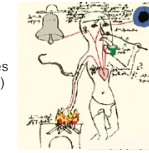


ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK BIOFIZIKÁJA LÁTÁS, HALLÁS

KELLERMAYER MIKLÓS

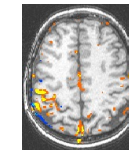
Elméletek az érzékelésről

Kardiocentrikus érzékelés
(középkori rekonstrukció)



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

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



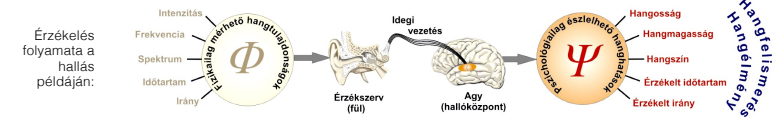
fMRI felvétel szenzomotoros
funkció közben



Szenzoros
homunculus

Ma:

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



Érzékszervi receptorok



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

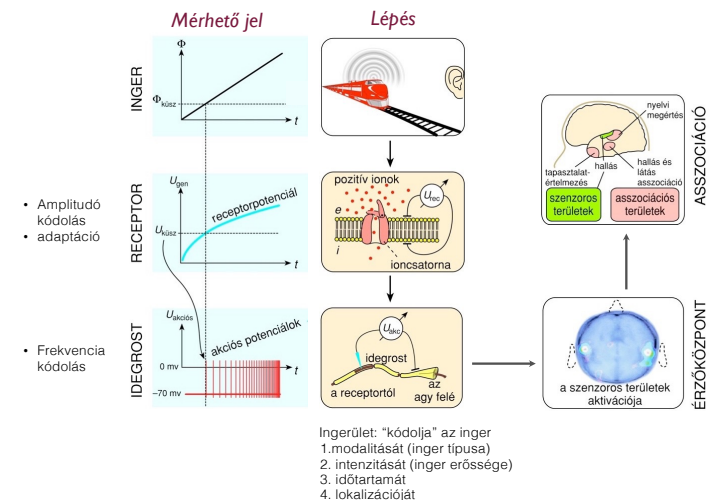
Receptorok (eltérő jelentés!): Olyan fehérjék, amelyek specifikusan képesek hormonok, neurotranszmitterek és más anyagok megkötésére és ezáltal specifikus válaszreakciókat indítanak el.

	Érzésmód	Receptor	Érzékelőszerv
Tudatosuló	Látás	Csapok és pálcikák	Szem
	Hallás	Szőrsejtek	Fül (Corti-szerv)
	Szaglás	Olfactorius neuron	Szagló nyálkahártya
	Ízezés	Ízezőreceptor-sejtek	Ízezőbimbó
	Szöggyorsulás	Szőrsejtek	Fül (félkörös vízjáratok)
	Lineáris gyorsulás	Szőrsejtek	Fül (utrículus és sacculus)
	Tapintás-nyomás	Idegvégződések	Többféle*
	Meleg	Idegvégződések	Többféle*
	Fájdalom	Csapas idegvégződések	Többféle*
	Hűség	Idegvégződések	Izomorsó
Nem tudatosuló	Ízületi helyzet és mozgás	Idegvégződések	Gölg-féle inaszerv
	Izomhossz	Idegvégződések	A sinus carotinus és az aortai nyújtási receptorai
	Izomfeszülés	Idegvégződések	A nagyvénák és a pitvarok falának nyújtási receptorai
	Artériás vérnyomás	Idegvégződések	A tüdőszövet nyújtási receptorai
	Centrális vénás nyomás	Idegvégződések	...
	A tüdő feszülése	Idegvégződések	Glomus caroticum és aorticum
	A vér hőmérséklete	Hypothalamusneuronok	...
	Artériás P_{O_2}	Idegvégződések	...
	Liquor-pH	A nyúló ventrális felszínének receptorai	...
	A plazma ozmotikus nyomása	Az OVI-T és valószínűleg más circumventricularis szervek az elülső hypothalamusban	...
	Arteriovenosus glükózkülönbség	Hypothalamus (glükóz) sejteit	...

Érzékszervi receptorok érzékenysége

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

A jelátalakítás lépései



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

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



Fechner (1801-1887)

Stevens-törvény

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



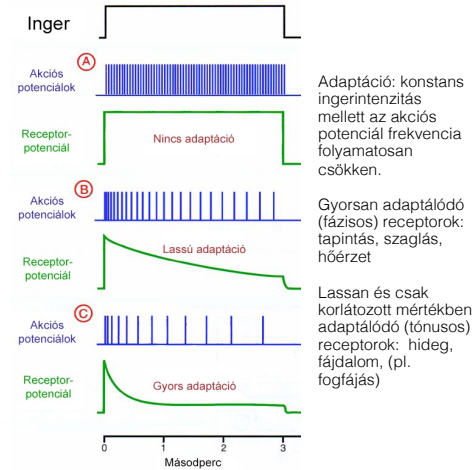
Stevens (1906-1973)

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

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

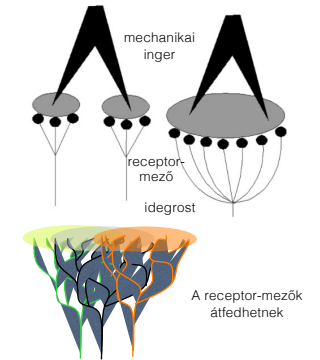
$n > 1$: expanszív függvény (nyomás, ízlelés)

3. Időtartam, adaptáció



4. Lokalizáció

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



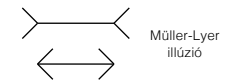
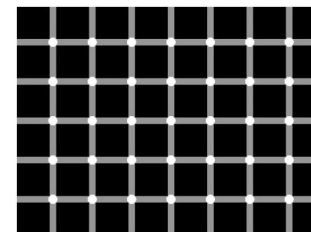
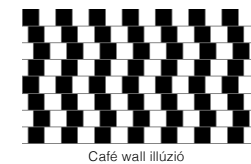
A látás biofizikája

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

Optikai csalódás - intenzitás



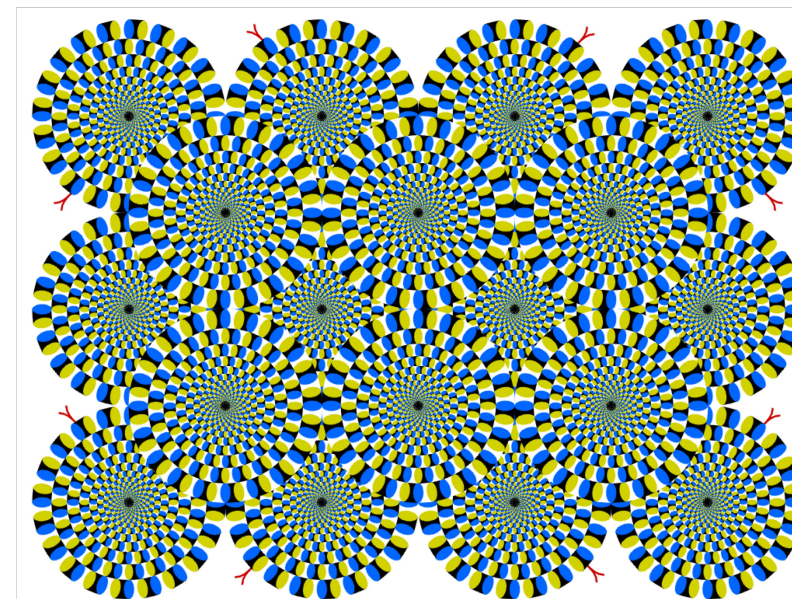
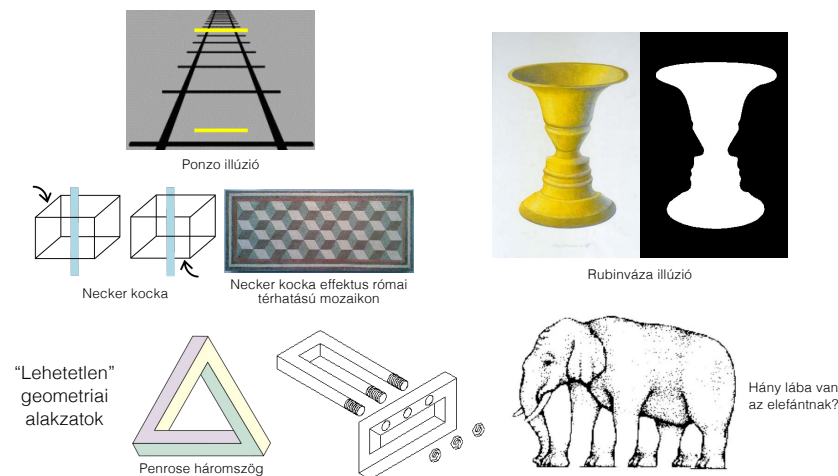
Optikai csalódás - irány, méret



A LÁTÁS BIOFIZIKÁJA

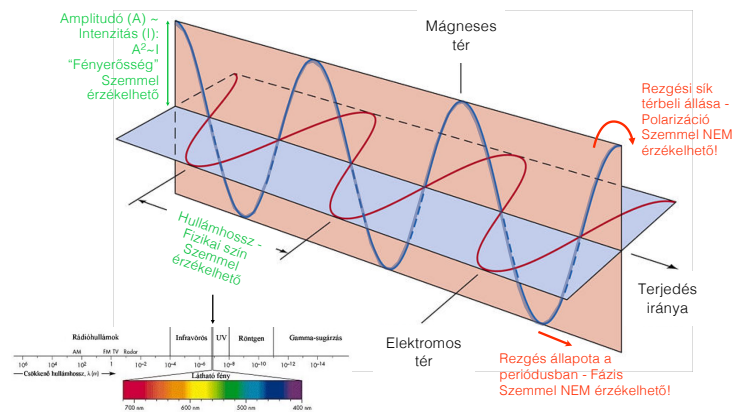
KELLERMAYER MIKLÓS

Optikai csalódások – tér, alak



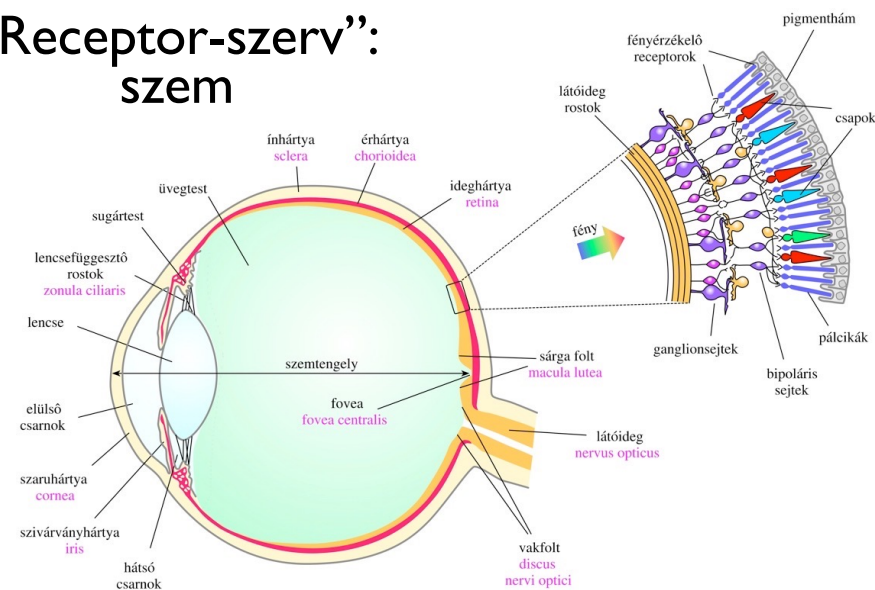
A látás ingere: fény

Elektromágneses (tranzverzális) hullám

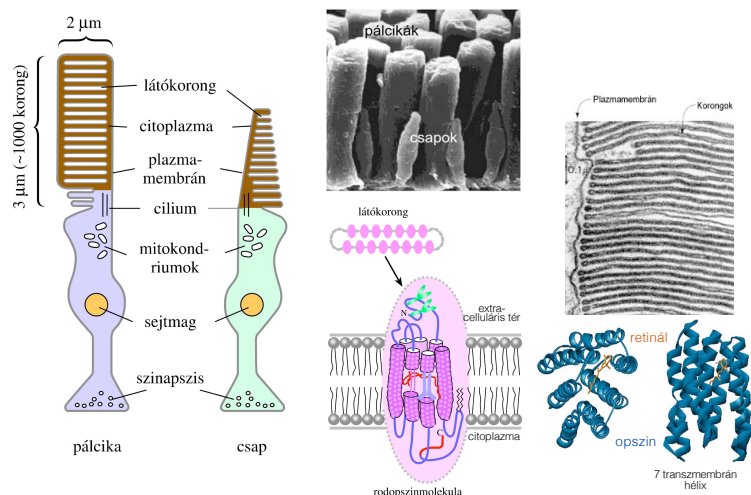


- A szem érzékeny: hullámhosszra és amplitúdóra (~intenzitás)
- A szem érzéketlen: fázisra és polarizációra

"Receptor-szerv": szem



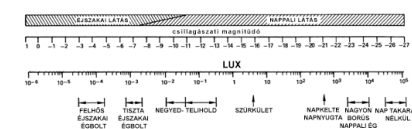
Fotoreceptorok



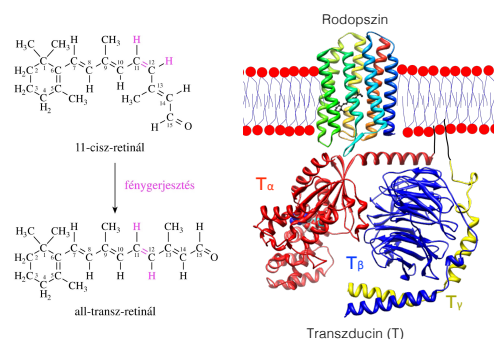
A receptorsejtek tulajdonságai

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 pálca - egy ganglion (nagyobb érzékenység, kisebb térbeli felbontás)	Kevésbé konvergáló idegi kapcsolatok (jobb térbeli felbontás)
Nem érzékeli 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 foton
 ↓
 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 (glutámát: gátló neurotranszmitter).

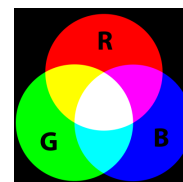
Erősítés: $(\sim 10^4)$

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

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)



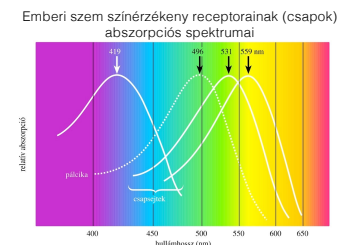
Additív színkódolás

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

$$X = rR + gG + bB$$

Emberi szemben:

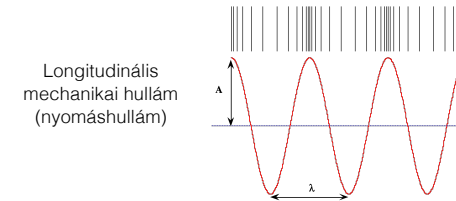
- 3 különböző színérzékeny receptor.
- Mindegyik receptor más-más szinttartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ($R=64\%$, $G=32\%$, $B=2\%$).



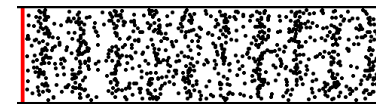
A HALLÁS BIOFIZIKÁJA

KELLERMAYER MIKLÓS

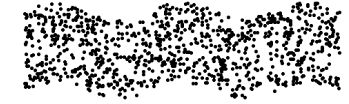
Hang



Longitudinális
mechanikai hullám
(nyomáshullám)



Longitudinális hullám

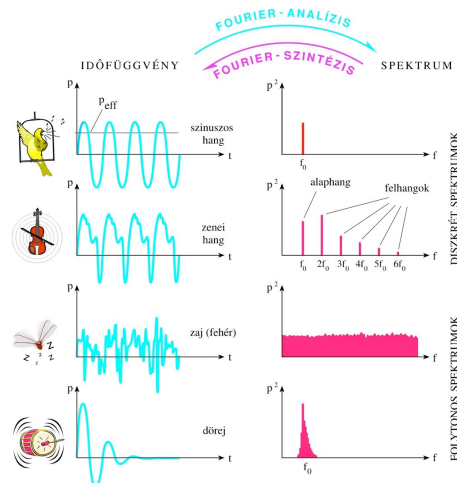


Tranzverzális hullám

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

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

Hangok és spektrumaik



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

A Fourier analízis lépései:

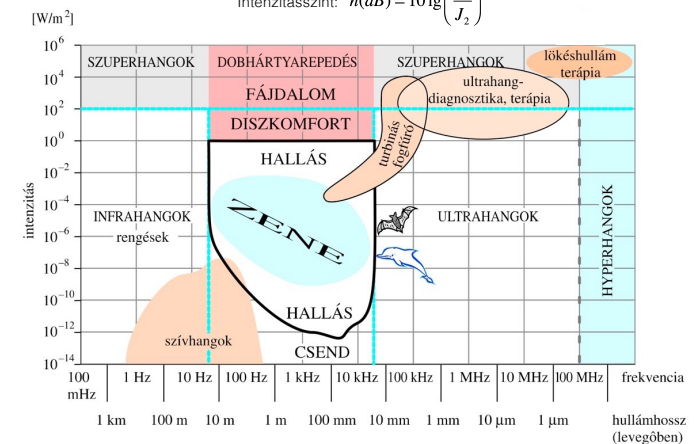


Oktáv - 2:1
arányú
frekvenciaköz

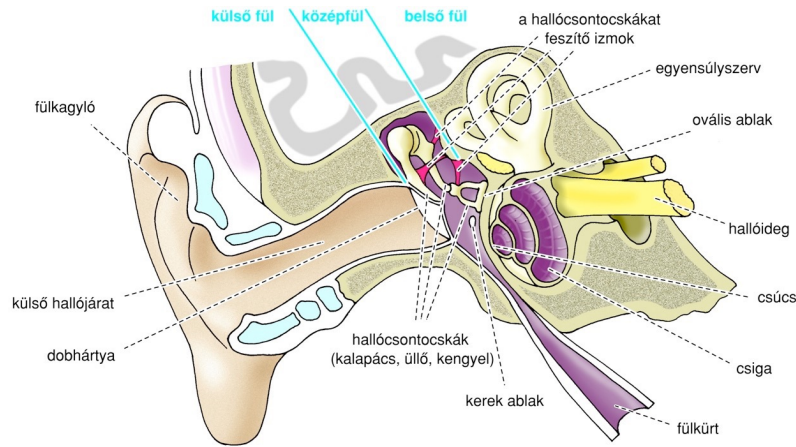
Hangintenzitás és frekvencia

Inger: hang - mechanikai hullám

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



“Receptor-szerv”: fül



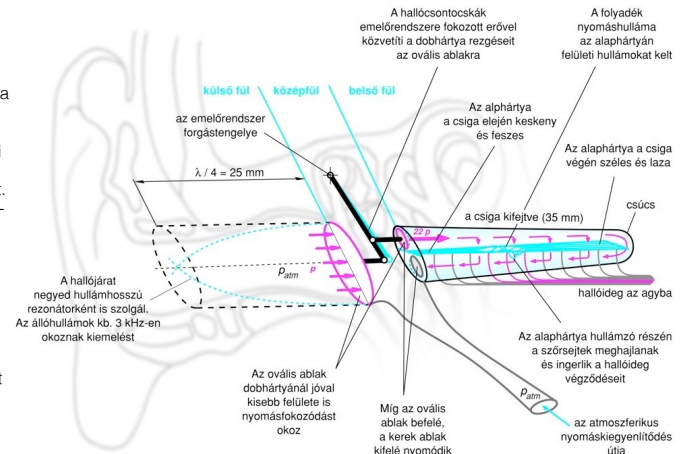
A fül fizikai vázlata

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)!



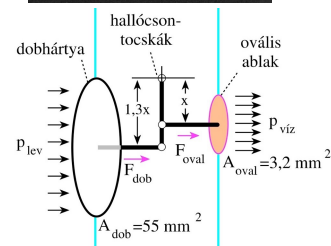
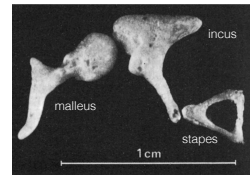
A középfül: mechanikai jeltovábbító és erősítő

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: $1,3 \times$

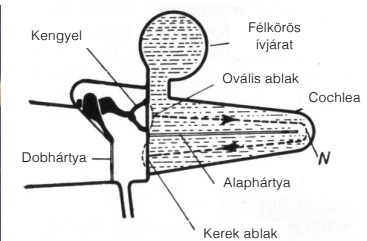
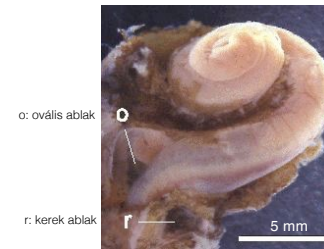
Összesen kb. $22 \times$ nyomásnövekedés



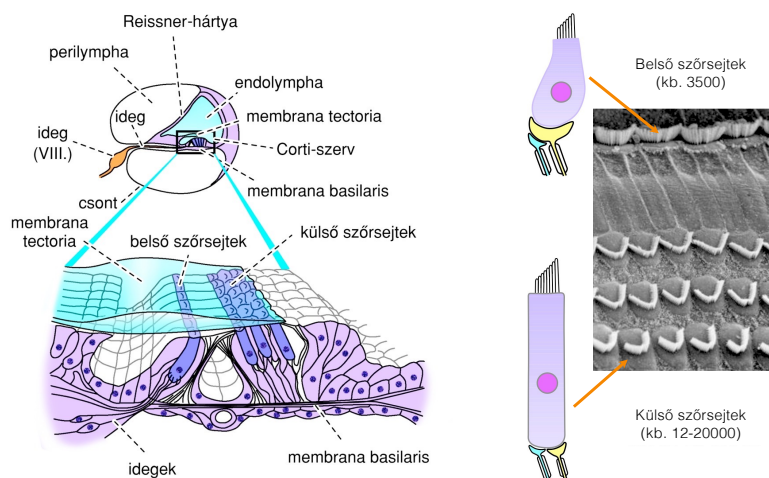
A belső fül: szenzor

Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

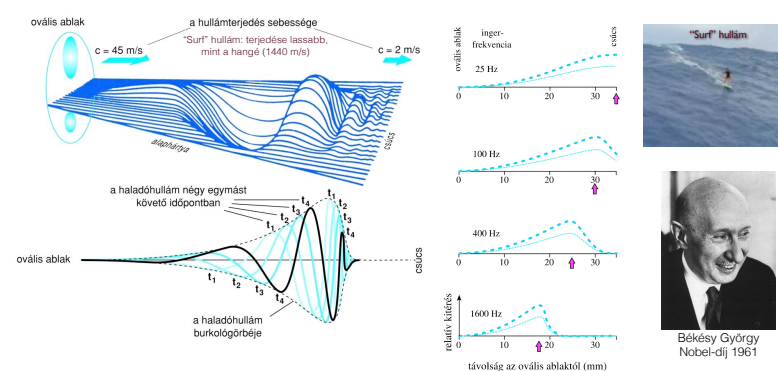
Csiga (cochlea): 2,5 menetű, 35 mm hosszú folyadékkal teli csatorna. Hosszában a részben csontos, részben hátyaszerű fal, az alaphártya (membrana basilaris) osztja ketté. A hang érzékelését végzi.



A belső fül finomszerkezete



Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán

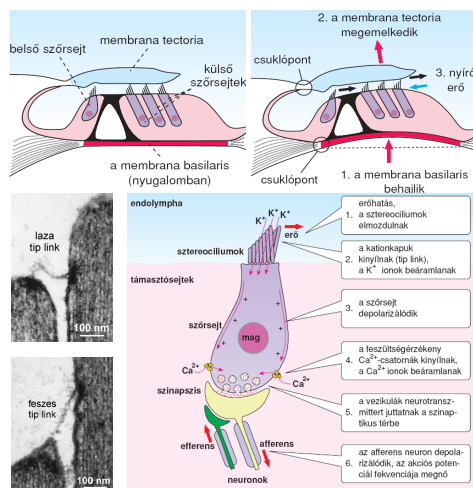


A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

A Corti-féle szerv működése

A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt megdőlnék és depolarizálódnak.

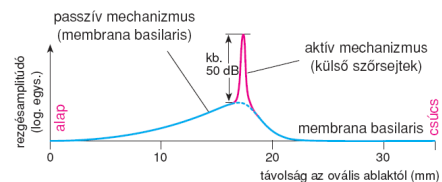
Belső szőrsejtek:
Mechanoelektromos
transzdukció



Külső szörsejtek: erősítők

Passzív detektálás
(Probléma, hogy túl nagy a csillapítás)

Aktív detektálás
(Energia bepumpálása a
detektálás frekvenciáján)

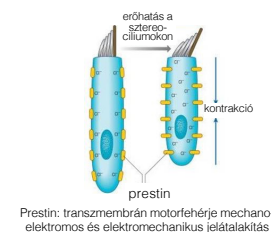


Erősítés:
hang-indukált
kontrakció a
külső
szőrsejtben

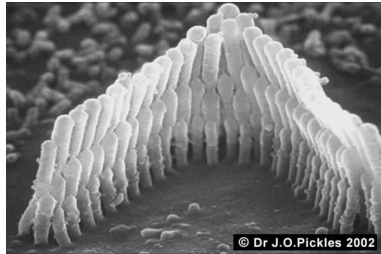
Aktív detektálásra utaló megfigyelések:

- 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).

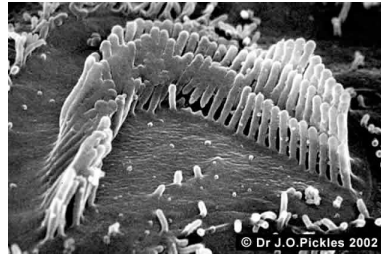
Regeneratív erősítő: pozitív visszacsatolási mechanizmus (szűk frekvencia tartományban nagy erősítés, de csak a disszipálódott energiát pótolja; egyébként fűlcsengés jönne létre)



Halláskárosodás

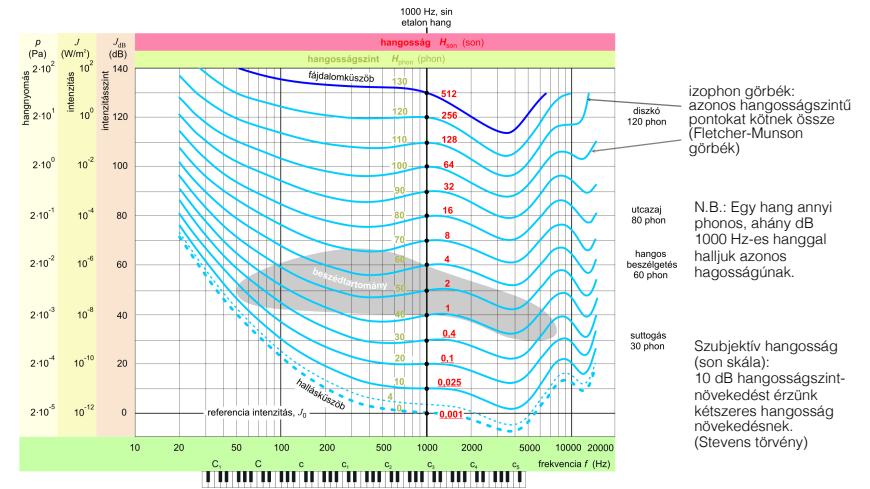


Külső szőrsejtek (normál állapot)



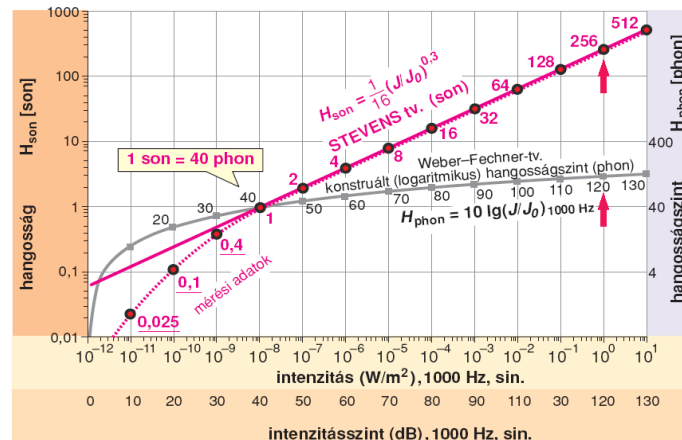
Külső szőrsejtek (károsodott állapot; pl. koncert után)

Ingerintenzitás és érzet - pszichoakusztika



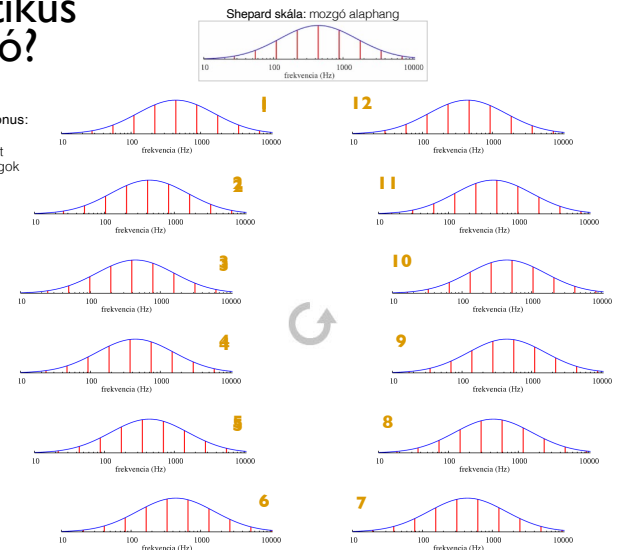
Phon és son skálák

A pszichoakusztikai viselkedést a Stevens-törvény írja le helyesen



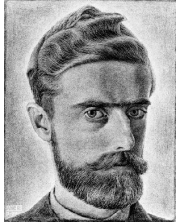
Akusztikus illúzió?

Shepard tónus: oktávokkal elválasztott szinushangok

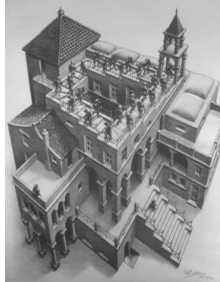
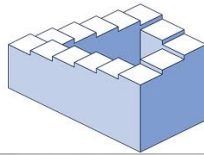


Akusztikus illúzió?

A Shepard skála vizuális analógjai:



Maurits Cornelis Escher
(1898-1972)



Escher lépcső



Fodrász rúd

OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=I9Q3MWIBCQTD5CYL>