

Orvosi Fizika 8.

Az emberi test és a környezet termikus kölcsönhatásainak leírása
Hőmérséklet és mérése, hőmennyiség, hőterjedés

Bari Ferenc

egyetemi tanár

SZTE ÁOK-TTIK Orvosi Fizikai és Orvosi
Informatikai Intézet

Szeged, 2019. október 21

Tanulási támpontok

- Sorolja fel a termodinamika fő tételeit
- Hőmérők, hőmérsékleti skálák (Celsius, Farenheit, abszolút [Kelvin])
- A hőkapacitás, a fajhő fogalma, az emberi szövetek fajhője
- Lineáris és térfogati hőtágulás
- A hő sugárzás értelmezése, az abszolút fekete test sugárzásának leírása
- A hővezetés törvényszerűségei
- A hőáramlás- benne az ellenáramlásos hőcsere- jellemzése
- A párolgás, a párolgási hő
- A köpeny és maghőmérséklet, ezek ingadozásai
- Az ember és a környezete közötti hőegyensúly feltételei





Az élőlények igen szélsőséges hőmérsékleti viszonyok között is tudják szabályozni a testhőmérsékletüket

Mit jelent a hőszabályozás

Van állapot vs. kell állapot



Negatív visszacsatolású szabályozási kör blokk diagramja



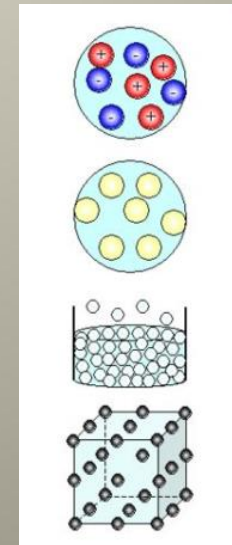
A **hőmérséklet** az anyagok egyik fizikai jellemzője, állapotátározó.

E jellemzőt az ember elsősorban a hőérzettel, másodsorban hőmérő segítségével észleli.

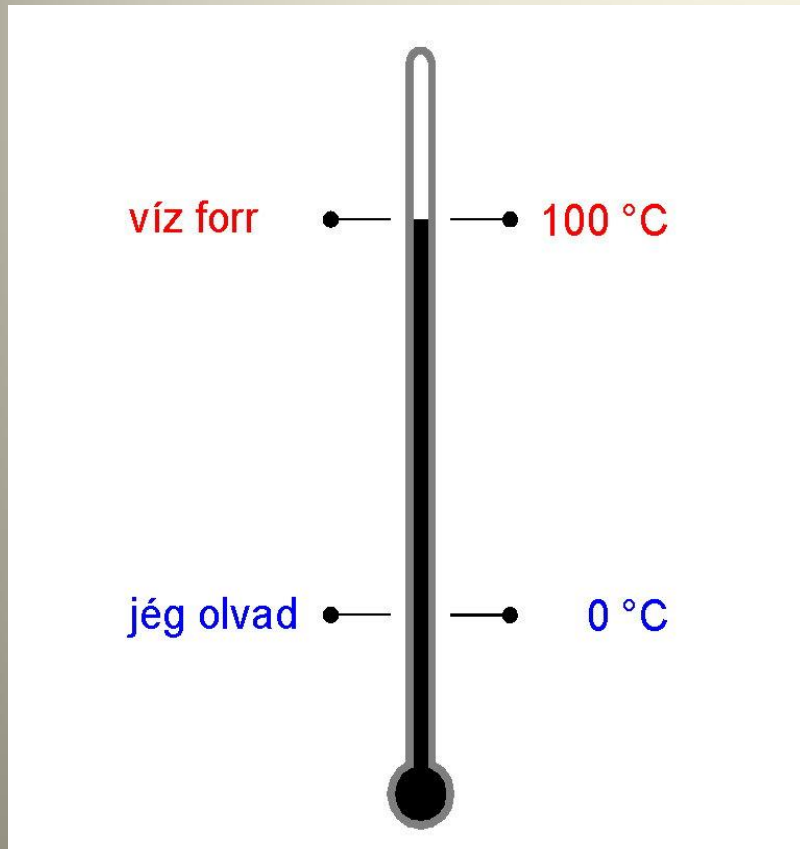
A **hőmérséklet** a hőtan tudományának egyik alapfogalma.



Fizikai szempontból :
a hőmérséklet az anyagot felépítő részecskék
átlagos mozgási energiájával kapcsolatos mennyiség,
statisztikus fogalom



A Celsius skála alappontjai:



Anders Celsius
(1701 –1744)

svéd természettudós, csillagász
1737-ben tervezte meg a ma is használatos,
100-as beosztású hőmérsékleti skáláját,
A skálát 1742-ben mutatta be a Svéd
Akadémiában
1750-ben Stromer svéd tudós módosította a
skálát, és a víz fagyáspontját tette meg 0°-nak,
a forráspontját pedig 100°-nak.



A Fahrenheit skála alappontjai:

0°F :szülővárosának (Gdansk-Danzig) leghidegebb hőmérséklete (1708)
(helyette hó és ammónium só keverék, olvadáspont-a víz olvadáspontja **32°F**)

100°F: testének hőmérséklete
(pontosabban **96°F**)

A víz forráspontja **212°F**

Daniel Gabriel Fahrenheit
(1686–1736) német fizikus

ÁTVÁLTÁS:

$$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{F}] - 32) \cdot 5/9$$

$$[^{\circ}\text{F}] = [^{\circ}\text{C}] \cdot 9/5 + 32$$

Néhány érdekes hőmérsékleti adat:

A Nap felszíni hőmérséklete: 6000°C

A Nap belső hőmérséklete: 10 millió $^{\circ}\text{C}$

Higany fagyáspontja: -39°C

Földön mért leghidegebb hőmérséklet $-89,2^{\circ}\text{C}$ /Antarktisz 1983/

Oxigén fagyáspontja: -219°C

Nitrogén fagyáspontja -210°C

Nitrogén forráspontja : -196°C

Galaxisok közötti tér hőm: -270°C

KELVIN SKÁLA

Ez a termodinamikai hőmérséklet-skála. Az abszolút hőmérsékleti skála használatát William Lord Kelvin (eredeti neve William Thomson, 1824-1907), angol fizikus vezettette be. 1892-ben Viktória királynő Kelvin néven ültette lorddá).

A skála alappontja az abszolút zérus pont. Abból a megfontolásból adódik, hogy a test hőmérsékletét a molekulák sebessége határozza meg.

Ahol ez a sebesség nulla, az anyag alapállapota.

$$0 \text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$$

$$0^\circ\text{C} = 273\text{K}$$

$$100^\circ\text{C} = 373\text{K}$$

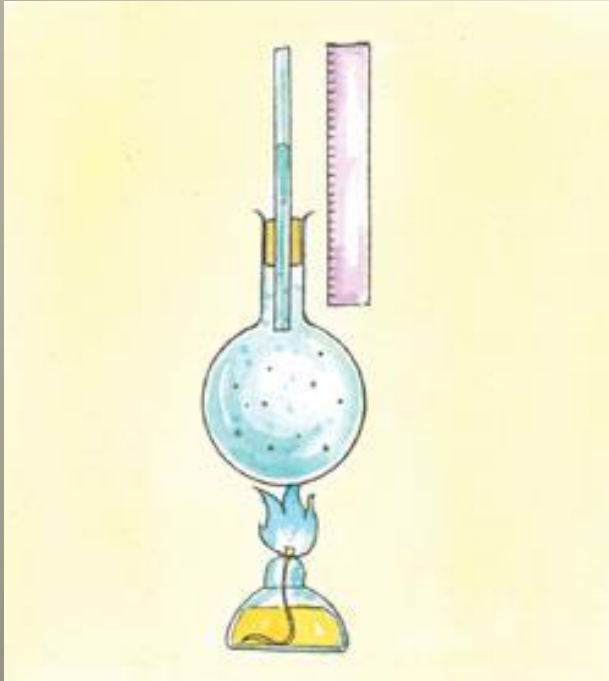
A Kelvin skálán az egységek ugyanakkorák, mint a Celsius skálán.

ÁTVÁLTÁS: T a hőmérséklet Kelvinben, t Celsius fokban

$$T = t + 273$$

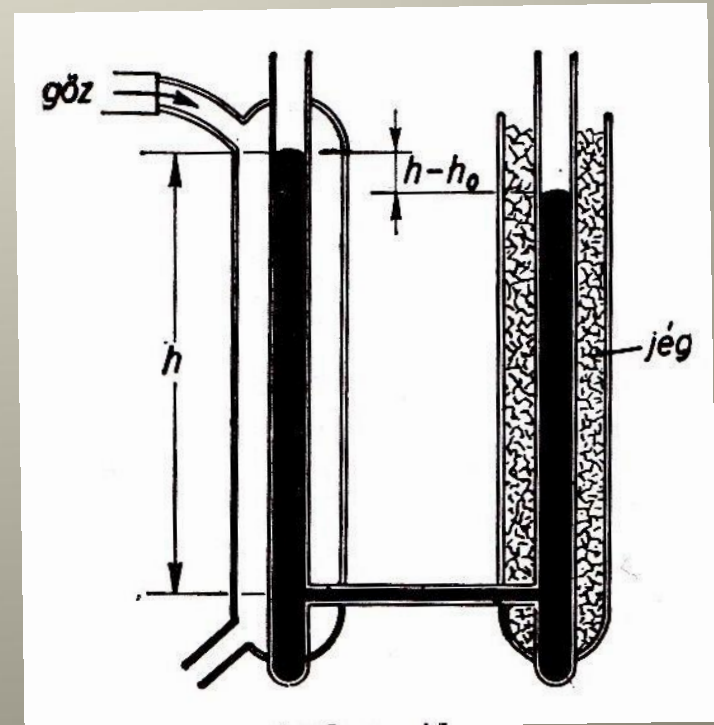
Az eddigi előállított leghidegebb hőmérséklet $2 \cdot 10^{-9} \text{ K}$ / 2 nK/

Folyadékok hőtágulása

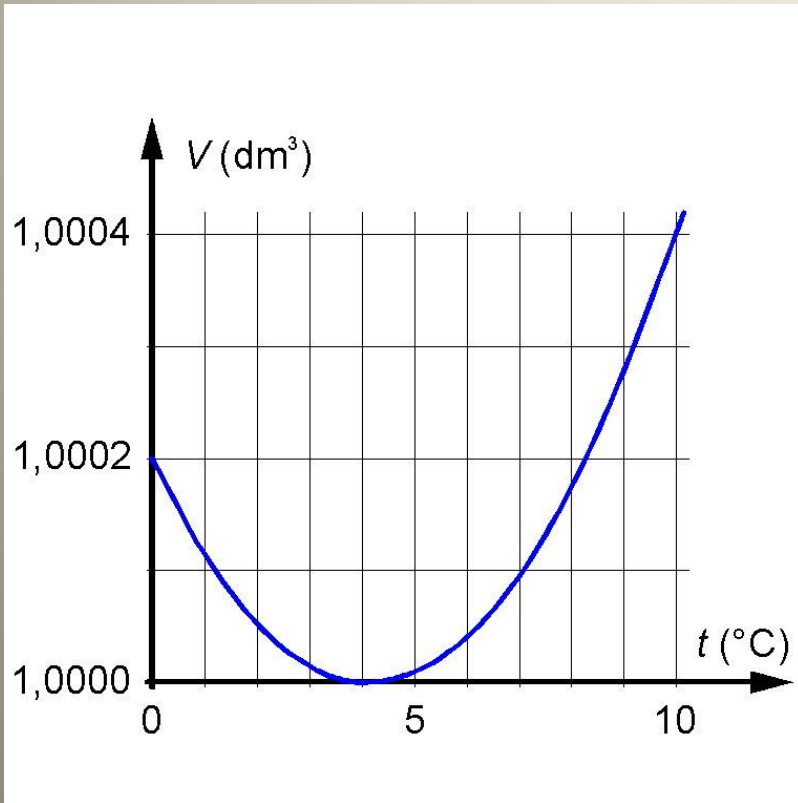


$$V_t = V_0 [1 + \beta(T - T_0)]$$

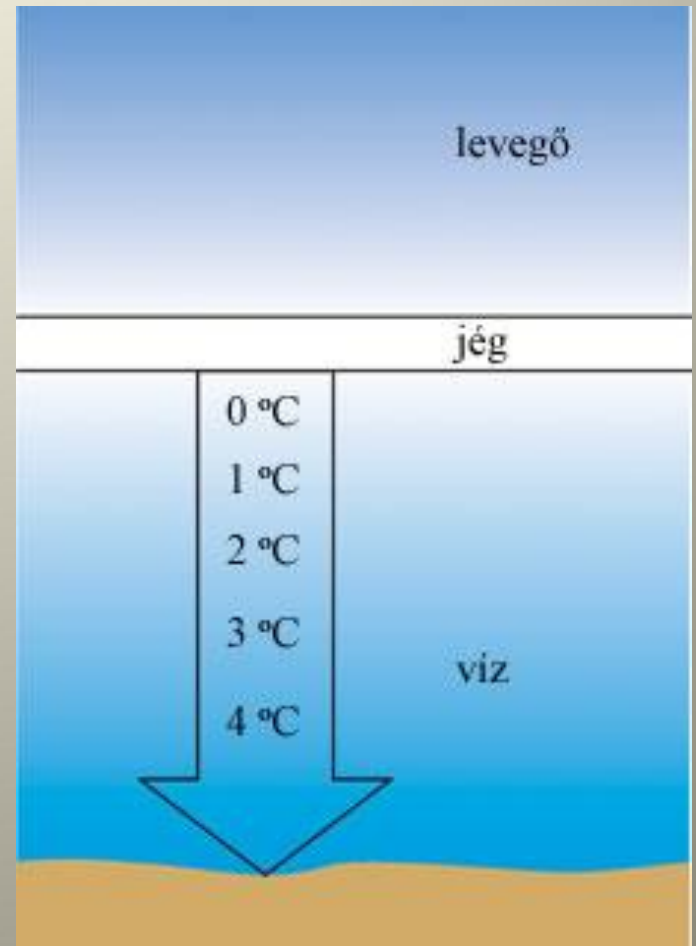
$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)}$$



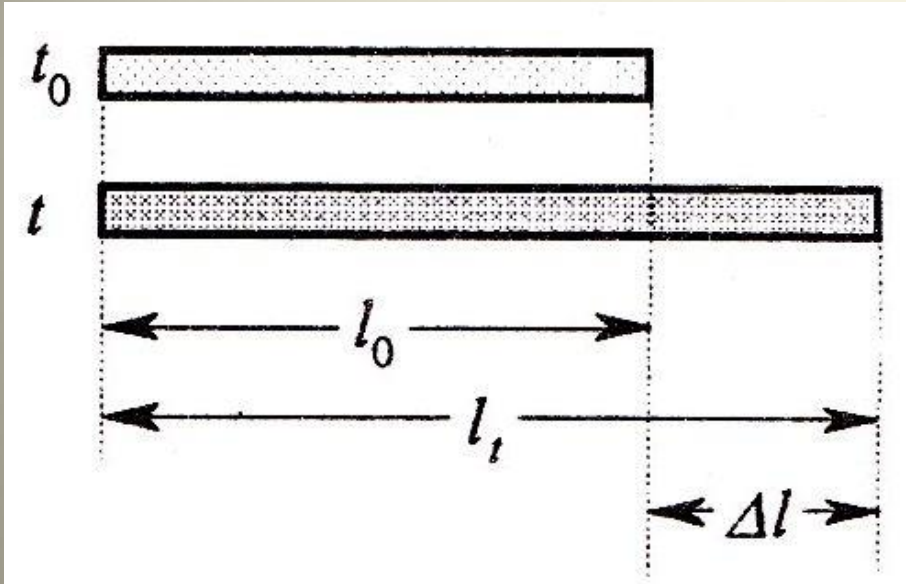
A víz hőtágulása



1 kg víz térfogatának változása a hőmérséklet függvényében



Szilárd testek hőtágulása, Lineáris hőtágulás



- Atomok rezegnek a kristályrácsban
- A növekvő hőmérséklet hatására az atomok átlagos távolsága megváltozik

$$l_t = l_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

- α : lineáris hőtágulási együttható

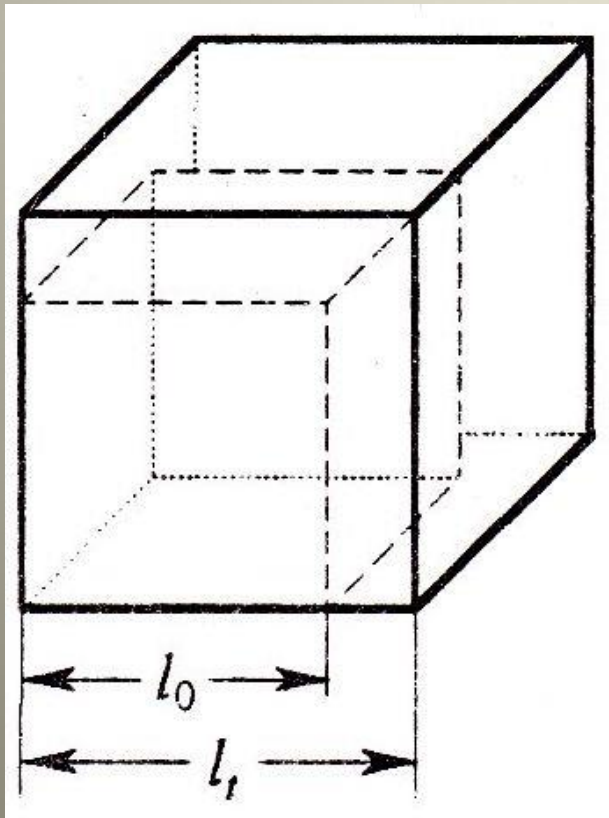
$$l_t = l_0 [1 + \alpha_1(T - T_0) + \alpha_2(T - T_0)^2 + \dots]$$

- Hőtágulás \rightarrow mechanikai feszültség

$$l = l_0 \left[1 \pm \frac{\sigma}{E} + \alpha(T - T_0) \right]$$

Ha nem tágulhat, hatalmas mechanikai feszültségek (és erők) ébrednek

Térfogati hőtágulás



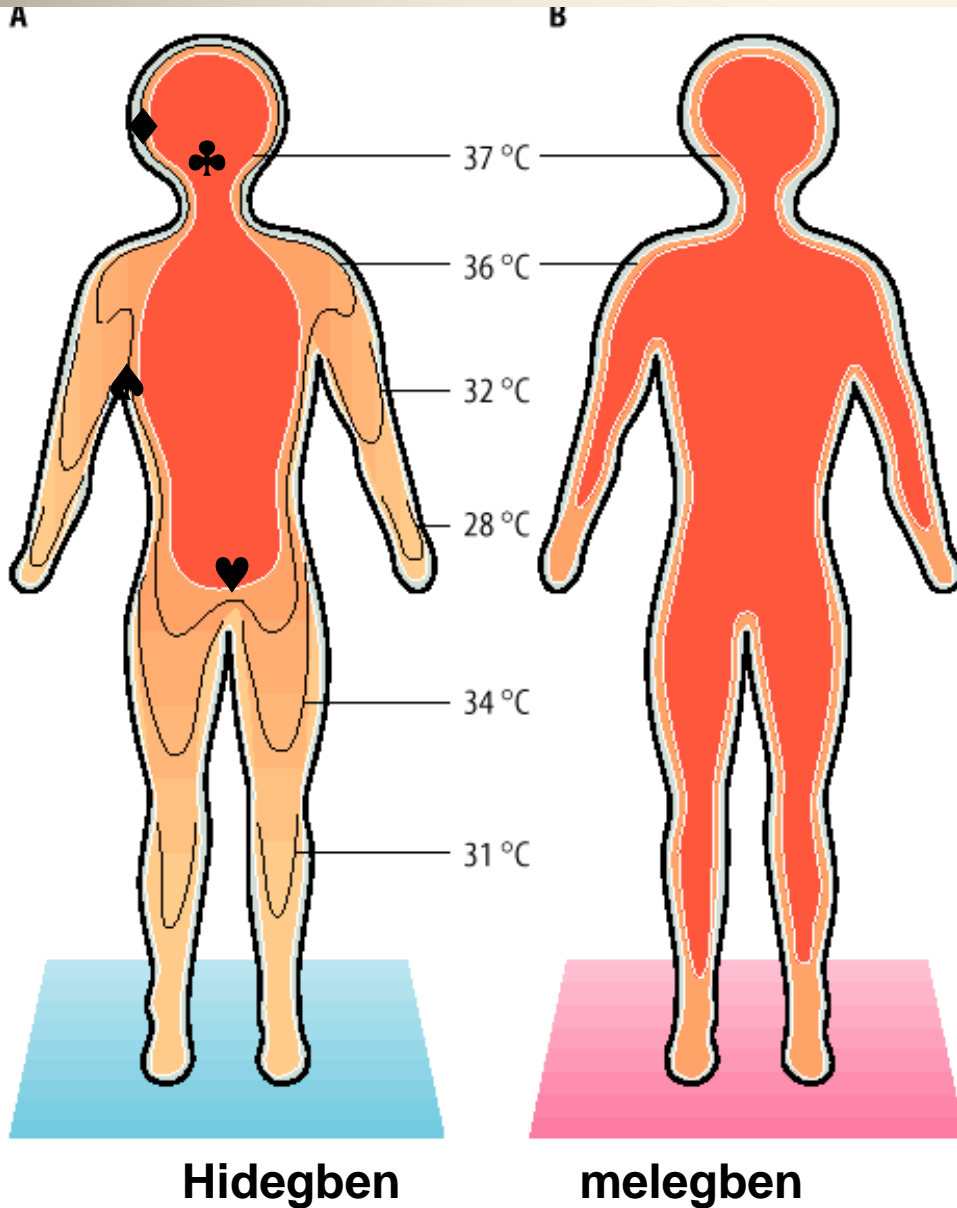
$$l_t = l_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$V_t = l_t^3 = l_0^3 [1 + \alpha(T - T_0)]^3$$

$$V_t \approx V_0 [1 + 3\alpha(T - T_0)]$$

$$V_t = V_0 [1 + \beta(T - T_0)]$$

Testhőmérséklet: Hol? Mennyi?



◆ = fül (timpanikus)

♣ = szublingvális

♥ = rektális

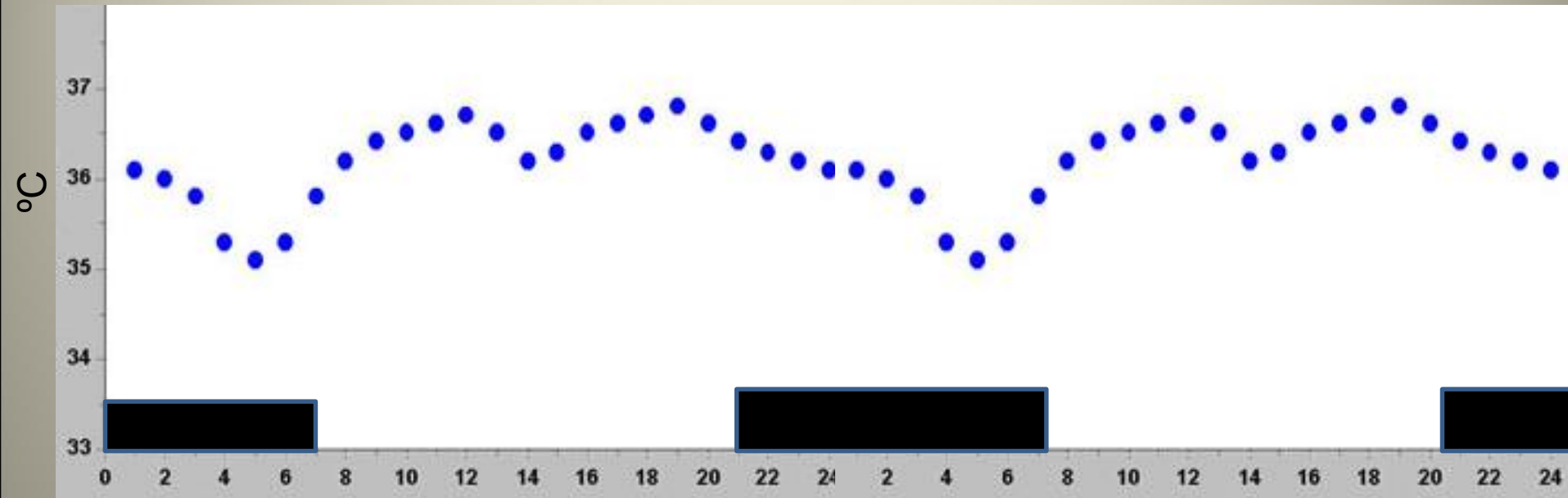
♠ = hónalj

Test „mag” és „köpeny” hőmérséklet

Csak a maghőmérséklet közel állandó!

Az emberi test hőmérséklete ciklusosan változik

maghőmérséklet



Mi befolyásolja:

fizikai aktivitás

táplálkozás (mikor, mennyit és milyen összetételben)

mentális állapot

Amikor csökken akkor : **hőleadás > hőtermelés+hőfelvétel**

Amikor nő akkor : **hőleadás < hőtermelés+hőfelvétel**

Az emberi test hőegyensúlyáról

Az **alapanyagcsere** (angolul *Basal Metabolic Rate*, **BMR**) az az energiamennyiség (kalóriákban kifejezve) amit a szervezet teljes nyugalomban, semleges környezeti hőmérsékleten (28-30 °C) élettani funkcióinak fenntartása miatt használ el (pontosabb definícióját-ill. a meghatározás módját az élettanban fogják tanulni)

Ez az energia mennyiség teszi ki a napi kalóriaszükségletünk 60-70%-át. Magában foglalja a légzés, a szívverés, az izzadás, a testhőmérséklet fenntartását, az egyéb szerveink működését, stb.

Az alapanyagcsere több tényező (nem, életkor, testösszetétel stb. függvénye)

Egy 70 kg tömegű férfi alapanyagcseréje ~1680 kcal/nap (~7030 kJ/nap)
(70 kcal/h)

Az emberi test **fajhője** 0,83 kcal/kg* °C,
esetünkben a **hőkapacitás** 70 kg*0,83 kcal/kg* °C = 58 kcal/°C,

Amennyiben nincs hőleadás, akkor az óránkénti hőmérséklet változás

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{70 \text{ kcal/h}}{58 \text{ kcal/}^\circ\text{C}} = 1,2^\circ\text{C/h}$$

Hőkapacitás

Egy rendszer **hőkapacitása** megadja, hogy mennyi hőt (Q) kell közölni a rendszerrel, hogy hőmérséklete egy kelvin fokkal ($^{\circ}\text{K}$) emelkedjék.

Jele: C , mértékegysége: J/K .

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

A **fajlagos hőkapacitás** (régi nevén fajhő), megadja, hogy mennyi hőt kell közölni egységnyi tömegű anyaggal ahhoz, hogy a hőmérséklete egy fokkal megemelkedjék. Jele: c , mértékegysége: $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Matematikailag megfogalmazva:

$$c = \frac{\Delta Q}{m * \Delta T}$$

,ahol m a rendszer tömege

Tehát 1 kg tömegű tiszta anyag hőkapacitása a fajhő, 1 mól anyagé pedig a mólhő.

A víz fajhője 20 °C-on $c = 1 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1} = 4187 \text{ J} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$

Az emberi test hőkapacitása $0,83 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$

A test összetevői szerint azonban ez inhomogén

Zsírokra = $0,51 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$

Fehérjére = $0,30 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$

Szénhidrátokra = $0,27 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$

Ásványi anyagokra = $0,20 \text{ kcal} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$

Az emberi test összetétele változik:

Sovány ember esetén: 72 % víz, 22 % fehérje, 6% ásványi anyag

Elhízott ember esetén a zsír tömeghányada akár 40-50% is lehet

Ezek alapján változik a test hőkapacitása is

Hőtermelés + hőfelvétel = hőleadás

A szervezet hőtermelése:
alapanyagcsere
+ izommunka
+ szekréción (kiválasztás)
folyamatok
stb

**Csak a hőszabályozás érdekében
termelt plusz hő**

**(akaratlan izom összehúzódás,
barna zsírszövet)**

Sugárzás

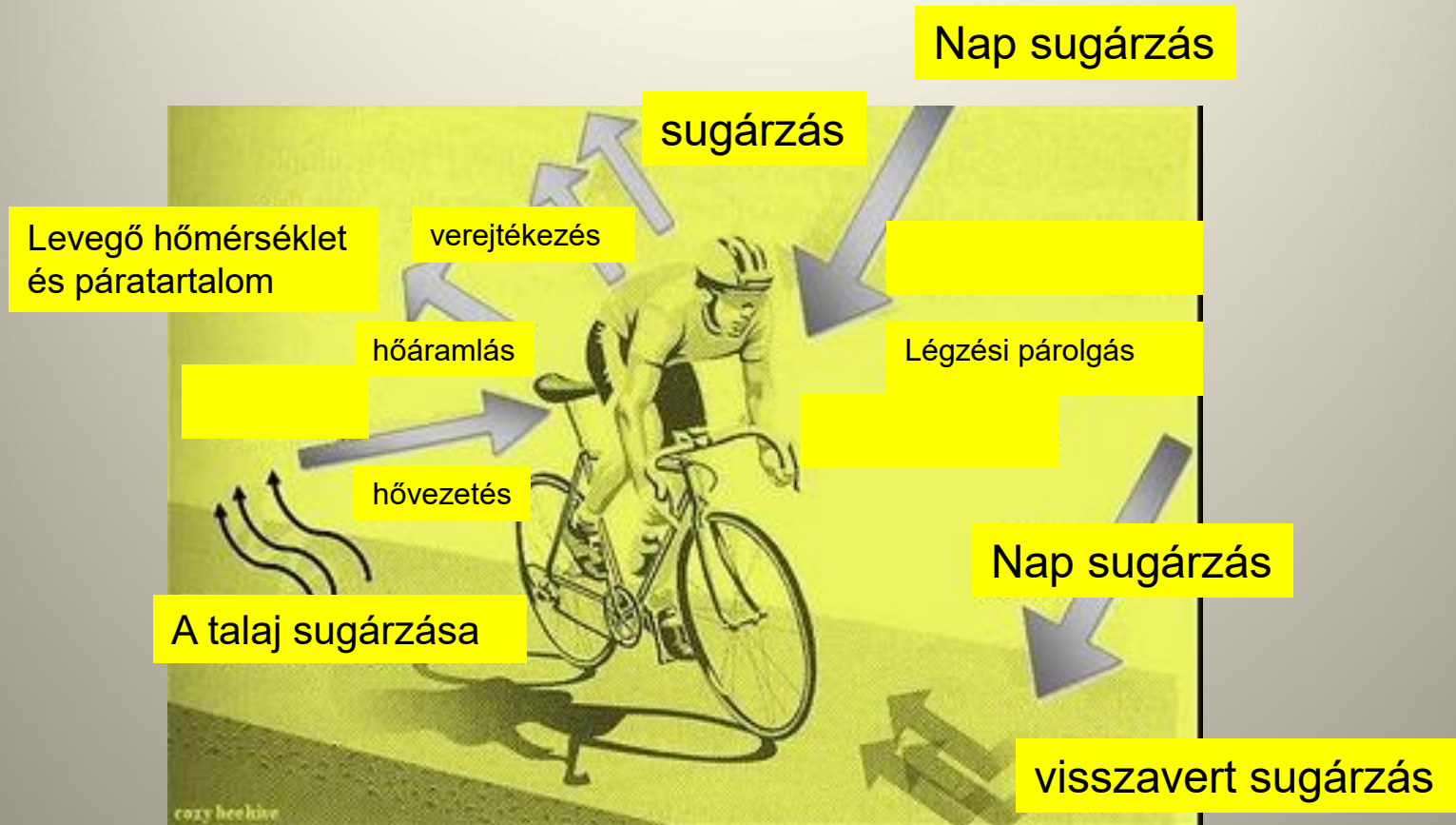
Vezetés
Áramlás

Sugárzás

Vezetés
Áramlás

Párolgás

Hővesztés és hőterhelés egyensúlya (?)



A szervezet hőháztartását számos tényező befolyásolja

Aktív hőtermelés (élettan, biokémia)- egy kicsit a fizika (izom biofizika (!!)) feladata megtanítani
Passzív hőleadás és hőterhelés (a fizika feladata megtanítani).

A hővesztés arányai

1. Sugárzás – (normál esetben 50-60 %)
2. Hőáramlás és hővezetés 25%
3. Párolgás (a bőrön keresztül) 7%
4. Párolgás (a légző rendszeren keresztül) 15%

Ezek szélsőségesen változhatnak:

hideg szél („wind chill” faktor-empirikus képletek)

hideg víz

alacsony/magas páratartalmú levegő (temperature-humidity index (THI),
empirikus képletek)

tűző napsütés

Hőszugárzás (alapfogalmak)

Közvetítő közeg („anyag”) nélküli hőterjedési jelenség-
(elektromágneses sugárzás)

Elektromágneses sugárzás: az elektromos és a mágneses térerősség
időbeni változásának tovaterjedése.

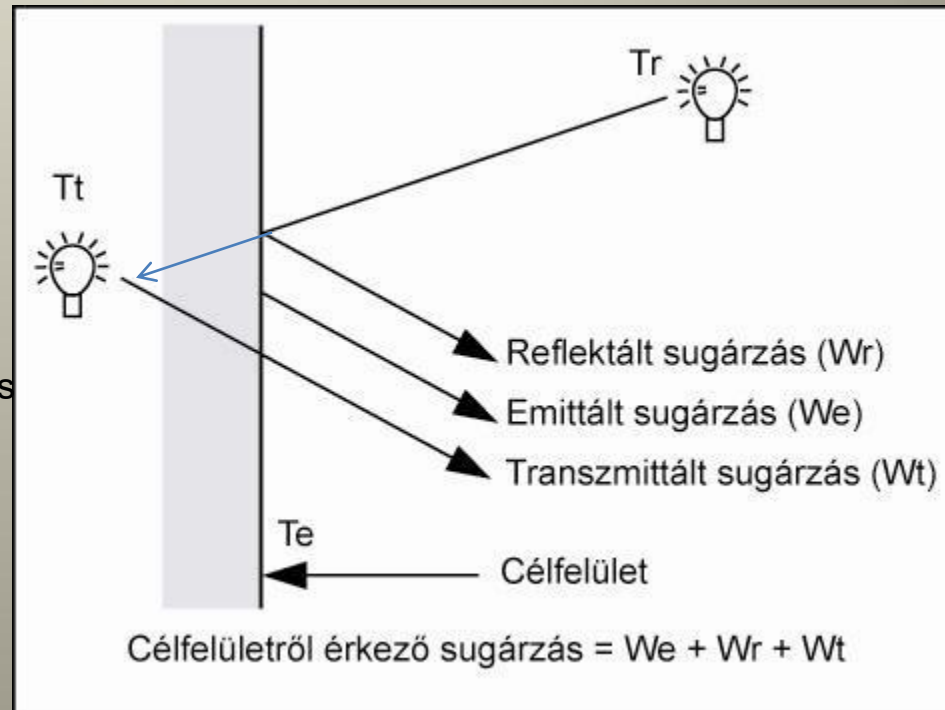
Elektromágneses hullámokat egy test részben:

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

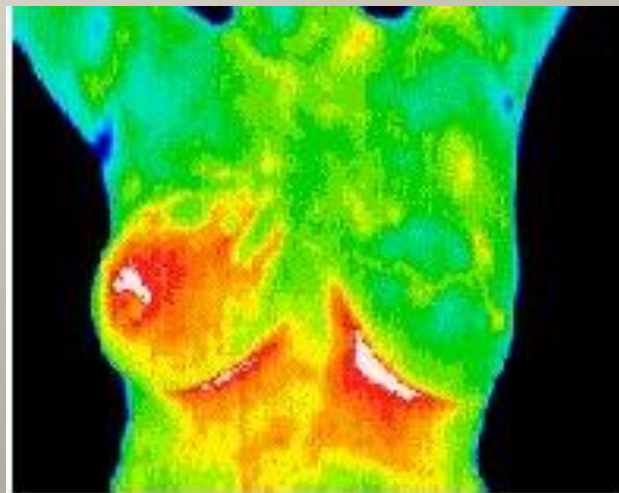
$$a + R + D = 1$$

A hőszugárzás elektromágneses hullámai - bármely más természetű hullámhoz hasonlóan – visszaverődhetnek, megtörhetnek, szóródhatnak. A sugárzó test a környezetében levő testek sugárzásának egy részét abszorbeálja, egy más részét visszaveri. Hőáramát a kibocsátott (emittált) és az elnyelt (abszorbeált) energiaáram különbségeként írhatjuk fel.

$$\Phi = \Phi_e - \Phi_a$$



Az E emisszióképességen azt az energiamennyiséget értjük, amelyet a test felületegysége az időegység alatt a $\lambda=0$ -tól $\lambda=\infty$ -ig terjedő minden hullámhosszon kisugároz. Ezen az energiamennyiségen kívül igen fontos azonban azt is ismerni, hogy különböző hőmérsékleteken hogyan oszlik meg a kisugárzott energia az egyes hullámhosszúságok függvényében.



Termográfia

Hőszugárzás

Az abszolút fekete test

Abszolút fekete test: a ráeső összes sugárzást elnyeli ($a=1$).

Az abszolút fekete test sugárzása: minden hullámhosszon végez kisugárzást (a színeképp folytonos!).

A Planck törvény

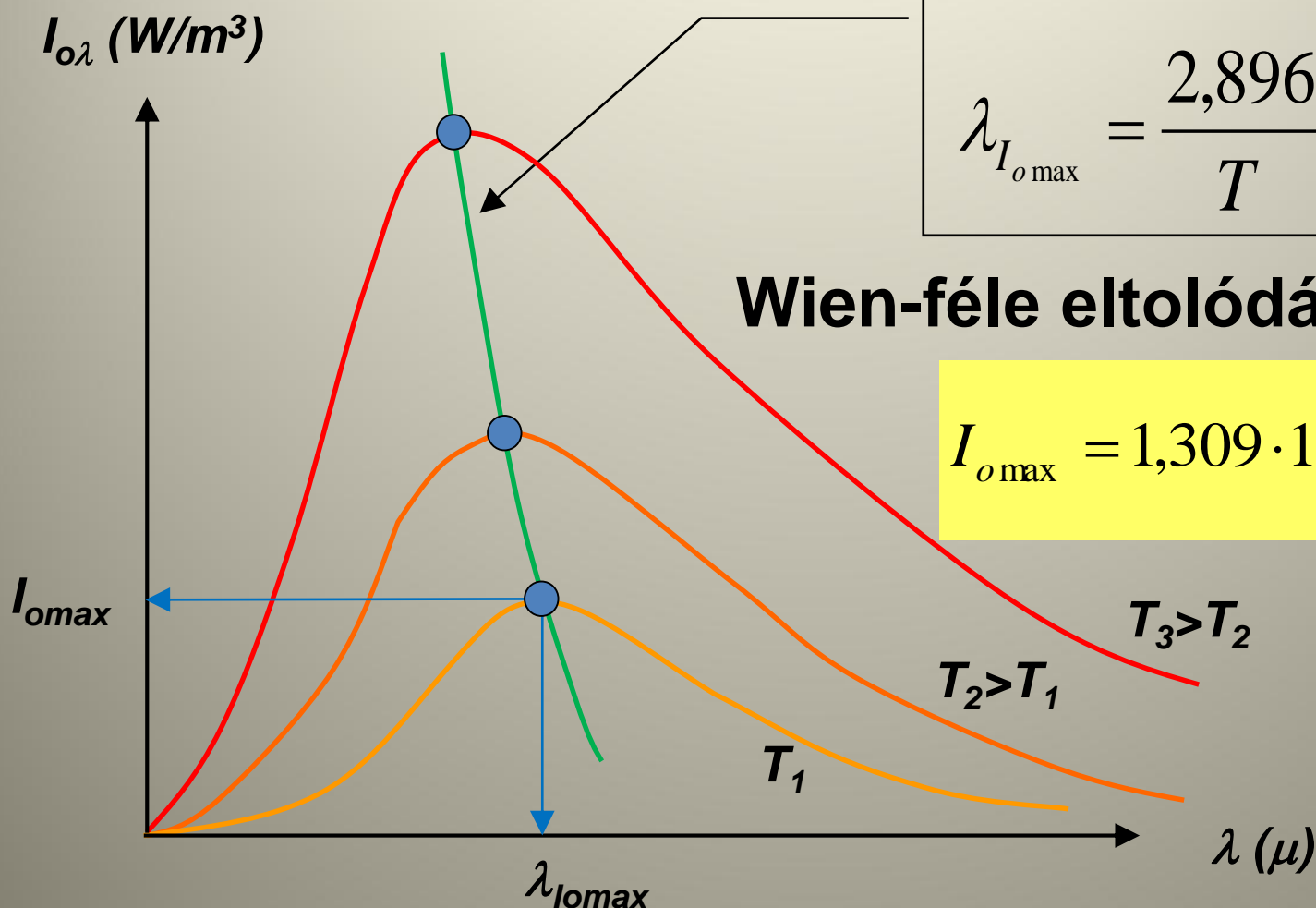
Sugárzási törvény, mely az abszolút fekete test hőmérsékleti sugárzásának hullámhossz szerinti energiaeoszlását írja le.

A ' T ' hőmérsékletű abszolút fekete test által valamely ' λ ' hullámhosszon mutatott sugárzásintenzitásról.

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

Hőszugárzás

Az abszolút fekete test



$$\lambda_{I_{o\max}} = \frac{2,896}{T} \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

Wien-féle eltolódási törvény

$$I_{o\max} = 1,309 \cdot 10^{-7} \cdot T^5 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right)$$

A hőmérséklet növekedésével a maximális sugárzás intenzitáshoz tartozó hullámhossz csökken!

Hőszugárzás

Bennünket az (is) érdekel, hogy összesen mennyi energiát sugároz ki egy test

- Stefan-Boltzmann-törvény (adott felületről, adott hőmérsékleten egységnyi idő alatt kisugárzott összes energia:
- A felületegység által kisugárzott energia (sugárzó képesség) az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával arányos

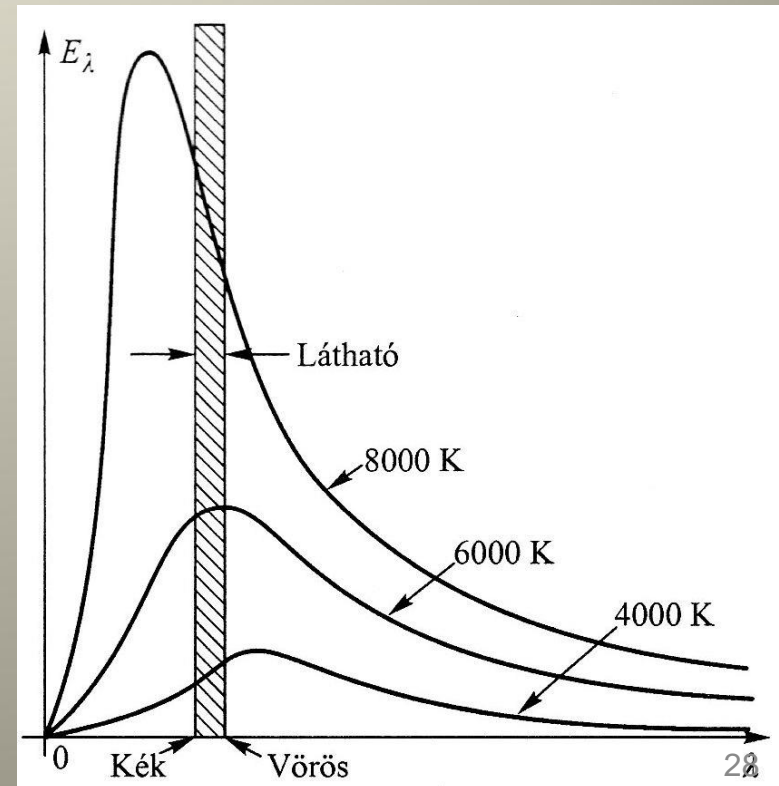
$$\frac{\Delta Q}{A \Delta \tau} = \varepsilon \sigma T^4$$

Stefan-Boltzmann állandó

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,672 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

ε a test feketeségi foka,

Mi általában ezt 1-hez közelinek vehetjük



A test nem csak sugároz, hanem el is nyeli a ráeső elektromágneses hullámokat
Ennek megfelelően a leadott és nyert hő különbsége adja a hőterhelés nagyságát

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \varepsilon \sigma A (T_2^4 - T_1^4)$$

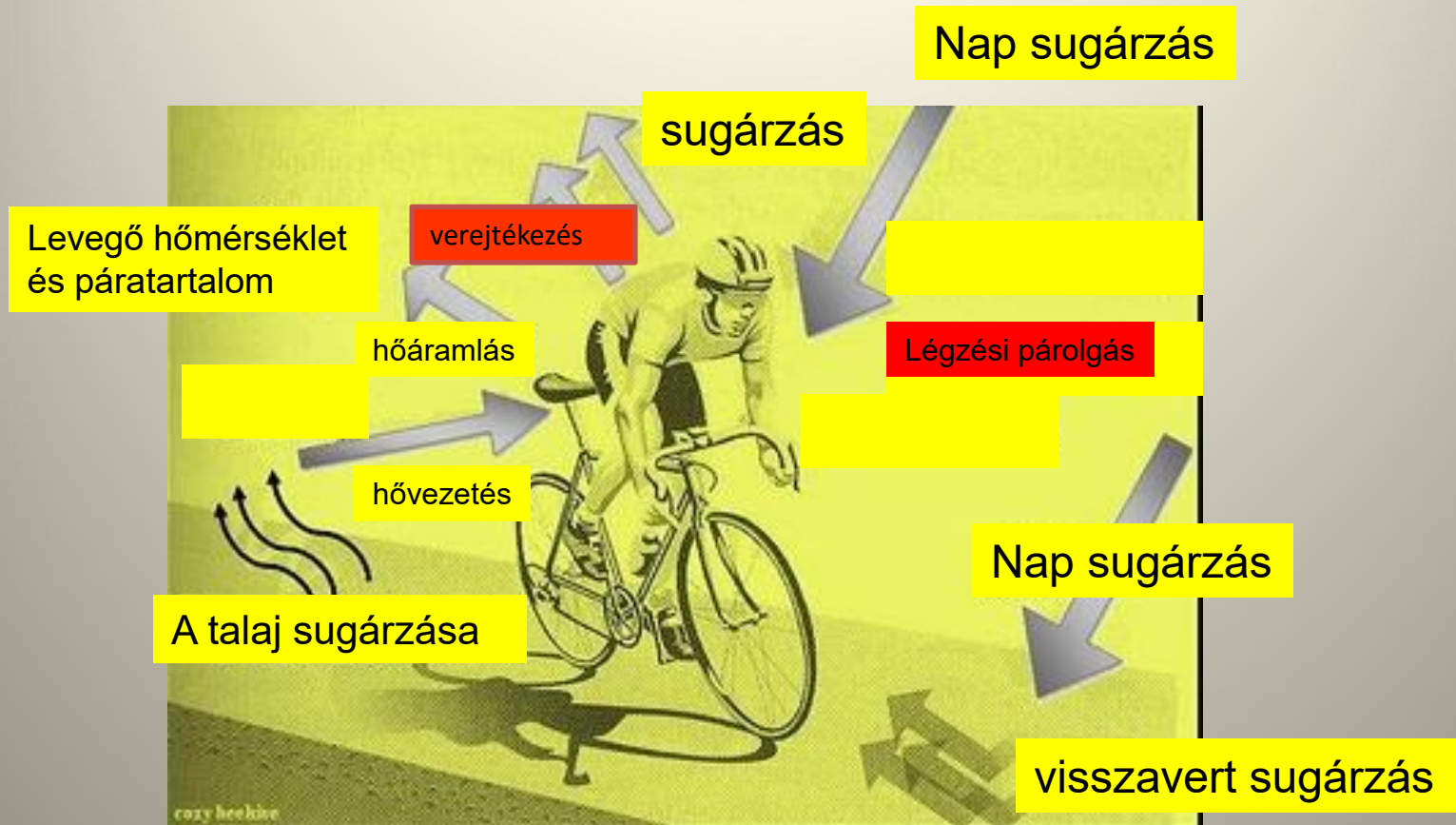
Szürke test – Szürke sugárzás

- A sugárzása minden hullámhosszon folytonos.
- A sugárzásintenzitása (I) minden hullámhosszon az abszolút fekete test sugárzásintenzitásának ' ε ' szorosa.
- a szürke test feketeségi foka (ε), mindig kisebb mint 1.

Egy ember által sugárzással veszített hő

- Testfelület $A = 1,85 \text{ m}^2$
- Bőrhőmérséklet $34 \text{ }^\circ\text{C}$ ($307 \text{ }^\circ\text{K}$)
- $\Delta Q / \Delta t = (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4) \cdot (307 \text{ K})^4 \cdot 1,85 \text{ m}^2 = 932 \text{ W}$, amennyiben igaz, hogy a 70 kg -os férfi fajhője $0,83 \text{ kcal/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, akkor a hőkapacitás $58 \text{ kcal/}^\circ\text{C} = 242,8 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$
- Egy óra alatt a veszített energia $Q = 932 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3355200 \text{ Ws} = 3355,20 \text{ kJ}$,
- azaz egyenletes lehűlés mellett $13,81 \text{ }^\circ\text{C}$ csökkenne a testhőmérséklet óránként
- Viszont: a $24 \text{ }^\circ\text{C}$ -os falak is sugároznak (hogyan mekkora felületen?)
- (végig számolva 816 W -tal), így a leadott hő teljesítménye csak 116 W , tehát a lehűlés üteme $\sim 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Hővesztés és hőterhelés egyensúlya (?)



A párolgás

A párolgás fizikai folyamat, amikor a folyadék cseppfolyós halmazállapotú részecskéi kilépnek a folyadéktérből és gáznemű állapotban belépnek a folyadékteret környező légtérbe.

A légtér - a párafellevő rendszer - által maximálisan felvehető páramennyiség a potenciális párolgás. A tényleges párolgás mértéke soha sem nagyobb, mint a potenciális párolgásé.

A párolgási hő

Egységnyi mennyiségű anyag állandó hőmérsékleten történő elpárolgtatásához szükséges energia .

Mértékegysége a J/mol vagy a J/kg.

(Előző a moláris párolgáshő, az utóbbi a fajlagos párolgáshő mértékegysége.)

- Hasonlóan a fajhőhöz a víz párolgáshője is igen nagy. Ennek oka a víz molekulaszervezetében keresendő. A hidrogénkötések miatt nagy energia szükséges a molekulák kilépéséhez a klaszterszerkezetből.
- **A víz fajlagos párolgáshője 2250 kJ/kg (540 kcal/kg)**
- A víz nagy az élő szervezetben is fontos szerepet játszik a párolgáshője miatt.
- Szervezetünk hőháztartásában a víz nagy párolgáshője miatt kap szerepet, hiszen 1 g víz elpárolgtatása bőrünkön keresztül ~ 2 kJ energiát von el.
- Számolják ki, hogy 500 ml víz elpárolgtatása mekkora hőveszteséggel jár!

A páratartalom is meghatározza a hőérzetet

Abszolút páratartalom:

1 m³ levegőben hány gramm pára van.

Sok esetben nem használható, mert más a következménye 20 g víznek 20 °C-os levegőben és más 0 °C-osban.

Telített levegő:

pára formájában több vizet már nem tud befogadni. Ha növelni próbálnánk a páratartalmat, akkor a többlet már cseppfolyós halmazállapotban kiválna. A meleg levegő több pátát tud befogadni, tehát csak nagyobb abszolút páratartalomnál válik telítetté, mint a hideg.

Relatív páratartalom:

A telített levegő relatív páratartalma 100%. A relatív páratartalom azt adja meg, hogy az adott hőmérsékletű levegő a telített állapothoz képest hány százalék vizet tartalmaz.

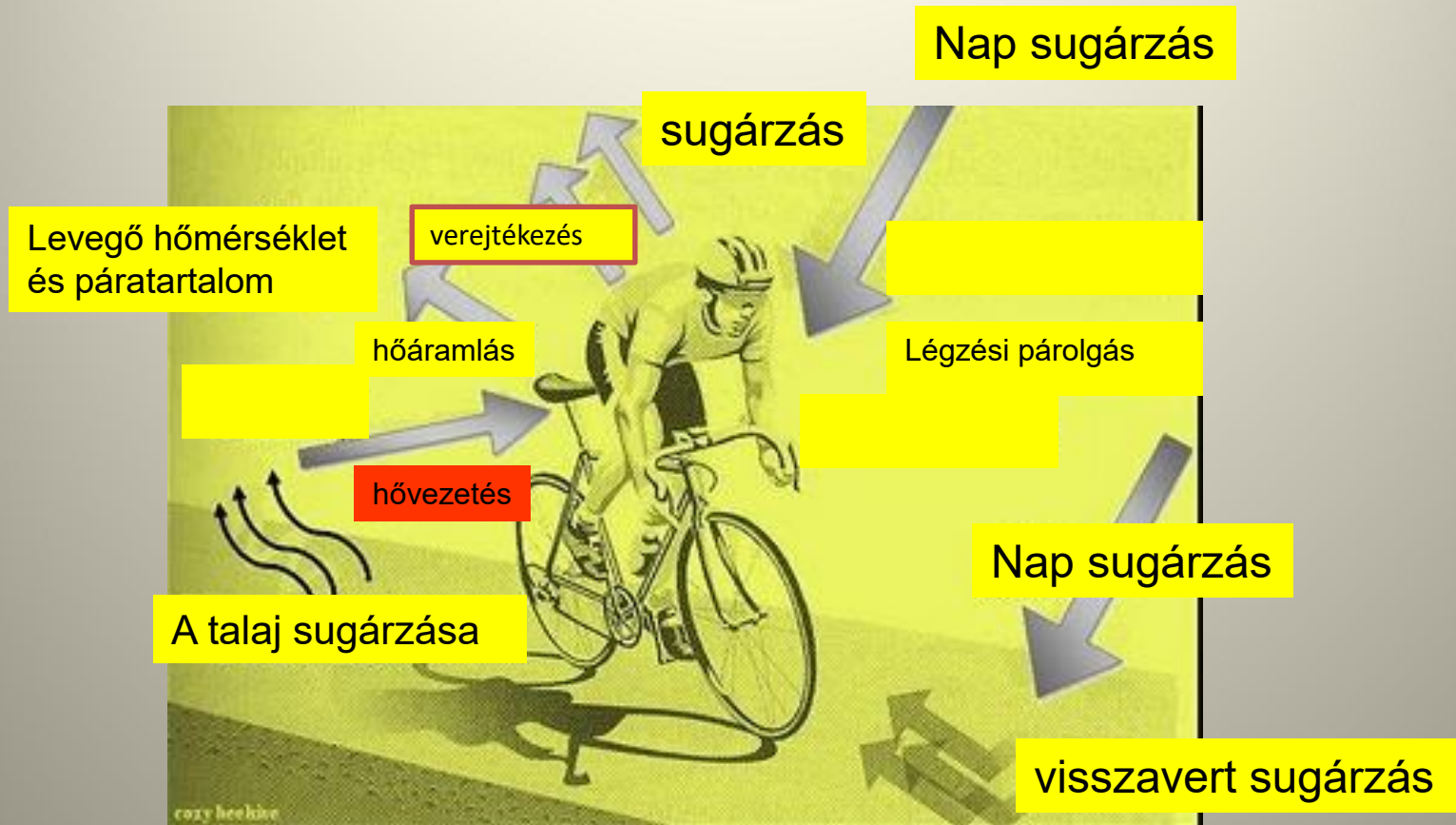
Pl. 1) 20 °C levegő tartalmaz 20 g vizet köbméterenként, ezzel telített. Ekkor abszolút páratartalma 20g/m³, relatív páratartalma 100%. 2) 20 °C levegő tartalmaz 10 g/m³ vizet. Ekkor nem telített. Abszolút páratartalma 10 g/m³. Relatív páratartalom = abszolút páratartalom/telítettség esetén fennálló abszolút páratartalom esetünkben

$10/20=0,5$, százalékban 50%.

Szauna: nagyobb a páráság - nagyobb a hőérzet



Hővesztés és hőterhelés egyensúlya (?)



A hővezetés

hővezetés a hőterjedésnek olyan formája, amikor az anyag részecskéi nem mozdulnak el egyensúlyi helyzetükről makroszkopikus mértékben

hőenergia hatására nő a részecskék rezgőmozgásának energiája.

nő a rezgés amplitúdója

A belső erők közvetítésével az energia továbbterjed.

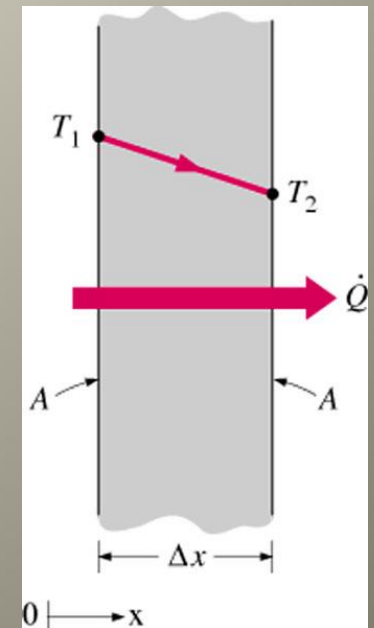
A hővezetést meghatározza

1. Az anyag geometriája
2. A vastagság
3. A anyag hővezető képességének jellemzői
4. Hőmérséklet különbség

A pl. hőenergia áramlását egy hasábon a hőmérséklet különbség, a hőáramlásban résztvevő felületek nagysága, a falvastagság, valamint az anyag hővezető képessége határozza meg.

A hőenergia áramlási sebessége

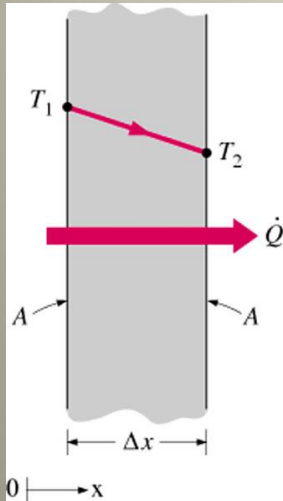
$$\frac{(\text{felület}) \times (\text{hőmérséklet különbség})}{\text{falvastagság}}$$



$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

k: az anyag hővezetőképessége

Fourier hővezetési törvénye



$$\Delta x \rightarrow 0$$

dT / dx : a hőmérsékleti gradiens

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

(negatív, ha a x növekedése mellett a hőmérséklet csökken x)

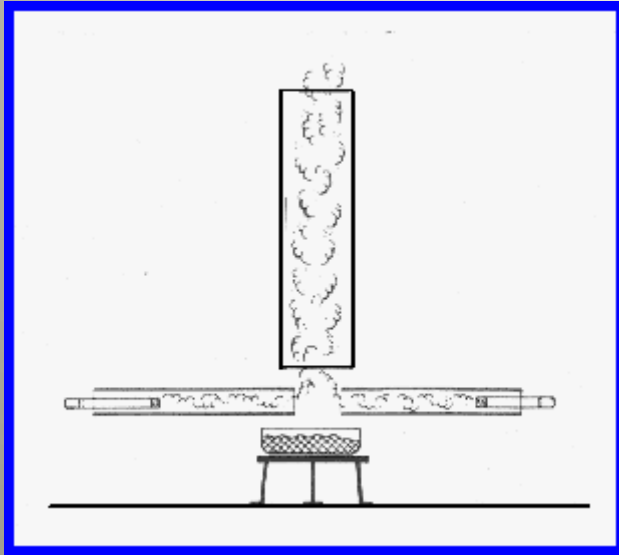
A hő a magasabb hőmérséklet felől az alacsonyabb felé áramlik. Az A a hőáramlásra merőleges felület.

Hűtőfürdő

A leggyakrabban alkalmazott fizikai lázcsillapító módszer. A fizikai lázcsillapító módszerek lényege a fölösleges hő minél nagyobb felületen történő elvezetése (kis hőmérséklet különbség mellett is sok hő vonható el) a testtől.

Hajókatasztrófák

Hőáramlás



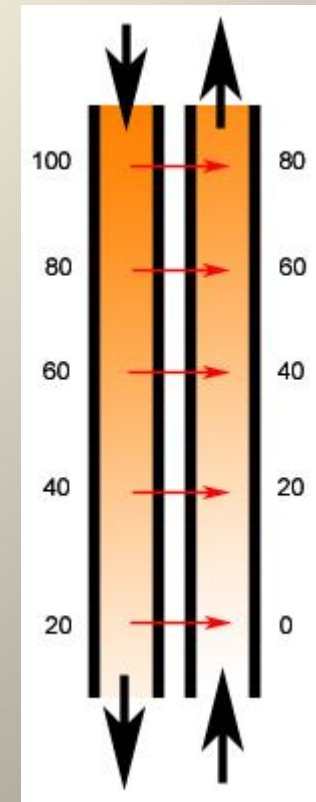
Hőáramlás során az anyag elmozdul a melegebb tartományból a hidegebb rész felé

Hőáramlás (konvekció) csak folyadékokban és gázokban alakul ki

A gravitációs mezőben létrejövő konvekció oka a Hőmérsékletkülönbség hatására bekövetkező sűrűség-különbség.

Egyébként valamilyen pumpa mechanizmusnak kell fenntartania az áramlást

Ellenáramlásos hőcserélő mechanizmus



A hőkonzerválás az emberi szervezetre is jellemző
-párhuzamosan futó artériák és vénák a végtagokban

A hőtan főtételei

- **1. főtétele:**
- Egy hőtani rendszer belső energiájának megváltozása egyenlő a vele közölt hő és a környezet által rajta végzett munka összegével.
- Ez az általános energia-megmaradás elve: környezetétől elszigetelt rendszerben, bármilyen folyamatok is mennek végbe a rendszeren belül, az energiák összege állandó.

- **2. főtétele:**
- Nem lehetségesek olyan körfolyamatok, amelyeknek egyetlen eredménye az, hogy egy hőtartályból felvett hővel egyenlő értékű munkavégzés történjék.
- Nem lehetségesek olyan folyamatok, amelyek egyetlen eredménye az, hogy a hidegebb test hőt ad át a melegebb testnek. A hő magától csak a melegebb helyről a hidegebbre mehet át: a természetben a spontán folyamatok iránya olyan, hogy a hőmérséklet-különbségek kiegyenlítődnek.
- Zárt rendszerben a spontán (önmaguktól lezajló) folyamatok olyan módon mennek végbe, hogy a rendszer entrópiája növekedjen.

- **3. főtétele:**
- Abszolút zérus fokhoz (0 K) közeledve a kémiaiilag egységes anyagok entrópiája zérushoz tart.
- Ennek következménye, hogy az abszolút zérus fokhoz közeledve az anyagok fajhője zérushoz tart.
- A termodinamika III. főtételeének más megfogalmazása: az abszolút zérus fok véges számú lépésben nem érhető el.

- **0. főtétele**
- mely szerint, ha két test külön-külön hőegyensúlyban van egy harmadik testtel, akkor egymással is hőegyensúlyban vannak

Energiaváltozás(ΔE) = Hőközlés(Q) + Munkavégzés(W)

Megállapodásszerűen az előjelet a rendszer szempontjából nézve szokás megadni. Pozitív az (az energiacsere közben végzett munka, vagy hő) előjele, ha azt a vizsgált rendszer kapja, negatív pedig abban az esetben, ha leadja.

Az I. főtétel szerint, ha egy folyamat állandó térfogaton megy végbe, és nem végez munkát, akkor a belső energia megváltozása egyenlő a hővel, vagyis

$$\Delta E = \Delta U = Q .$$