

# Biofizika-2

## Transzportfolyamatok-2: diffúzió, ozmózis

2025-04-03

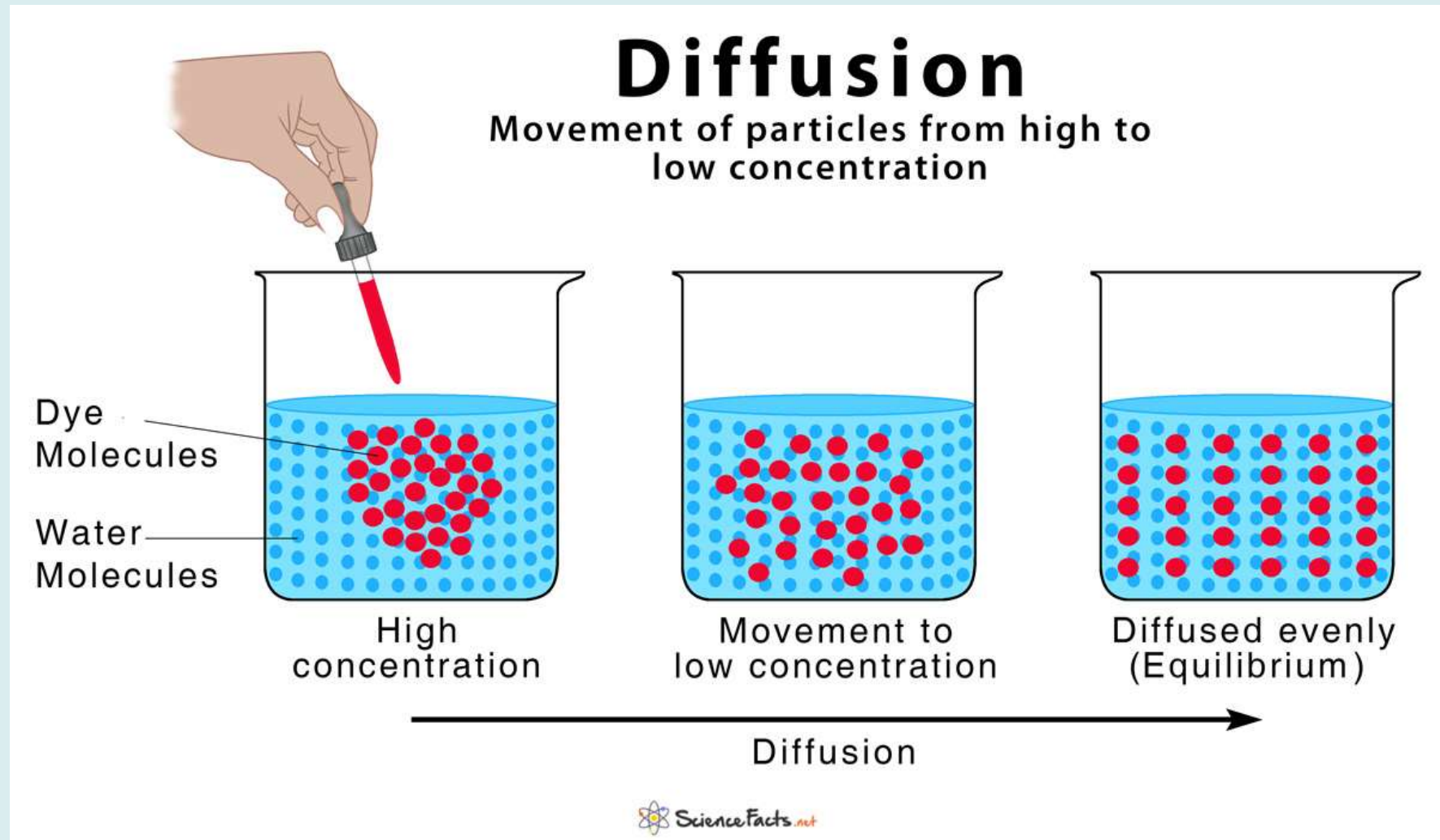
Varga Andrea

Diffúzió = anyagáramlás, amelynek során a részecskék betöltik a rendelkezésükre álló folyadék- vagy gázteret.

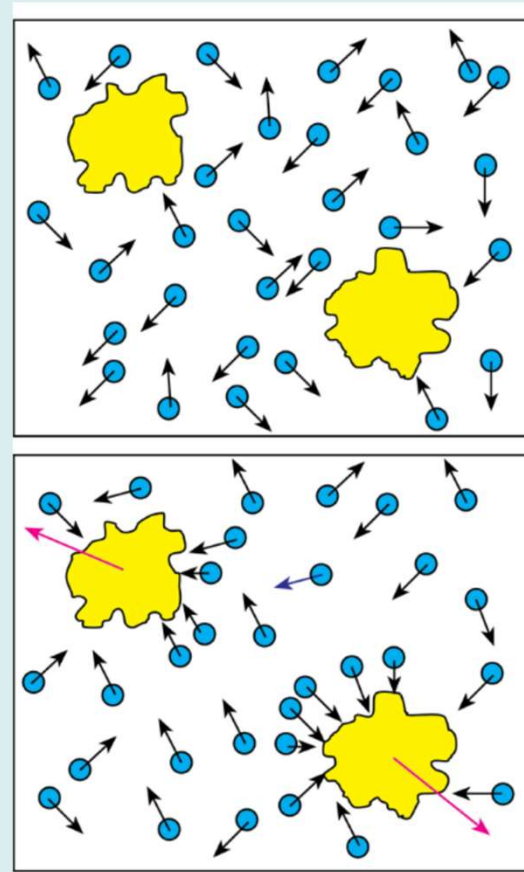
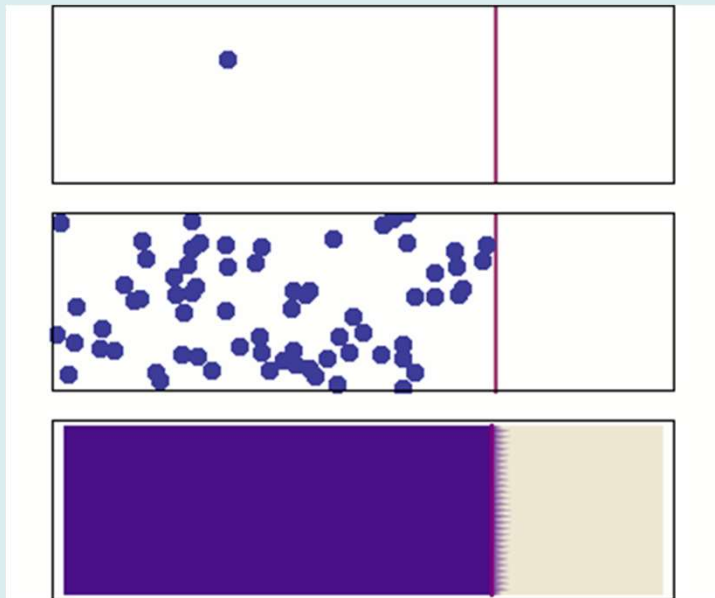
A diffúziós folyamat addig tart, amíg a kezdeti koncentráció-különbség kiegyenlítődik, a részecskék egyenletesen eloszlanak.



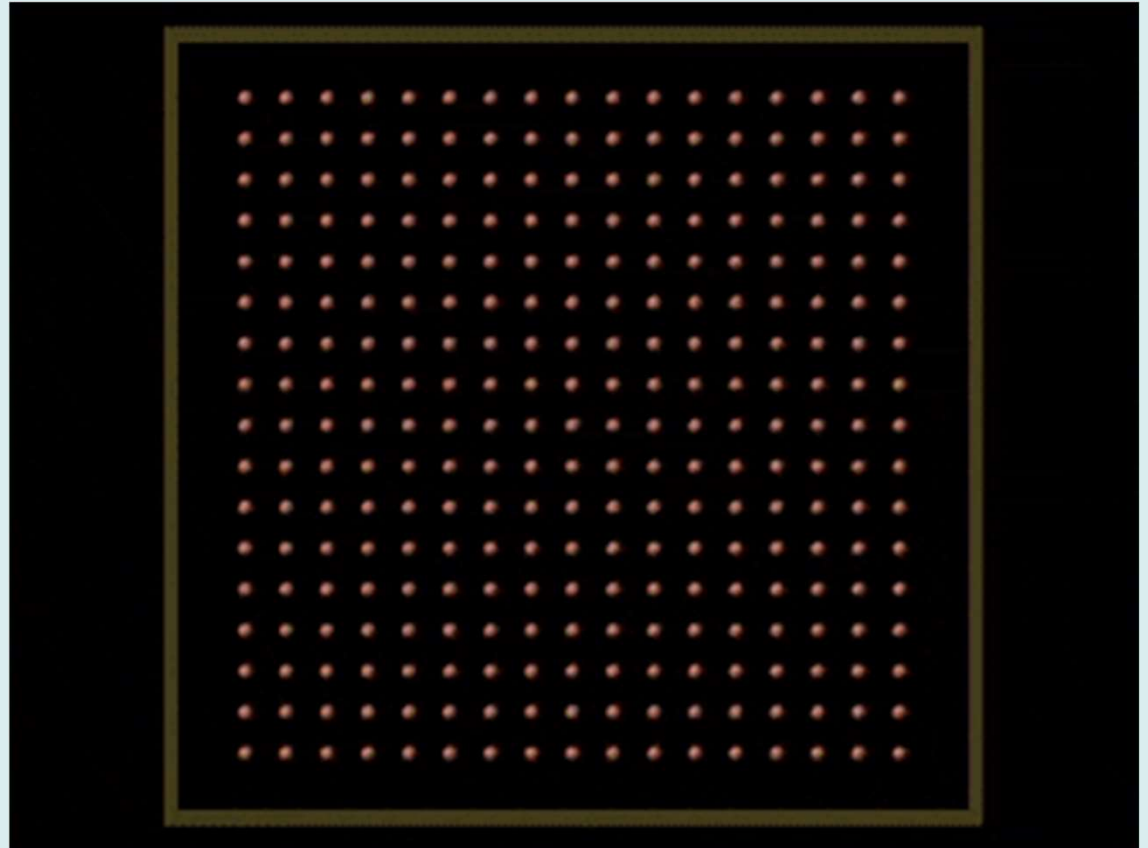
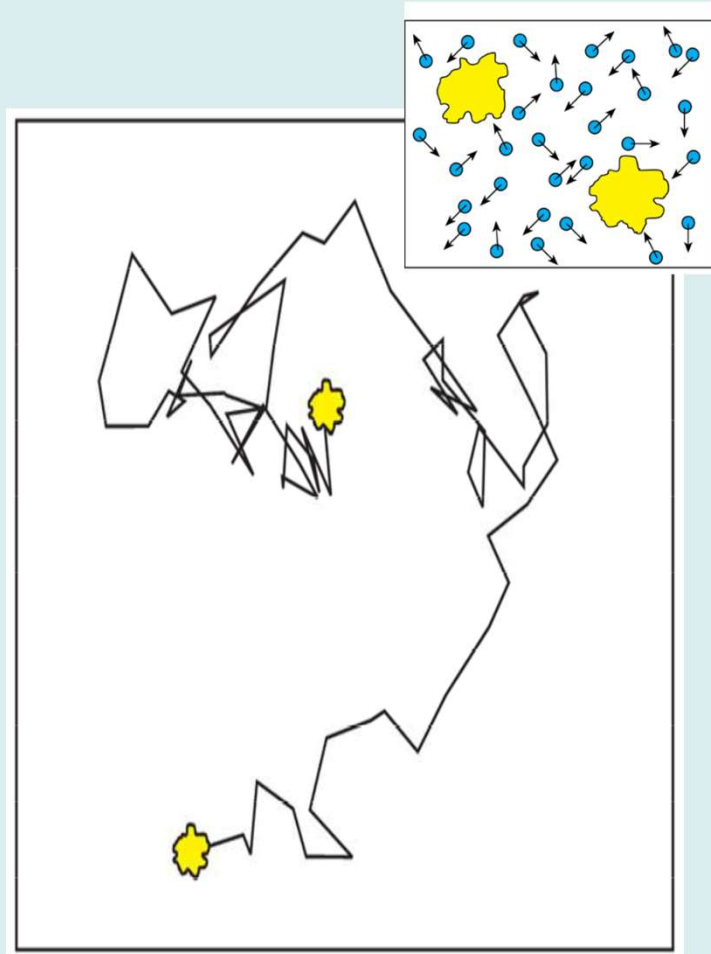
A diffúziós folyamat addig tart, amíg a kezdeti koncentrációkülönbség kiegyenlítődik, a részecskék egyenletesen eloszlanak.



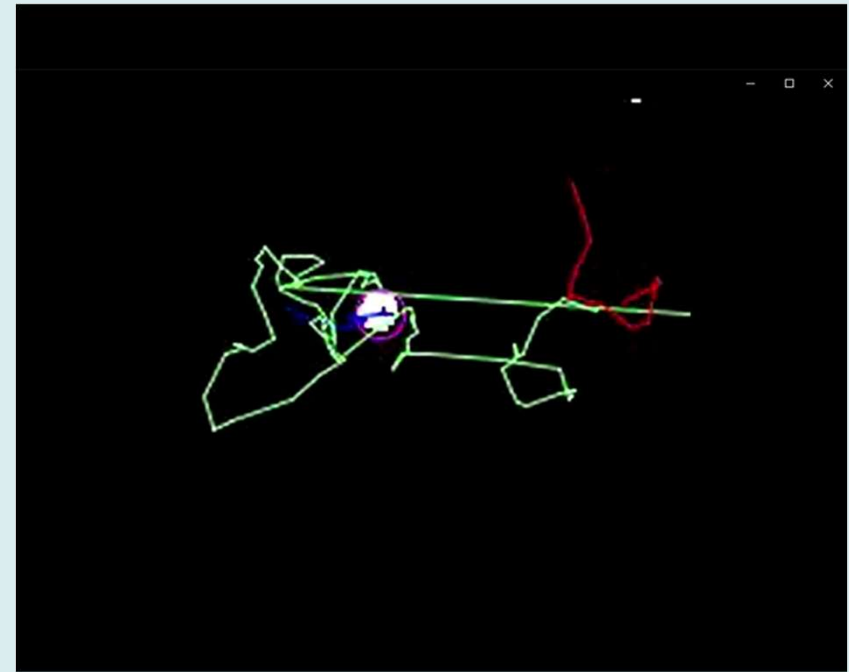
A részecskék a hőmozgás következtében egymástól függetlenül, rendezetlenül mozognak, ütköznek. Ezt a zegzugos, rendezetlen mozgást megfigyelhetjük gázokban vagy folyadékokban szuszpendált részecskéken: **Brown-mozgás** (Robert Brown skót botanikus – pollen szuszpenzió mikroszkópos vizsgálata, 1827).



# Véletlen bolyongás – a Brown-mozgás modellje



# Véletlen bolyongás – a Brown-mozgás modellje

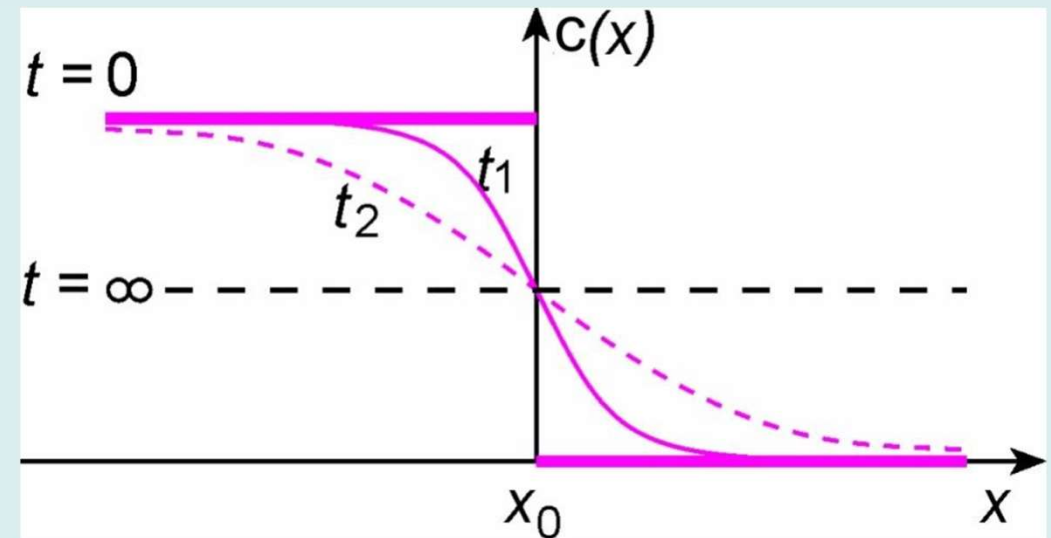
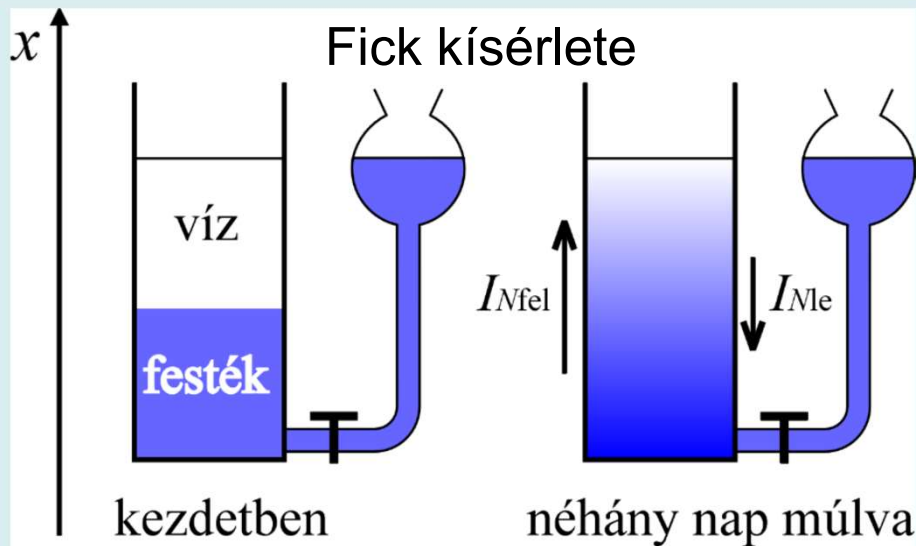


Makroszkopikus modell házilag: mákszemek rázatva =  
oldószer, műanyag hab golyócska a mákon = szuszpendált  
részeske

# Diffúzió = anyagáramlás

Anyag-áramerősség:  $I_v = \frac{\Delta v}{\Delta t}; \left[ \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$

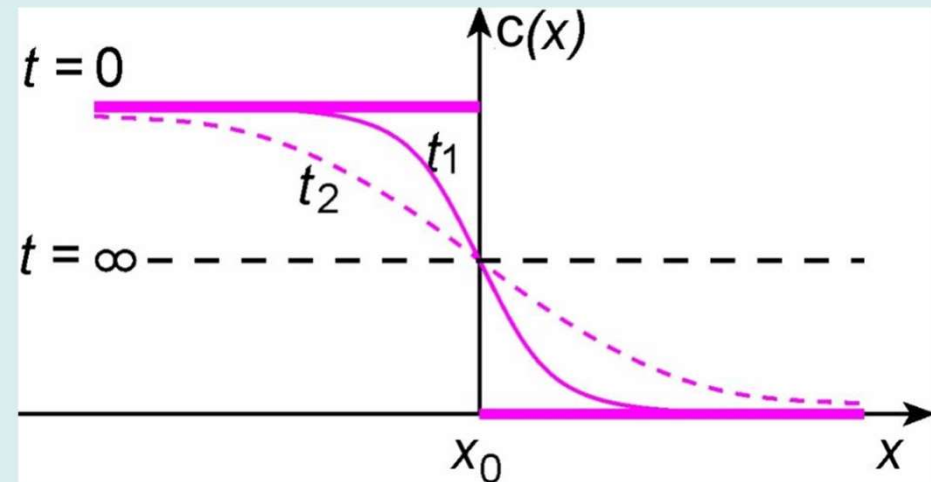
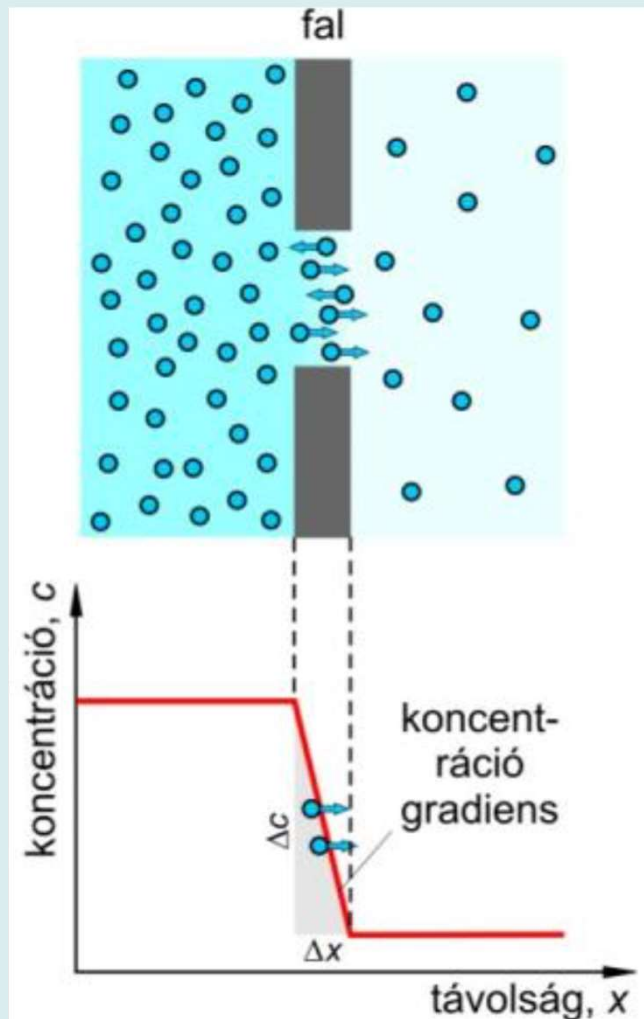
Anyag-áramsűrűség:  $J_v = \frac{\Delta I_v}{\Delta A}; \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$





# Fick I. törvénye

Anyagáramlás mindig a magasabb koncentrációjú helyről az alacsonyabb koncentrációjú hely felé – statisztikus hatás!

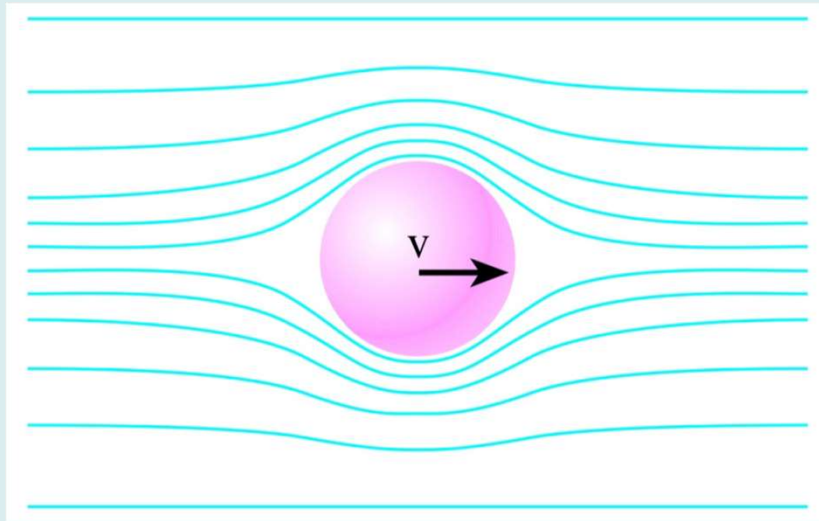


$$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

Az anyagáram-sűrűség egyenesen arányos a koncentráció-grádienssel.  
[D] = m<sup>2</sup>/s



# Gömb-alakú részecskék diffúziós együtthatója: Einstein-Stokes összefüggés



$$D = u \cdot kT$$

$u = v/F$  (mobilitás)  
és gömbre  
 $F = 6\pi\eta r v$  (Stokes)

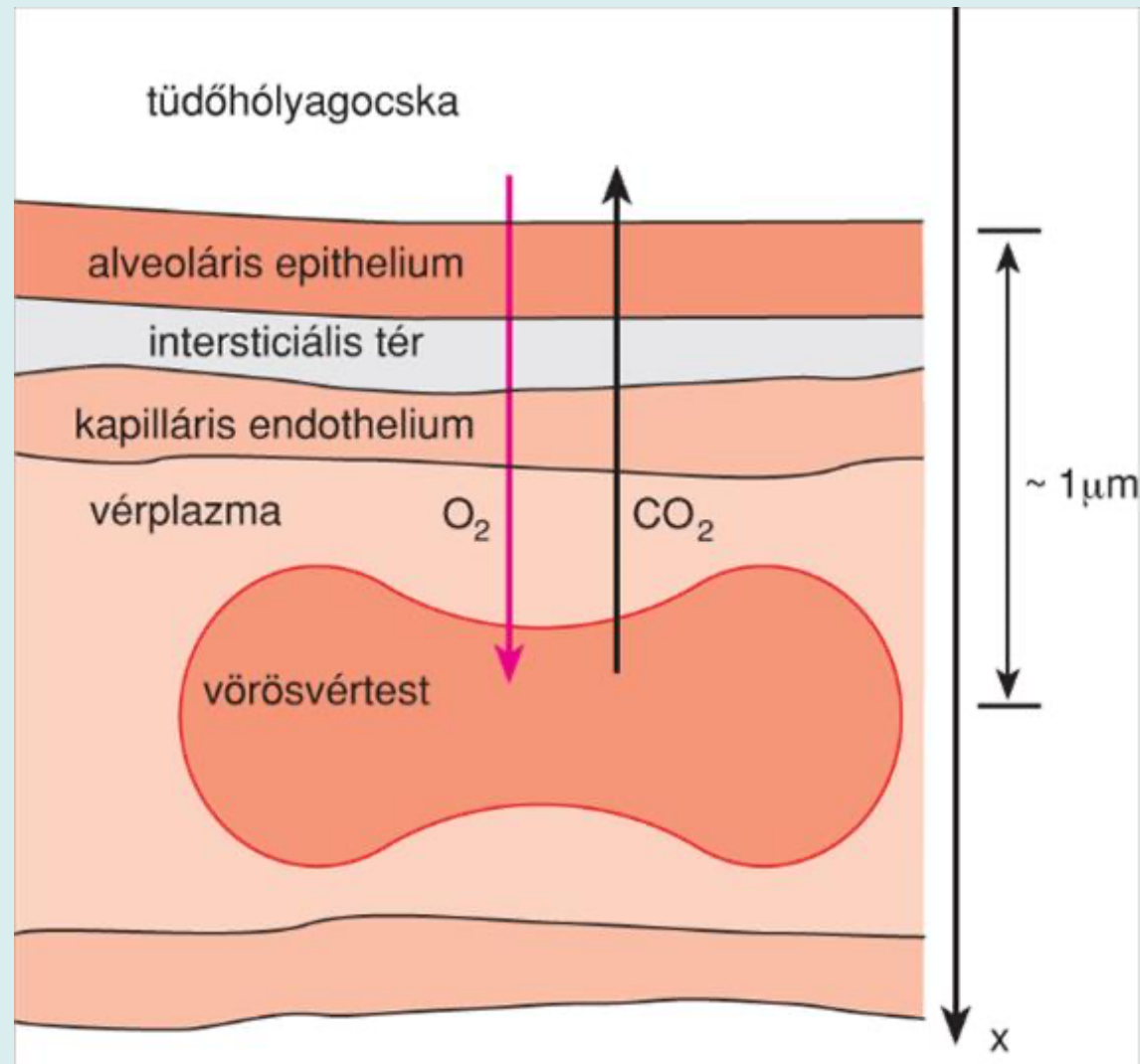
$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$$

nemlineáris hőmérsékletfüggés!

# Néhány anyag diffúziós állandója

diffundáló részecske (molekulatömeg)	közeg	$D$ (m <sup>2</sup> /s)
H <sub>2</sub> (2)	levegő	$6,4 \cdot 10^{-5}$
O <sub>2</sub> (32)	levegő	$2 \cdot 10^{-5}$
CO <sub>2</sub> (44)	levegő	$1,8 \cdot 10^{-5}$
H <sub>2</sub> O (18)	víz	$2,2 \cdot 10^{-9}$
O <sub>2</sub> (32)	víz	$1,9 \cdot 10^{-9}$
glicin (75)	víz	$0,9 \cdot 10^{-9}$
szérum albumin (69 000)	víz	$6 \cdot 10^{-11}$
tropomiozin (93 000)	víz	$2,2 \cdot 10^{-11}$
dohánymozaik vírus (40 000 000)	víz	$4,6 \cdot 10^{-12}$

# Megvalósulhat-e diffúzióval a gázcsere?



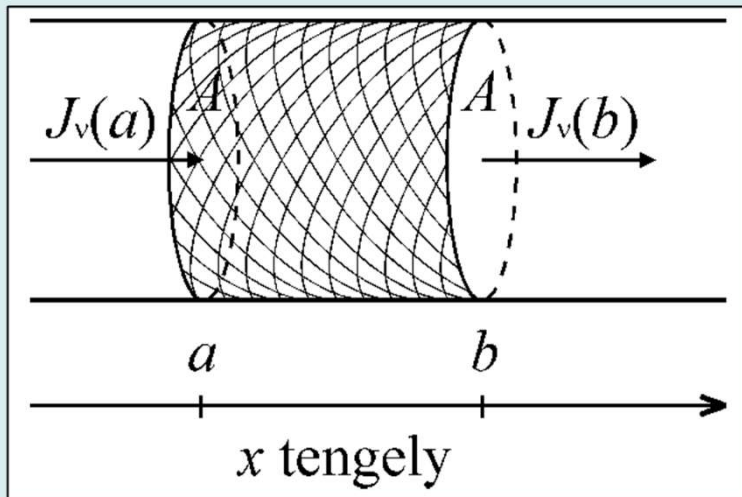
$$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

$D(O_2) \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D(CO_2) \sim 6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  
vörösvértest átlagos tartózkodási ideje a tüdő kapillárisaiban  $\sim 0,5 \text{ s}$

# Milyen gyors a diffúziós anyagtranszport?

## Általánosított kontinuitási egyenlet.

$$J_v(a)A\Delta t - J_v(b)A\Delta t = 0$$



Ha  $J_v(a) > J_v(b)$   
akkor több részecske lép be az  
adott térfogatba, mint amennyi  
kilép.

Ez a többlet anyagmennyiség  
az adott térfogatban a  $c$   
koncentrációt fogja növelni.

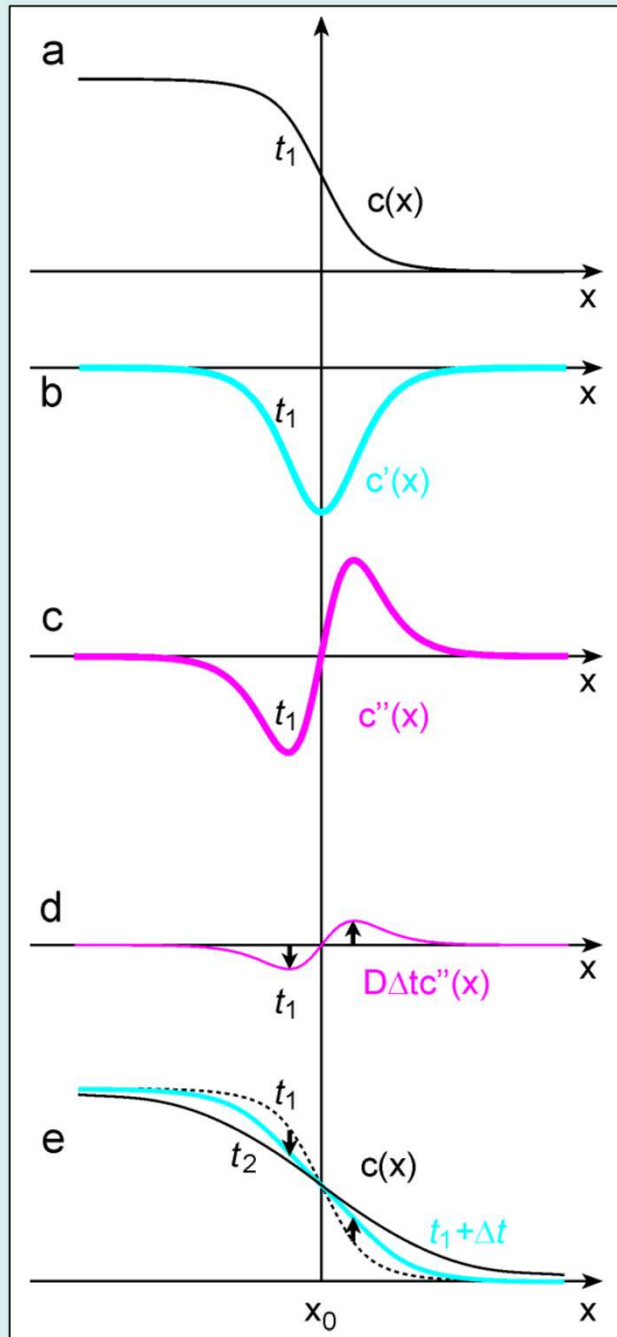
$$c = \frac{\Delta v}{\Delta V}$$

Legyen  $a = x$  és  $b = x + \Delta x$  két közeli hely az  $x$  tengely mentén.

$$[J_v(x) - J_v(x + \Delta x)]A\Delta t = [c(t + \Delta t) - c(t)]A\Delta x \quad A\Delta x = \Delta V$$

$$-\frac{\Delta J_v}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

# Fick II. törvénye



$$-\frac{\Delta J_v}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

$$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

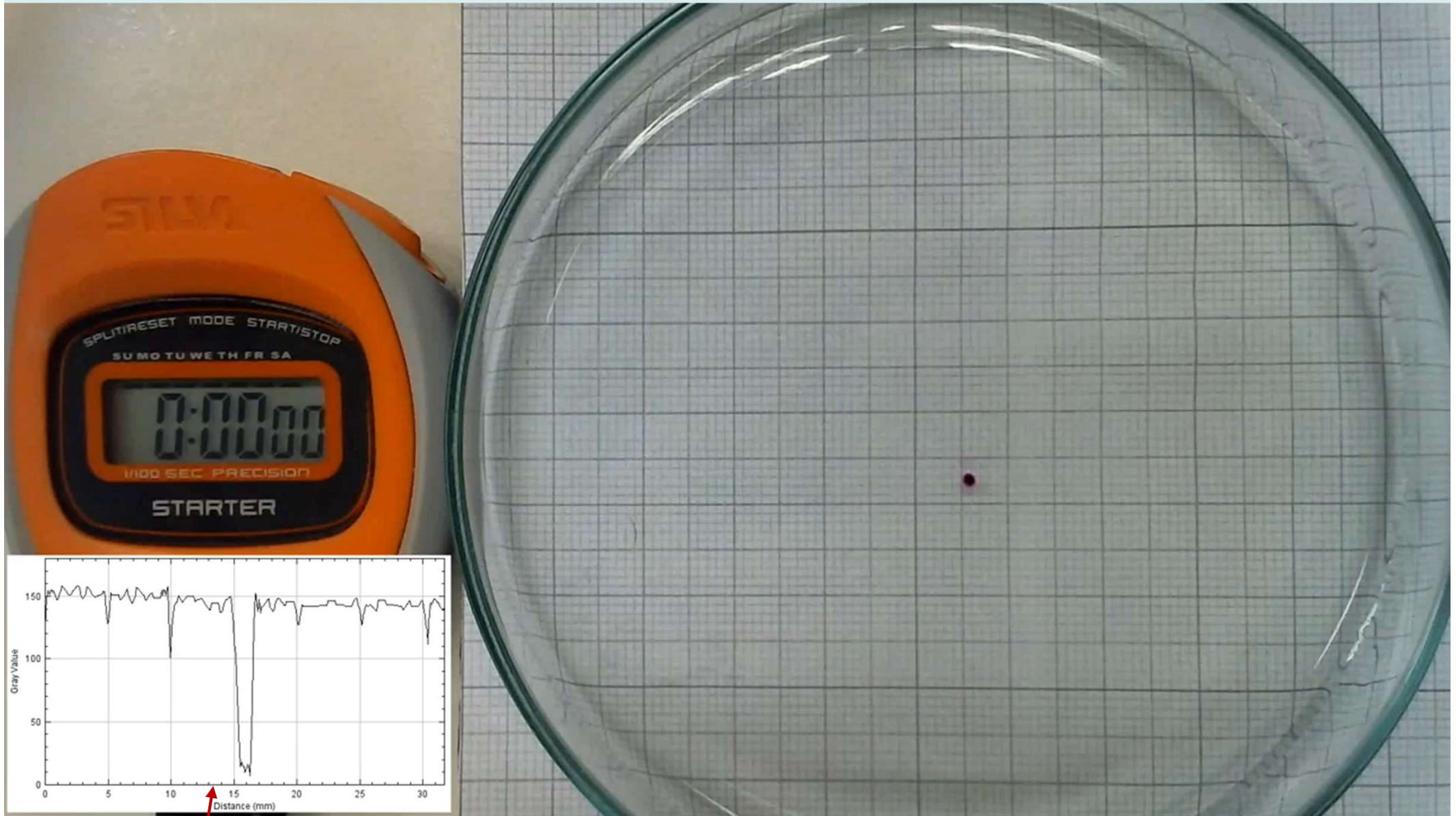
$$D \frac{\Delta \left( \frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

Értelmezés:

$$c(t) + D\Delta t \frac{\Delta \left( \frac{\Delta c}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = c(t + \Delta t)$$

$$c(t) + c'' D\Delta t = c(t + \Delta t)$$

# Sorozatfelvétel (time-laps) kálium-permanganát diffúziójáról



$$w = 6 \cdot \sqrt{2 \cdot D \cdot t}$$



# Milyen gyors a diffúziós anyagtranszport?

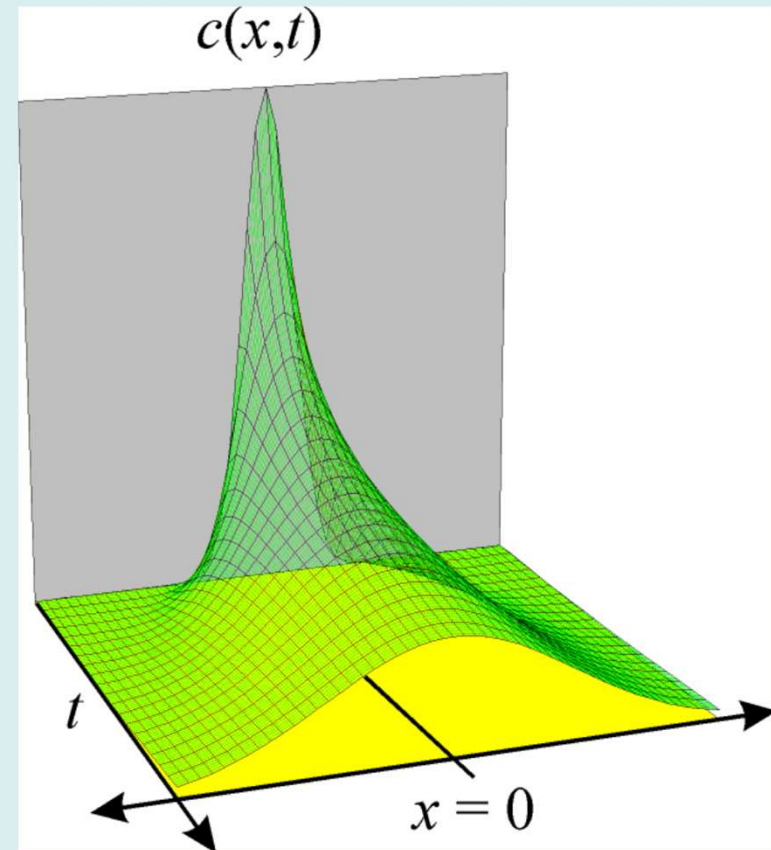
$c(x,t)$  grafikus szemléltetés:

$$c(x,t) = \frac{c_0}{\sqrt{2\pi}\sigma(t)} e^{-\frac{x^2}{2[\sigma(t)]^2}}$$

$$\sigma(t) \sim \sqrt{2Dt}$$

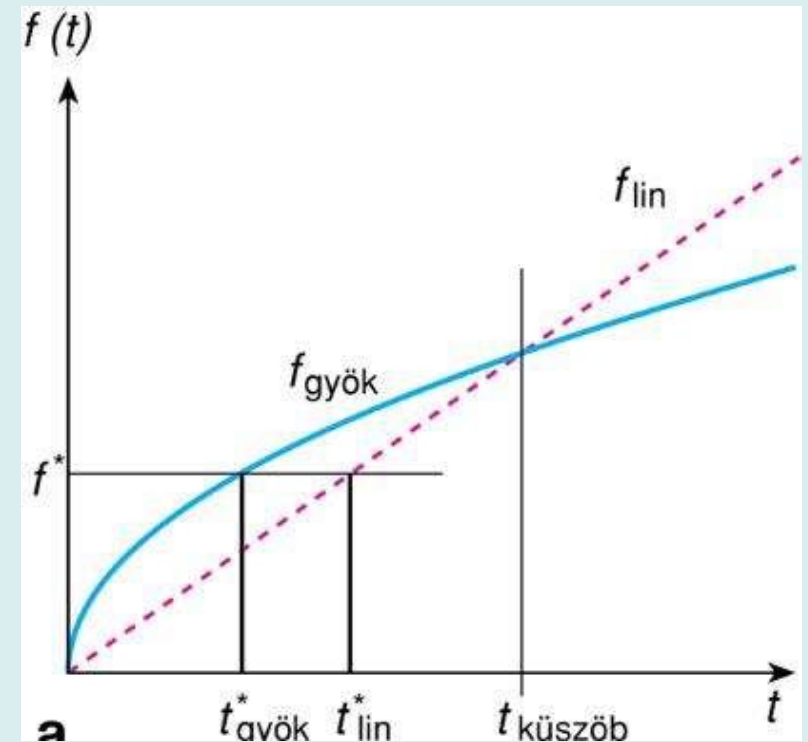
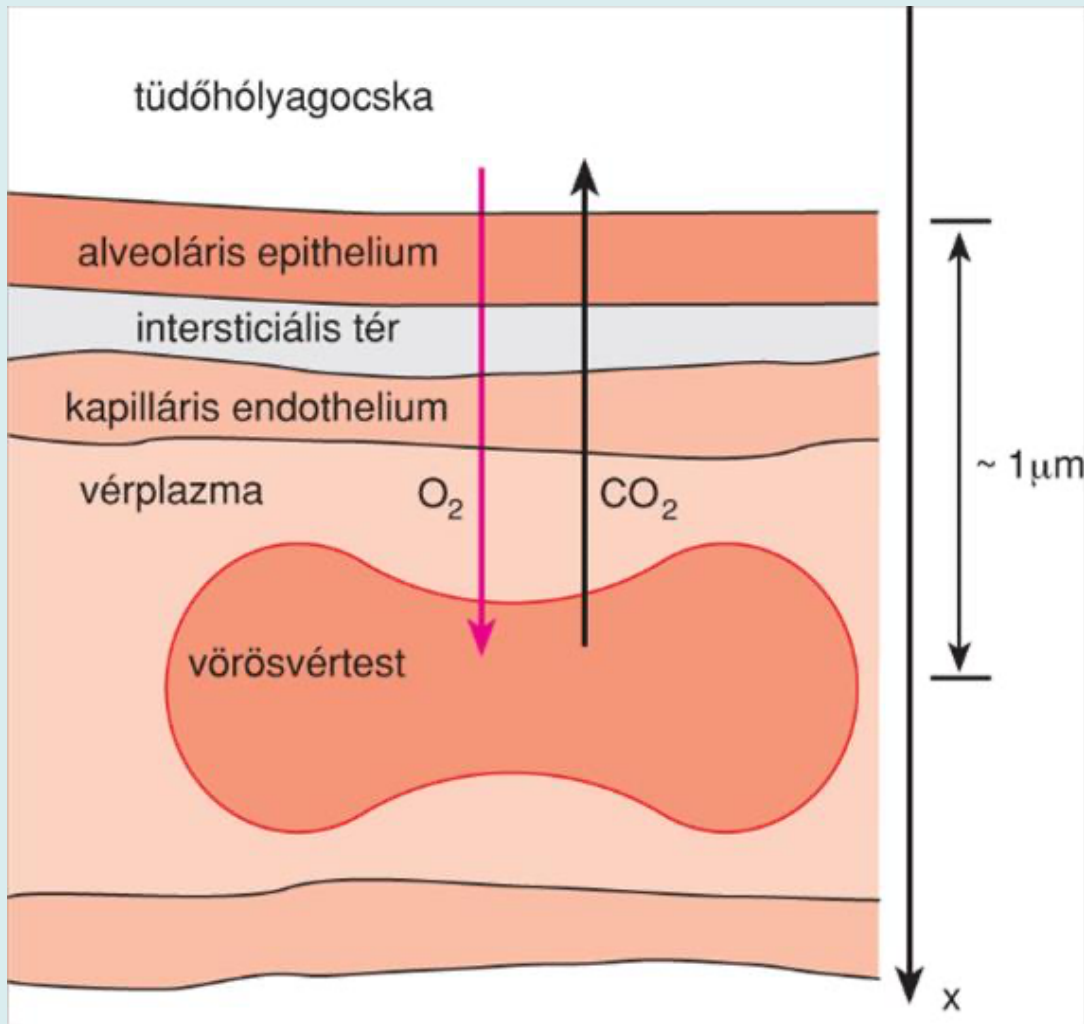
$$R_{\text{átlag}} = \sqrt{6 \cdot D \cdot t}$$

$$t = R_{\text{átlag}}^2 / 6D$$





# Megvalósulhat-e diffúzióval a gázcsere?



*A diffúzió  $\sim 100 \mu m$ -ig gyors,  
nagyobb távolságon azonban  
igen lassú folyamat!*

$D(O_2) \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D(CO_2) \sim 6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  
vörösvértest átlagos tartózkodási ideje a tüdő kapillárisaiban  $\sim 0,5 \text{ s}$

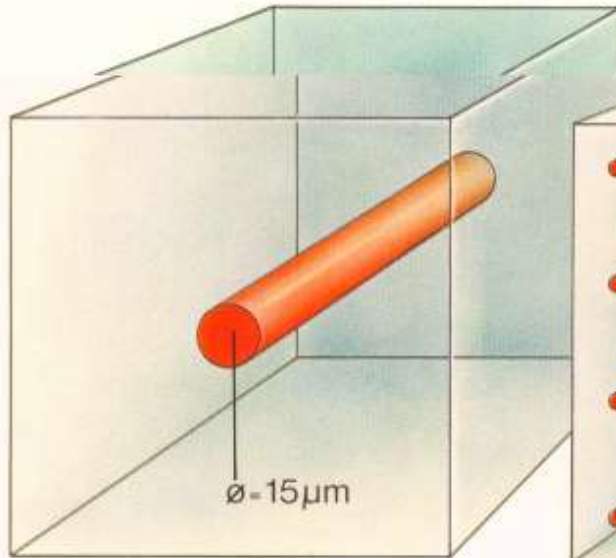
$$t = R_{\text{átlag}}^2 / 6D$$



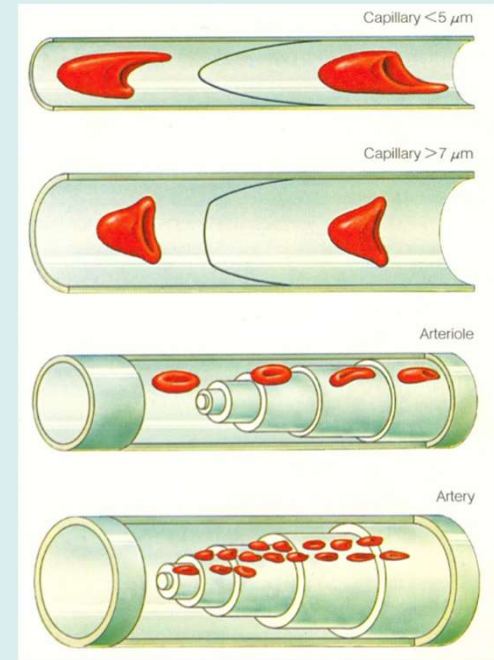
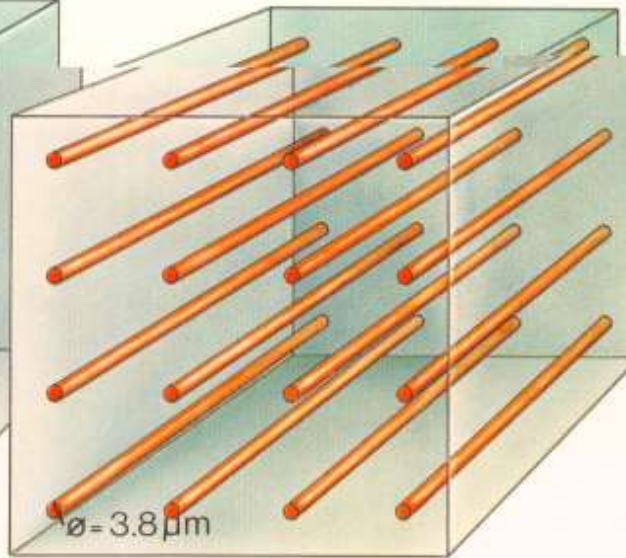
$$t_{O_2}^{1\mu m} \sim 500 \text{ us}, \quad t_{CO_2}^{1\mu m} \sim 80 \text{ us}$$

# Diffúziós távolság szövetekben

Schematic diagram of capillary formation in cold-blooded animals



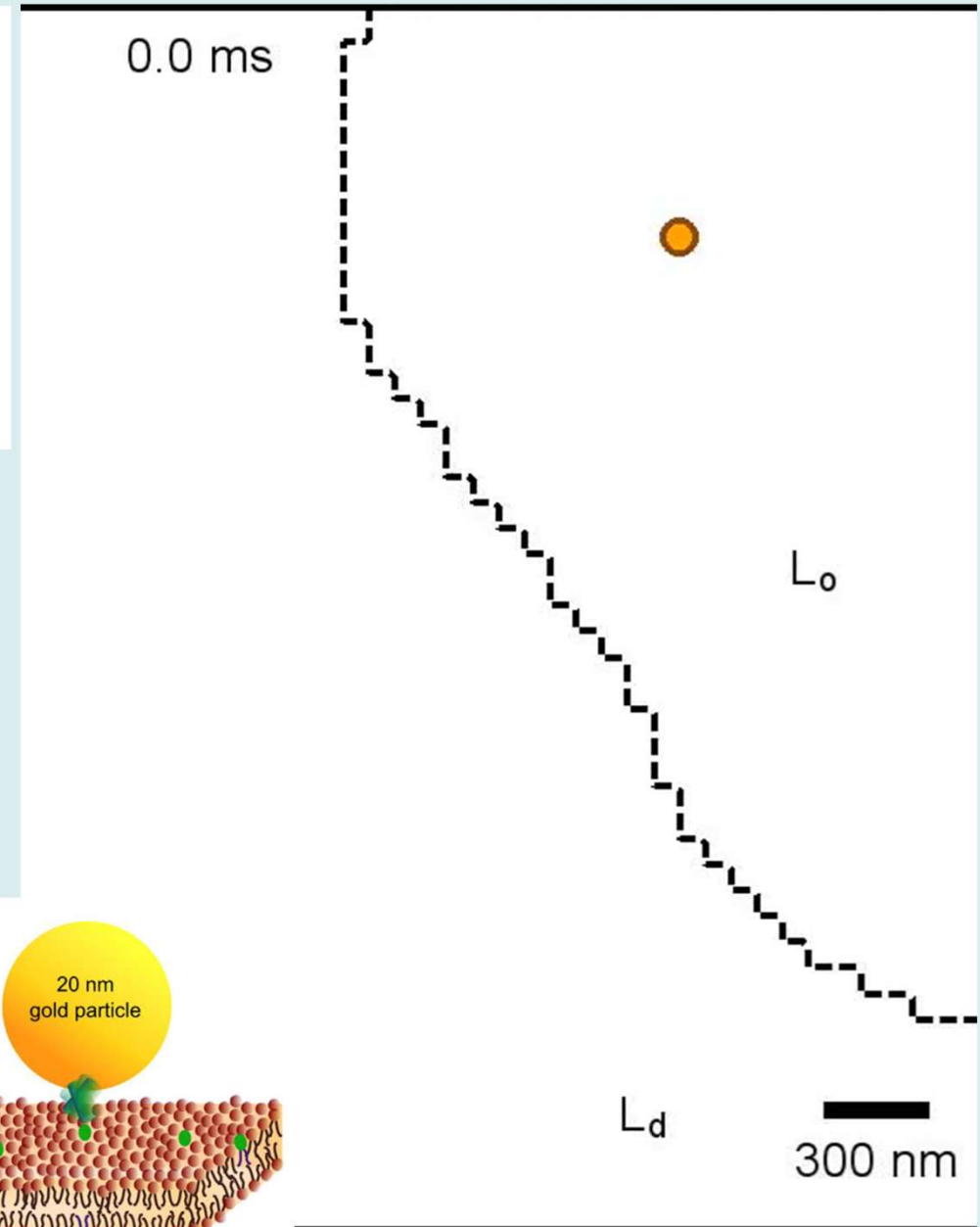
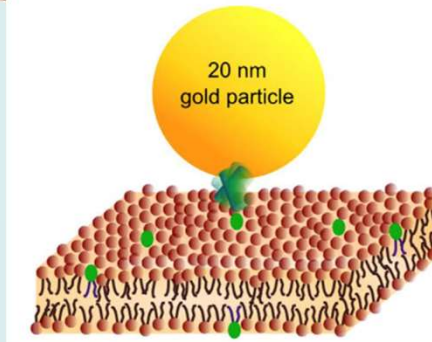
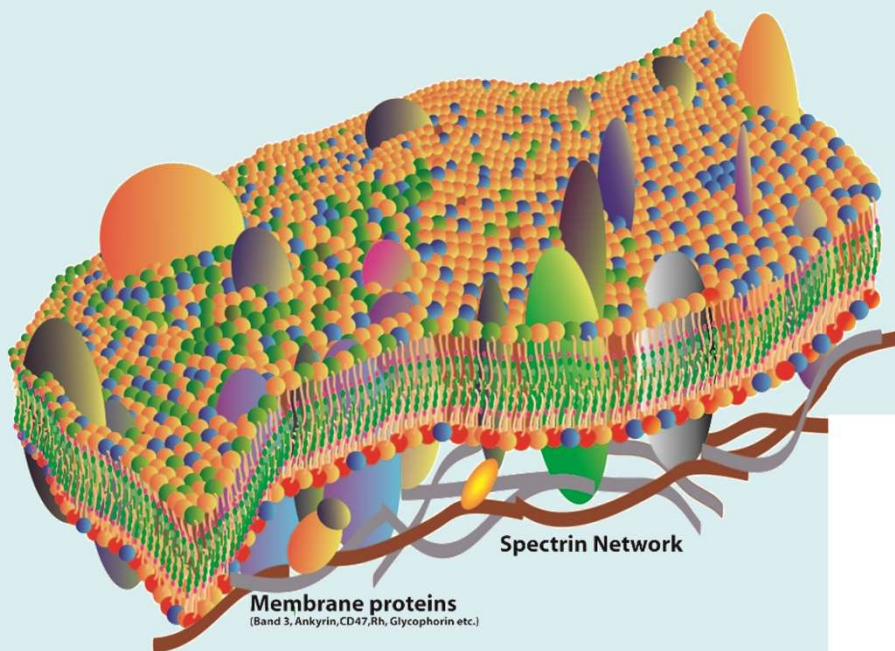
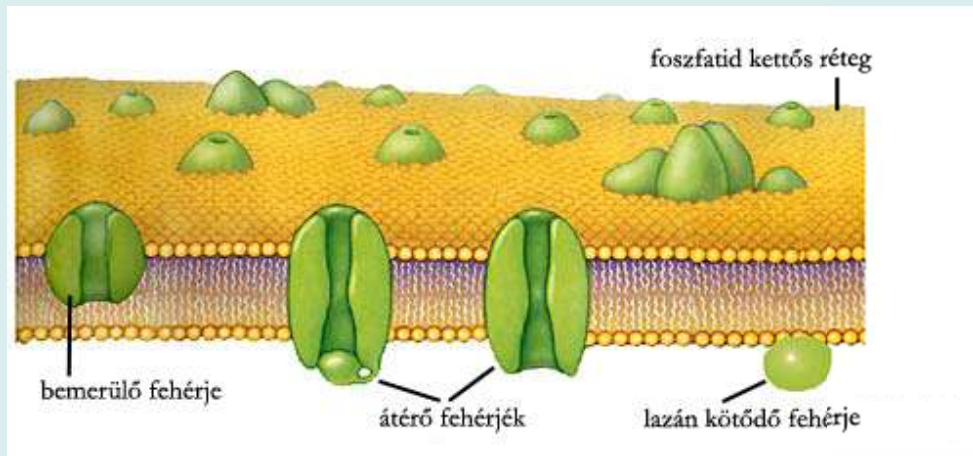
Schematic diagram of capillary formation in mammals



Az emlősök ugyanakkora vértérfogatból ~16-szor több kapillárist képesek perfundálni, mint a békák. (vékony kapilláris – deformálható vörösvértestek)

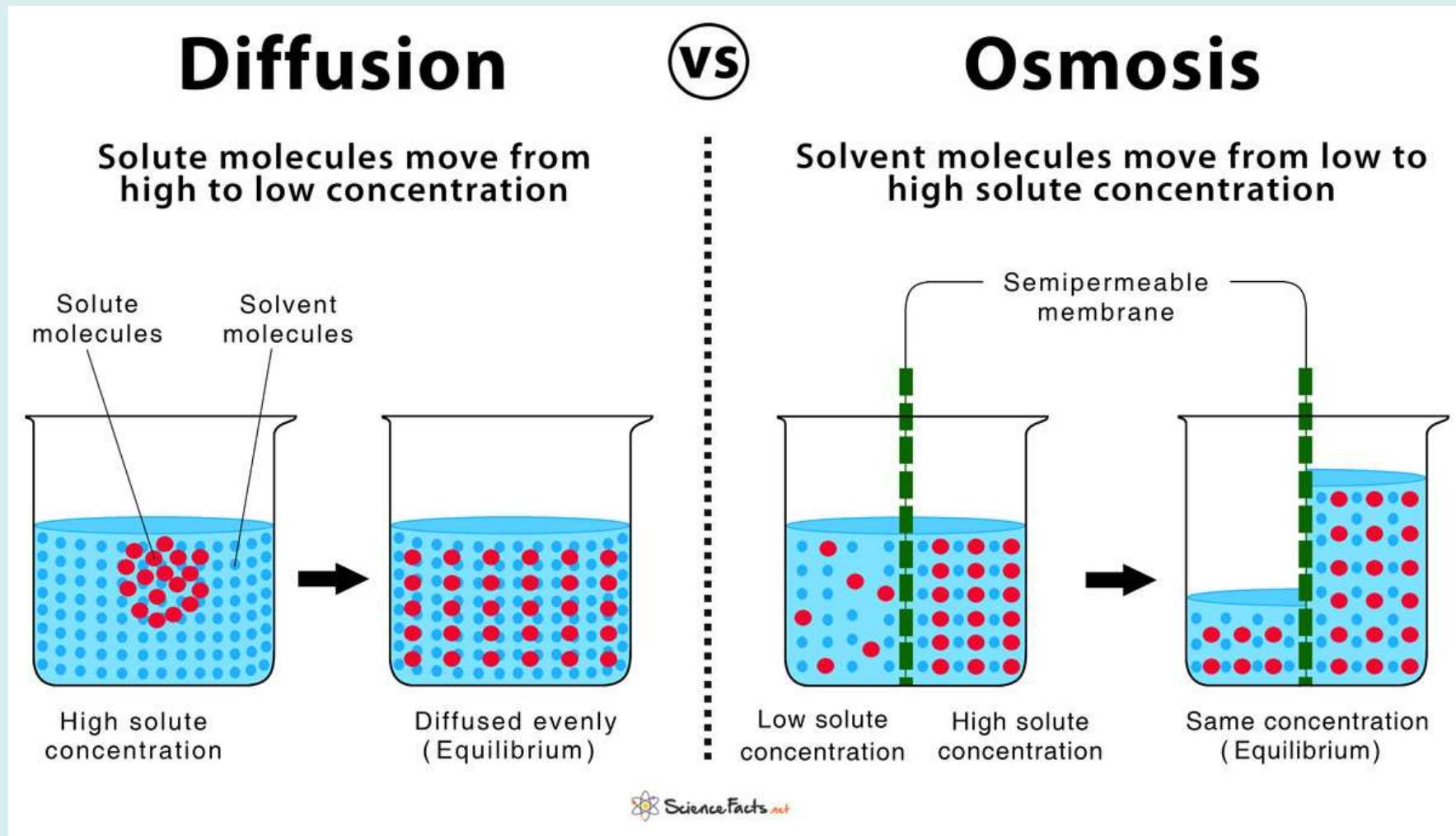
**Diffúziós távolság lerövidül → nagyobb metabolikus aktivitás lehetséges!**

# Laterális diffúzió membránokban





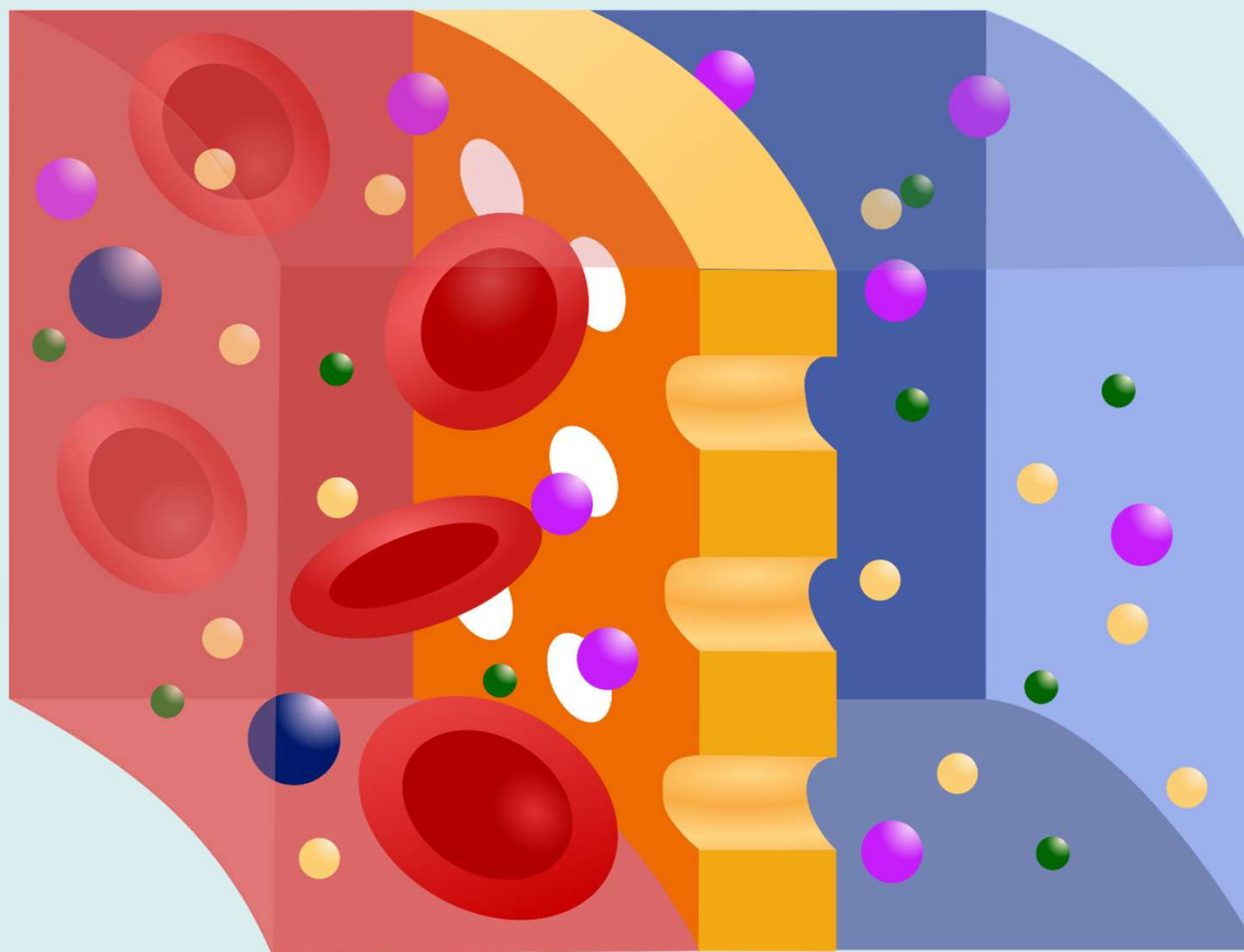
# Ozmózis – Diffúzió



Az oldott anyag vándolása a koncentráció kiegyenlítődéskéig.

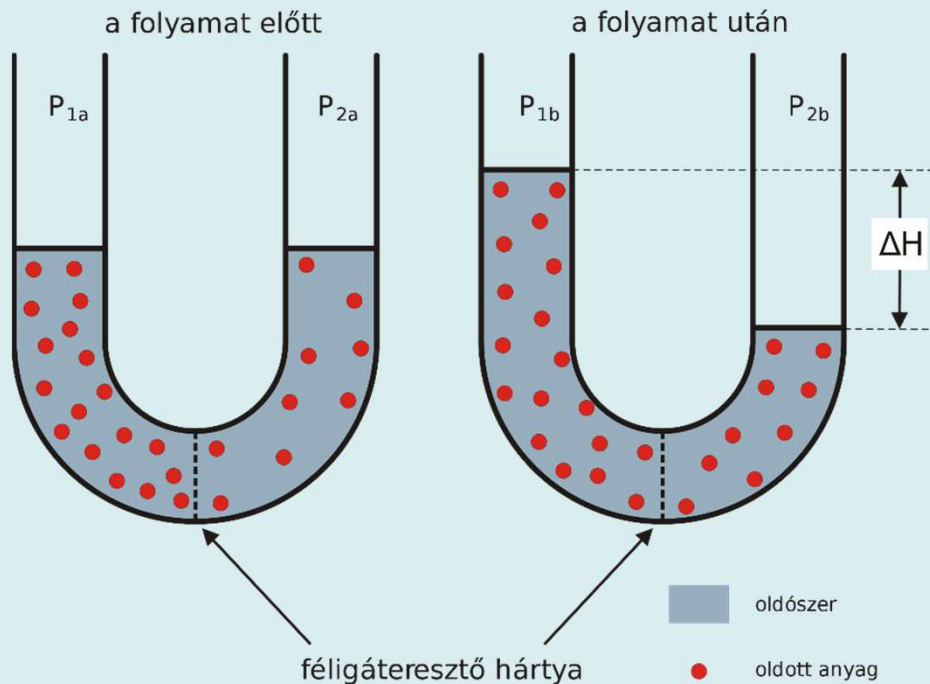
Az oldószer molekulák vándolása a koncentráció kiegyenlítődéskéig.

# Hemodialízis



A vesék károsodott funkciója esetén féligáteresztő membrán segítségével kidiffundáltatjuk a kiválasztandó kismolekulákat egy nagyterefogatú „dialízis” oldatba.

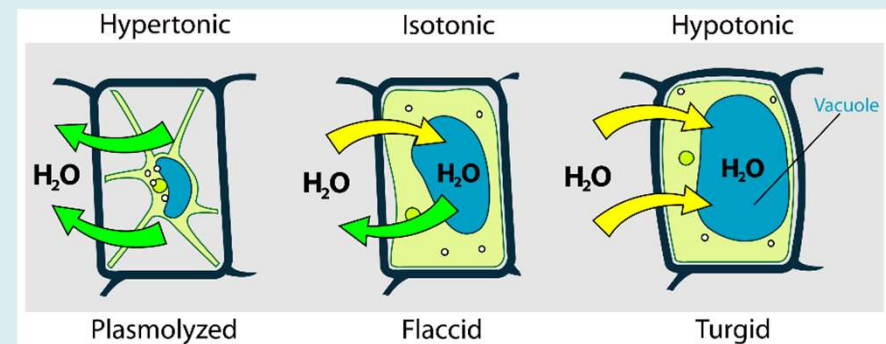
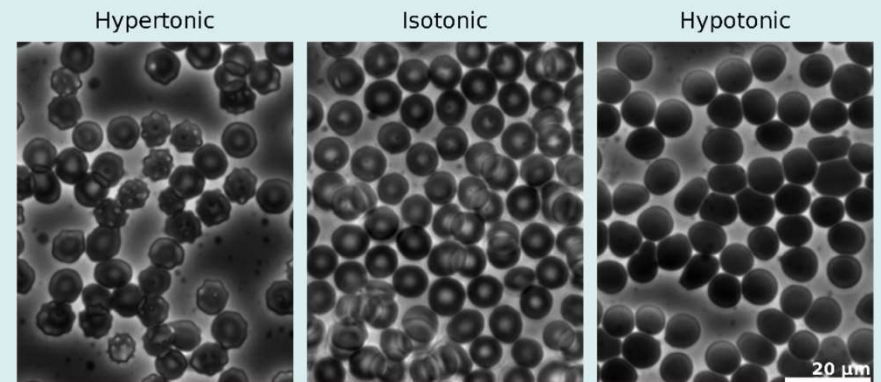
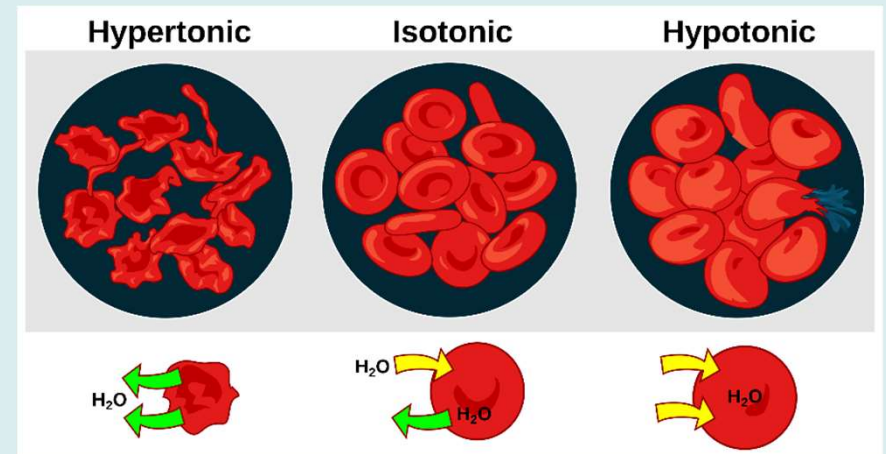
# Ozmózis: van't Hoff törvénye



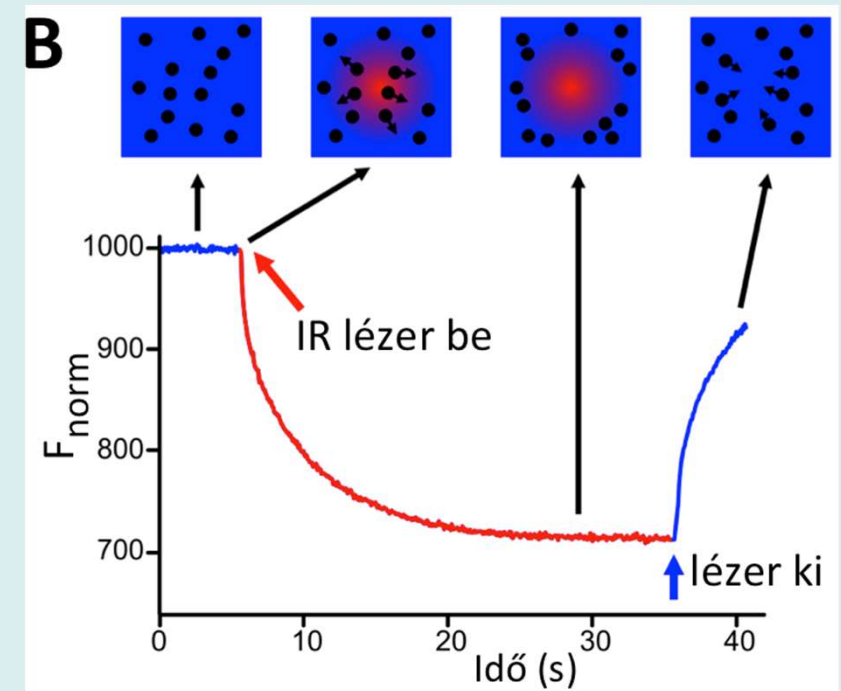
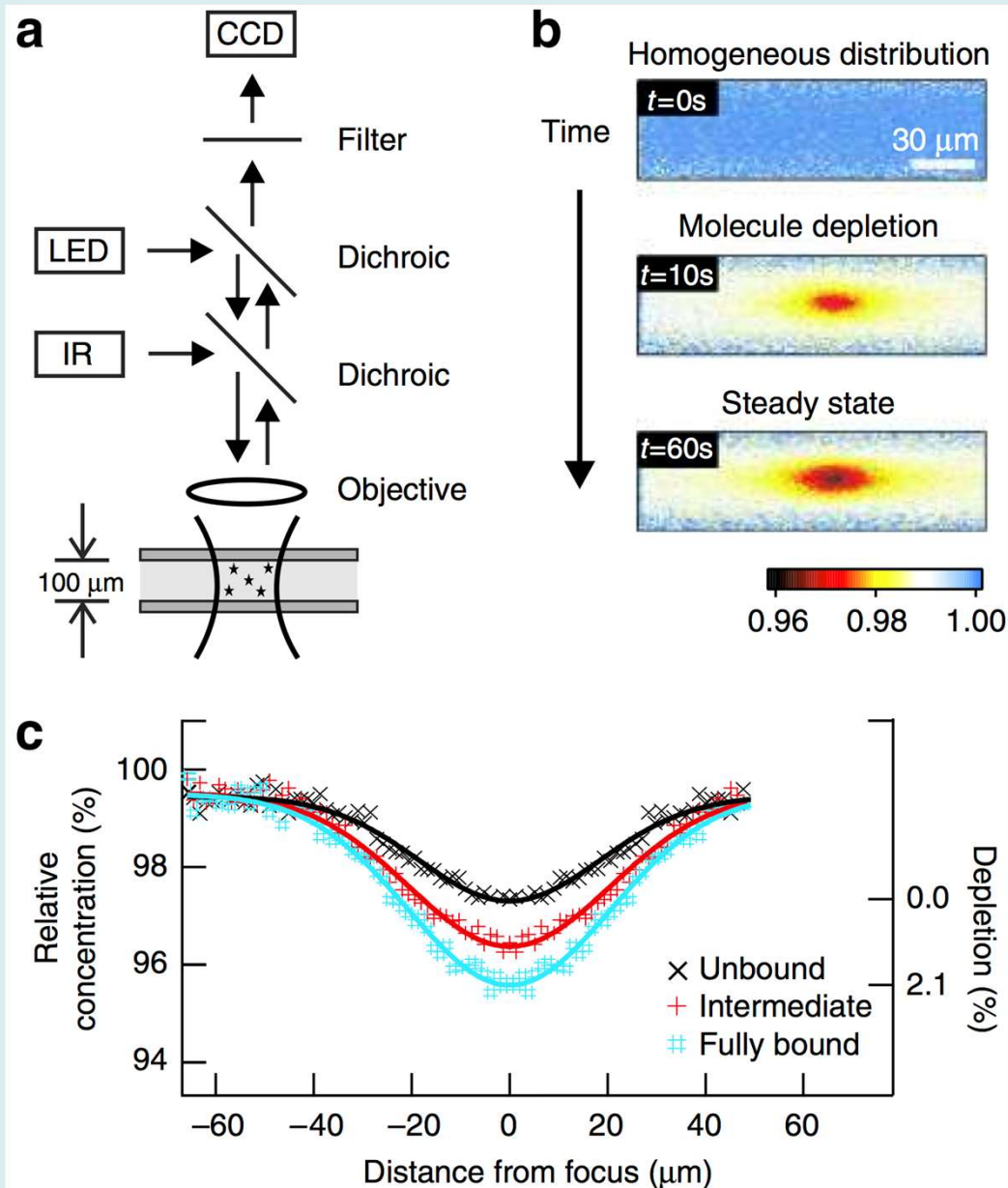
$$\pi = cRT$$

izotóniás oldat = 0,9% (w/v) NaCl

ozmolaritás  
vérplazma ~ 300 mOsm/l



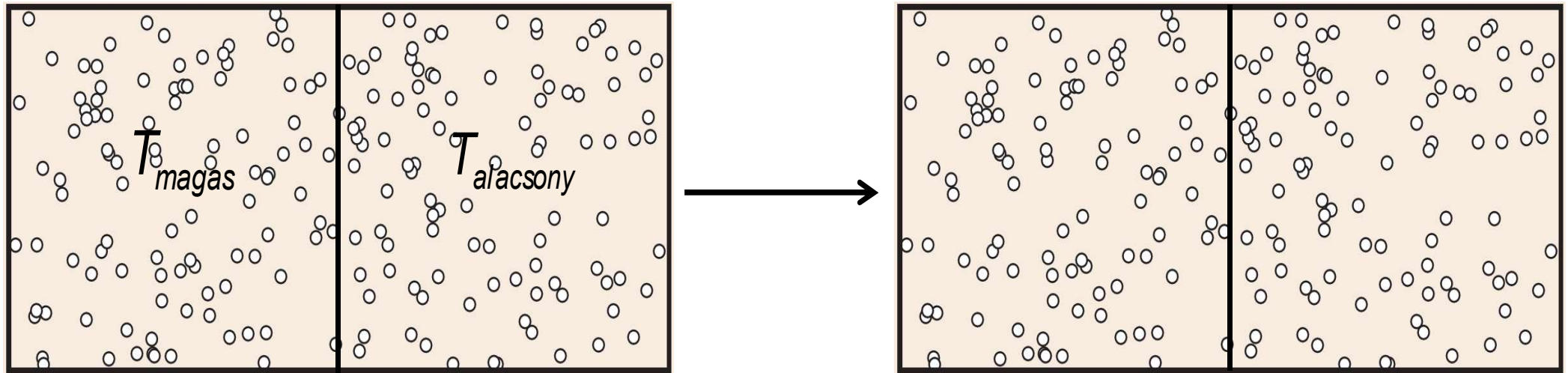
# Termodiffúzió: Ludvig-Soret effektus



$$J_v = -L_T \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



# Hővezetés: Fourier törvénye



$$T_{bal} > T_{jobb}$$

$$\Delta N = N_{magas} - N_{alacsony} = 0$$

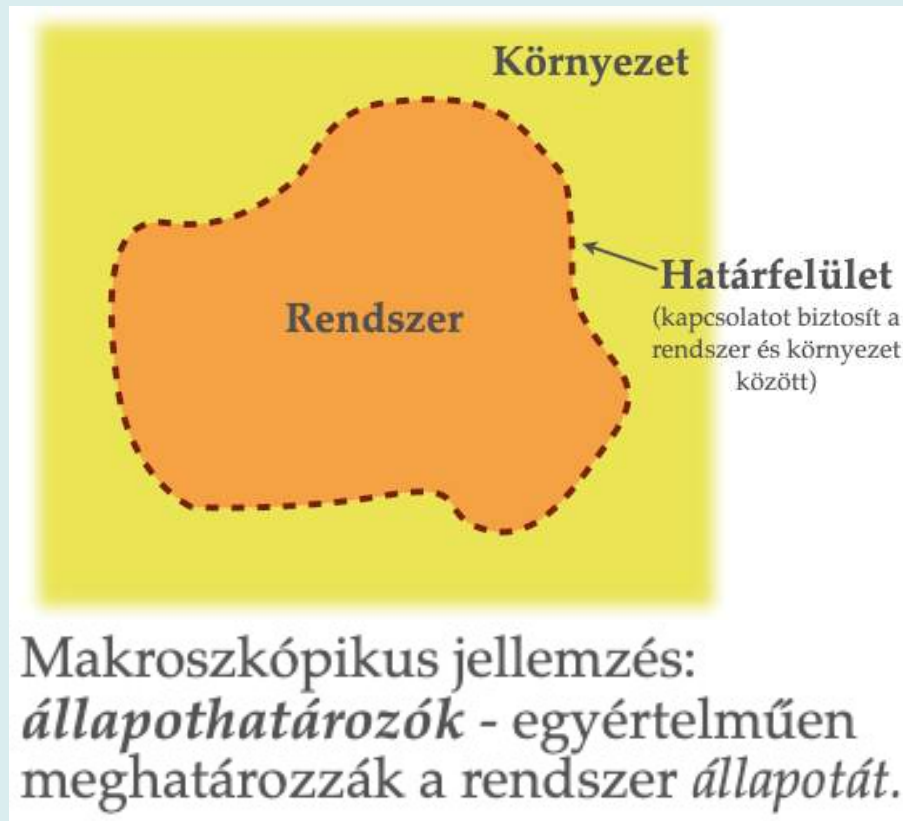
$$N_{magas} = N_{alacsony} \quad - \text{egyensúly esetén}$$

Energia-áramsűrűség

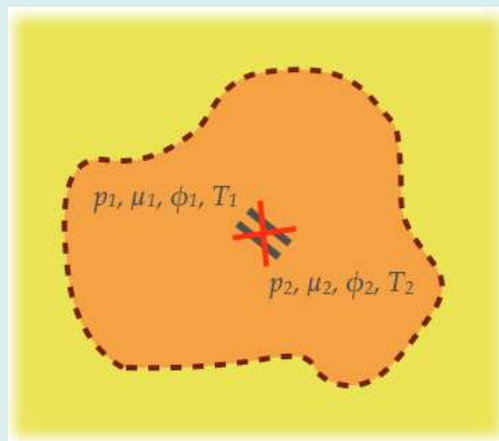
$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad - \text{ha nincs egyensúly}$$

$$J_v = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = \frac{N_{magas} \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot (T_{magas} - T_{alacsony})}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

# Általánosítás: Onsager-relációk



Egyensúly = homogén intenzív mennyiségek!



Extenzív mennyiség	Intenzív mennyiség
Térfogat ( $V$ )	Nyomás ( $p$ )
Anyag-mennyiség ( $n$ )	Kémiai potenciál ( $\mu$ )
Töltés ( $Q$ )	Elektromos potenciál ( $\phi$ )
Entrópia (rendezetlenség, $S$ )	Hőmérséklet ( $T$ )

- *Extenzív* mennyiségek: értékük arányos a rendszer méretével
- *Intenzív* mennyiségek: értékük független a rendszer méretétől

Onsager-összefüggés:  $J_{ext.} = L_{vez} * X_{int}$

$J_{ext.}$ : áramló extenzív mennyiség áramsűrűsége (pl.:  $J_{anyag}$ )

$X_{int.}$ : az intenzív mennyiség esése, "termodinamikai erő" (pl.:  $\frac{\Delta c}{\Delta x}$ )

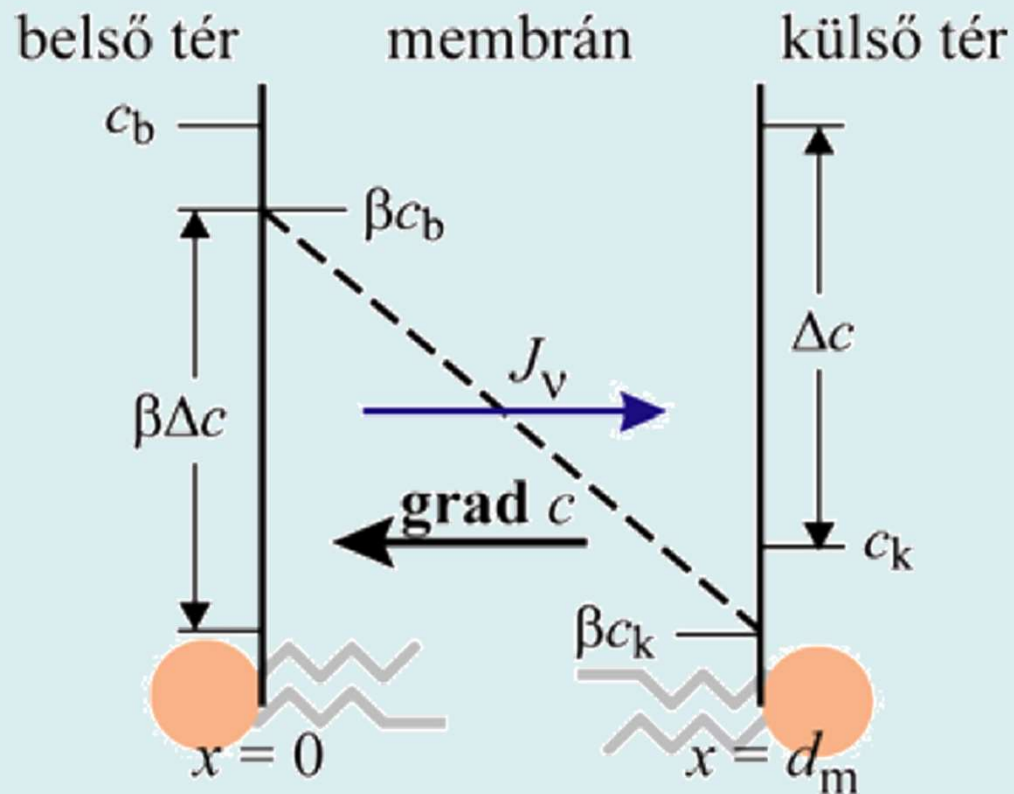
$L_{vez.}$ : vezetési együttható (pl.:  $D$ )

# Általánosítás: Onsager-relációk

Termodinamikai áram	Áramot fenntartó intenzív mennyiség-különbség	Áramsűrűség	Törvény
Hőáram	Hőmérséklet ( $T$ )	$J_E = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$	Fourier
Térfogati áram	Nyomás ( $p$ )	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$	Hagen-Poiseuille
Elektromos áram	Elektromos potenciál ( $\phi$ )	$J_Q = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \phi}{\Delta x}$	Ohm
Anyagáram (diffúzió)	Kémiai potenciál ( $\mu$ )	$J_n = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$	Fick

A termodinamikai áramok a rendszer inhomogenitásainak megszüntetésére, az egyensúly helyreállítására törekszenek (irreverzibilis folyamatok).

# Diffúzió membránon keresztül



Fick I. tv.:

$$J = -D \Delta c / \Delta x$$

$$= -D_m (c_k^m - c_b^m) / d_m$$

$$= -P_m \Delta c_m$$

$$= -P_m \beta \Delta c = -P \Delta c$$

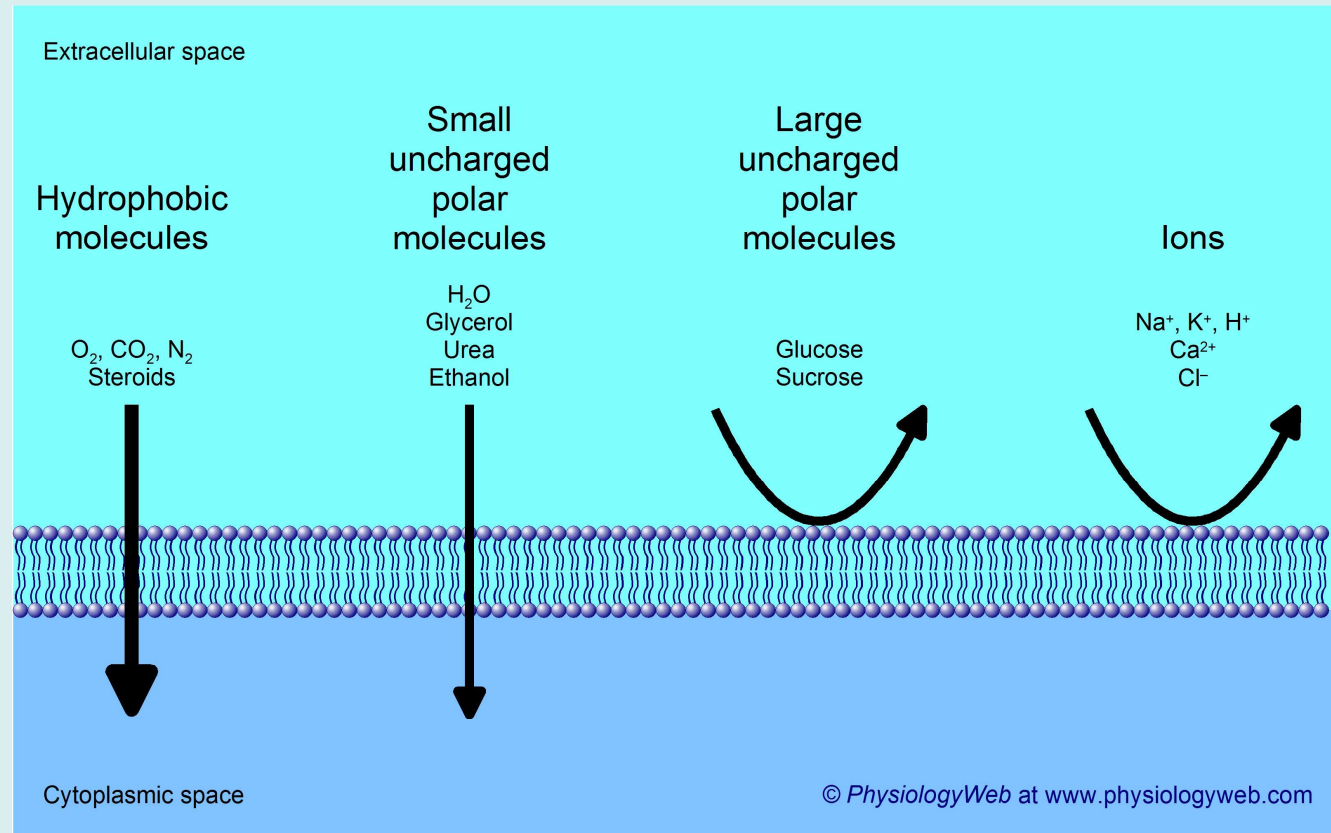
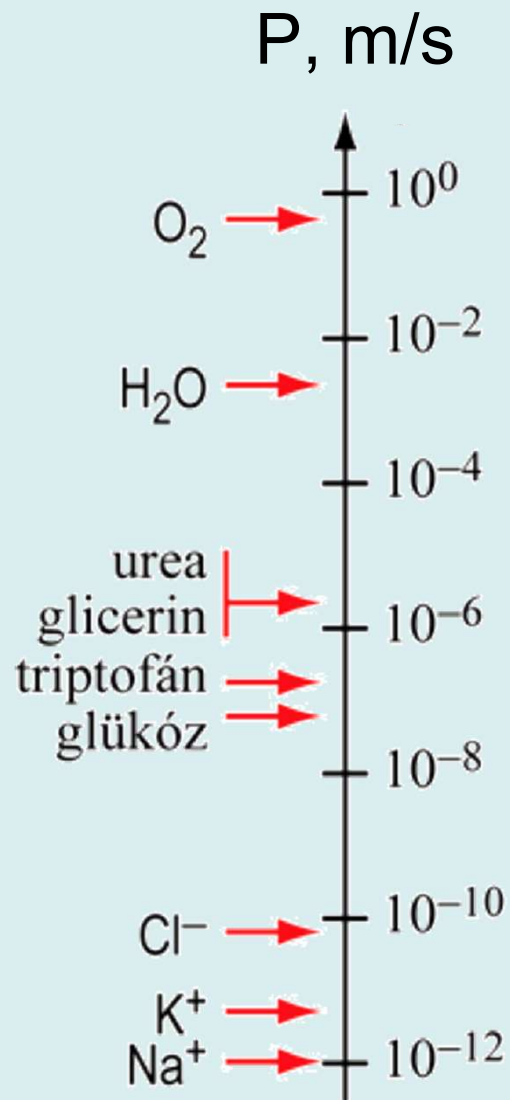
P: permeabilitási együttható

$\beta$  – partíciós együttható

$$\beta = c_m(0)/c_b = c_m(d_m)/c_k$$

$$[P] = \text{m/s}$$

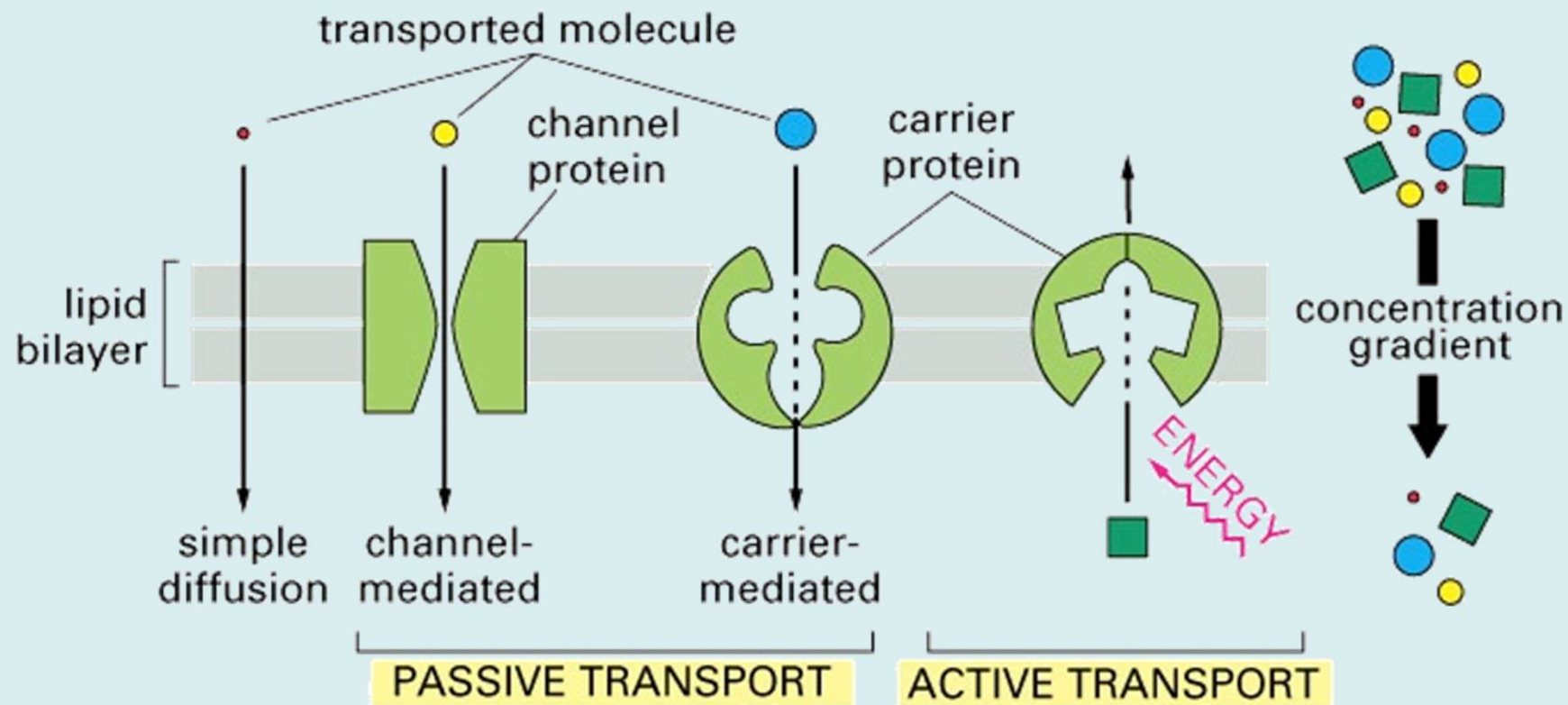
# Diffúzió membránon keresztül



$\text{Na}^+$  ionokra  $P = 10^{-12} \text{ m/s} = 10^{-3} \text{ nm/s}$ , tehát a 6 nm vastag membránt majdnem két óra alatt küzdik le!  
A lipidmembrán ionokra alig, nagyobb töltött molekulákra praktikusán nem átjárható !

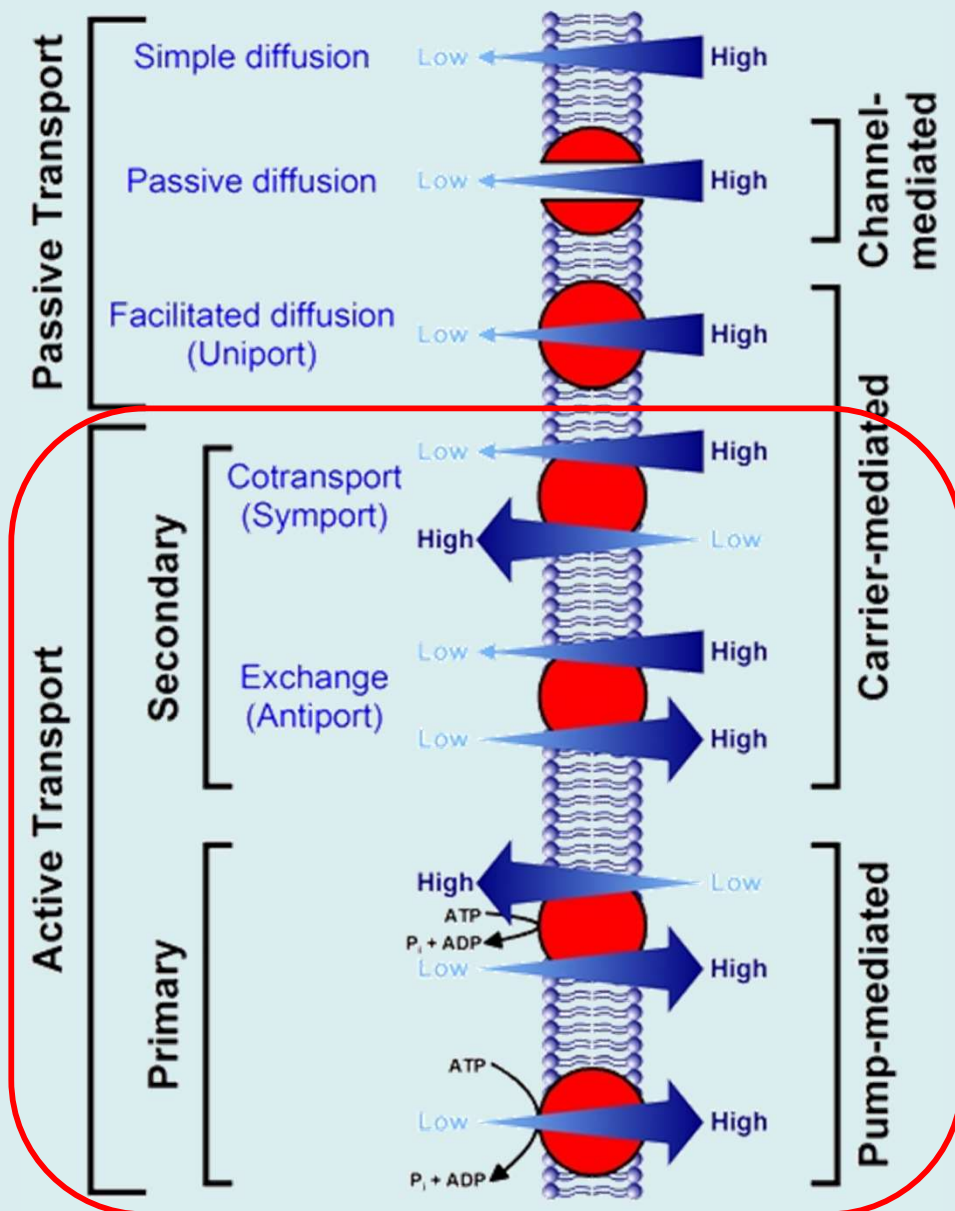


# Transzport biológiai membránokban



- a biológiai membránokban a szabad diffúzió erősen korlátozott
- a szállítás mechanizmusa szerint a transzport lehet szállító molekula nélküli (csatornán keresztül), illetve szállító molekulával segített
- a transzport energiaigénye szerint lehet passzív vagy aktív

# Transzport biológiai membránokban



- Passzív transzportfolyamatok során az anyag kizárólag a koncentrációgradiens mentén mozog, a transzport sebessége függ a hőmérséklettől, a molekula méretétől, polaritásától (gázok, szteroidok, alkohol, víz);

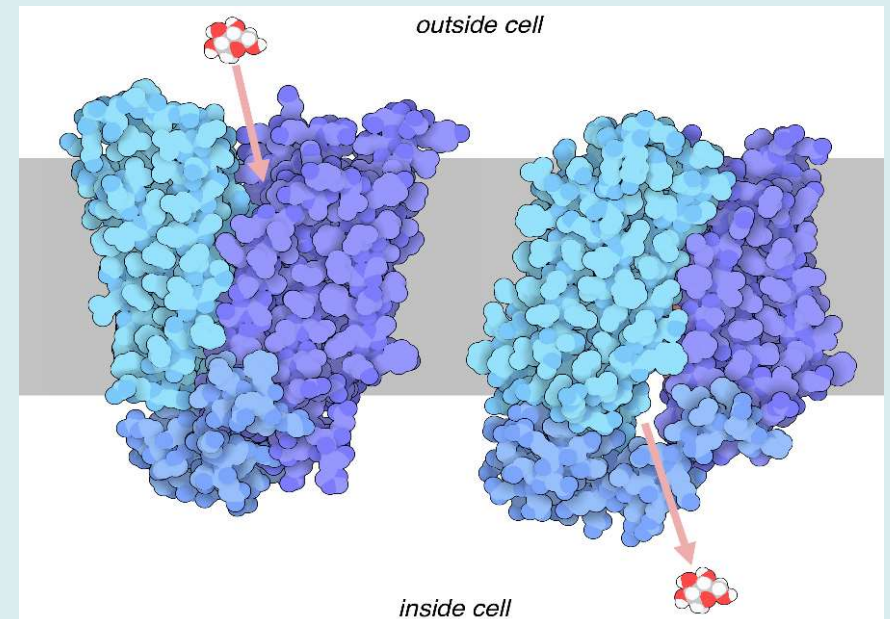
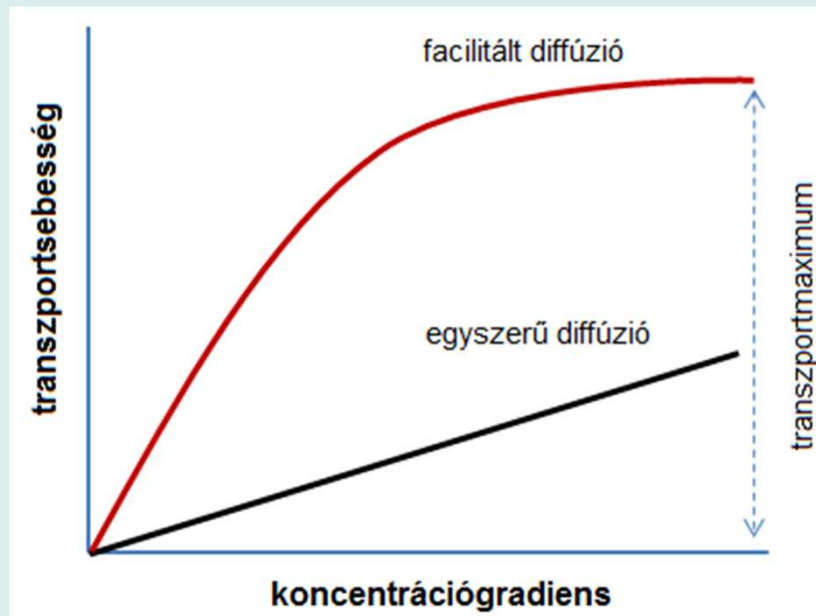
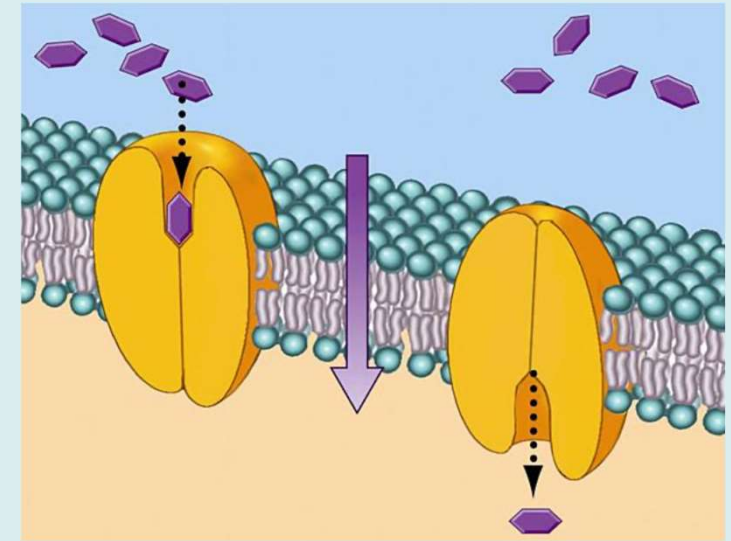
- Aktív transzporterek: a közvetlenül ATP-függő pumpa-fehérjék (elsődleges aktív transzporterek) mellett a ko-transzporterek (antiporterek és szimporterek) is aktív transzporterek, hiszen működésükhöz az energiát az ATP-függő pumpák által létrehozott koncentráció-gradiensből merítik = másodlagos aktív transzporterek.



# Facilitált diffúzió

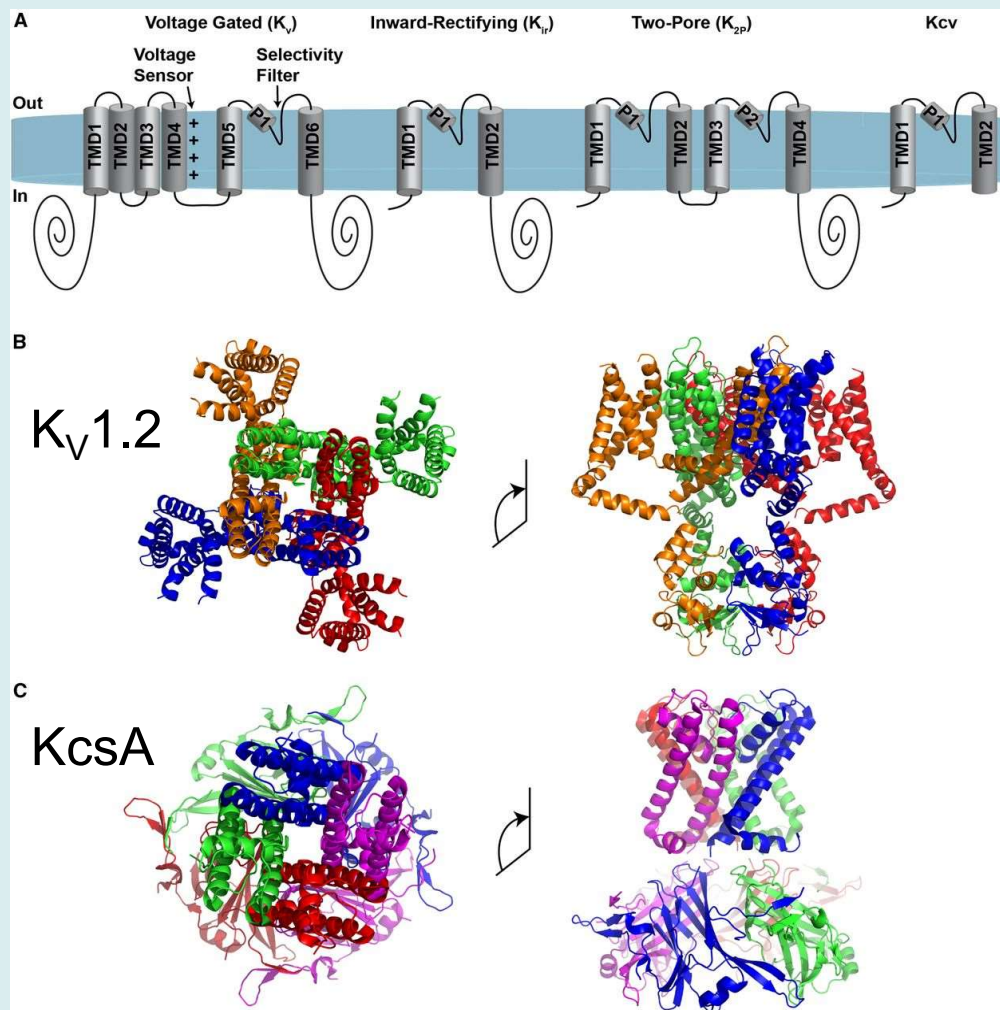
Hordozófehérjéhez kötött, amelyik a membrán két oldala felé felváltva hozzáférhető kötőhellyel rendelkezik.

A facilitált diffúzió azonos koncentráció-gradiensnél intenzívebb a szabad diffúziónál. Michalis-Menten kinetikát követ, jellemzője még, hogy szelektív és gátolható. Tipikus karrier-fehérjék pl a “GLUT” glükóz transzporterek.

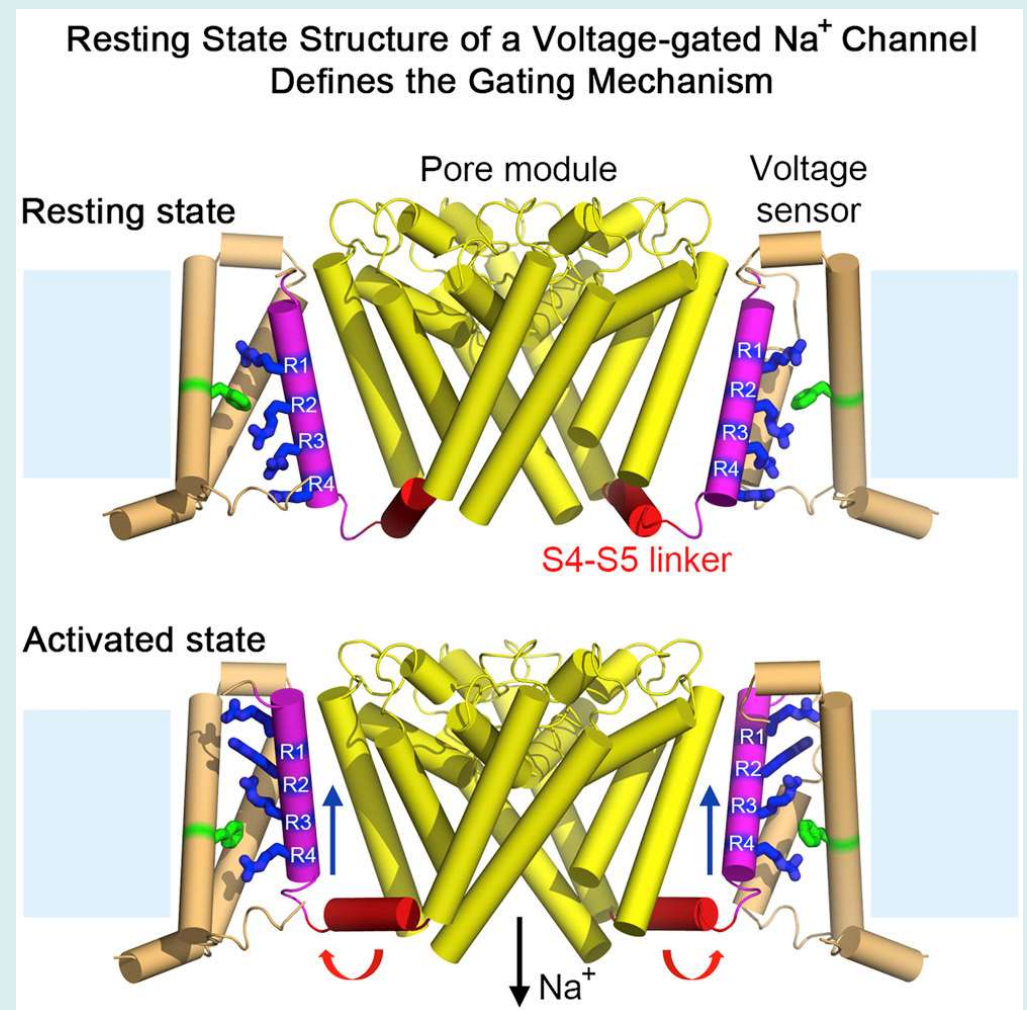


# Ioncsatornák

Sok alegységből álló transzmembrán fehérjék, amelyek adott ionokra szelektívek, nyitásuk-zárásuk szabályozott (membrán-potenciál változása, vagy kötődő ligandumok, vagy membrán-deformáció).



Kálium-csatornák

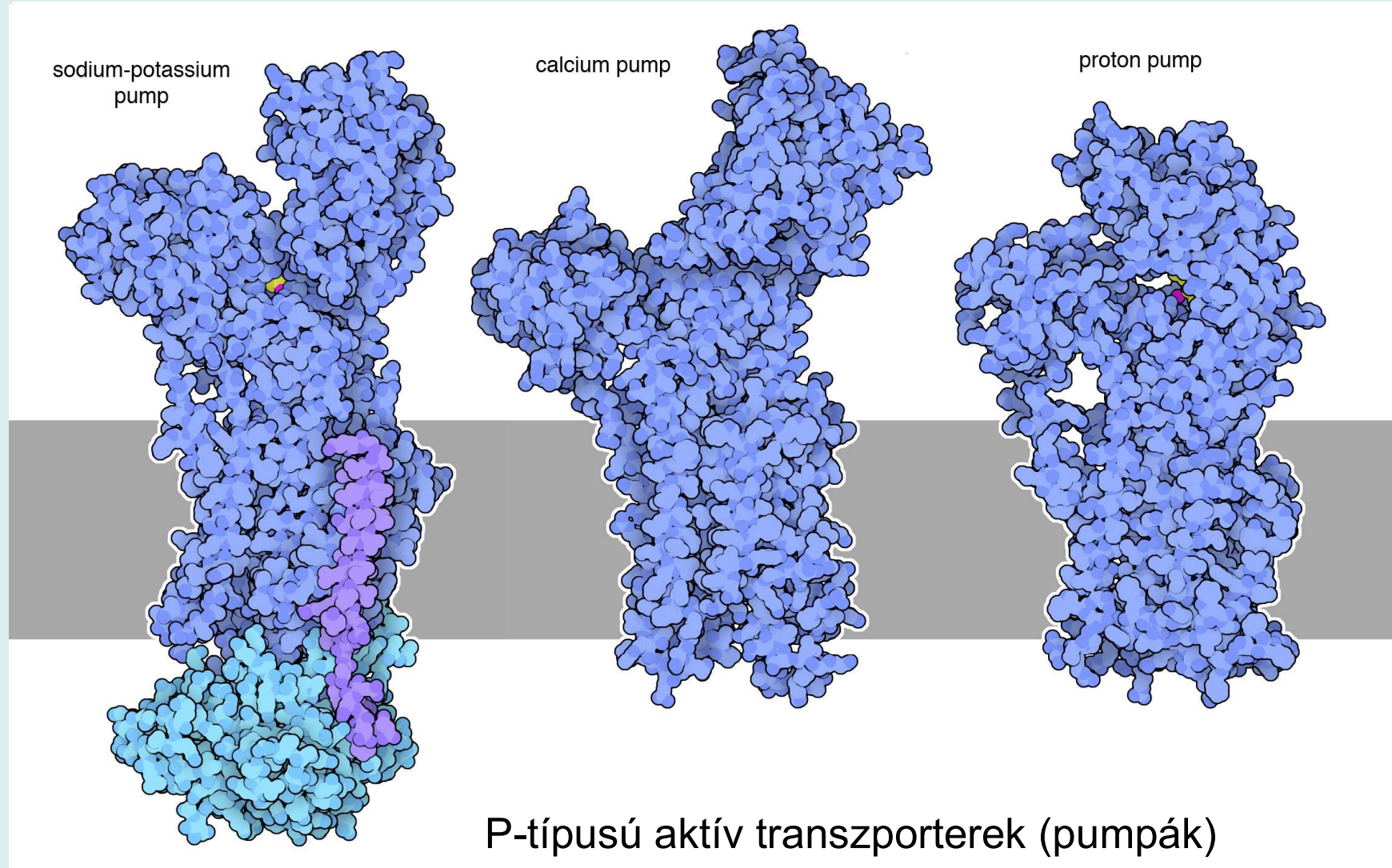


Feszültségvezérelt Na-csatorna

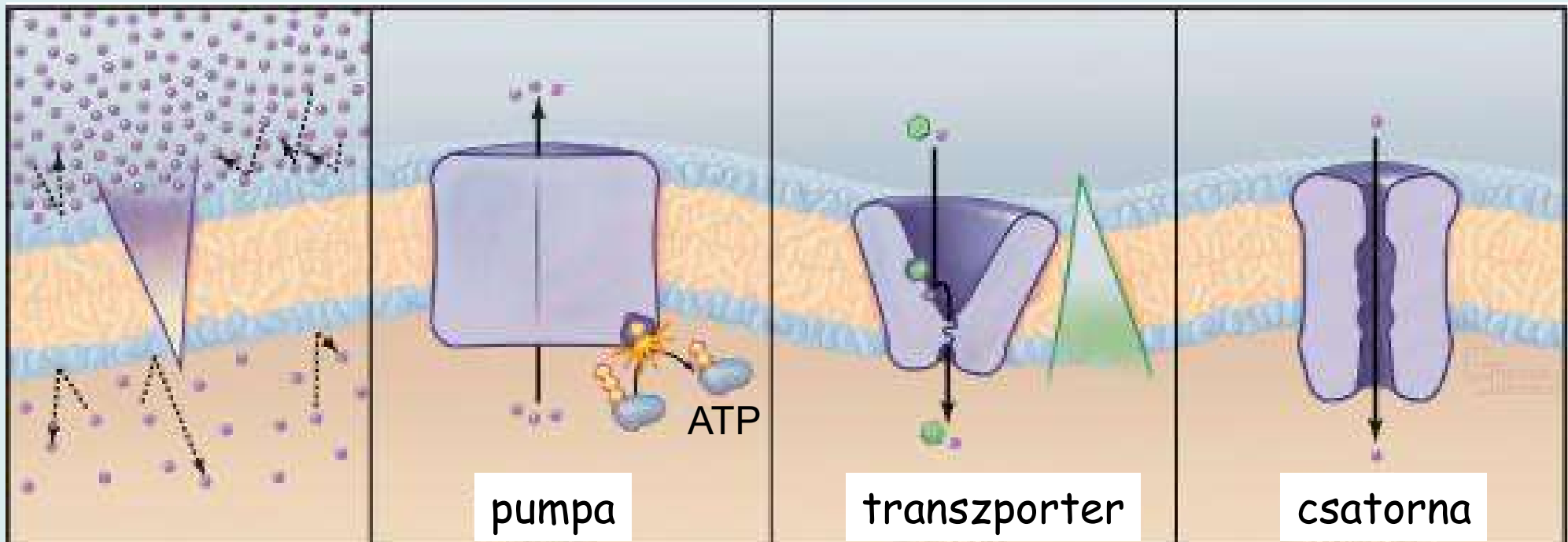


# Aktív transzporterek

Az ATP energiáját használják, vagy az ATP felhasználásával felépített valamely koncentrációgrádinest (pl proton-grádiens).



# Transzporterek összehasonlítása



specif icit ás	teljes	közepes	kicsi
sebesség (ion/ s)	lassú (100)	közepes (<1000)	gyors ( $10^6$ )
koncent ráció	ellen	szerint*	szerint
ener giaigény	van	nincs	nincs
ion/ konf ormációs vált ozás	$\sim 1$	$\sim 1$ (esetleg más ionokat is mozgat)	sok

Kapcsolódó fejezetek:

*Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika*

III./2.

2.1

2.2

III./3.

3.1

3.2

*Gyakorlati jegyzet: Diffúzió*

*Javasolt irodalom:*

*Herényi Levente: Orvosegyetemi fizika, Semmelweis Kiadó, 2024*