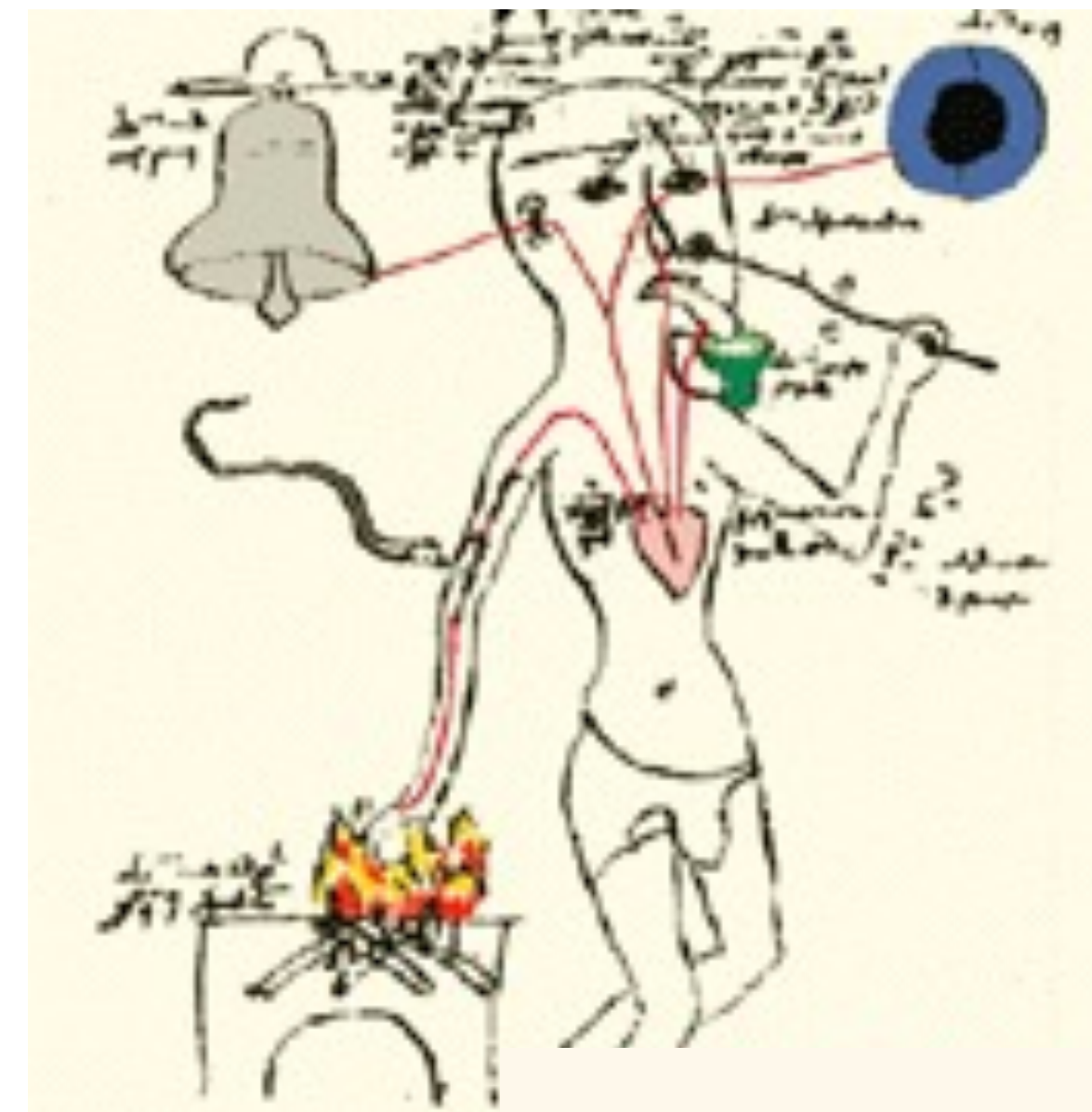


ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK
BIOFIZIKÁJA
LÁTÁS, HALLÁS

KELLERMAYER MIKLÓS

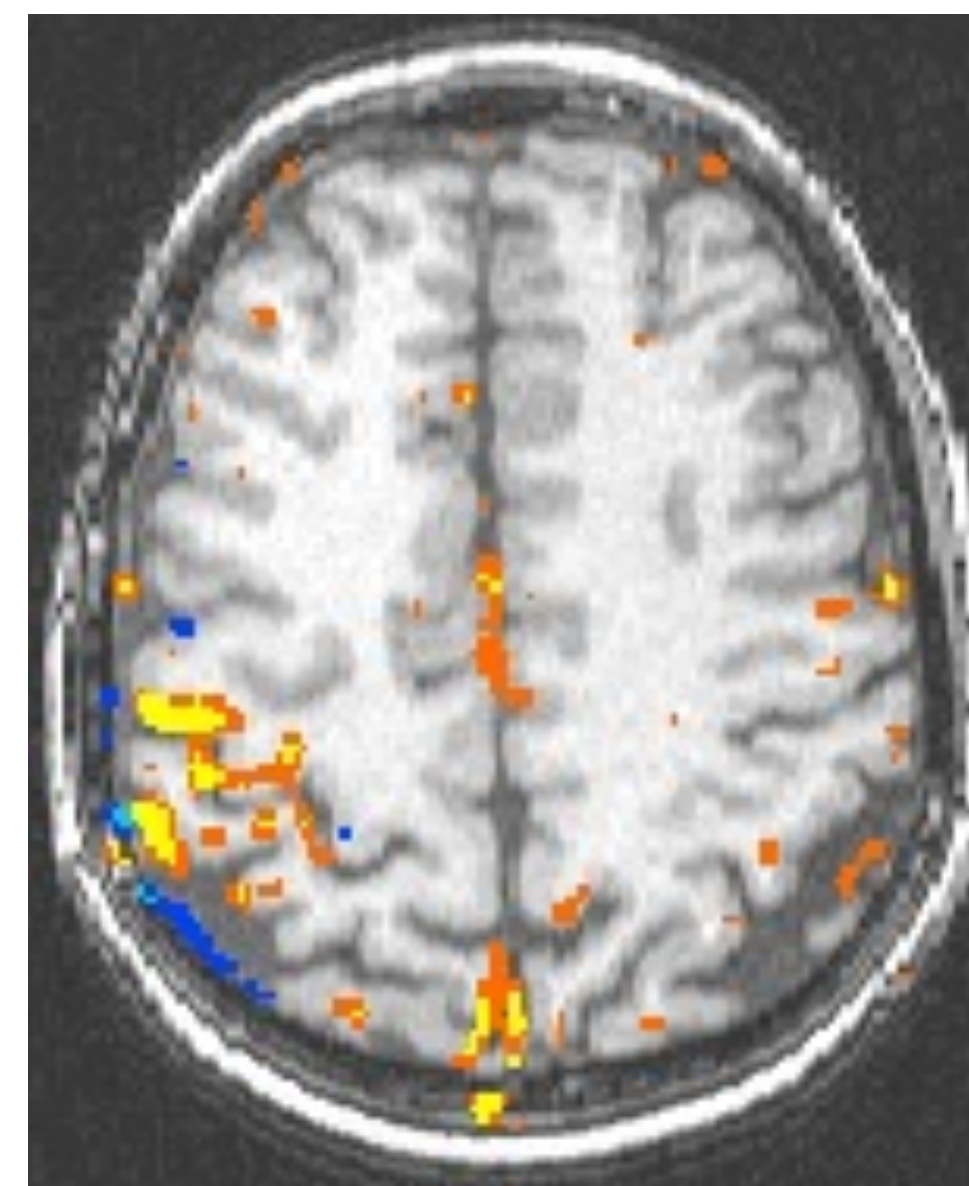
Elméletek az érzékelésről

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.

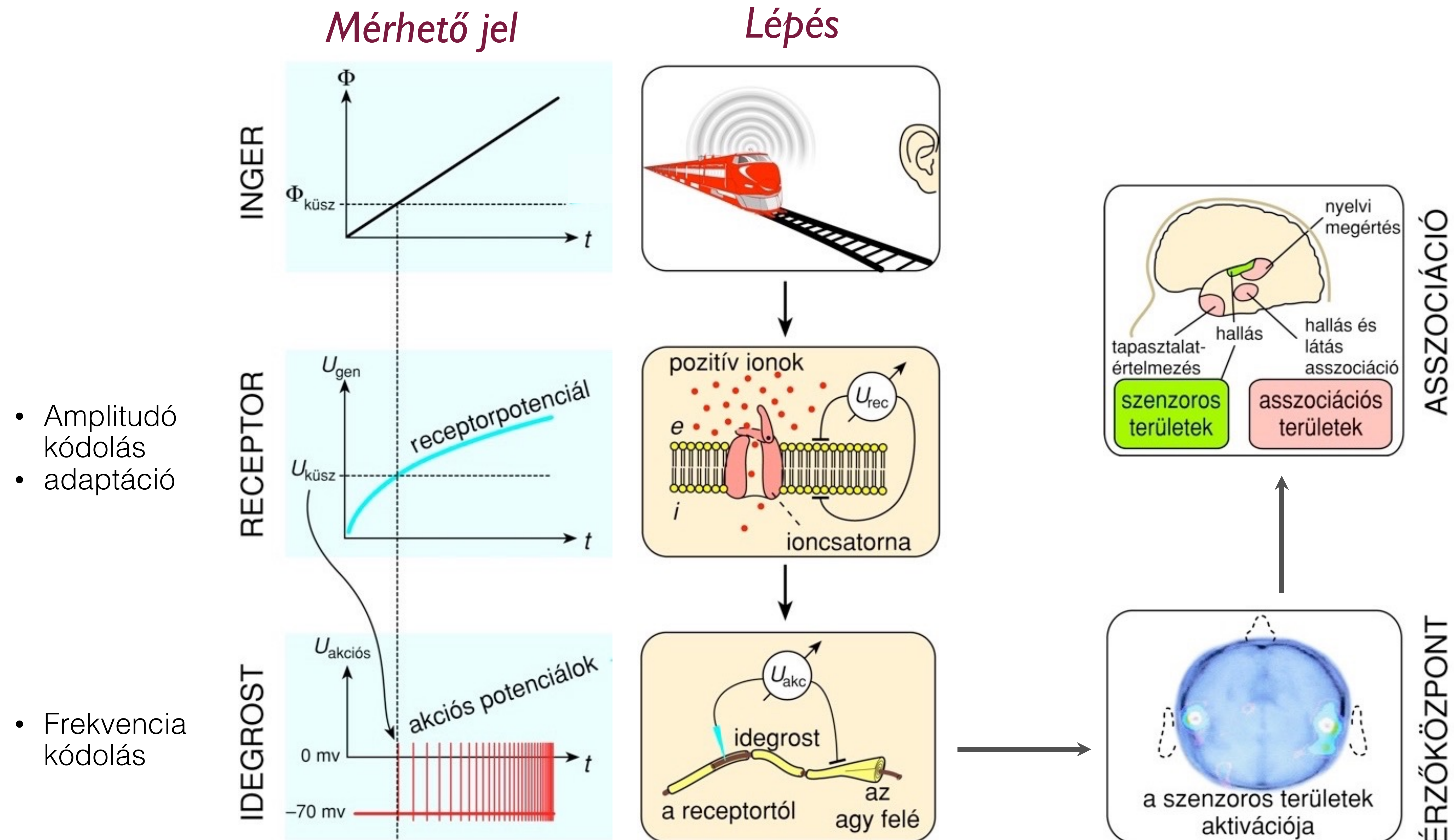
Receptorok (eltérő jelentés!): Olyan fehérjék, amelyek specifikusan képesek hormonok, neurotranszmitterek és más anyagok megkötésére és ezáltal specifikus válaszreakciókat indítanak el.

	Érzésmodalitás	Receptor	Érzékelőszerv
Tudatosuló	Látás	Csapok és pálcikák	Szem
	Hallás	Szőrsejtek	Fül (Corti-szerv)
	Szaglás	Olphactorius neuron	Szagló nyálkahártya
	Ízezés	Ízezőreceptor-sejtek	Ízezőbimbó
	Szöggyorsulás	Szőrsejtek	Fül (félkörös ívjáratok)
	Lineáris gyorsulás	Szőrsejtek	Fül (utrículus és sacculus)
	Tapintás-nyomás	Idegvégzódések	Többféle*
	Meleg	Idegvégzódések	Többféle*
	Fájdalom	Idegvégzódések	Többféle*
	Hideg	Csupasz idegvégzódések	...
	Ízületi helyzet és mozgás	Idegvégzódések	Többféle*
	Izomhossz	Idegvégzódések	Izomorsó
	Izomfeszülés	Idegvégzódések	Golgi-féle inszerv
	Artériás vérnyomás	Idegvégzódések	A sinus caroticus és az aortaív nyújtási receptorai
	Centrális vénás nyomás	Idegvégzódések	A nagyvénák és a pitvarok falának nyújtási receptorai
Nem tudatosuló	A tüdő feszülése	Idegvégzódések	A tüdőszövet nyújtási receptorai
	A vér hőmérséklete	Hypothalamusneuronok	...
	Artériás P _{O₂}	Idegvégzódések	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:
- hallóreceptorok: a levegő molekulák termikus mozgása
 - fényreceptorok: 1-2 foton

A jelátalakítás lépései



- Amplitudó kódolás
- adaptáció

- Frekvencia kódolás

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!

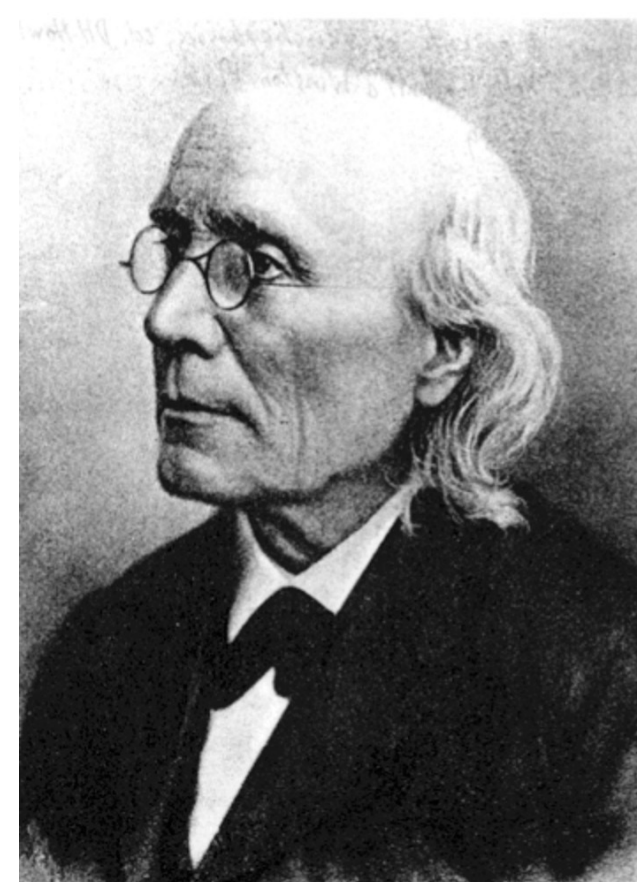
2. Ingerintenzitás és érzet

Weber-Fechner-féle
pszichofizikai alaptörvény

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



Weber (1795-1878)



Fechner (1801-1887)

Stevens-törvény

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



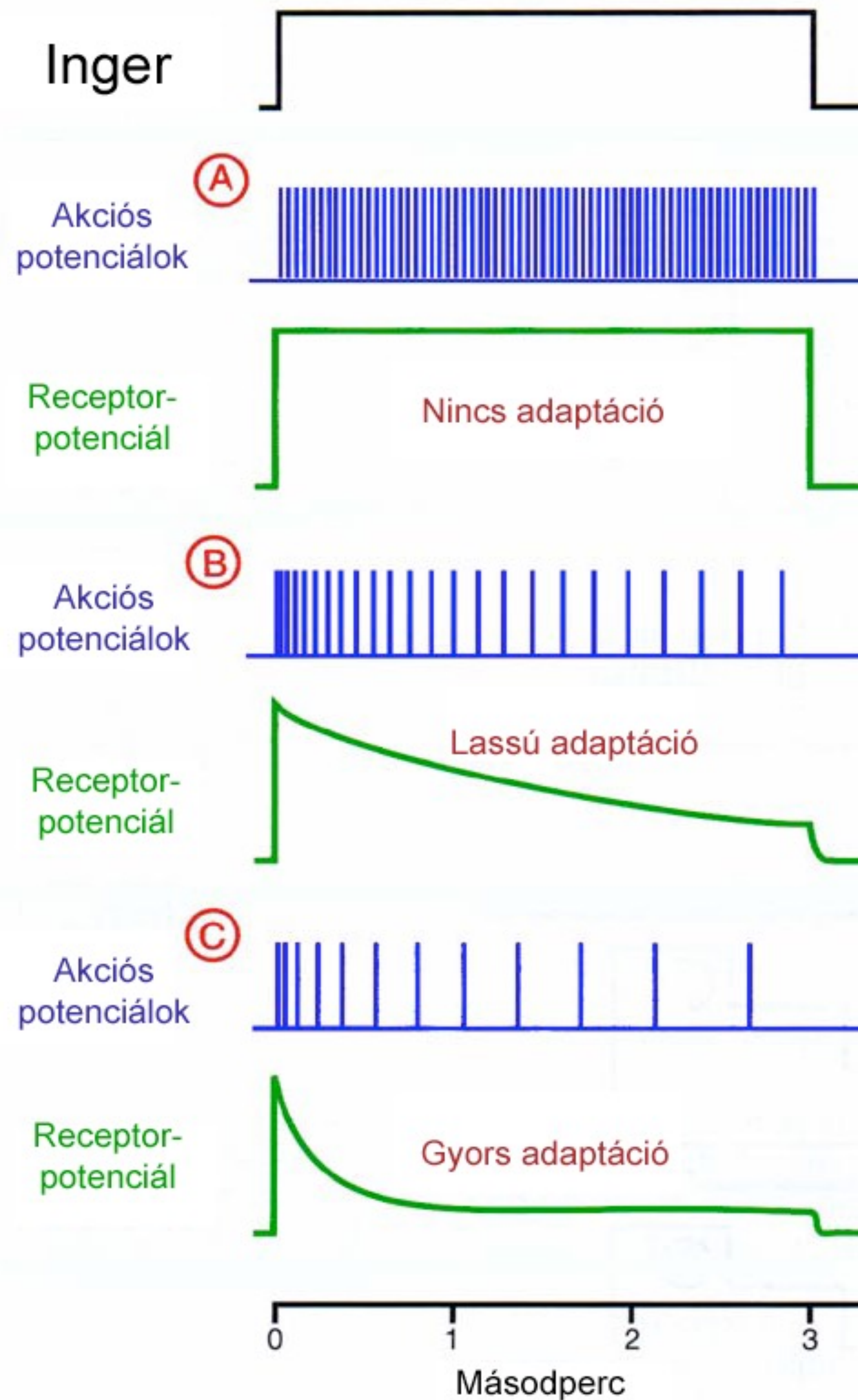
Stevens (1906-1973)

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

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

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

3. Időtartam, adaptáció



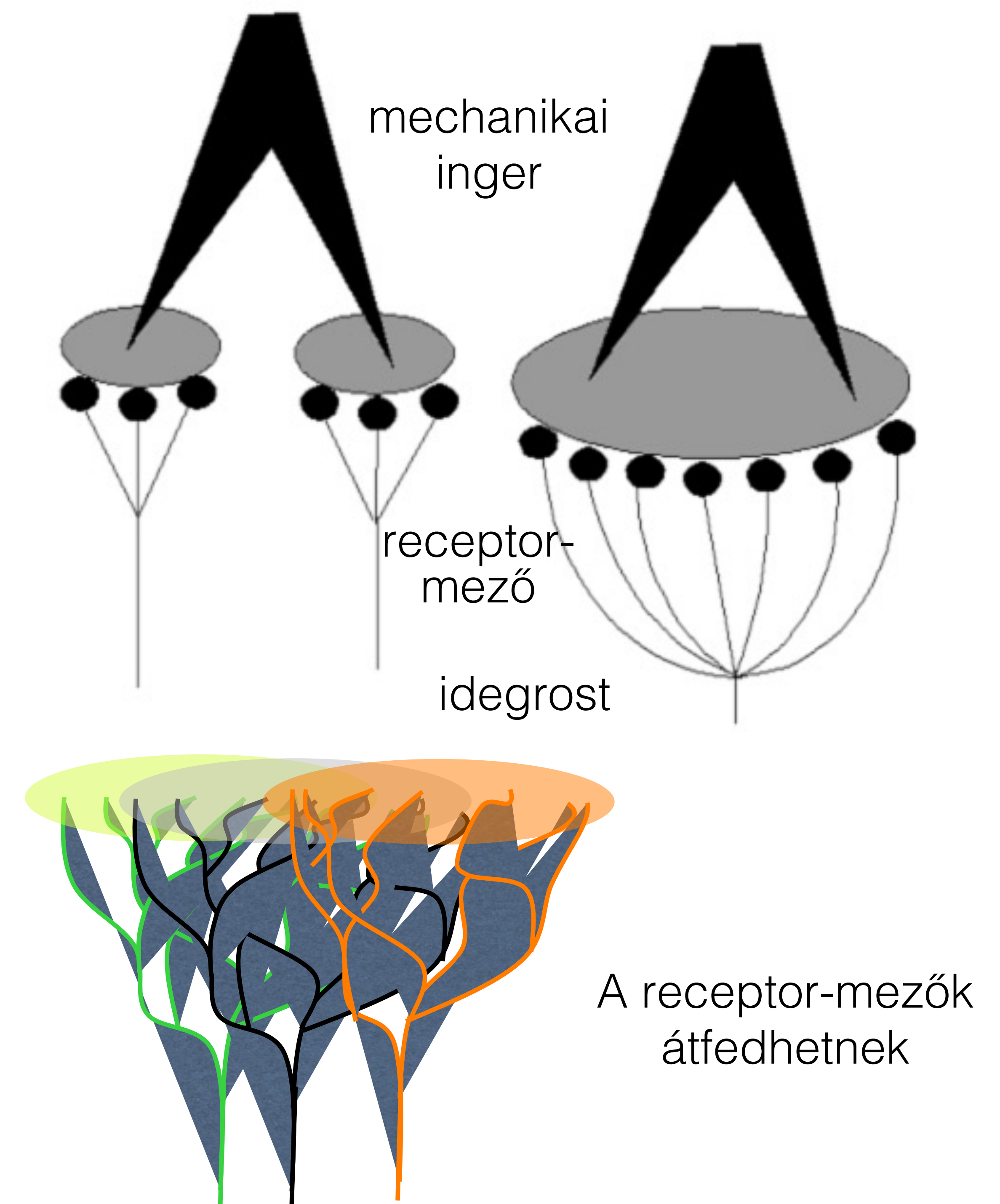
Adaptáció: konstans ingerintenzitás mellett az akciós potenciál frekvencia folyamatosan csökken.

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

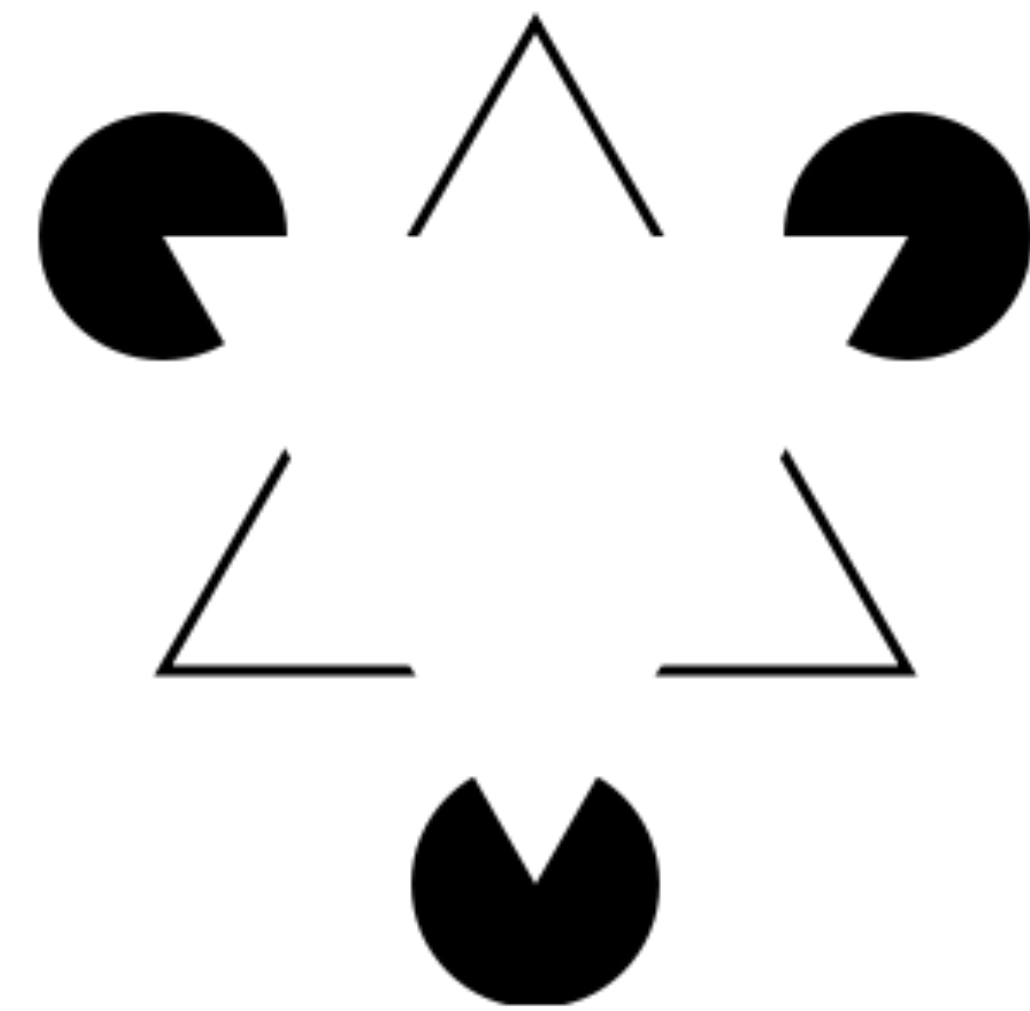
A látás biofizikája

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

Optikai csalódás - intenzitás

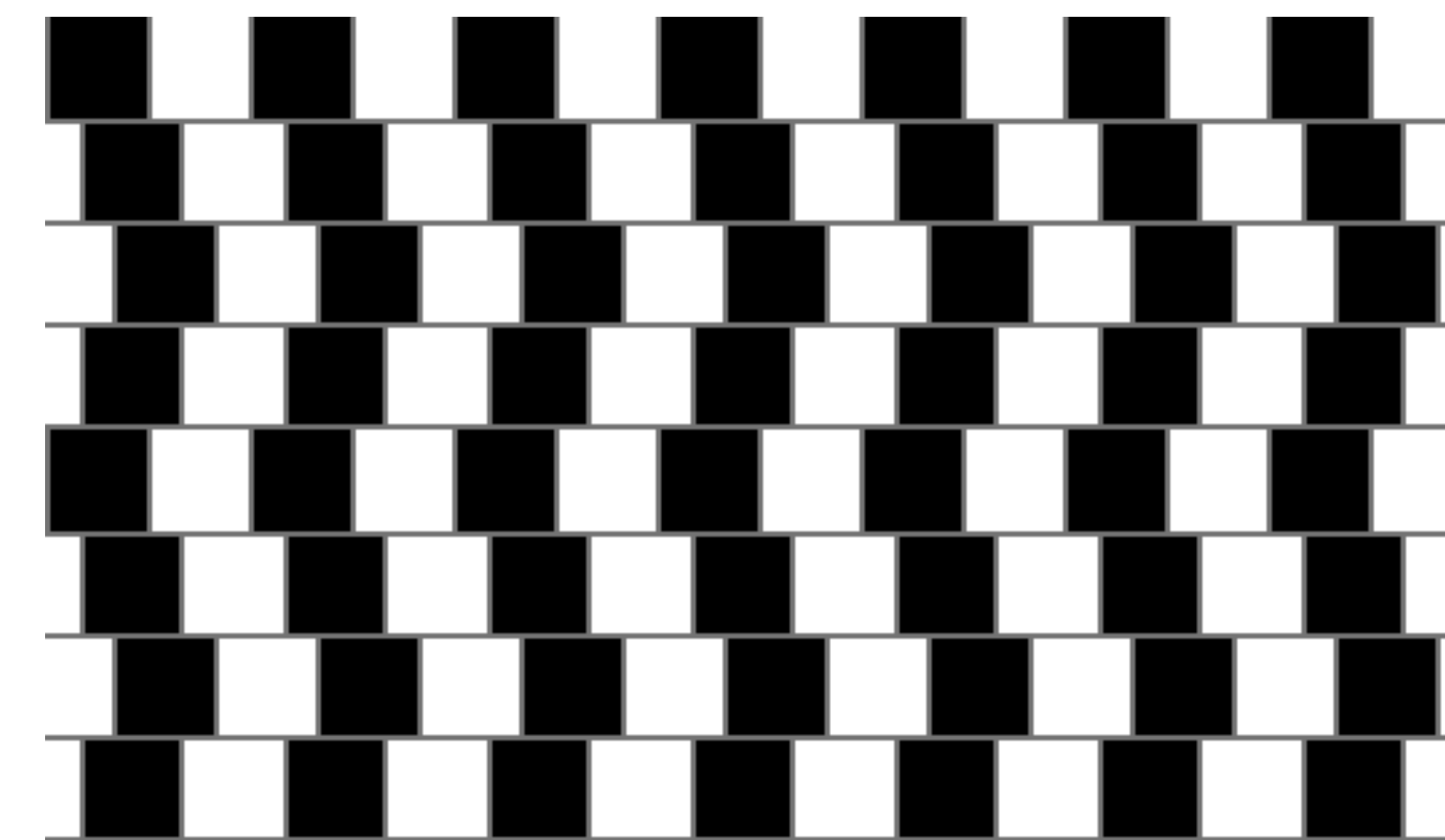


Mach sávok

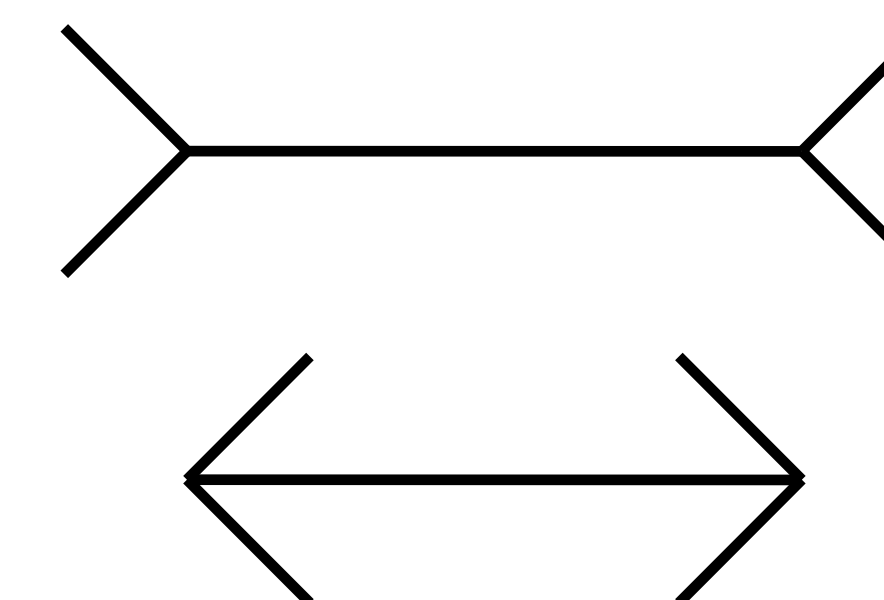


Kanizsa háromszög

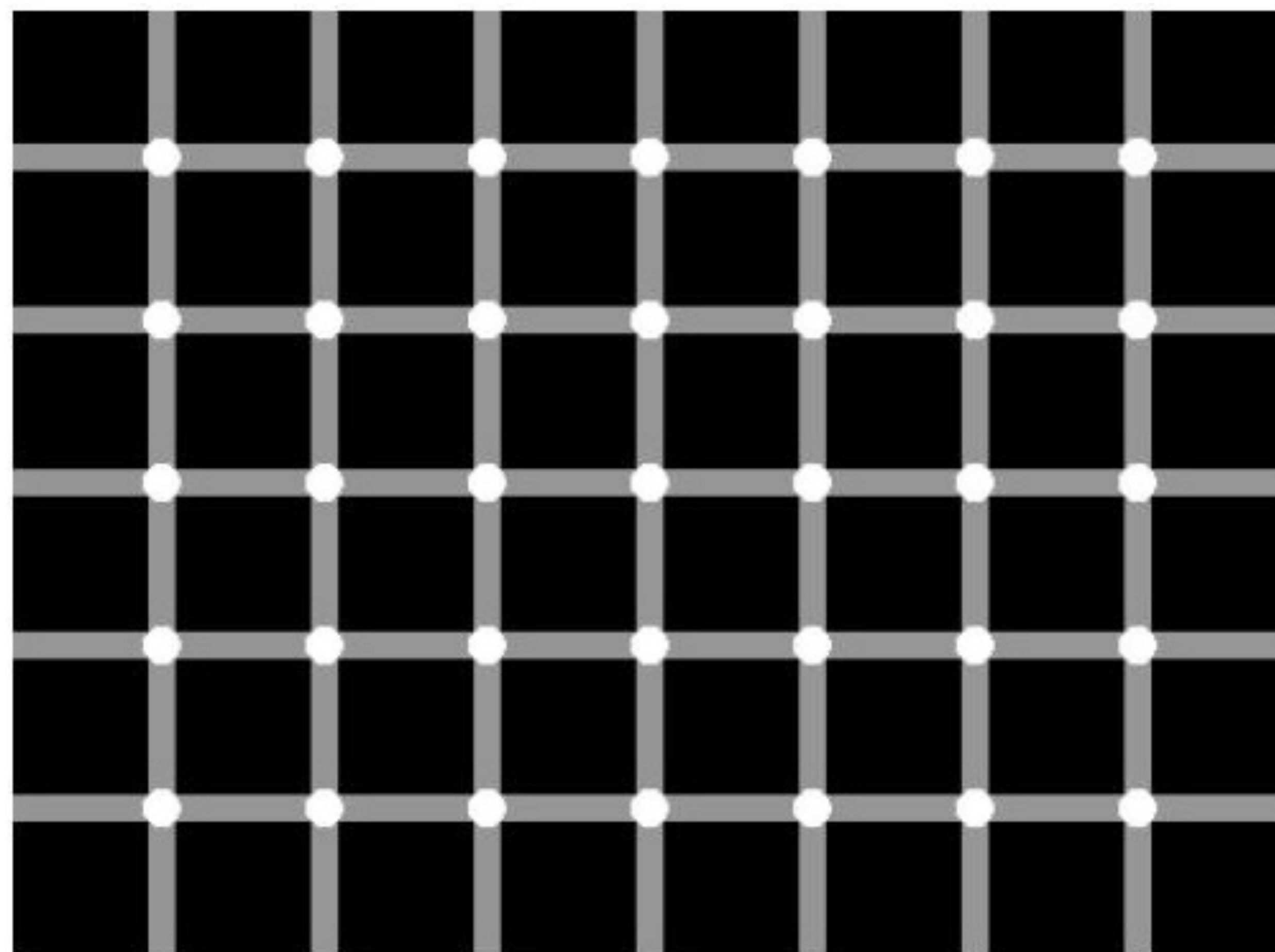
Optikai csalódás - irány, méret



Café wall illúzió



Müller-Lyer
illúzió

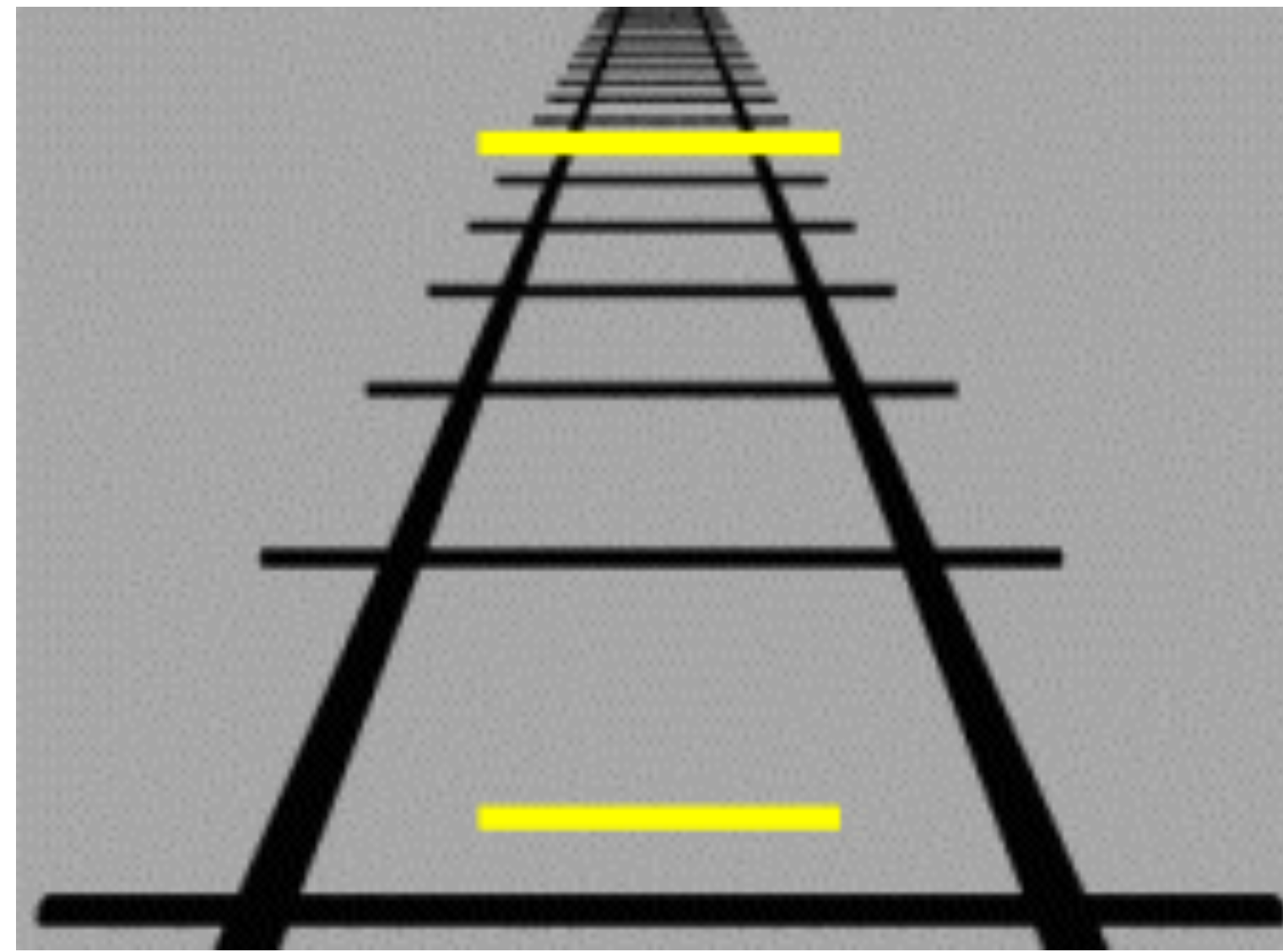


Hány fekete korongot látunk?

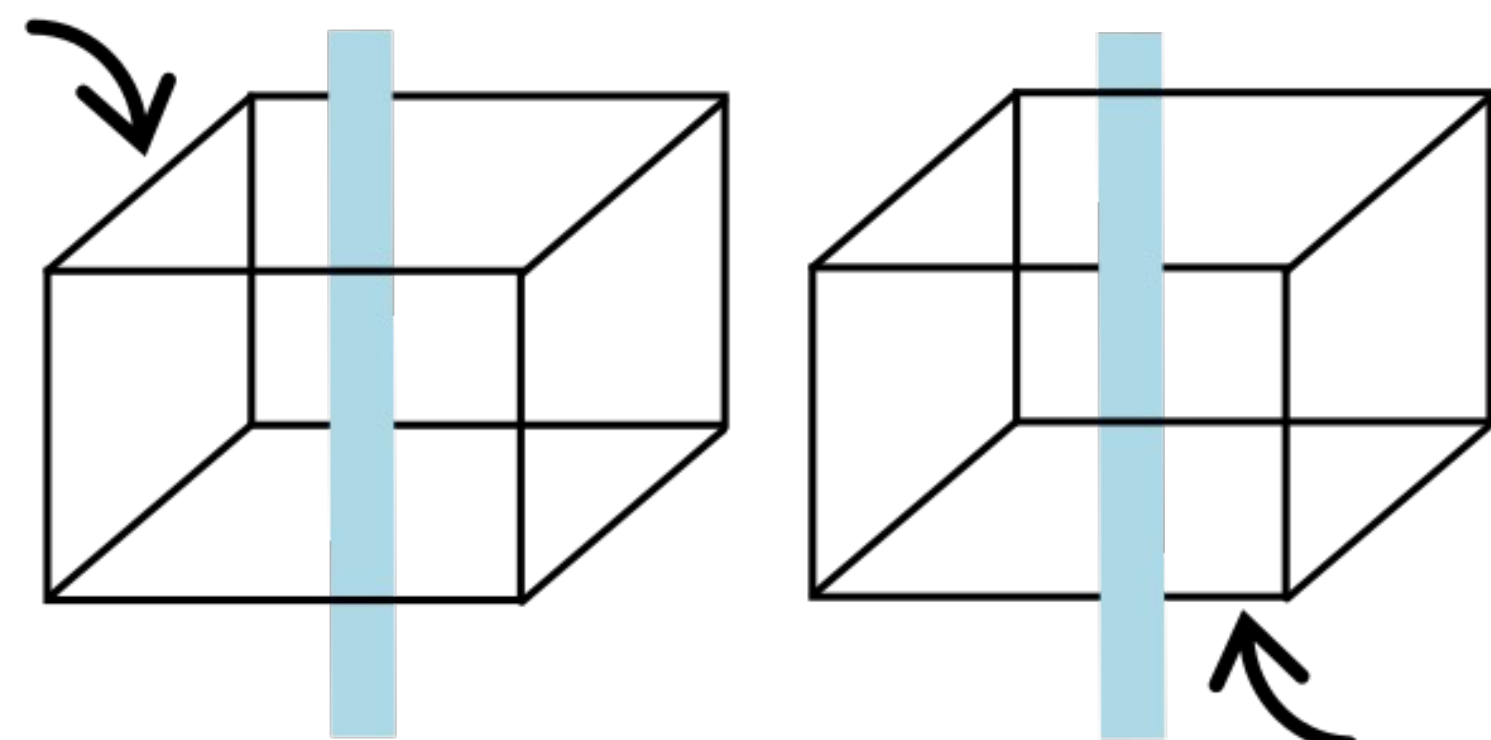


Ebbinghaus illúzió

Optikai csalódások – tér, alak



Ponzo illúzió



Necker kocka

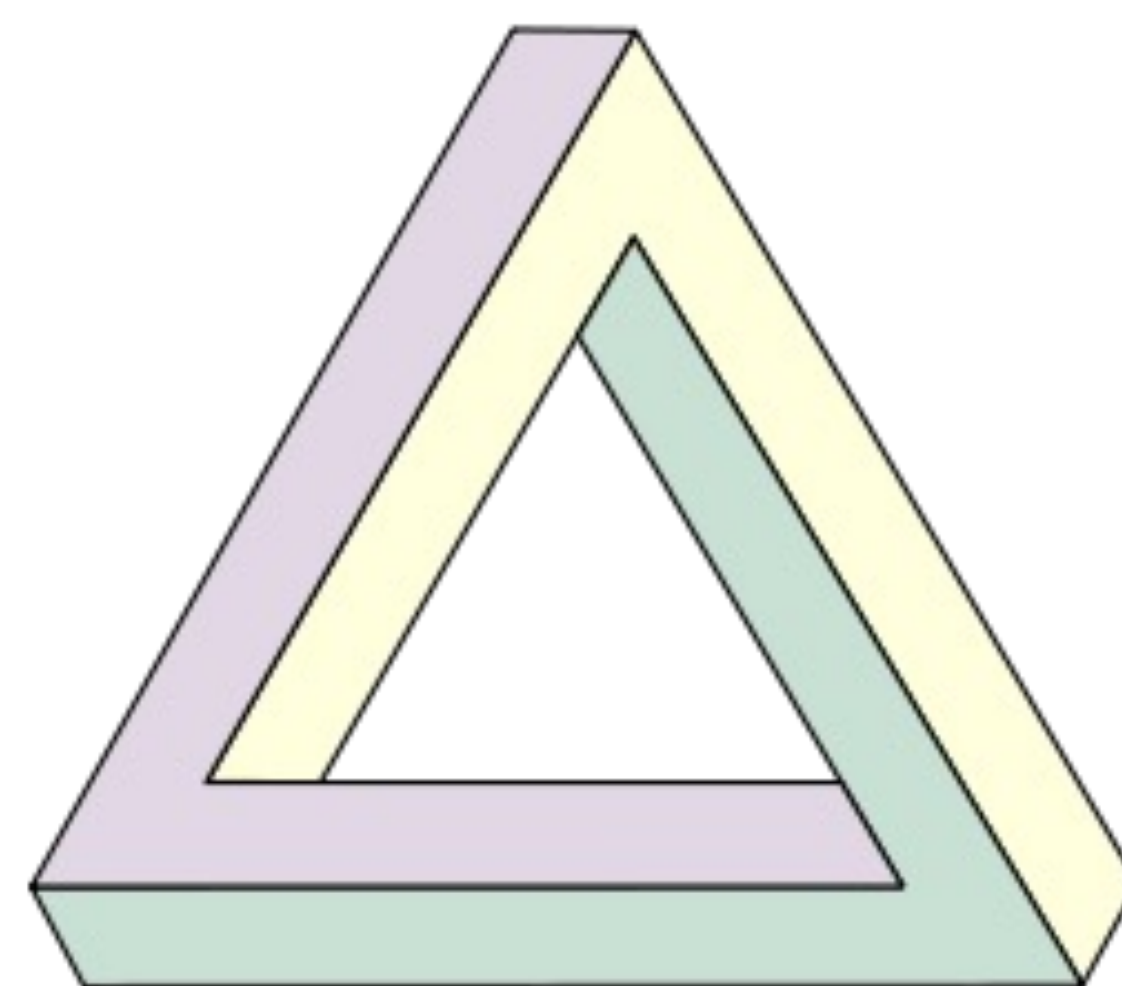


Necker kocka effektus római térhatású mozaikon

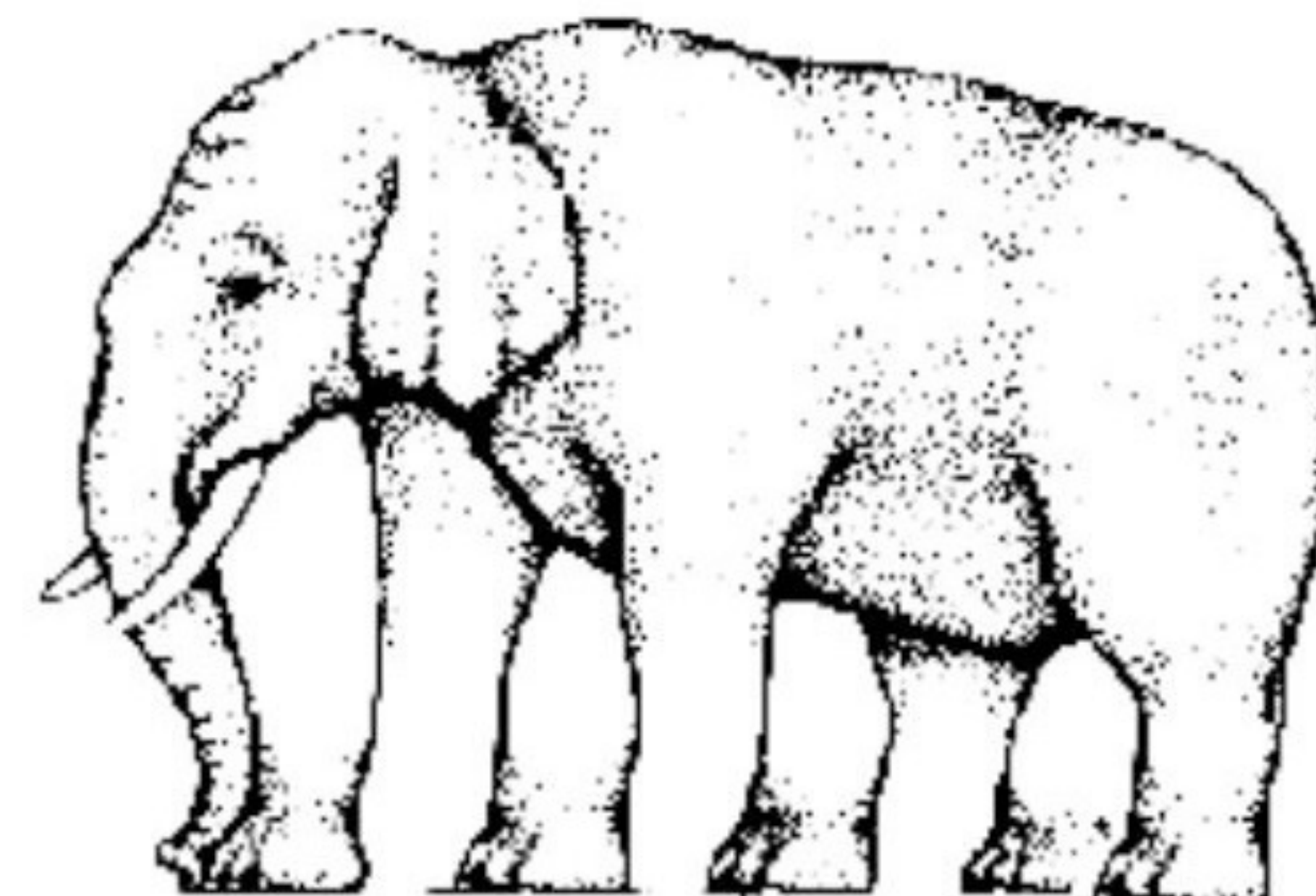
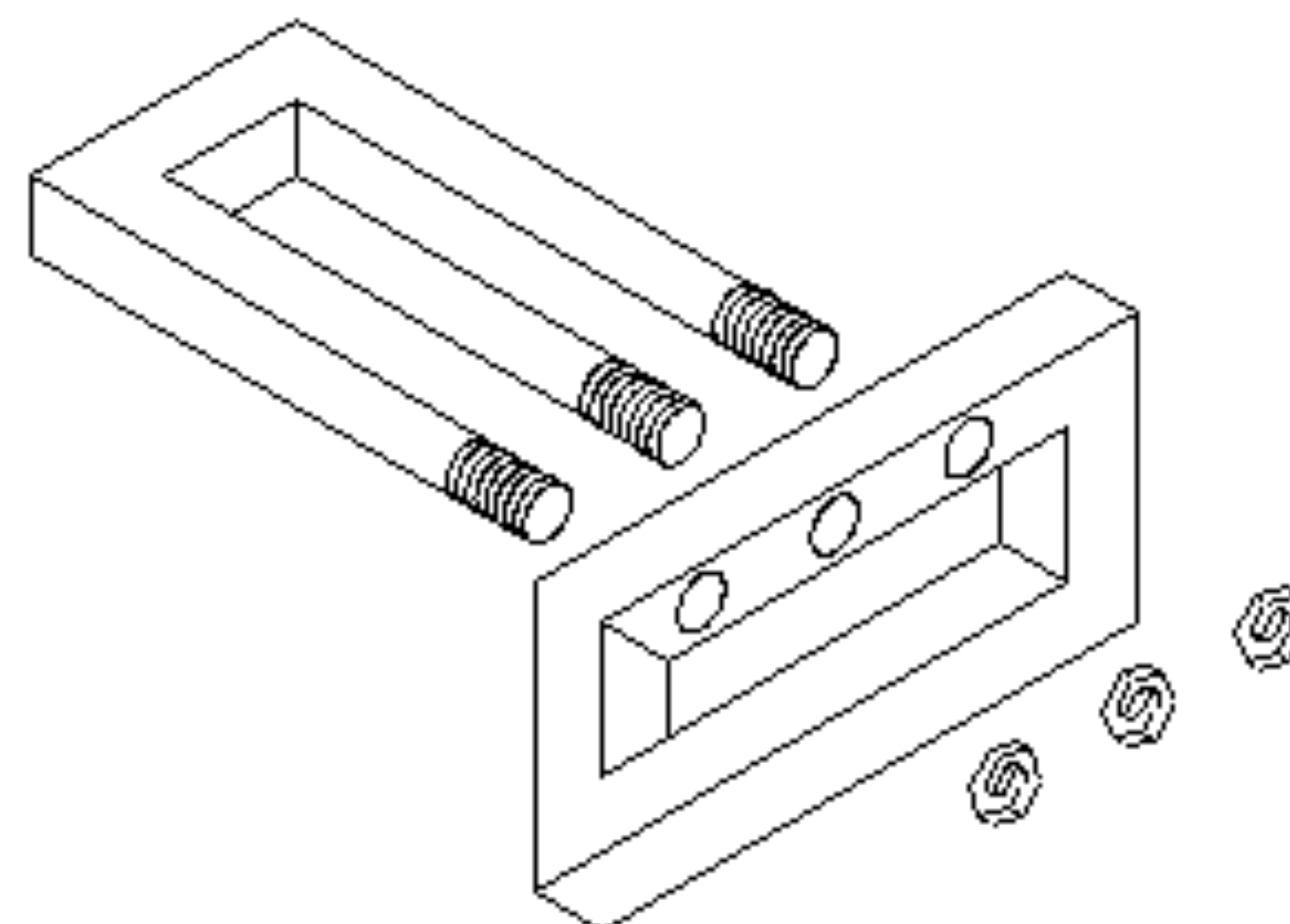


Rubinváza illúzió

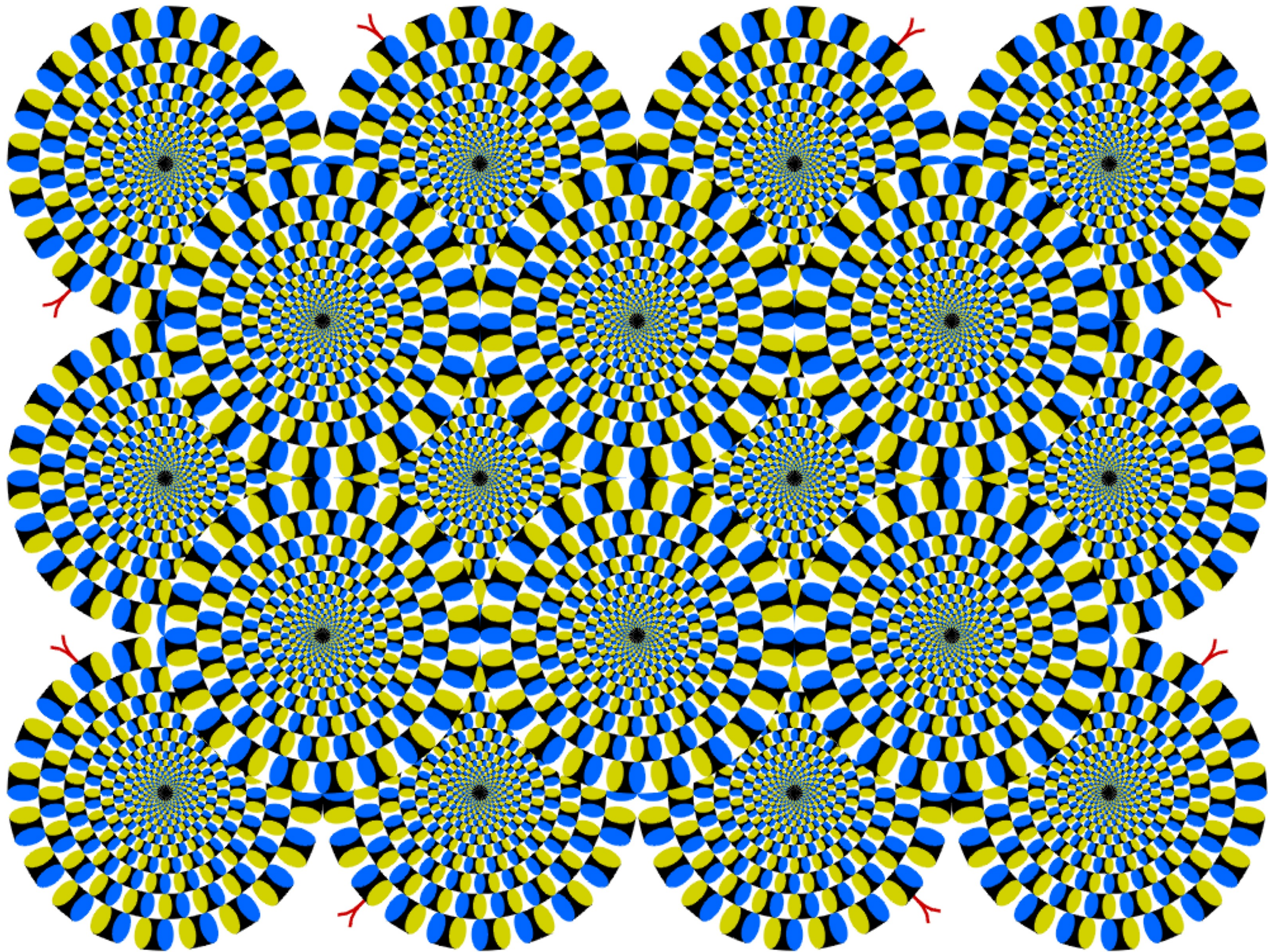
“Lehetetlen”
geometriai
alakzatok



Penrose háromszög

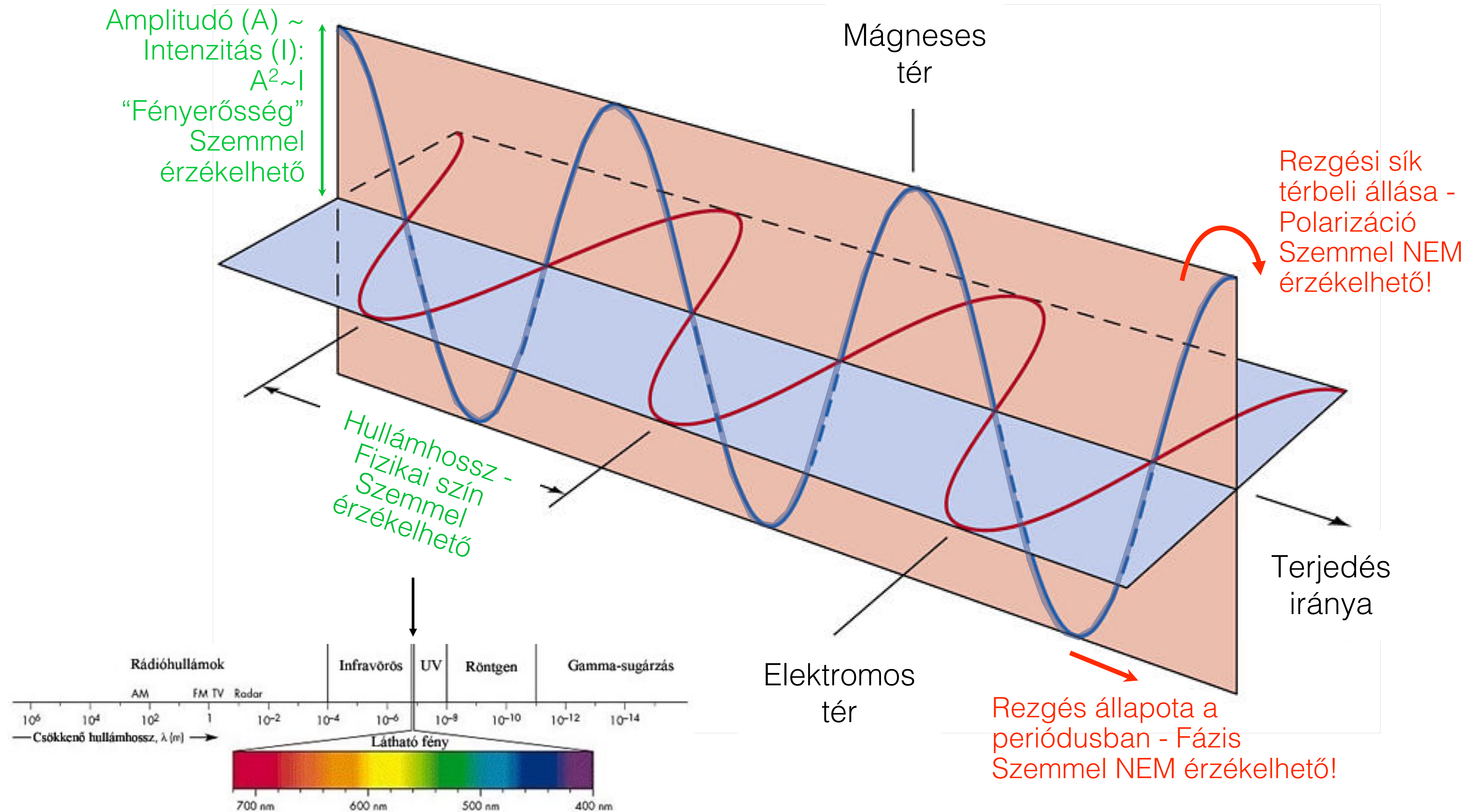


Hány lába van
az elefántnak?



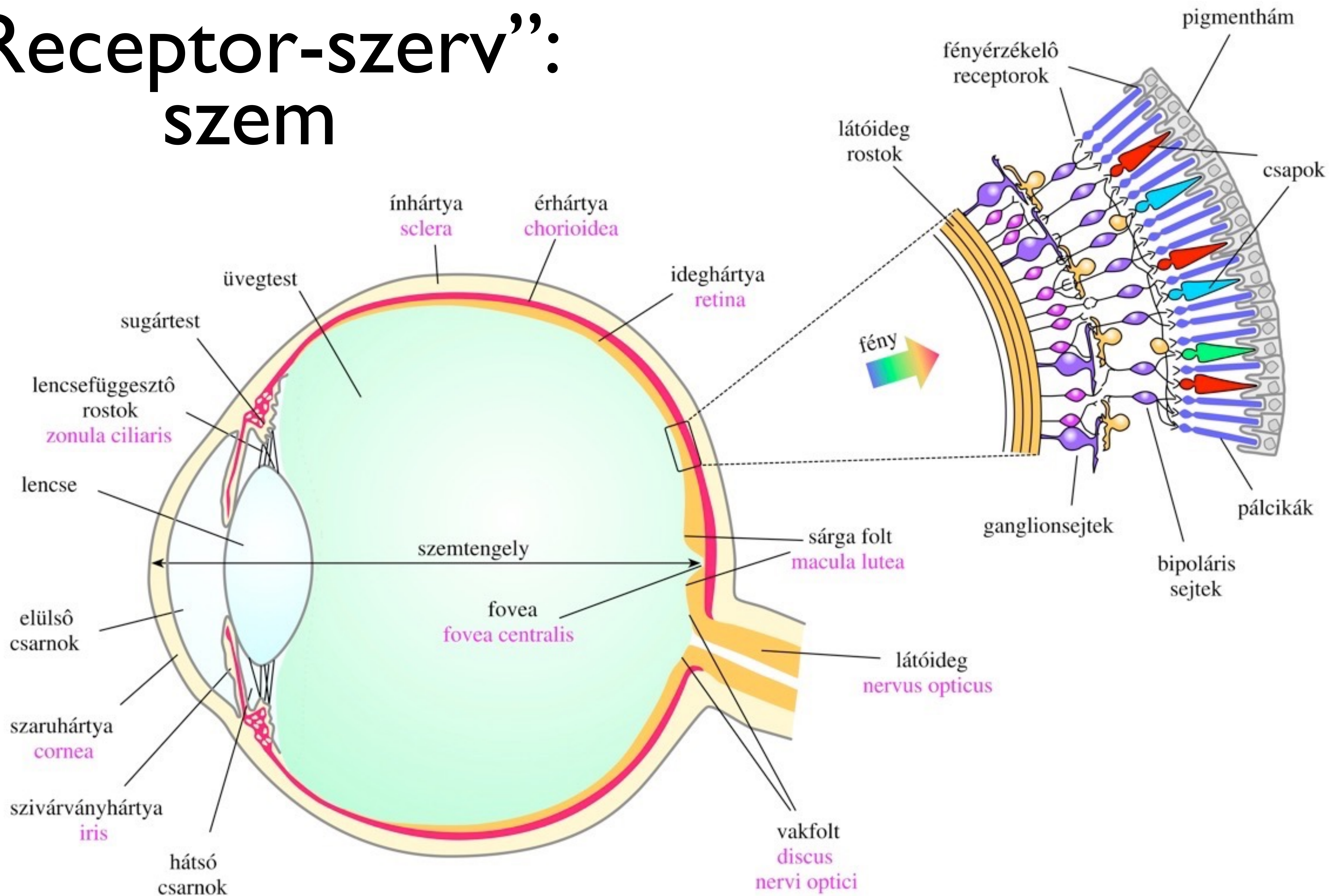
A látás ingere: fény

Elektromágneses (tranzverzális) hullám

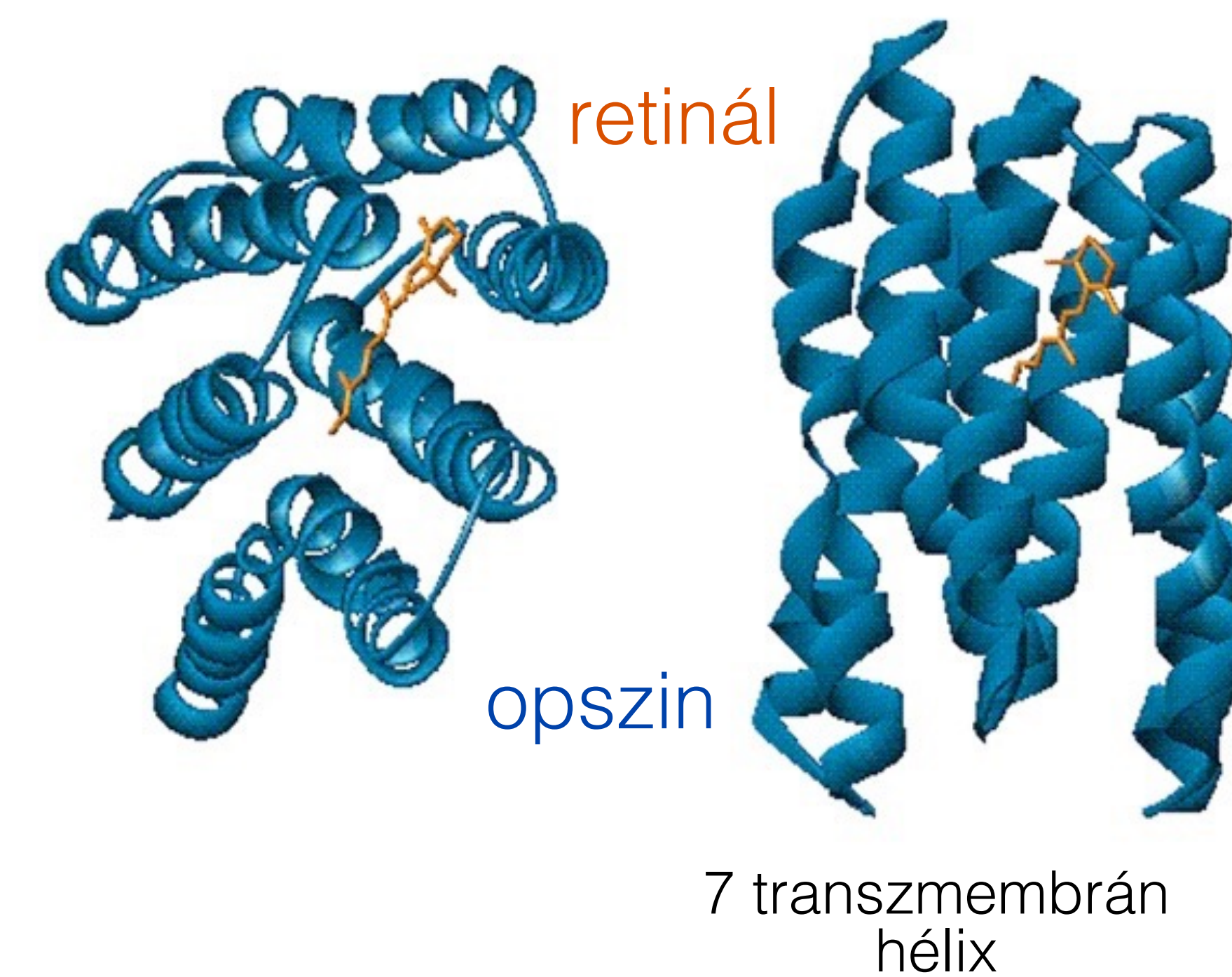
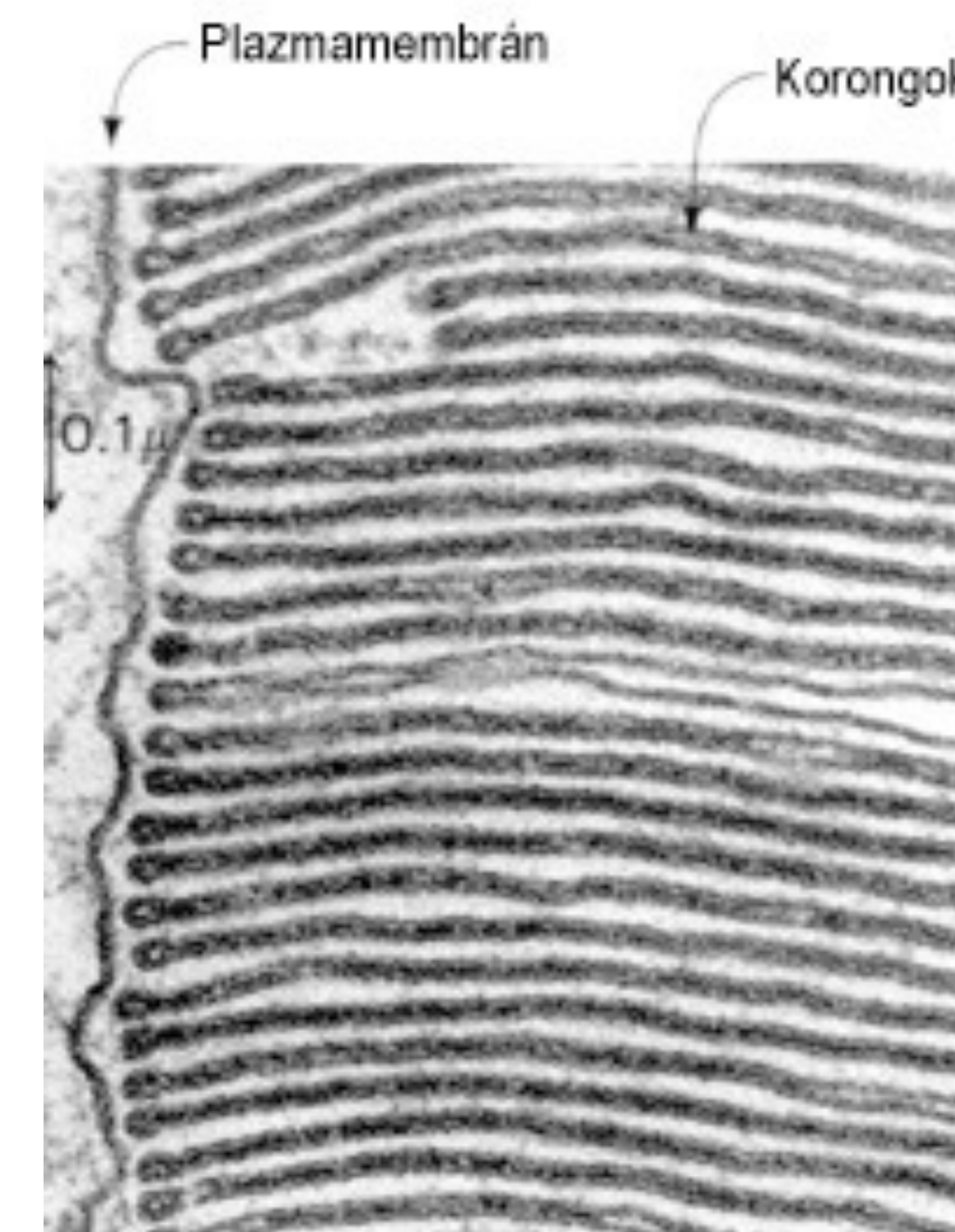
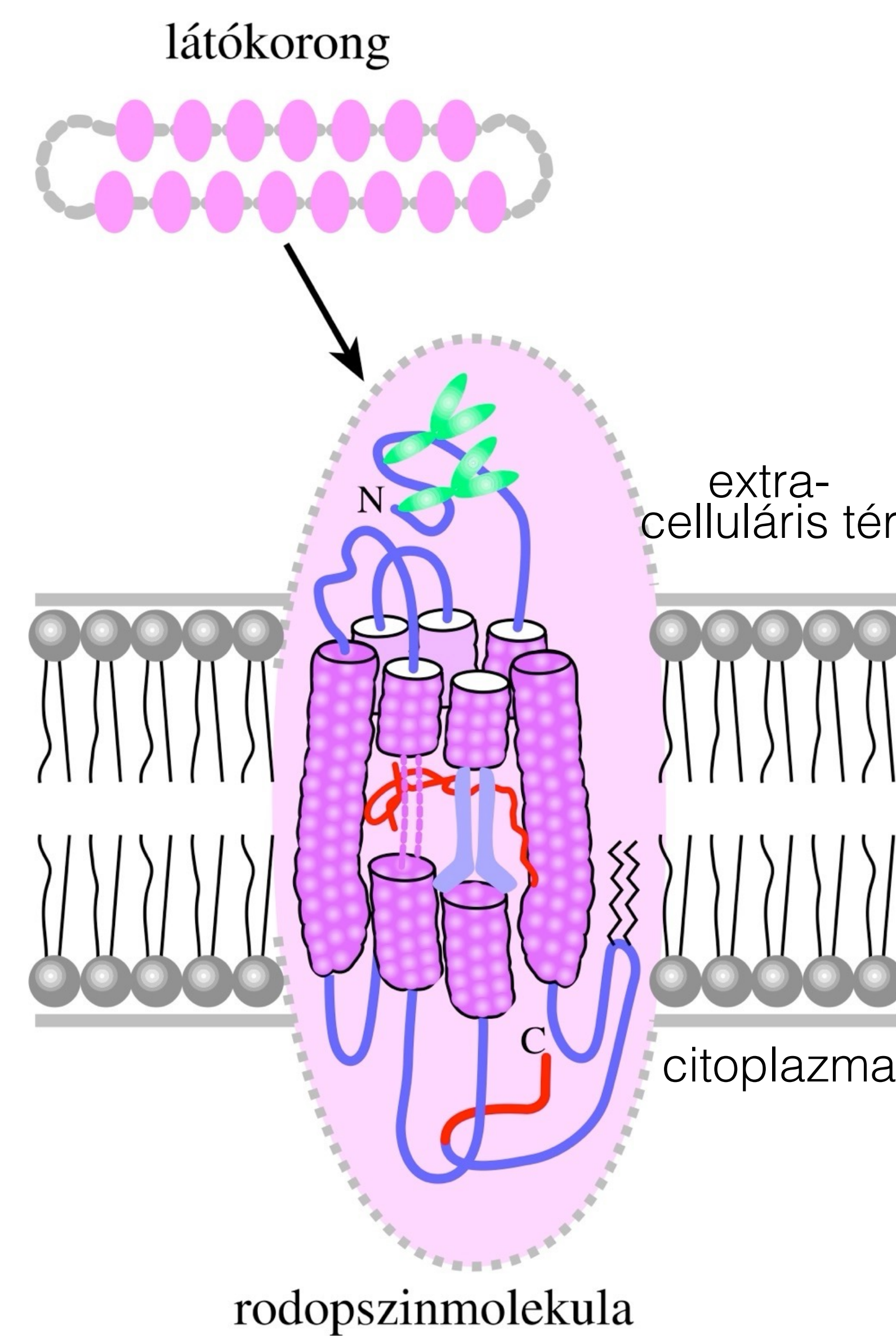
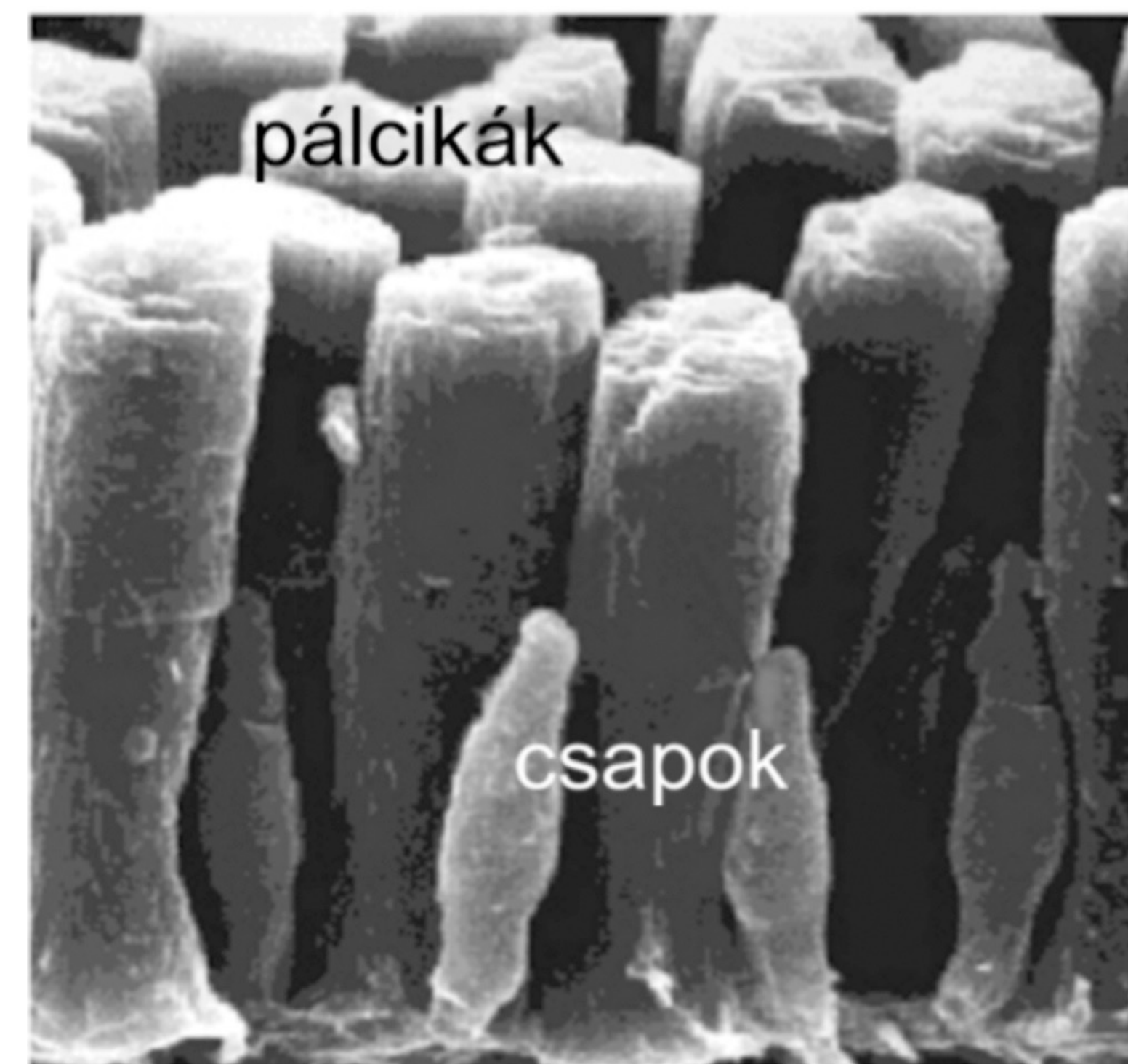
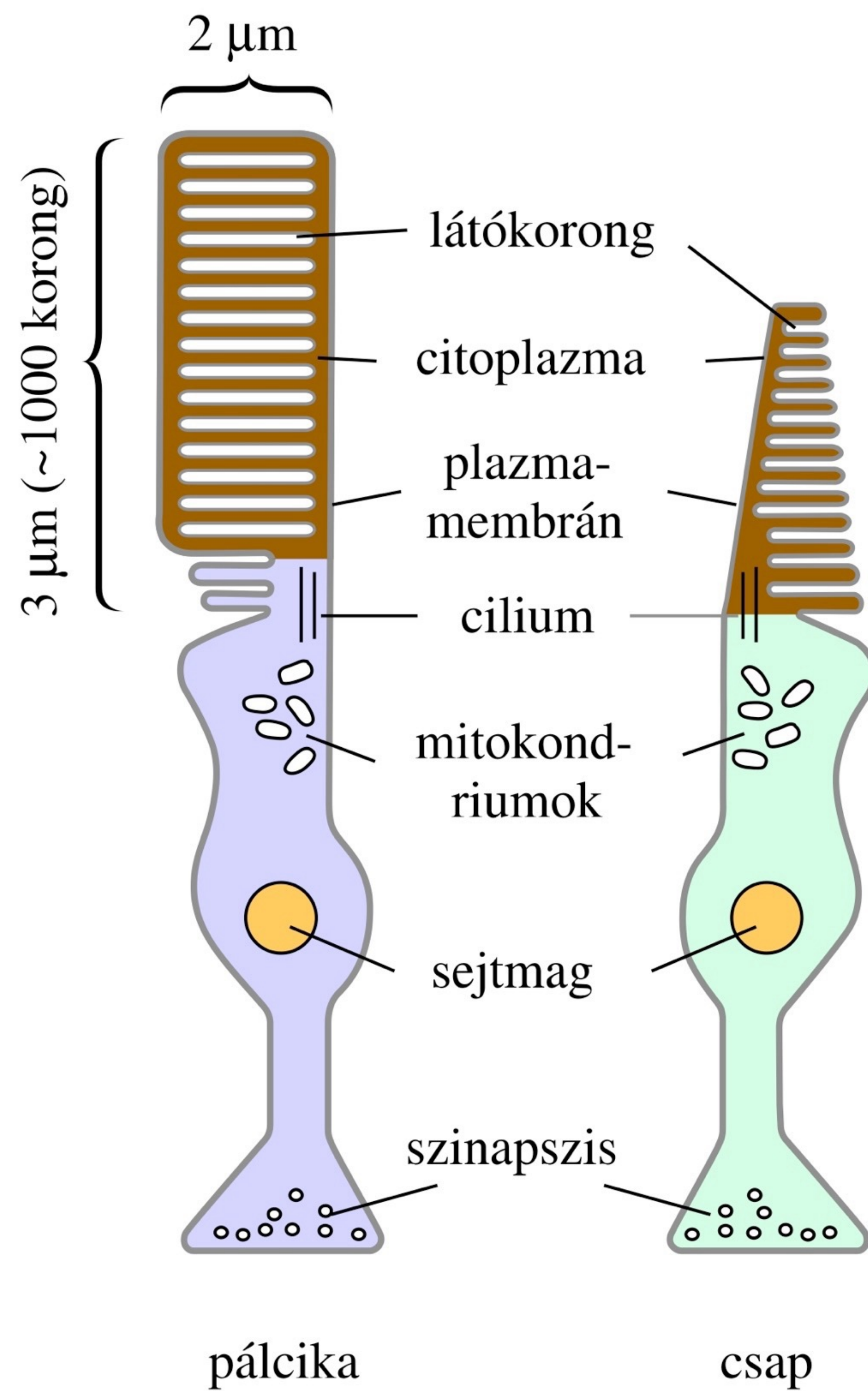


- A szem érzékeny: hullámhosszra és amplitudóra (~intenzitás)
- A szem érzéketlen: fázisra és polarizációra

“Receptor-szerv”: szem



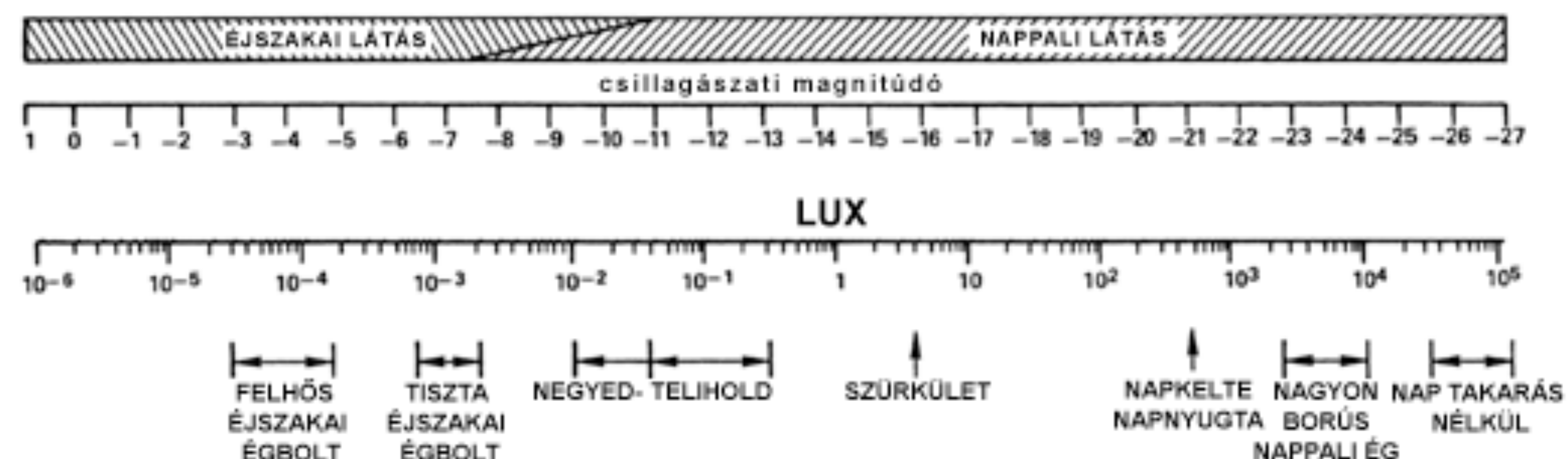
Fotoreceptorok



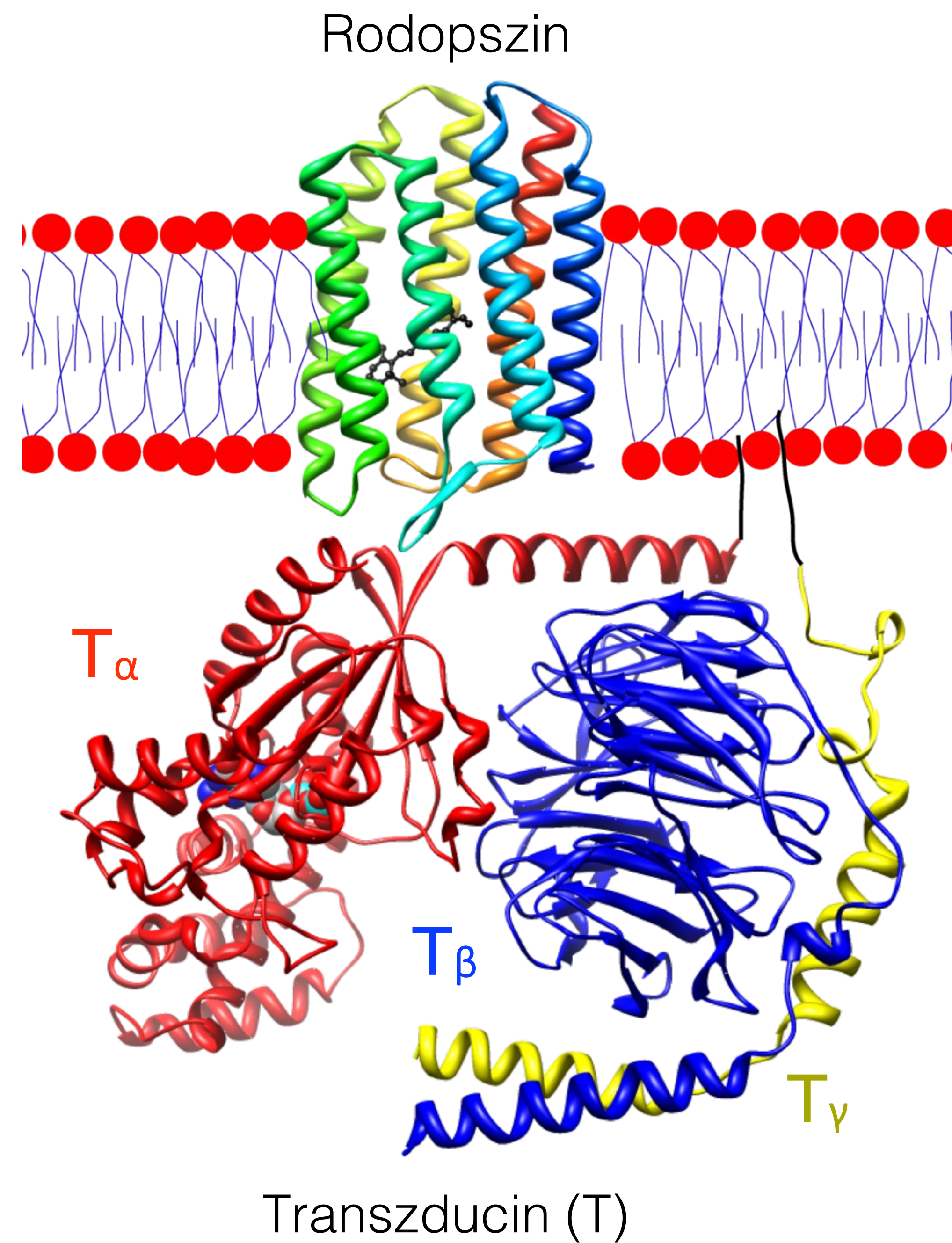
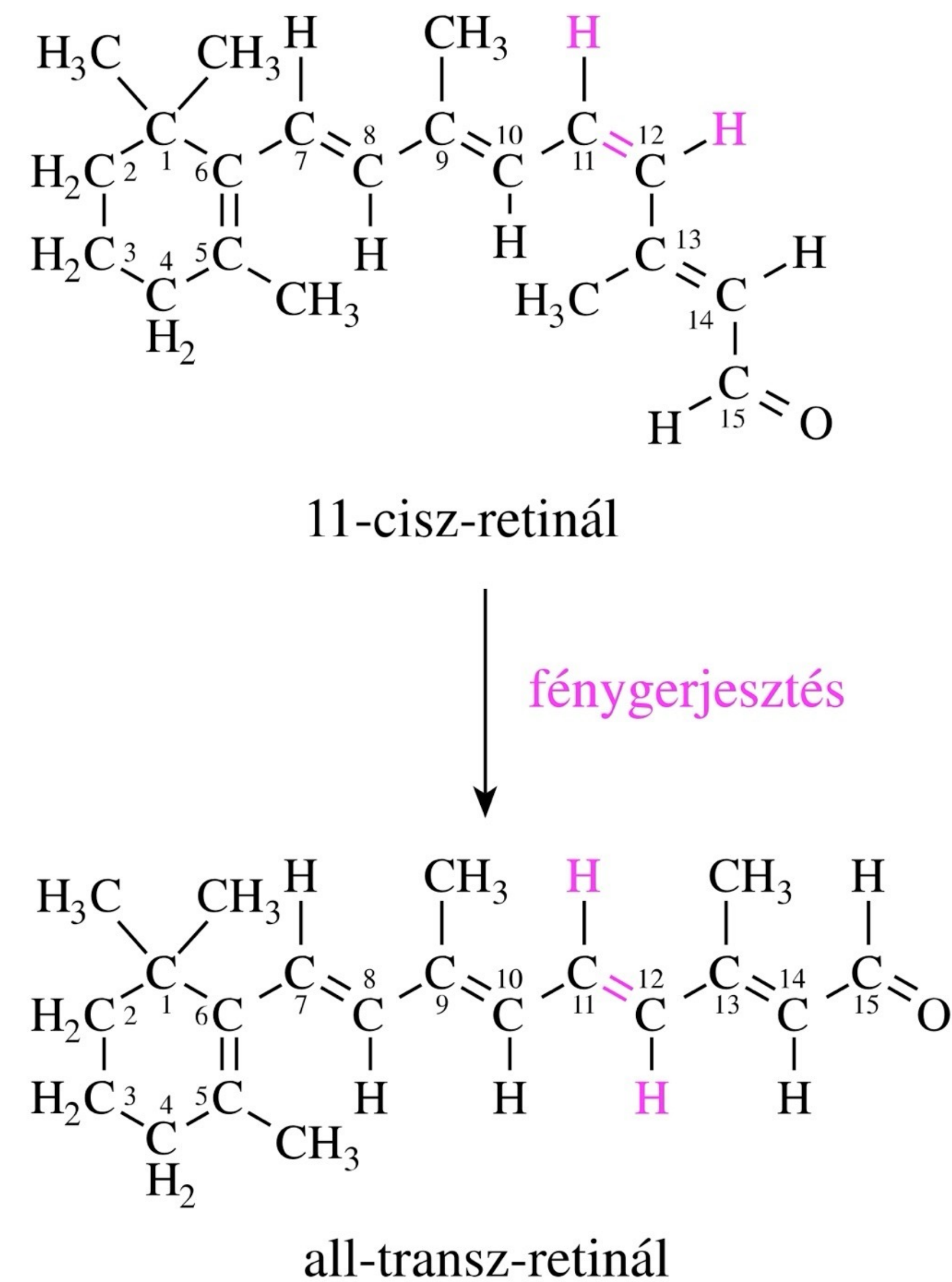
A receptorsejtek tulajdonságai

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



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).

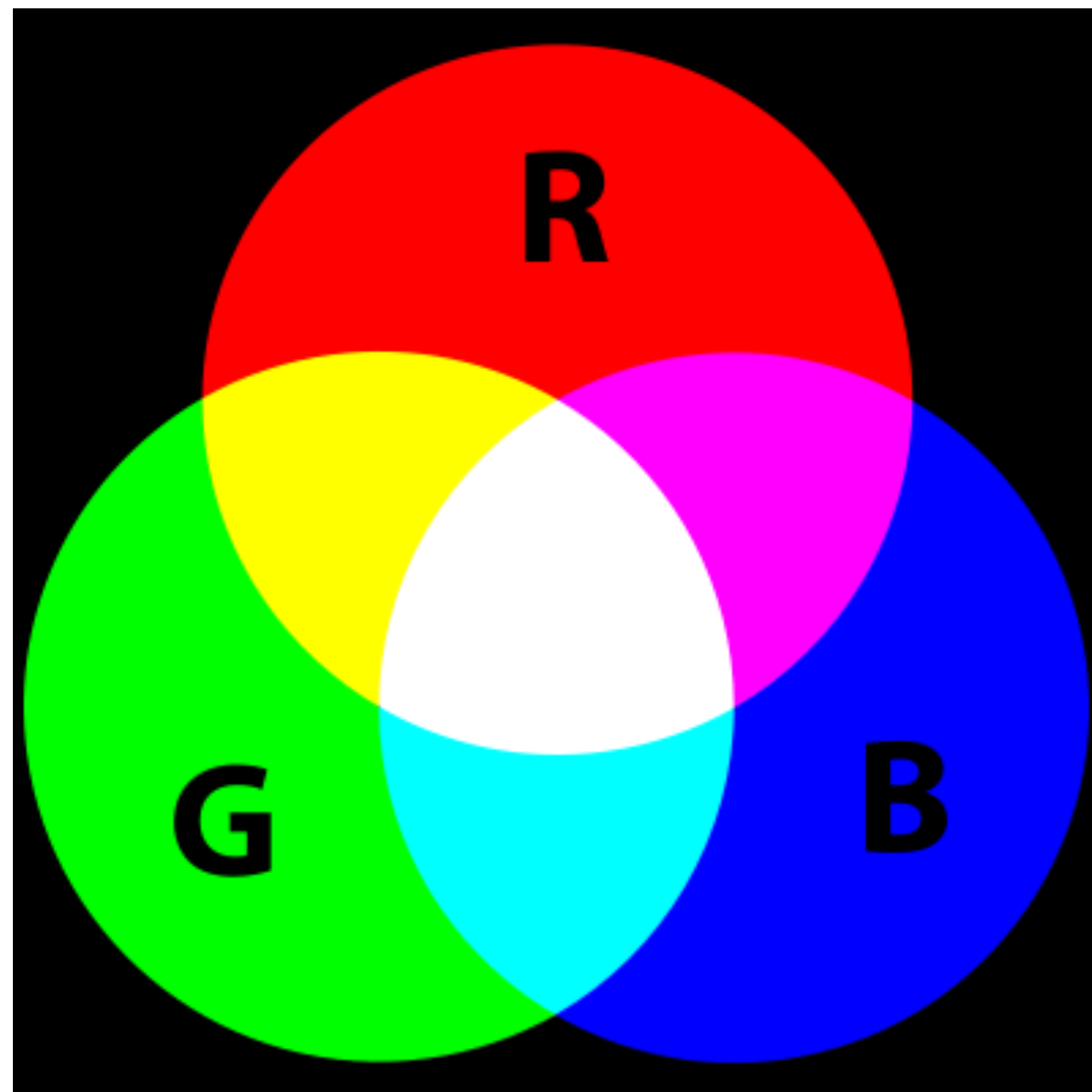
Erősítés:
($\sim 10^4$)

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

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

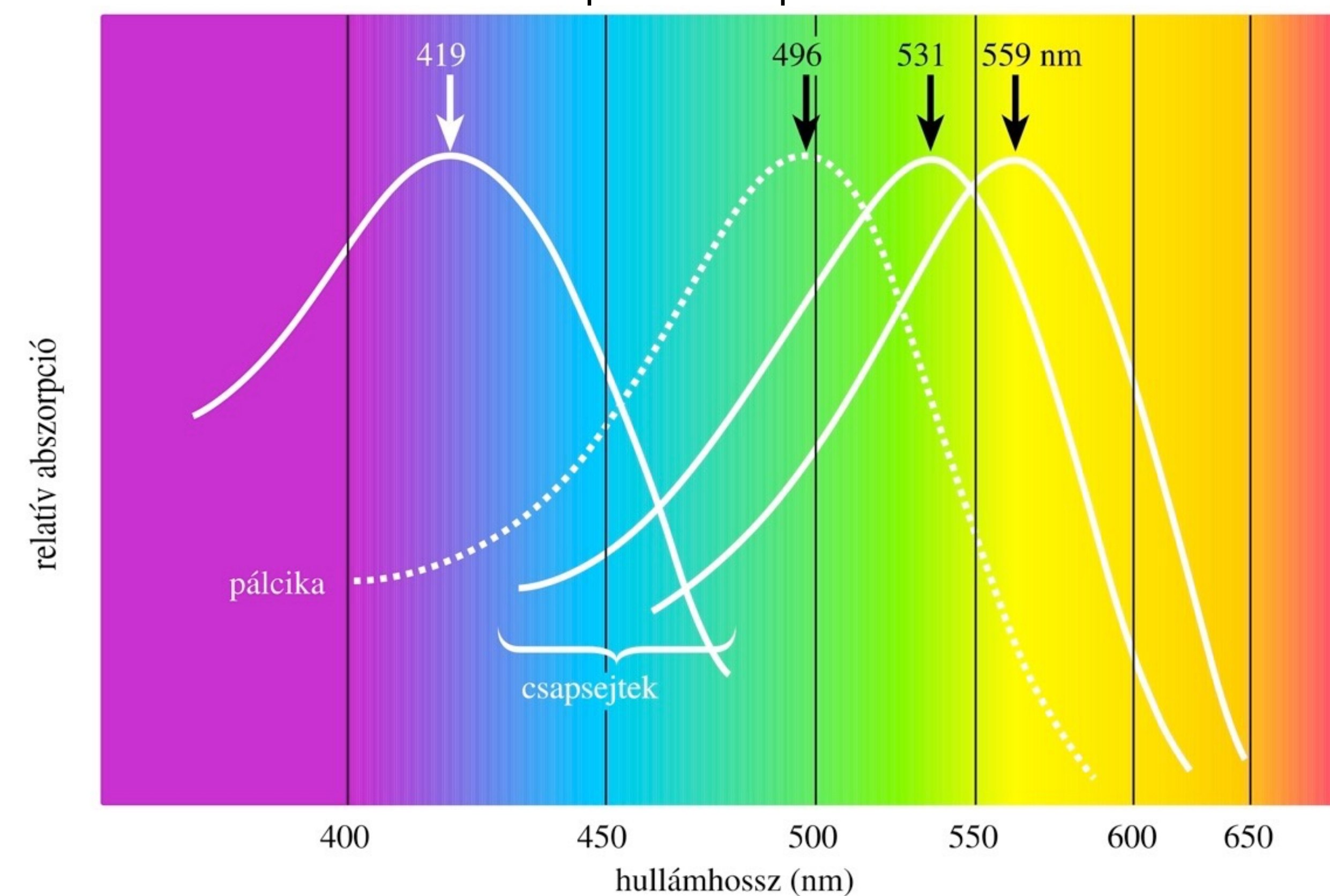
Bármely szín (X) kikeverhető a három alapszín (R =vörös, G =zöld, B =kék) megfelelő súlyozású (r , g , b) összekeverésével

$$X = rR + gG + bB$$

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

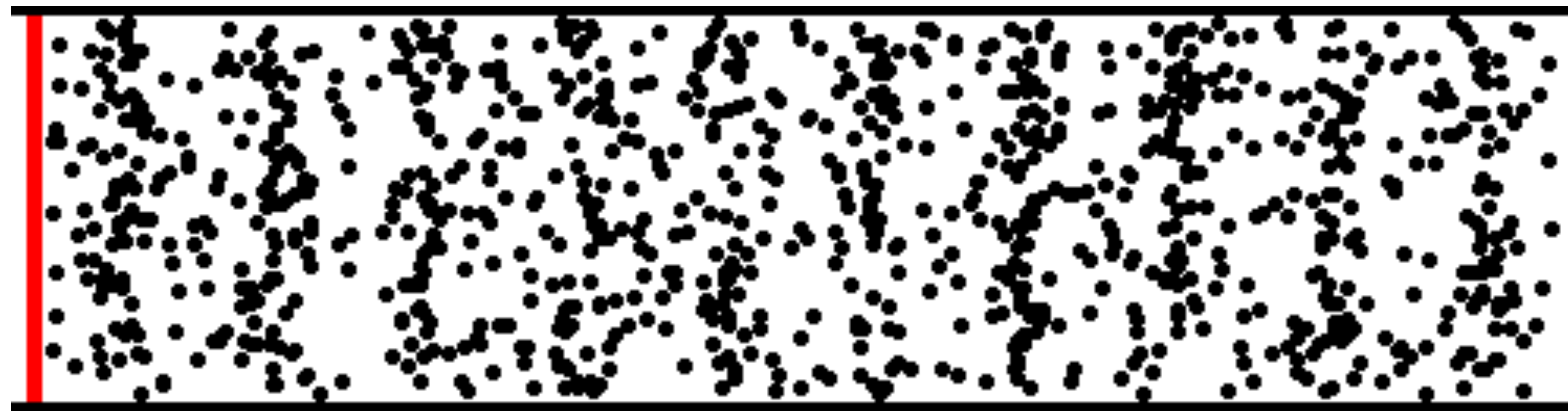
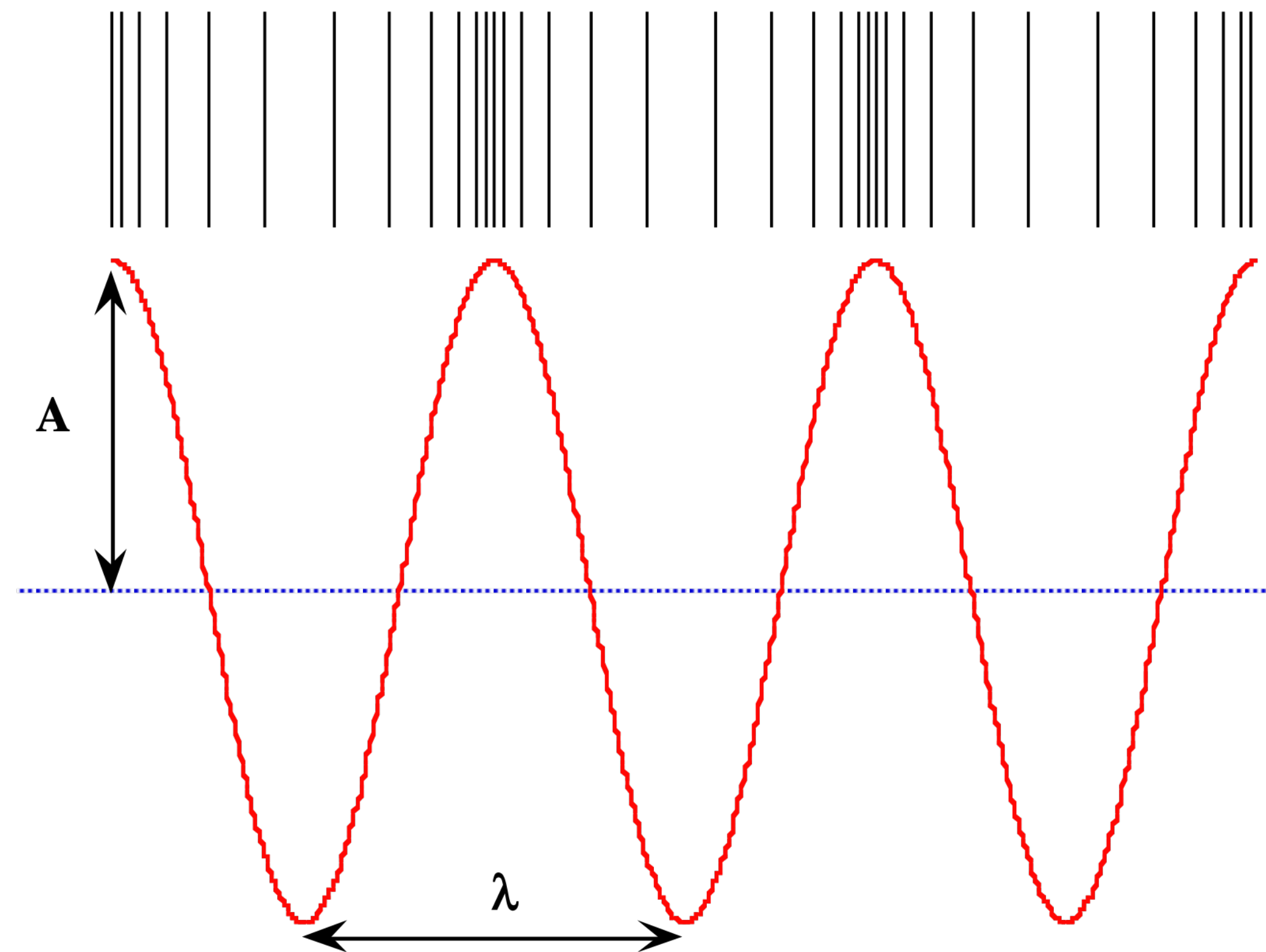


A HALLÁS BIOFIZIKÁJA

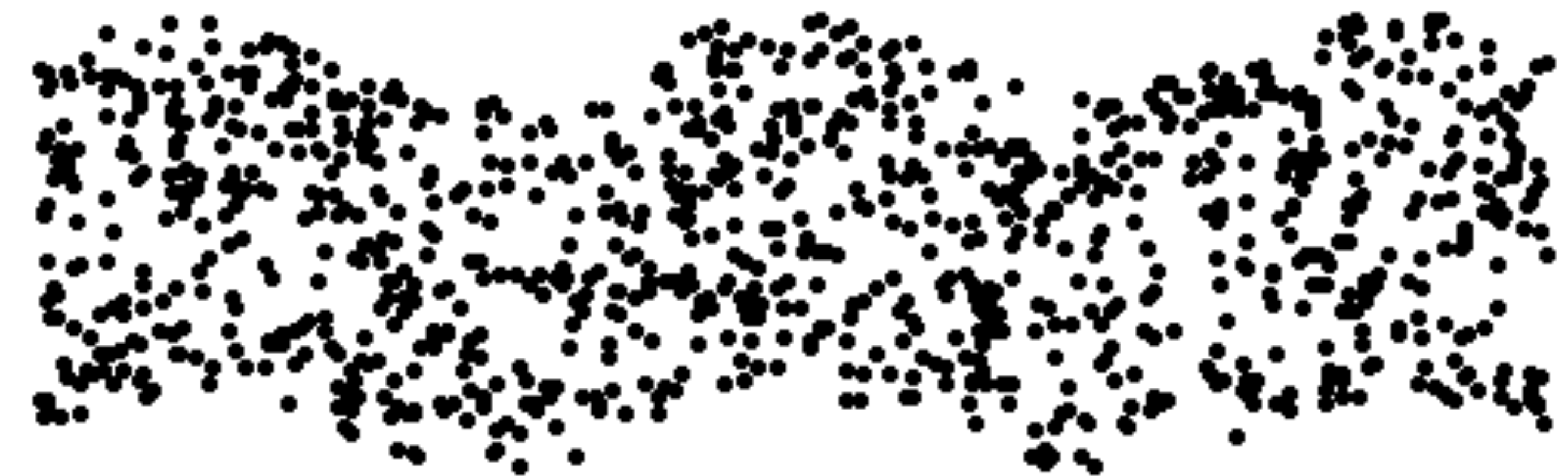
KELLERMAYER MIKLÓS

Hang

Longitudinális
mechanikai hullám
(nyomáshullám)



Longitudinális hullám

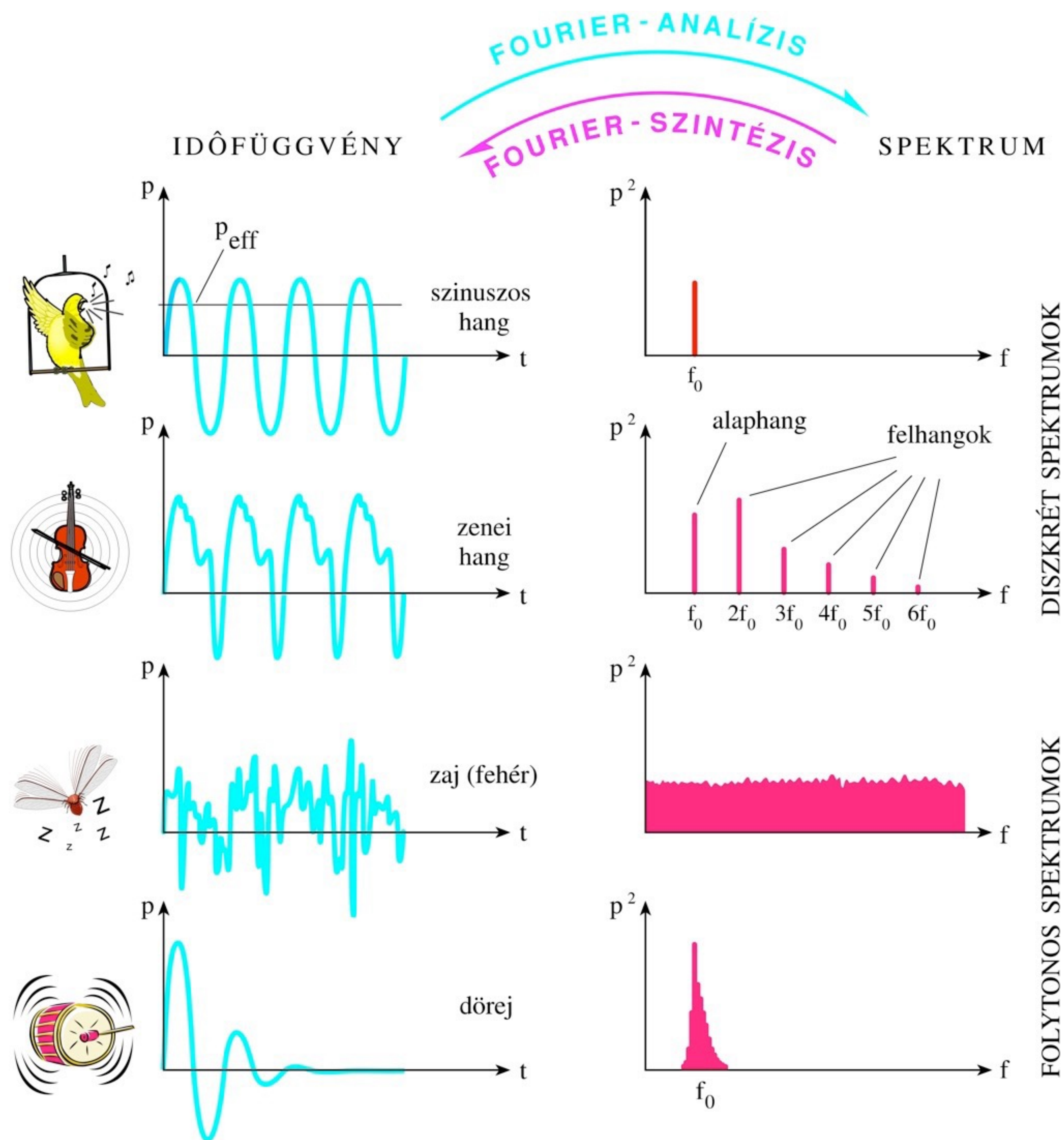


Tranzverzális hullám

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:

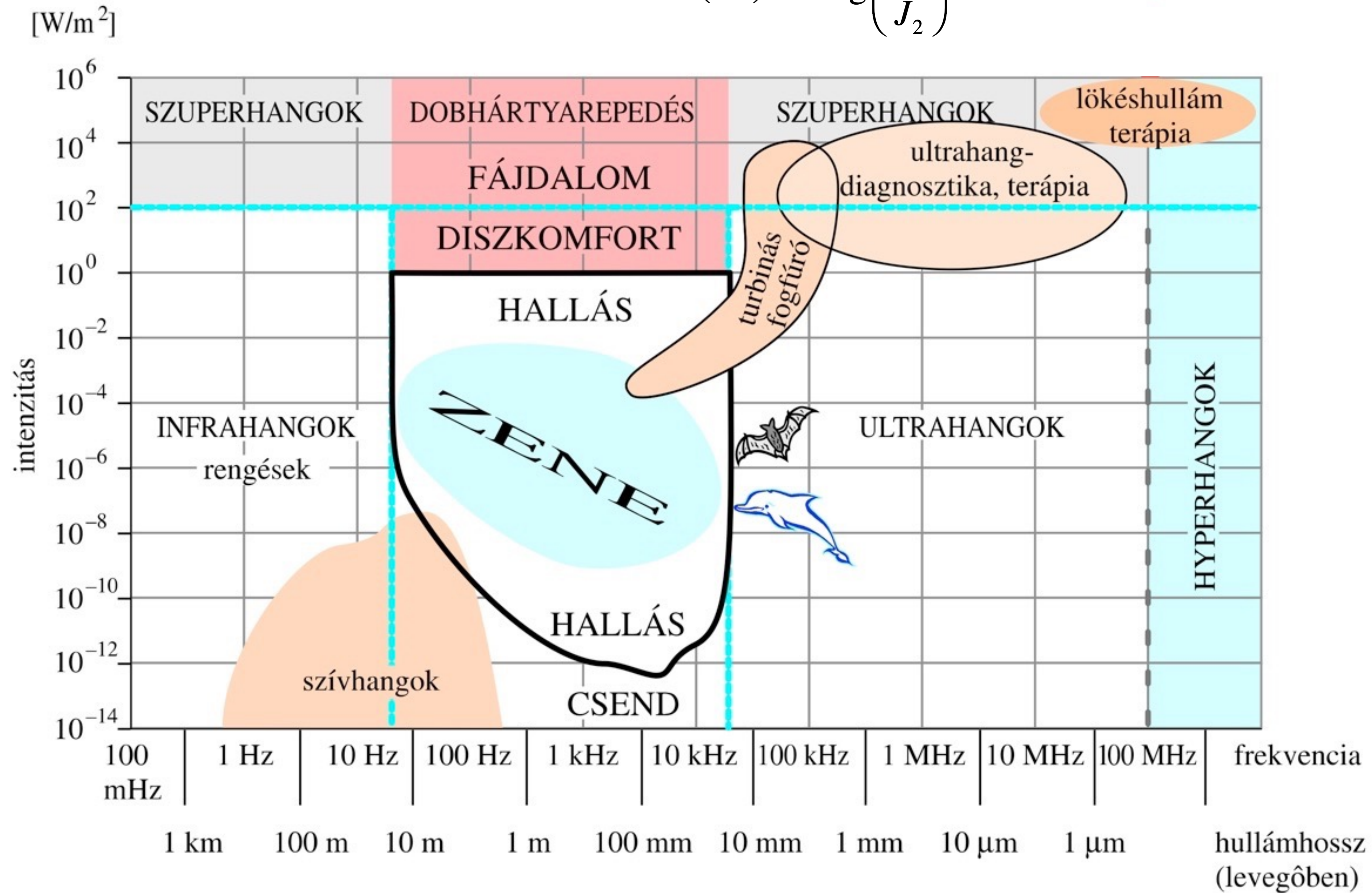


Oktáv - 2:1
arányú
frekvenciaköz

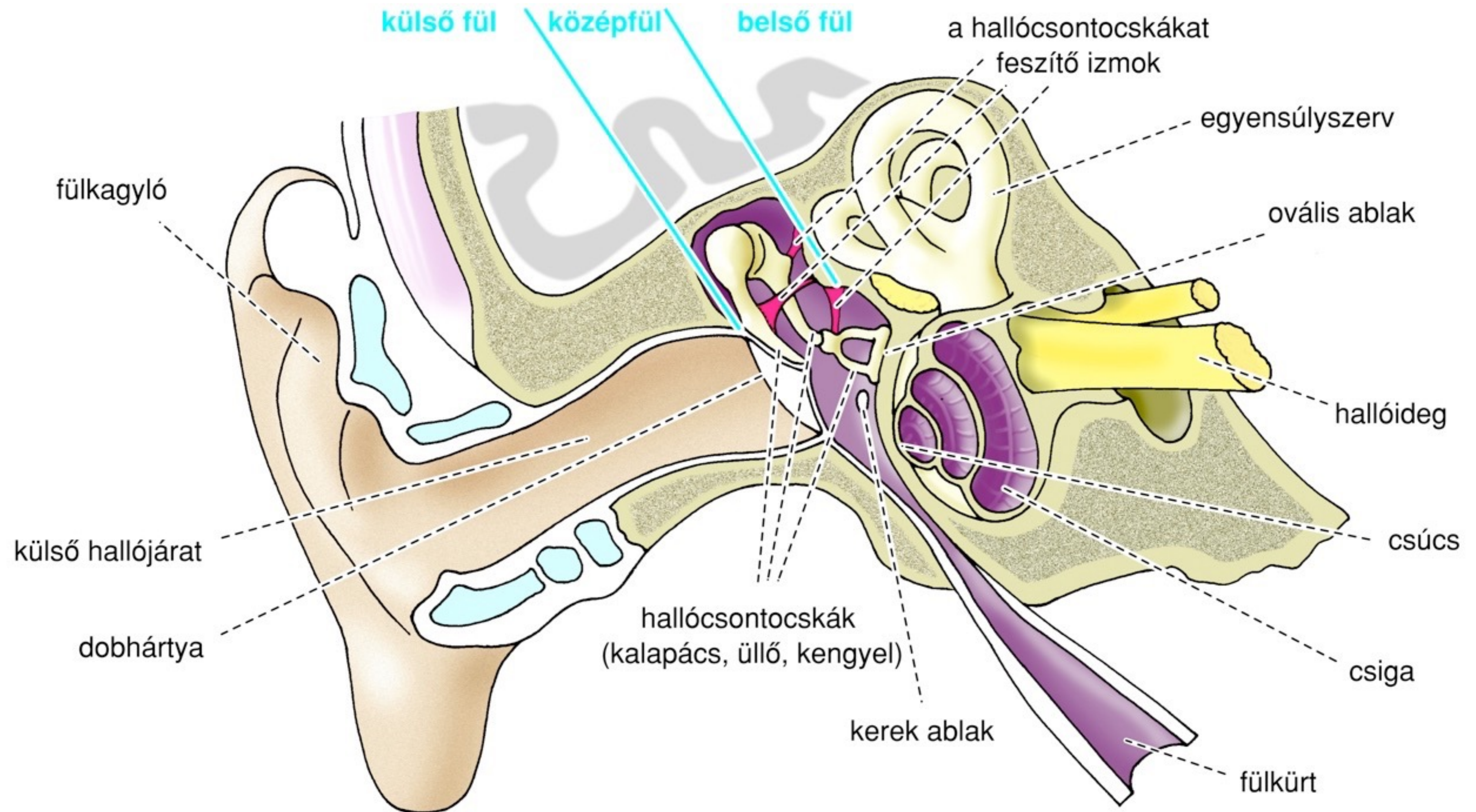
Hangintenzitás és frekvencia

Inger: hang - mechanikai hullám

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



“Receptor-szerv”: fül



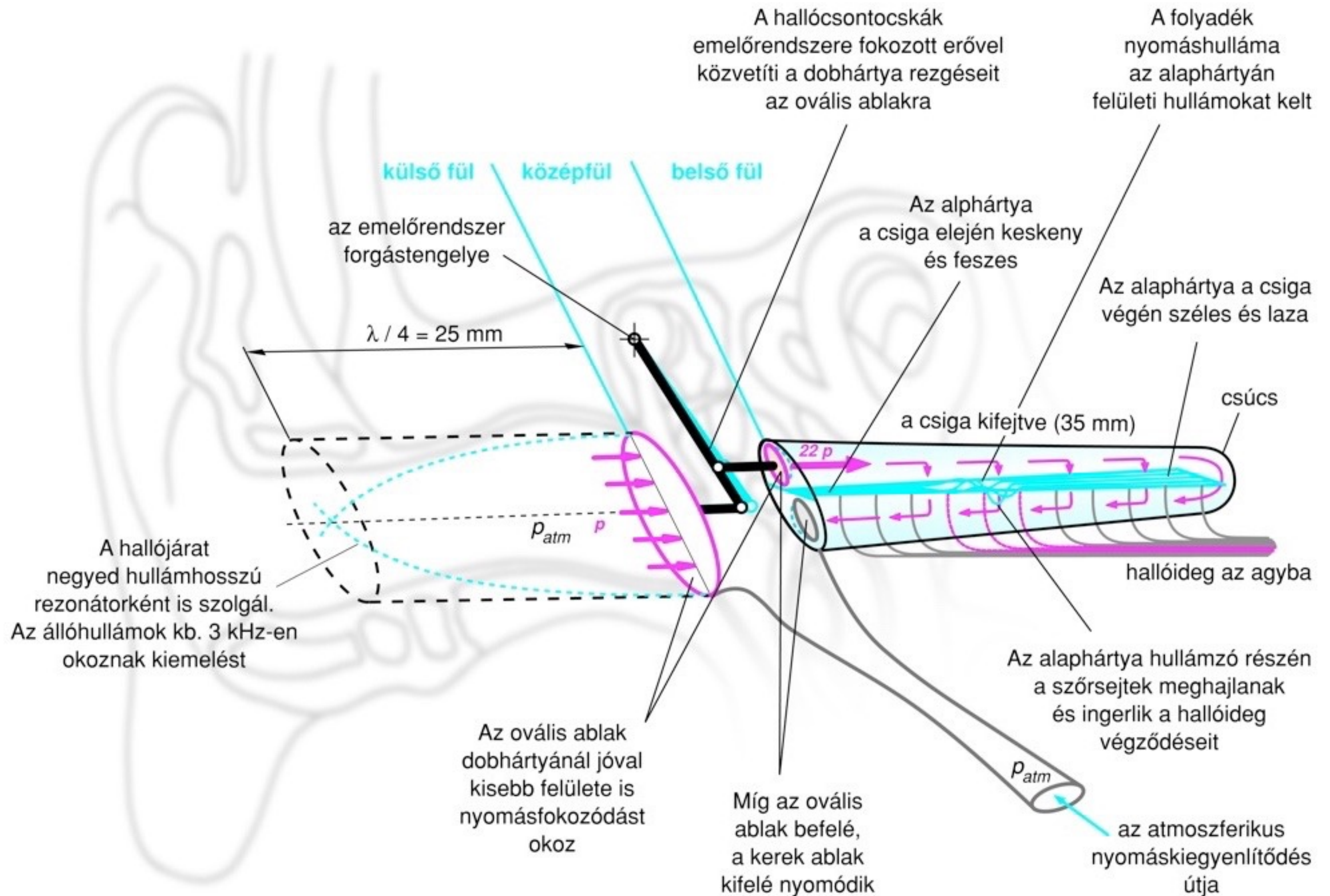
A fül fizikai vázlata

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 jeltovábbító és erősítő

Hallócsontocskák

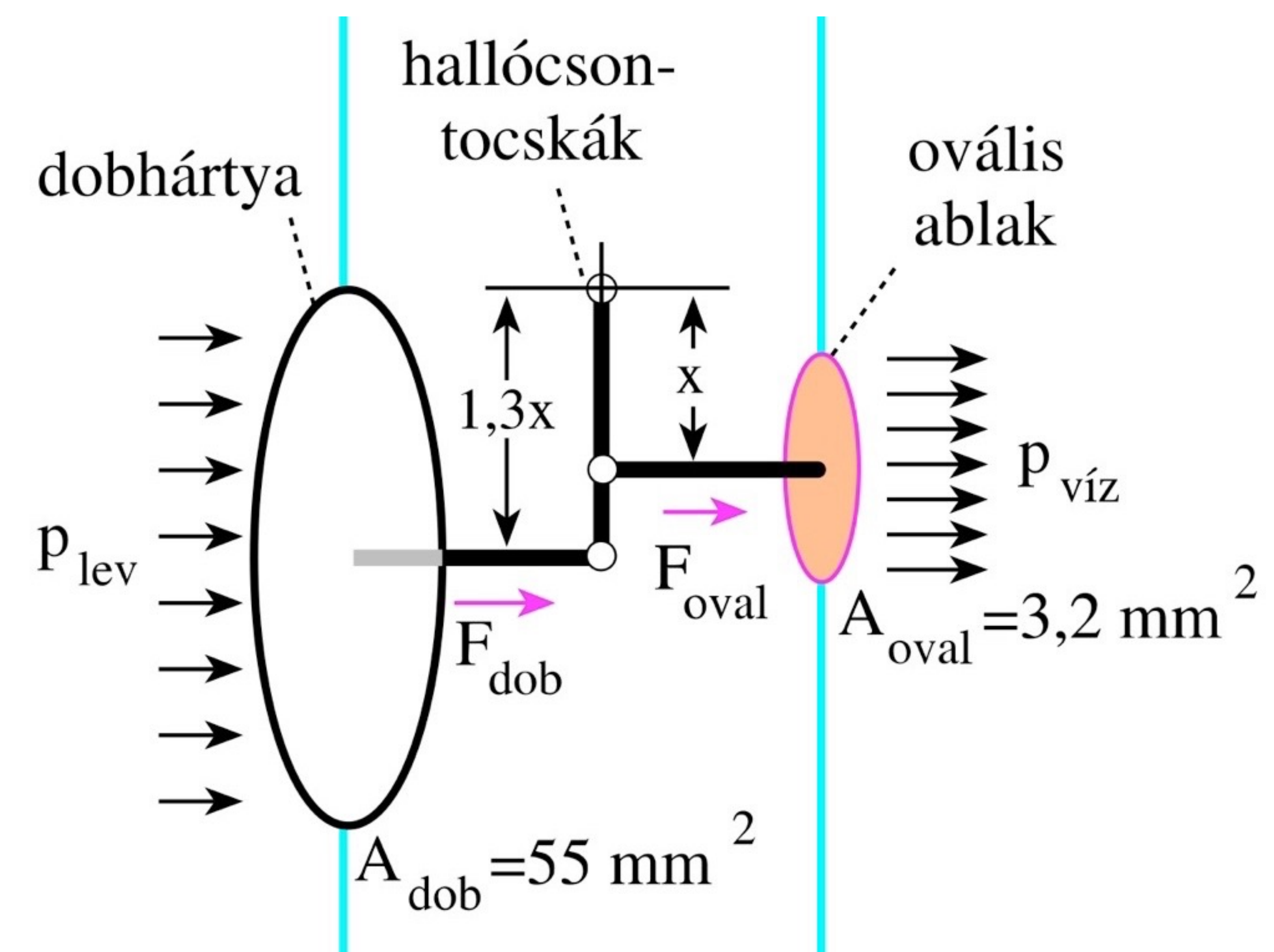
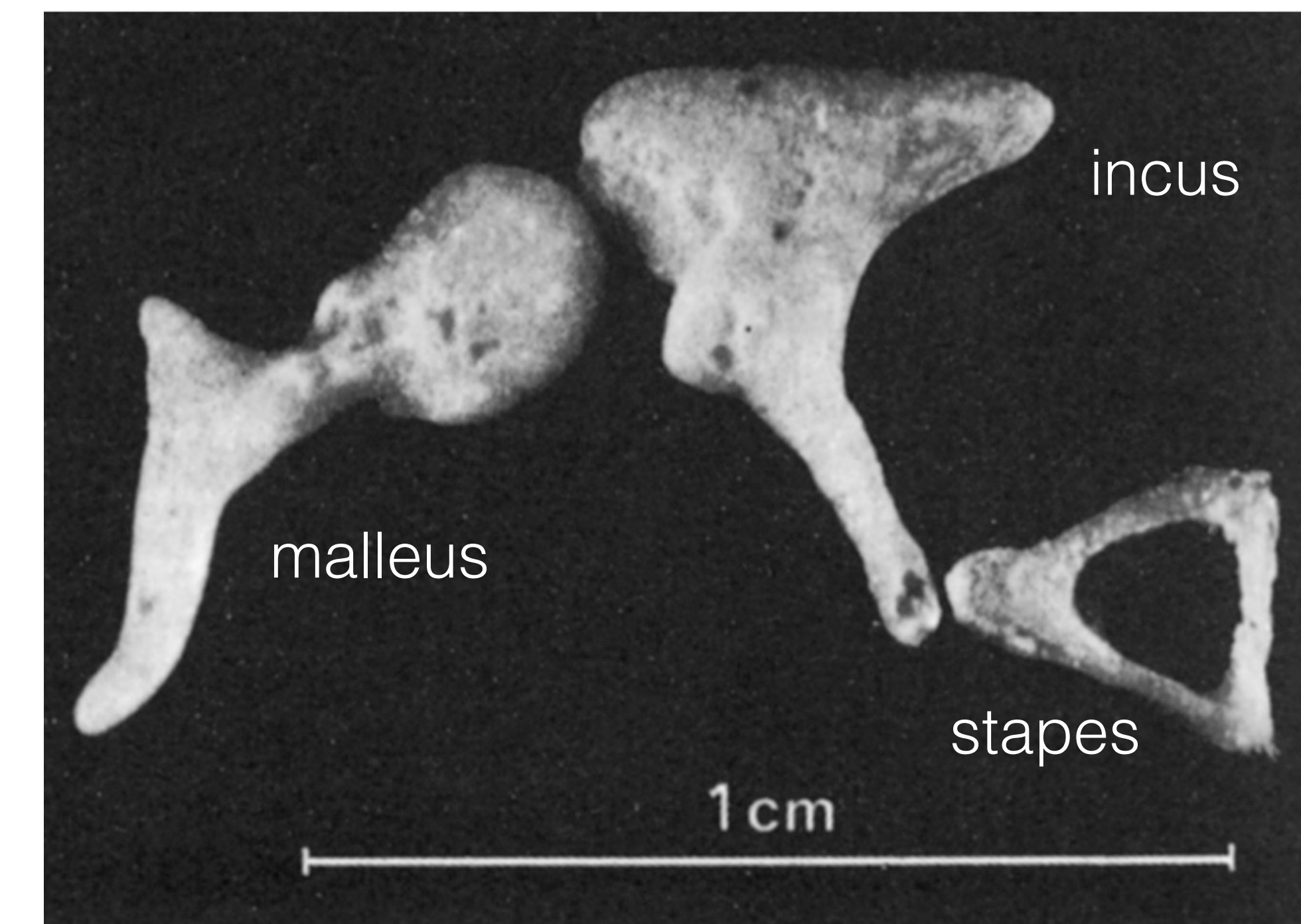
(kalapács, üllő, kengyel)

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: $17 \times$
emelőszerű működés: $1,3 \times$

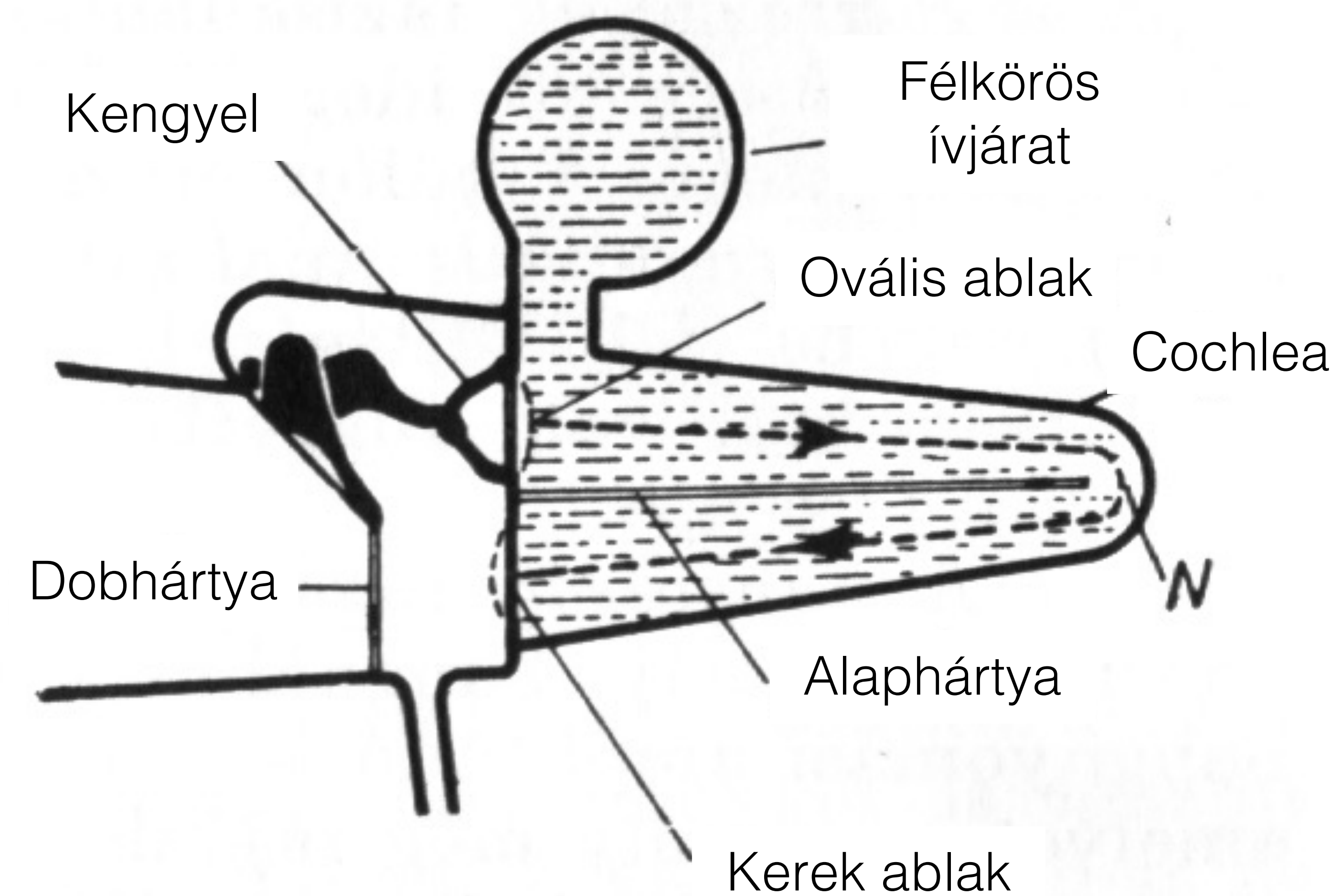
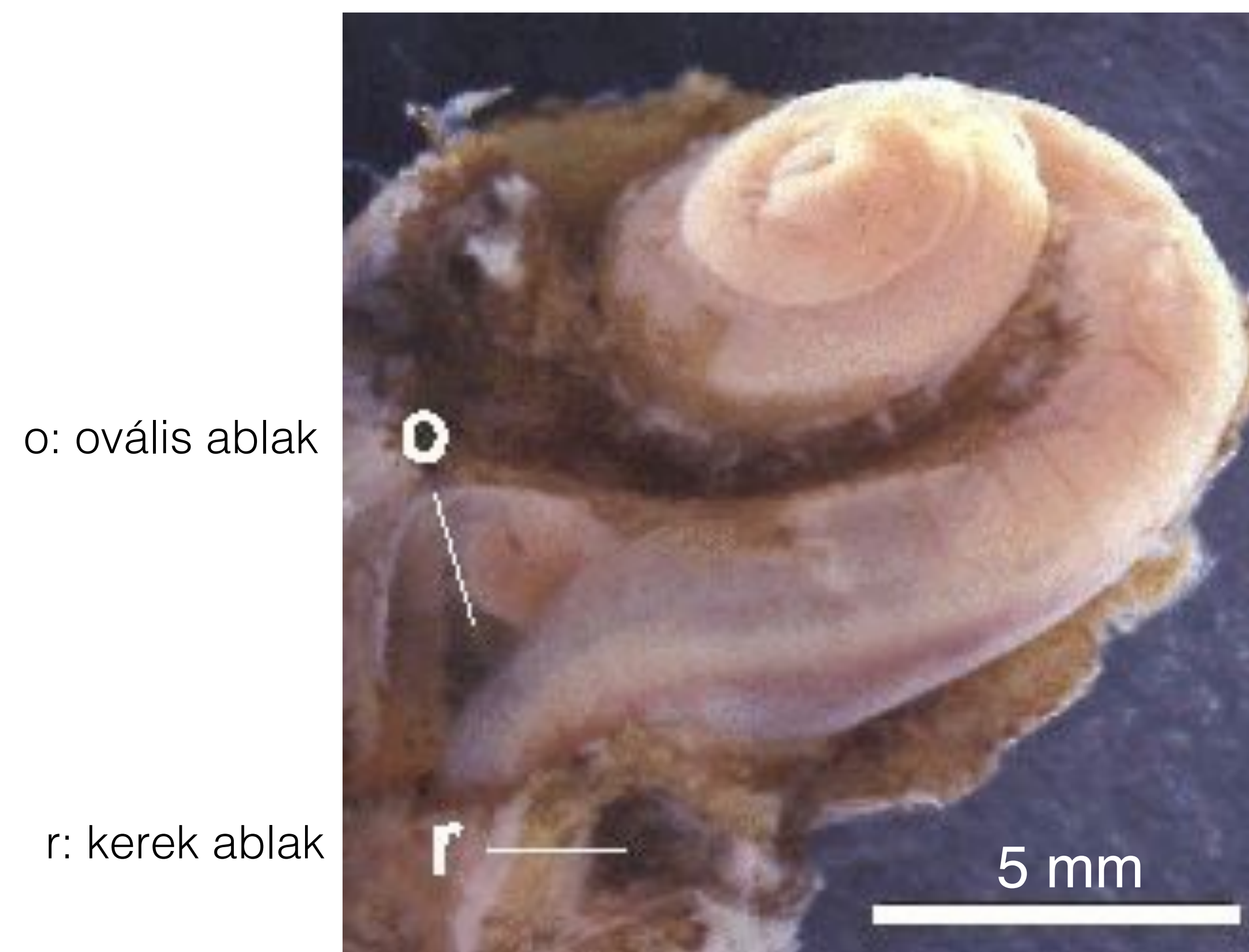
Összesen kb. $22 \times$ nyomásnövekedés



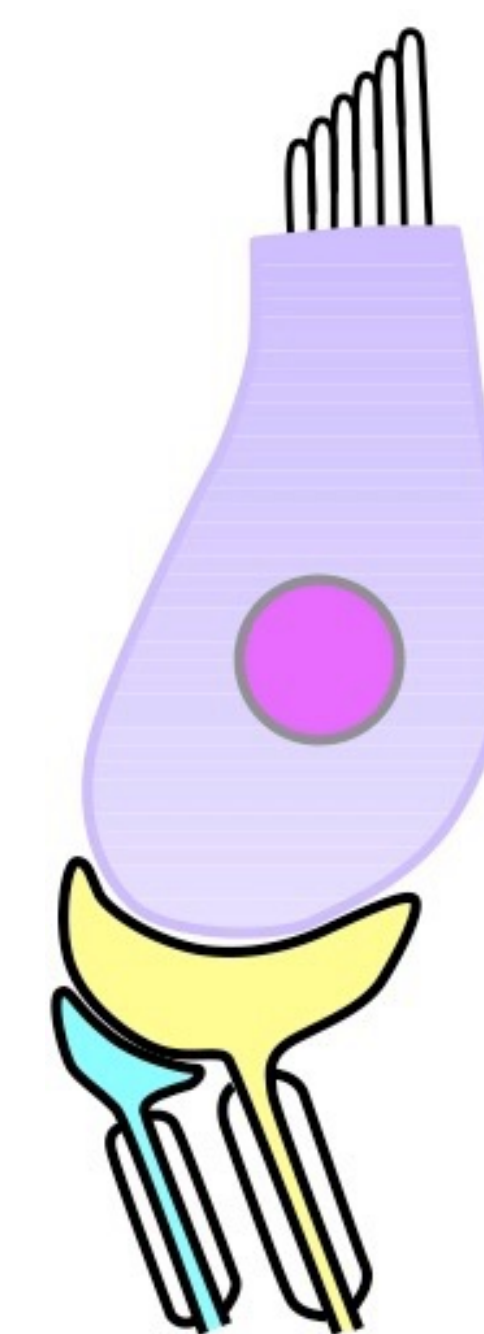
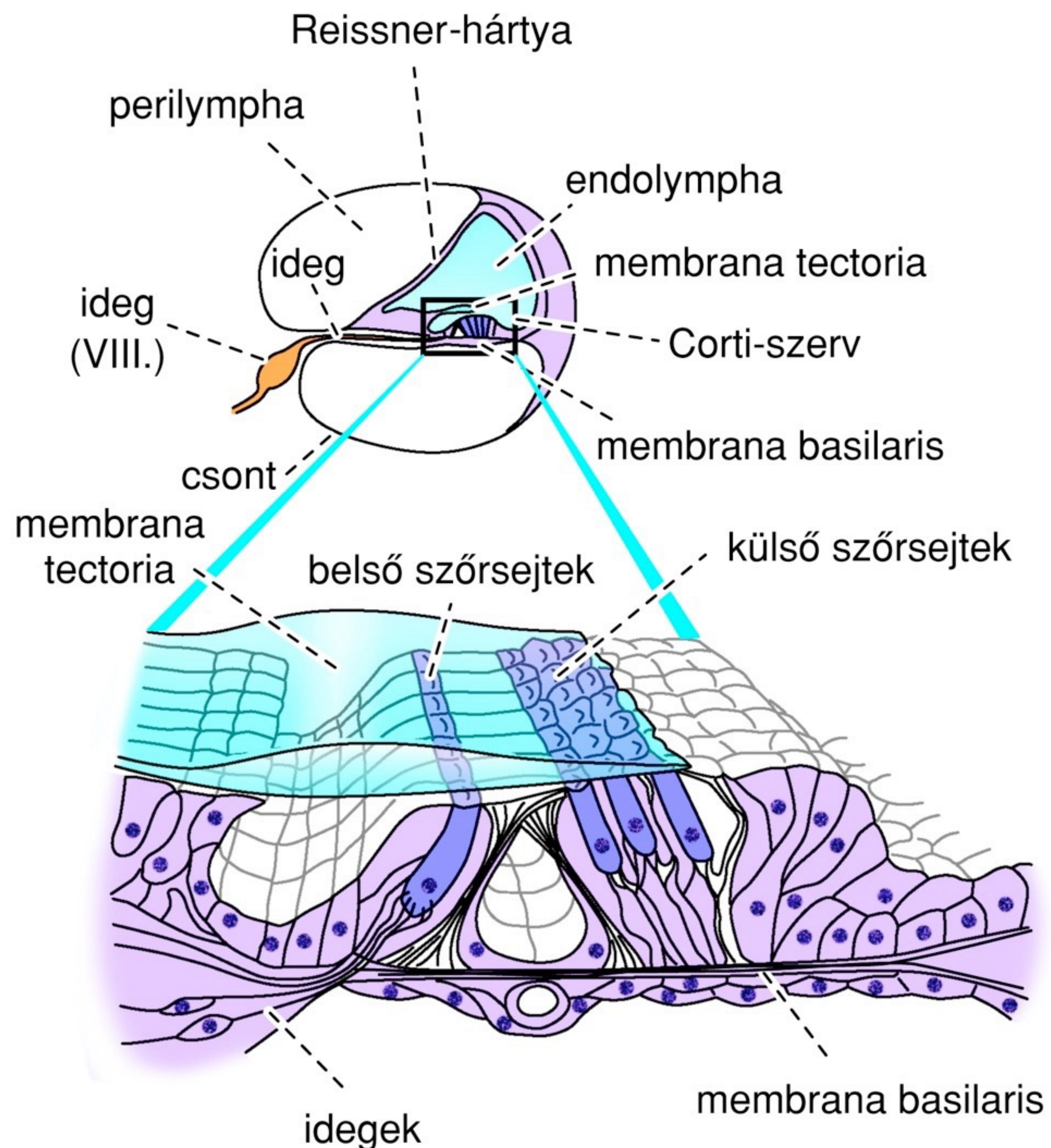
A belső fül: szenzor

Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

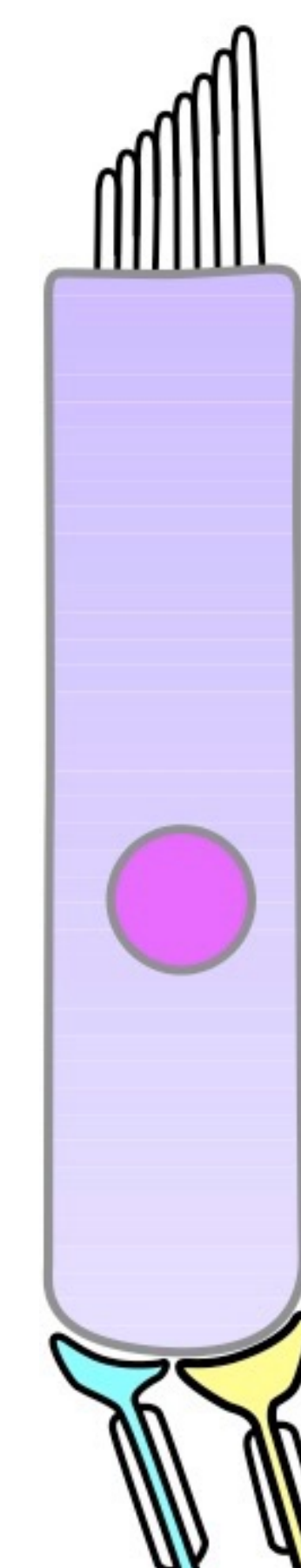
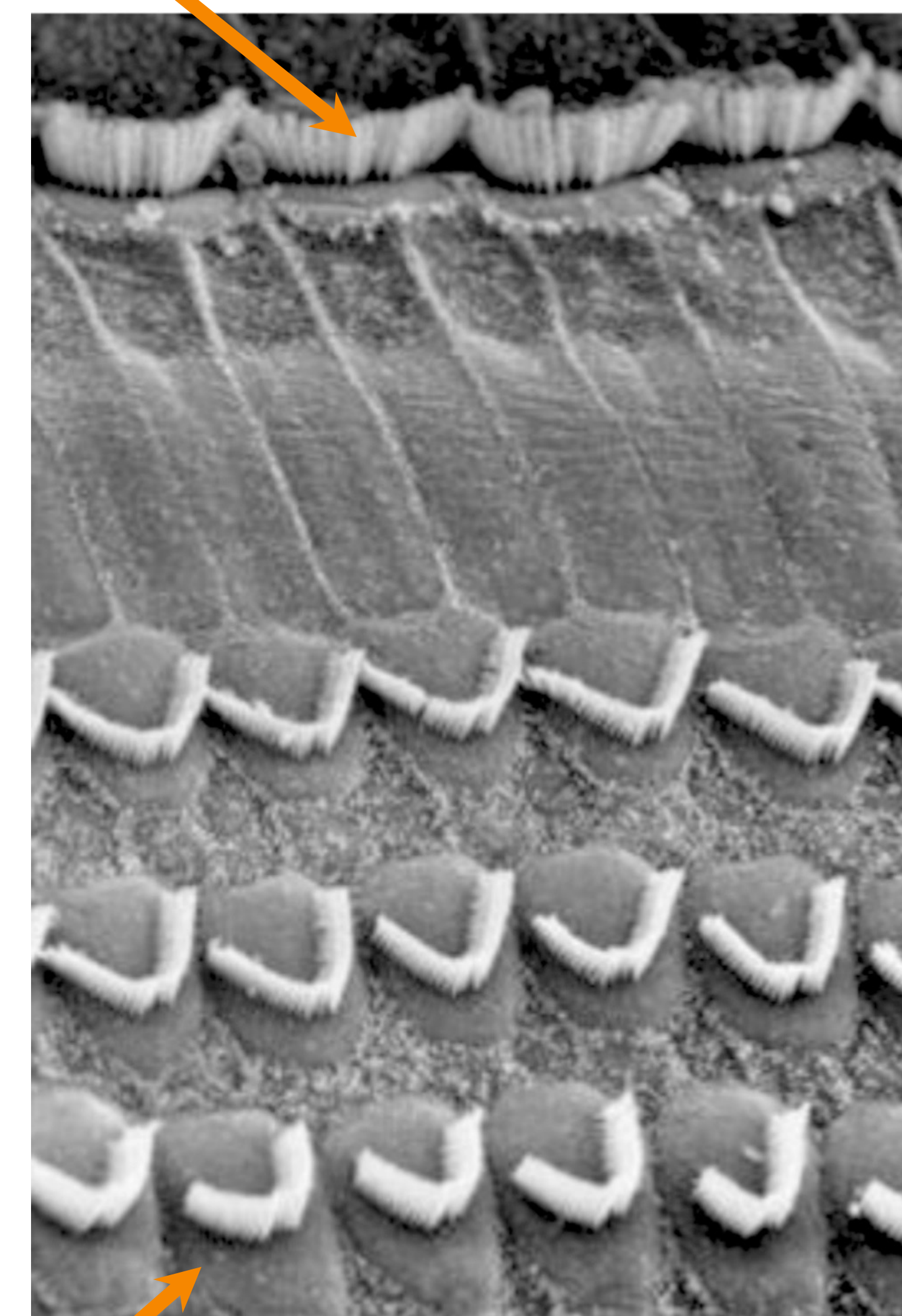
Csiga (cochlea): 2,5 menetű, 35 mm hosszú folyadékkal teli csatorna. Hosszában a részben csontos, részben hártyaszerű fal, az alaphártya (membrana basilaris) osztja ketté. A hang érzékelését végzi.



A belső fül finomszerkezete

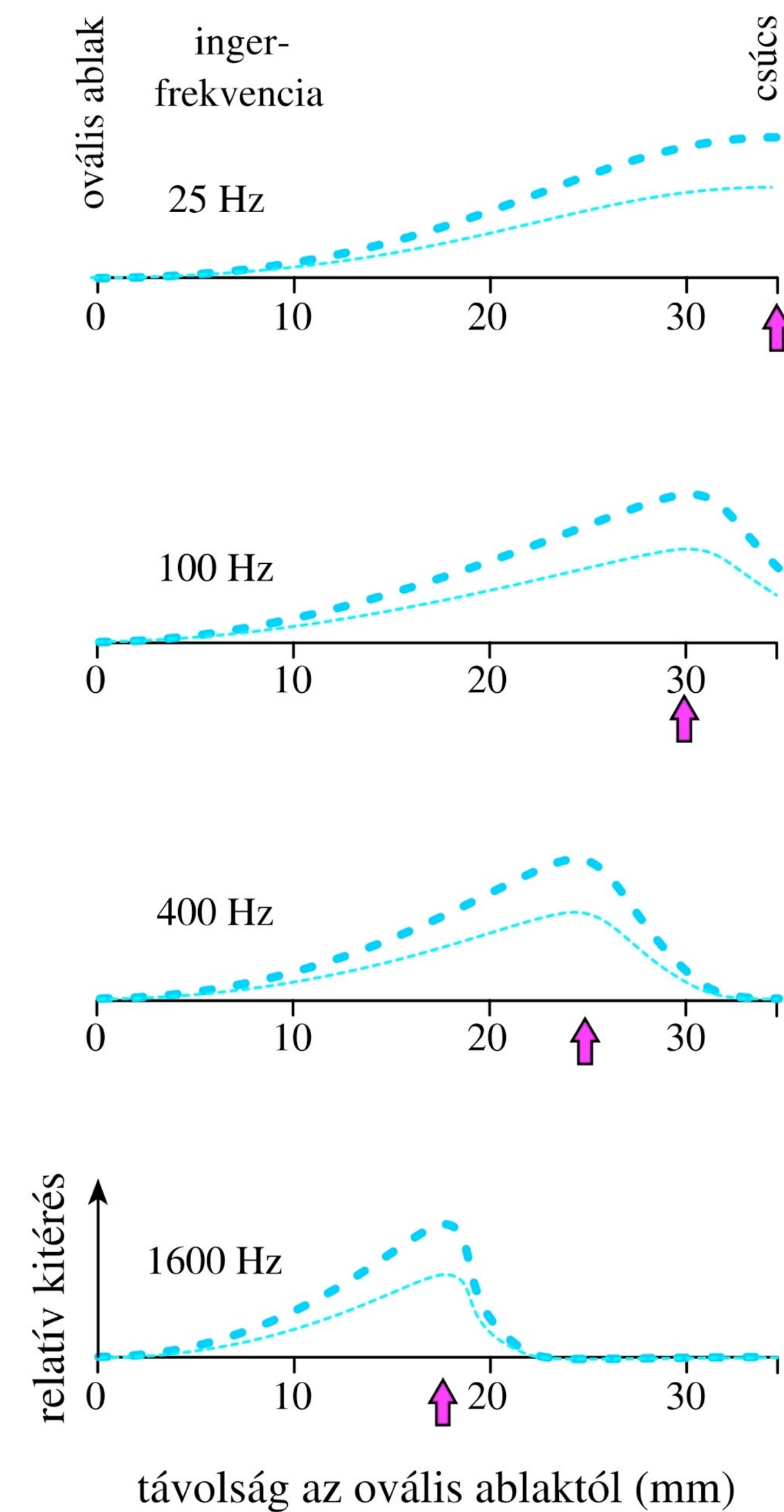
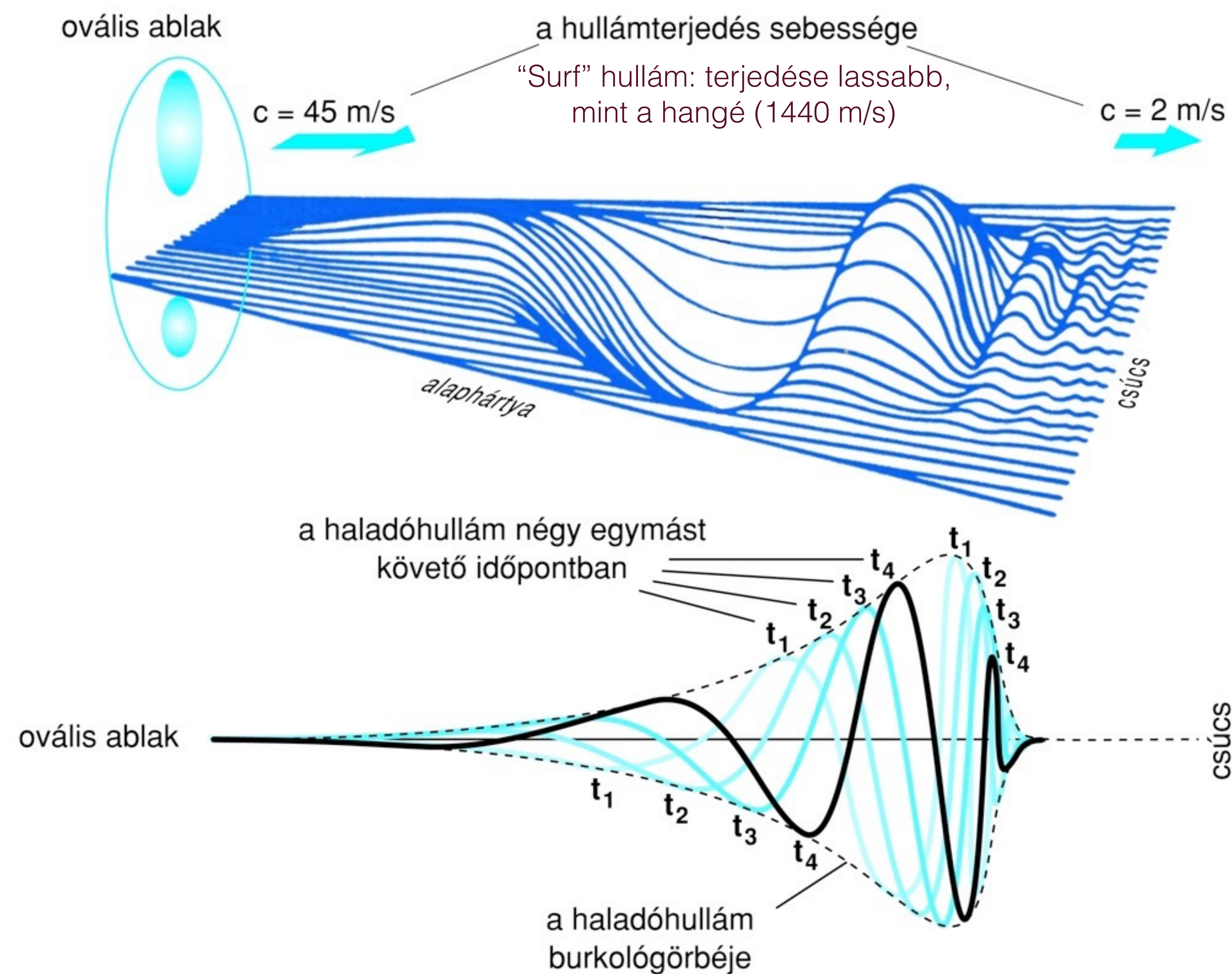


Belső szőrsejtek
(kb. 3500)



Külső szőrsejtek
(kb. 12-20000)

Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán

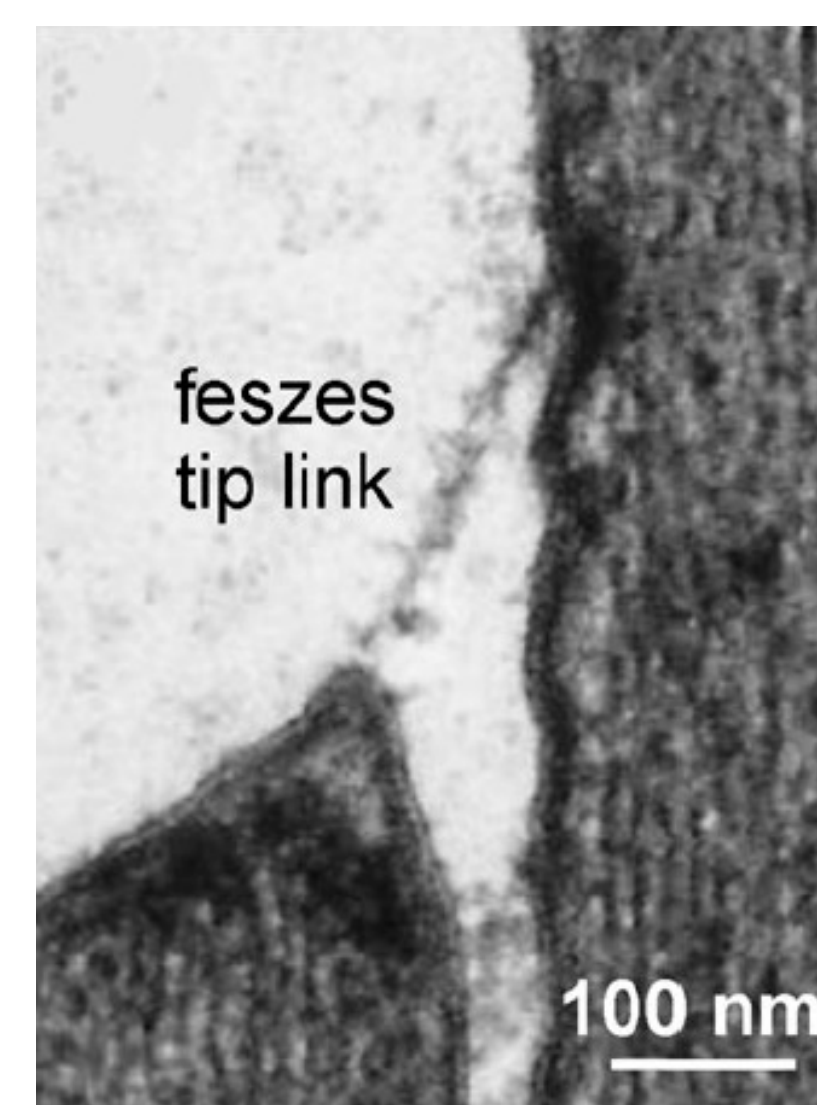
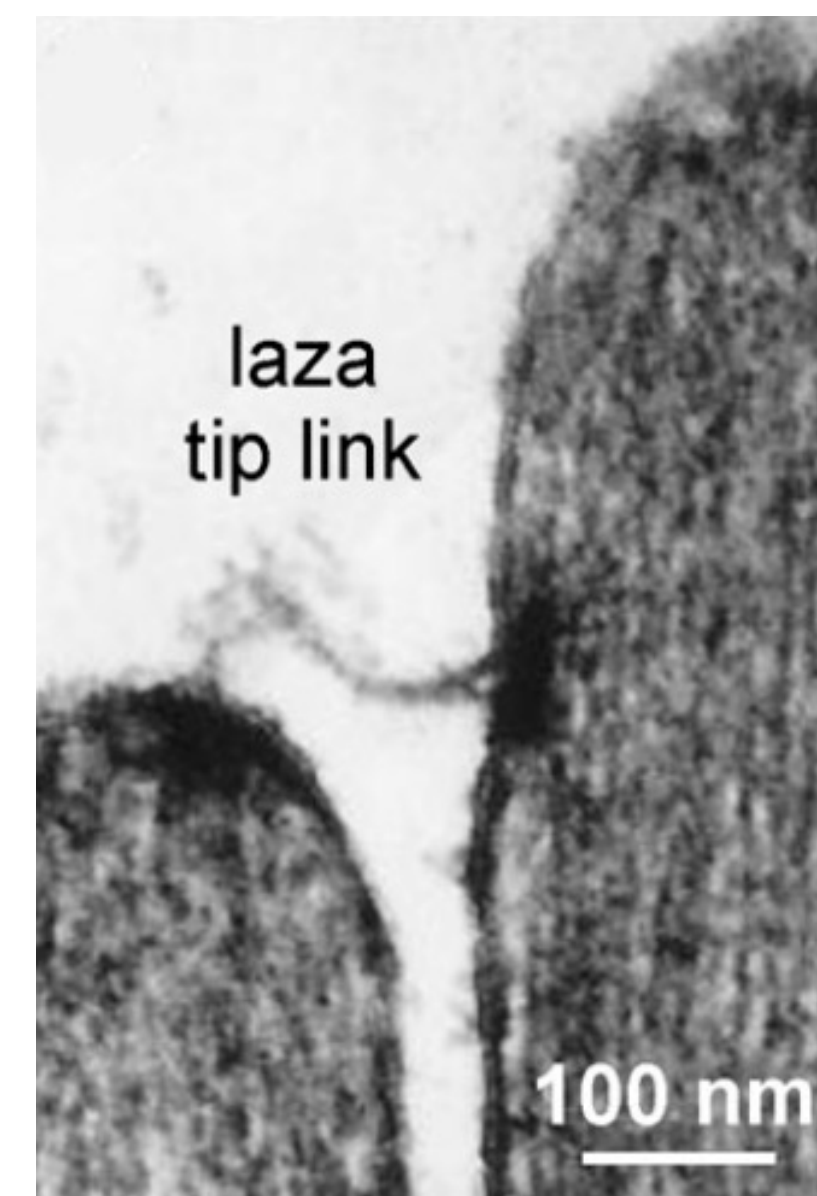
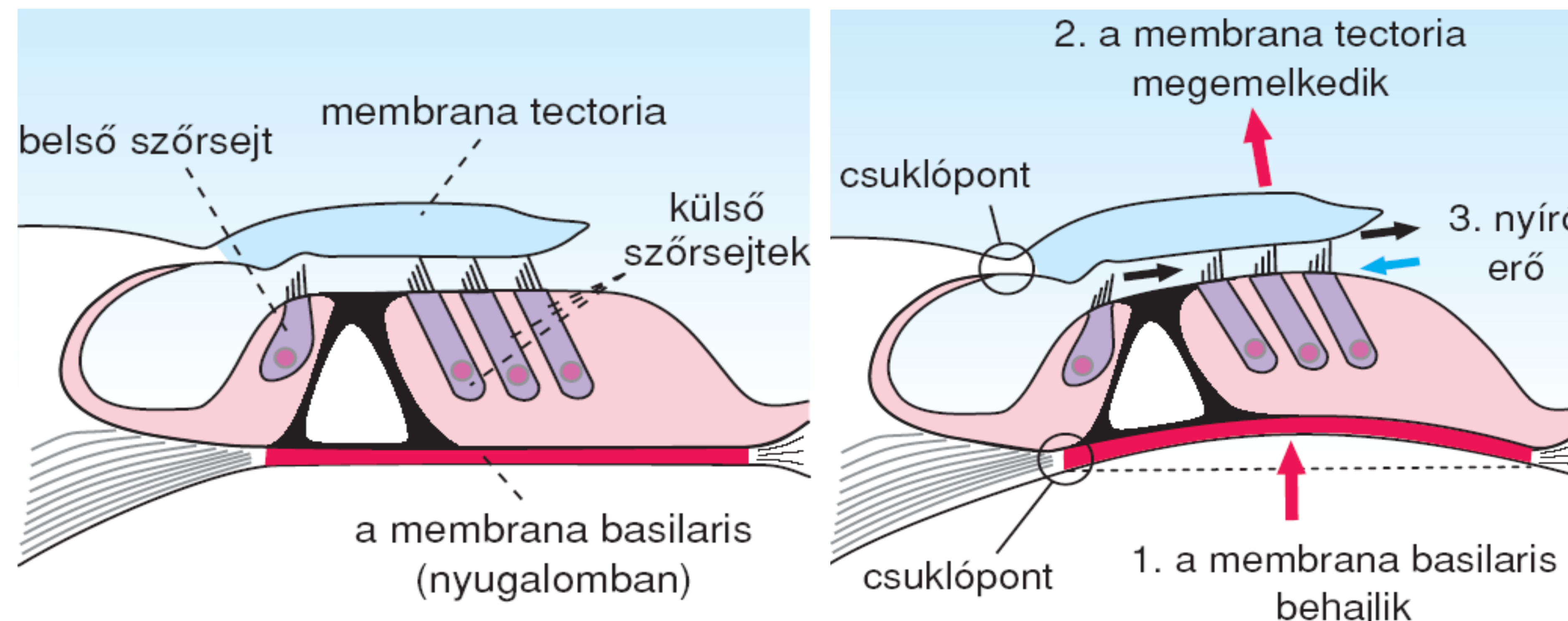


Békésy György
Nobel-díj 1961

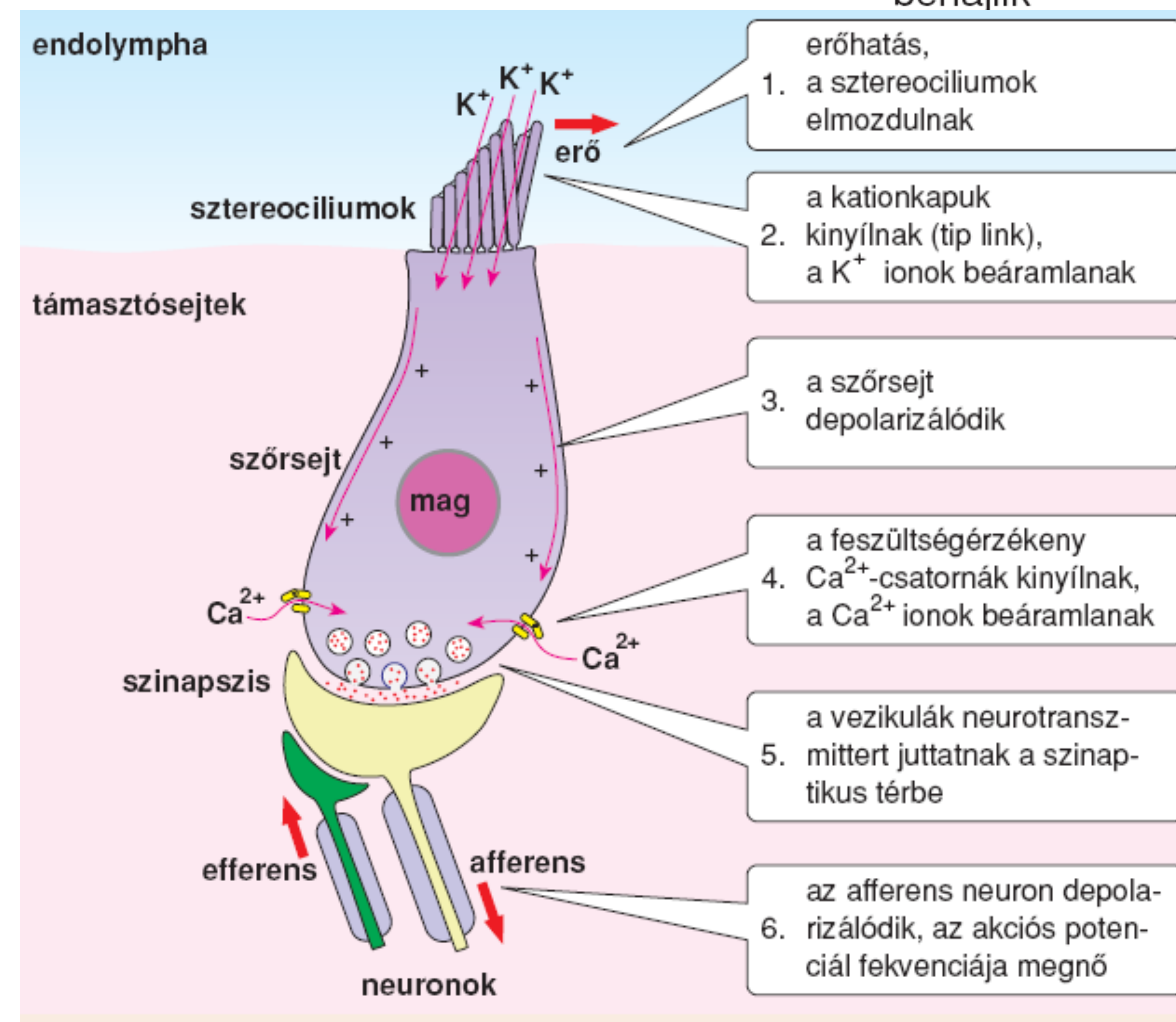
A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

A Corti-féle szerv működése

A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt megdőlnek és depolarizálódnak.



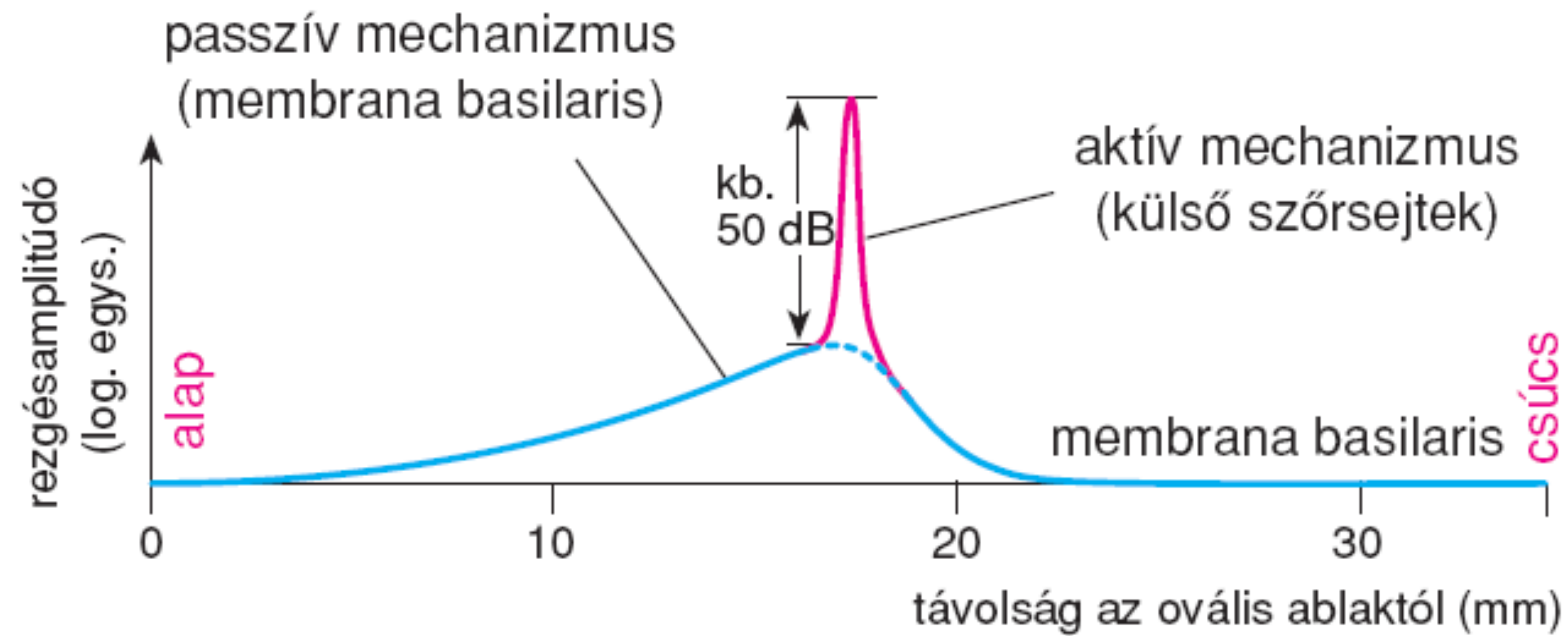
Belső szőrsejtek:
Mechanoelektromos
transzdukció



Külső szőrsejtek: erősítők

Passzív detektálás
(Probléma, hogy túl nagy a csillapítás)

Aktív detektálás
(Energia bepumpálása a detektálás frekvenciáján)

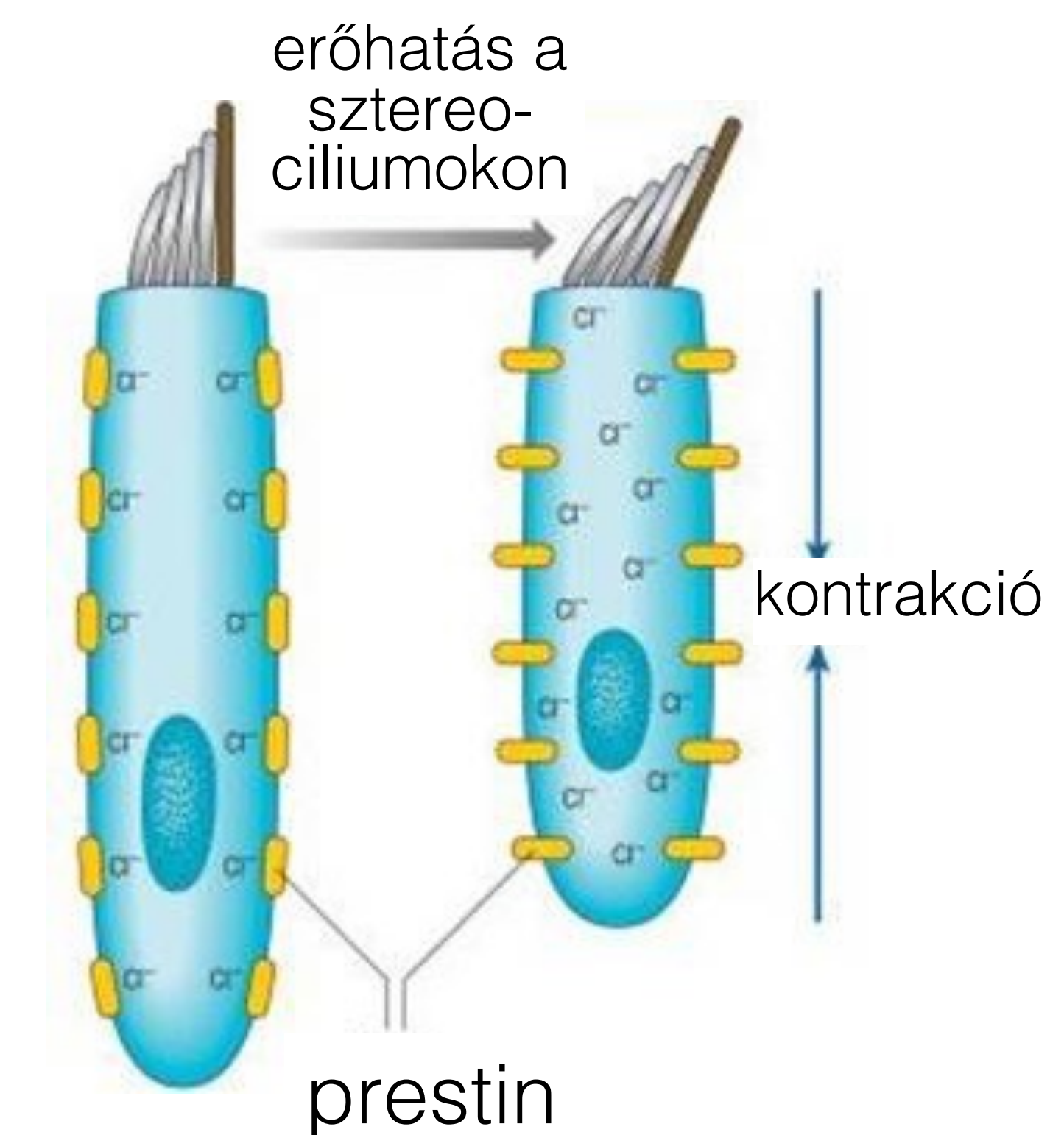


Aktív detektálásra utaló megfigyelések:

- 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).

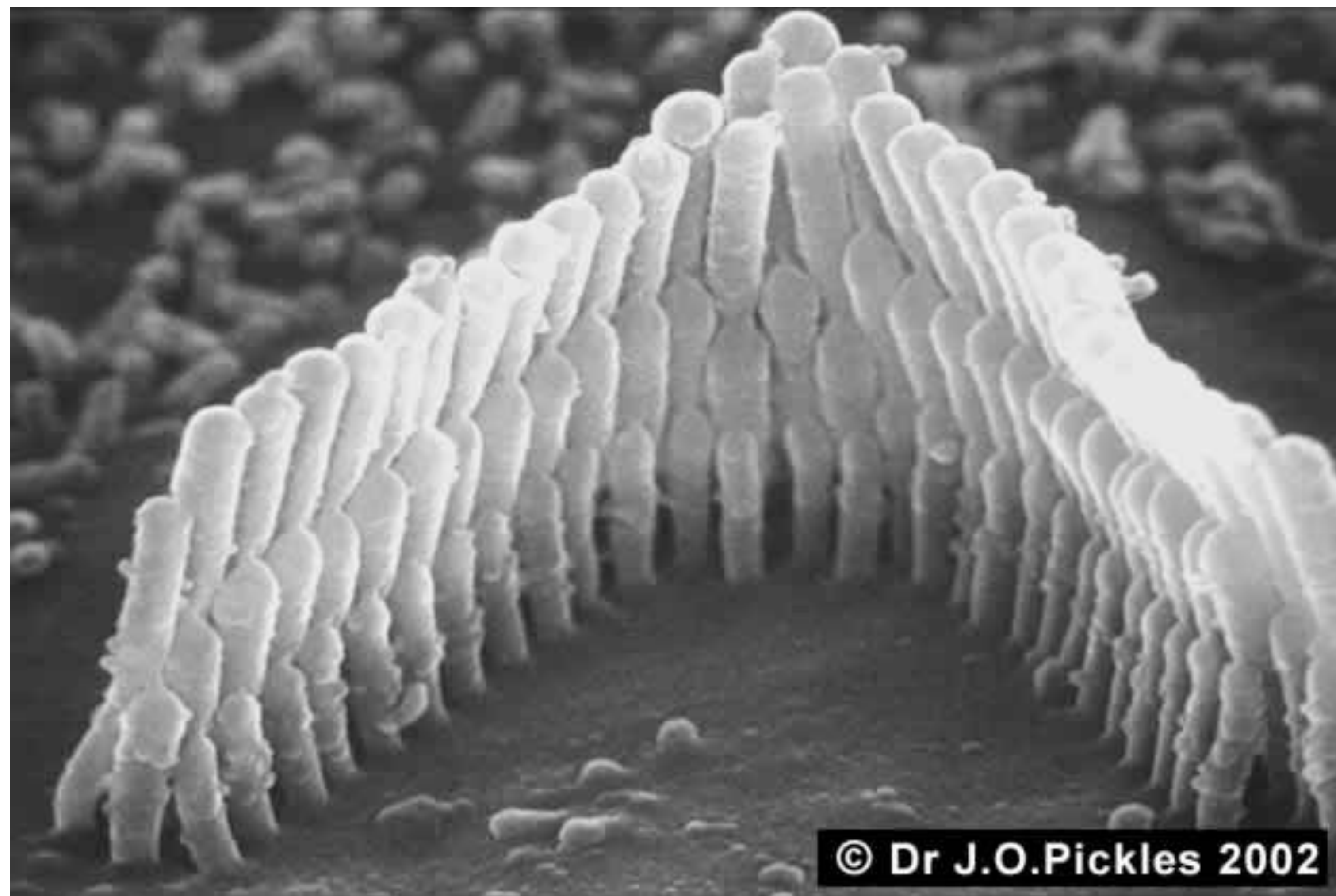
Regeneratív erősítő: pozitív visszacsatolási mechanizmus (szűk frekvencia tartományban nagy erősítés, de csak a disszipálódott energiát pótolja; egyébként fülcsengés jönne létre)

Erősítés:
hang-indukált
kontrakció a
külső
szőrsejtben

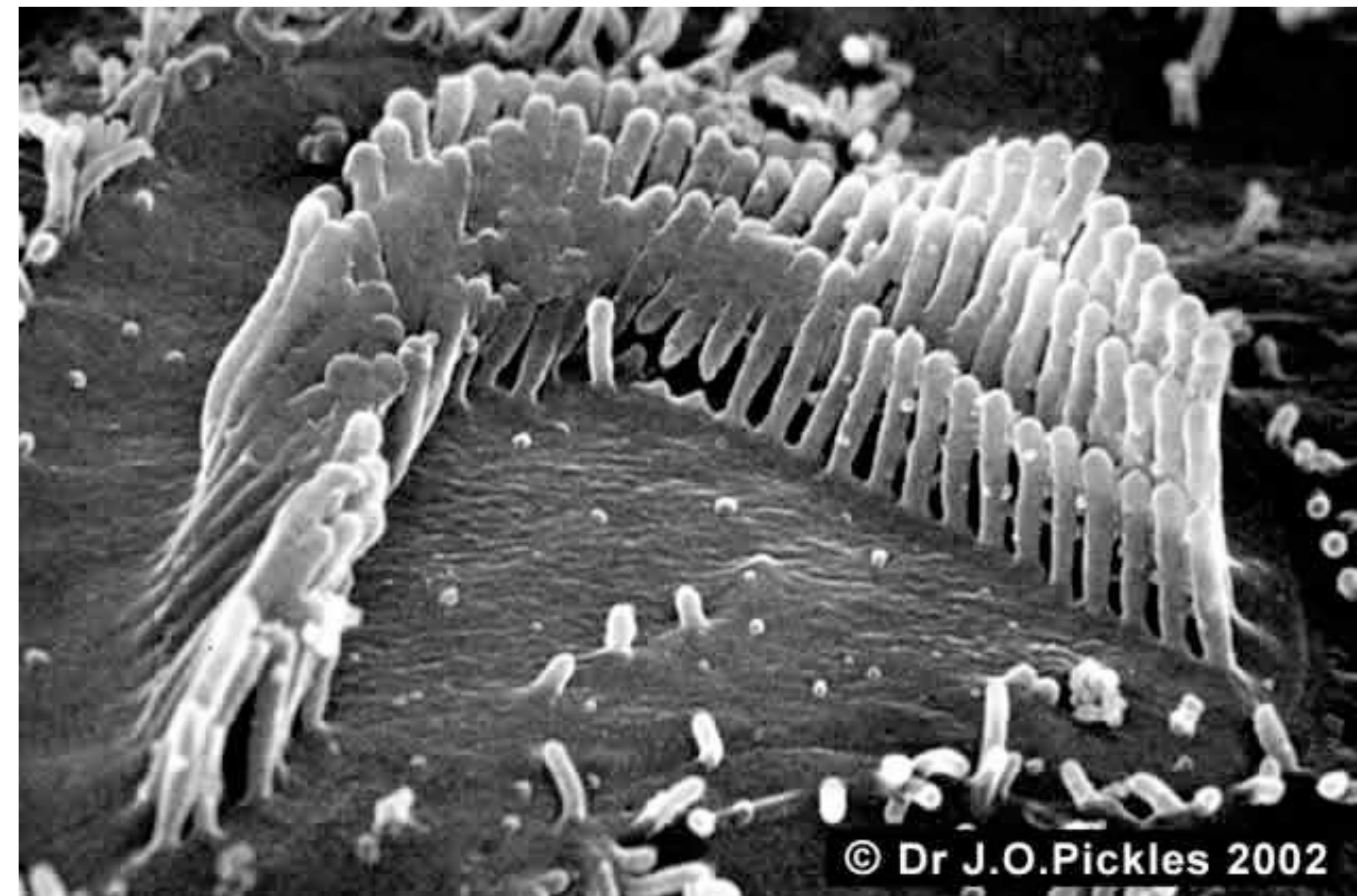


Prestin: transzmembrán motorfehérje mechano-elektromos és elektromechanikus jelátalakítás

Halláskárosodás

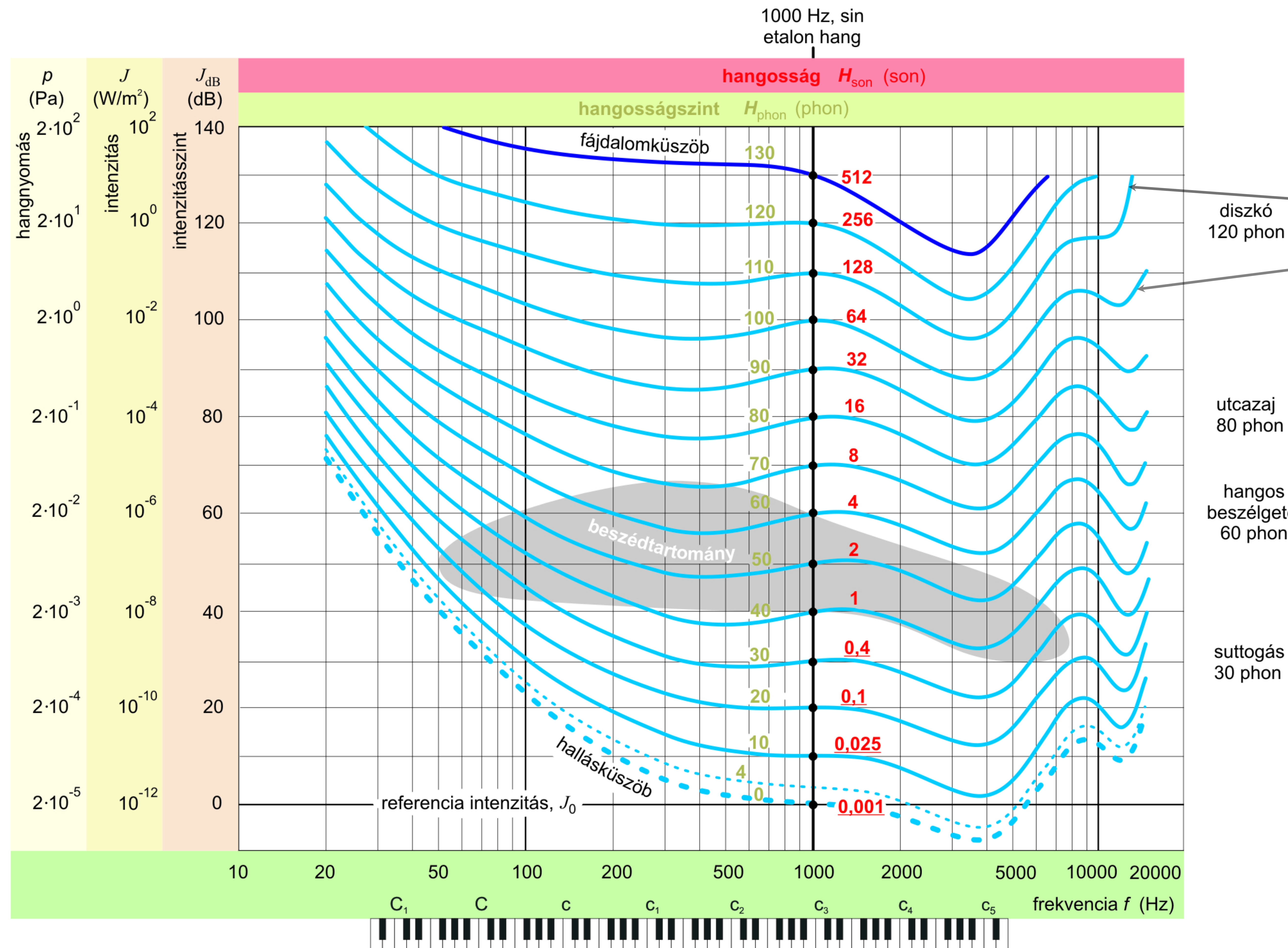


Külső szőrsejtek (normál állapot)



Külső szőrsejtek (károsodott állapot; pl. koncert után)

Ingerintenzitás és érzet - pszichoakusztika



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

utcazaj
80 phon

hangos
beszélgetés
60 phon

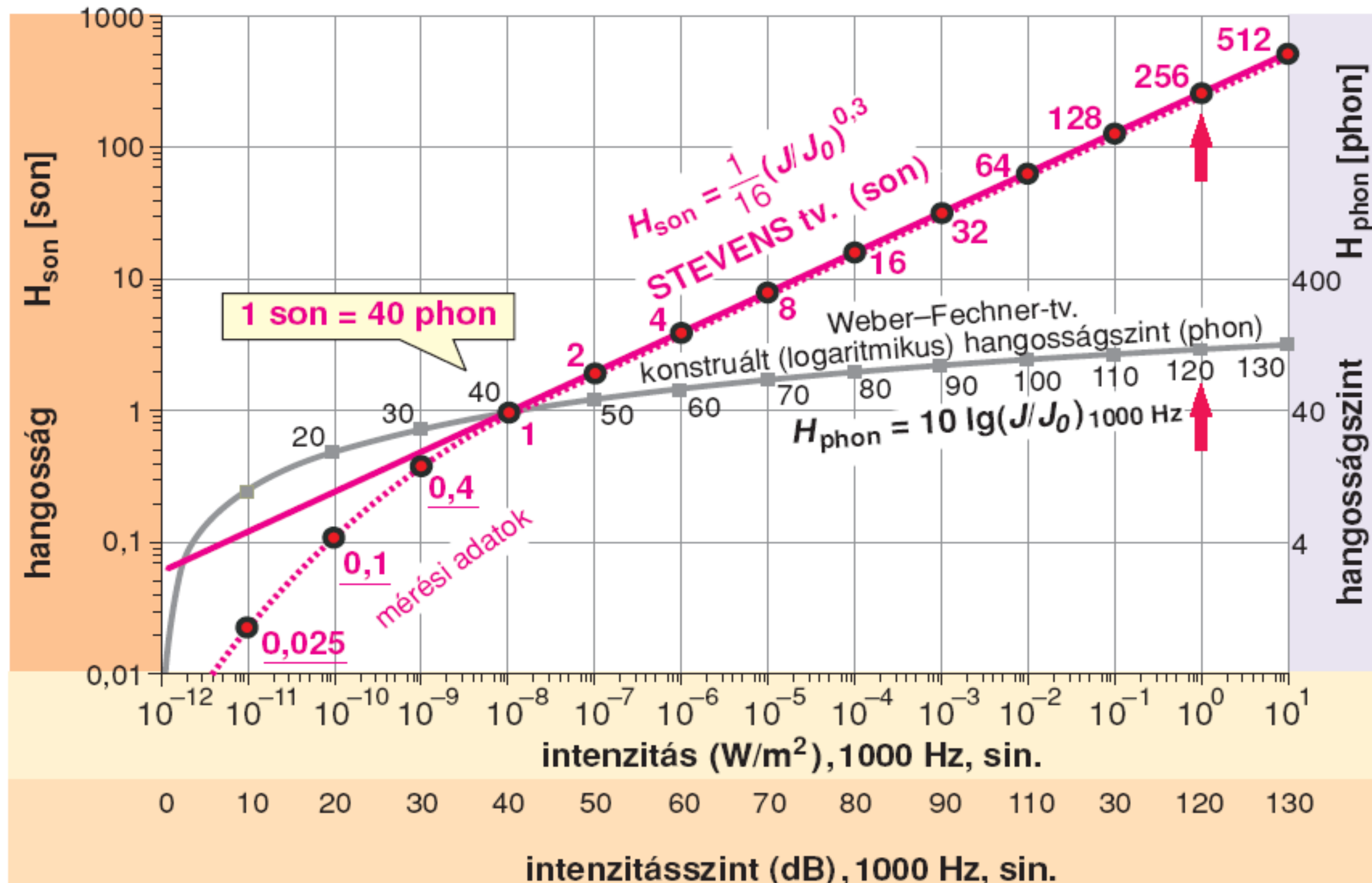
suttogás
30 phon

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

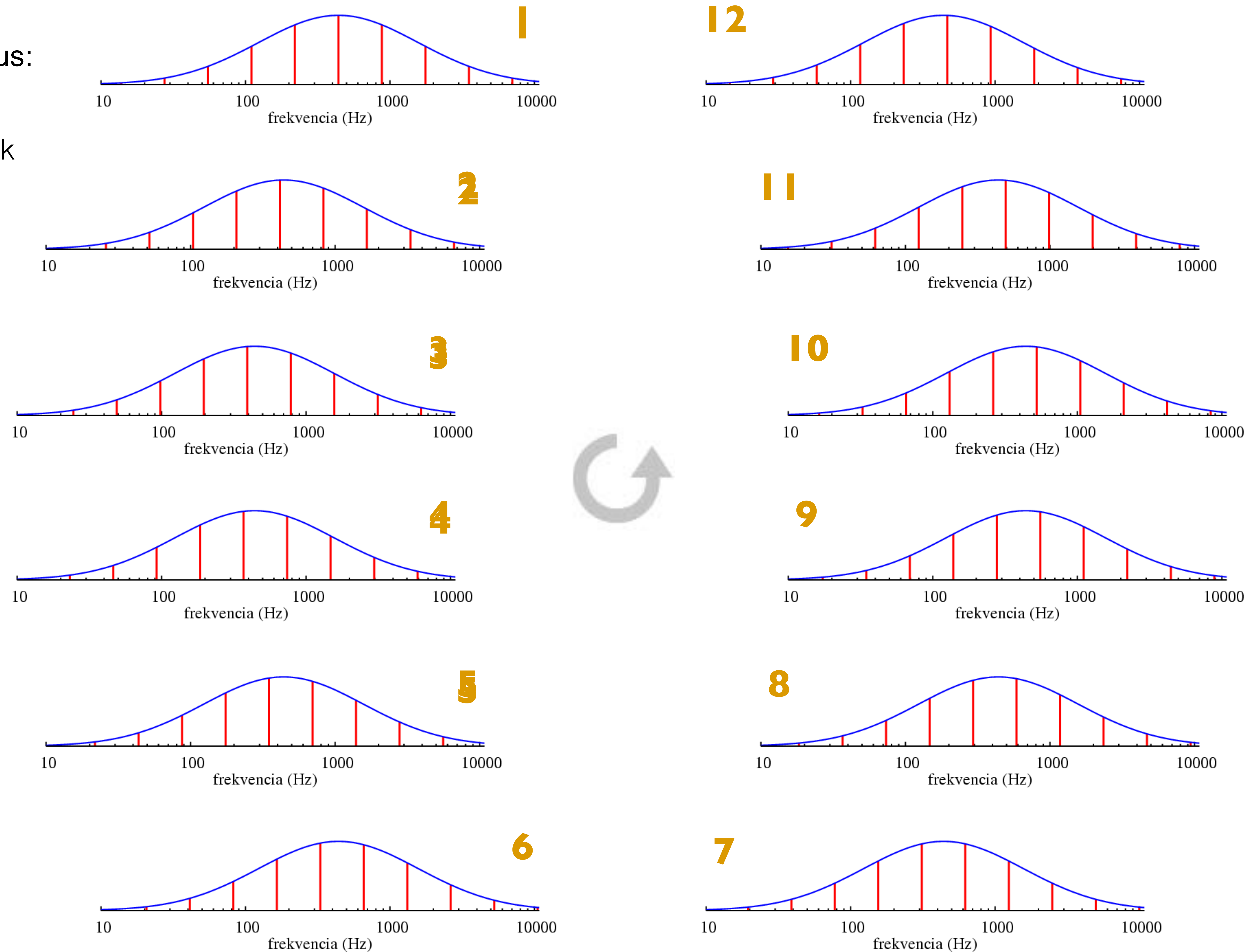
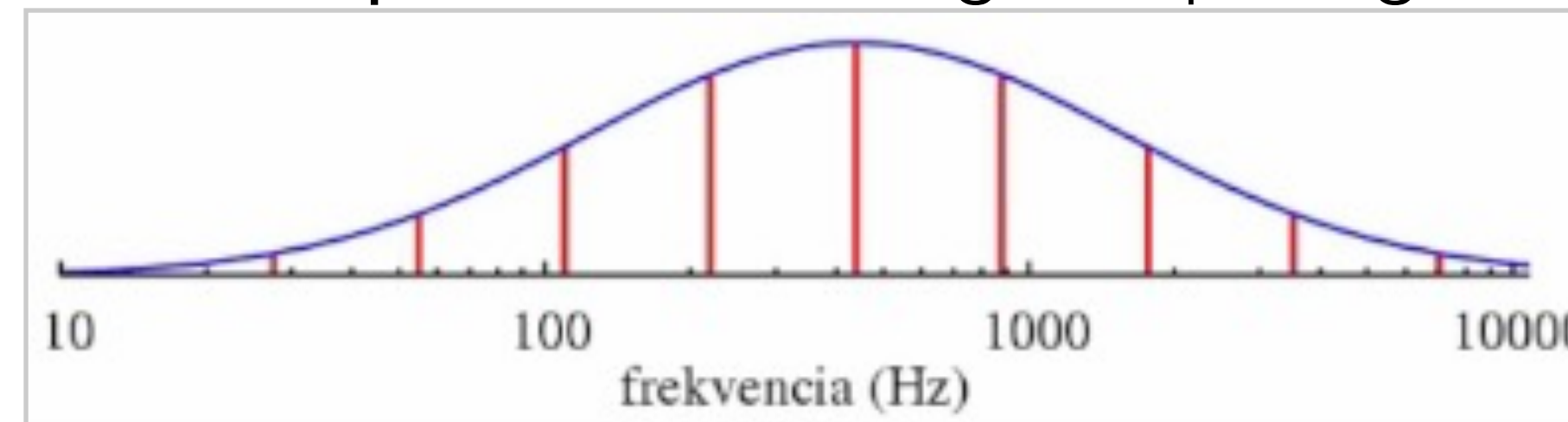
A pszichoakusztikai viselkedést a Stevens-törvény írja le helyesen



Akusztikus illúzió?

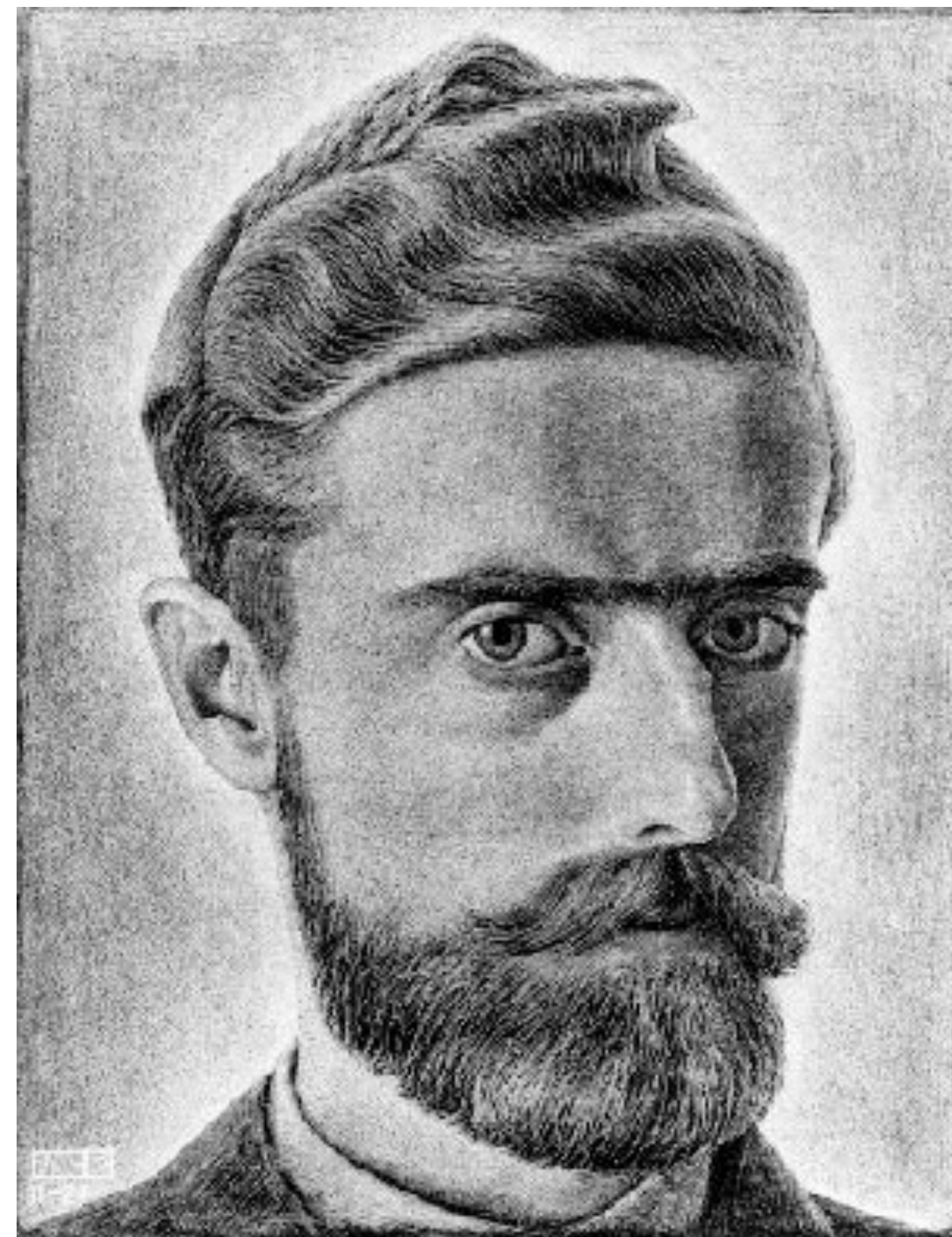
Shepard tónus:
oktávokkal
elválasztott
szinushangok

Shepard skála: mozgó alaphang

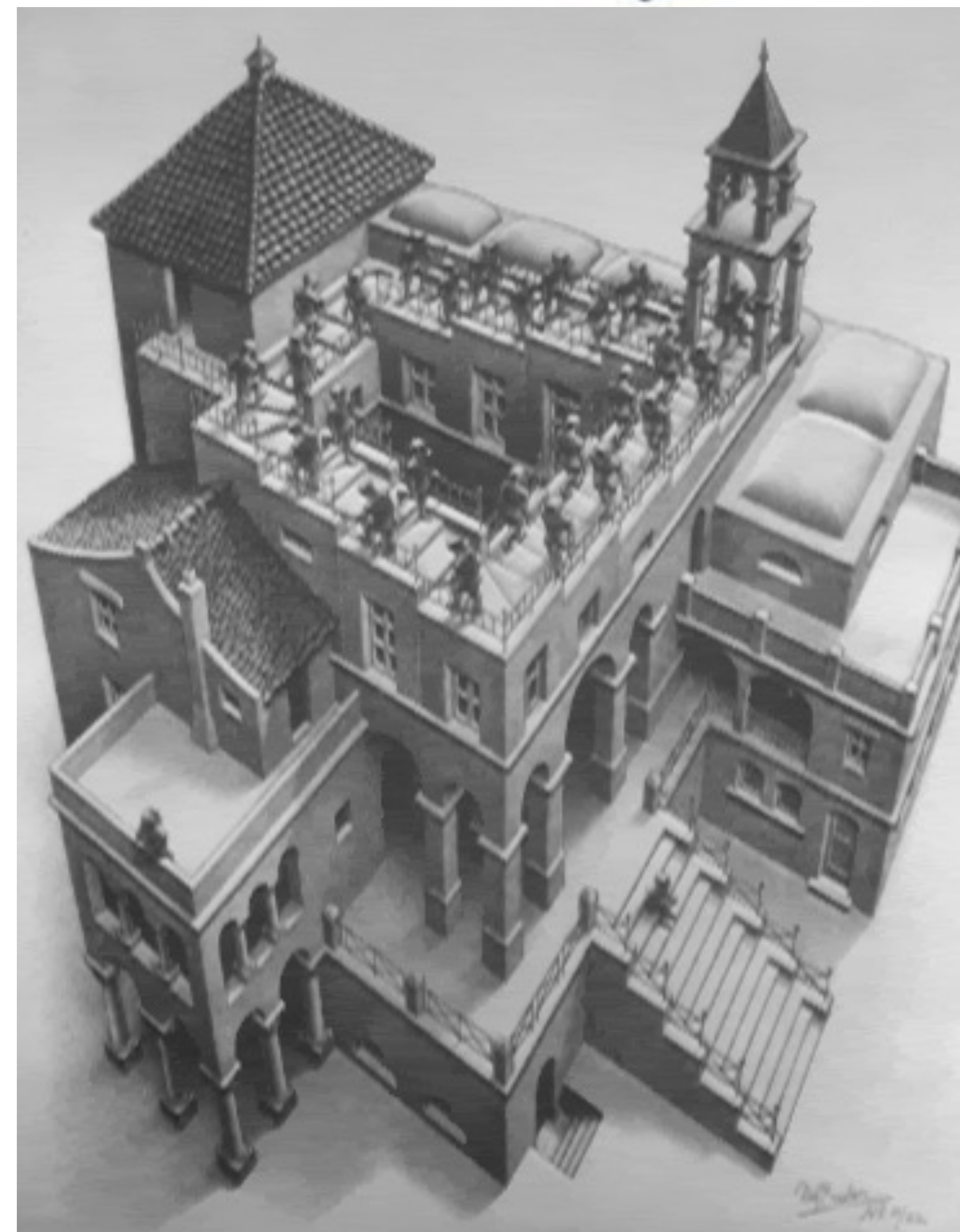
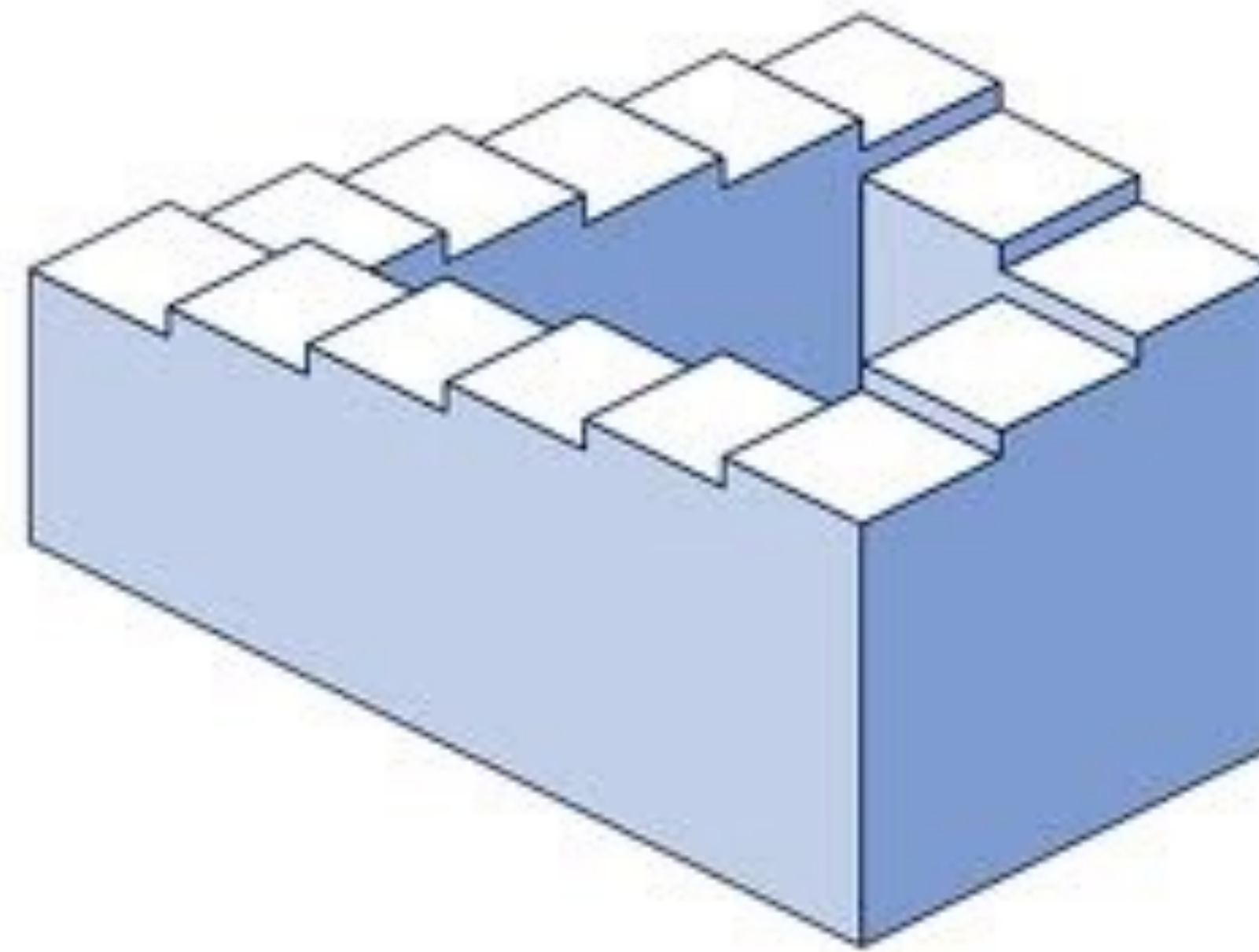


Akusztikus illúzió?

A Shepard skála vizuális analógjai:



Maurits Cornelis Escher
(1898-1972)



Escher lépcső



Fodrász rúd

OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/index.php?feedback-qr=P6OHH4ZB6FZBEYIB>