

ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK BIOFIZIKÁJA LÁTÁS, HALLÁS

KELLERMAYER MIKLÓS

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.

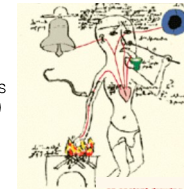
| | Érzésmódáltság | Receptor | Érzékelőszerv |
|----------------|-----------------------------------|---|---|
| Tudatosuló | Látás | Csapok és pálcikák | Szem |
| | Hallás | Szőrsejtek | Fül (Corti-szerv) |
| | Szaglás | Olfaktorikus neuron | Szagló nyálkahártya |
| | Ízlelés | Ízlelőreceptor-sejtek | Ízlelőbimbó |
| | Szögvesztülés | Szőrsejtek | Fül (félkörös ivjartok) |
| | Lineáris gyorsulás | Szőrsejtek | Fül (utrículus és sacculus) |
| | Tapintás-nyomás | Idegvégződések | Többféle* |
| | Meleg | Idegvégződések | Többféle* |
| | Fájdalom | Idegvégződések | Többféle* |
| | Ízületi helyzet és mozgás | Csapasz idegvégződések | ... |
| Nem tudatosuló | Izomhossz | Idegvégződések | Többféle* |
| | Izomfeszülés | Idegvégződések | Izomorsó |
| | Artériás vérnyomás | Idegvégződések | Golgi-féle inszerv |
| | Centrális vénás nyomás | Idegvégződések | A sinus caroticus és az aortaív nyújtási receptorai |
| | A tüdő feszülése | Idegvégződések | A nagyvénák és a pitvarok falának nyújtási receptorai |
| | A vér hőmérséklete | Hypothalamusneuronok | A tüdőszövet nyújtási receptorai |
| | Artériás P_{CO_2} | Idegvégződések | ... |
| | Liquor-pH | A nyúlóvél centrális felszínének receptorai | Glomus caroticum és aorticum |
| | A plazma ozmotikus nyomása | Az OVLT és valószínűleg más circumventricularis szervek az elülső hypothalamusban | ... |
| | Arteriovenosus glükózkoncentráció | Hypothalamus (glukozszt) sejtjei | ... |

Érzékszervi receptorok érzékenysége

- eV nagyságrendű inger is elegendő az ingerület kiváltására:
- hallóreceptorok: a levegő molekulák termikus mozgása
- fényreceptorok: 1-2 foton

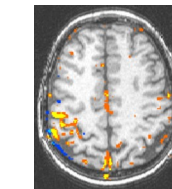
Elméletek az érzékelésről

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

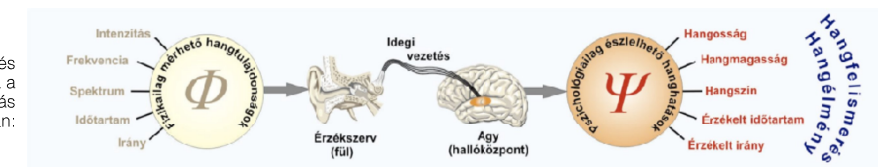


Szenzoros homunculus

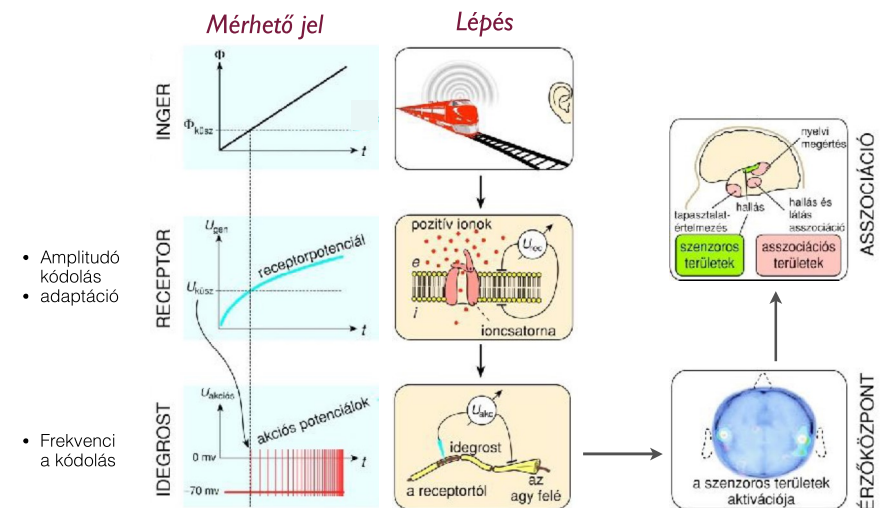
Ma:

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

Érzékelés folyamata a hallás példáján:



A jelátalakítás lépései



- Amplitúdó kódolás
- adaptáció

- Frekvencia kódolás

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

1. Modalitás

Az inger fizikai jellemzője.

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

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



Weber (1795-1878) Fechner (1801-1887)

Stevens-törvény

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



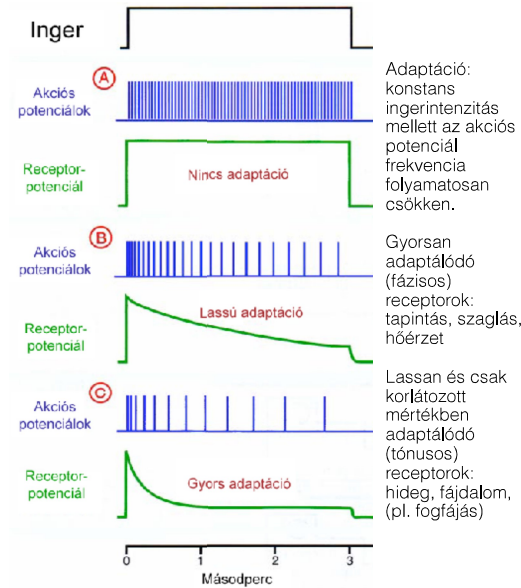
Stevens (1906-1973)

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

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

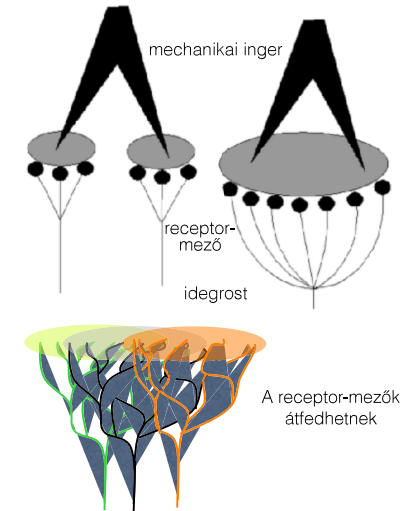
$n > 1$: expanszív függvény (nyomás, ízlelés)

3. Időtartam, adaptáció



4. Lokalizáció

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



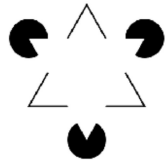
A látás biofizikája

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

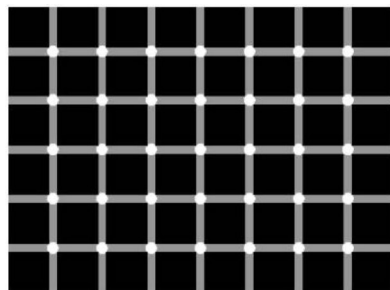
Optikai csalódás - intenzitás



Mach sávok

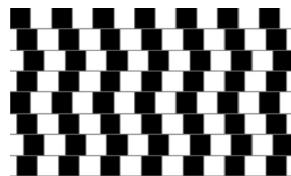


Kanizsa háromszög

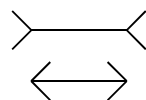


Hány fekete korongot látunk?

Optikai csalódás - irány, méret



Café wall illúzió

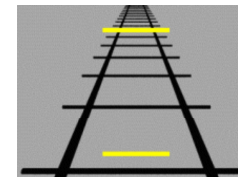


Müller-Lyer illúzió

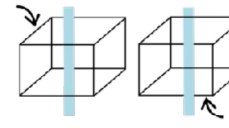


Ebbinghaus illúzió

Optikai csalódások – tér, alak



Ponzo illúzió



Necker kocka

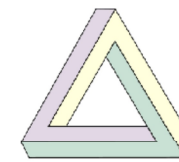


Necker kocka effektus római térhatású mozaikon

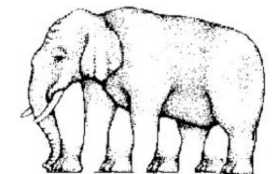
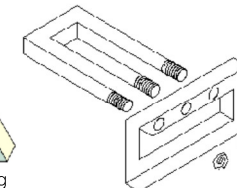


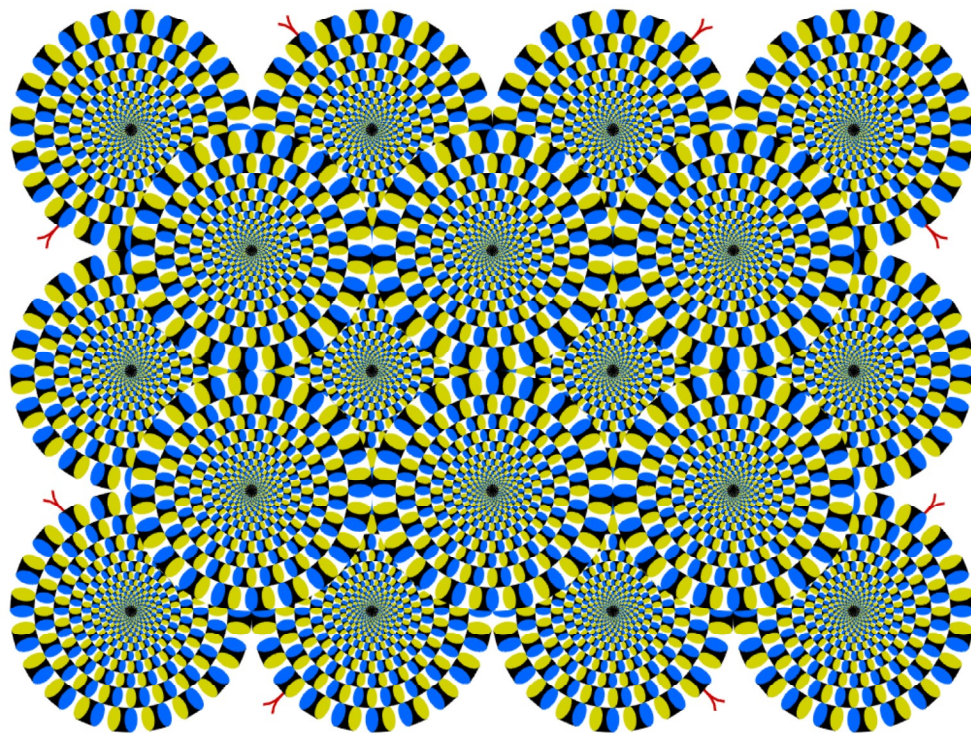
Rubinváza illúzió

“Lehetetlen” geometriai alakzatok



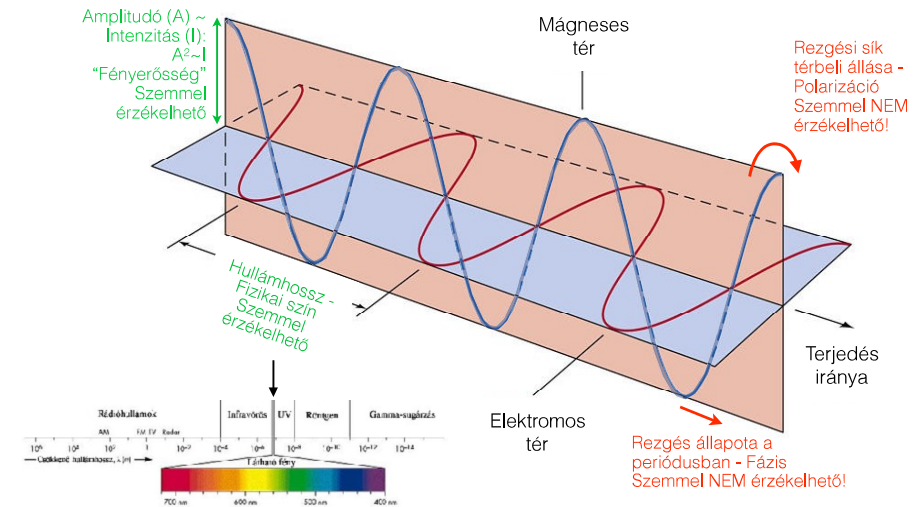
Penrose háromszög





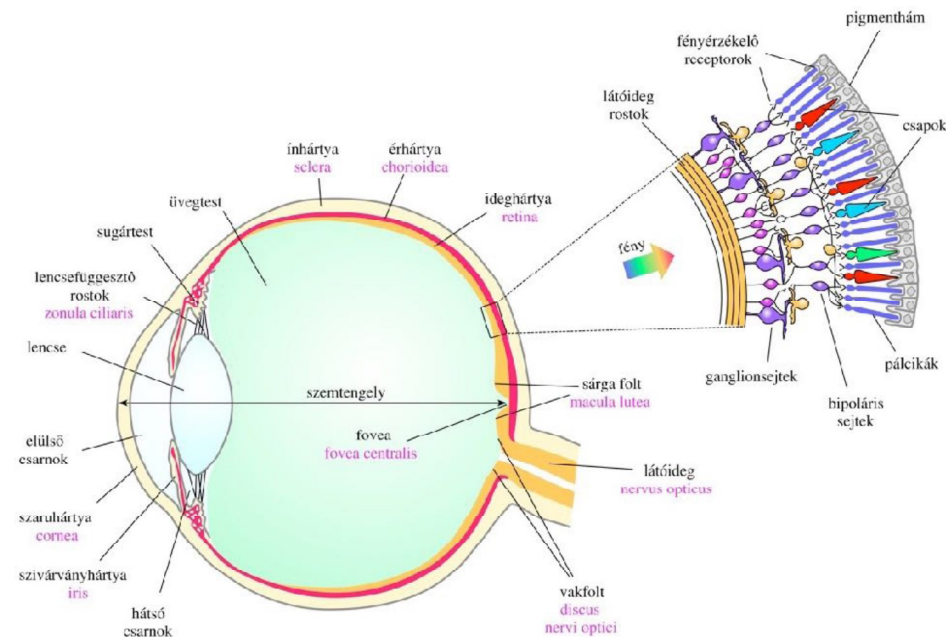
A látás ingere: fény

Elektromágneses (tranzverzális) hullám

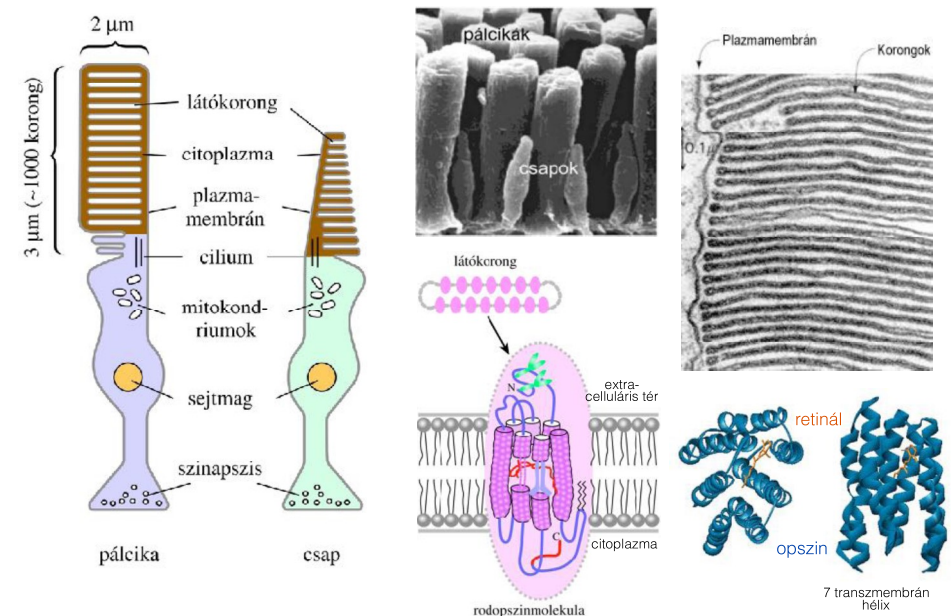


- A szem érzékeny: hullámhosszra és amplitúdóra (~intenzitás)
- A szem érzéketlen: fázisra és polarizációra

“Receptor-szerv”: szem



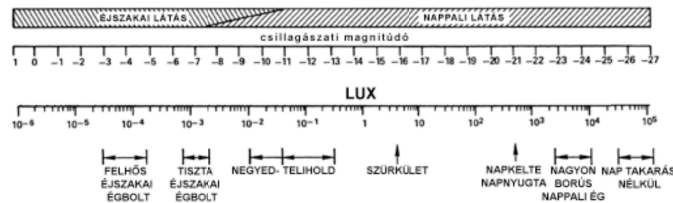
Fotoreceptorok



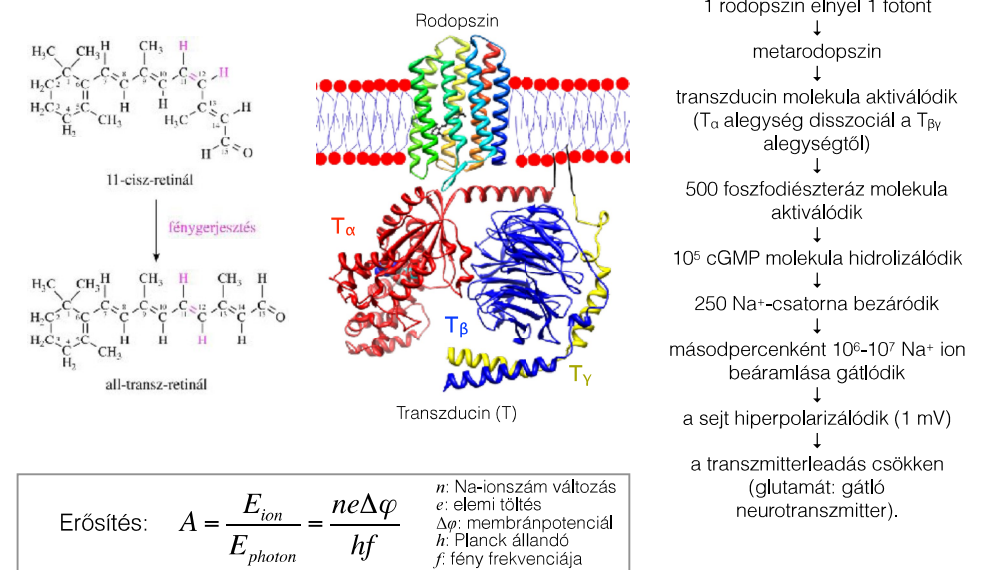
A receptorsejtek tulajdonságai

| Pálcikák | Csapok |
|---|---|
| Kis fényintenzitást képes érzékelni (optimális esetben akár 1 foton!!) | 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!

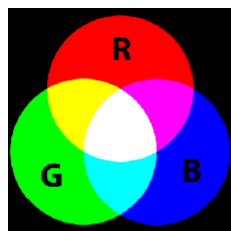


Fényérzékelés alapja: fotokémiai reakció



A színérzékelés alapja

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

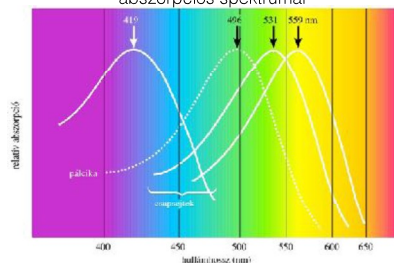


Additív színkódolás

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

$$X = rR + gG + bB$$

Emberi szem színérzékeny receptorainak (csapok) abszorpciós spektrumai

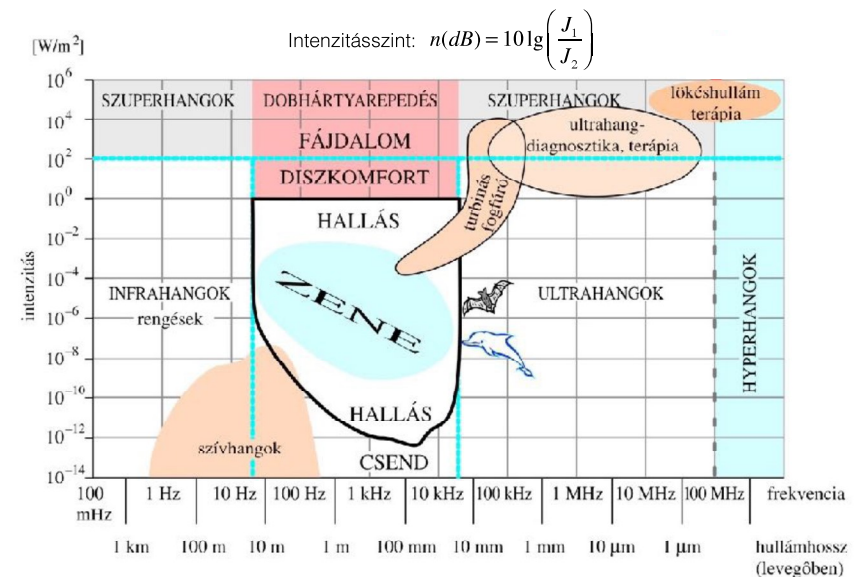


Emberi szemben:

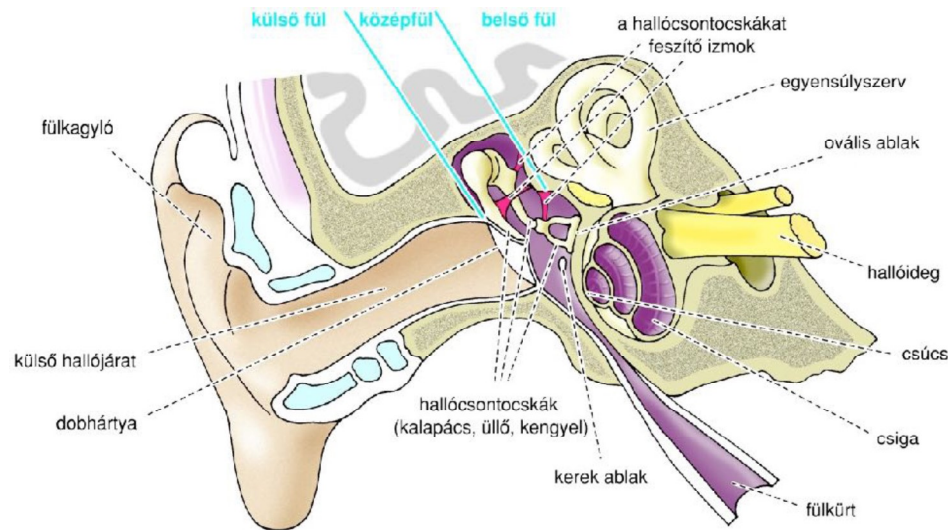
- 3 különböző színérzékeny receptor.
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ($R=64\%$, $G=32\%$, $B=2\%$).

A hallás biofizikája

Inger: hang - mechanikai hullám



“Receptor-szerv”: fül



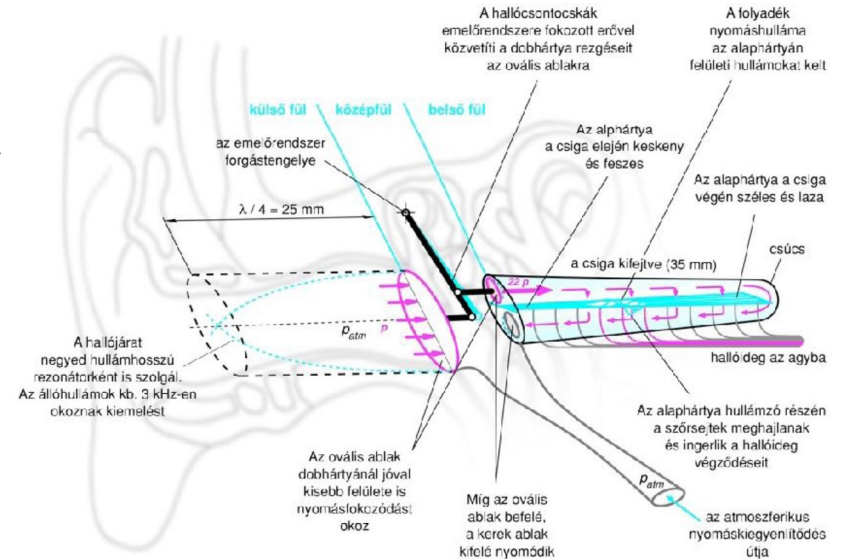
A fül egyszerűsített vázlata

Külső fül:

1. Fülkagyló: A hangot a hallójáratba tereli.

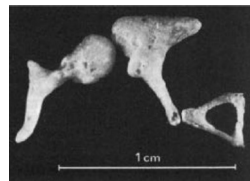
2. Hallójárat: Visszaveri és a dobhártya felé tereli a hanghullámokat. Adott tartományt (2000-5000 Hz) hatékonyabban továbbít.

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

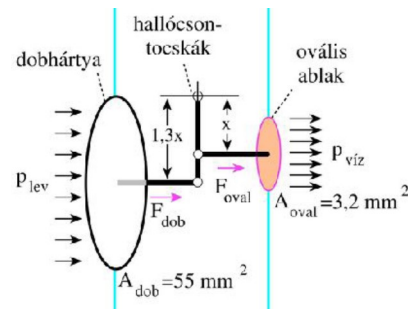
Hallócsontocskák (kalapács, üllő, kengyel)



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

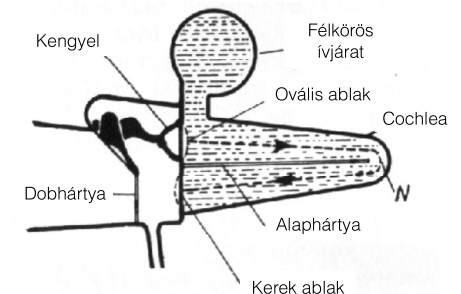
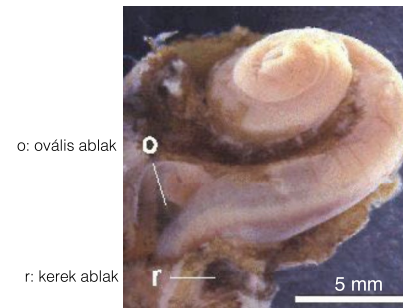
Összesen kb. $22 \times$ nyomásnövekedés



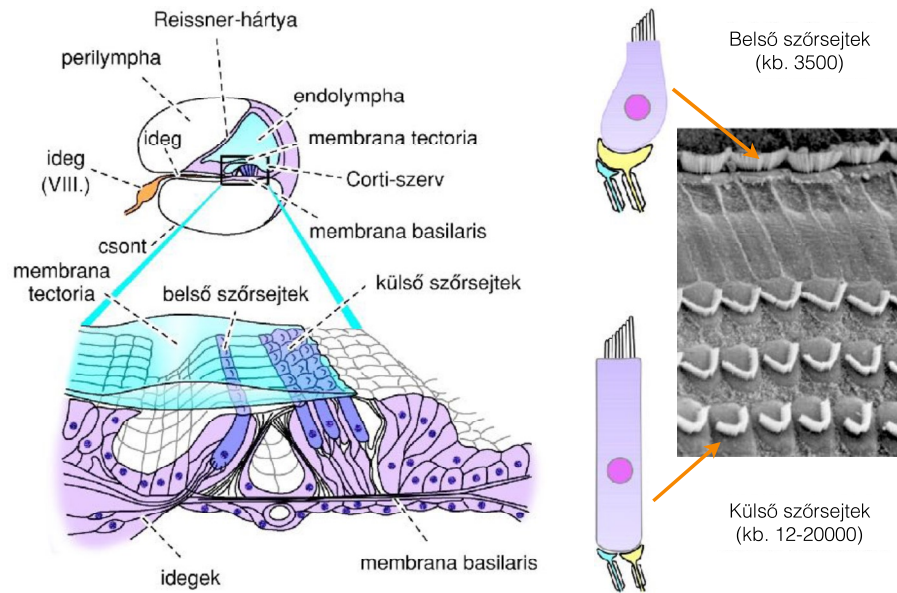
A belső fül: szenzor

Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

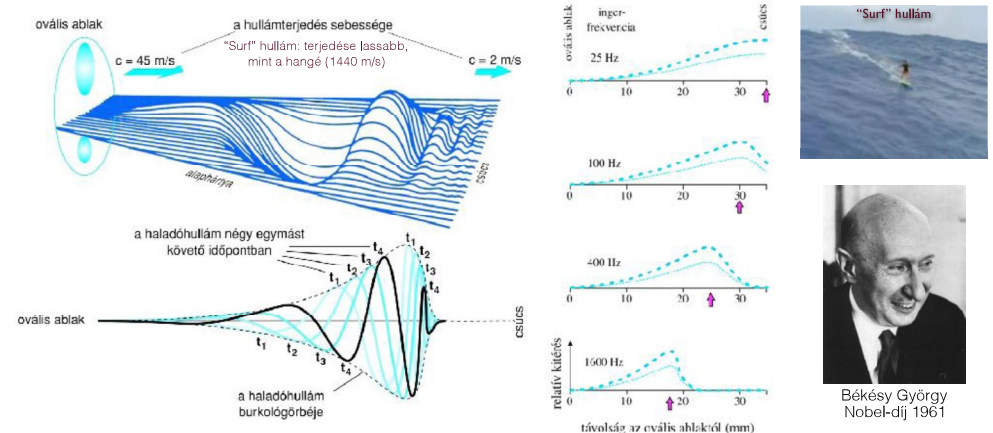
Csiga (cochlea): 2,5 menetű, 35 mm hosszú folyadékkal teli csatorna. Hosszában a részben csontos, részben hátyaszerű fal, az alaphártya (membrana basilaris) osztja ketté. A hang érzékelését végzi.



A belső fül finomszerkezete



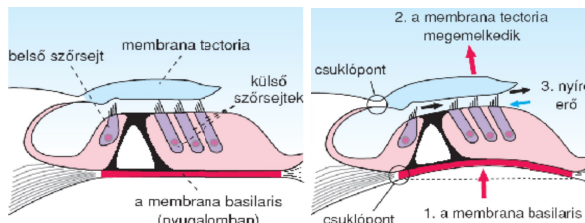
Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán



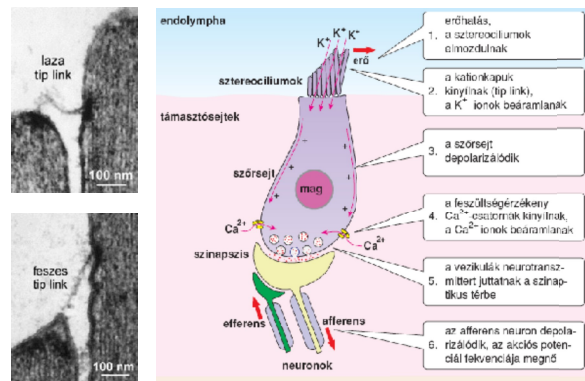
A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

A Corti-féle szerv működése

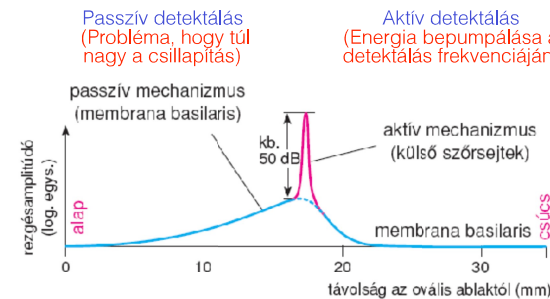
A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt megdőlnének és depolarizálódnak.



Belső szőrsejtek: Mechanoelektromos transzdukcio



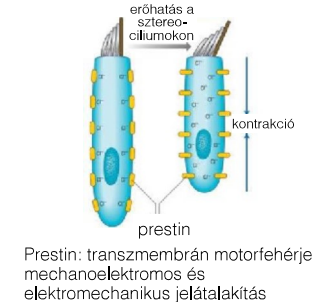
Külső szőrsejtek: erősítők



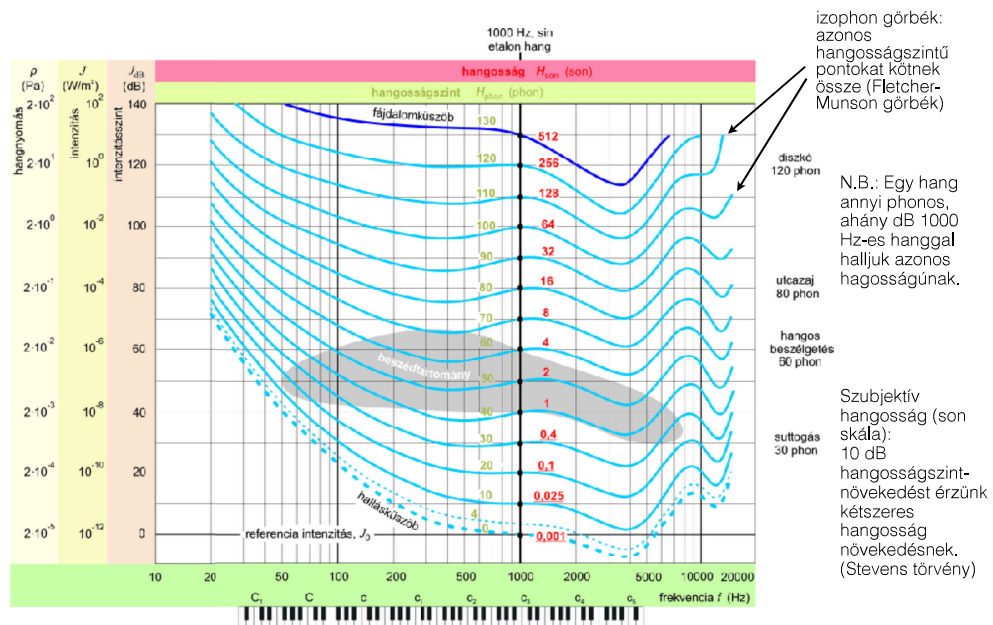
Erősítés: hang-indukált kontrakció a külső szőrsejtben



- 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)

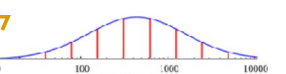
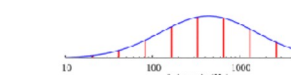
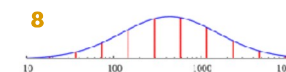
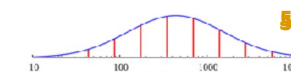
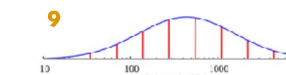
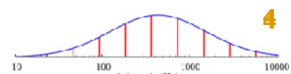
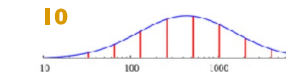
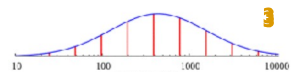
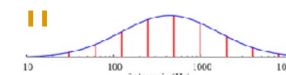
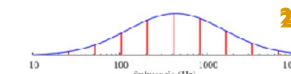
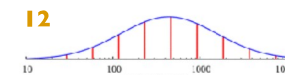
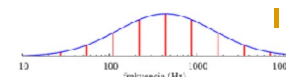


Ingerintenzitás és érzet - pszichoakusztika



Akusztikus illúzió?

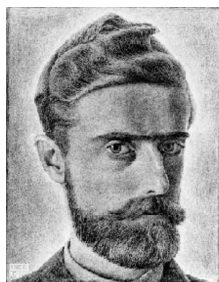
Shepard tónus: oktávokkal elválasztott szinushangok



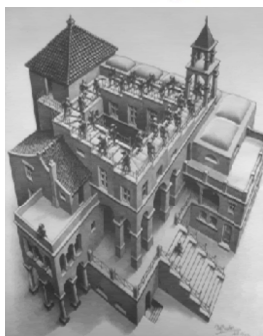
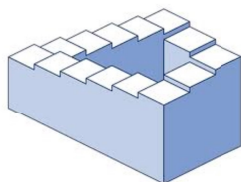
Shepard skála: mozgó alaphang

Akusztikus illúzió?

A Shepard skála vizuális analógjai:



Maurits Cornelis Escher (1898-1972)



Escher lépcső



Fodrász rúd