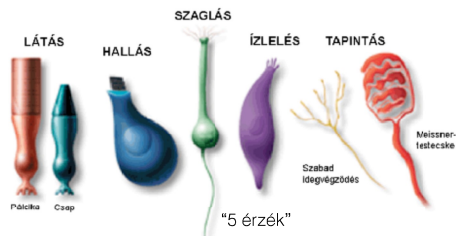


# ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK BIOFIZIKÁJA LÁTÁS, HALLÁS

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.

	Érzésmódosítás	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	Idegvégződés	Többféle*
	Meleg	Idegvégződés	Többféle*
	Fájdalom	Idegvégződés	Többféle*
	Ízületi helyzet és mozgás	Csapos idegvégződés	...
Nem tudatosuló	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 $P_{CO_2}$	Idegvégződés	...
	Liquor-pH	A nyúlóközpont ventrális felszínének receptorai	Glomus caroticum és aorticum
	A plazma ozmotikus nyomása	Az OVLT és valószínűleg más circumventricularis szervek az elülső hypothalamusban	...
	Arteriovenosus glükózkoncentráció	Hypothalamus (glukozotróf) sejtjei	...

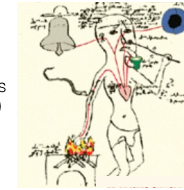
### Érzékszervi receptorok érzékenysége

eV nagyságrendű inger is elegendő az ingerület kiváltására:

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

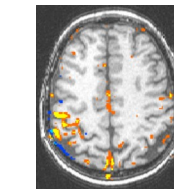
## Elméletek az érzékelésről

Kardiocentrikus érzékelés (középkori rekonstrukció)

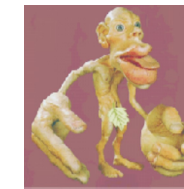


Arisztotelész (Kr. e. 384-322) kardiocentrikus érzékelés.

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



fMRI felvétel szenzomotoros funkció közben

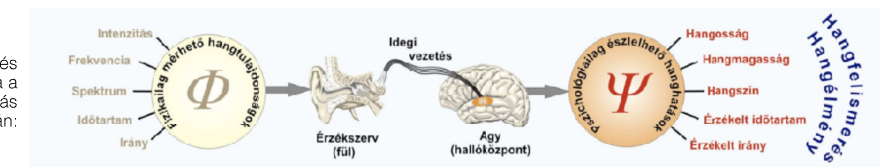


Szenzoros homunculus

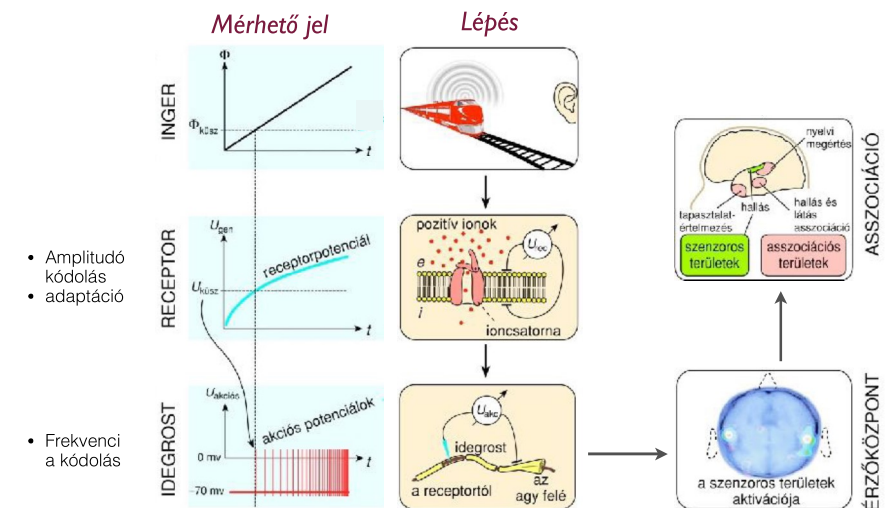
Ma:

- 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

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



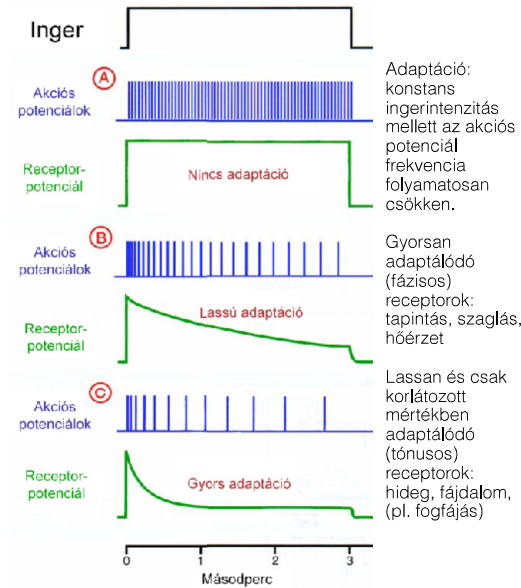
Stevens (1906-1973)

$\psi$  = érzet erőssége  
 $\phi$  = háttérintenzitás  
 $\phi_0$  = abszolút küszöbinger  
 $n$  = érzékelés fajtájára jellemző konstans

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

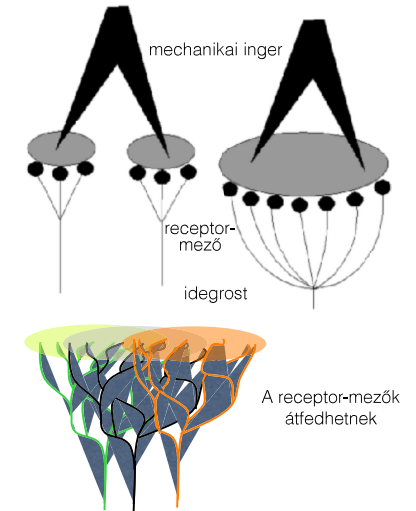
$n > 1$ : expanszív függvény (nyomás, ízlelés)

## 3. Időtartam, adaptáció



## 4. Lokalizáció

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



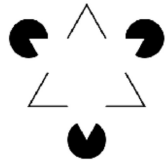
## A látás biofizikája

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

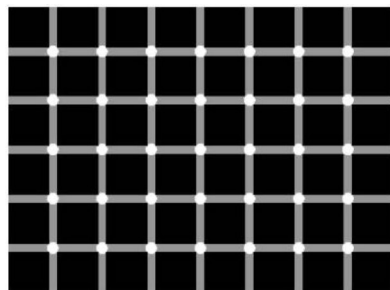
Optikai csalódás - intenzitás



Mach sávok

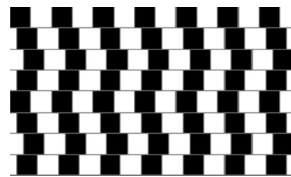


Kanizsa háromszög

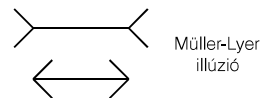


Hány fekete korongot látunk?

Optikai csalódás - irány, méret



Café wall illúzió

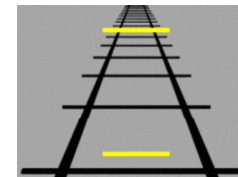


Müller-Lyer illúzió

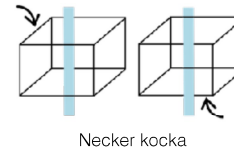


Ebbinghaus illúzió

## Optikai csalódások – tér, alak



Ponzo illúzió



Necker kocka

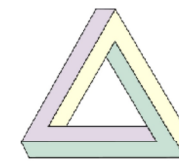


Necker kocka effektus római térhatású mozaikon

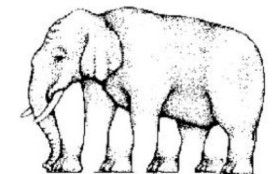
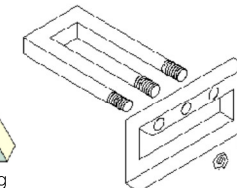


Rubinváza illúzió

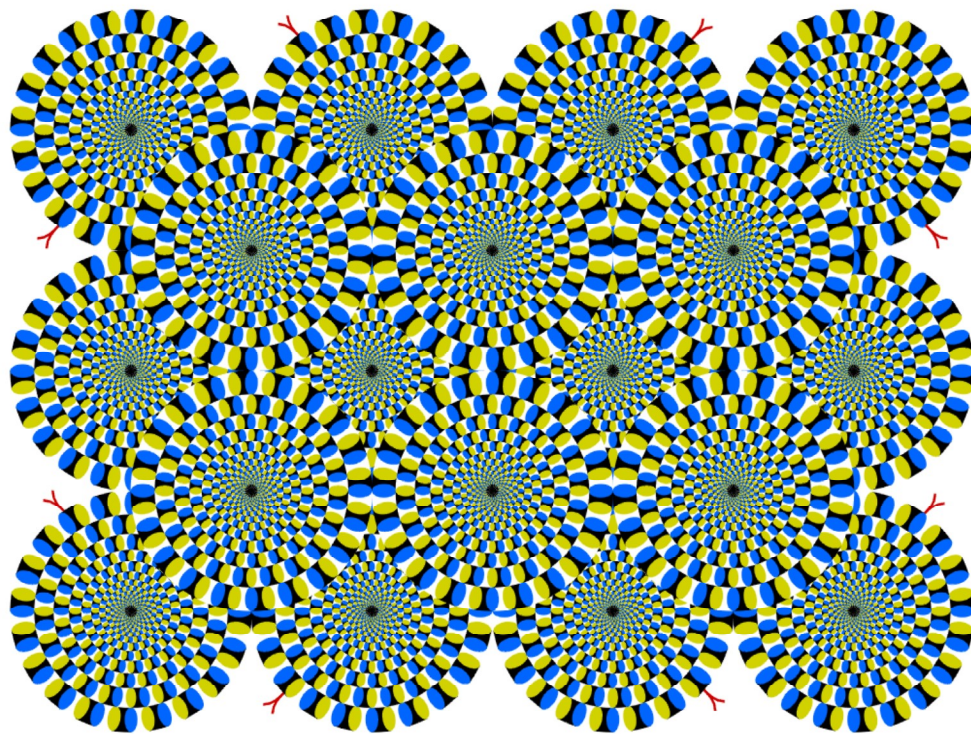
“Lehetetlen” geometriai alakzatok



Penrose háromszög

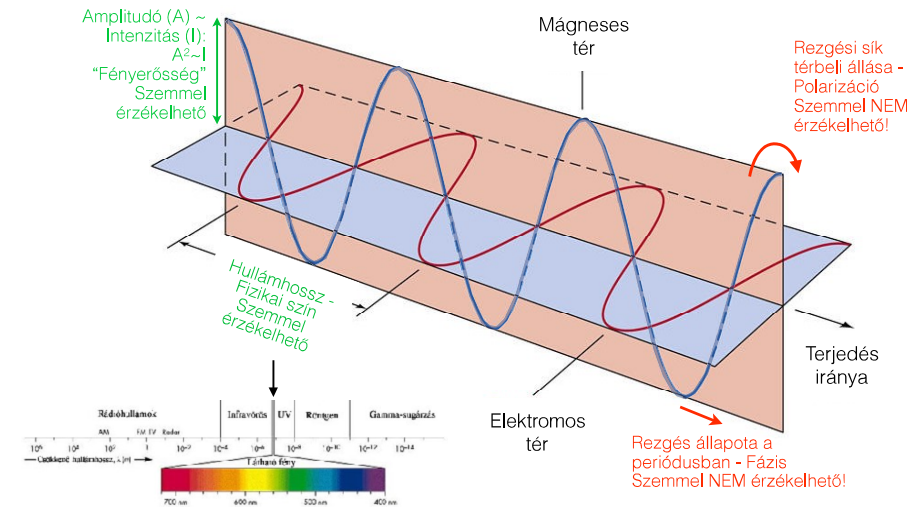






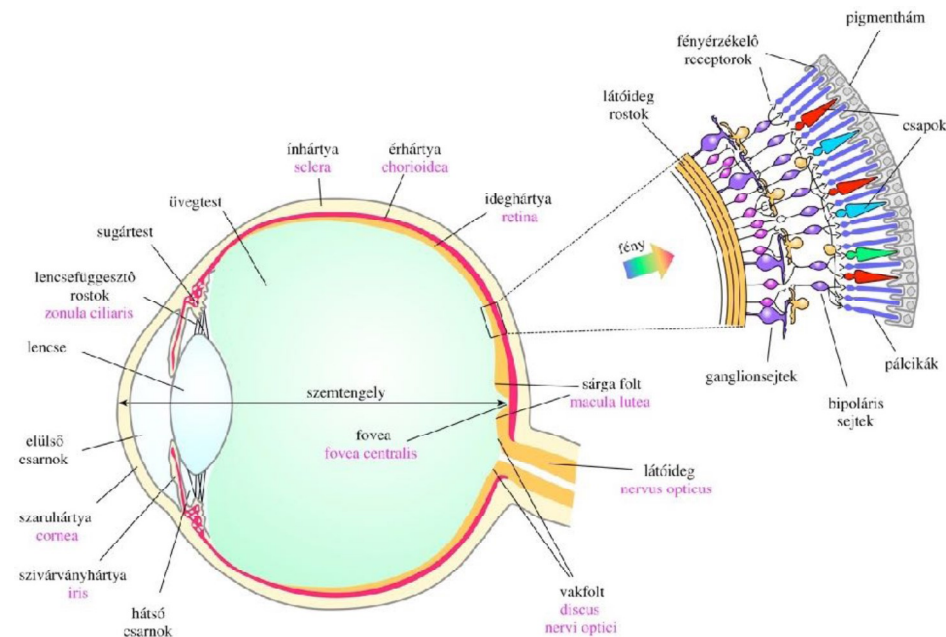
# A látás ingere: fény

Elektromágneses (tranzverzális) hullám

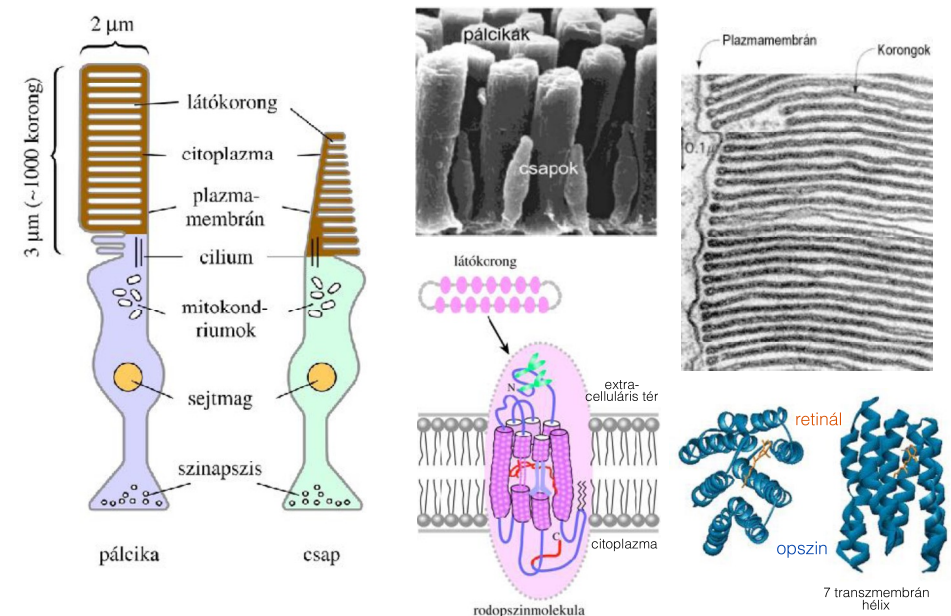


- A szem érzékeny: hullámhosszra és amplitúdóra (~intenzitás)
- A szem érzéketlen: fázisra és polarizációra

## “Receptor-szerv”: szem



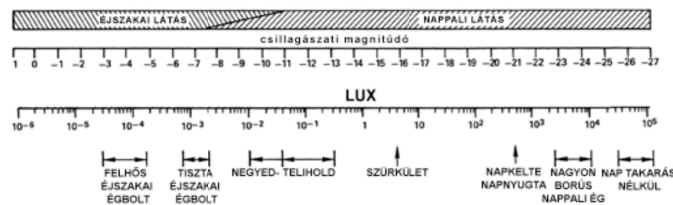
## Fotoreceptorok



# A receptorsejtek tulajdonságai

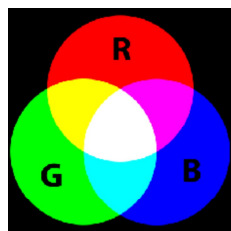
Pálcikák	Csapok
Kis fényintenzitást képes érzékelni (optimális esetben akár 1 foton!!)	Kevésbé érzékeny, de nagy intenzitástartományban érzékel
Közepes fényerősségnél válasza telítődik	Nincs telítődés
Főleg a retina perifériáján található	Foveában, főleg fovea centralis
Több pálcika - egy ganglion (nagyobb 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!



## A színérzékelés alapja

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

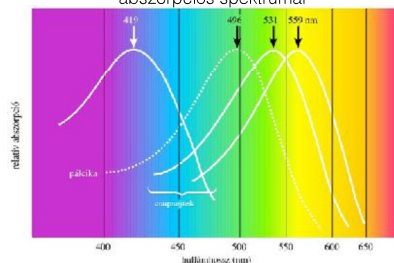


### Additív színkódolás

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

$$X = rR + gG + bB$$

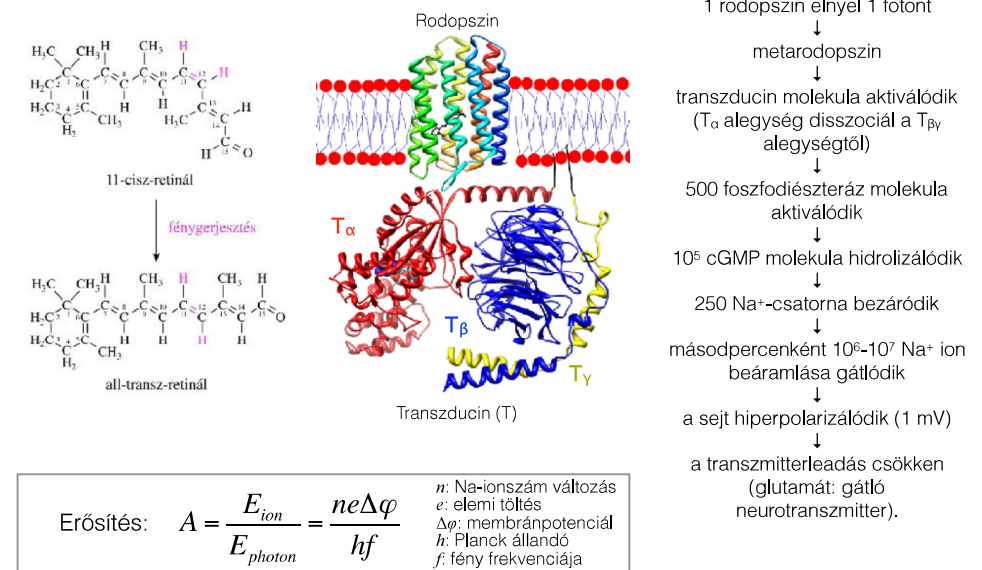
Emberi szem színérzékeny receptorainak (csapok) abszorpciós spektrumai



Emberi szemben:

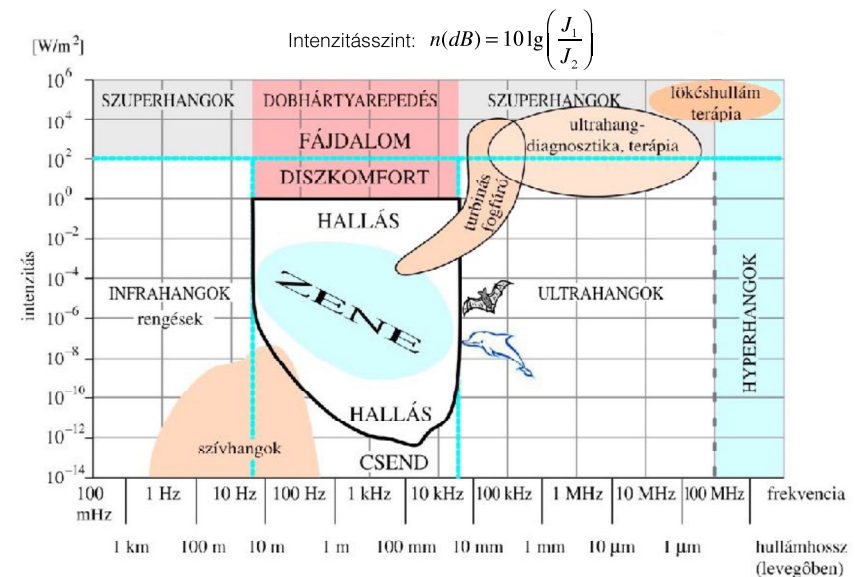
- 3 különböző színérzékeny receptor.
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ( $R=64\%$ ,  $G=32\%$ ,  $B=2\%$ ).

## Fényérzékelés alapja: fotokémiai reakció



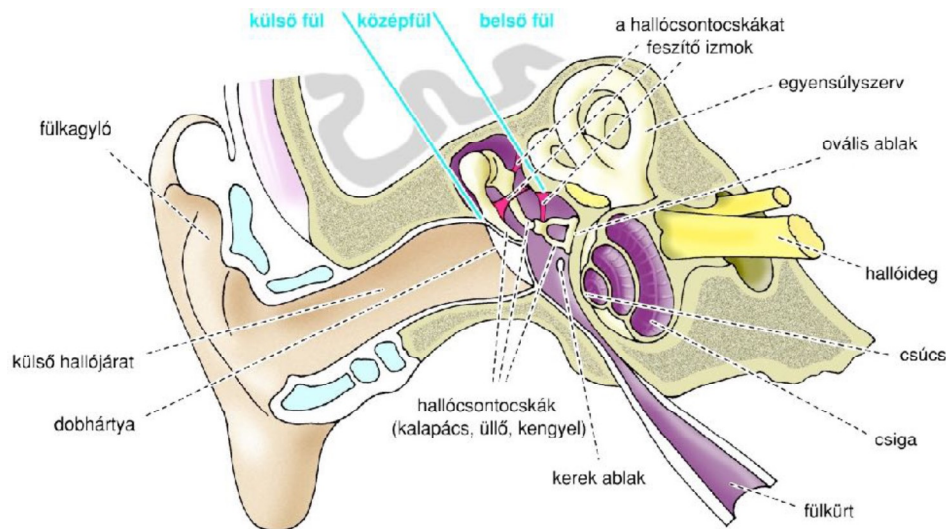
## A hallás biofizikája

Inger: hang - mechanikai hullám





# “Receptor-szerv”: fül



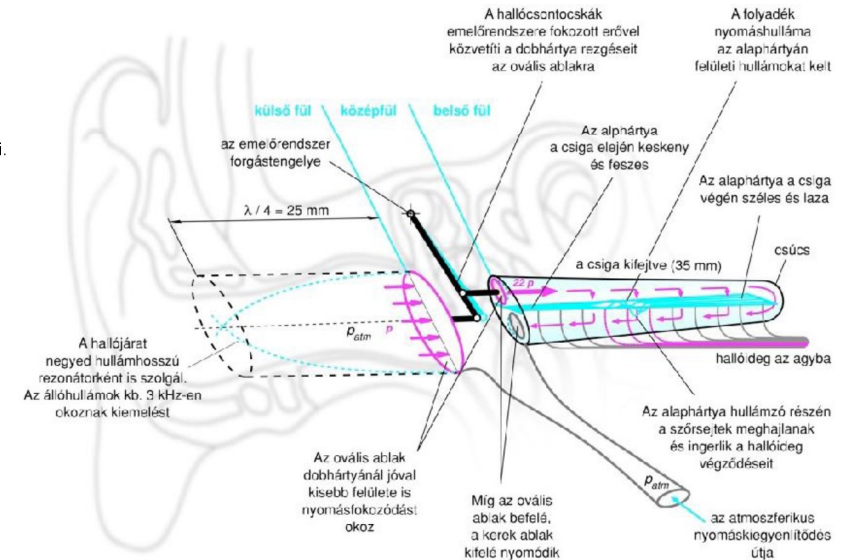
# A fül egyszerűsített vázlata

Külső fül:

1. Fülkagyló: A hangot a hallójáratba tereli.

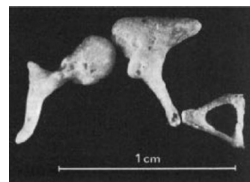
2. Hallójárat: Visszaveri és a dobhártya felé tereli a hanghullámokat. Adott tartományt (2000-5000 Hz) hatékonyabban továbbít.

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

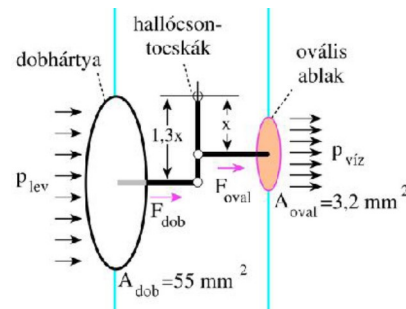
Hallócsontocskák  
(kalapács, üllő, kengyel)



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:  $1,3 \times$

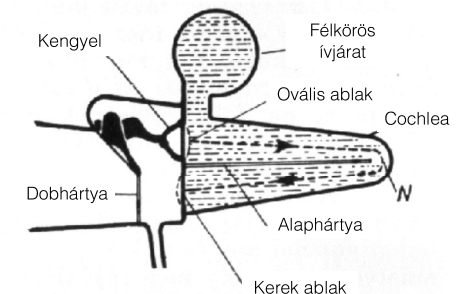
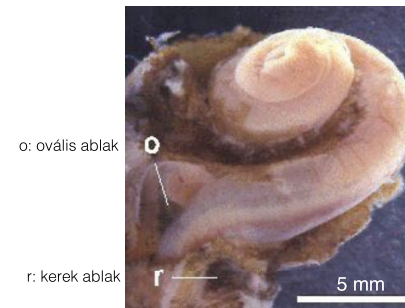
Összesen kb.  $22 \times$  nyomásnövekedés



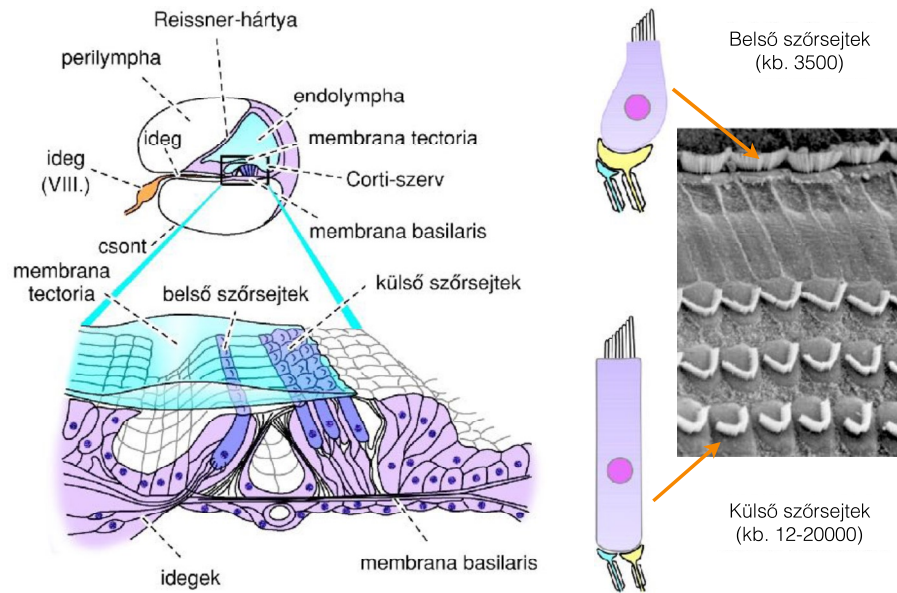
## A belső fül: szenzor

Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

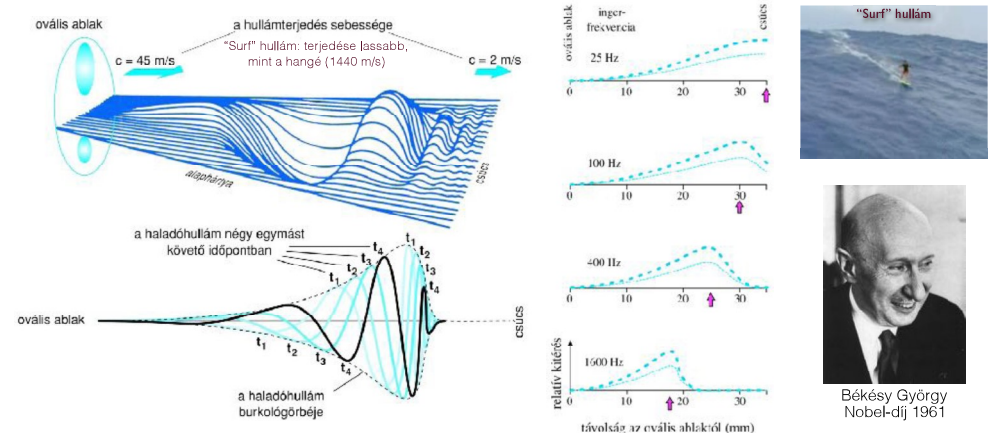
Csiga (cochlea): 2,5 menetű, 35 mm hosszú folyadékkal teli csatorna. Hosszában a részben csontos, részben hátyaszerű fal, az alaphártya (membrana basilaris) osztja ketté. A hang érzékelését végzi.



# A belső fül finomszerkezete



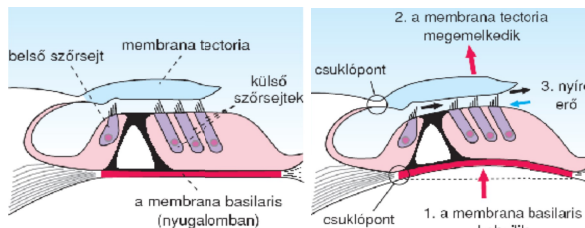
# Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán



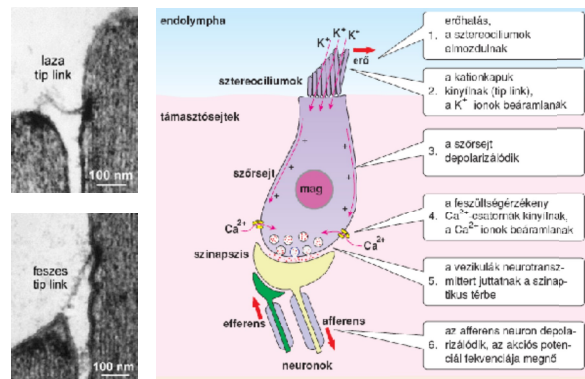
A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

# A Corti-féle szerv működése

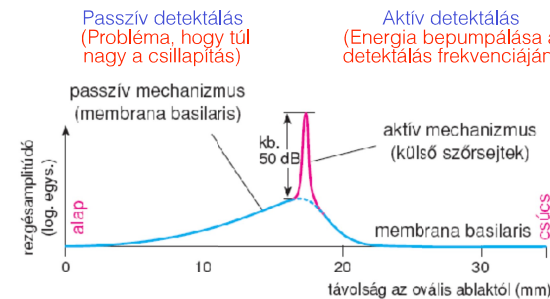
A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt megdőlnék és depolarizálódnak.



Belső szőrsejtek: Mechanoelektromos transzdukcio



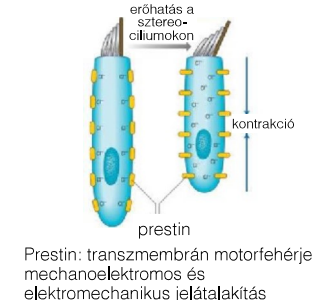
# Külső szőrsejtek: erősítők



Erősítés: hang-indukált kontrakció a külső szőrsejtben



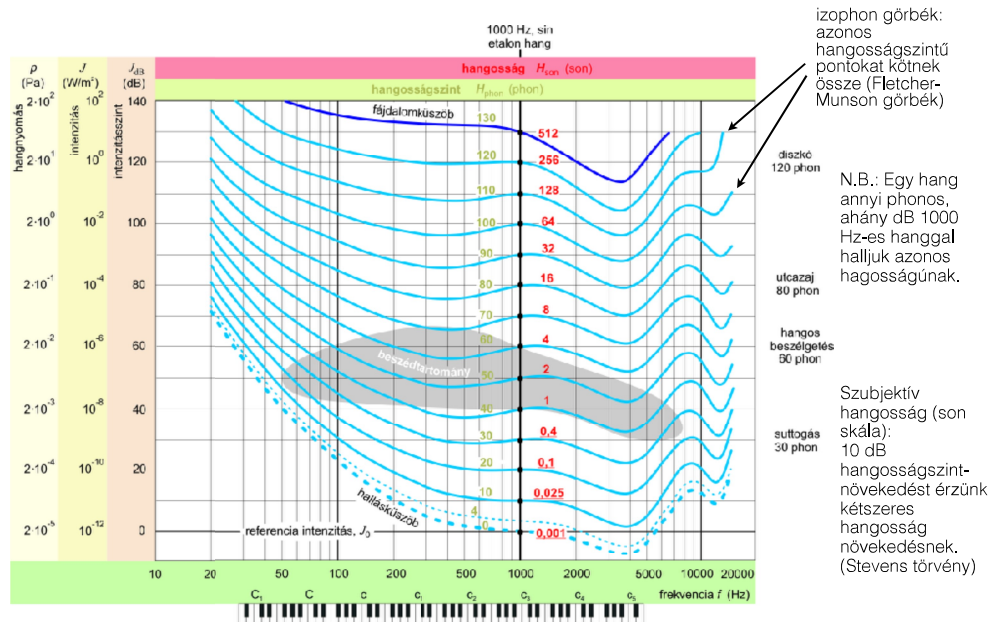
- Aktív detektálásra utaló megfigyelések:
  - T. Gold (1948): analógia a regeneratív rádióvevőkkel (pozitív visszacsatolás adott frekvencián: szelektivitás + érzékenység).
  - W. Rode (1971): az élő fül sokkal érzékenyebb.
  - D. Kemp (1979): hang jön a fülből (otoakusztikus emisszió).
- Regeneratív erősítő: pozitív visszacsatolási mechanizmus (szűk frekvencia tartományban nagy erősítés, de csak a disszipálódott energiát pótolja; egyébként fűlcsengés jönne létre)



Prestin: transzmembrán motorfehérje mechanoelektromos és elektromechanikus jelátalakítás

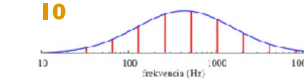
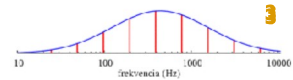
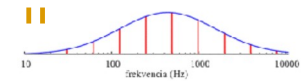
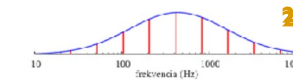
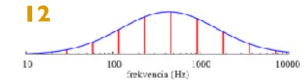
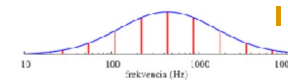


# Ingerintenzitás és érzet - pszichoakusztika

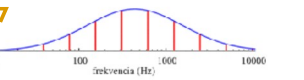
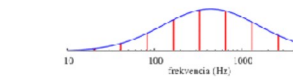
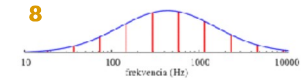
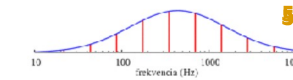
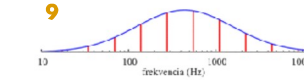
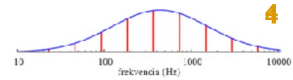


# Akusztikus illúzió?

Shepard tónus: oktávokkal elválasztott szinushangok

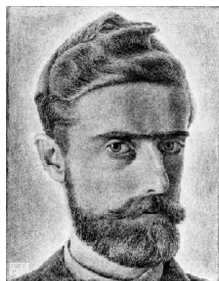


Shepard skála: mozgó alaphang

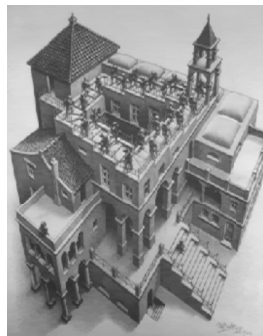
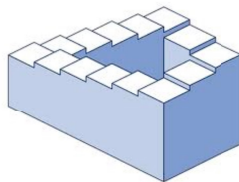


# Akusztikus illúzió?

A Shepard skála vizuális analógjai:



Maurits Cornelis Escher (1898-1972)



Escher lépcső



Fodrász rúd