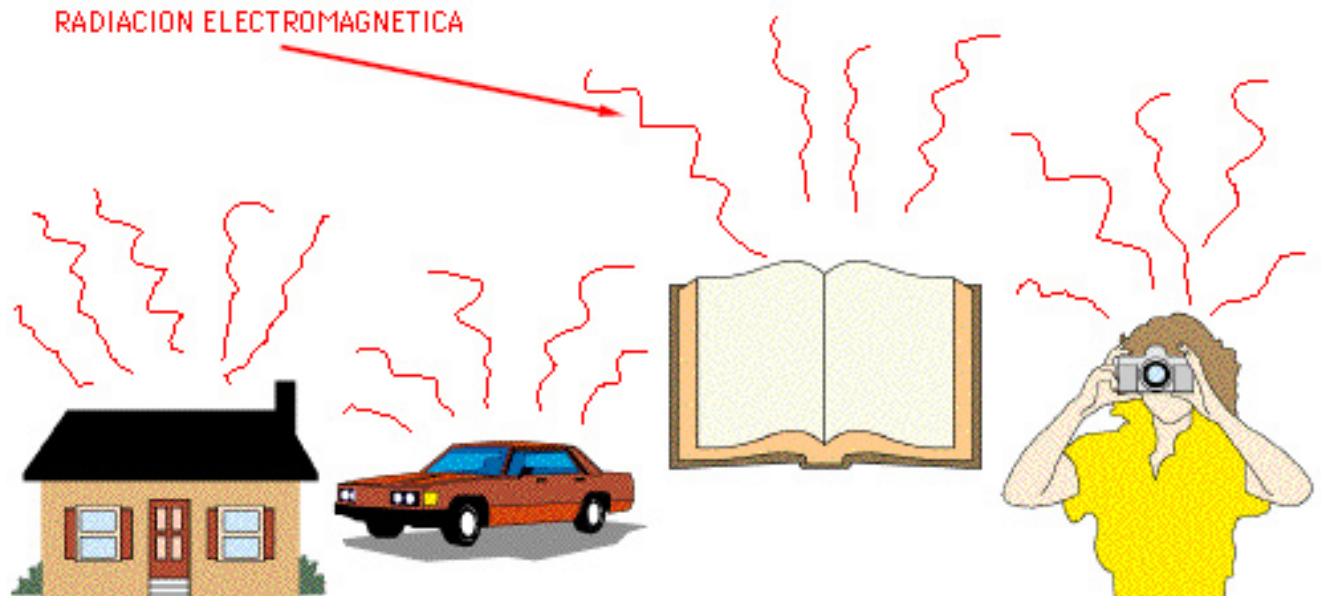


## LA RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

¿Sabía usted que todos los objetos emiten ondas electromagnéticas?

Un carro, una casa, un libro, la Tierra, usted mismo, continuamente están emitiendo ondas electromagnéticas:



¿Cómo se puede explicar este fenómeno?

Para entender por qué emiten radiación los objetos ponga mucha atención a las siguientes consideraciones:

Los objetos están hechos de átomos.

Un átomo puede emitir radiación (como la luz) cuando uno de sus electrones pierde energía y así pasa a un orbital de menor energía.

Un átomo puede absorber radiación cuando uno de sus electrones gana energía y así pasa a un orbital de mayor energía.

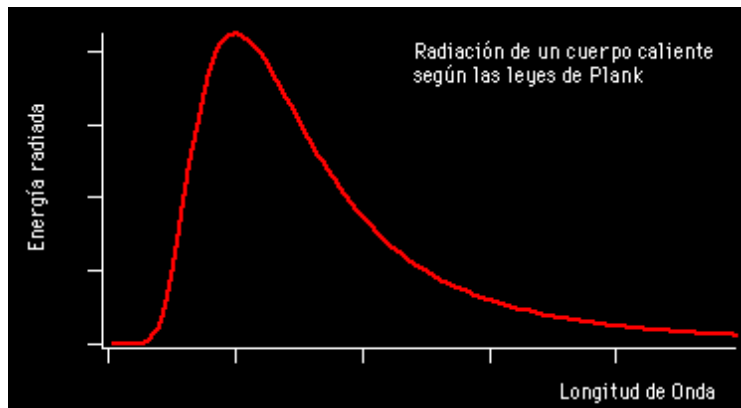
El movimiento de los átomos en un objeto produce choques o vibraciones que estimulan la emisión y absorción de radiación.

Un aumento en la temperatura de un objeto representa un aumento de la energía cinética de movimiento de sus átomos.

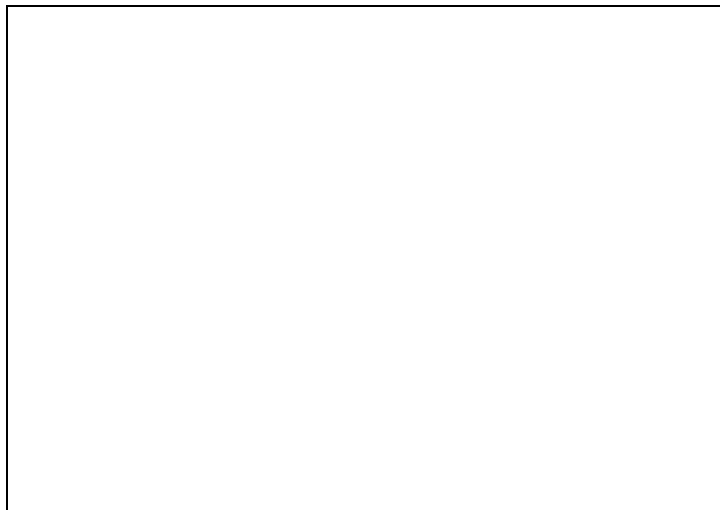
En la naturaleza ningún objeto puede tener temperatura absoluta igual a cero.

El físico alemán Max Plank, descubrió la ley que gobierna la radiación de los cuerpos en equilibrio termodinámico. Según Plank, la intensidad de radiación para cada longitud de onda depende únicamente de la temperatura del cuerpo en cuestión.

El espectro de radiación (o intensidad para cada longitud de onda) al que llegó Plank tiene una forma característica así:



Los físicos designan este espectro con el nombre de Radiación de Cuerpo Negro. Plank llegó a este resultado introduciendo el concepto de quantum de energía (es decir que la energía en la naturaleza sólo se puede intercambiar en paquetes con cantidades discretas). Este es el principio de la mecánica cuántica.



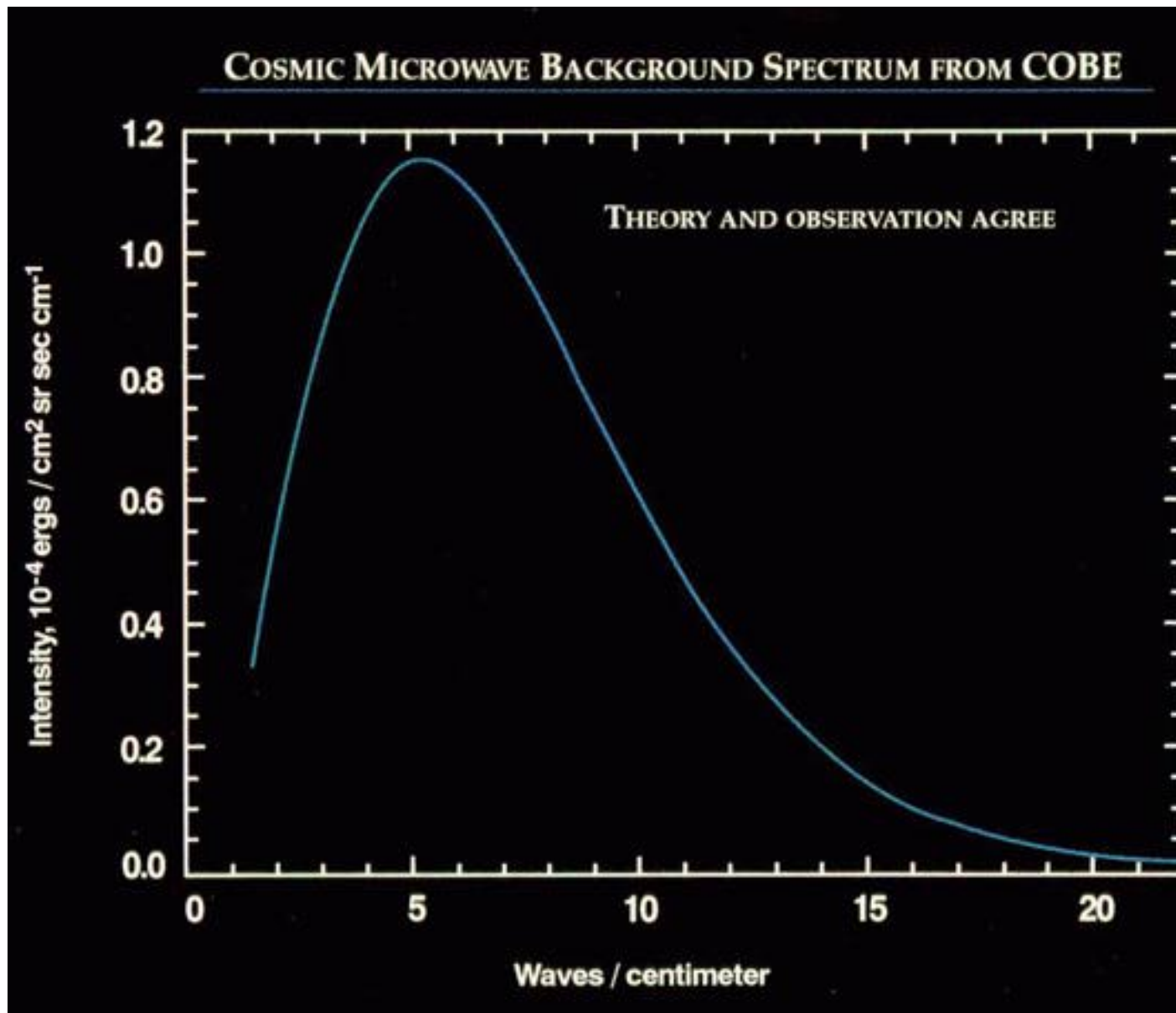


Max Planck  
(1858 – 1947)

### El Universo y la Radiación de Cuerpo Negro

El universo comenzó hace 15 mil millones de años con una gran explosión. Los astrofísicos que elaboraron esa teoría hicieron la predicción de que la energía presente en los primeros momentos del universo debe existir aún en el espacio y debe tener un espectro de Cuerpo Negro (a esta energía se le llama radiación cósmica de fondo).

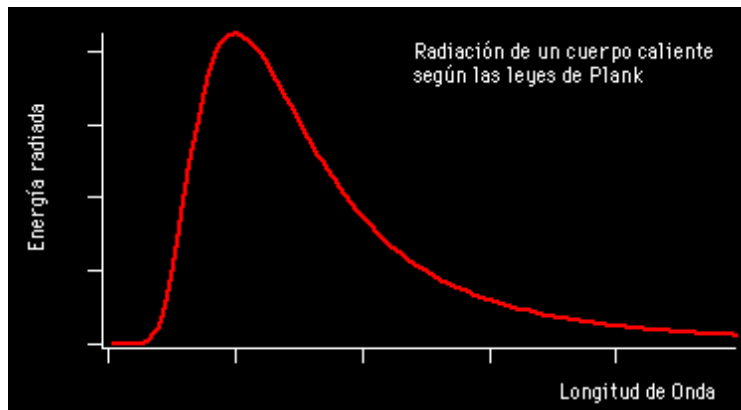
El 13 de enero de 1990 el astrofísico John C. Mather anunció al mundo el resultado de la medición del espectro de la radiación cósmica de fondo obtenida por el proyecto COBE de la NASA: resultó ser exactamente un espectro de cuerpo negro correspondiente a una temperatura de 2.725 Kelvin. Éste es el espectro original obtenido por COBE:



Aplicación de la física del cuerpo negro al entendimiento del origen del universo.

### **La radiación de 'cuerpo negro'**

Es posible tomar fotografías durante la noche sin la ayuda de un flash. Esto se puede hacer usando una película sensible a la radiación infrarroja y es posible debido al hecho que los objetos emiten radiación electromagnética de acuerdo a su temperatura. Estas ondas electromagnéticas son emitidas a todas las frecuencias, pero hay unas frecuencias que dominan más que otras dependiendo de la temperatura. Si uno hace una gráfica de la intensidad de las ondas electromagnéticas con respecto a su frecuencia el resultado es lo que se llama la distribución espectral o simplemente el espectro.



(Espectro de emisión de un cuerpo negro)

En el caso de cuerpos en equilibrio térmico el espectro tiene una forma característica que consiste en una función que crece de forma continua y monótona hasta alcanzar un máximo y luego decrece para altas frecuencias. Entre mayor sea la temperatura del cuerpo mayor será la frecuencia donde aparece el punto máximo del espectro. La forma teórica del espectro de radiación de un cuerpo en equilibrio únicamente depende del parámetro temperatura, fue descubierta por Max Planck en 1900 y constituyó el comienzo de la mecánica cuántica.

La fotosfera del Sol tiene una temperatura de 5000 grados centígrados y se ve de color amarillo por que el pico de su espectro aparece ubicado precisamente en el lugar correspondiente a la longitud de onda del color amarillo, mientras que el cuerpo humano normalmente a 37 grados centígrados se ve sólo en el infrarrojo.

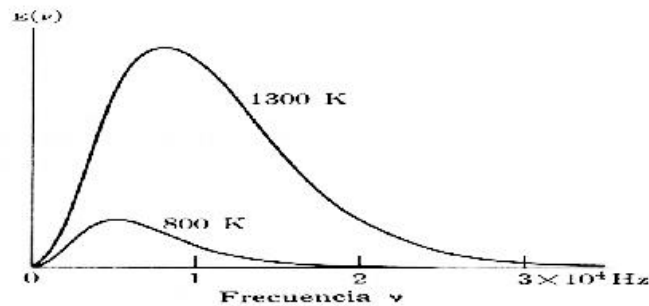
#### RADIACION DE UN CUERPO NEGRO.

Consideremos una cavidad cuyas paredes están a una cierta temperatura. Los átomos que componen las paredes están emitiendo radiación electromagnética y al mismo tiempo absorben la radiación emitida por otros átomos de las paredes. El campo de la radiación electromagnética ocupa toda la cavidad. Cuando la radiación encerrada dentro de la cavidad alcanza el equilibrio con los átomos de las paredes, la cantidad de energía que emiten los átomos por unidad de tiempo es igual a la que absorben. En consecuencia, cuando la radiación dentro de la cavidad está en equilibrio con las paredes, la densidad de energía del campo electromagnético es constante. Los experimentos han demostrado que en el equilibrio, la radiación electromagnética encerrada tiene una distribución de energía bien definida; es decir: a cada frecuencia corresponde una densidad de energía que depende solamente de la temperatura de las paredes y es independiente de su material. La densidad de energía correspondiente a la radiación con frecuencia entre  $\nu$  y  $\nu + d\nu$

se escribe  $E(\nu)d\nu$ , donde  $E(\nu)$

es la densidad de energía por intervalo unitario de frecuencias, denominado a veces densidad de energía

monocromática.



*Figura 3. Densidad de energía monocromática de la radiación de un cuerpo negro en función de la frecuencia para diversas temperaturas.*

En la figura 3 se ilustra la variación observada de  $E(\nu)$

con la frecuencia  $\nu$

para dos temperaturas. Lummer y Pringsheim fueron los primeros en obtener experimentalmente curvas como éstas en 1899. Se puede ver en las curvas que para cada temperatura la densidad de energía presenta a cierta frecuencia un máximo pronunciado. Obsérvese también que la frecuencia para la cual la densidad de la energía es máxima aumenta al aumentar la temperatura. Esto explica el cambio de color de un cuerpo radiante a medida que su temperatura varía. Si se abre un pequeño agujero en una de las paredes de la cavidad, parte de la radiación escapa y se puede analizar. El agujero se ve muy brillante cuando el cuerpo está a temperatura muy alta y la intensidad de la radiación de equilibrio dentro de la cavidad es alta, pero se ve completamente negro a temperaturas bajas cuando la intensidad de la radiación de equilibrio es despreciable en la región visible del espectro. Es por esa razón que se denomina a la radiación que sale de la cavidad radiación de cuerpo negro. El problema de encontrar qué mecanismo hace que los átomos radiantes produzcan la distribución de energía de la radiación de cuerpo negro, dio lugar a la física cuántica. Hacia fines del siglo pasado todas las tentativas de explicar esta distribución de energía, usando los conceptos conocidos entonces, habían fracasado completamente. El físico alemán Max Planck (1858–1947) sugirió alrededor de 1900 que si la radiación dentro de la cavidad está en equilibrio con los átomos de las paredes, debía haber una correspondencia entre la distribución de energía de la radiación y las energías de los átomos de la cavidad. Planck supuso, como modelo para los átomos radiantes, que los mismos se comportan como osciladores armónicos y que cada uno oscila con una frecuencia dada  $\nu$

. Planck sugirió como segunda hipótesis que: cada oscilador puede absorber o emitir energía de radiación en una cantidad proporcional a su frecuencia  $\nu$

. Esta última condición no se exige en la teoría clásica del electromagnetismo, expresadas por las ecuaciones de Maxwell, la cual permite una emisión o una absorción continua de energía. Si  $E$  es la energía absorbida o emitida en un solo proceso de interacción de un oscilador con la radiación electromagnética, la hipótesis de Planck establece que:  $E = h\nu$

donde  $h$  es una constante de proporcionalidad que se supone sea la misma para todos los osciladores. Por lo tanto, cuando un oscilador absorbe o emite radiación electromagnética, su energía aumenta o disminuye en una cantidad  $h\nu$

. La ecuación anterior indica que la energía de los osciladores atómicos, está cuantizada. Esto significa que la energía de un oscilador  $\nu$

sólo puede tener ciertos valores que son:  $0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots$

, suponiendo que la energía mínima del oscilador es cero. De modo que los posibles valores de la energía de un oscilador de frecuencia  $\nu$

son:  $E_n = nh\nu$

donde  $n$  es un entero positivo. Como sabemos, la energía de un oscilador es proporcional al cuadrado de su amplitud y podemos hacer que un oscilador de frecuencia dada tenga una energía elegida arbitrariamente ajustando la amplitud de las oscilaciones en forma apropiada. Por consiguiente la idea de Planck fue una suposición, que no se podía explicar usando conceptos clásicos; estaba justificada solamente porque funcionaba y porque los físicos de la época no tenían explicación mejor. Aún no tenemos una explicación mejor; debemos aceptar la cuantización de algunas magnitudes físicas como un hecho fundamental de la naturaleza.

Aplicando algunas consideraciones de naturaleza estadística, Planck obtuvo para la densidad de energía en la radiación de un cuerpo negro, la expresión:

$$E(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

donde  $K$  es la constante de Boltzman. Esta expresión, que concuerda sorprendentemente bien con los valores experimentales de  $E(\nu)$

a muy diversas temperaturas, ha sido aceptada como la expresión correcta para la radiación de cuerpo negro. Se denomina ley de radiación de Planck.

El valor obtenido para la constante de Planck  $h$ , es:  $h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

La constante de Planck es una de las más importantes de la física. En algunas ocasiones es preferible expresar la densidad de energía monocromática en función de la longitud de onda en vez de la frecuencia.

Definimos  $E(\lambda)$

conforme a la relación  $E(\lambda)d\lambda = -E(\lambda)d\nu$

. El signo menos se debe a que  $d\lambda$  y  $d\nu$

tienen signos opuestos mientras que  $E(\lambda)$  y  $E(\nu)$

son positivas. Como , tenemos:  $d\nu/d\lambda = -c/\lambda^2$

y

$$E(\lambda) = -E(\nu)d\nu/d\lambda = E(\nu).c/\lambda^2.$$

Reemplazando  $E(\nu)$

por el valor dado, y poniendo  $\nu = c/\lambda$

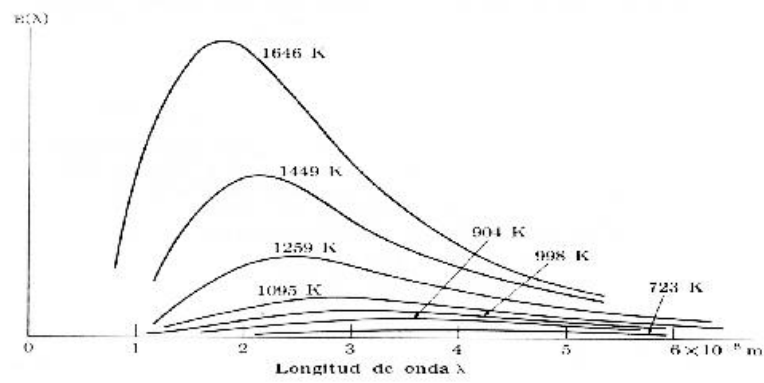
, obtenemos finalmente:

$$E(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}$$

En la figura 5 se muestra el gráfico de  $E(\lambda)$

para diversas temperaturas. Presenta un pico pronunciado para una longitud de onda que depende de la

temperatura.



*Figura 4. Densidad de energía monocromática de la radiación de cuerpo negro en función de la longitud de onda para diversas temperaturas*