

ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK BIOFIZIKÁJA

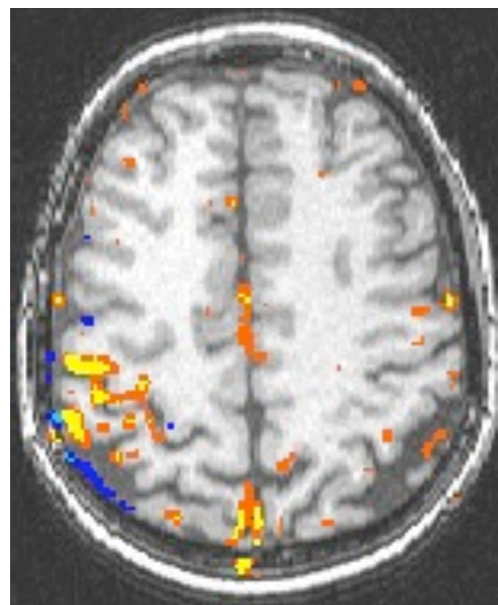
Elméletek az érzékelésről



*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

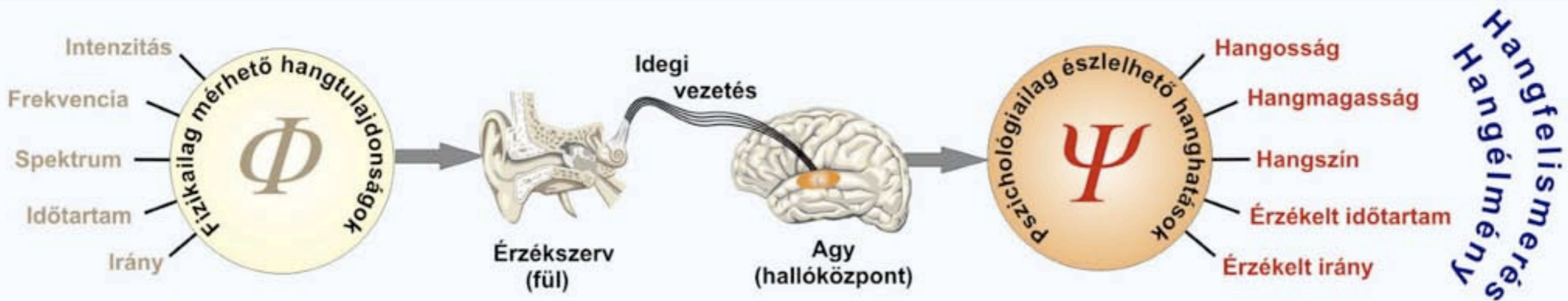
Ma:

inger →

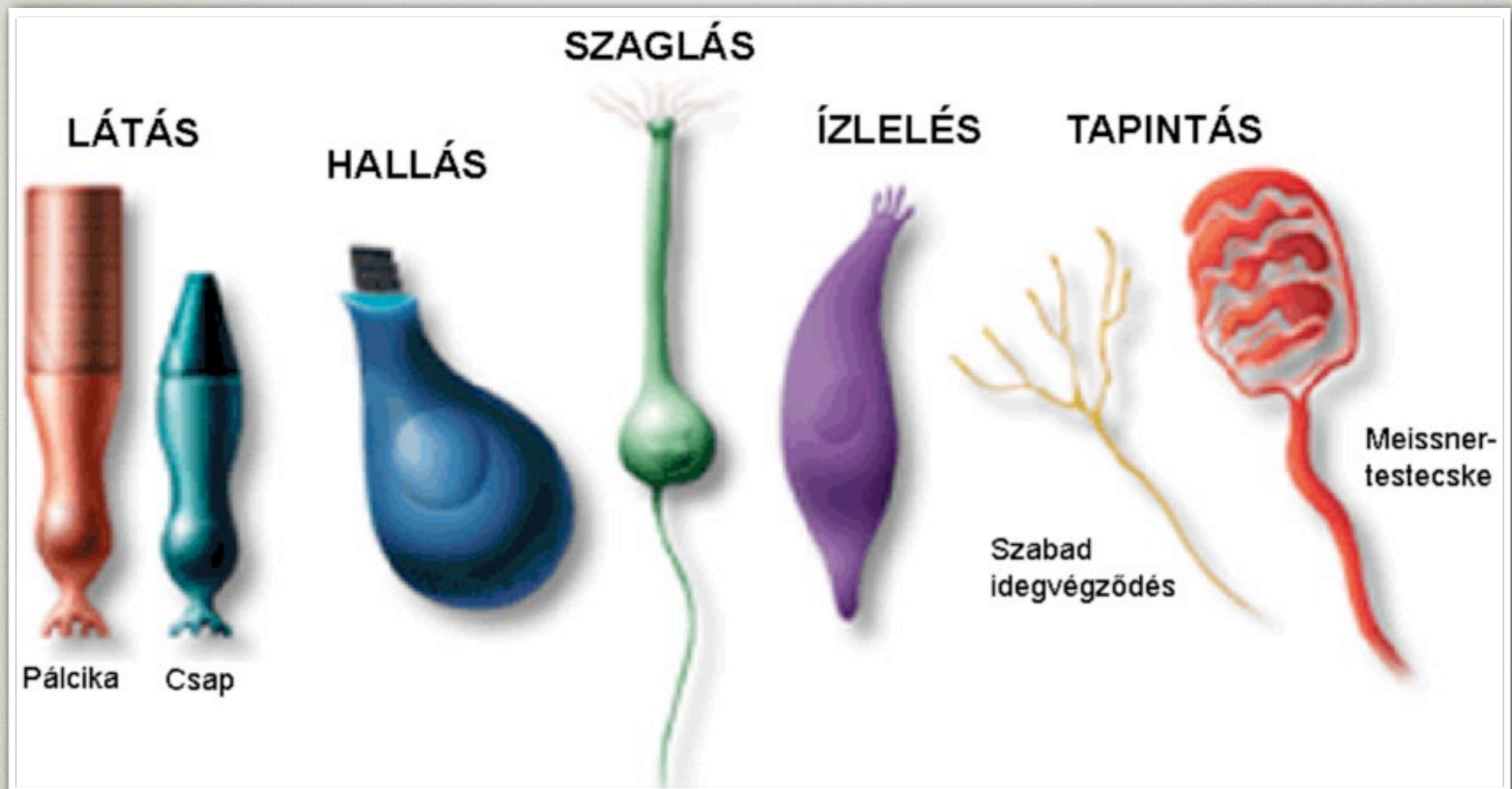
- érzékszervi receptorok →
- receptorpotenciál →
- ideg →
- akciós potenciál →
- központi idegrendszer →
- jelfeldolgozás →
- **érzet**

Érzékelés folyamata

Hallás esete



Érzékszervi receptorok



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

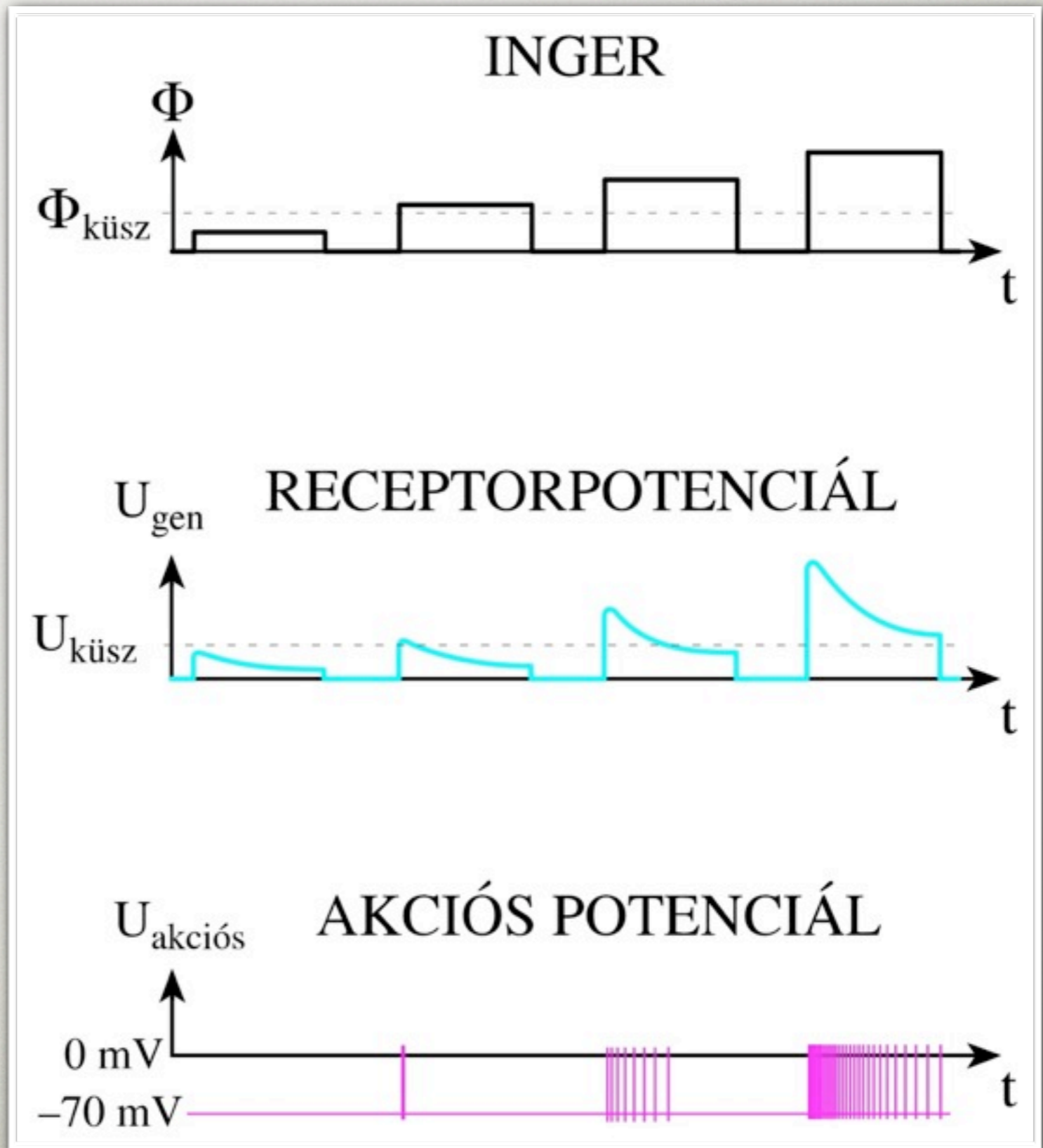
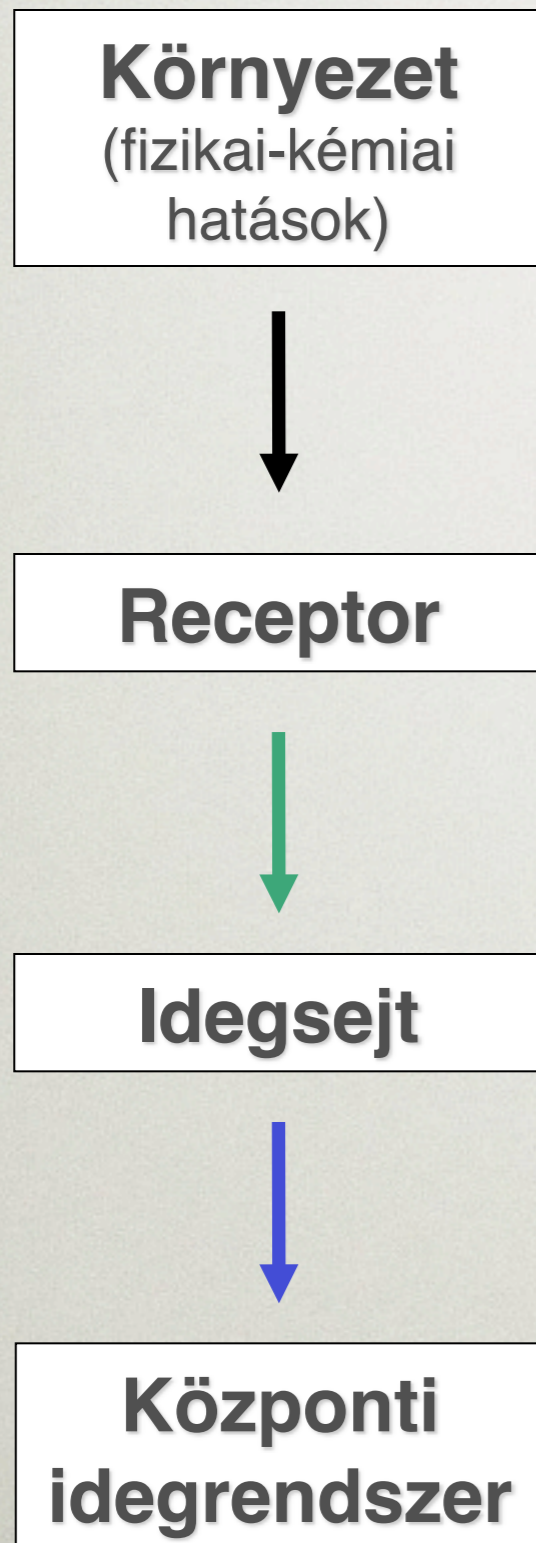
Receptorok (eltérő jelentés!): Olyan fehérjék, amelyek specifikusan képesek hormonok, neurotranszmitterek és más anyagok megkötésére és ezáltal specifikus válaszreakciókat indítanak el.

Öt érzék?

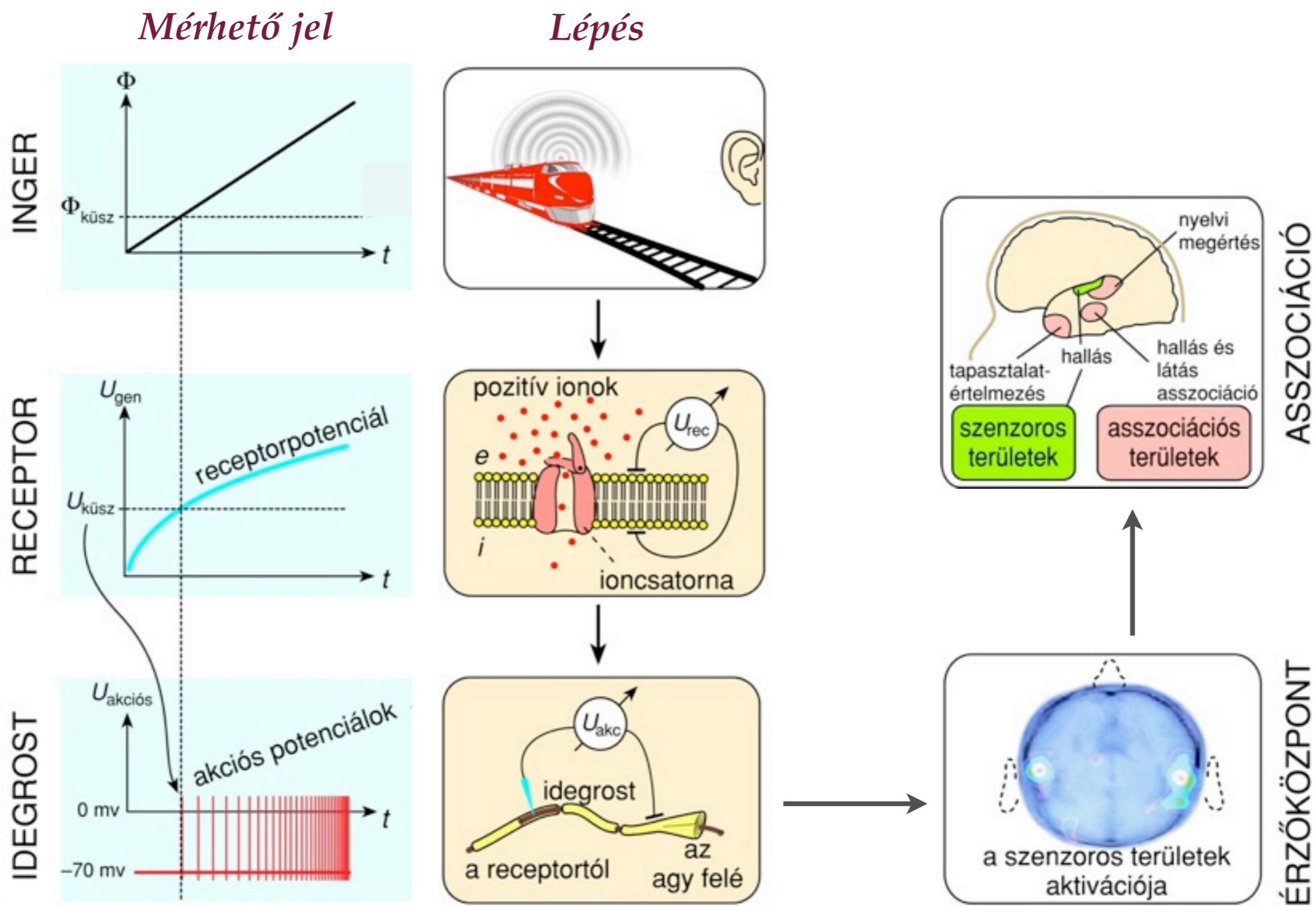
Legfontosabb érzésmodalitások (első 11 helyen a tudatosuló érzékelések)

Érzésmodalitás	Receptor	Érzékelőszerv
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 (utrículus és sacculus)
Tapintás-nyomás	Idegvégződés	Többféle*
Meleg	Idegvégződés	Többféle*
Fájdalom	Idegvégződés	Többféle*
Hideg	Csupasz idegvégződés	...
Ízületi helyzet és mozgás	Idegvégződés	Többféle*
Izomhossz	Idegvégződés	Izomorsó
Izomfeszülés	Idegvégződés	Golgi-féle inszerv
Artériás vérnyomás	Idegvégződés	A sinus caroticus és az aortaív nyújtási receptorai
Centrális vénás nyomás	Idegvégződés	A nagyvénák és a pitvarok falának nyújtási receptorai
A tüdő feszülése	Idegvégződés	A tüdőszövet nyújtási receptorai
A vér hőmérséklete	Hypothalamusneuronok	...
Artériás P_{O_2}	Idegvégződés	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	...

A jelátalakítás lépései



Ingertől az érzetig



Érzékenység

eV nagyságrendű inger is elegendő az ingerület kiváltására:

- hallóreceptorok: a levegő molekulák termikus mozgása,
- fényreceptorok: 1-2 foton.

Mit kódol az ingerület?

Az inger:

- modalitását (inger típusa)
- intenzitását (inger erőssége)
- időtartamát
- lokalizációját

1. Modalitás

Adekvát inger

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

Az akciós potenciálok minden idegben azonosak. Honnan tudjuk például, hogy az ingerület tapintási és nem melegingerhez tartozik?

Specifikus érzékszervi energiák elve

Az érzetet az impulzusok által aktivált agyrész határozza meg!

2. Intenzitás

Az inger nagyságáról információt hordoz

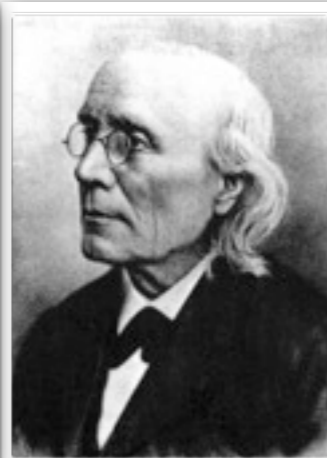
- akciós potenciálok frekvenciájának megváltozása
- aktivált receptorok számának megváltozása

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. Állandó erősségű ingerrel stimulálva egy idő után a receptorhoz tartozó idegben csökken az akciós potenciálok frekvenciája.

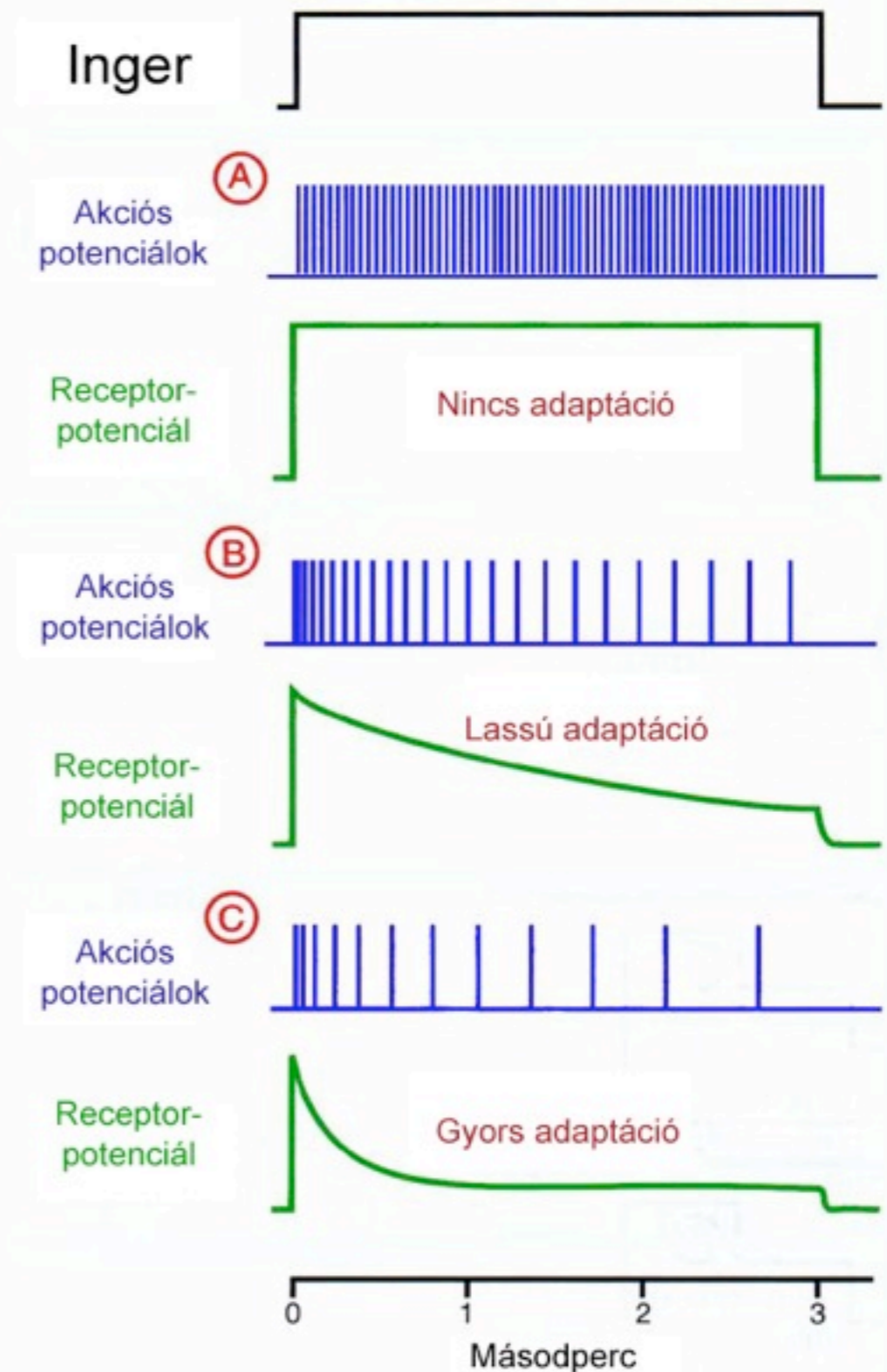
Gyorsan adaptálódó (fázisos) receptorok

Pl. tapintás, szaglás, hőérzet

Lassan és csak korlátozott mértékben adaptálódó (tónusos) receptorok

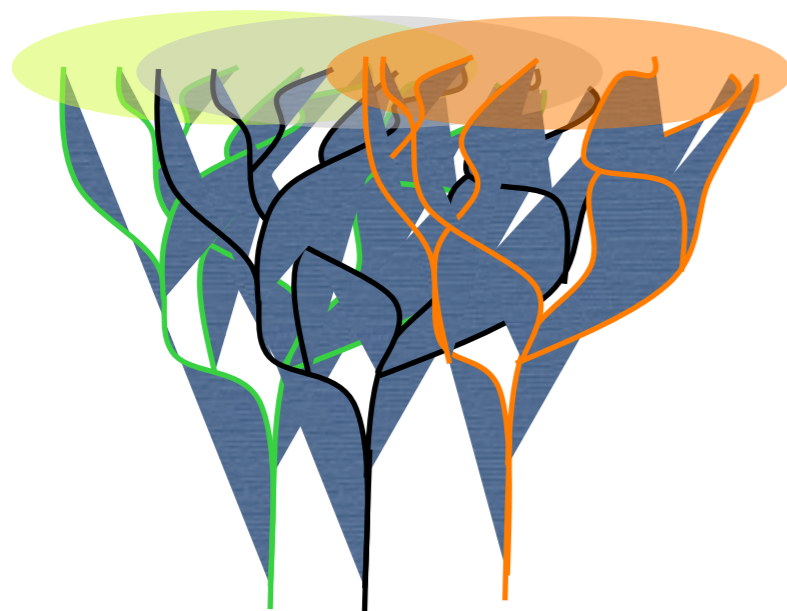
Pl. hideg, fájdalom (fogfájás)

Illyés Gyula: "Doleo, ergo sum"

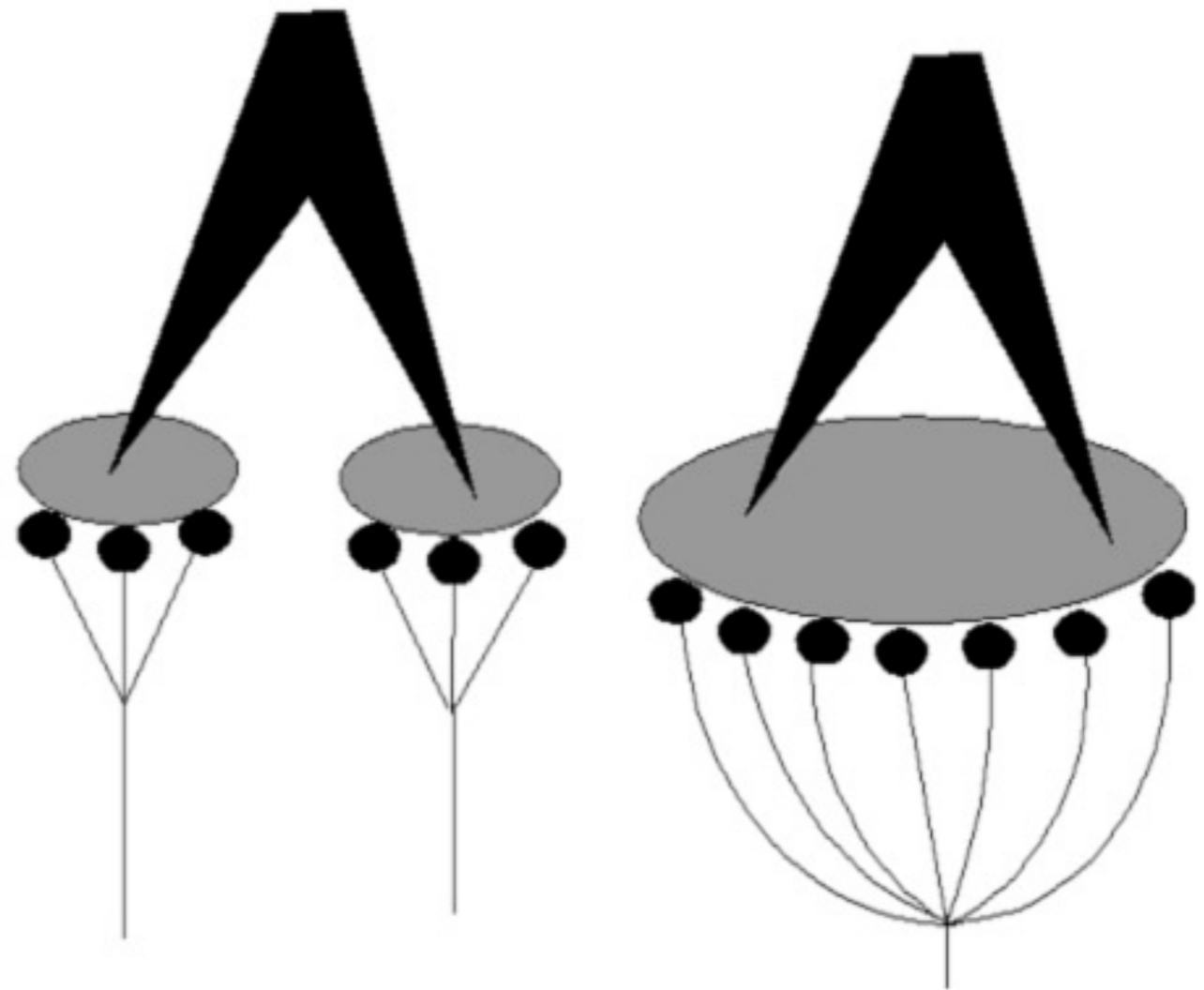


4. Lokalizáció, receptor-mezők

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

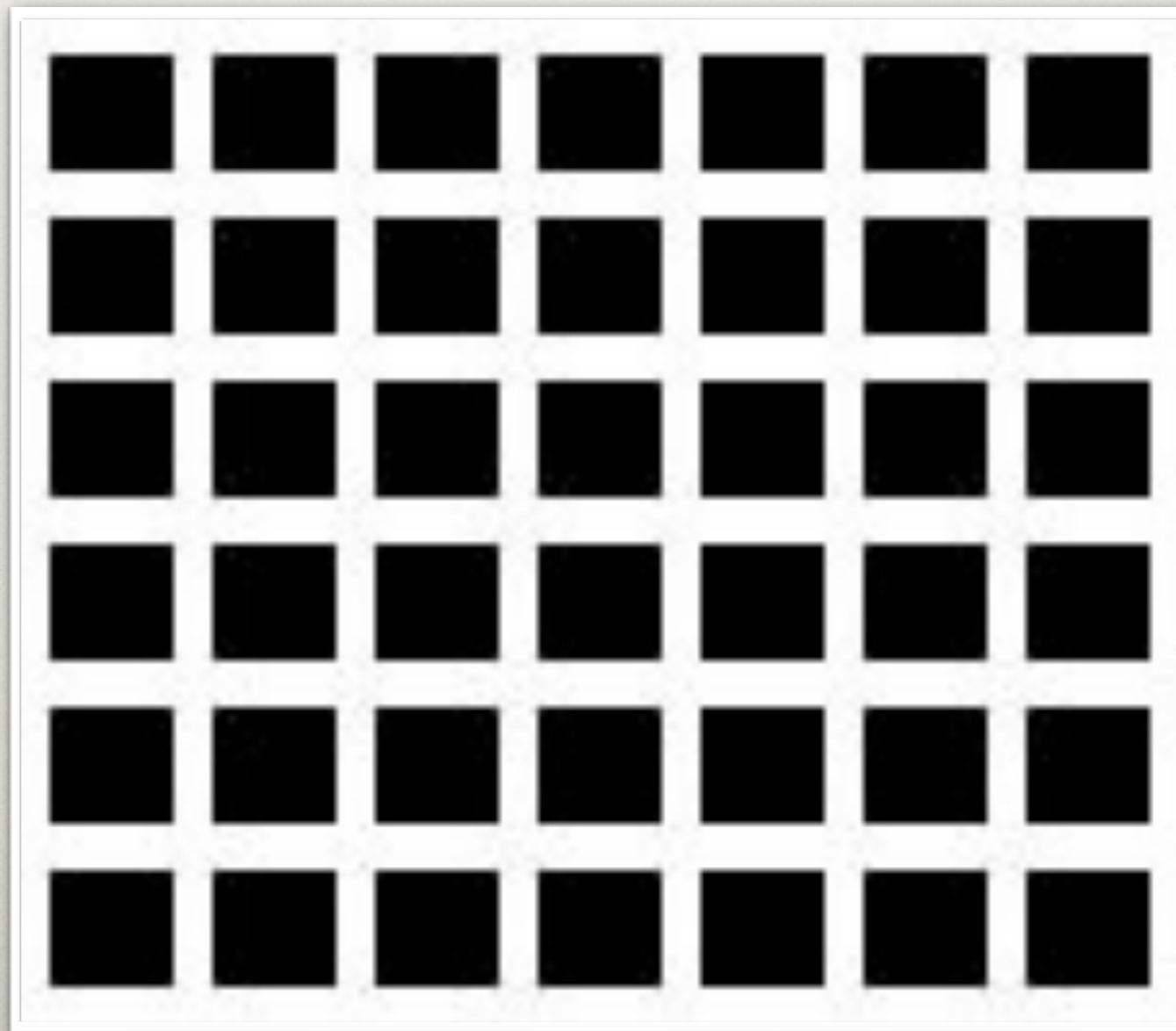


Receptor-mezők és átfedésük

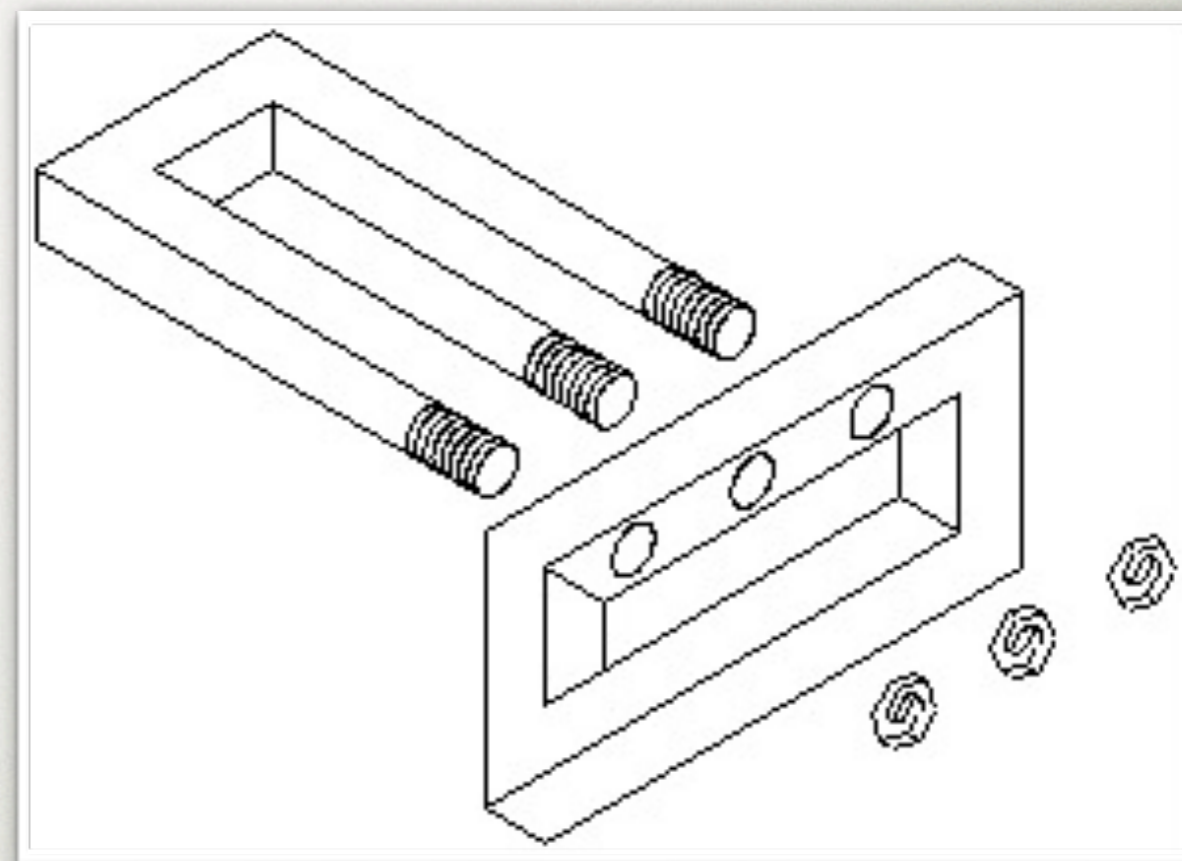
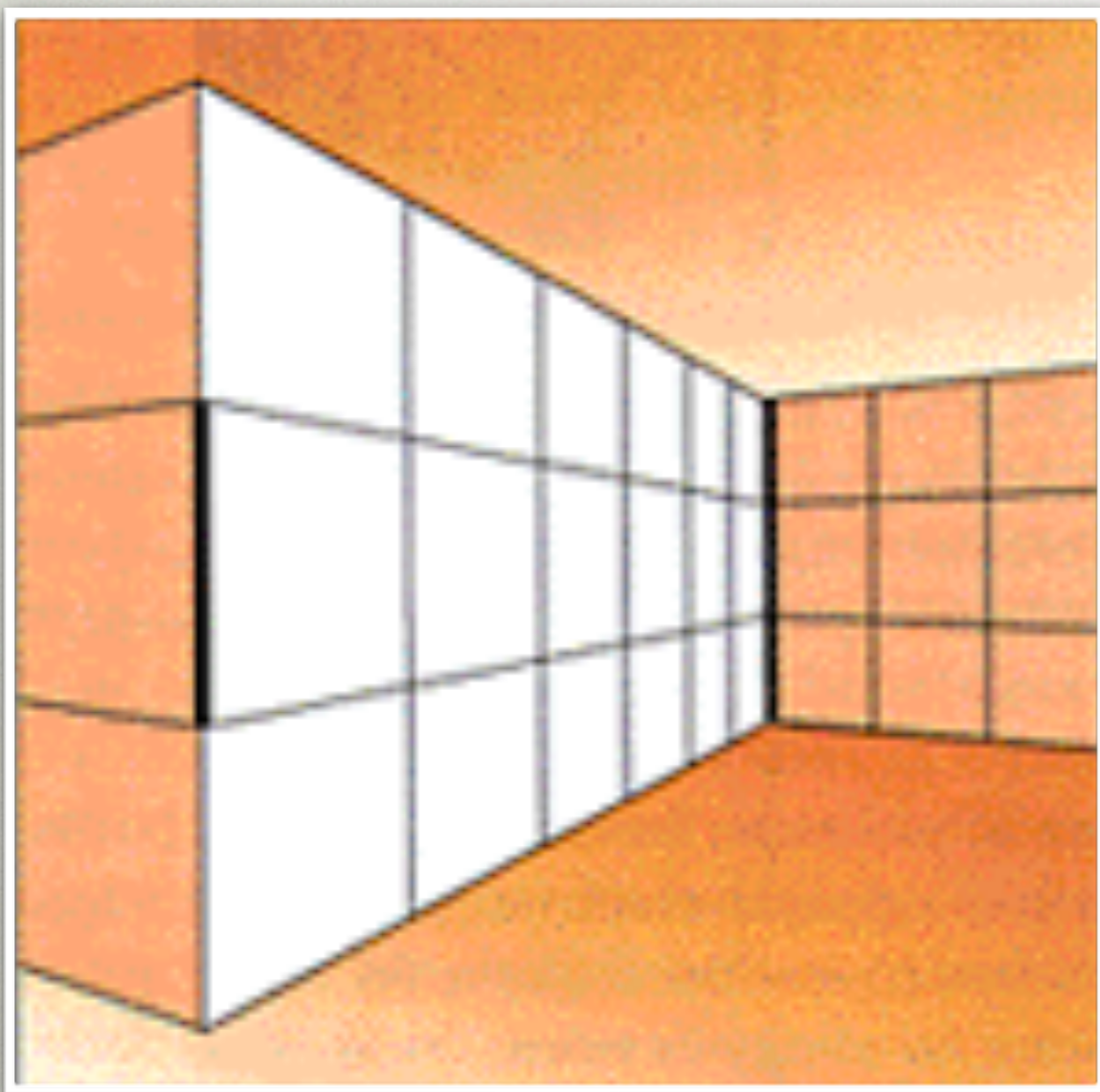


A SZEM BIOFIZIKÁJA

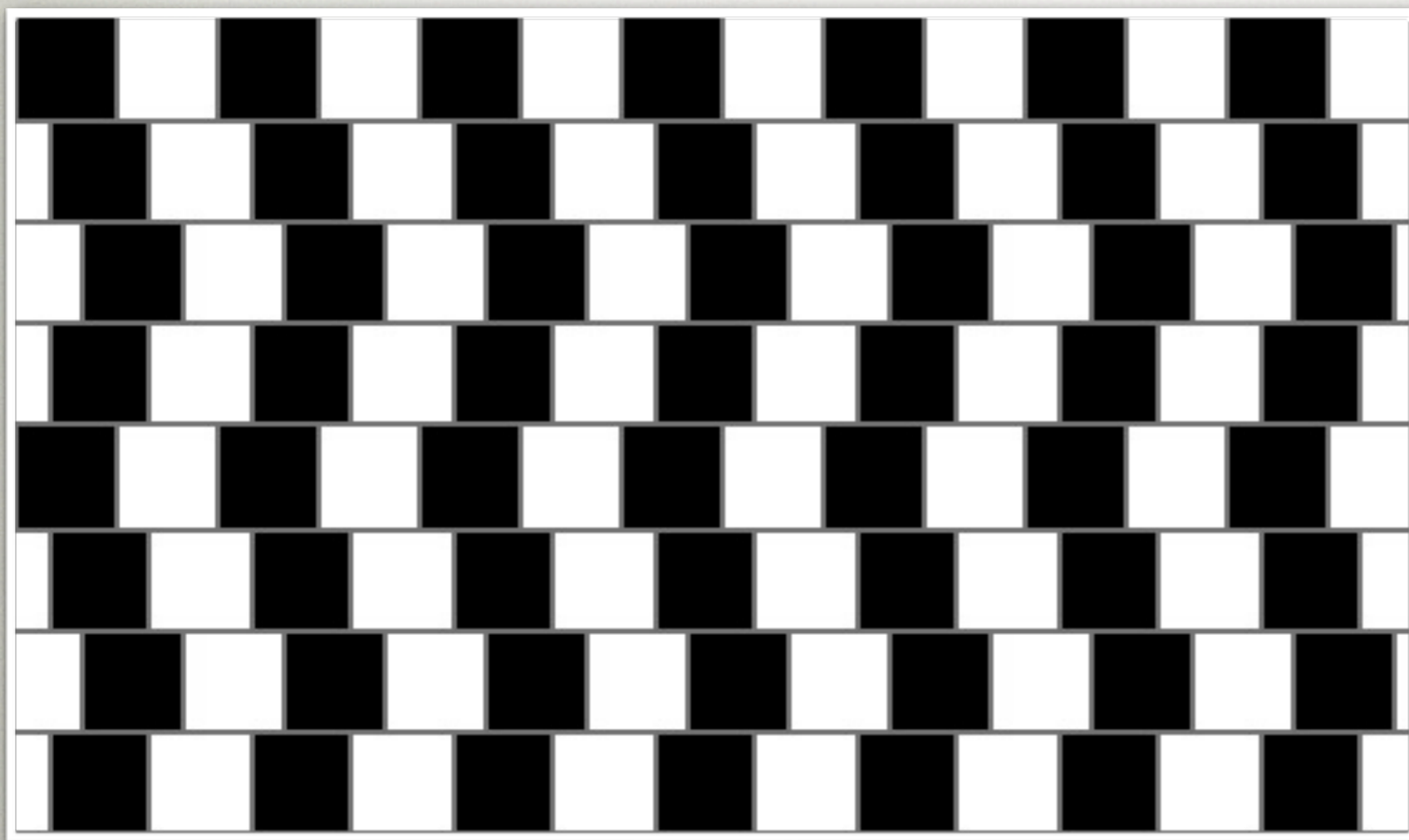
Optikai csalódások – intenzitás



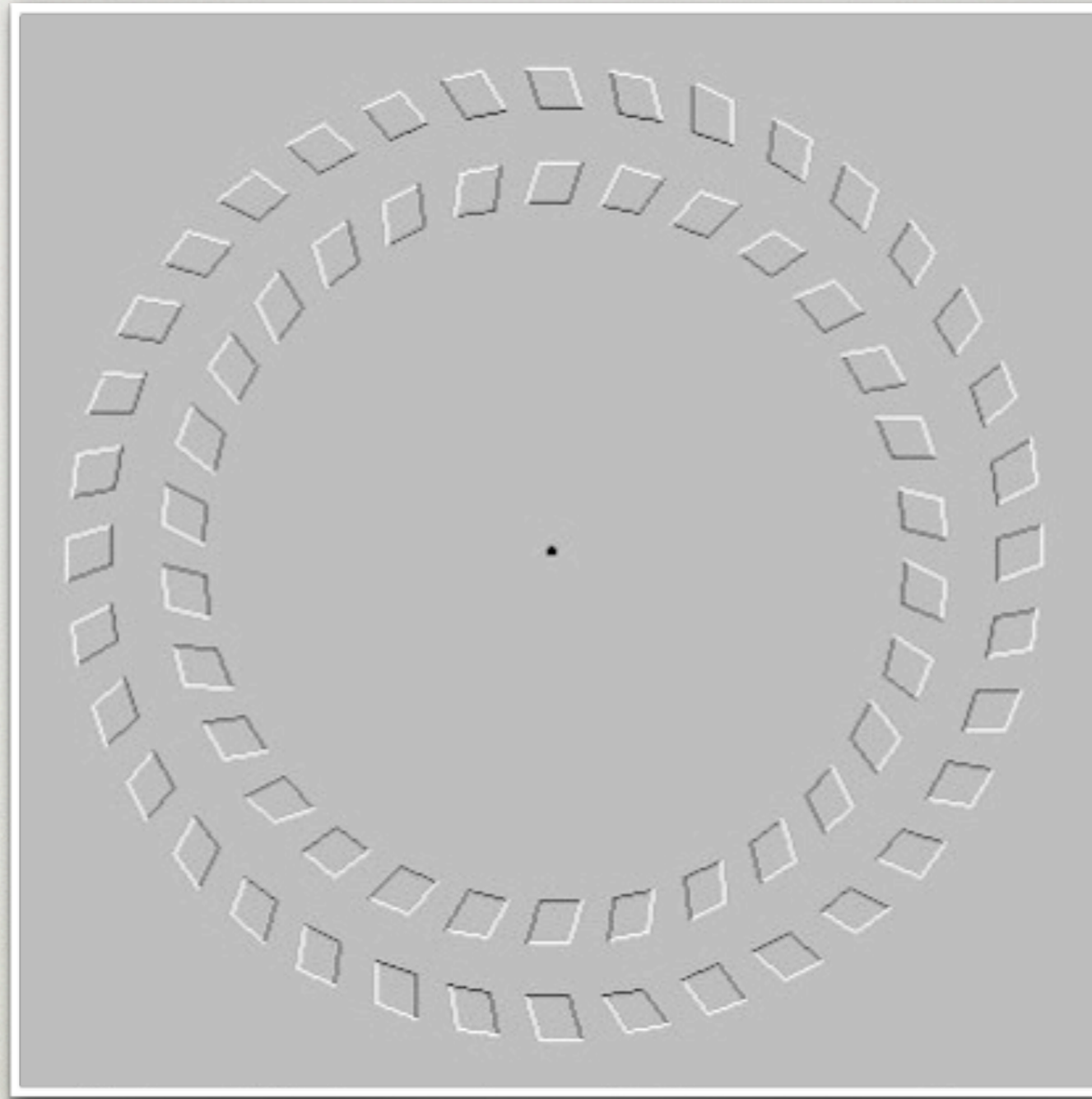
Optikai csalódások – tér



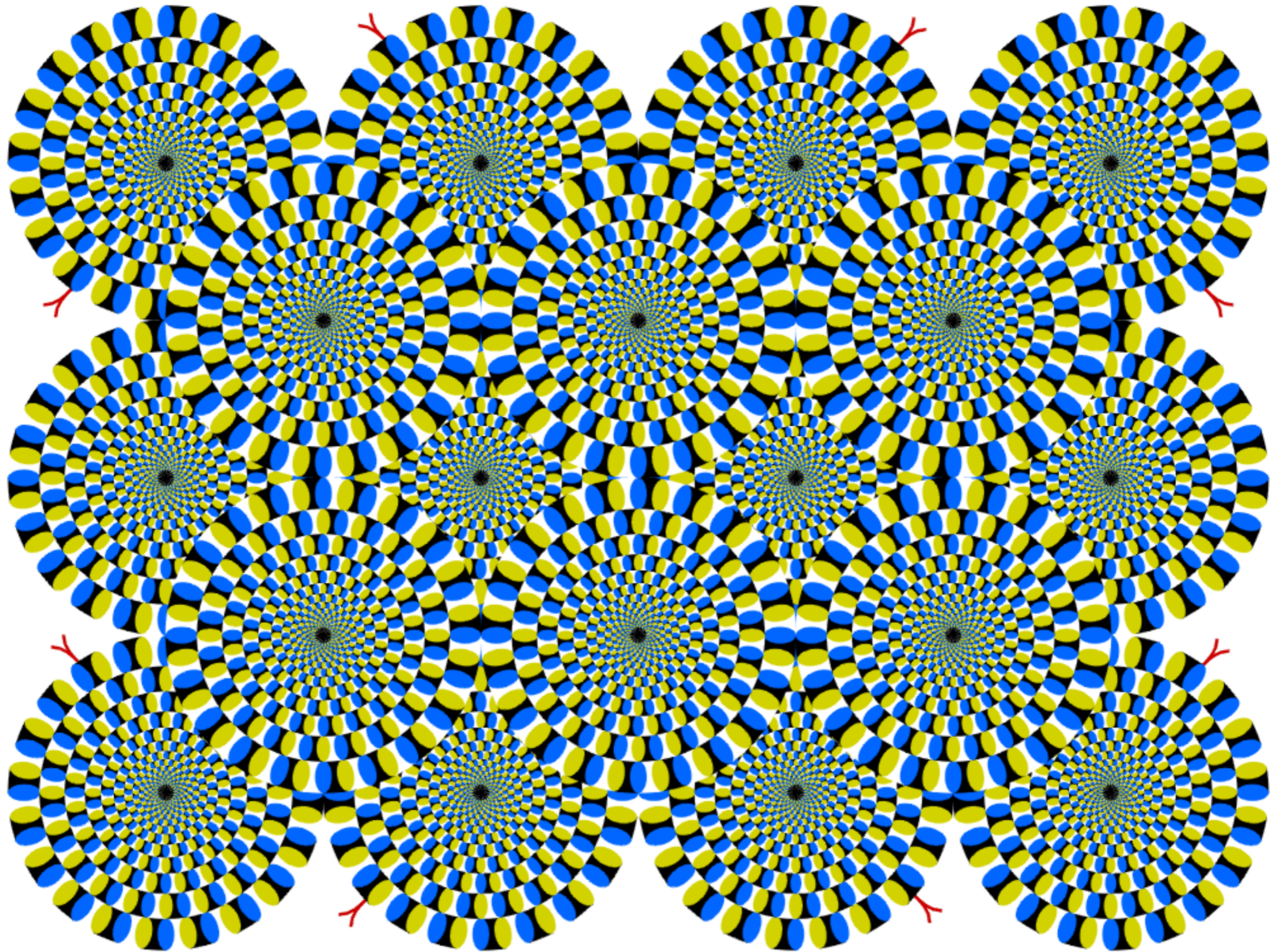
Optikai csalódások – irány



Optikai csalódások – mozgás

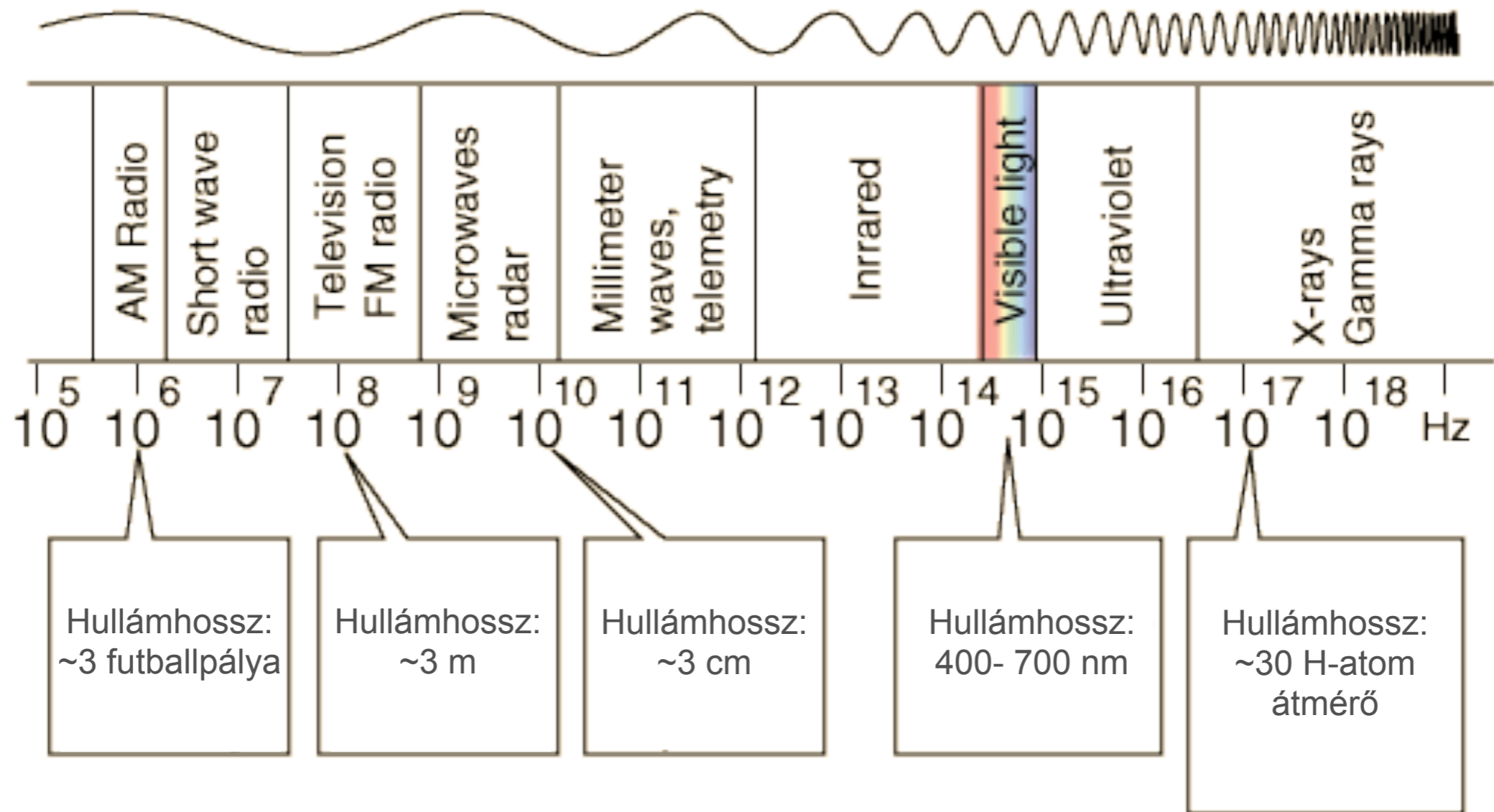


Az optikai csalódások a látórendszer különleges jelfeldolgozó képességére utalnak.



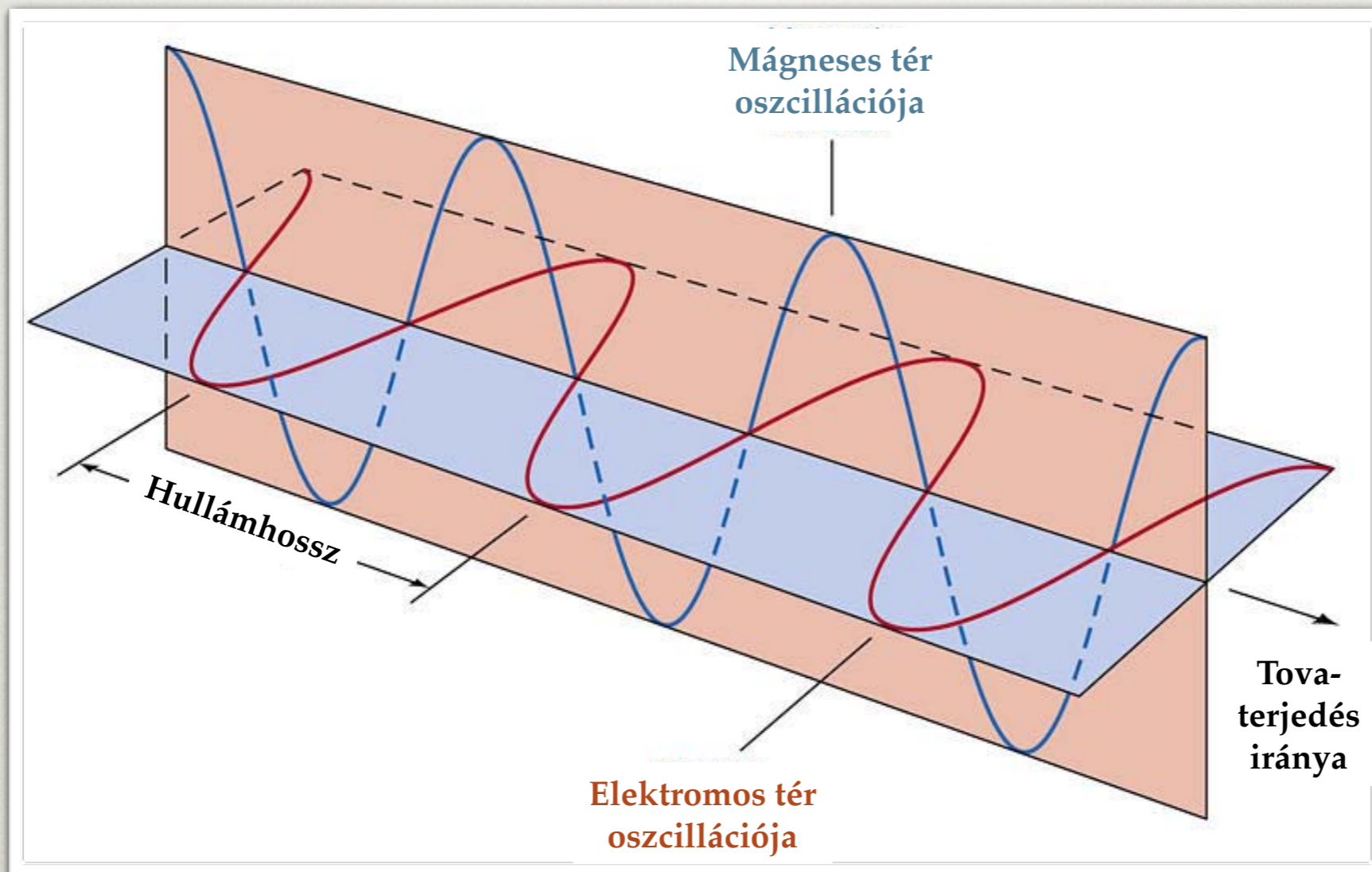
Inger: fény

Elektromágneses hullám



Inger: fény

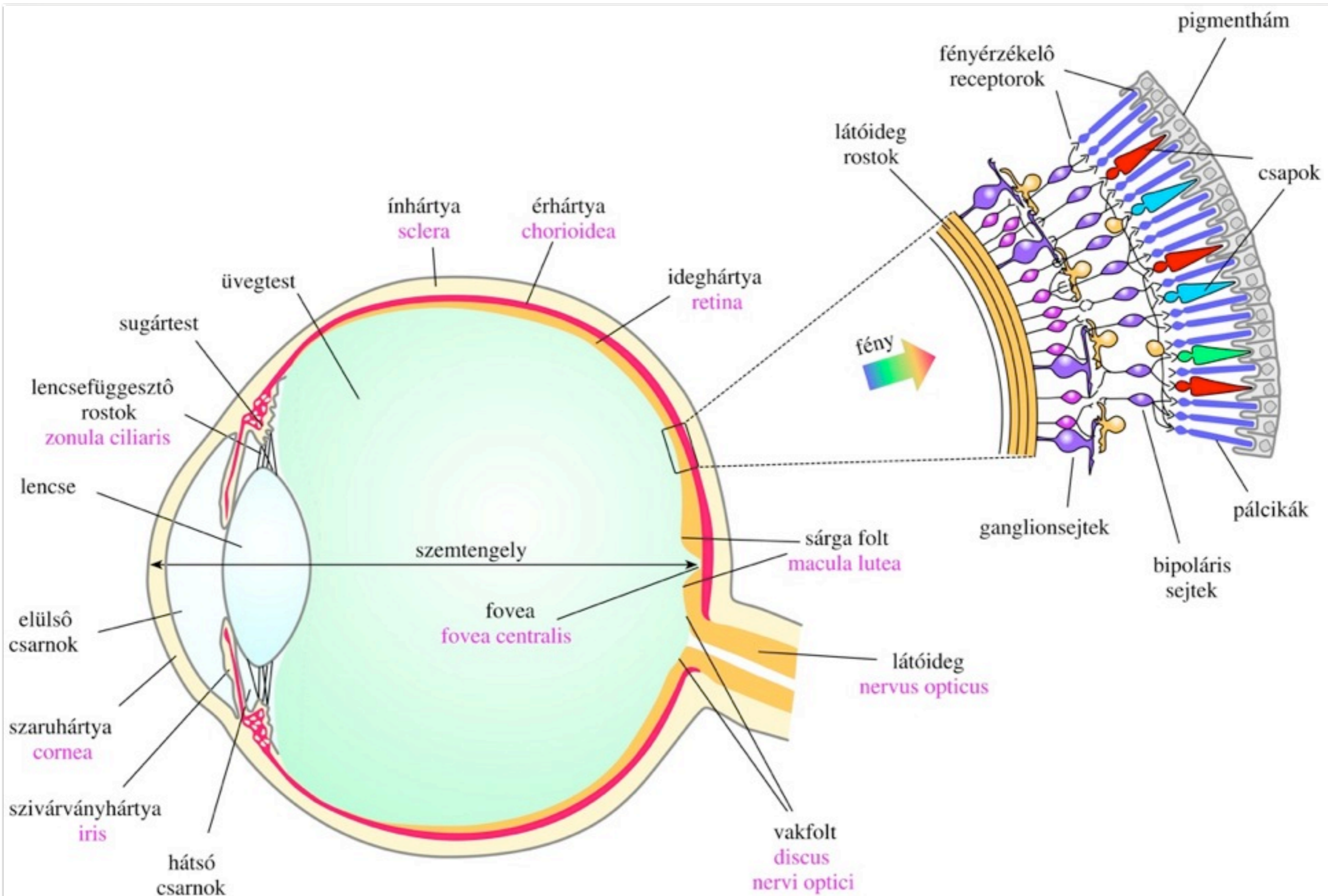
Tranzverzális hullám



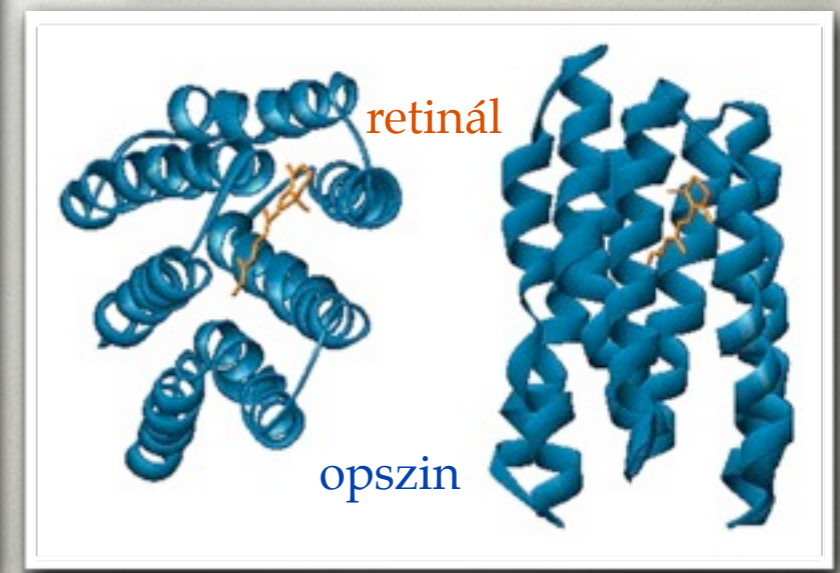
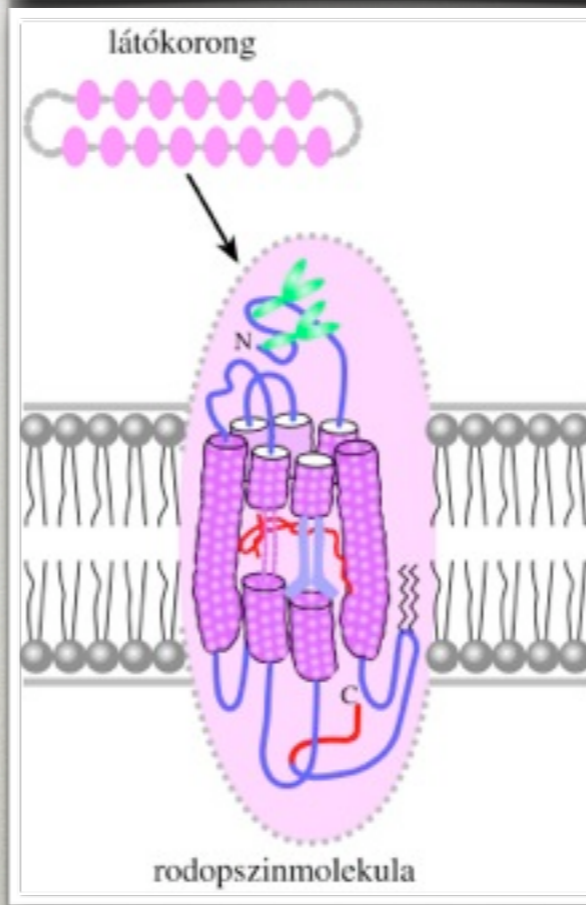
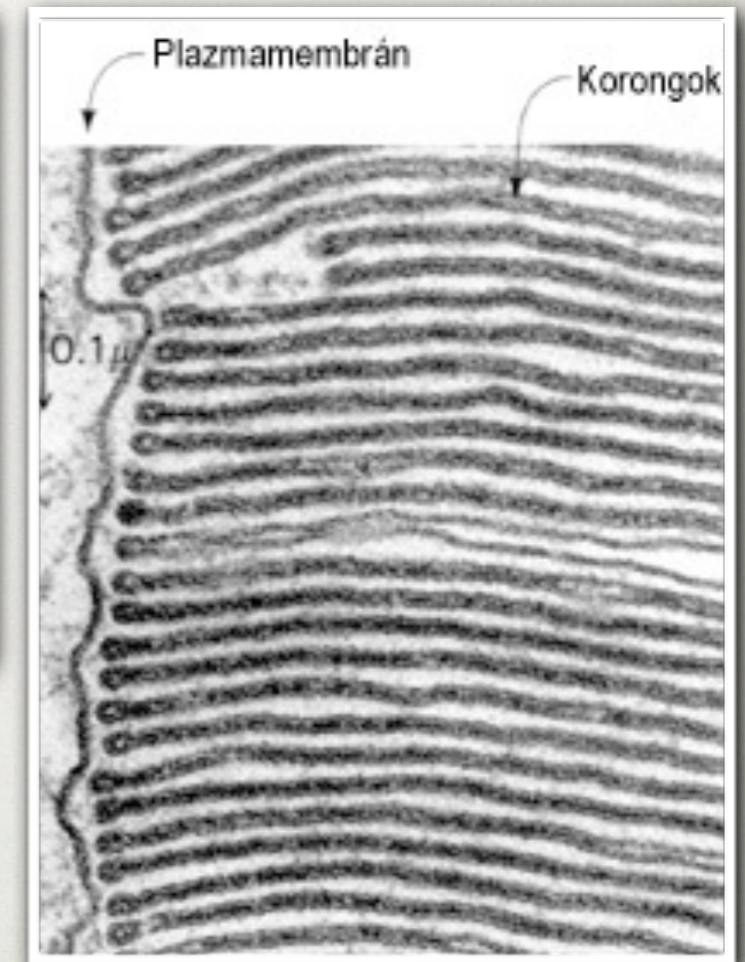
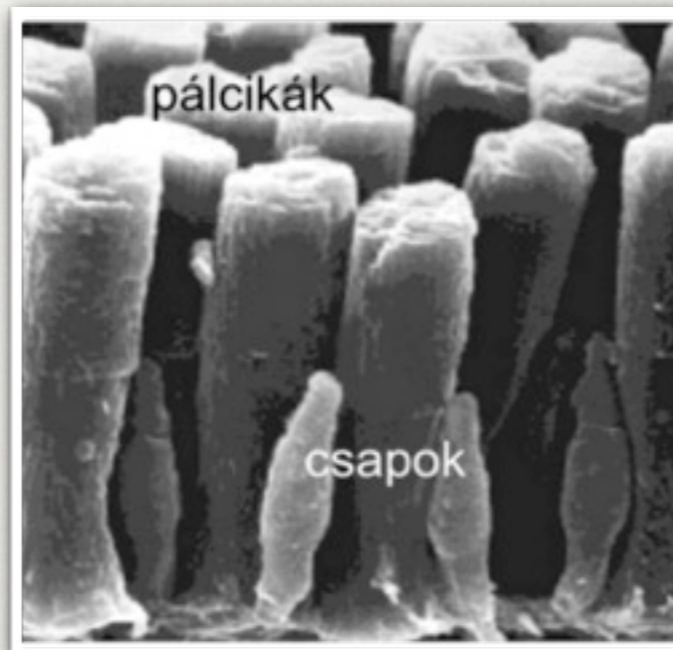
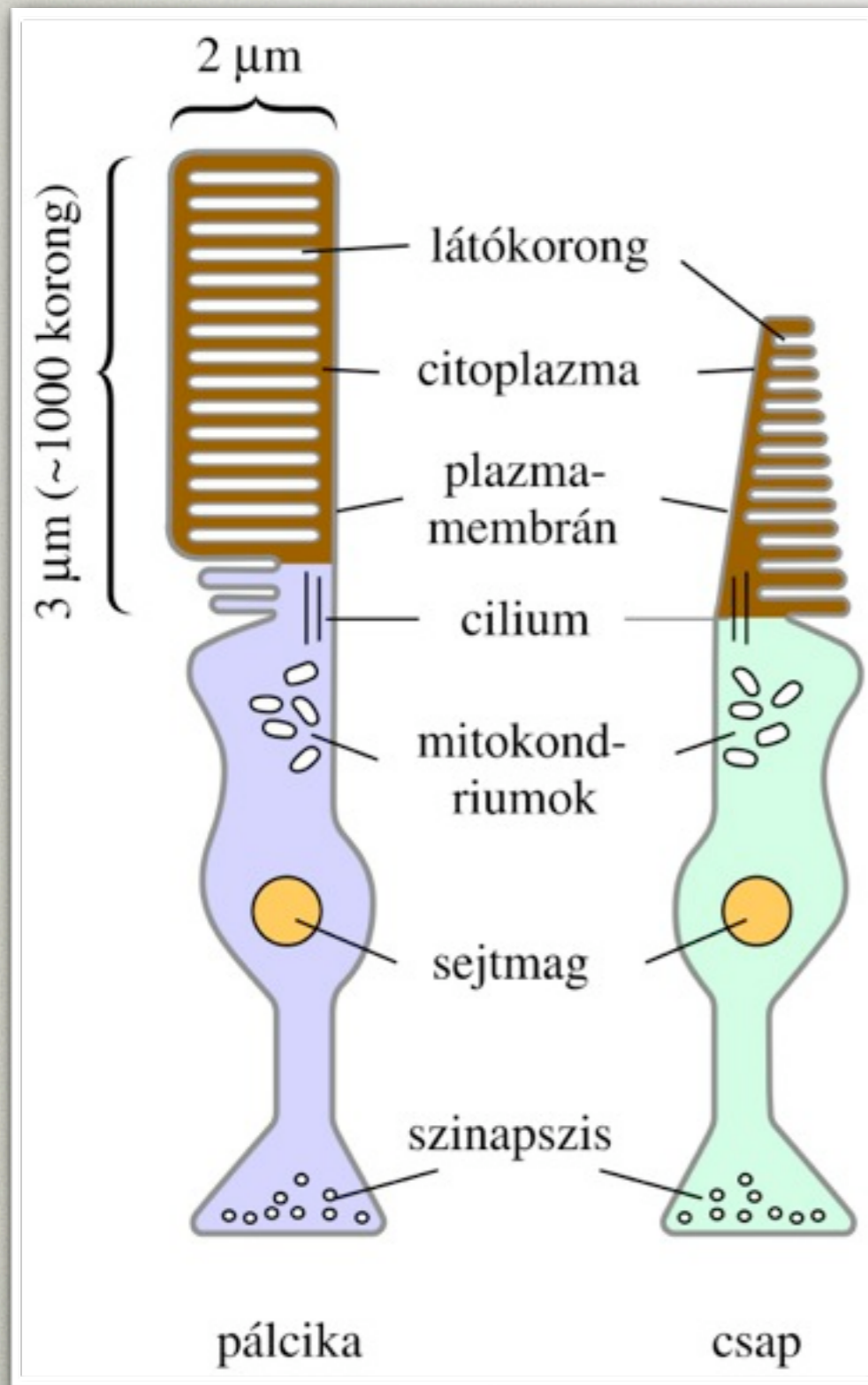
A szem érzékeny: hullámhosszra és amplitudóra (~intenzitás)

A szem érzéketlen: fázisra és polarizációra

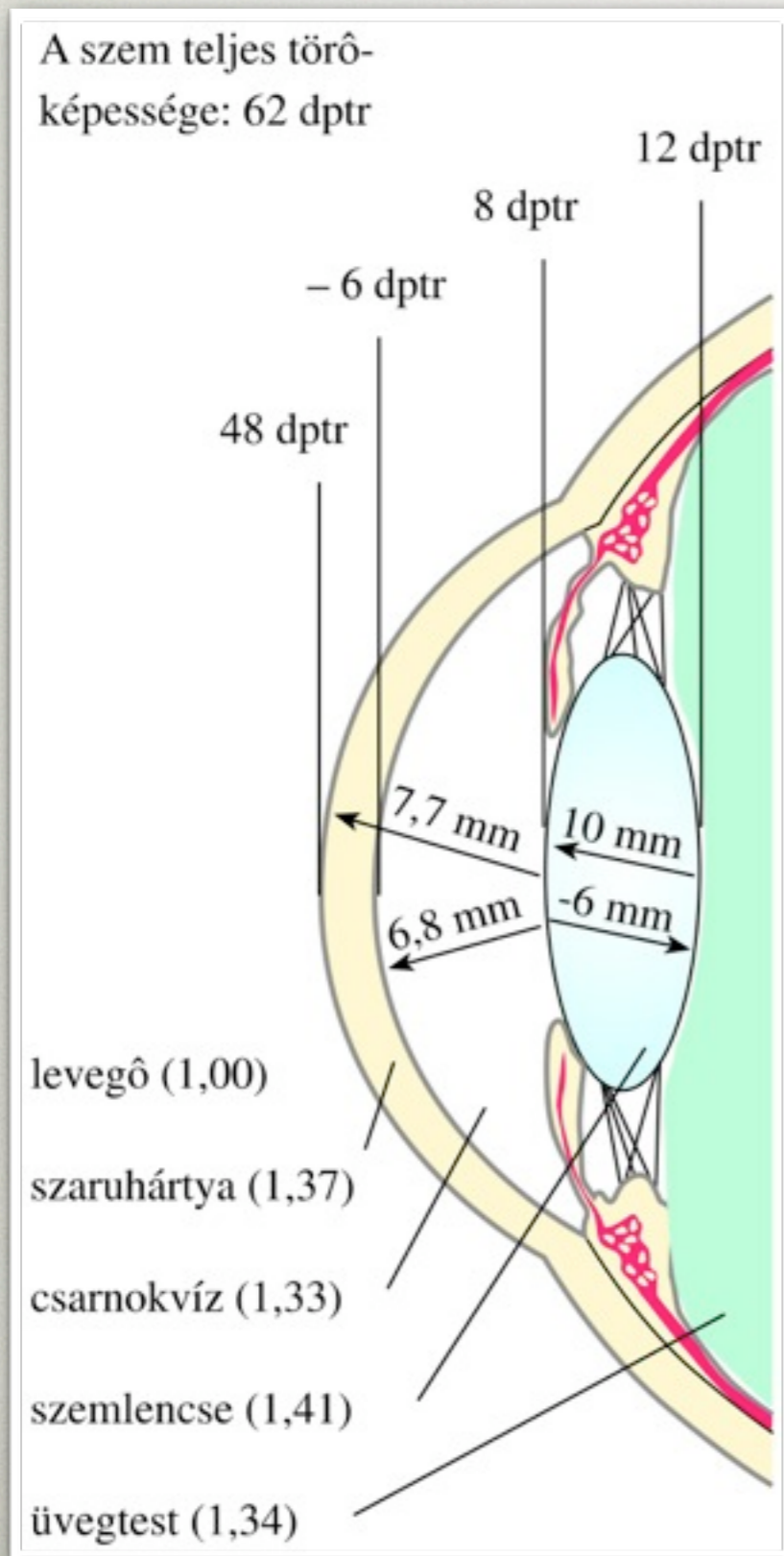
“Receptor-szerv”: szem



Fotoreceptorok



A szem optikája



Szembe jutó optikai teljesítmény (P)

$$P = J\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

J=intenzitás (W/m²)

d=pupilla átmérő

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \left(\frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right)^2 = 16$$

d_{max}=8 mm

d_{min}=2 mm

Törőfelületek törőképessége (D)

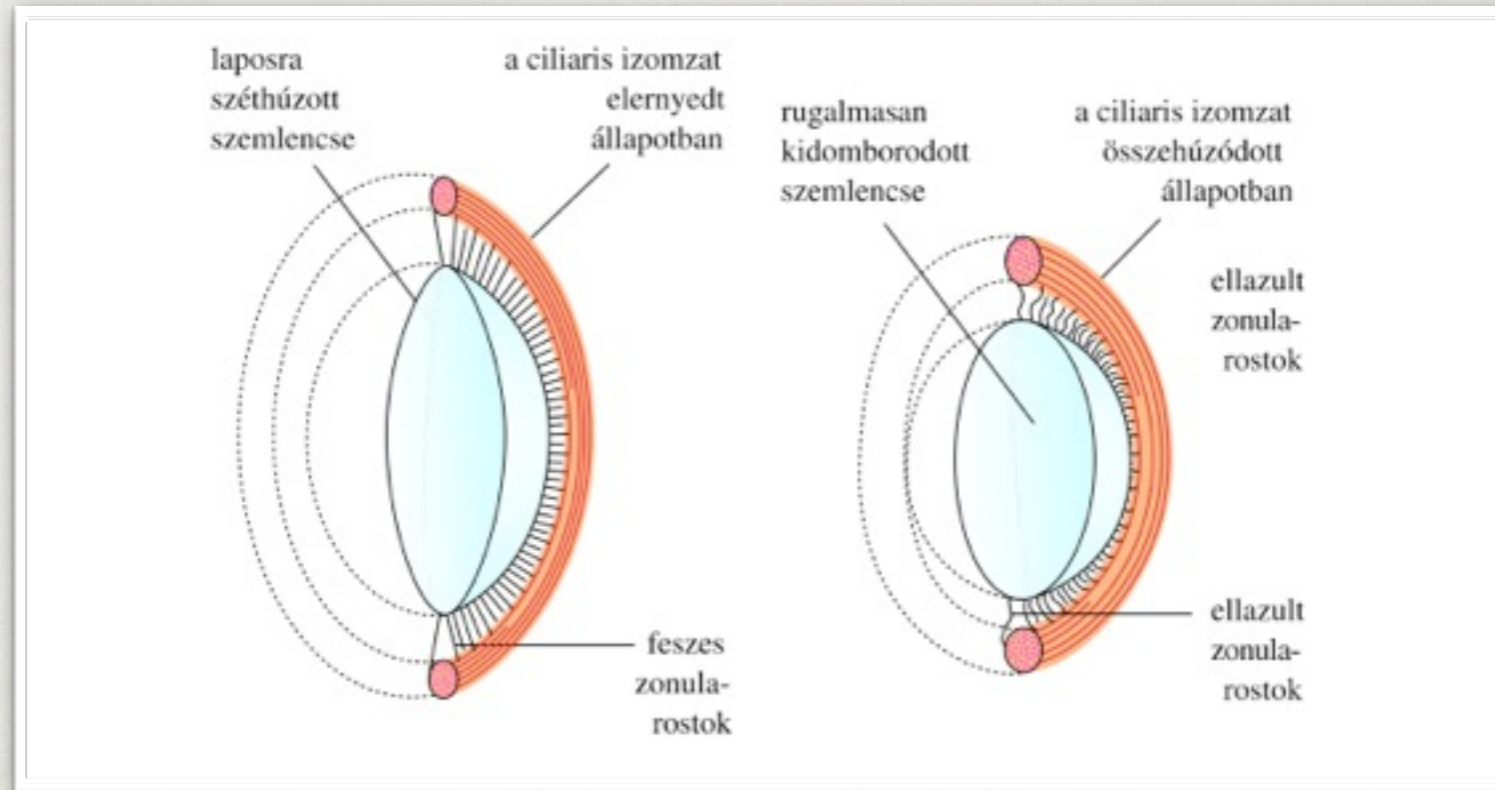
$$D = \frac{n - n'}{r}$$

n-n'=törőközegek

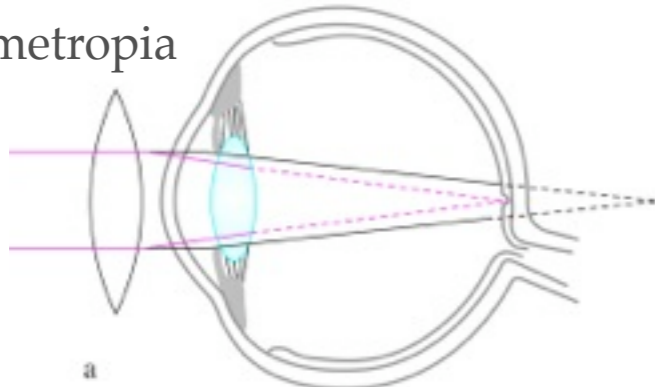
törésmutatókülönbsége

r=törőfelület görbületi sugara

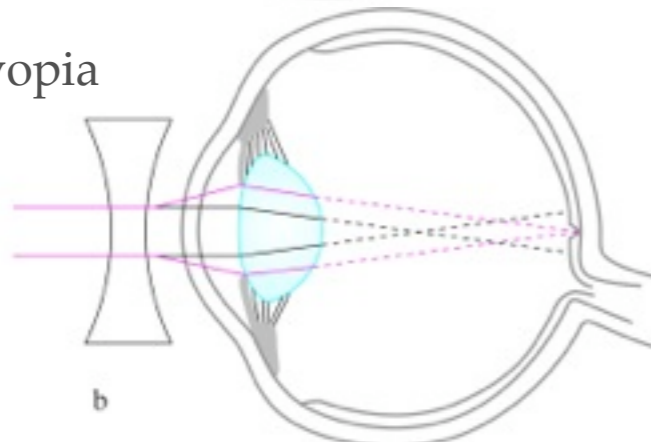
Akkomodáció és törési hibák



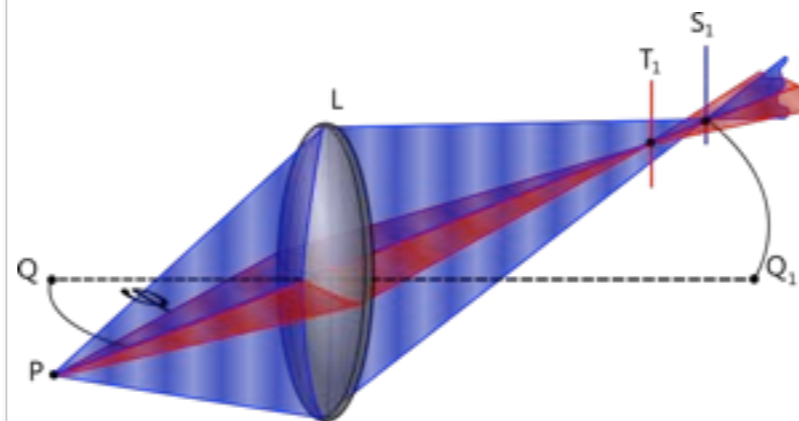
Hypermetropia



Myopia

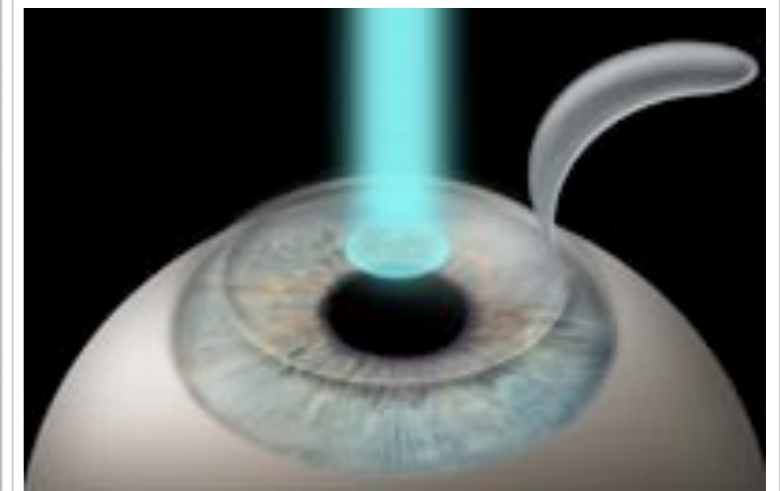


Astigmatismus



Korrektio cilindrikus lencsével

LASIK
(Laser Assisted In Situ
Keratomileusis)




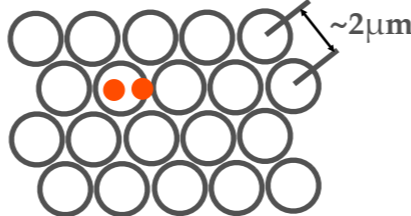


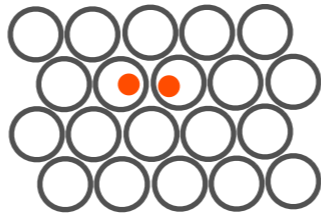


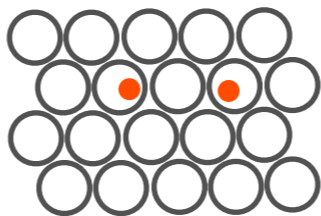

A szem feloldóképesége

Látószöghatár: az a legkisebb látószög, amelynél két különálló pontot meg tudunk különböztetni egymástól.

Egészséges szem esetében: 1'

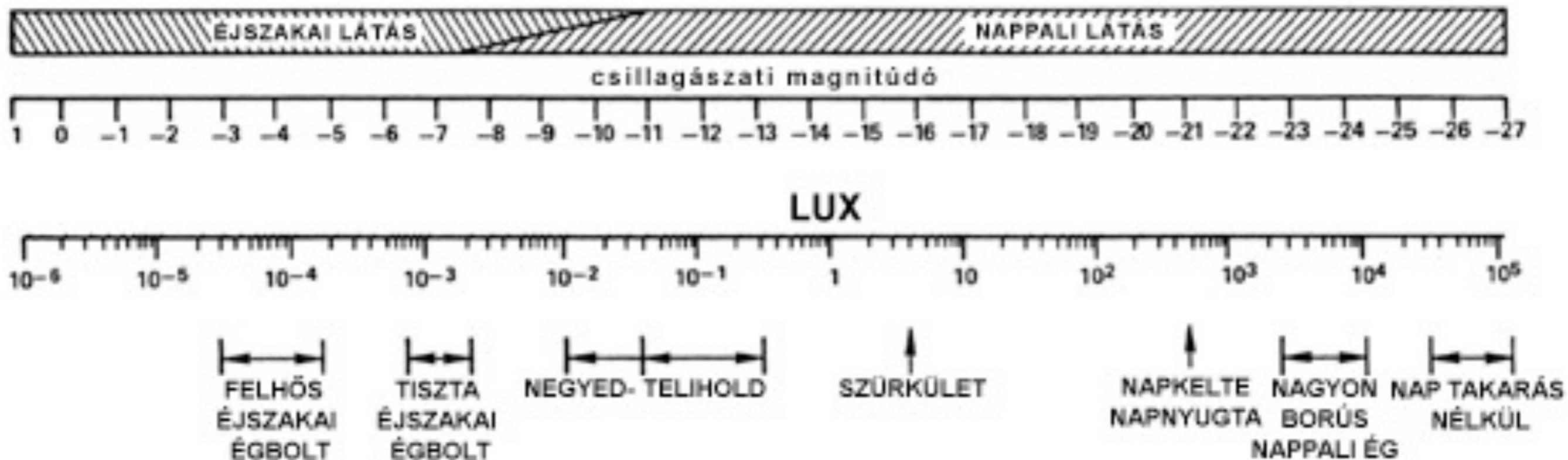
$$\text{látásélesség} = \frac{1'}{\alpha} 100\% \quad \alpha = \text{kísérleti látószöghatár}$$

A feloldóképeségnek hullámoptikai (diffrakció) és biológiai (receptorsűrűség) korlátai vannak. Az emberi szemben ezek egybeesnek.

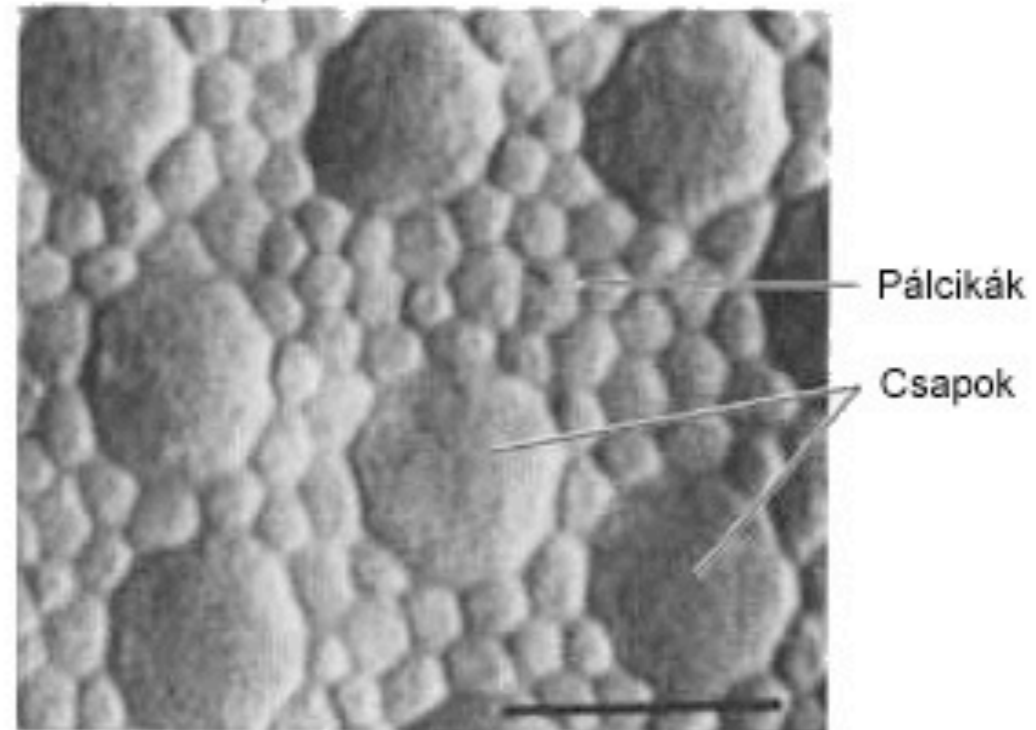
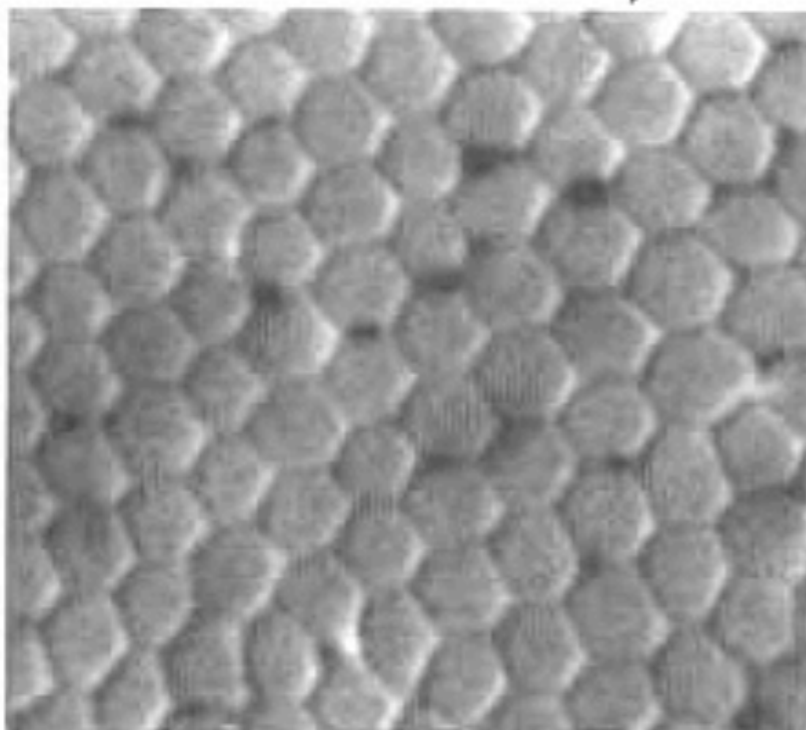
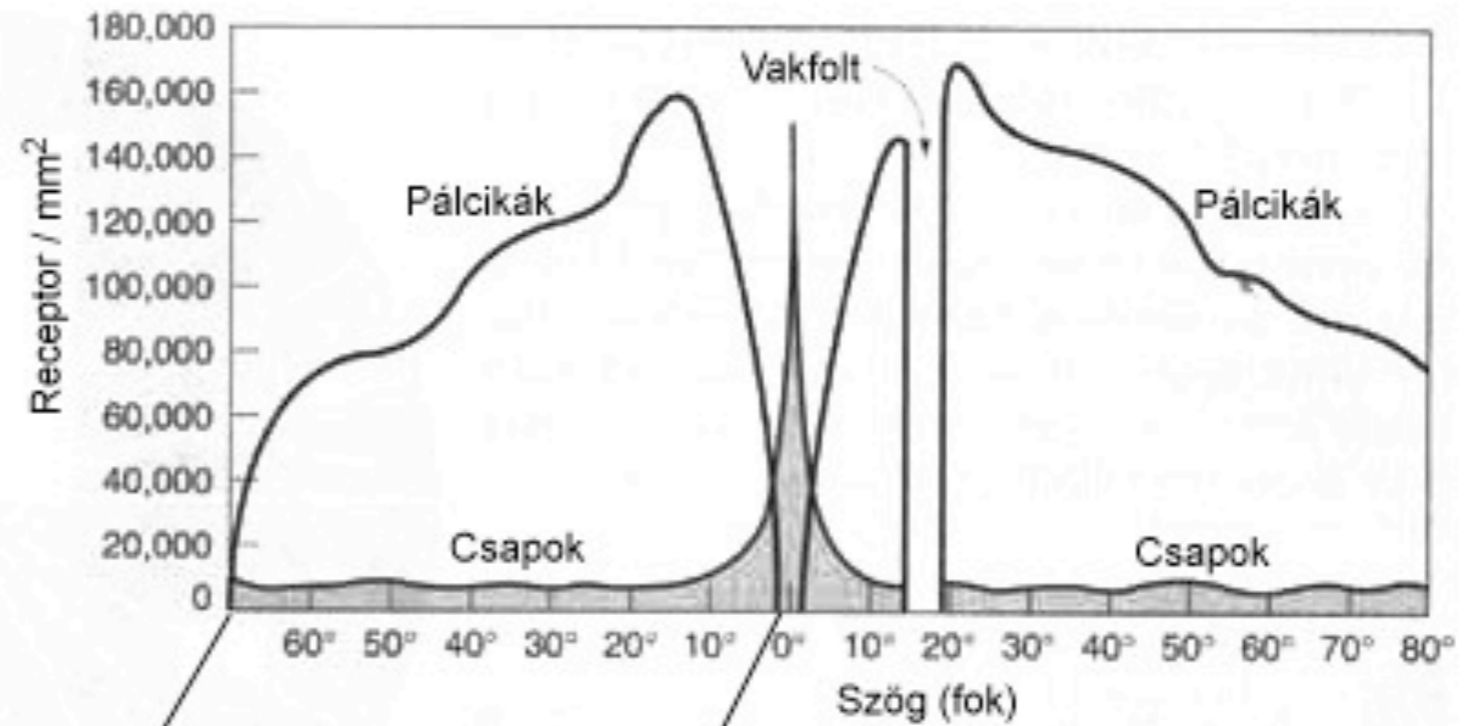
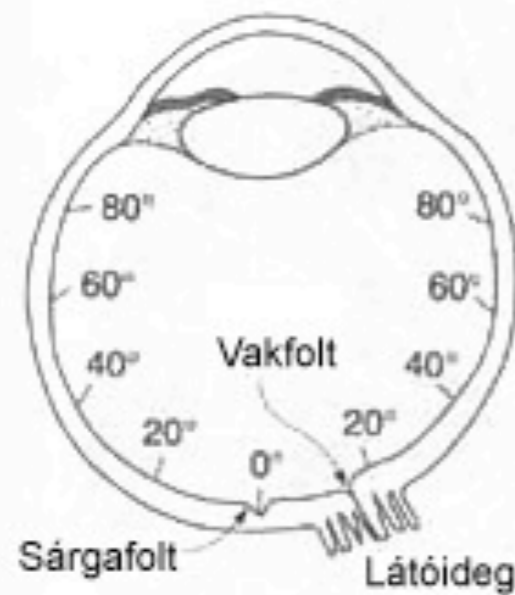
Tárgy	Receptorokra eső kép	Látásérzet
		
		
		

Látási ingerület kialakulása

A szem érzékenysége



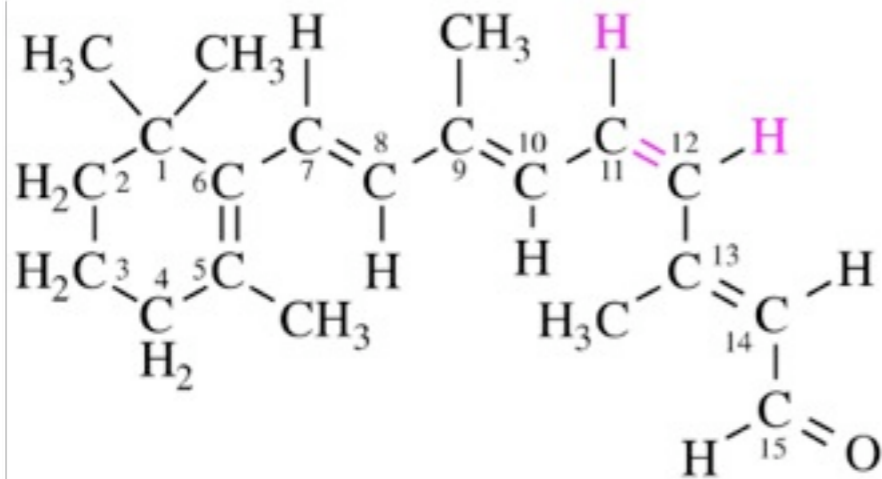
Fotoreceptor eloszlás a retinán



A receptorsejtek tulajdonságai

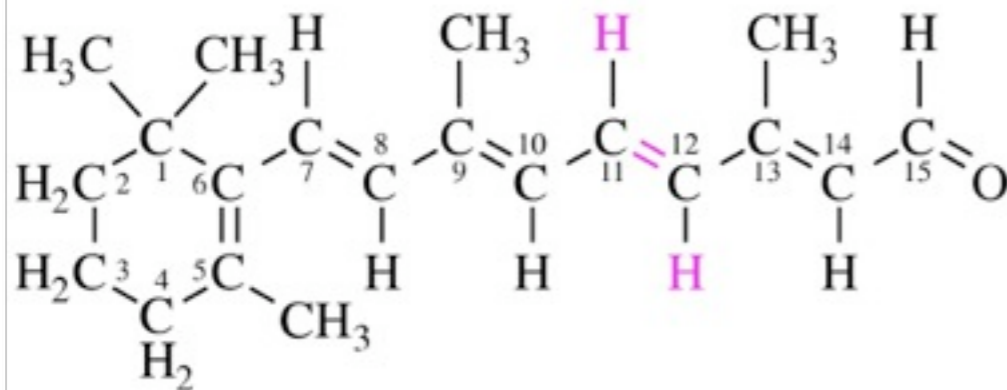
Pálcika	Csap
Kis fényintenzitást képes érzékelni (optimális esetben akár 1 fotont!)	Kevésbé érzékeny, de nagy intenzitástartományban érzékel
Közepes fényerősségnél válasza telítődik	Nincs telítődés
Főleg a retina perifériáján található	Foveában, főleg fovea centralis
Egy ganglionnak több pálcika adja át az ingerületet (nagyobb érzékenység, kisebb térbeli felbontás)	Kevésbé konvergáló idegi kapcsolatok (jobb térbeli felbontás)
Nem érzékel színeket	Színérzékeny

Fotokémiai reakció



11-cisz-retinál

fénygerjesztés



all-transz-retinál

1 rodopszin elnyel 1 fotont



500 transzducin molekula aktiválódik



500 foszfodiészteráz molekula
aktiválódik, és



10^5 cGMP molekulát hidrolizál



250 Na^+ -csatorna bezáródik



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

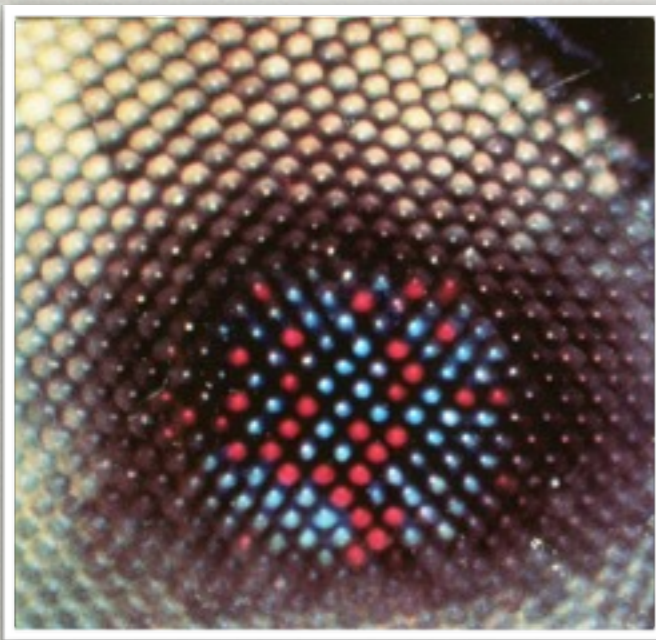


a sejt hiperpolarizálódik (1 mV)



a transzmitterleadás csökken (glutamát:
gátló neurotranszmitter).

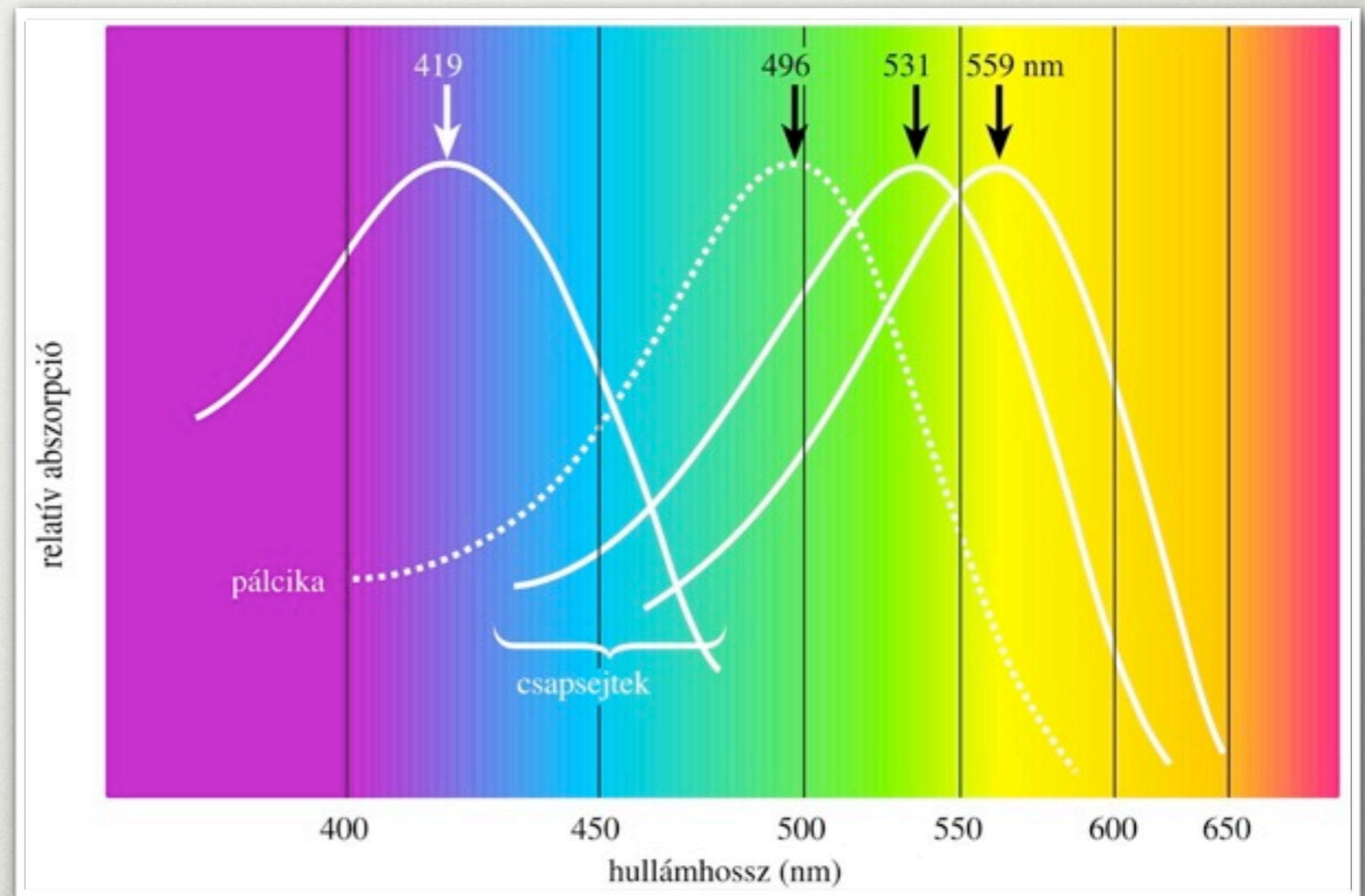
A színérzékelés alapja



Fényvisszaverődés egy pillangó retinájáról. A különböző receptorok más-más színt vernek vissza.



Emberben: 3 típusú receptor, mindegyik más színtartományt érzékel, azaz más színeket nyel el (R=64%, G=32%, B=2%).

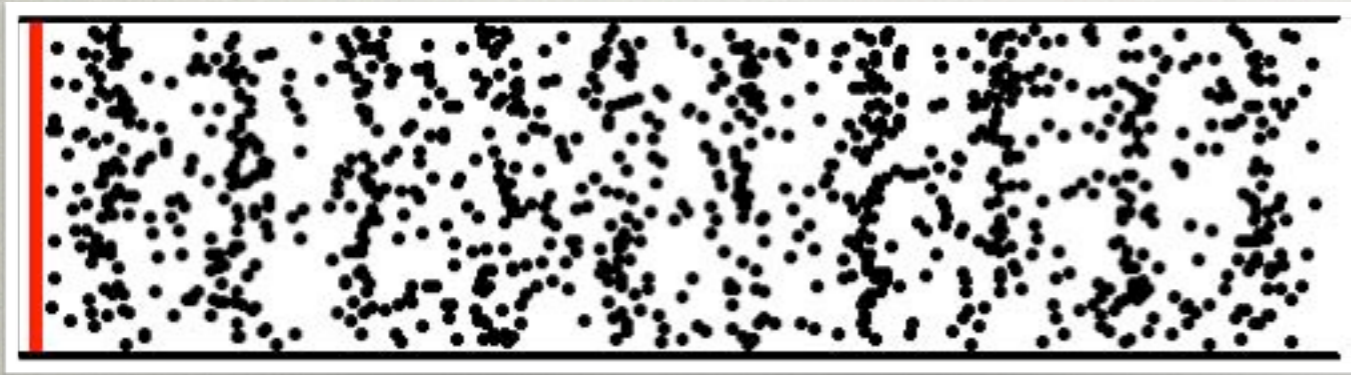
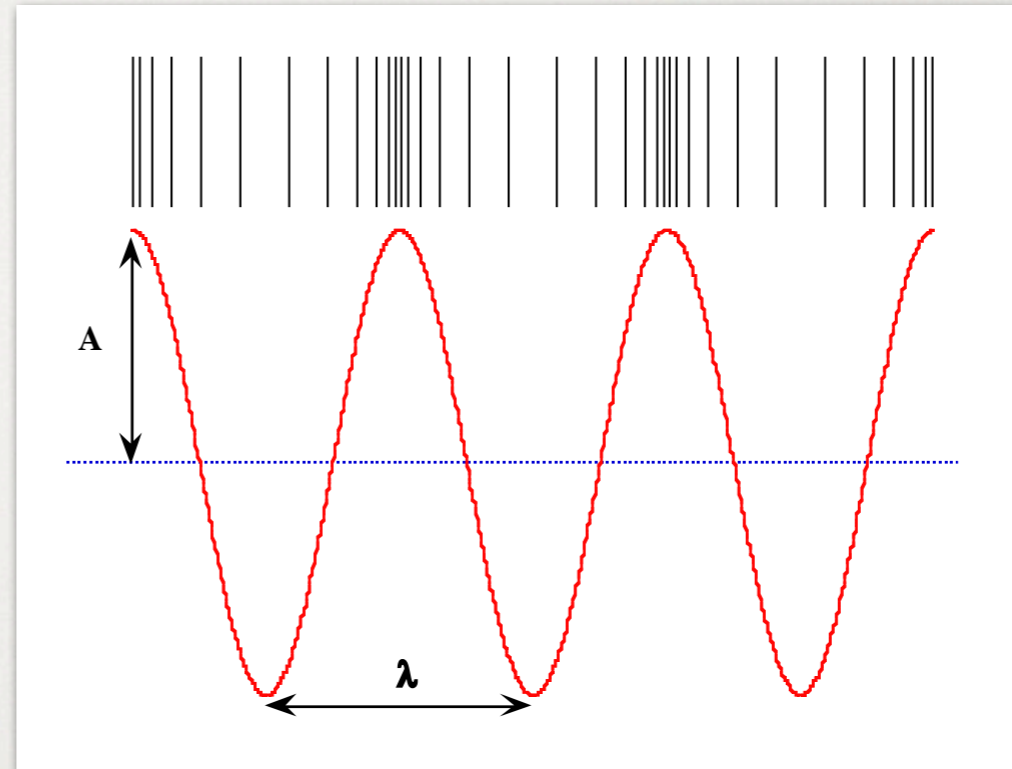


$$X = rR + gG + bB$$

A HALLÁS BIOFIZIKÁJA

Inger: hang

Longitudinális
mechanikai hullám
(nyomáshullám)



Longitudinális hullám



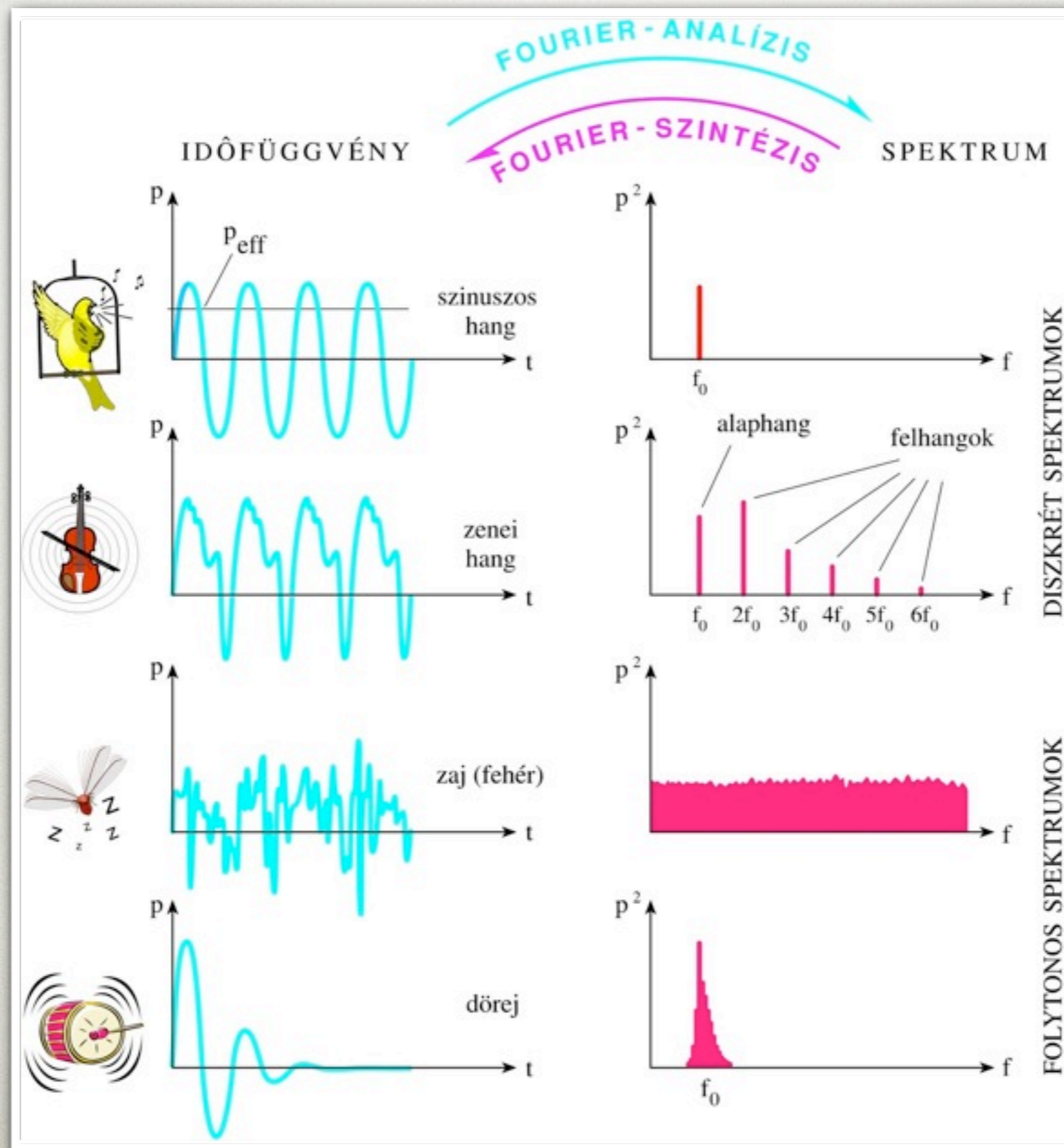
Tranzverzális hullám

Harmonikus rezgés:

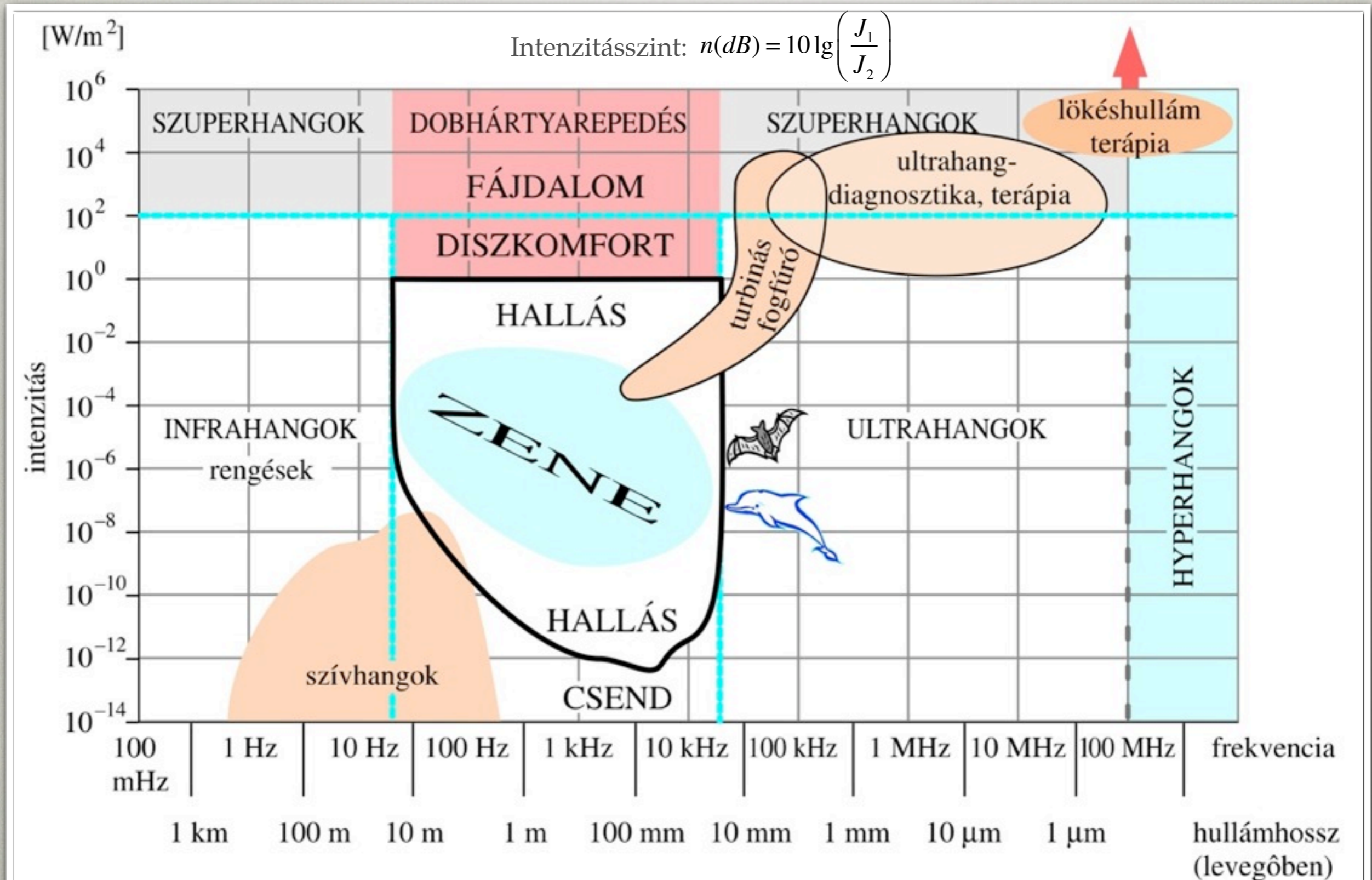
$$y(t) = A \sin(ft + \varphi)$$

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

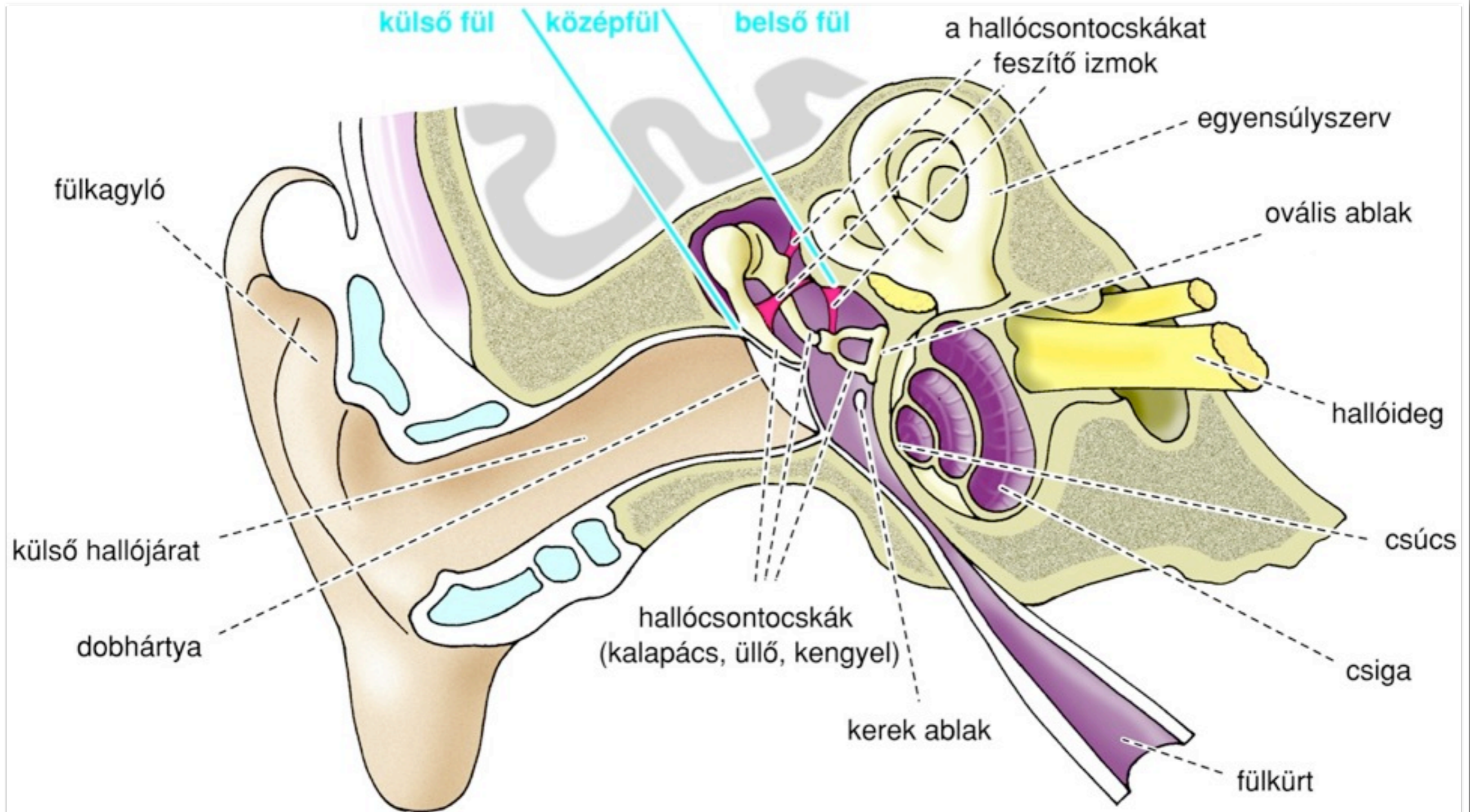
Hangok és spektrumaik



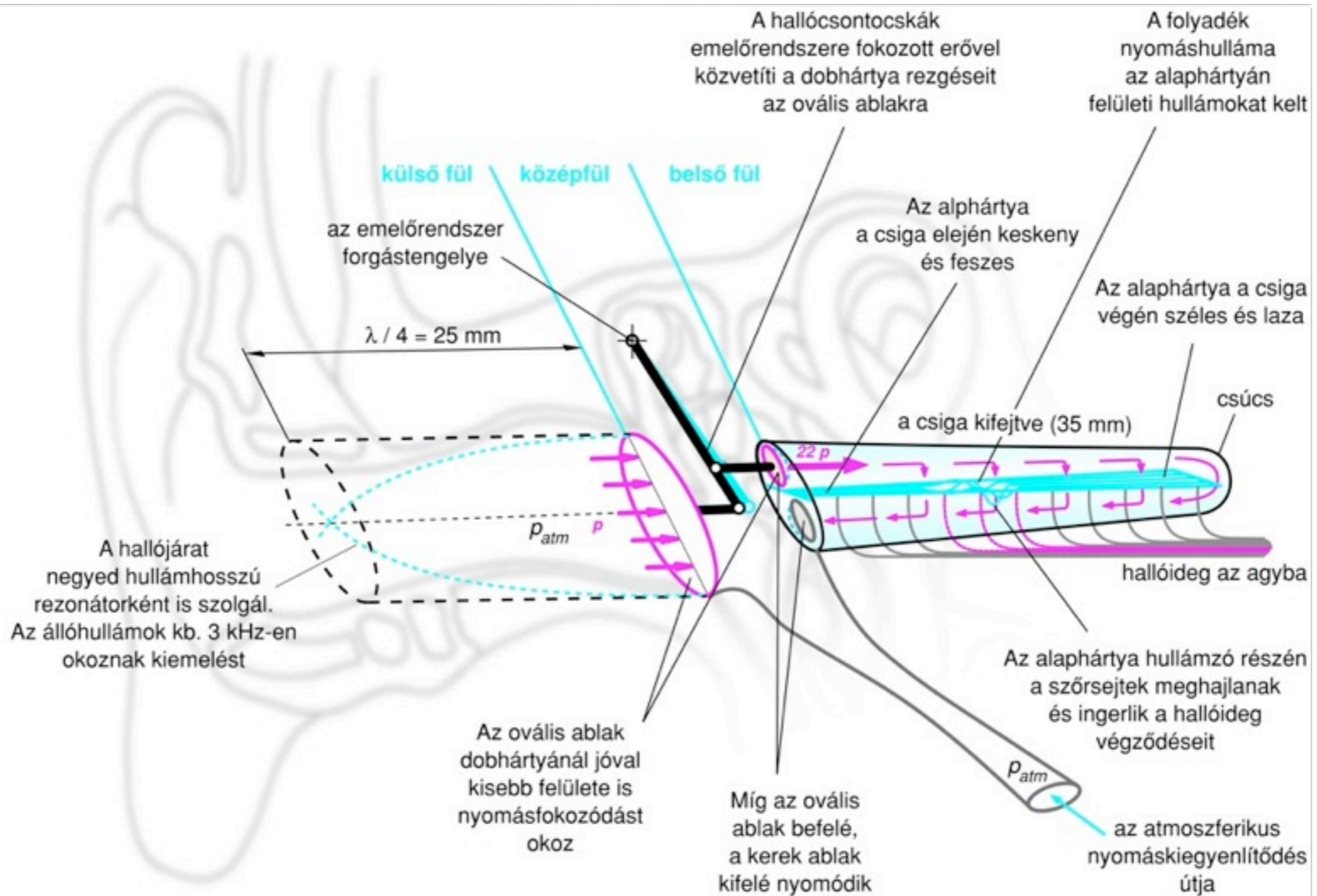
Hangok frekvenciája és intenzitása



“Receptor-szerv”: fül



A fül egyszerűsített vázlatja



Külső fül: hanggyűjtő

Fülkagyló

A hangot a hallójáratba tereli.

Hallójárat

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

Dobhártya

A hang által rezgésbe jön.

A középfül: mechanikai erősítő

Hallócsontocskák

(kalapács, üllő, kengyel)

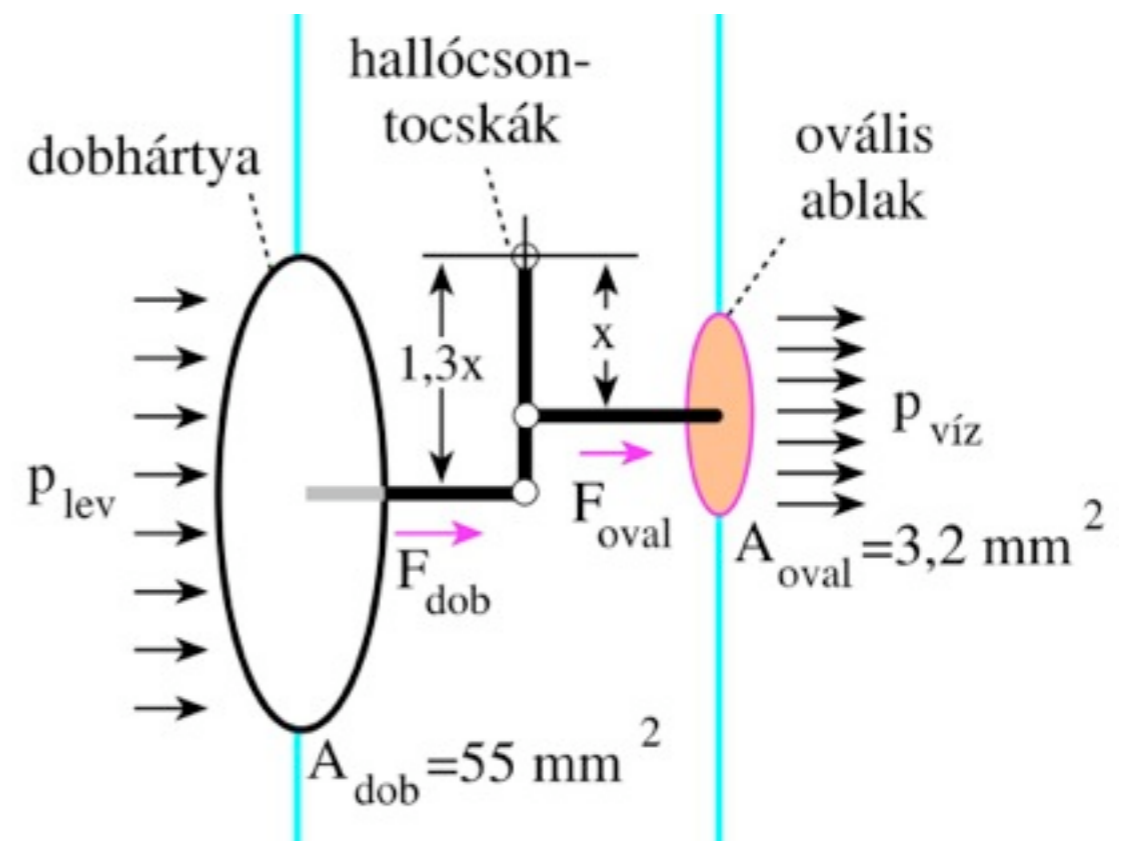
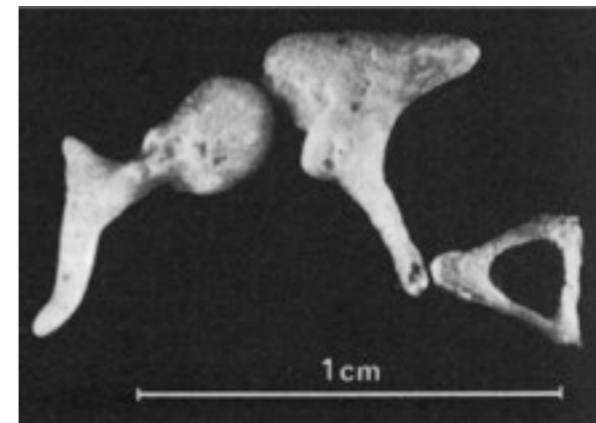
A dobhártya rezgését felerősítik, és átviszik az ovális ablakra.

Erősítés:

kisebb felületre koncentrált rezgések: $17 \times$

emelőszerű működés: $1,3 \times$

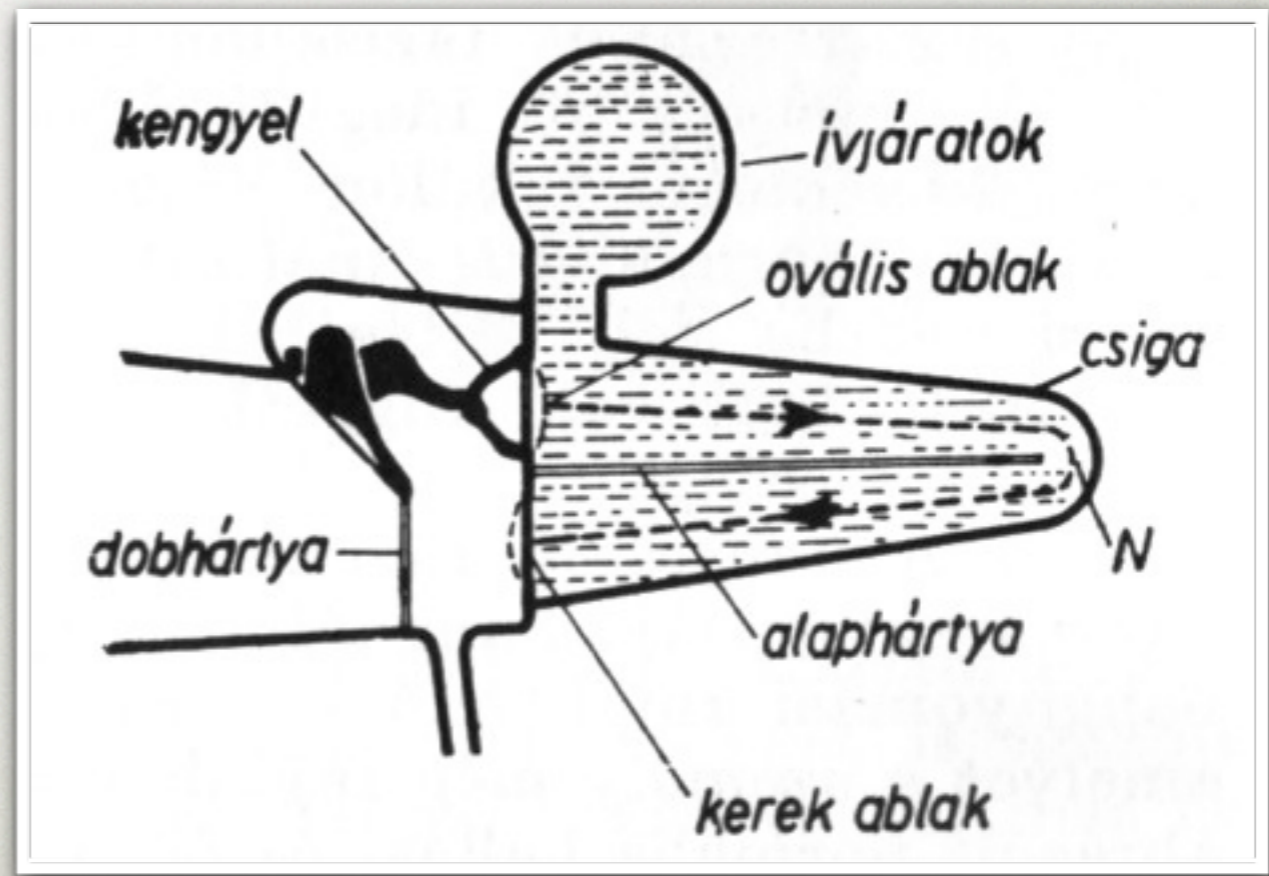
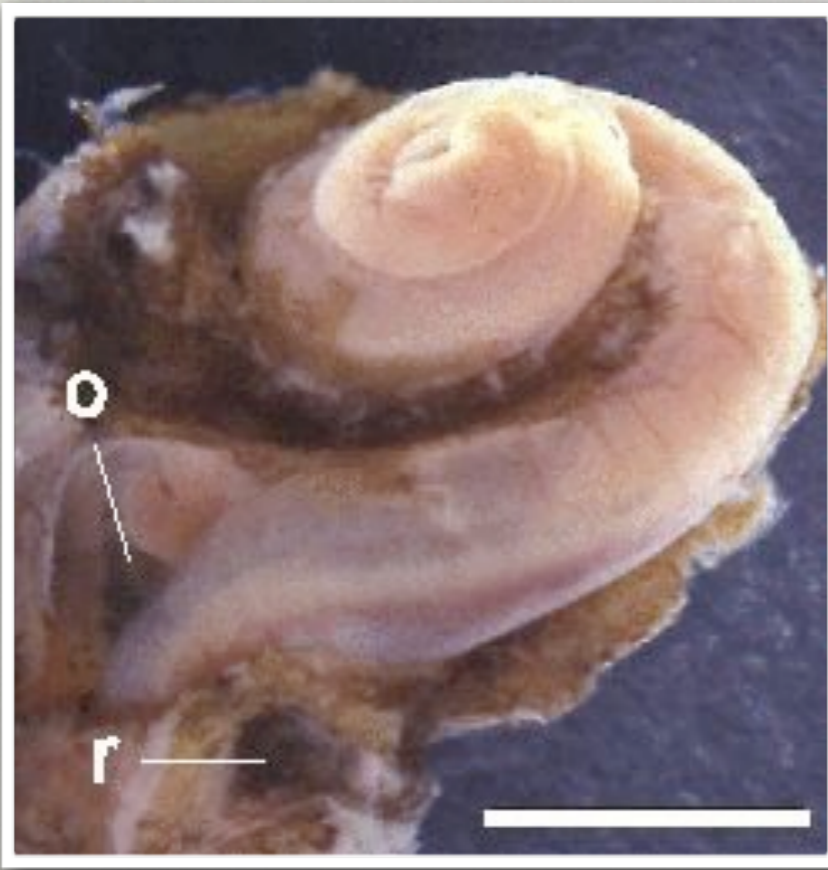
Összesen kb. $22 \times$
nyomásnövekedés



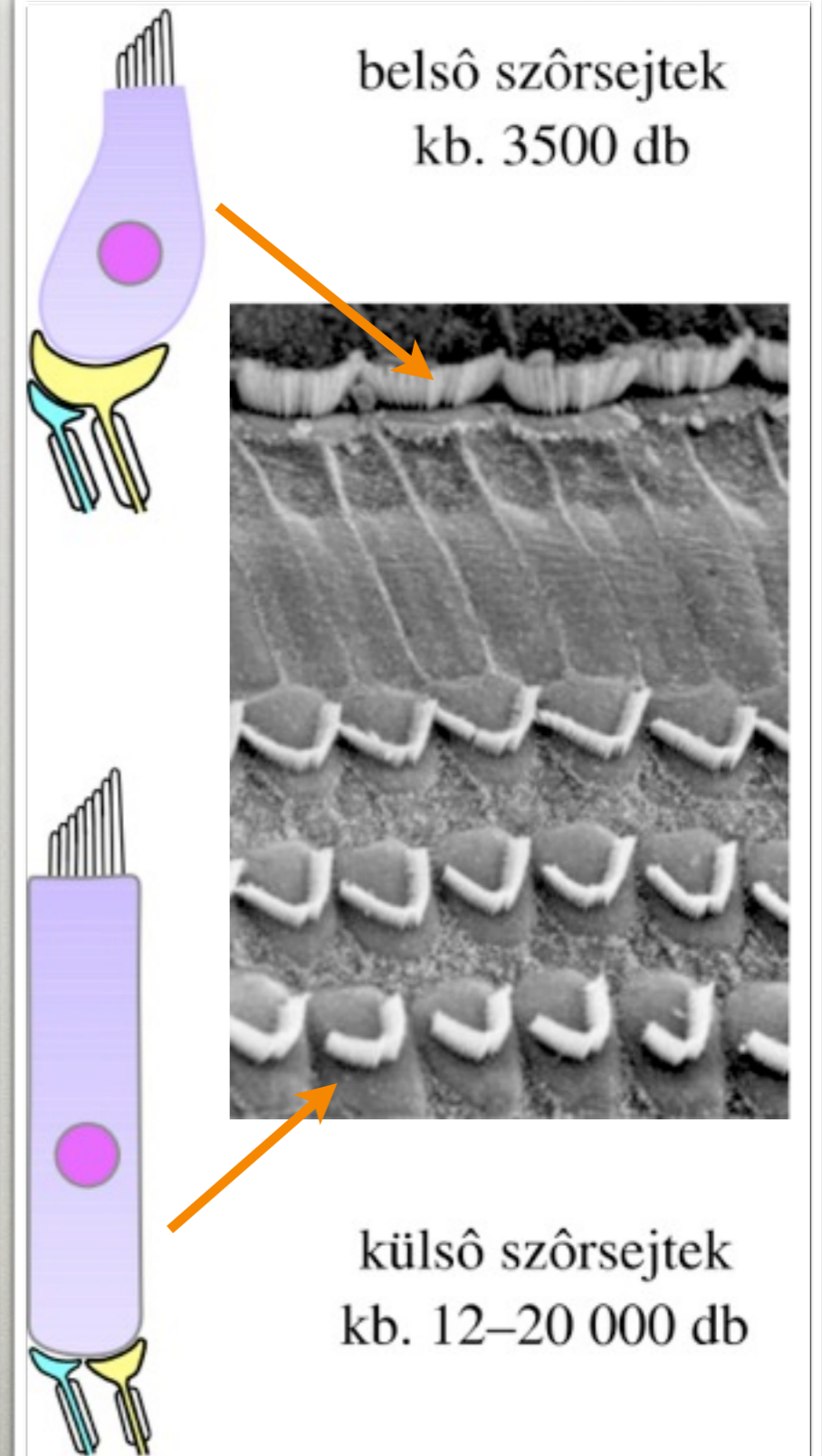
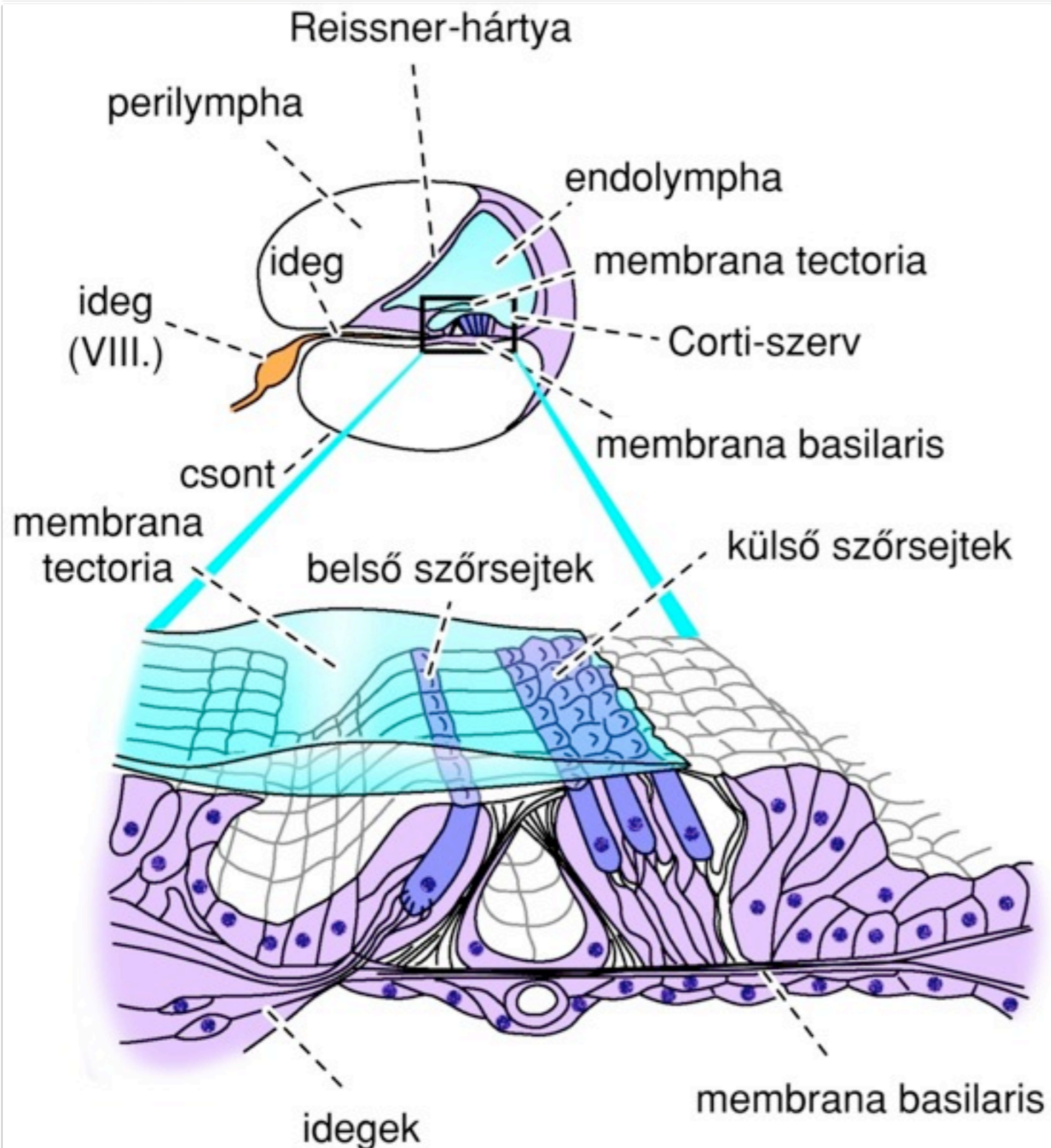
A belső fül: szenzor

Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

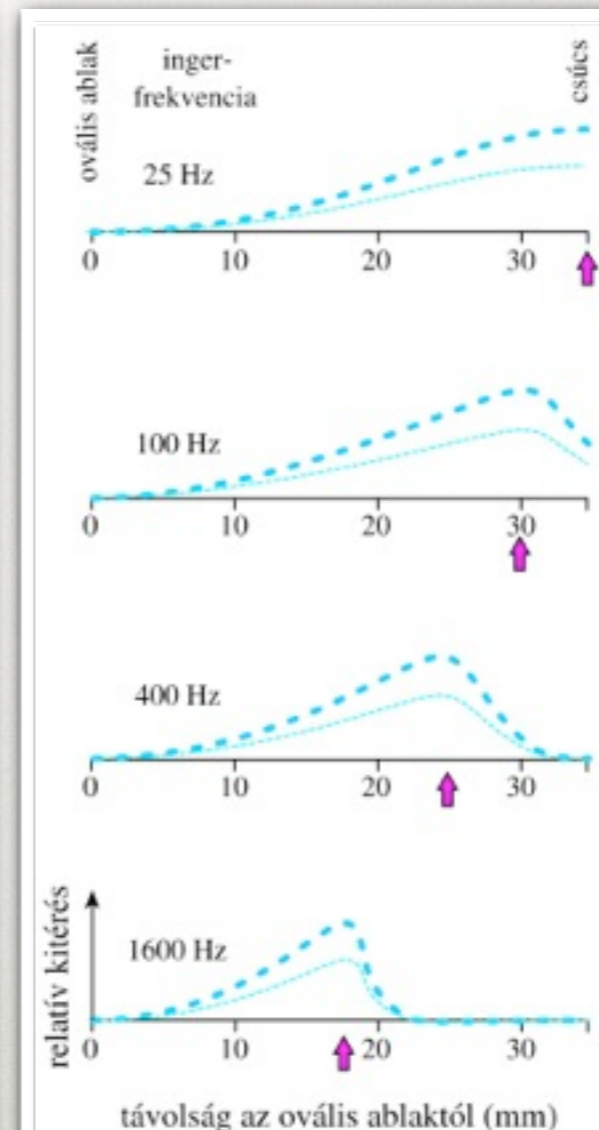
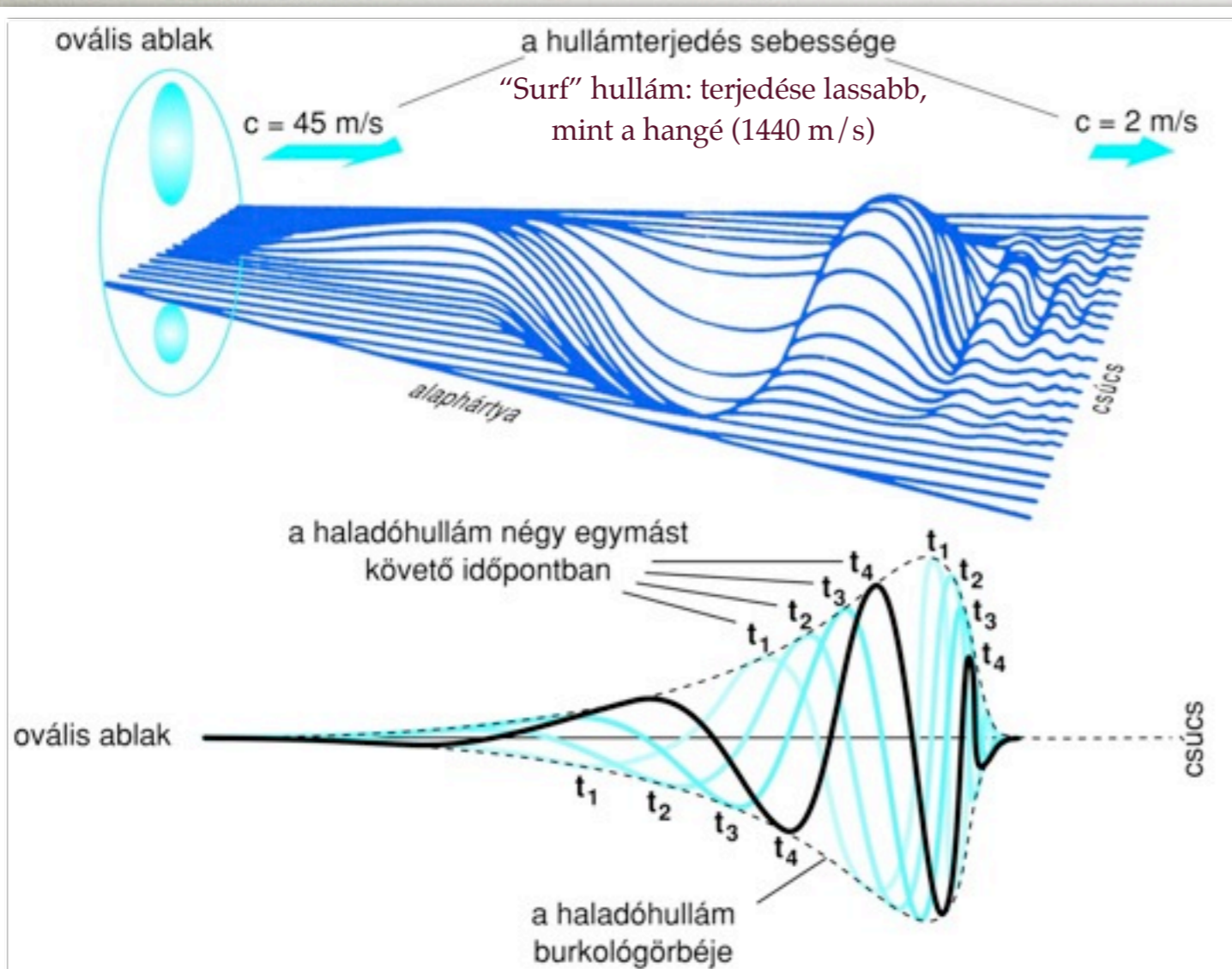
Csiga (cochlea): 2,5 menetű, 35 mm hosszú folyadékkal teli csatorna. Hosszában a részben csontos, részben hártyaszerű fal, az *alaphártya* (membrana basilaris) osztja ketté. A hang érzékelését végzi.



A belső fül finomszerkezete



Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán

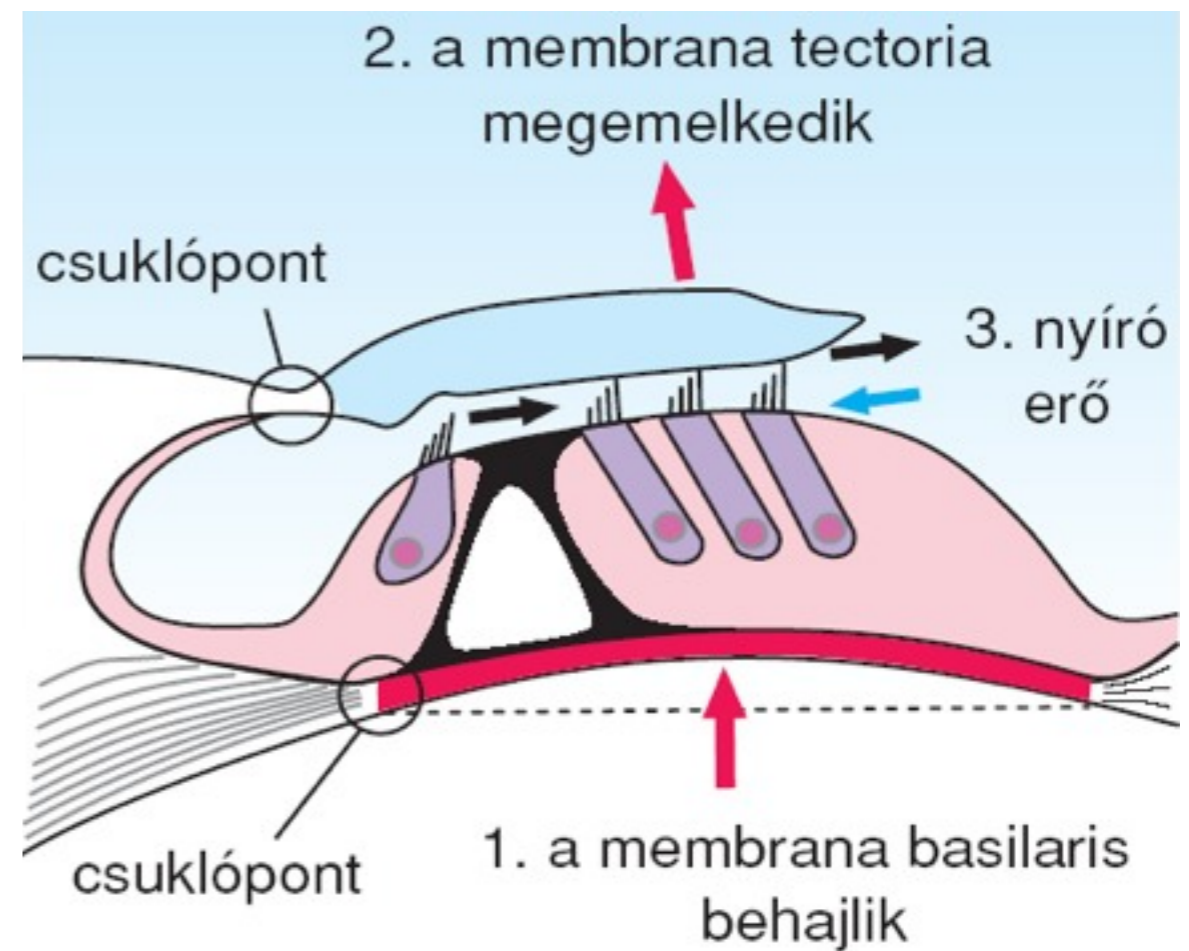
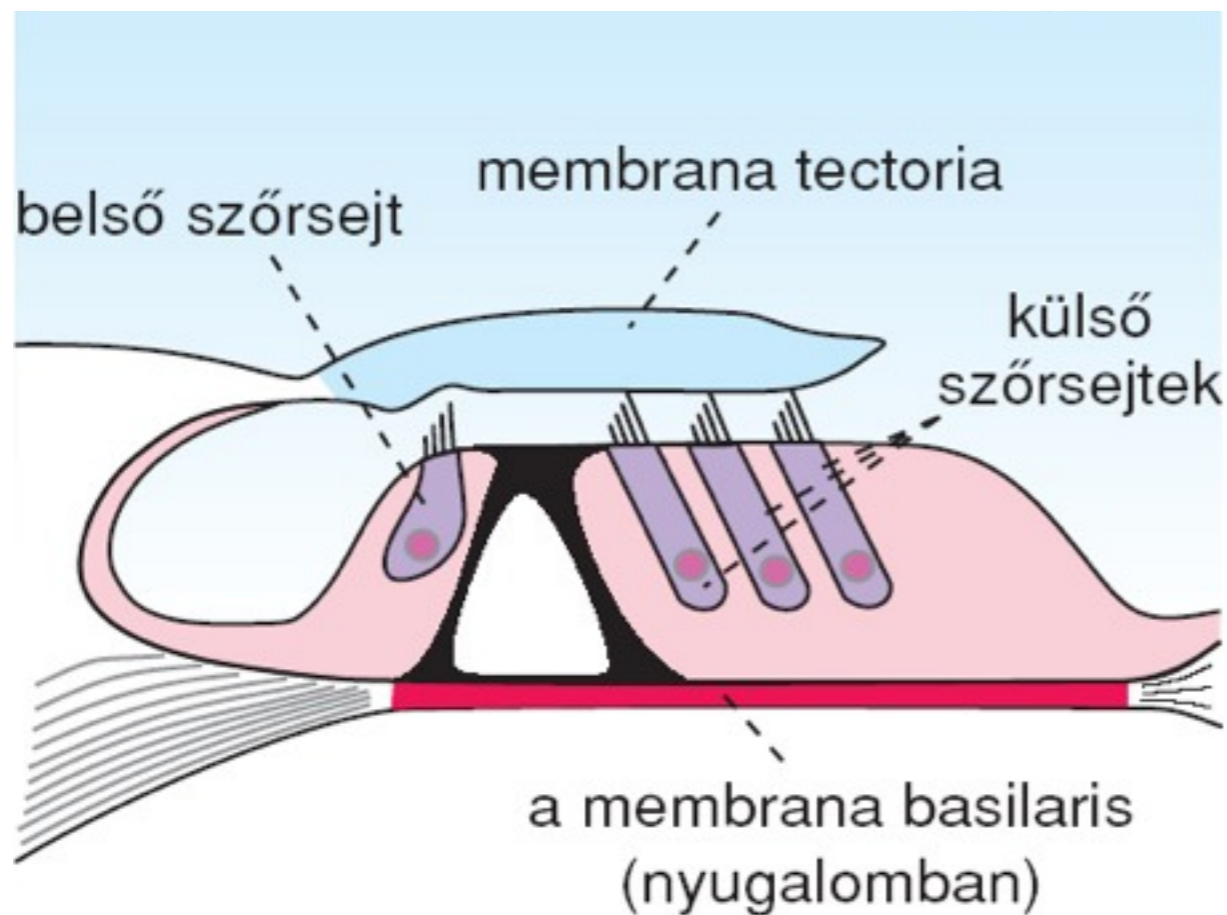


Békésy György
Nobel-díj 1961

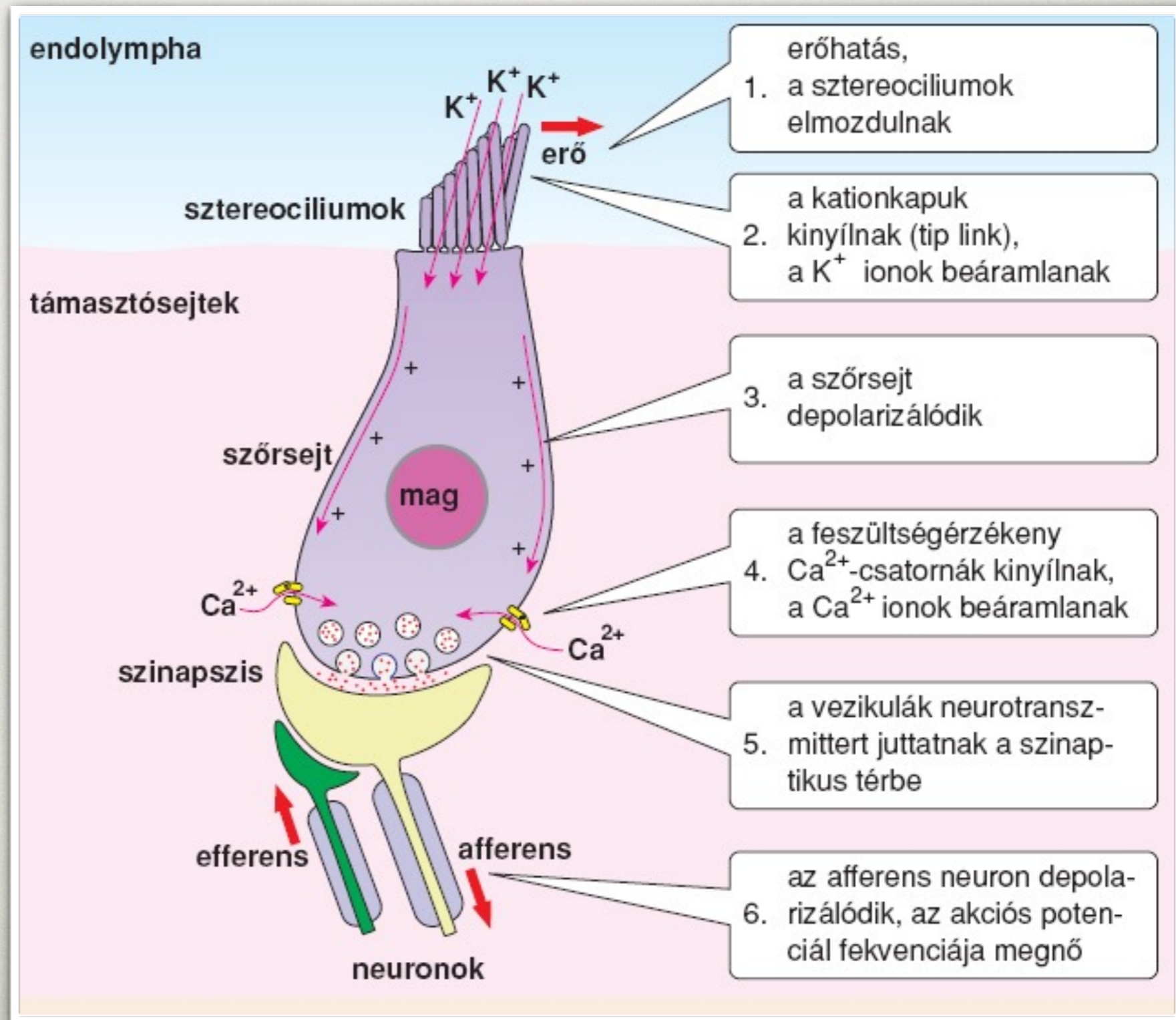
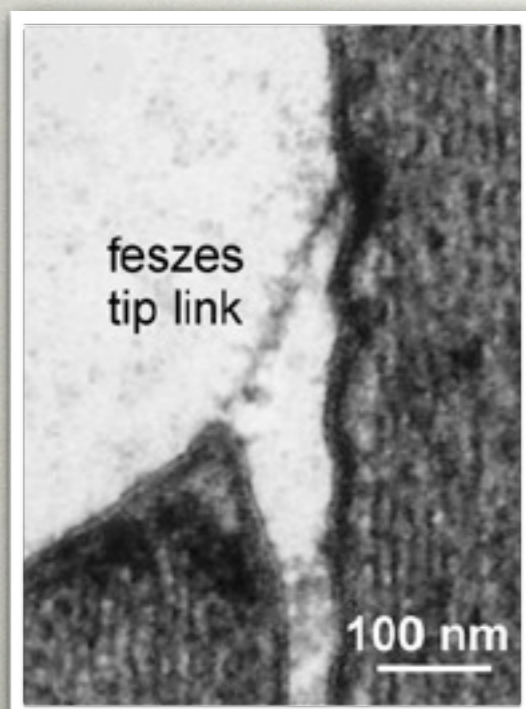
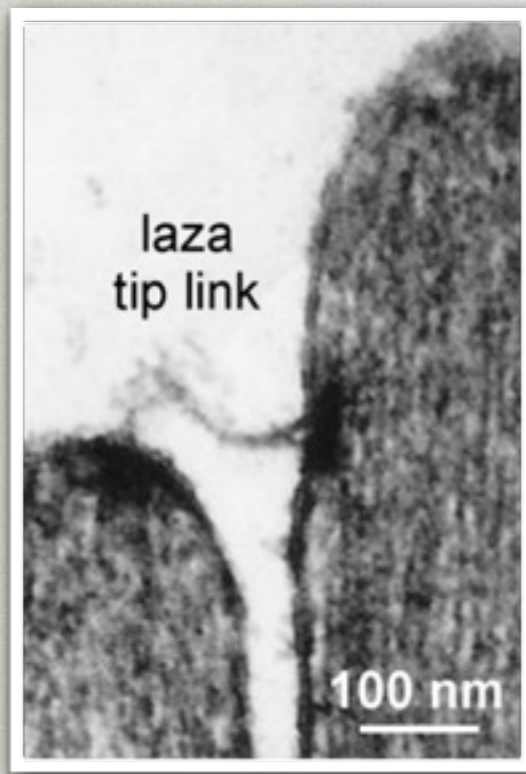
A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

A Corti-féle szerv működése

A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt megdőlnek és depolarizálódnak.



Belső szőrsejtek: Mechanoelektromos transzdukció



PASSZÍV VERSUS AKTÍV DETEKTÁLÁS

Passzív detektálás (Probléma, hogy túl nagy a csillapítás)

- H. Helmholtz (1857): húrok rezonálnak.
- Békésy Gy. (1930-40-es évek): az alapmembrán rezeg (pozíciókódolás).

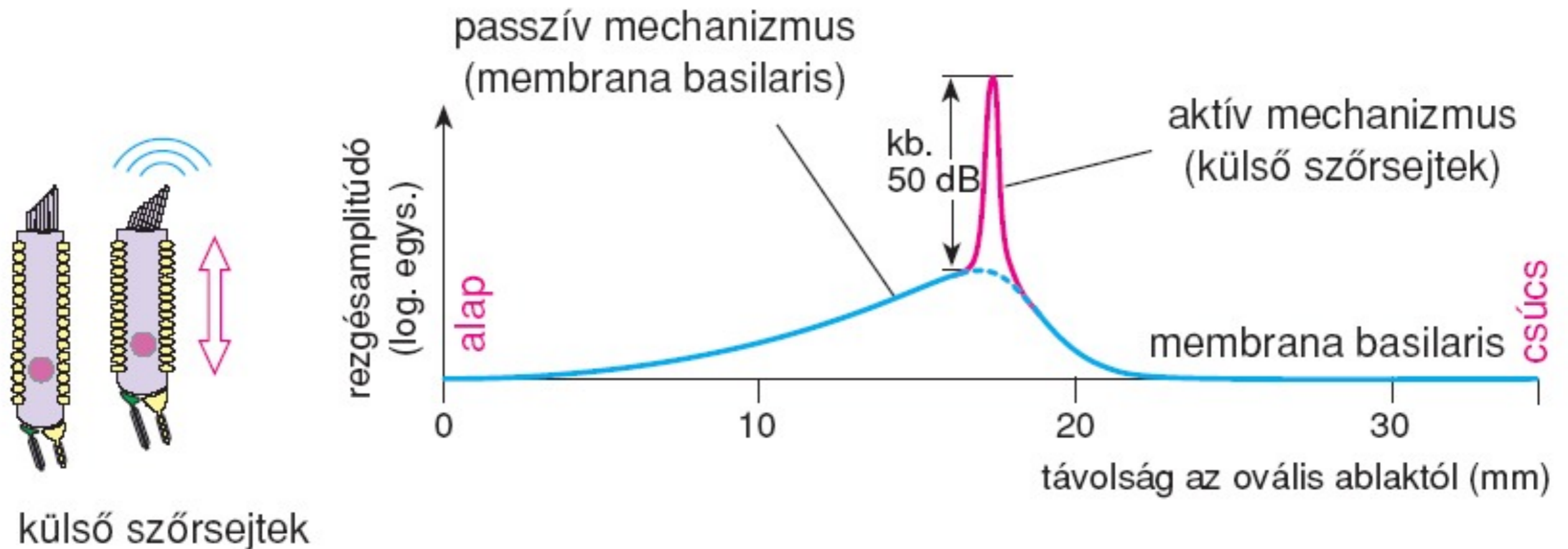
Aktív detektálás (Energia bepumpálása a detektálás frekvenciáján)

- 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).

A kritikus pontba hangolva a hallószőrök nagyon érzékennyé válnak a kis jelekre (hasonlóan a kihajlás jelenségéhez a kritikus nyomóerőnél).



Külső szőrsejtek: erősítők



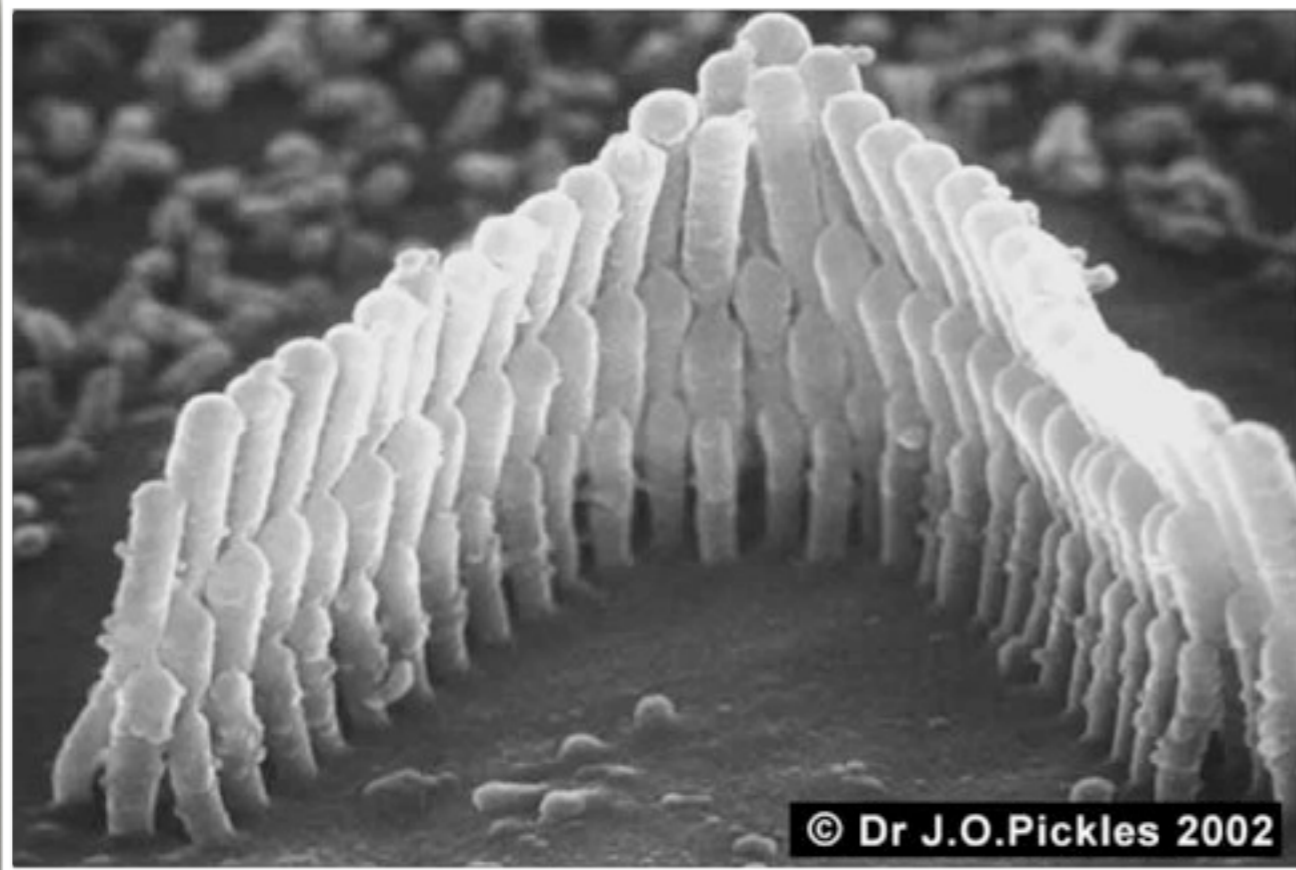
Regeneratív erősítő: pozitív visszacsatolási mechanizmus (szűk frekvencia tartományban nagy erősítés, de csak a disszipálódott energiát pótolja; egyébként fülcsengés jönne létre)

Külső szőrsejtek erősítő funkciója

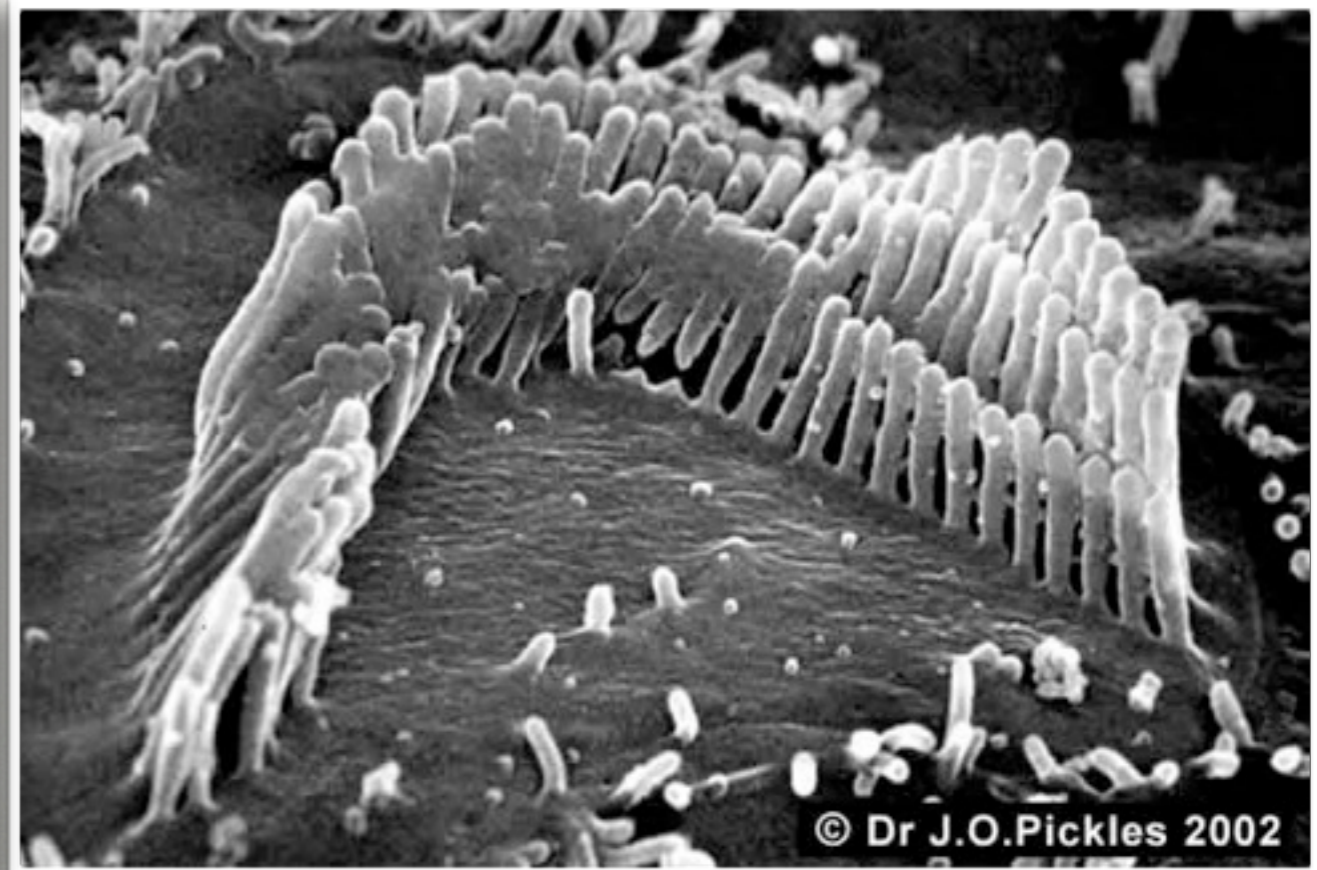


Felelős fehérje - **prestín**, transzmembrán motorfehérje
mechanoelektromos és elektromechanikus jelátalakítás

HALLÁSKÁROSODÁS



Külső szőrsejtek (normál állapot)



Külső szőrsejtek (károsodott állapot)

Akusztikus információ kódolása

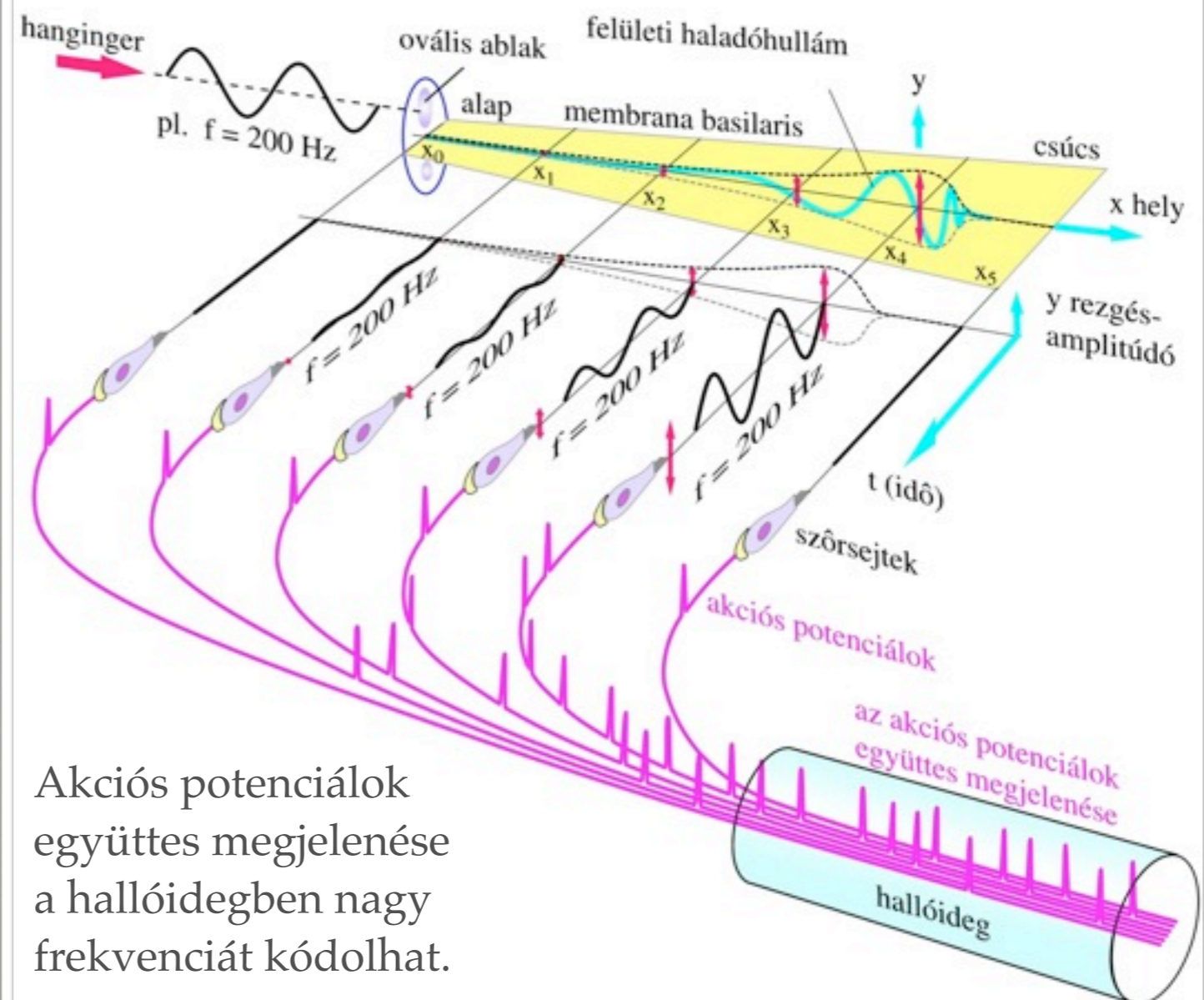
Hely-teória

Frekvencia érzékelés
lokálisan kódolt.

Alapja:

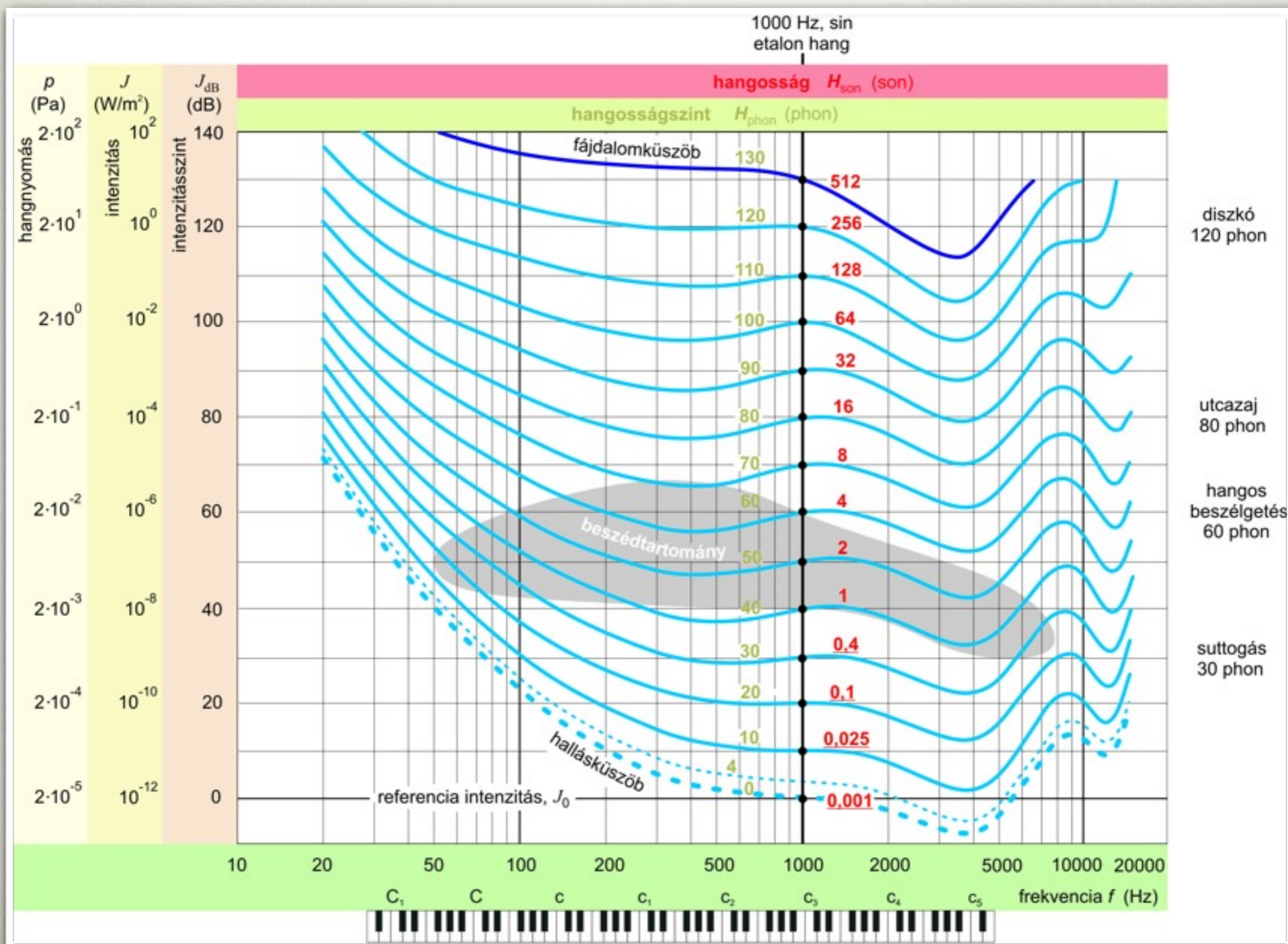
1. A Békésy-féle haladóhullámok amplitúdómaximum-helyeinek gyenge frekvenciafüggése.
2. Aktív erősítés
3. Afferens idegek frekvenciaérzékenysége (küszöbinger a frekvenciától függ).

Röplabdaelmélet

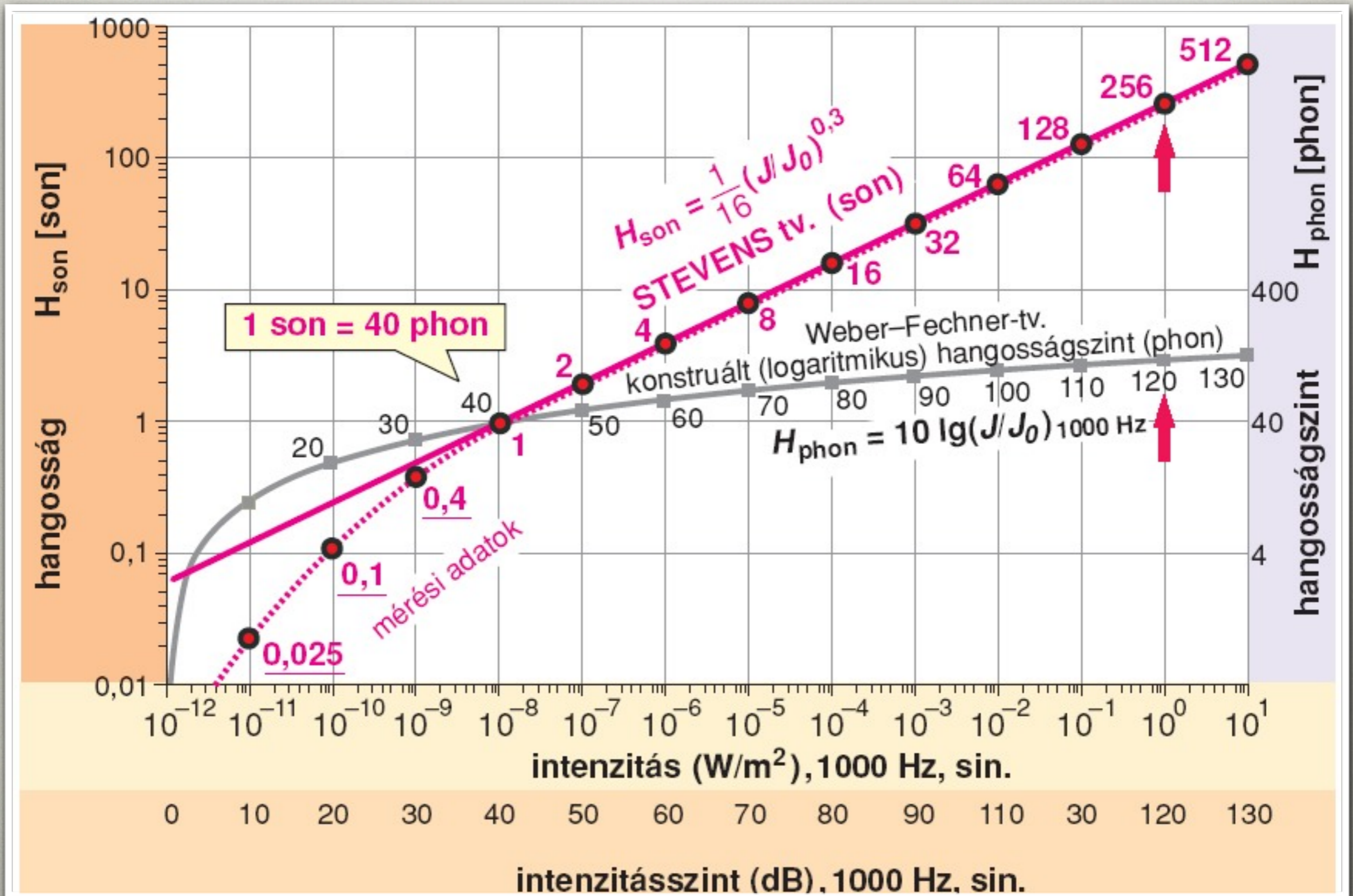


Akciós potenciálok
együttes megjelenése
a hallóidegben nagy
frekvenciát kódolhat.

Pszichoakusztika: hangosság (Fletscher–Munson)

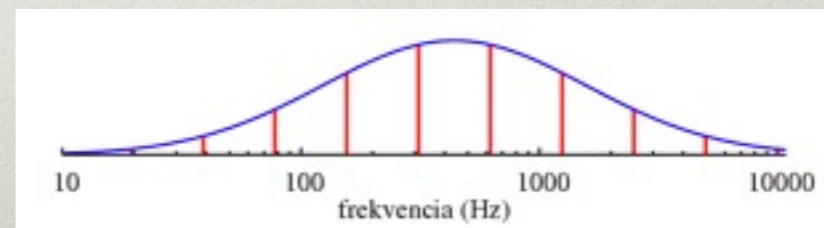
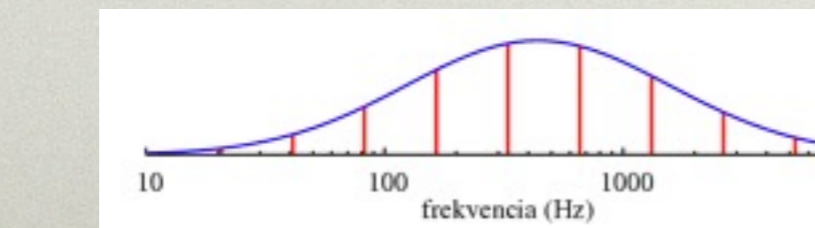
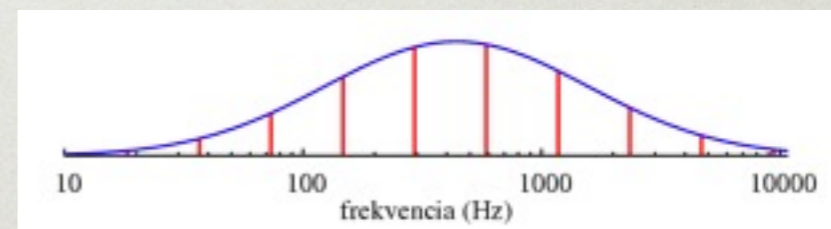
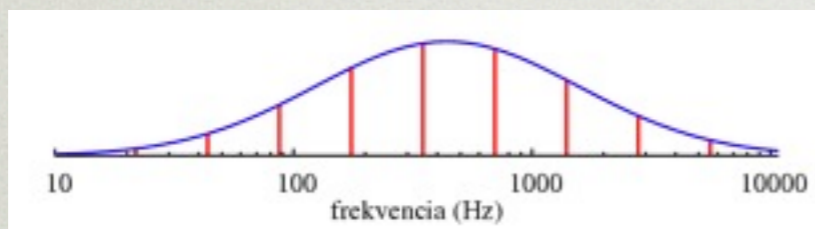
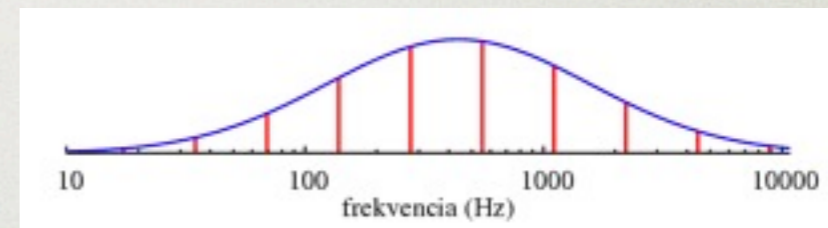
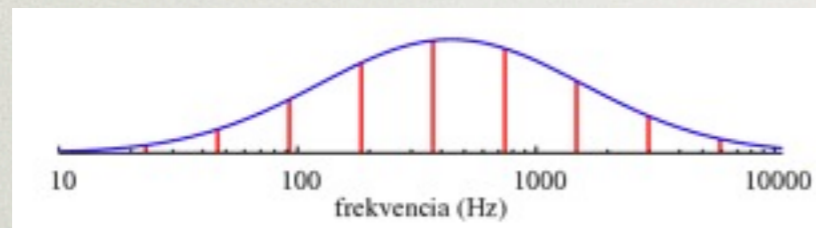
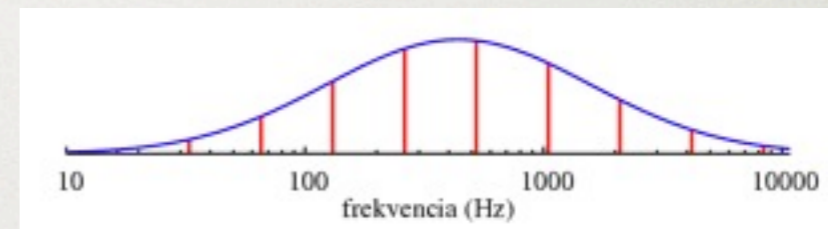
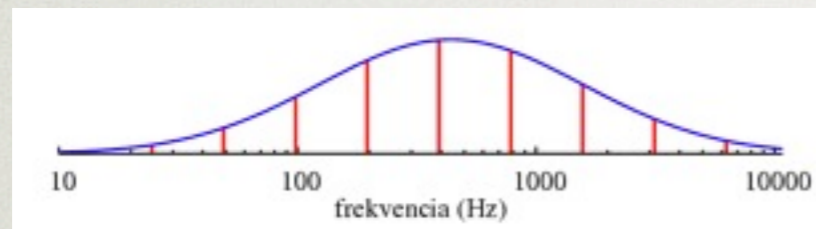
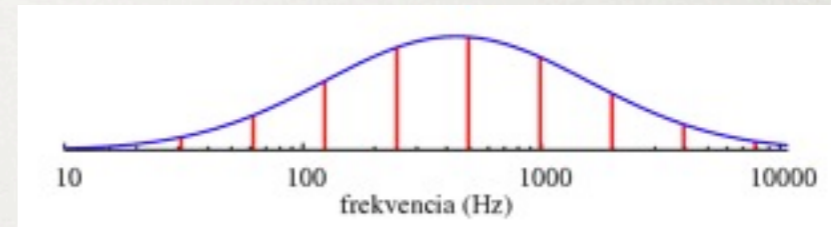
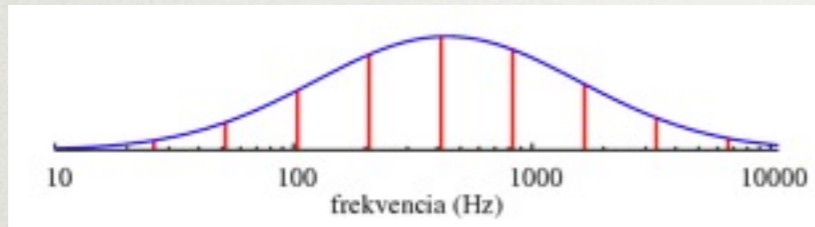
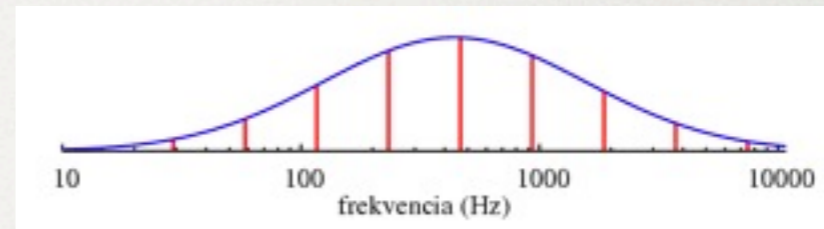
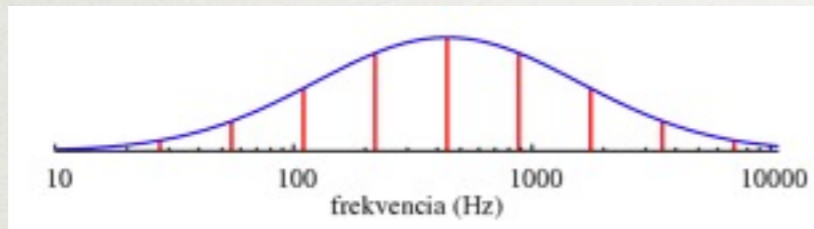


Phon és son skálák



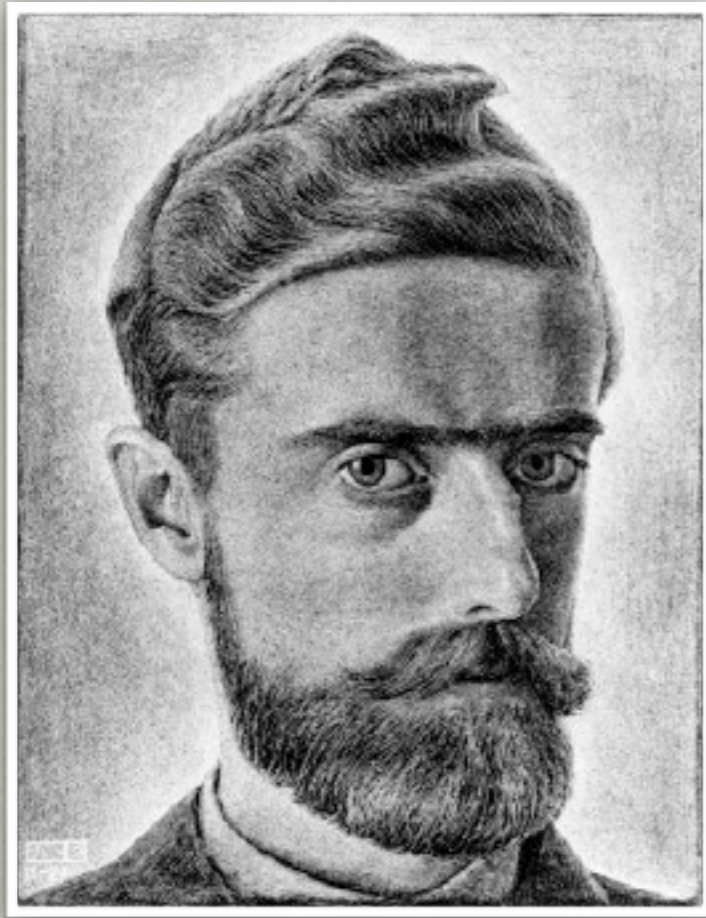
Akusztikus illúzió?

Shepard tónus:
oktávokkal
elválasztott
szinushangok

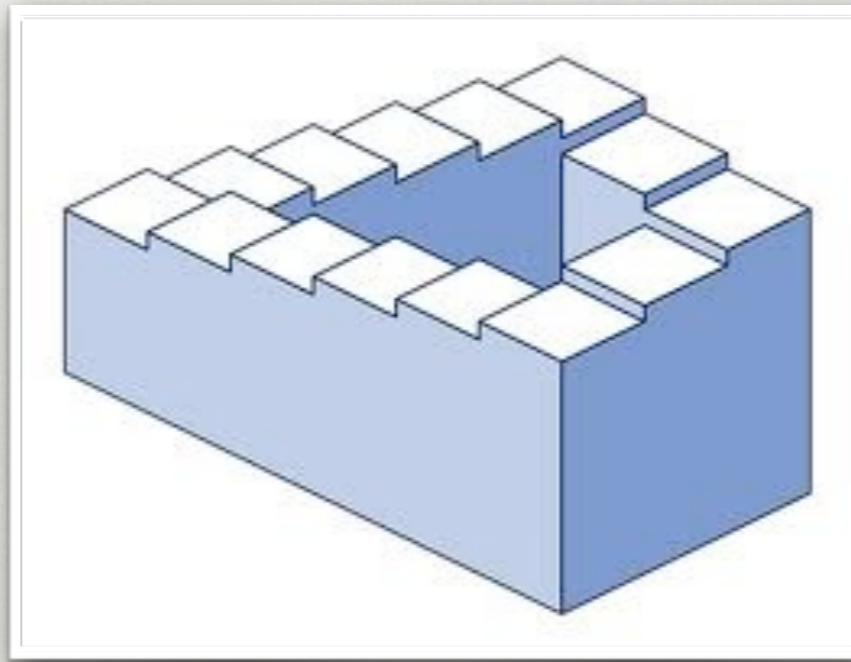


Shepard
skála:
mozgó
alaphang

Akusztikus illúzió?



Maurits Cornelis Escher
(1898-1972)



Escher lépcső

