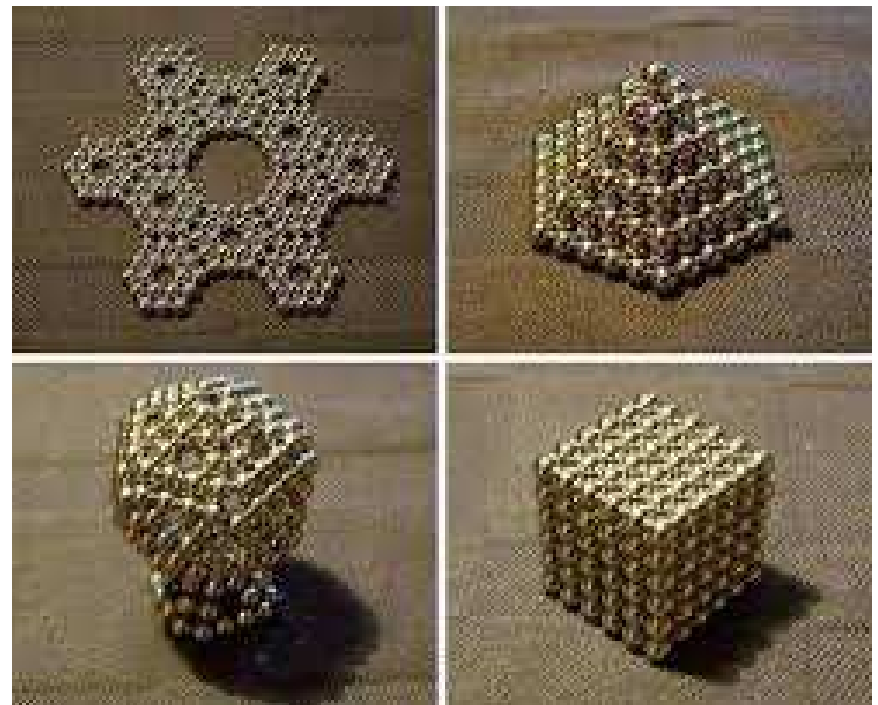


Fizika 112

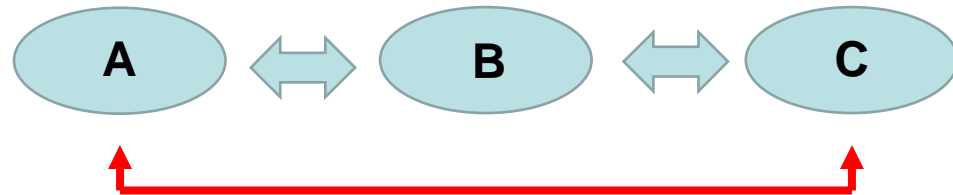
9. és 10. Előadás



A termodinamika főtételei

0. főtétele:

- bármely magára hagyott termodinamikai rendszer egy idő után egyensúlyi állapotba kerül amelyből önmagától nem mozdulhat ki
- a két testből álló magára hagyott termodinamikai rendszer egyensúlyban van ha a testek között fellépő kölcsönhatásokat jellemző intenzív állapotváltozók egyenlők
- az egyensúly tranzitív



I. főtétele: Energia-megmaradás törvénye

$$\text{Zárt rendszer: } \Delta U = W + Q$$

Ha $Q > 0$: a rendszer hőt vesz fel

Ha $W > 0$: a környezet munkát végez a rendszeren

Ha $\Delta U > 0$: a belső energia nő (T nő)

A környezet által a gázon végzett munka

Ideális gáz

Ideális gáz:

- alkotórésznek nincs saját alakja,
- kitölti a rendelkezésre álló teret,
- kölcsönhatás a részecskék között nincs

$$\left. \begin{array}{l} p \propto T \quad (V = \text{const.}) \\ V \propto T \quad (P = \text{const.}) \end{array} \right\}$$

$$pV \propto T \quad (m = \text{const.})$$

$$P \text{ [Pa]}$$

$$V \text{ [m}^3\text{]}$$

$$T \text{ [K]}$$



Ideális gáz állapotegyenlete

$$pV = nRT$$

mólok száma

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

a gáz tömege

moláris tömeg

egyetemes gázállandó: $R = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

1 mólban: $N_A = L_A = 6,022 \cdot 10^{23}$

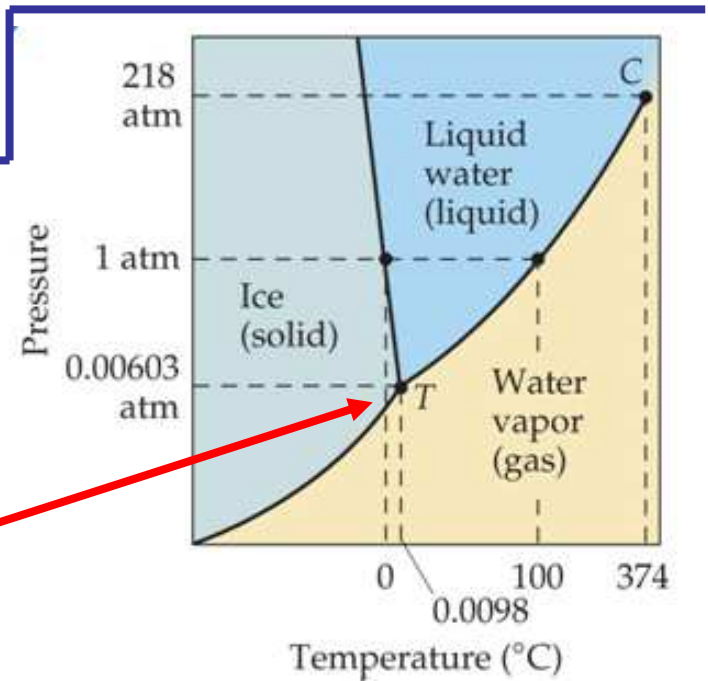
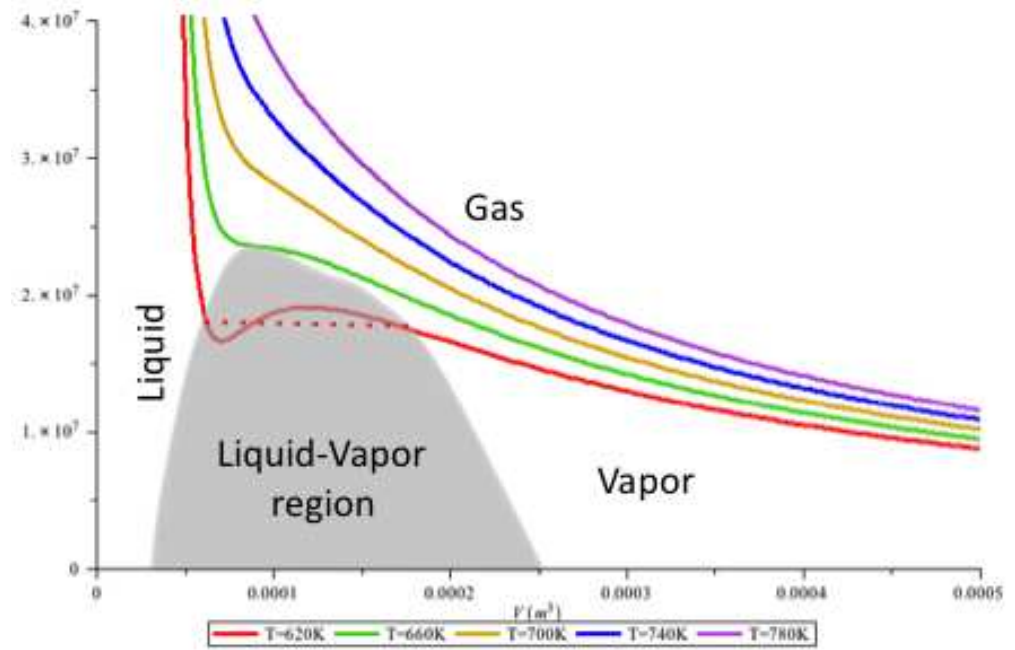
$$k_B = \frac{R}{L_A} \rightarrow pV = Nk_B T$$

Reális gáz

Van der Waals egyenlet:

$$\left(p + \left(\frac{N}{V} \right)^2 a \right) (V - Nb) = nkT$$

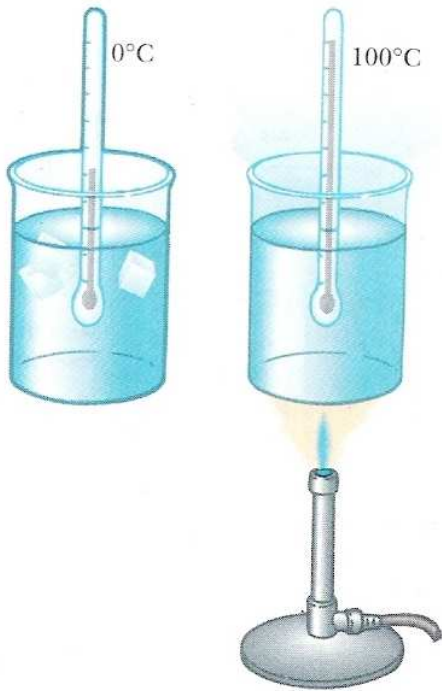
$a \rightarrow 0$ és $b \rightarrow 0$: $pV = Nk_B T$



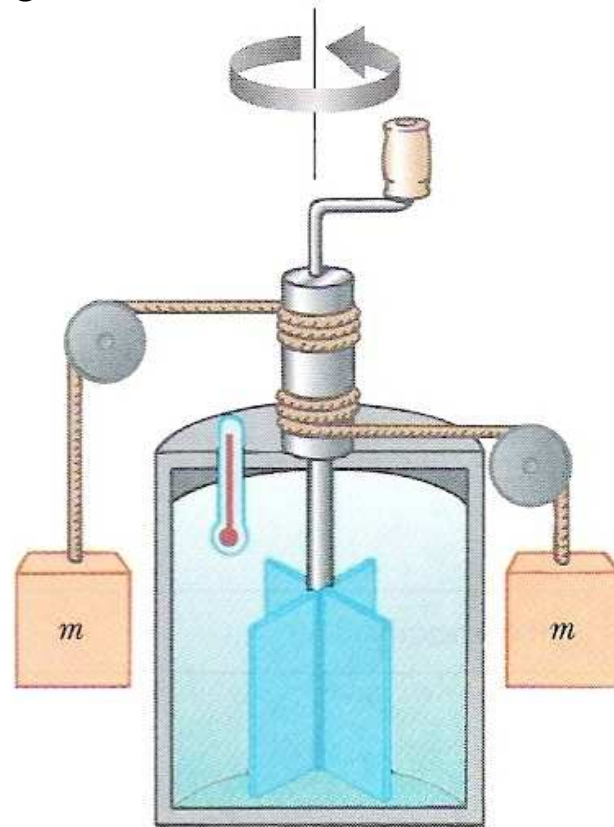
A víz hármaspontja

Munka, hőmennyiség

A hőmérséklet emelésének lehetőségei:



hő közlés



munkavégzés
(Joule kísérlet)

Melegítés, hűtés

$$\left. \begin{array}{l} Q \propto \Delta T \\ Q \propto m \end{array} \right\} Q = cm\Delta T$$

c = fajlagos hőkapacitás
(fajhő) [J/kg·K]

Víz $c = 4.18$ kJ/kg·K

$$Q = Cn\Delta T$$

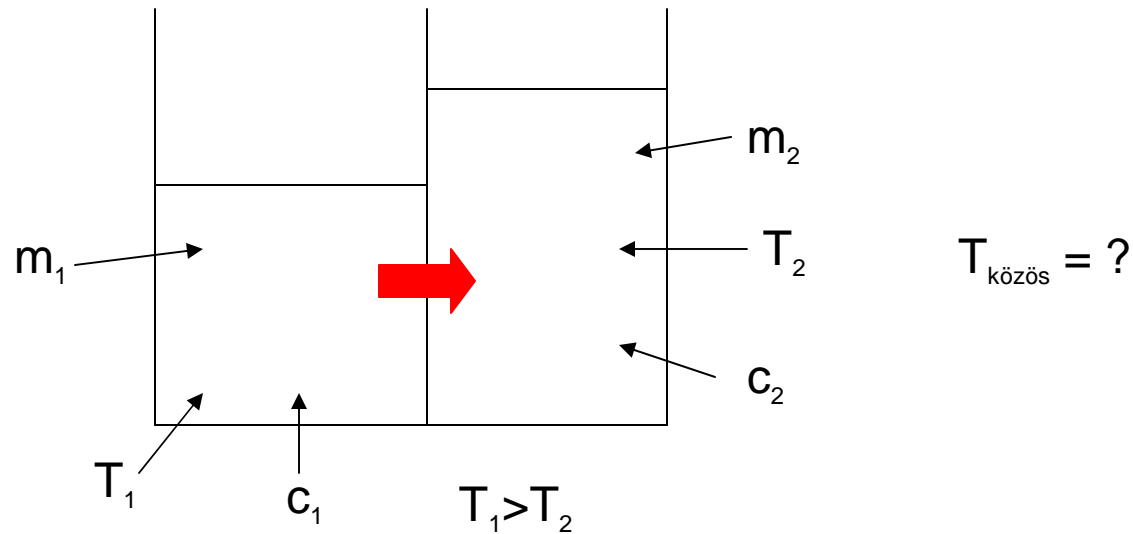
C = moláris hőkapacitás
(mólhő) [J/kg·K]

TABLE 10.3

Specific heat for some common materials at 25°C*

Substance	Specific heat (J/kg·°C)
Water (0°C to 100°C)	4190
Ice (−10°C to 0°C)	2090
Steam (100°C)	2010
Wood	1700
Aluminum	900
Marble	860
Glass	840
Iron	448
Copper	390
Zinc	386
Silver	236
Lead	128

*The specific heat of most materials varies slightly with temperature to be constant.



leadott hőmennyiség: $Q_1 = c_1 m_1 (T_1 - T_{\text{közös}})$

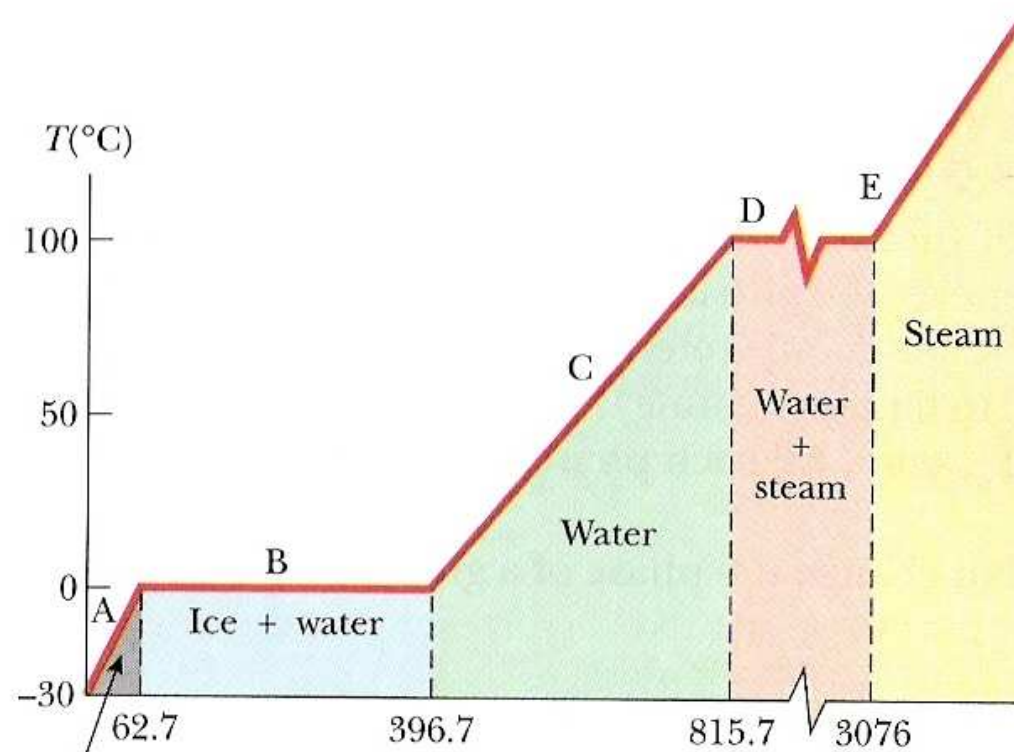
felvett hőmennyiség: $Q_2 = c_2 m_2 (T_{\text{közös}} - T_2)$

$$Q_1 = Q_2$$

$$T_{\text{közös}} = \frac{c_1 m_1 T_1 + c_2 m_2 T_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2}$$

Látens hő

A fázisváltáshoz szükséges energiamennyiség mértéke: $Q = mL$



$$Q_f = mL_f$$

$$Q_v = mL_v$$

$$L_f = 3.3 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$$

$$L_v = 2.2 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

olvadás

forrás

Ideális gáz kétféle mólhő (fajhő) : C_p és C_v

$C_p > C_v$ mert állandó nyomáson végzett melegítéskor kiterjed a gáz, és térfogati munkát végez

$$dQ_v = dU$$

$$dQ_p = dU + pdV$$

$$C_v = \frac{1}{n} \frac{dQ_v}{dT} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dU}{dT}$$

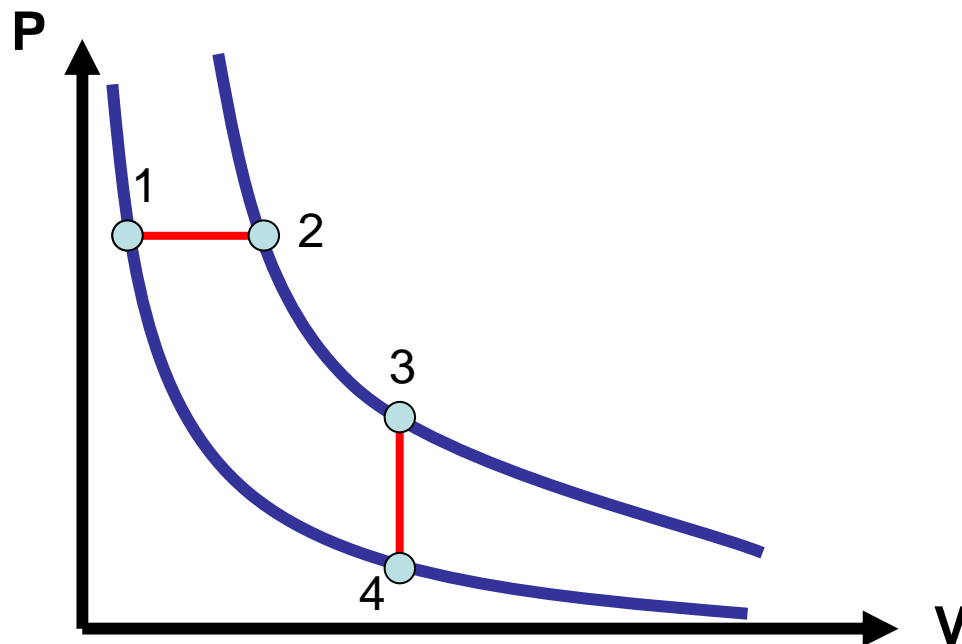
$$\begin{array}{c} \uparrow \\ nRdT \end{array}$$

$$C_p = \frac{1}{n} \frac{dQ_p}{dT} = \frac{1}{n} \cdot \frac{d}{dT} (U + nRT) = \frac{1}{n} \left(\frac{dU}{dT} + nR \right)$$

$$\boxed{C_p - C_v = R}$$

Tökéletes (ideális) gázok állapotváltozásai (izobár, izochor, izoterm)

Reverzibilis állapotváltozásokat tárgyalunk.
Kvázisztatikus!!!



1 - 2: izobár
3 - 4: izochor
2 - 3: izotherm

Izobár állapotváltozás (p állandó)

Térfogati munka:

$$W_g = \int p dV = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1)$$

(a gáz végzett munkát)

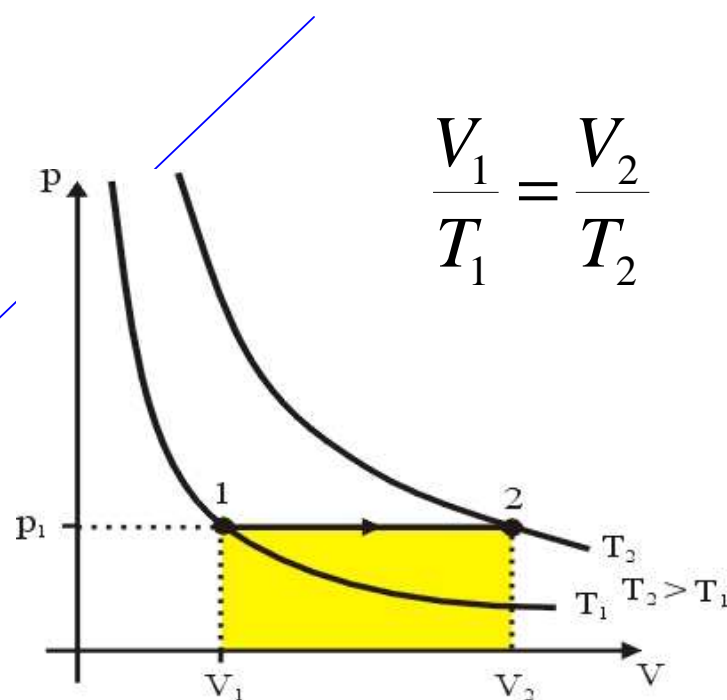
Hő

$$Q_p = nC_p \Delta T = c_p m \Delta T$$

(a gáz felvett hőt)

Belsőenergia-változás:

$$\Delta U = -W_g + Q = -nR \int_{T_1}^{T_2} dT + n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = n \int_{T_1}^{T_2} (C_p - R) dT = n \int_{T_1}^{T_2} C_v dT$$



Izochor állapotváltozás (V=állandó)

$$\Delta U = W_k + Q$$

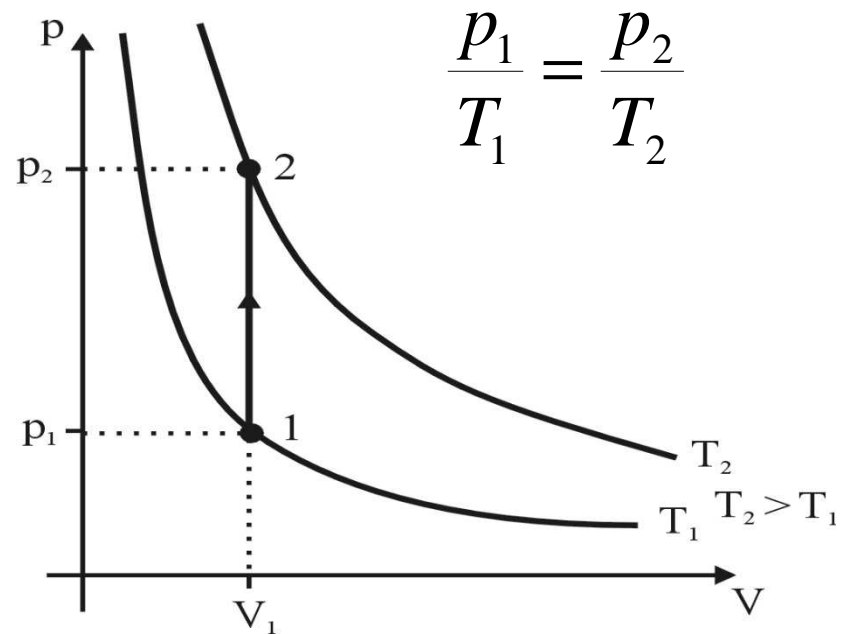
Térfogati munka:

$$W = 0$$

Hő (belsőenergia-változás):

$$Q_v = \Delta U = nC_v\Delta T = c_v m\Delta T$$

(a gáz felvett hőt)



Izoterm állapotváltozás (T állandó)

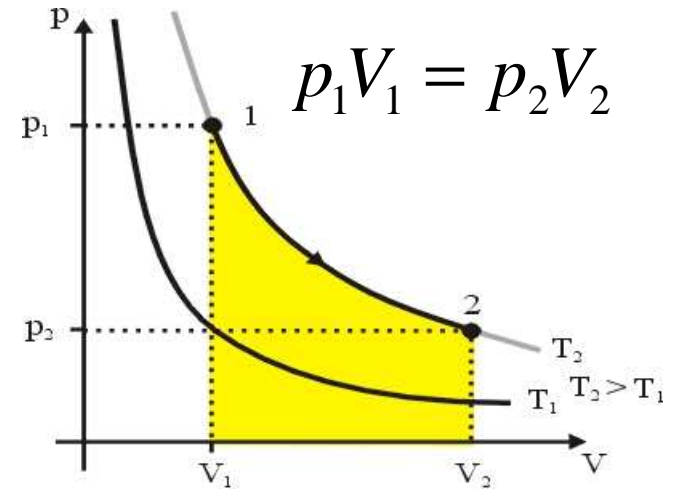
$$\Delta U = 0 \Rightarrow Q = W_g$$

Térfogati munka:

$$W_g = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

$$W_g = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q = W_g = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



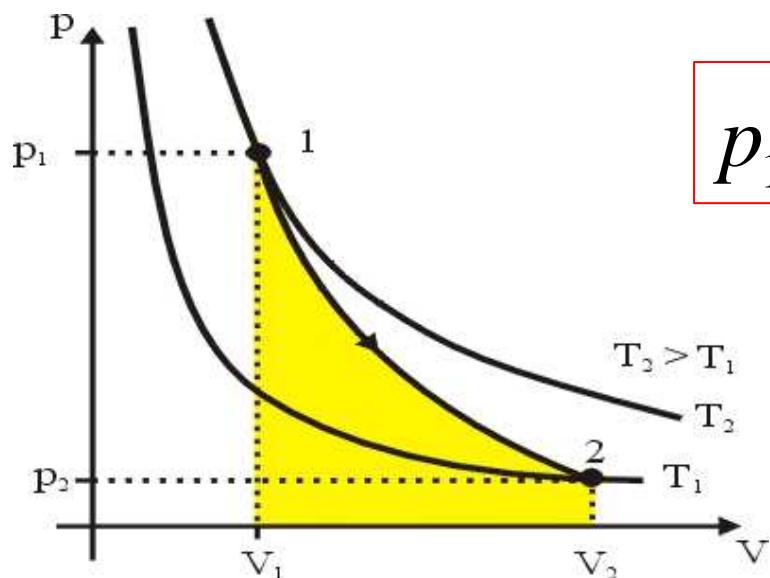
Adiabatikus állapotváltozás ($Q = 0$)

$$Q = 0 \Rightarrow \Delta U = W_k = -W_g$$

Adiabatikus folyamatban mindhárom állapotjelző (p , T , V) változik.

$$TV^{\kappa-1} = \text{állandó}$$

$$\frac{C_p}{C_v} = \kappa$$

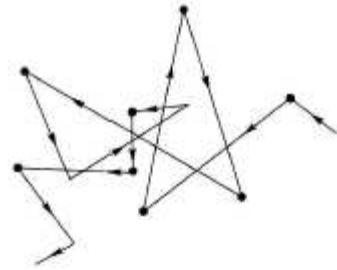


$$p_1 V_1^{\kappa} = p_2 V_2^{\kappa}$$

$$\Delta U = c_v m \Delta T = n C_v \Delta T$$

Kinetikus gázelmélet

Brown mozgás:



Magyarázat: Einstein 1905

Az anyag atomokból, molekulákból áll.

Leukipposz,
Demokritos,
Dalton

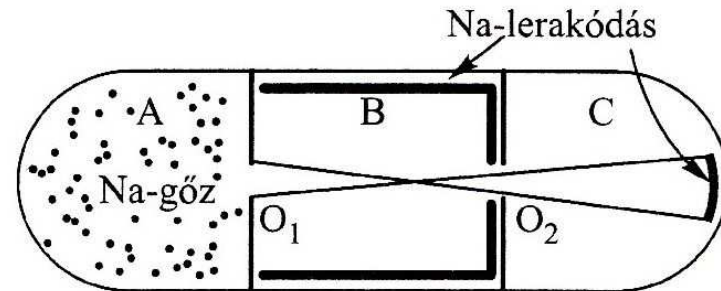
Avogadro



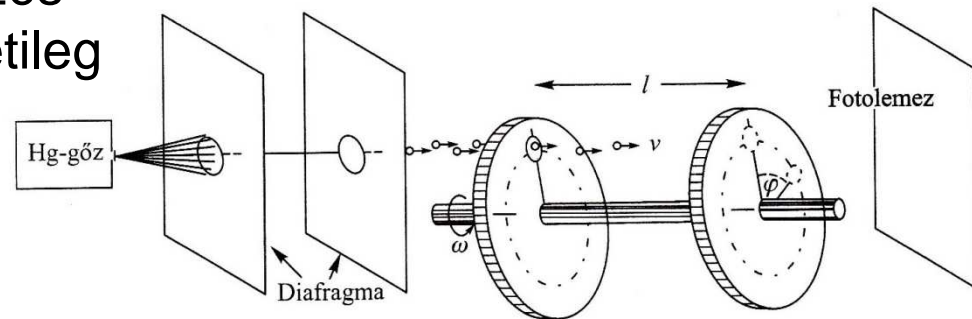
A kinetikus gázelmélet alapfeltevései:

- az ideális gázok pontszerű atomokból/molekulákból állnak
- nagyszámú részecske (10^{24})
- a gázcseppkék egymással és az edény falával ütköznek, más kölcsönhatás nincs
- egyensúlyban a gázcseppkék egyenletesen töltik ki a teret

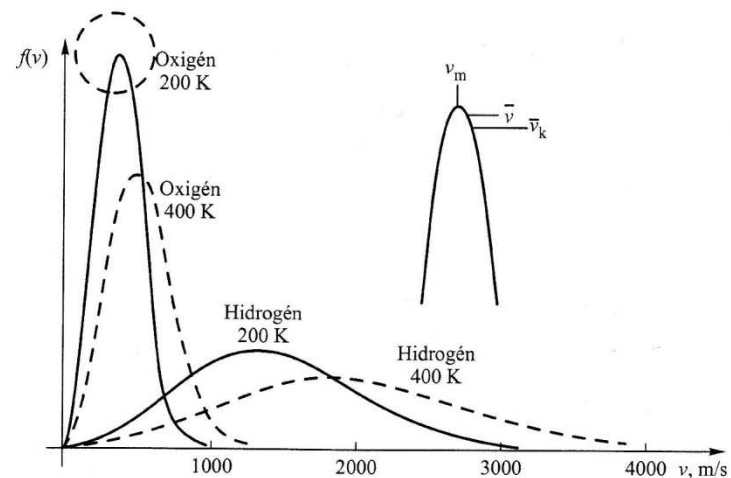
Dunoyer-kísérlet: ha a gáz részecskéi egymással nem ütköznek, egyenes vonalban haladnak.



Eldridge-Lammert-féle berendezés
A részecskék sebessége kísérletileg meghatározható



Az egyes részecskék sebessége nem azonos
Az események leírása statisztikai függvényekkel lehetséges



Maxwell eloszlás

négyzetes középsebesség:

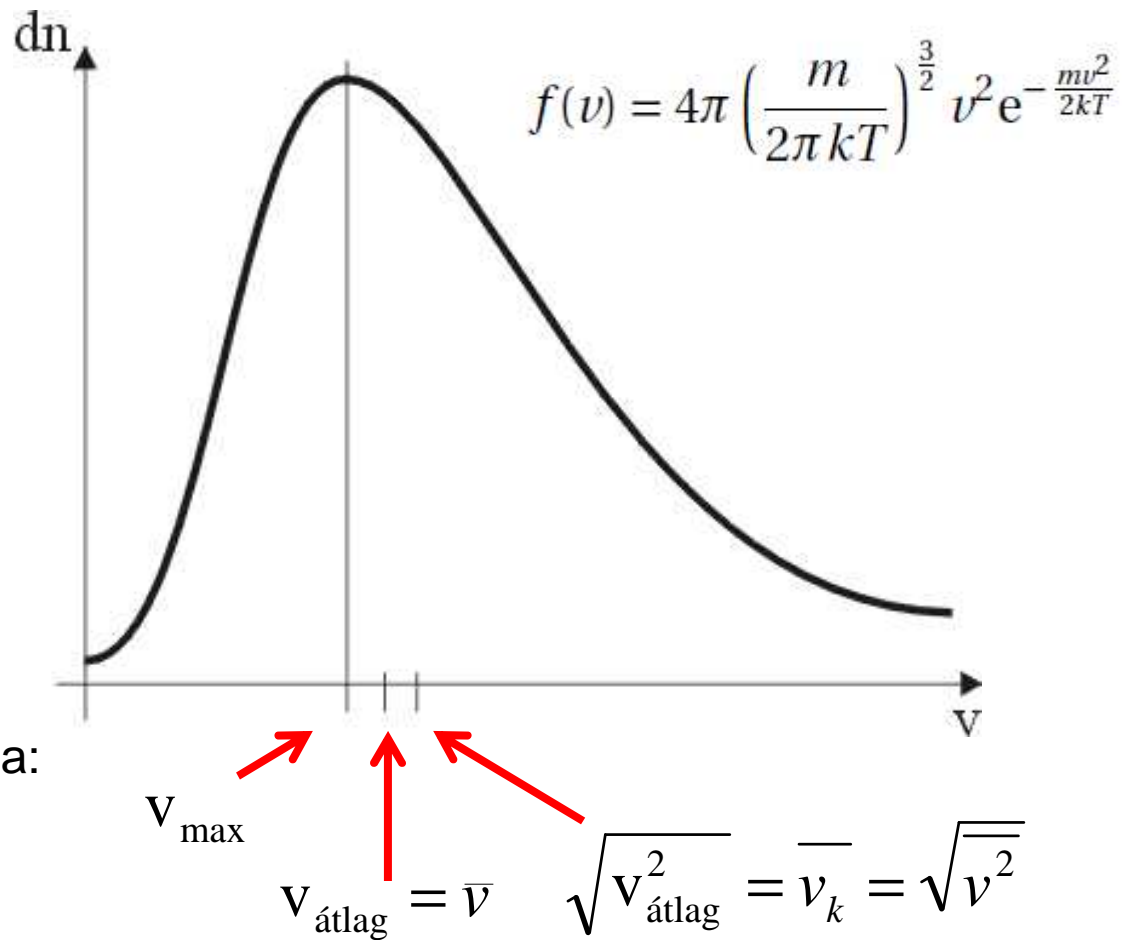
$$\bar{v}_k = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

egy részecske átlagos energiája:

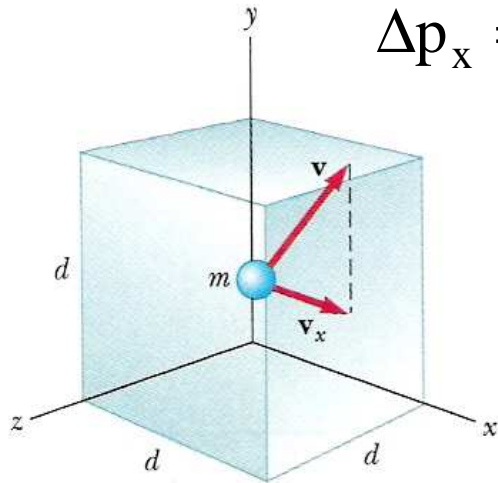
$$\bar{\epsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

a hőmérséklet statisztikai értelmezése:

$$T = \frac{2}{3k} \bar{\epsilon}_k$$



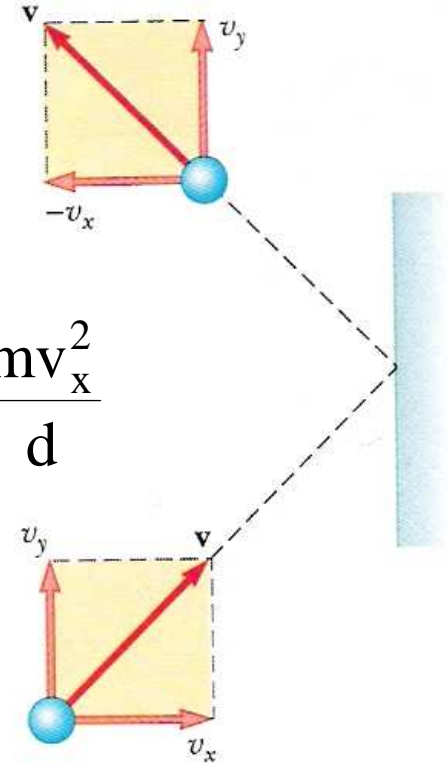
Kinetikus gázelmélet alapjai



$$\Delta p_x = -mv_x - (mv_x) = -2mv_x$$

$$F_x \Delta t = \Delta p_x = 2mv_x$$

$$F_x = \frac{2mv_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2d/v_x} = \frac{mv_x^2}{d}$$



$$F_x = \frac{m}{d} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots)$$

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + \dots + v_{Nx}^2}{N}$$

$$F_x = \frac{Nm}{d} \overline{v_x^2}$$

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$$

$$F_x = \frac{N}{3d} m \overline{v^2}$$

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{d^2}$$

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right)$$

$$pV = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = nRT = \frac{N}{N_A} RT = N \left(\frac{R}{N_A} \right) T = N k_B T$$

$$\left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = 3 \cdot \frac{1}{2} k_B T$$

$$f = 3$$

Az ekvipartíció elve:

$$\langle E_k \rangle = f \cdot \frac{1}{2} k_B T$$

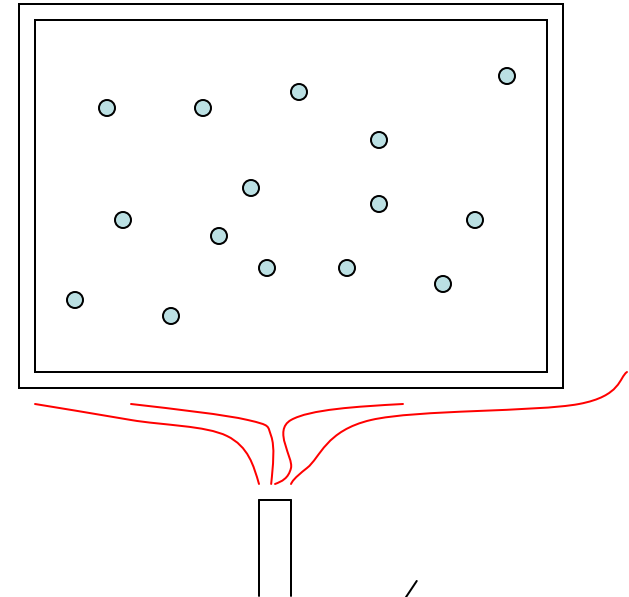
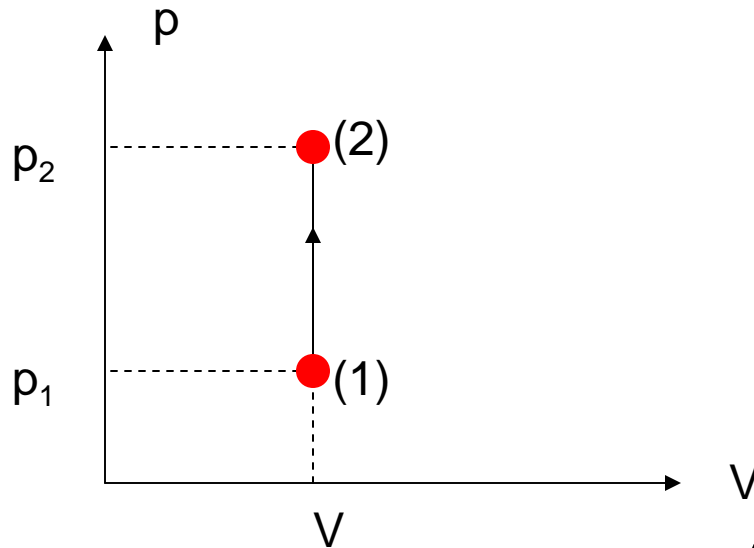
$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

belső energia:
$$E_k = N \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = N \frac{3}{2} k_B T = n \frac{3}{2} RT$$

Izochor állapotváltozás

$V = \text{const.}$

$W=0$



$$\Delta U = \Delta Q + \cancel{W_k} = 0$$

$$\left. \begin{aligned} p_1 V_1 &= nRT_1 \\ p_2 V_2 &= nRT_2 \end{aligned} \right\}$$

$V\Delta p = nR\Delta T$

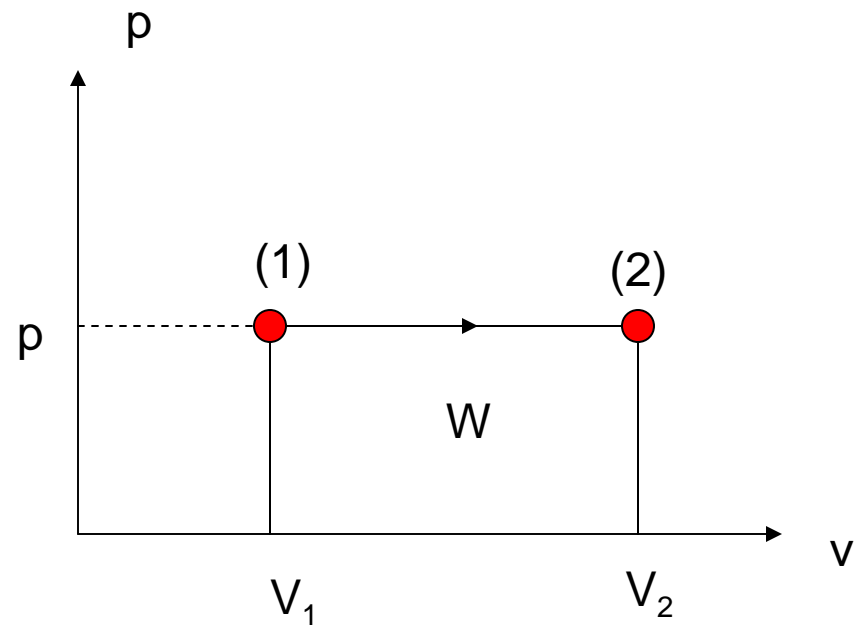
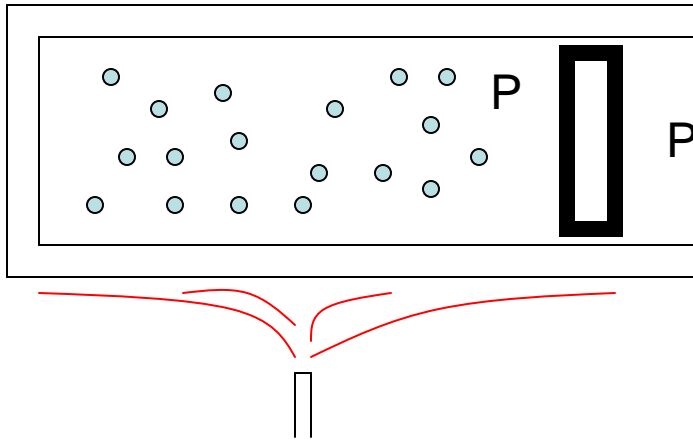
$f=3$

$$U = n \frac{3}{2} RT \rightarrow \Delta Q = \Delta U = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T = n C_V \Delta T$$

$$C_V = \frac{f}{2} R$$

$$U = n C_V T = n \frac{f}{2} RT$$

Izobár állapotváltozás



$$\left. \begin{array}{l} pV_1 = nRT_1 \\ pV_2 = nRT_2 \end{array} \right\} p(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1)$$

$$\downarrow$$

$$W = p\Delta V = nR\Delta T$$

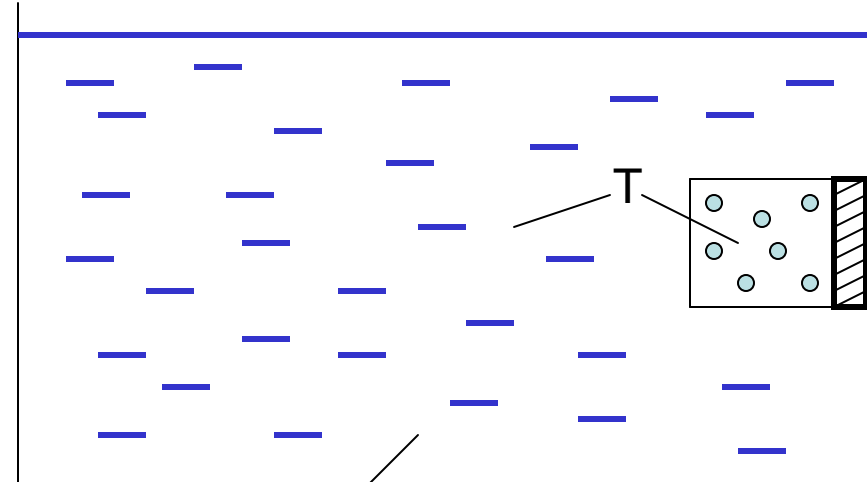
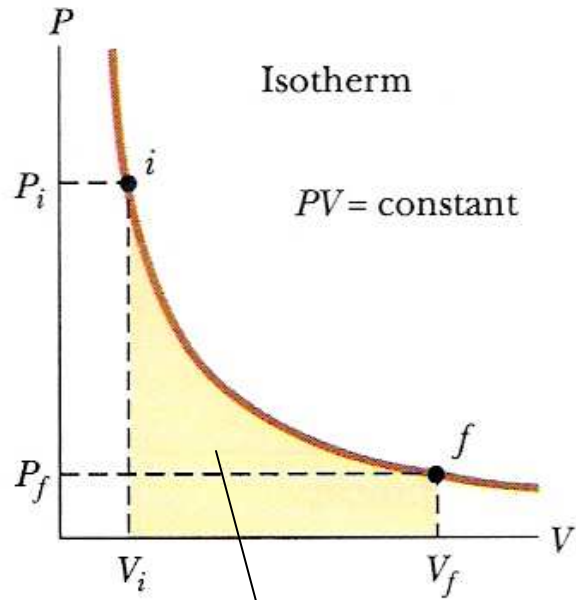
$$\Delta U = \Delta Q - W_g$$

$$\Delta Q = \Delta U + W_g = n \frac{f}{2} R\Delta T + p\Delta V = n \frac{f}{2} R\Delta T + nR\Delta T = n \left(\frac{f+2}{2} R \right) \Delta T$$

$$\Delta Q = nC_P \Delta T \quad C_P = \frac{f+2}{2} R$$

Izoterm állapotváltozás

$$\Delta T = 0$$



$$W_{\text{sz}} = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

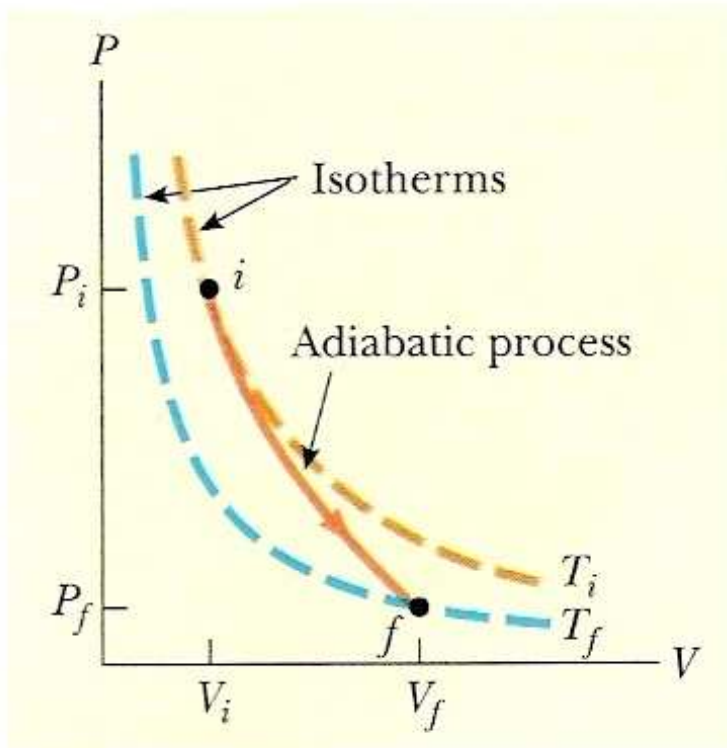
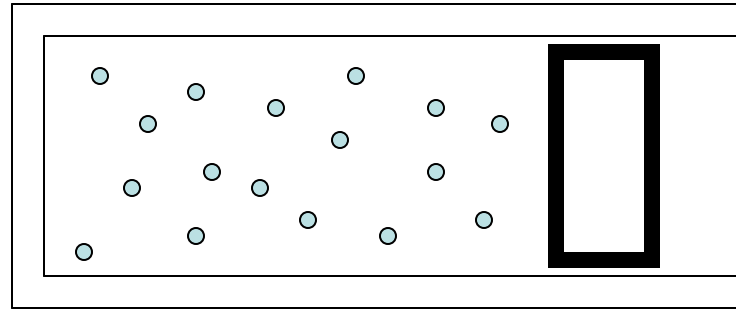
$$\Delta U = \Delta Q - W_{\text{sz}} \quad \Delta U = nC_V \Delta T = 0$$

$$W_{\text{sz}} = \Delta Q$$

Adiabatikus állapotváltozás $\Delta Q=0$

$$\Delta U = \Delta Q - W_g$$

$$\Delta U = -W_g$$

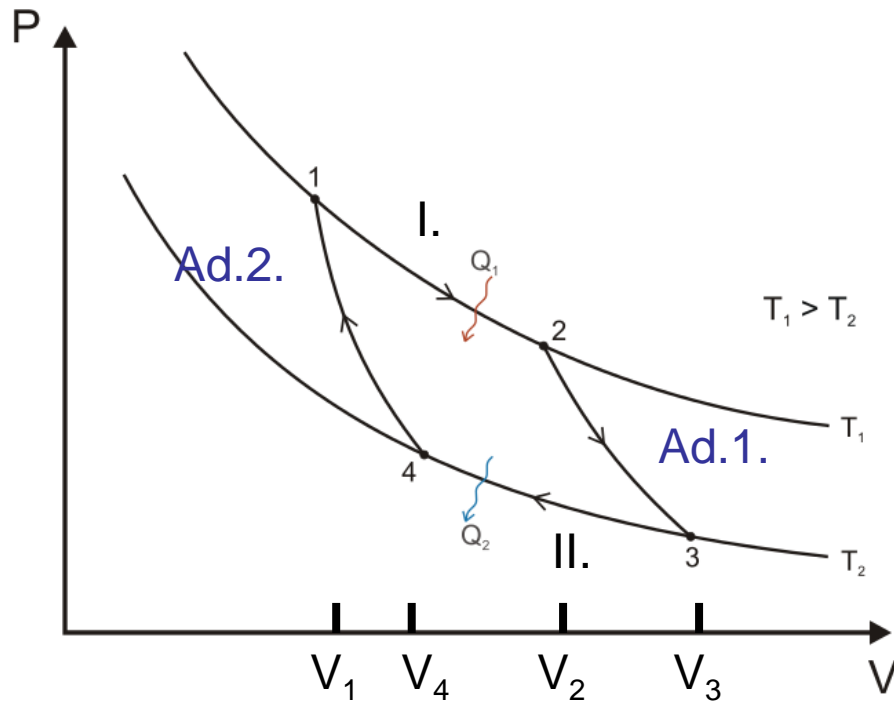


$$pV^\kappa = \text{const.}$$

$$\kappa = \frac{C_P}{C_V} = \frac{f+2}{f}$$

$$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa$$

A Carnot-féle körfolyamat



A körfolyamat részei:

Izotermikus tágulás (1-2)

Adiabatikus tágulás (2-3)

Izotermikus összenyomás (3-4)

Adiabatikus összenyomás (4-1)

Tágulás:

$$\text{I. } W_{g1} = Q_1 = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{Ad.1. } W_{\text{Ad.1.}} = nC_v(T_1 - T_2)$$

Kompresszió:

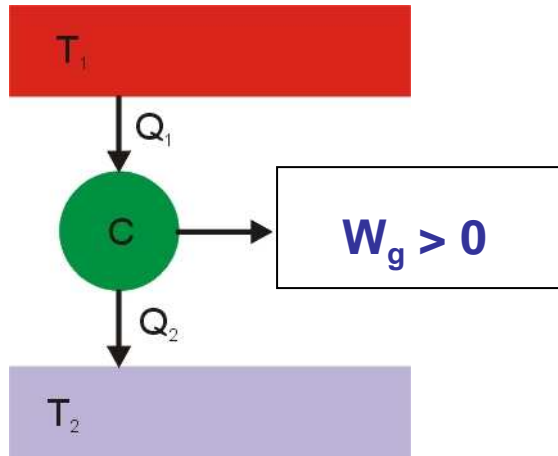
$$\text{II. } W_{g2} = Q_2 = nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$\text{Ad.2. } W_{\text{Ad.2.}} = nC_v(T_2 - T_1)$$

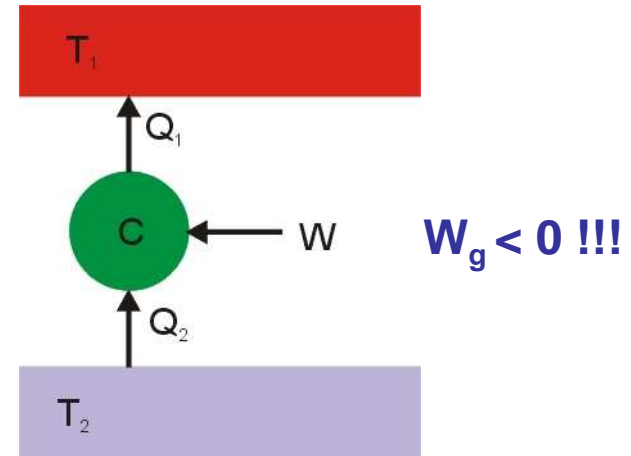
A körfolyamat során végzett munka:

$$W_g = nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Hőerőgép



Hűtőgép vagy hőpumpa



A végzett munka: $W_g = Q_1 + Q_2$

Hatásfok (ideális, reverzibilis körfolyamat esetén):

$$\eta = \frac{W_g}{Q_{be}} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - nRT_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)}{nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

A redukált hők összege: $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$

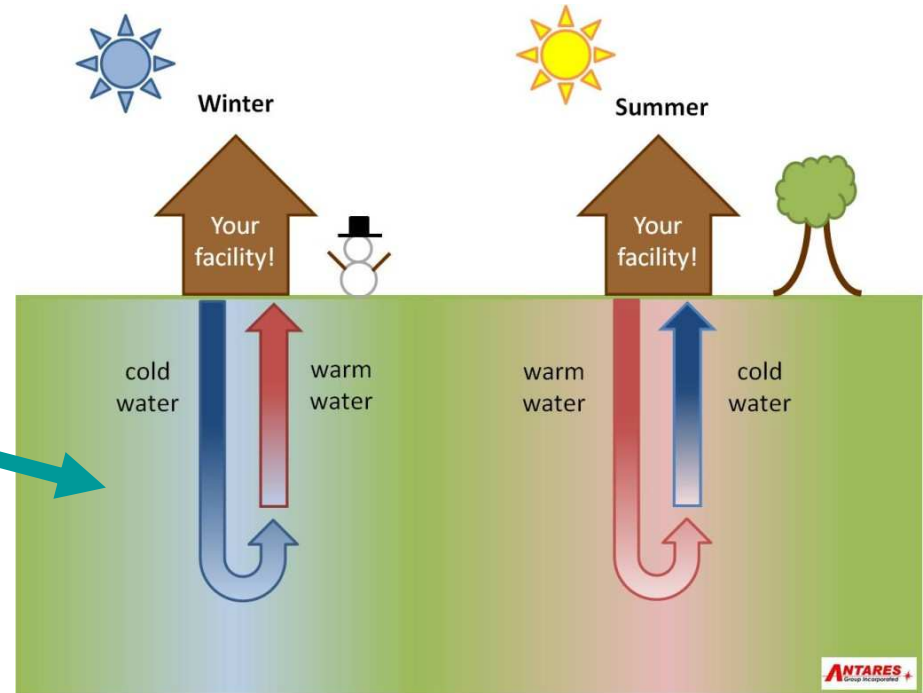
$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = ???$$



Coefficient of performance:

Hőpumpa:

$$\text{C.O.P.} = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$



Hűtőgép:

$$\text{C.O.P.} = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



Reverzibilis és irreverzibilis folyamatok

Az I. főtétel számos folyamatot megenged

Reverzibilis folyamatok: mindkét irányba lejátszódnak

Valóság: számos folyamat csak egy irányba valósul meg önként:

súrlódási munka - hő

környezetnél melegebb testek lehűlése

víz + só – feloldódás

Számos folyamat **irreverzibilis**

külső beavatkozás nélkül végbemennek

egyensúly (intenzív paraméterek kiegyenlítődése)

fordított irányba nem játszódnak le

A termodinamika második főtétele

Clausius-féle megfogalmazás:

nem létezik olyan folyamat (gép), amelyben a hő önként, munkavégzés nélkül egy hidegebb testről egy melegebb testbe menne át

Kelvin-Planck-féle megfogalmazás:

nem létezik olyan folyamat (gép), melyben egy test hőt veszít, és az teljes egészében (100 % hatásfokkal) munkává alakulna át

Nem létezik másodfajú örökmozgó:

olyan gép, amely a környezetből felvett hőenergiát veszteségek nélkül munkavégzésre fordítja

Reverzibilis és irreverzibilis Carnot-féle körfolyamat

Reverzibilis Carnot-féle körfolyamat esetén:

A hatásfok független az anyagi minőségtől.

A redukált hőök összege 0.

Clausius-féle egyenlőség:

$$\oint \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = 0$$

Irreverzibilis Carnot-féle körfolyamat:

veszteségek lépnek fel

$$\eta_{\text{irrev}} < \eta_{\text{rev}}$$

$$\frac{Q_{1,\text{irrev}}}{T_1} + \frac{Q_{2,\text{irrev}}}{T_2} < 0$$

Transzportfolyamatok

Transzportfolyamat: anyag, energia vagy más mennyiség az egyik helyről egymásikra jut

Kiváltja: adott X intenzív mennyiség térbeli változása

Pl. koncentrációkülönbség, elektromos potenciál, hőmérséklet

Hatására ΔY extenzív mennyiség $\Delta\tau$ idő alatt áthalad

Y : anyagmennyiség, tömeg, töltés, energia

Áramsűrűség:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\Delta Y}{A\Delta\tau}$$

Termikus energia transzport

Intenzív mennyiség: hőmérséklet

Extenzív mennyiség: energia (hő)

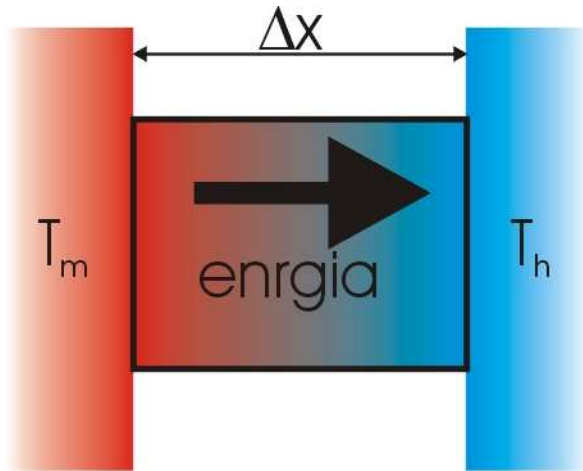
Típusai:

hővezetés

hőáramlás

hősugárzás

Hővezetés

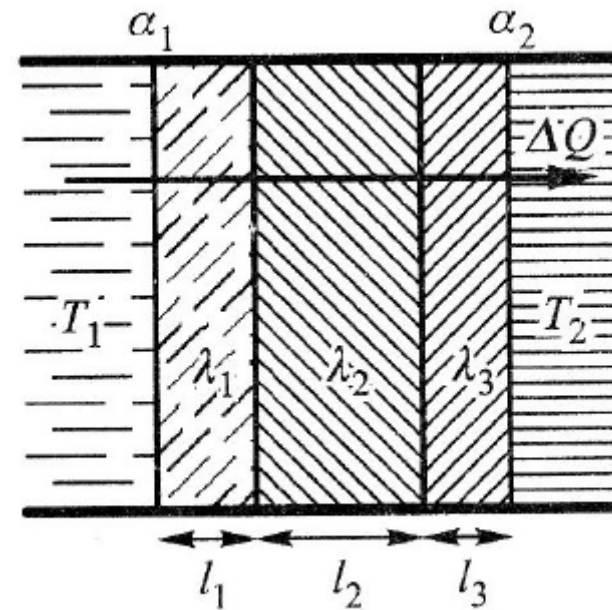


A hővezetést leíró egyenlet:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

λ : hővezetési együttható $\frac{\text{J}}{\text{msK}} = \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

Hőellenállás



Hőterjedés sugárzással

Közvetítő anyag illetve közeg nélküli hőterjedési jelenség.
(elektromágneses sugárzás)

Elektromágneses hullámokat egy test részben:

- átengedi (átengedési tényező $D \leq 1$), $a+R+D=1$
- visszaveri (visszaverődési tényező $R \leq 1$),
- elnyeli (abszorpció, elnyelési tényező $a \leq 1$).

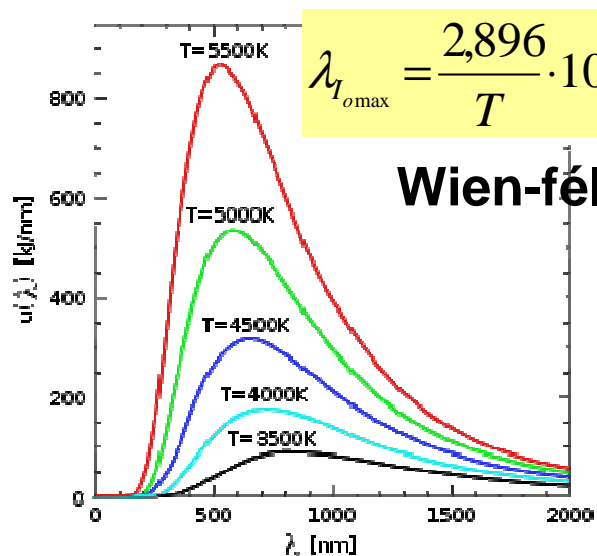
Abszolút fekete test ($a=1$).

Planck törvény

$$I_{o\lambda} = \frac{3,74 \cdot 10^{-16} \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{1,44 \cdot 10^{-2}}{\lambda T}} - 1} \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

Stefan-Boltzmann törvény

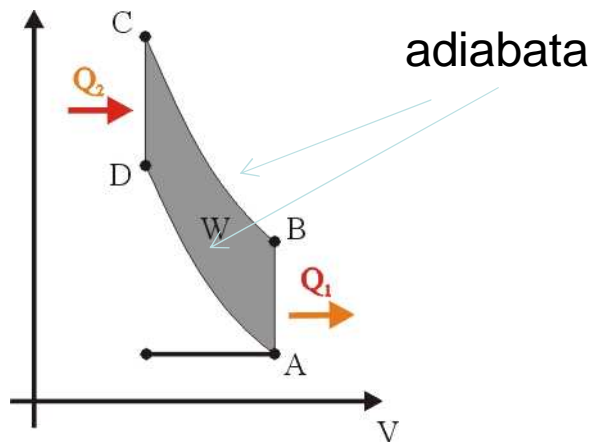
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4$$



Wien-féle eltolódási törvény

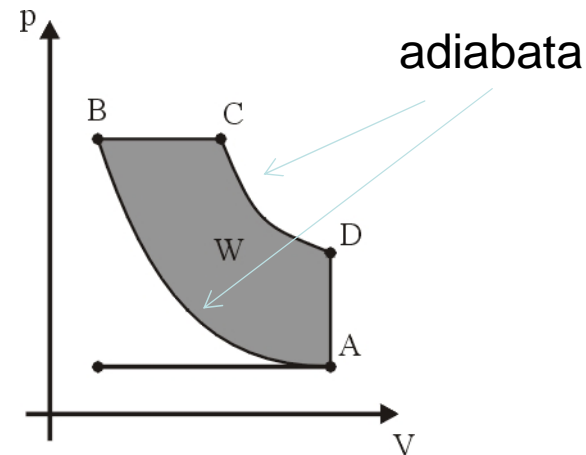
Hőerőgépek

Otto körfolyamat



A-D: sűrítés (V_A/V_B : kompresszió viszony)
D-C: égés, C-B: izoterm expanzió
B-A: munkaütem

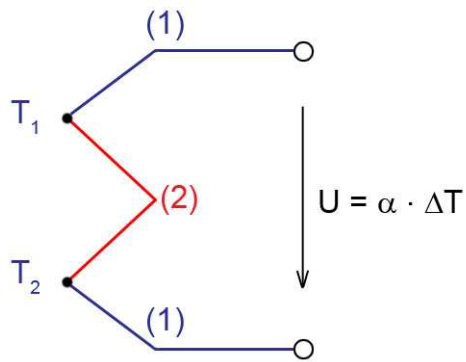
Diesel körfolyamat



B: befecskendezett olaj meggyullad
B-C-D: égés
magasabb kompresszió viszony

$$\frac{\text{hasznos munka}}{\text{befektetett hő}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\kappa-1}}$$

Peltier effektus

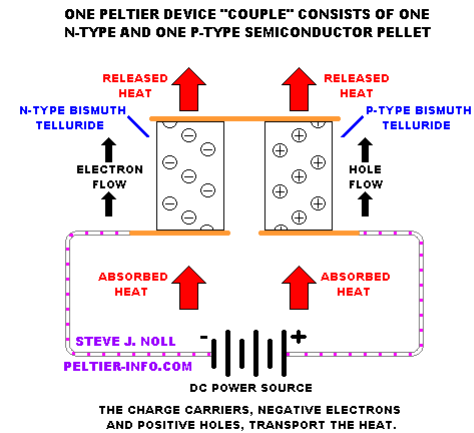


Seebeck effektus

$$U = \alpha \Delta T$$



hőmérséklet mérés



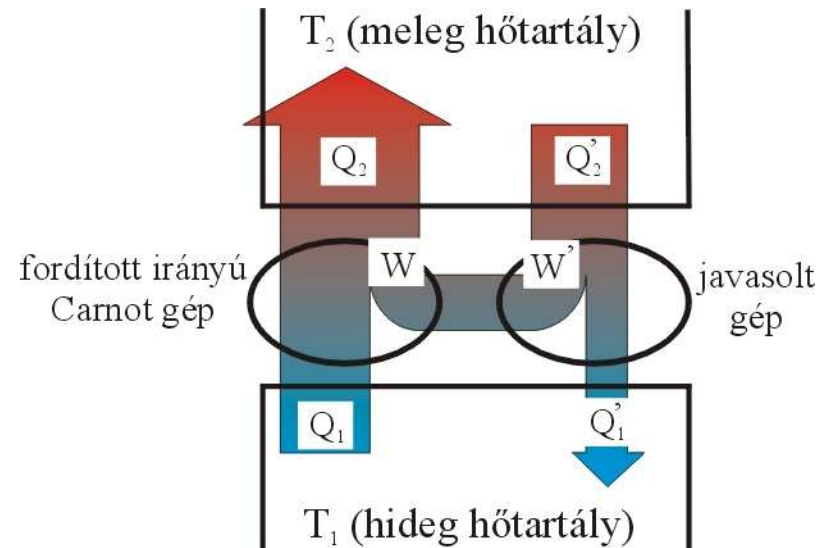
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha \Delta T I = \Pi_{AB} I = (\Pi_B - \Pi_A) I$$



Az elérhető legnagyobb hatásfok

feltételezés:

$$\left(\frac{W'}{Q_2'}\right)_{\text{javasolt}} > \left(\frac{W}{Q_2}\right)_{\text{Carnot}}$$



Mivel $W'=W$ ezért $Q_2 > Q_2'$

Az I. főtételeből:

$$W = Q_2 - Q_1 \quad \text{és} \quad W' = Q_2' - Q_1'$$

$$Q_1 > Q_1'$$

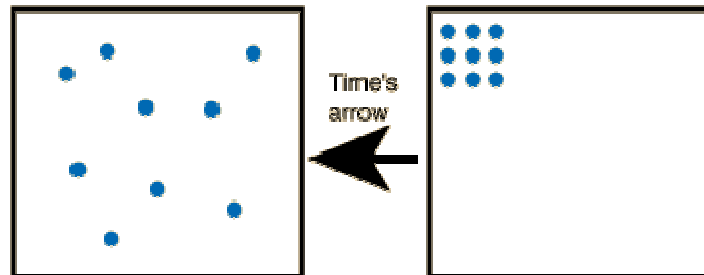
Az entrópia

I. főtétele: energiamegmaradás tétele. Nem mond semmit a folyamatok irányáról.

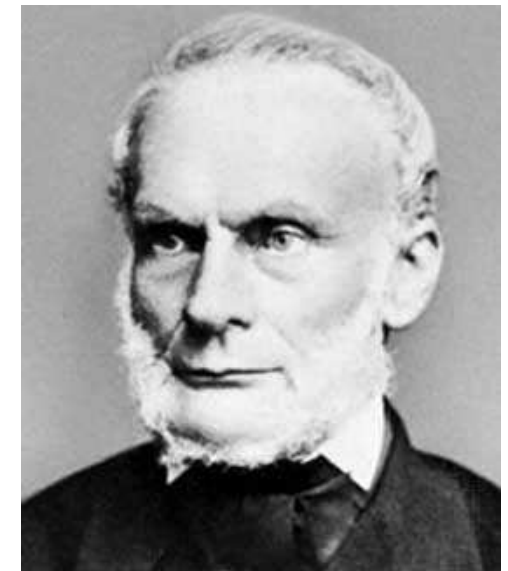
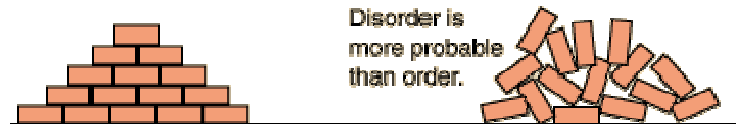
II. főtétele: természetben lejátszódó folyamatok irányára ad felvilágosítást.



If the particles represent gas molecules at normal temperatures inside a closed container, which of the illustrated configurations came first?



If you tossed bricks off a truck, which kind of pile of bricks would you more likely produce?



Clausius

Hő önként nem megy az alacsonyabb hőmérsékletű testről a magasabb hőmérsékletű testre.

A természeti folyamatokra jellemző az energia szétszóródása.

Rendezett \longrightarrow Rendezetlen

Definiálunk egy függvényt, amely számszerűen kifejezi a rendezetlenség mértékét.

Entrópiának fogjuk nevezni: **S**

Legfontosabb jellemzője: Önként végbemenő folyamatokban (elszigetelt rendszerben) mindig nő.

$$dU = \delta W + \delta Q$$

Érvényes reverzibilis és irreverzibilis folyamatokra is.

$$\text{Reverzibilis folyamatokra: } dU = \delta W_{\text{rev}} + \delta Q_{\text{rev}}$$

$$\text{Térfogati munka: } \delta W_{\text{rev}} = -p \cdot dV$$

↑ intenzív ↓ extenzív

$$\text{hasonlóan: } \delta Q_{\text{rev}} = T \cdot dS$$

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

$$\Delta S = \int_A^B \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} \quad \text{J/K}$$

Az entrópia-változás számítása

$$\Delta S = \int_A^B \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Izobár melegítés, hűtés: $\delta Q_{rev} = nC_p dT$

$$\Delta S = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT = nC_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

melegítéskor nő,
hűtéskor csökken

Izochor melegítés, hűtés: $\delta Q_{rev} = nC_v dT$

$$\Delta S = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_v}{T} dT = nC_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

melegítéskor nő,
hűtéskor csökken

Izoterm folyamat:
$$\Delta S = \frac{1}{T} \int_A^B \delta Q_{rev} = \frac{Q_{rev}}{T}$$

Tökéletes gáz izoterm reverzibilis

változása

$$\Delta U = 0, \quad Q = -W, \quad W = nRT \ln \frac{p_2}{p_1} \quad Q = -nRT \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta S = -nR \ln \frac{p_2}{p_1} = nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

kiterjedéskor nő
összenyomáskor csökken

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

Állapotváltozások (izoterm-izobár folyamatok)

$$\Delta S_{olv} = \frac{\Delta H_{olv}}{T_{olv}} \quad \Delta S_{pár} = \frac{\Delta H_{pár}}{T_{pár}}$$

olvadáskor, párolgáskor nő
fagyáskor, lecsapódáskor csökken

S változása zárt rendszerben

S nő

melegítés

olvadás

párolgás

kiterjedés

(elegyedés)

(oldódás)

RENDEZETLENSÉG

NŐ

S csökken

hűtés

fagyás

kondenzálás

összenyomás

(szételegyedés)

(kicsapódás)

RENDEZETLENSÉG

CSÖKKEN

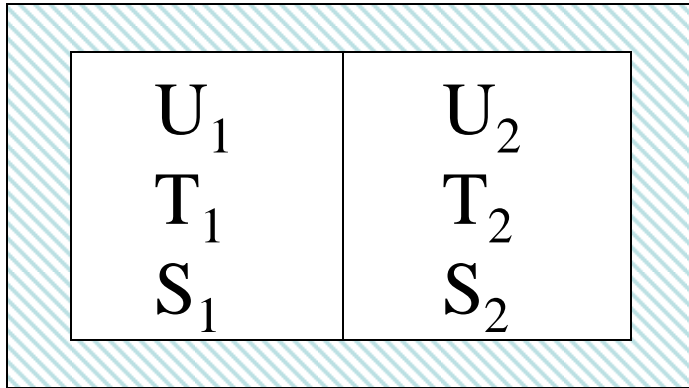
Entrópia – irreverzibilis folyamatok

Irreverzibilis folyamatokban hogyan változik az entrópia?

$$dU = -pdV + TdS$$

- 1.** Két különböző hőmérsékletű test (pl. fém) érintkezik. Hő megy át a magasabb hőmérsékletű testről az alacsonyabb hőmérsékletűre.
- 2.** Két test (gáz) hőmérséklete azonos, de nyomása különbözik. Nyomás-kiegyenlítési folyamat indul el.

1.



szigetelés

A két test termikus kölcsönhatásban van egymással, de együtt elszigetelt rendszert alkotnak.

Hanyagoljuk el a térfogatváltozást: $dV_1 = dV_2 = 0$

I. főtétele: $dU = dU_1 + dU_2 = 0 \quad \blacktriangle \quad dU_2 = -dU_1$

$dU_1 = T_1 dS_1 \quad dU_2 = T_2 dS_2$

A teljes entrópia-változás:

$$dS = dS_1 + dS_2 = \frac{dU_1}{T_1} + \frac{dU_2}{T_2} = \frac{dU_1}{T_1} - \frac{dU_1}{T_2} = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \cdot dU_1$$

$$dS = \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \cdot dU_1$$

$$dS = \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \cdot dU_1$$

A tapasztalat szerint hő önként csak a melegebb testről megy a hidegebbre.

a) Ha a 2-es test melegebb:

$$T_2 - T_1 > 0$$

$$dU_1 > 0 \quad (\text{mert az 1-es test veszi fel a hőt})$$

$$dS > 0$$

b) Ha az 1-es test melegebb:

$$T_2 - T_1 < 0$$

$$dU_1 < 0 \quad (\text{mert az 1-es test adja le a hőt})$$

$$dS > 0$$

Mindkét esetben:

$$dS > 0$$

A II. főtétele:

$$\Delta S \geq 0$$

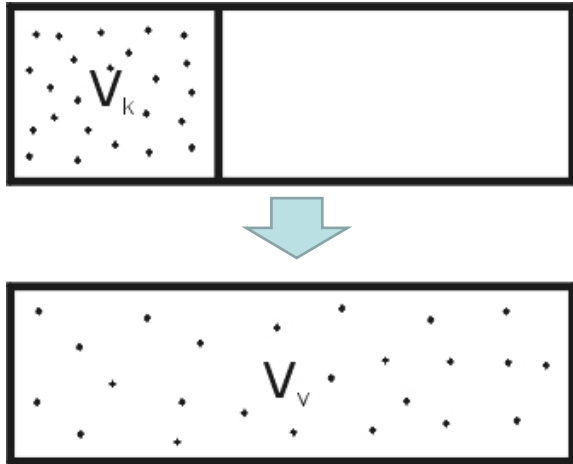
(elszigetelt rendszerben)

Ha a rendszer nem elszigetelt, akkor a rendszer és a környezet együttes entrópiájára érvényes:

$$\Delta S_{\text{rendszer}} + \Delta S_{\text{környezet}} \geq 0$$

Makroszkópikus folyamatok mindig az entrópia növekedésével járnak együtt.

Entrópia – mikroszkópikus szempontból



egy molekulára: $W_k = \frac{V_k}{V}$

N molekulára: $W_k = \left(\frac{V_k}{V}\right)^N$

más térfogatra: $W_k = \left(\frac{V_v}{V}\right)^N$

$$\frac{W_v}{W_k} = \frac{\left(\frac{V_v}{V}\right)^N}{\left(\frac{V_k}{V}\right)^N} = \left(\frac{V_v}{V_k}\right)^N$$

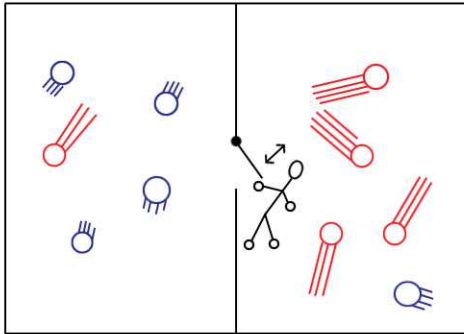
$$k \ln \left(\frac{W_v}{W_k} \right) = nN_A k \ln \left(\frac{V_v}{V_k} \right)$$

$$k \ln W_v - k \ln W_k = nR \ln \left(\frac{V_v}{V_k} \right)$$

$$S_v - S_k = nR \ln \left(\frac{V_v}{V_k} \right)$$

$$S = k \ln W$$

Maxwell démon



paradoxon feloldása:

Szilárd Leó (démon entrópia növekedése)

Rolf William Landauer (véges memóriakapacitás - irreverzibilis)



Miért eszünk?

Démon: szelektálás



zárt rendszer entrópiája csökken



II. főtétele



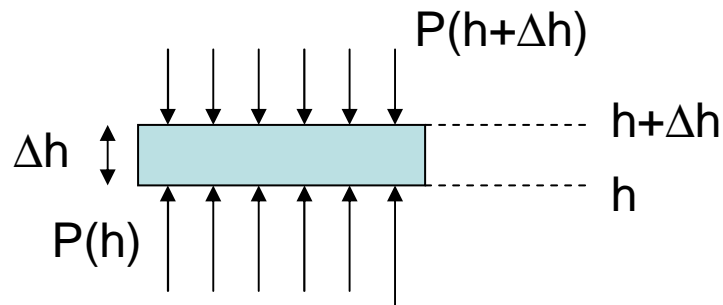
Mennyibe kerül egy bit?

Élet a Földön \leftrightarrow termodinamikai egyensúly???



A légnyomás magasságfüggése (energia eloszlás)

Tegyük fel: $T = \text{áll.}$



$$F = A[P(h) - P(h + \Delta h)] \quad (+)$$

$$F = mgnA\Delta h \quad (++)$$

m : molekula tömeg

n : részecske sűrűség

$$P = nkT$$

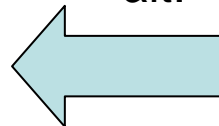
(+) és (++)

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{mg}{kT}n$$

Energia-eloszlás:

$$n = n_0 e^{-E_{pot} / kT}$$

ált.



A megoldás: $n = n_0 e^{-mgh / kT}$

$$p = p_0 e^{-mgh / kT}$$