

# ÉRZÉKSZERV RECEPTOROK BIOFIZIKÁJA

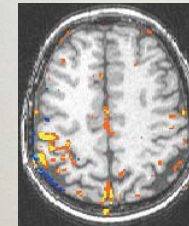
## Elméletek az érzékelésről



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

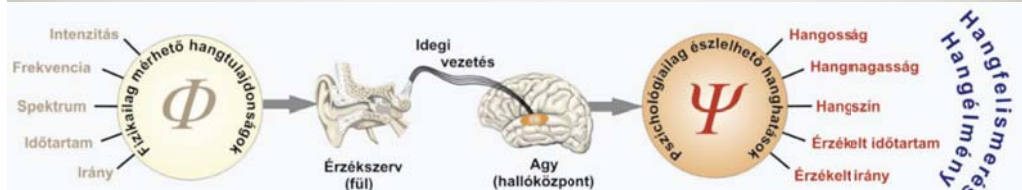
Ma:

**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
Izlelés	Izlelőreceptor-sejtek	Izlelőbimbó
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	...

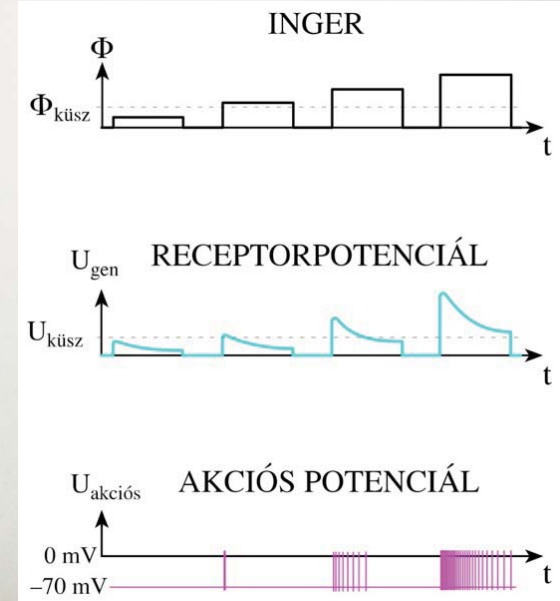
## A jelátalakítás lépései

**Környezet**  
(fizikai-kémiai hatások)

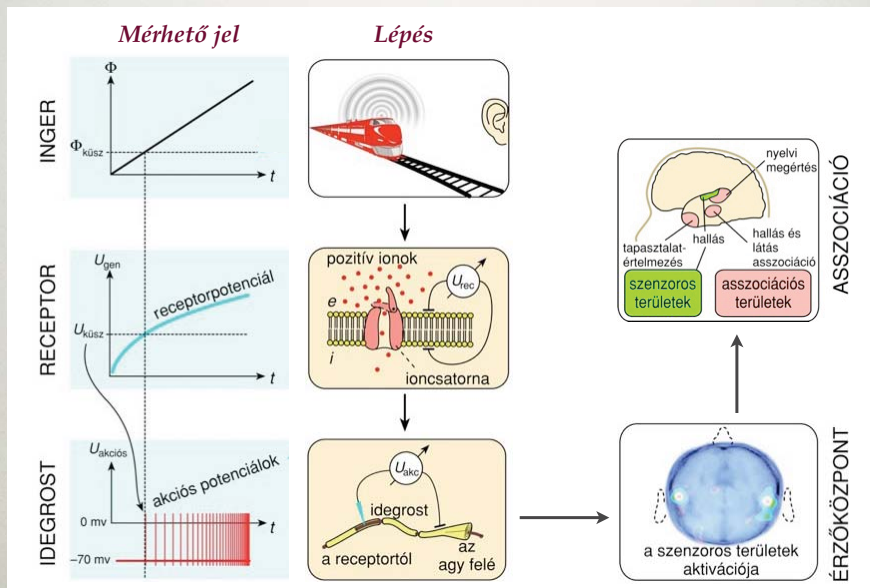
**Receptor**

**Idegsejt**

**Központi idegrendszer**



## 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!

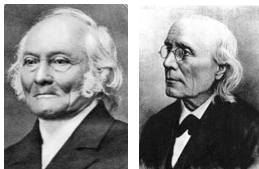
## 2. Intenzitás

### 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)

$\psi$  = érzet erőssége  
 $\phi$  = háttérintenzitás  
 $\phi_0$  = 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.

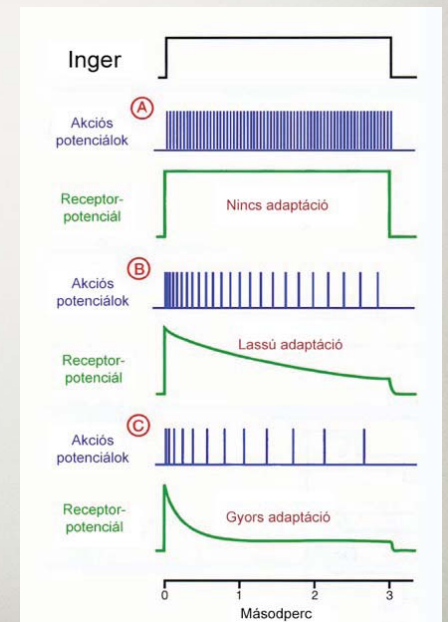
Gyorsan adaptálódó (fázisos) receptorok

Pl. tapintás, szaglás, hőérzet

Lassan és csak korlátozott mértékben adaptálódó (tónusos) receptorok

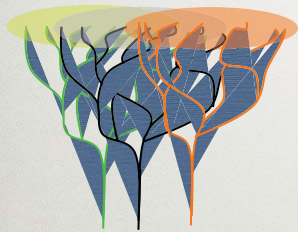
Pl. hideg, fájdalom (fogfájás)

Illyés Gyula: "Doleo, ergo sum"

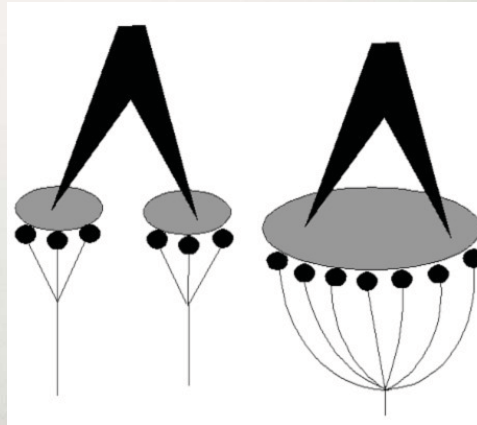


## 4. Lokalizáció, receptor-mezők

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

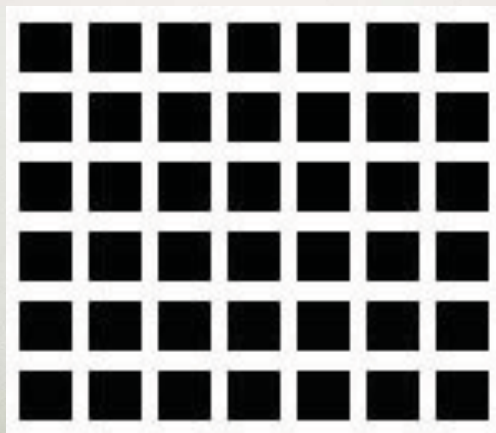
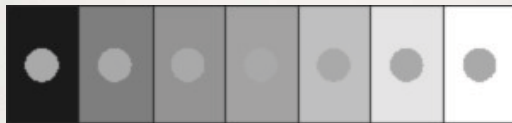


Receptor-mezők és átfedésük

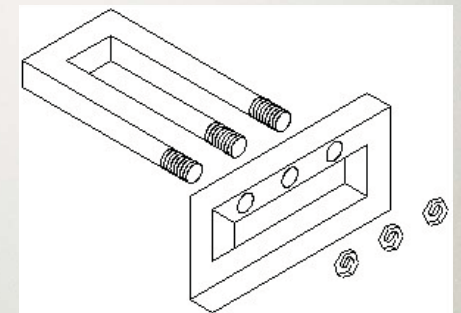
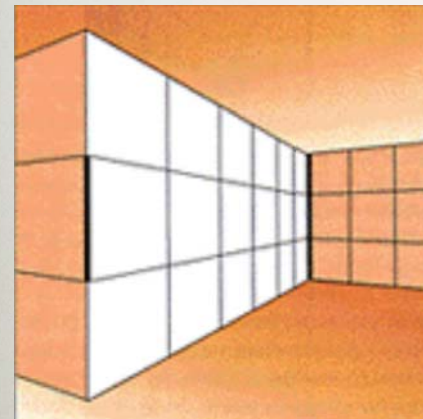


## A SZEM BIOFIZIKÁJA

### Optikai csalódások – intenzitás

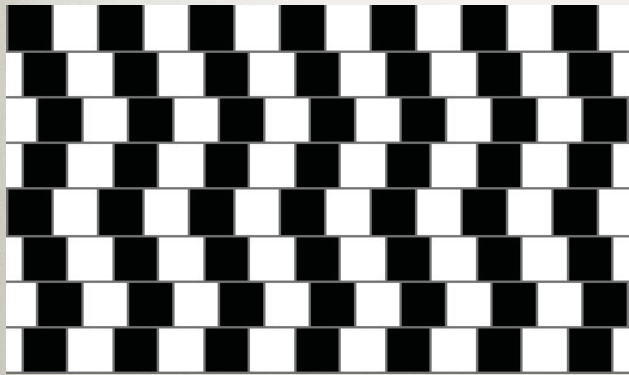


### Optikai csalódások – tér

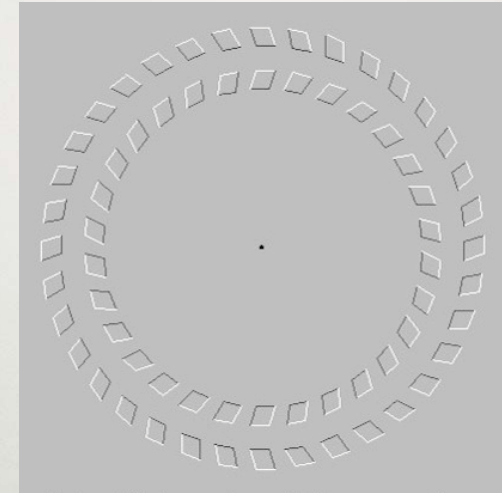




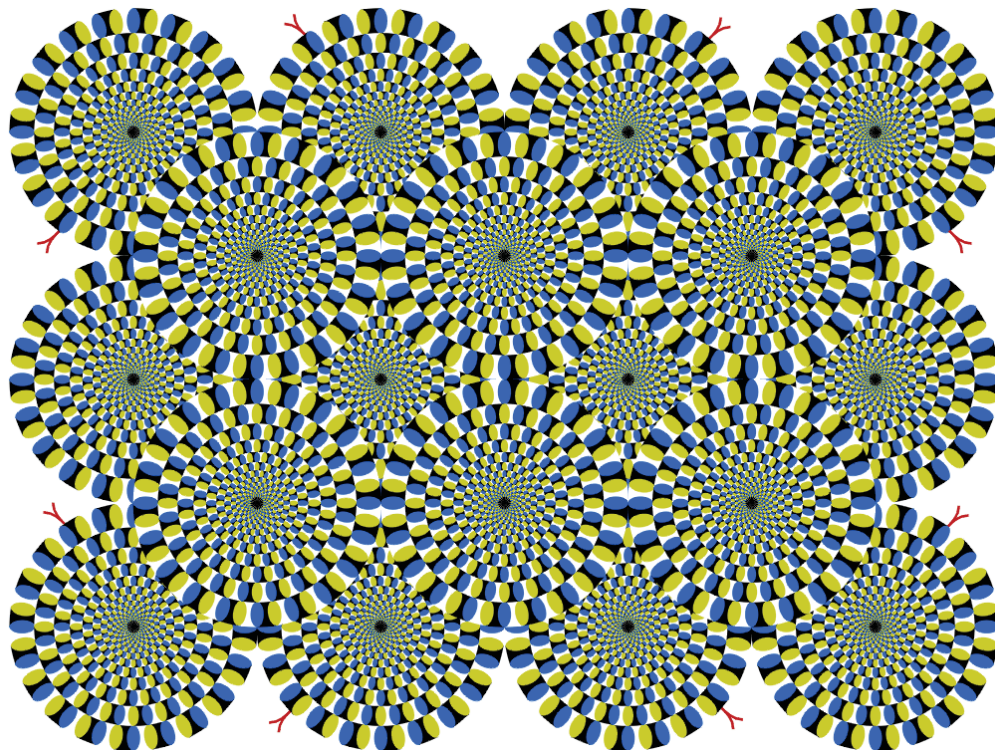
## Optikai csalódások - irány



## Optikai csalódások - mozgás

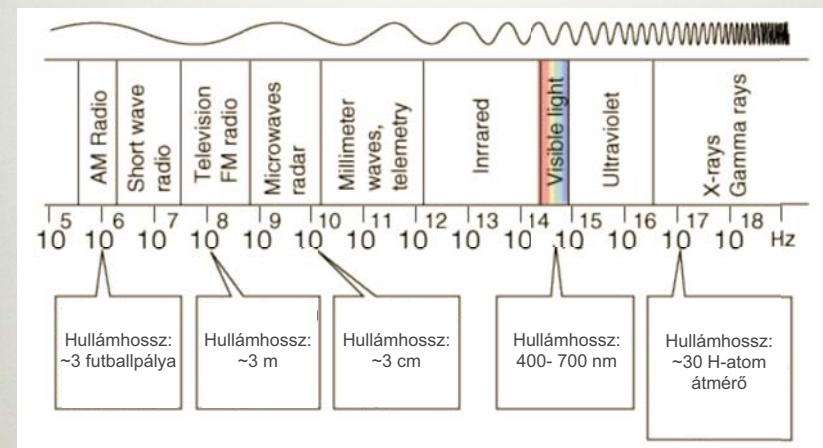


Az optikai csalódások a látórendszer különleges jelfeldolgozó képességére utalnak.



## Inger: fény

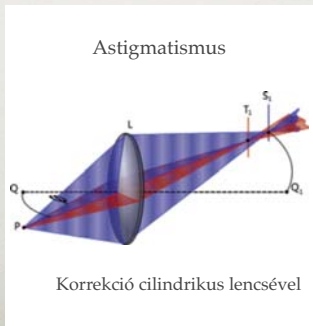
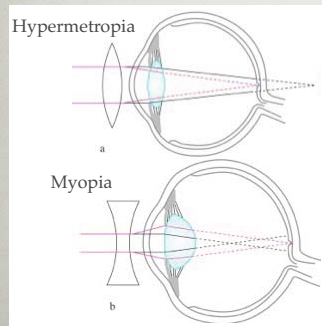
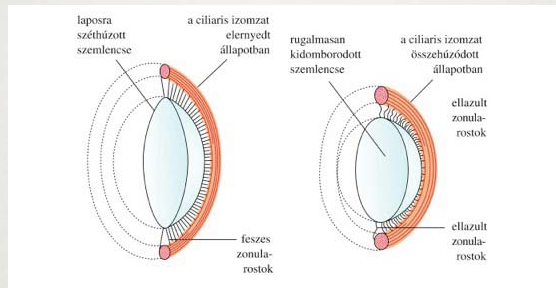
### Elektromágneses hullám







# Akkomodáció és törési hibák



# A szem feloldóképesége

**Látászöghatár:** az a legkisebb látászög, amelynél két különálló pontot meg tudunk különböztetni egymástól.

Egészséges szem esetében: 1'

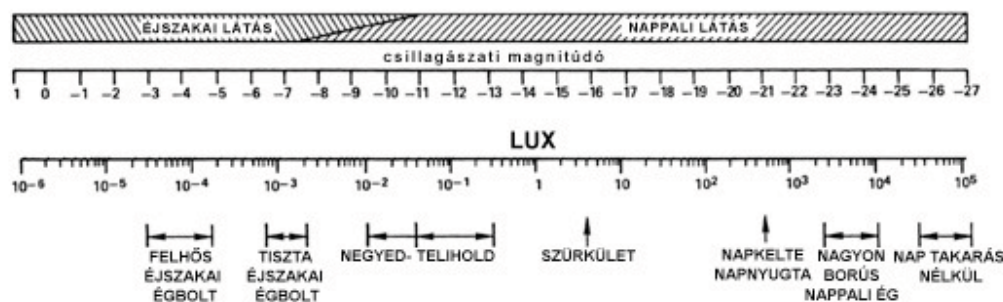
$$\text{látásélesség} = \frac{1'}{\alpha} 100\% \quad \alpha = \text{kísérleti látászöghatár}$$

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

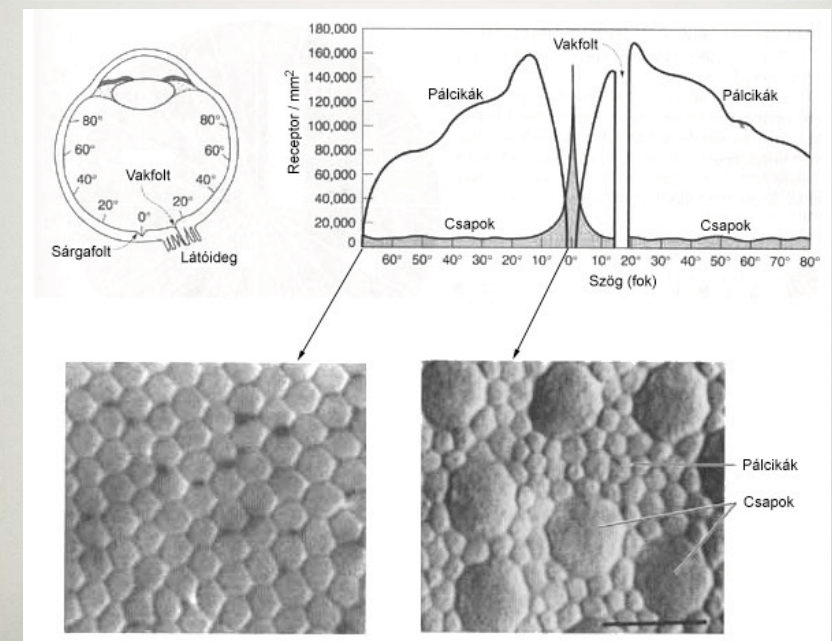
Tárgy	Receptorokra eső kép	Látásérzet

# Látási ingerület kialakulása

## A szem érzékenysége



# Fotoreceptor eloszlás a retinán

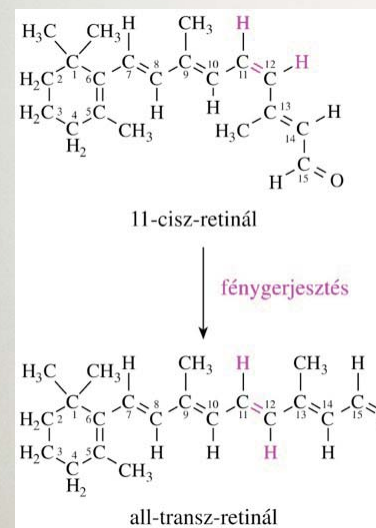




## A receptorsejtek tulajdonságai

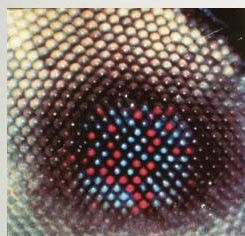
Pálcika	Csap
Kis fényintenzitást képes érzékelni (optimális esetben akár 1 fotont!)	Kevésbé érzékeny, de nagy intenzitástartományban érzékel
Közepes fényerősségnél válasza telítődik	Nincs telítődés
Főleg a retina perifériáján található	Foveában, főleg fovea centralis
Egy ganglionnak több pálcika adja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

## Fotokémiai reakció



1 rodopszin elnyel 1 fotont  
 ↓  
 500 transzducin molekula aktiválódik  
 ↓  
 500 foszfodiészteráz molekula aktiválódik, és  
 ↓  
 10<sup>5</sup> cGMP molekulát hidrolizál  
 ↓  
 250 Na<sup>+</sup>-csatorna bezáródik  
 ↓  
 másodpercenként 10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> Na<sup>+</sup> ion beáramlása gátlódik  
 ↓  
 a sejt hiperpolarizálódik (1 mV)  
 ↓  
 a transzmitterleadás csökken (glutamát: gátló neurotranszmitter).

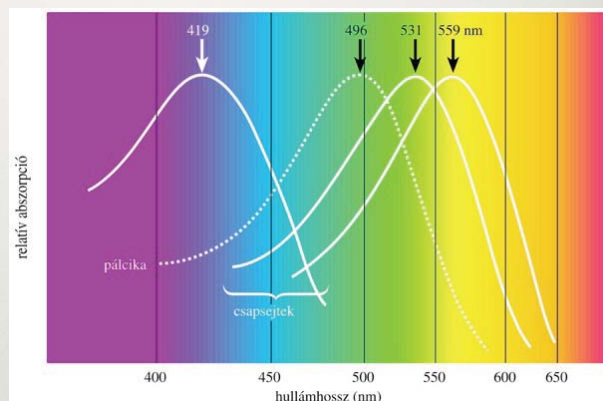
## A színérzékelés alapja



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%).



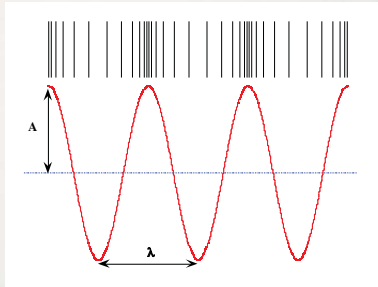
$$X = rR + gG + bB$$

## A HALLÁS BIOFIZIKÁJA



# Inger: hang

Longitudinális  
mechanikai hullám  
(nyomáshullám)



Longitudinális hullám

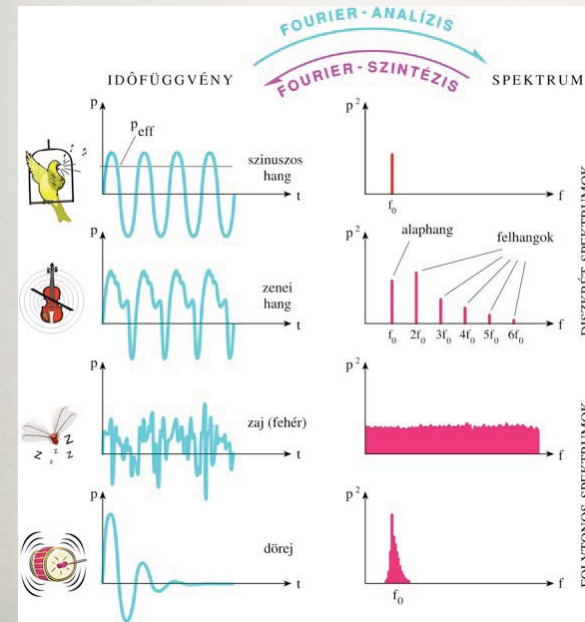


Tranzverzális hullám

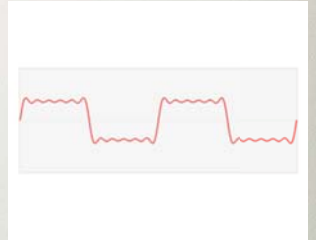
Harmonikus rezgés:  $y(t) = A \sin(ft + \varphi)$

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

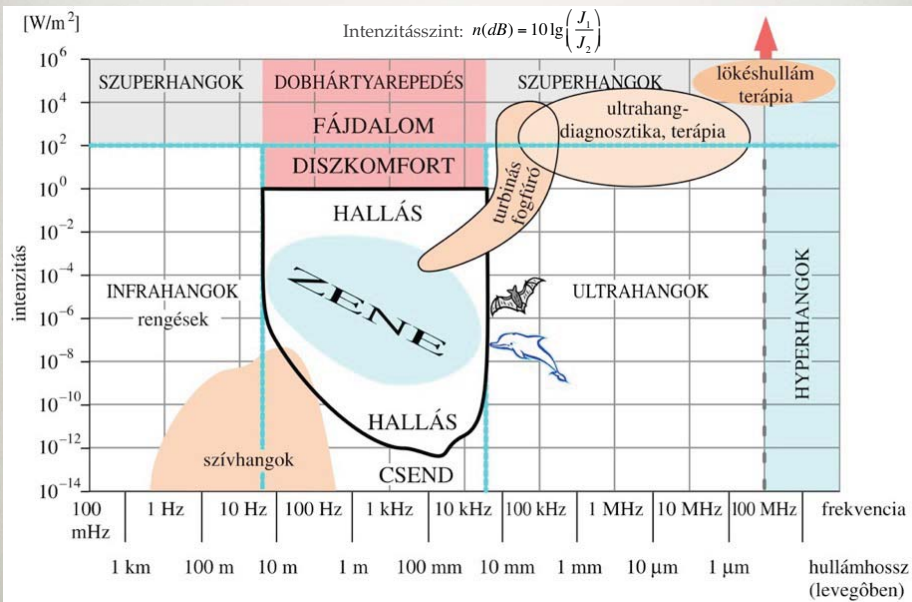
# Hangok és spektrumaik



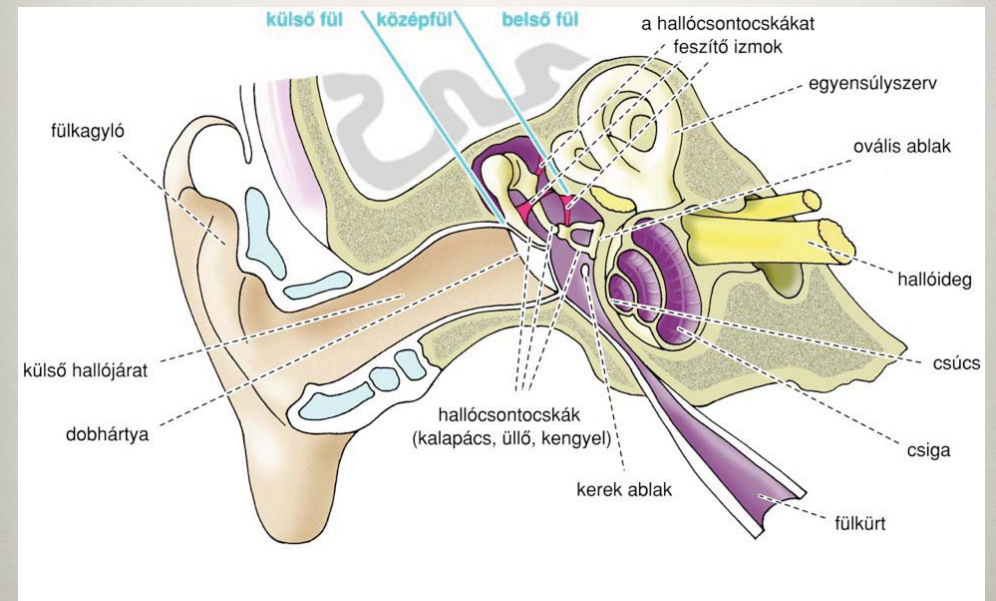
A Fourier analízis lépései:



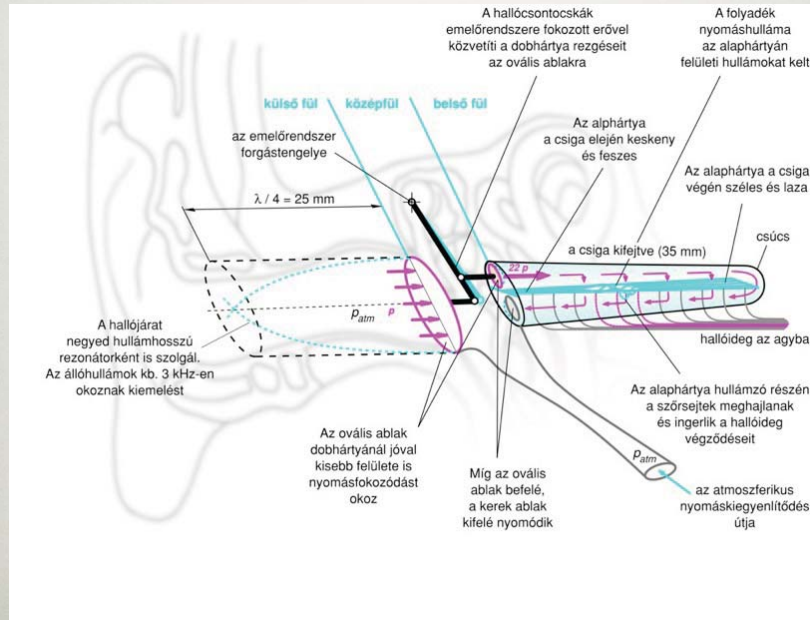
# Hangok frekvenciája és intenzitása



# “Receptor-szerv”: fül



# A fül egyszerűsített vázlata



## 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.

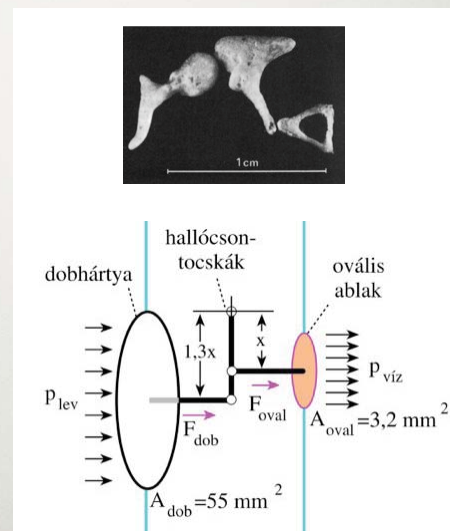
## A középfül: mechanikai erősítő

### Hallócsontocskák (kalapács, üllő, kengyel)

A dobhártya rezgését felerősítik, és átvisszik az ovális ablakra.

**Erősítés:**  
kisebb felületre koncentrált rezgések:  $17 \times$   
emelőszervi működés:  $1,3 \times$

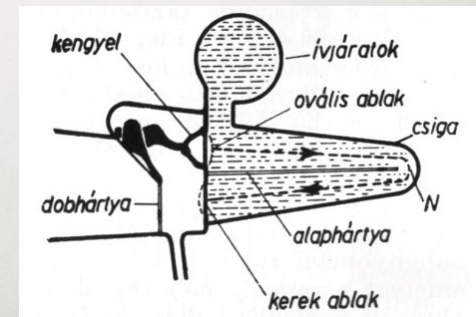
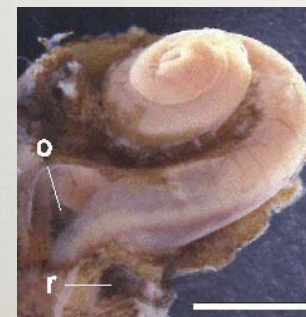
Összesen kb.  $22 \times$   
nyomásnövekedés



## A belső fül: szenzor

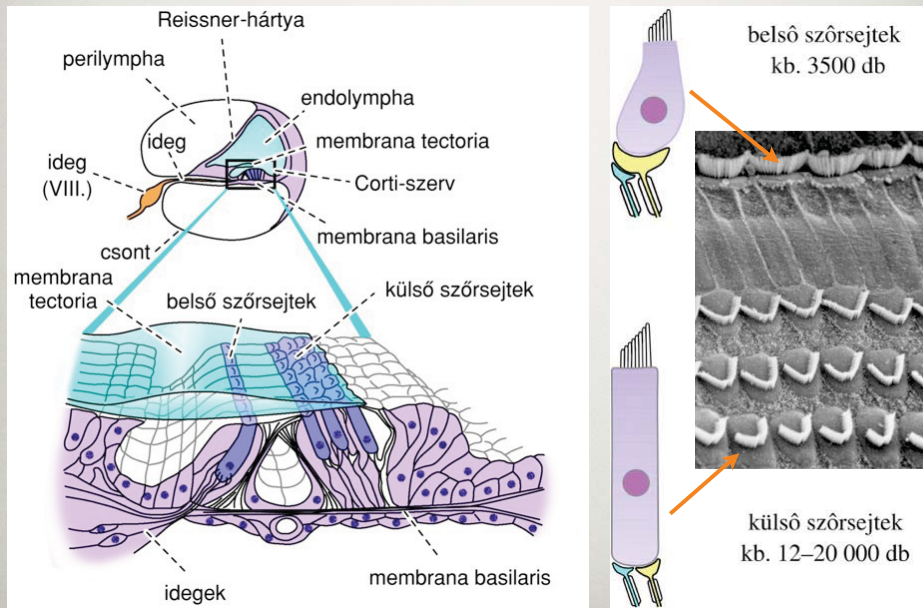
### Egyensúlyozószerv: félkörös ívjáratok

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

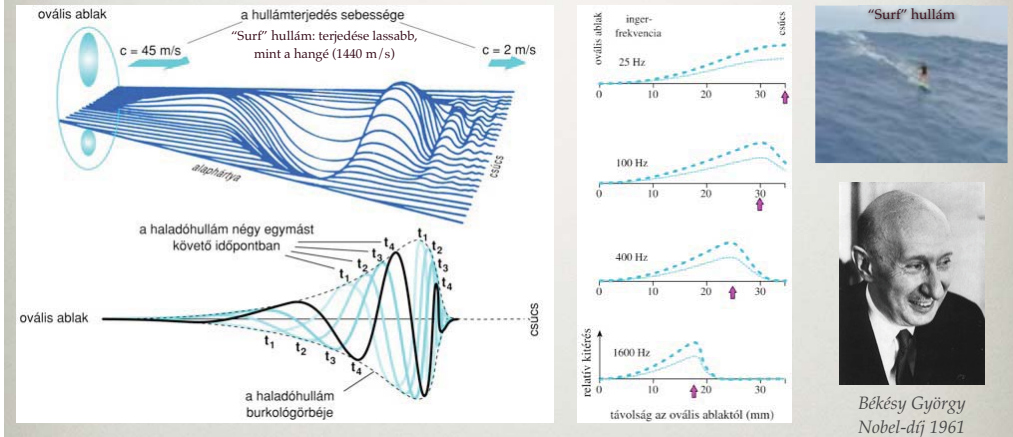




# A belső fül finomszerkezete



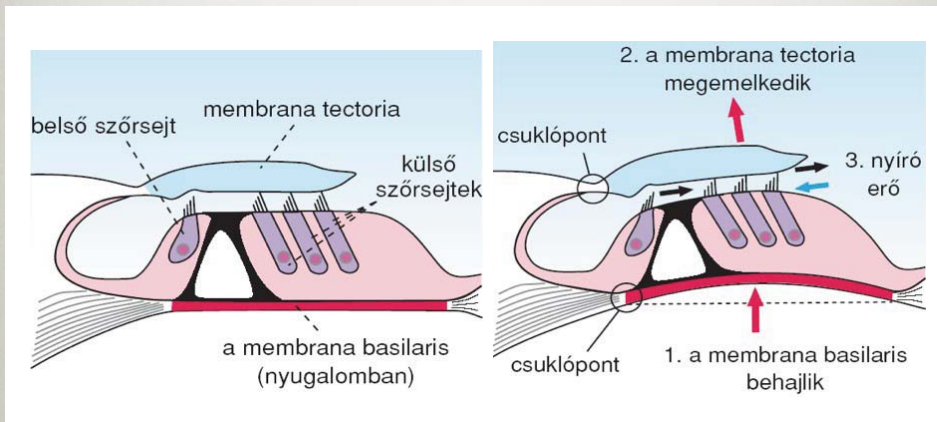
# Békésy: felületi haladóhullámok az alaphártyán



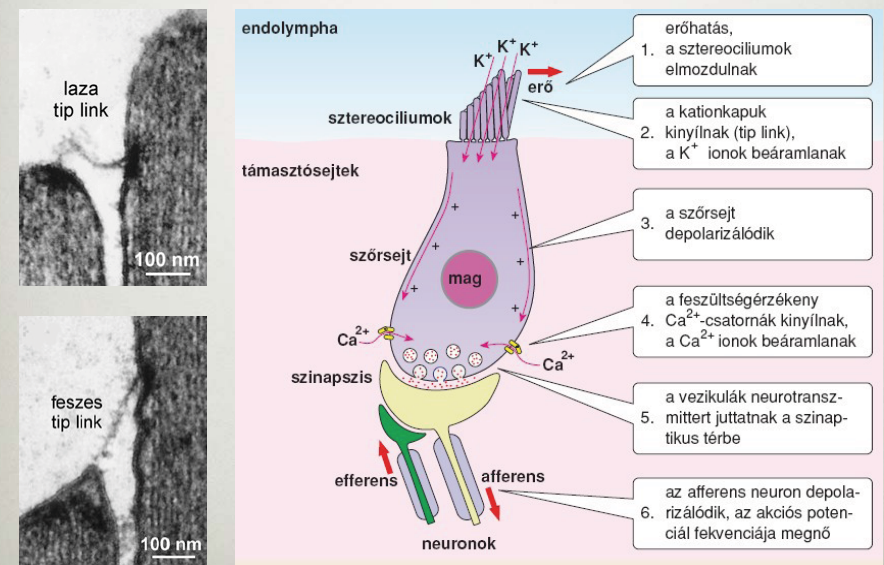
A felületi hullámcsúcsok helyének frekvenciafüggése durva frekvencia-diszkriminációra ad lehetőséget.

# A Corti-féle szerv működése

A szőrsejtek a membrana basilaris behajlása miatt 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).

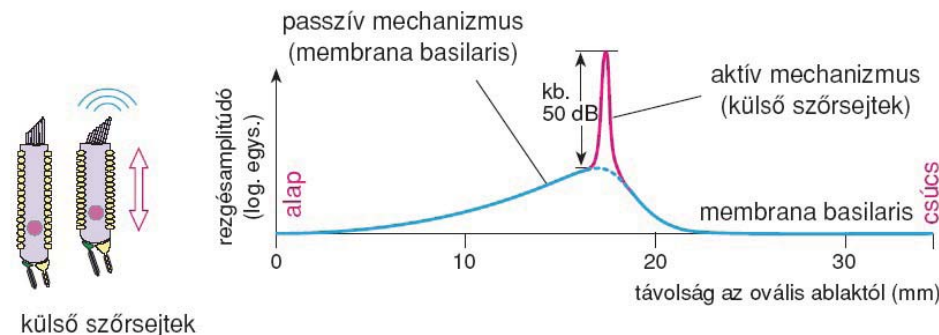
## Aktív detektálás (Energia bepumpálása a detektálás frekvenciáján)

- 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



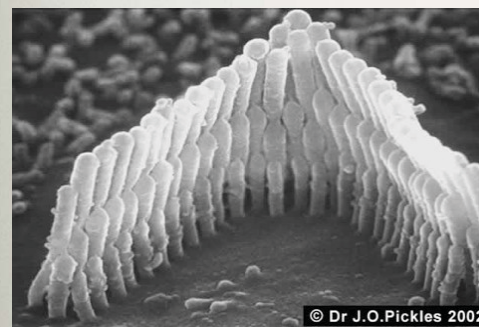
**Regeneratív erősítő:** pozitív visszacsatolási mechanizmus (szűk frekvencia tartományban nagy erősítés, de csak a disszipálódott energiát pótolja; egyébként fülszengés jönne létre)

## Külső szőrsejtek erősítő funkciója

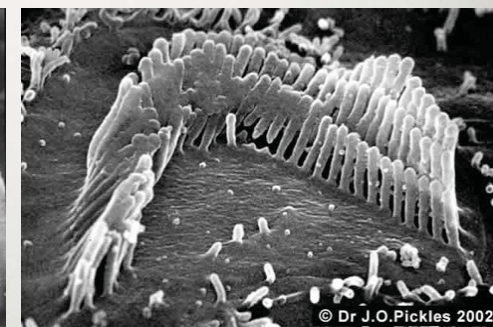


Felelős fehérje - **prestin**, transzmembrán motorfehérje mechanoelektromos és elektromechanikus jelátalakítás

## HALLÁSKÁROSODÁS



Külső szőrsejtek (normál állapot)



Külső szőrsejtek (károsodott állapot)



# Akusztikus információ kódolása

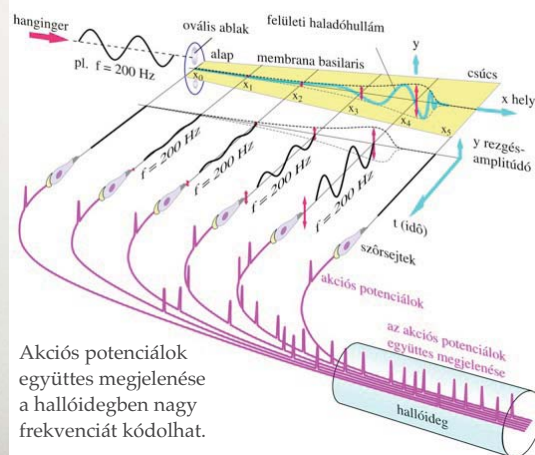
## Hely-teória

Frekvencia érzékelés hely szerint kódolt.

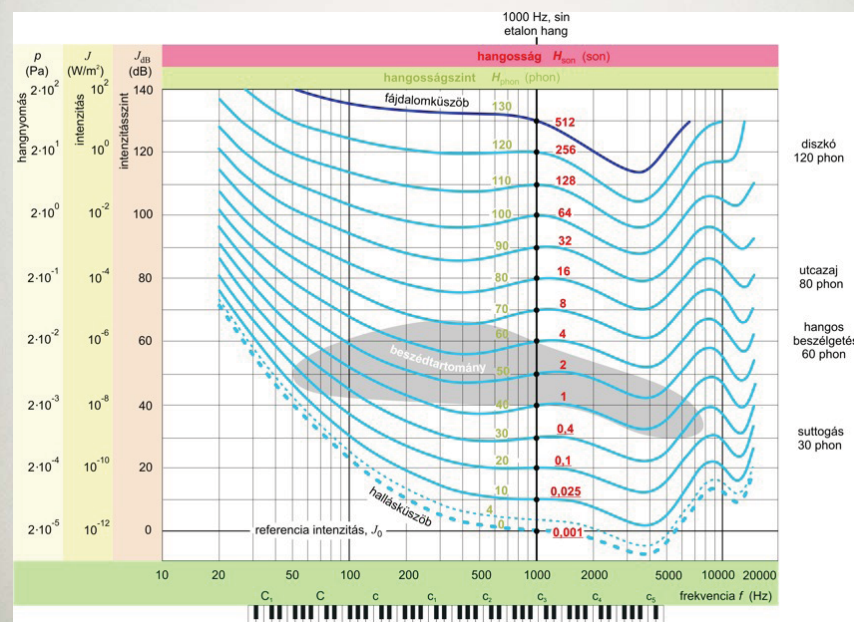
Alapja:

1. A Békésy-féle haladóhullámok amplitúdómaximum-helyeinek gyenge frekvenciafüggése.
2. Aktív erősítés
3. Belső szőrsejtek afferens idegeinek érzékenysége frekvenciafüggő
4. Az afferens idegek hallókérgi leképeződése különböző helyekre történik: a frekvencia "hely szerint kódolt".

## Röplabdaelmélet

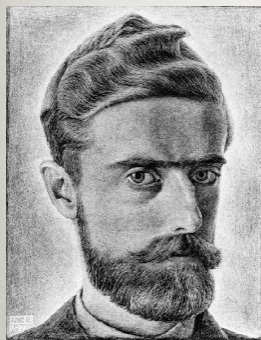


## Pszichoakusztika: hangosság (Fletcher-Munson)

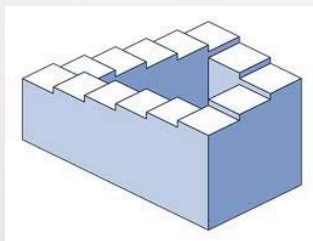


# Akusztikus illúzió?

---



Maurits Cornelis Escher  
(1898-1972)



Escher lépcső

