio de la transferencia de calor por radiación?



PLANCK Y LA REVOLUCIÓN DE LA FÍSICA CUÁNTICA.

INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

…a radiación que incide sobre la superficie de un sólido opaco puede ser …ida o reflejada.

ABSORCIÓN

Absorción: cuando la adición de energía radiante a un sistema atómico o molecular da lugar a que el sistema pase a un estado más elevado de energía.

Coeficiente de absorción: fracción de la radiación incidente que se absorbe

Luz incidental

$$a=q\uparrow(a)\ /q\uparrow(i) \qquad a\downarrow v=q\downarrow v\uparrow(a)\ /q$$

Existe el coeficiente de absorción para cada frecuencia ν.

El cuerpo negro es una idealización de un cuerpo que absorbe toda la energía que recibe su coeficiente de absorción por lo tanto es 1.

EMISIÓN Y LEY DE KIRCHHOFF

Emisión: cuando un sistema atómico o molecular pasa desde un estado elevado de energía a otro más bajo.

Todas las superficies solidas emiten energía radiante $q^{(e)}$ (Por unidad de tiempo y unidad de área).

La cantidad de energía emitida por un cuerpo negro se denota por: $q_b^{(e)}$ y se usa como referencia para definir la emisividad de cualquier otro cuerpo.

$$e = q^{(a)} / qb^{(e)}$$

$$e_v = q_v^{(a)} / qb_v^{e}$$

Ley de Kirchhoff: Para una temperatura dada e=a de manera global y para cada frecuencia.

LEY DE KIRCHHOFF

Si llamamos $q_b^{(e)}$ a la emisión del cuerpo negro tendremos:

$$e = q^{(e)} / q_b^{(e)}$$
$$e_v = q_v^{(e)} / q_{b\,v}^{(e)}$$

A "e" se le conoce como la emisividad

Para una T dada la emisividad e, es igual a la absorbancia a de manera global y para cada frecuencia

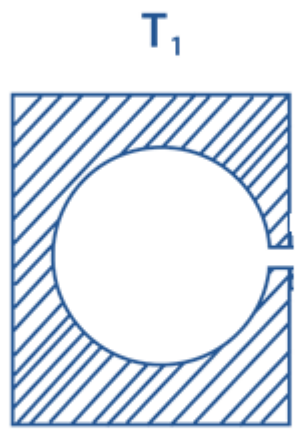
(Ley de Kirchhoff)

¿QUÉ ES EL CUERPO NEGRO (GRIS)?

Cuerpo gris:
El que absorbe siempre la misma fracción de la radiación incidente, cualquiera que sea la frecuencia.

Cuerpo negro: Caso límite en el que a_v=1 para todas las frecuencias y temperaturas.

RADIACIÓN DE UNA CAVIDAD



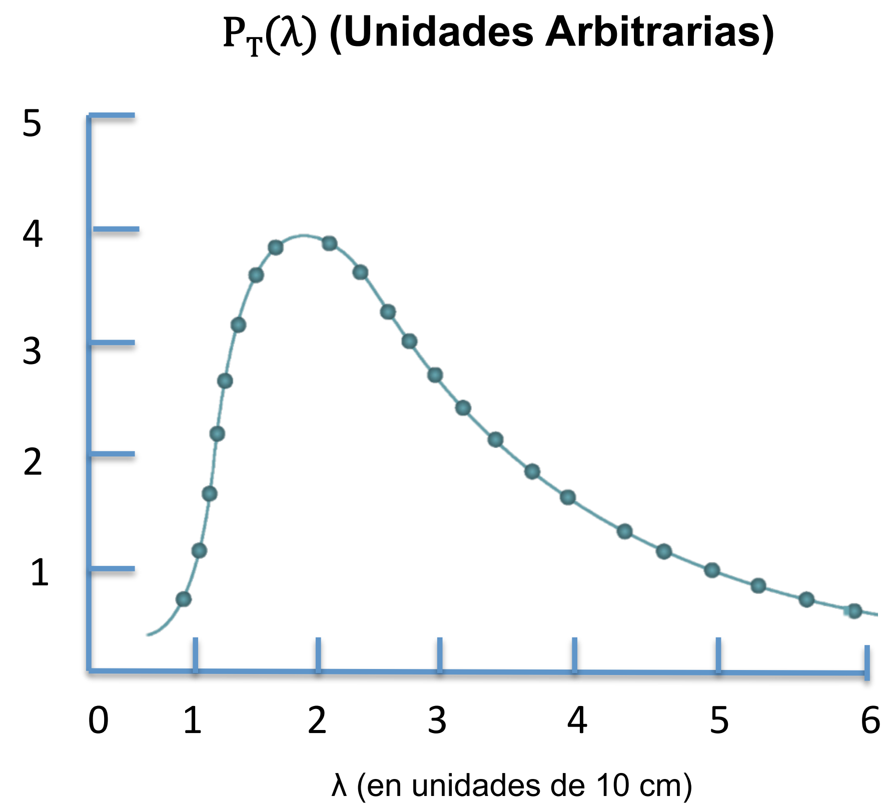
$e_{orif} = - e/e + f(1-e)!$

- En una cavidad isotérmica, con un pequeño orificio
- la radiación es independiente de la naturaleza de las paredes y varía solamente con la temperatura de las mismas.
- Se le puede usar para obtener una excelente aproximación de un cuerpo negro.
- La siguiente relación expresa la emisividad efectiva del orificio e_{orif}, en función de la emisividad real e de las paredes de la cavidad, y la fracción f del área interna total de la cavidad que se elimina:

Si e = 0,8 y f = 0,001,
el valor de e_{orif} resulta 0,99975.
Por lo tanto, se absorberá el 99,975 por ciento de la radiación que incide sobre el orificio.

PLANCK

E=hv (h la constante de Planck, cuyo valor es $6,624 \times 10^{-27}$ erg seg)



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

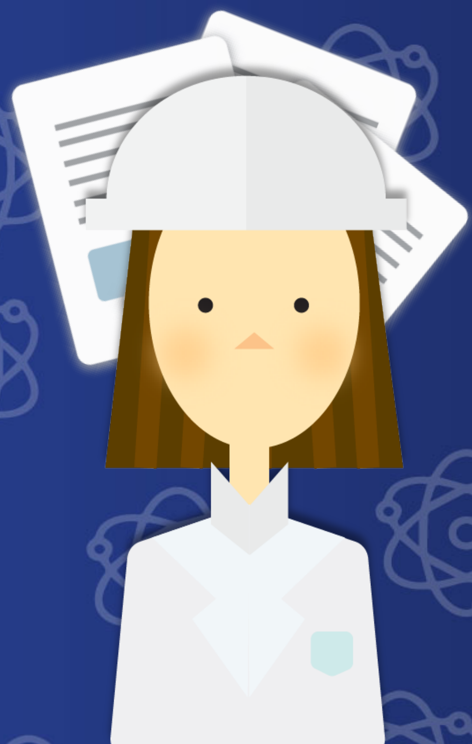
$C_1 = 2\pi c^2 h = 3.7415 \times 10^{-16}\ W/m^2$ C_1

$q(e)@b\lambda = 2\pi c^2 h/\lambda^5 \; 1/e^{ch/\lambda KT}-1$

C_2

$C_2 = 1.4388 \times 10^{-2}$ m K

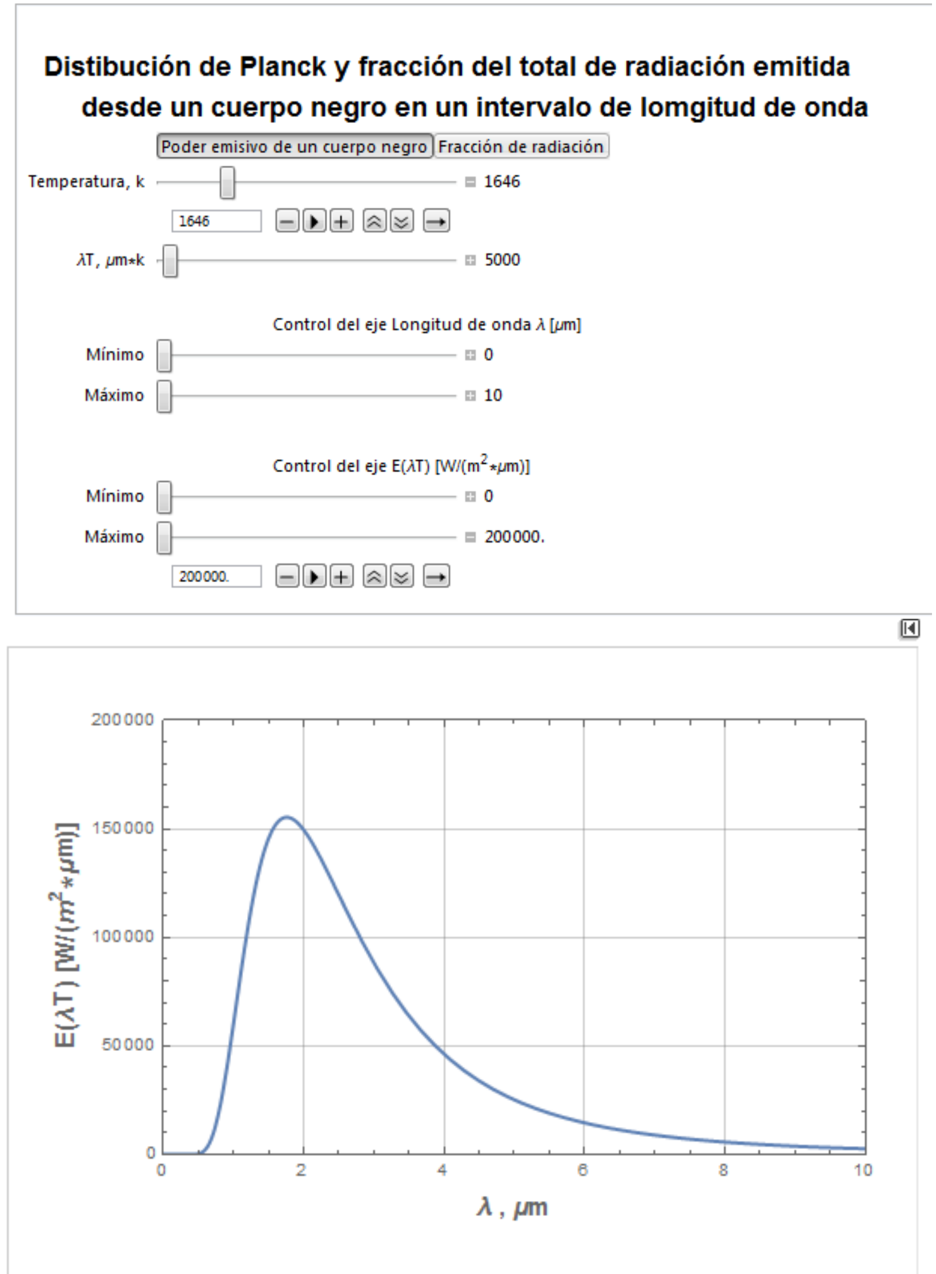
ACTIVIDAD

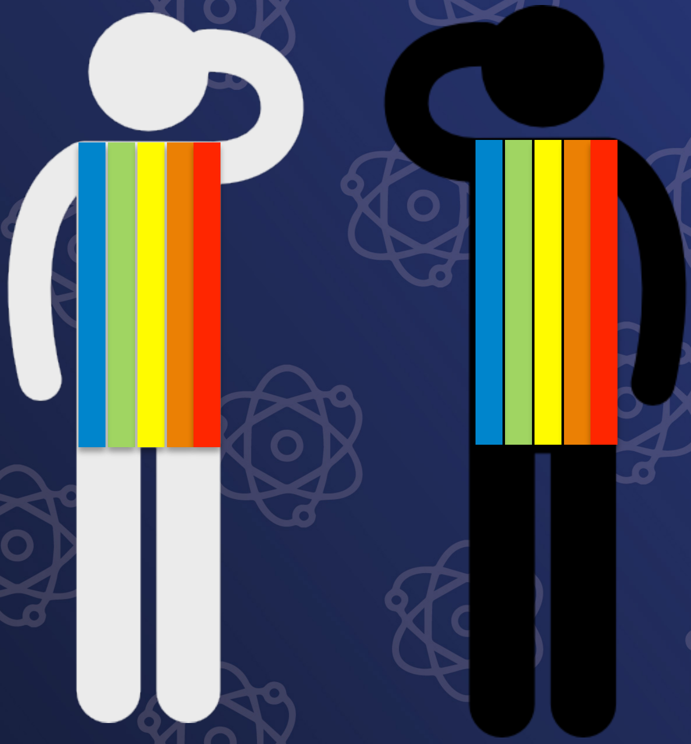


1. Utilizar el simulador de la distribución de Planck para graficar la distribución de potencia para diferentes valores de la temperatura.

2. En cada caso indica el valor de la longitud de onda que corresponde al máximo de la distribución.

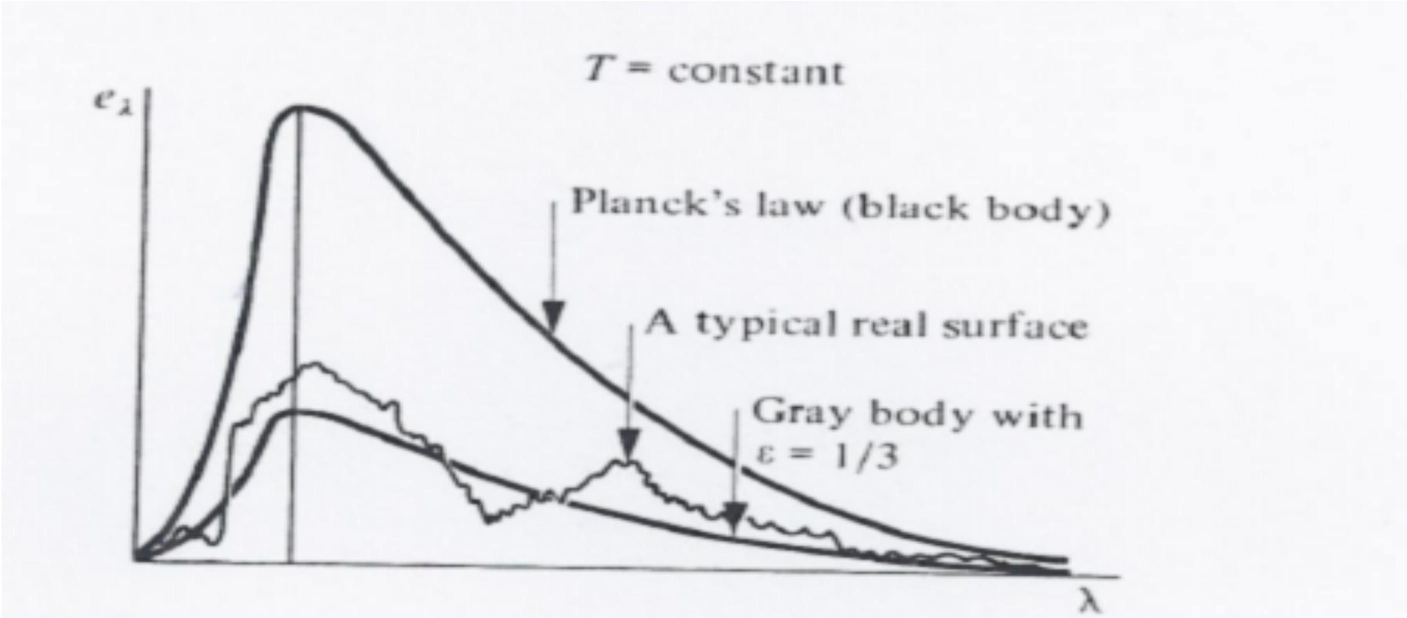
SOLUCIÓN


Distibución de Planck y fracción del total de radiación emitida desde un cuerpo negro en un intervalo de lomgitud de onda
Poder emisivo de un cuerpo negro
Fracción de radiación
Temperatura, k
1646
λT, μm*k
5000
Control del eje Longitud de onda λ [μm]
Mínimo
0
Máximo
10
Control del eje E(λT) [W/(m2*μm)]
Mínimo
0
Máximo
200000.
E(λT) [W/(m2*μm)]
λ , μm
0
50000
100000
150000
200000
2
4
6
8
10



TODO CUERPO RADIA

PERO NO TODOS SON CUERPO NEGRO



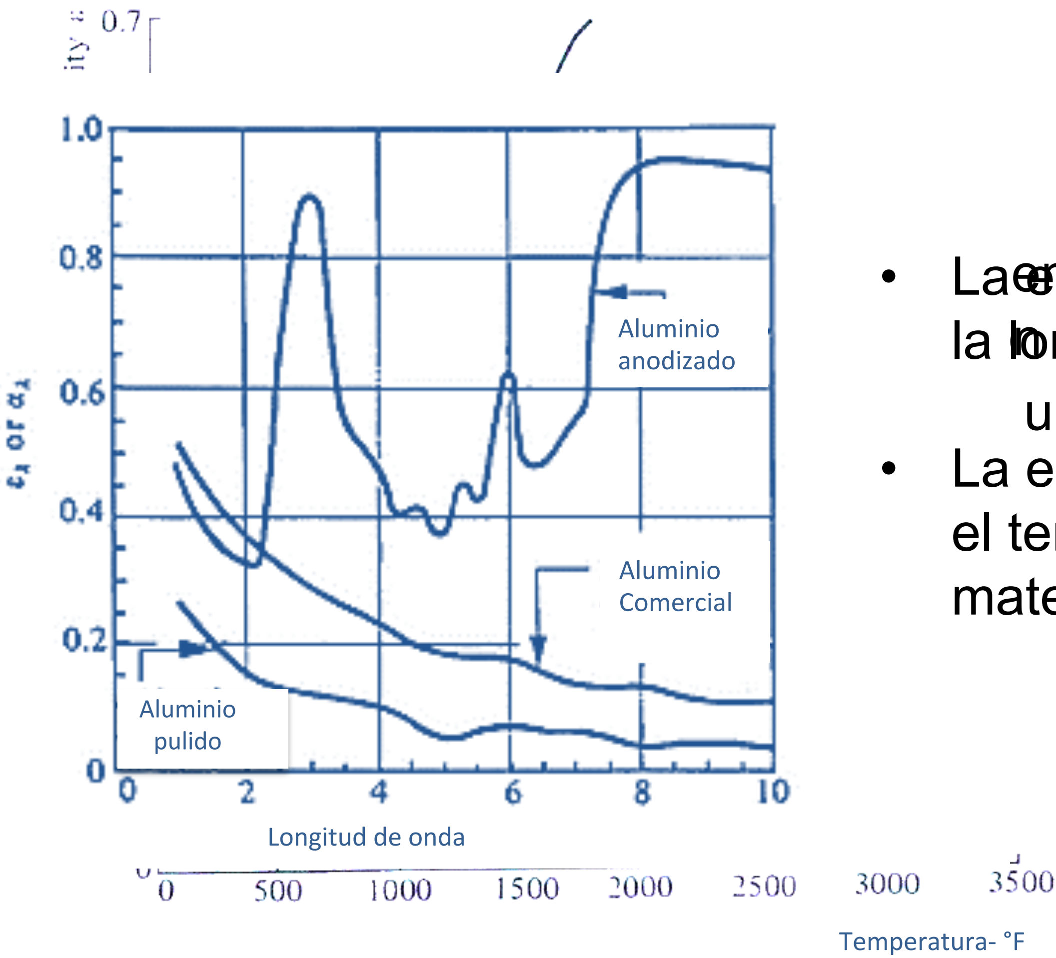
T = constant
e_λ
Planck's law (black body)
A typical real surface
Gray body with
$\varepsilon = 1/3$
λ

LA VIDA REAL

EMISIVIDAD

- $\mathbf{q^{(e)} = e\ q_b^{(e)}}$ (**e** es la emisividad).
- La emisividad depende de la frecuencia y del ángulo de emisión.
- Las superficies metálicas no oxidadas y límpias poseen emisividades muy bajas.
- A temperatura ambiente o superior la mayoría de los no metales y los óxidos metálicos tienen emisividades del orden de 0. 8
- Para casi todos los materiales la emisividad aumenta con la temperatura.

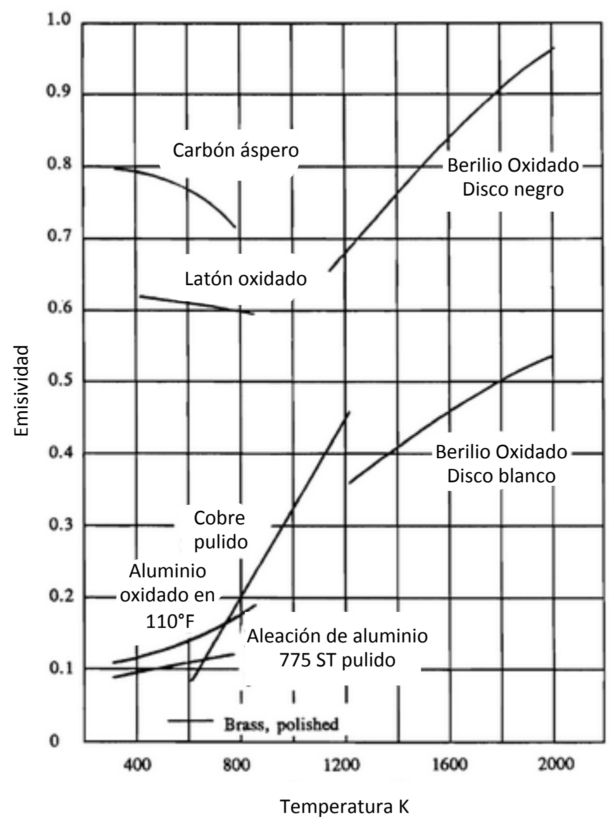
CRITERIO PARA LA «GRISURA» DE UN CUERPO RADIANTE.



- La emisividad varia con la longitud de onda.

  emisividad como n de la temperatura un buen criterio.
- La emisividad varia con el terminado del material.

DATOS DE EMISIVIDADES.



La emisividad de varios materiales. (G.G Gubarel, J. E. Janssen y R.H. Toborg, Thermal Radiation Properties Survey, Honeywell Research Center, Mineapolis, MN, 1960.)

ALGUNOS EJEMPLOS (TOMADOS DEL BIRD)

EMISIVIDADES TOTALES DE VARIAS SUPERFICIES PARA **EMISIÓN** PERPENDICULAR

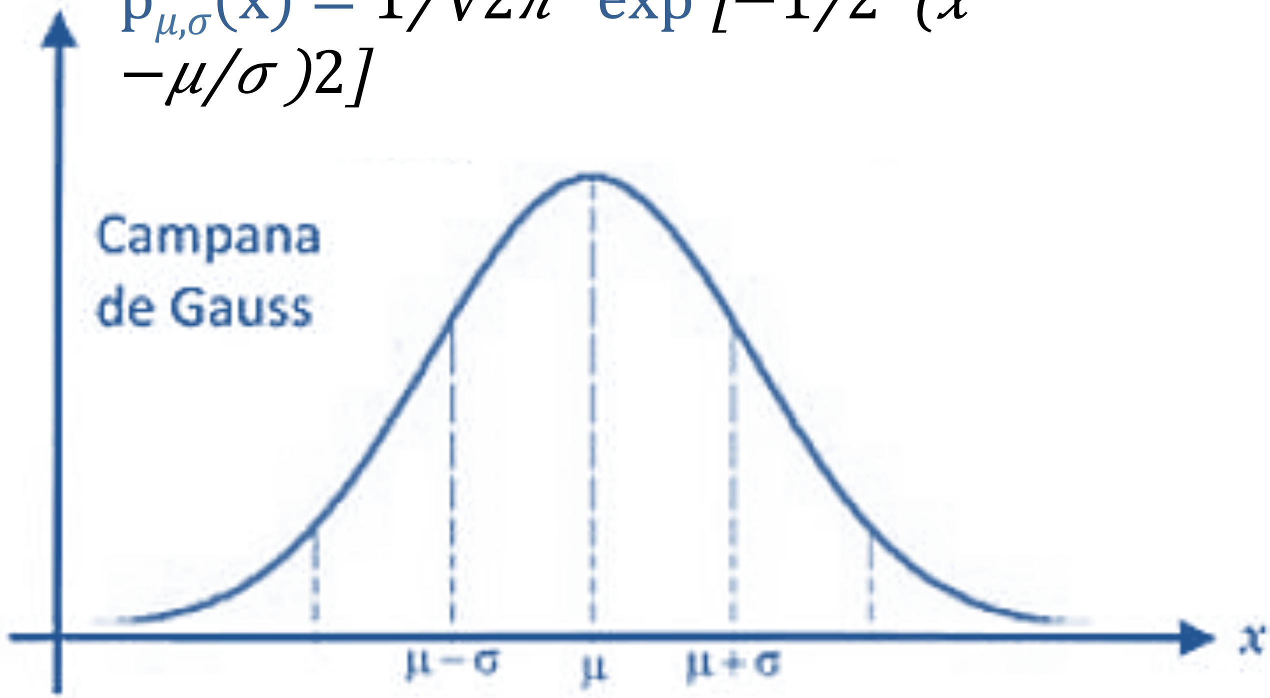
	T(°K)	e	T(°K)	e
Aluminio				
Altamente pulimentado, pureza 98,3%	500	0,039	850	0,057
Oxidado a 600 °C	472	0,11	872	0,19
Material para techos recubiertos de Al	311	0,216		
Cobre				
Electrolítico, altamente pulimentado	353	0,018		
Oxidado a 600 °C	472	0,57	872	0,57
Hierro				
Electrolítico, altamente pulimentado	450	0,052	500	0,064
Totalmente oxidado	293	0,685		
Fundición, pulimentada	473	0,21		
Fundición, oxidada a 600 °C	472	0,64	872	0,78
Cartón de amianto	311	0,93	644	0,945

Table 11.1 The emissivity of some ceramic materials. (From H. C. Hottel and A. F. Sarofim, *ibid.*)

Material	Temperature, K	Emissivity
Cuprous oxide	1070-1370	0.66-0.54
Magnesium oxide	550-1100	0.55-0.20
	1170-1980	0.20
Nickel oxide	920-1530	0.59-0.86
Thorium oxide	550-770	0.58-0.36
	770-1100	0.36-0.21
Alumina-silica-iron oxide		
58-80% Al_2O_3, 16-38% SiO_2, 0.4% Fe_2O_3	1280-1840	0.61-0.43
26-36% Al_2O_3, 50-60% SiO_2, 1.7% Fe_2O_3	1280-1840	0.73-0.62
61% Al_2O_3, 35% SiO_2, 3% Fe_2O_3	1280-1840	0.78-0.68
Fireclay brick	1273	0.75
Magnesite refractory brick	1273	0.38
Quartz (opaque)	570-1110	0.92-0.80
Zirconium silicate	510-770	0.92-0.80
	770-1105	0.80-0.52

INTERLUDIO. UNA DISTRIBUCIÓN YA CONOCIDA: LA DE GAUSS.

$$p_{\mu,\sigma}(x) = 1/\sqrt{2}\pi \ \ \exp [-1/2 \ \ (x -\mu/\sigma\ )2]$$



SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS DE LAS DOS FUNCIONES.

1. Las dos son funciones de distribución. Una función de distribución indica la manera como se distribuye una propiedad (eje y) entre diferentes valores de una variable (eje x)

2. La distribución de Gauss es una distribución de probabilidad (eje y) entre varios posibles resultados (eje x).

3. La distribución de Planck es una distribución de energía (eje y) entre diferentes longitudes de onda (eje x)

4. Las distribuciones pueden ser simétricas o no. La de Gauss lo es, la de Planck, no.

SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS DE LAS DOS FUNCIONES.

5. En las distribuciones simétricas las medidas de tendencia central (media, mediana y moda) coinciden

6. La integral de la función de distribución entre dos valores de la propiedad en estudio mide la cantidad de esa propiedad que se encuentra entre esos dos valores.

7. La integral de la función de distribución en todo el dominio mide la cantidad total de esa propiedad.

EJEMPLO

El voltaje de ruptura de un diodo seleccionado al azar está normalmente distribuido. ¿Cuál es la probabilidad de que el voltaje de ruptura de un diodo esté dentro de una desviación estándar de su valor medio?

SOLUCIÓN

Se trata de encontrar el área bajo la curva de la distribución normal estándar entre los valores de -1 y 1.

Para eso existen varios métodos:

a) A la antigua, usando tablas.
b) Usando Excel
c) Usando Mathematica.

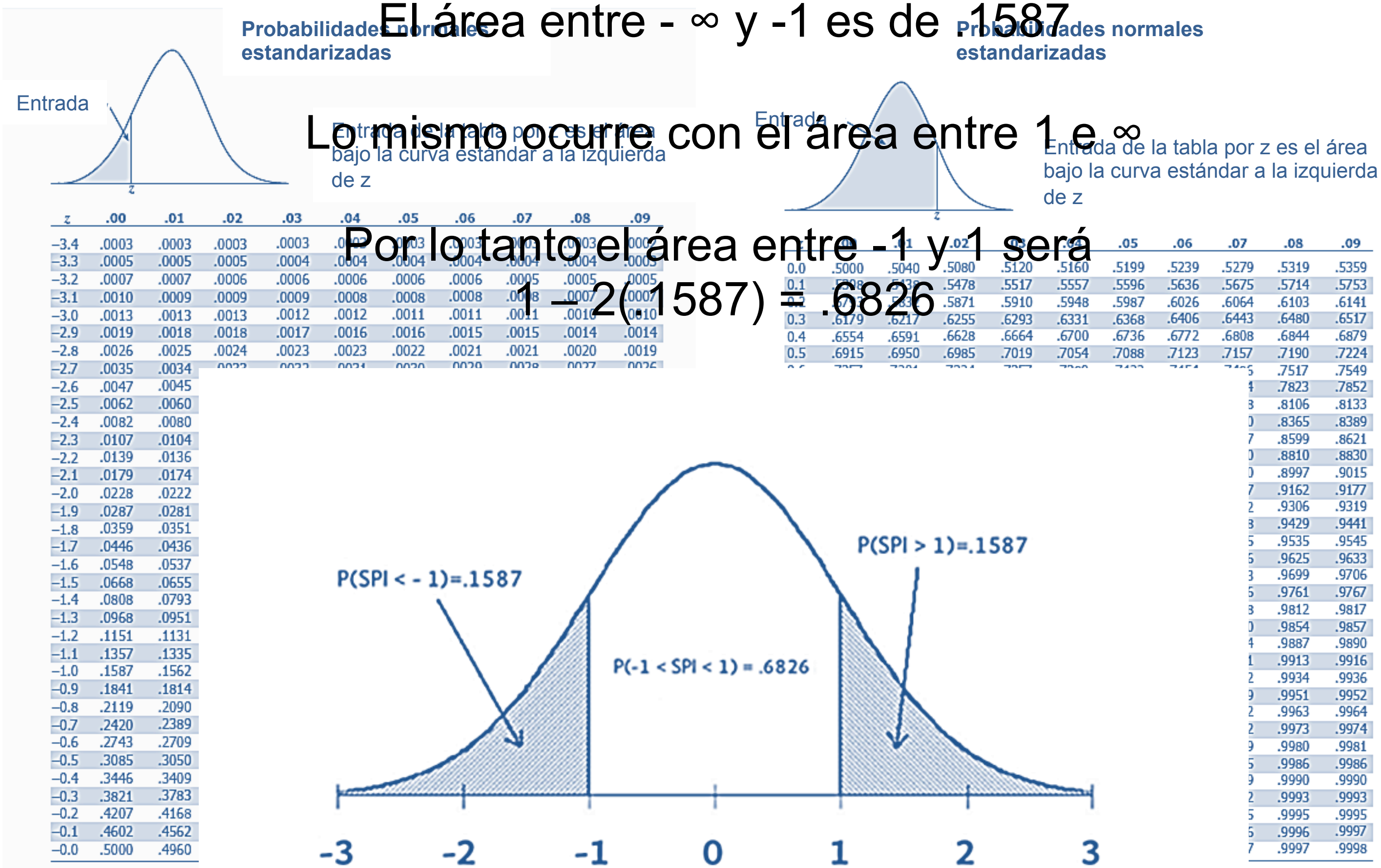
USO DE TABLAS

El área entre - ∞ y -1 es de .1587

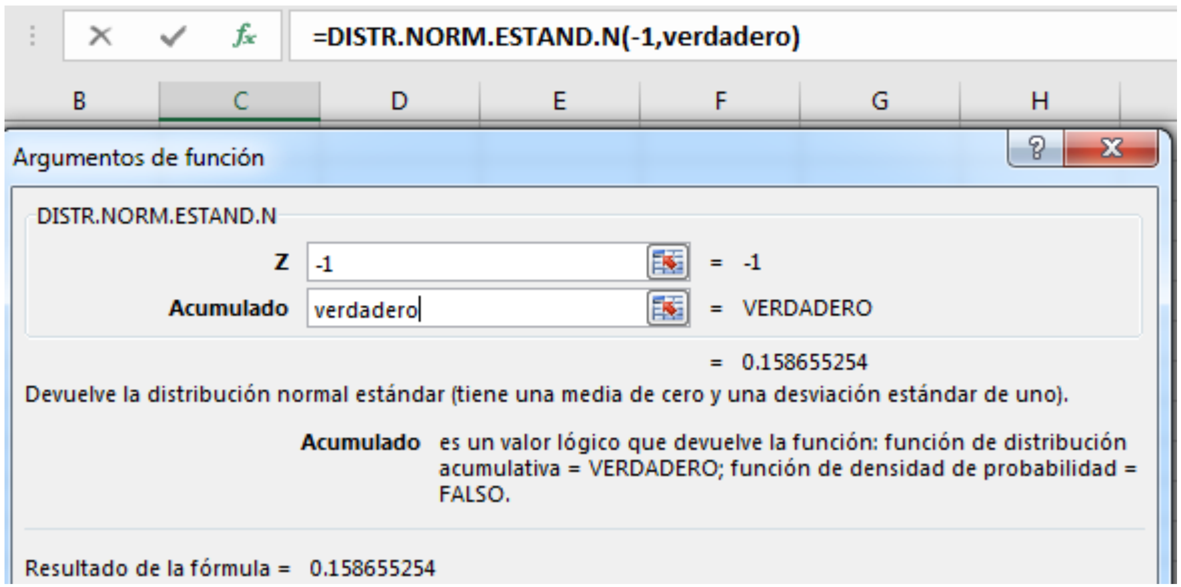
Lo mismo ocurre con el área entre 1 e ∞

Por lo tanto el área entre -1 y 1 será

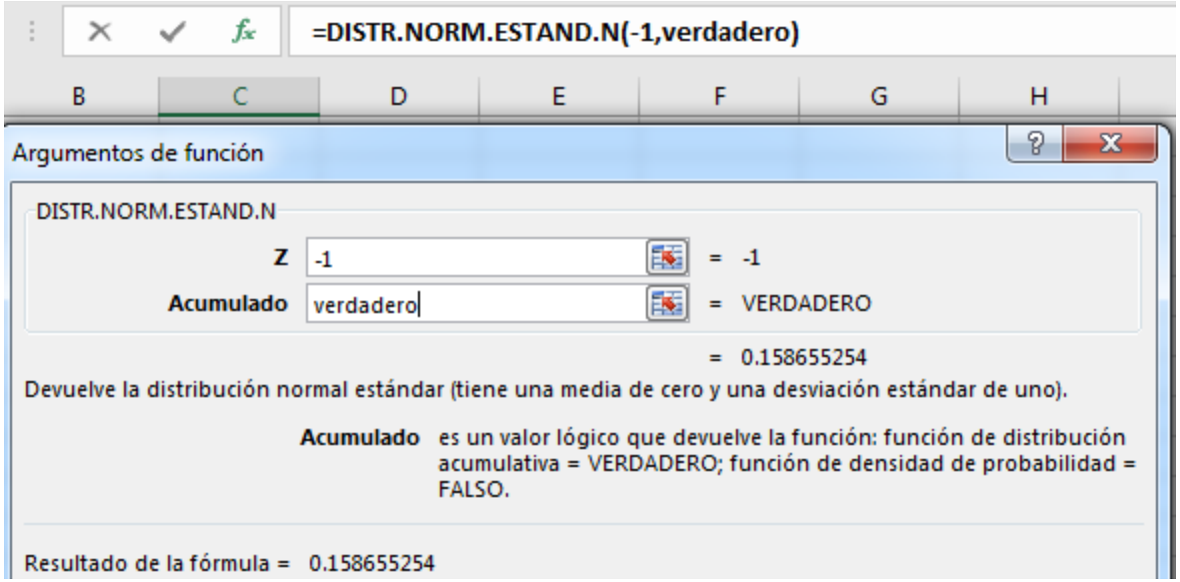
1 – 2(.1587) = .6826



USO DE EXCEL Y DE MATHEMATICA



USO DE MATHEMATICA



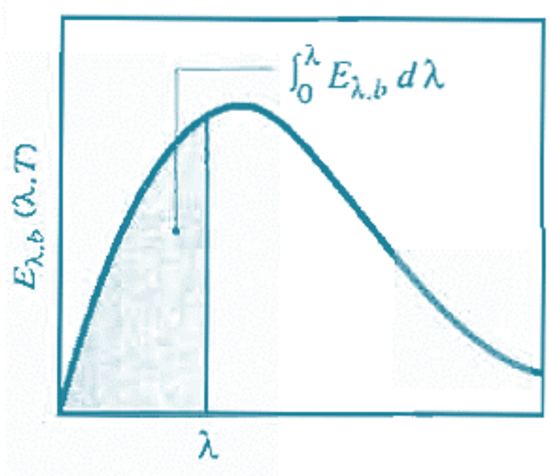
$q^{(e)}_{b\lambda}\, d\lambda$ es la cantidad de energía por unidad de área y de tiempo que emite una superficie negra en el intervalo de longitud de onda comprendido entre λ y $\lambda + d\lambda$

Integrada a lo largo de todo el dominio, da la cantidad de energía total, por unidad de área y de tiempo

σ, la constante de Stefan-Boltzmann es
$4{,}878 \times 10^{-8}$ kcal hr^{-1} m^{-2} $^{o}K^{-4}$
o bien $1{,}355 \times 10^{-12}$ cal seg^{-1} cm^{-2} $^{o}K^{-4}$

LEY DE STEFAN-BOLTZMANN

EMISIÓN EN UNA BANDA DE FRECUENCIAS
(LONGITUDES DE ONDA)



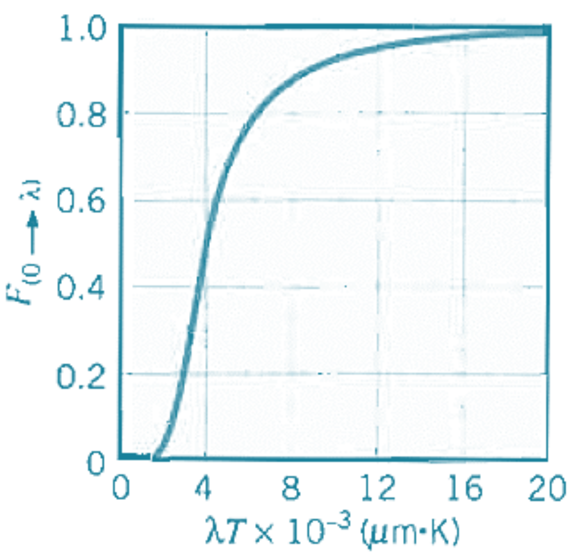
$$F_{(0\rightarrow\lambda)} \equiv \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,b}\, d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\sigma T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{\lambda,b}}{\sigma T^5}\, d(\lambda T) = f(\lambda T)$$

$$F_{(\lambda_1\rightarrow\lambda_2)} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b}\, d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b}\, d\lambda}{\sigma T^4} = F_{(0\rightarrow\lambda_2)} - F_{(0\rightarrow\lambda_1)}$$

VALORES

También en este caso existen varios métodos:

a) A la antigua, usando tablas
b) Usando Excel
c) Usando Mathematica.



λT (μm·K)	$F_{(0\to\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/\sigma T^5$ $(\mu m\cdot K\cdot sr)^{-1}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/I_{\lambda,b}(\lambda_{max},T)$
200	0.000000	0.375034×10^{-27}	0.000000
400	0.000000	0.490335×10^{-13}	0.000000
600	0.000000	0.104046×10^{-8}	0.000014
800	0.000016	0.991126×10^{-7}	0.001372
1,000	0.000321	0.118505×10^{-5}	0.016406
1,200	0.002134	0.523927×10^{-5}	0.072534
1,400	0.007790	0.134411×10^{-4}	0.186082
1,600	0.019718	0.249130	0.344904
1,800	0.039341	0.375568	0.519949
2,000	0.066728	0.493432	0.683123
2,200	0.100888	0.589649×10^{-4}	0.816329
2,400	0.140256	0.658866	0.912155
2,600	0.183120	0.701292	0.970891
2,800	0.227897	0.720239	0.997123
2,898	0.250108	0.722318×10^{-4}	1.000000
3,000	0.273232	0.720254×10^{-4}	0.997143
3,200	0.318102	0.705974	0.977373
3,400	0.361735	0.681544	0.943551
3,600	0.403607	0.650396	0.900429
3,800	0.443382	0.615225×10^{-4}	0.851737
4,000	0.480877	0.578064	0.800291
4,200	0.516014	0.540394	0.748139
4,400	0.548796	0.503253	0.696720
4,600	0.579280	0.467343	0.647004
4,800	0.607559	0.433109	0.599610

VALORES CON MATHEMATICA

Incluir aquí lo mismo pero con Mathematica. Pedirlo a Julio.

*I*ʎ*,b(*
λ*,T)/*
*I*ʎ*,b(*
λ*max*
,T)

EJERCICIO

Una cavidad se mantiene a una temperatura de 2000 K. A través de un pequeño orificio en la cavidad emerge radiación térmica..

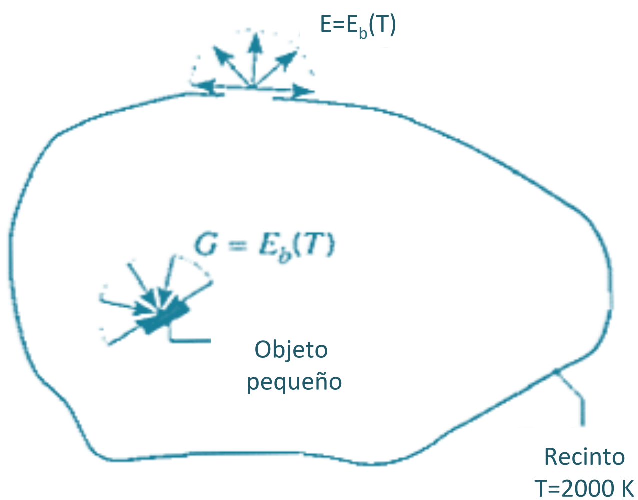
1. Calcule su potencia de emisión.
2. ¿Cuál es el valor de λ_1 tal que el 10% de la radiación se encuentra por debajo de ese valor?
3. ¿Cuál es el valor de λ_2 tal que el 10% de la radiación se encuentra por encima de ese valor?
4. Determine el máximo de la potencia de emisión y la longitud de onda a la que ocurre.
5. ¿Cuál es la irradiación recibida por un objeto pequeño que se encuentra dentro de la cavidad?

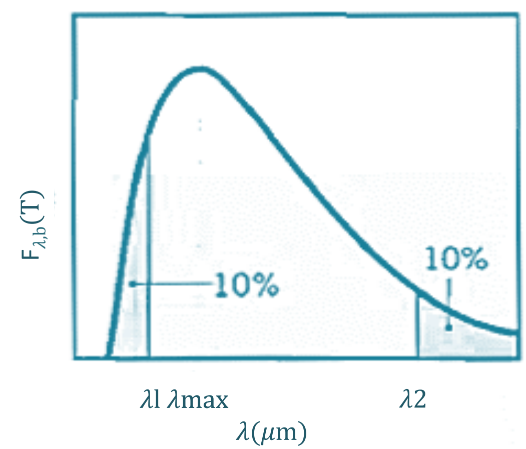
SOLUCIÓN
ESQUEMA

A. La cavidad radiante es una buena aproximación al cuerpo negro, por lo tanto:

$$E = E_b(T) = \sigma T^4 = 5.670 \times 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4 (2000\ K)^4$$

$$E = 9.07 \times 10^5\ W/m^2$$





B) Y C) VALORES DE λ_1 Y λ_2

λT $(\mu m\cdot K)$	$F_{(0\rightarrow\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/\sigma T^5$ $(\mu m\cdot K\cdot sr)^{-1}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/I_{\lambda,b}(\lambda_{max},T)$
200	0.000000	0.375034×10^{-27}	0.000000
400	0.000000	0.490335×10^{-13}	0.000000
600	0.000000	0.104046×10^{-8}	0.000014
800	0.000016	0.991126×10^{-7}	0.001372
1,000	0.000321	0.118505×10^{-5}	0.016406
1,200	0.002134	0.523927×10^{-5}	0.072534
1,400	0.007790	0.134411×10^{-4}	0.186082
1,600	0.019718	0.249130	0.344904
1,800	0.039341	0.375568	0.519949
2,000	0.066728	0.493432	0.683123
2,200	0.100888	0.589649×10^{-4}	0.816329
2,400	0.140256	0.658866	0.912155
2,600	0.183120	0.701292	0.970891
2,800	0.227897	0.720239	0.997123
2,898	0.250108	0.722318×10^{-4}	1.000000
3,000	0.273232	0.720254×10^{-4}	0.997143
3,200	0.318102	0.705974	0.977373
3,400	0.361735	0.681544	0.943551
3,600	0.403607	0.650396	0.900429
3,800	0.443382	0.615225×10^{-4}	0.851737
4,000	0.480877	0.578064	0.800291
4,200	0.516014	0.540394	0.748139
4,400	0.548796	0.503253	0.696720
4,600	0.579280	0.467343	0.647004
4,800	0.607559	0.433109	0.599610

λT $(\mu m\cdot K)$	$F_{(0\rightarrow\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/\sigma T^5$ $(\mu m\cdot K\cdot sr)^{-1}$	$I_{\lambda,b}(\lambda,T)/I_{\lambda,b}(\lambda_{max},T)$
9,500	0.903085	0.765338	0.105956
10,000	0.914199	0.653279×10^{-5}	0.090442
10,500	0.923710	0.560522	0.077600
11,000	0.931890	0.483321	0.066913
11,500	0.939959	0.418725	0.057970
12,000	0.945098	0.364394×10^{-5}	0.050448
13,000	0.955139	0.279457	0.038689
14,000	0.962898	0.217641	0.030131
15,000	0.969981	0.171866×10^{-5}	0.023794
16,000	0.973814	0.137429	0.019026
18,000	0.980860	0.908240×10^{-6}	0.012574
20,000	0.985602	0.623310	0.008629

D) MÁXIMO DE LA POTENCIA DE EMISIÓN.

- Por la ley de Wien: $\lambda_{max}T=2898\ \mu m\cdot K$.
- Como $T = 2000$ entonces $\lambda_{max} = 1.45\ \mu m$
- Conociendo ese valor de y usando la ecuación

$$E_{\lambda,b}(\lambda,T)=\pi I_{\lambda,b}(\lambda,T)= C1/\lambda 5\ [\exp(C2/\lambda T)-1]$$

puede calcularse $E_{\lambda b} = 4.12\ X\ 10^{5}\ W/\ m^2 .\ \mu m$

- Alternativamente usando los valores de la tabla para $I_{\lambda b}$

IRRADIACIÓN RECIBIDA.

- La cavidad se comporta como un cuerpo negro por lo tanto la irradiación sobre el objeto pequeño será:

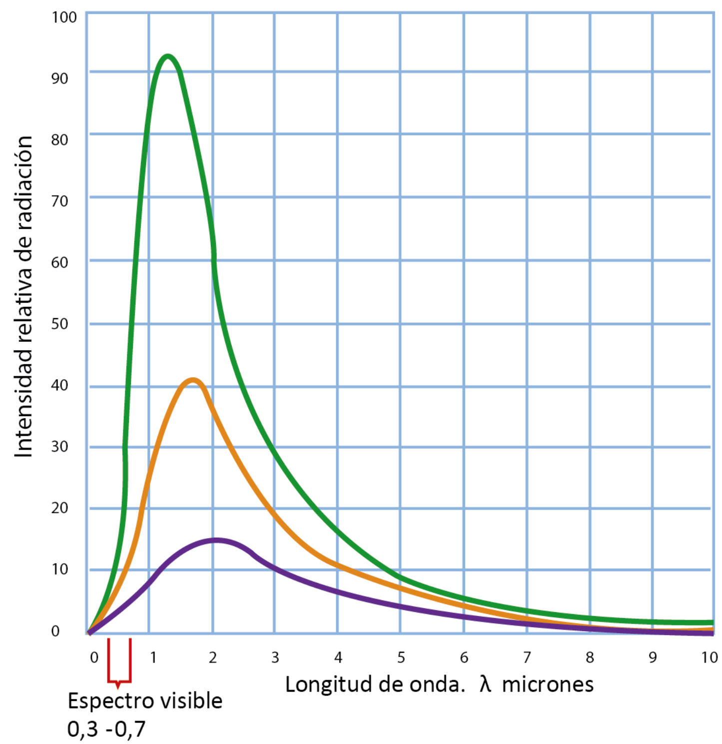
$$q_b(e) = \sigma T^4$$

$$5.67\ X\ 10^{-8}\ X\ (2000)^4 = 9.07\ X\ 10^5\ W/m^2\ .\ \mu m$$

SOLUCIÓN DEL C)

- Para resolver este inciso grafiquen los datos que obtuvieron al usar el simulador y calcular el máximo de la curva de la distribución de Plank en función de la longitud de onda.

LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN



$$\lambda_{máx}\, T = 0{,}2884 \text{ cm °K}$$

EJEMPLO. TEMPERATURA Y EMISIÓN DE ENERGÍA RADIANTE DEL SOL

SOLUCIÓN

El Sol puede considerarse como un cuerpo negro que emite radiación con una intensidad máxima para λ = 0,5 micrones (5000 A).

Estimar:

a) la temperatura de la superficie del Sol

b) la densidad de flujo calorífico que emite la superficie del Sol.

a. A partir de la ley de desplazamiento de Wien,

$$T = 0{,}2884/\lambda_{\text{máx}} = (0{,}2884\ cm\,°K)/(0{,}5\ x\ 10^{-4}\ cm) = 5760\ °K = 10\ 400\ °R$$

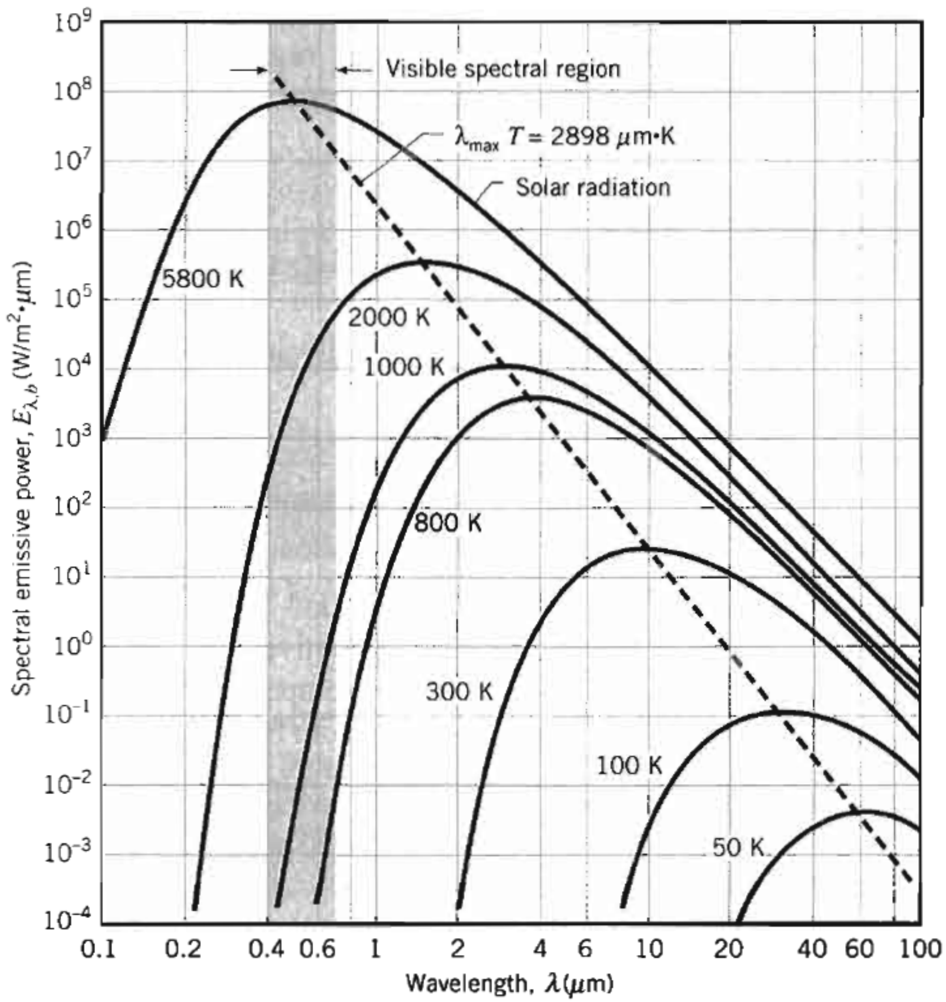
b. A partir de la ley de Stefan-Boltzmann,

$$q_b^{(e)} = \sigma T^4$$

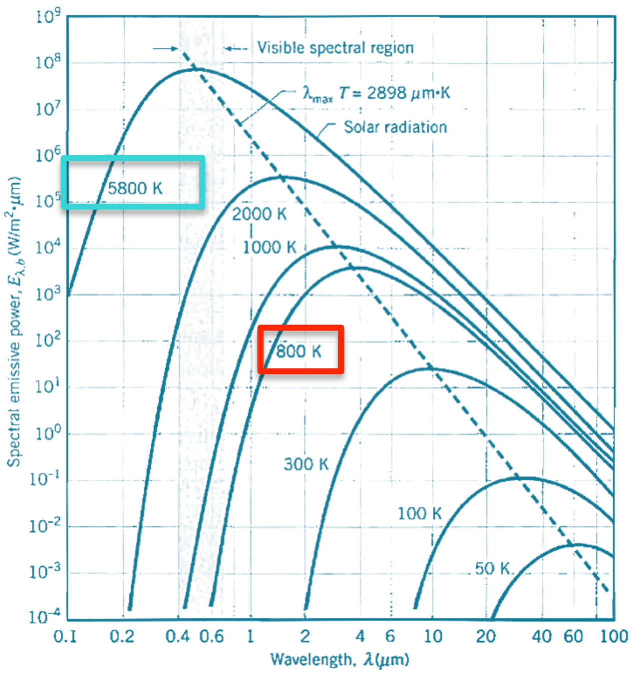
$= (4{,}878 \text{ x } 10^{-8})(5760)^4$

$= 5{,}4 \text{ x } 10^{7}$ kcal $hr^{-1}m^{-2}$

LA RADIACIÓN TÉRMICA Y EL ESPECTRO VISIBLE



Utiliza los valores de la tabla siguiente, junto con la gráfica de la diapositiva anterior para decir a qué color equivale una temperatura a) de 800 K b) de 1000 K. ¿Para que temperatura el máximo de la radiación ocurre en la parte visible del espectro?



	A	B	C	D	E
1	Color	Rango inf (nM)	Rango sup (nM)	λ media (nM)	Frecuencia (THz)
2	Rojo	625	740	682.5	439.56
3	Naranja	590	625	607.5	493.83
4	Amarillo	565	590	577.5	519.48
5	Verde	520	565	542.5	553.00
6	Azul	450	500	475	631.58
7	Añil	430	450	440	681.82
8	violeta	380	430	405	740.74
9					

1. Observando la gráfica se ve que un cuerpo a una temperatura de 800 K en la única zona del espectro visible en la que emite radiación está alrededor de 0.6 µm, que corresponden al color rojo.

2. En la gráfica se observa que un cuerpo a la temperatura de 1500 K ya emite en toda la gama de frecuencias (longitudes de onda) del espectro visible, por lo tanto le corresponde el color blanco.

3. En la gráfica se aprecia que esto ocurre para una temperatura de 5880 K

Lecturas adicionales

- Capítulo 12 del Incropera «Fundamentals of heat and mass transfer»
- Capítulo 9 del Kreith «Principios de transferencia de calor»
- Capítulo 14 del Bird «Transport Phenomena»
- Transport Phenomena in Metallurgy (Geiger-Poirier)
- http://desarmandolamafia.blogspot.mx/2018/03/catastrofe-ultra-blanca.html

Lecturas

Cometarios adicionales

- Capítulo 12 del libro «Fundamentals of heat and mass transfer»
- El color puede utilizarse para estimar la temperatura de los metales bajo tratamiento térmico. Rojo 800 K. Blanco 1, 500 K
- Capítulo 9 del Kreith «Principios de transferencia de calor»
- El valor de σ es relativamente pequeño $5.670 \text{ X } 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ por lo tanto a temperatura ambiente puede despreciarse el efecto de la radiación.
- Capítulo 14 del Bird «Transport Phenomena»
- A 300 K el flux de energía radiante es: $5.670 \text{ X } 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \ (300)^4 = 460 \text{ W/m}^2$
- Transport Phenomena in Metallurgy (Geiger-Poirier)
- http://desarmandolamafia.blogspot.mx/2018/03/[illegible].html
- Esto es aproximadamente 0.1 veces la cantidad de calor transmitida por convección.