

Podstawy fizyki 2

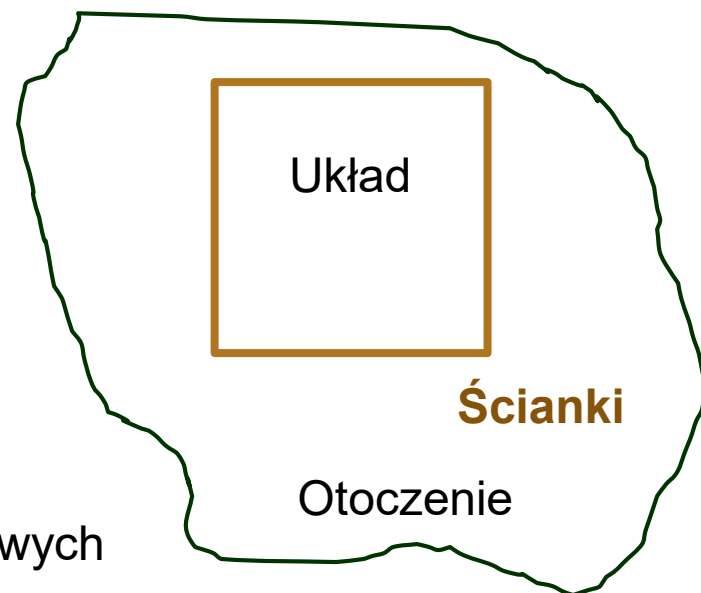
Elementy termodynamiki

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 106
amucha@agh.edu.pl
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

Temodynamika

- Termodynamika to **nauka o energii i cieple**.
- Dział fizyki zajmujący się badaniem efektów energetycznych związanych z wszelkimi rodzajami przemian fizycznych i chemicznych, które wpływają na **zmianę energii wewnętrznej** układów.
- Termodynamika zajmuje się nie tylko przemianami cieplnymi, lecz także efektami energetycznymi reakcji chemicznych i przemianami fazowymi.
- Różne podejścia do temodynamiki:
 - **termodynamika klasyczna**
 - termodynamika kwantowa
 - **termodynamika statystyczna**
 - termodynamika techniczna
 - termodynamika chemiczna
 - termodynamika procesów nierównowagowych



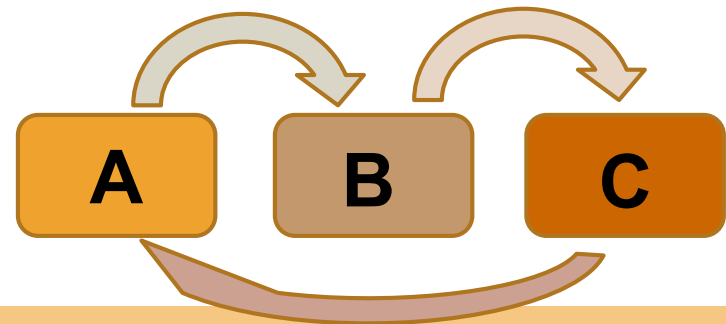
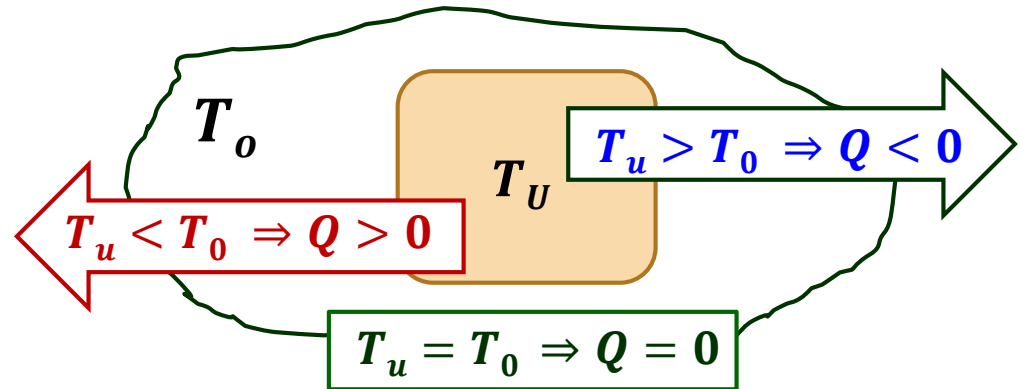
Energia wewnętrzna

- Termodynamika opisuje układy składające się z **bardzo wielu ciał** (atomów i cząsteczek) - 1 mol substancji zawiera $6.02 \cdot 10^{23}$ atomów.
- **Stan równowagi termodynamicznej** – stan układu, którego parametry nie zależą od czasu i nie ma żadnych przepływów.
- Parametry układu – **objętość, ciśnienie, temperatura, liczba cząsteczek, energia wewnętrzna, entropia, entalpia**
- **Energia wewnętrzna** (U, E_w) - suma **energii kinetycznej i potencjalnej** cząsteczek (suma energii oddziaływań międzycząsteczkowych i wewnątrzcząsteczkowych układu oraz energii ruchu cieplnego cząsteczek)
- E_w wzrasta wraz z temperaturą.
- E_w to nie jest ciepło!
 - Ciepło przechodzi z ciała cieplejszego do chłodniejszego.
 - Ciepło nie jest energią, jaką ciało posiada, lecz energią przechodzącą z jednego ciała do innego.
 - Ciało nie posiada ciepła, tylko energię wewnętrzną!

Temperatura

- Temperatura jest miarą przepływu ciepła.

Jeśli dwa ciała mają tę samą temperaturę, to w bezpośrednim kontakcie nie przekazują sobie ciepła, gdy mają różną temperaturę, to następuje przekazywanie ciepła z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej, aż do wyrównania się temperatur obu ciał.



Zerowa zasada termodynamiki:

Jeśli układ A jest w równowadze termodynamicznej z układem B, a układ B jest w równowadze termodynamicznej z układem C, to układ A jest także w równowadze z układem C.

Rozszerzalność cieplna

- Wraz ze zmianą temperatury zmieniają się rozmiary lub objętości danego układu fizycznego (np. rozgrzane powietrze jest rzadsze niż zimne i unosi się do góry – przepływ ciepła w środowisku, szczeliny dylatacyjne w budowlach)

- Liniowa rozszerzalność cieplna:

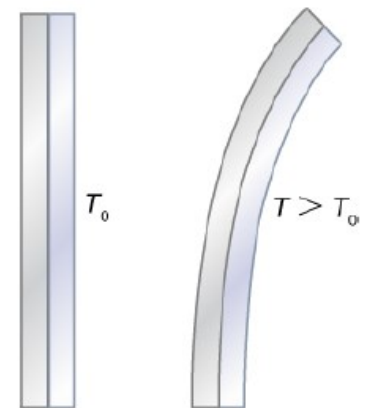
$$\frac{dL}{dT} = \alpha T$$

α – współczynnik rozszerzalności liniowej

- W praktyce używa się:

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

- Bimetal:** używany jako termometr lub przełącznik.



Pojemność cieplna

- Jeżeli w układzie nie zachodzą przemiany fazowe ani nie jest wykonywana praca przez układ lub nad układem, to przekazane ciepło jest wprost proporcjonalne do zmiany temperatury i do masy układu:

$$\Delta Q = mc \Delta T$$

c – ciepło właściwe [J/(kg K)]

- Ciepło właściwe i przewodność cieplna:

	c [J/kg K]	k [W/m°C]
Woda	4186	0.6
Drewno	1700	0.08
Aluminium	900	220
Szkło, granit	840	0.84
Powietrze (suche, war.norm)	1015	0.023

Dlaczego metalowe przedmioty są zimne?

Dlaczego drewniana podłoga grzeje a płytki chłodzą?

Dlaczego woda jest stosowana w systemach chłodzenia np. superkomputerów?

Dlaczego domy z cegieł są cieplejsze niż z betonu?

Przemiany fazowe

- Przemiany fazowe – zmiana stanu skupienia substancji,

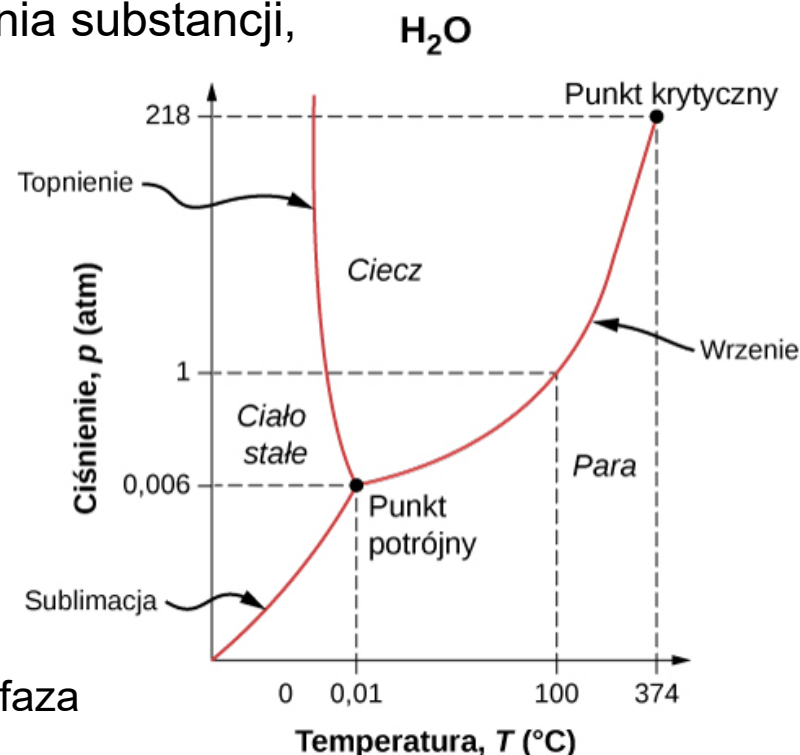
- topnienie i krzepnięcie
- parowanie i skraplanie

- Każda przemiana fazowa odbywa się w charakterystycznej temperaturze.

- Temperatura przemiany fazowej zależy od ciśnienia.

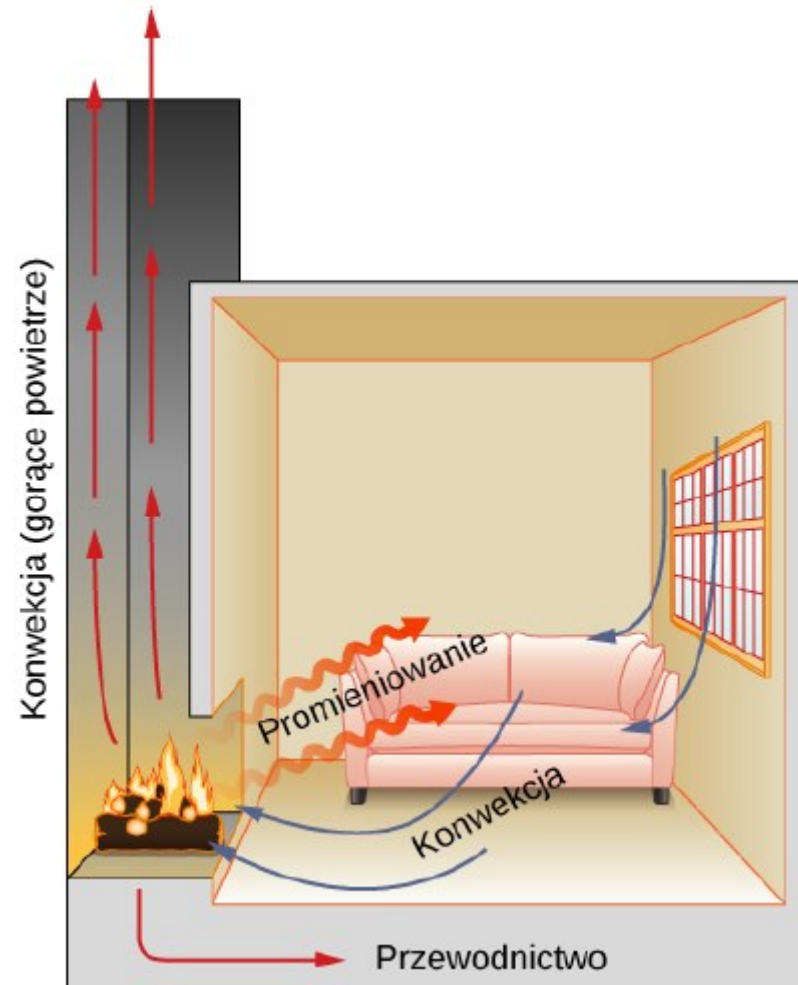
- W punkcie potrójnym współistnieją trzy stany skupienia (w równowadze);

- przy niższym ciśnieniu niż p_p nie występuje faza ciekła (gotowanie w górach)
- sublimacja – zamiana fazy ciekłej na gazową (śnieg w powietrze, mróz na szybie, suchy lód)



Sposoby przekazywania ciepła

- Trzy mechanizmy przekazywania ciepła pomiędzy układami:
 - **przewodnictwo cieplne** – bezpośredni kontakt cieplny pomiędzy ciałami (kamień w ognisku),
 - **konwekcja** – unoszenie ogrzanego, lżejszego gazu, który znajduje się w sąsiedztwie źródła ciepła i napływ zimniejszego prądu (klimat, grzejniki),
 - **promieniowanie** (przekaz za pomocą fal elektromagnetycznych, na odległość) - Słońce.



Kinetyczna teoria gazu doskonałego

- ▶ Cząsteczki **gazu doskonałego** traktujemy jako **punkty materialne** (objętość cząsteczek gazu jest o wiele mniejsza niż objętość zajmowana przez gaz i dlatego z dobrym przybliżeniem przyjmujemy, że ich objętość jest równa zeru);
- ▶ W gazie doskonałym **zderzenia** z innymi cząsteczkami oraz ze ściankami naczynia są **sprężyste** i dlatego **całkowita energia** cząsteczek jest równa ich **energii kinetycznej**; energia potencjalna jest stale równa zeru (nie ma przyciągania ani odpychania pomiędzy cząsteczkami).
- ▶ Jako gazy doskonałe uważać można gazy rzeczywiste o stosunkowo małej gęstości – cząsteczki znajdują się daleko od siebie

Kinetyczna teoria gazu doskonałego - temperatura

- ▶ Temperaturę bezwzględną definiujemy jako wielkość wprost proporcjonalną do **średniej energii kinetycznej** cząsteczek.

$$T = \left(\frac{2}{3k} \right) \frac{m \overline{v^2}}{2}$$

z poprzedniego slajdu: $pV = N m \frac{\overline{v^2}}{3}$

$$pV = NkT$$

$$R = kN_A$$

$$pV = nRT$$

Równanie stanu gazu doskonałego

- ▶ Prawo Boyle'a-Mariotte'a – w stałej temperaturze iloczyn ciśnienia i objętości danej masy gazu jest stały **$pV = \text{const}$** .
- ▶ Prawo Charlesa - przy stałej objętości gazu stosunek ciśnienia i temperatury danej masy gazu jest stały **$p/T = \text{const}$** .
- ▶ Prawo Gay-Lussaca - dla stałego ciśnienia stosunek objętości do temperatury danej masy gazu jest stały **$V/T = \text{const}$** .

Energia kinetyczna

- ▶ **Średnia** energia kinetyczna: $E_{k \text{ } \overline{sr}} = \frac{m \overline{v^2}}{2}$

Z równania gazu: $E_{k \text{ } \overline{sr}} = \frac{3}{2} kT$

- ▶ W danej temperaturze wszystkie cząsteczki gazu doskonałego (niezależnie od masy) mają taką samą **ŚREDNIĄ** energię kinetyczną i **średnią prędkość** kwadratową. Jest to wielkość średnia, co oznacza, że poszczególne cząsteczki mają różne prędkości.
- ▶ **Średnia prędkość kwadratowa** charakteryzuje zbiór cząsteczek. Jaki jest faktyczny **ROZKŁAD prędkości** cząsteczek gazu doskonałego (odnośnik do zarobków ;-)?

Energia wewnętrzna

- ▶ W gazie doskonałym nie ma oddziaływań między cząsteczkami, czyli energia potencjalna wynosi zero.
- ▶ Energia wewnętrzna jest to zatem suma energii kinetycznych wszystkich cząstek gazu: $U = \frac{i}{2} k T N_A = \frac{1}{2} R T$
- ▶ Energia wewnętrzna zależy liniowo od temperatury T – temperatura jest miarą energii wewnętrznej układu.
- ▶ Energia wewnętrzna jest **funkcją stanu układu** (zmiana energii wewnętrznej nie zależy od sposobu przejścia układu od stanu początkowego do końcowego).

Pierwsza zasada termodynamiki

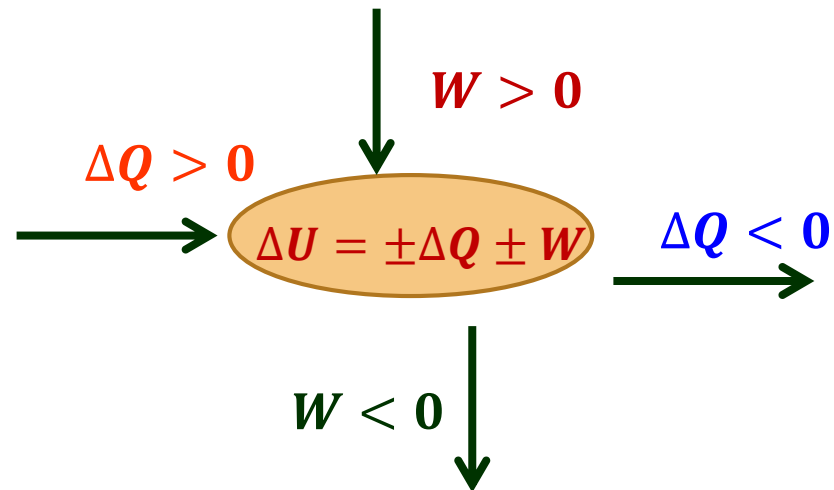
- W przemianach termodynamicznych może nastąpić przekaz energii w nowej postaci - ciepła

Suma pobranego przez układ ciepła i wykonanej nad układem pracy równa jest przyrostowi energii wewnętrznej:

$$dU = dQ + dW$$

I zasada termodynamiki

$\Delta Q > 0$ ciepło pobrane przez układ
 $W > 0$ praca wykonana nad układem



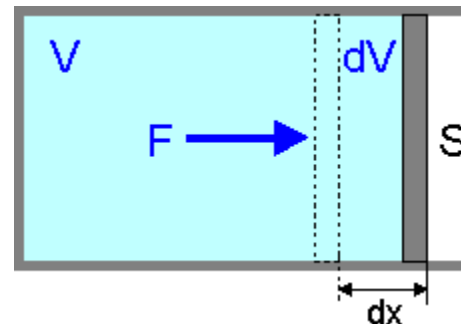
Praca gazu

- **Praca** wykonana przez gaz działający siłą F na tłok o powierzchni S wynosi:

$$dW = F dx = \frac{F}{S} S dx = p dV$$

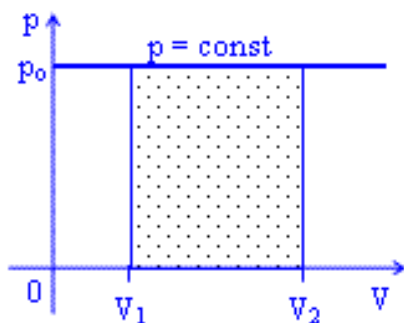
a zmiana energii wewnętrznej gazu:

$$dU = dQ - p dV$$

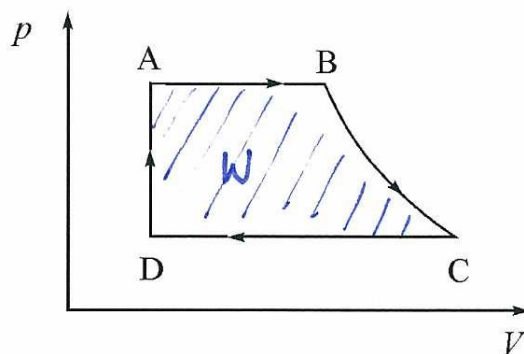


<http://www.ftj.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/>

Przykł. Praca wykonana przez gaz jest równa polu powierzchni pod krzywą $p(V)$:



$$W = p_0(V_2 - V_1)$$



$$dW = p dV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$

Liczone dla każdej przemiany!

Kilka szczególnych przemian

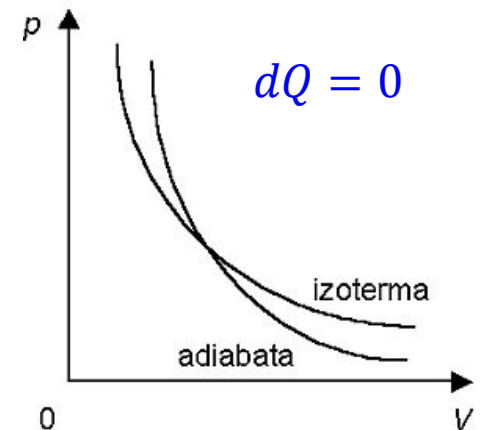
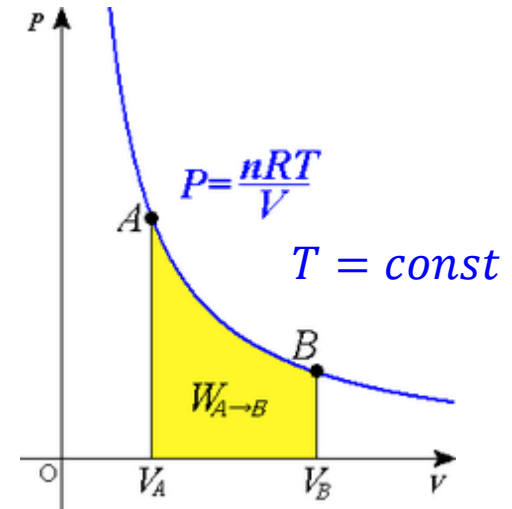
- ▶ Przemiana izobaryczna ($p = \text{const}$) $W = p(V_2 - V_1)$
- ▶ Przemiana izochoryczna ($V = \text{const}$) $W = 0, dU = dQ$
- ▶ Przemiana izotermiczna ($T = \text{const}$)

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV = \int_{V_1}^{V_2} nRT \frac{1}{V} dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

- ▶ Przemiana adiabatyczna ($dQ = 0$, ciało nie wymienia ciepła z otoczeniem, przemiana zachodzi bardzo szybko lub układ jest bardzo dobrze izolowany) $dU + p dV = 0$

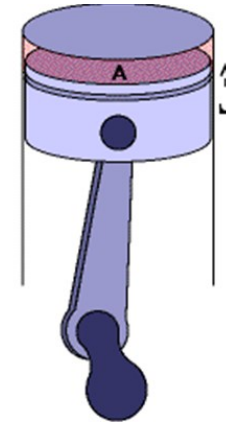
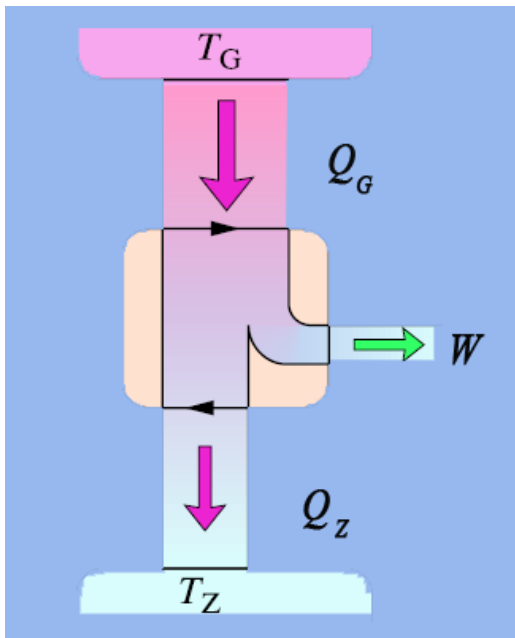
$$p V^\kappa = \text{const} \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

adiabaticzne rozprężanie używane jest w chłodnictwie i silnikach spalinowych



Cykl Carnota (1824)

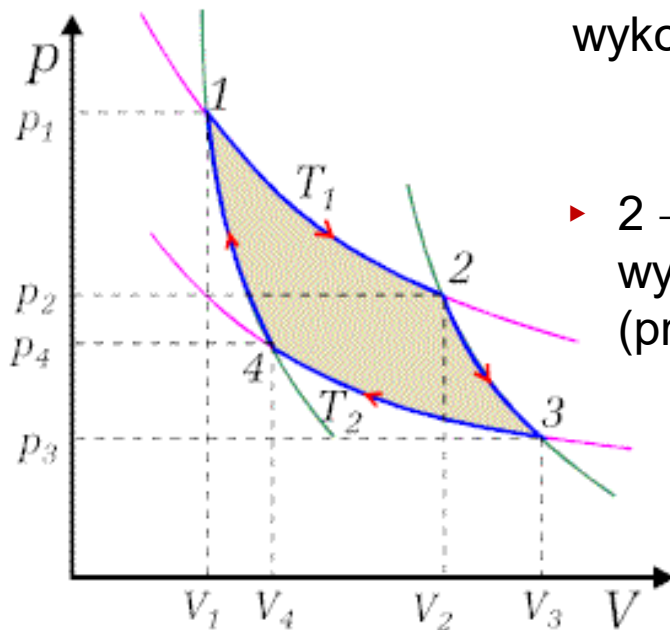
- Cykliczne, odwracalne przemiany termodynamiczne, w których ciepło zamieniane jest na pracę. Nie ma strat ciepła na tarcie.



Gaz **pobiera ciepło** ze zbiornika o **wysokiej temperaturze** (grzejnika) i ulega rozprężeniu wykonując **pracę**.

Następnie gaz **oddaje ciepło** do chłodnicy ulegając sprężeniu.

Cykl Carnota - przebieg



- ▶ 1 → 2 przemiana izotermiczna, gaz zwiększa objętość i wykonuje pracę

$$W = Q_G = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} > 0$$

- ▶ 2 → 3 przemiana adiabatyczna, gaz zwiększa objętość, wykonuje pracę, ale nie wymienia ciepła z otoczeniem (przemiana odwracalna).

- ▶ 3 → 4 przemiana izotermiczna, gaz zmniejsza objętość, praca jest ujemna (otoczenie wykonuje pracę nad gazem)

$$W = Q_Z = \int_{V_2}^{V_3} p(V) dV = nRT \ln \frac{V_3}{V_2} < 0$$

- ▶ 4 → 1 przemiana adiabatyczna, objętość maleje, praca ujemna, brak wymiany ciepła

Energia wewnętrzna po całym procesie nie zmieniła się!

Cykl Carnota - uzyskana praca

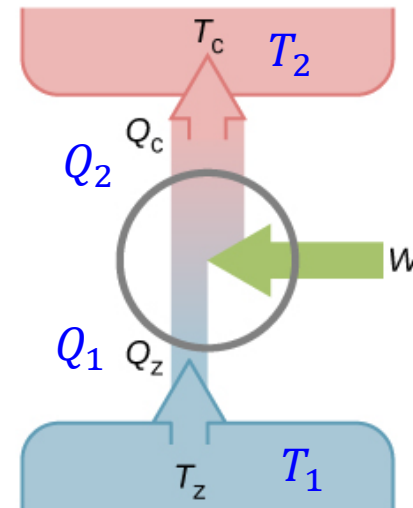
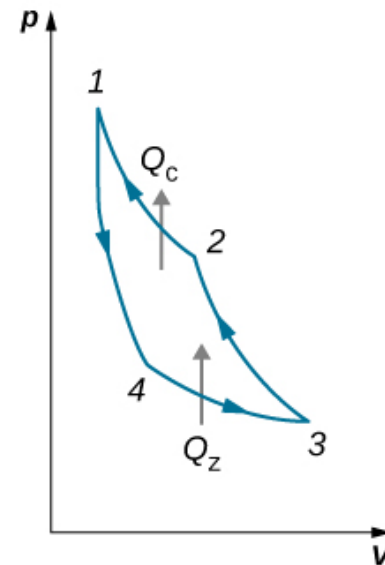
- ▶ Wykonana praca jest równa polu obszaru ograniczonego krzywymi przemiany.
- ▶ Pobrane ciepło: $\Delta Q = Q_C - Q_Z$, energia wewnętrzna się nie zmieniła, bo układ wrócił do stanu początkowego.

$$W = Q_C - Q_Z$$

- ▶ Jest to model silnika cieplnego o **sprawności** (stosunek pracy wykonanej przez układ w jednym cyklu do pobranego w tym cyklu ciepła) :

$$\eta = \frac{Q_C - Q_Z}{Q_Z} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

- ▶ Sprawność jest zawsze mniejsza od 1! Całe ciepło nie może być zamienione na pracę – do zamknięcia cyklu potrzebny zbiornik chłodzący



- ▶ Cykl przeprowadzony w kierunku przeciwnym-łódówka

Druga zasada termodynamiki

W trakcie pracy silnika cieplnego część pobieranego ciepła była oddawana do zbiornika o niższej temperaturze - ta ciepła nie była zamieniana na pracę.

Czy można skonstruować urządzenie, które pobierałoby ciepło i w całości zamieniałoby je na pracę?

Doświadczalnie pokazano, że:

- ▶ niemożliwe jest urządzenie pozwalające wytwarzać pracę kosztem ciepła jednego tylko zbiornika bez jednoczesnego wywołania innych przemian;
- ▶ niemożliwe jest urządzenie pozwalające przeprowadzić ciepło z niższej temperatury do wyższej bez jednoczesnego wywołania innych przemian.

Druga zasada termodynamiki

Skonstruowanie perpetuum mobile drugiego rodzaju, czyli silnika, który pobierałby ciepło z zewnątrz i całkowicie przekształcałby je w pracę, jest niemożliwe.

Przemiany nieodwracalne i entropia

- ▶ Przepływ ciepła zachodzi od ciała cieplejszego do zimniejszego – nigdy odwrotnie – jest to proces nieodwracalny. Ale nie ma tu łamania zasady zachowania energii.
- ▶ Proces nazywamy odwracalnym, jeśli za pomocą bardzo małej zmiany otoczenia można przeprowadzić proces odwrotny, po tej samej drodze, w przeciwnym kierunku. Proces nieodwracalny – brak takiej możliwości (stłuczona filiżanka..)
- ▶ Nowe spojrzenie na procesy nieodwracalne:

W przemianach nieodwracalnych **ENTROPIA** rośnie

Entropia- jest to **funkcja stanu** (co oznacza, że jej zmiana NIE zależy od rodzaju przemiany, a jedynie od stanu początkowego i końcowego), taka że dla procesu **odwracalnego**:

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

porównaj do: $dW = pdV$, dla odwracalnych

czyli: $S = \int \frac{dQ}{T}$

- ▶ **Entropia** układu izolowanego nie może maleć.

Podsumowanie

- ▶ Temperatura, ciepło, zerowa zasada termodynamiki.
- ▶ Kinetyczna teoria gazów – ciśnienie, rozkład Maxwella (znaczenie)
- ▶ Energia wewnętrzna
- ▶ Pierwsza zasada termodynamiki
- ▶ Praca wykonana przez gaz
- ▶ Model silnika cieplnego
- ▶ Entropia