



Biofizika

(molekuláris biofizika és biológiai anyagtan)

2016, tavaszi szemeszter

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

Tárgy gyakorlatainak felelősei:

Dr. Varga Zsófia, tudományos munkatárs,

Dr. Jedlovsky-Hajdú Angéla, tudományos munkatárs

varga.zsofia@med.semmelweis-univ.hu, hajdu.angela@med.semmelweis-univ.hu

PROGRAM

Febr. 17. Az élő rendszerek termodinamikája (bioenergetikája). (Zrínyi Miklós)

Febr.24. A biológiai „anyag” szerkezetét meghatározó kölcsönhatások és funkcionális jelentőségük. (Fidy Judit)

Márc. 2. Elektromágneses sugárzások kölcsönhatása szövetekkel és szöveti komponensekkel I. Optikai tartomány (Fidy Judit)

Márc. 9. Elektromágneses sugárzások kölcsönhatása szövetekkel és szöveti komponensekkel II. Röntgen és gamma tartomány (Fidy Judit)

Márc. 16. Szövetek kölcsönhatása mágneses térrel. Mag mágneses rezonancia szövetekben, az orvosi alkalmazások alapjai (Fidy Judit)

Márc. 23. *Tavaszi szünet*

Márc. 30. Biológiai rendszerek különleges komponensei: a víz és a makromolekulák (Zrínyi Miklós)

PROGRAM

Április. 6. Ultrahang terjedése szövetekben, az orvosi alkalmazások szempontjai. (Fidy Judit)

Április 13. Egyedi biomolekulák és sejtek mechanikai tulajdonságai és mérési módszereik. (Kellermayer Miklós)

Április 20. Transzport jelenségek az élő szervezetben I. (Zrínyi Miklós)

Április 27. Transzport jelenségek az élő szervezetben II. (Zrínyi Miklós)

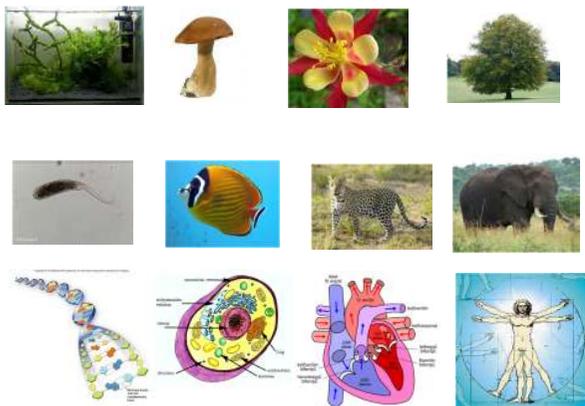
Május 4. Fehérjék szerkezetének predikciója, szerkezeti adatok felhasználása adatbázisok segítségével, a számítógépes molekuladinamikamodellezés alapjai (Hegedüs Tamás)

Május 11. 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.

 varga.zsofia@med.semmelweis-univ.hu

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 anyagok azok a szintetikus anyagokat, amelyek 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 és felhasználásának elvi alapjaival foglalkozó tudomány.

Technikai anyag Élő anyag

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

**KÉMIAI SZERKEZET
TULAJDONSÁG
FELHASZNÁLÁS**

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

**KÉMIAI SZERKEZET
TULAJDONSÁG
FUNKCIÓ**

Technikai anyag



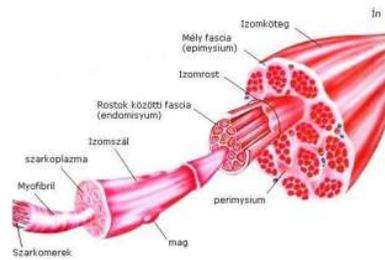
Élő anyag

monolit

hierarchikus



kompozit



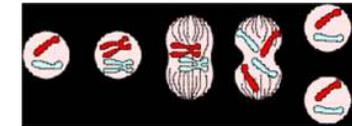
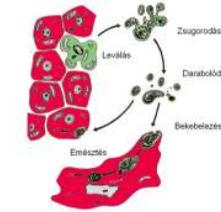
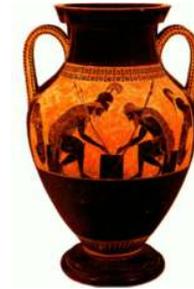
Technikai anyag



Élő anyag

állandóság

folytonos megújulás



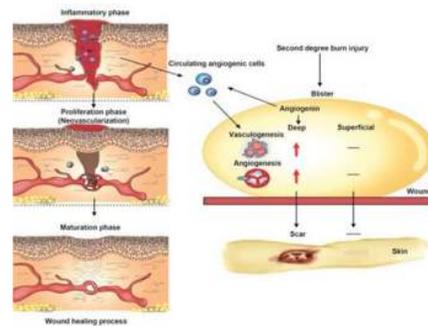
Technikai anyag



Élő anyag

korrózió, károsodás

öngyógyulás



Technikai anyag



Élő anyag

passzív

alkalmazkodóképesség



Mimóza (Mimosa pudica)

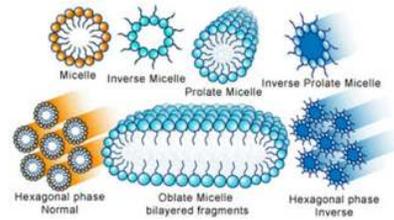
Technikai anyag



Élő anyag

mérnöki struktúrák

önszerveződő struktúrák



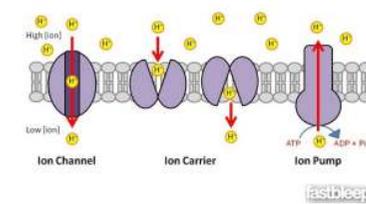
Technikai anyag



Élő anyag

elektronok

ionok



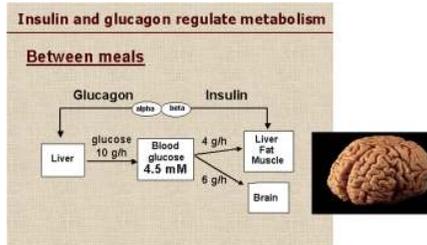
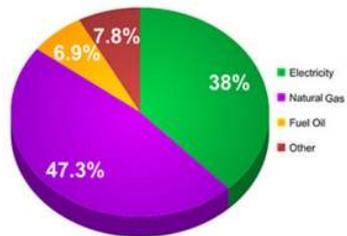
Technikai anyag



Élő anyag

változatos energiaforrások

ATP



**KÉMIAI SZERKEZET
TULAJDONSÁG
FELHASZNÁLÁS**

Technikai anyag



Élő anyag

termikusan ellenálló

hőmérséklet érzékeny



Technikai anyag ↔ Élő anyag

Folyamatos energia ellátás

Szakaszos energia ellátás



Biofizikai termodinamika
(Bio-termodinamika, vagy bioenergetika)

Az energia biológiai hasznosításának
tudománya.

A mozgás mechanikai energiája



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

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

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

$$E_{kin} + E_{pot} = \text{állandó ?}$$

Teljes energiamérleg több tagból áll!

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

$$dE_{tot} = ?$$



Az energiamegmaradás tétele



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

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

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

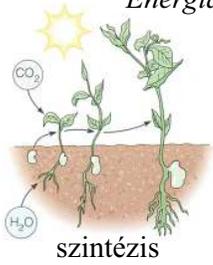
Mayer felismerte, hogy a hő is, meg a mechanikai munka is, az energia egy formája.

Joule 1843-ban kísérletekkel meghatározta a hő mechanikai egyenértékét.

Helmholtz 1847-ben megfogalmazza az energiamegmaradás tételét

Az energia biológiai hasznosítása

Energia : munkavégző képesség ?



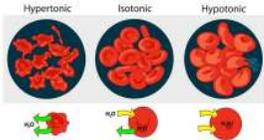
szintézis



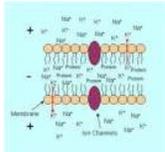
fizikai munka



izom munka



ozmotikus munka



elektrokémiai munka



fotokémiai munka

Honnan van a hasznosítható energia ?

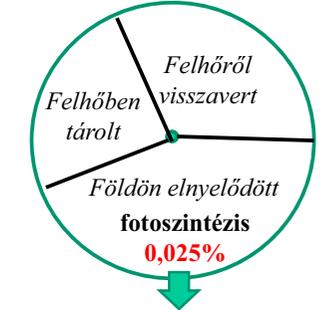
A nap a földi élet energiaforrása



$5 \cdot 10^{18} \text{ MJ / év}$
 $1,7 \cdot 10^{17} \text{ J / s}$



ÉLET



Biológiai makromolekulák

keményítő

glikogén

cellulóz



fototróf



élőlények

kemotróf



fény
 H_2O
 CO_2

szénhidrát
növényi
szövet

zsír
állati
szövet

Az élő szervezet sejtjeiben végbemenő folyamatok összessége:
metabolizmus

felépítő folyamatok
anabolizmus

lebontó folyamatok
katabolizmus

rendezetlen + **energia** → **rend**

rend → **rendezetlen** + **energia**

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

felépítő folyamatok
anabolizmus

lebontó folyamatok
katabolizmus

aminosavak

fehérjék

Molekuláris rend növekszik

pl. glükóz

CO_2 H_2O

Molekuláris rend csökken

A környezetből felvett anyagok beépülése az élő szervezetbe:
anabolizmus

fototróf

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



kemotróf

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

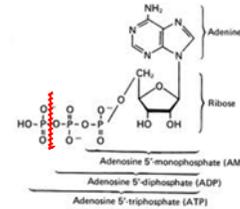


Az élő szervezetek biokémiai reakciók során történő tápanyag lebontása: **katabolizmus**.

poliszacharidok,
lipidek,
fehérjék
nukleinsavak



monoszacharidok,
zsírsavak,
nukleotidok,
aminosavak



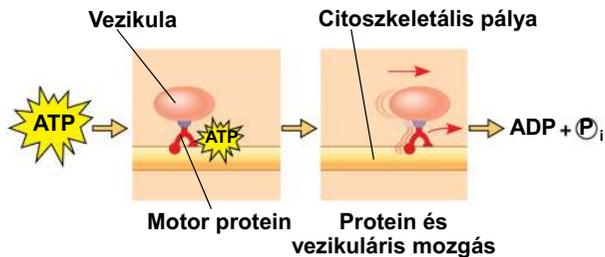
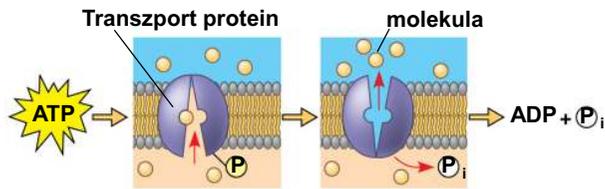
Q

ADP

tejsav
ecetsav
ammónia
karbamid



Két példa az **ATP** hasznosítására.



tápanyag szénhidrátja

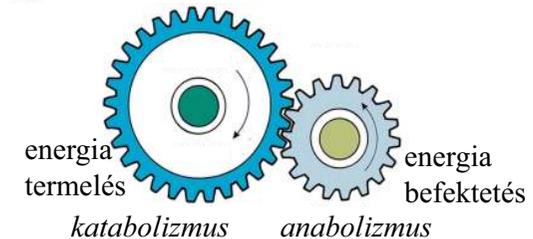
emésztés hidrolízis

monoszacharidok

katabolizmus
energia
széndioxid
víz

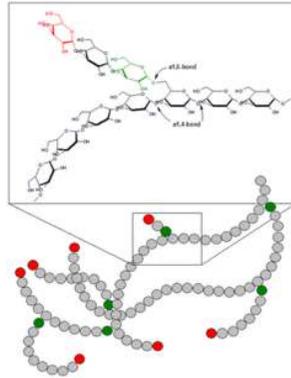
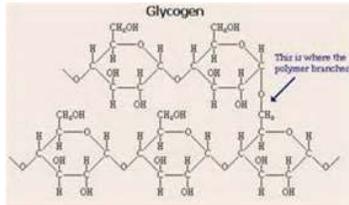
glikogén
zsír

anabolizmus
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

A európai lakosság napi szénhidrát bevétele 300 – 500 g.
Ez a napi energiaszükséglet közel fele.

Ennek nagyobb része raktározódik

poliszacharid → keményítő

Májban glikogén a tartalék tápanyag



glükóz, fruktóz, galaktóz, *cellulóz*

↓ 80 %

Izomszövetben
glikogénként raktározódik

Cori kör

A vér glükóz szintjének
stabilitása

A európai lakosság napi lipid bevétele 50 – 100 g.

Ez a napi energiaszükséglet közel 40%-a.

zsírszövet → felnőtt ember testének 8-22%



Fő energia tartalék: fehér zsírszövet

trigliceridek

Felnőtt emberben a napi fehérjelebomlás 200 - 350 g.



aminosavak

Nitrogén egyensúly

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

Energiát szállító anyag: a **vér**

Egy példa az önszabályozásra.

Étkezés után a vér glükóz koncentrációja emelkedik

A megnövekedett glükóz koncentráció hatására a hasnyálmirigy inzulint termel.

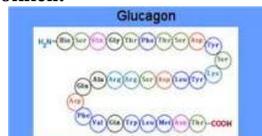
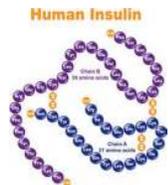
Inzulin hatására a glükóz a májban és az izmokban glikogén formában tárolódik. Az inzulin elősegíti a többlet glükóz zsírrá történő átalakítását.

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

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

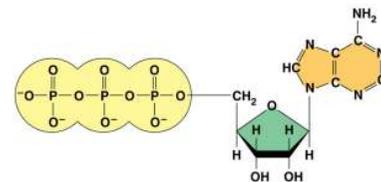
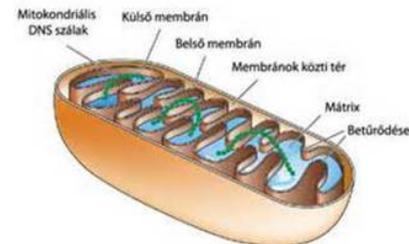
Glucagon hatására a májban tárolt glikogénből glükóz keletkezik és jut a vérbe.

A vér glükóz koncentrációja újra emelkedik.



Mitokondrium: a biológiai erőmű

az ATP gyár

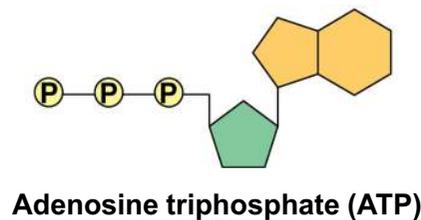


Több lépéses anaerob oxidáció

glükóz

ATP

5 – 10 % energia veszteség (feces és urin)

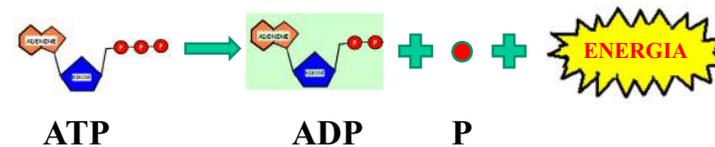


Adenosine triphosphate (ATP)

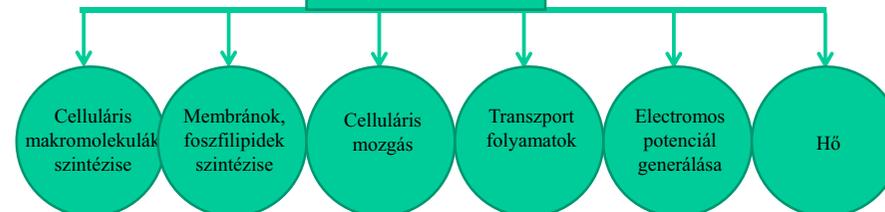
P_i

Adenosine diphosphate (ADP)

Energy



ENERGIA



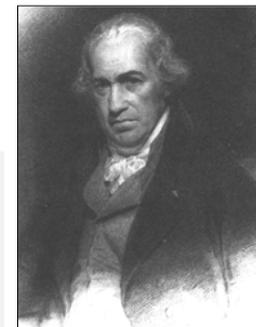
Az energia hasznosítására vonatkozó legáltalánosabb elmélet



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:

James Watt (1736-1819) skót feltaláló

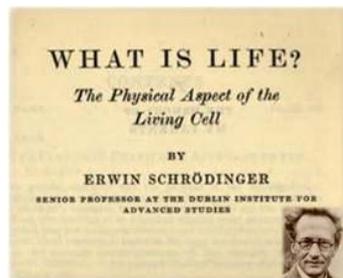
- **a változások** és átalakulások irányának és az egyensúlyi végállapot felé való törekvésének értelmezése, valamint
- **az egyensúlyt** és a hozzá vezető folyamatot befolyásoló tényezők felderítése.



(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

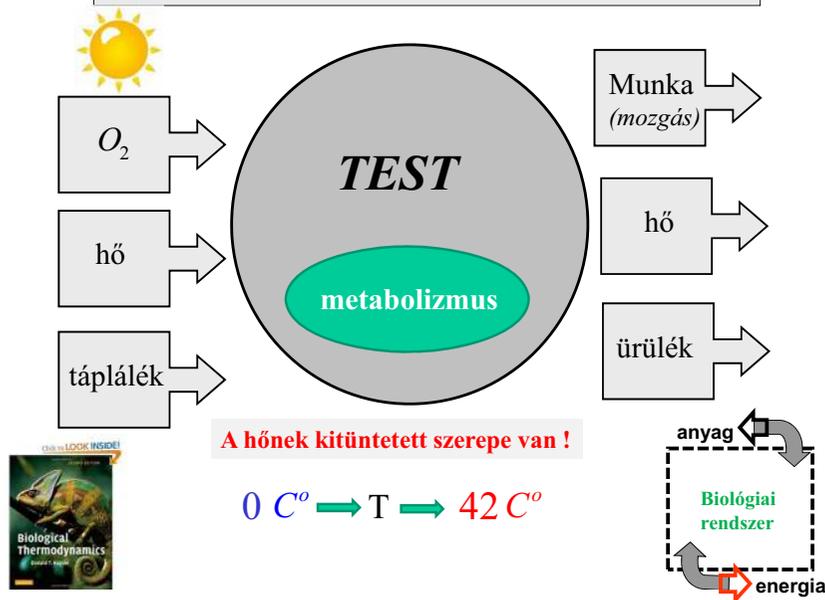
irányának, mozgó erőinek, és befolyásoló tényezőinek

felderítése.

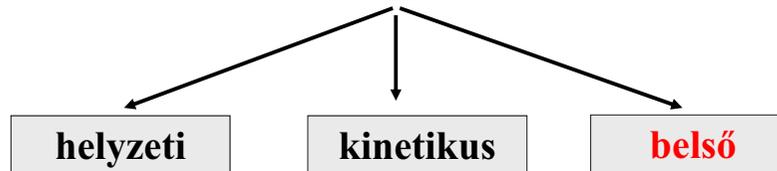
Törvényei általánosíthatók

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

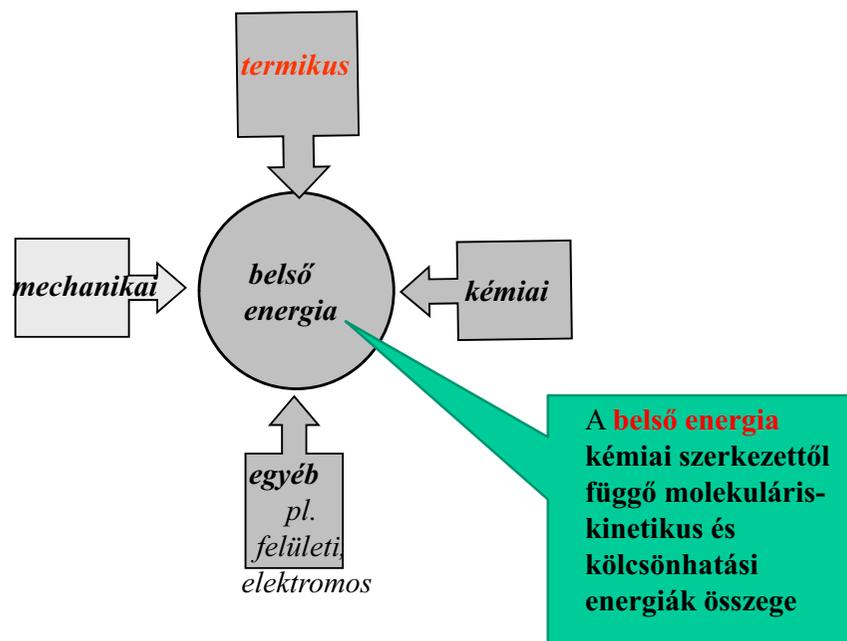
BIOLÓGIAI TERMODINAMIKAI RENDSZER



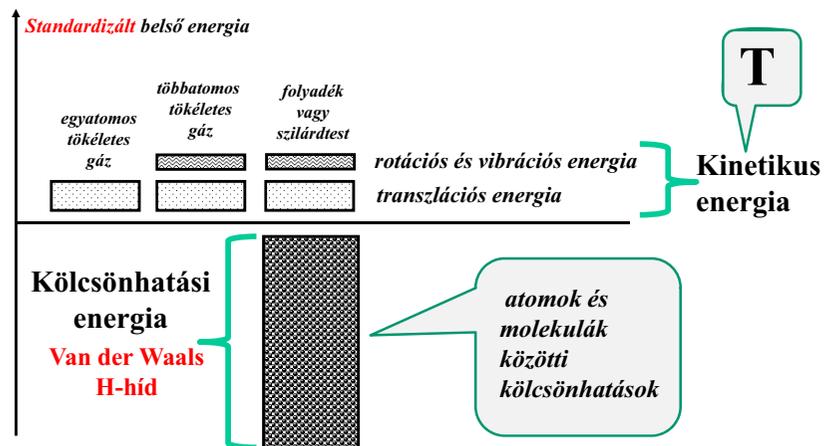
ENERGIA



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



A belső energia járulékai (**molekuláris kinetikus energiák**) azonos hőmérsékleten összehasonlítva



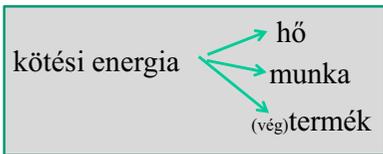
Néhány „üzemanyag” energia sűrűsége

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	$1,6 \cdot 10^7$

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

+ - + - -

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

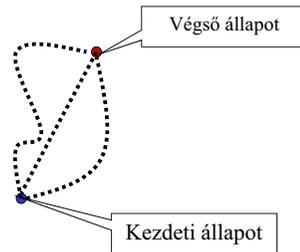


VISSZA A TERMODINAMIKÁHOZ

A belső energia **extenzív** mennyiség.

A belső energia **állapotfüggvény**.

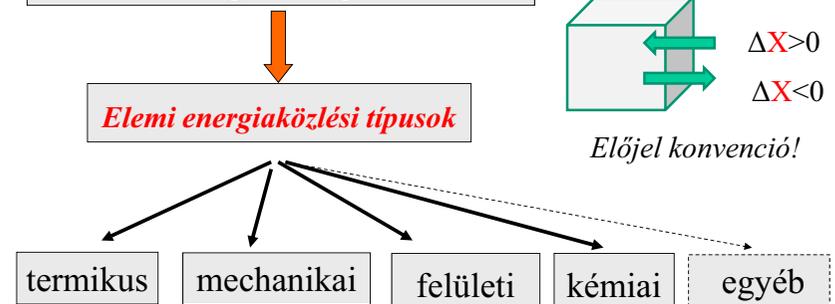
A belső energia **értékét nem ismerjük**.



A belső energia megváltozik,

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

Belső energia megváltozása



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

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

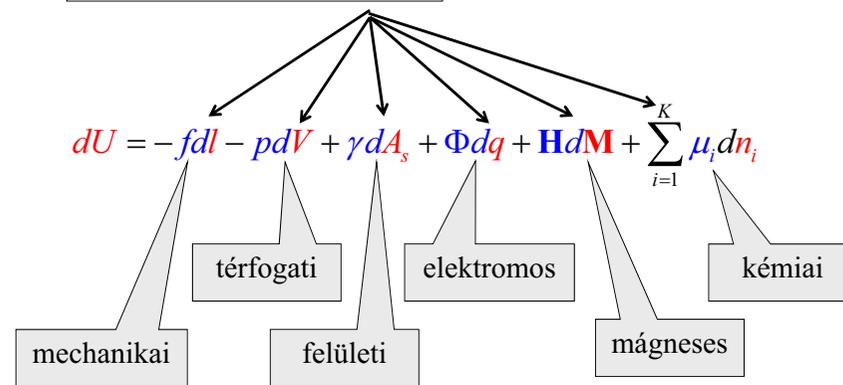
Minden egyes kölcsönhatáshoz tartozik egy-egy jellemző **intenzív** és **extenzív** mennyiség, melynek szorzata megadja a kölcsönhatáshoz tartozó elemi energiacserét.

$$dW_i = y_i \cdot dx_i$$

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.**

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

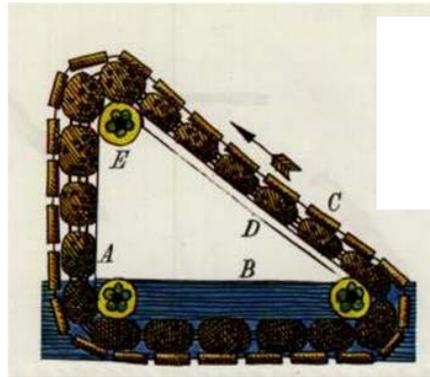
$$\Delta W_{mech} = \Delta U - \Delta Q - \sum_i \Delta W_i$$

Egy termodinamikai rendszer akkor képes munkavégzésre ($\Delta W_{mech} < 0$), 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.

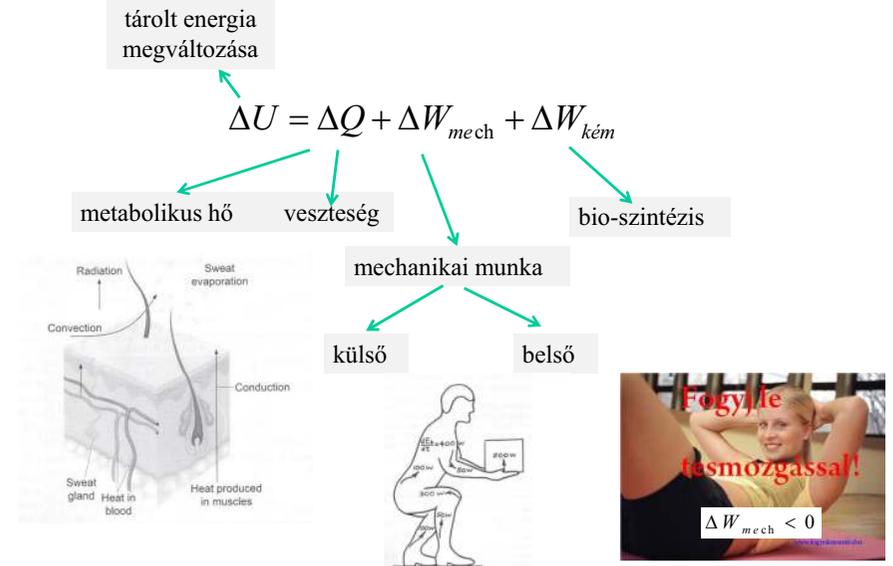
Az olyan gépeket, amelyek mechanikai munkát végeznének anélkül, hogy külső forrásból energiát fogyasztanának, **első fajú perpetuum mobile**-nek, vagy más néven **örökmozgónak** nevezzük. A termodinamika első főtételéből következik, hogy első fajú perpetuum mobile nem működhet.

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



Termikus kölcsönhatások jellemzői: a hőmérséklet és az entrópia

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

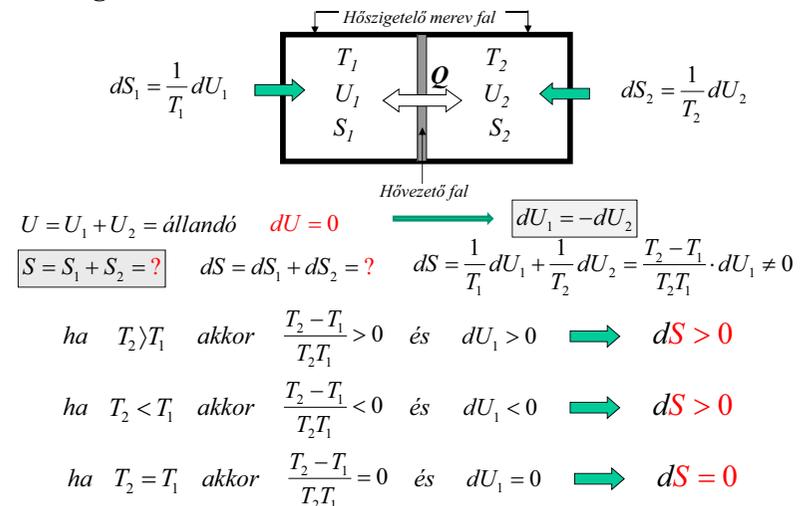
- A **hőmérséklet** fogalom a hideg-, ill. melegérzetből fejlődött ki.
- Alapvető felismerés: **a hő és a hőmérséklet nem azonos.** (Joseph Black skót kémikus)
- Az első hőmérséklet-mérő készüléket **Galileo Galilei** alkotta meg.
- **Jean Rey** francia orvos megalkotta az első lázmérőt 1631-ben
- A mai hőmérséklet-skálát **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



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 :

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

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

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

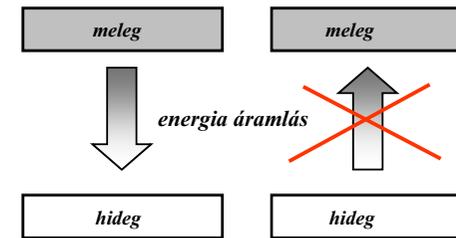
Elszigetelt rendszerben a hőmérséklet és a nyomás kiegyenlítődési folyamatok során az entrópia növekszik, egyensúlyban eléri a maximális értékét.

A termodinamika II. főtétele

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

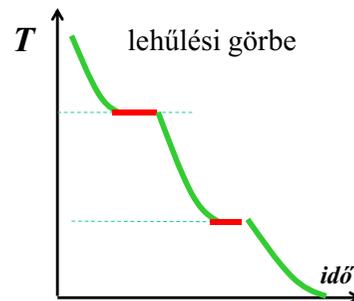
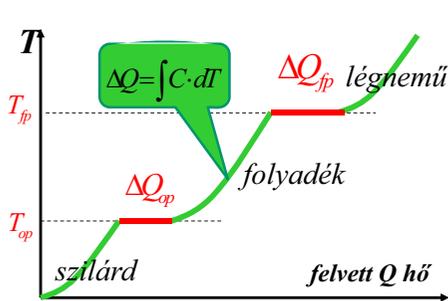
Lehetetlen olyan periodikusan működő gépet szerkeszteni, amely egyetlen hőtartályból hőt von el, és azt teljes egészében munkává alakítja.

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

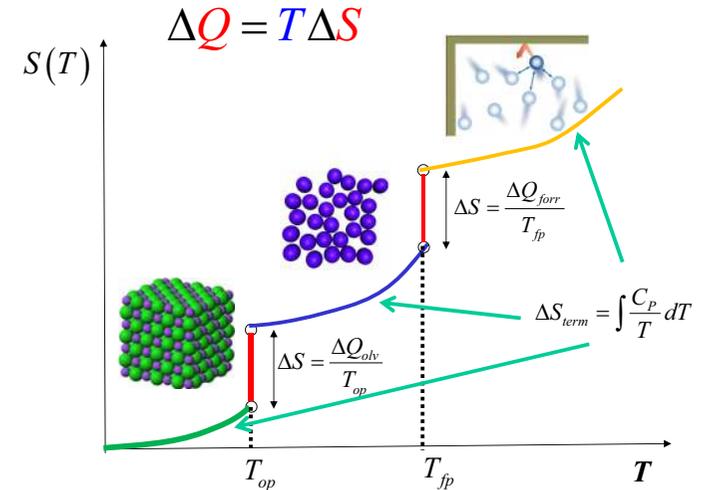


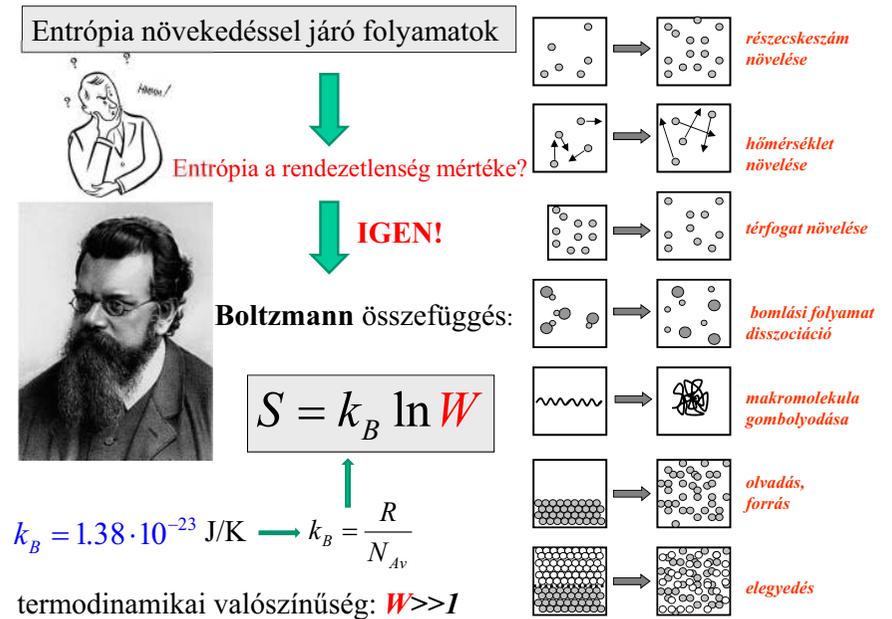
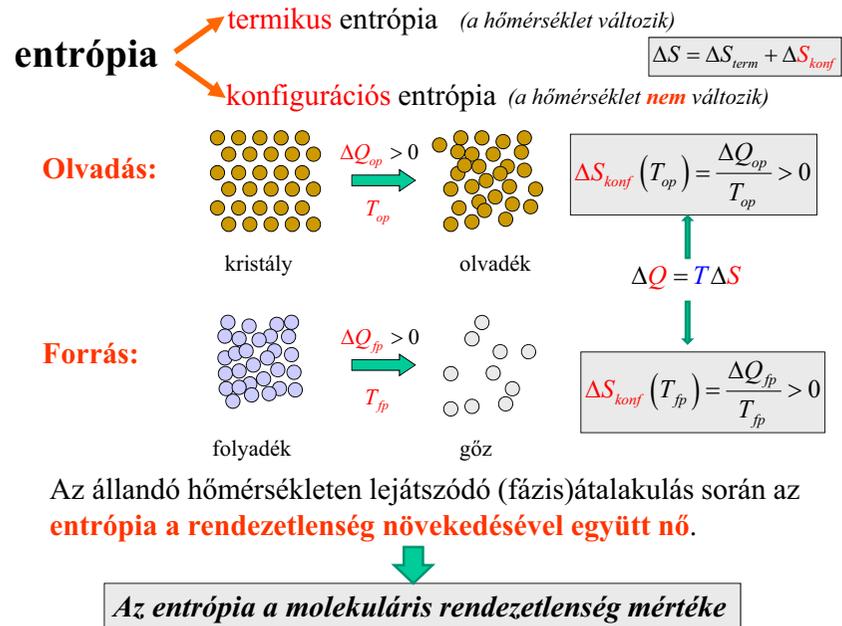
Termikus kölcsönhatások

Hő hatására \rightarrow a hőmérséklet változik (1)
 \rightarrow a hőmérséklet nem változik (2)
látens hő!

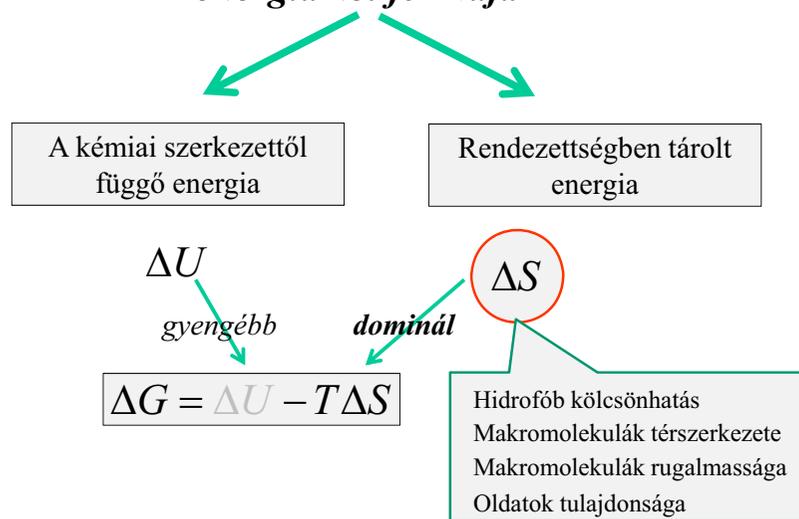


Az entrópia függése a hőmérséklettől





A termodinamika II. főtétele alapján a biológiai energia két formája



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

$$S(T) = \int_0^T \frac{C_p}{T} dT + \Delta S_{konfig} \rightarrow S(T) = S^0(T^0) + \int_{T^0}^T \frac{C_p}{T} dT + \Delta S_{konfig}$$

Standard entrópia

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

Néhány anyag standard entrópiája 298 K hőmérsékleten
J/molK egységben



Methane, CH₄
S° = 186.3 J mol⁻¹ K⁻¹



Ethane, C₂H₆
S° = 229.6 J mol⁻¹ K⁻¹



Propane, C₃H₈
S° = 270.3 J mol⁻¹ K⁻¹

TABLE 19.2 Standard Molar Entropies of Selected Substances at 298 K

Substance	S°, J/mol-K
Gases	
H ₂ (g)	130.6
N ₂ (g)	191.5
O ₂ (g)	205.0
H ₂ O(g)	188.8
NH ₃ (g)	192.5
CH ₃ OH(g)	237.6
C ₆ H ₆ (g)	269.2
Liquids	
H ₂ O(l)	69.9
CH ₃ OH(l)	126.8
C ₆ H ₆ (l)	172.8
Solids	
Li(s)	29.1
Na(s)	51.4
K(s)	64.7
Fe(s)	27.23
FeCl ₃ (s)	142.3
NaCl(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.

Entrópia a rendezetlenség mértéke.



?

evolúció



termodinamika II. főtétele

Biológiai hőforgalom mérése

Direkt kalorimetria

Indirekt kalorimetria

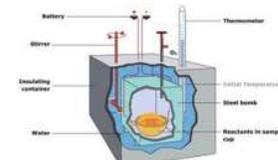
$$\Delta Q = Q_{\text{metabolizmus}} + Q_{\text{vesztés}}$$

Oxigén fogyasztás és/vagy CO₂ termelés arányos a hőtermeléssel

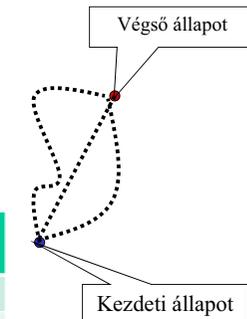
$$Q_{\text{vesztés}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$



Direkt kalorimetria



Hess tétele:



anyag	kalorimetrikus energia kJ/g
szénhidrát	17,1
fehérje	23,6
etanol	29,7
zsír	39,6

anyag	energia sűrűség J/Kg
ATP	1,0 · 10 ⁵
H ₂	1,2 · 10 ⁸
zsír	3,9 · 10 ⁷
glükóz	1,6 · 10 ⁷

Direkt és indirekt kalorimetria

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

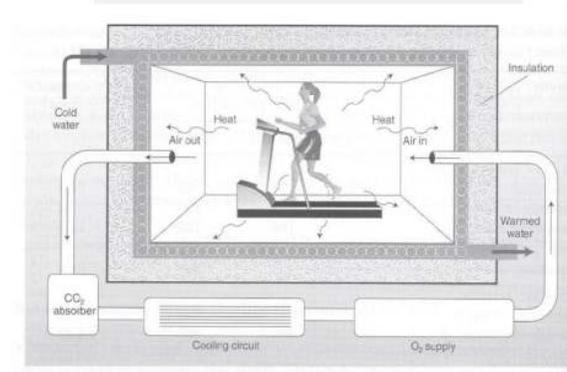
$$\Delta H = +2817 \text{ kJ}$$

Oxigén energia egyenérték

1 L oxigén fogyasztására 21 kJ energiát jelent

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

Direkt és indirekt kalorimetria



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

$$\Delta H = +1757 \text{ kJ}$$

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

Kalorimetria > metabolikus
(V=konst.) (p=konst.)

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

$$BMR = \left. \frac{dQ}{dt} \right|_{nyugalom}$$



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

Kleiber törvény

A **BMR** a korrallal csökken

$m_b = 70 \text{ kg}$ 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

Átlagos ember átlagos termikus jellemzői:

Fajhő: 3,47 kJ/kgK

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

$$Q = C \cdot m_b \cdot \Delta T \quad \frac{dQ}{dt} = C \cdot m_b \cdot \frac{dT}{dt} \quad \frac{dT}{dt} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot BMR$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{BMR}{C \cdot m_b}$$

$$\rightarrow \frac{dT}{dt} = 1,2 \text{ C}^\circ/\text{óra} \quad \text{Ha nem lenne veszteség és fizikai aktivitás!}$$

Hővesztesség: Sugárzás: 54 – 60 %
Levegő : 25 %
Izzadás : 7 %
Légzés : 14 %

Fizikai aktivitás esetén



$$\frac{dQ}{dt} = f \cdot BMR$$

$$\frac{dT}{dt} = f \cdot \frac{BMR}{C \cdot m_b} \approx 1,2 f C^\circ / h$$

$0 < f < 20$
Fizikai aktivitás

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

Evés és hőtermelés nyugalomban

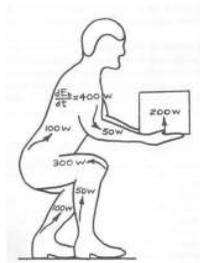
	Nagy evő	Kis evő	arány
Test súly (kg)	54,2	52,7	1,03
Kaja energia (kJ/nap)	9916	6485	1,54
Nappali hőtermelés (kJ/nap)	9079	5815	1,55
Éjszakai hőtermelés (kJ/nap)	7196	4602	1,56

de....

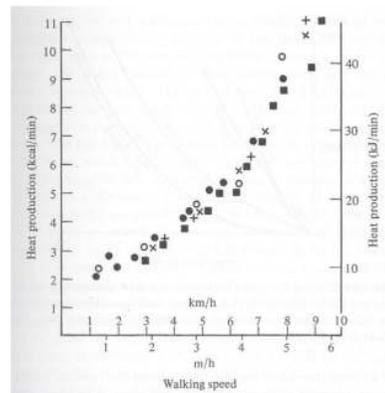
$$\frac{dQ}{dt} = f \cdot BMR$$

$0 < f < 20$
Fizikai aktivitás

Energiaforgalom és mozgás



Gyaloglással felszabadított hő függése a sebességtől.



munka(fizika) ≠ munka(biológia)

külső

belső