



SEMMELWEIS EGYETEM

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet,
Nanokémiai Kutatócsoport

Lágy Anyagok
Laboratóriuma

**(Bio)termodinamika, entrópia,
egyensúly és változás**

Zrínyi Miklós

egyetemi tanár, az MTA rendes tagja

A termodinamika I. főtétele

$$\Delta U = T\Delta S - p\Delta V + \sum_{i=1}^K \mu_i \Delta n_i + \dots +$$

Az energiamegmaradás törvényének legáltalánosabb megfogalmazása. $\Delta U = \Delta Q + \Delta W_{\text{mech}} + \Delta W_{\text{kém}} + \dots + \Delta W_i$

A termodinamika II. főtétele

Elszigetelt rendszerben a önként lejátszódó (kiegyenlítődési) folyamatok során az entrópia növekszik.

A termodinamika III. főtétele

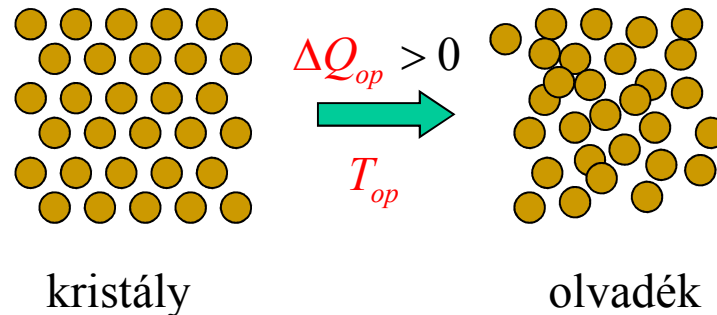
Tiszta kristályos anyagok entrópiája nulla az abszolút zérus ponton:

entrópia  **termikus** entrópia (a hőmérséklet változik)

$$\Delta S = \Delta S_{term} + \Delta S_{konf}$$

 **konfigurációs** entrópia (a hőmérséklet **nem** változik)

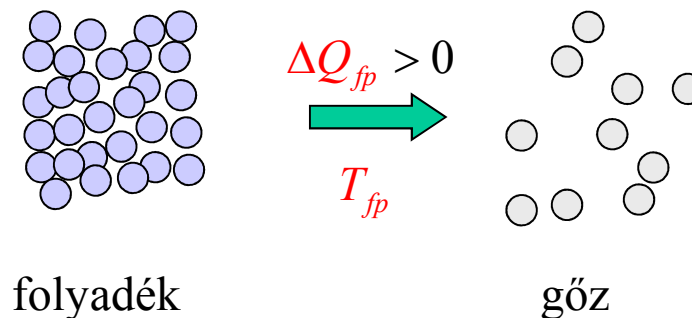
Olvasás:



$$\Delta S_{konf}(T_{op}) = \frac{\Delta Q_{op}}{T_{op}} > 0$$

$$\Delta Q = T \Delta S$$

Forrás:



$$\Delta S_{konf}(T_{fp}) = \frac{\Delta Q_{fp}}{T_{fp}} > 0$$

Az állandó hőmérsékleten lejátszódó (fázis)átalakulás során az **entrópia a rendezetlenség növekedésével együtt nő.**

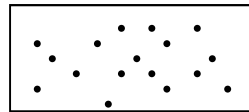
Az entrópia a molekuláris rendezetlenség mértéke

entrópia \rightarrow termikus entrópia (a hőmérséklet változik)
 \rightarrow konfigurációs entrópia (a hőmérséklet **nem** változik)

$$S = S_{term} + S_{konf}$$

Gáz adiabatikus expanziója

Adiabatikus esetben a rendszer a környezetétől termikusan elszigetelt: $S = \text{állandó}$



gáz adiabatikus kitágulása során: $\Delta S = 0$

A rendezetlenség növekszik $\Delta S_{konfig} > 0$

Mivel $\Delta S = \Delta S_{konfig} + \Delta S_{term} = 0 \Rightarrow$

$$\Delta S_{konfig} = -\Delta S_{term}$$

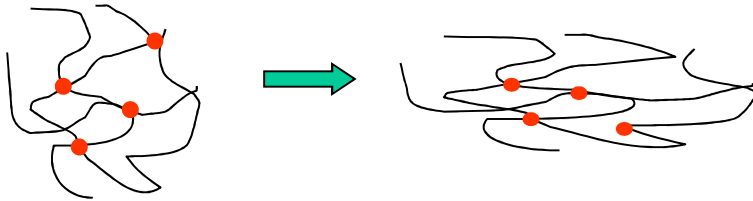
$$\Delta S_{term} < 0$$

$$\Delta S_{term} = \frac{C_V}{T} \Delta T < 0 \Rightarrow$$

$$\Delta T < 0$$

A gáz lehül !

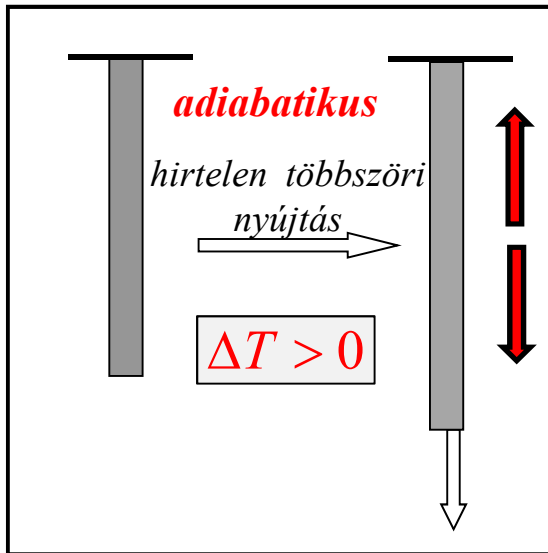
A gumiszál adiabatikus nyújtása



adiabatikus deformációnál: $S = \text{állandó}$

A rendezettség növekszik $\Delta S_{\text{konfig}} < 0$

Mivel $\Delta S = \Delta S_{\text{konfig}} + \Delta S_{\text{term}} = 0 \Rightarrow \Delta S_{\text{konfig}} = -\Delta S_{\text{term}} \Rightarrow \Delta S_{\text{term}} > 0$

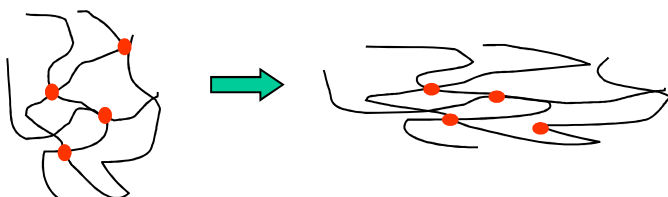


$$\Delta S_{\text{term}} = \frac{C_V}{T} \Delta T > 0 \Rightarrow \Delta T > 0$$

A hirtelen meghúzott gumiszál felmelegszik!

MAKROMOLEKULÁK RUGALMASSÁGA

Entrópia rugalmasság



$$\Delta S_{konfig} < 0$$

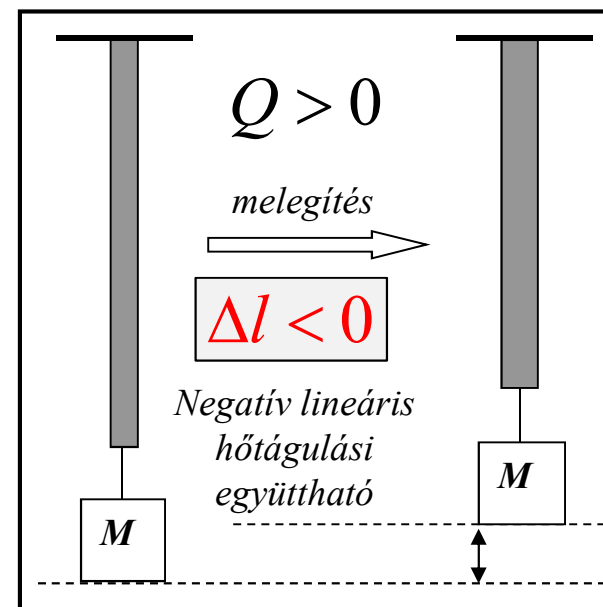
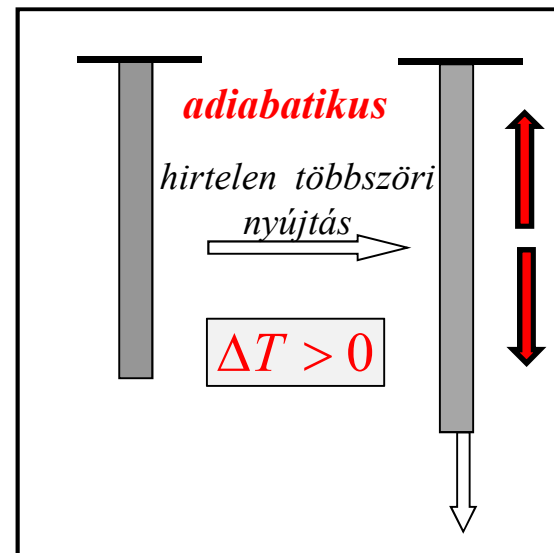
$$\Delta S = \Delta S_{konfig} + \Delta S_{term} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta S_{term} > 0$$

$$\Delta S_{term} \quad \Rightarrow \quad \Delta S_{konfig}$$

nyújtott \Rightarrow gombolyodott

összehúzódás

$$\Delta S_{konfig} > 0$$



Entropia növekedéssel járó folyamatok



Entropia a rendezetlenség mértéke?

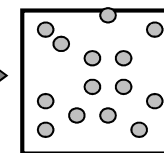
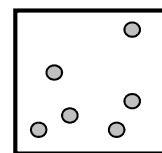
IGEN!

Boltzmann összefüggés:

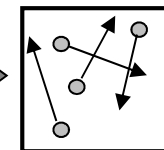
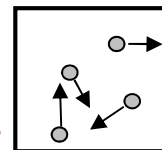
$$S = k_B \ln W$$

$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \longrightarrow k_B = \frac{R}{N_{Av}}$$

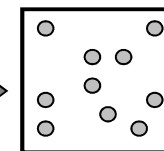
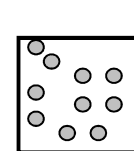
termodinamikai valószínűség: $W \gg 1$



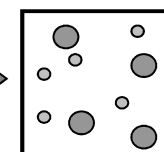
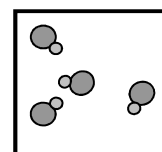
*részecskeszám
növelése*



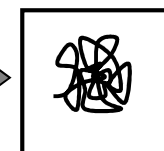
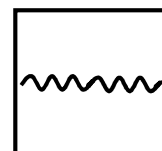
*hőmérséklet
növelése*



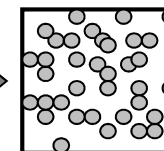
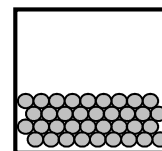
térfogat növelése



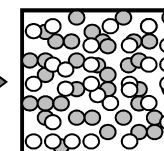
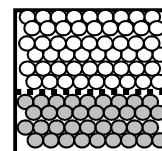
*bomlási folyamat
disszociáció*



*makromolekula
gombolyodása*



*olvadás,
forrás*



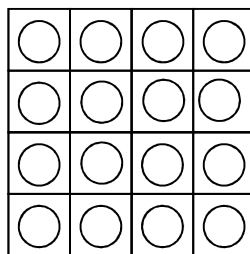
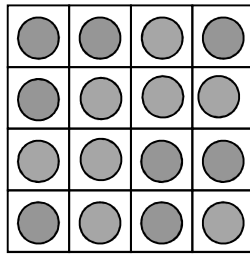
elegyedés

A **W termodinamikai valószínűség** megadja az adott **makroállapothoz** tartozó **mikroállapotok** számát.

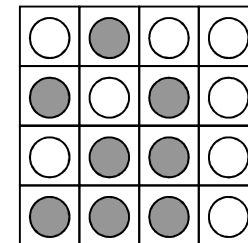
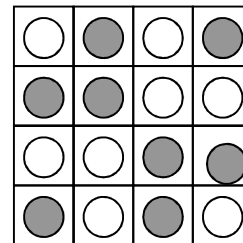
1. példa: **makroállapot:** koncentráció
mikroállapot: lehetséges eloszlások száma

$$W = \frac{16!}{8!8!} = 12870$$

$$x_A = 8 / 16$$



$\Delta S_{konfig} > 0$



$$S = k_B \ln W$$

$$W_A = 1$$

$$S_A = 0$$

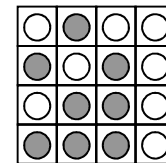
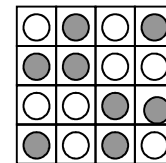
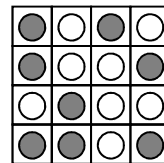
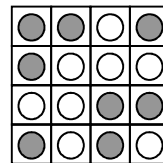
$$W_B = 1$$

$$S_B = 0$$

$$W_{A,B} = 12870$$

$$S_{A,B} = k_B T \ln(12870)$$

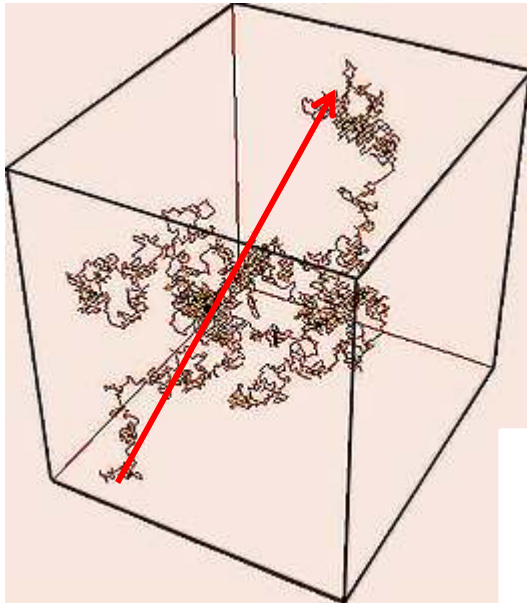
$$W_{A,B} = \frac{(N_A + N_B)!}{N_A! N_B!} = \frac{16!}{8!8!} = 12870$$



Négy különböző mikroállapot a lehetséges 12870 számából.

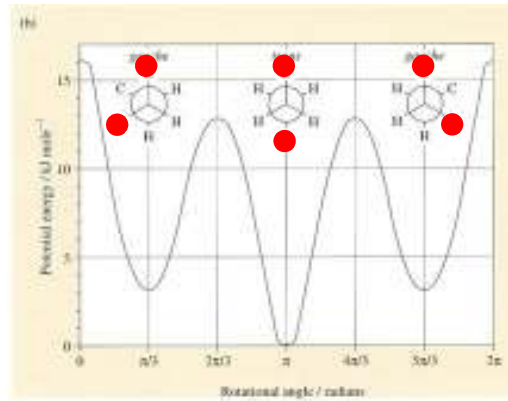
A **W termodinamikai valószínűség** megadja az adott **makroállapot**hoz tartozó **mikroállapotok** számát.

2. példa: **makroállapot: láncvégtávolság**
 mikroállapot: lehetséges konformációk száma



gombolyag, g

$$S = k_B \ln W$$

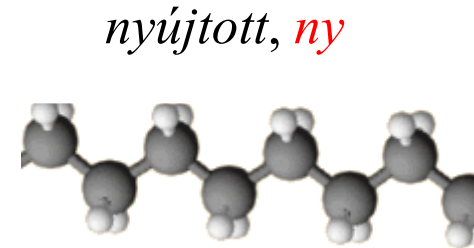


$$N_{C-C} = 10^4$$

$$W_g = 3^{10000}$$

$$S_g = k_B T \ln(3^{10000})$$

$$S_g = 10^4 k_B T \ln 3$$



$$N_{C-C} = 10^4$$

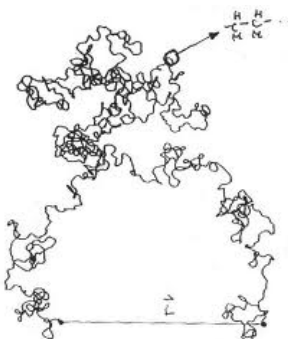
$$W_{ny} = 1$$

$$S_{ny} = k_B T \ln 1$$

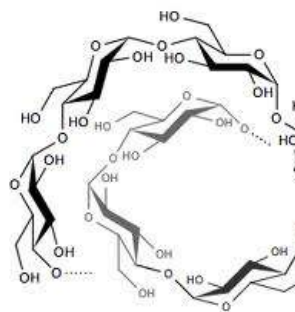
$$S_{ny} = 0$$

Térszerkezet és konformációs entrópia

konstitúció - konfiguráció - konformáció



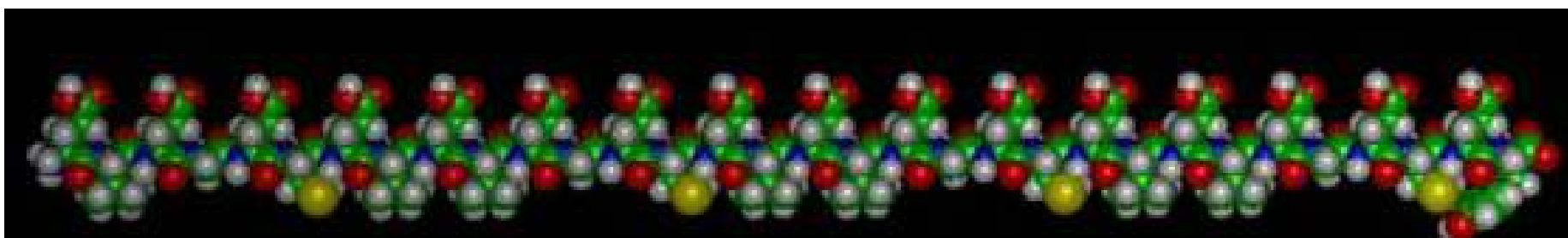
Statisztikus gombolyag



Szabályos térszerkezet

Nagy konformációs entrópia

Jóval kisebb konformációs entrópia

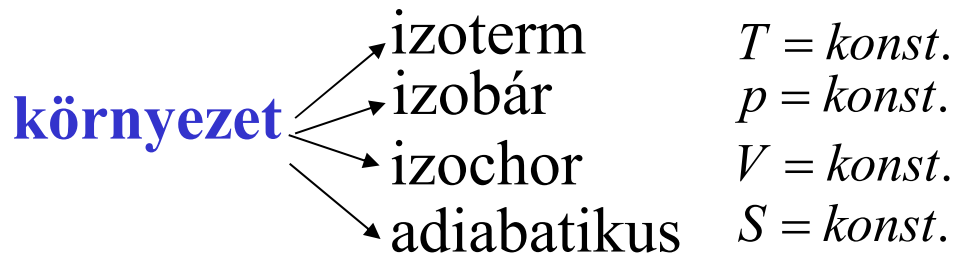


$$W=1$$



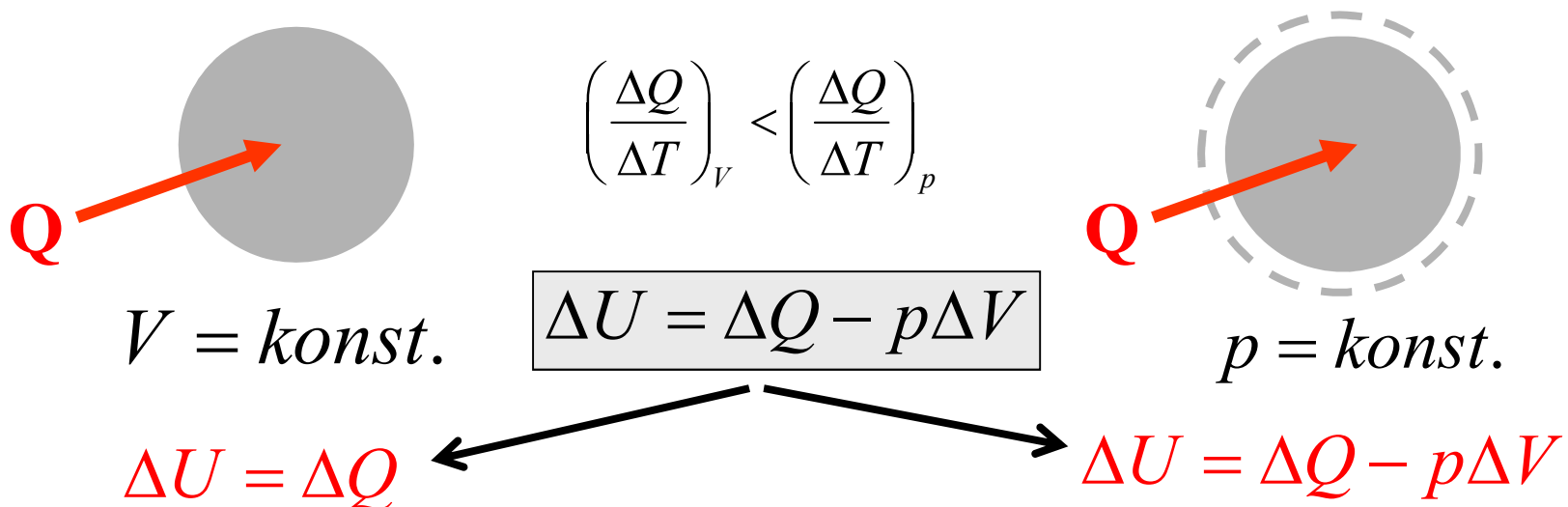
$$S_{konf} = 0$$

Környezeti hatások



A belső energia egy része a környezet állandóságának biztosítására fordítódik!

Hasznosítható energia \neq Belső energia változása



A belső energia adott körülmények között hasznosítható része:

Izobár eset: **H entalpia**

Izoterm eset: **F szabadenergia**

Izoterm-izobár eset: **G szabadentalpia**

ENTALPIA

Csak termikus és mechanikai kölcsönhatást vizsgáljunk

$$\Delta U = T\Delta S - p\Delta V \quad \text{ha } p=\text{állandó, akkor } \Delta U = T\Delta S - \Delta(pV)$$

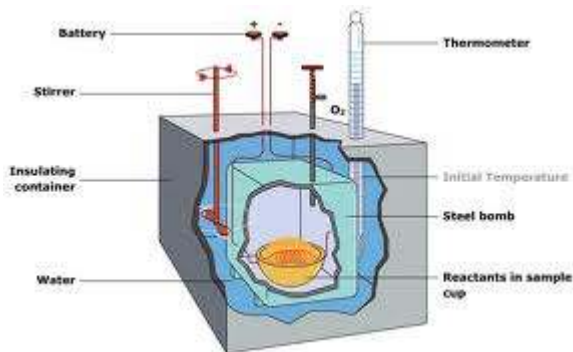
$$\Delta U + \Delta(pV) = \Delta(U + pV) = T\Delta S$$

$$\Delta H = \Delta(U + pV) = T\Delta S \quad \rightarrow \quad \text{hő}$$



$$H = U + pV$$

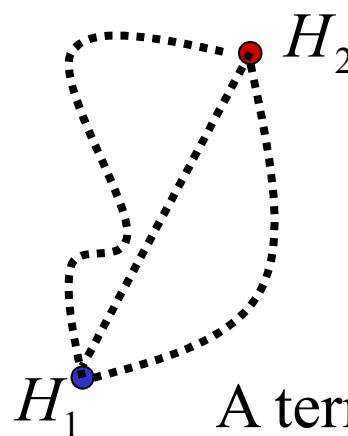
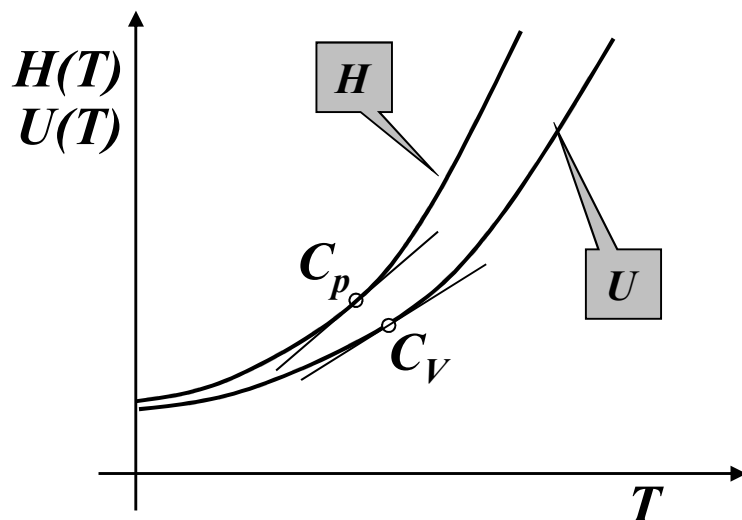
A H entalpia az U belső energiának izobár hőközléssel hasznosítható része.



$$H = U + pV$$

Az entalpia **extenzív** mennyiség.

Az entalpia **állapotfüggvény**.



$$\Delta H = H_2 - H_1$$

Hess tétel!

A termokémia főtétele.

Nem függ tehát a reakcióhő nagysága a részfolyamatok sorrendjétől

A szabadenergia

Csak termikus és mechanikai kölcsönhatást vizsgáljunk

$$\Delta U = T\Delta S - p\Delta V \quad \text{ha } T=\text{állandó, akkor } \Delta U = \Delta(TS) - p\Delta V$$

$$\Delta A = \Delta U - \Delta(TS) = -p\Delta V = \Delta W_{\text{mech}}$$

$$\Delta F = \Delta(U - TS) = -p\Delta V = \Delta W_{\text{mech}}$$

mechanikai munka



$$F = U - TS$$

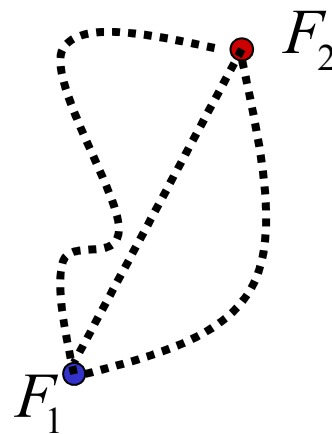
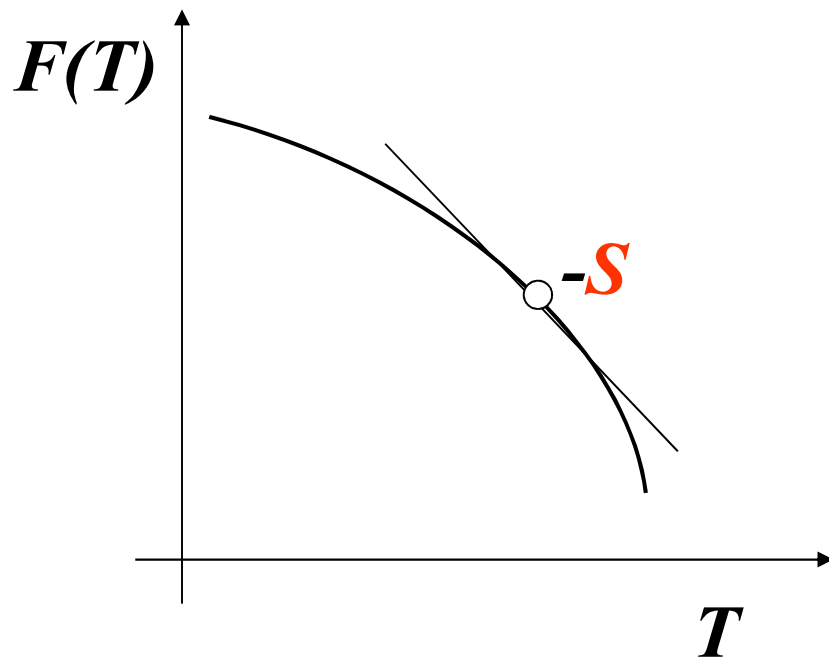
Az F szabadenergia az U belső energiának izoterm munkavégzéssel hasznosítható része.

A szabadenergia függvény matematikai tulajdonságai

$$F = U - TS$$

A szabadenergia **extenzív** mennyiség.

A szabadenergia **állapotfüggvény**.



$$\Delta F = F_2 - F_1$$

A szabadenergia **nem megmaradó mennyiség!**

A szabadentalpia

Termikus, mechanikai és kémiai kölcsönhatásokat vizsgáljunk

$$\Delta U = T\Delta S - p\Delta V + \sum_{i=1}^K \mu_i \Delta n_i$$

$$\Delta U = -p\Delta V + T\Delta S + \sum_{i=1}^K \mu_i \Delta n_i + \dots +$$

ha T és p =állandó, akkor $\Delta U = \Delta(TS) - \Delta(pV) + \sum_{i=1}^K \mu_i \Delta n_i$

$$\Delta G = \Delta U + \Delta(PV) - \Delta(TS) = \sum_{i=1}^K \mu_i \Delta n_i$$

$$\Delta G = \Delta(U + PV - TS) = \sum_{i=1}^K \mu_i \Delta n_i$$

$$\Delta G = \Delta(H - TS) = \sum_{i=1}^K \mu_i \Delta n_i$$

kémiai munka

$$G = H - TS$$

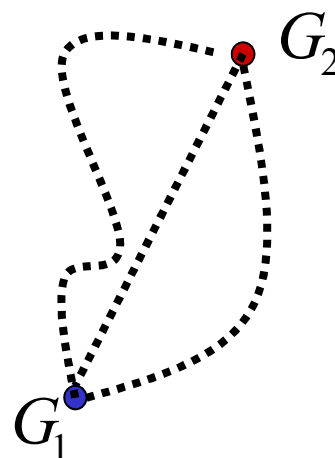
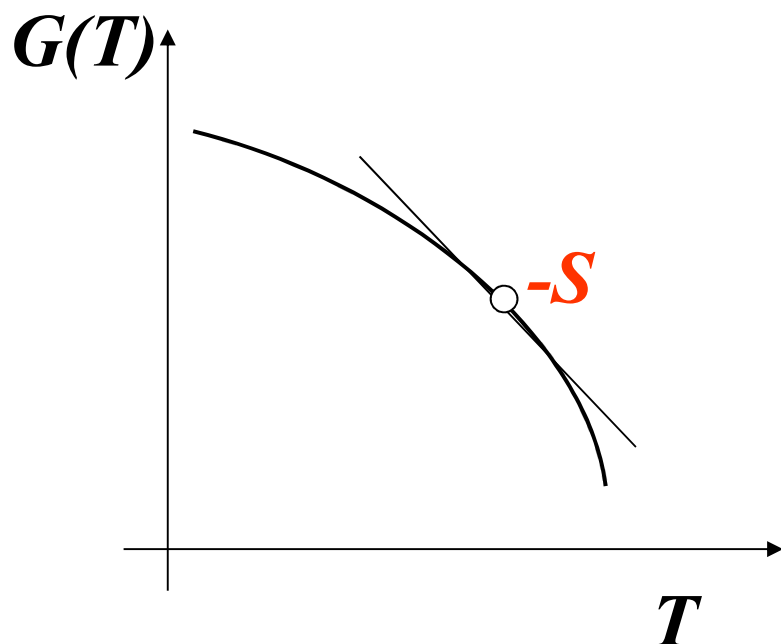
A **G** szabadentalpia az **U** belső energiának kémiai folyamatokkal hasznosítható része.

A szabadentalpia függvény matematikai tulajdonságai

$$G = H - TS$$

A szabadentalpia **extenzív** mennyiség.

A szabadentalpia **állapotfüggvény**.



$$\Delta G = G_2 - G_1$$

A szabadentalpia **nem megmaradó mennyiség!**

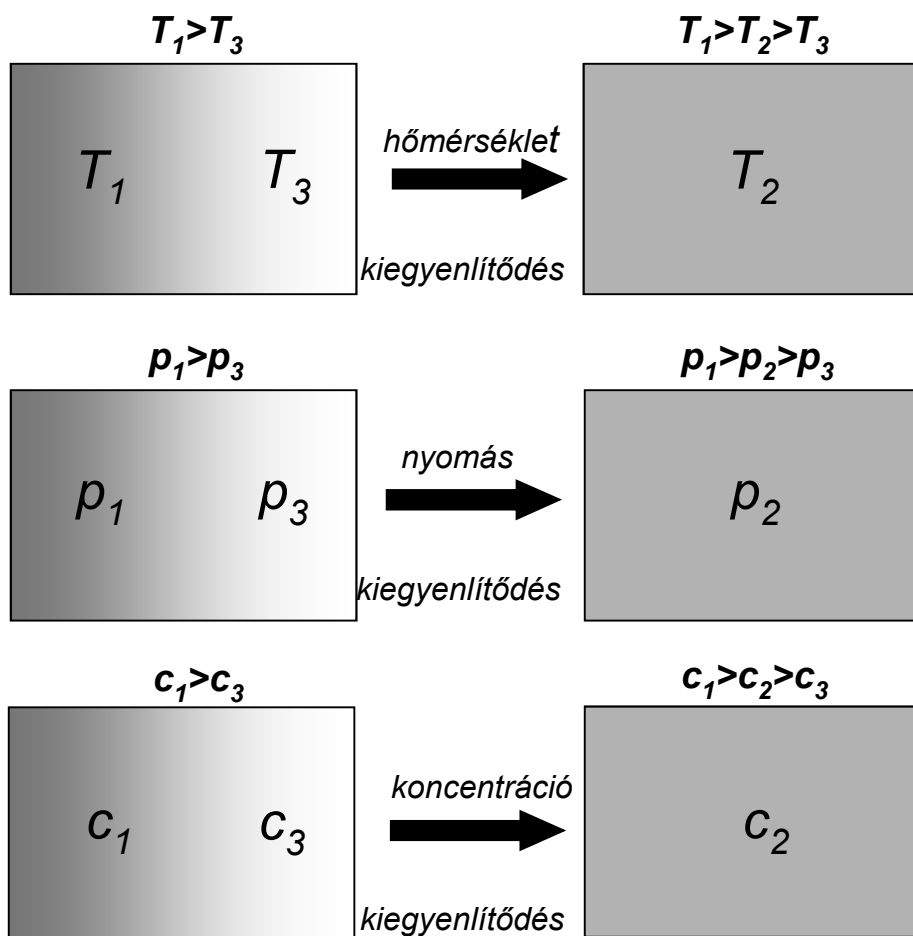
Önként lejátszódó folyamatok iránya és hajtóereje

A fizikai kémiai folyamatok spontán lejátszódásának nem szükséges feltétele a belső energia minimumra való törekvése!

Egy példa: A jég olvadása. 0 C hőmérséklet közelében a víz belső energiája nagyobb, mint a jégé, ennek ellenére az 1 C-os hőmérsékletű jég légköri nyomáson spontán megolvad. Az olvadást $= +4,2 \text{ kJ/mol}$ belsőenergia növekedés kíséri.

Elszigetelt rendszerben önként végbemenő folyamatok.

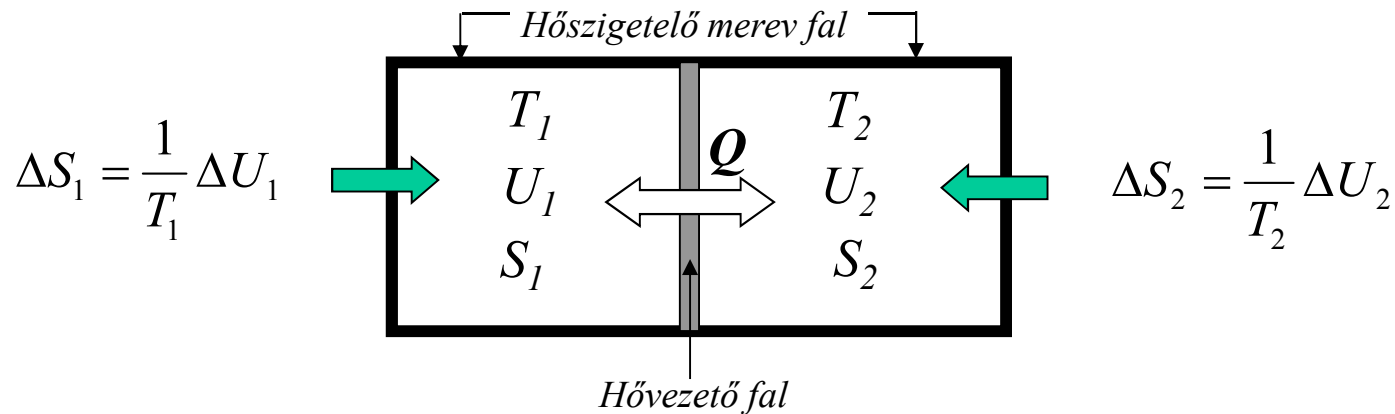
$$\Delta U = 0$$



Az entrópia *nem megmaradó* extenzív mennyiség!

Elszigetelt rendszer

Az energia megmaradó mennyiség



$U = U_1 + U_2 = \text{állandó} \quad \Delta U = 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta U_1 = -\Delta U_2$

$S = S_1 + S_2 = ? \quad \Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = ? \quad \Delta S = \frac{1}{T_1} \Delta U_1 + \frac{1}{T_2} \Delta U_2 = \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \cdot \Delta U_1 \neq 0$

ha $T_2 > T_1$ akkor $\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} > 0$ és $\Delta U_1 > 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta S > 0$

ha $T_2 < T_1$ akkor $\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} < 0$ és $\Delta U_1 < 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta S > 0$

ha $T_2 = T_1$ akkor $\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} = 0$ és $\Delta U_1 = 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta S = 0$

A hőcsere következtében a rendszer teljes entrópiája növekszik!

Önként lejátszódó folyamatok termodinamikai jellemzése

Kölcsönhatás izoterm rendszerben



$$F = U - TS$$



$$\Delta F = -p\Delta V$$

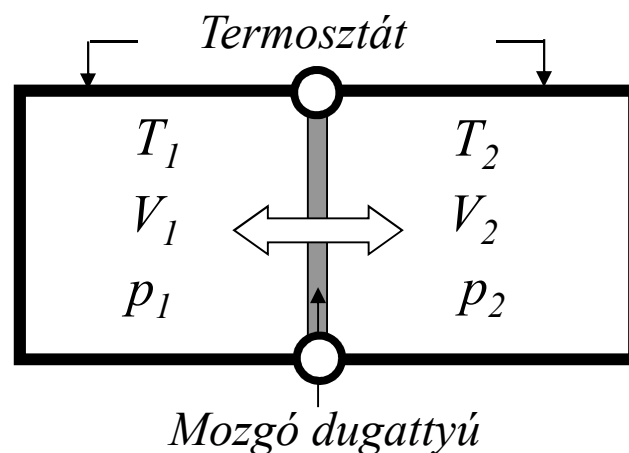
$$F = F_1 + F_2 = ?$$

$$\Delta F = \Delta F_1 + \Delta F_2 = ?$$

$$\Delta F_1 = -p_1\Delta V_1$$



$$V = V_1 + V_2 = \text{állandó}$$




$$\Delta F_2 = -p_2\Delta V_2$$


Mozgó dugattyú


$$\Delta V_1 = -\Delta V_2$$

$$dF = -p_1\Delta V_1 - p_2\Delta V_2$$

$$\Delta F = (p_1 - p_2)\Delta V_2$$

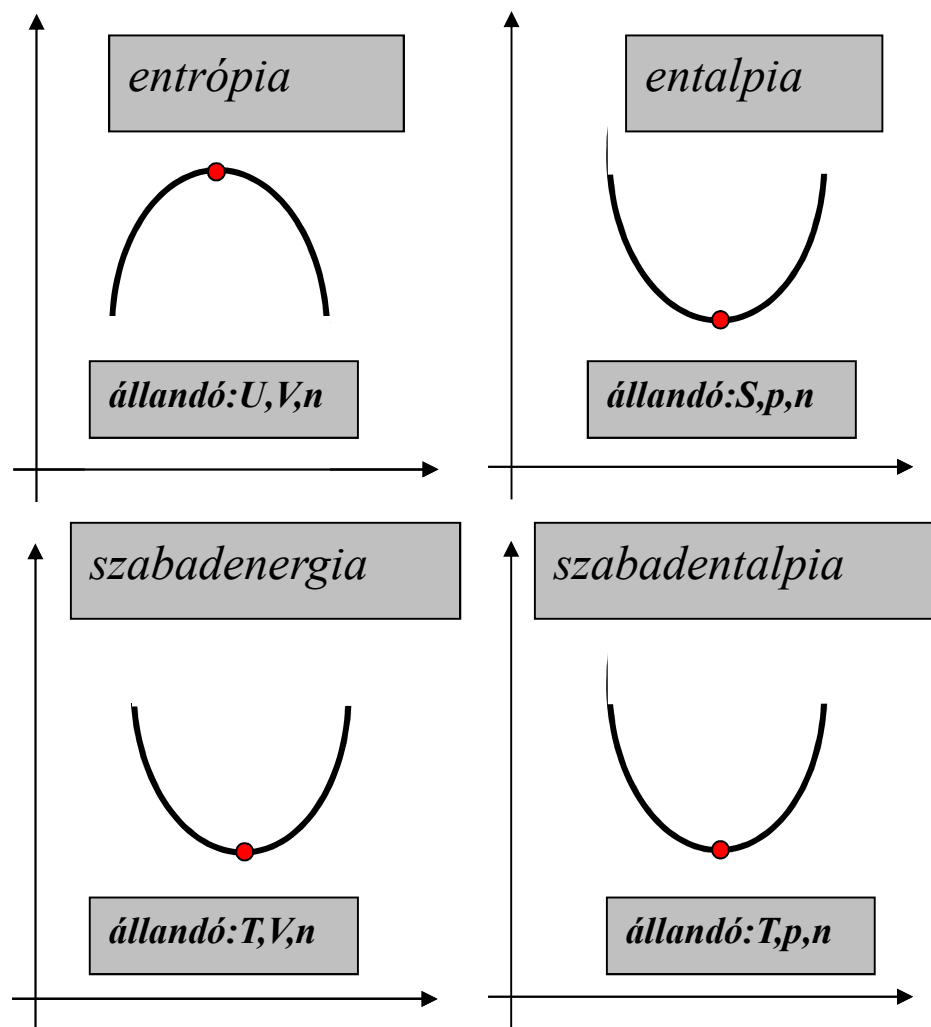
ha $p_1 > p_2$ akkor $(p_1 - p_2) > 0$ és $\Delta V_2 < 0$  $\Delta F < 0$

ha $p_1 < p_2$ akkor $(p_1 - p_2) < 0$ és $\Delta V_2 > 0$  $\Delta F < 0$

ha $p_1 = p_2$ akkor $(p_1 - p_2) = 0$ és $\Delta V_2 = 0$  $\Delta F = 0$

Izoterm nyomás-kiegyenlítődési folyamat során a szabadenergia csökken.

A termodinamikai egyensúly feltétele



termodinamikai egyensúly \longleftrightarrow Szélsőérték meghatározás

A termodinamikai egyensúly feltétele

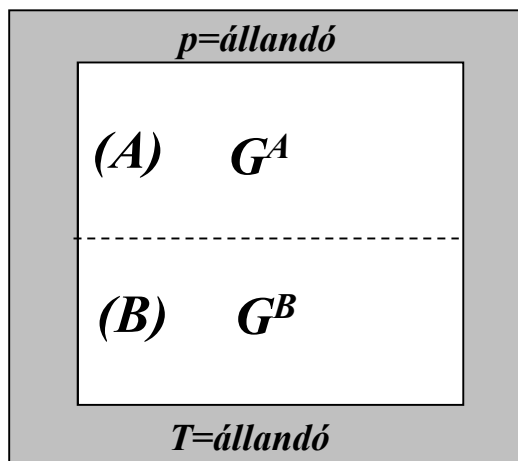
<i>karakterisztikus függvény</i>	<i>környezeti kölcsönhatás</i>	<i>"szigetelés"</i>	<i>az egyensúlyhoz tartozó szélsőérték</i>	<i>önként lejátszódó folyamat során</i>
$S(U, V, n)$	elszigetelt	U, V, n	maximum	$S > 0$
$U(S, V, n)$	-	S, V, n	minimum	$U < 0$
$H(S, p, n)$	mechanikai	$S, -, n$	minimum	$H < 0$
$F(T, V, n)$	termikus	$-, V, n$	minimum	$F < 0$
$G(T, p, n)$	Mechanikai és termikus	$-, -, n$	minimum	$G < 0$

A termodinamikai egyensúlyt az intenzív állapotjelzők homogén eloszlása jellemzi.

Fázisok közötti termodinamikai egyensúlyt az intenzív mennyiségek fázisok közötti egyenlősége jellemzi.

A és B fázisok közötti egyensúly termodinamikai feltétele I

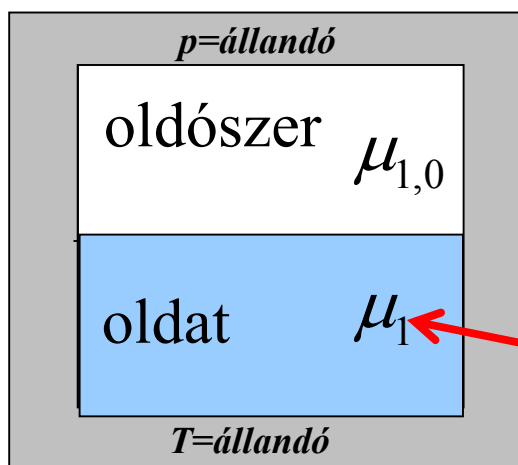
egykomponensű rendszer



$$G = G^A + G^B$$

Izoterm és izobár környezetben a fázisok egyensúlyának szükséges feltétele a moláris szabadentalpiák egyenlősége!

$$G_m^A \equiv G_m^B$$



Az oldatfázisban az oldott anyag kémiai potenciáljának meg kell egyeznie a másik fázis moláris szabadentalpiájával!

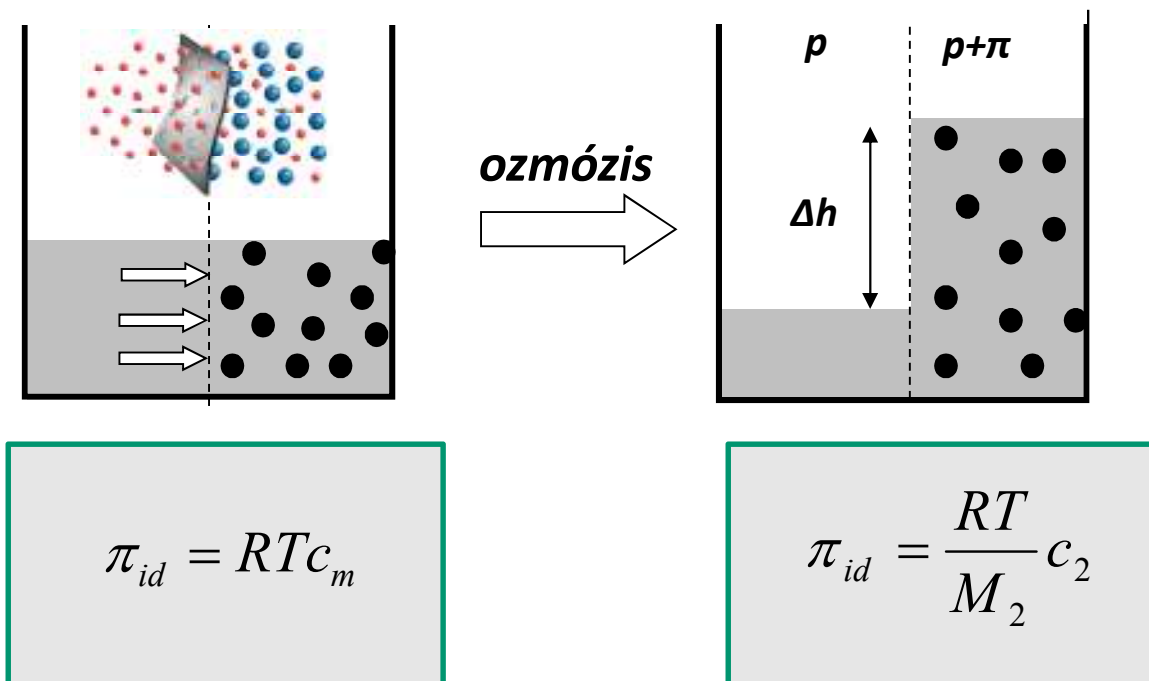
$$\mu_1^L = G_m^S$$

↓

$$\mu_1 = \mu_{1,0}(p) + RT \ln x_1$$

Ozmózis: kiegyenlítődési folyamat

Az ozmózis jelenségéről akkor beszélünk, amikor két eltérő összetételű oldatot olyan féligáteresztő hártyával (**szemipermeabilis membránnal**) választunk el, amely az oldószer-molekulák számára átjárható, de az oldott anyag molekuláit nem engedi át.



Van't Hoff-törvény

Ekvivalens ozmotikus nyomás (ozmotikus koncentráció):

oldatrendszerrel egyensúlyban levő nemelektrolit oldat koncentrációja.

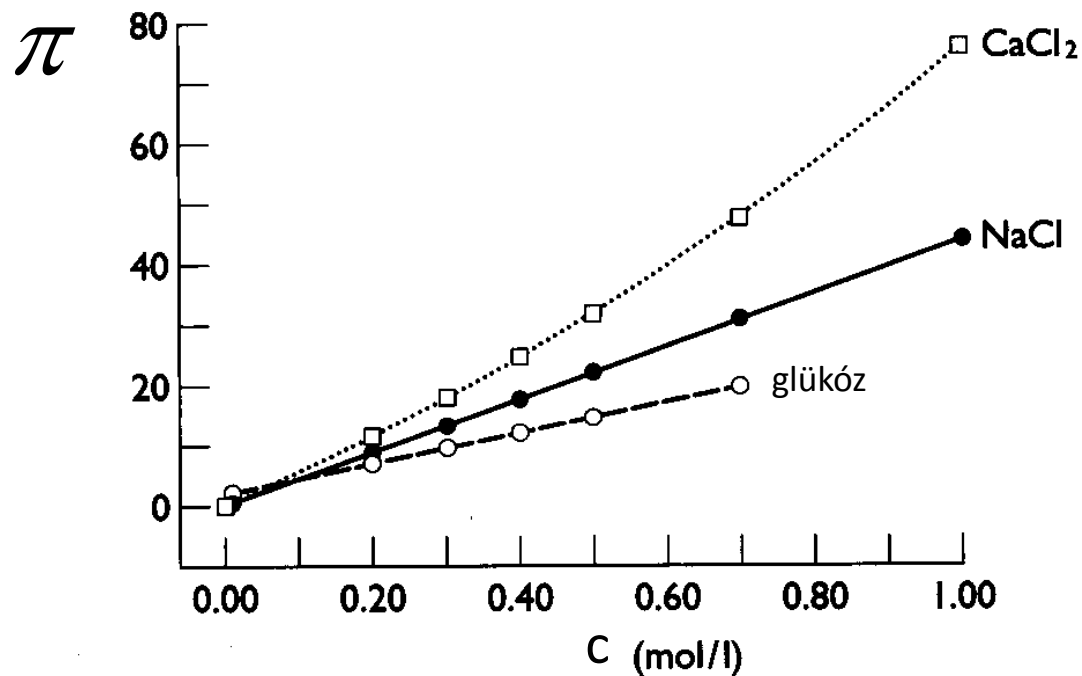
Mértékegység: mmol/kg = mOsmol/kg = mOsm

Ozmózis=**kolligatív tulajdonság**

$$n = n_0 \alpha \nu + n_0 (1 - \alpha) = n_0 [1 + \alpha(\nu - 1)]$$

$$\pi = \frac{RT}{M_2} c_2 \cdot i$$

$$i = [1 + \alpha(\nu - 1)]$$



Izotóniás oldatok: ha két különböző oldat ozmózisnyomása egyező

Sejtek belsejével,
illetve a vérrel izotóniás
oldatok

3,8 m%-os Na-citrát oldat,
5,5 m%-os glükóz oldat,
0,87 m%-os NaCl oldat.

Ha a koncentráció kisebb, mint az izotóniás oldaté, akkor:

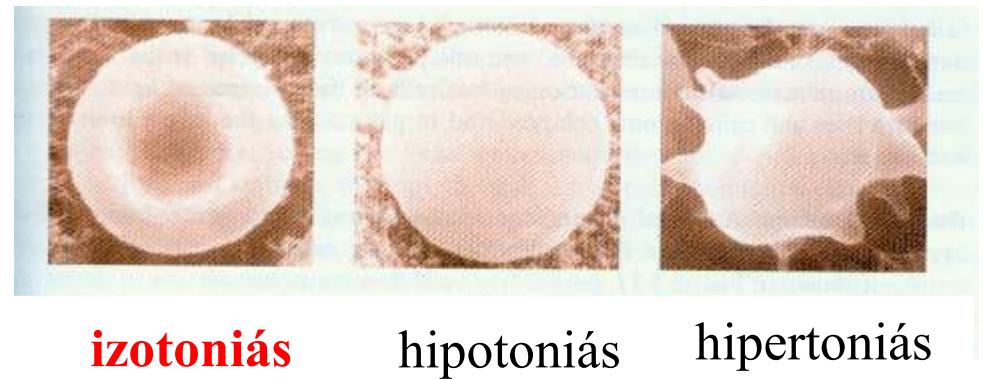
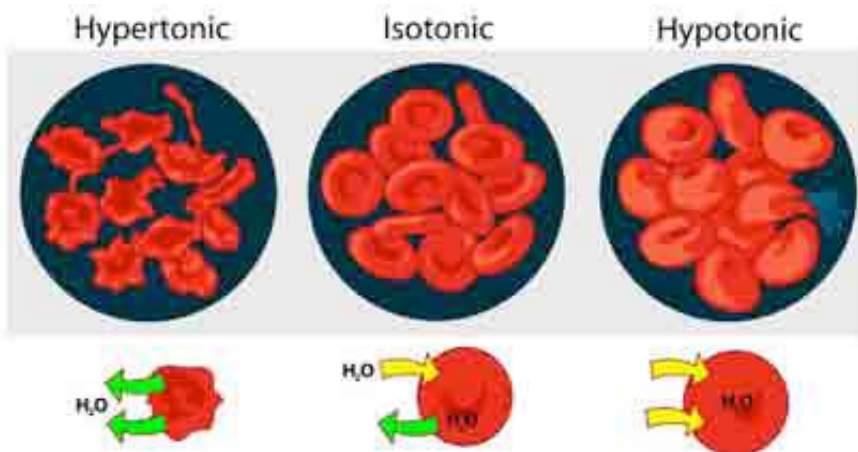
víz → sejt

hipotóniás oldat

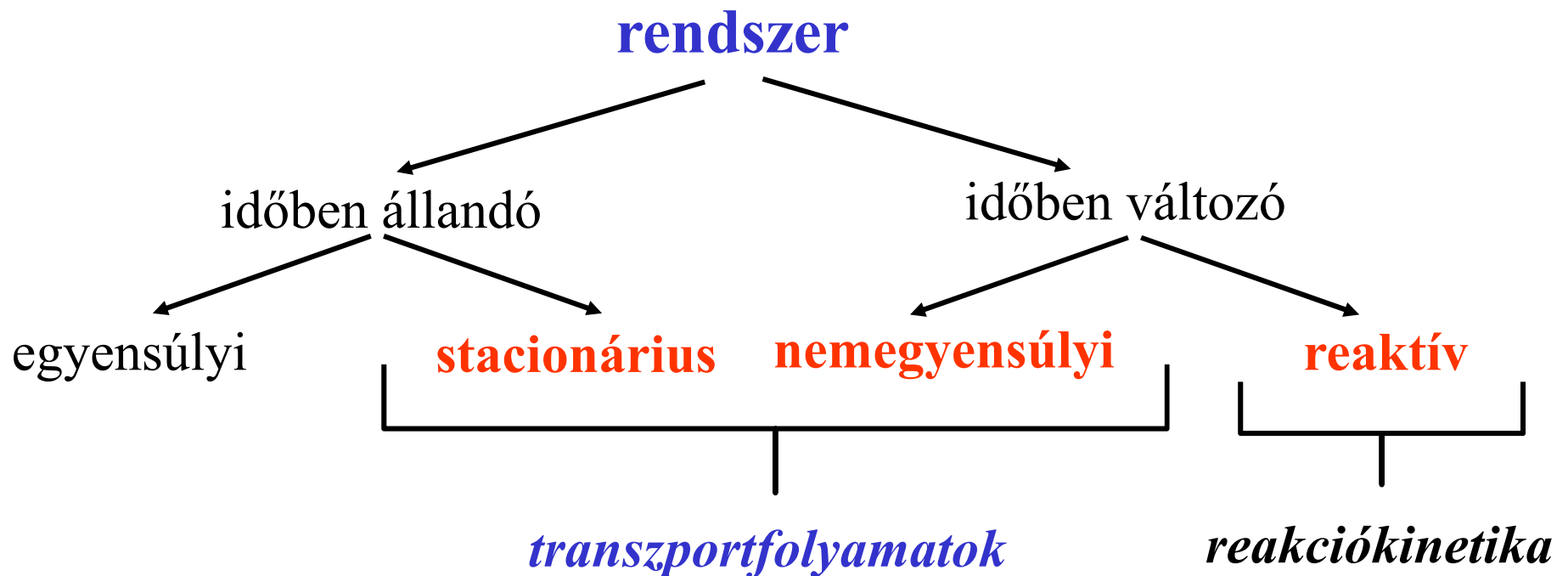
Ha a koncentráció nagyobb, mint az izotóniás oldaté, akkor:

környezet ← sejtvíz

hipertóniás oldat



RENDSZER TIPUSOK



Folyamatok hajtóereje: **az egyensúlyra való törekvés**

*önként lejátszódó
folyamat során*

$$\Delta S > 0$$

$$\Delta F < 0$$

$$\Delta G < 0$$

$$F = U - TS$$

$$G = H - TS$$

KÉMIAI ÉS BIOKÉMIAI REAKCIÓK HAJTÓEREJE

$$\Delta_r G = G_{\text{termékek}} - G_{\text{reaktánsok}}$$

$$\Delta_r G = \Delta_r H - T \Delta_r S$$

reakcióhő

endoterm

exoterm

reakcióentrópia

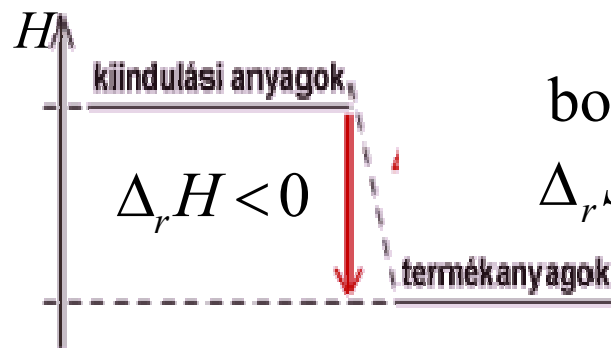
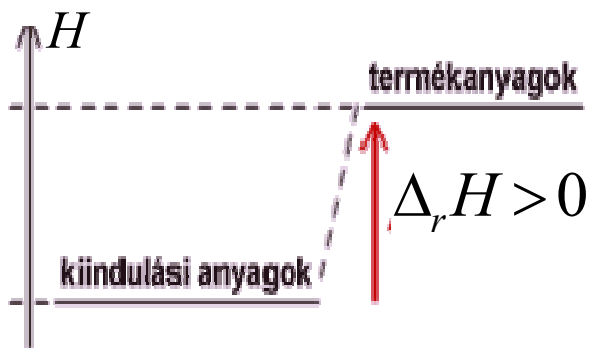
Molekuláris
rendezettség változása

bomlás

$$\Delta_r S > 0$$

gyűrűképzés

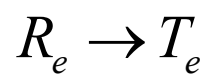
$$\Delta_r S < 0$$



Reaktív rendszerek termodinamikája I.

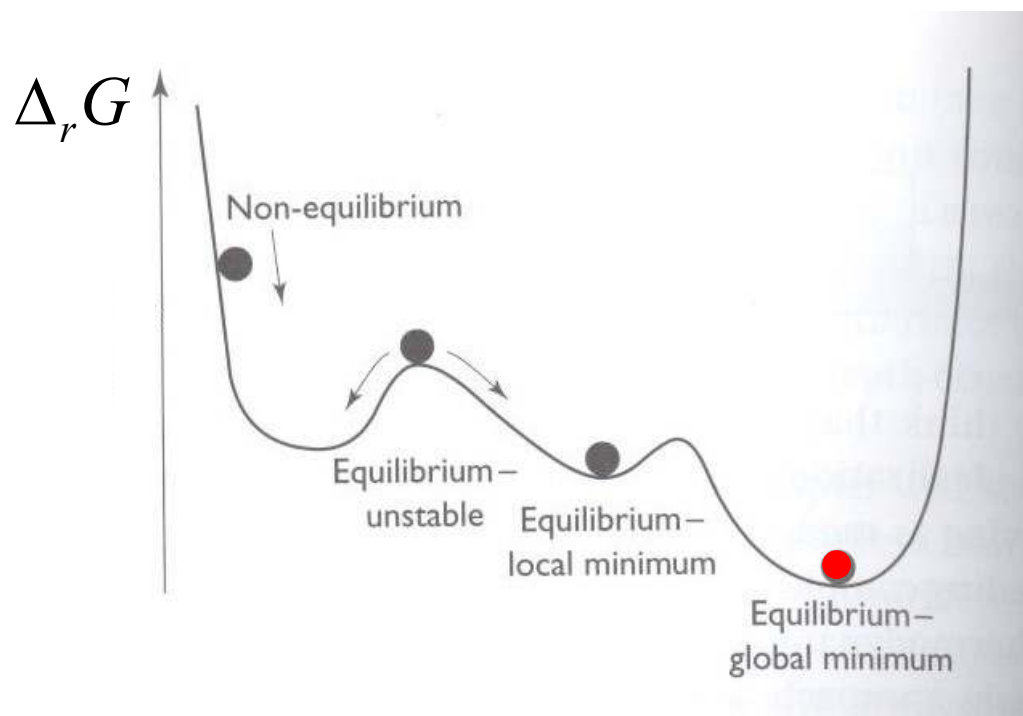
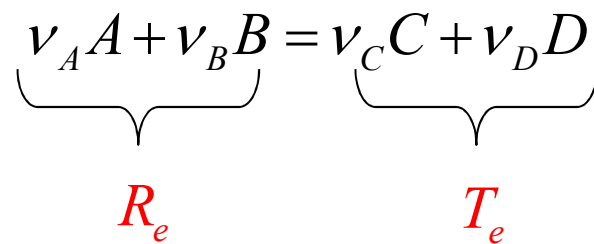
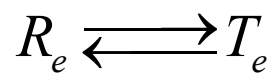
Kémiai átalakulás

$$\Delta_r G < 0$$



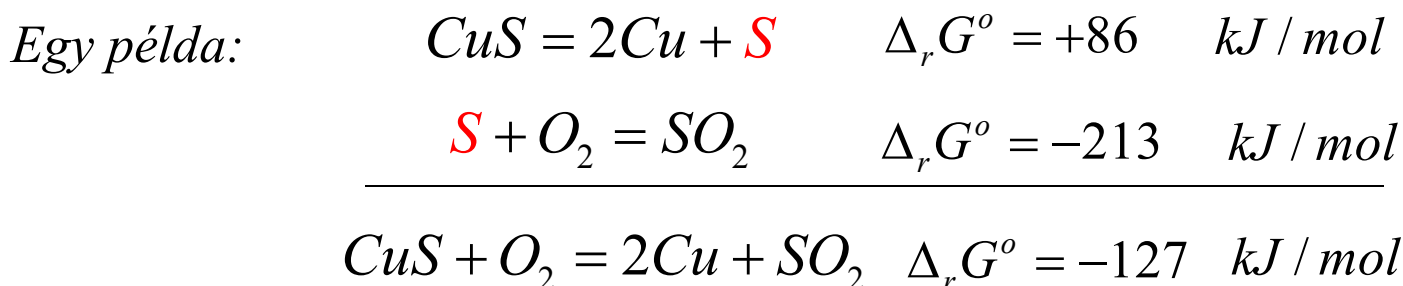
Kémiai egyensúly

$$\Delta_r G = 0$$

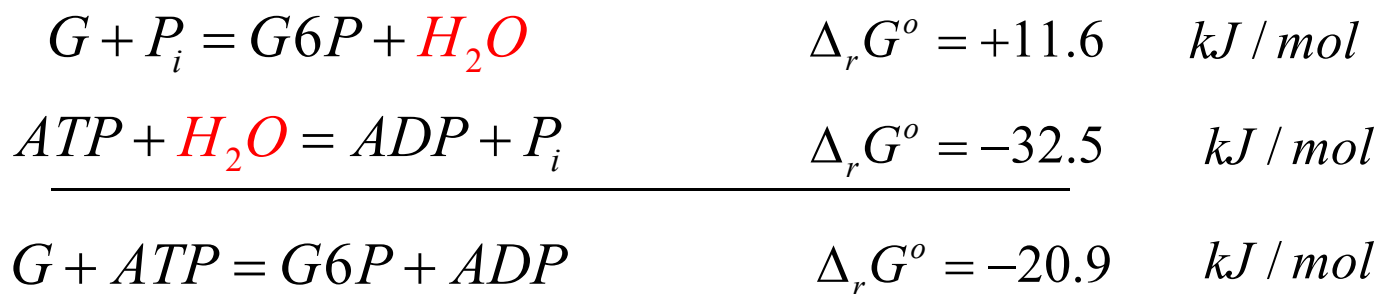


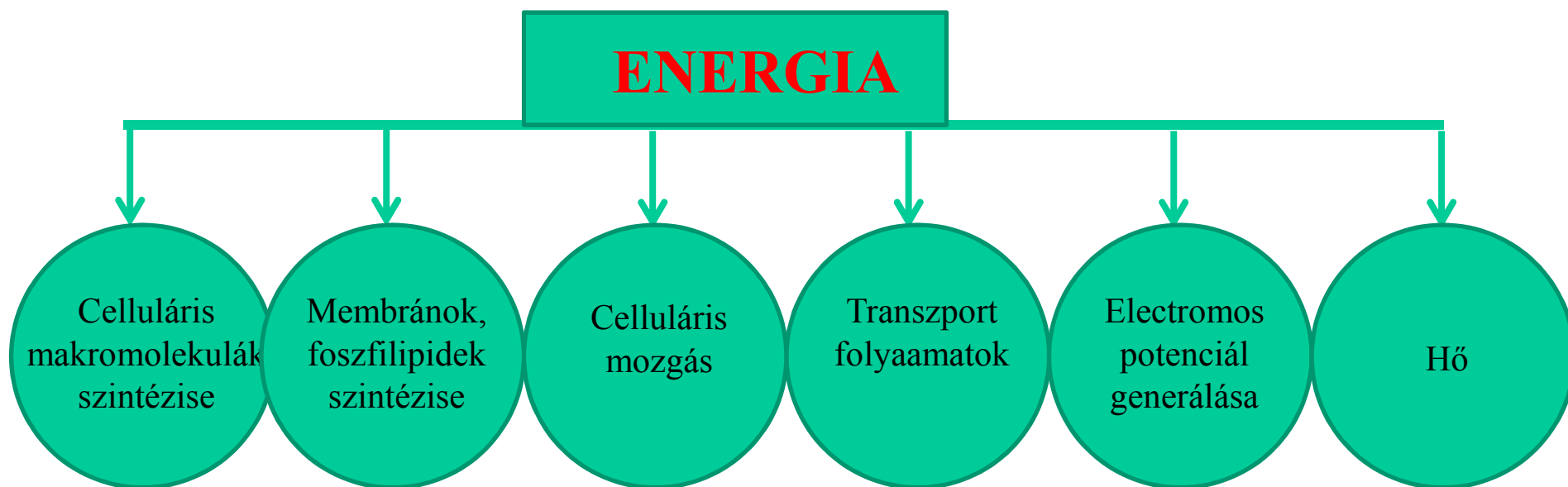
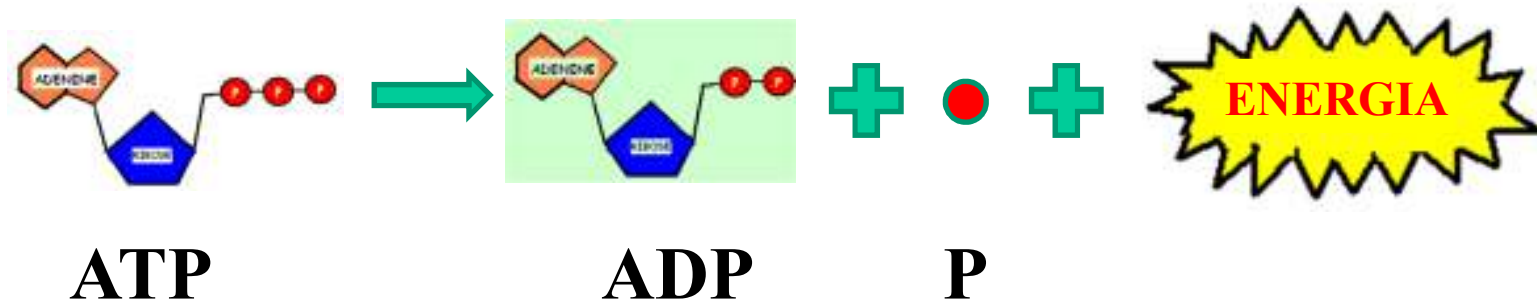
Kapcsolt reakcióegyensúlyok II.

Egy termodinamikai szempontból kedvezőtlen reakció összekapcsolása egy kedvező kémiai reakcióval az átalakulás irányát megfordíthatja.

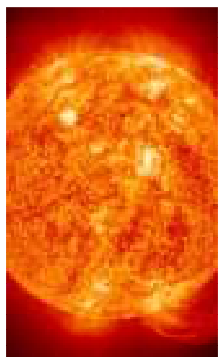


*Igen sok biokémiai reakció lefolyását az **adenozin-trifoszfát (ATP) hidrolízise**, mint az energiát szolgáltató „húzó” reakció teszi lehetővé.*





A biológiai belső energia



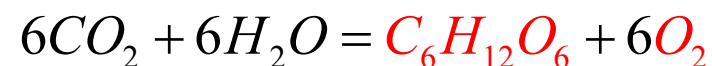
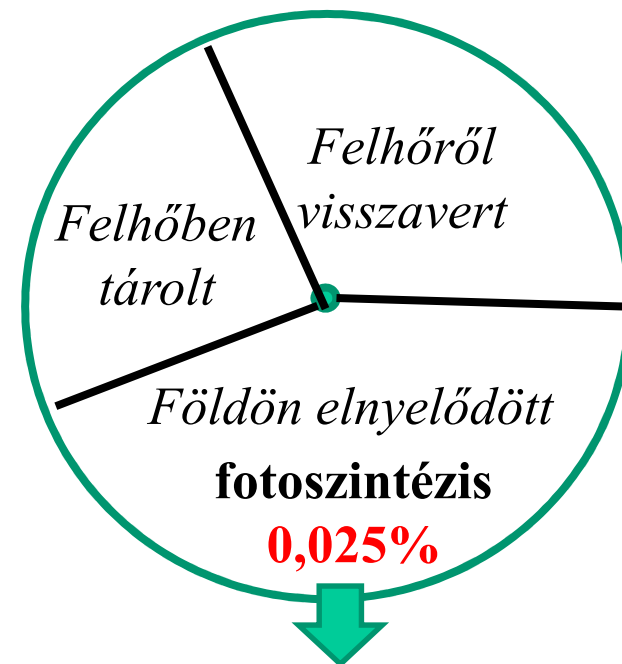
$5 \cdot 10^{18} \text{ MJ / év}$



$1,7 \cdot 10^{17} \text{ J / s}$



ÉLET



Biológiai makromolekulák



keményítő

glikogén

cellulóz





fény
 H_2O
 CO_2



szénhidrát
növényi
szövet



zsír
állati
szövet

Az élő szervezetben végbemenő anyagcsere folyamatok
összessége: **metabolizmus**

felépítő folyamatok
anabolizmus

ADP → ATP

lebontó folyamatok
katabolizmus

ATP → ADP+ energia

A környezetből felvett anyagok beépülése az élő szervezetbe: **anabolizmus**

fototróf

egyszerű szervetlen anyagokból
bonyolult szerves vegyületek
felépítésére képes szervezetek



kemotróf

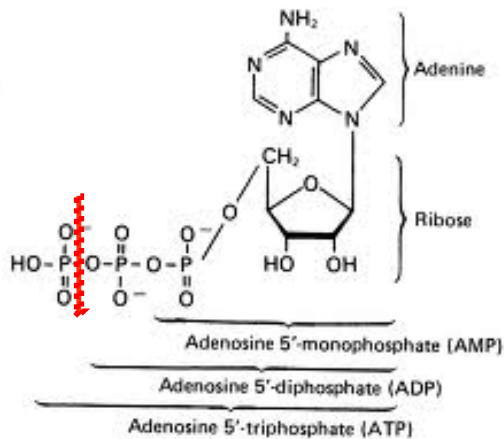


Az élő szervezetek biokémiai reakciók során történő tápanyag lebontása: **katabolizmus**.

poliszacharidok,
lipidek,
fehérjék
nukleinsavak



monoszacharidok,
zsírsavak,
nukleotidok,
aminosavak



Q

ADP

tejsav
ecetsav
ammónia
karbamid



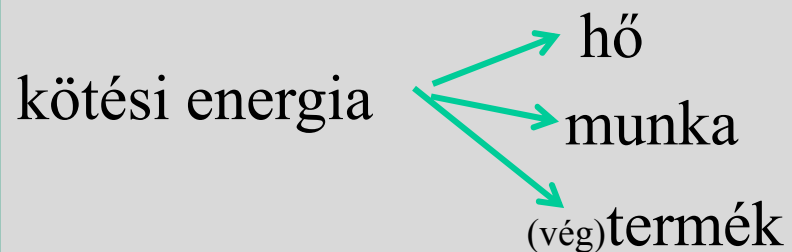
58 - 59 kJ/mol

Néhány „üzemanyag” energia sűrűsége

anyag	Energia sűrűség [J/Kg]
ATP	$1,0 \cdot 10^5$
H_2 gáz 10^3 atm. nyomáson	$1,2 \cdot 10^8$
glicin	$6,5 \cdot 10^6$
zsír	$3,9 \cdot 10^7$
szénhidrát	$1,7 \cdot 10^7$
glükóz	$1,6 \cdot 10^7$

$$\Delta U = \underset{+}{\Delta(ME)} + \underset{-}{\Delta Q} + \underset{+}{\Delta U}_{\text{tárolt}} + \underset{-}{\Delta W}_{\text{mech}}$$

$$\Delta(ME) = 0 \implies \Delta U < 0$$



A bio-termodinamika I. főtétele

tárolt energia
megváltozása

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W_{mech} + \Delta W_{kém}$$

metabolikus hő

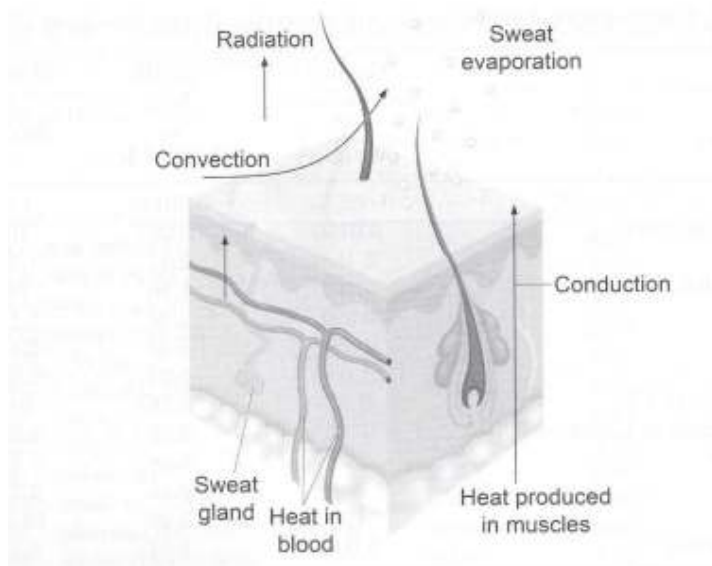
veszteség

bio-szintézis

mechanikai munka

külső

belső



$$\Delta W_{mech} < 0$$



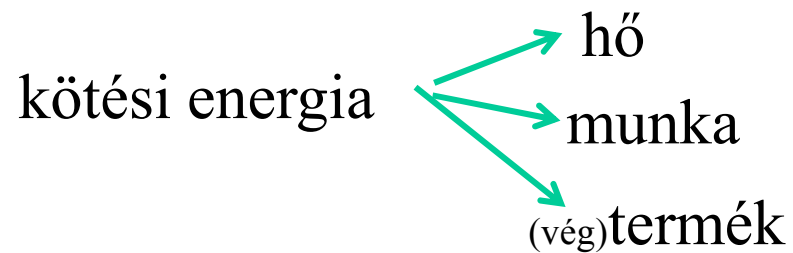
Biológiai termikus energia forgalom mérése

Direkt kalorimetria

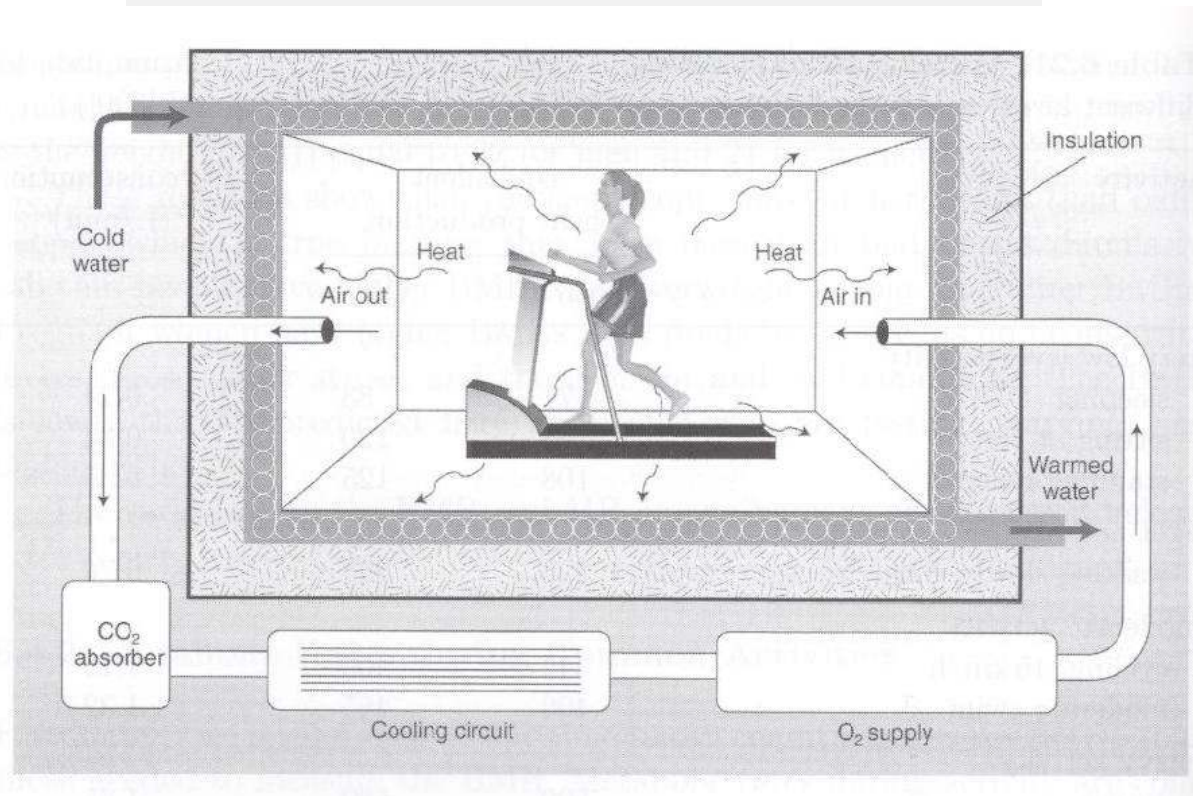
Indirekt kalorimetria

$$\Delta Q = Q_{\text{metabolizmus}} + Q_{\text{veszteség}}$$

Oxigén fogyasztás és/vagy
CO₂ termelés arányos a
hőtermeléssel

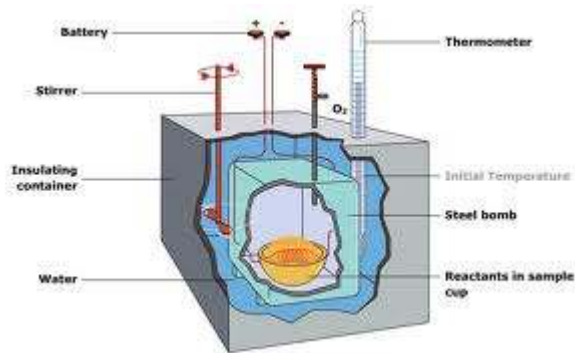


Direkt kalorimetria

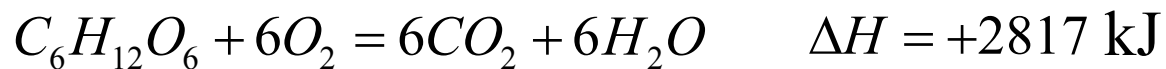
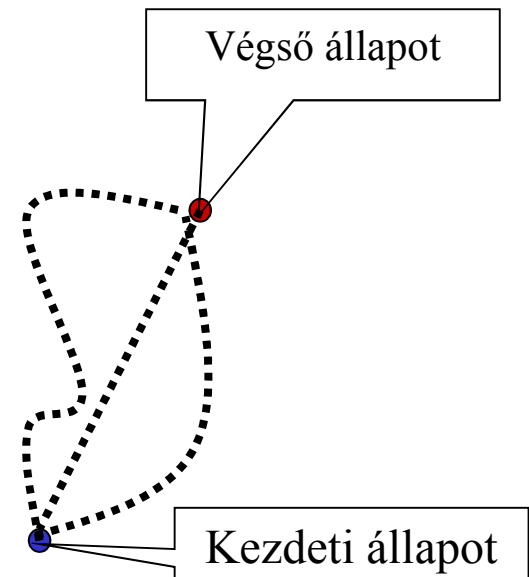


Kalorimetria $>$ metabolikus
($V=\text{konst.}$) ($p=\text{konst.}$)

Indirekt kalorimetria



Hess tétele:



$$\eta = 61-65 \%$$

Direkt és indirekt kalorimetria

1 mól glükóz oxidációjához 6 mól=134,46 L oxigén kell!

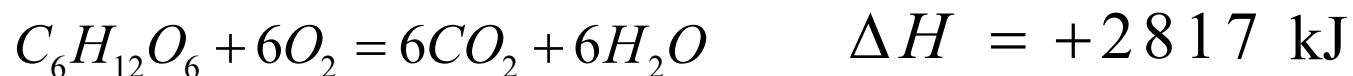
$$\Delta H = +2817 \text{ kJ}$$

Oxigén energia egyenérték

1 L oxigén fogyasztására 21 kJ energiát jelent

Indirekt kalorimetria

1 mól glükóz oxidációjához 6 mól=134,46 L oxigén kell!



Oxigén energia egyenérték

1 L oxigén fogyasztása 21 kJ energiát jelent

komponens	kalorimetrikus energia kJ/g	Oxigén egyenérték kJ/l	Széndioxid egyenérték kJ/l
szénhidrát	17,1	21,1	21,1
fehérje	23,6	18,7	23,3
etanol	29,7	20,3	30,3
zsír	39,6	19,8	27,9

Alap – energiaforgalom: **BMR**
Basal metabolic rate

$$BMR = \left. \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right|_{nyugalom}$$



$$BMR \propto m_b^{3/4}$$

Kleiber törvény

A BMR a korral csökken

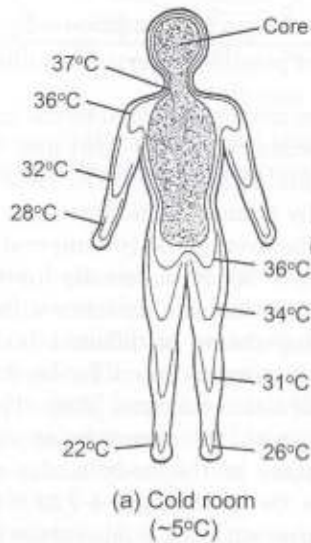
$m_b = 70$ kg 7029 kJ/nap 293 kJ/óra 81 W férfi
60 W nő

Energiaforgalom:(MR) és oxigén fogyasztás

alvás	83 W	O_2 : 0,24 L/perc
séta	265 W	O_2 : 0,76 L/perc
kerékpározás	400 W	O_2 : 1,13 L/perc

A BELSŐ ENERGIA (*HŐ*) TRANSZPORTJA

Hol keletkezik a nyugalmi metabolikus hő?

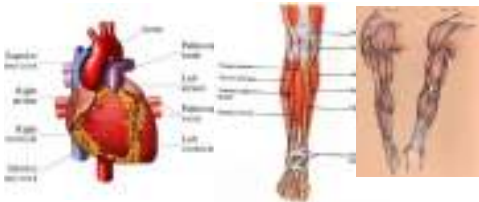


<i>agyvelő</i>	25%
<i>szív</i>	15%
<i>vázizom</i>	25%
<i>hasi zsigerek</i>	25%
<i>vese</i>	6%
<i>bőr</i>	4%

A szervezetben belül a hőmérséklet eloszlás nem homogén.

mag

köpeny



Hol veszik el a metabolikus hő?

$$Q_{\text{veszteség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

54-60 %

25 %

7 %

14 %

Átlagos ember átlagos termikus jellemzői:

Fajhő: 3,47 kJ/kgK

70 kg-os személy hőkapacitása: 243 kJ/C°

$$\Delta Q = C \cdot m_b \cdot \Delta T \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \cdot m_b \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot BMR$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{BMR}{C \cdot m_b}$$



$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = 1,2 \text{ C}^\circ/\text{óra}$$

Ha nem lenne veszteség és fizikai aktivitás!

$$Q_{\text{veszteség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

54-60 %

25 %

7 %

14 %

Fizikai aktivitás esetén



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = f \cdot B M R$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = f \cdot \frac{B M R}{C \cdot m_b} \approx 1,2 f C^o / h$$

$$0 < f < 20$$

Fizikai aktivitás

aktivitás	f
alvás	1
ülés	1,5
állás	1,7
gyaloglás	4,7

Fizikai aktivitás esetén



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = f \cdot B M R$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = f \cdot \frac{B M R}{C \cdot m_b} \approx 1,2 f C^o / h$$

$$0 < f < 20$$

Fizikai aktivitás

aktivitás	f
alvás	1
ülés	1,5
állás	1,7
gyaloglás	4,7