



# Przekaz energii elementy termodynamiki

Dr hab. inż. Jarosław Kanak  
Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321  
[kanak@agh.edu.pl](mailto:kanak@agh.edu.pl)  
<http://layer.uci.agh.edu.pl/~kanak>



## THERMAL PHYSICS

- Fenomenologicznie - wielkość informująca o tym jak ciepłe/zimne jest dane ciało.
- Kinetyczno molekularnie - jest określona przez średnią energię kinetyczną ruchu cząsteczek ciała.

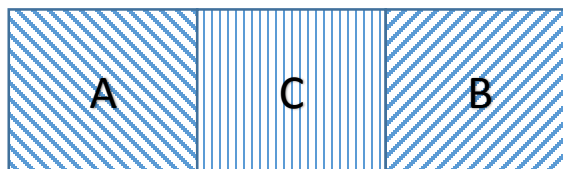


# Pomiar temperatury

- Zmiana temperatury zmiany  $\rightarrow$  własności ciał  $\rightarrow$  termoskop
- Wyskalowany termoskop  $\rightarrow$  termometr

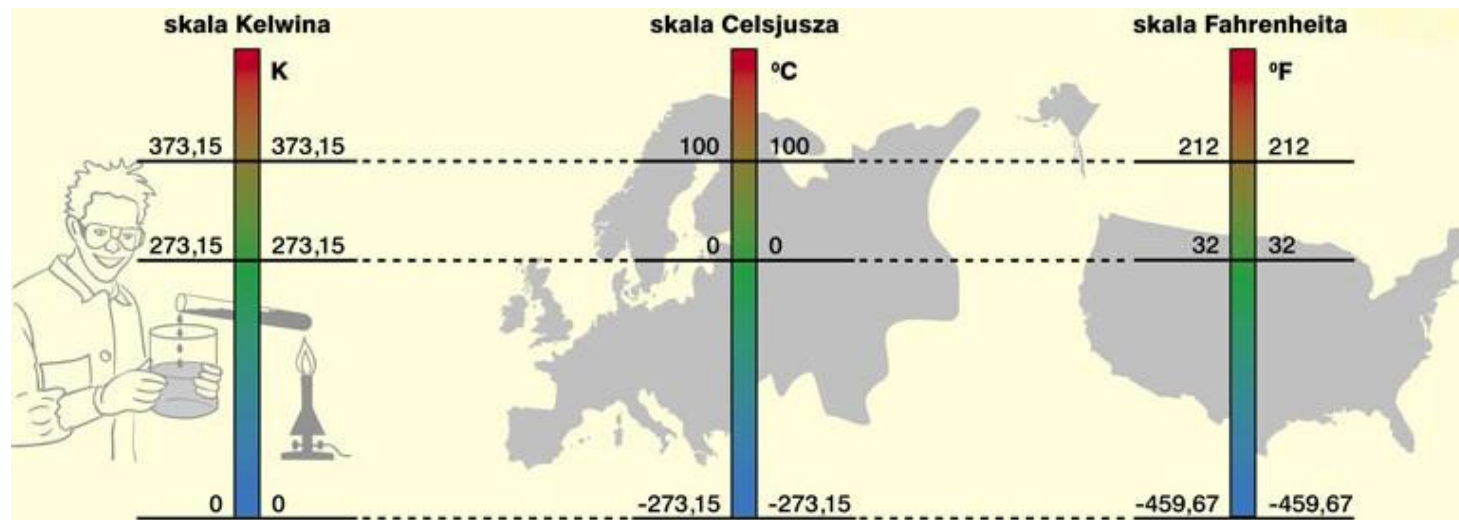


- Pomiar temperatury Zasada pomiaru opiera się na  
**ZEROWEJ ZASADZIE TERMODYNAMIKI**



**Jeżeli układ A i układ B są w równowadze termicznej z układem C, to są w równowadze termicznej względem siebie.**

# Skale temperatur



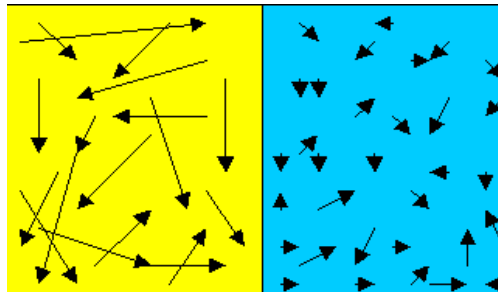
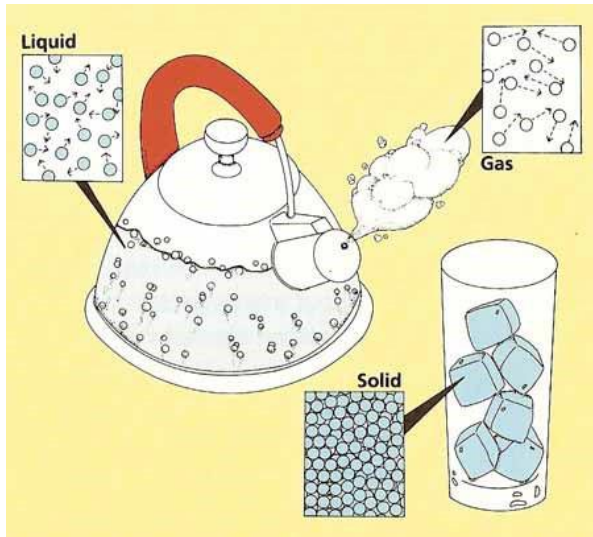
- Punkty termometryczne:
  - Wrząca woda
  - Topniejący lód
  - Temperatura ciała

punkt potrójny wody  
= 273,16 K

$$T_C = T_K - 273,16 \text{ K}$$

$$\Delta T_C = \Delta T_K \quad T_F = 9/5 (T_{KC} + 32)$$

# Kinetyczno-molekularna interpretacja temperatury



Gaz  
gorący

Gaz  
zimny

Związek energii kinetycznej cząsteczki z temperaturą:

$$\langle E_K \rangle \sim kT$$

Gdzie  $k$  – stała Boltzmana

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

- Dla cząsteczki jednoatomowej:

$$\langle E_K \rangle = \frac{3}{2} kT$$

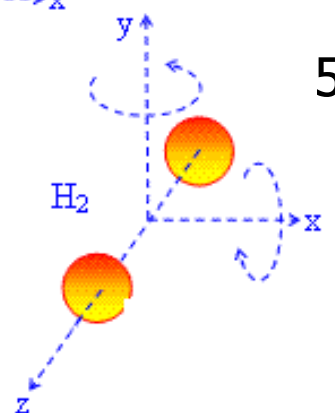
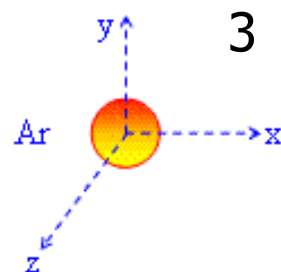
- Dla cząsteczki dwuatomowej:

$$\langle E_K \rangle = \frac{5}{2} kT$$

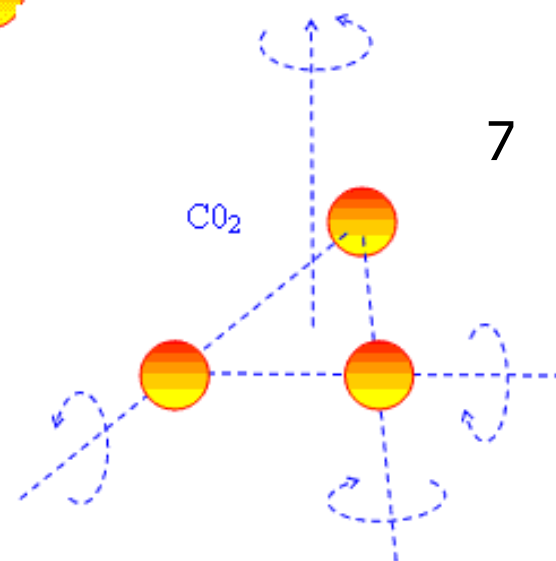
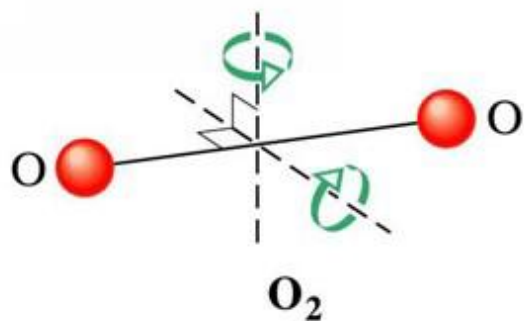


# Stopnie swobody cząstek

- Liczba danych koniecznych i wystarczających do określenia położenia ciała w przestrzeni



- Dla cząsteczki dwuatomowej:



$$\langle E_K \rangle = \frac{m\langle V_x^2 \rangle}{2} + \frac{m\langle V_y^2 \rangle}{2} + \frac{m\langle V_z^2 \rangle}{2} + \frac{I_y\langle \omega_y^2 \rangle}{2} + \frac{I_z\langle \omega_z^2 \rangle}{2}$$

# Zasada ekwipartycji energii

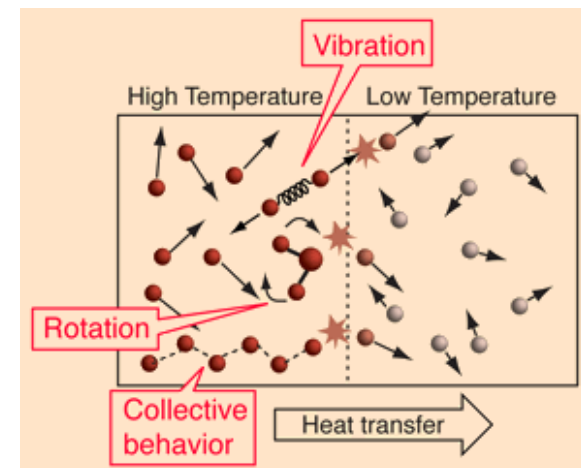
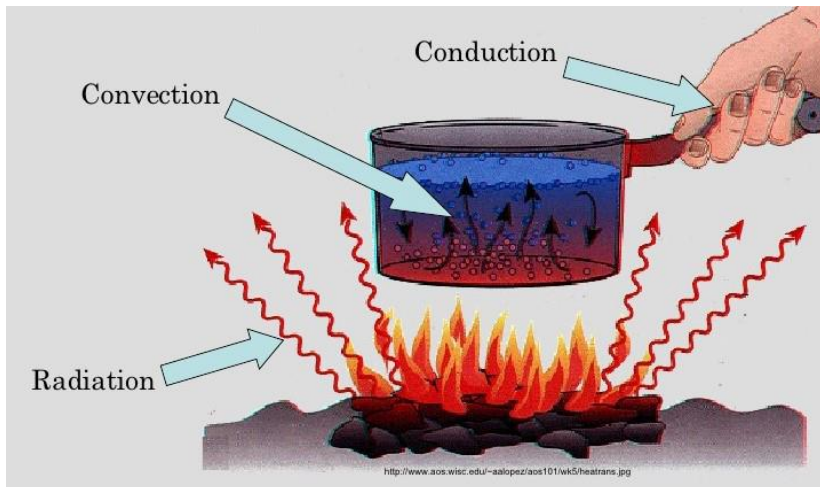


- Zgodnie z zasadą ekwipartycji energii na każdy stopień swobody przypada ta sama średnia wartość energii kinetycznej

$$\frac{m\langle V_i^2 \rangle}{2} = \frac{I_i\langle \omega_i^2 \rangle}{2} = \frac{1}{2}kT$$

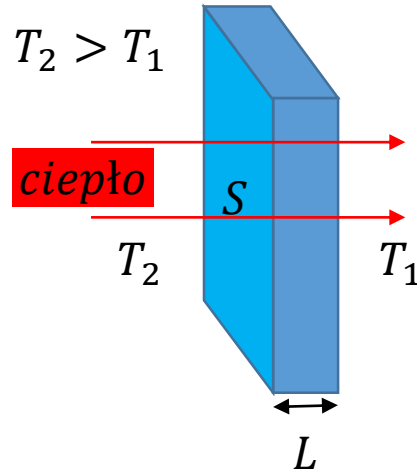
- Dla cząsteczki jednoatomowej:  $\langle E_K \rangle = \frac{3}{2}kT$

- Dla cząsteczki dwuatomowej:  $\langle E_K \rangle = \frac{5}{2}kT$





# Przewodnictwo ciepłne



- Przepływ ciepła w jednostce czasu:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \lambda \cdot S \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$\frac{dQ}{dT} = -\lambda \cdot S \frac{dT}{dx}$$

Minus oznacza przepływ ciepła przeciwnie do gradientu temperatury.

- $\lambda$  - przewodność cieplna materiału [W/m·s·K]

Materiał	$\lambda$ [W/m·s·K]
stal	40
szkło	0.84
styropian	0.036
powietrze	0.025

- Dla konkretnej przegrody współczynnik przenikania ciepła:

$$U = \frac{\lambda}{L}$$

- Przykładowo, dla ścian zewnętrznych budynków mieszkalnych współczynnik przenikania ciepła nie powinien być większy niż 0,23 [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>], niezależnie od rodzaju ściany

**Przykład.** Obliczyć szybkość przepływu ciepła przez szybę o grubości 3 mm i wymiarach 2 m x 1,5 m, przy różnicy temperatur 1°C między jej powierzchniami.

Odp.: 840 W





# I zasada termodynamiki

- O zmianach energii wewnętrznej układu wnioskujemy ze zmian parametrów określających stan termodynamiczny:  $p$ ,  $V$ ,  $T$
- Istnieją dwa sposoby wymiany energii między układami w formie **CIEPŁA** lub **PRACY**

Mówi o tym I zasada termodynamiki:

$$\Delta U = Q + W$$

Energia wewnętrzna układu rośnie gdy dostarczamy ciepła lub wykonujemy nad układem pracę.

Ilość przekazanego ciepła zależy od:

- rodzaju substancji (jej ciepła właściwego)
- masy substancji
- uzyskanej różnicy temperatur

$$Q = c_w \cdot m \cdot \Delta T$$



# I zasada termodynamiki

- Przy ogrzewaniu układu:  $\Delta T = T_k - T_0 > 0 \Rightarrow Q > 0$  - ciepło jest pobierane przez układ
- Przy oziębianiu układu:  $\Delta T = T_k - T_0 < 0 \Rightarrow Q < 0$  - ciepło jest oddawane przez układ

Stąd zasada bilansu cieplnego:

$$\Sigma Q = 0$$

- w jednym molu substancji jest  $N_A = 6.023 \cdot 10^{23}$  cząsteczek
- masa gazu  $m = n \cdot \mu$  (gdzie  $\mu$  masa molowa,  $n$  ilość moli)
- ciepło właściwe a ciepło molowe:

$$c_w = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

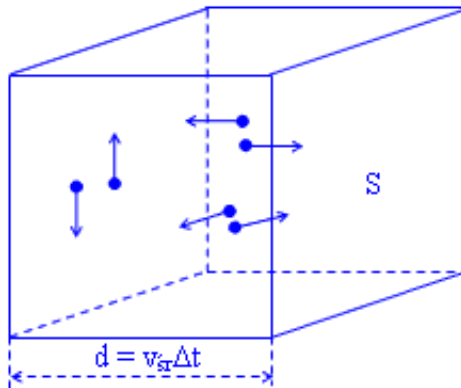
$$C = \frac{Q}{n \cdot \Delta T}$$

# Równanie stanu gazu doskonałego



Gaz doskonały:

- punkty materialne
- oddziałują ze sobą tylko podczas zderzeń, które są idealnie sprężyste
- poruszają się jednostajnie prostoliniowo



Nacisk na jedną ściankę wywierany przez  $N$  cząstek:

$$\langle F \rangle = \frac{1}{3} \frac{N}{d} \langle m v^2 \rangle$$

Ciśnienie na jedną ściankę:

$$p = \frac{\langle F \rangle}{d^2} = \frac{1}{3} \frac{N}{V} \langle m v^2 \rangle = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left\langle \frac{m v^2}{2} \right\rangle$$

# Równanie stanu gazu doskonałego



$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle$$

$$\langle E_K \rangle = \frac{3}{2} kT \quad \longrightarrow \quad pV = NkT \quad \longrightarrow \quad \boxed{\frac{pV}{T} = \text{const}}$$

Przy przejściu między dwoma stanami gazu:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

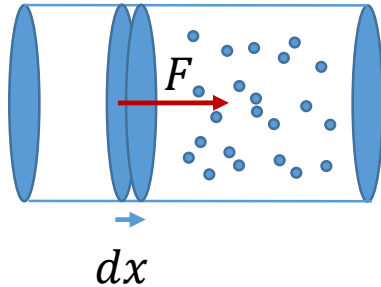
Dla jednego mola gazu w warunkach normalnych:  $\frac{p_0 V_0}{T_0} = R$        $R = 8.31 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$

Dla  $n$  moli gazu w warunkach normalnych:

$$pV = nRT \quad \text{równanie Clapeyrona}$$

$$pV = \frac{m}{\mu} RT$$

# Praca w termodynamice



$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{x} = p \cdot S \cdot dx = p \cdot dV$$

$$W = \int dW = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$$

W tym wypadku objętość się zmniejsza  $dV < 0$  zatem aby być w zgodzie z I zasadą termodynamiki należy przyjąć że praca siły zewnętrznej:

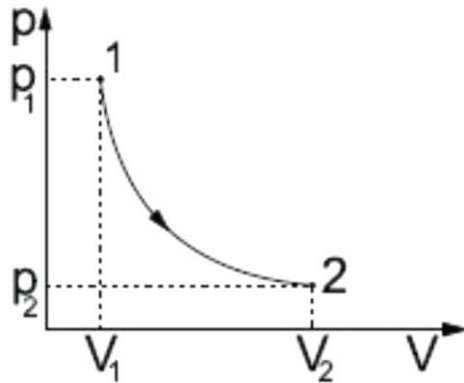
$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$$

jeżeli gaz się rozpręża:  $dV > 0$  to  $W < 0$

$$W = -p\Delta V$$

Uwaga! W podręcznikach anglojęzycznych często stosowana jest umowa odwrotna! (wówczas  $\Delta U = Q - W$ )

# Przykład



Podczas rozprężania gaz przechodzi ze stanu 1 do stanu 2. Zakładamy, że  $T_1 = T_2$ .

Równanie Clapeyrona

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

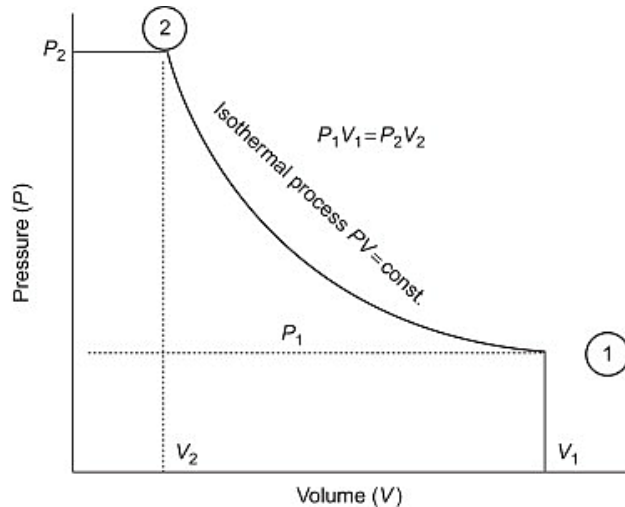
$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = -nRT \left| \ln V \right|_{V_1}^{V_2} = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} < 0$$

oznacza to, że to gaz wykonuje pracę



# Przykład c.d.



Określić rodzaj gazu, którego masa 2 kg została sprężona izotermicznie w temperaturze 27 °C tak, że ciśnienie wzrosło trzykrotnie i wykonano przy tym pracę  $1.37 \cdot 10^3$  kJ

Równanie Clapeyrona

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

$$W = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$n = \frac{m}{\mu}$$

$$W = -\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$T_1 = T_2 \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \longrightarrow V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{V_1}{3} \longrightarrow W = -\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{1}{3}$$

$$1.37 \cdot 10^6 = -\frac{2}{\mu} 8.31 \cdot 300 \ln \frac{1}{3} \quad \mu = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot \text{K}}{\text{J}} = 4 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \longrightarrow \text{He}$$

# Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego



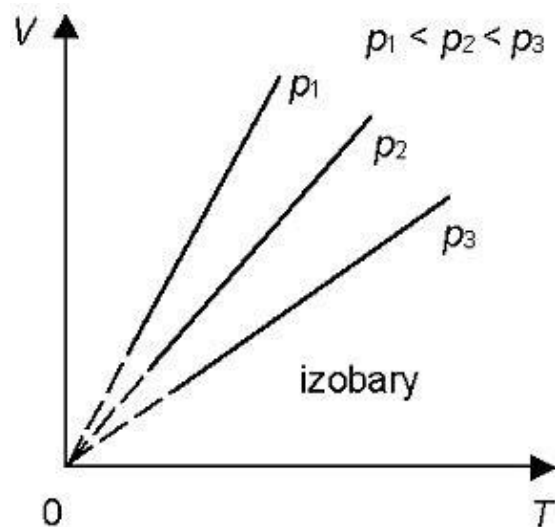
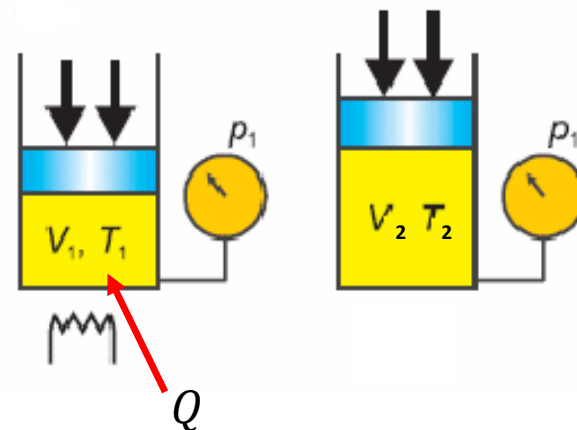
## ■ Izobaryczna *Gay-Lusac'a*

$$p = const$$

$$\frac{V}{T} = const$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$



$$V = V_0(1 + \alpha \Delta T)$$

$V_0$  – objętość w 0 °C

$\alpha$  – współczynnik rozszerzalności objętościowej gazu

$$[\alpha] = \frac{1}{deg}$$



# Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego

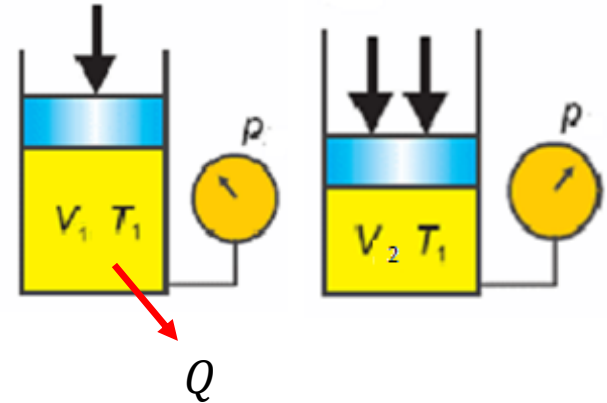


- Izotermiczna  
*Boyl'a-Mariotte'a*  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$

$$T = \text{const} \quad \longrightarrow \quad \Delta U = 0$$

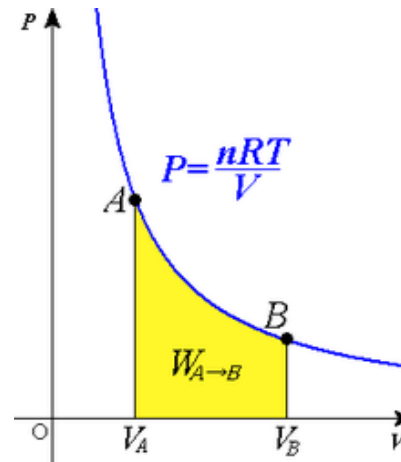
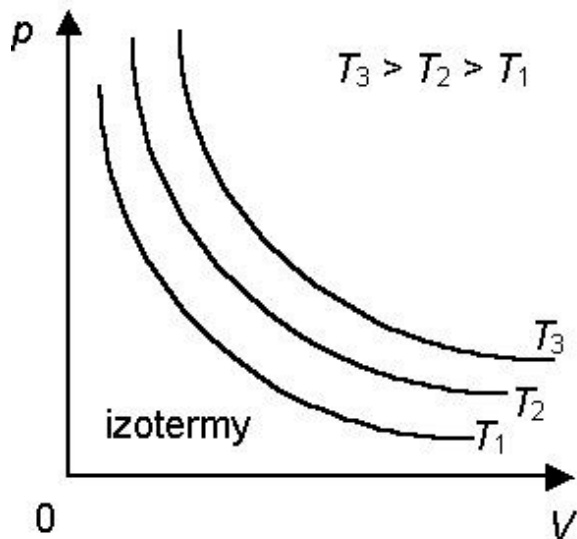
$$pV = \text{const}$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$



Układ oddaje ciepło:  $Q < 0$

Pracę wykonuje siła zewnętrzna:  $W > 0$



$$W = -RT \ln \frac{V_B}{V_A}$$

# Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego



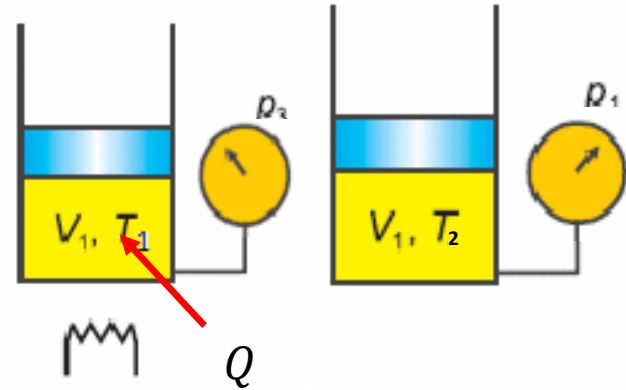
## ■ Izochoryczna Charles'a

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$V = \text{const}$$

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$



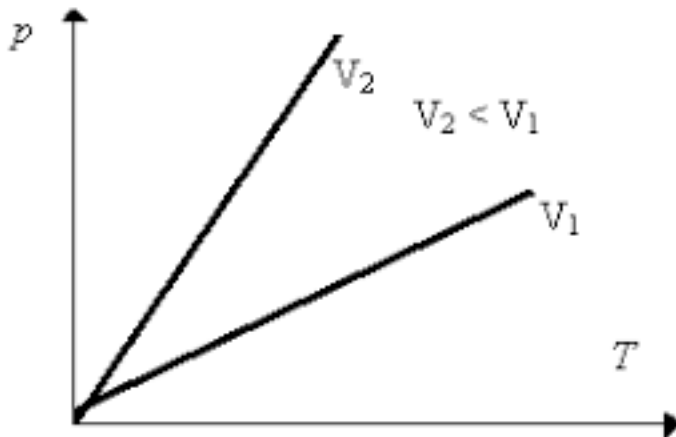
Do układu dostarczono ciepło:  $Q > 0$

Układ nie wykonuje pracy:  $W = 0$

$$\Delta U = Q$$

$$p = p_0(1 + \beta \Delta T)$$

$\beta$  – współczynnik termicznej rozprężliwości gazu



# Przemiany termodynamiczne gazu doskonałego



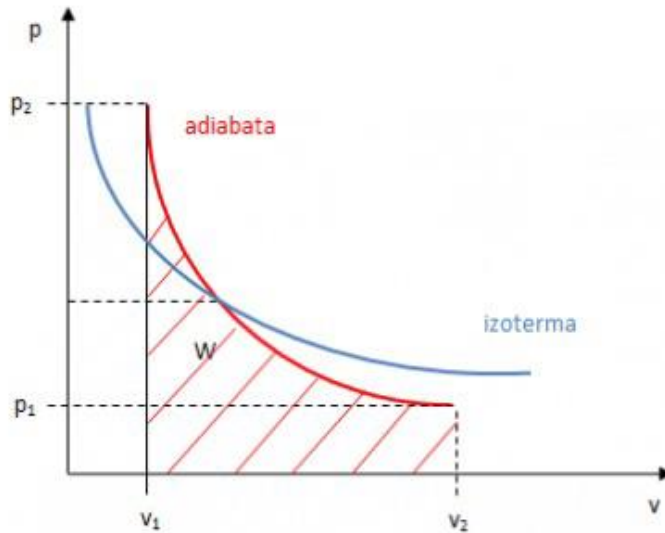
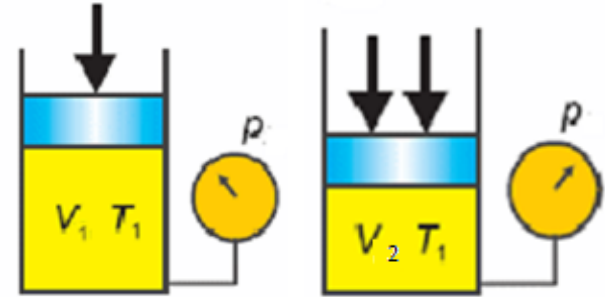
## ■ Adiabaticzna

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$pV^\kappa = \text{const}$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}$$



Układ izolowany:  $Q = 0$

Praca siły zewnętrznej:  $W > 0$

$$\Delta U = W$$

# Cykl Carnot'a



Izolowane ścianki  
i tłok



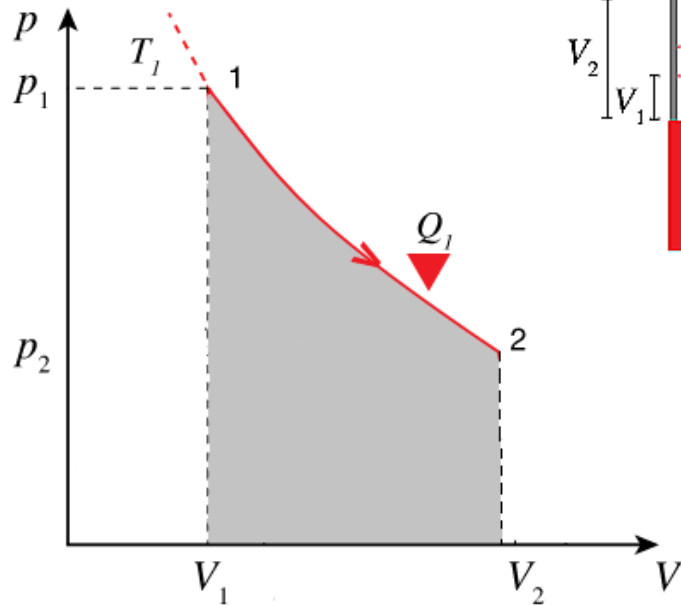
Zasada pracy silników cieplnych:  
Substancja robocza dokonuje szeregu przemian termodynamicznych (cykli mniej lub bardziej zamkniętych), pobierając ciepło i w ich wyniku wykonuje pracę.

Nieskończona pojemność cieplna źródła i chłodnicy

# Cykl Carnot'a



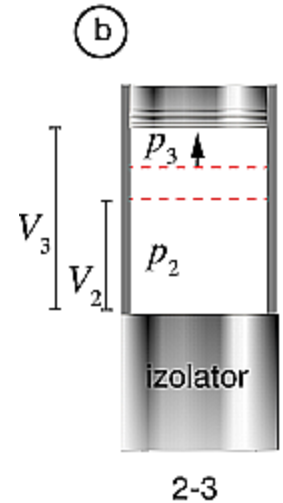
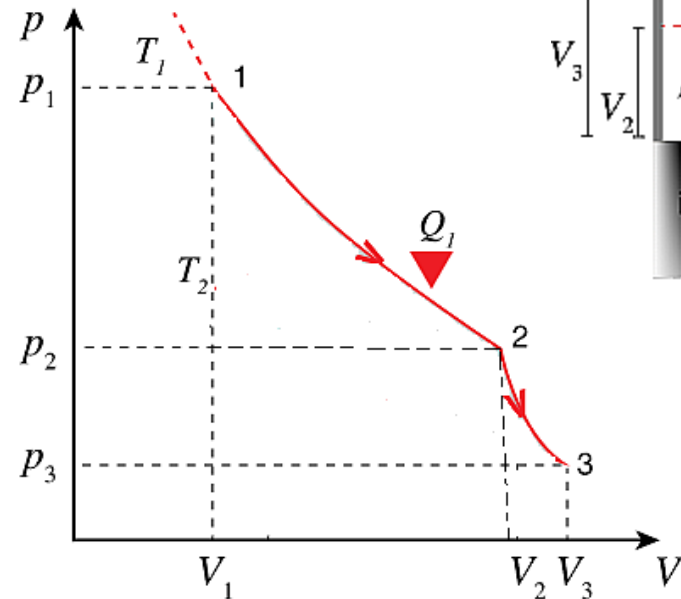
rozprężanie  
izotermiczne



$$\Delta U = 0$$

$$Q_1 = W_1$$

rozprężanie  
adiabaticzne



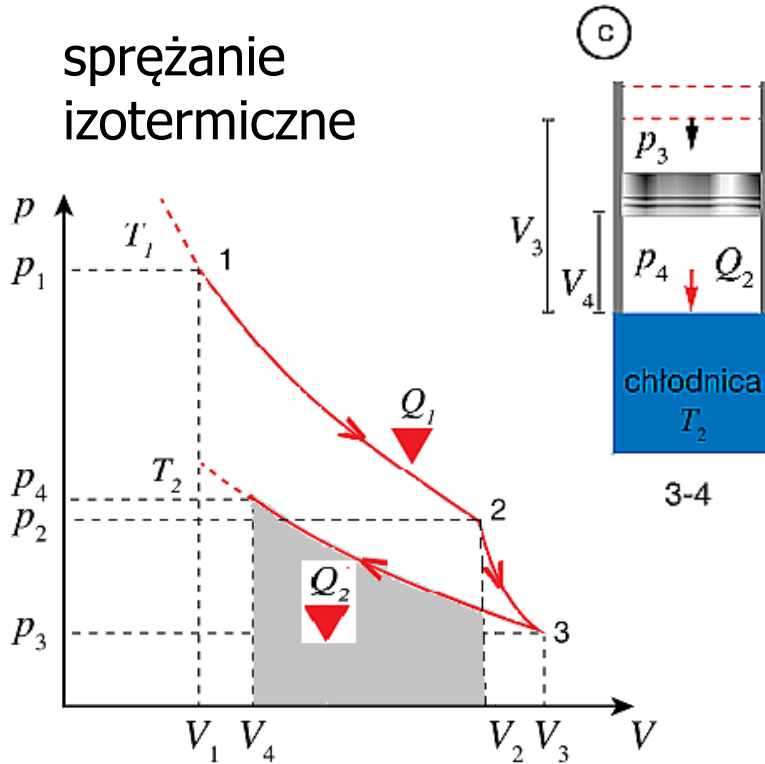
$$W_a = \Delta U$$

Koszt energii wewnętrznej gazu

# Cykl Carnot'a



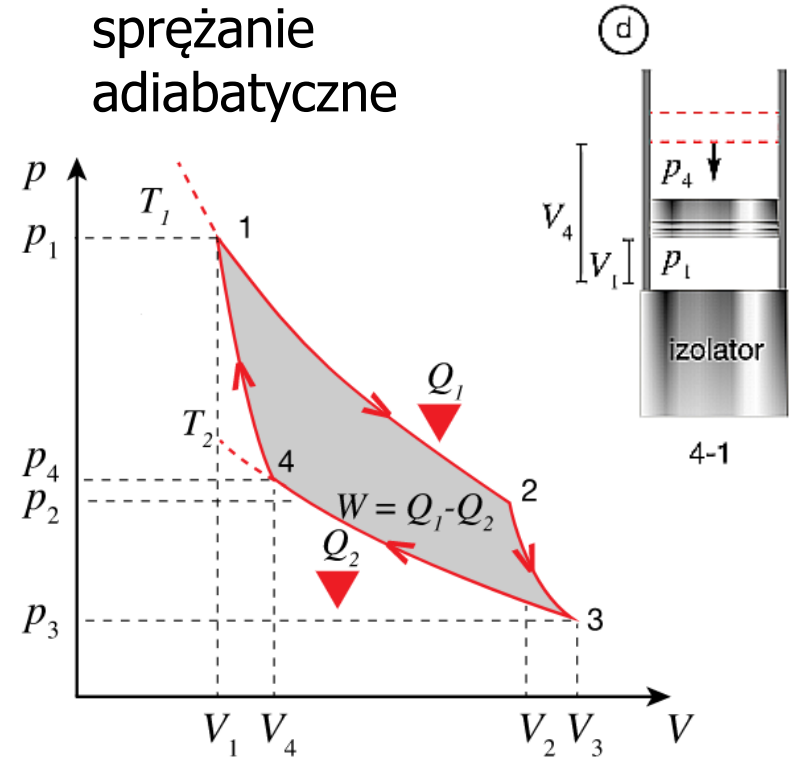
sprężanie izotermiczne



$$\Delta U = 0$$

$$Q_2 = W_2$$

sprężanie adiabatyczne



$$W_a = \Delta U$$

nad gazem wykonywana jest praca

praca wykonana w cyklu kosztem pobranego ciepła

$$W = Q_1 - Q_2$$

# Cykl Carnot'a

---



Sprawność cyklu:

$$\beta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Sprawność cyklu Carnota zawsze jest mniejsza od 1 bowiem temperatura  $T_2$  chłodnicy ma wartość większą od zera, gdyż temperatura zera bezwzględnego jest nieosiągalna



# II zasada termodynamiki

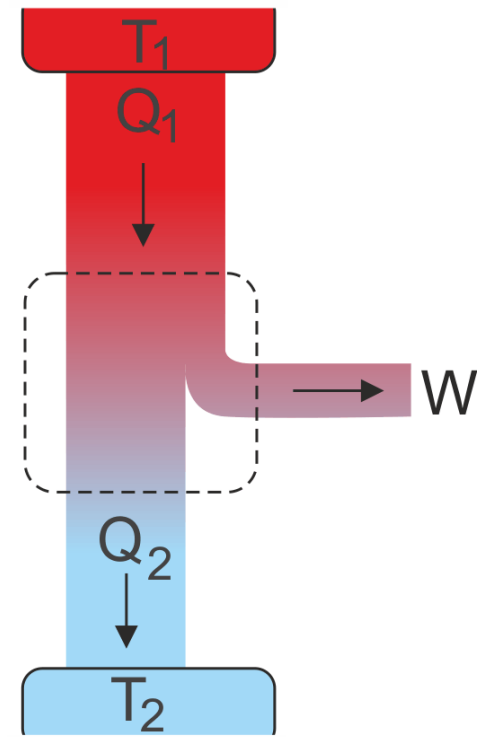
Nie istnieje proces termodynamiczny, którego jedynym wynikiem jest pobranie ciepła z danego zbiornika i całkowita zamiana tego ciepła na pracę.

Kelwin

Nie istnieje proces termodynamiczny, którego jedynym wynikiem jest pobranie ciepła od ciała o niższej temperaturze i przekazanie go do ciała o wyższej temperaturze.

Clausius

$$\beta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

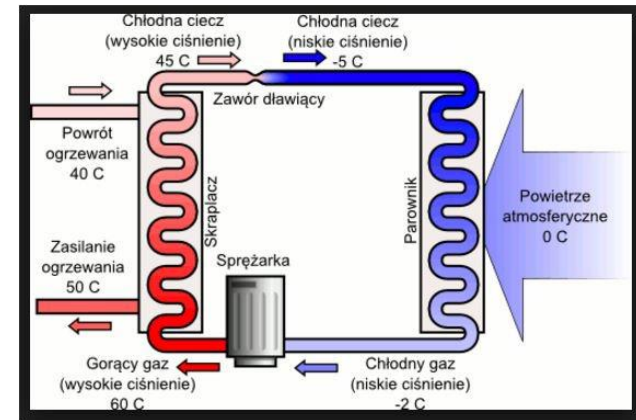
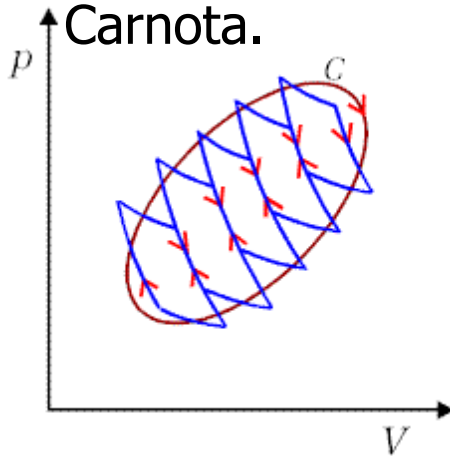






# II zasada termodynamiki

Każdy proces odwracalny można przybliżyć złożeniem cykli Carnota.



Pompa ciepła ciepło jest przekazywane od ciała o temperaturze niższej do ciała o temperaturze wyższej w kierunku przeciwnym do samorzutnego przepływu ciepła. Procesowi przekazywania ciepła w tym kierunku musi towarzyszyć praca czynnika zewnętrznego (np. sprężarka w lodówce).

Sprawność silnika spalinowego (temp. Spalania mieszanki 2700 K, chłodnicy 300K) wynosi 0,56

Sprawność cyklu Carnota o temperaturze zbiornika ciepła 2700 K, i otaczającego powietrza około 300 K wynosi: 0,89

Sprawność silnika parowego (kocioł o temperaturze 373 K) to jedynie 0,21

# Entropia



Entropia (S) jest miarą stopnia nieuporządkowania układu i rozproszenia energii.

Jest to termodynamiczna funkcja stanu, określająca kierunek przebiegu samorzutnych procesów, w odosobnionym układzie termodynamicznym.

Druga zasada termodynamiki mówi, że w układzie zamkniętym entropia S nie może maleć to znaczy  $dS \geq 0$ .

Zależy ona tylko od początkowego i końcowego stanu układu, a nie od drogi przejścia pomiędzy tymi stanami.

Entropia jest funkcją określoną dla stanu równowagi, taką że dla procesu odwracalnego:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

*dQ – ciepło dostarczone  
w procesie odwracalnym*

# Entropia



Entropia układu izolowanego adiabatycznie, w którym zachodzą procesy odwracalne, jest stała.

Natomiast dla układów nieizolowanych adiabatycznie wymieniających ciepło z otoczeniem entropia układu rośnie.

$$dS + dS_0 \geq 0 \quad dS_0 - \text{zmiana entropii otoczenia}$$

## Przykład

Oblicz zmianę entropii w  $n$  molach gazu doskonałego podczas odwracalnego izotermicznego rozprężania gazu od objętości  $V_1$  do objętości  $V_2$ .

$$dU = dQ + dW = 0 \quad dQ = -dW \quad dW = pdV$$

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{pdV}{T} \quad pV = nRT \quad \longrightarrow \quad p = \frac{nRT}{V}$$

$$dS = \frac{nRdV}{V} \quad S = nR \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad V_2 > V_1 \quad \longrightarrow \quad S > 0$$