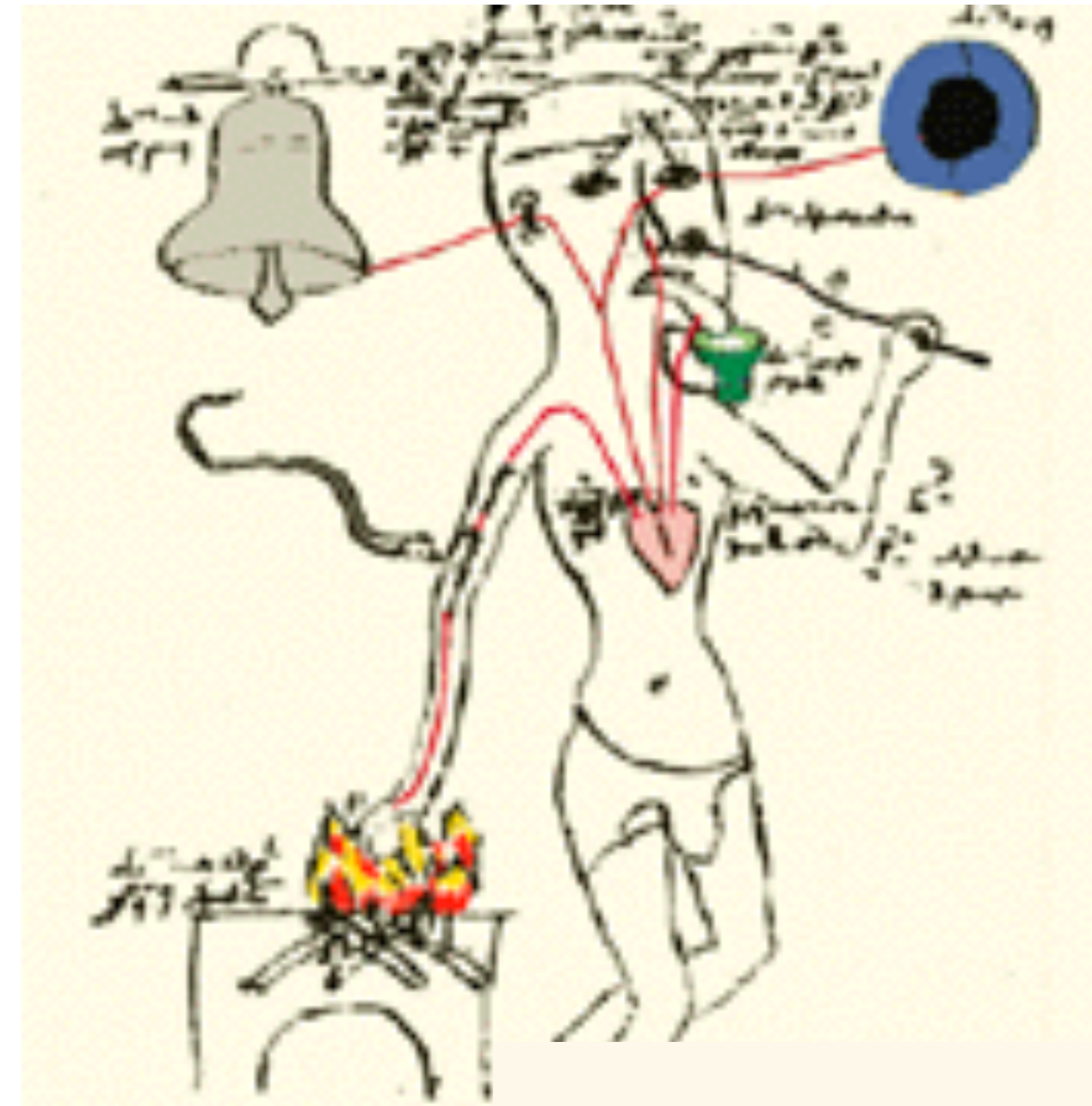


ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK BIOFIZIKÁJA LÁTÁS, HALLÁS

KELLERMAYER MIKLÓS

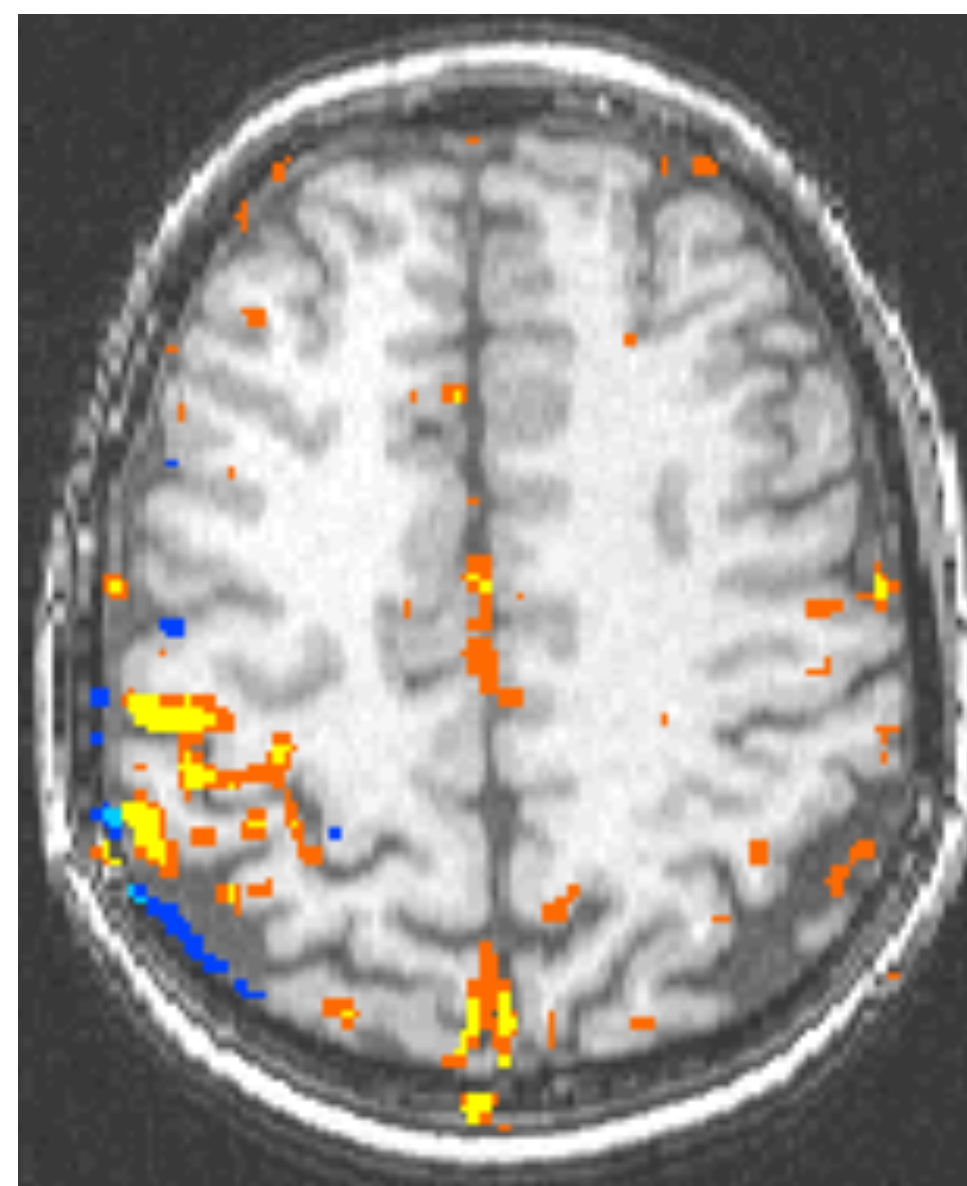
Elméletek az érzékelésről

Kardiocentrikus érzékelés
(középkori rekonstrukció)

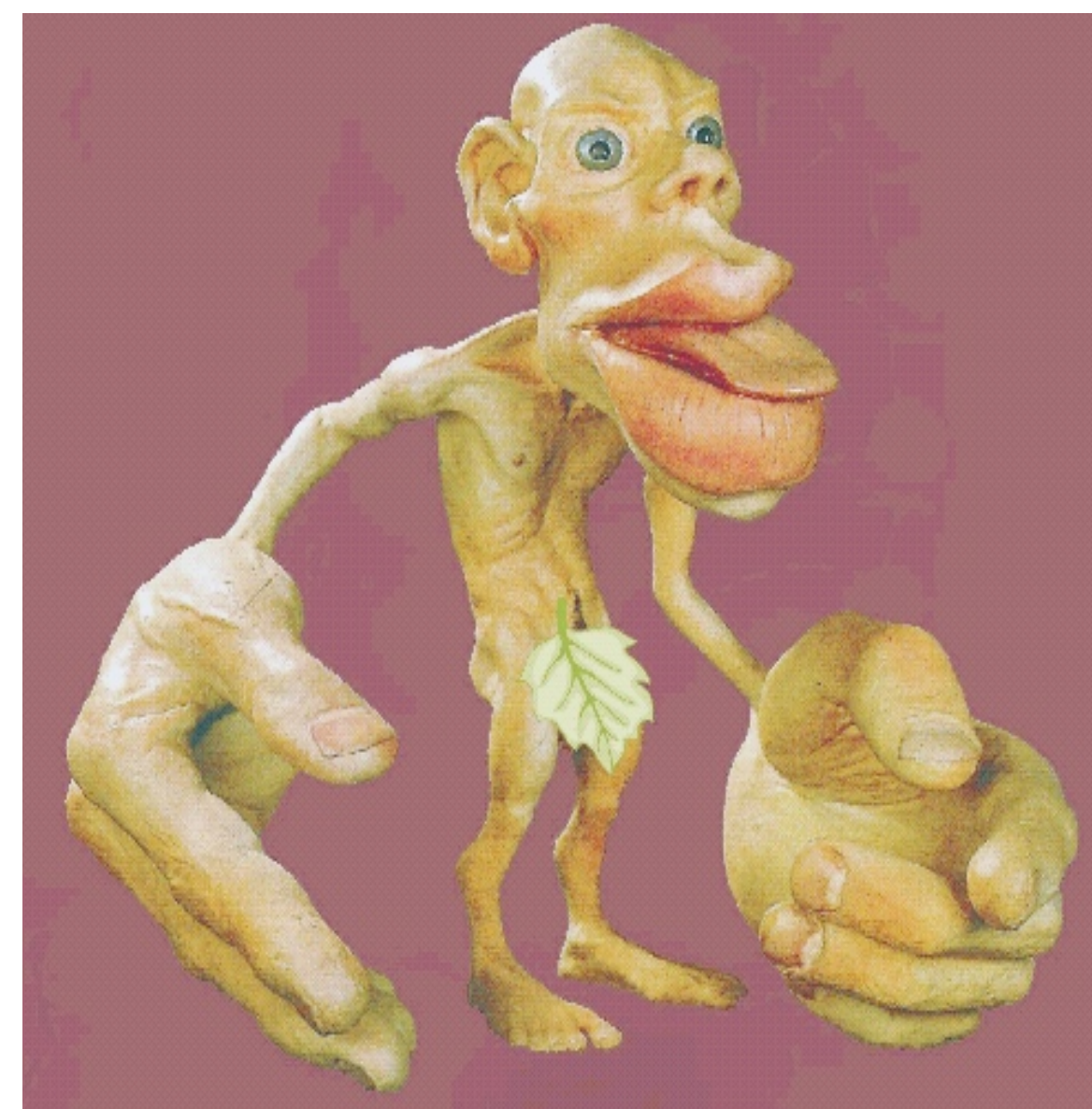


Arisztotelész (Kr. e. 384-322)
kardiocentrikus érzékelés.

Galenus (Kr. u. 129-200)
kardiocentrikus érzékelés
cáfolatait adta.



fMRI felvétel szenzomotoros
funkció közben



Szenzoros
homunculus

Ma:

inger →

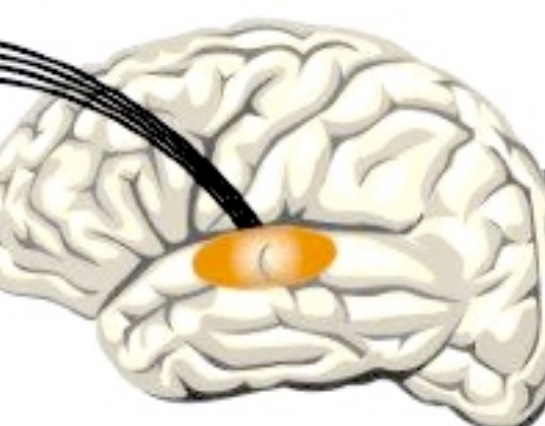
- érzékszervi receptorok →
- receptorpotenciál →
- ideg →
- akciós potenciál →
- központi idegrendszer →
- jelfeldolgozás →
- érzet

Érzékelés
folyamata a
hallás
példáján:



Érzékszerv
(fül)

Idegi
vezetés



Agy
(hallóközpont)



Hangfelismerés
Hangélmény

Érzékszervi receptorok



Érzékszervi receptor (érzőreceptor): Speciálizálódott érzékelősejt, amely egy adott típusú ingerre (fény, hang, szagmolekulák) válaszol és továbbítja az információt a központi idegrendszerbe.

Receptorok (eltérő jelentés!): Olyan fehérjék, amelyek specifikusan képesek hormonok, neurotranszmitterek és más anyagok megkötésére és ezáltal specifikus válaszreakciókat indítanak el.

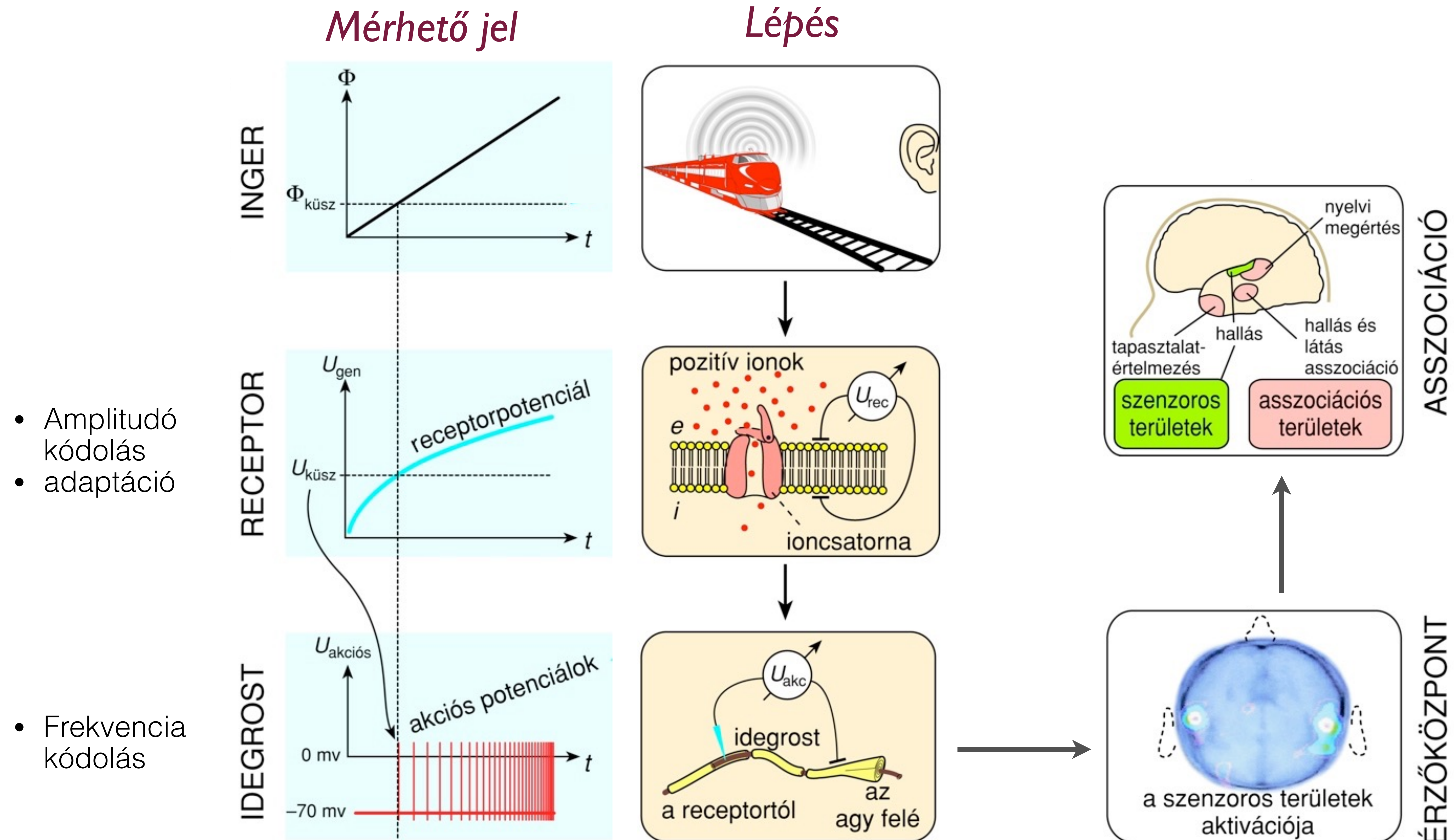
	Érzésmodalitás	Receptor	Érzékelőszerv
Tudatosuló	Látás	Csapok és pálcikák	Szem
	Hallás	Szőrsejtek	Fül (Corti-szerv)
	Szaglás	Olphactorius neuron	Szagló nyálkahártya
	Ízlelés	Ízlelőreceptor-sejtek	Ízlelőbimbó
	Szöggyorsulás	Szőrsejtek	Fül (félkörös ívjáratok)
	Lineáris gyorsulás	Szőrsejtek	Fül (utriculus és sacculus)
	Tapintás-nyomás	Idegvégződések	Többféle*
	Meleg	Idegvégződések	Többféle*
	Fájdalom	Idegvégződések	Többféle*
	Hideg	Csupasz idegvégződések	...
	Ízületi helyzet és mozgás	Idegvégződések	Többféle*
Nem tudatosuló	Izomhossz	Idegvégződések	Izomorsó
	Izomfeszülés	Idegvégződések	Golgi-féle inszerv
	Artériás vérnyomás	Idegvégződések	A sinus caroticus és az aortaív nyújtási receptorai
	Centrális vénás nyomás	Idegvégződések	A nagyvénák és a pitvarok falának nyújtási receptorai
	A tüdő feszülése	Idegvégződések	A tüdőszövet nyújtási receptorai
	A vér hőmérséklete	Hypothalamusneuronok	...
	Artériás P _O ₂	Idegvégződések	Glomus caroticum és aorticum
	Liquor-pH	A nyúltvelő ventrális felszínének receptorai	...
	A plazma ozmotikus nyomása	Az OVLT és valószínűleg más circumventricularis szervek az elülső hypothalamusban	...
	Arteriovenosus glukózkülönbség	Hypothalamus (glukosztát) sejtjei	...

Érzékszervi receptorok érzékenysége

eV nagyságrendű inger is
elegendő az ingerület kiváltására:

- hallóreceptörök: a levegő molekulák termikus mozgása
- fényreceptorok: 1-2 foton

A jelátalakítás lépései



Ingerület: "kódolja" az inger
 1. modalitását (inger típusa)
 2. intenzitását (inger erőssége)
 3. időtartamát
 4. lokalizációját

I. Modalitás

Az inger fizikai jellemzője. Pl. a látásé a fény, hallásé a hang, stb.

Adekvát inger: Az az energiafajta, amelyre a receptor a legérzékenyebb (pl. a pálcikák adekvát ingere a fény).

Specifikus érzékszervi energiák elve: Az érzetet az impulzusok által aktivált agyrész határozza meg!

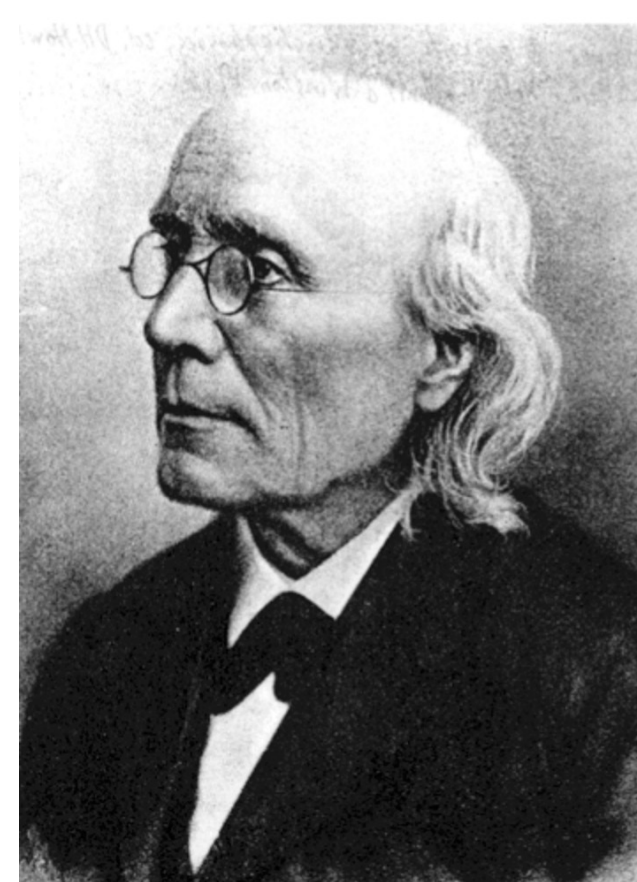
2. Ingerintenzitás és érzet

Weber-Fechner-féle
pszichofizikai alaptörvény

$$\psi = \text{const} \cdot \lg \frac{\phi}{\phi_0}$$



Weber (1795-1878)



Fechner (1801-1887)

Stevens-törvény

$$\psi = \text{const} \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^n$$



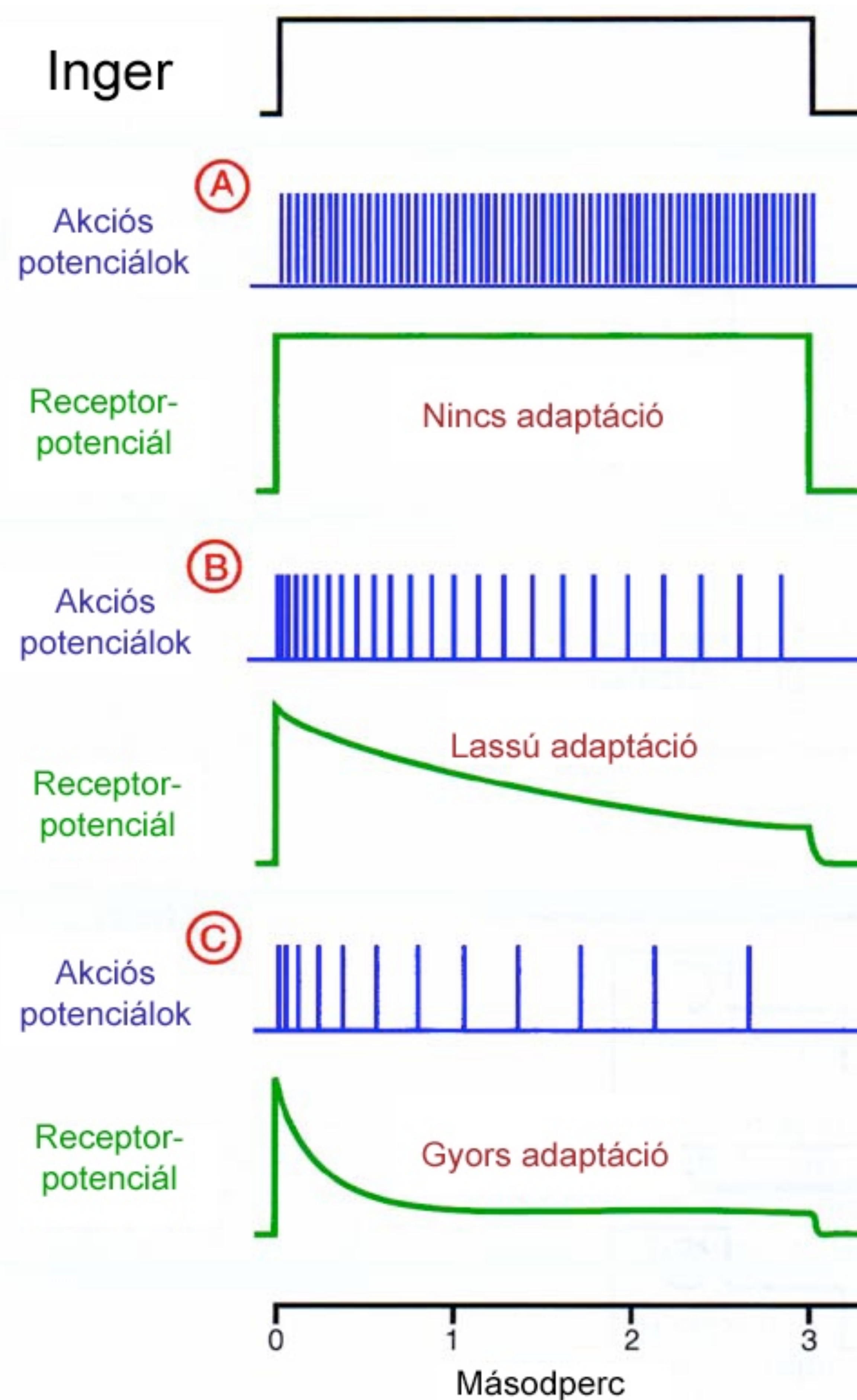
Stevens (1906-1973)

ψ = érzet erőssége
 ϕ = háttérintenzitás
 ϕ_0 = abszolút küszöbinger
 n = érzékelés fajtájára jellemző konstants

$n < 1$: kompresszív függvény
(hallás, látás)

$n > 1$: expanzív függvény
(nyomás, ízlelés)

3. Időtartam, adaptáció



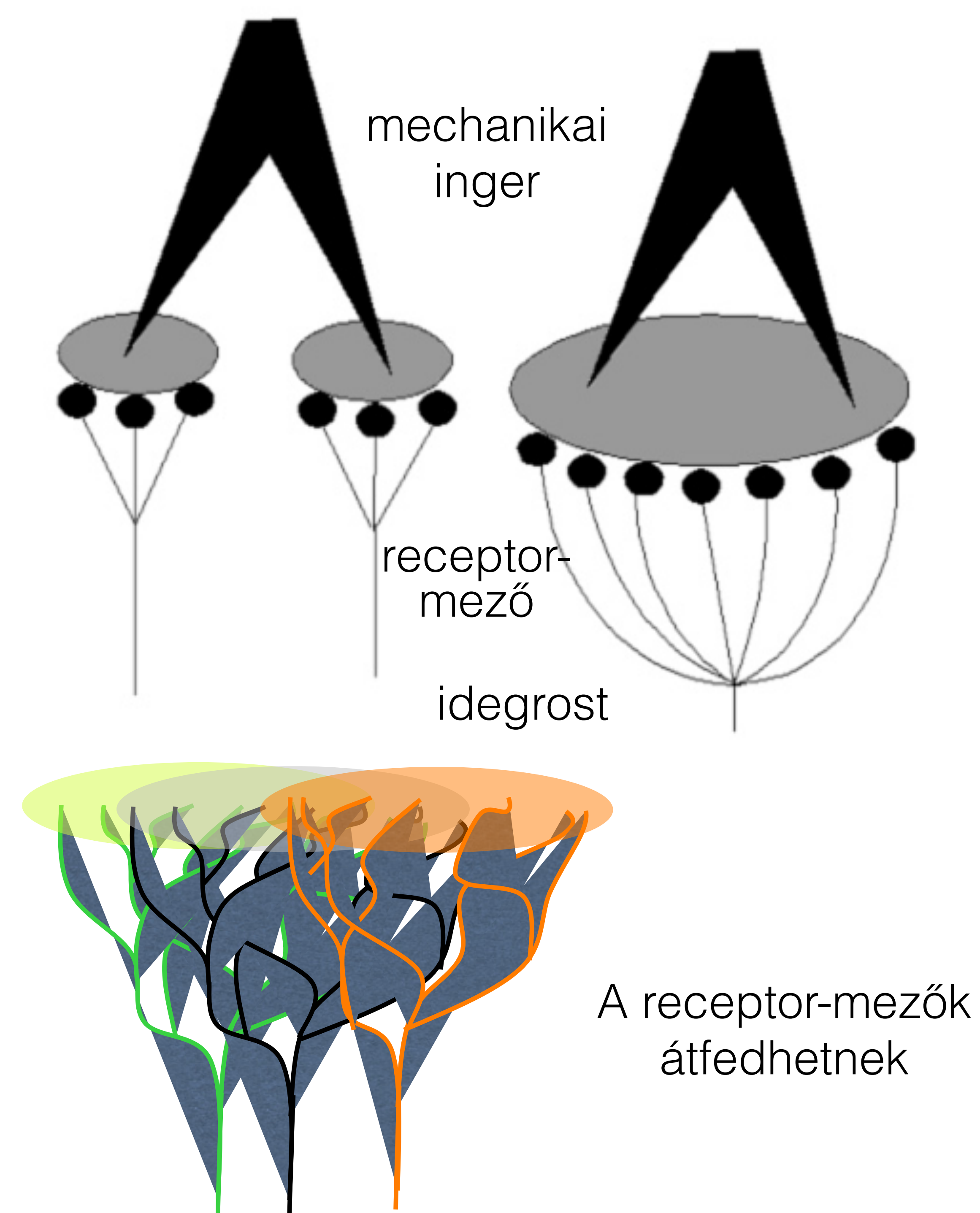
Adaptáció: konstans ingerintenzitás mellett az akciós potenciál frekvencia folyamatosan csökken.

Gyorsan adaptálódó (fázisos) receptorok: tapintás, szaglás, hőérzet

Lassan és csak korlátozott mértékben adaptálódó (tónusos) receptorok: hideg, fájdalom, (pl. fogfájás)

4. Lokalizáció

A többszörösen elágazó idegvégződések receptormezőket hoznak létre (konvergencia). Ilyenek találhatók pl. a bőrben (tapintóreceptorok) és a retina perifériáján (pálcikák).



A LÁTÁS BIOFIZIKÁJA

KELLERMAYER MIKLÓS

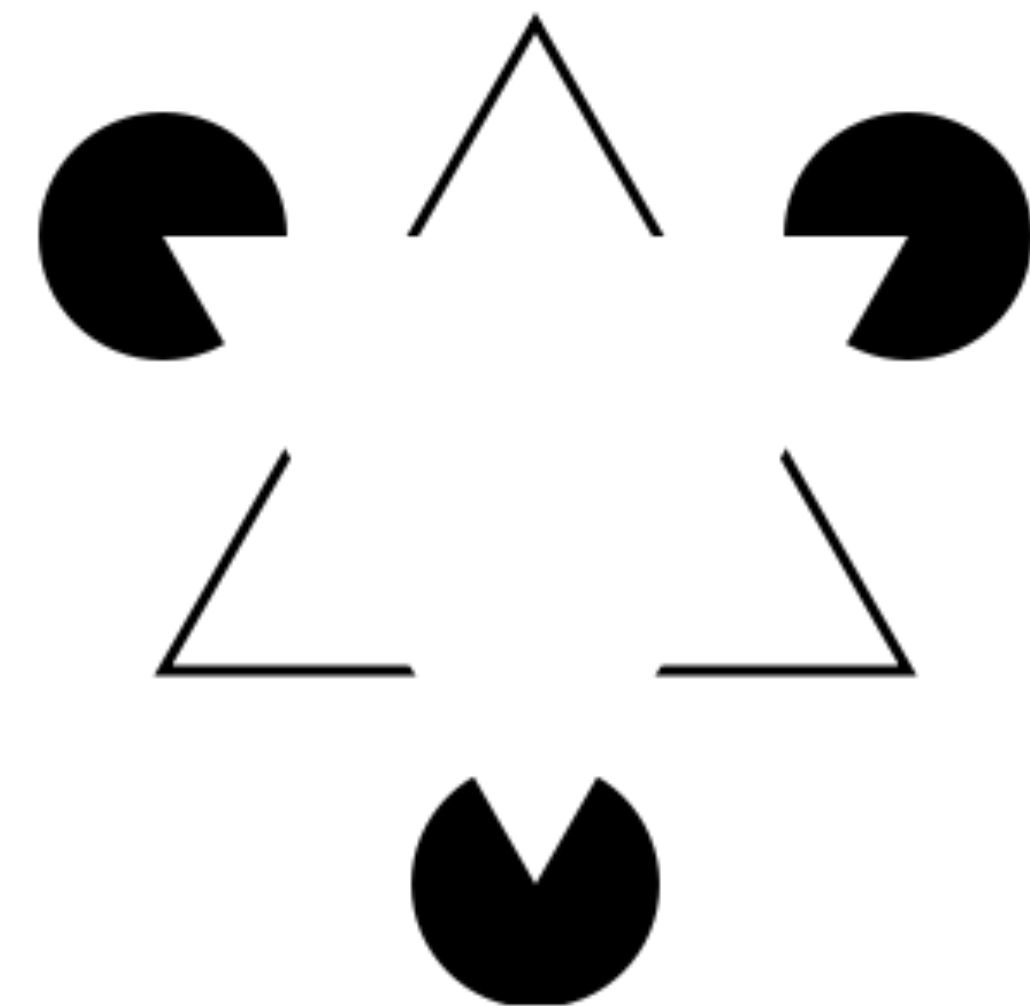
A látás biofizikája

A látórendszerben komplex jelfeldolgozás történik.
Ezt demonstrálják az optikai csalódások.

Optikai csalódás - intenzitás

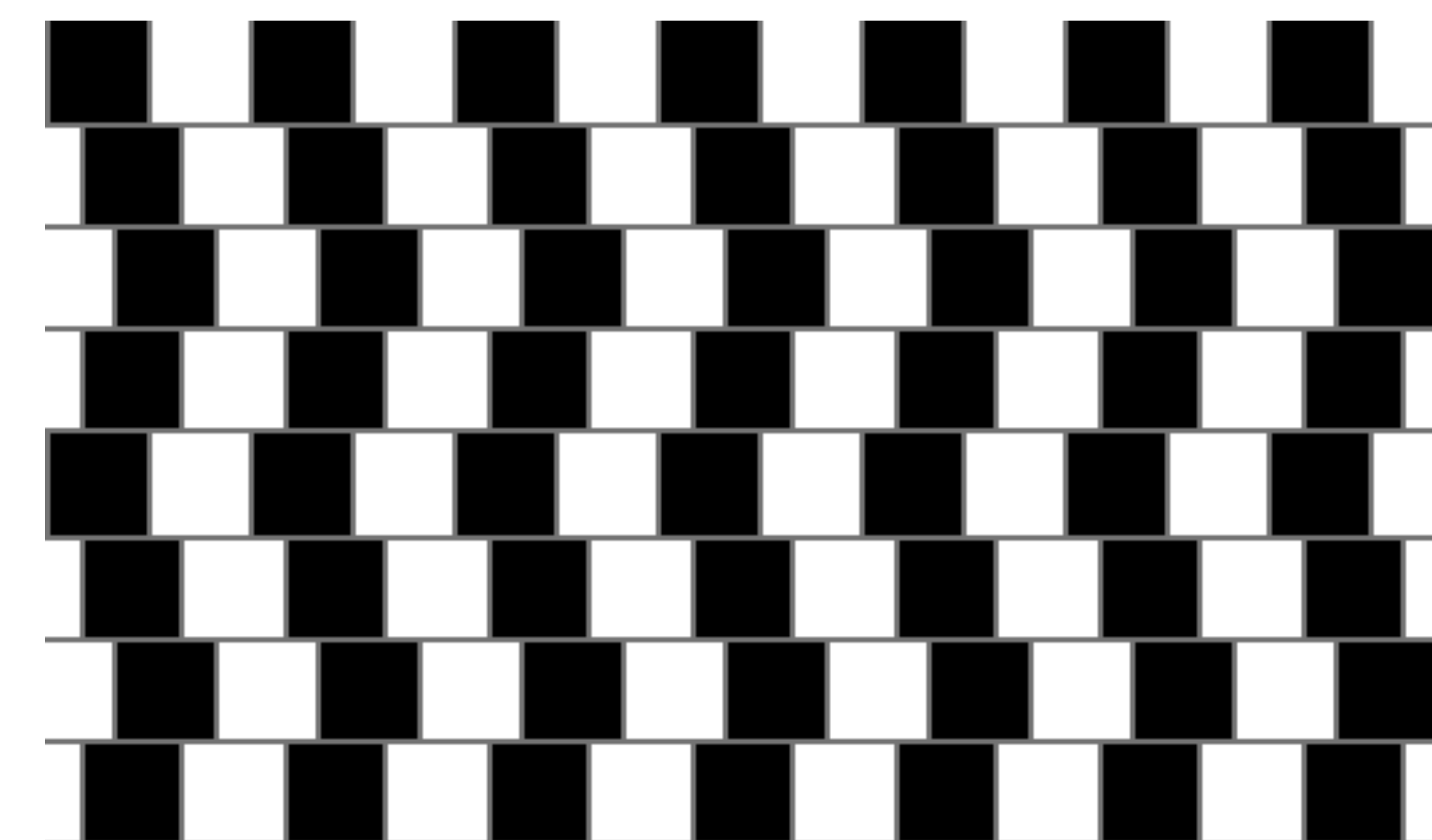


Mach sávok

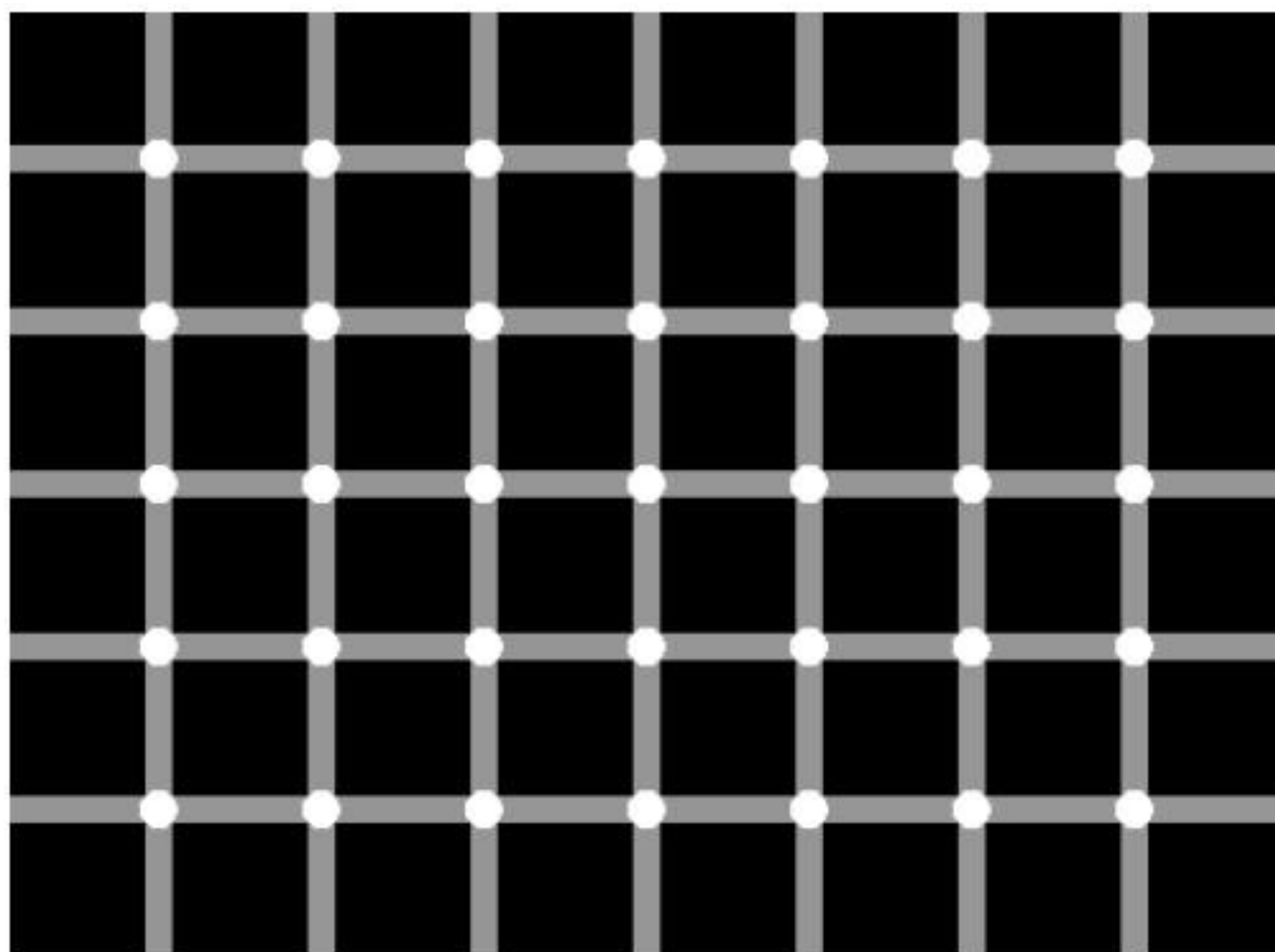


Kanizsa háromszög

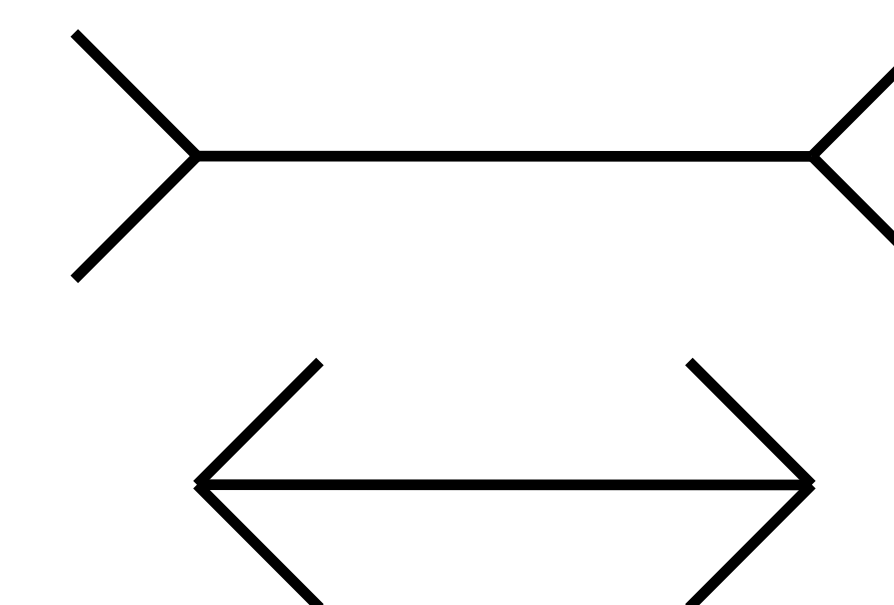
Optikai csalódás - irány, méret



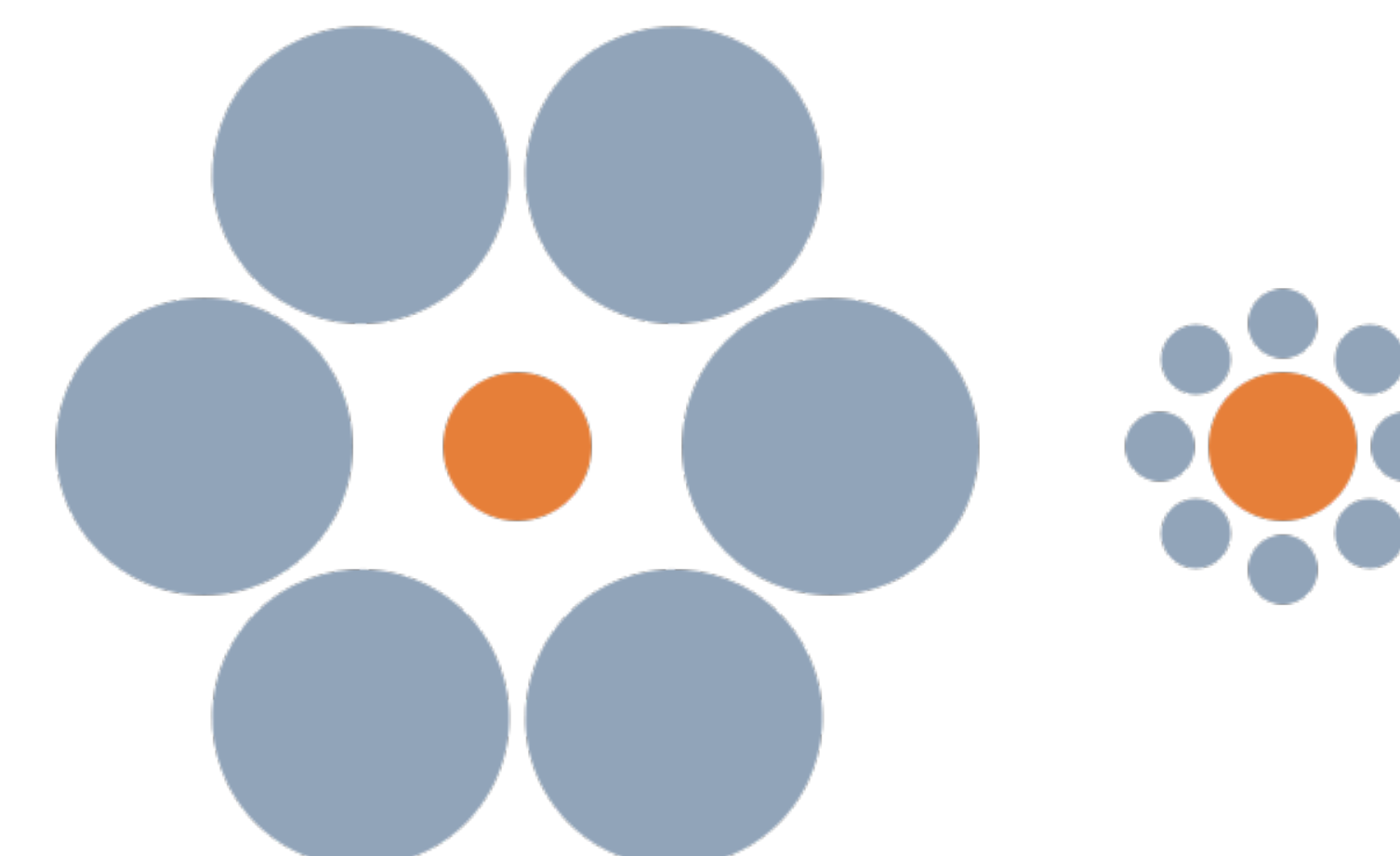
Café wall illúzió



Hány fekete korongot látunk?

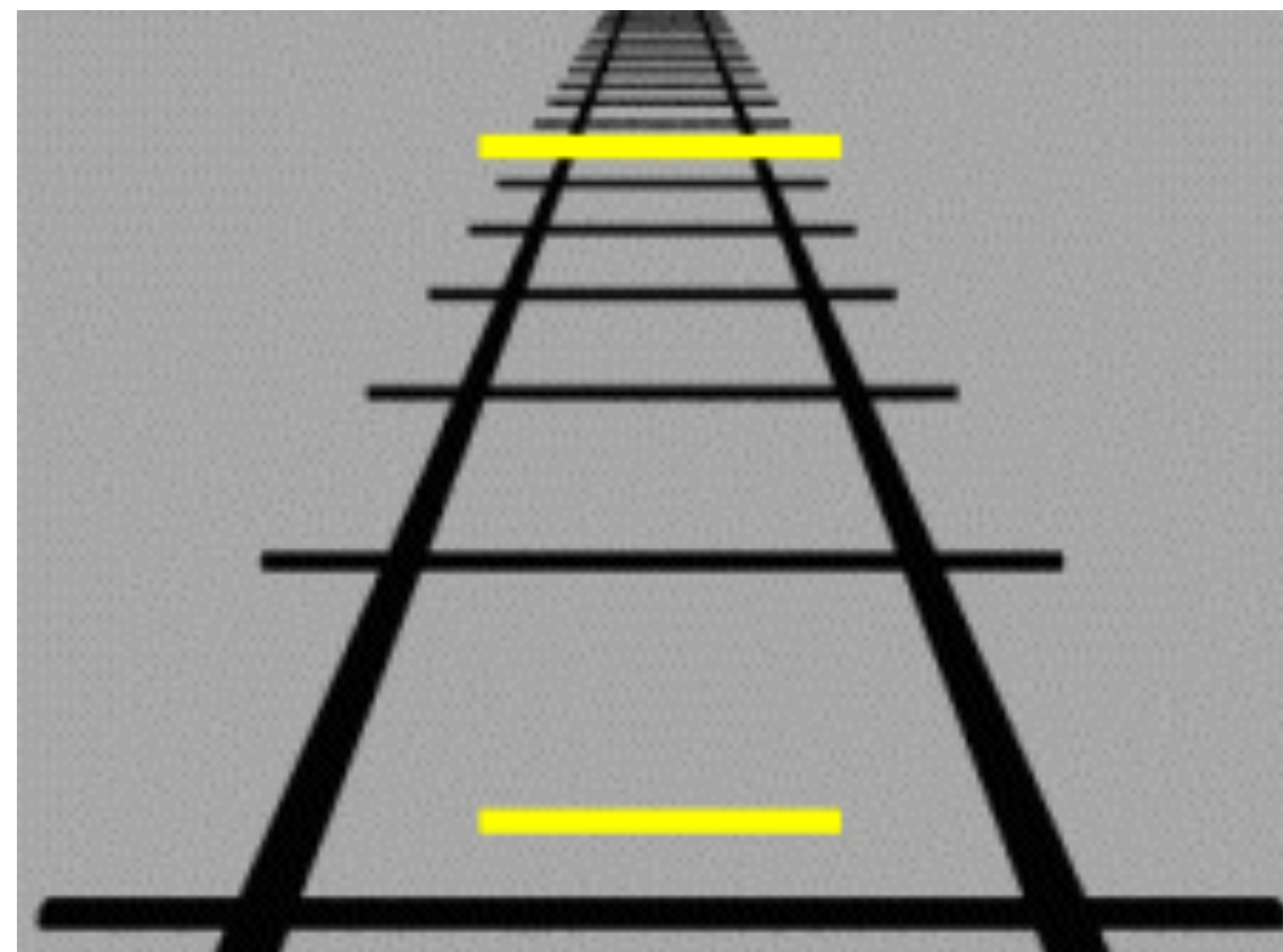


Müller-Lyer
illúzió

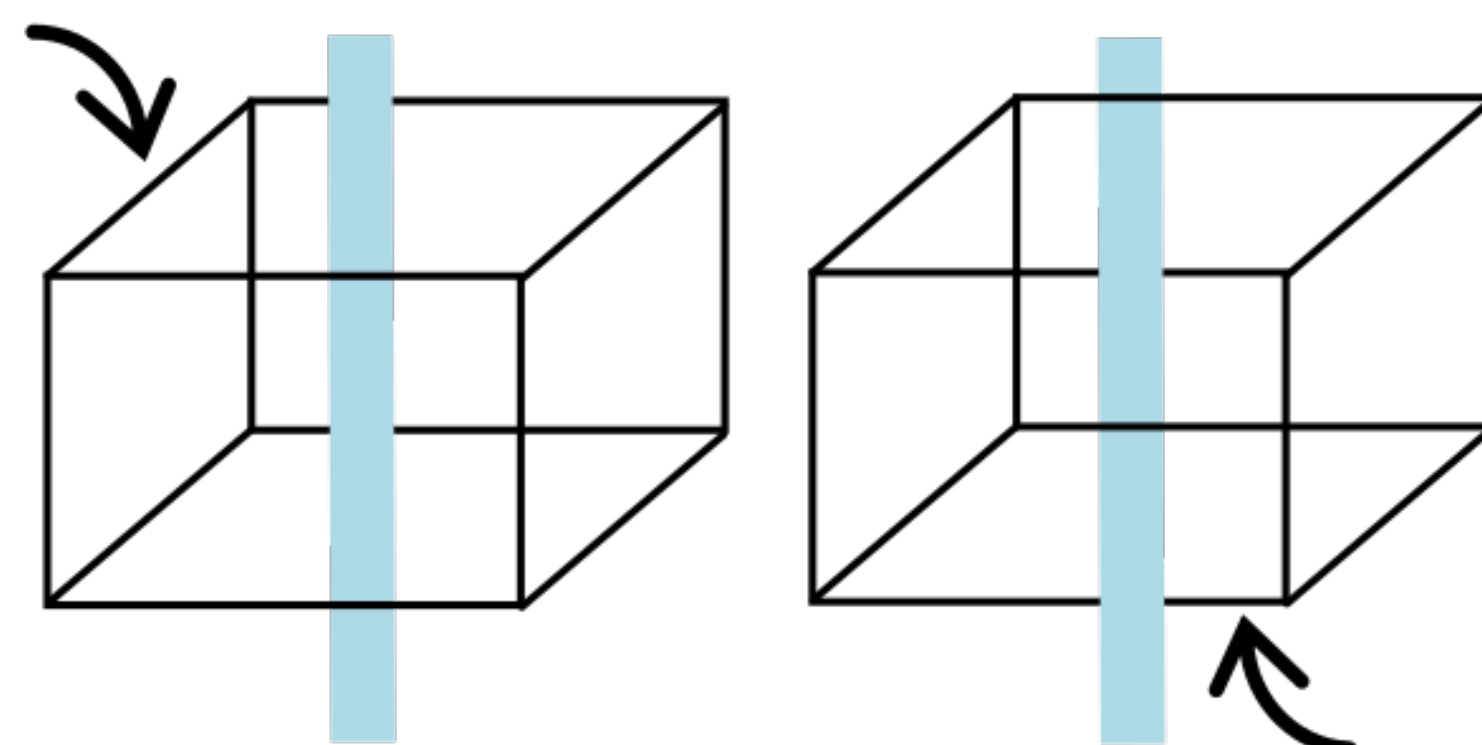


Ebbinghaus illúzió

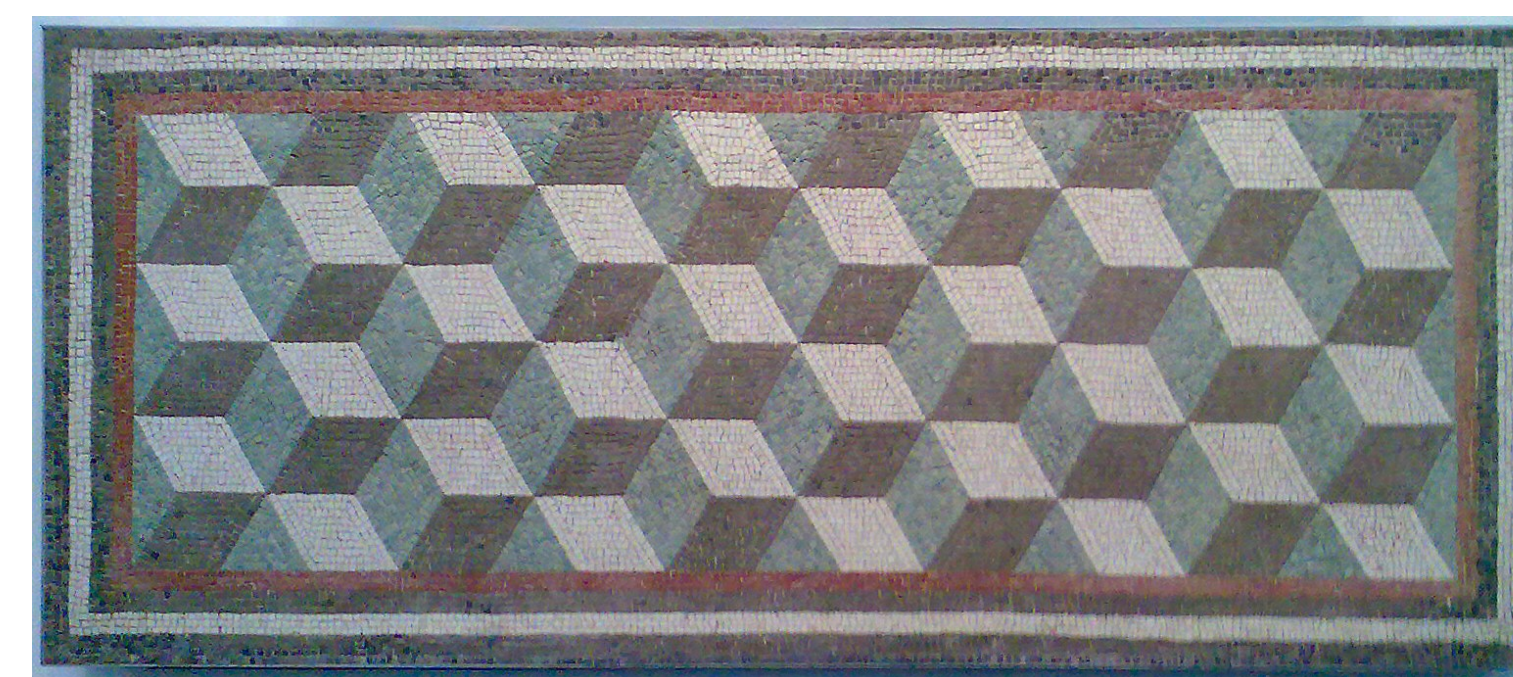
Optikai csalódások – tér, alak



Ponzo illúzió



Necker kocka

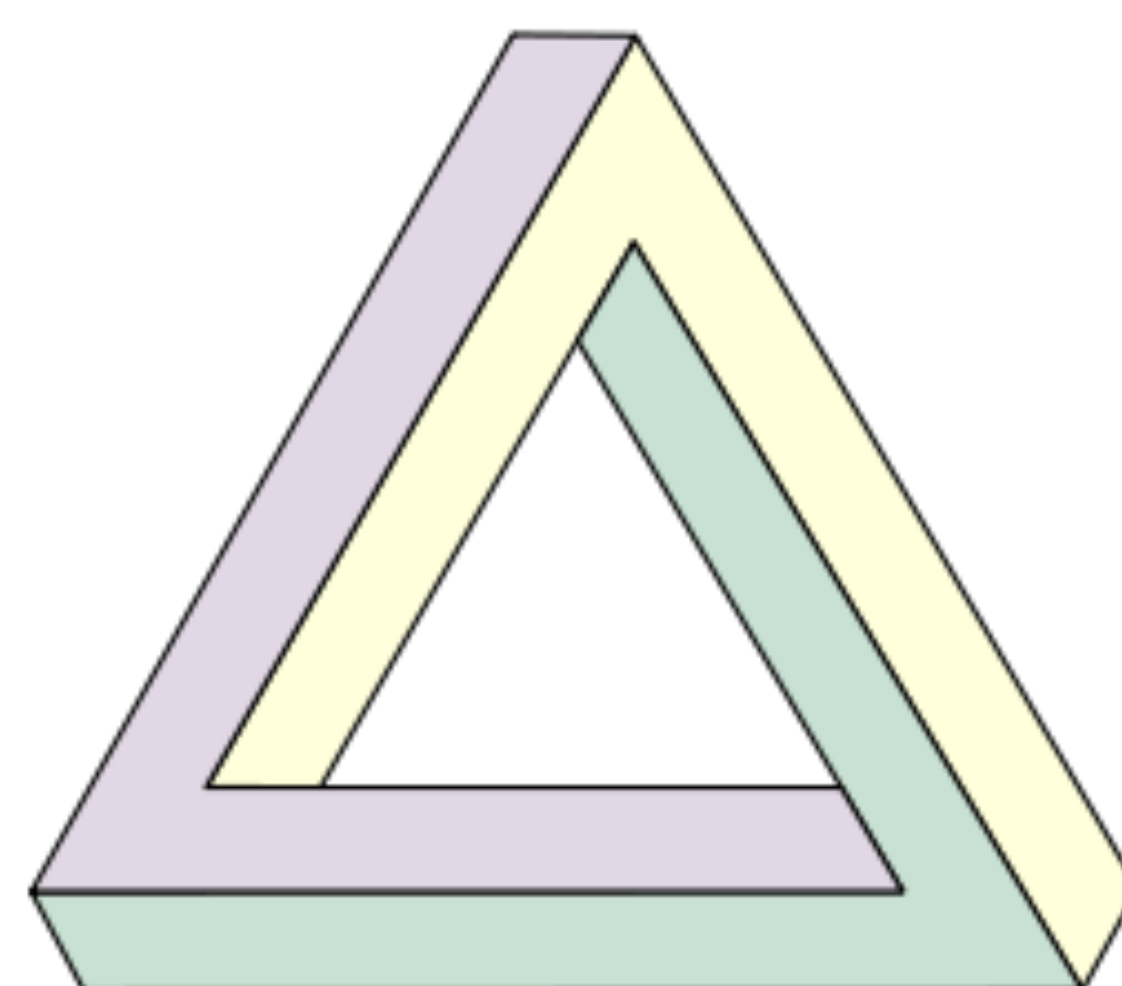


Necker kocka effektus római térhatású mozaikon

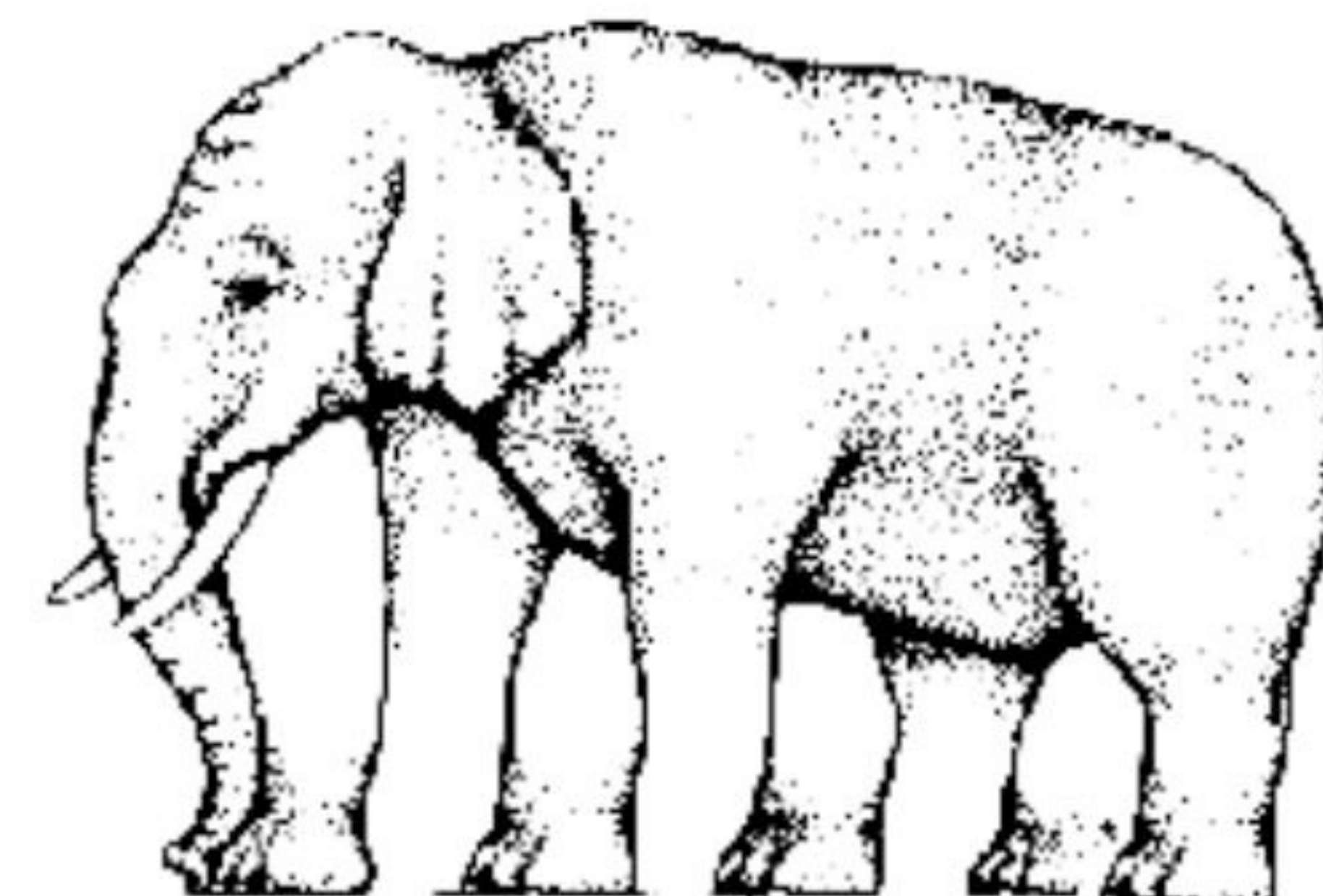
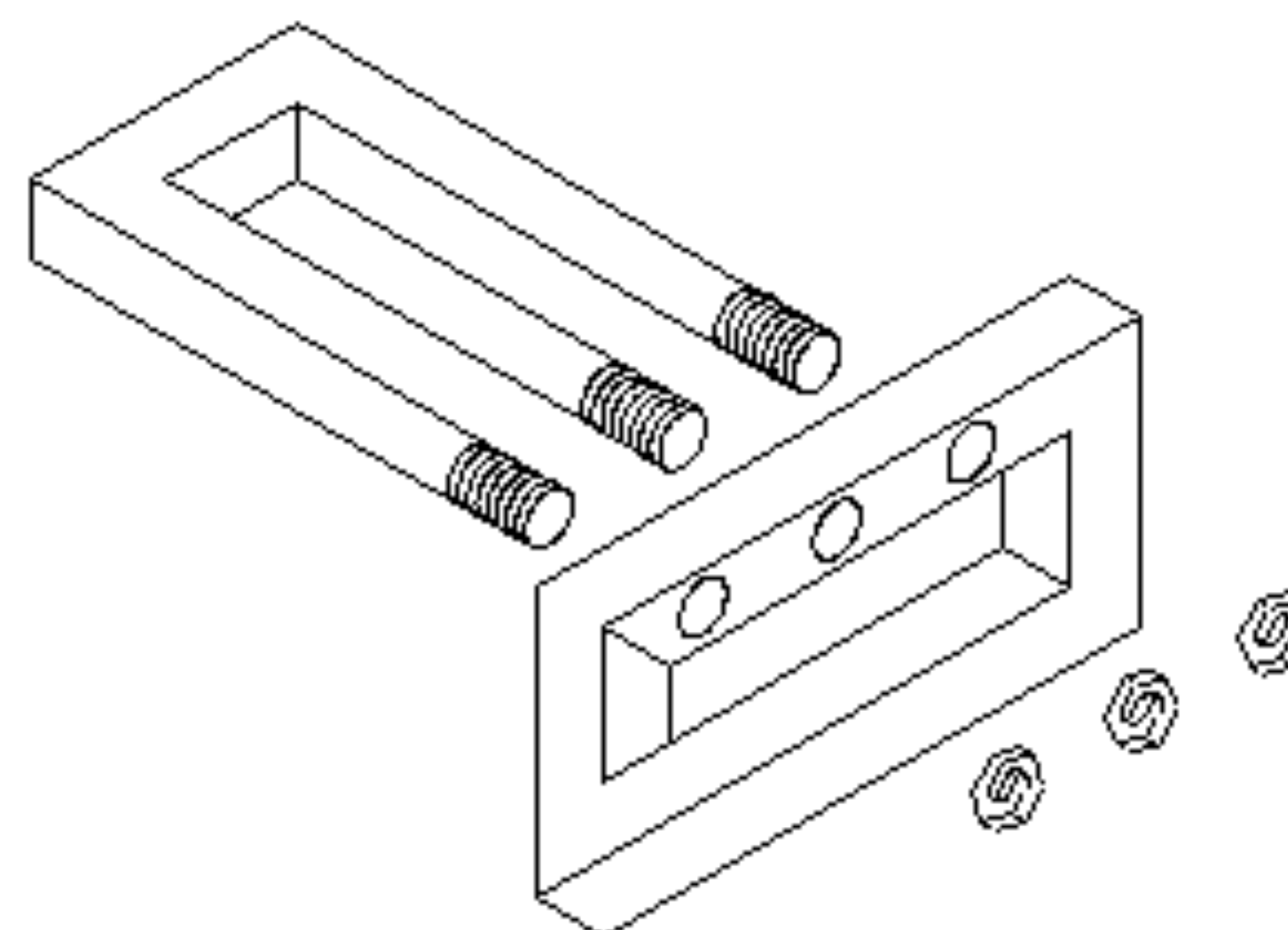


Rubinváza illúzió

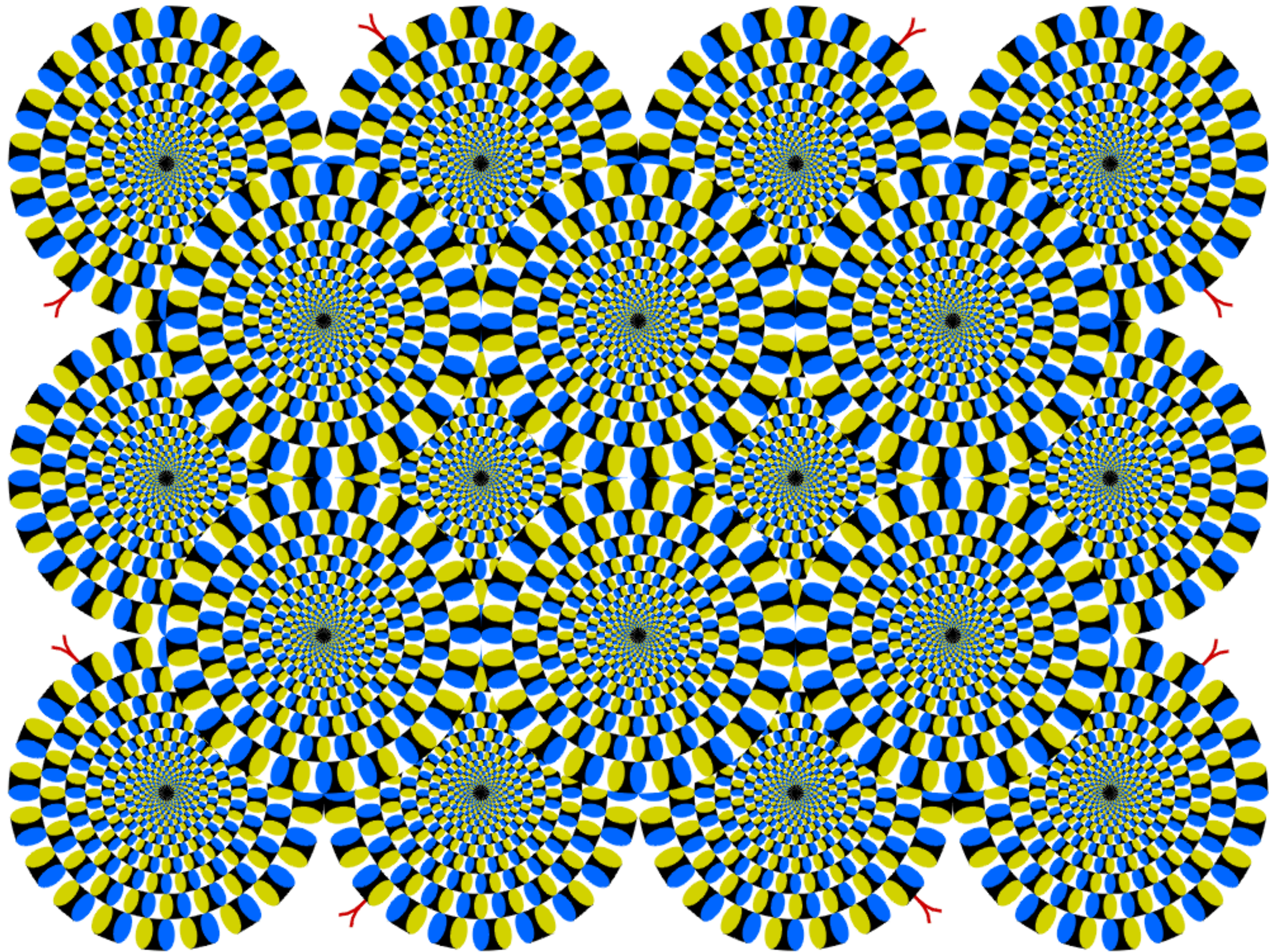
“Lehetetlen”
geometriai
alakzatok



Penrose háromszög

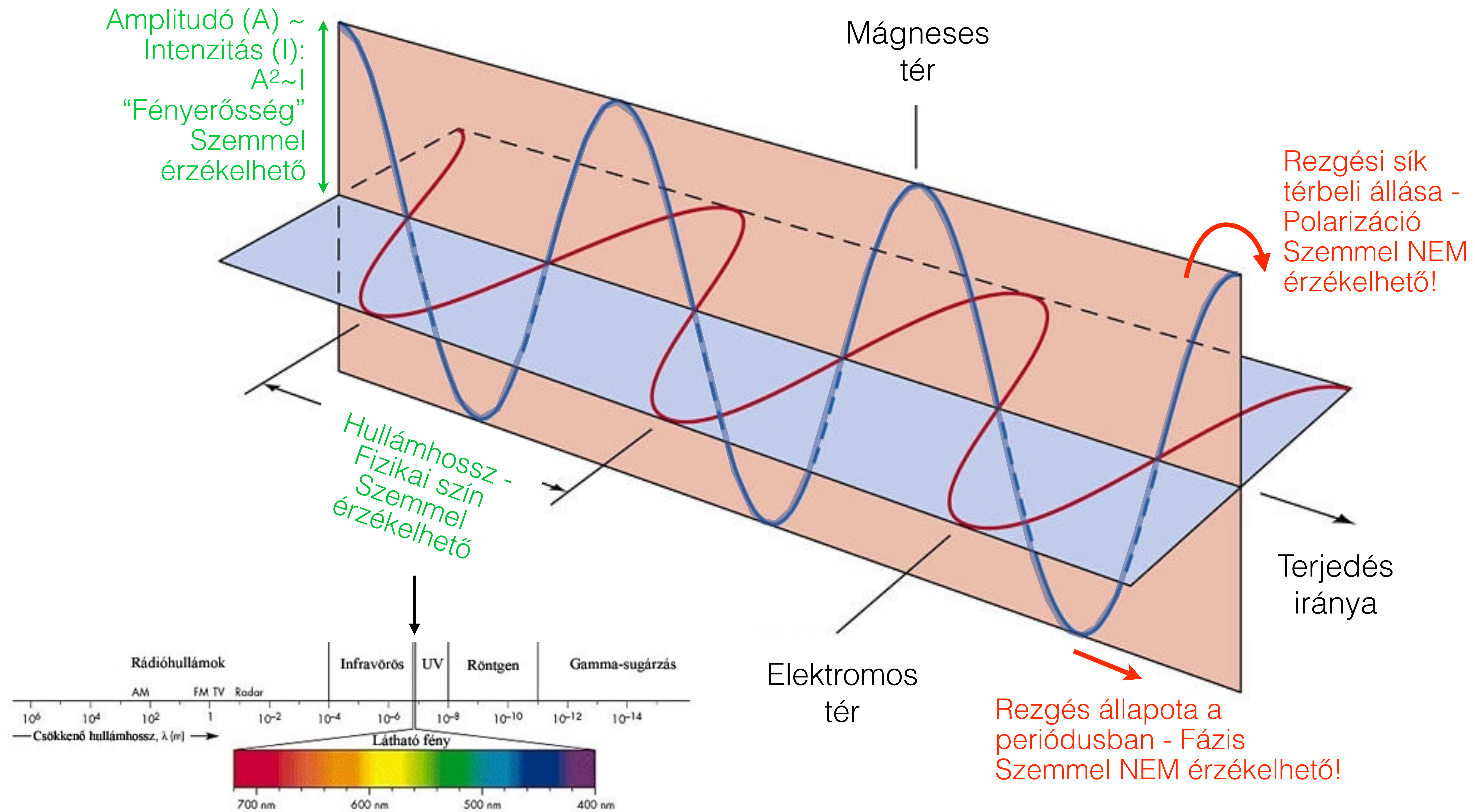


Hány lába van
az elefántnak?



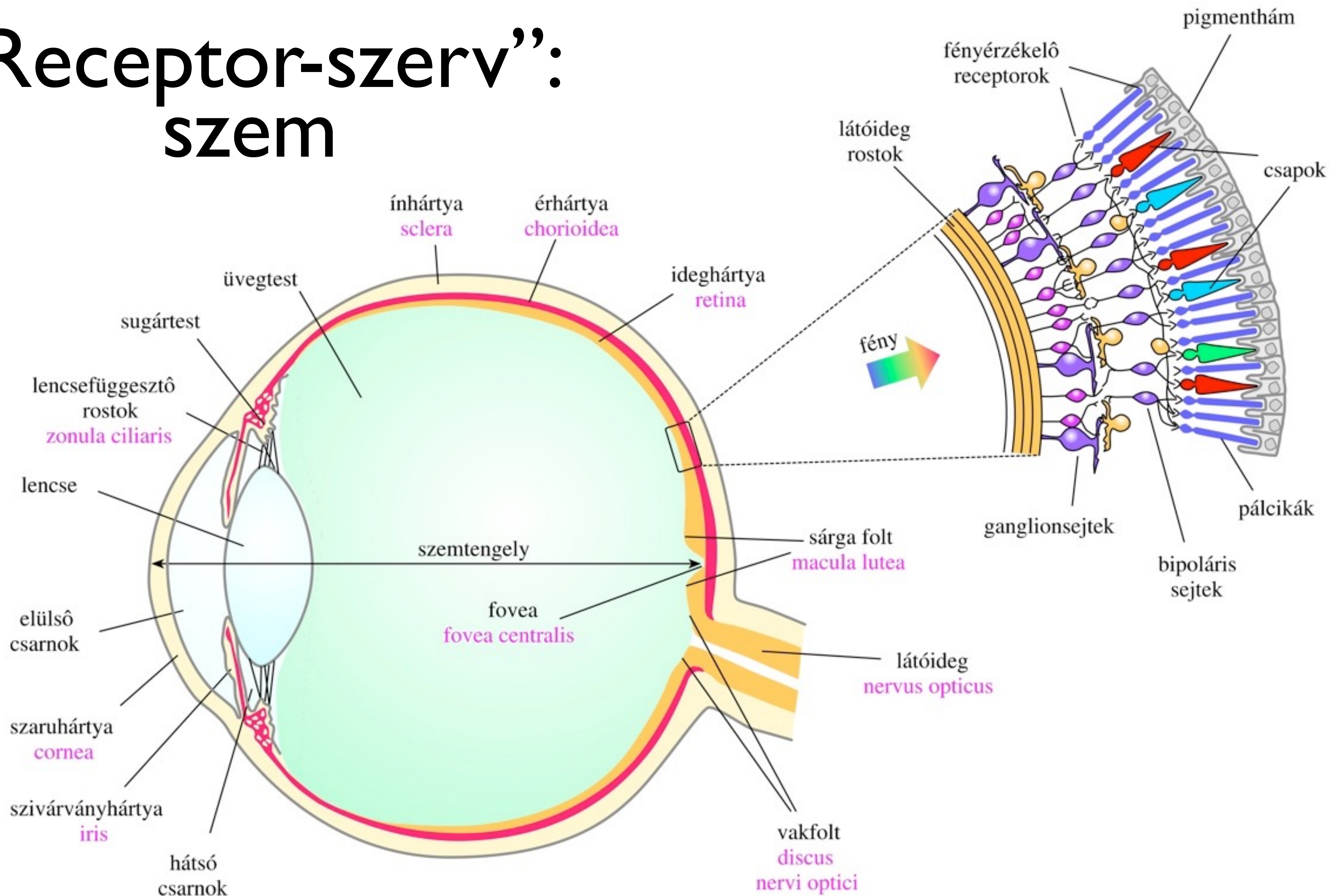
A látás ingere: fény

Elektromágneses (tranzverzális) hullám

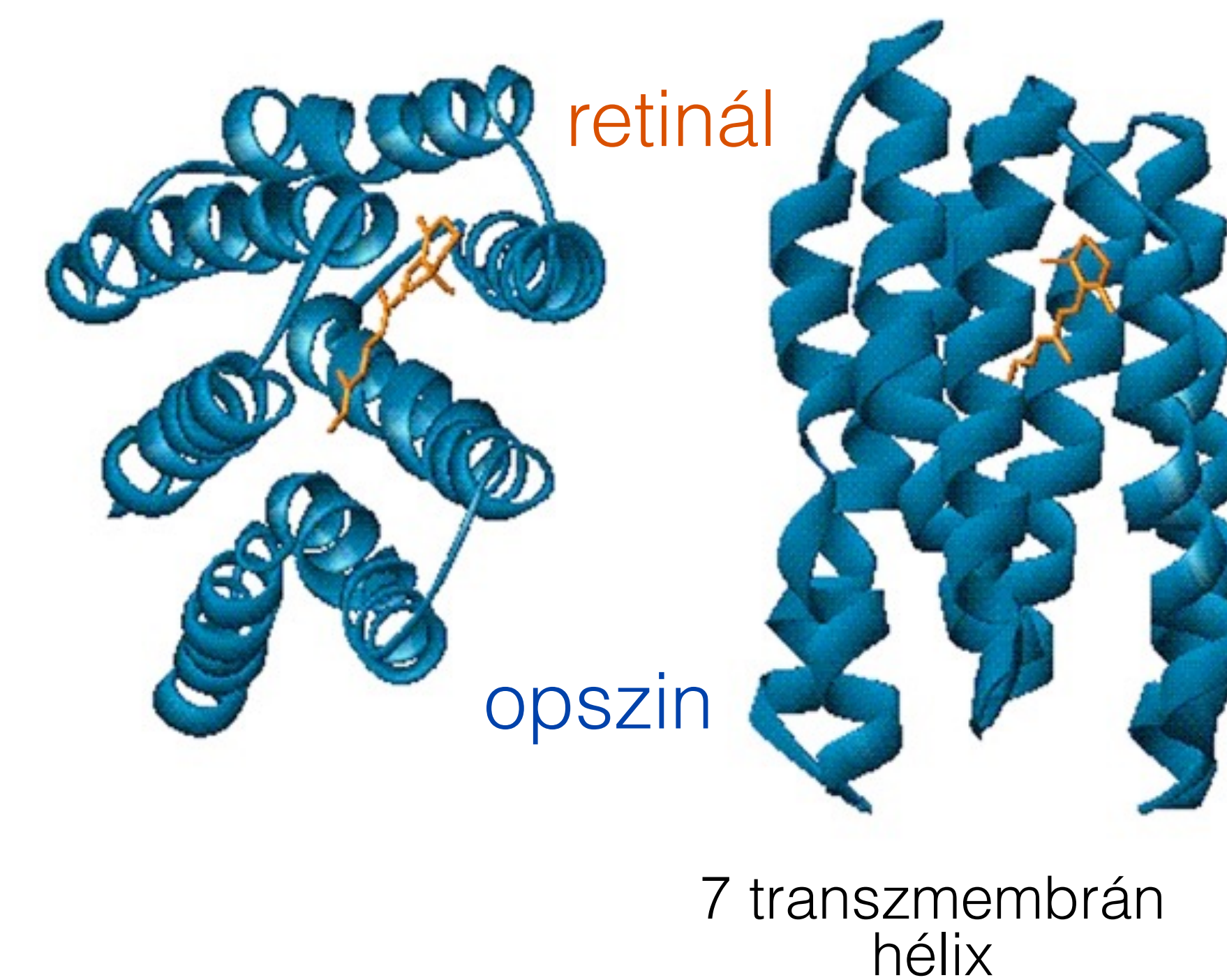
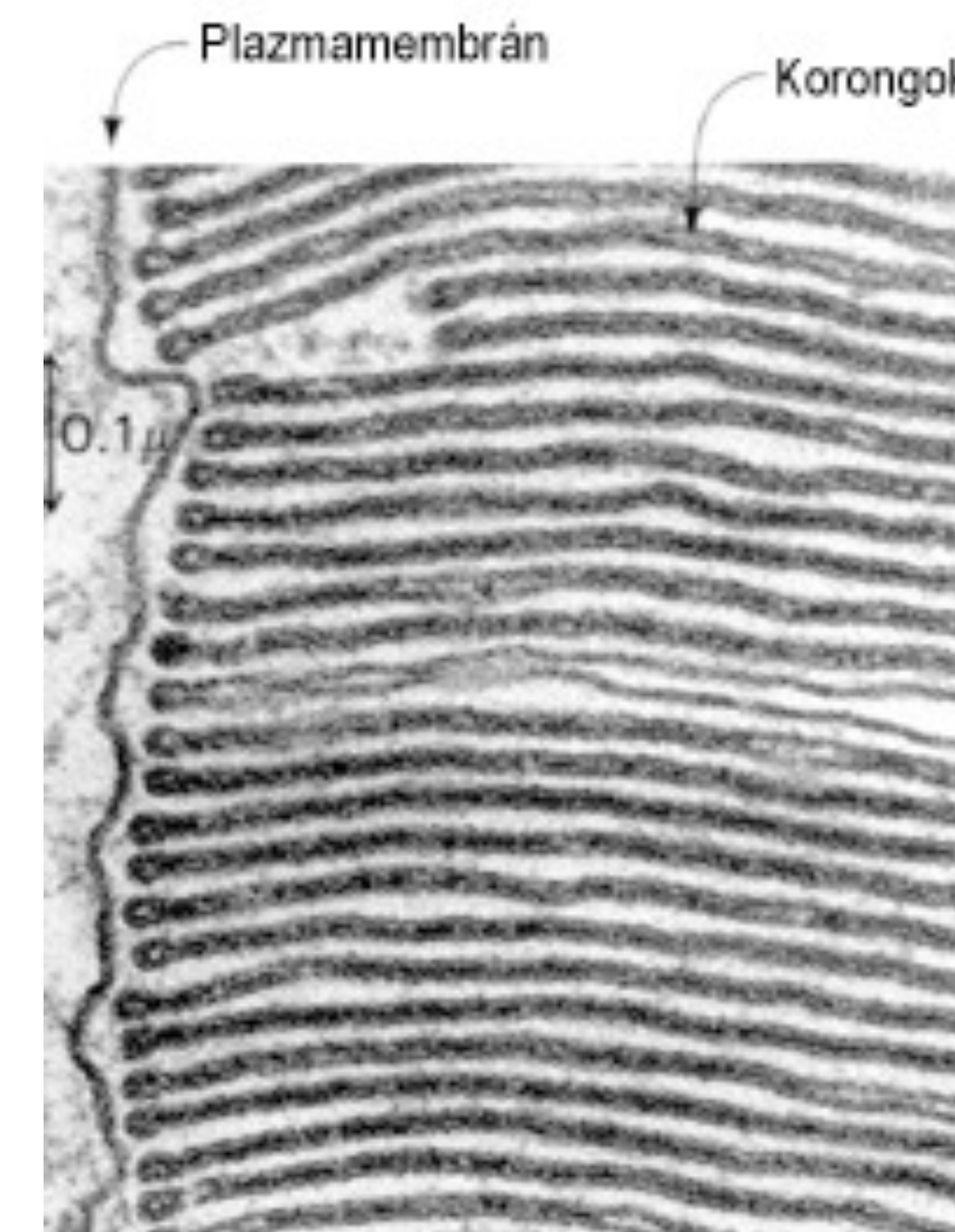
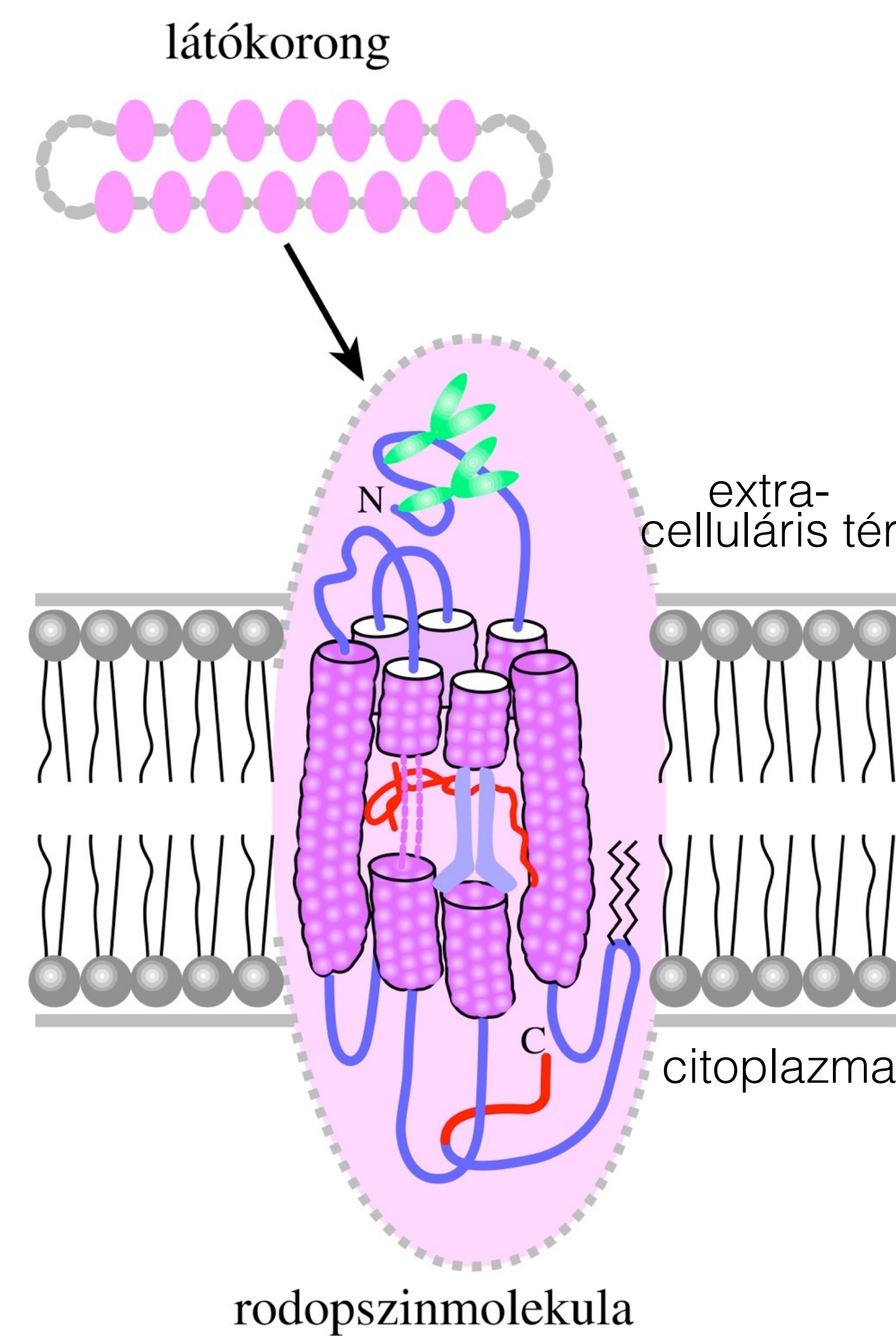
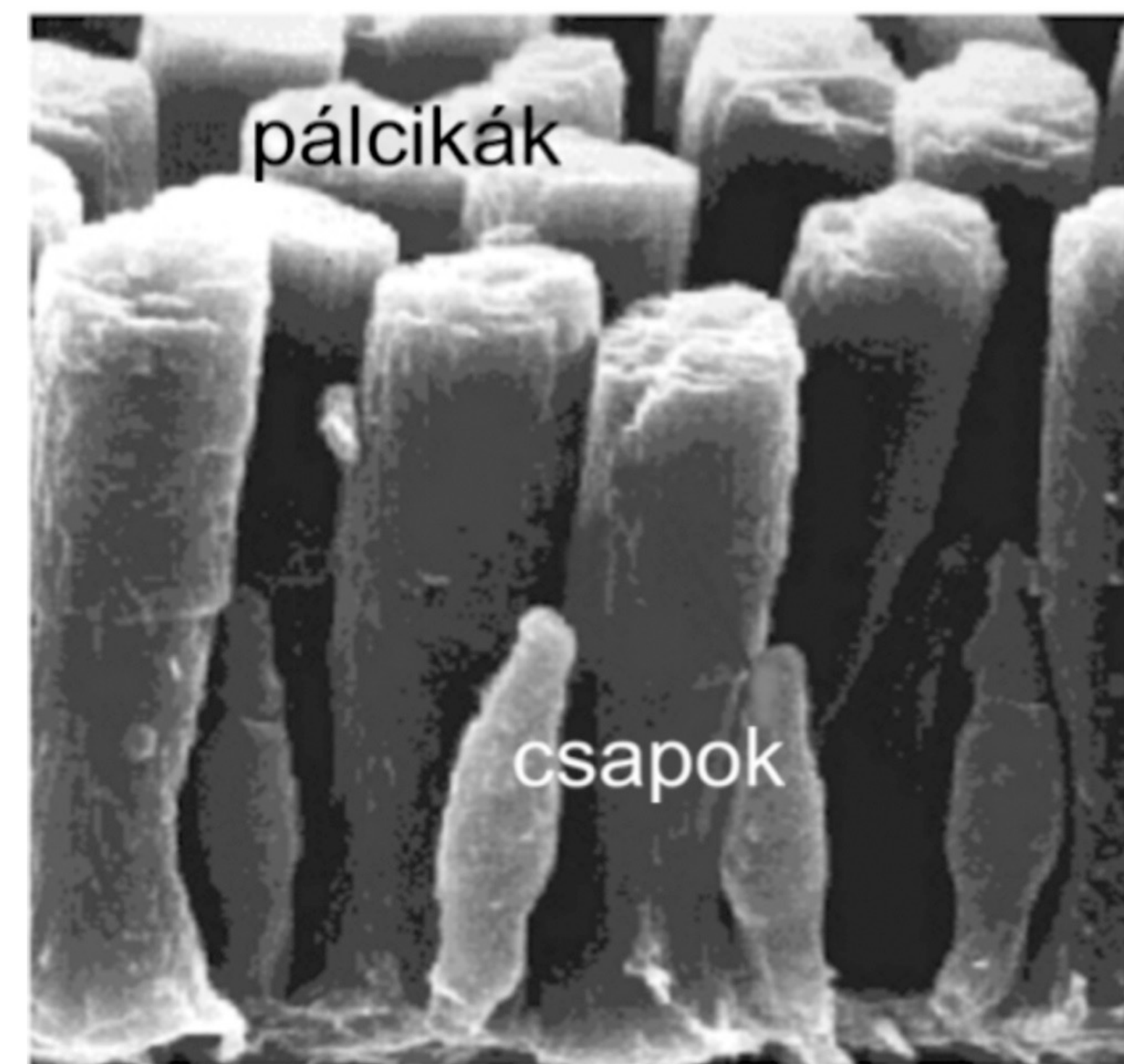
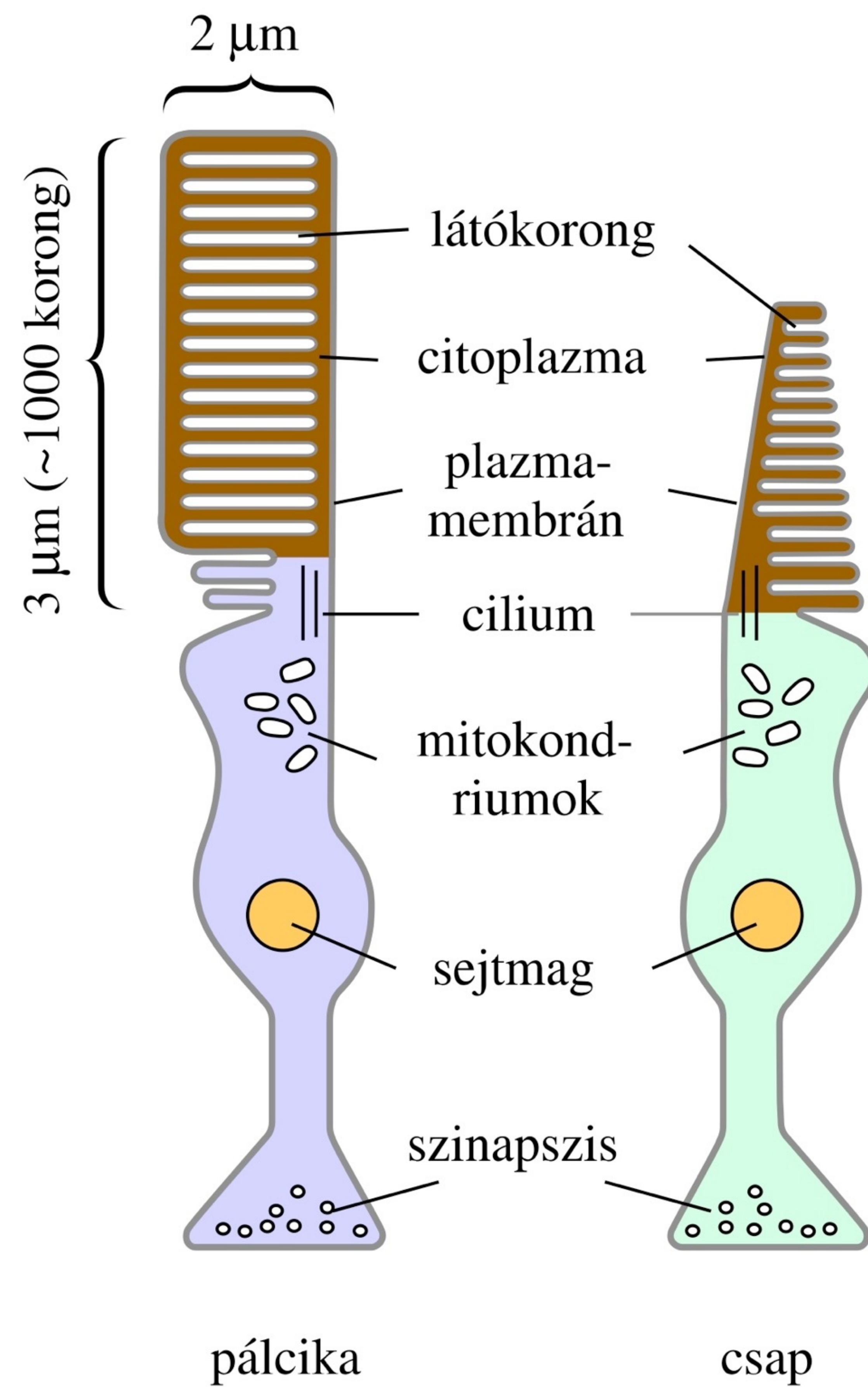


- A szem érzékeny: hullámhosszra és amplitudóra (~intenzitás)
- A szem érzéketlen: fázisra és polarizációra

“Receptor-szerv”: szem



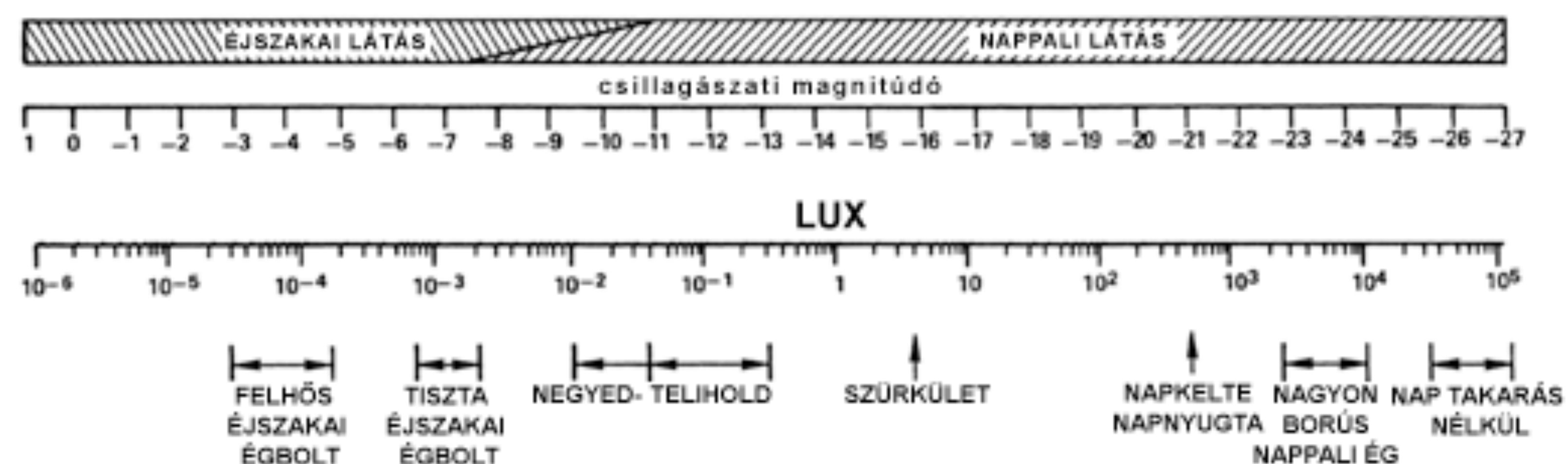
Fotoreceptorok



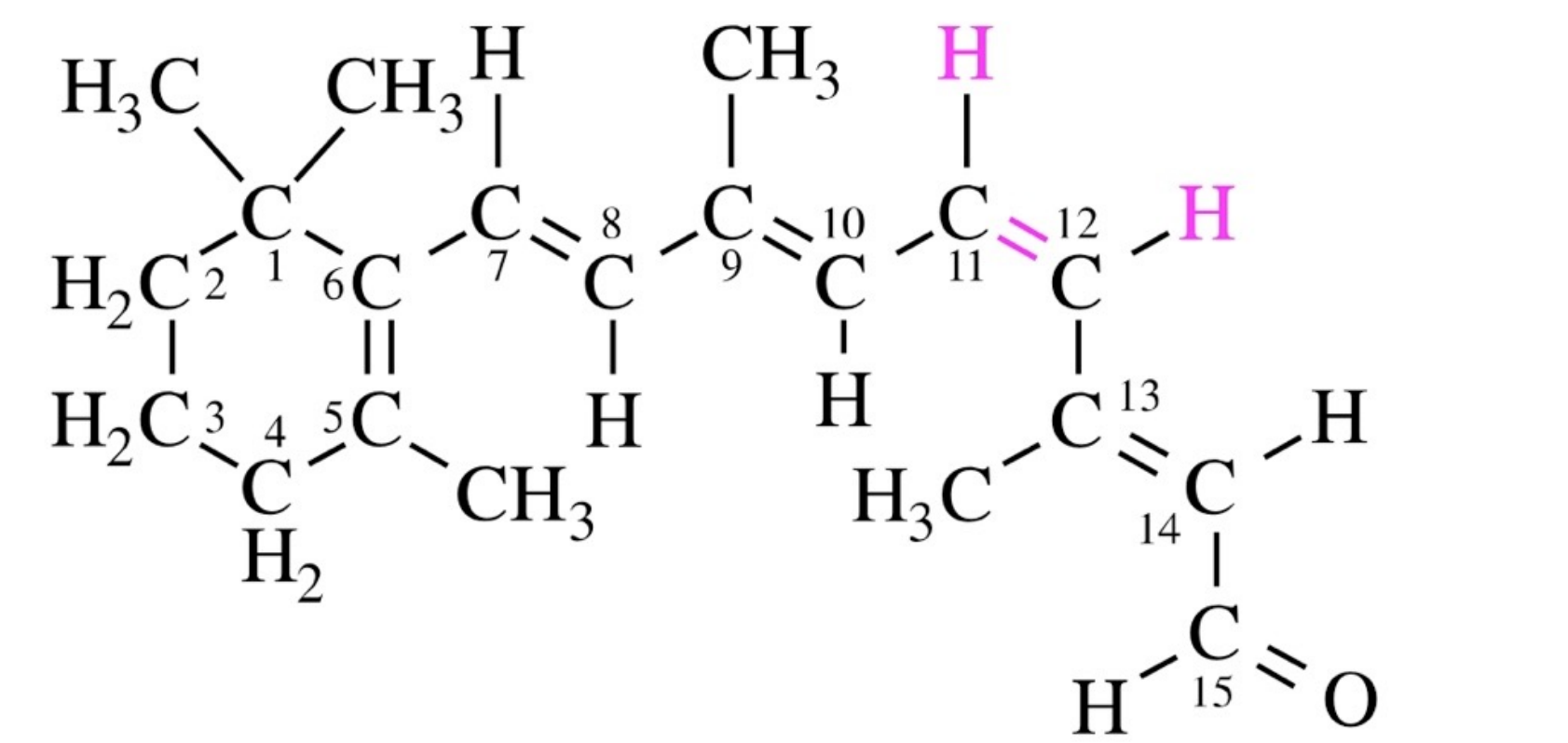
A receptorsejtek tulajdonságai

Pálcikák	Csapok
Kis fényintenzitást képes érzékelni (optimális esetben akár 1 fotont!)	Kevésbé érzékeny, de nagy intenzitástartományban érzékel
Közepes fényerősségnél válasza telítődik	Nincs telítődés
Főleg a retina perifériáján található	Foveában, főleg fovea centralis
Több pálcika - egy ganglion (nagyobb érzékenység, kisebb térbeli felbontás)	Kevésbé konvergáló idegi kapcsolatok (jobb térbeli felbontás)
Nem érzékel színeket	Színérzékeny
Frekvencia érzékenysége nagy	Frekvencia érzékenysége alacsony (~20 Hz)

Receptorok együttes
dinamikus tartománya:
 $10^{-9} - 10^5$ lux!

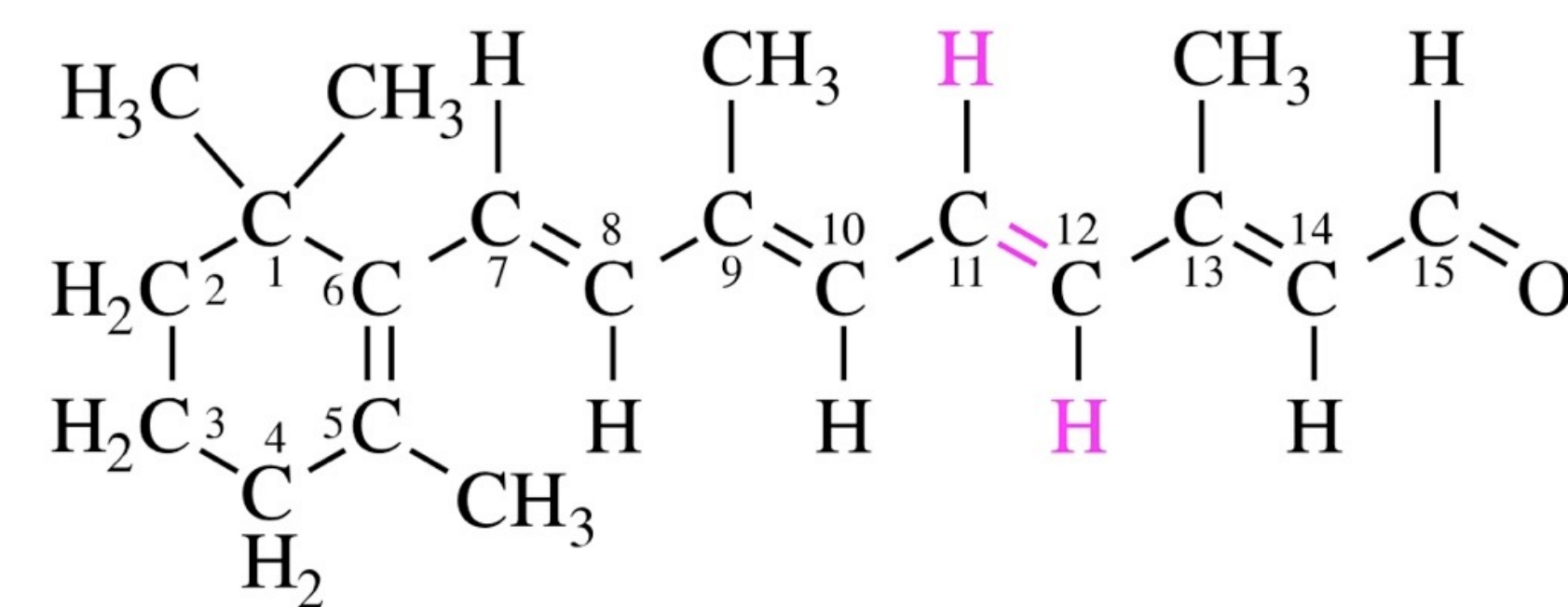


Fényérzékelés alapja: fotokémiai reakció

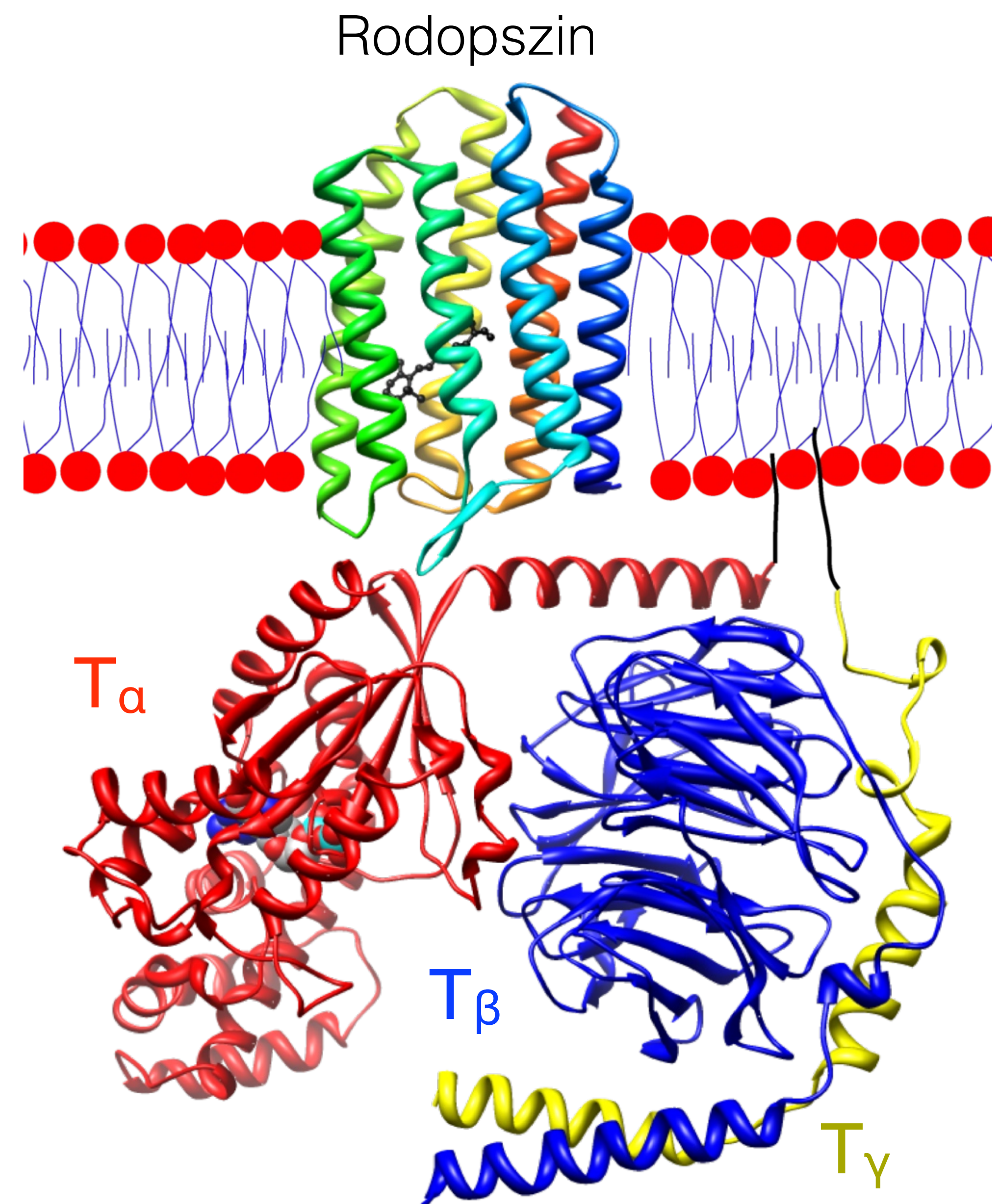


11-cisz-retinál

fényerjesztés



all-transz-retinál



Transzducin (T)

1 rodopszin elnyel 1 fotont

↓
metarodopszin

↓
transzducin molekula aktiválódik (T_α
alegység disszociál a $T_{\beta\gamma}$
alegységtől)

↓
500 foszfodiészteráz molekula
aktiválódik

↓
 10^5 cGMP molekula hidrolizálódik

↓
250 Na^+ -csatorna bezáródik

↓
másodpercenként 10^6 - 10^7 Na^+ ion
beáramlása gátlódik

↓
a sejt hiperpolarizálódik (1 mV)

↓
a transzmitterleadás csökken
(glutamát: gátló neurotranszmitter).

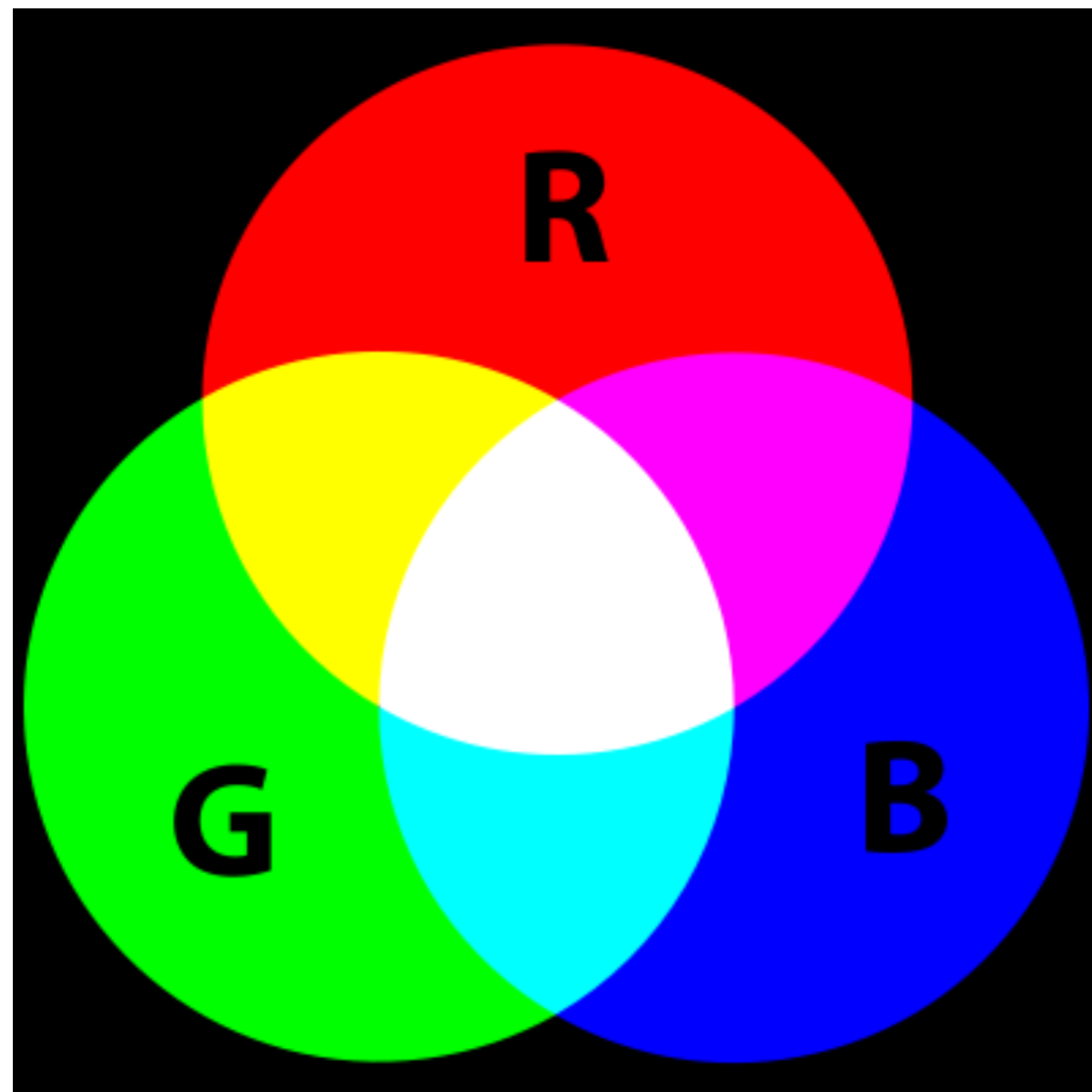
Erősítés:
($\sim 10^4$)

$$A = \frac{E_{ion}}{E_{photon}} = \frac{ne\Delta\varphi}{hf}$$

n : Na -ionszám változás
 e : elemi töltés
 $\Delta\varphi$: membránpotenciál
 h : Planck állandó
 f : fény frekvenciája

A színérzékelés alapja

Szín: érzet és nem fizikai tulajdonság (nem minden színhez rendelhető hullámhossz)



Additív színkódolás

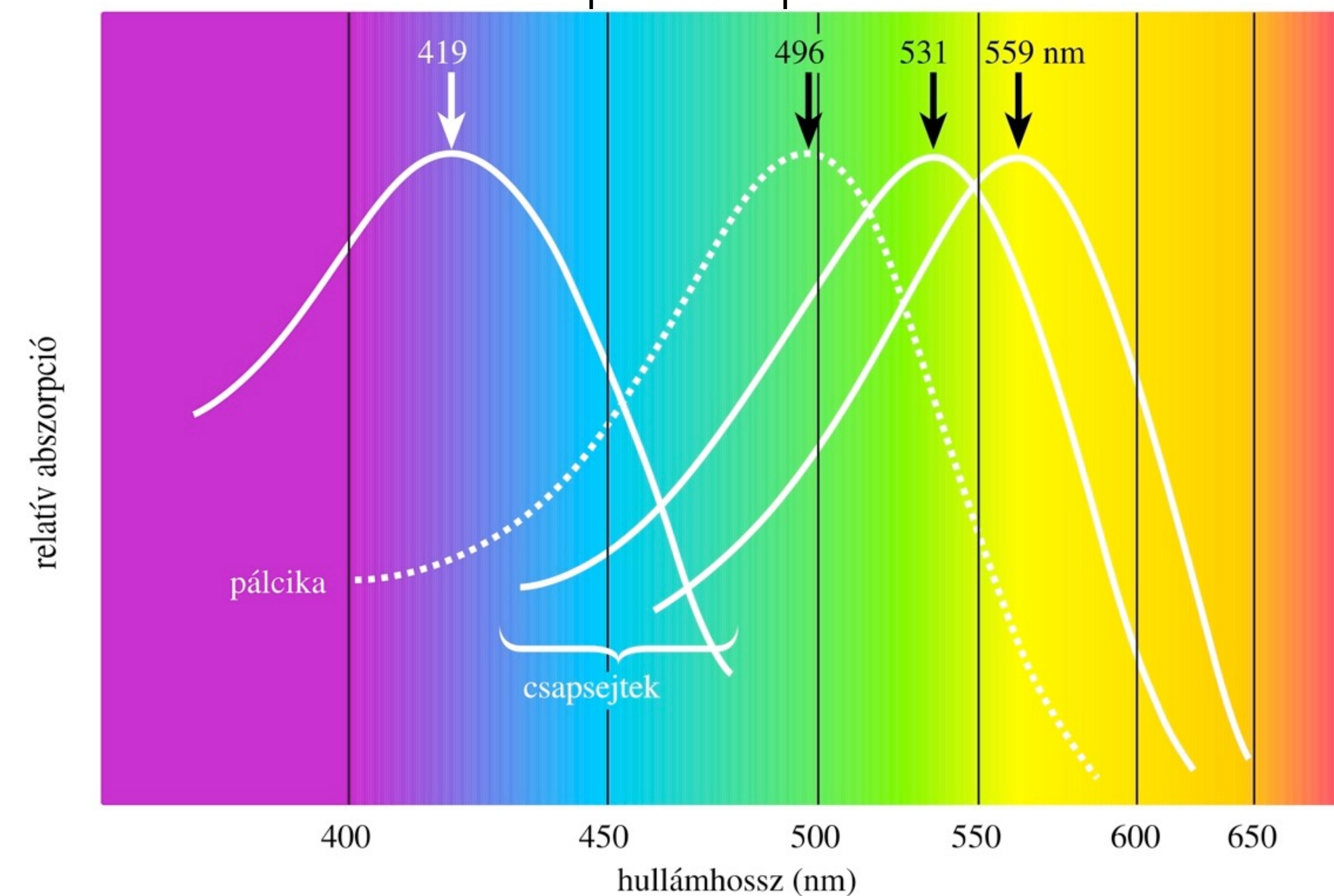
Bármely szín (X) kikeverhető a három alapszín (R =vörös, G =zöld, B =kék) megfelelő súlyozású (r , g , b) összekeverésével

$$X = rR + gG + bB$$

Emberi szemben:

- 3 különböző színérzékes receptor.
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ($R=64\%$, $G=32\%$, $B=2\%$).

Emberi szem színérzékes receptorainak (csapok) abszorpciós spektrumai

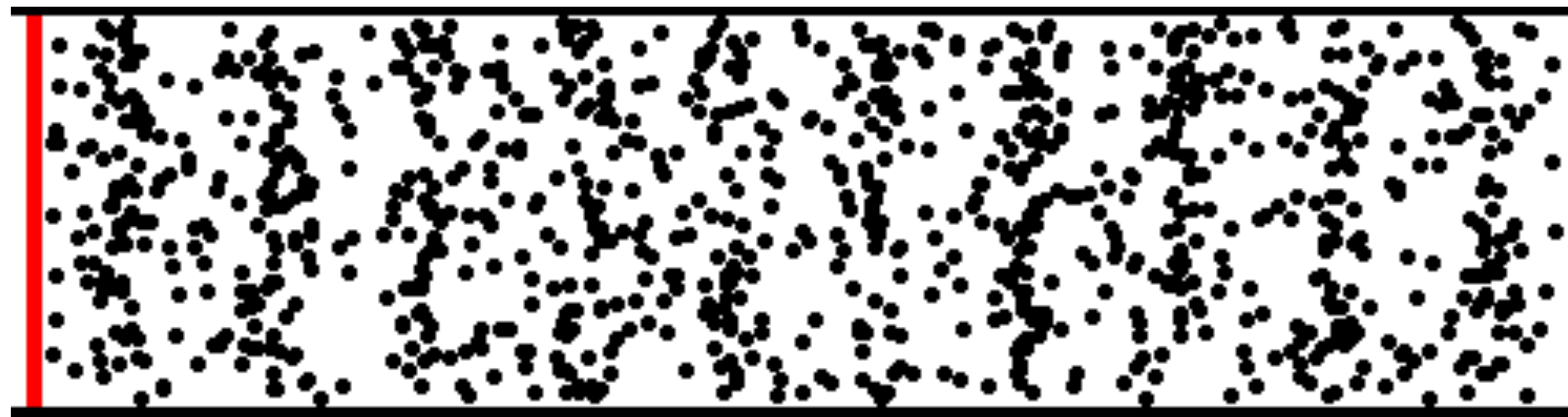
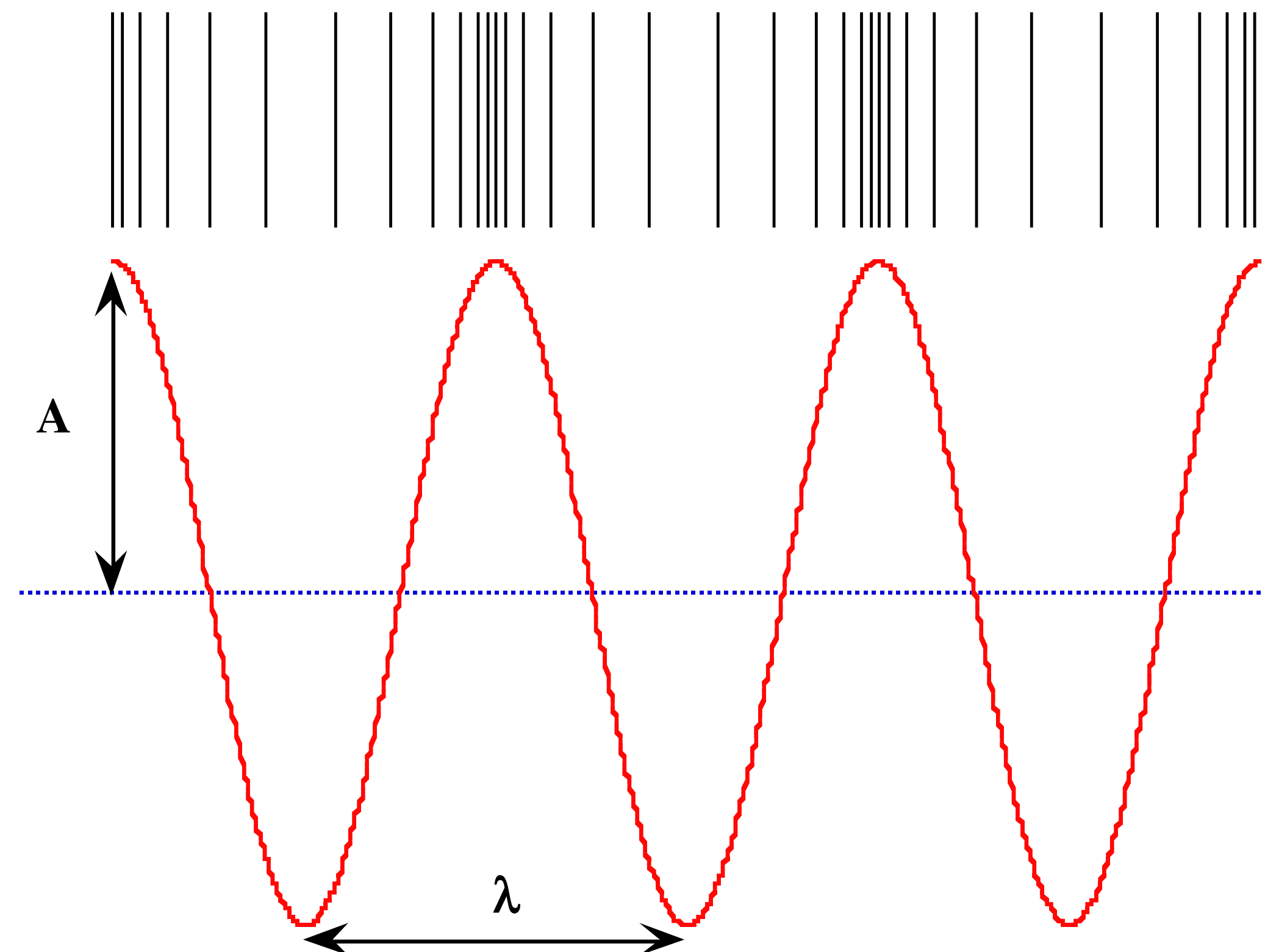


A HALLÁS BIOFIZIKÁJA

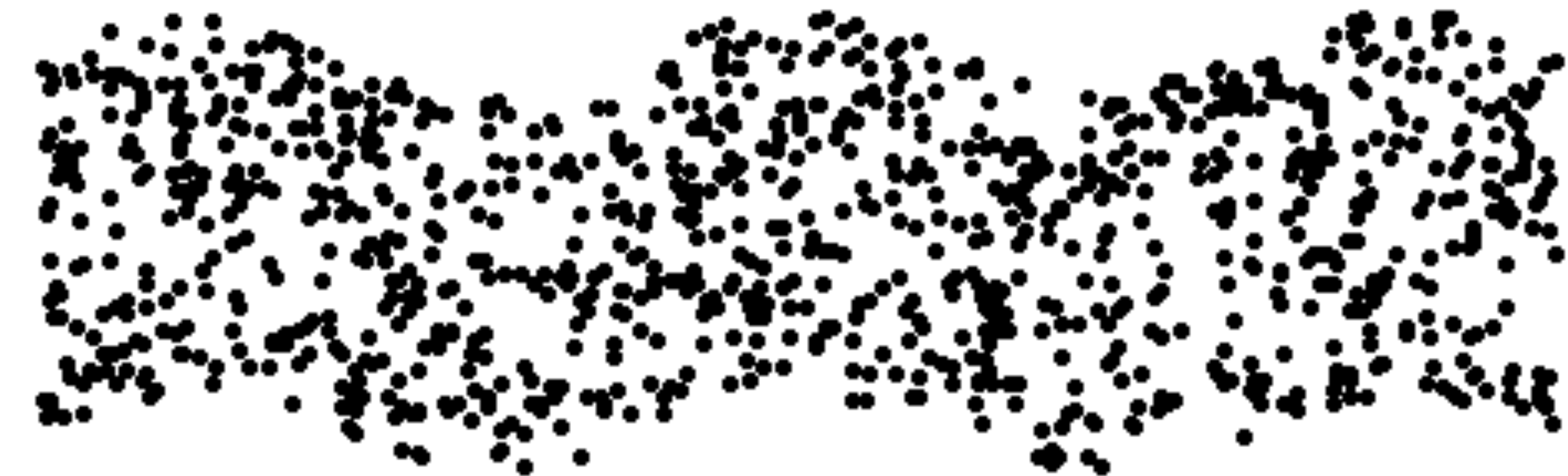
KELLERMAYER MIKLÓS

Hang

Longitudinális
mechanikai hullám
(nyomáshullám)



Longitudinális hullám

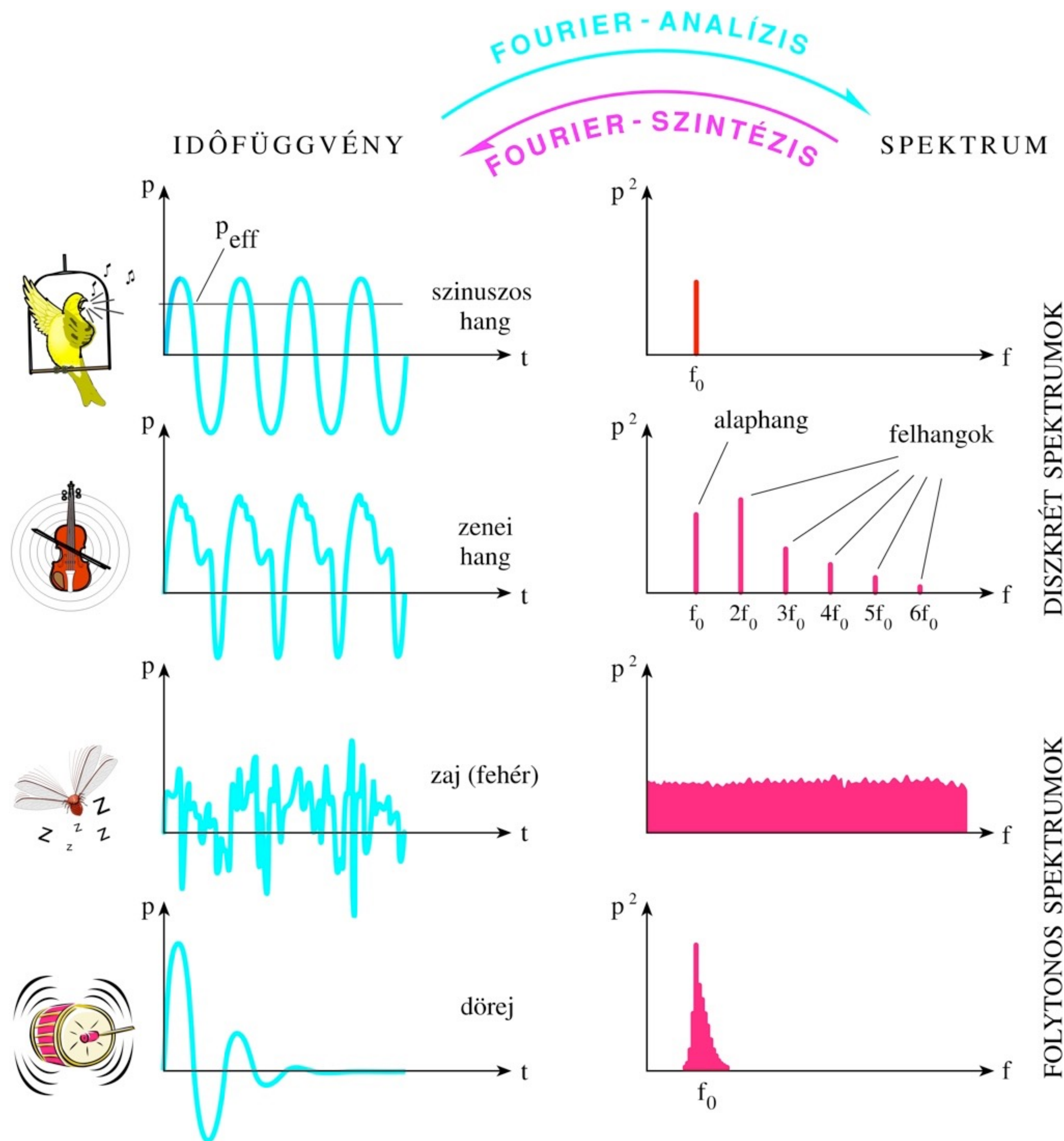


Tranzverzális hullám

Harmonikus rezgés: $y(t) = A \sin(ft + \varphi)$

y =aktuális nyomás; t =idő
 f =frekvencia (Hz); A =amplitudó
 φ =fáziseltolódás

Hangok és spektrumaik



Fourier-tétel:
bármely függvény felbontható
egy szinuszos alapfüggvény
és felharmonikusai összegére

A Fourier analízis lépései:

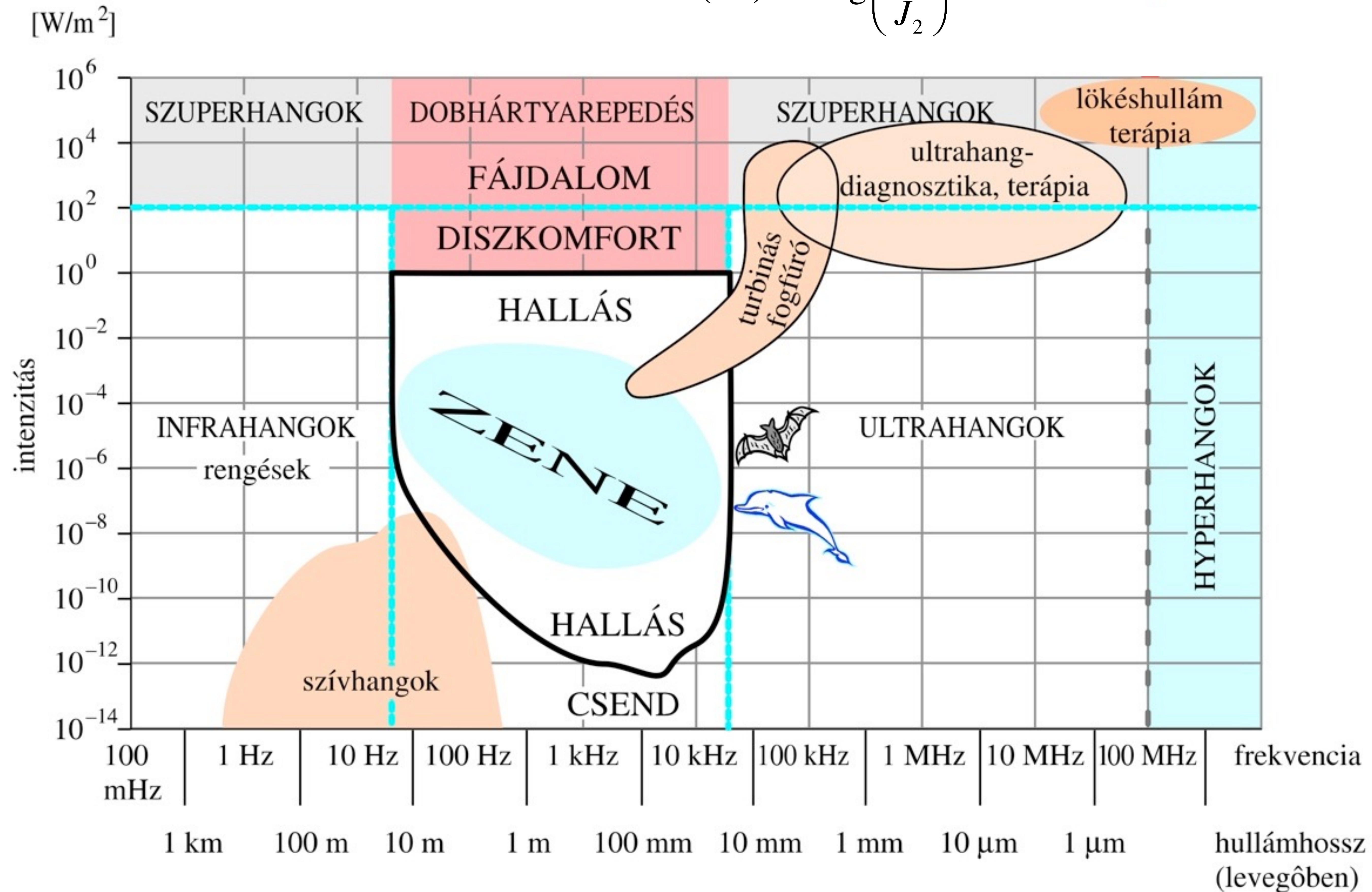


Oktáv - 2:1
arányú
frekvenciaköz

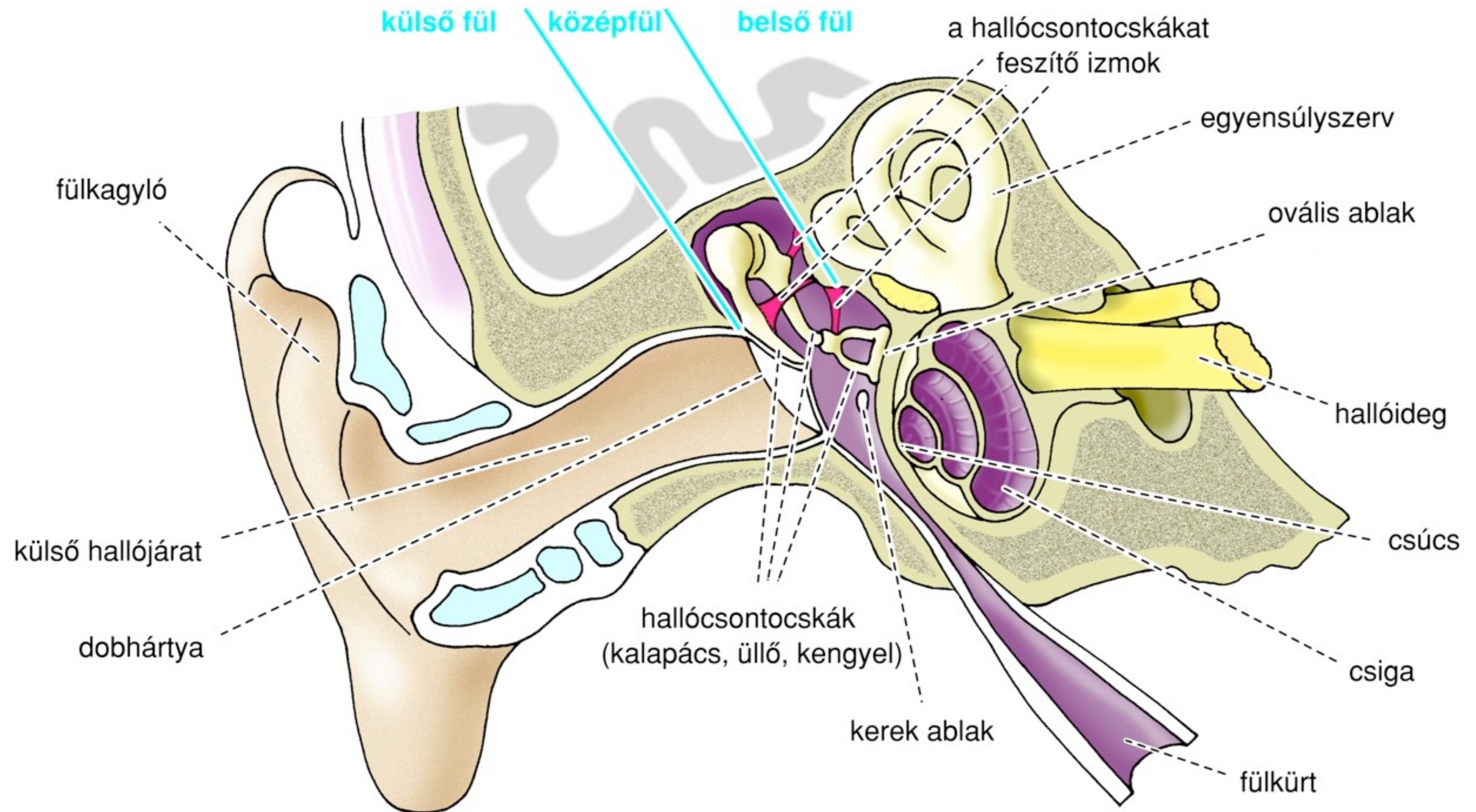
Hangintenzitás és frekvencia

Inger: hang - mechanikai hullám

$$\text{Intenzitásszint: } n(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{J_1}{J_2} \right)$$



“Receptor-szerv”: fül



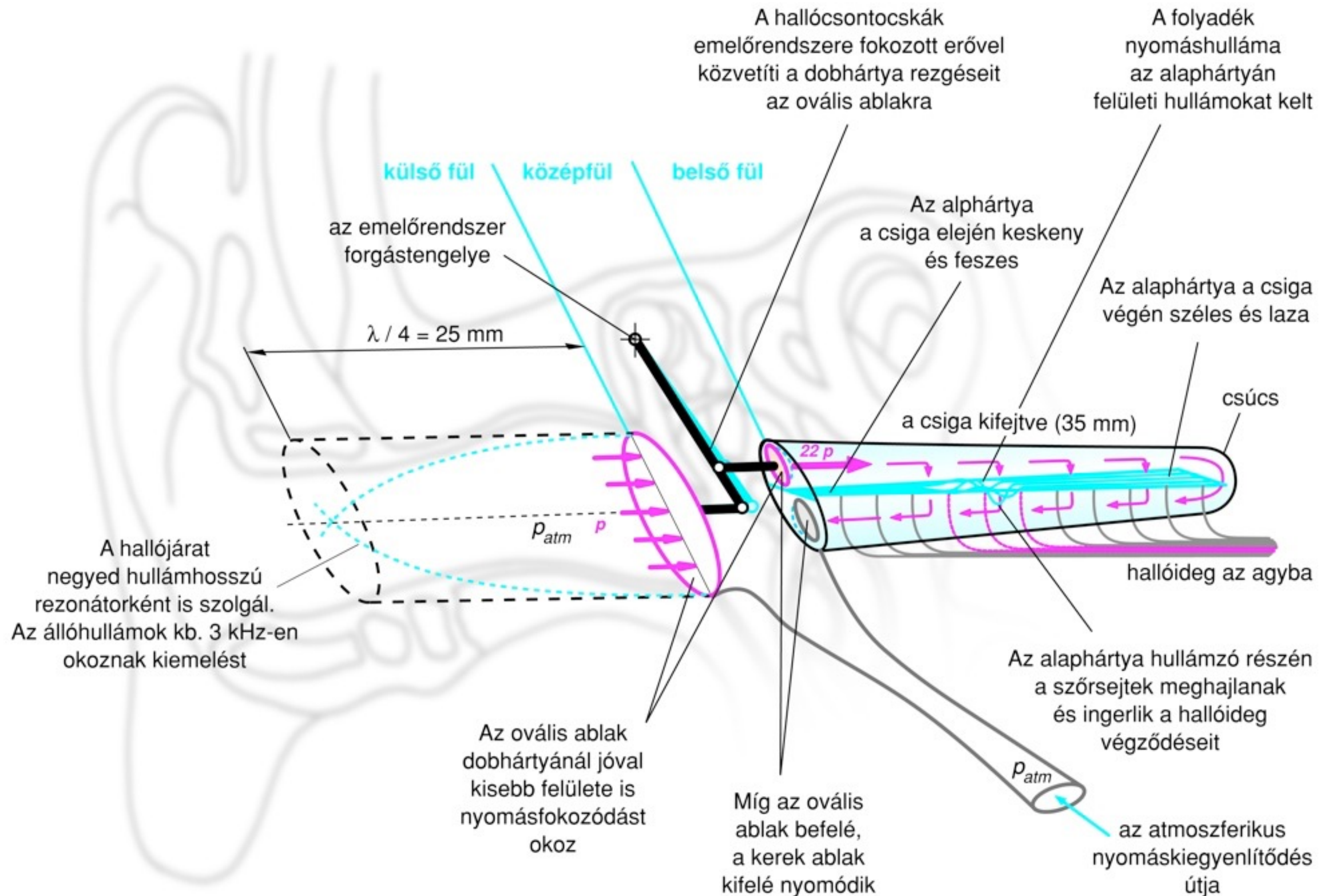
A fül fizikai vázlata

Külső fül:

1. **Fülkagyló:** A hangot a hallójáratba tereli.

2. **Hallójárat:** Visszaveri és a dobhártya felé tereli a hanghullámokat. Adott tartományt (2000-5000 Hz) hatékonyabban továbbít.

3. **Dobhártya:** A hang által rezgésbe jön. Kilengése a hallásküszöbnél: 10^{-11} m (kissé nagyobb, mint a termikus zaj okozta kilengés)!



A középfül: mechanikai jelátvitel és erősítő

Hallócsontocskák

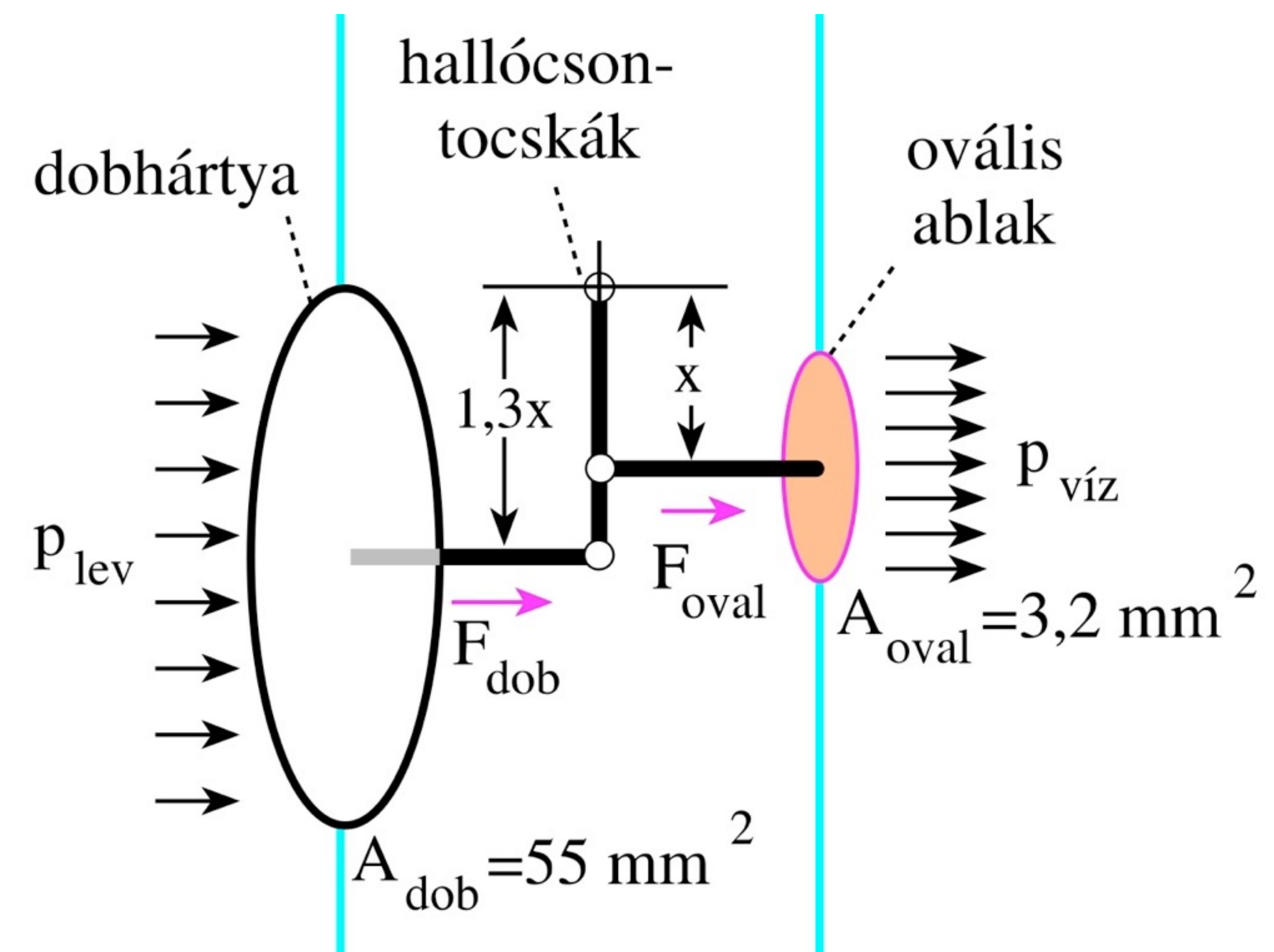
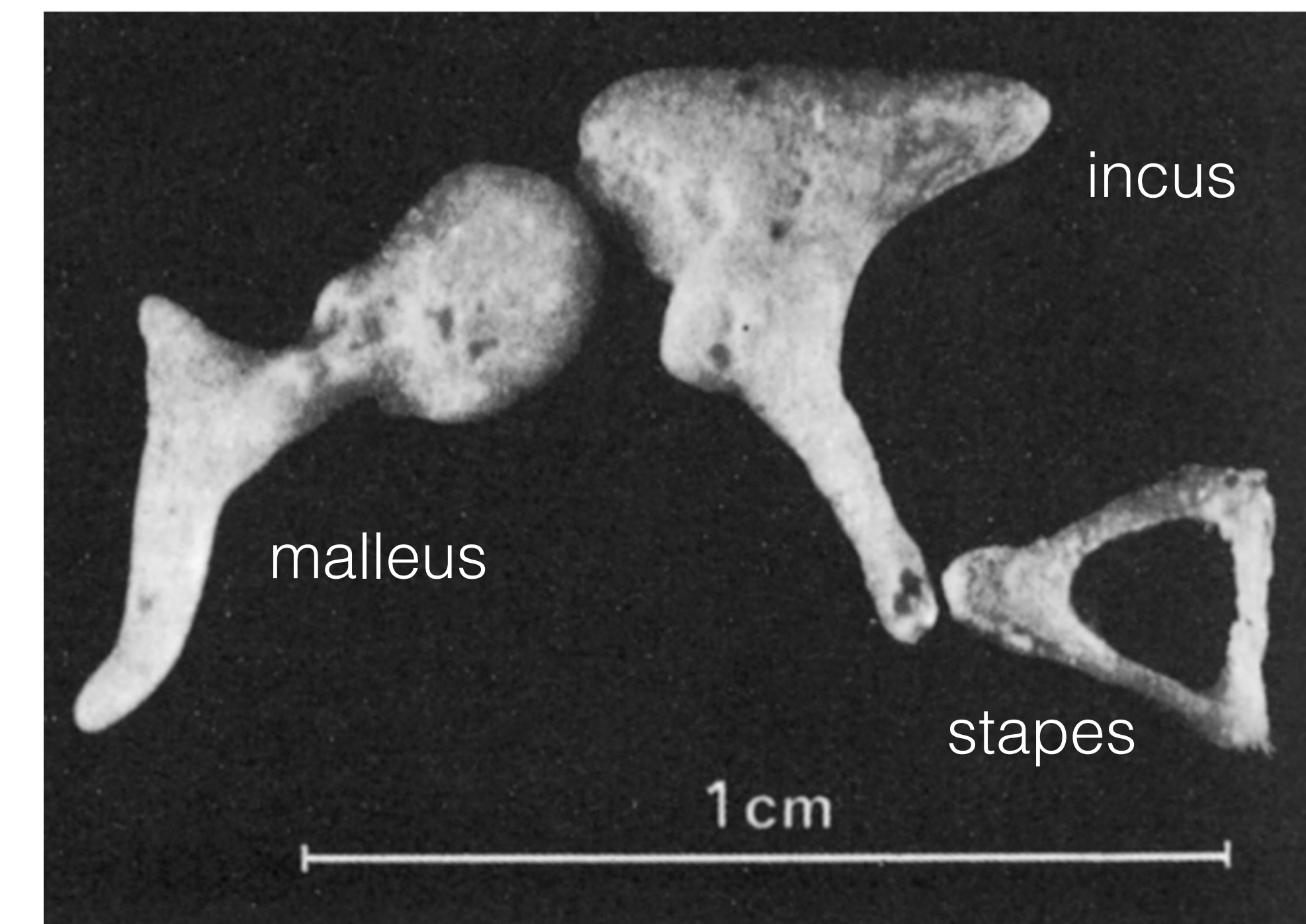
(kalapács, üllő, kengyel)

A dobhártya rezgését **felerősítik**, és átviszik az ovális ablakra. (N.B.: a levegő és víz eltérő akusztikus impedanciája miatt teljes visszaverődés lépne fel!)

Erősítés:

kisebb felületre koncentrált rezgések: $17 \times$
emelőszűrő működés: $1,3 \times$

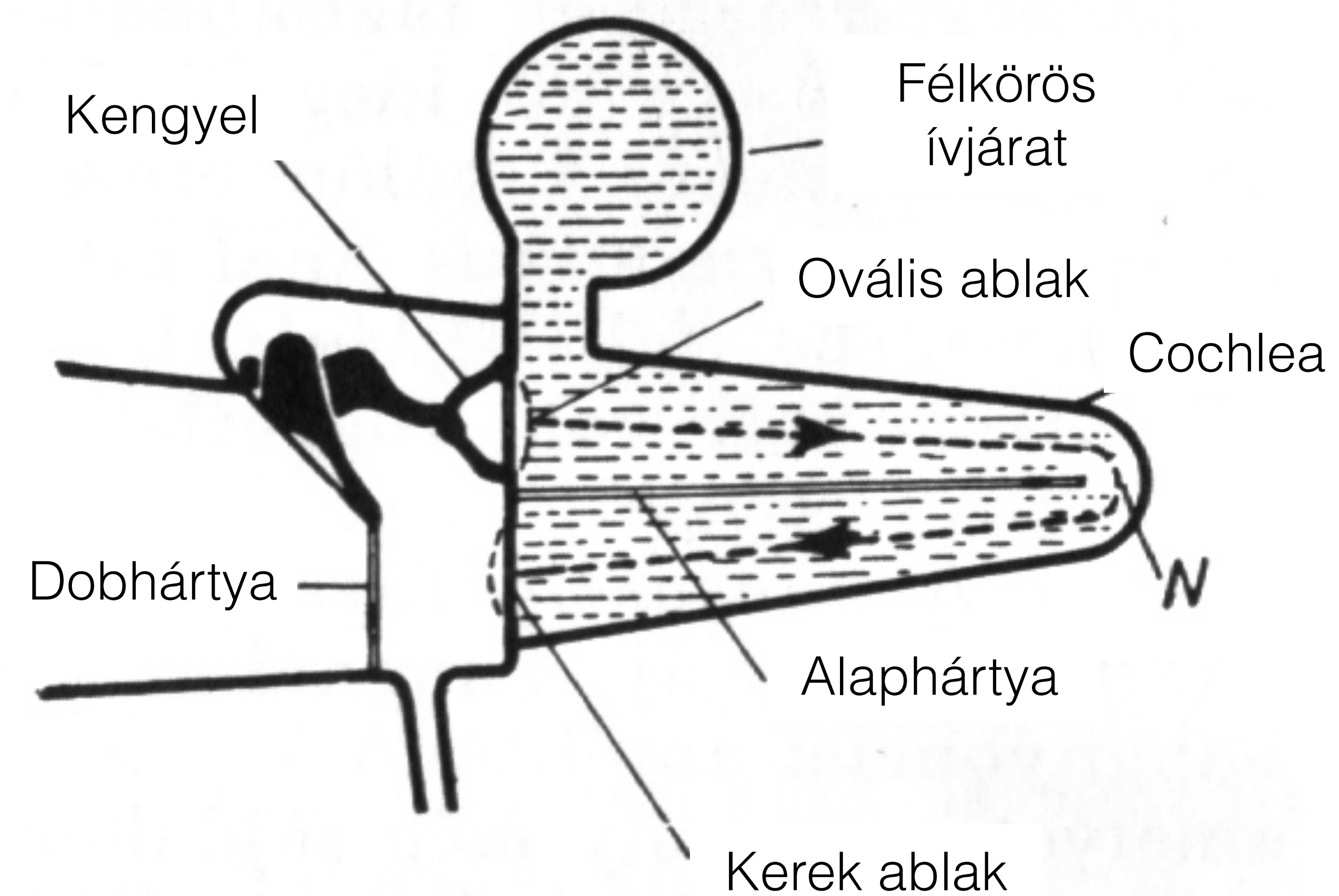
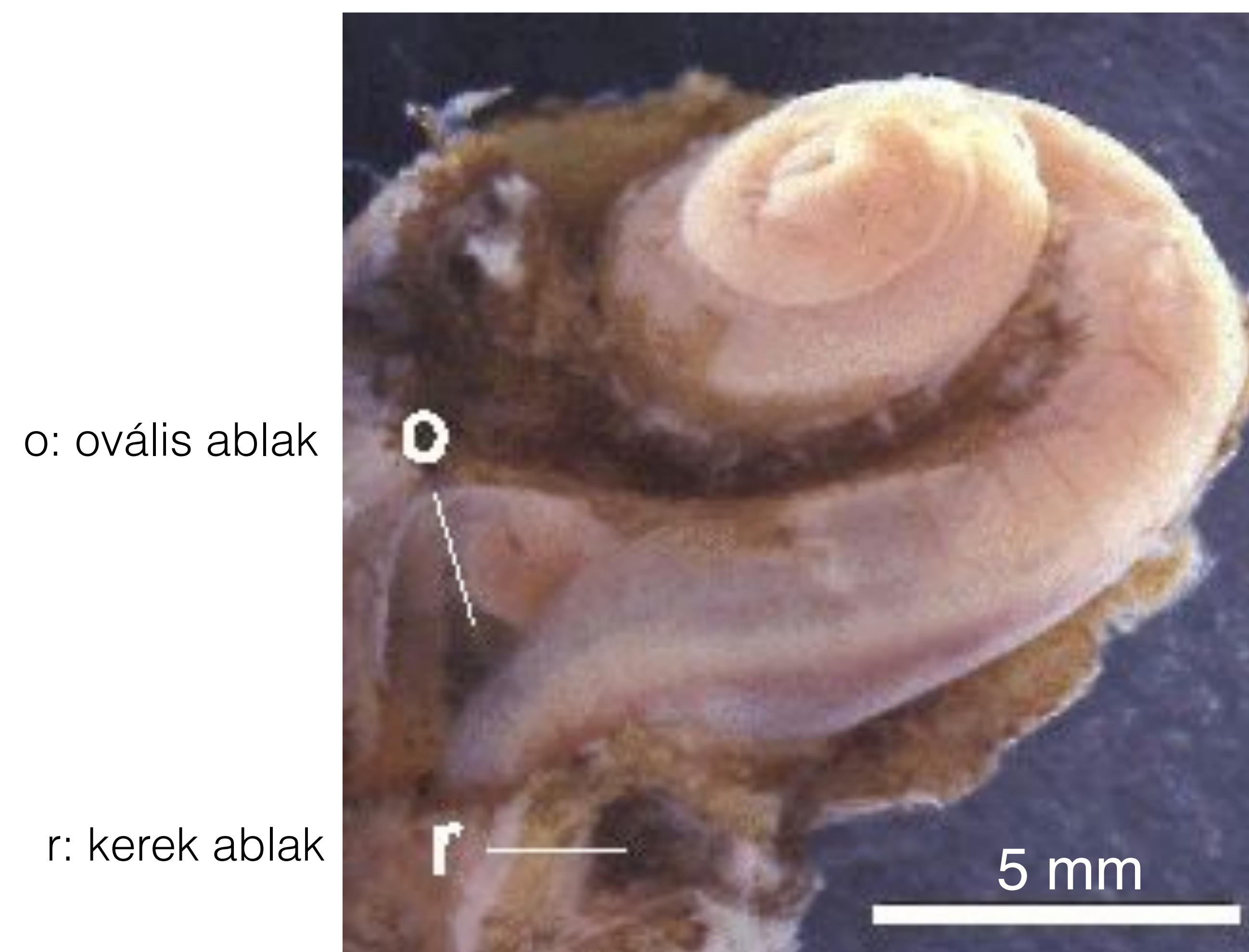
Összesen kb. $22 \times$ nyomásnövekedés



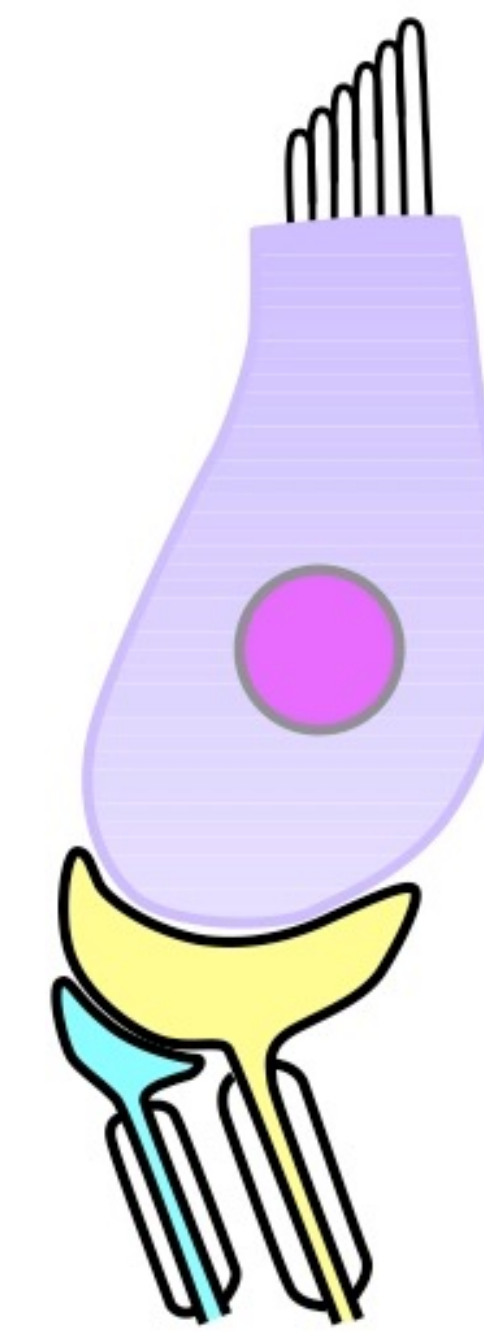
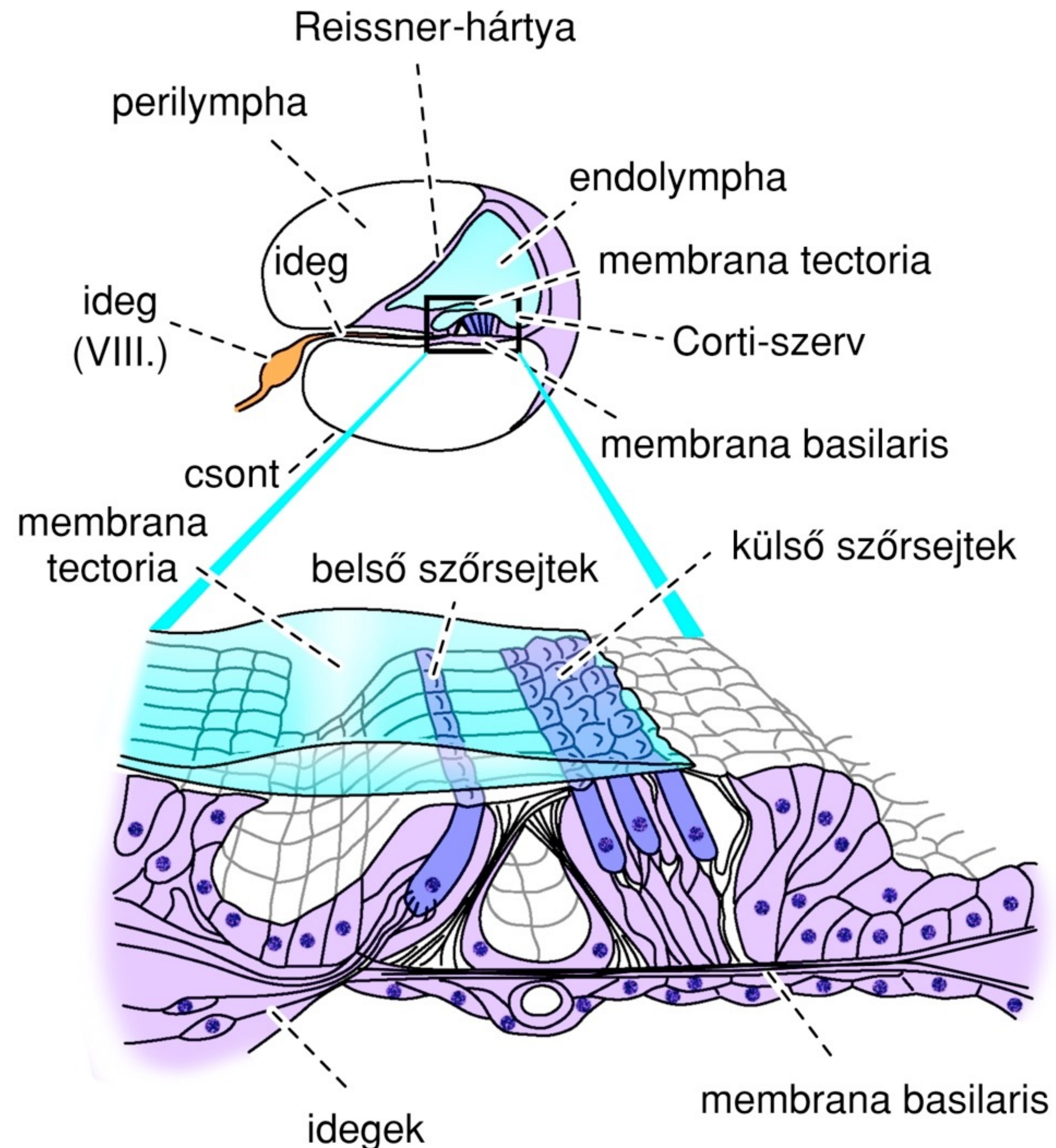
A belső fül: szenzor

Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

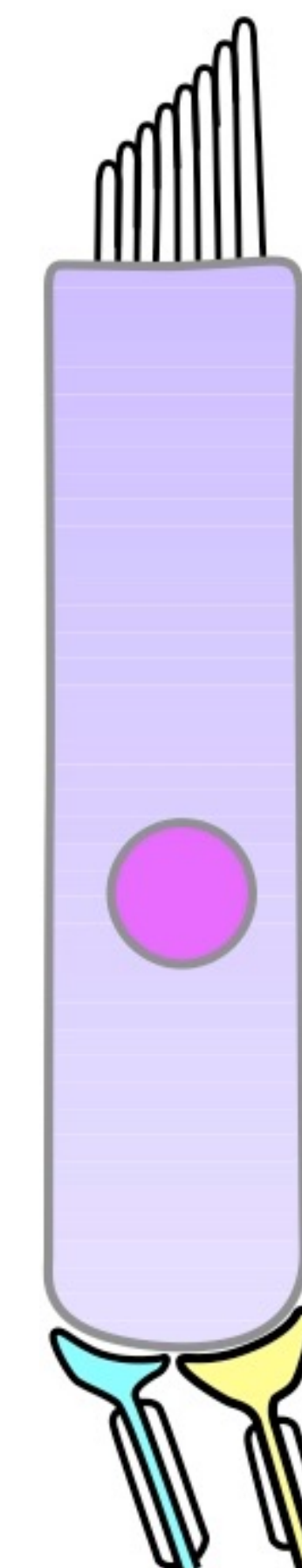
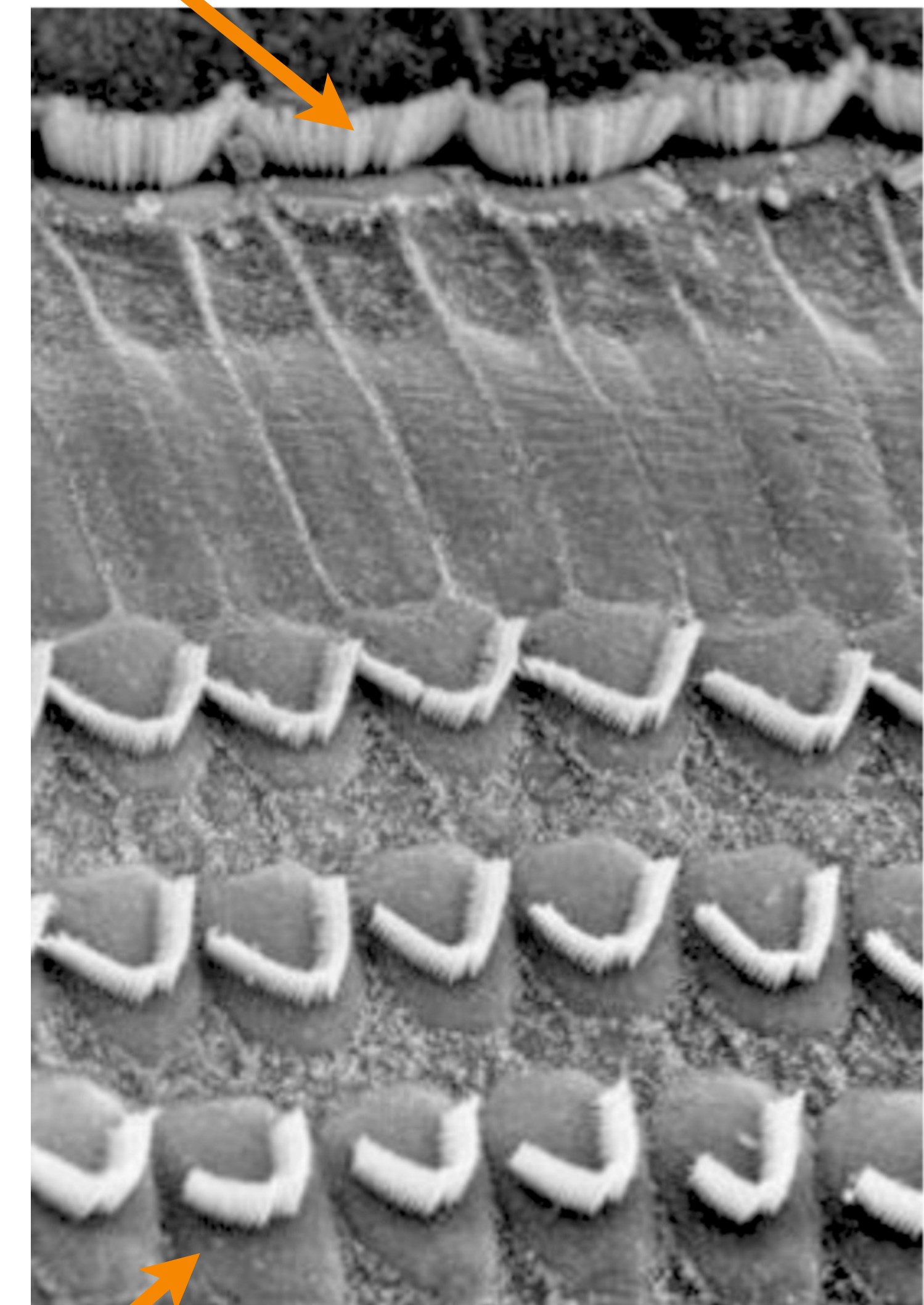
Csiga (cochlea): 2,5 menetű, 35 mm hosszú folyadékkal teli csatorna. Hosszában a részben csontos, részben hártyaszerű fal, az alaphártya (membrana basilaris) osztja ketté. A hang érzékelését végzi.



A belső fül finomszerkezete

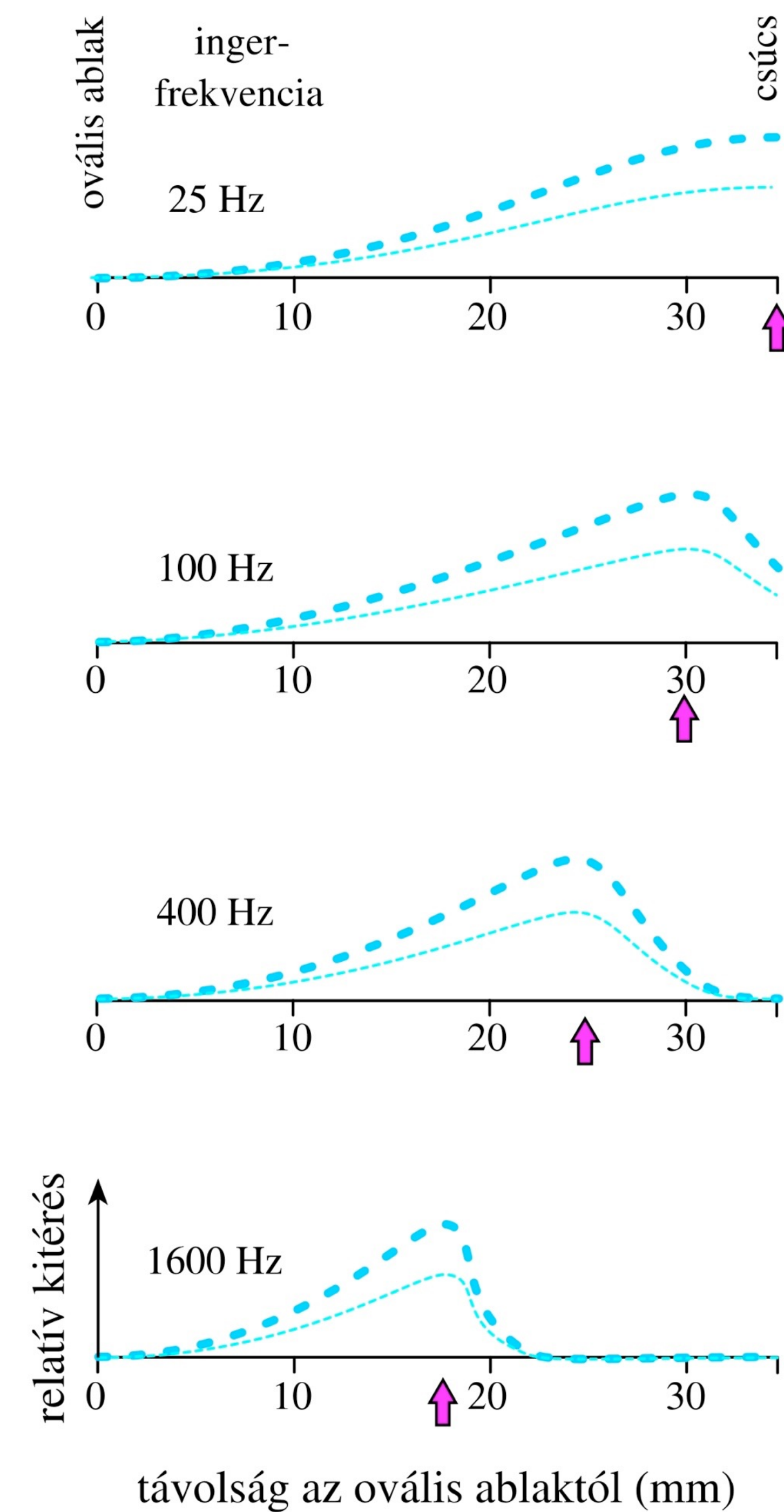
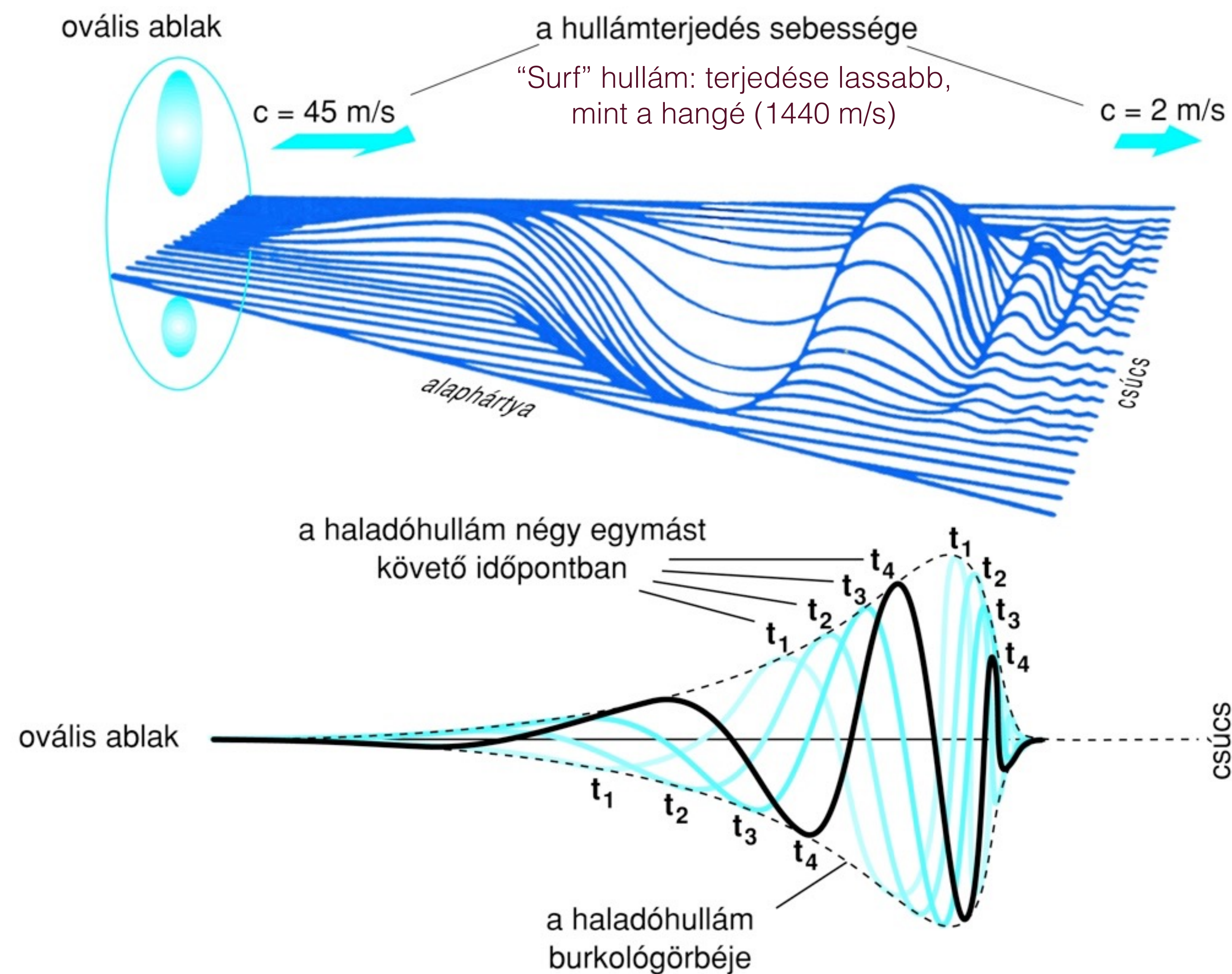


Belső szőrsejtek
(kb. 3500)



Külső szőrsejtek
(kb. 12-20000)

Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán

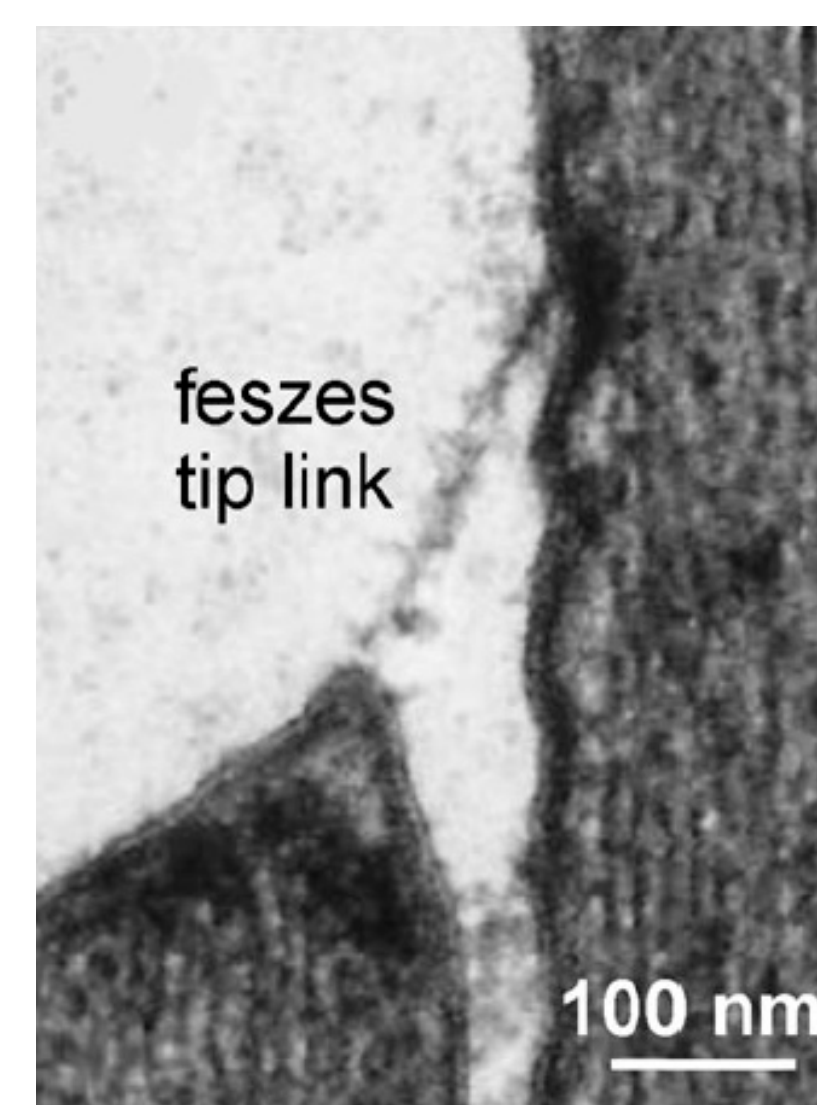
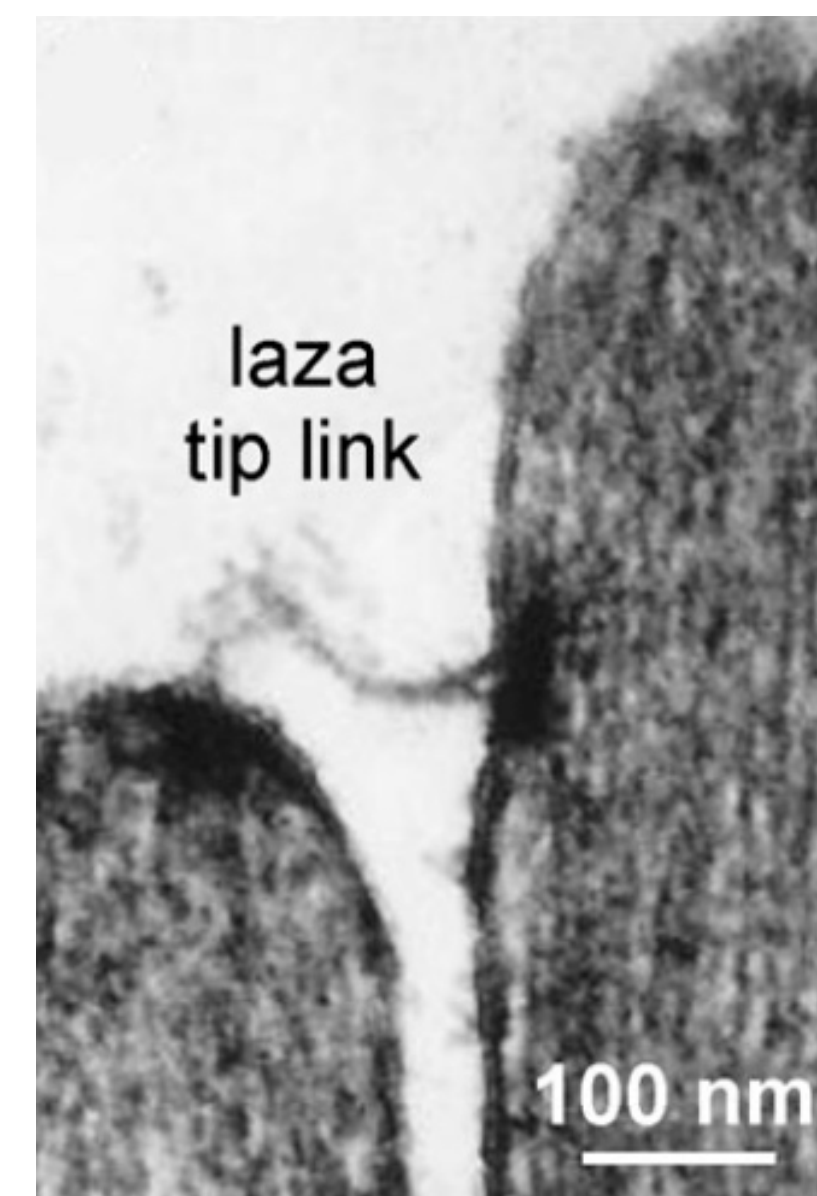
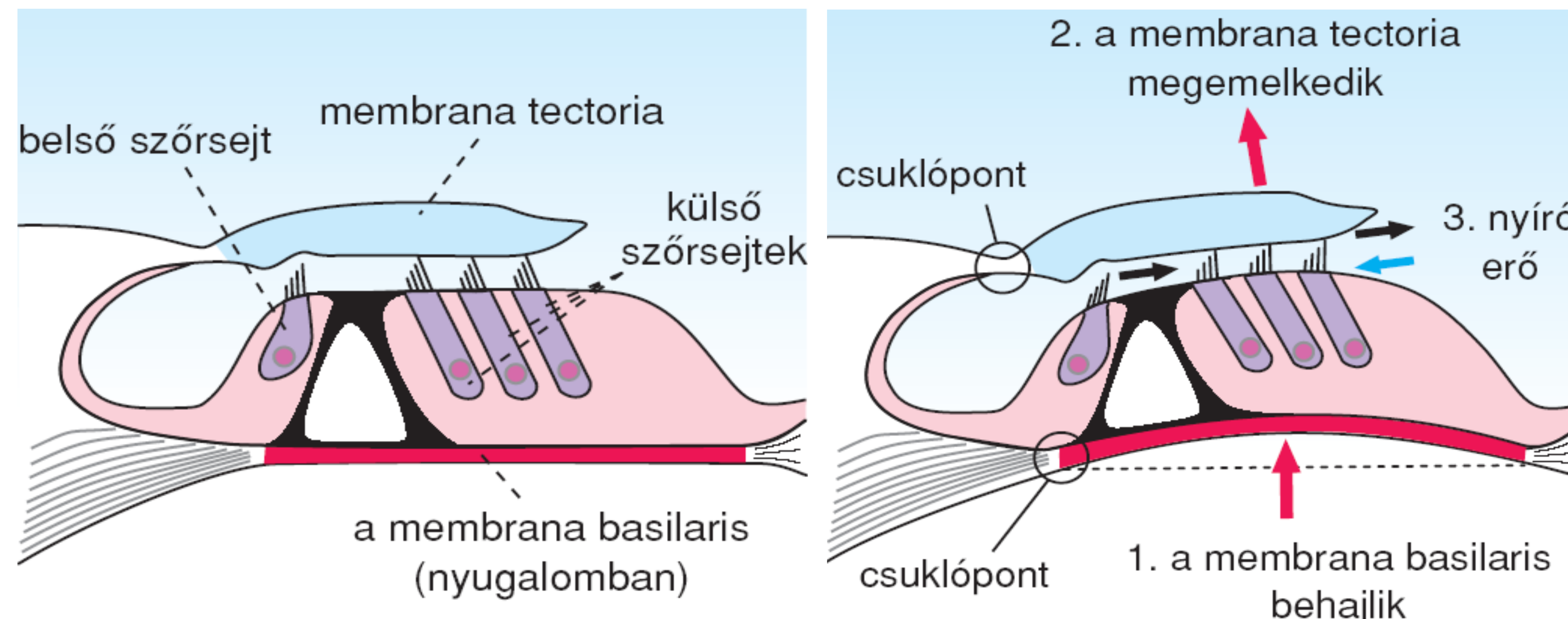


Békésy György
Nobel-díj 1961

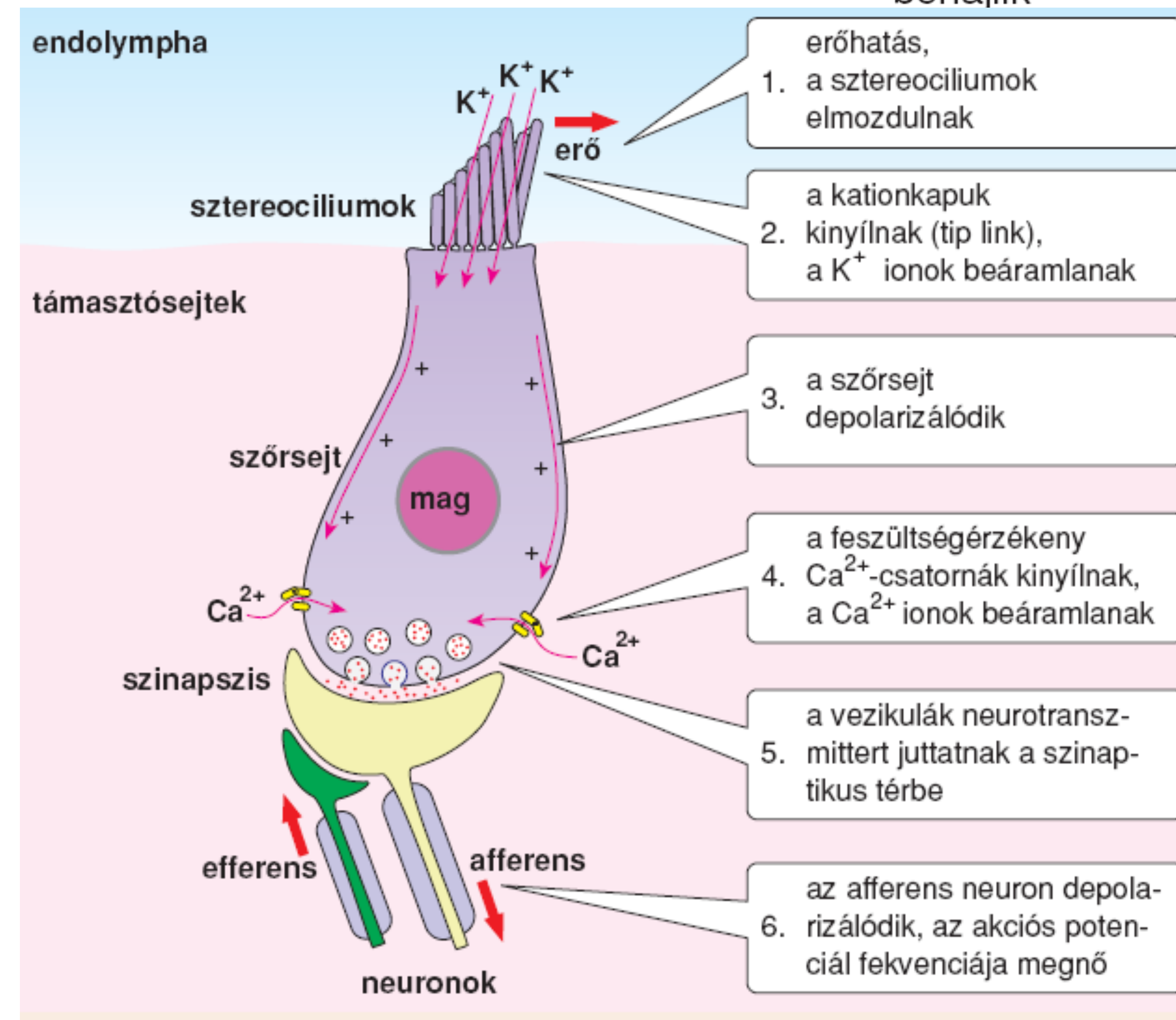
A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

A Corti-féle szerv működése

A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt megdőlnek és depolarizálódnak.



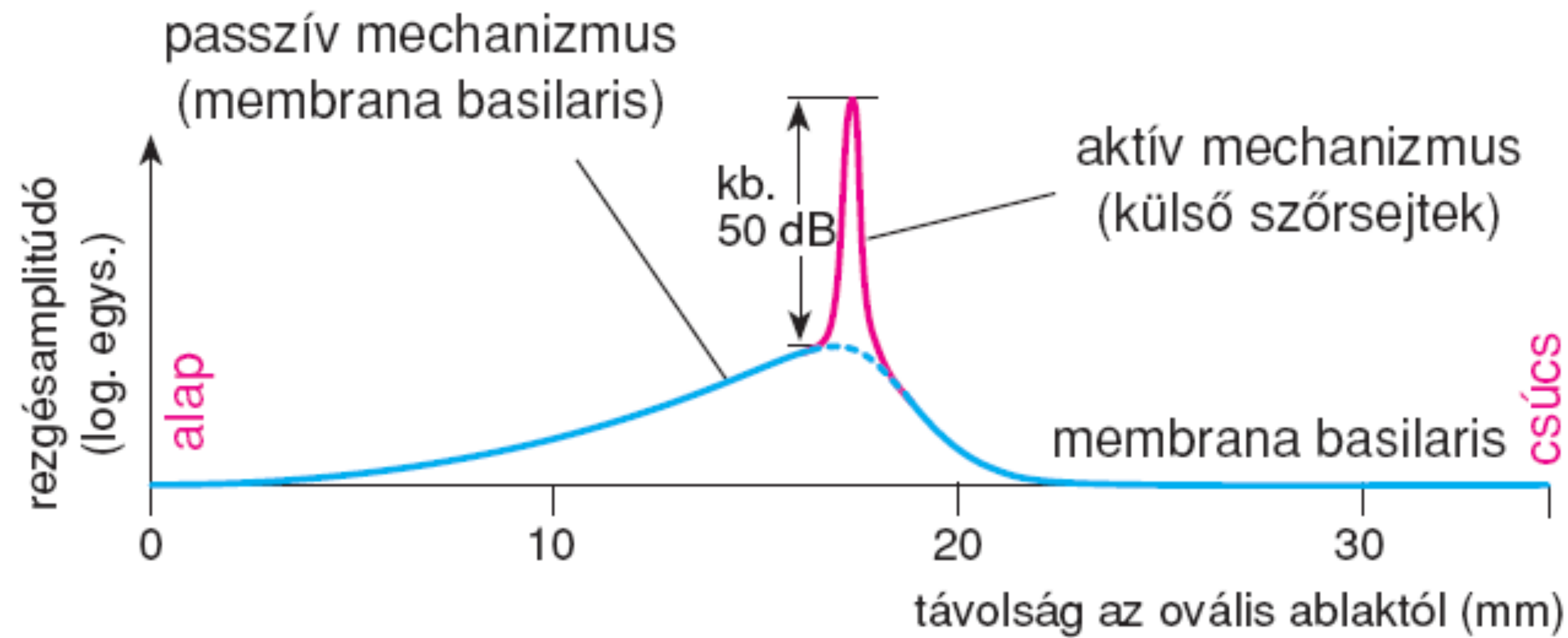
Belső szőrsejtek:
Mechanoelektromos
transzdukció



Külső szőrsejtek: erősítők

Passzív detektálás
(Probléma, hogy túl nagy a csillapítás)

Aktív detektálás
(Energia bepumpálása a detektálás frekvenciáján)

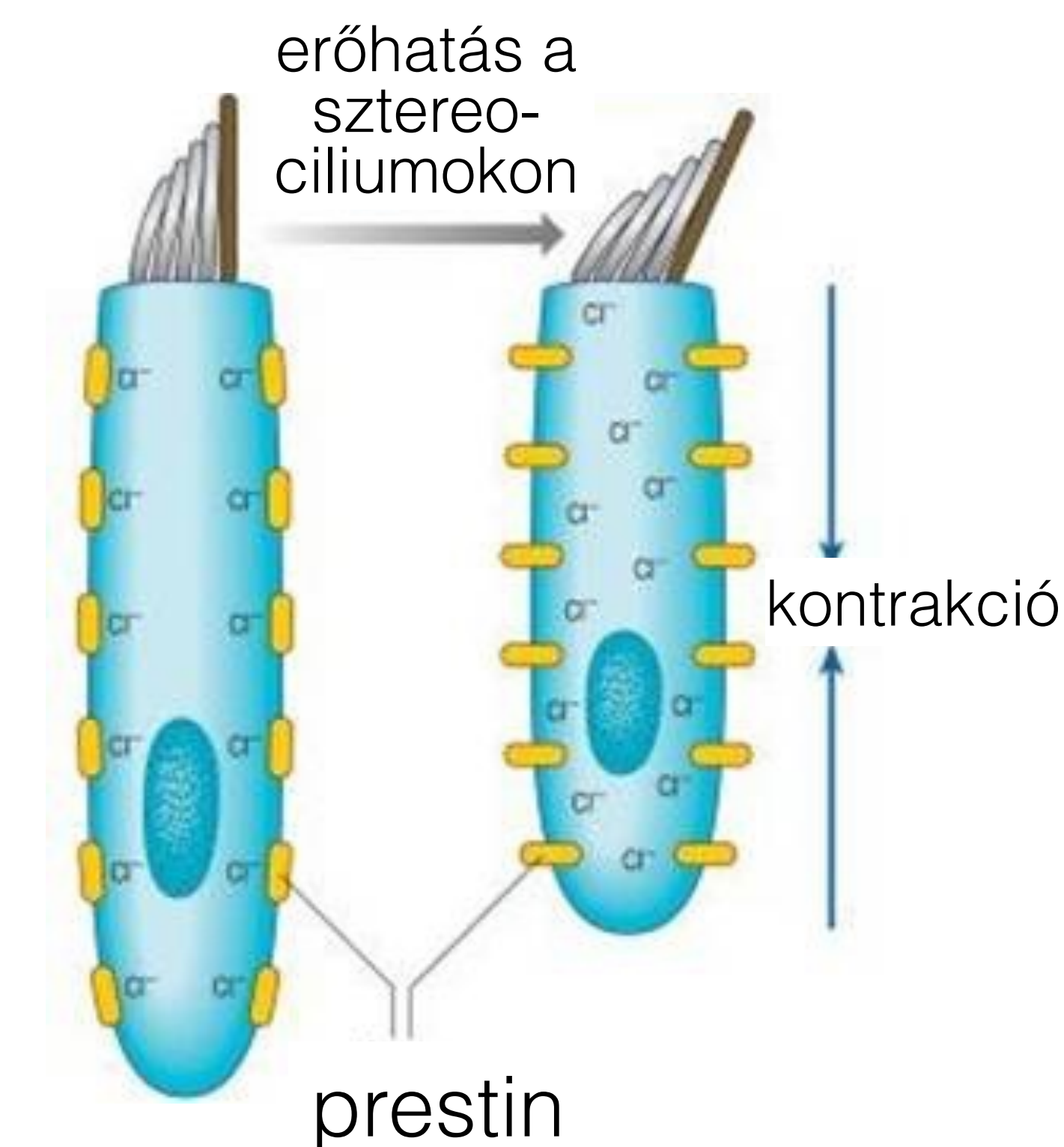


Aktív detektálásra utaló megfigyelések:

- T. Gold (1948): analógia a regeneratív rádióvevőkkel (pozitív visszacsatolás adott frekvencián: szelektivitás + érzékenység).
- W. Rode (1971): az élő fül sokkal érzékenyebb.
- D. Kemp (1979): hang jön a fülből (otoakusztikus emisszió).

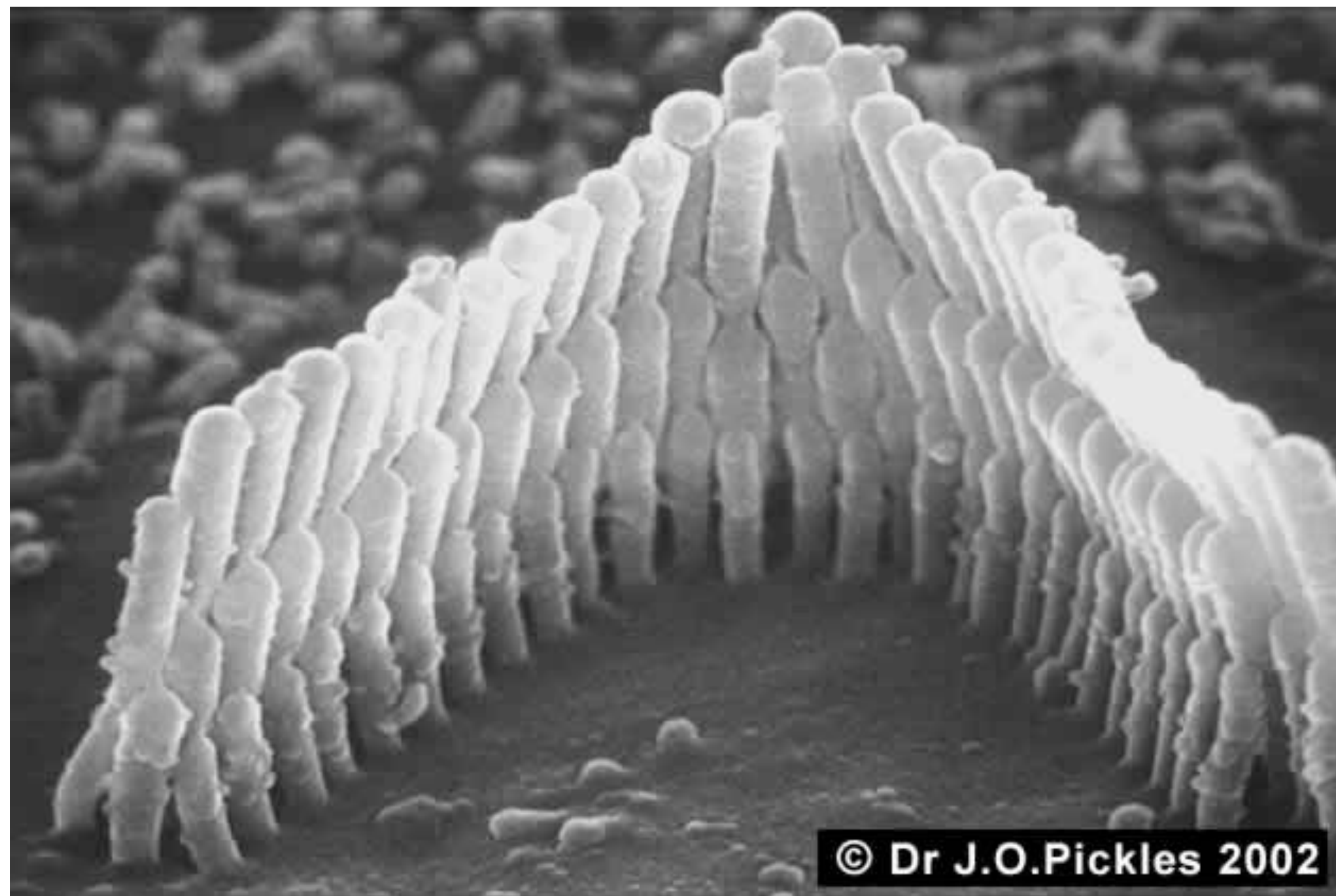
Regeneratív erősítő: pozitív visszacsatolási mechanizmus (szűk frekvencia tartományban nagy erősítés, de csak a disszipálódott energiát pótolja; egyébként fülcsengés jönne létre)

Erősítés:
hang-indukált
kontrakció a külső
szőrsejtben

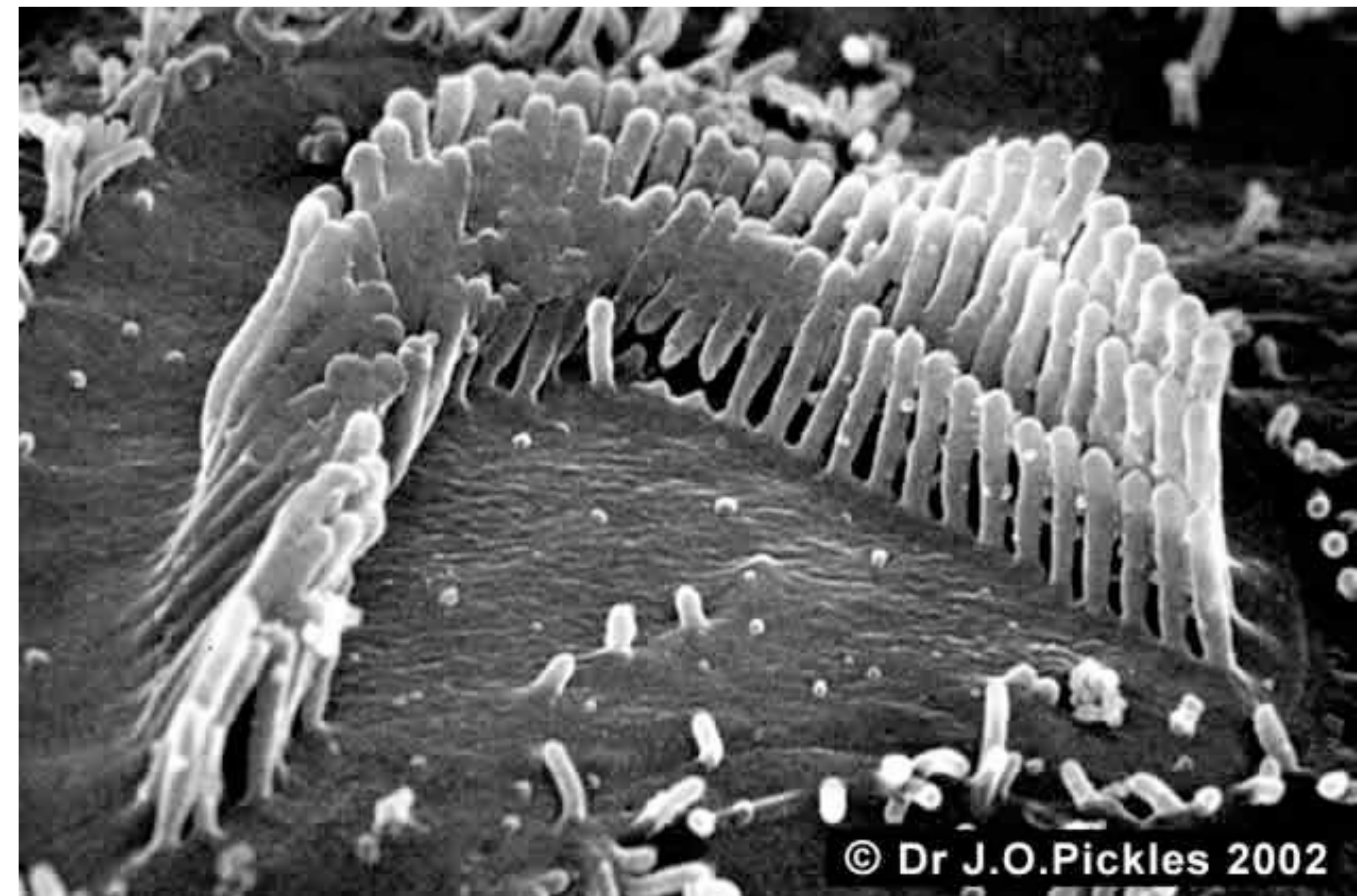


Prestin: transzmembrán motorfehérje mechano-elektromos és elektromechanikus jelátalakítás

Halláskárosodás



Külső szőrsejtek (normál állapot)



Külső szőrsejtek (károsodott állapot; pl. koncert után)

Akusztikus információ kódolása

Hely-teória

Frekvencia érzékelés (agykérgi) hely szerint kódolt.

Alapja:

1. A Békésy-féle haladóhullámok amplitudómaximum-helyeinek gyenge frekvenciafüggése.

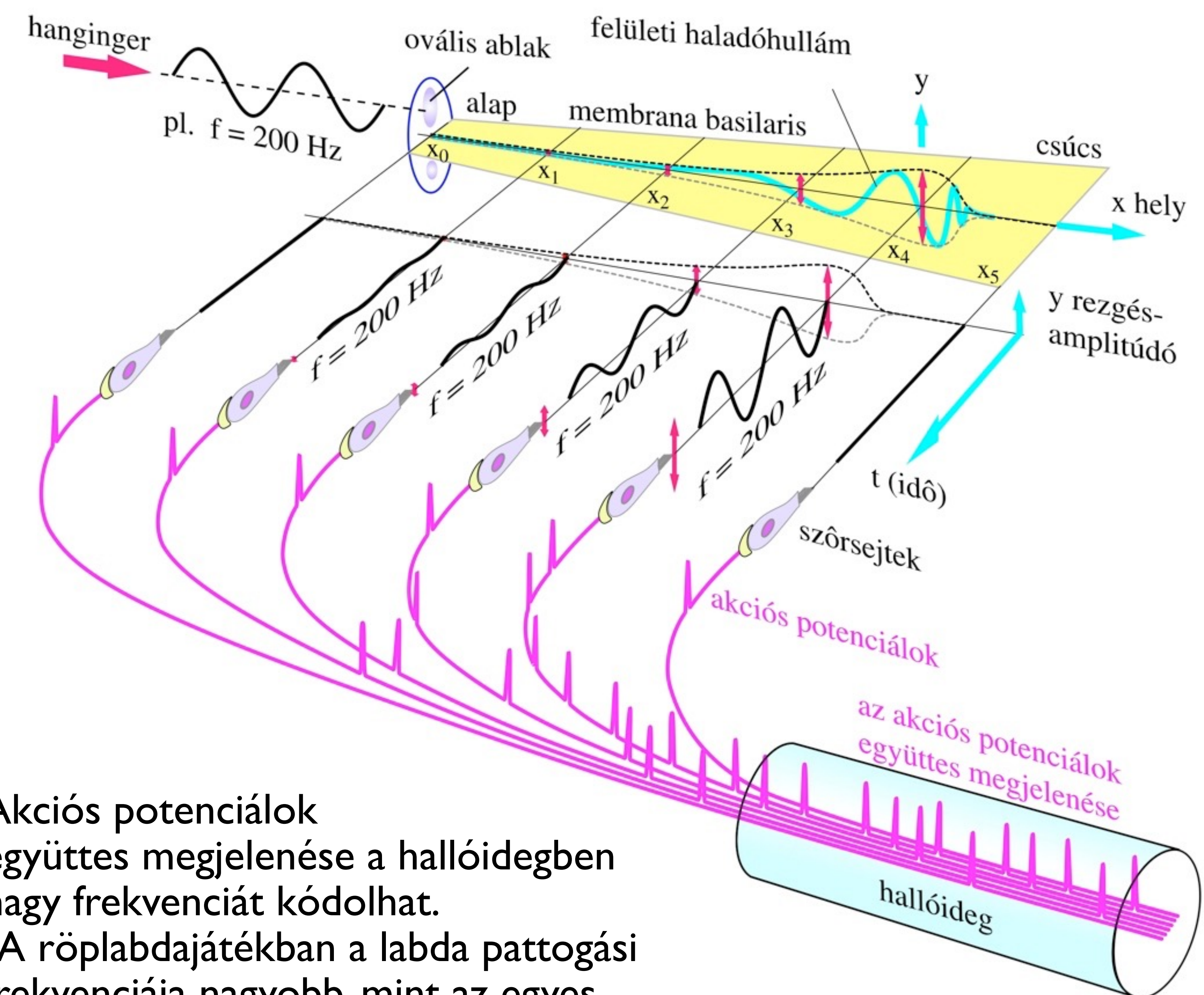
2. Aktív erősítés

3. Belső szőrsejtek afferens idegeinek érzékenysége frekvenciafüggő

4. Az afferens idegek hallókérgi leképeződése különböző helyekre történik: a frekvencia “hely szerint kódolt”.

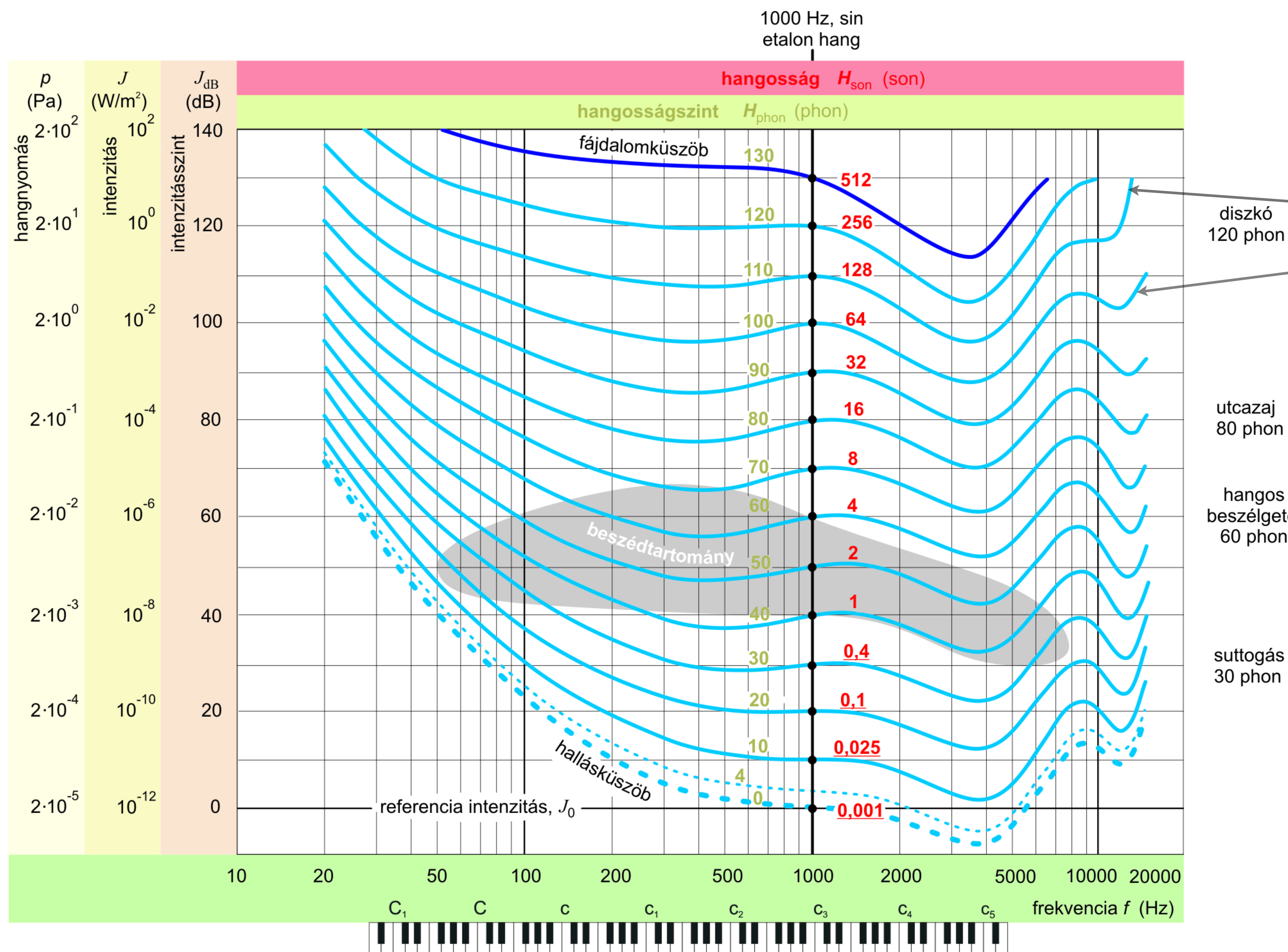
Röplabdaelmélet

Probléma: az akciós potenciál frekvenciája limitált (kb. 1 kHz).



Akciós potenciálok együttes megjelenése a hallóidegben nagy frekvenciát kódolhat. (A röplabdajátékban a labda pattogási frekvenciája nagyobb, mint az egyes játékosok ütési frekvenciája)

Ingerintenzitás és érzet - pszichoakusztika



izophon görbék:
azonos hangosságszintű
pontokat kötnék össze
(Fletcher-Munson görbék)

utcazaj
80 phon

hangos
beszélgetés
60 phon

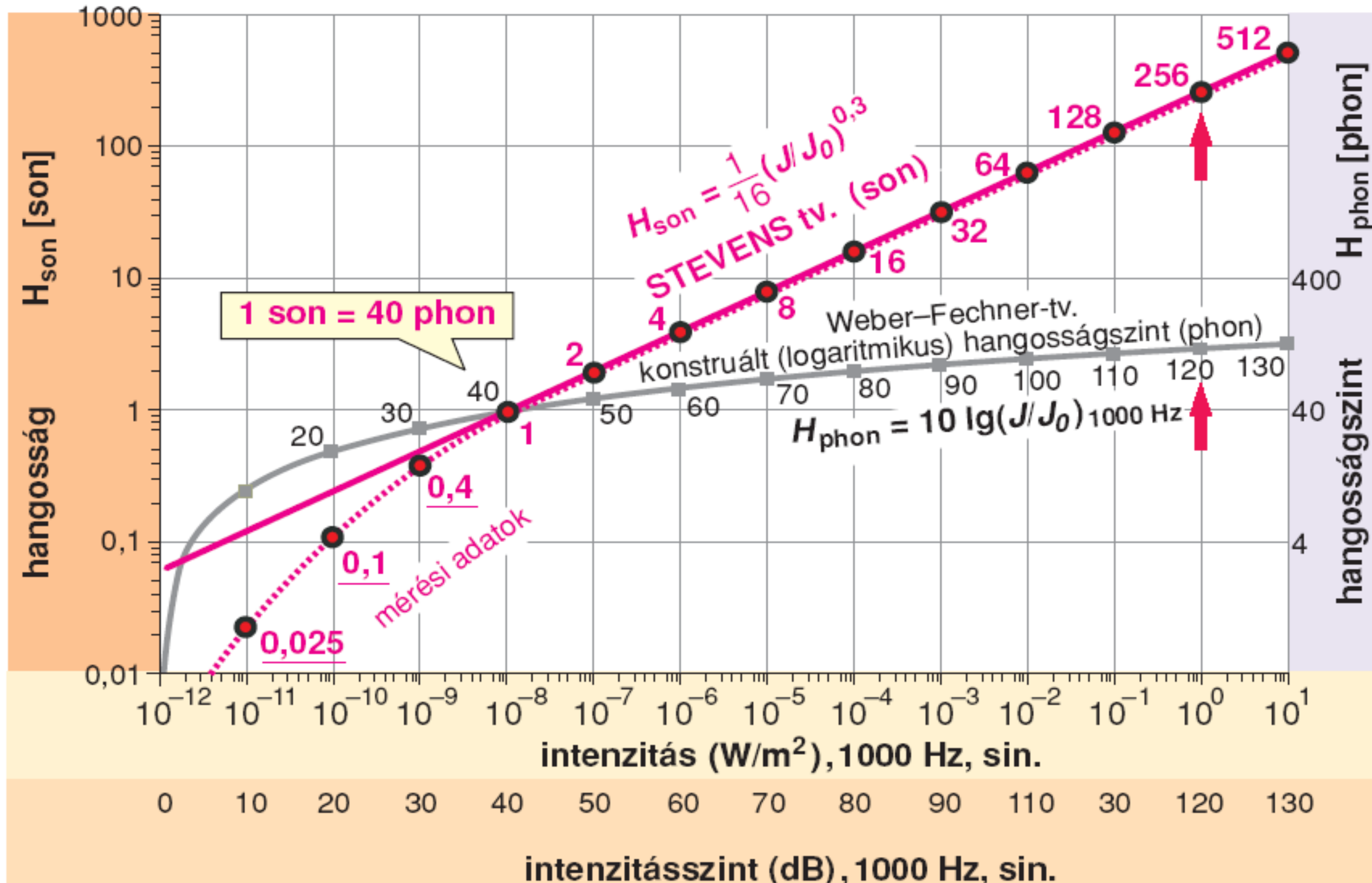
suttogás
30 phon

N.B.: Egy hang annyi
phonos, ahány dB
1000 Hz-es hanggal
halljuk azonos
hangosságúnak.

Szubjektív hangosság
(son skála):
10 dB hangosságszint-
növekedést érzünk
kétszeres hangosság
növekedésnek.
(Stevens törvény)

Phon és son skálák

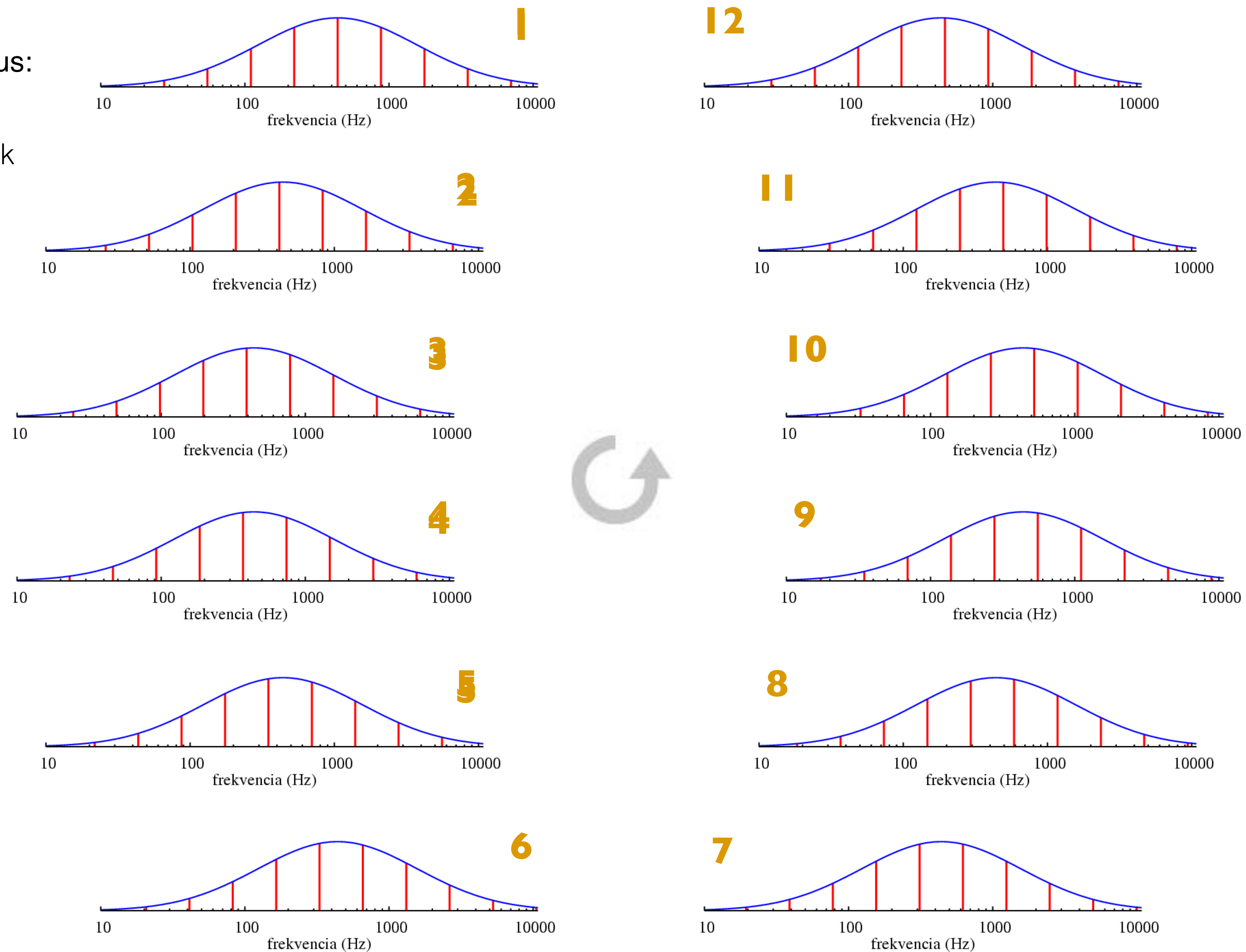
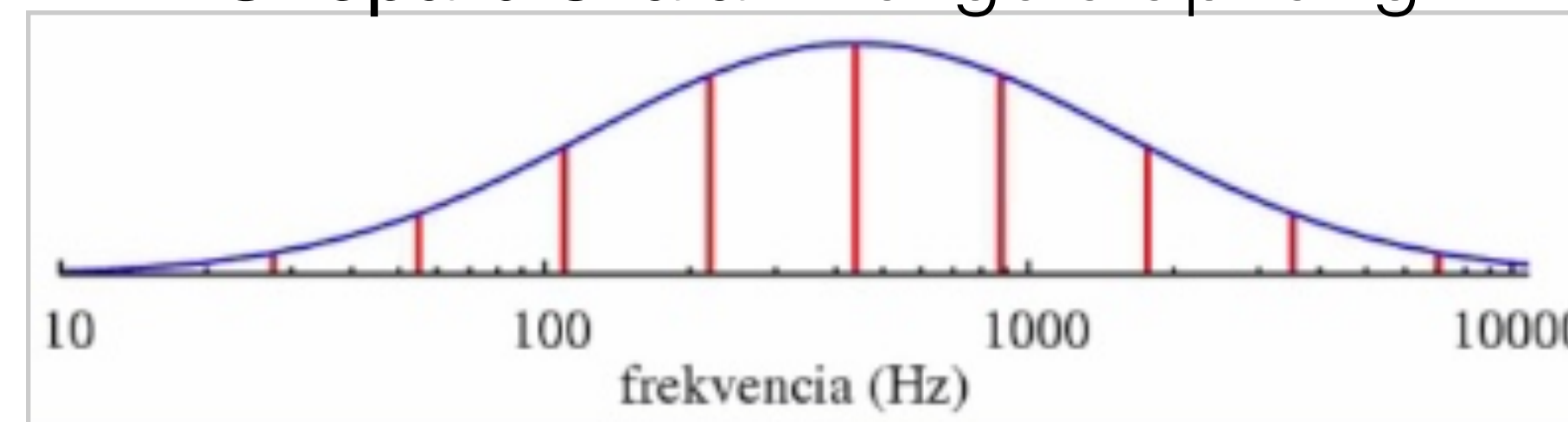
A pszichoakusztikai viselkedést a Stevens-törvény írja le helyesen



Akusztikus illúzió?

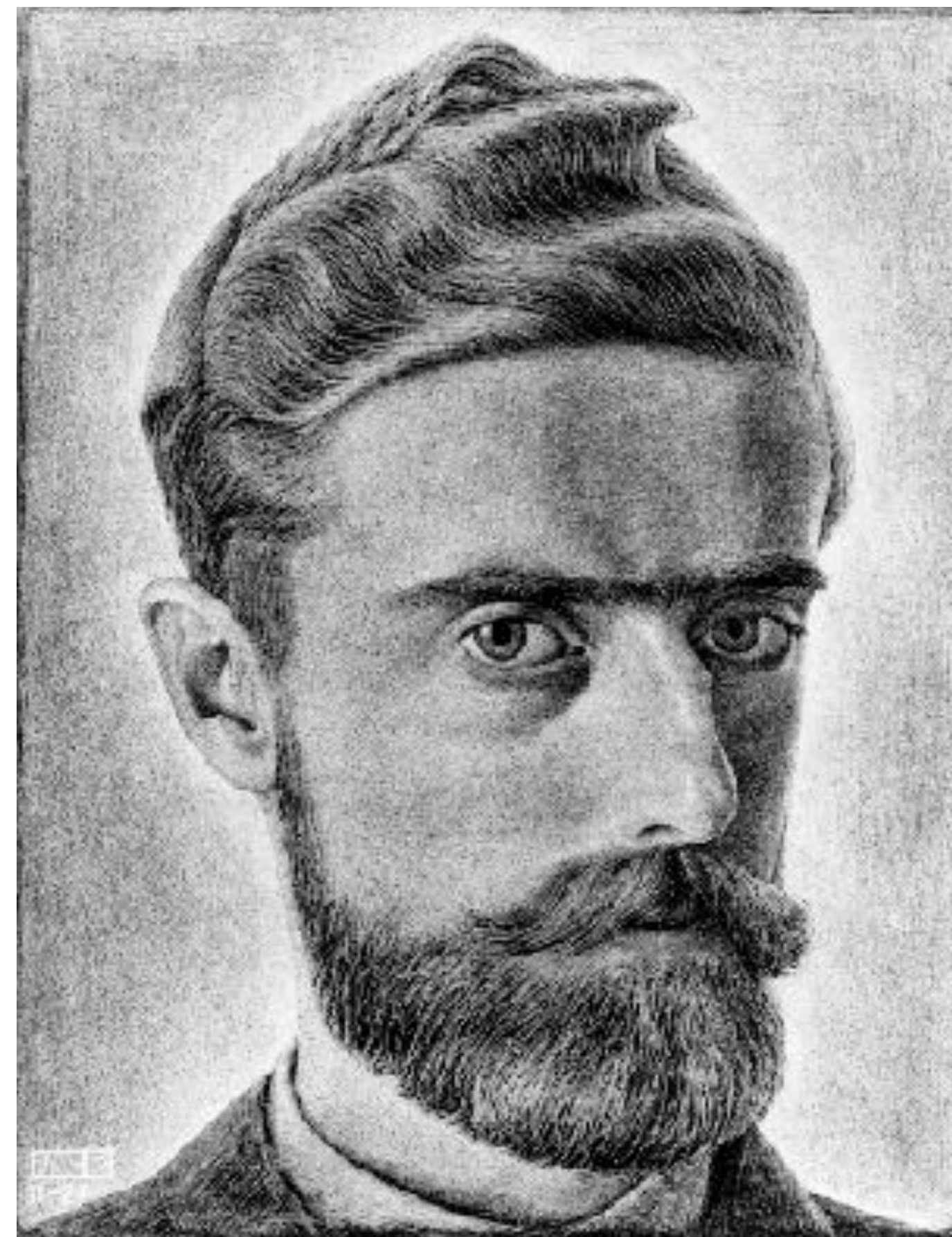
Shepard tónus:
oktávokkal
elválasztott
szinushangok

Shepard skála: mozgó alaphang

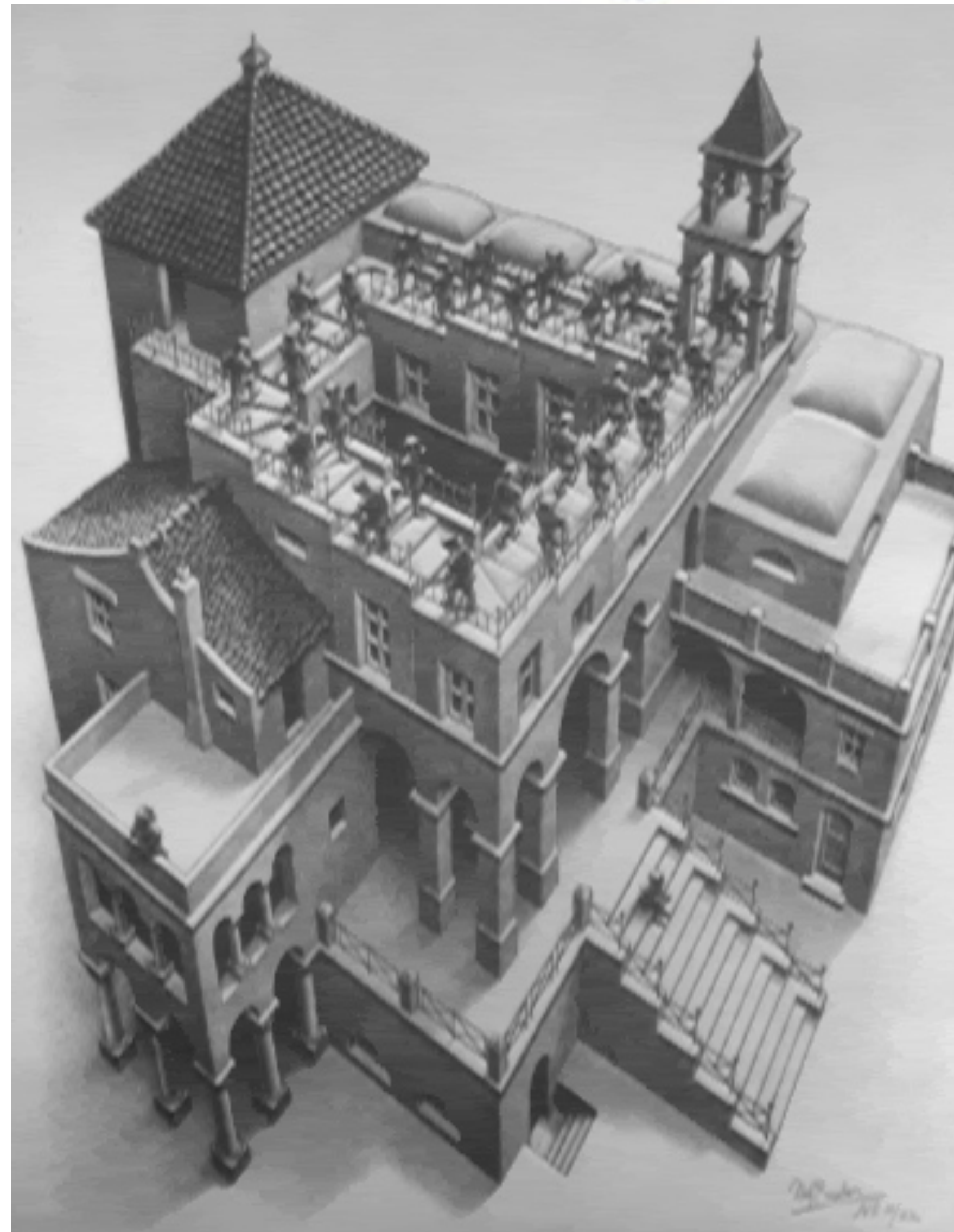
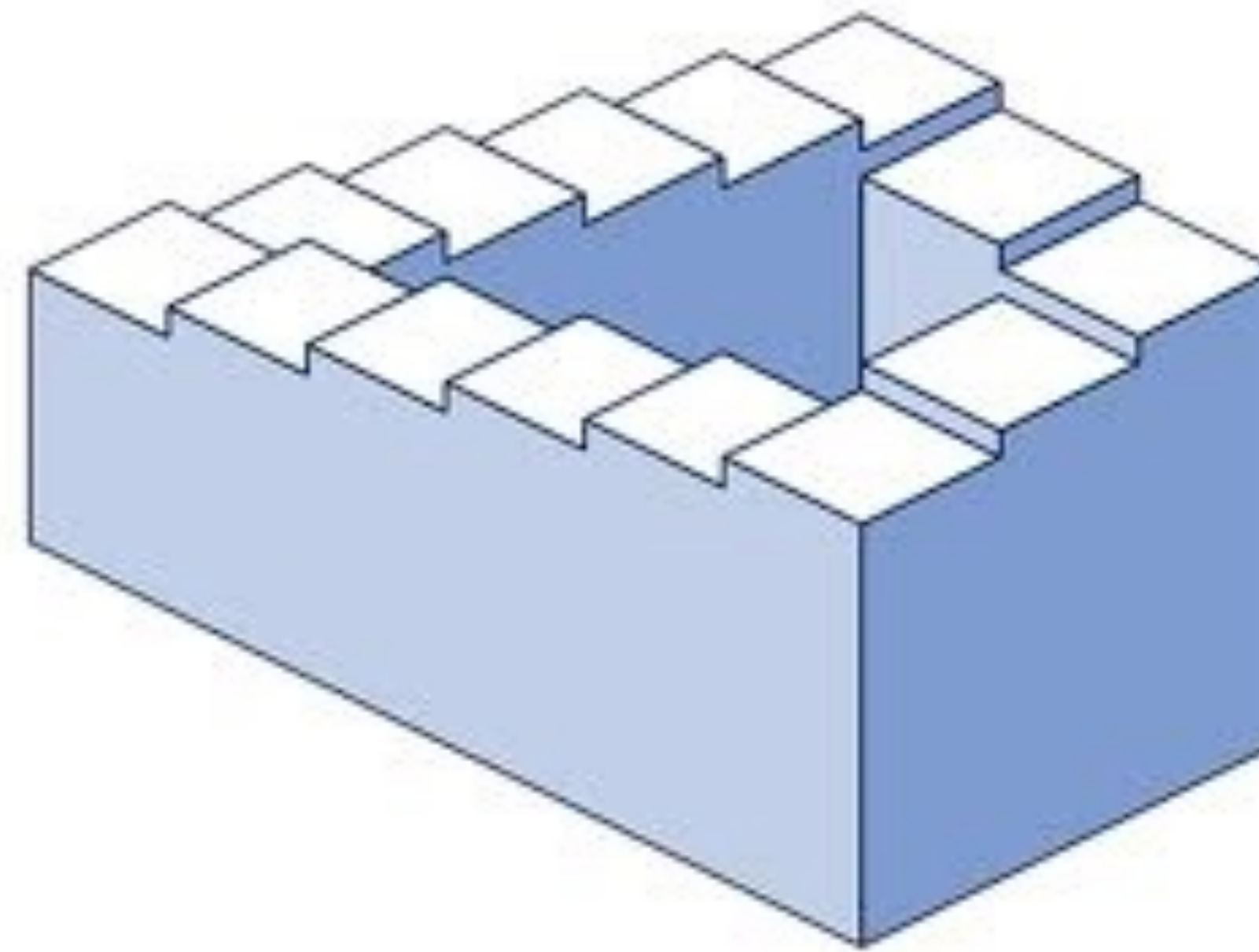


Akusztikus illúzió?

A Shepard skála vizuális analógjai:



Maurits Cornelis Escher
(1898-1972)



Escher lépcső



Fodrász rúd

OMHV



<http://report.semmelweis.hu/linkreport.php?qr=9TD9PIGIF5J4TDG8>