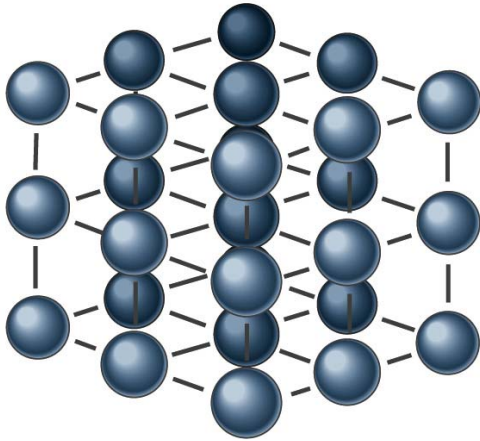
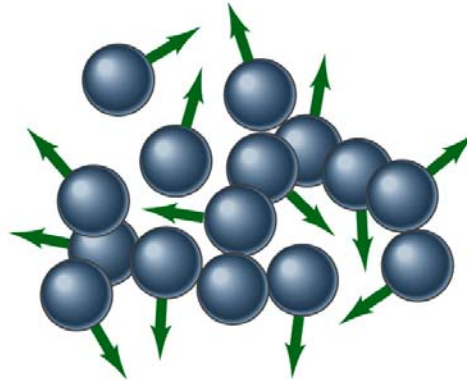


# Stany materii



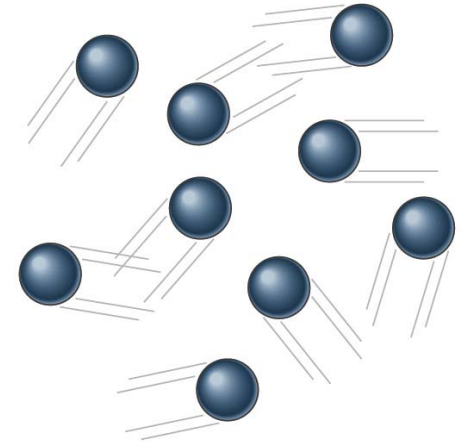
(a)

Monokryształ



(b)

Ciecz

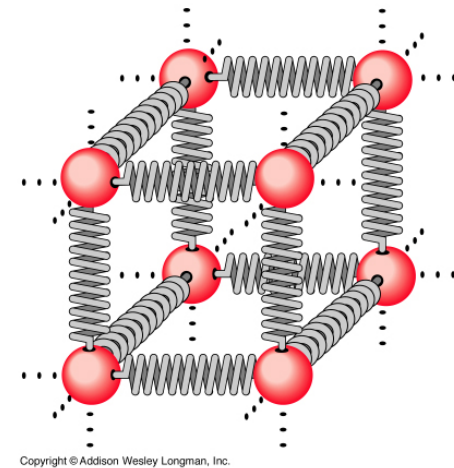
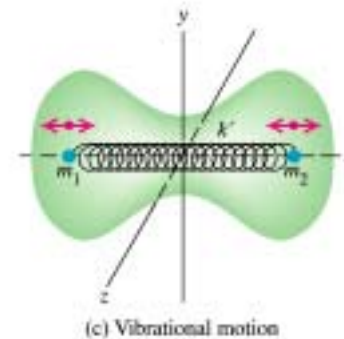
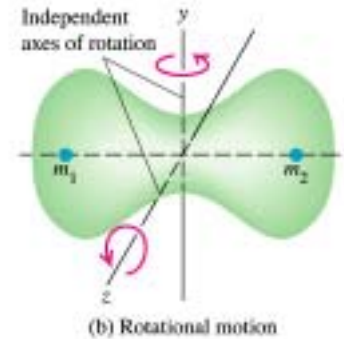
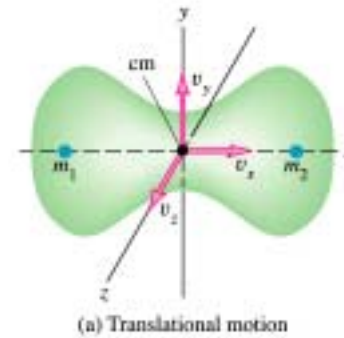


(c)

Gaz

# Temperatura

- Temperatura jest miarą energii kinetycznej cząstek.
- Zderzenia pomiędzy cząstkami powodują redystrybucję energii

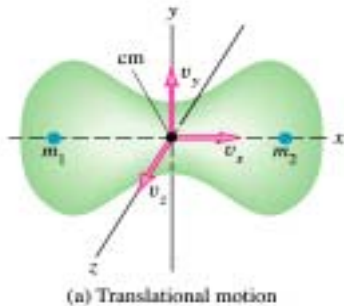


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

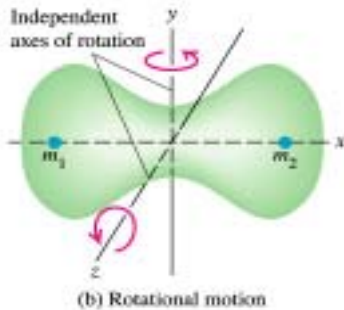
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

# Stopnie swobody

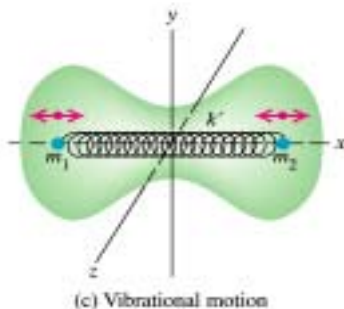
Liczba stopni swobody = liczba niezależnych parametrów potrzebnych do opisania położenia cząstek układu



$$n_{post} = 3$$

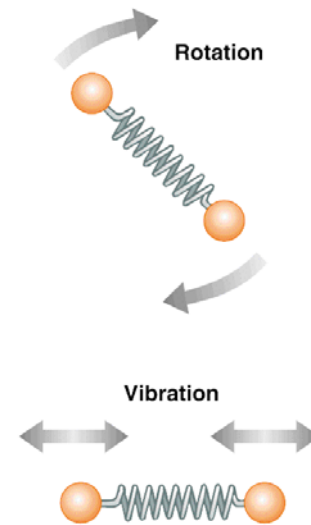


$$n_{obr} = 2$$



$$n_{oscyl} = 1$$

Serway, College Physics, 5/e  
Text Figure 12.1



Harcourt Brace & Company

$$i = n_{post} + n_{obr} + 2n_{oscyl}$$

# Stopnie swobody

## ★ Zasada ekwipartycji energii

Na każdy stopień swobody przypada taka sama energia kinetyczna równa :

$$E = \frac{1}{2}kT$$

*k* -stała Boltzmanna

Średnia energia cząstki :

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2}kT$$

Przykład.

Średnia prędkość kwadratowa cząsteczki  $O_2$  w temperaturze 300K

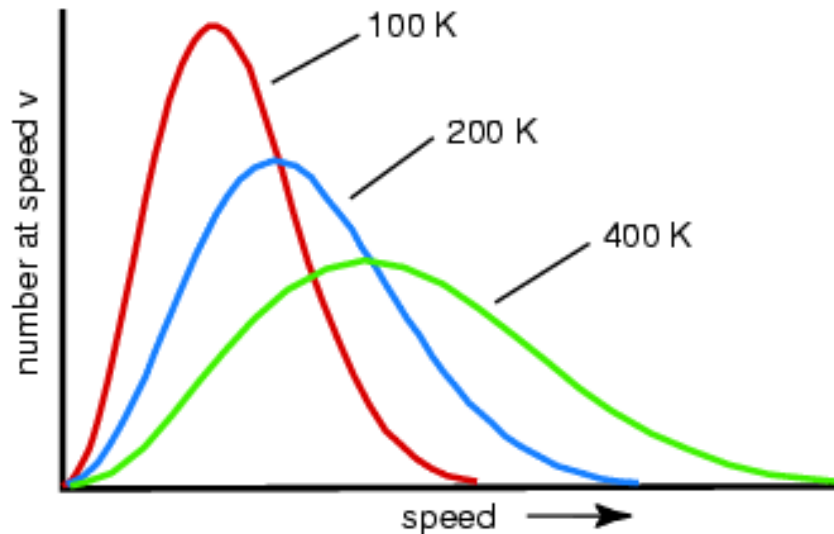
$$m(O_2) = 5.3 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

$$\frac{m \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v_{sr, kw} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3 kT}{2 m}}$$

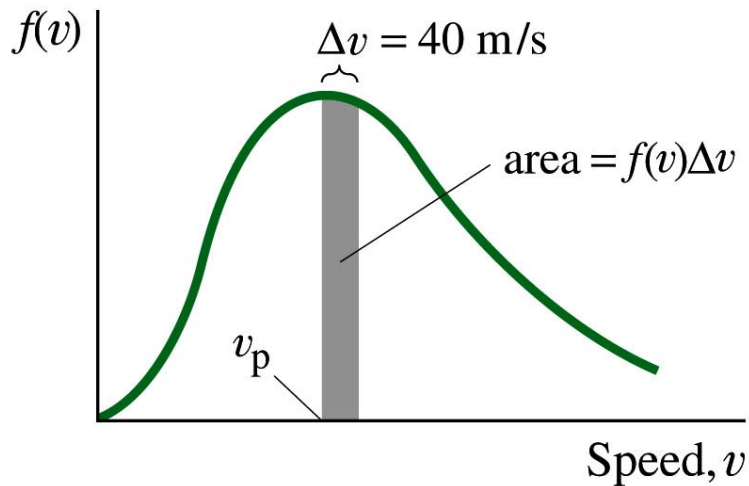
$$v_{sr, kw} = 480 \text{ m / s}$$

# Rozkład Maxwella

- W wyniku zderzeń cząstek gazu następuje redystrybucja pędu, a tym samym energii kinetycznej pomiędzy cząstkami. W wyniku tego ustala się pewien rozkład prędkości cząstek zależny od temperatury.



# Rozkład Maxwella



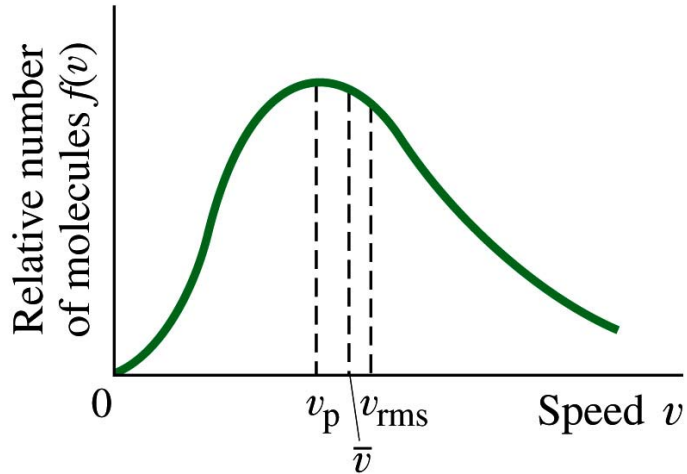
Ilość cząstek  $\Delta N$  posiadających prędkość z przedziału  $(v, \Delta v)$

$$\Delta N = F(v)N \cdot \Delta v$$

$$\frac{\Delta N}{N} = F(v) \cdot \Delta v$$

$$F(v) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{1}{2} \frac{mv^2}{kT}} 4\pi v^2$$

# Rozkład Maxwella



- Prędkość średnia

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v F(v) dv = \sqrt{8kT / (\pi m)}$$

- Prędkość najbardziej prawdopodobna -  $v_p$

$$\frac{dF}{dv} = 0 \Rightarrow v_p = \sqrt{2kT / m}$$



# Rozkład Maxwella

Przykład.

W temperaturze 300K znajduje się gaz He zawierający  $10^6$  atomów.

a) prędkość najbardziej prawdopodobna

$$v_p = \sqrt{2kt / m} = 1.12 \times 10^3 \text{ m / s}$$

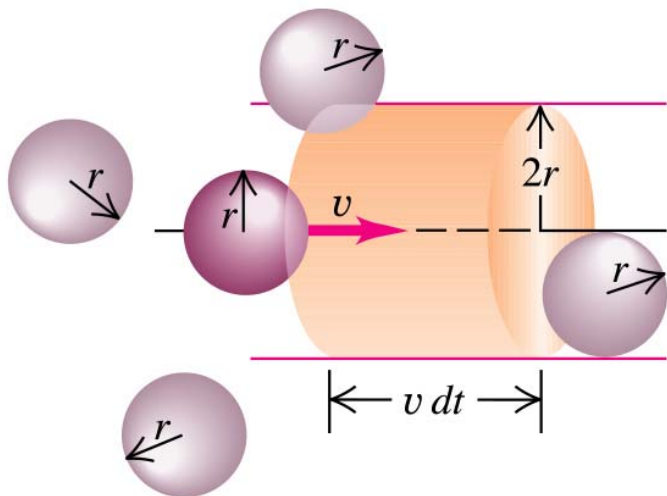
b) ilość atomów posiadających wartość prędkości z przedziału  $(v_p, v_p + 40 \text{ m/s})$

$$\Delta N = F(v)N \cdot \Delta v \approx 30\,000 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta N}{N} = 0.03$$

c) ilość atomów posiadających wartość prędkości z przedziału  $(10v_p, 10v_p + 40 \text{ m/s})$

$$\Delta N = F(v)N \cdot \Delta v \approx 4 \cdot 10^{-39} = 0$$

# Średnia droga swobodna



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

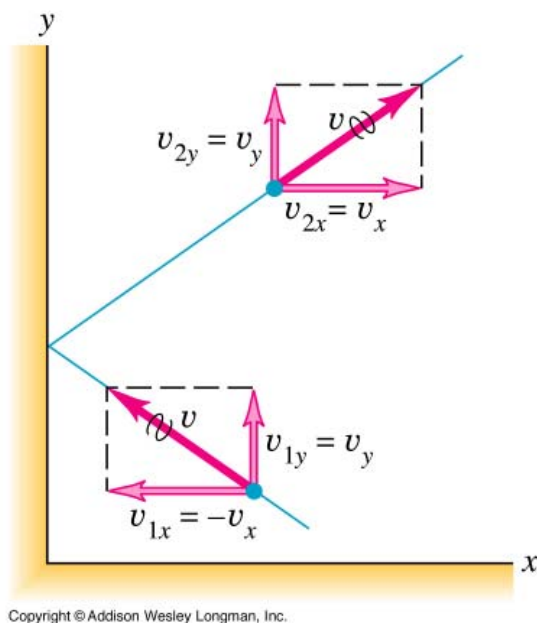
Cząstki gazu są w ciągłym chaotycznym ruchu. W ciągu czasu  $dt$  cząstka o promieniu  $r$  będzie się zderzała z inną cząstką znajdującą się w obszarze walca o promieniu  $r$  i długości  $v dt$ . Średnia droga pomiędzy zderzeniami:

$$\lambda = \frac{kT}{4\pi\sqrt{2} r^2 p}$$

Przykład:  $T=300\text{K}$ ,  $p=1 \text{ atm}$ ,  $r=2 \cdot 10^{-10}\text{m}$

$$\lambda=5.8 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

# Ciśnienie wywierane przez gaz na ścianki naczynia



a) jedna cząstka

założenie: zderzenia doskonale sprężyste

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} \Rightarrow |\vec{v}_1| = |\vec{v}_2| = v_x$$

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2$$

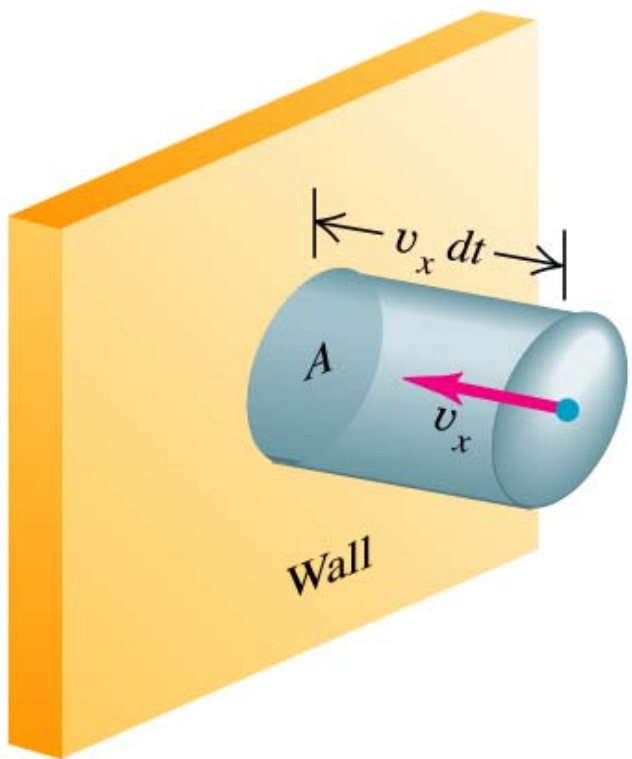
zmiana pędu w wyniku zderzenia:

$$\Delta \vec{p} = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 \Rightarrow \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{2m\vec{v}_x}{\Delta t}$$

$$F = |\vec{F}| = \frac{2mv_x}{\Delta t}$$

b) gaz doskonały o koncentracji  $n$

$\Delta N$  - ilość cząstek uderzających  
w czasie  $\Delta t$  w fragment ściany o  
powierzchni  $\Delta S$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$\Delta N = \frac{1}{2} n v_x \Delta t \Delta S$$

$$F = \frac{2m v_x}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} n v_x \Delta t \Delta S$$

$$p = \frac{F}{\Delta S} = 2n \cdot \frac{m v_x^2}{2}$$

Cząstki w gazie poruszają się całkowicie chaotycznie, stąd

$$v_x^2 = v_y^2 = v_z^2 \quad \longrightarrow \quad v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 3v_x^2$$

$$E_k = \frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2} = \frac{3mv^2}{2}$$

$$p = 2n \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot mv_x^2}{2} = \frac{2}{3}n \cdot E_k$$

$$p = \frac{2}{3}n \cdot E_k = \frac{2}{3}n \cdot \frac{3}{2}kT = nkT$$

## Równanie gazu doskonałego

$$p = nkT$$

$$n = \frac{N}{V} = \frac{n_{mol} N_A}{V} \Rightarrow p = \frac{n_{mol}}{V} N_A k T$$

$\swarrow$   $R$

$n_{mol}$  - ilość moli gazu

## Równanie gazu doskonałego

$$pV = n_{mol} RT$$

# Pojemność cieplna gazu doskonałego

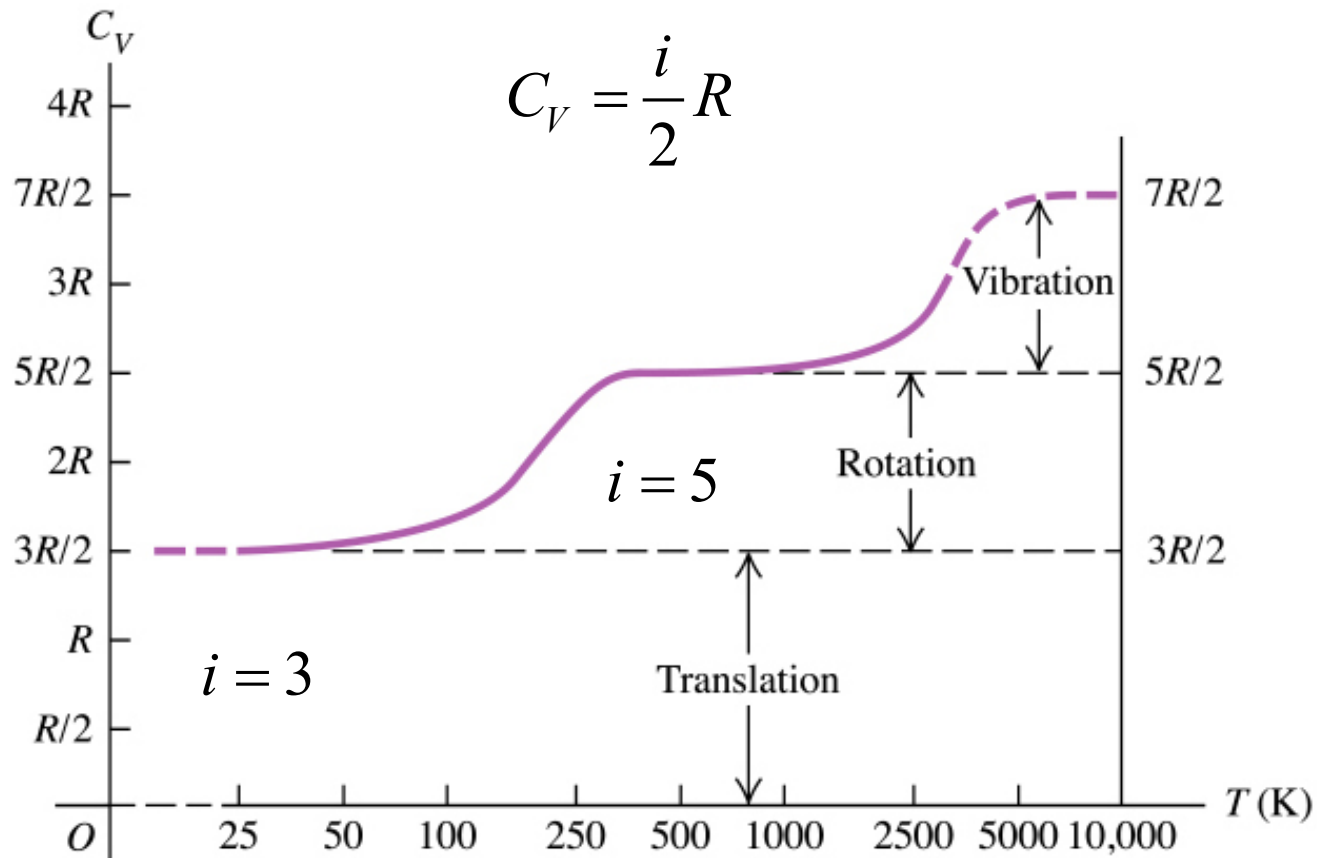
- Energia wewnętrzna jednego mola gazu doskonałego

$$U_m = N_A \cdot \langle E \rangle = \frac{i}{2} N_A k T = \frac{i}{2} R T$$

- Pojemność cieplna przy stałej objętości

$$C_V = \frac{\Delta U_m}{\Delta T} = \frac{\frac{i}{2} R \cdot \Delta T}{\Delta T} = \frac{i}{2} R$$

$$U_m = C_V T \Rightarrow U(T) = n_{mol} C_V T$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Eksperymentalne wartości  $C_V$  dla gazu wodorowego ( $H_2$ )



# Praca gazu

- Tłok przesuwa się na odległość  $dl$  w wyniku ekspansji gazu o ciśnieniu  $p$

- Siła działająca na tłok:

$$F = p \cdot A$$

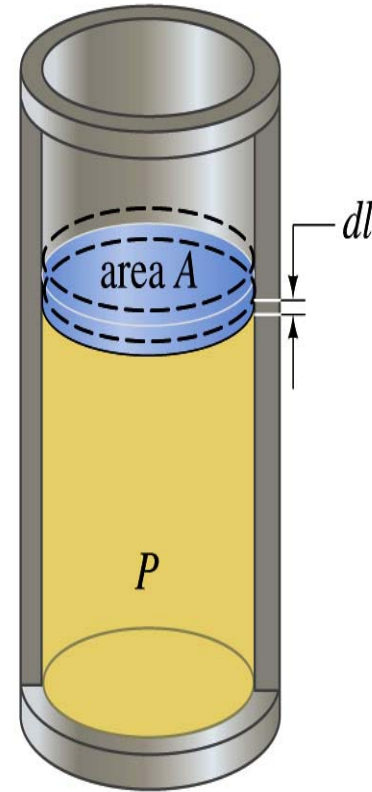
- Wykonana przez gaz praca:

$$dW = F \cdot dl = pA \cdot dl$$

$$dW = p \cdot dV$$

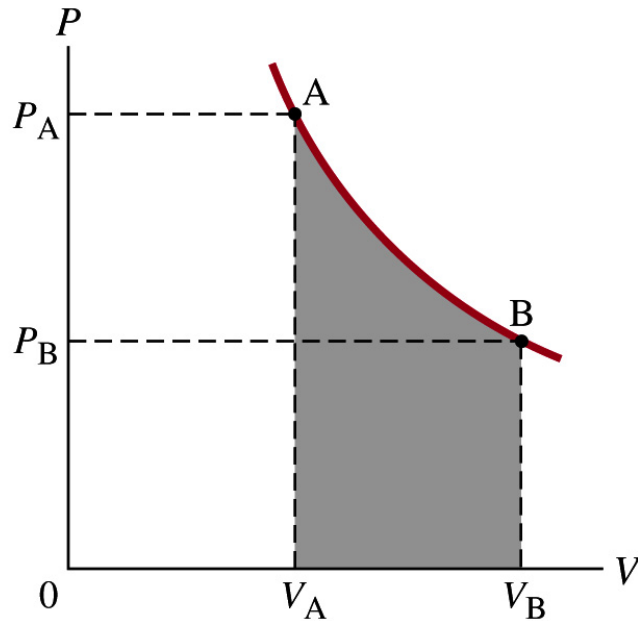
- Praca wykonana przez gaz w czasie rozprężania od objętości  $V_p$  do  $V_k$ :

$$W = \int dW = \int_{V_p}^{V_k} p dV$$



# Praca gazu

Wykonana praca zależy od rodzaju przemiany.

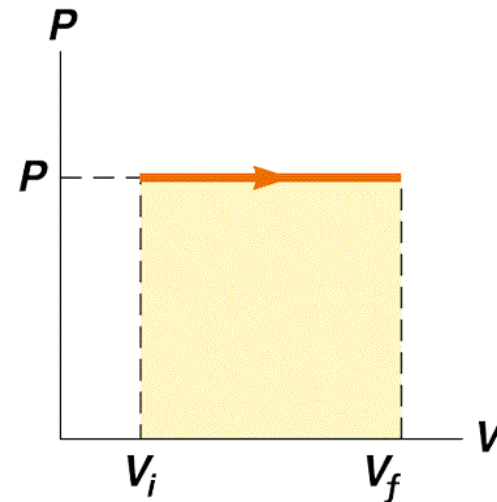
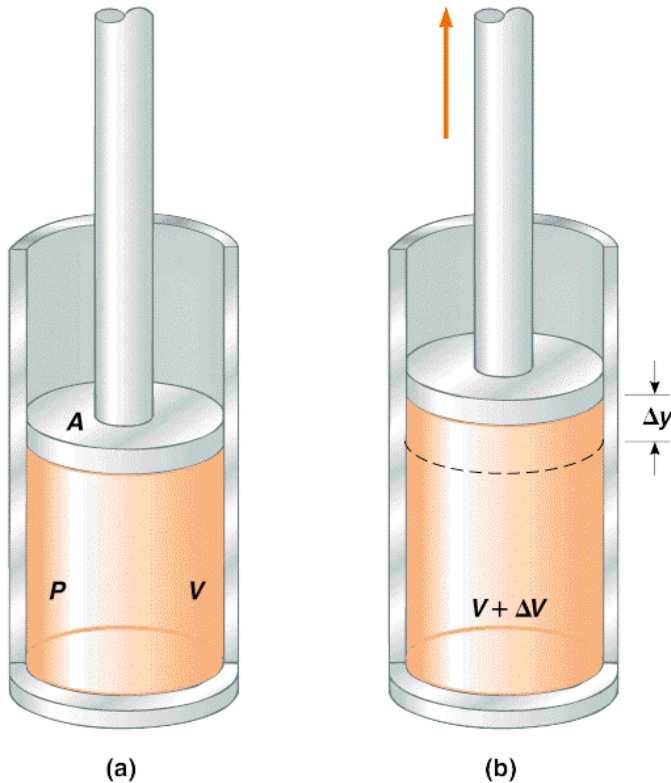


$$W = \int_{V_A}^{V_B} P dV = \text{pole pod krzywą } p - V$$

# Praca gazu przy stałym ciśnieniu

$$\Delta W = F \cdot \Delta x = pA \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V$$

$$\Delta W = p \cdot \Delta V$$



# Praca gazu

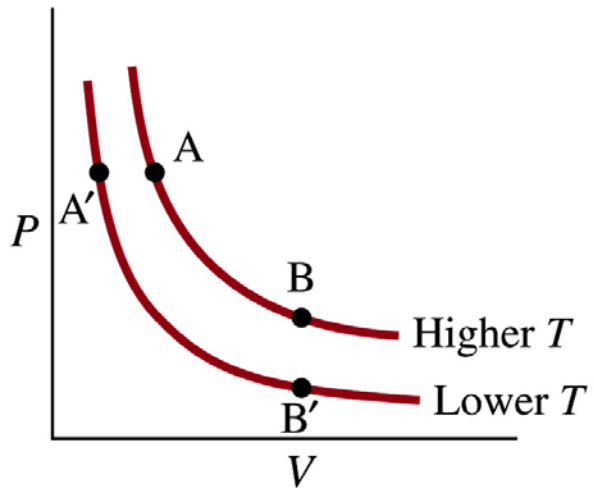
- Praca gazu podczas przemiany izotermicznej -  $T = \text{const.}$

a) równanie przemiany

$$p = \frac{nRT}{V}$$

b) praca

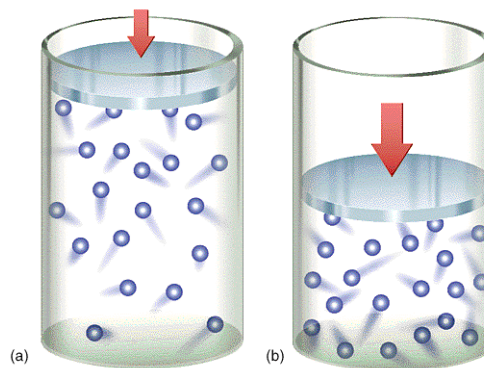
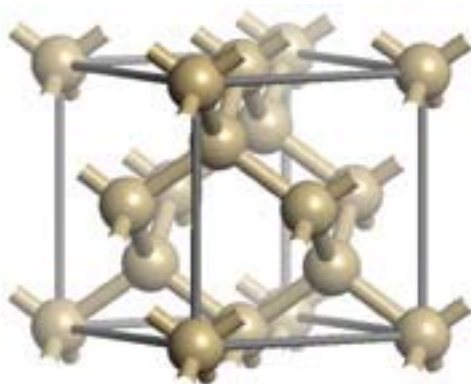
$$W = \int_{V_A}^{V_B} p dV = \int_{V_A}^{V_B} \frac{nRT}{V} dV$$



$$W = nRT \cdot \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

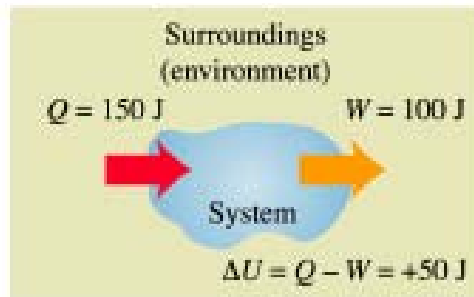
# Energia wewnętrzna

**Energia wewnętrzna** – suma energii kinetycznych i potencjalnych atomów (molekuł) tworzących układ



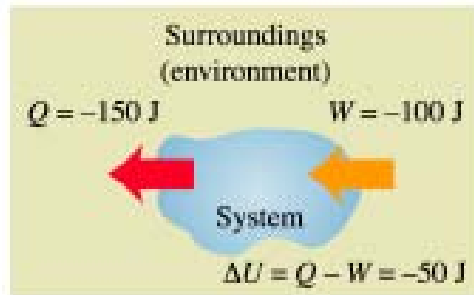
Energia wewnętrzna jest **funkcją stanu**. Jej wartość nie zależy od sposobu (rodzaju procesów termodynamicznych) w jaki stan układu został osiągnięty. **Zależy jedynie** od parametrów makroskopowych określających stan układu.

# Pierwsza zasada termodynamiki



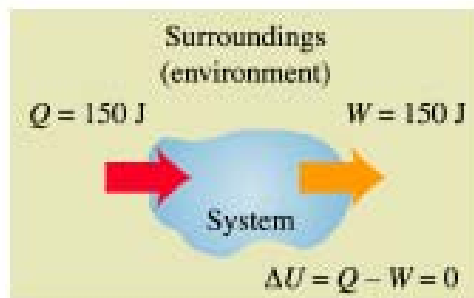
(a)

$$Q = \Delta U + W$$



(b)

$$\Delta Q = \Delta U + p\Delta V$$



(c)

# *Energia wewnętrzna w różnych procesach*

- **proces adiabatyczny** – nie ma transportu ciepła

$$\Delta U = \Delta W \quad (dU = -dW)$$

- **proces izochoryczny** – *stała objętość*

$$\Delta U = \Delta Q \quad (dU = dQ)$$

- **proces cykliczny** – *układ wraca do stanu początkowego*

$$\Delta U = 0$$

- **proces izotermiczny** - *stała temperatura*

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad (dU = dQ - dW)$$

*(dla gazu idealnego  $dU = 0$ )*

- **proces izobaryczny** – *stałe ciśnienie*

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad (dU = dQ - dW)$$

- **Swobodne rozszerzanie** – *proces adiabat. bez wykonania pracy*

$$\Delta U = 0 \quad (dU = 0)$$

# Pierwsza zasada termodynamiki

- Pojemność cieplna jednego mola gazu idealnego przy stałym ciśnieniu

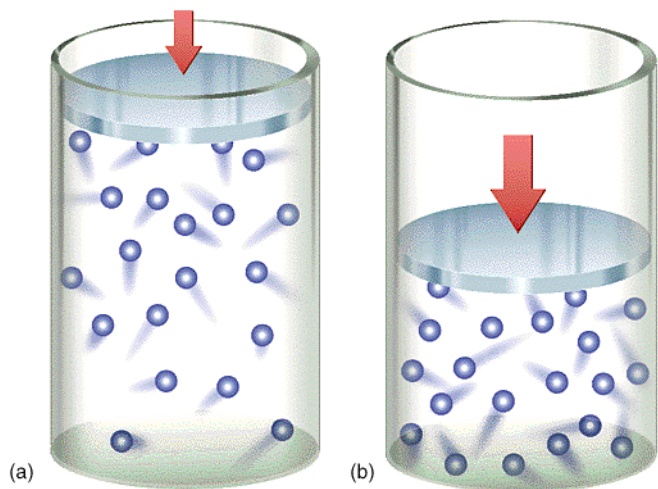
$$\Delta Q = C_p \Delta T$$

$$\Delta Q = \Delta U + p\Delta V$$

$$C_p = \frac{\Delta U}{\Delta T} + p \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

$$C_V \nearrow$$

$$V = \frac{R}{p} T \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{R}{p}$$



$$C_p = C_V + p \frac{R}{p} \Rightarrow C_p = C_V + R$$



# Przemiana adiabatyczna

Przemiana w której wymiana ciepła z otoczeniem  $\Delta Q = 0$

$$dU + dW = 0 \Rightarrow nC_V dT = -pdV = -\frac{nRT}{V} dV$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

ale

$$C_p - C_V = R \Rightarrow \frac{C_p}{C_V} - 1 = \frac{R}{C_V} \quad \text{skąd}$$

$$\frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0$$

Po scałkowaniu otrzymamy

$$\int \frac{dT}{T} = -\int (\gamma - 1) \frac{dV}{V}$$

$$\ln(T) = -(\gamma - 1) \ln(V) + C \Rightarrow TV^{\gamma-1} = \text{constant}$$

# Przemiana adiabatyczna

- Równanie adiabaty

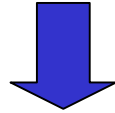
$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

Z równania gazu doskonałego:  $T = \frac{pV}{nR}$  skąd

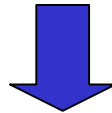
$$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}$$

# Przemiana w przemianie adiabatycznej

$$\Delta U = -W$$



$$W = nC_V(T_1 - T_2)$$



$$W = \frac{C_V}{R} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$



$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

# Silnik cieplny

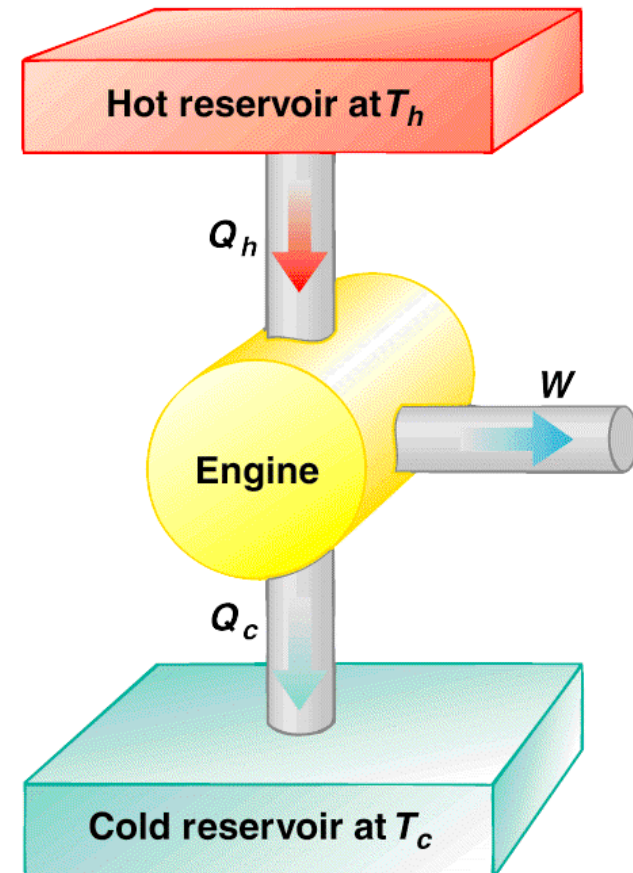
Warunki zamiany ciepła na pracę:

- Ciepło musi przepływać ze źródła do chłodnicy

$$T_h > T_c$$

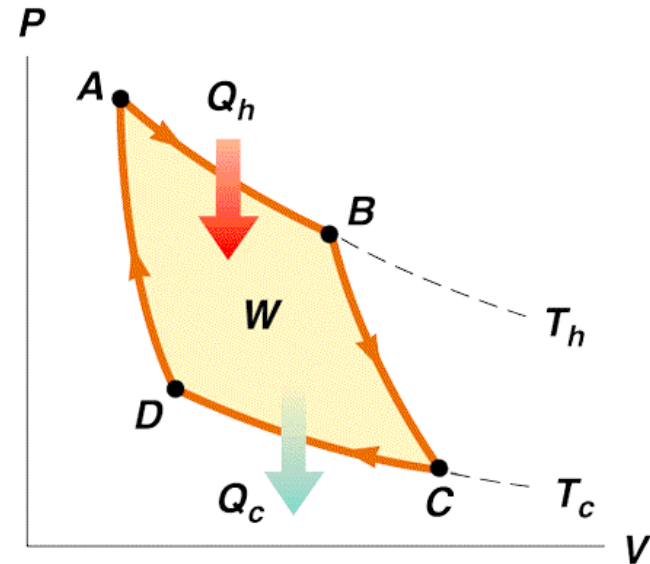
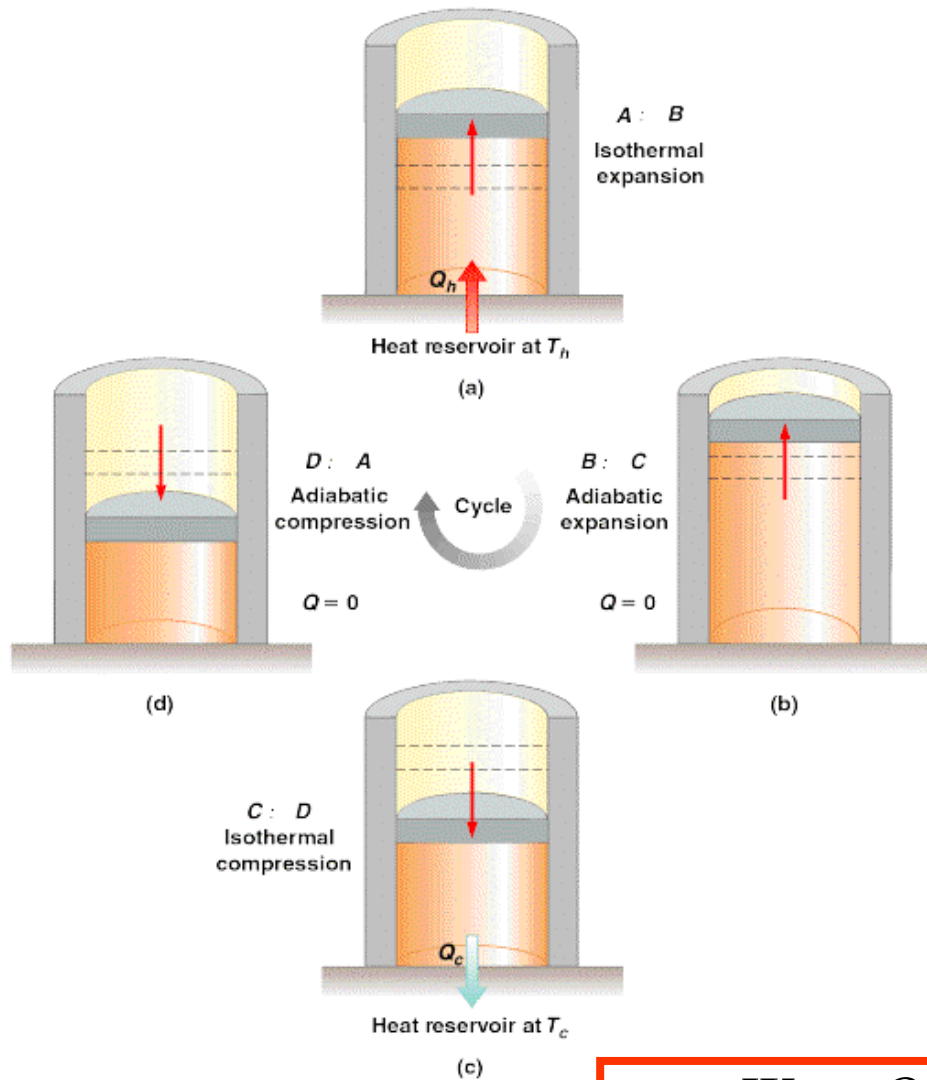
- Musi istnieć czynnik roboczy pracujący w cyklu kołowym
- Część przepływającego ciepła jest bezpowrotnie oddawana do chłodnicy

Serway, College Physics, 5/e  
Text Figure 12.6



# Cykl Carnota

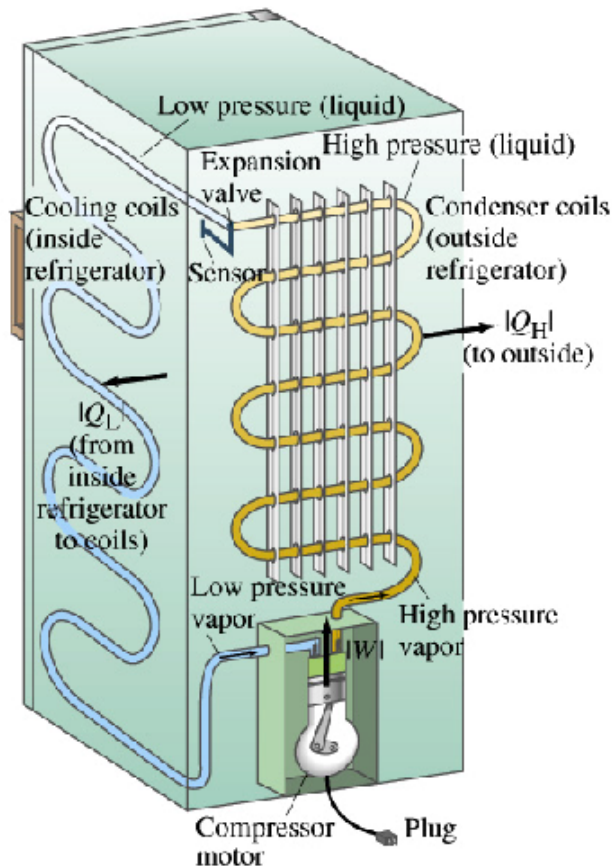
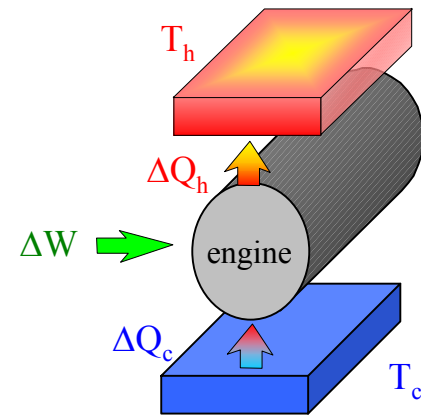
- A-B izotermiczne rozprężanie
- B-C adiabatyczne rozprężanie
- C-D izotermiczne sprężanie
- D-A adiabatyczne sprężanie



$$\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = \frac{T_h - T_c}{T_c}$$

# Lodówka

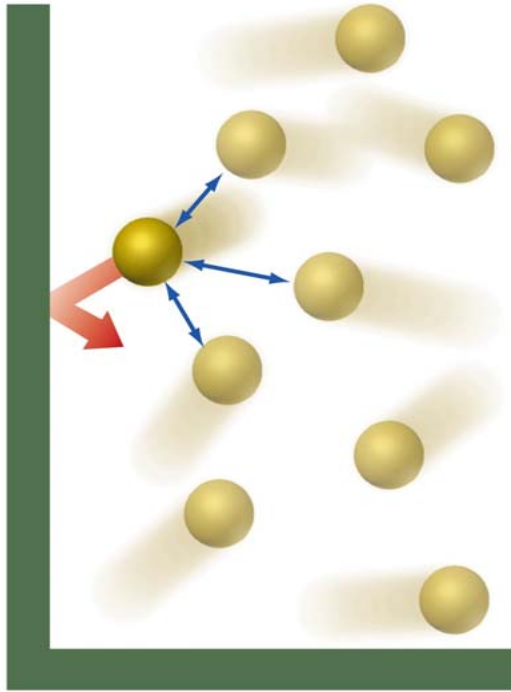
Lodówka przenosi ciepło od ciała o niższej temperaturze do ciała o wyższej temperaturze.



## Zasada pracy:

- kompresor spręża gaz do wysokiego ciśnienia
- na wymienniku ciepła sprężony gaz oddaje ciepło do otoczenia i ulega skropleniu
- skroplony gaz poprzez zawór przechodzi do obszaru o niskim ciśnieniu i odparowuje absorbując ciepło z wnętrza lodówki

# Gaz van der Waalsa



- Z powodu przyciągania się cząsteczek gaz rzeczywisty wywiera większe ciśnienie na ścianki naczynia
- Rzeczywista objętość „dostępna” dla cząstek gazu jest mniejsza niż objętość naczynia w którym gaz się znajduje

$$\left( p + \frac{n^2 a}{V} \right) (V - nb) = nRT$$

a, b - stałe van der Waalsa

n - ilość moli gazu

# Gaz van der Waalsa

Energia wewnętrzna gazu van der Waalsa:

$$U = nC_vT - \frac{n^2a}{V}$$



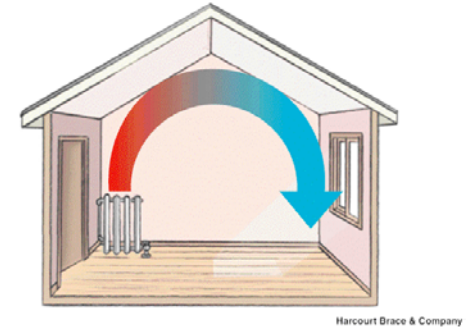
# Transport ciepła

## Mechanizmy transportu ciepła:

### 1. Konwekcja cieplna -

Energia cieplna przenoszona jest w wyniku transportu gazu.

Serway, College Physics, 5/e  
Text Figure 11.7



### 2. Promieniowanie cieplne

Energia przenoszona przez fale elektromagnetyczne z zakresu podczerwieni.

Serway, College Physics, 5/e  
Text Figure 11.8



### 3. Przewodnictwo cieplne

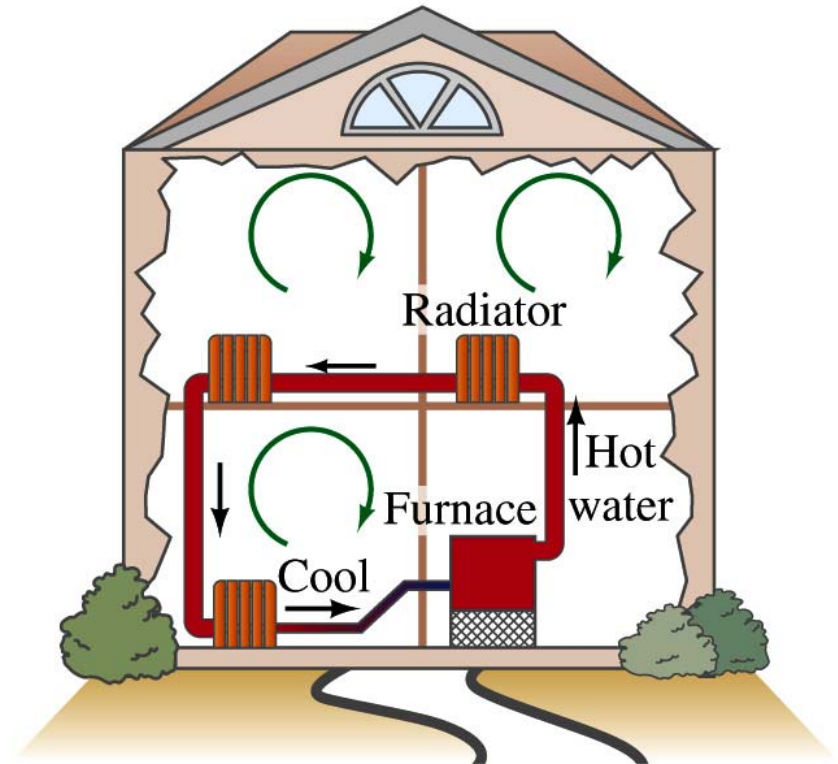
Energia cieplna przenoszona jest w wyniku różnicy temperatur pomiędzy różnymi miejscami.

Serway, College Physics, 5/e  
Text Figure 11.3



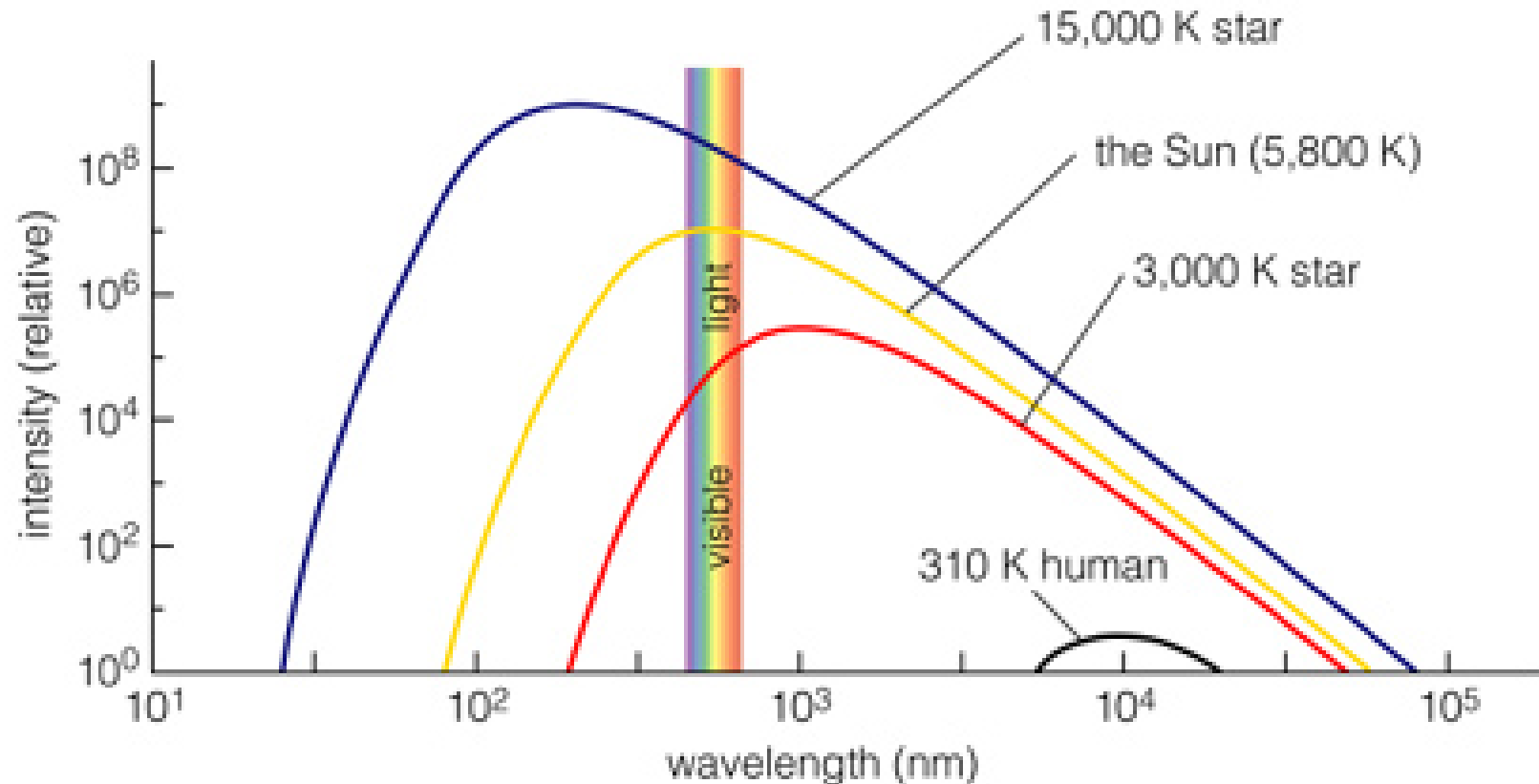
# Transport ciepła - konwekcja

- Transport ciepła w wyniku przemieszczania się substancji.



# Transport ciepła - promieniowanie cieplne

- Każde ciało emituje energię w postaci fali elektromagnetycznej.



# Transport ciepła - promieniowanie cieplne

**Moc emitowanej  
fali:**

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \sigma A T^4$$

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

$A$  = surface area

$\varepsilon$  = współczynnik emisyjności (*liczba między 0 a 1*)

$T$  = temperatura w skali Kelvina

# Przewodnictwo ciepłne

Szybkość transportu ciepła:

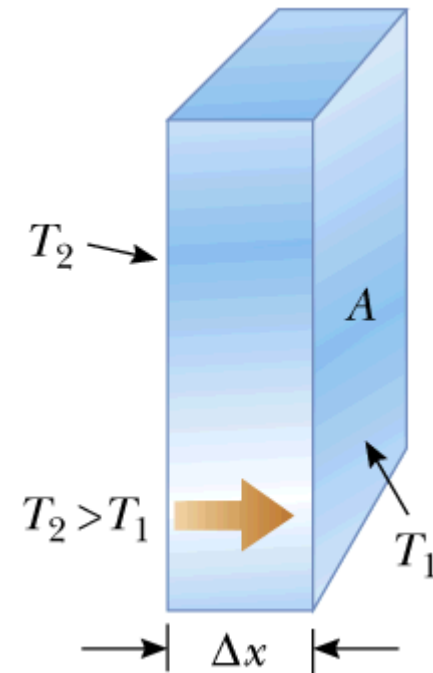
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}$$

Jednostka: 1 J/s = 1 W

$k$  - współczynnik przewodnictwa cieplnego

$A$  - pole przekroju poprzecznego

material	k (W/(m·°C))
miedź	238
szyba	0.8
woda	0.6
powietrze	0.0234

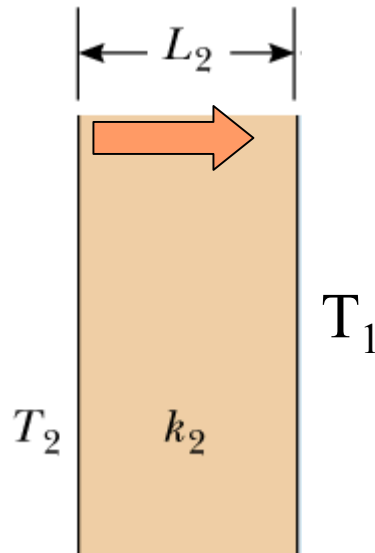


# Przewodnictwo ciepłne

Przykład 1.

Pojedyncza szyba -  $T_1=20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2=0^{\circ}\text{C}$

$A=1\text{m}^2$ ,  $L_2=0.002\text{m}$ ,  $k_2=0.8\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$



$$\frac{dQ}{dt} = k_2 A \frac{T_2 - T_1}{L_2} = 8000\text{ W}$$

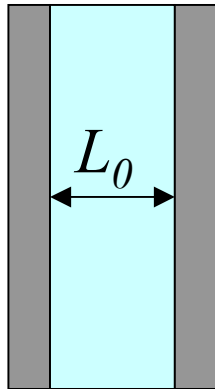
# Przewodnictwo ciepłne

Przykład 2.

Podwójna szyba z warstwą powietrza -  $T_1=20^\circ\text{C}$ ,  $T_2=0^\circ\text{C}$

szyba :  $A=1\text{m}^2$ ,  $L_1=L_2=0.002\text{m}$ ,  $k_2=0.8\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

powietrze :  $L_0=0.01\text{m}$ ,  $k_0=0.0234\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

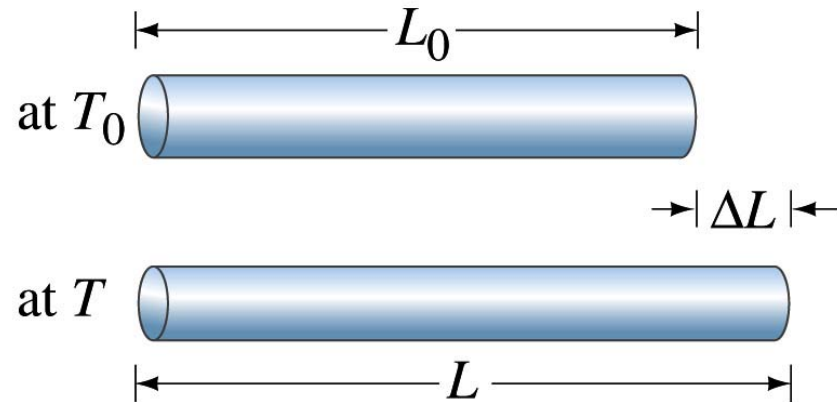
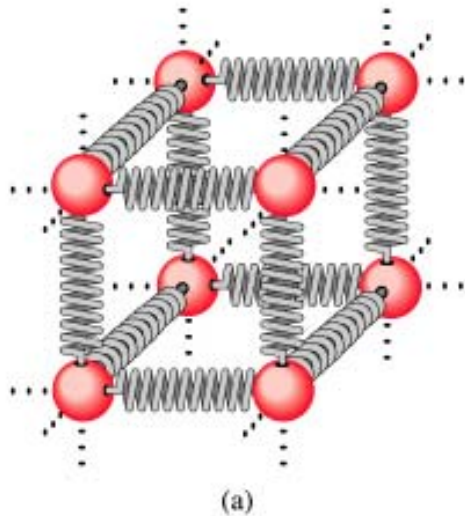


$$\frac{dQ}{dt} = k_{eff} A \frac{T_2 - T_1}{L_2 + L_1 + L_0}$$

$$k_{eff} = \frac{L_2 + L_1 + L_0}{L_2 / k_2 + L_1 / k_1 + L_0 / k_0}$$

$$\frac{dQ}{dt} = 46\text{ W}$$

# Rozszerzalność termiczna ciał stałych



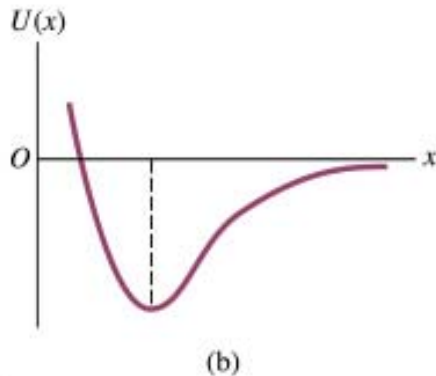
Zmiana długości:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

Zmiana objętości:

$$\Delta V = 3\alpha V_0 \Delta T$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$\alpha_{Al} = 7.2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$$