

# Wymiana ciepła

- Opór cieplny
- Przewodzenie ciepła
- Konwekcja
- Promieniowanie
- Ekranowanie ciepła

# Wymiana ciepła

- Warunkiem przepływu ciepła między dwoma ośrodkami jest różnica temperatur
- Ciepło przepływa z ośrodka o temperaturze wyższej do ośrodka o temperaturze niższej
- Przepływ ciepła ustaje wówczas, gdy następuje wyrównanie temperatur obu ośrodków

# Wymiana ciepła

Ilość wymienianego ciepła zależy od:

- różnicy temperatur między ośrodkami  $\Delta T$  [K] lub [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- pola powierzchni wymiany ciepła  $S$  [ $\text{m}^2$ ]
- czasu trwania wymiany ciepła  $\tau$  [s]
- współczynnika charakteryzującego dany proces wymiany ciepła

# Wymiana ciepła

Natężenie strumienia ciepła

$$q = \frac{Q}{S \cdot \tau} \left[ \frac{kJ}{m^2 \cdot s} = \frac{kW}{m^2} \right]$$

# Wymiana ciepła

Natężenie strumienia ciepła  $q$  zależy od różnicy temperatur i współczynnika charakterystycznego dla danego procesu, który może być wyrażony jako:

- opór cieplny

$R$

$$\left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

- współczynnik przepływu (przejmowania, przewodzenia itp.) ciepła

$\alpha$

$$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

# Wymiana ciepła

$$q = \alpha \cdot \Delta t$$

$$q = \frac{\Delta t}{R}$$

# Wymiana ciepła

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \tau \cdot \Delta t$$

$$Q = \frac{S \cdot \tau \cdot \Delta t}{R}$$

# Wymiana ciepła

- Jeśli podczas przepływu ciepła nie zmienia się różnica temperatur, to nie zmienia się także ilość wymienianego ciepła
- Proces taki nazywamy procesem ustalonej wymiany ciepła



# Wymiana ciepła

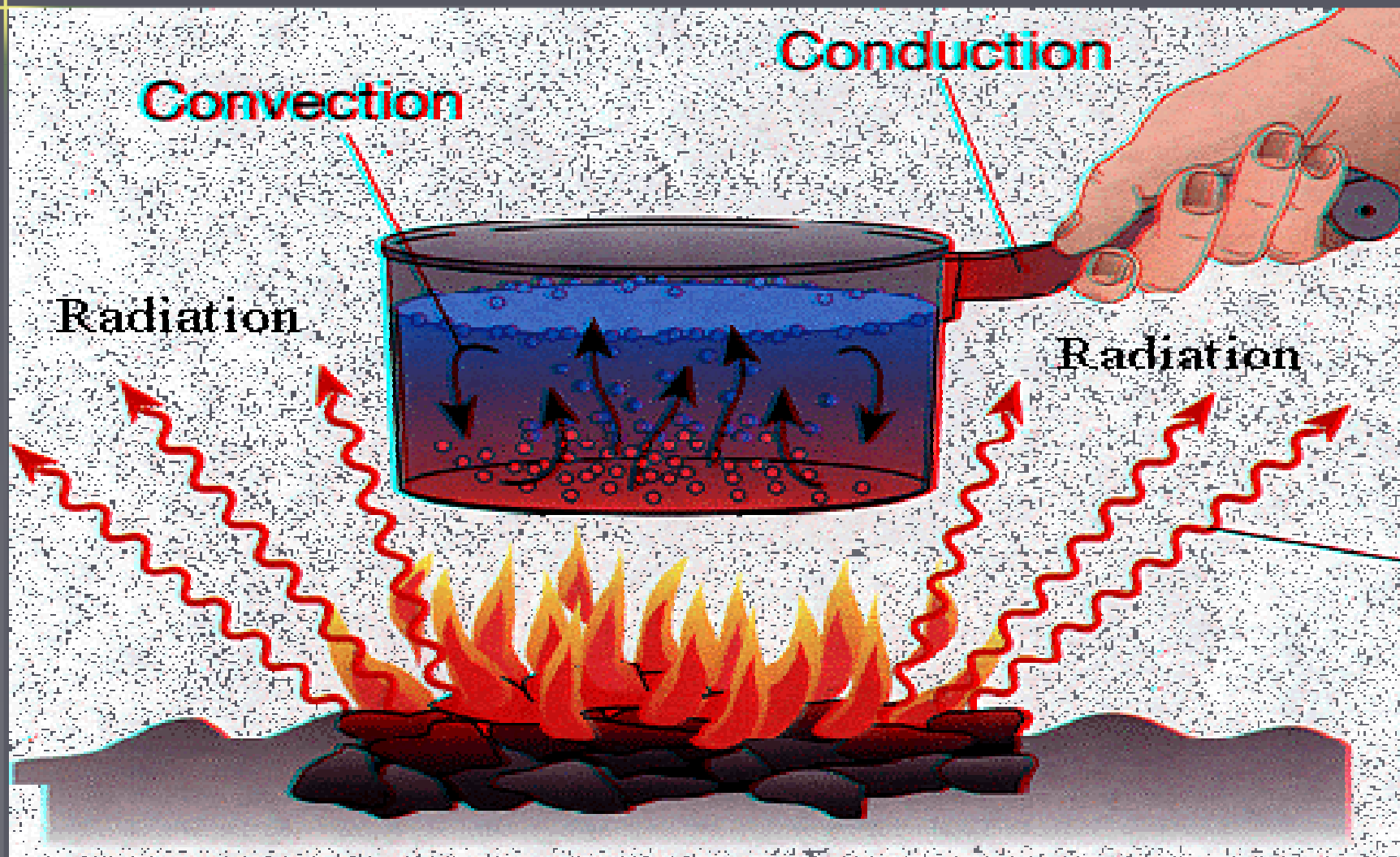
- Jeśli podczas przepływu ciepła zmienia się różnica temperatur, to zmienia się także ilość wymienianego ciepła
- Proces taki nazywamy procesem nieustalonej wymiany ciepła.

# Wymiana ciepła

Sposoby wymiany ciepła można podzielić na trzy elementarne rodzaje:

- przewodzenie – wymiana ciepła następuje bez przemieszczania się cząstek względem siebie
- konwekcja – wymiana ciepła następuje w wyniku mieszania się cząstek
- promieniowanie – wymiana ciepła następuje za pośrednictwem fal elektromagnetycznych

# Wymiana ciepła



# Wymiana ciepła

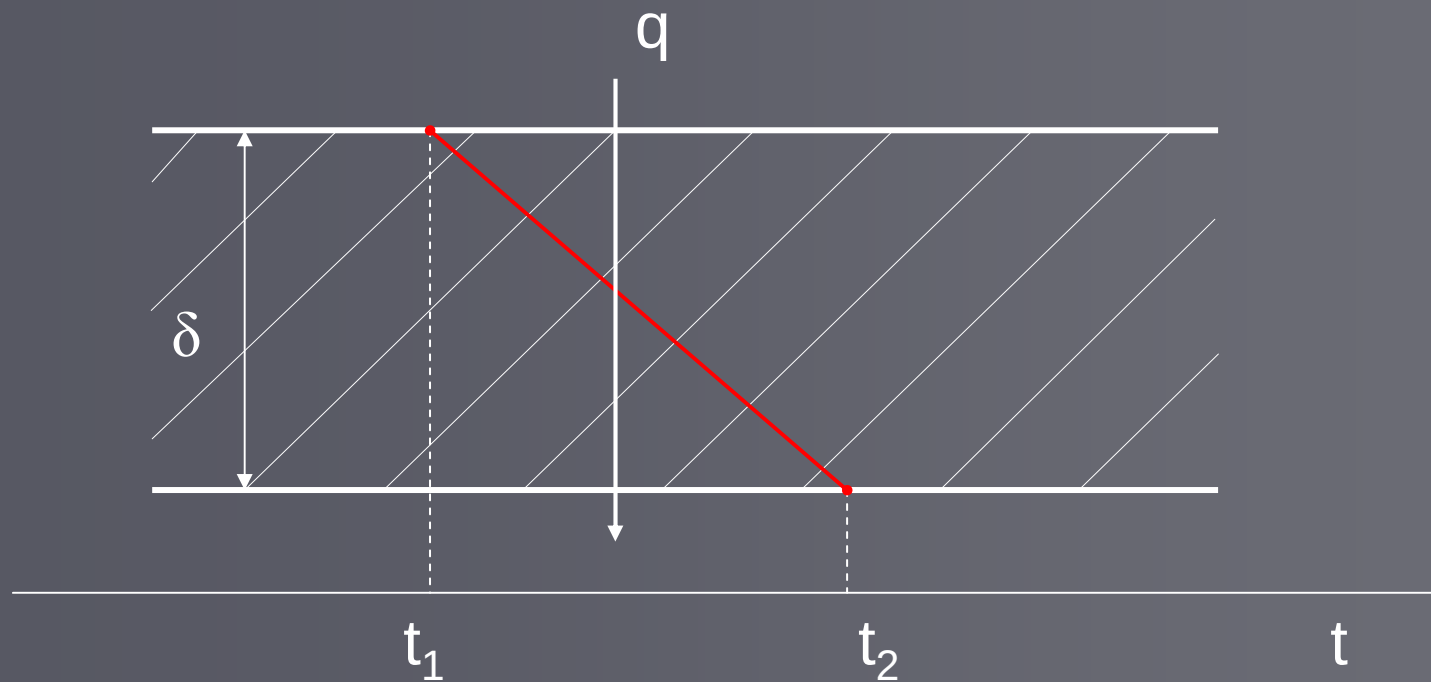
- Przewodzenie dotyczy cząstek bezpośredni stykających się ze sobą
- Jest dominującym procesem wymiany ciepła w ciałach stałych i nie mieszających się cieczach i gazach

# Wymiana ciepła

- Konwekcja (unoszenie) możliwa jest wówczas, gdy cząstki mogą się przemieszczać względem siebie, co ma miejsce w cieczech i gazach
- Z konwekcją mamy do czynienia podczas przepływu cieczy lub gazu

# Wymiana ciepła

## Przepływ ciepła przez ściankę płaską



# Wymiana ciepła

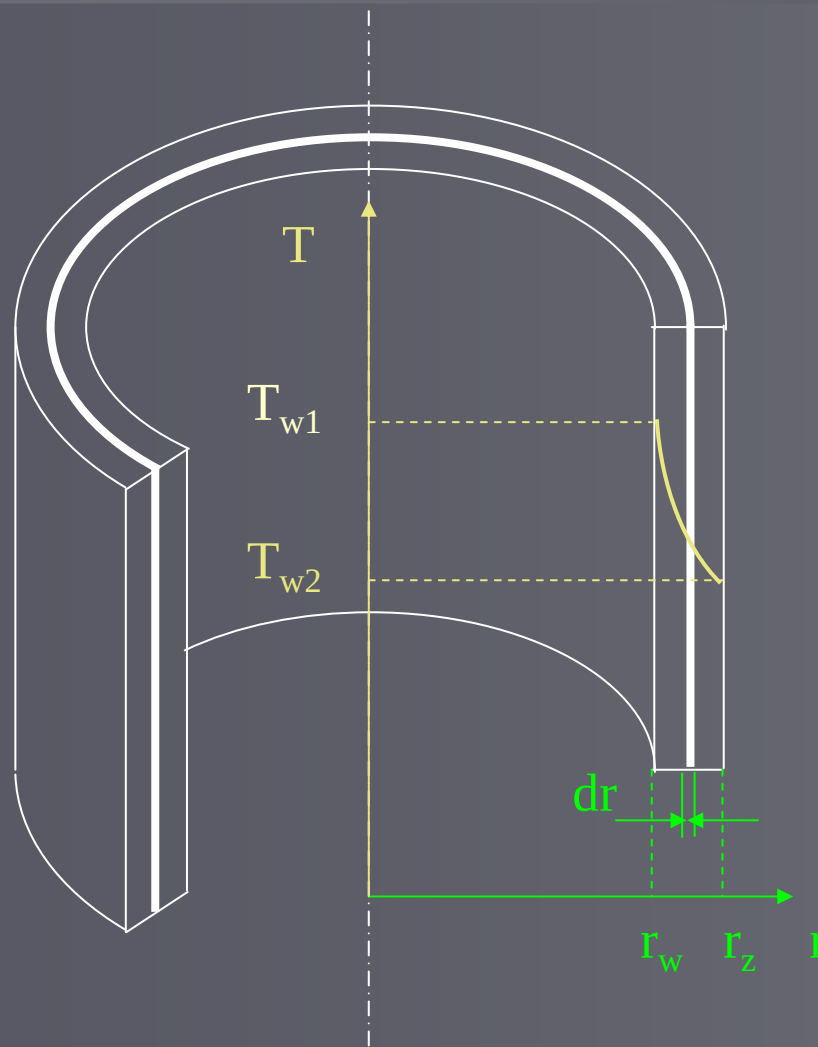
$$q = \frac{\Delta t}{R}$$

$$R = \frac{\delta}{\lambda}$$

Opór cieplny ścianki jest proporcjonalny do grubości ścianki  $\delta$  i odwrotnie proporcjonalny do współczynnika przewodzenia ciepła

$$\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$$

# Wymiana ciepła





# Wymiana ciepła

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad q = \frac{Q}{S}$$

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$$

$$q_l = \frac{Q}{l} = q \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$q_l = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{dT}{dr}$$

# Wymiana ciepła

$$q_l = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{dT}{dr}$$

$$q_l \cdot \frac{dr}{r} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot dT$$

$$q_l \cdot \int_{r_w}^{r_z} \frac{dr}{r} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot \int_{T_{w1}}^{T_{w2}} dT$$

# Wymiana ciepła

$$q_l \cdot \ln \frac{r_z}{r_w} = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot (T_{w2} - T_{w1})$$

$$q_l = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln \frac{r_z}{r_w}} \cdot (T_{w1} - T_{w2})$$

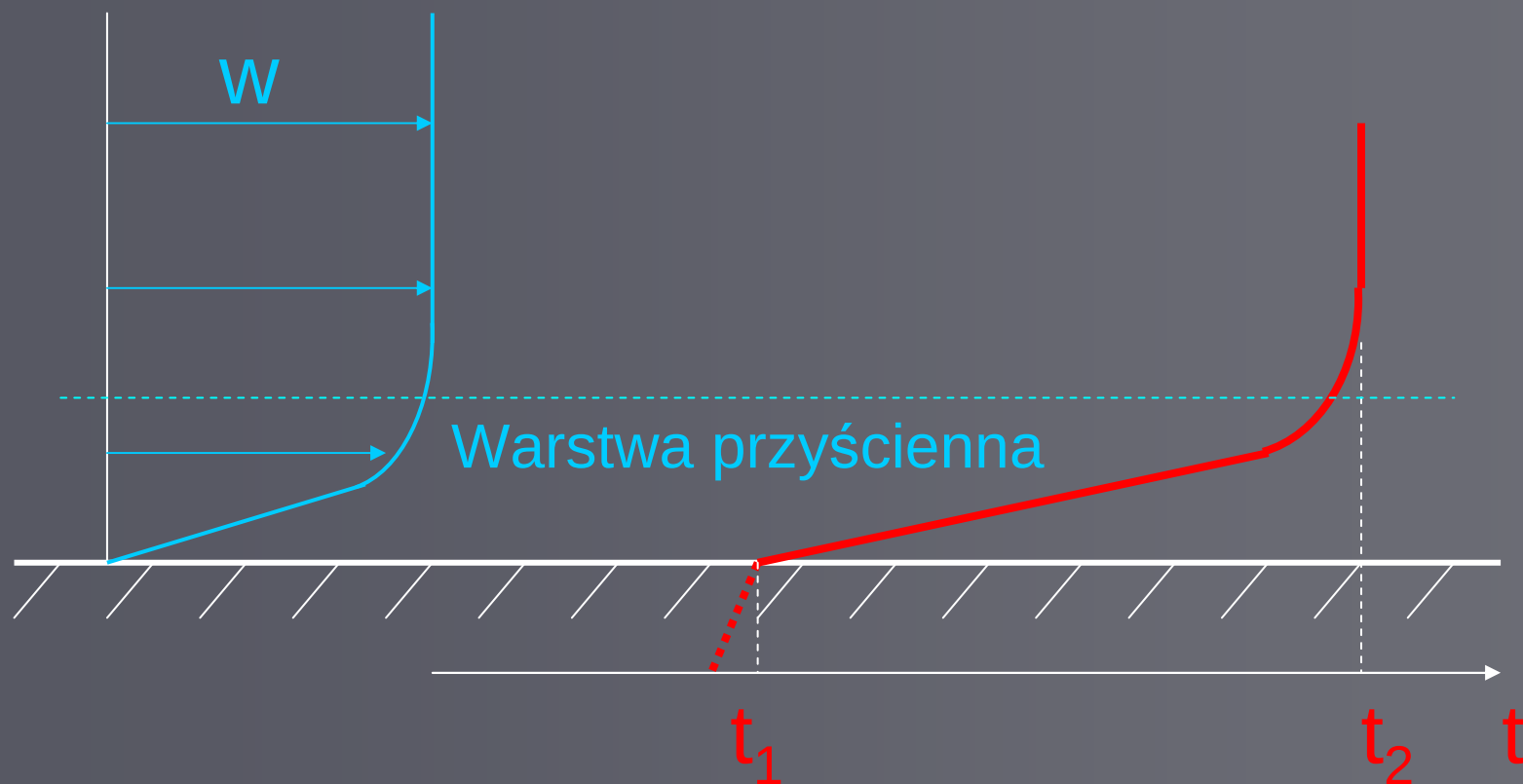
# Wymiana ciepła

Współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$

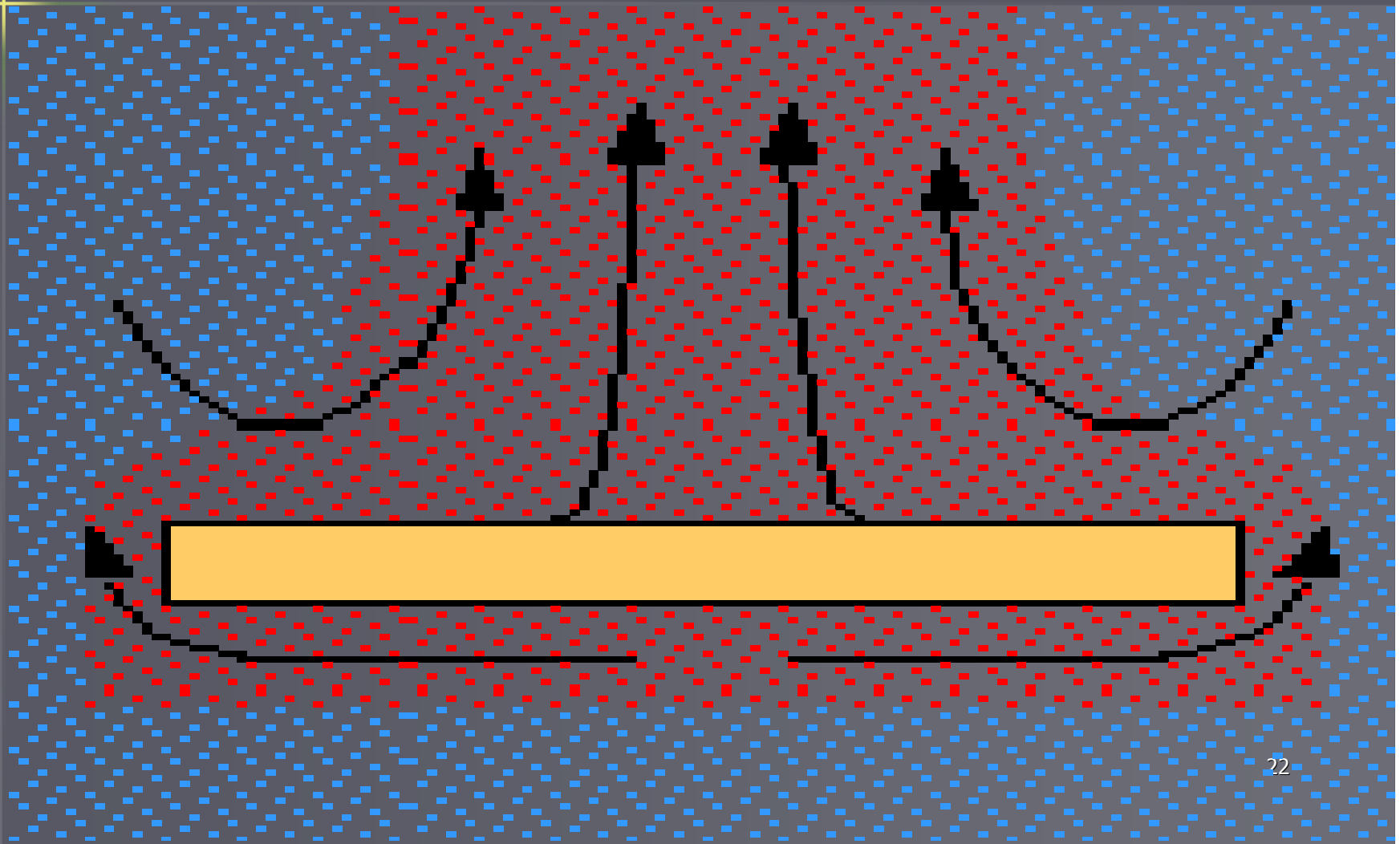
- - srebro
- (najlepszy przewodnik ciepła) 418
- - materiały ceramiczne
- (beton, cegła, szkło)  $\sim 1$
- - woda  $0,6 \div 0,7$
- - powietrze  $0,03 \div 0,08$

# Wymiana ciepła

Termodynamika techniczna

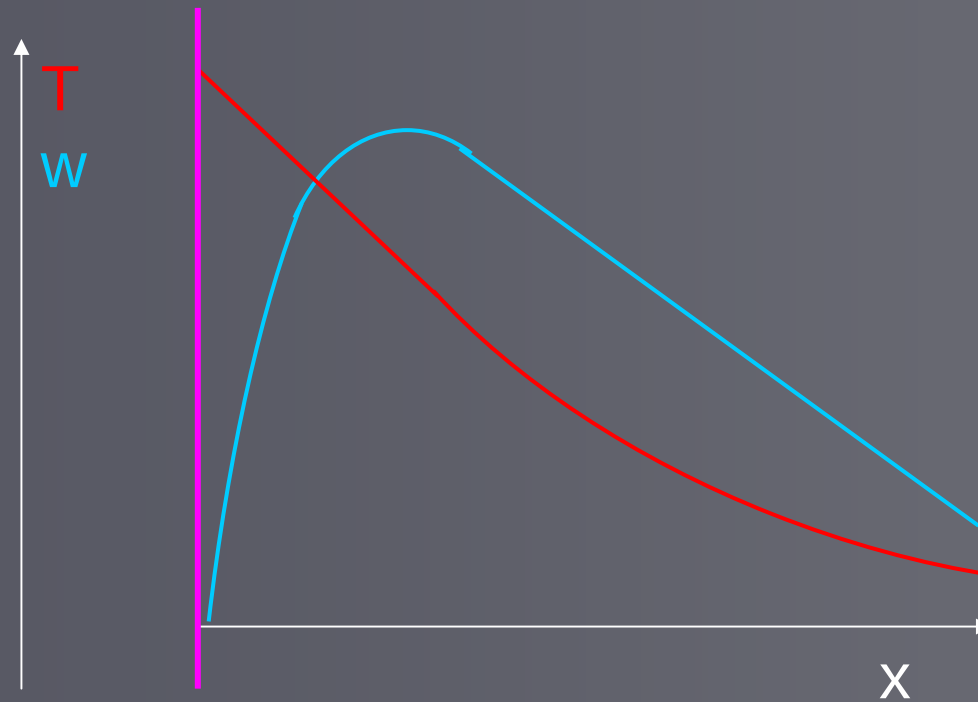


# Wymiana ciepła



# Wymiana ciepła

Rozkład temperatur i prędkości płynu przy konwekcji swobodnej na płaskiej, pionowej rozgrzanej płycie.



# Wymiana ciepła

Przepływ ciepła przez warstwę przyścienną płynu zależy od własności płynu, parametrów ruchu płynu, grubości warstwy przyściennej płynu i zjawisk fizycznych występujących w płynie

$$q = \alpha \cdot \Delta t$$



# Wymiana ciepła

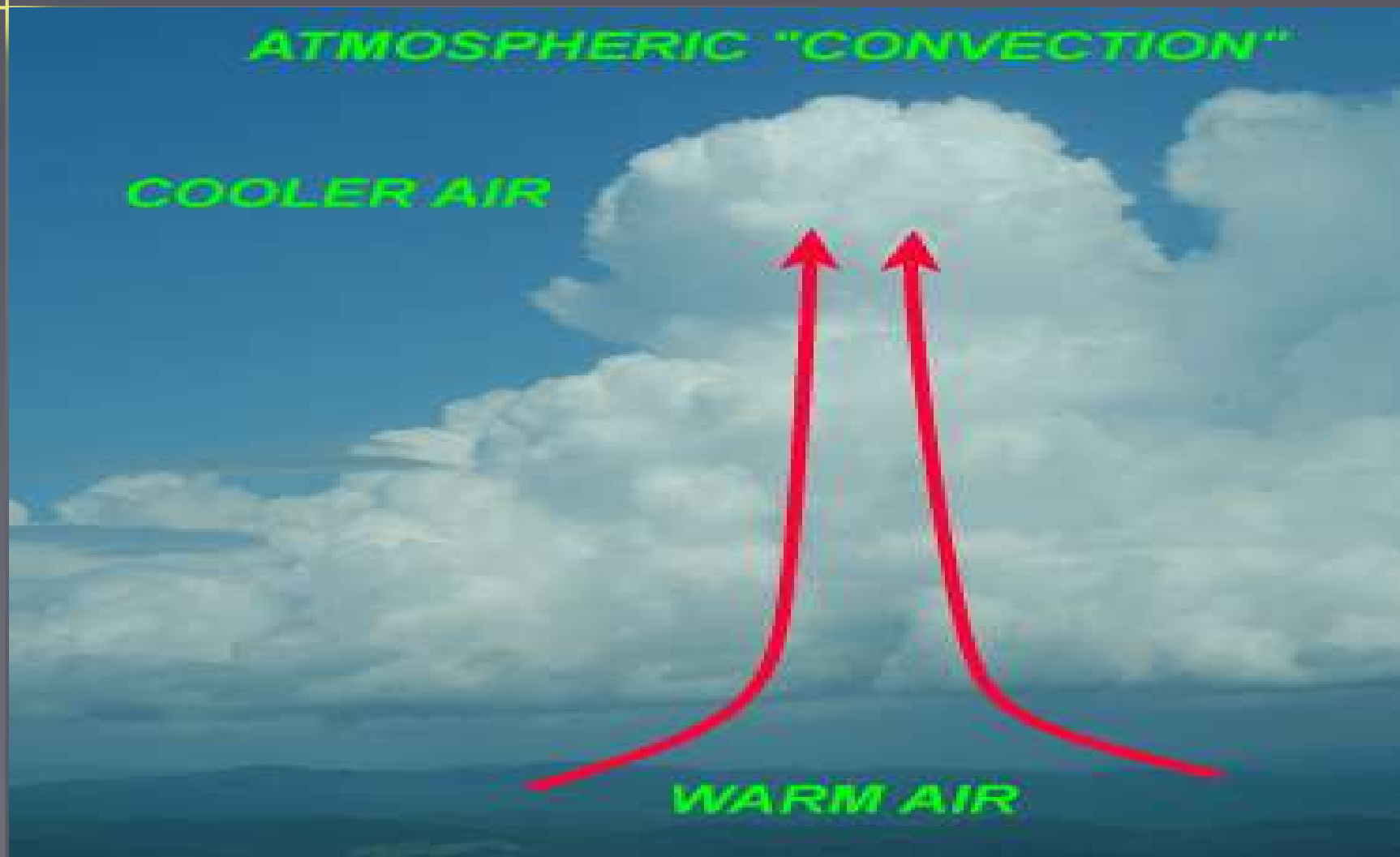
Współczynnik przejmowania (wnikania) ciepła wyznaczany jest doświadczalnie i zmienia się w bardzo szerokich granicach:

- - gazy  $0,1 \div 500$
- - ciecze  $500 \div 7000$
- - ciecze wrzące  $2000 \div 10.000$
- - pary skraplane  $6000 \div 70.000$

w10

# Wymiana ciepła

Termodynamika techniczna

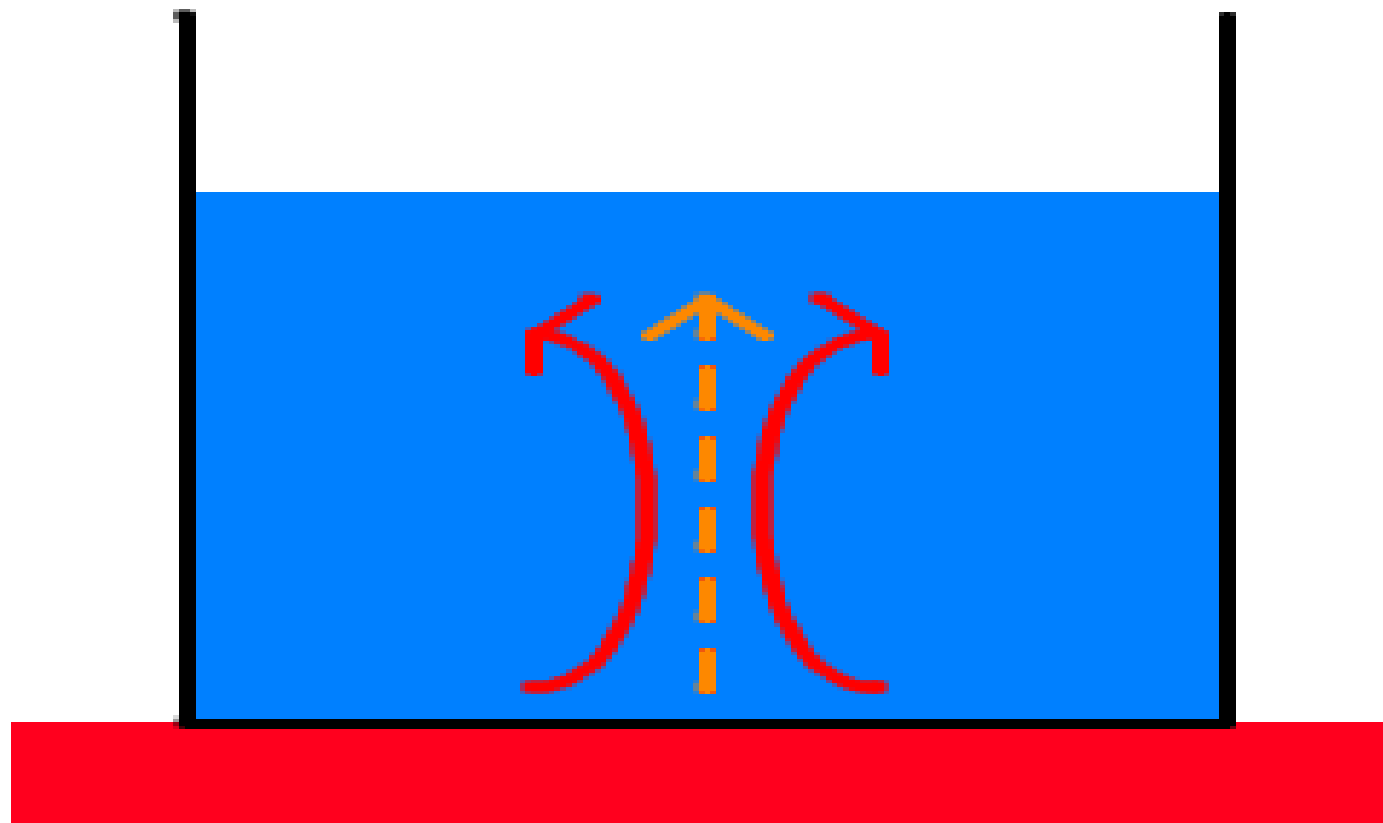


w10

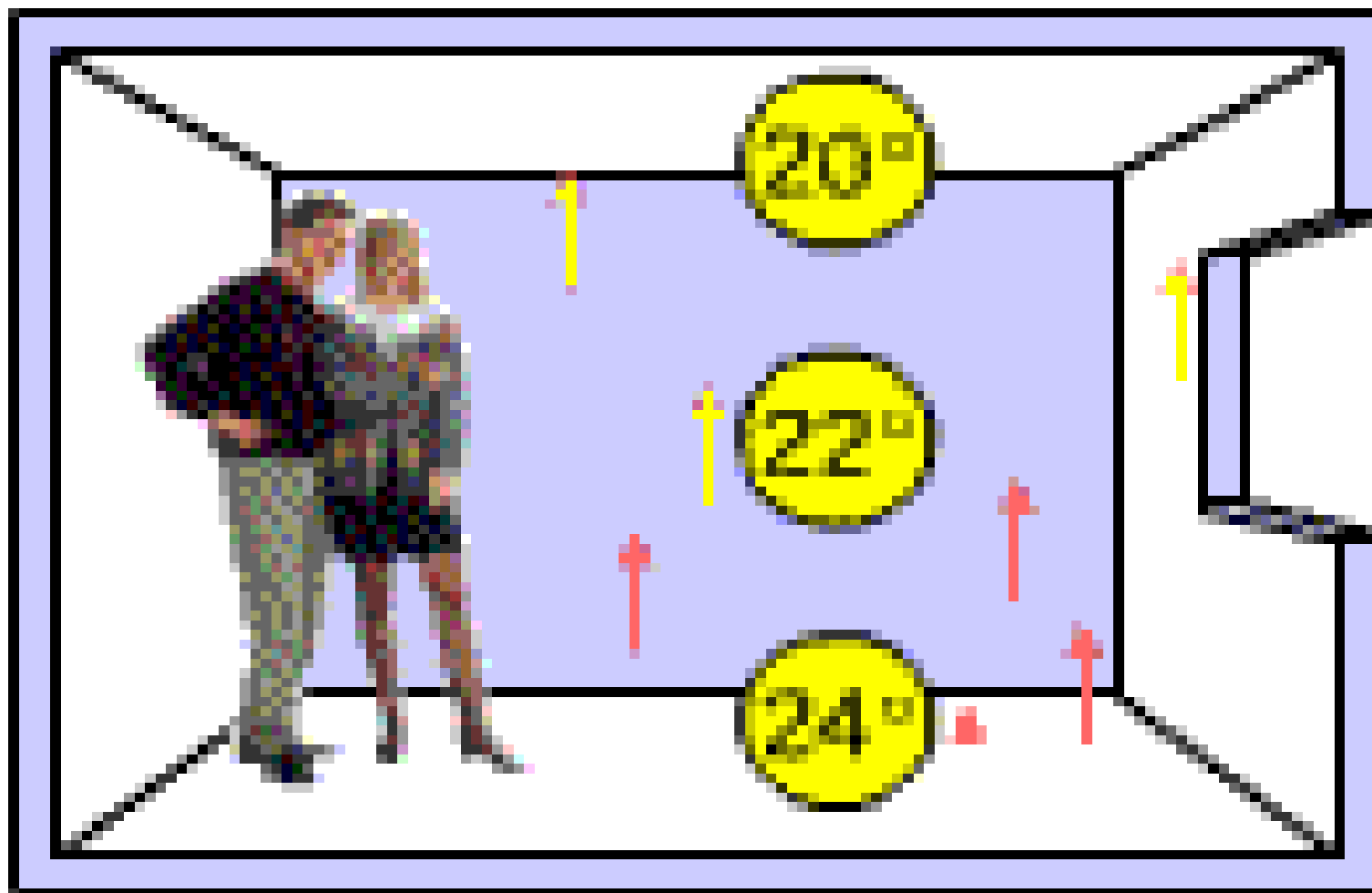
# Wymiana ciepła

Termodynamika techniczna

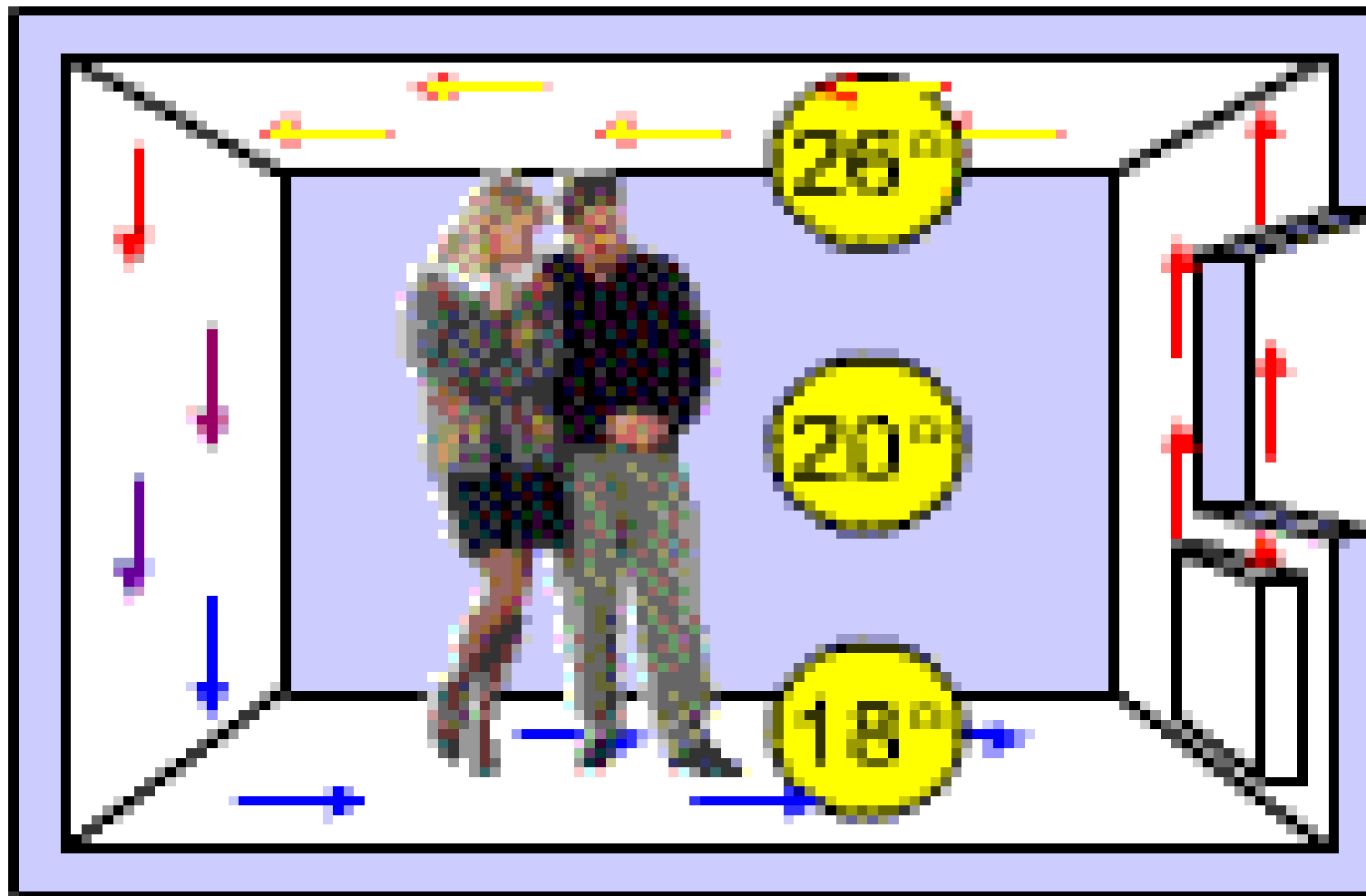
[www.explainthatstuff.com](http://www.explainthatstuff.com)



# Wymiana ciepła



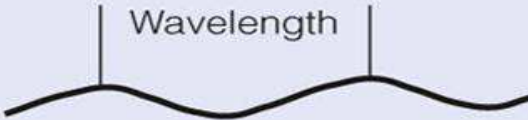
# Wymiana ciepła



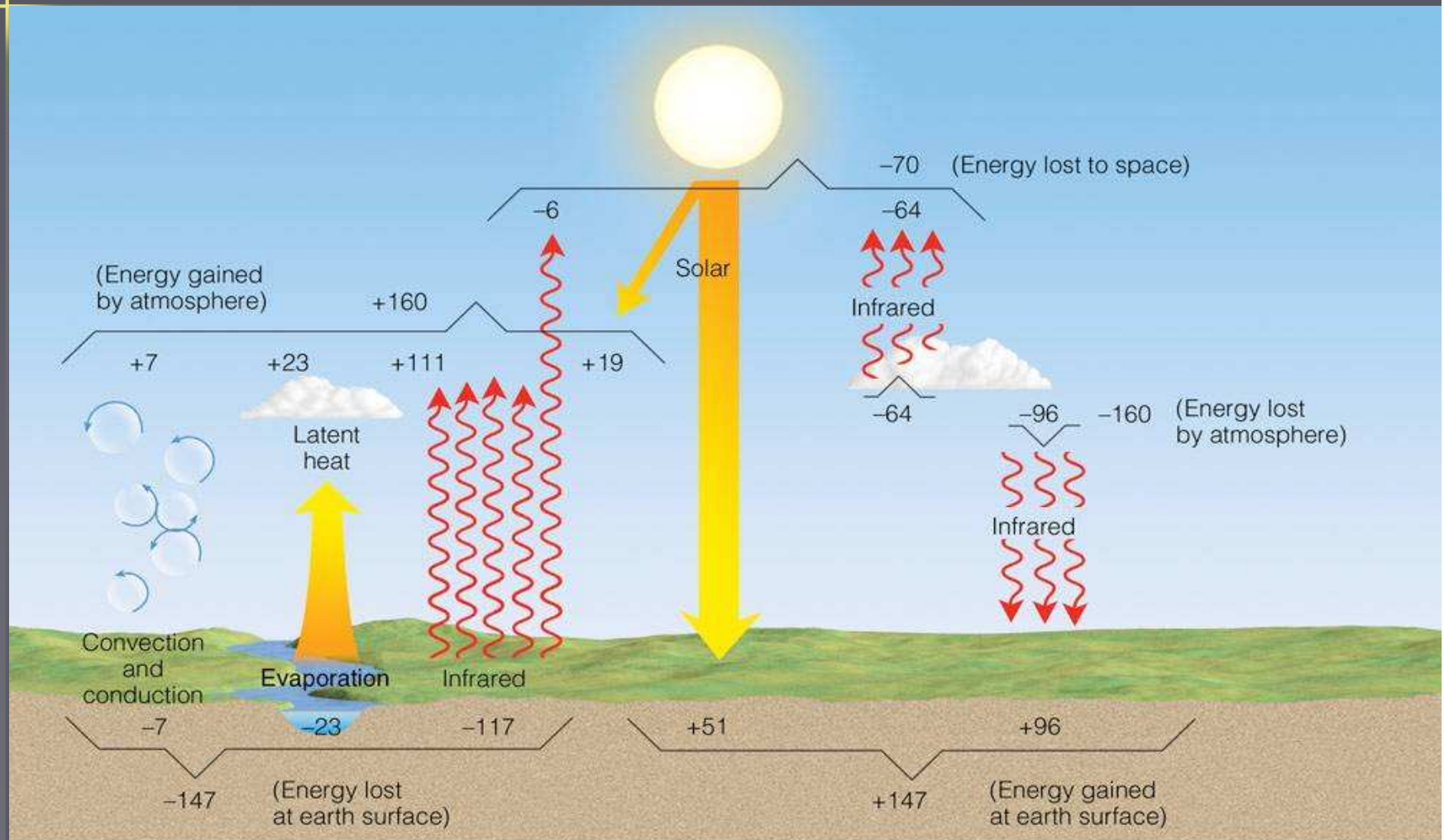
# Wymiana ciepła

Promieniowanie fal elektromagnetycznych jest promieniowaniem termicznym. Wynika ono z drgań termicznych cząstek i dotyczy wszystkich ciał o temperaturze wyższej od 0[K], niezależnie od stanu skupienia. Dla temperatur nie przekraczających 600 [°C] promieniowanie termiczne jest promieniowaniem podczerwony ( $\lambda = 0,8 \div 400 \text{ } [\mu\text{m}]$ )

# Wymiana ciepła

| TYPE OF RADIATION | RELATIVE WAVELENGTH                                                                  | TYPICAL WAVELENGTH (meters) | ENERGY CARRIED PER WAVE OR PHOTON                                                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AM radio waves    |    | 100                         | Increasing<br> |
| Television waves  |    | 1                           |                                                                                                    |
| Microwaves        |  | $10^{-3}$                   |                                                                                                    |
| Infrared waves    |  | $10^{-6}$                   |                                                                                                    |
| Visible light     |  | $5 \times 10^{-7}$          |                                                                                                    |
| Ultraviolet waves |  | $10^{-7}$                   |                                                                                                    |
| X rays            |  | $10^{-9}$                   |                                                                                                    |

# Wymiana ciepła





# Wymiana ciepła

Promieniowanie ciał stałych i cieczy następuje przez ich powierzchnię, a promieniowanie gazów występuje w całej objętości. Gazy symetryczne ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ) są przepuszczalne dla promieniowania elektromagnetycznego. Gazy niesymetryczne ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ) pochłaniają w szczególności promieniowanie podczerwone.

# Wymiana ciepła

Promieniowanie elektromagnetyczne padające na powierzchnię ciała może być:

- pochłonięte (absorpcyjność  $A$ )
- odbite (refleksyjność  $R$ )
- przepuszczone (przepuszczalność  $P$ )

$$A + R + P = 1$$

# Wymiana ciepła

Przyjmuje się, że większość ciał stałych i cieczy jest nieprzepuszczalna dla promieniowania cieplnego ( $P = 0$ )

Rozróżniamy następujące modele ciał:

- ciało doskonale czarne  $A = 1; R = 0$
- ciało doskonale białe  $A = 0; R = 1$
- ciało doskonale szare  $A > 0; R > 0;$   
 $A + R = 1$

# Wymiana ciepła

$$e_c = C_c \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$C_c = 5,67 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$$

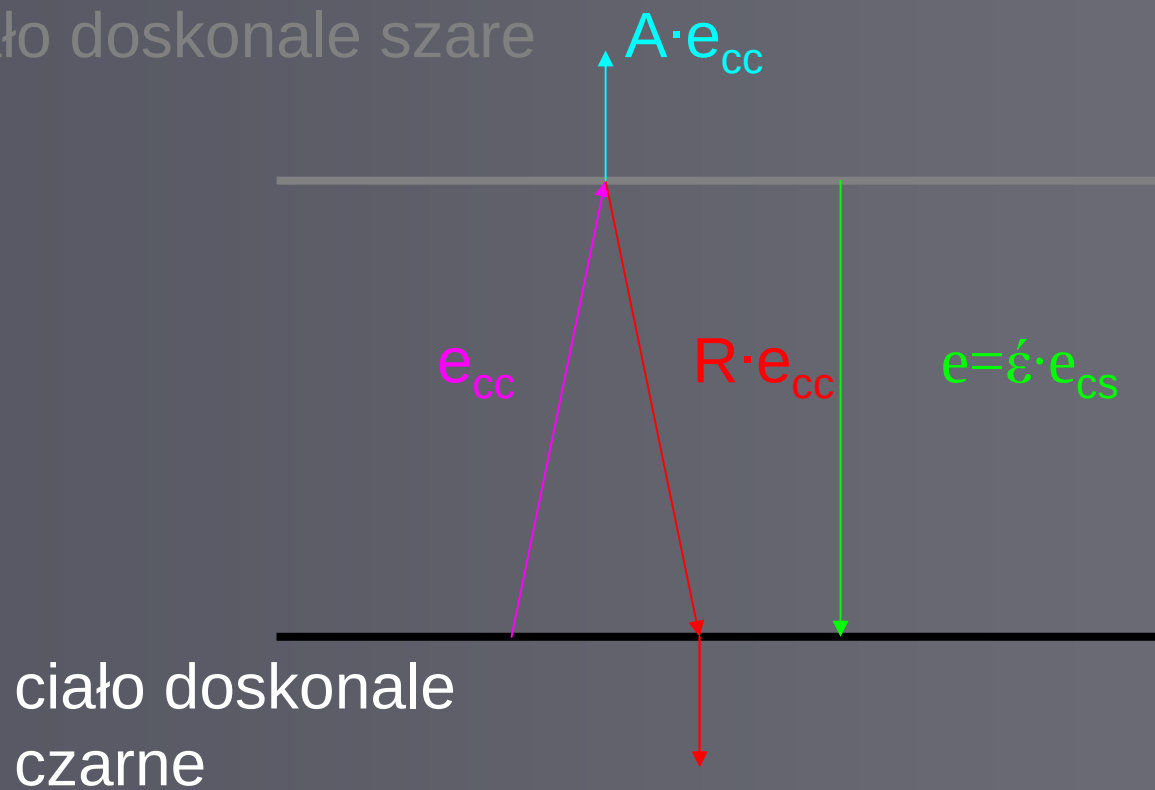
# Wymiana ciepła

Promieniowanie dowolnego ciała jest iloczynem emisyjności  $\varepsilon$  tego ciała i promieniowania ciała doskonale czarnego w danej temperaturze

$$e = \varepsilon \cdot e_c = \varepsilon \cdot C_c \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

# Wymiana ciepła

ciało doskonale szare



# Wymiana ciepła

$$e_{Cc} = A \bullet e_{Cc} + R \bullet e_{Cc}$$

$$e_{Ccp} = R \bullet e_{Cc} + e = R \bullet e_{Cc} + \varepsilon \bullet e_{Cs}$$

$$e_{Cc} = e_{Cp}$$

$$A \bullet e_{Cc} + R \bullet e_{Cc} = R \bullet e_{Cc} + \varepsilon \bullet e_{Cs}$$

$$A \bullet e_{Cc} = \varepsilon \bullet e_{Cs}$$

# Wymiana ciepła

$$T_C = T_S \Rightarrow e_{Cc} = e_{Cs} \Rightarrow A = \varepsilon$$

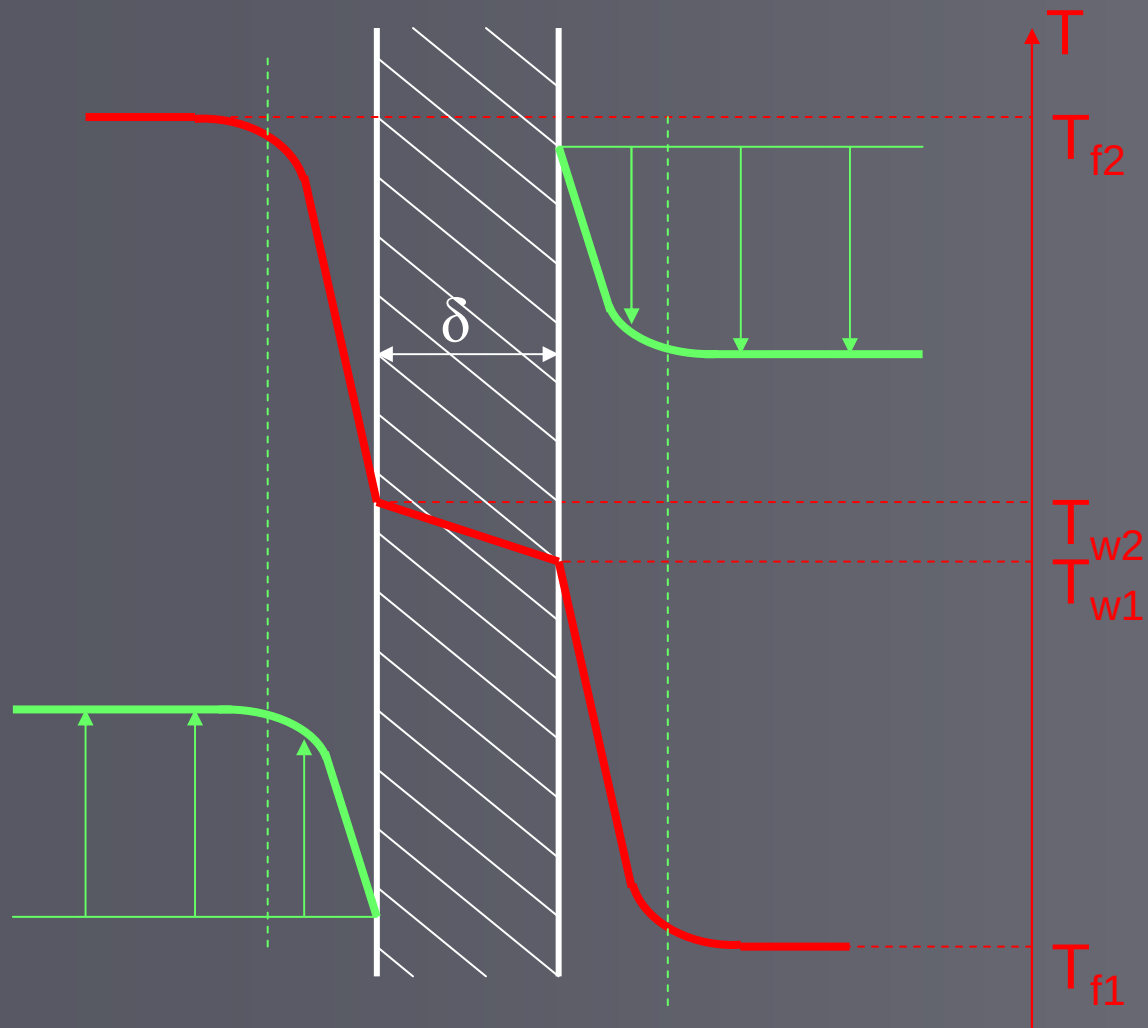


$$T_1 > T_2 \Rightarrow e_{C1} > e_{C2} \Rightarrow \varepsilon_1 > \varepsilon_2$$



# Wymiana ciepła

Termodynamika techniczna



# Wymiana ciepła

$$T_{f2} - T_{f1} = T_{f2} - T_{w2} + T_{w2} - T_{w1} + T_{w1} - T_{f1}$$

$$T_{f2} - T_{w2} = q \cdot R_{\alpha 2}$$

$$T_{w2} - T_{w1} = q \cdot R_{\lambda}$$

$$T_{w1} - T_{f1} = q \cdot R_{\alpha 1}$$

# Wymiana ciepła

$$T_{f2} - T_{f1} = q \cdot R_{\alpha2} + q \cdot R_{\lambda} + q \cdot R_{\alpha1}$$

$$T_{f2} - T_{f1} = q \cdot (R_{\alpha2} + R_{\lambda} + R_{\alpha1})$$

$$R = R_{\alpha2} + R_{\lambda} + R_{\alpha1}$$

$$q = \frac{T_{f2} - T_{f1}}{R}$$

# Wymiana ciepła

$$q = k \cdot \Delta T$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1}$$

# Wymiana ciepła

$$q_l = k_l \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R_l}$$

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_w} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{r_z}{r_w} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_z}$$

# Wymiana ciepła

$$\Delta r = r_z - r_w$$

$$r_w = \text{const} \cap \Delta r \uparrow \Rightarrow r_z \uparrow$$

$$r_z \uparrow \Rightarrow q_l \downarrow \Rightarrow Q \downarrow$$

$$r_z \uparrow \Rightarrow S \uparrow \Rightarrow Q \uparrow$$

# Wymiana ciepła

$$\alpha_1 = \text{const}$$

$$\alpha_2 = \text{const}$$

$$\lambda = \text{const}$$

$$r_w = \text{const}$$

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_w} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln r_w + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln r_z + \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_z}$$

# Wymiana ciepła

$$\frac{\delta R_l}{\delta r_z} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln r_z \right)' + \left( \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_z} \right)'$$

$$\frac{\delta R_l}{\delta r_z} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot r_z} - \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_z^2} = 0$$

$$\lambda \cdot r_z = \alpha_2 \cdot r_z^2$$



# Wymiana ciepła

$$r_z = \frac{\lambda}{\alpha_2}$$

$$d_z = \frac{2 \cdot \lambda}{\alpha_2} = d_{kr}$$

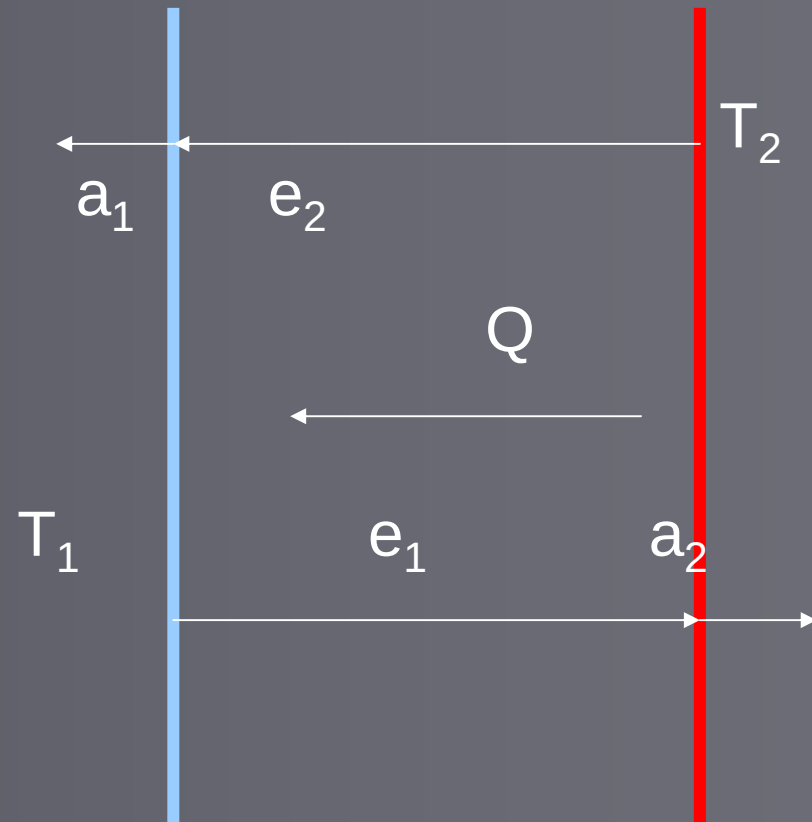
$$d_w < d_{kr} \cap d_z \leq d_{kr} \Rightarrow d_z \uparrow \Rightarrow Q \uparrow$$

# Wymiana ciepła

$$q = e_2 - e_1$$

$$q = \varepsilon \cdot e_{c2} - \varepsilon \cdot e_{c1}$$

$$q = \varepsilon \cdot C_c \cdot \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right]$$



# Wymiana ciepła

$$T_2^4 - T_1^4 = (T_2 - T_1) \cdot (T_2 + T_1) \cdot (T_2^2 + T_1^2)$$

$$T_2 + T_1 = 2 \cdot T_1 + \Delta T$$

$$T_2^2 + T_1^2 = 2 \cdot T_1^2 + 2 \cdot T_1 \cdot \Delta T$$

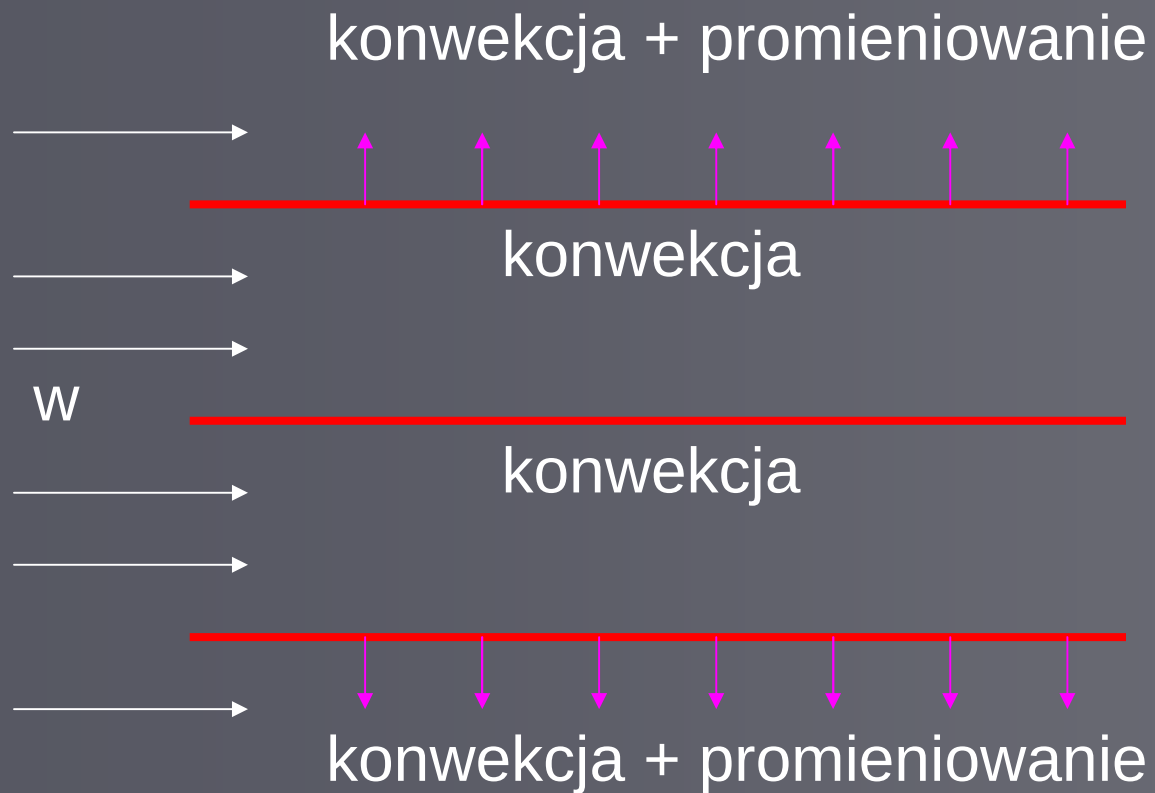
$$T_2^4 - T_1^4 > (\Delta T)^4$$

# Wymiana ciepła

- Zakładamy, że promieniowanie zależy od czwartej potęgi różnicy temperatur ( $\Delta T^4$ ), a konwekcja zależy od pierwszej potęgi różnicy temperatur ( $\Delta T$ )
- Dla małych różnic temperatur konwekcja może dawać większe natężenia strumienia ciepła
- Dla dużych różnic temperatur promieniowanie jest dominującym sposobem wymiany ciepła

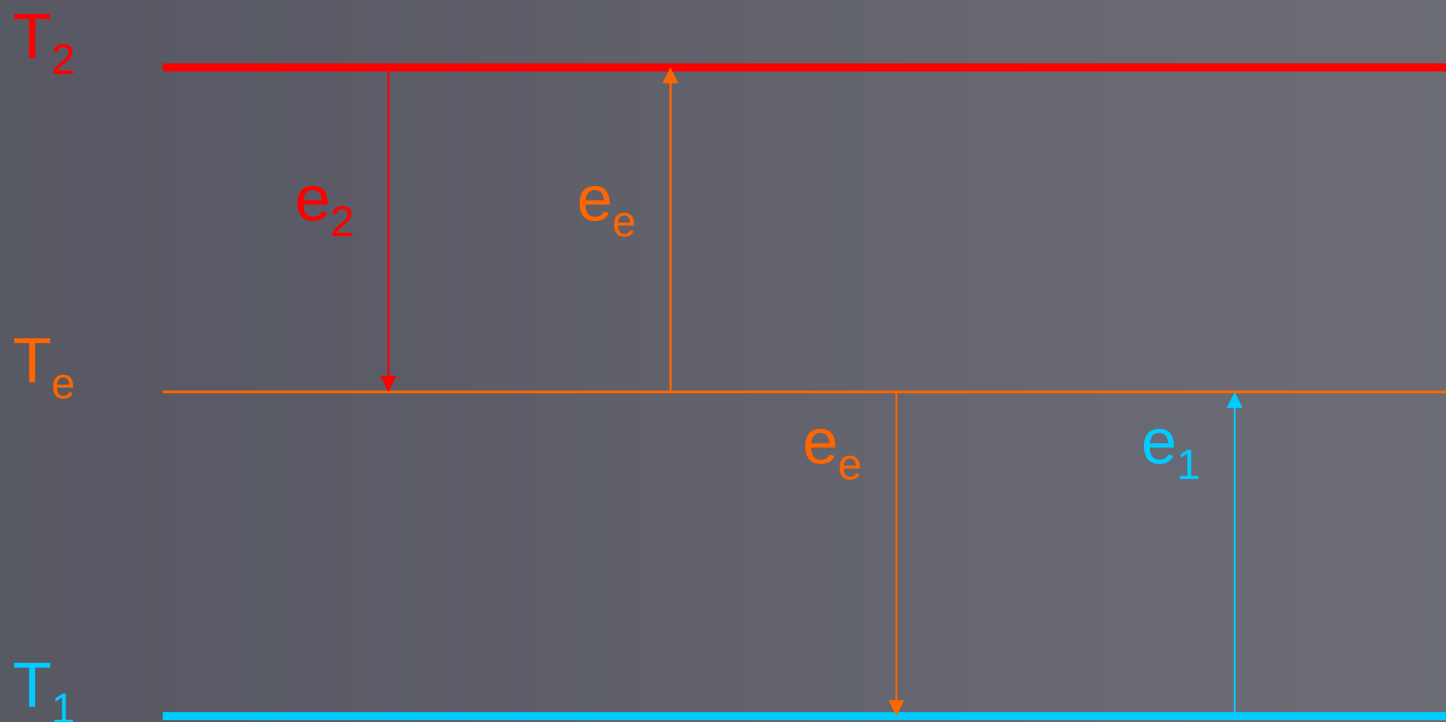
# Wymiana ciepła

Termodynamika techniczna



# Wymiana ciepła

Termodynamika techniczna



# Wymiana ciepła

$$q_{2 \rightarrow e} = e_2 - e_e$$

$$q_{e \rightarrow 1} = e_e - e_1$$

$$T_e = \text{const} \Rightarrow q_{2 \rightarrow e} = q_{e \rightarrow 1}$$

$$e_2 - e_e = e_e - e_1$$

$$e_e = \frac{e_2 - e_1}{2} = \frac{1}{2} \bullet q_{2 \rightarrow 1}$$

# Wymiana ciepła

- Każdy ekran zmniejsza wymianę ciepła przez promieniowanie o połowę
- Grubość ekranu nie wpływa na efekt ekranowania.