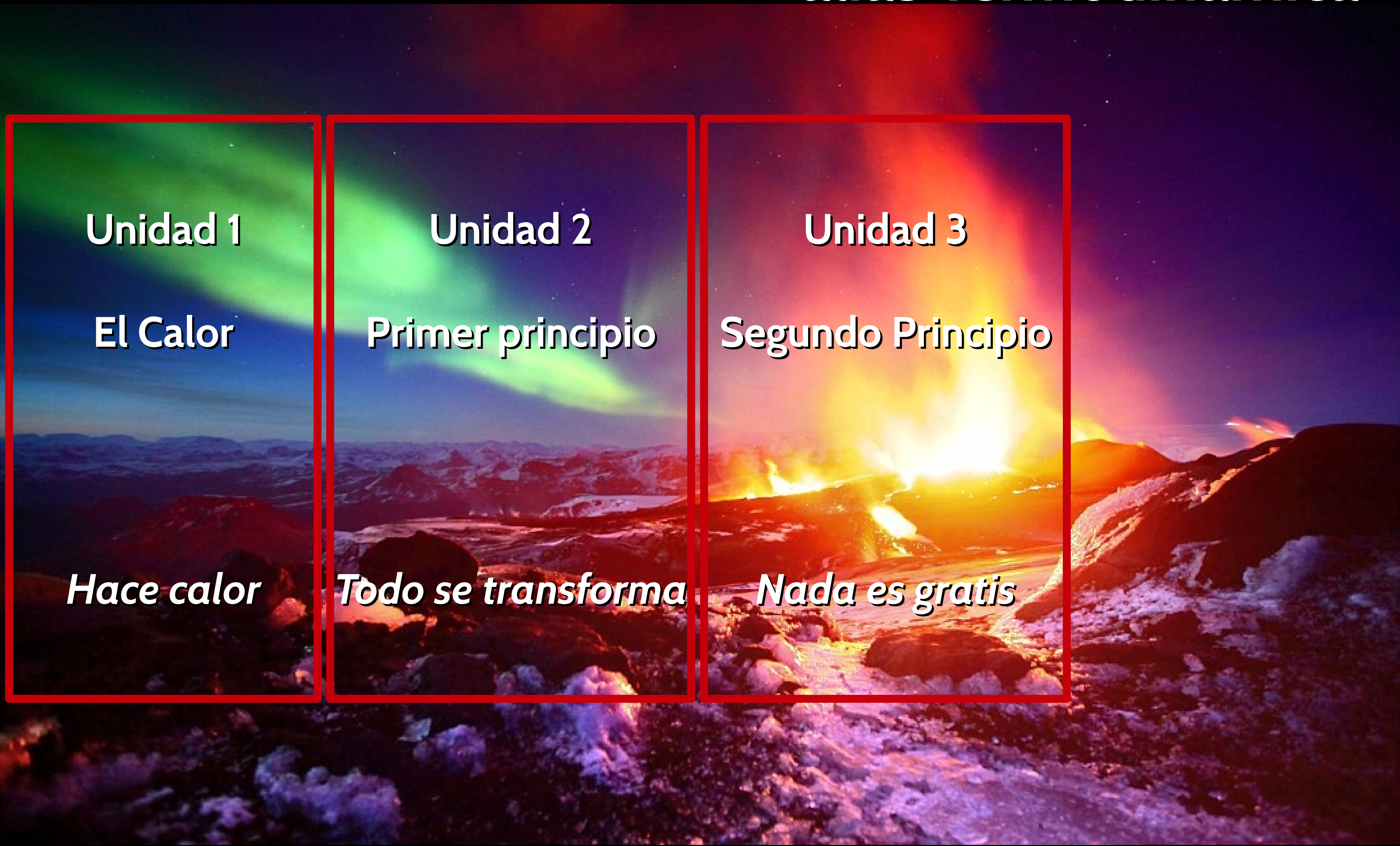
- **Unidad** 04 – Aplicaciones
- **Clase** U04 C02 – 25/29
- **Cont** Procesos de transferencia de calor
- **Cátedra** Asorey
- **Web** https://campusbimodal.unrn.edu.ar/course/view.php?id=24220

Contenidos: B5331 Física IIIB 2022
alias Termodinámica

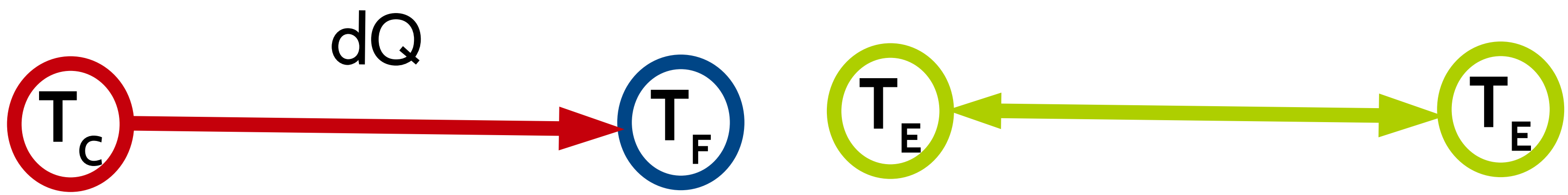


Unidad 04: Aplicaciones
Del 07/Jun al 23/Jun (6 encuentros)

Transferencia de calor: radiación, conducción y convección. Ley de Newton. Conductores y aislantes del calor. Ley de Fourier. Aplicaciones hogareñas. Termodinámica de la vida. Energía y humanidad. Efecto invernadero. Cambio climático y calentamiento global.

Entrega guía 04: Jueves 23/Jun 23:59

Observaciones empíricas



- El cuerpo caliente (emisor) entrega calor y se enfría. El cuerpo frío (receptor), recibe calor y se calienta

$$T_C \equiv T_c(t),\ \frac{dT_c}{dt} < 0 \qquad T_f \equiv T_f(t),\ \frac{dT_f}{dt} > 0$$

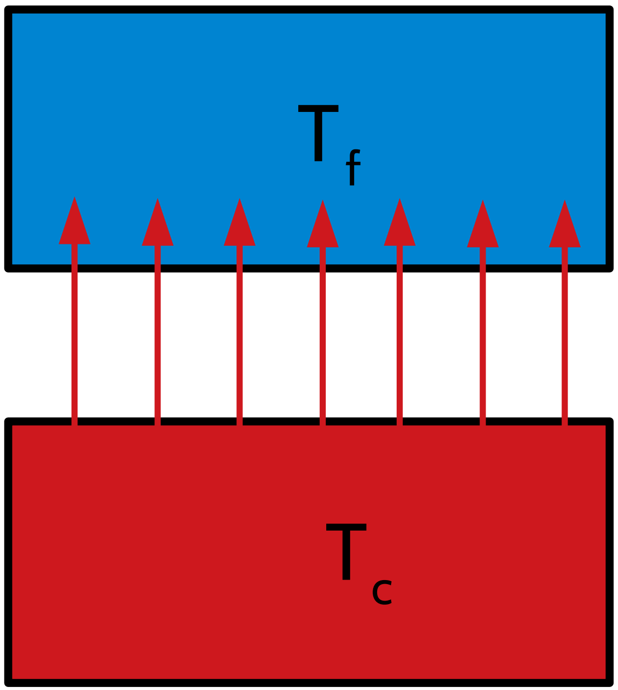
- Mientras exista diferencia de temperatura entre objetos vecinos, la transferencia de calor no puede detenerse.

$$\text{Sí}\quad \Delta T(t) \overset{\text{def}}{=} T_c(t) - T_f(t) > 0 \rightarrow dQ > 0$$

- La velocidad de transferencia tiende a cero a medida que las temperaturas de ambos cuerpos se igualan:

$$\lim_{\Delta T(t) \rightarrow 0} \frac{dQ}{dt} = 0$$

Ley de enfriamiento



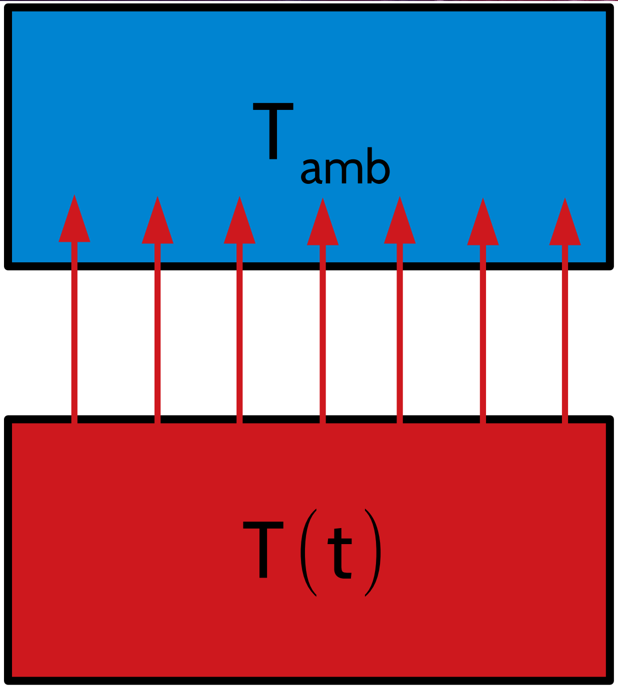
$$\frac{dQ}{dt} \propto A\left(T_c - T_f\right)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -hA\left(T_c - T_f\right)$$

- Imaginemos una región caliente y una fría
- ¿Qué variables determinan el flujo de calor? $\frac{dQ}{dt}$
  - ¿Área de contacto? A
  - ¿Diferencia de temperatura?
  - ¿Materiales?
  - h es el coeficiente de transferencia de calor: [h] = W / (m^2 K)

El signo – aparece porque miramos el enfriamiento!

Ley de enfriamiento de Newton



$$\frac{dT(t)}{dt} = -r\left(T(t) - T_{amb}\right) = -r\,\Delta T(t)$$

$$r = \left(\frac{hA}{mC_V}\right) > 0 \qquad \tau \overset{\text{def}}{=} r^{-1} = \left(\frac{mC_V}{hA}\right)$$

$$[r] = s^{-1} \qquad [\tau] = s$$

τ es un tiempo característico

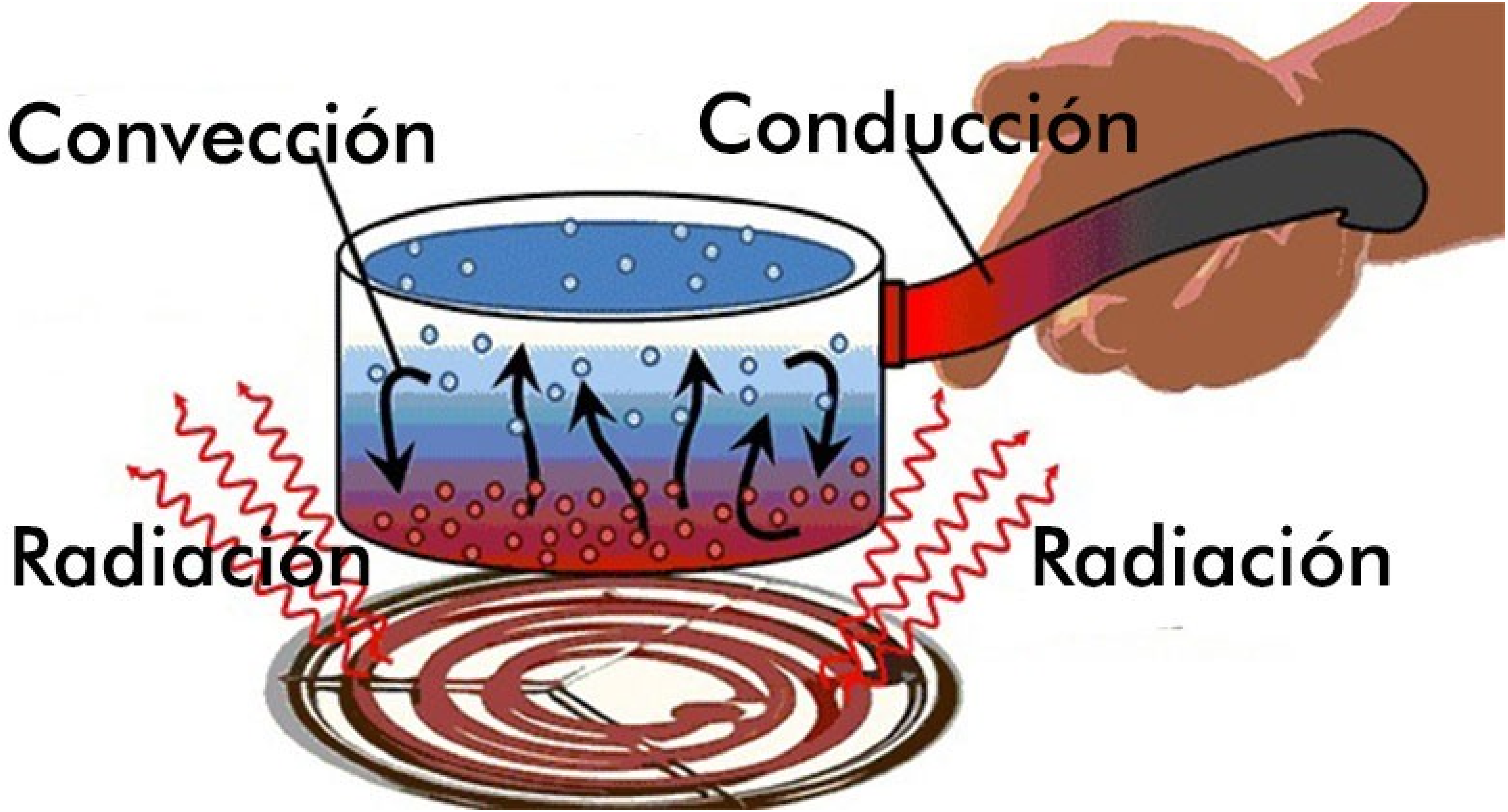
(depende del sistema)

$$\frac{dT(t)}{dt} = -r\,\Delta T(t)$$

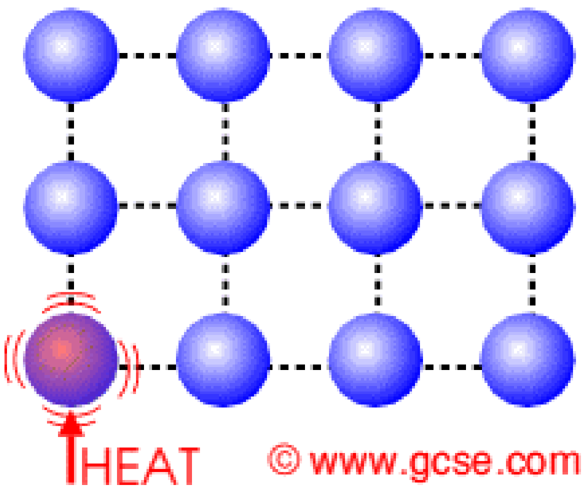
$$\boxed{\Delta T(t) = \Delta T(0)\,e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

$$\boxed{T(t) = T_{amb} + \left(T(0) - T_{amb}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

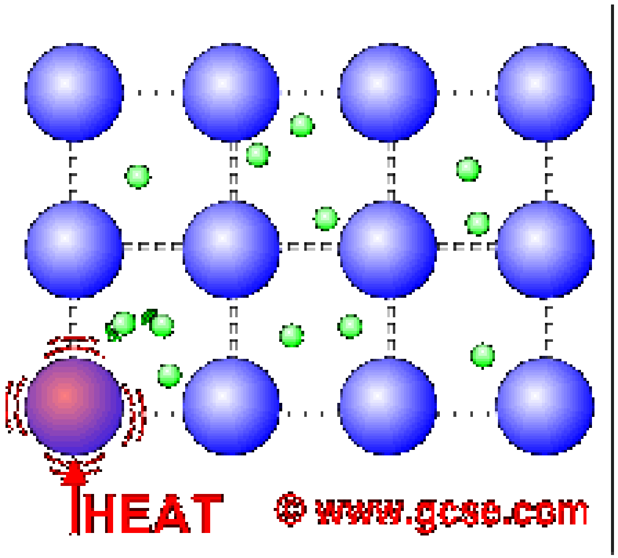
Conducción, convección y radiación

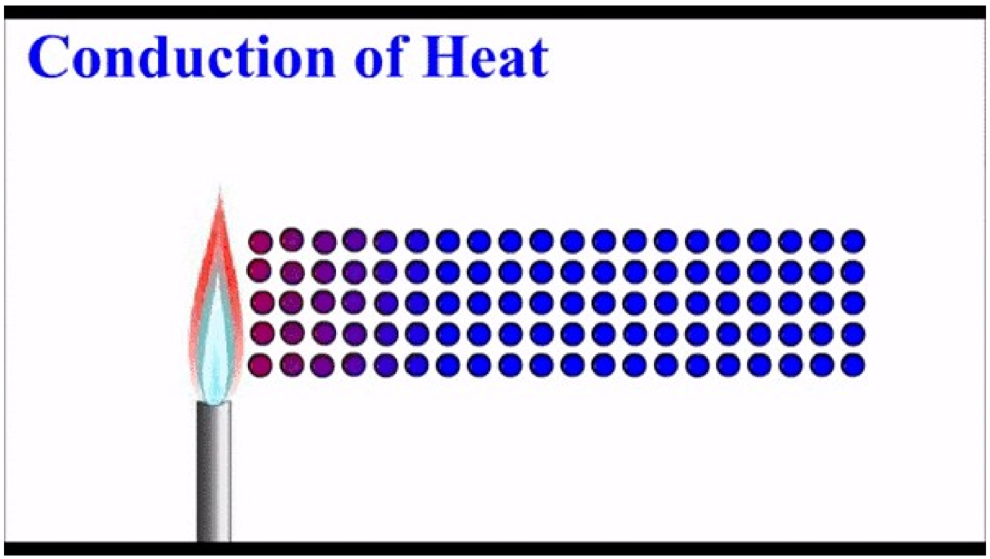


Aislante



Conductor



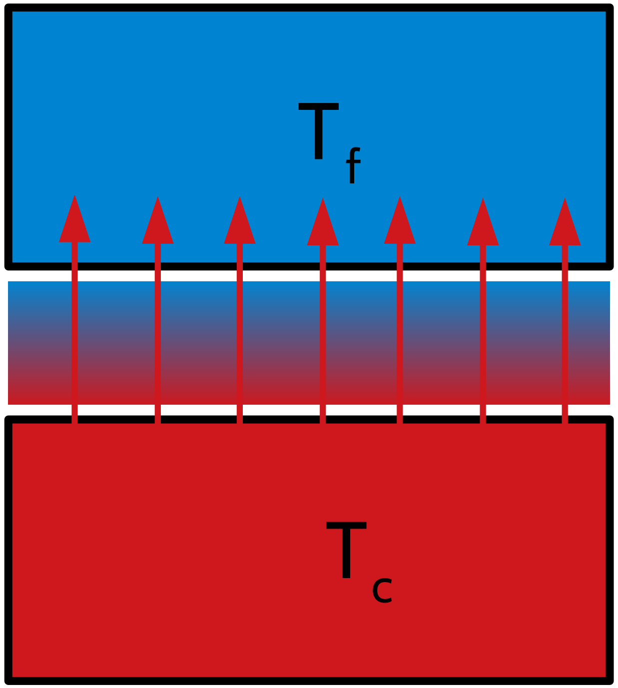


Conducción de calor

En gases

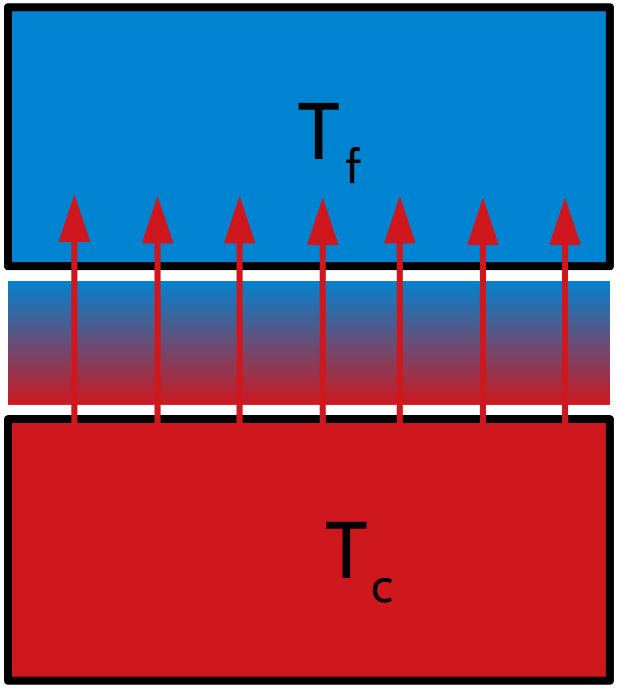
- La distancia entre las moléculas o átomos es mayor que en otros medios →
  - menor tasa de colisiones → menor conducción.
- Aumenta con la temperatura.
- Aumenta con la presión, hasta un punto crítico:
  - Cuando la densidad del gas es muy alta las moléculas están inhibidas de transferir calor.
  - Más allá de ese punto la conductividad aumenta sólo ligeramente al aumentar la presión y la densidad.

Conductividad térmica



- Imaginemos una región caliente y una fría, separadas por una región de transición
- ¿Qué variables determinan el flujo de calor?
  - ¿Área de contacto? A
  - ¿Diferencia de temperatura? $(T_c - T_f)$
  - ¿Materiales? (k)
  - ¿Espesor de la transición? (d)

Conductividad térmica



$$\frac{dQ}{dt} \propto \frac{A}{d}\left(T_c - T_f\right)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \kappa \frac{A}{d}\left(T_c - T_f\right)$$

- Imaginemos una región caliente y una fría…

  …separadas por una región de transición

- ¿Qué variables determinan el flujo de calor?
  - ¿Área de contacto? A
  - ¿Diferencia de temperatura? $(T_c - T_f)$
  - ¿Materiales? (κ)
  - ¿Espesor de la región de transición? (d)

Ley de Fourier

- El flujo de calor por conducción entre una región caliente (T_c) y una fría (T_f) está dado por:

$$I_Q \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dQ}{dt} = \kappa \frac{A}{d}\left(T_c - T_f\right) \rightarrow I_Q = \kappa \frac{A}{d}\left(T_c - T_f\right)$$

- **κ es el coeficiente de conductividad térmica**

$$[\kappa] = \frac{J\,m}{m^2\,s\,K} = \frac{W}{m\,K}$$

- **cantidad de calor transferida por unidad de área, unidad de tiempo por un material de espesor unitario cuando la diferencia de temperatura entre sus caras es de 1 K.**

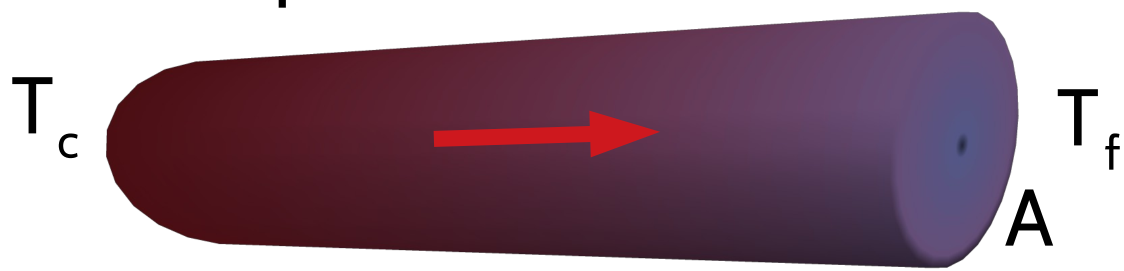
$\kappa \rightarrow$ sólo depende del material

$k>10$ → conductores, $k<1$ → aislantes

Material	k	Material	k	Material	k
Acero	47-58	**Corcho**	0,03-0,04	**Mercurio**	83,7
Agua	0,58	**Estaño**	64,0	**Mica**	0,35
Aire	0,02	**Lana de vidrio**	0,03-0,07	**Níquel**	52,3
Alcohol	0,16	**Glicerina**	0,29	**Oro**	308,2
Alpaca	29,1	**Hierro**	80,2	**Parafina**	0,21
Aluminio	209,3	**Ladrillo**	0,80	**Plata**	406,1-418,7
Amianto	0,04	**Ladrillo refractario**	0,47-1,05	**Plomo**	35,0
Bronce	116-186	**Latón**	81-116	**Vidrio**	0,6-1,0
Zinc	106-140	**Litio**	301,2	**Cobre**	372,1-385,2
Madera	0,13	**Tierra húmeda**	0,8	**Diamante**	2300

Aplicación: resistencia térmica

- Barra de longitud L, sección A y de conductividad k, aislada en su superficie salvo en los extremos



- El flujo de calor está dado por la Ley de Fourier

$$I_Q \overset{def}{=} \frac{dQ}{dt} = \underbrace{\left(\kappa \frac{A}{L}\right)}_{\overset{def}{=} R^{-1}} \Delta T \rightarrow I_Q = \Delta T \frac{1}{R}$$

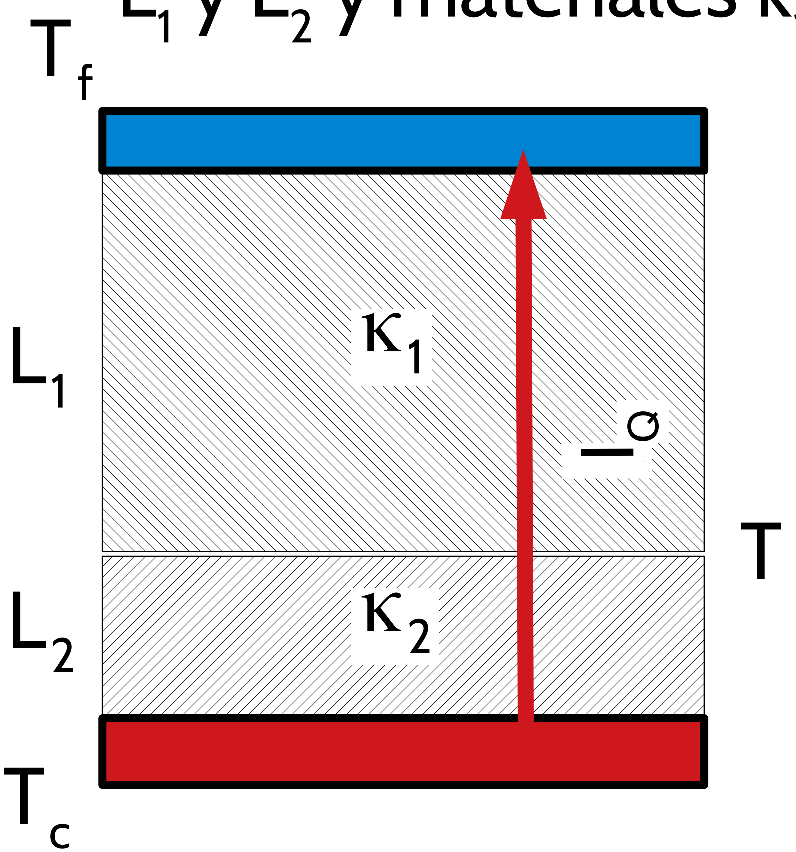
$$\boxed{\Delta T = I_Q R}$$

Ley de Ohm

$$V = iR$$

Aplicación: aislación en paredes

- Pared de área A compuesta por dos placas de espesores L_1 y L_2 y materiales k_1 y k_2., a temperaturas T_c y T_f.



- Las T_c y T_f se mantienen constantes (fuentes de calor)
- ¿Cuál es la temperatura T en la región de transición una vez se alcanzó el estado estacionario?

Resistencia en serie

$$I_{q_1} = \underbrace{\frac{k_1}{L_1} A}_{R^{-1}} (T - T_f) \qquad I_{q_2} = \frac{k_2}{L_2} A (T_c - T)$$

En el estacionario: $I_{Q_1} = I_{Q_2} \Rightarrow \frac{k_1}{L_1} \cancel{A} (T - T_f) = \frac{k_2}{L_2} \cancel{A} (T_c - T)$

$$\Rightarrow \frac{k_1}{L_1} T - \frac{k_1}{L_1} T_f = \frac{k_2}{L_2} T_c - \frac{k_2}{L_2} T \Rightarrow \left(\frac{k_1}{L_1} + \frac{k_2}{L_2}\right) T = \frac{k_2}{L_2} T_c + \frac{k_1}{L_1} T_f$$

$$\Rightarrow \left(\frac{k_1 L_2 + k_2 L_1}{\cancel{L_1} \cancel{L_2}}\right) T = \frac{k_2 L_1 T_c + k_1 L_2 T_f}{\cancel{L_1} \cancel{L_2}} \Rightarrow \boxed{T = \frac{k_2 L_1 T_c + k_1 L_2 T_f}{k_1 L_2 + k_2 L_1}}$$

<u>Otra forma:</u>

$$I_{q_1} = \frac{T - T_f}{R_1} \quad y \quad I_{Q_2} = \frac{T_c - T}{R_2} \Rightarrow \frac{T - T_f}{R_1} = \frac{T_c - T}{R_2} \Rightarrow T R_2 - T_f R_2 = T_c R_1 - T R_1$$

$$\Rightarrow T(R_1 + R_2) = T_c R_1 + T_f R_2 \Rightarrow \boxed{T = \frac{T_c R_1 + T_f R_2}{R_1 + R_2}}$$

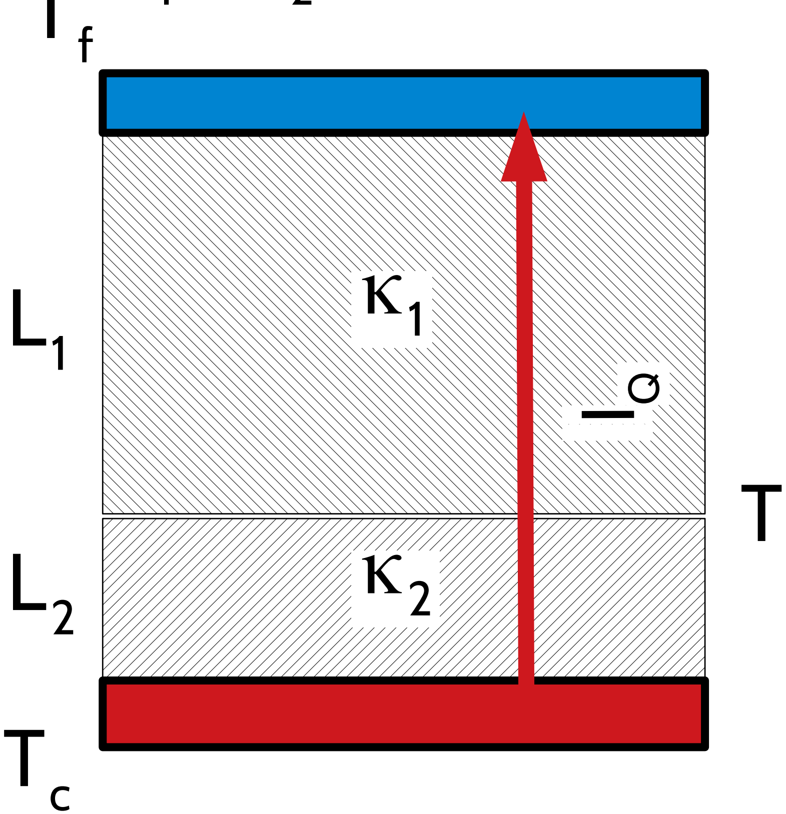
$$y \ I_{Q_1} = \frac{1}{R_1}\left[\frac{T_c R_1 + T_f R_2}{R_1 + R_2} - T_f\right] = \frac{1}{R_1}\left[\frac{T_c R_1 \cancel{+ T_f R_2} - T_f R_1 \cancel{- T_f R_2}}{R_1 + R_2}\right] = \frac{1}{\cancel{R_1}} \frac{(T_c - T_f)\cancel{R_1}}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_{Q_1} = (T_c - T_f) / R_1 + R_2} \qquad \Rightarrow \boxed{R_{ef} = R_1 + R_2}$$

U04-C03-2

Aplicación: aislación en paredes

- Pared de área A compuesta por dos placas de espesores L_1 y L_2 y materiales k_1 y k_2., a temperaturas T_c y T_f.



$$R_i = \frac{L_i}{\kappa_i A} \rightarrow T = \frac{T_c R_1 + T_f R_2}{R_1 + R_2}$$

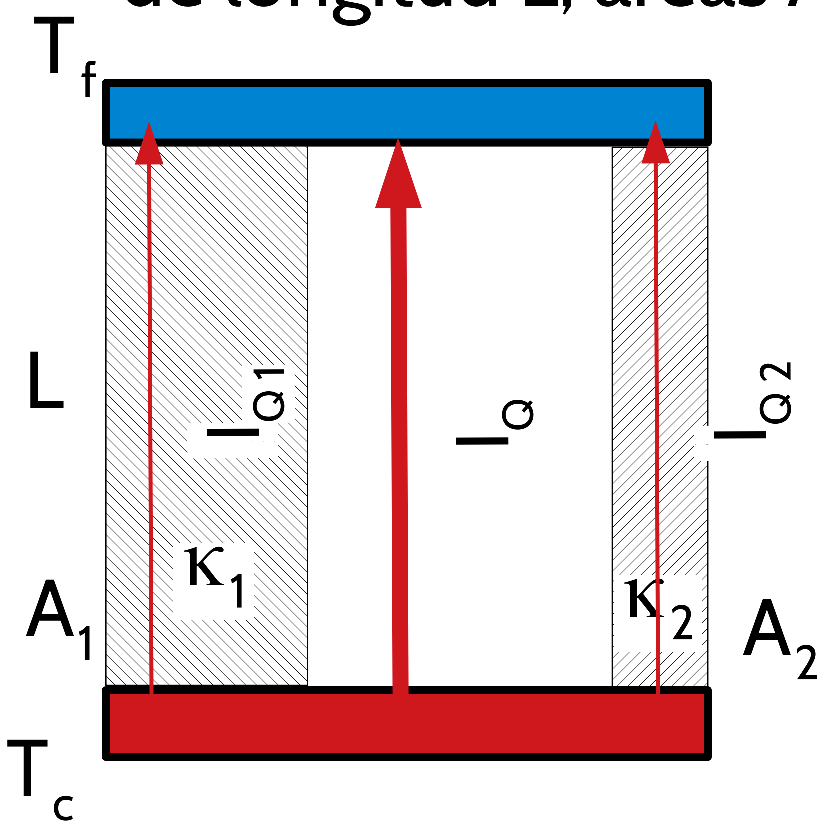
$$I_Q = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2} \rightarrow \Delta T = I_Q R_{eq}$$

Resistencias térmicas en serie

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^{N} R_i$$

Aplicación: conductos de calor

- Conector térmico entre T_c y T_f compuesto por dos barras de longitud L, áreas A_1 y A_2 y materiales k_1 y k_2



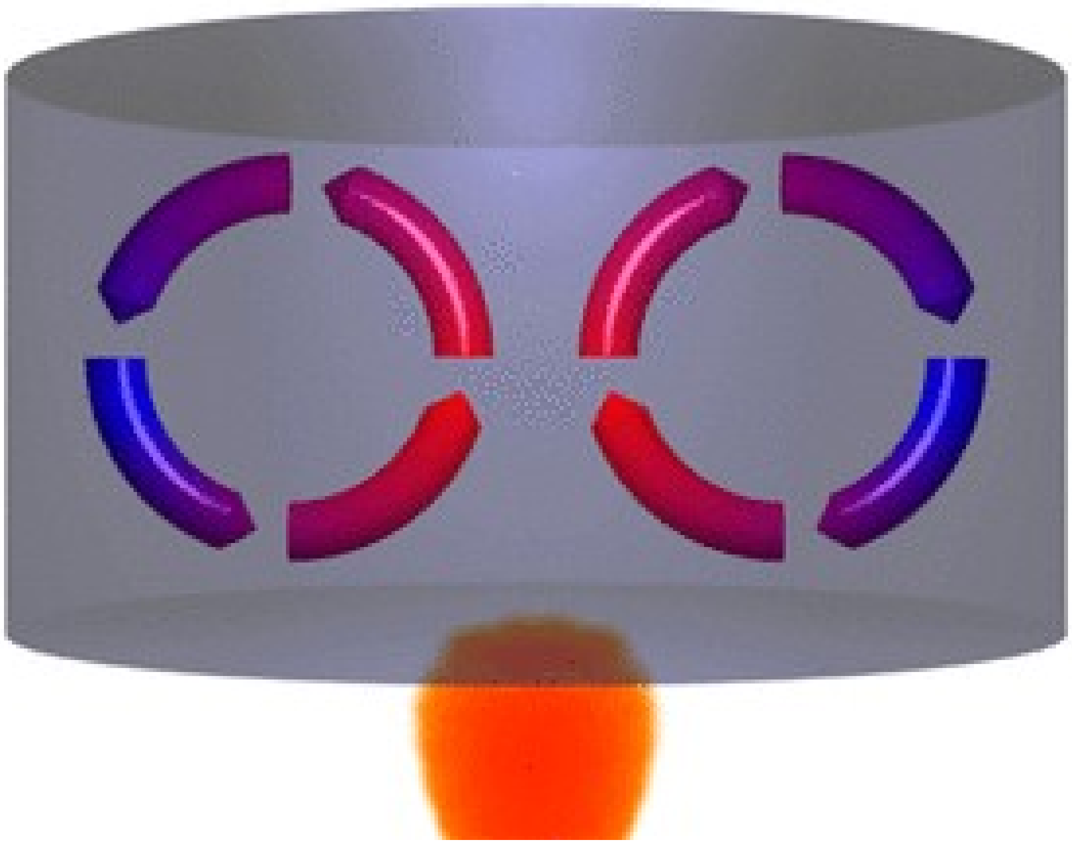
$$R_i = \frac{L_i}{\kappa_i A}, \quad I_{Qi} = \frac{\Delta T}{R_i}, \quad I_Q = \sum_{i=1}^{N} I_{Qi}$$

Resistencias térmicas en paralelo

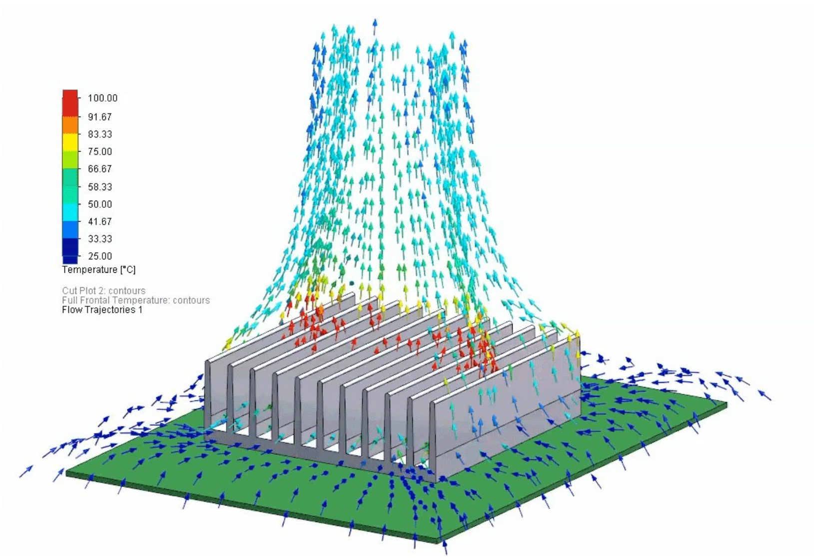
$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{R_i}$$

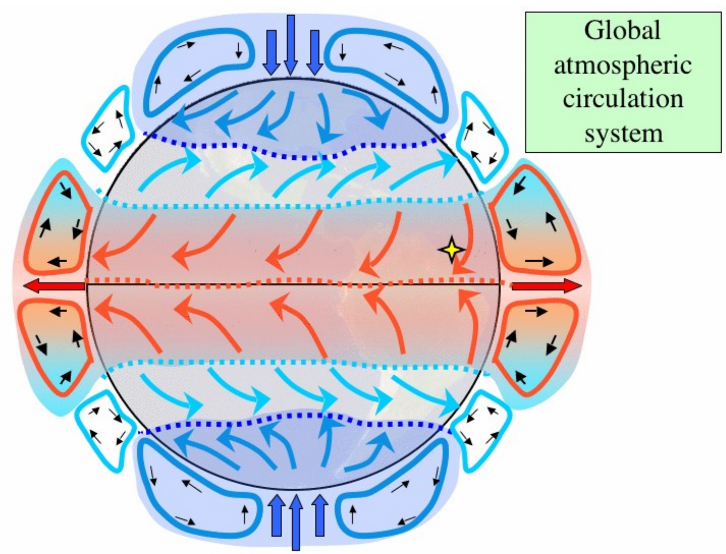
Transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido en contacto con zonas a diferentes temperaturas

calor → cambio de densidad → empuje → flotación

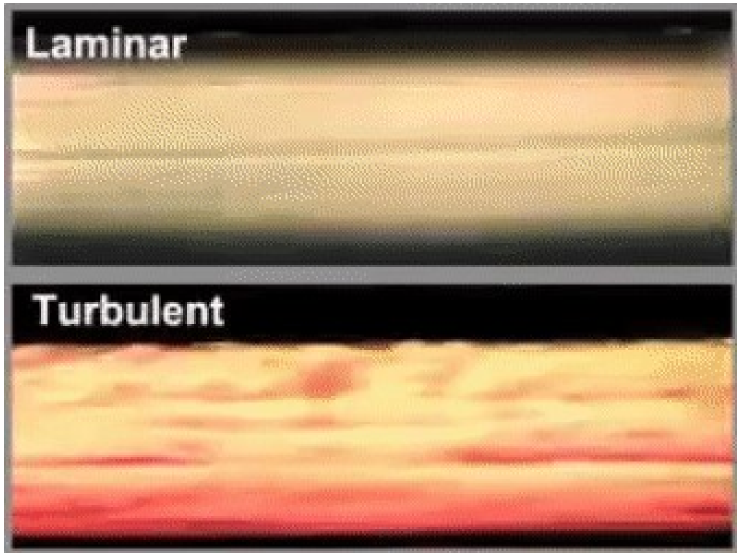


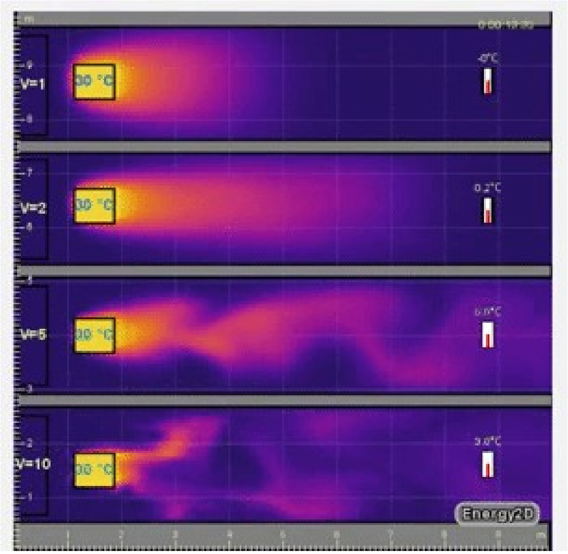
Celdas convectivas





Flujo laminar y turbulento



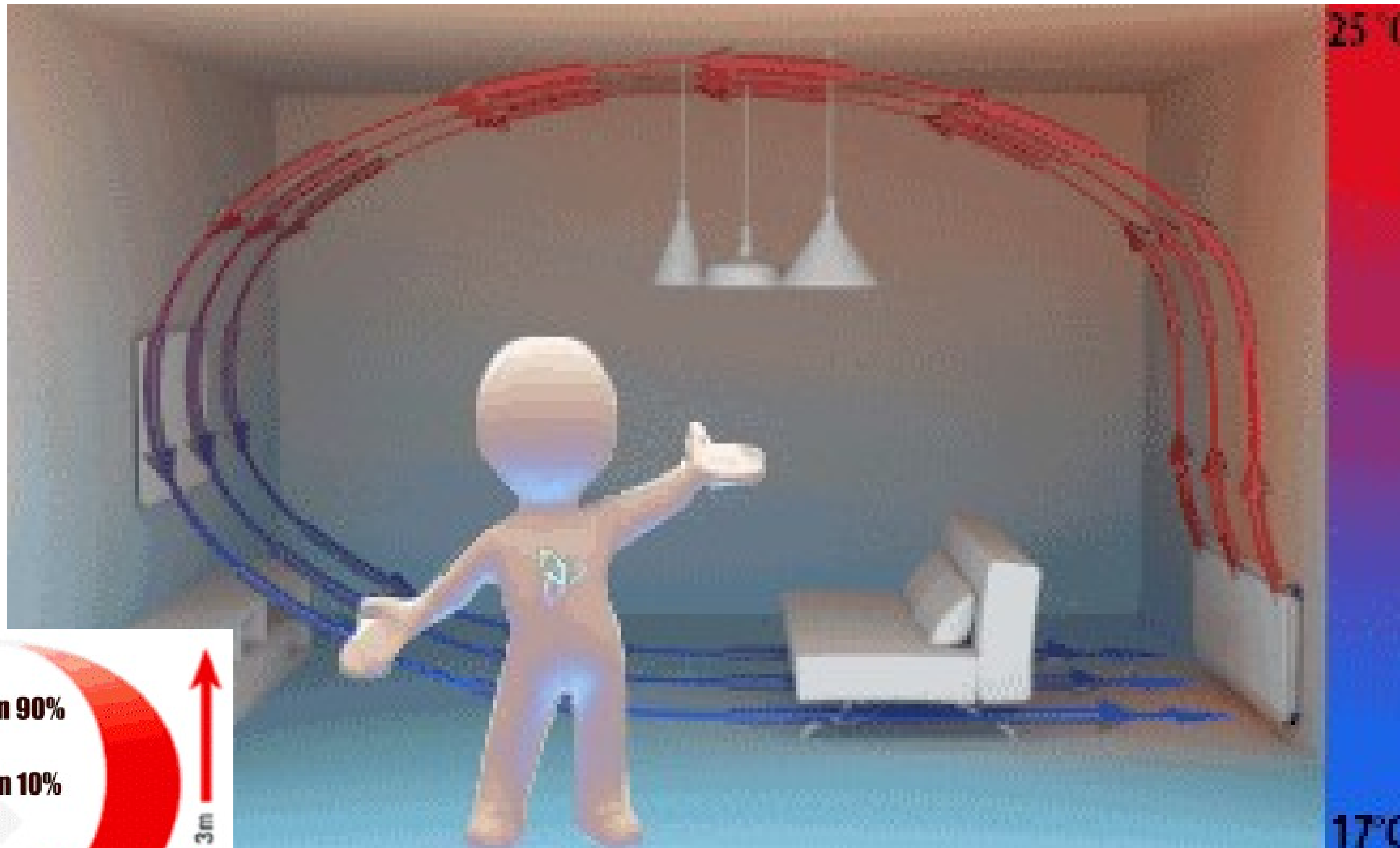


Transición a flujo turbulento

Aplicación: radiadores de calefacción

- ¿Son radiadores?
- En realidad son "conductores+radiadores+convectores"
- ¿Cuánto radian? Acordarse de T^4.

Convección

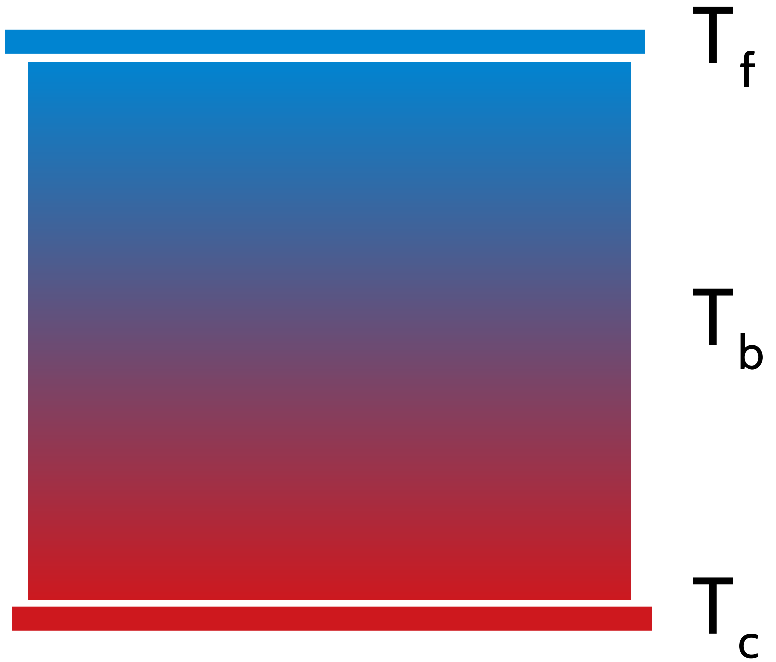


Transferencia por convección: ¿de qué depende?

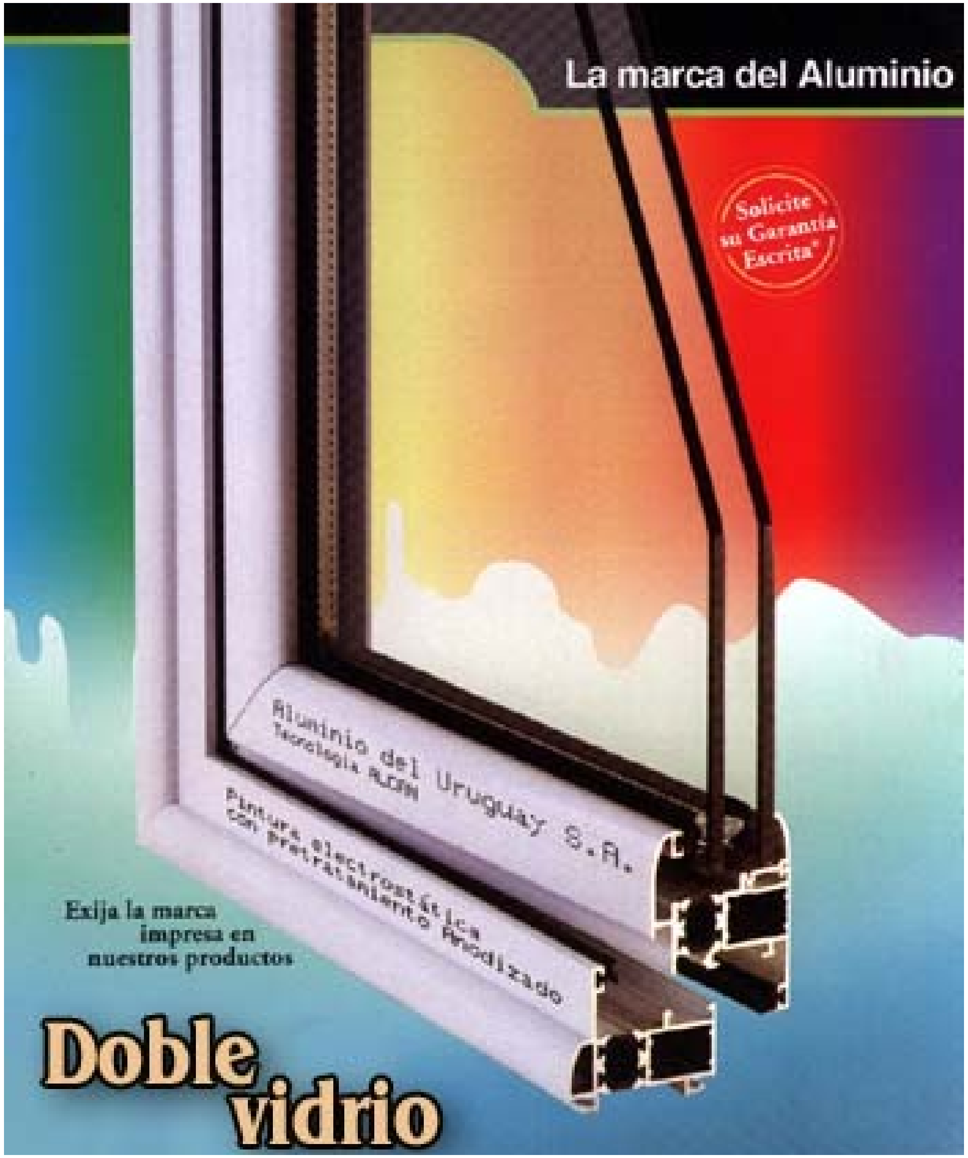
- Tasa de transferencia: $\frac{dQ}{dt}$
- ¿Qué pasa si aumento el **área de contacto**?
- ¿Qué pasa si aumento la **diferencia de temperatura**?
- ¿de qué más dependerá? Ignorancia → Lew de Newton

$$\frac{dQ}{dt} = h\,A\,(T_c - T_b)$$

- h depende del fluído, de las superficies de contacto, de las diferencias de temperura, del flujo...



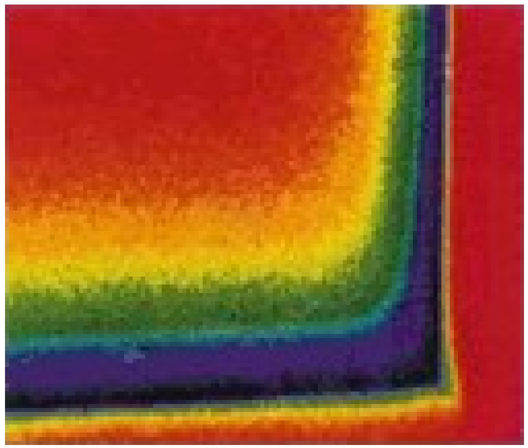
Aplicación → Termopaneles



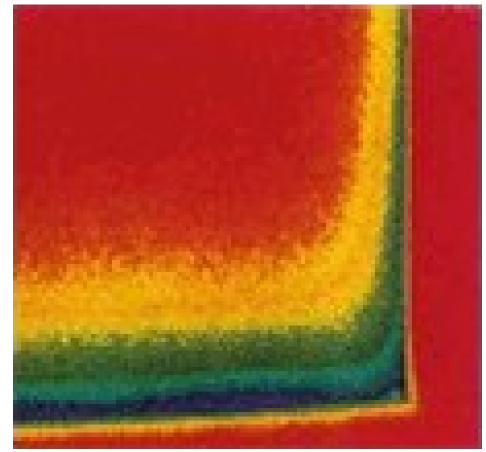
Termopaneles

- Es una armadura de vidrios dobles usada en los climas fríos.
- El calor se transfiere de un ambiente hacia el exterior por:
  - Conducción en el vidrio interior
  - Conducción y convección en el aire intermedio
  - Conducción en el vidrio exterior

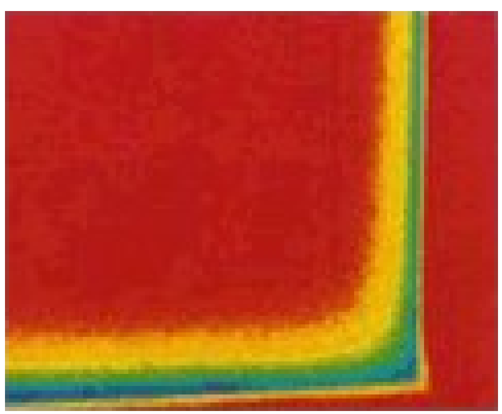
Triple vidrio



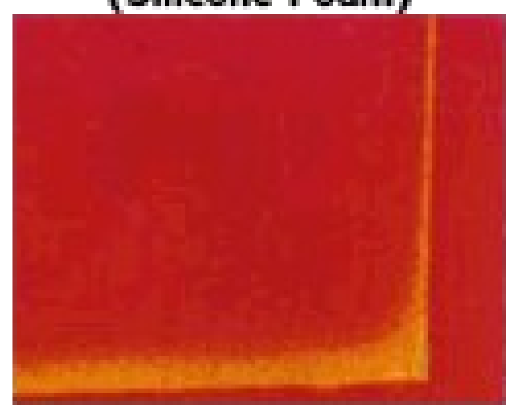
Double Glazed
Aluminum Spacer



Double Glazed
warm edged spacer
(Silicone Foam)



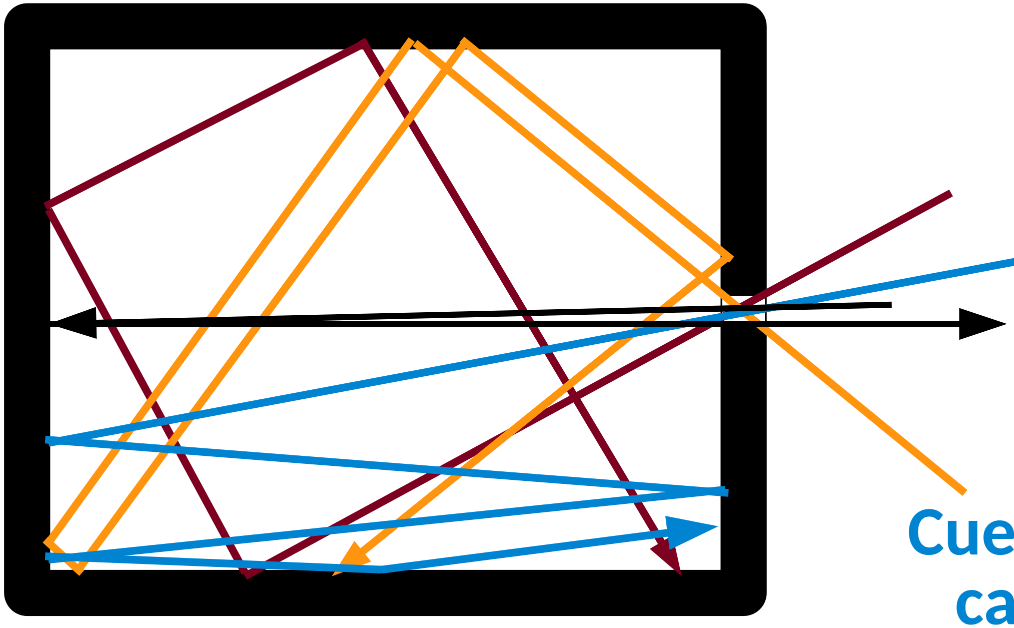
Triple Glazed
Aluminum Spacer

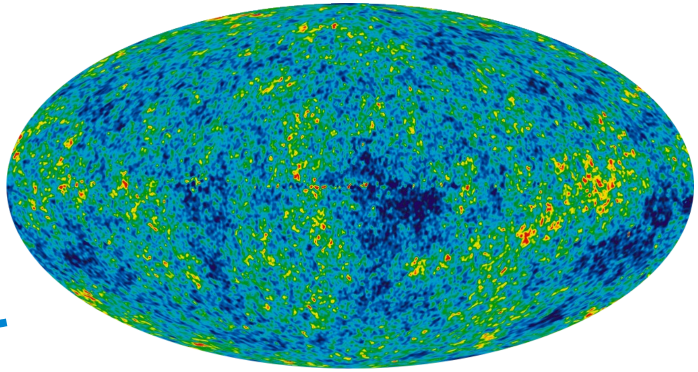


Triple Glazed
warm edged spacer
(Silicone Foam)

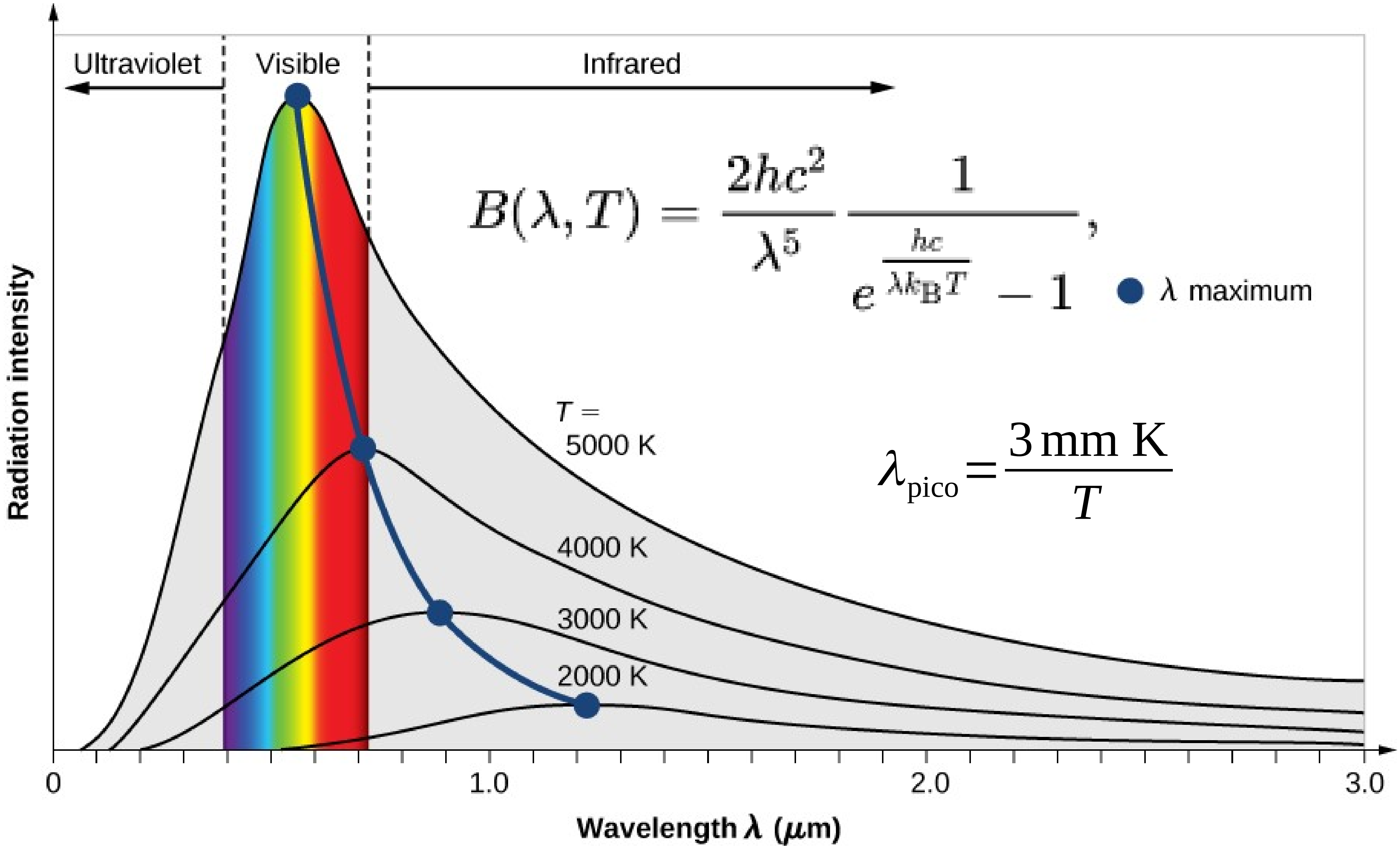
Un cuerpo negro es...

- Un **cuerpo negro** es un sistema físico ideal que absorbe toda la radiación electromagnetica incidente sin importar su longitud de onda: **es un absorbente perfecto de radiación electromagnética**





Cuerpos negros casi ideales


Ultraviolet
Visible
Infrared
$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$,
λ maximum
T = 5000 K
4000 K
3000 K
2000 K
$\lambda_{pico} = \frac{3\,\mathrm{mm\,K}}{T}$
Radiation intensity
0
1.0
2.0
3.0
Wavelength λ (μm)

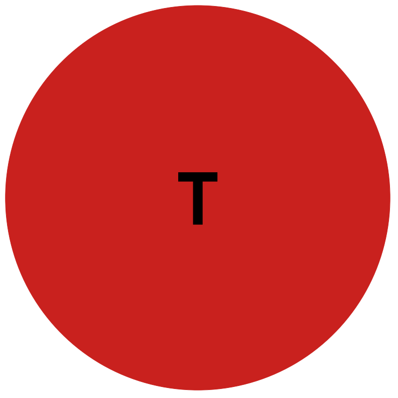
Transferencia por radiación: ¿de qué depende?

- Todos los objetos emiten y absorben radiación EM
- ¿Qué pasa si aumento el **área de emisión A**?
- ¿Qué pasa si aumento la **temperatura**?
- ¿Qué pasa si cambio el **material**?

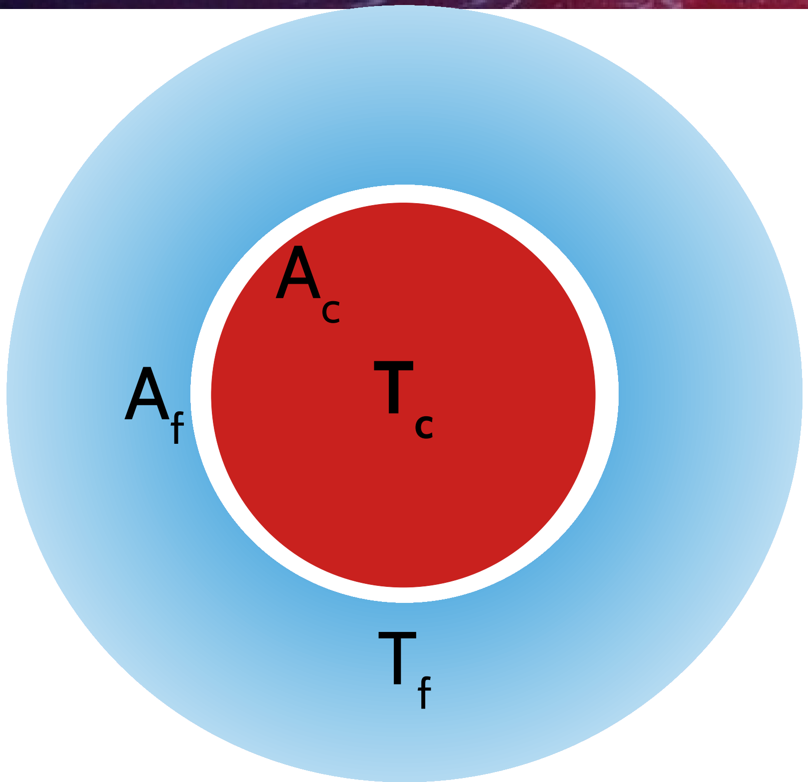
Tasa de emisión $\frac{dQ}{dt}$

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma \, \varepsilon \, A \, T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \, W \, m^{-2} K^{-4}$$



- Radiación tipo cuerpo negro:
  - A es el área, T la temperatura
    $0<\varepsilon<1$ es la emisividad (si $\varepsilon=1 \rightarrow$ cuerpo negro ideal)



- El objeto T_c emite radiación, el objeto a temperatura T_f la absorbe, se calienta y también emite.
- Suponemos $A_c \sim A_f \sim A$, y $\varepsilon=1$
- La tasa de intercambio será

$$\frac{dQ_c}{dt}=-\sigma A_c T_c^4 \quad \text{y} \quad \frac{dQ_f}{dt}=\sigma A_f T_f^4$$

$$\frac{dQ_c}{dt}=\sigma A\left(T_f^4-T_c^4\right) \quad \text{y} \quad \frac{dQ_f}{dt}=\sigma A\left(T_c^4-T_f^4\right)$$

Radiación al ambiente T_f → Ley de Newton

- Supongamos T_f es temperatura ambiente (cte) y $T_c \sim T_f$ →

$$\frac{dQ_c}{dt} = -\sigma A_c \left(T_c^4 - T_f^4\right) = -\sigma A_c \left(T_c^2 + T_f^2\right)\left(T_c^2 - T_f^2\right)$$

$$\frac{dQ_c}{dt} = -\sigma A_c \left(T_c^2 + T_f^2\right)\left(T_c + T_f\right)\left(T_c - T_f\right)$$

$$\frac{dQ_c}{dt} \simeq -\sigma A_c \left(T_f^2 + T_f^2\right)\left(T_f + T_f\right)\left(T_c - T_f\right) \simeq -\sigma A_c \left(2 T_f^2\right)\left(2 T_f\right) \Delta T$$

$$\frac{dQ_c}{dt} \simeq -\underbrace{\sigma 4 T_f^3}_{h} A_c \Delta T \rightarrow \boxed{\frac{dQ_c}{dt} \simeq -h A_c \Delta T}$$

Ley de Newton