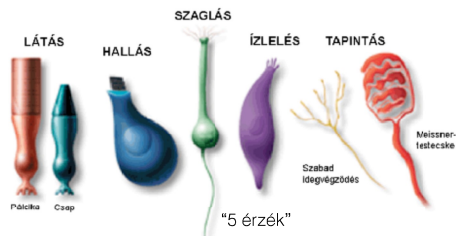


ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK BIOFIZIKÁJA LÁTÁS, HALLÁS

KELLERMAYER MIKLÓS

Érzékszervi receptorok



Érzékszervi receptor (érzőreceptor): Speciálizált 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.

	Érzésmódosítás	Receptor	Érzékelőszerv
Tudatosuló	Látás	Csapok és pálcikák	Szem
	Hallás	Szőrsejtek	Fül (Corti-szerv)
Nem tudatosuló	Szaglás	Olfaktorikus neuron	Szagló nyálkahártya
	Ízlelés	Ízlelőreceptor-sejtek	Ízlelőbimbó
	Szögvesztülés	Szőrsejtek	Fül (félkörös ivjartok)
	Lineáris gyorsulás	Szőrsejtek	Fül (utrículus és sacculus)
	Tapintás-nyomás	Idegvégződés	Többféle*
	Meleg	Idegvégződés	Többféle*
	Fájdalom	Idegvégződés	Többféle*
	Ízületi helyzet és mozgás	Csapos idegvégződés	...
	Izomhossz	Idegvégződés	Többféle*
	Izomfeszülés	Idegvégződés	Izomorsó
	Artériás vérnyomás	Idegvégződés	Golgi-féle inszerv
	Centrális vénás nyomás	Idegvégződés	A sinus caroticus és az aortaív nyújtási receptorai
	A tüdő feszülése	Idegvégződés	A nagyvénák és a pitvarok falának nyújtási receptorai
	A vér hőmérséklete	Hypothalamusneuronok	A tüdőszövet nyújtási receptorai
	Artériás P_{O_2}	Idegvégződés	...
	Liquor-pH	A nyúlóventrális felszínének receptorai	Glomus caroticum és aorticum
	A plazma ozmotikus nyomása	Az OVLT és valószínűleg más circumventricularis szervek az elülső hypothalamusban	...
	Arteriovenosus glükózkoncentráció	Hypothalamus (glukozaszt) sejtjei	...

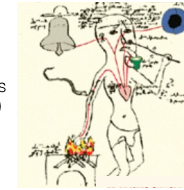
Érzékszervi receptorok érzékenysége

eV nagyságrendű inger is elegendő az ingerület kiváltására:

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

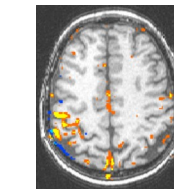
Elméletek az érzékelésről

Kardiocentrikus érzékelés (középkori rekonstrukció)

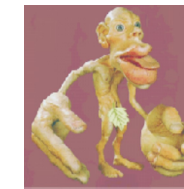


Arisztotelész (Kr. e. 384-322) kardiocentrikus érzékelés.

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



fMRI felvétel szenzomotoros funkció közben

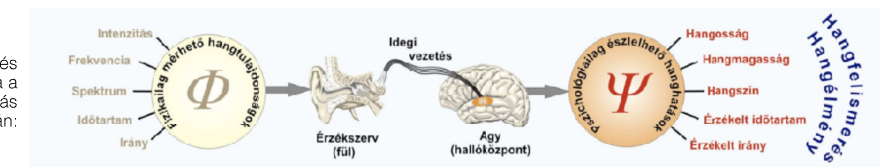


Szenzoros homunculus

Ma:

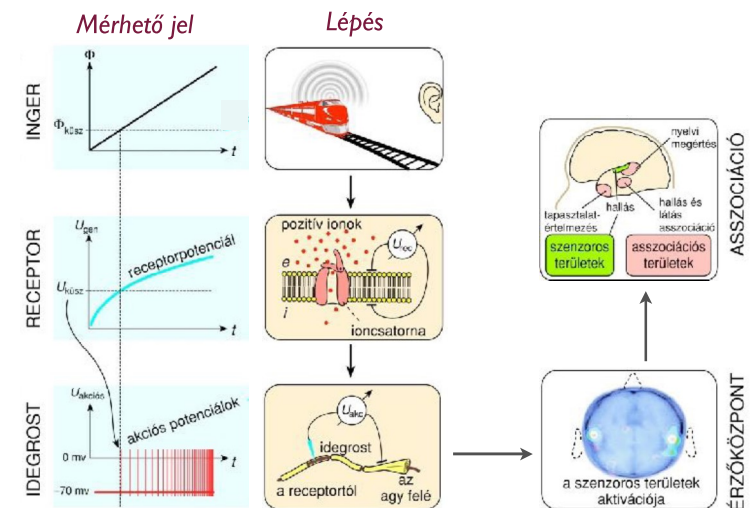
- inger →
- érzékszervi receptorok →
- receptorpotenciál →
- ideg →
- akciós potenciál →
- központi idegrendszer →
- jelfeldolgozás →
- érzet

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

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



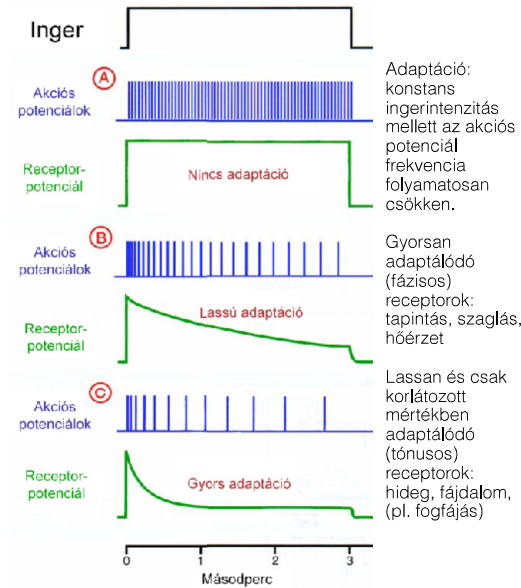
Stevens (1906-1973)

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

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

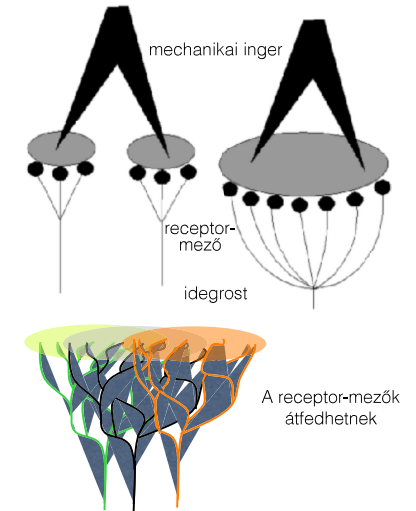
$n > 1$: expanszív függvény (nyomás, ízlelés)

3. Időtartam, adaptáció



4. Lokalizáció

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



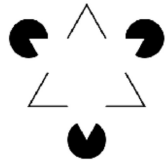
A látás biofizikája

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

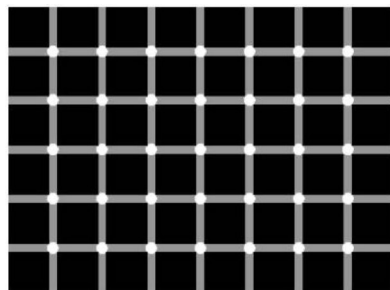
Optikai csalódás - intenzitás



Mach sávok

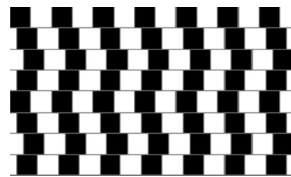


Kanizsa háromszög

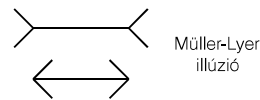


Hány fekete korongot látunk?

Optikai csalódás - irány, méret



Café wall illúzió

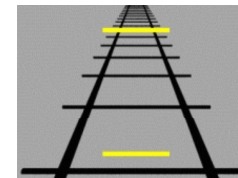


Müller-Lyer illúzió

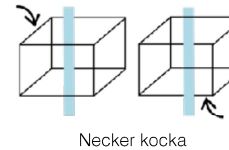


Ebbinghaus illúzió

Optikai csalódások – tér, alak



Ponzo illúzió



Necker kocka

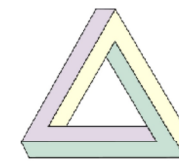


Necker kocka effektus római térhatású mozaikon

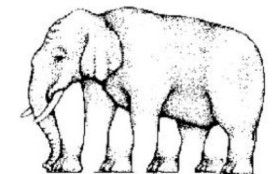
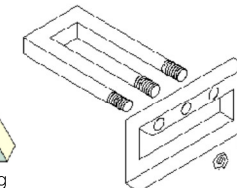


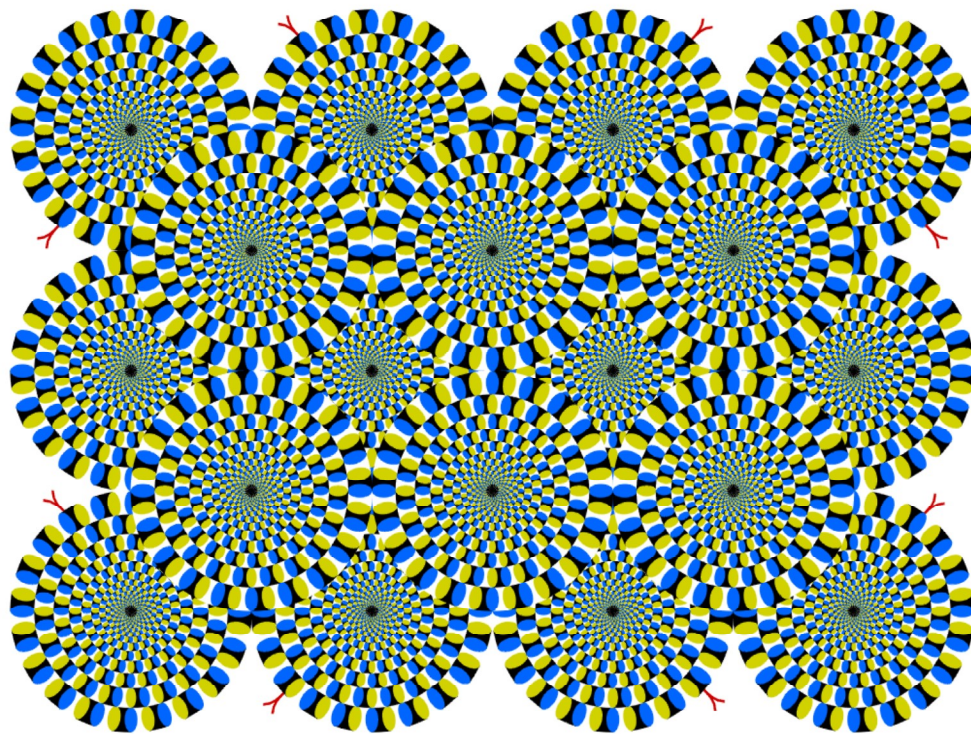
Rubin váza illúzió

“Lehetetlen” geometriai alakzatok



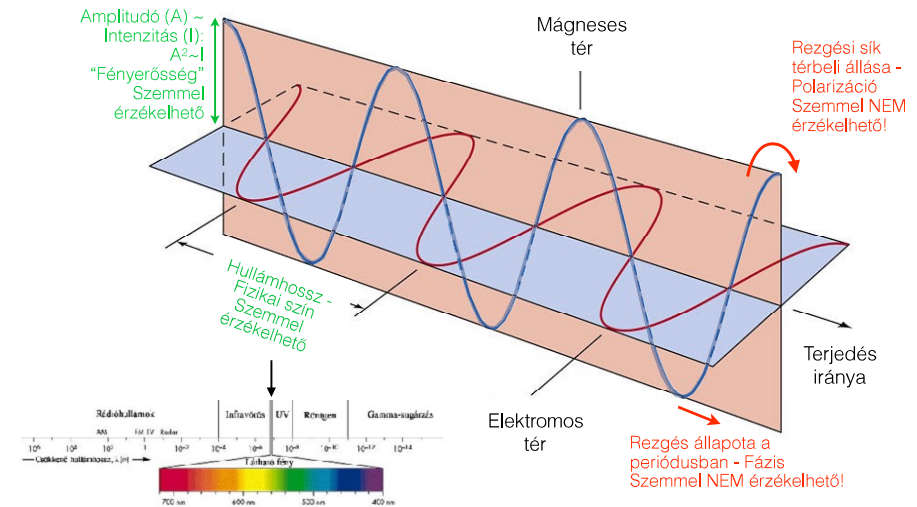
Penrose háromszög





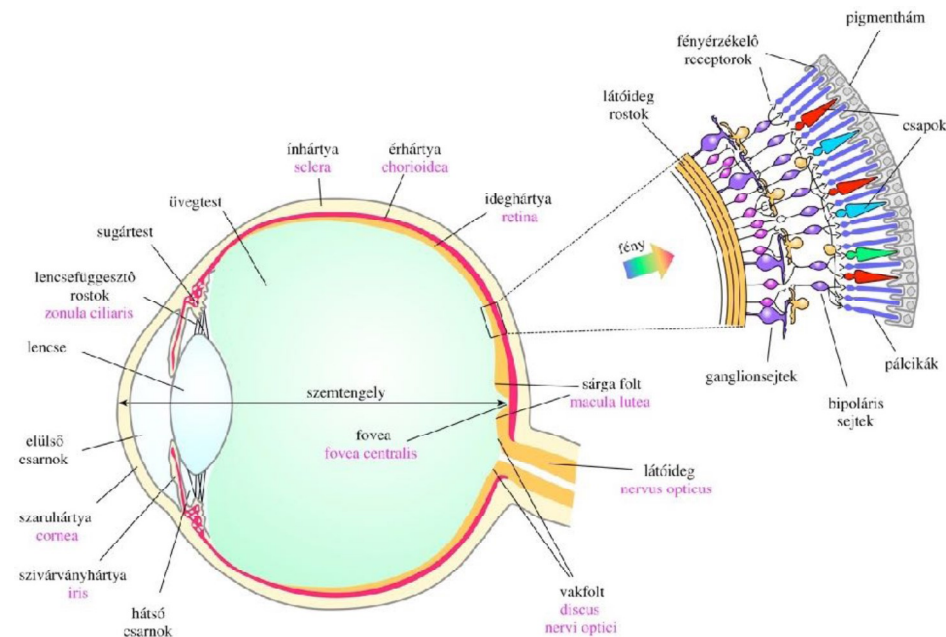
A látás ingere: fény

Elektromágneses (tranzverzális) hullám

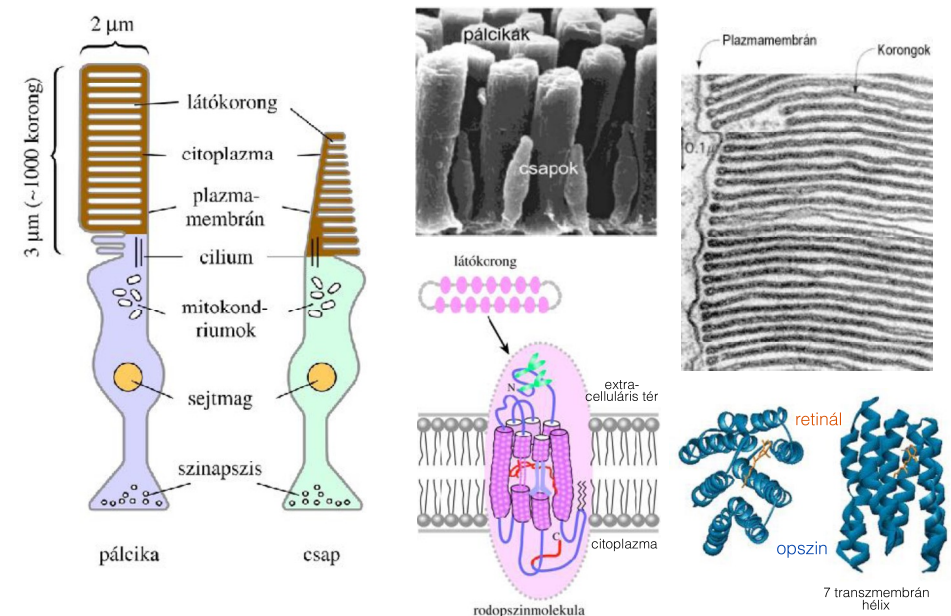


- A szem érzékeny: hullámhosszra és amplitúdóra (~intenzitás)
- A szem érzéketlen: fázisra és polarizációra

“Receptor-szerv”: szem



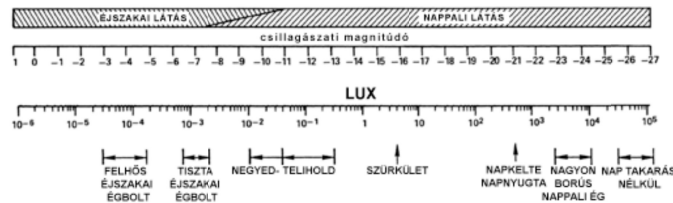
Fotoreceptorok



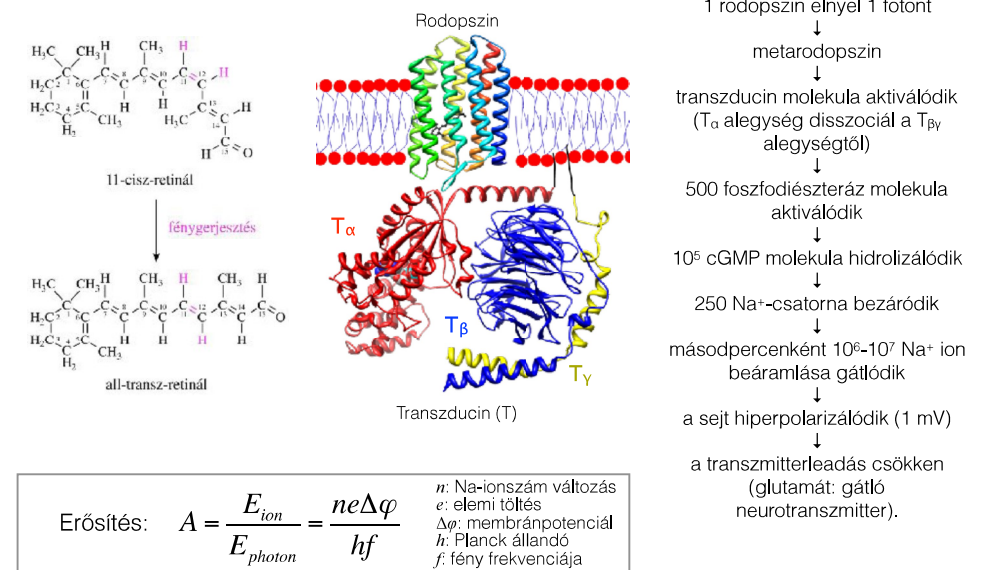
A receptorsejtek tulajdonságai

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!

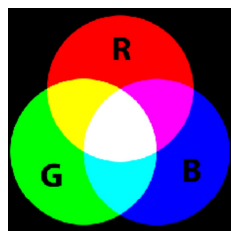


Fényérzékelés alapja: fotokémiai reakció



A színérzékelés alapja

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

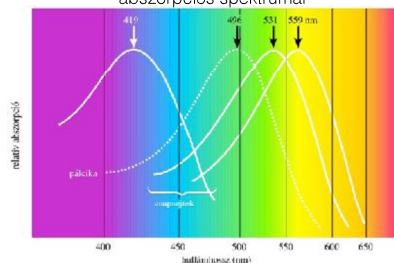


Additív színkódolás

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

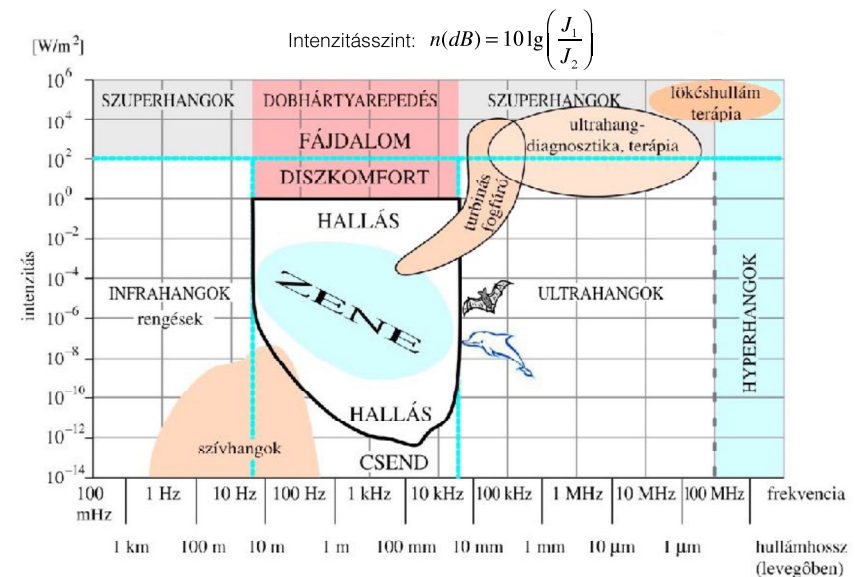


Emberi szemben:

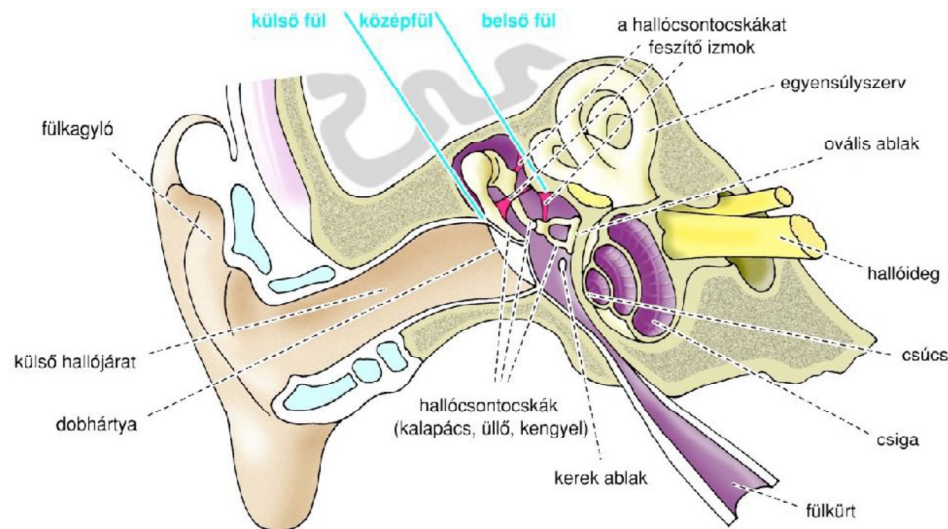
- 3 különböző színérzékeny receptor.
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ($R=64\%$, $G=32\%$, $B=2\%$).

A hallás biofizikája

Inger: hang - mechanikai hullám



“Receptor-szerv”: fül



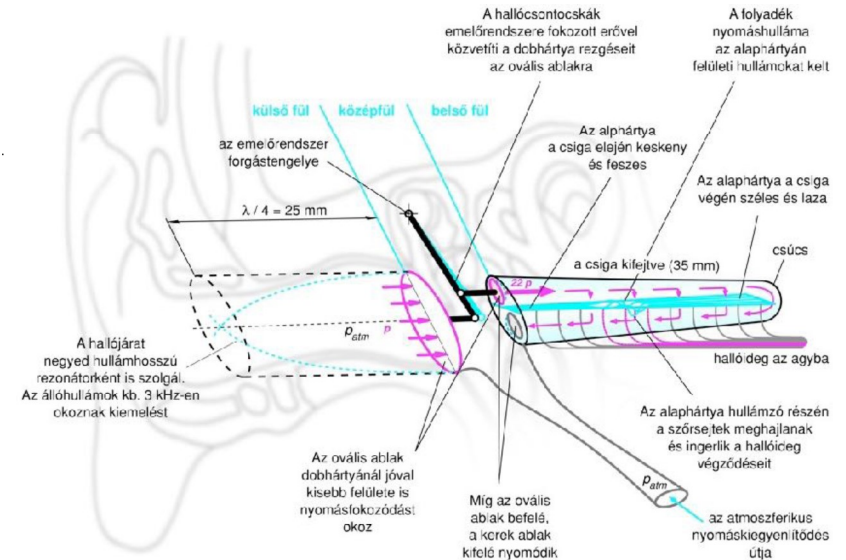
A fül egyszerűsített vázlata

Külső fül:

1. Fülkagyló: A hangot a hallójáratba tereli.

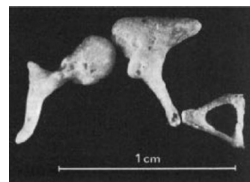
2. Hallójárat: Visszaveri és a dobhártya felé tereli a hanghullámokat. Adott tartományt (2000-5000 Hz) hatékonyabban továbbítja.

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

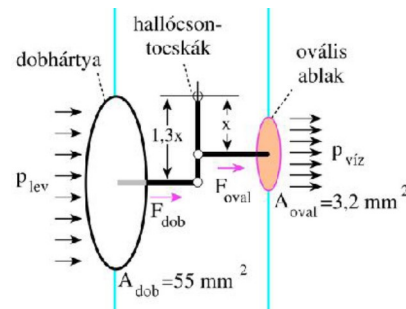
Hallócsontocskák (kalapács, üllő, kengyel)



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: $1,3 \times$

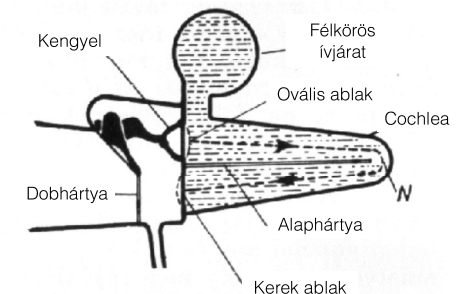
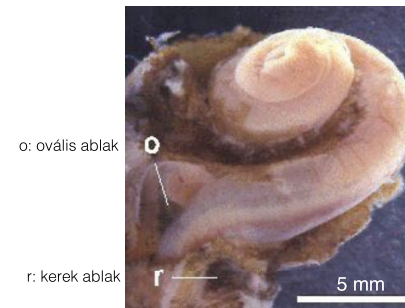
Összesen kb. $22 \times$ nyomásnövekedés



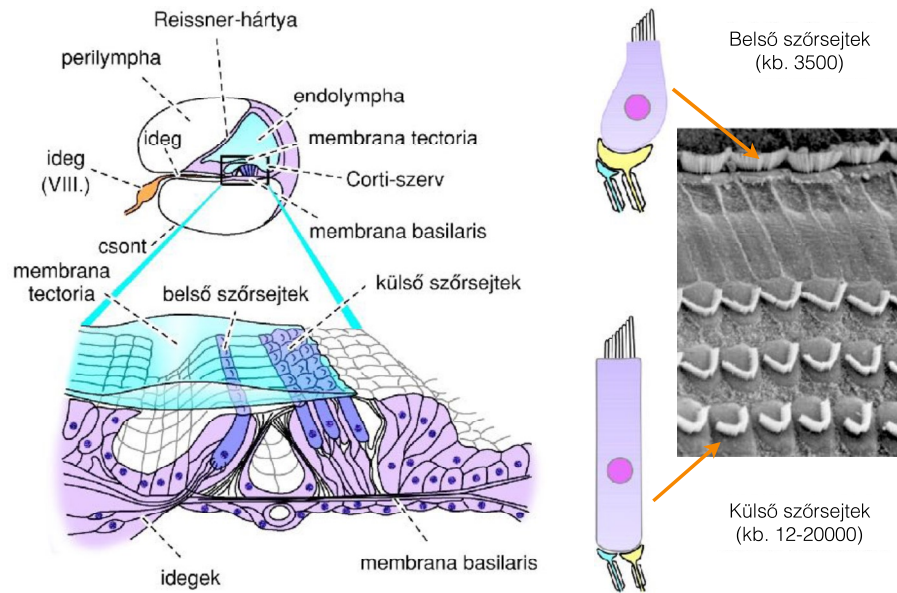
A belső fül: szenzor

Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

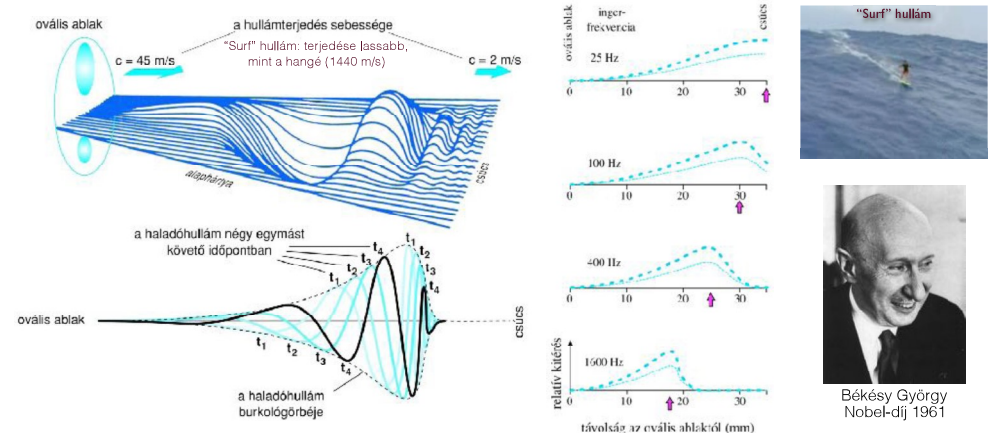
Csiga (cochlea): 2,5 menetű, 35 mm hosszú folyadékkal teli csatorna. Hosszában a részben csontos, részben hátyaszerű fal, az alaphártya (membrana basilaris) osztja ketté. A hang érzékelését végzi.



A belső fül finomszerkezete



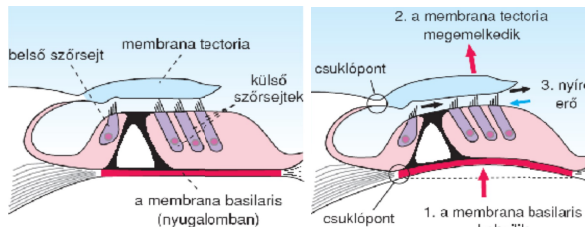
Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán



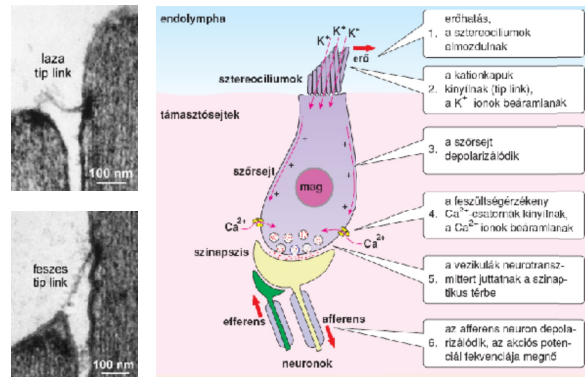
A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

A Corti-féle szerv működése

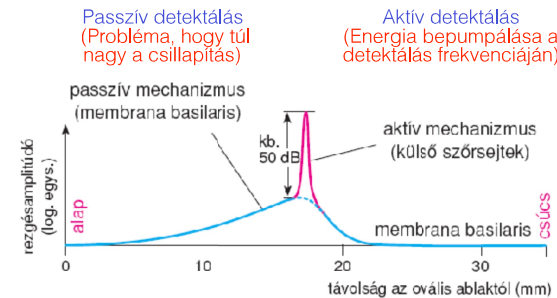
A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt megdőlnék és depolarizálódnak.



Belső szőrsejtek: Mechanoelektromos transzdukcio



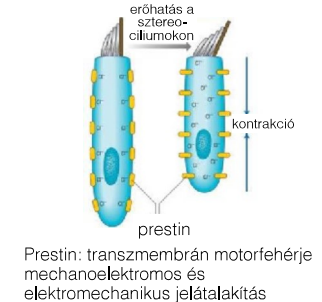
Külső szőrsejtek: erősítők



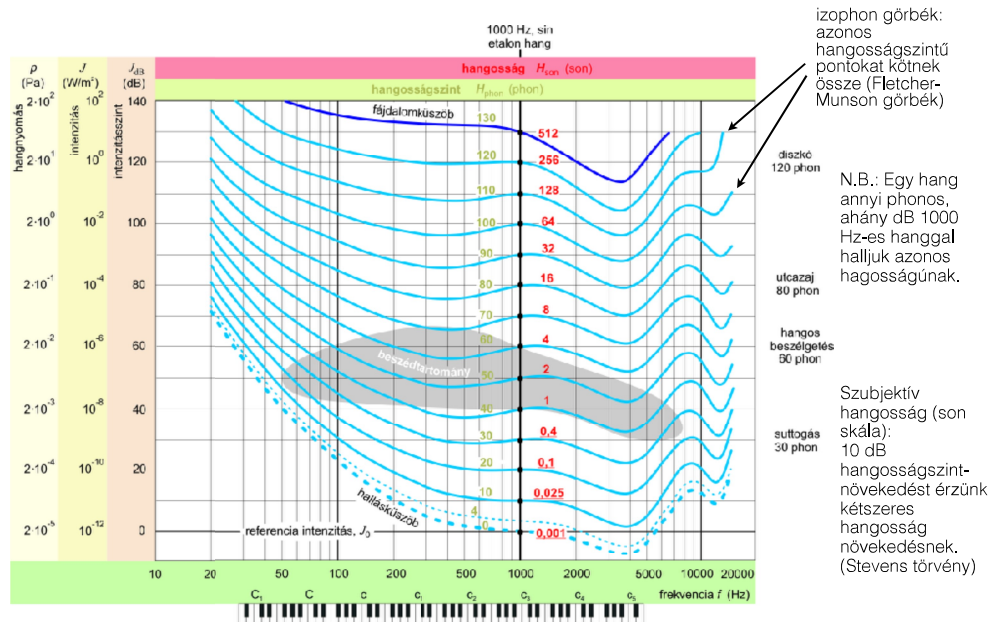
Erősítés: hang-indukált kontrakció a külső szőrsejtben



- 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 fűlcsengés jönne létre)

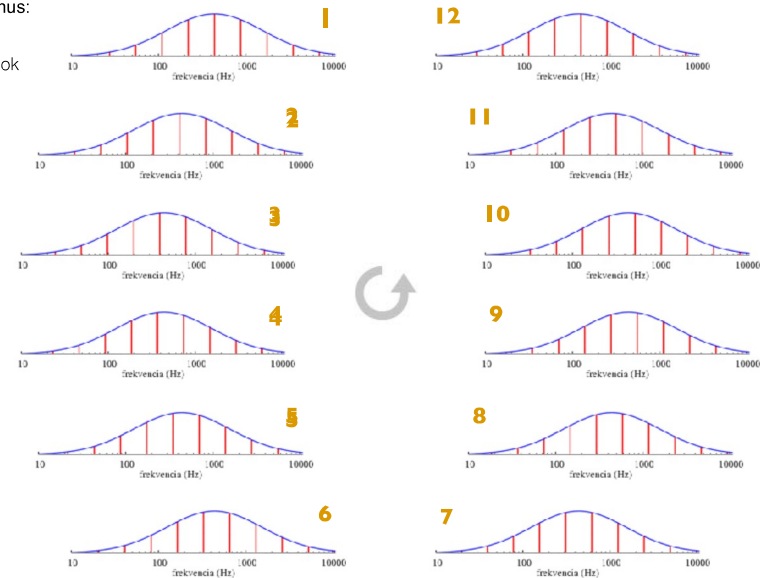


Ingerintenzitás és érzet - pszichoakusztika



Akusztikus illúzió?

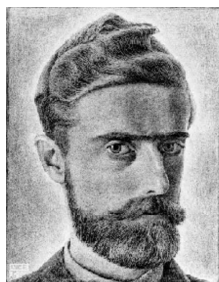
Shepard tónus: oktávokkal elválasztott szinushangok



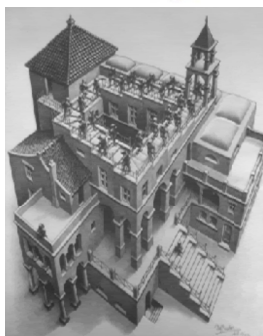
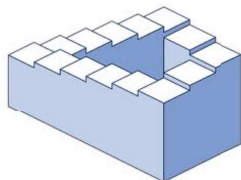
Shepard skála: mozgó alaphang

Akusztikus illúzió?

A Shepard skála vizuális analógjai:



Maurits Cornelis Escher (1898-1972)



Escher lépcső



Fodrász rúd