

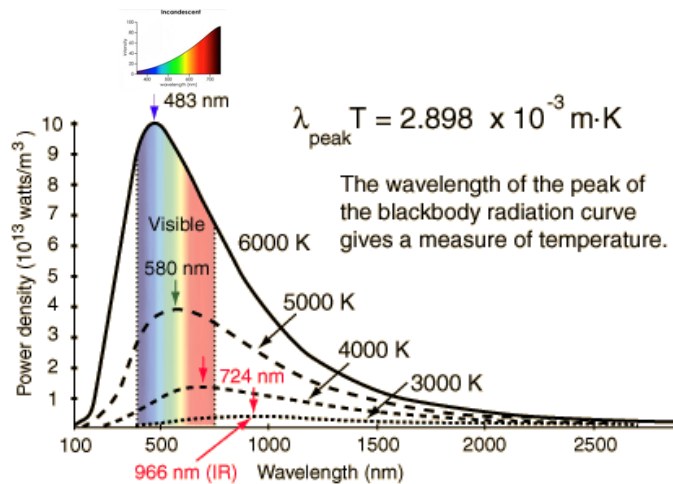
8. RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO (2018)

© Damían Gulich
www.damiangulich.com.ar

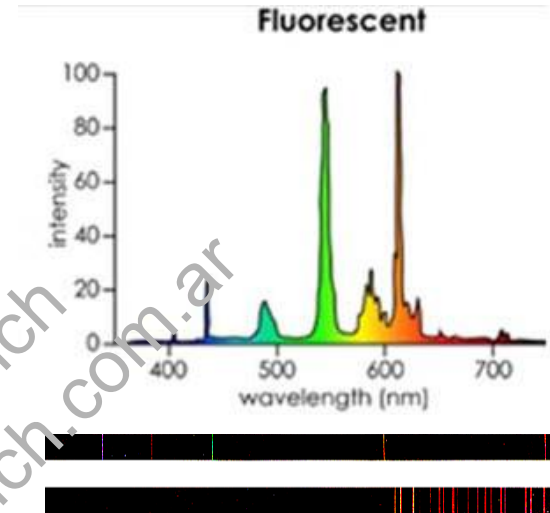
8. 1 Definiciones

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Espectros de sólidos y líquidos versus los de gases



Los sólidos y líquidos emiten espectros continuos



Los gases emiten espectros discretos (de líneas) (ejemplo lámparas de mercurio, sodio, etc.)

La distribución de energía del espectro de sólidos y líquidos depende *solamente* de la temperatura y **no de la sustancia en estudio**.

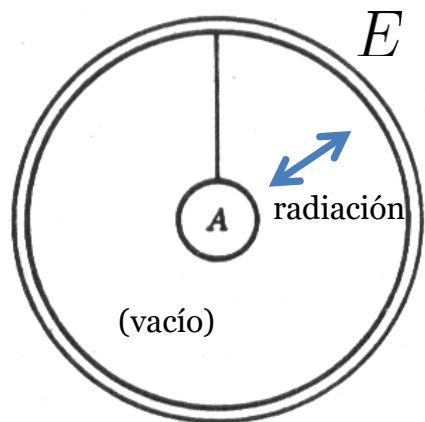
La radiación es visible a temperaturas mayores de 500°C. A temperaturas menores, la emisión NO es visible (λ largas).

Definiciones

- Una fuente de ondas electromagnéticas se denomina **emisor**.
- La energía transportada por esas ondas es la **energía radiante**.
- La expresión general para el **proceso** en virtud del que se origina la energía radiante se llama **radiación**.
- En el caso en que la energía térmica de un sólido o un líquido se transforma en energía radiante, el proceso se llama **radiación térmica**.
- La energía radiante que incide o atraviesa una superficie por unidad de tiempo, o la energía radiante emitida por unidad de tiempo por una fuente se llama **flujo radiante** (P). Se mide en W.



Intercambio de energía radiante



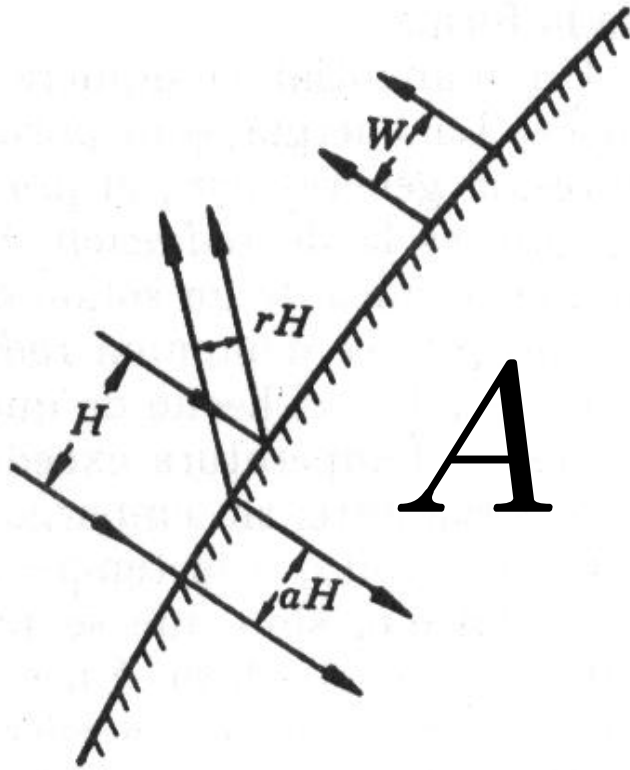
- Imaginemos envoltura E dentro de la que se hizo vacío. Suspendido dentro de la envoltura hay un pequeño cuerpo A .
- El intercambio de energía entre E y A es sólo por radiación (gracias al vacío no hay ni convección ni conducción).
 - Las paredes de E están a temperatura uniforme.
 - Para cualquier temperatura del envoltorio, A termina a la temperatura de E .
 - En el equilibrio térmico, la temperatura de A permanece constante.

La energía radiada o reflejada por E incide sobre A . Parte es reflejada y parte es absorbida aumentando la energía de los átomos de A .

La superficie de A emite energía radiante dada por sus átomos.

- La energía radiante por unidad de tiempo es el **Flujo Radiante** P [W].
- El flujo radiante incidente por unidad de área es la **Irradiación** H [W/m²]

Detalle del proceso de irradiación, absorción, reflexión y emisión



Consideramos una porción de A . El ancho de cada franja dibujada representa la magnitud. La separación es sólo esquemática puesto que el proceso es sobre todo A . Si el cuerpo A es pequeño comparado con el envoltorio, la **irradiación incidente** H es igual en toda la superficie, aunque dependerá de la temperatura de E .

$$H \equiv H(T_E) \star$$

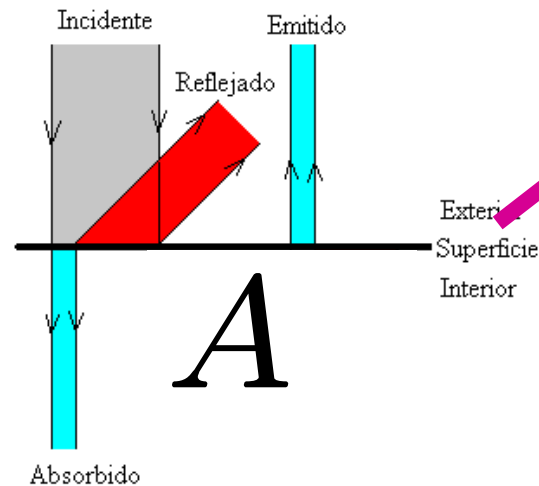
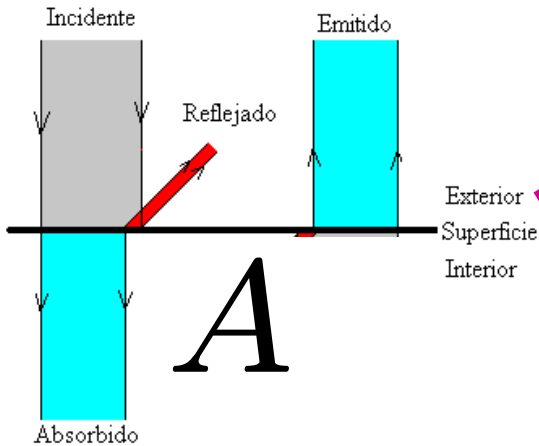
- La fracción reflejada de H es el **poder reflectante** (r).
- La fracción absorbida de H es el **poder absorbente** (a).
- Tanto r como a son números entre 0 y 1.

Para una superficie opaca

$$r + a = 1$$

- rH es la energía reflejada por unidad de área y unidad de tiempo.
- aH es la energía absorbida por unidad de área y unidad de tiempo (**térmica**)
- El **poder emisivo** o **emitancia** (W) es la energía emitida por A por unidad de tiempo y unidad de área (W/m^2).

Buenos y malos receptores/emisores



Comparando, vemos que

- un buen absorbente de radiación es un buen emisor
- un mal absorbente es un mal emisor

También podemos decir que

- un buen reflector es un mal emisor
- un mal reflector es un buen emisor

Aplicación: termos utilizados para mantener la temperatura de los líquidos. Un termo tiene dobles paredes de vidrio, habiéndose vaciado de aire el espacio entre dichas paredes para evitar las pérdidas por conducción y convección. Para reducir las pérdidas por radiación, se cubren las paredes con una lámina de plata que es altamente reflectante y por tanto, mal emisor y mal absorbente de radiación.

Equilibrio térmico

Si la superficie es lisa y pulimentada la mayor parte de la energía incidente se refleja, el resto atraviesa la superficie del cuerpo y es absorbida por sus átomos o moléculas.

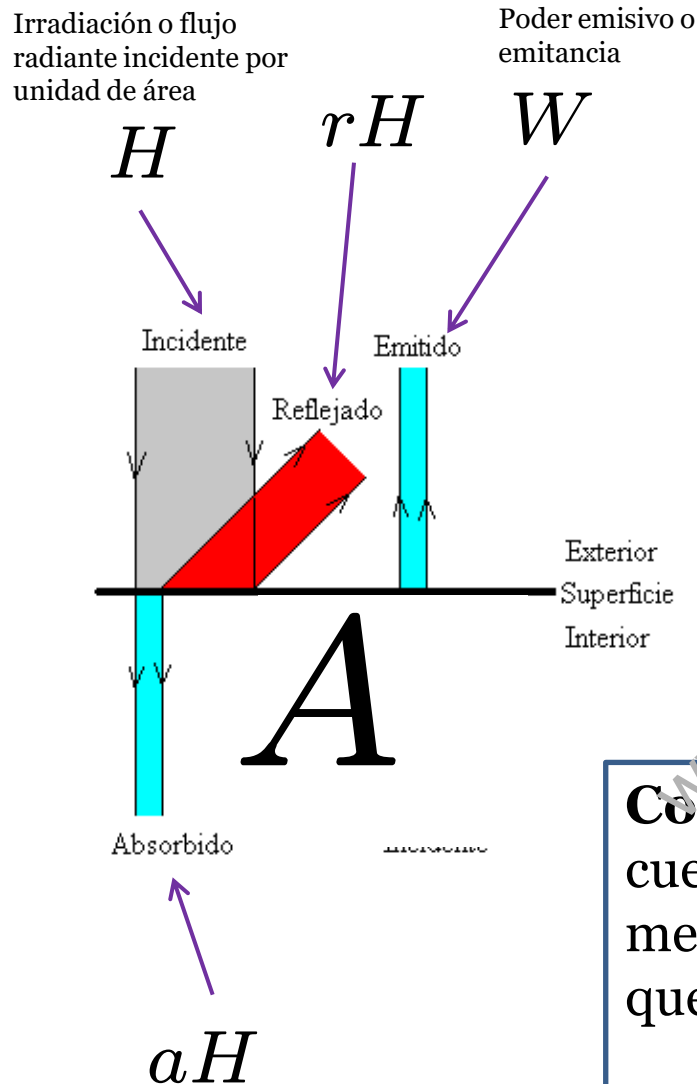
Como mencionamos, r es la proporción de energía radiante que se refleja, y a la proporción que se absorbe y se debe de cumplir que $r+a=1$.

- La proporción $aH=(1-r)H$ es absorbida.
- La cantidad de energía emitida por unidad de tiempo y unidad de área es W .

$$aH = W$$

Condición para el equilibrio térmico: Un cuerpo que está en equilibrio térmico con su medio debe emitir tanta energía radiante como la que absorbe.

$$aH = W$$



8. 2 Ley de Kirchhoff

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Ley de Kirchhoff (1859)

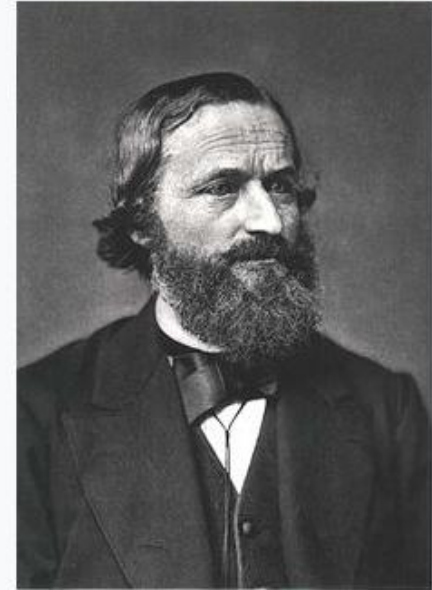
De la condición de equilibrio térmico $aH = W$

$$\rightarrow \frac{W}{a} = H(T_E)$$

Ley de Kirchhoff: La razón del poder emisor al poder absorbente es la misma para **todas** las superficies **a la misma temperatura**.

$$\frac{W_1}{a_1} = \frac{W_2}{a_2} = \dots = \frac{W_N}{a_N}$$

Gustav Kirchhoff



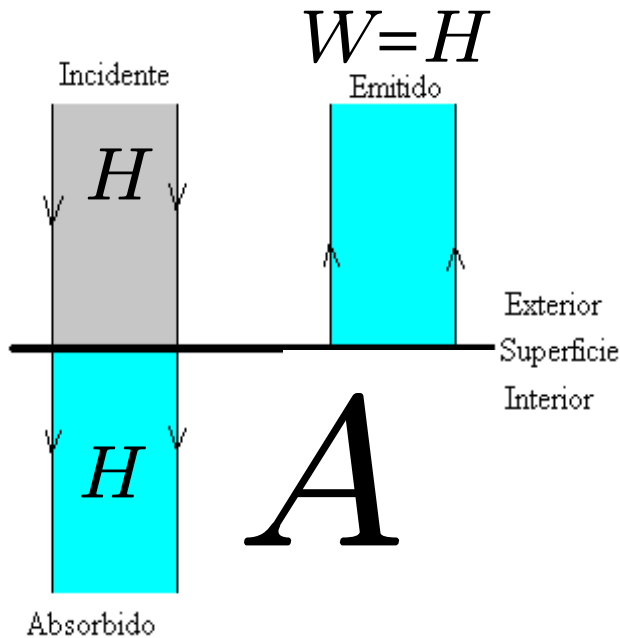
Gustav Kirchhoff

Born	Gustav Robert Kirchhoff 12 March 1824 Königsberg, Province of East Prussia, Kingdom of Prussia (present-day Kaliningrad, Russia)
Died	17 October 1887 (aged 63) Berlin, Province of Brandenburg, Kingdom of Prussia (present-day Germany)
Residence	Prussia / German Empire
Nationality	Prussian (1824-1871) German (1871-1887)
Alma mater	University of Königsberg
Known for	Kirchhoff's circuit laws Kirchhoff's law of thermal radiation Kirchhoff's laws of spectroscopy Kirchhoff's law of thermochemistry

8. 3 Cuerpo negro

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Cuerpo negro



Por la ley de Kirchhoff, el cuerpo que tenga el máximo poder emisor tendrá también el máximo poder absorbente.

La superficie que tenga una total absorción ($a = 1$) tiene nula reflexión. A esta superficie se la llama **cuerpo negro (o superficie negra ideal)** puesto que se la ve totalmente negra (si su temperatura no es lo suficientemente elevada para brillar por su cuenta).

El cuerpo negro absorbe toda la energía que le llega en forma de radiación electromagnética, independientemente de la frecuencia (o longitud de onda).

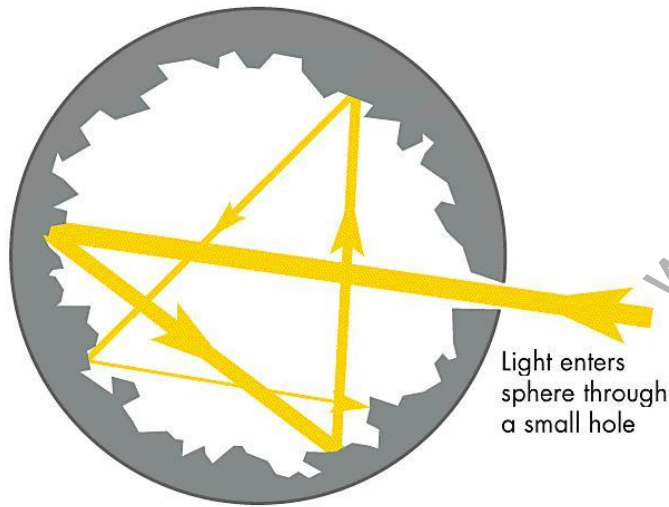
Por la ley de Kirchhoff
$$\frac{W}{a} = \frac{W_{CN}}{1} = W_{CN}$$

A una temperatura dada, ninguna superficie puede tener una emitancia (poder emisor) W mayor que la de un cuerpo negro W_{CN} a la misma temperatura: $W = aW_{CN}$

No existe en la naturaleza un cuerpo negro, incluso el negro de humo refleja el 1% de la energía incidente.

Una buena aproximación al cuerpo negro

- En laboratorio, una buena aproximación a un cuerpo negro es una cavidad con un pequeño orificio por donde ingresa y sale la radiación.
- La energía radiante incidente a través de la abertura, es absorbida por las paredes en múltiples reflexiones y solamente una mínima proporción escapa (se refleja) a través de la abertura. Podemos por tanto decir, que prácticamente toda la energía incidente es absorbida.
- La abertura es lo que se comporta como cuerpo negro**, puesto que toda la radiación incidente sobre ella es absorbida.

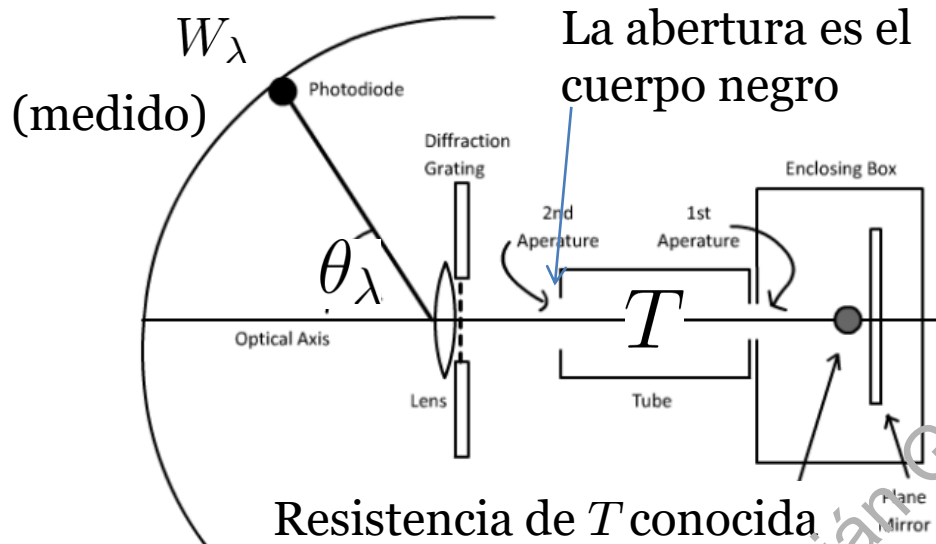


Consideremos una cavidad cuyas paredes están a una cierta temperatura. Los átomos que componen las paredes están emitiendo radiación EM y al mismo tiempo absorben la radiación emitida por otros átomos de las paredes.

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 en unidad de tiempo es igual a la que absorben. En consecuencia, la densidad de energía del campo electromagnético existente en la cavidad es constante.

A cada frecuencia (longitud de onda) corresponde una densidad de energía que depende solamente de la temperatura de las paredes y es independiente del material del que están hechas.

Espectro de emisión de un cuerpo negro

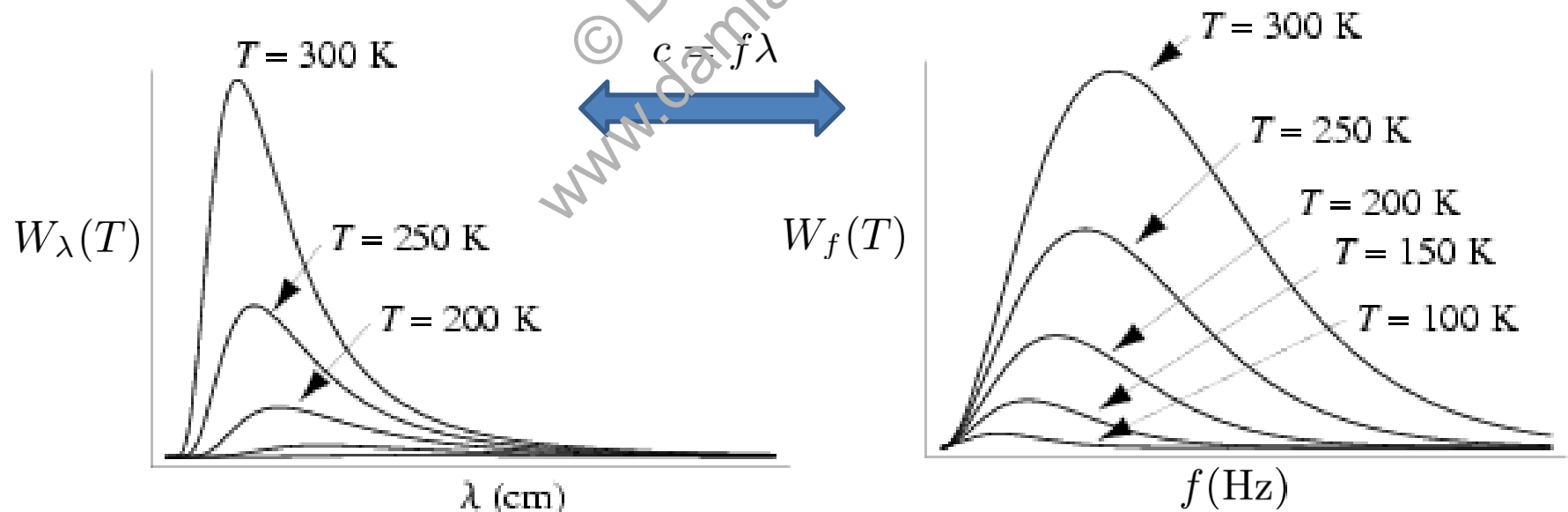


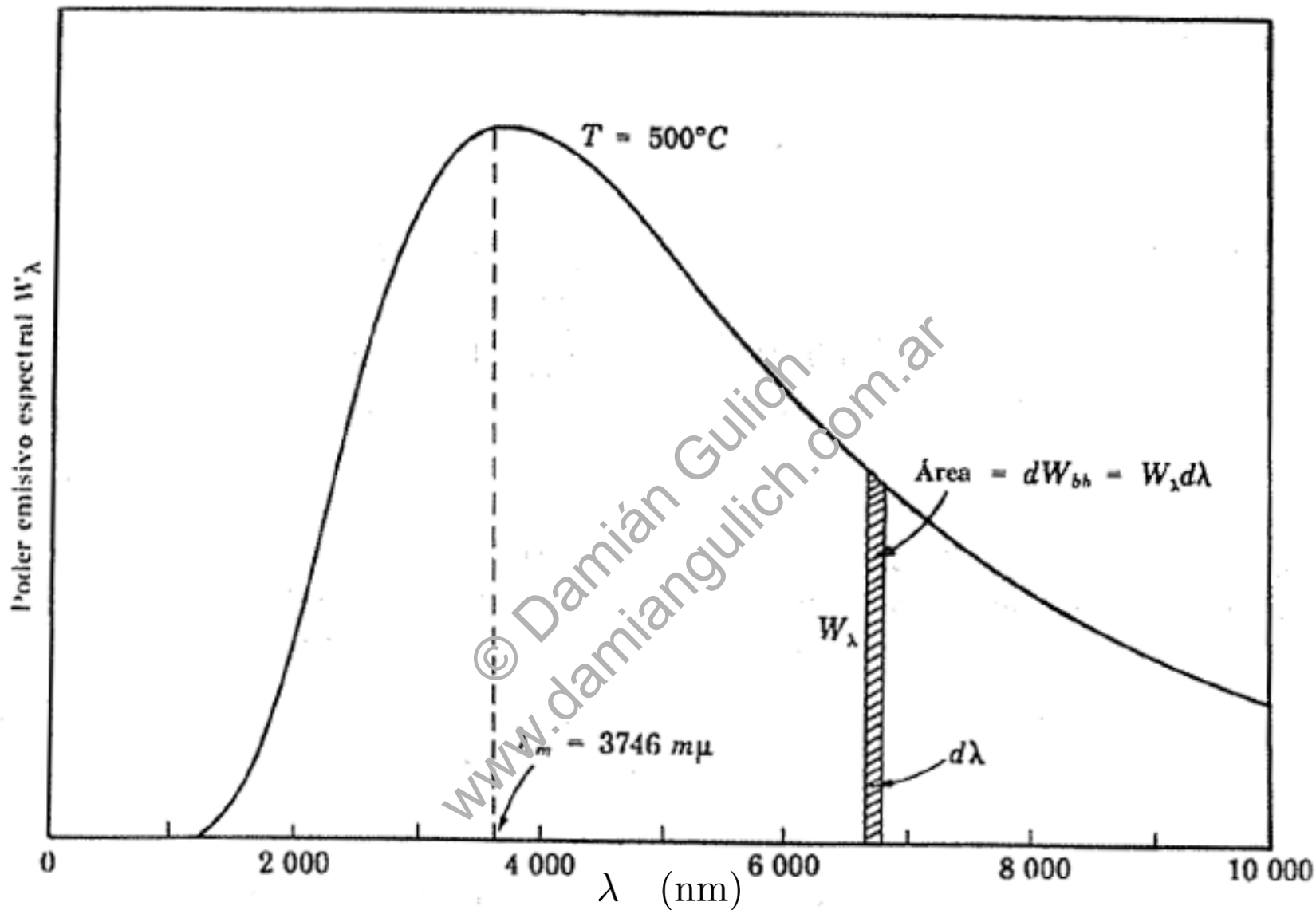
¿Cómo es la distribución de la energía que emite un cuerpo negro con la longitud de onda y la temperatura? Es conveniente representarla en términos del **poder emisor espectral** W_λ definido según:

$$dW_{CN} = W_\lambda d\lambda$$

$$[W_\lambda] = \frac{W}{m^3} \equiv \frac{W}{m^2 \cdot nm}$$

Las curvas dependen de la temperatura pero no del material emisor.



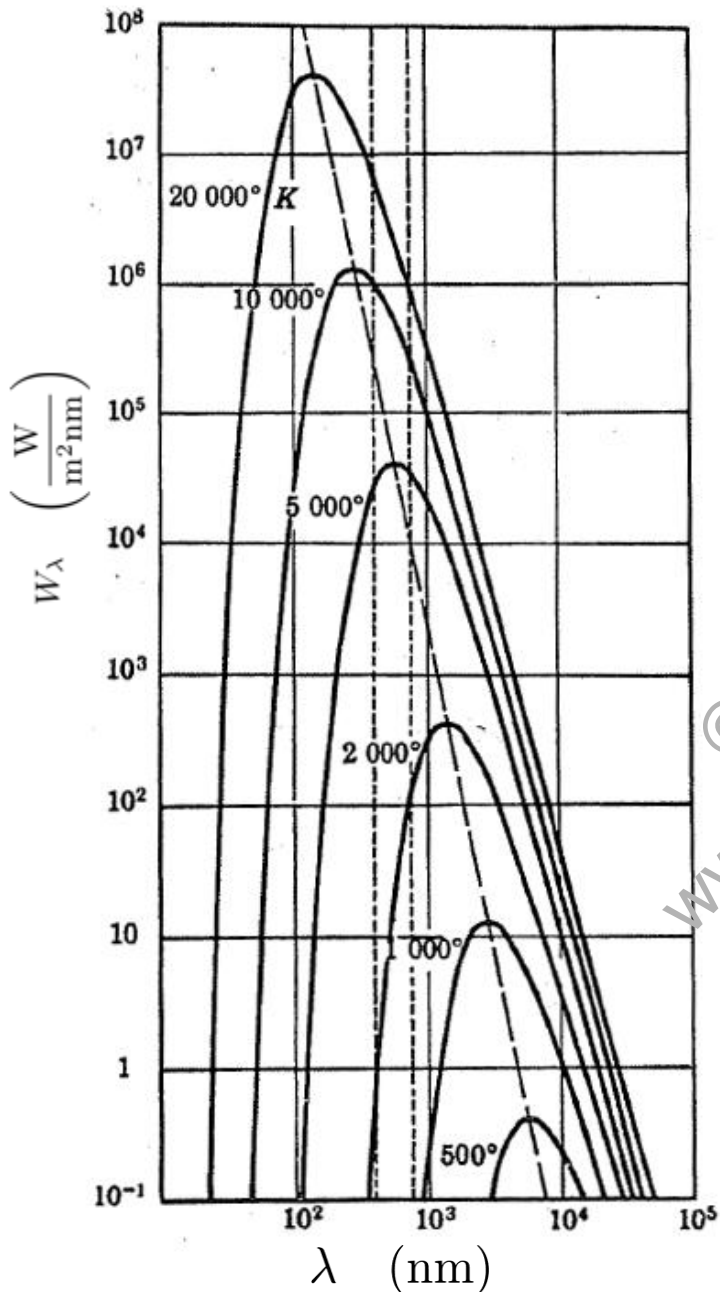


Poder emisorio espectral de un cuerpo negro a 500°C . El área de una pequeña franja vertical en una longitud de onda λ cualquiera representa la energía radiante emitida por unidad de área y por unidad de tiempo en el intervalo λ y $\lambda + d\lambda$.

8. 3.1 Cuerpo negro: Dos leyes empíricas

© Damian Guich
www.damianguich.com.ar

Ley de desplazamiento de Wien (1893)



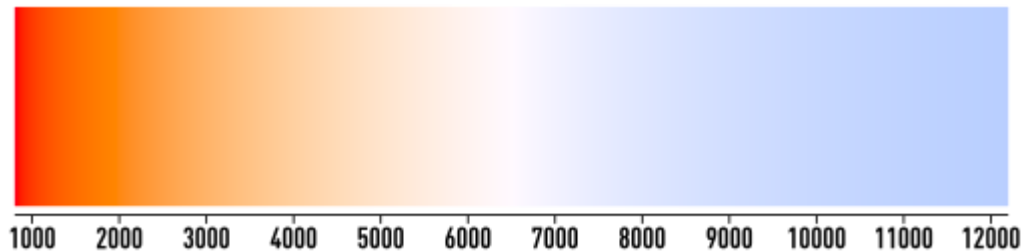
La primera propiedad empírica que enunciaremos es sobre la derivada de las curvas de W_λ (es entonces una propiedad local).

La longitud de onda del máximo de la curva ($\lambda_{\text{máx}}$) es inversamente proporcional a la temperatura. Se la encuentra con la **Ley de desplazamiento de Wien**:

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = C_{\text{Wien}}$$

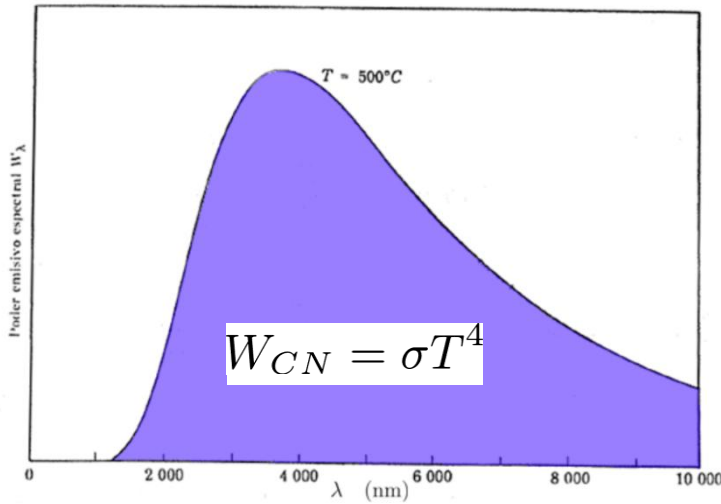
donde la **Constante de Wien** es

$$C_{\text{Wien}} = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



Color de un cuerpo negro de 800 K a 12200 K. Esta gama de colores se aproxima a la gama de colores de estrellas de diferentes temperaturas, tal como se ven o fotografían en el cielo nocturno.

Ley de Stefan-Boltzman (1835)



La segunda propiedad empírica que enunciaremos es sobre la integral de las curvas de W_λ (es entonces una propiedad global).

La **Ley de Stefan-Boltzmann** dice que la integral de W_λ (que es el poder emisor total del cuerpo negro W_{CN}) se vincula con la temperatura según

$$W_{CN} = \int_0^{\infty} W_\lambda d\lambda = \sigma T^4$$

Donde $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ es la *constante de Stefan-Boltzmann*

La Ley de Stefan-Boltzman y un cuerpo emisor cualquiera

Por la ley de Kirchhoff $\frac{W}{a} = \frac{W_{CN}}{1} = W_{CN} \Rightarrow W = a W_{CN}$

Un cuerpo emisor cualquiera $\xrightarrow{\text{blue arrow}}$

(A la misma temperatura)

La potencia total irradiada W por ese cuerpo es, según la Ley de Stefan-Boltzmann

$$W = a W_{CN} = a \sigma T^4$$

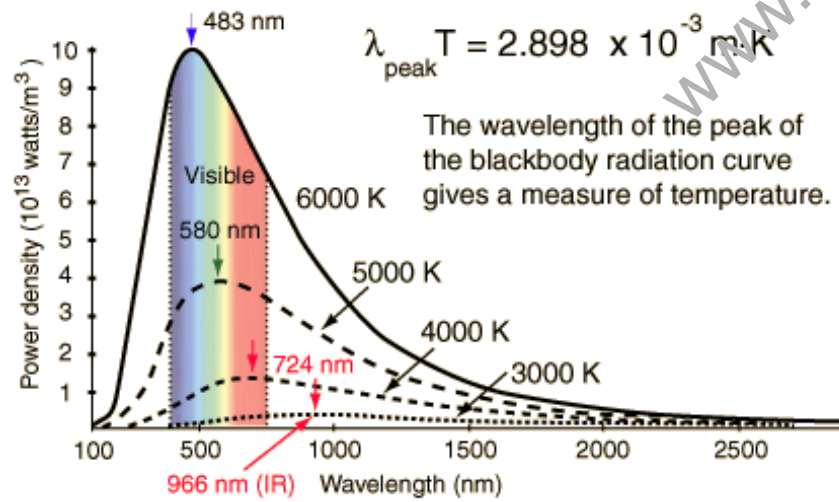
Desde este punto de vista, el poder absorbente a es igual a la razón del poder emisivo de una superficie al poder emisivo de un cuerpo negro a la misma temperatura ($a = W/W_{CN}$). Esta razón entonces recibe un nombre especial: la **emisividad** e de una superficie.

$$e = a = 1 - r$$

Por este motivo a veces se escribe

$$W = e \sigma T^4$$

Temperatura (K)	% infrarrojo	%visible	%ultravioleta
1000	99.999	$7.367 \cdot 10^{-4}$	$3.258 \cdot 10^{-11}$
2000	98.593	1.406	$7.400 \cdot 10^{-4}$
3000	88.393	11.476	0.131
4000	71.776	26.817	1.407
5000	55.705	39.166	5.129
6000	42.661	45.732	11.607
7000	32.852	47.506	19.641
8000	25.565	46.210	28.224
9000	20.154	43.247	36.599
10000	16.091	39.567	44.342



En la tabla, se se el porcentaje de la contribución de la radiación IR, visible y UV a la radiación de un cuerpo negro a las temperaturas indicadas.

Algunas observaciones sobre la tabla anterior

- A baja temp. prácticamente toda la radiación es infrarroja.
- A muy alta temp. la contribución de la radiación ultravioleta es cada vez mayor y la visible e infrarroja se hacen cada vez menores.
- La contribución radiación visible alcanza un máx. aprox a 7100° K.

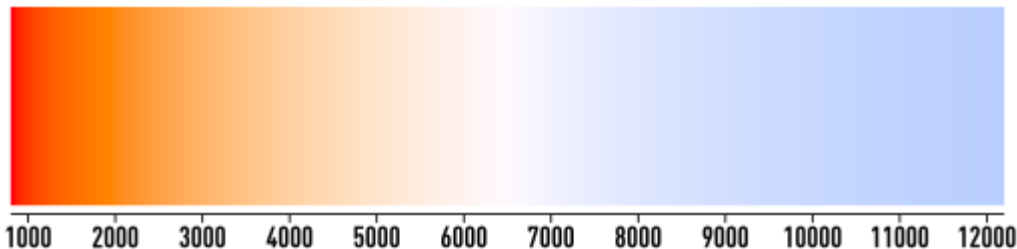
¿De qué depende el color de un cuerpo caliente?

A 2000 K un cuerpo emite luz visible pero la intensidad en el extremo rojo (baja frec., alta long. onda) del espectro visible es mucho mayor que la azul (alta frec., baja long. onda) y cuerpo aparece rojo brillante.

A 3000 K, la temp. aprox de un filamento lámpara incandescente, la cantidad relativa de luz azul ha aumentado, pero predomina aún la componente roja.

A 6000 K, que es aprox. la temp. Sol, la distribución es casi uniforme entre todas las comp. de la luz visible y el cuerpo aparece blanco brillante.

Por encima de 10000 K se emite luz azul con mayor intensidad que roja y un cuerpo (estrella caliente) a esta temperatura se ve azul.



Color de un cuerpo negro de 800 K a 12200 K. Esta gama de colores se aproxima a la gama de colores de estrellas de diferentes temperaturas, tal como se ven o fotografían en el cielo nocturno.

8. 3.2 Cuerpo negro: Dos desastres

© Damián Guich
www.damianguich.com.ar

Las leyes anteriores se pudieron explicar con los argumentos de la Física Clásica, pero **NO** la forma de la curva W_{λ} .

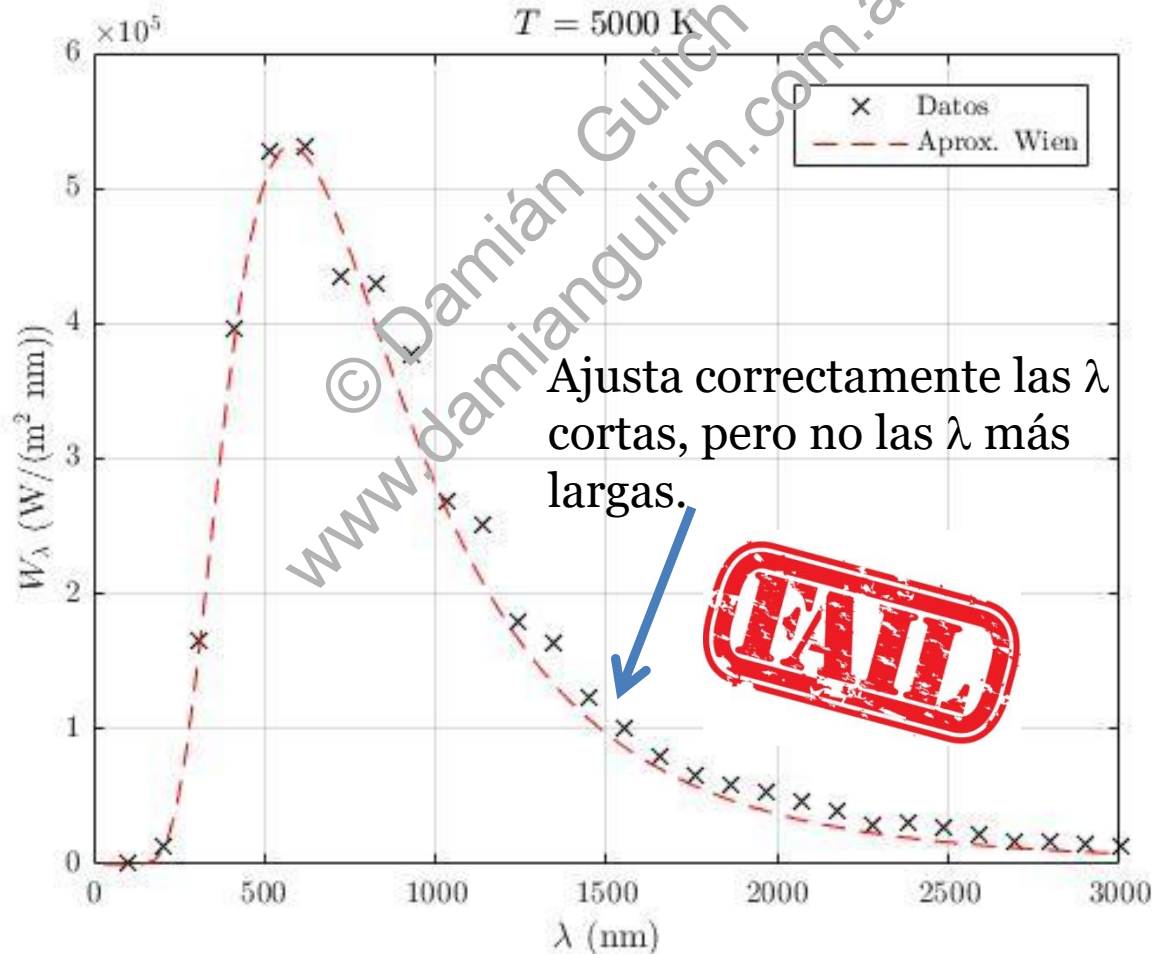
A pesar de que las leyes de Stephan-Boltzmann y de desplazamiento de Wien daban resultados correctos, todos los esfuerzos por deducir la forma del espectro desde la teoría clásica fallaron.



#1: Wien lo intenta de nuevo (1896)

En 1896 Wien propuso una expresión conjetural empírica para ajustar la curva de la distribución espectral del cuerpo negro según:

$$W_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}}$$



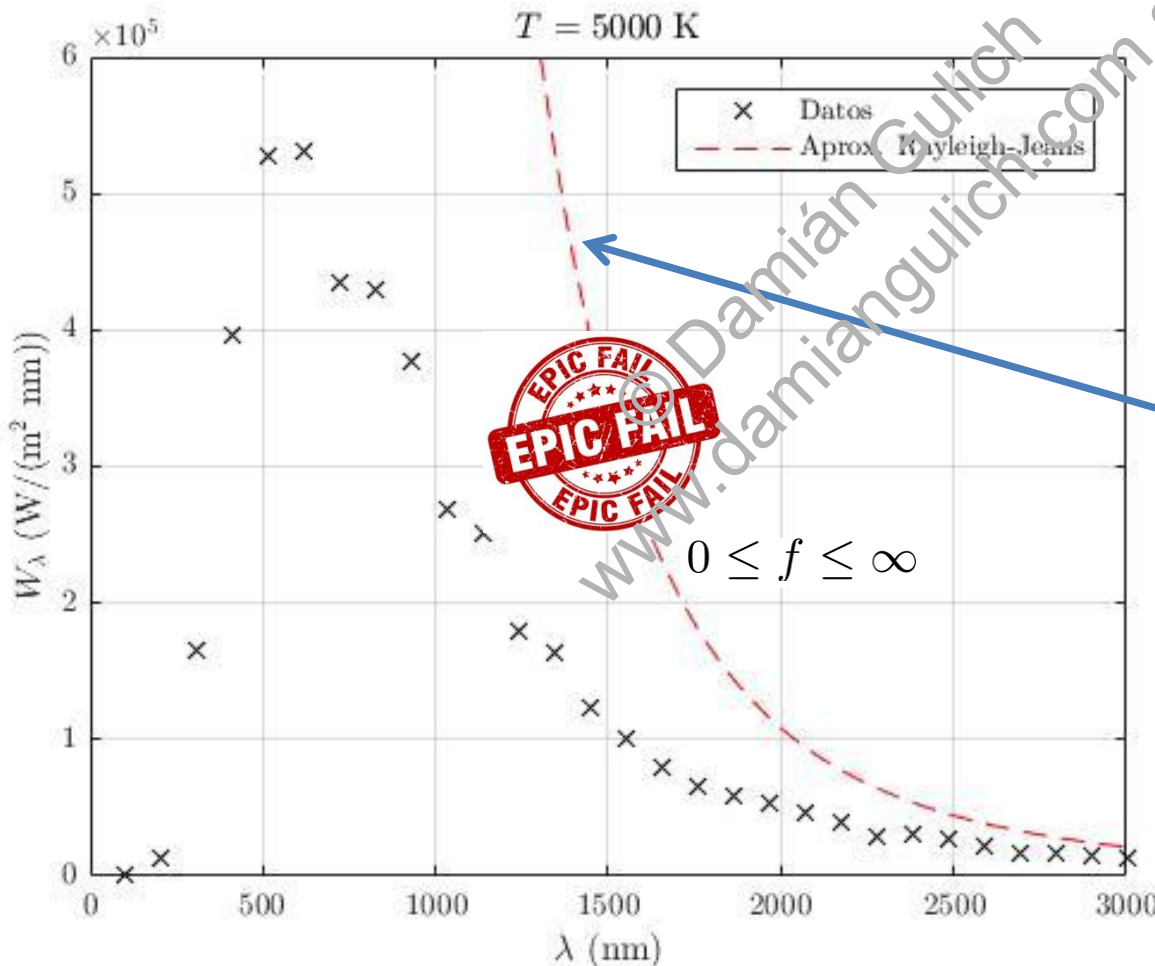
#2: Rayleigh y Jeans (1900)

Lord Rayleigh utiliza la teoría clásica del electromagnetismo y la termodinámica para demostrar que la distribución espectral de cuerpo negro debería ser según:

$$W_{\lambda} = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Constante de Boltzmann



Para longitudes de onda grandes reproduce los resultados experimentales.

Para $\lambda \rightarrow 0$ **fracasa**, prediciendo en conjunto energía total por unidad de volumen infinita, esto se conoció como la **catástrofe del ultravioleta**.

8. 3.3 Cuerpo negro: La solución de Planck

© Damían Guich
www.damianguich.com.ar

El nacimiento de la Mecánica Cuántica (1900)

Históricamente, el nacimiento de la Mecánica Cuántica se sitúa en el momento en el que Max Planck explica el mecanismo que hace que los átomos radiantes produzcan la distribución de energía observada para el cuerpo negro.

Para explicar W_λ , tuvo que hacer las siguientes hipótesis

- La radiación dentro de la cavidad está en equilibrio con los átomos de las paredes que se comportan como osciladores armónicos de frecuencia dada f .
- Cada oscilador puede absorber o emitir energía de la radiación en una cantidad proporcional a f . Cuando un oscilador absorbe o emite radiación EM, su energía aumenta o disminuye en una cantidad hf .
- La segunda hipótesis de Planck, establece que la energía de los osciladores está **cuantizada**. La energía que un oscilador de frecuencia f puede absorber o emitir sólo puede tener ciertos valores discretos que son $0, hf, 2hf, 3hf \dots nhf$. El número n es el **número cuántico**.
- Si el oscilador permanece en un estado cuántico estacionario NO absorbe ni emite energía.

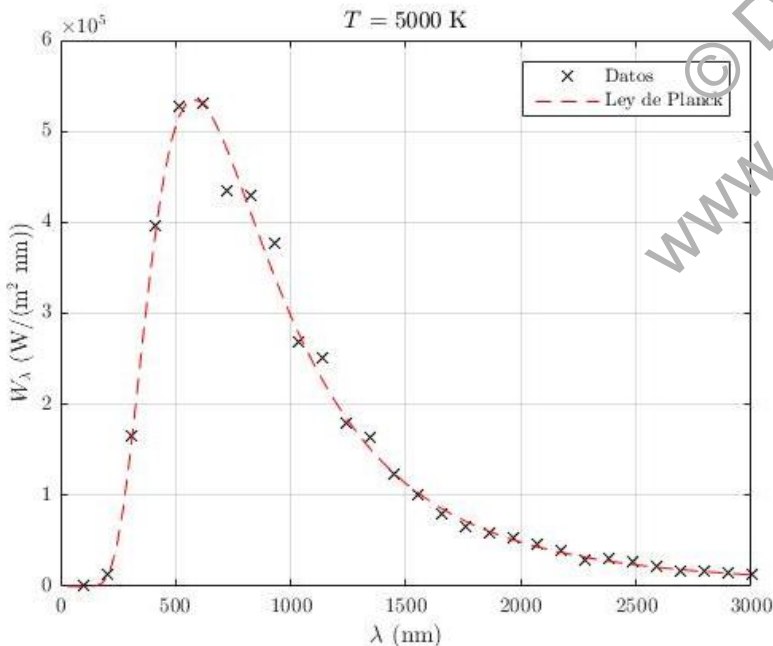
Ley de radiación de Planck (1900)

Planck pudo derivar teóricamente la Ley de Radiación.

Sus hipótesis rompen por primera vez la continuidad de los procesos físicos. (Planck fue Premio Nobel en 1918). Planck encontró una nueva expresión que ajusta extraordinariamente bien la forma de la curva experimental:

$$W_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1 \right]}$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Constante de Planck



Para λ grande:

$$W_{\lambda} \rightarrow \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

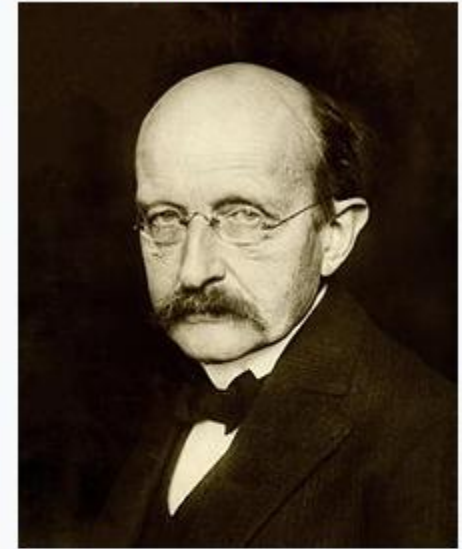
De acuerdo con la ley de Rayleigh-Jeans

Para $\lambda \rightarrow 0$:

$$W_{\lambda} \rightarrow 0$$

Se evita la catástrofe ultravioleta

Max Planck



Planck in 1933

Born	Max Karl Ernst Ludwig Planck 23 April 1858 Kiel, Duchy of Holstein
Died	4 October 1947 (aged 89) Göttingen, Lower Saxony, Germany
Nationality	German
Alma mater	Ludwig Maximilian University of Munich
Known for	Planck constant Planck postulate Planck's law of black body radiation Third law of thermodynamics Fokker–Planck equation

Más éxitos de la Ley de radiación de Planck

- A partir de la distribución espectral W_λ de Planck se reproduce la Ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} T = \frac{hc}{4,965k}$$

- Y también la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$W_{CN} = \int_0^\infty W_\lambda d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{con} \quad \sigma = \frac{8\pi^2 k^4}{15h^3 c^3}$$

A partir de ellas se determina el valor de la **constante de Planck**:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Algunos comentarios

- El trabajo de Plank comenzó como una hipótesis para ajustar los datos experimentales.
- La hipótesis de que la energía era emitida y absorbida en “cuantos” de hf ha resultado ser una afirmación fundamental sobre la naturaleza.
- La cantidad h , lejos de ser un simple parámetro de ajuste, ha demostrado ser una de las constantes universales de la física.