



Biofizika

(molekuláris biofizika és biológiai anyagtan)

2015, tavaszi szemeszter

Tárgy előadója: **Fidy Judit** és **Zrínyi Miklós**

Tárgy gyakorlatainak felelősei:
Dr. Varga Zsófia, tudományos munkatárs,
Bauer Rita, tudományos segédmunkatárs

PROGRAM

Febr. 11. Az élő rendszerek termodinamikája (bioenergetikája). (Zrínyi Miklós)

Febr.18. Biológiai rendszerek különleges komponense, a víz. (Zrínyi Miklós)

Febr. 25. A biológiai „anyag” szerkezetét meghatározó kölcsönhatások és funkcionális jelentőségük. (Fidy Judit)

Márc. 4. Elektromágneses sugárzások kölcsönhatása szövetekkel és szöveti komponensekkel I. Optikai tartomány (Fidy Judit)

Márc. 11. Elektromágneses sugárzások kölcsönhatása szövetekkel és szöveti komponensekkel II. Röntgen és gamma tartomány (Fidy Judit)

Márc. 18. Szövetek kölcsönhatása mágneses térrel. Mag mágneses rezonancia szövetekben, az orvosi alkalmazások alapjai (Fidy Judit)

Márc. 25. Ultrahang terjedése szövetekben, az orvosi alkalmazások szempontjai. (Fidy Judit)

PROGRAM

Április. 1. *Tavaszi szünet*

Április. 8. Makromolekulák szerkezete és konformációja (Zrínyi Miklós)

Április 15. Egyedi biomolekulák és sejtek mechanikai tulajdonságai és mérési módszereik. (Kellermayer Miklós)

Április 22. Transzport jelenségek az élő szervezetben I. (Zrínyi Miklós)

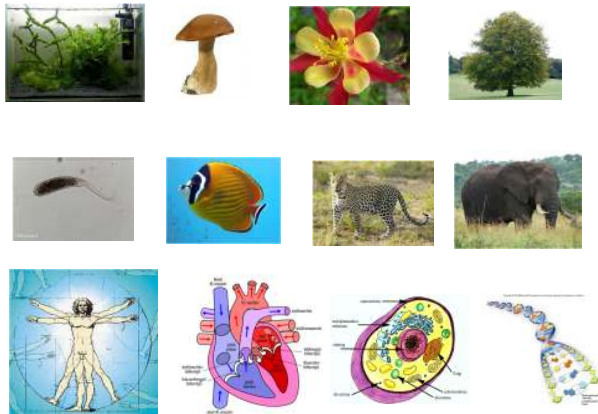
Április 29. Transzport jelenségek az élő szervezetben II. (Zrínyi Miklós)

Május 6. Fehérjék szerkezetének predikciója, szerkezeti adatok felhasználása adatbázisok segítségével, a számítógépes molekuladinamikamodellzés alapjai (Hegedüs Tamás)

Május 13. Biomolekulák elektromos tulajdonságai, bioelektronikai megközelítések, nanotechnológiai alkalmazások. (Dér András, MTA SzBK)

Követelmény: Az aláírás feltétele az előadásokon szerzett minimum 8 pont elérése, a gyakorlatok teljesítése és a jegyzőkönyvek elfogadása, valamint a szorgalmi időszakban íratott 1 zárthelyi dolgozaton legalább elégséges eredmény elérése. Amennyiben a zárthelyi dolgozaton a hallgató 80%-nál jobb eredményt ér el, mentesül a szóbeli vizsgán a gyakorlati tétel húzása alól. A vizsgaidőszakban szóbeli vizsgát tartunk az előadás és a gyakorlatok anyagából. Az előadások anyagából a szóbeli vizsga két vizsgarészből áll, mindkét tételsorból 2-2 rövid tétel húzásával. A gyakorlati anyagból egy tételt húzatunk. A végső jegy megállapítása a rész vizsgajegyek alapján a vizsgáztatók egyeztetésével történik. Amennyiben bármelyik részvizsga eredménye nem éri el az elégséges szintet, a vizsga elégtelen eredménnyel zárul.

A **biofizika** életfolyamatok és biológiai rendszerek tulajdonságainak leírása a fizika és fizikai-kémia törvényei alapján. Értelmezési tartománya kiterjed minden élőlényre, a makroszkopikus testektől az egysejtűekig. Egyedi biomolekulák jellemzése is a biofizika tárgykörébe tartozik..



biológiai
rendszerek

ÉLŐ ANYAG, BIOANYAG ÉS BIOMIMETIKUS ANYAG

Élő anyag (rendszer), amely vegetatív (*önfenntartó*) és szaporító (*önreprodukáló*) (élet)jelenségeket mutat.

Bioanyagoknak (biomaterials) az élővilágot alkotó-, az élő szervezetek által előállított-, vagy befogadott (szintetikus) anyagokat nevezzük.

Biomimetikus anyagoknak azokat a szintetikus anyagokat nevezzük, amelyeknek összetételét, struktúráját vagy funkcióját a természetből vett példa szolgáltatja.

anyagtudomány  biológiai anyag-tudomány

Az **anyagtudomány** az anyagok szerkezetével, tulajdonságaival, a **szerkezet és a tulajdonságok** közötti összefüggésekkel, a tulajdonságok megváltoztatásának, valamint új tulajdonságú anyagok előállításának elvi alapjaival foglalkozó tudomány.

A **biológiai anyagtudomány** az anyagok szerkezetével, tulajdonságaival, a **szerkezet és a funkció** közötti összefüggésekkel, a tulajdonságok megváltoztatásának, valamint új tulajdonságú **biokompatibilis** és **biodegradábilis** anyagok előállításának elvi alapjaival foglalkozó tudomány.

Technikai anyag Élő anyag

monolit
állandóság
korrózió, károsodás
passzív
mérnöki struktúrák
elektronok
változatos energiaforrások
termikusan ellenálló

**KÉMIAI SZERKEZET
TULAJDONSÁG
FELHASZNÁLÁS**

hierarchikus
folytonos megújulás
öngyógyulás
alkalmazkodó képesség
önszerveződő struktúrák
ionok
ATP
hőmérséklet érzékeny

**KÉMIAI SZERKEZET
TULAJDONSÁG
FUNKCIÓ**

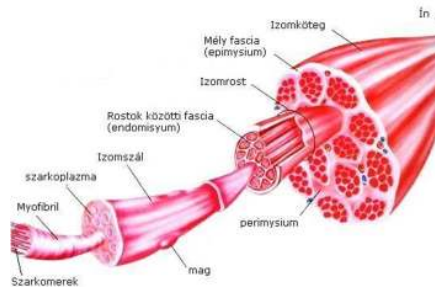
Technikai anyag

monolit



Élő anyag

hierarchikus



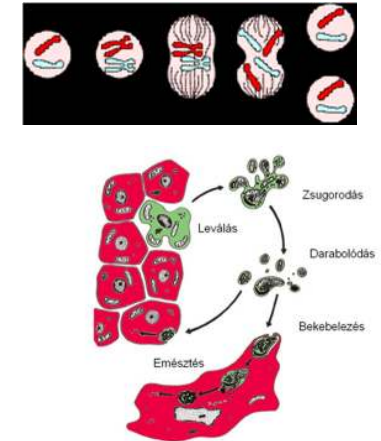
Technikai anyag

állandóság



Élő anyag

folytonos megújulás



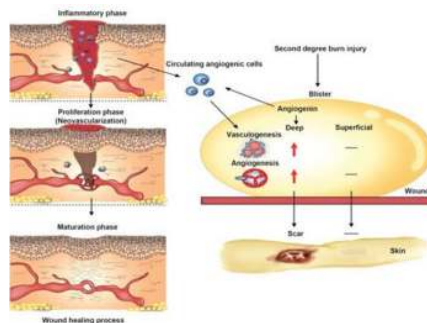
Technikai anyag

korrózió, károsodás



Élő anyag

öngyógyulás



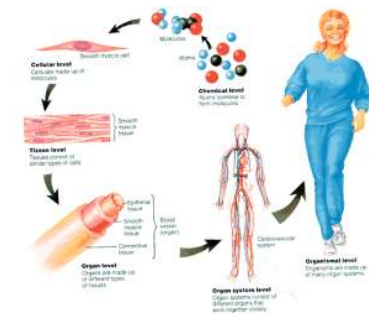
Technikai anyag

passzív



Élő anyag

alkalmazkodó képesség



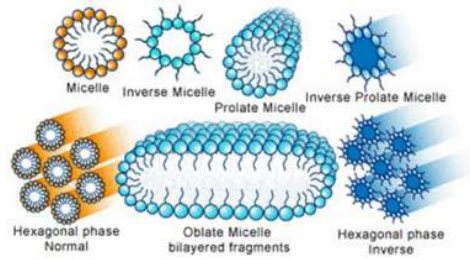
Technikai anyag

mérnöki struktúrák



Élő anyag

önszerveződő struktúrák



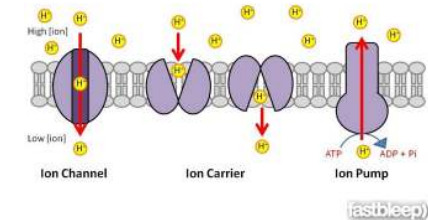
Technikai anyag

elektronok



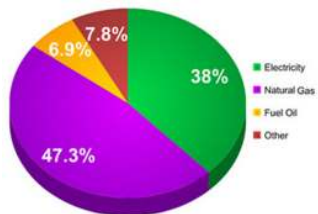
Élő anyag

ionok



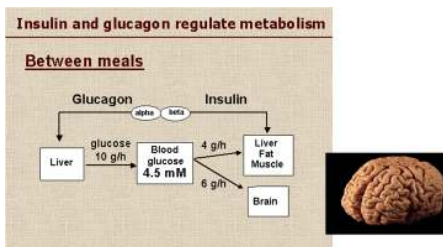
Technikai anyag

változatos energiaforrások



Élő anyag

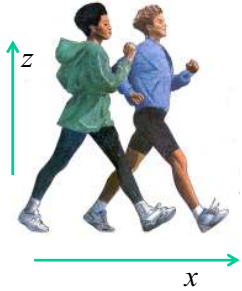
ATP



Biofizikai termodinamika
(Bio-termodinamika, vagy bioenergetika)

Az energia hasznosításának tudománya.

A mozgás mechanikai energiája



$$E_{mech} = E_{kin} + E_{pot}$$

$$E_{kin} = E_h + E_v = \frac{1}{2} m_b \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} m_b \left(\frac{dz}{dt} \right)^2$$

$$E_{pot}(t) = m_b \cdot g \cdot z_m(t)$$

$$E_{kin} + E_{pot} \approx \text{állandó}$$

Teljes energiamérleg több tagból áll!

$$E_{tot} = E_{kin} + E_{pot} + E_{met} + E_{therm} + \dots + E_{???}$$

$$dE_{tot} = ?$$

Az energia hasznosítására vonatkozó legáltalánosabb elmélet



termodinamika



Az energiamegmaradás tétele



Leibniz (1676-1689) megfigyelte, hogy sok mechanikai rendszerben a mozgási energia (*élőerő*) megmarad.



Newton és **Descartes** megfogalmazzák az impulzusmegmaradás törvényét.



Rumford 1798-ban megfigyelte, hogy az ágyúcsövek fűrése hőkéltéssel jár: a mechanikai munka hővé alakítható!

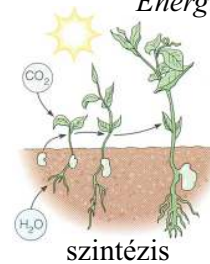
Mayer felismerte, hogy a hő is, meg a mechanikai munka is, az energia egy formája.

Joule 1843-ban kísérletekkel meghatározta a hő mechanikai egyenértékét.

Helmholtz 1847-ben megfogalmazza az energiamegmaradás tételét

Az energia biológiai hasznosítása

Energia : munkavégző képesség ?



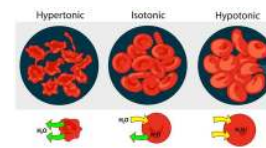
szintézis



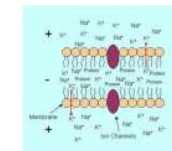
fizikai munka



izom munka



ozmotikus munka



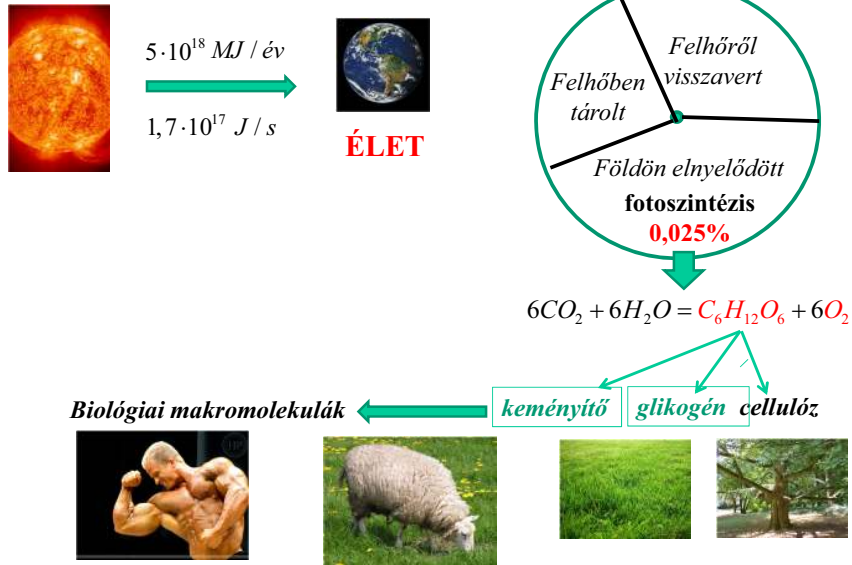
elektrokémiai
munka



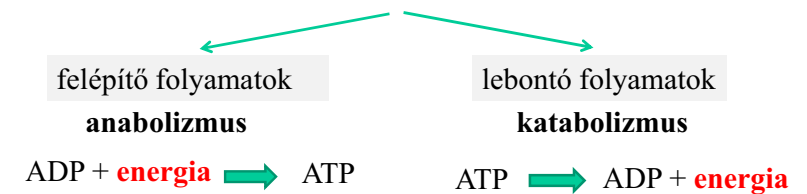
fotokémiai
munka

Honnan van a hasznosítható energia ?

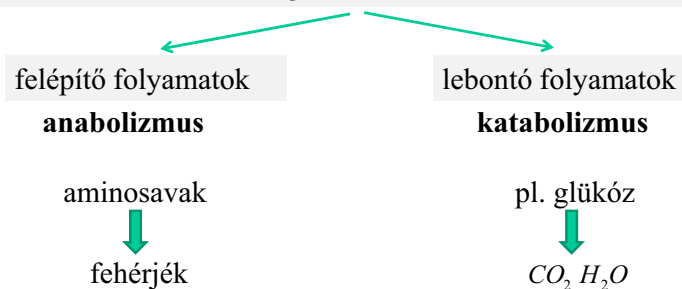
A nap a földi élet energiaforrása



Az élő szervezet sejtjeiben végbemenő folyamatok összessége:
metabolizmus



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



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



58 - 59 kJ/mol

A környezetből felvett anyagok beépülése az élő szervezetbe:
anabolizmus

fototróf

Energia felhasználásával egyszerűbb szerves anyagokból bonyolult szerves vegyületek szintézise (fehérjék, glikogén, zsírok)



kemotróf

A fototróf szervezetek által előállított vegyületek (belső)energiáját hasznosítják (glikolízis)



tápanyag szénhidrátja

emésztés

hidrolízis

monoszacharidok

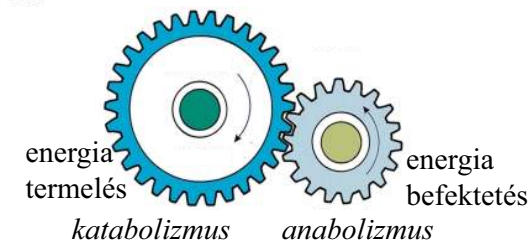
katabolizmus

anabolizmus

energia
széndioxid
víz

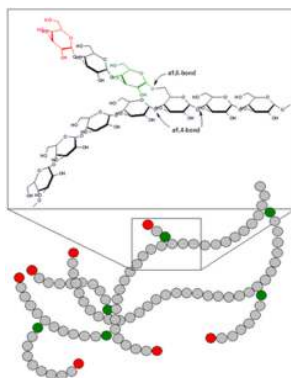
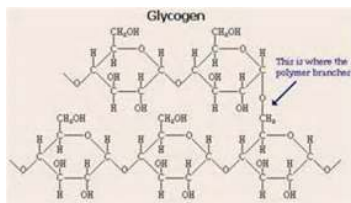
glikogén
zsír

aminosavak



Glikogén

Növényekben nem található, csak húsban
A glikogén a glükózt tároló molekula!



A glükóz az agy energiaforrása, valamint az izmok energiaforrásának a fele!

Hogyan jut el az energiaforrás a szükséges helyekre?



glükóz homeosztázis

65 kg-os személy 12% zsírtartalommal

„energiát tároló anyag”	[g]
máj glikogén	110
izom glikogén	500
glükóz	15
bőr alatti és zsigeri zsír	7800
intramuscular zsír	161

Egy példa az önszabályozásra.

Étkezés után a vér glükóz koncentrációja emelkedik

A megnövekedett glükóz koncentráció hatására a hasnyálmirigy inzulint termel.

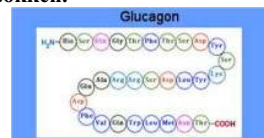
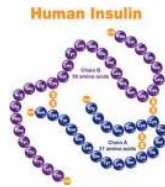
Inzulin hatására a glükóz a májban és az izmokban glikogén formában tárolódik. Az inzulin elősegíti a többlet glükóz zsírrá történő átalakítását.

Ahogy a sejtek elhasználják a glükózt, a vér glükóz szintje lecsökken.

A lecsökkent glükóz koncentráció hatására a hasnyálmirigy glucagont juttat a véráramba.

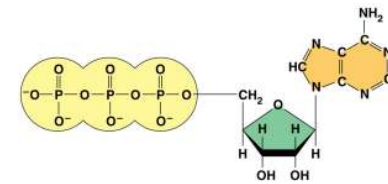
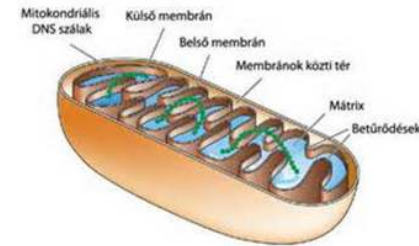
Glucagon hatására a májban tárolt glikogénből glükóz keletkezik és jut a vérbe.

A vér glükóz koncentrációja újra emelkedik.



Mitokondrium: a biológiai erőmű

az ATP gyár

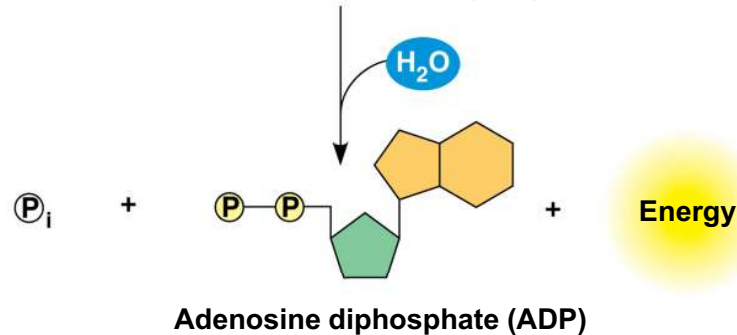
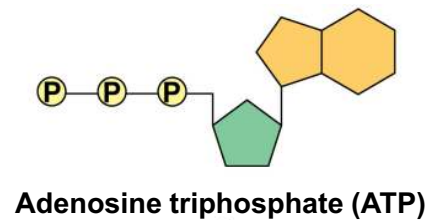


Több lépéses
anaerob
oxidáció

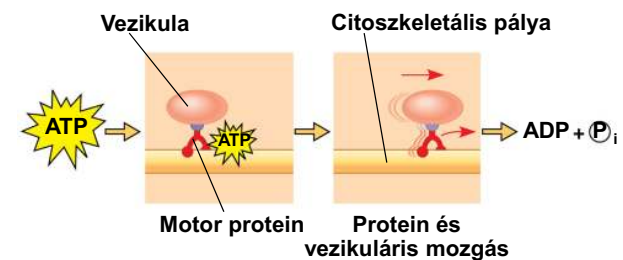
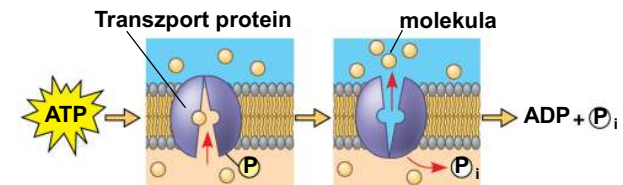
glükóz

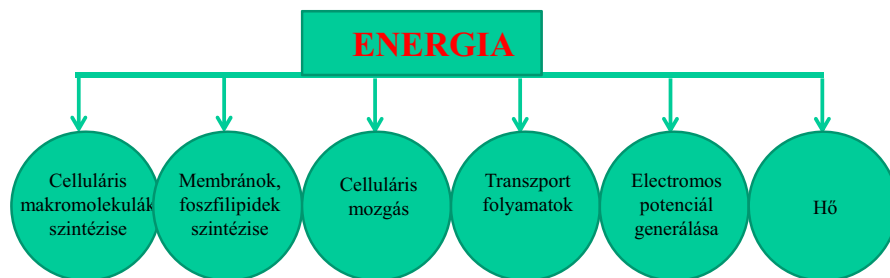
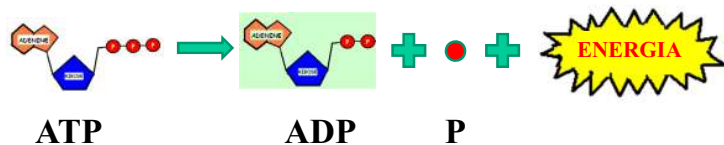
ATP

5 – 10 % energia veszteség
(feces és urin)



Két példa az ATP hasznosítására.





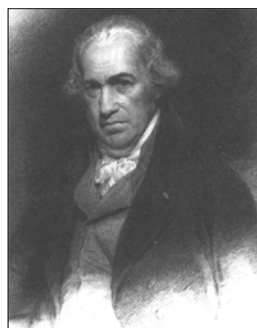
Az energia hasznosítására vonatkozó legáltalánosabb elmélet



termodinamika



$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$



A **termodinamika** a fizikának a **hő**-jelenségekkel foglalkozó ágából mára az **energetikai kölcsönhatások folytán fellépő egyensúlyok és folyamatok** tudományává vált.

Fő feladata:

- a **változások** és átalakulások irányának és az egyensúlyi végállapot felé való törekvésének értelmezése, valamint
- az **egyensúlyt** és a hozzá vezető folyamatot befolyásoló tényezők felderítése.

James Watt (1736-1819) skót feltaláló

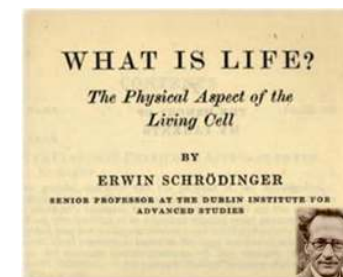


(A.L. Lavoisier 1743-1794)



Rubner 1894-ben elsőként állította, hogy a termodinamika törvényei alkalmazhatók élő rendszerekre.

“...respiration is nothing but a slow combustion of carbon and hydrogen...”



Fenomenologikus- és statisztikus termodinamika

Fő feladata: a kölcsönhatások folytán fellépő változások és átalakulások

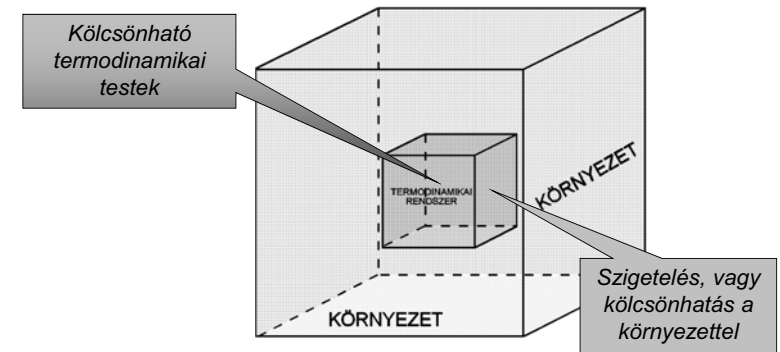
**irányának,
mozgató erőinek, és
befolyásoló tényezőinek**

felderítése.

Törvényei általánosíthatók

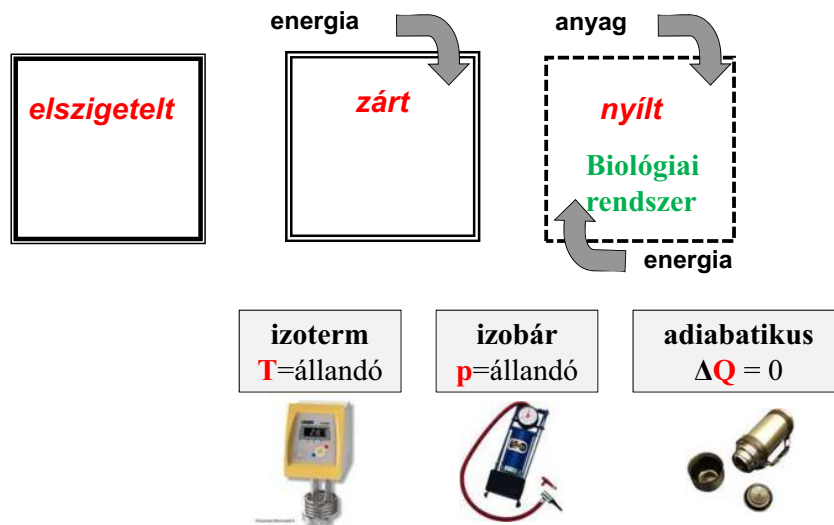
biológiai-, társadalmi-, gazdasági-, pénzügyi- és egyéb... rendszerekre.

TERMODINAMIKAI RENDSZER

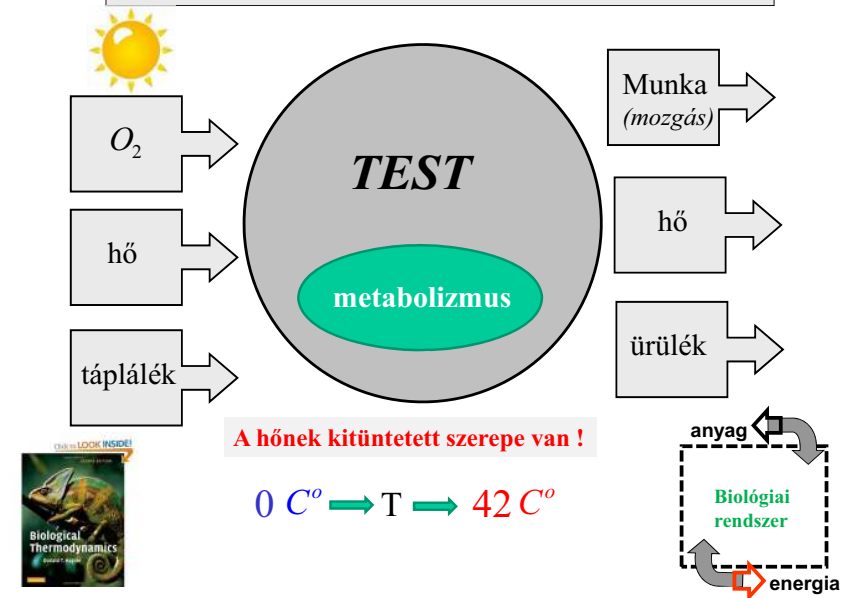


A hőnek nincs kitüntetett szerepe !

Termodinamikai rendszerek típusai környezeti kapcsolatuk alapján



BIOLÓGIAI TERMODINAMIKAI RENDSZER





Az energiamegmaradás tétele



Leibniz (1676-1689) megfigyelte, hogy sok mechanikai rendszerben a mozgási energia (*élőerő*) megmarad.



Newton és **Descartes** megfogalmazzák az impulzusmegmaradás törvényét.



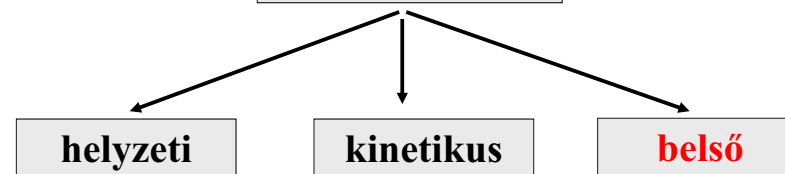
Rumford 1798-ban megfigyelte, hogy az ágyúcsövek fűrése hőkeléssel jár: a mechanikai munka hővé alakítható!

Mayer felismerte, hogy a hő is, meg a mechanikai munka is, az energia egy formája.

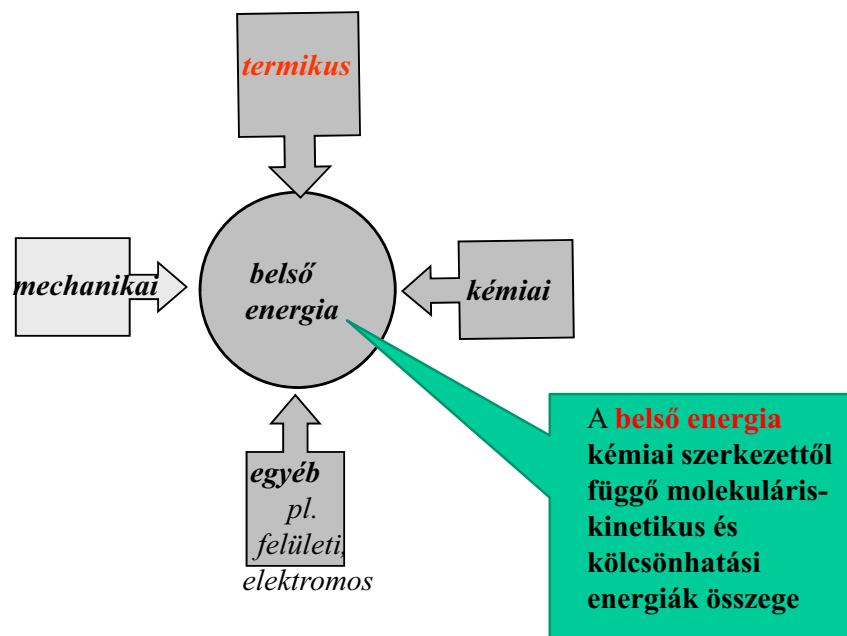
Joule 1843-ban kísérletekkel meghatározta a hő mechanikai egyenértékét.

Helmholtz 1847-ben megfogalmazza az energiamegmaradás tételét

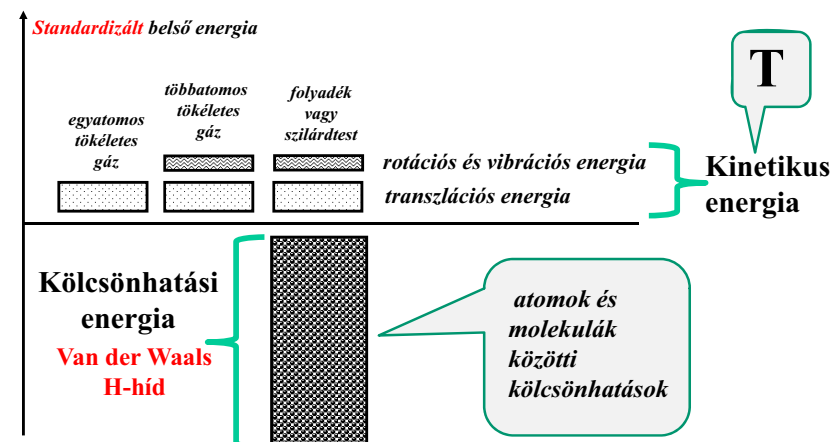
ENERGIA



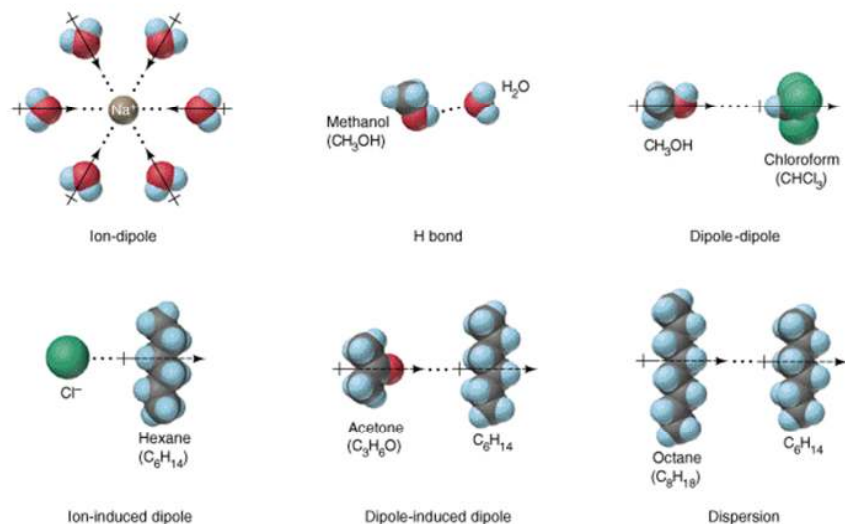
$$E = E_{pot} + E_{kin} + U$$



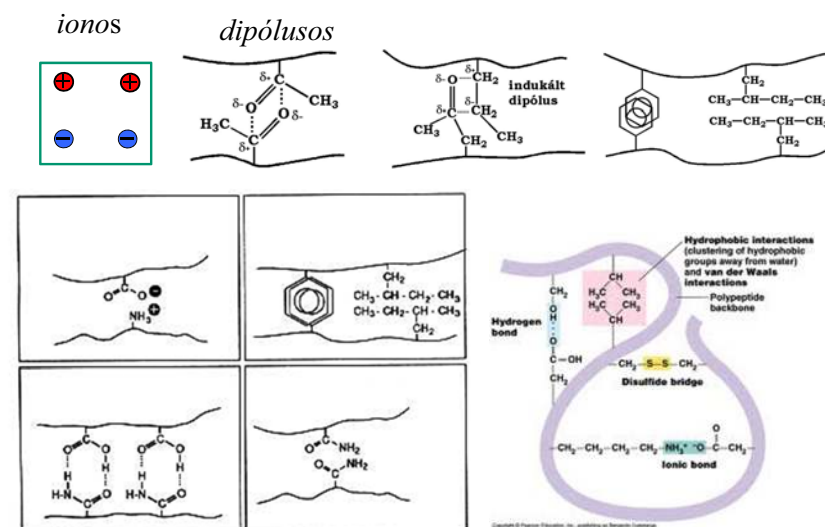
A belső energia járuléka (molekuláris kinetikus energiák) azonos hőmérsékleten összehasonlítva



Alapvető molekuláris kölcsönhatások



Alapvető molekuláris kölcsönhatások



Kölcsönhatás

RT egységben mért kölcsönhatási energia

Kölcsönhatás	RT egységben mért kölcsönhatási energia
kémiai reakció	40 - 200
ion-ion	80 - 100
ion - dipólus	10 - 20
H-híd	10 - 15
dipólus - dipólus	0,5 - 2
indukált dipólus - dipólus	0,3 - 2
indukált dipólus - indukált dipólus	0,2 - 2

A tökéletes gáz RT egységben mért moláris energiája: $3/2$

$$U_m = \frac{3}{2} RT$$

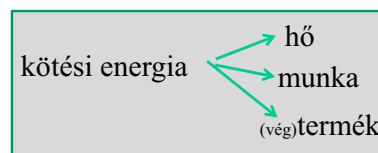
Néhány „üzemanyag” energia sűrűsége

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	$1,6 \cdot 10^7$

$$\Delta U = \Delta(ME) + \Delta Q + \Delta U_{\text{tárolt}} + \Delta W_{\text{mech}}$$

+ - + -

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

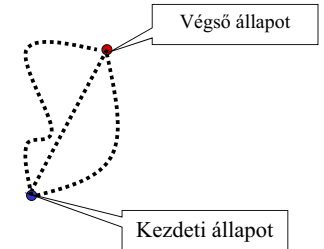


VISSZA A TERMODINAMIKÁHOZ

A belső energia **extenzív** mennyiség.

A belső energia **állapotfüggvény**.

A belső energia **értékét nem ismerjük**.

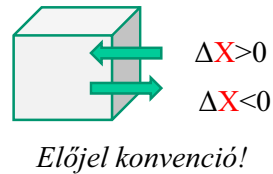
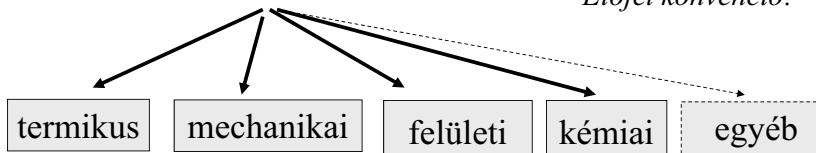


A belső energia megváltozik,

- amikor változik a hőmérséklet,
- amikor változik a molekuláris vagy halmaz szerkezet,
- amikor változnak az intermolekuláris kölcsönhatások,
- amikor valamelyik elektronpálya gerjesztett állapotba kerül.

Belső energia megváltozása

Elemi energiaközlési típusok



A belső energia változása annyi tagból tevődik össze, ahányféle kölcsönhatásban vesz részt a vizsgált test vagy rendszer.

$$\Delta U = \Delta Q + \sum_i \Delta W_i$$

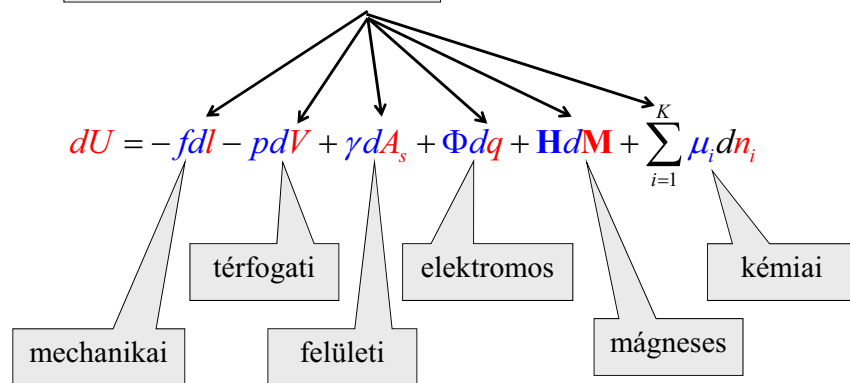
*Minden egyes kölcsönhatáshoz tartozik egy-egy jellemző **intenzív** és **extenzív** mennyiség, melynek szorzata megadja a kölcsönhatáshoz tartozó elemi energiacserét.*

$$dW_i = y_i \cdot dx_i$$

elemi energiacsere

$$dU = \sum_i dW_i = \sum_i y_i \cdot dx_i$$

y : intenzív mennyiség
 x : extenzív mennyiség



És hol van a hőhatás ??? $y = T$ $x = ?$

$$dU = -pdV + \gamma dA_s + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i + ? d?$$



Van a belső energiának egy olyan része, amely a többi extenzív mennyiségtől függetlenül is változhat. Ezt az "önmagában történő belső energiaváltozást" célszerű az elemi energia-cserékhez hasonlóan egy intenzív és egy extenzív mennyiség szorzataként felírni.

- termikus kölcsönhatás $dU_Q = dQ = TdS$

$$dU = -pdV + TdS + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i + \dots +$$

$$\mu_i = \mu_{o,i} + RT \ln c_i$$

kémiai potenciál

↑
entrópia

A termodinamika I. főtétele

$$dU = TdS - pdV + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i + \dots +$$

↑
Az **energiamegmaradás** törvényének legáltalánosabb megfogalmazása.

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

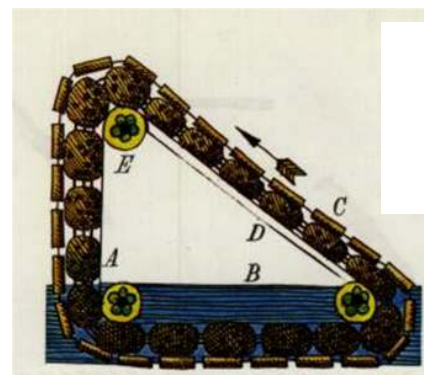
$$\Delta W_{\text{mech}} = \Delta U - \Delta Q - \sum_i \Delta W_i$$

Egy termodinamikai rendszer akkor képes munkavégzésre ($\Delta W_{\text{mech}} < 0$), ha a belső energiáját csökkenti ($\Delta U < 0$), vagy ha környezetéből hőt von el ($\Delta Q > 0$), vagy más formában energiát ($\Delta W_i > 0$) vesz fel.

Az olyan gépeket, amelyek mechanikai munkát végeznének anélkül, hogy külső forrásból energiát fogyasztanának, **első fajú perpetuum mobile-nek**, vagy más néven **örökmozgónak** nevezzük. A termodinamika első főtételéből következik, hogy első fajú perpetuum mobile nem működhet.

A termodinamika első főtétele, maga az energia-megmaradás elve!

Egy szellemes perpetuum mobile, amelynek működését kizárja a termodinamika első főtétele.



A bio-termodinamika I. főtétele

tárolt energia
megváltozása

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

metabolikus hő

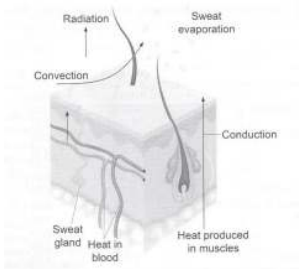
vesztesség

bio-szintézis

mechanikai munka

külső

belső



Termikus kölcsönhatások jellemzői: a
hőmérséklet és az entrópia

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

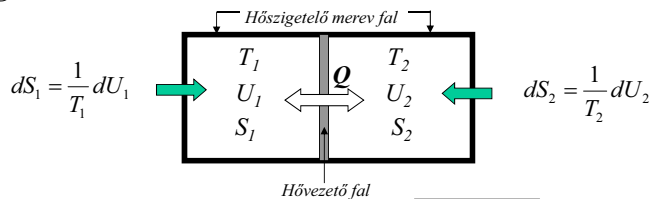
- A **hőmérséklet** fogalom a hideg-, ill. melegérzetből fejlődött ki.
- Alapvető felismerés: **a hő és a hőmérséklet nem azonos.** (Joseph Black skót kémikus)
- Az első hőmérséklet-mérő készüléket **Galileo Galilei** alkotta meg.
- **Jean Rey** francia orvos megalkotta az első lázmérőt 1631-ben
- A mai hőmérsékletskálát **Anders Celsius**nak köszönhetjük (1742). A víz forráspontját 0 foknak vette, az olvadáspontját pedig 100 foknak.
- A 100 fokos hőmérsékleti skálát **Carl von Linne** fordította meg, úgy ahogy napjainkban is használjuk.



Az entrópia **nem megmaradó** extenzív mennyiség!

Elszigetelt rendszer

Az energia megmaradó mennyiség



$$U = U_1 + U_2 = \text{állandó} \quad dU = 0 \quad dU_1 = -dU_2$$

$$S = S_1 + S_2 = ? \quad dS = dS_1 + dS_2 = ? \quad dS = \frac{1}{T_1} dU_1 + \frac{1}{T_2} dU_2 = \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \cdot dU_1 \neq 0$$

$$\text{ha } T_2 > T_1 \text{ akkor } \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} > 0 \text{ és } dU_1 > 0 \Rightarrow dS > 0$$

$$\text{ha } T_2 < T_1 \text{ akkor } \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} < 0 \text{ és } dU_1 < 0 \Rightarrow dS > 0$$

$$\text{ha } T_2 = T_1 \text{ akkor } \frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} = 0 \text{ és } dU_1 = 0 \Rightarrow dS = 0$$

A hőcsere következtében a rendszer teljes entrópiája növekszik!

Megadhatjuk tetszőleges termodinamikai kölcsönhatásban álló elszigetelt rendszer entrópia változását.

$$dU = TdS - pdV + \sum_{i=1}^K \mu_i dn_i + \dots +$$

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T} dV - \sum_{i=1}^K \frac{\mu_i}{T} dn_i + \dots +$$

$$dS = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) dU_1 + \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) dV_1 - \left(\frac{\mu_1}{T_1} - \frac{\mu_2}{T_2} \right) dn_1$$

Izoterm nyomás kiegyenlítődési folyamatnál:

$$\text{ha } p_1 > p_2 \text{ akkor } \frac{p_1}{T} - \frac{p_2}{T} > 0 \text{ és } dV_1 > 0 \Rightarrow dS > 0$$

$$\text{ha } p_1 < p_2 \text{ akkor } \frac{p_1}{T} - \frac{p_2}{T} < 0 \text{ és } dV_1 < 0 \Rightarrow dS > 0$$

$$\text{ha } p_1 = p_2 \text{ akkor } \frac{p_1}{T} - \frac{p_2}{T} = 0 \text{ és } dV_1 > 0 \Rightarrow dS = 0$$

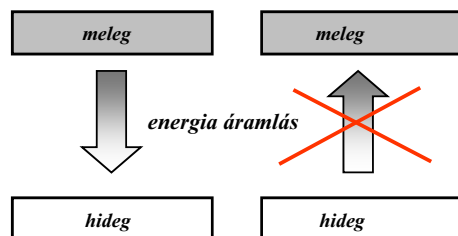
Elszigetelt rendszerben a hőmérséklet és a nyomás kiegyenlítődési folyamatok során az entrópia növekszik, egyensúlyban eléri a maximális értékét.

A termodinamika II. főtétele

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

Lehetetlen olyan periodikusan működő gépet szerkeszteni, amely egyetlen hőtartályból hőt von el, és azt teljes egészében munkává alakítja.

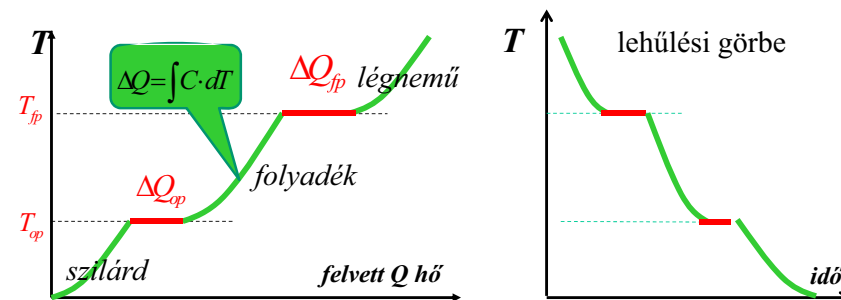
Másodfajú perpetuum mobile működése nem ellenkezne az első főtételel, de megvalósítását a termodinamika második főtétele kizárja.



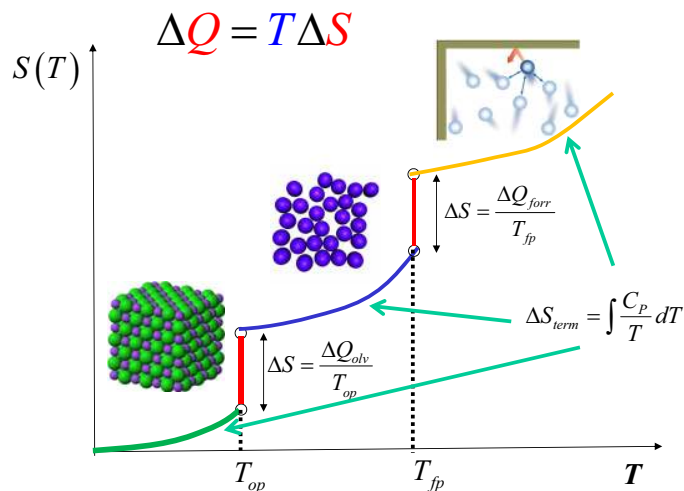
Termikus kölcsönhatások

Hő hatására

- a hőmérséklet változik (1)
- a hőmérséklet nem változik (2) **látens hő!**

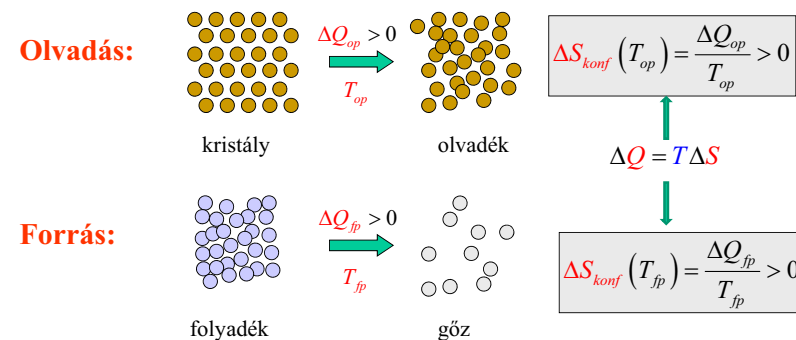


Az entrópia függése a hőmérséklettől



entrópia

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



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

Az entrópia a molekuláris rendezetlenség mértéke

Entropia növekedéssel járó folyamatok



Entropia a rendezetlenség mértéke?



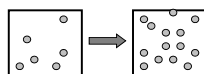
IGEN!

Boltzmann összefüggés:

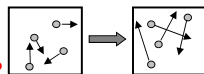
$$S = k_B \ln W$$

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

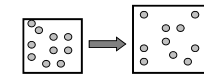
termodinamikai valószínűség: $W \gg 1$



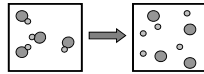
részesekszám
növelése



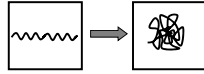
hőmérséklet
növelése



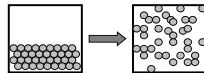
térfogat növelése



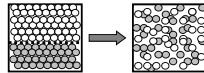
bomlási folyamat
disszociáció



makromolekula
gombolyodása



olvadás,
forrás



elegyedés

A termodinamika III. főtétele

Tiszta kristályos anyagok entrópiája nulla az abszolút zérus ponton:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S(T) = 0$$

Nernst kísérleti úton, Planck pedig az entrópia statisztikus értelmezése alapján fogalmazta meg.



A III. főtétele lehetővé teszi **abszolút entrópia skála** bevezetését

$$S(T) = \int_0^T \frac{C_p}{T} dT + \Delta S_{konfig}$$



$$S(T) = S^0(T^0) + \int_{T^0}^T \frac{C_p}{T} dT + \Delta S_{konfig}$$

Standard entrópia

Minél bonyolultabb szerkezetű egy molekula, annál nagyobb a standard entrópiája.

Néhány anyag standard entrópiája 298 K hőmérsékleten
J/molK egységben



Methane, CH_4
 $S^\circ = 186.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$



Ethane, C_2H_6
 $S^\circ = 229.6 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$



Propane, C_3H_8
 $S^\circ = 270.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

TABLE 19.2 Standard Molar Entropies of Selected Substances at 298 K	
Substance	S° , J/mol·K
Gases	
$\text{H}_2(\text{g})$	130.6
$\text{N}_2(\text{g})$	191.5
$\text{O}_2(\text{g})$	205.0
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	188.8
$\text{NH}_3(\text{g})$	192.5
$\text{CH}_3\text{OH}(\text{g})$	237.6
$\text{C}_6\text{H}_6(\text{g})$	269.2
Liquids	
$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	69.9
$\text{CH}_3\text{OH}(\text{l})$	126.8
$\text{C}_6\text{H}_6(\text{l})$	172.8
Solids	
$\text{Li}(\text{s})$	29.1
$\text{Na}(\text{s})$	51.4
$\text{K}(\text{s})$	64.7
$\text{Fe}(\text{s})$	27.23
$\text{FeCl}_3(\text{s})$	142.3
$\text{NaCl}(\text{s})$	72.3

szilárd anyag		folyadék		gáz
C gyémánt	2,4	benzol	173,3	benzol gőz 269,3
C grafit	5,7	Víz	69,9	vízgőz 188,8

Elszigetelt rendszerben a önként lejátszódó folyamatok során az entrópia növekszik.

Entropia a rendezetlenség mértéke.



?

evolúció



termodinamika II. főtétele