

Orvosi Fizika 1.

Az hallás és a látás biofizikája

Bari Ferenc

egyetemi tanár

SZTE ÁOK-TTIK Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai
Intézet

Szeged, 2020. október 12.

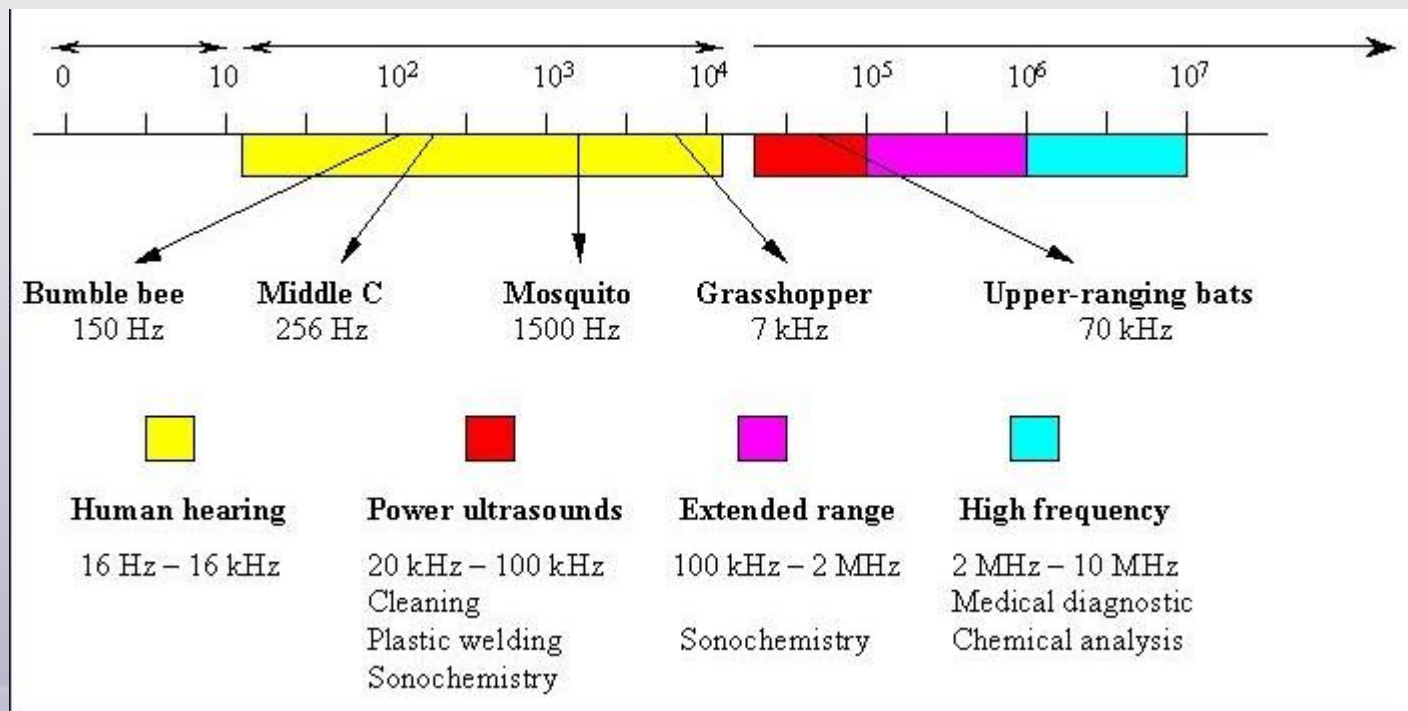
Tanulási támpontok

1. Definiálja a hangot és a hallást, jellemezze a hangot, mint longitudinálisan terjedő mechanikai hullámot
2. Ismertesse a hang sebessége, frekvenciája és hullámhossza, valamint az ezek közötti összefüggéseket! Definiálja a hangmagasságot és a felharmonikusokat (hangszín)! Hogyan függ a hangsebessége a közvetítő közeg mechanikai tulajdonságaitól (sűrűség, hőmérséklet)?
3. A hang intenzitás, a nyomás, az energia sűrűség, a decibel (dB) skála és a szubjektív hangérzet definíciója és jellemzői
4. Ismertesse a Doppler hatást (mozgó hangforrás, mozgó érzékelő, mozgó visszaverő felület)
5. Ismertesse az emberi hallás modelljét, a fülkagyló, a külső fül, a középfül és a belső fül akusztikai jellemzőit (csillapítás, erősítés, impedancia illesztés)
6. Jellemezze a belső fülben kialakuló folyadék rezgéseket, illetve a folyadék kompartmentekből elválasztó membránok mechanikai tulajdonságait
7. Az elektro-mechanikai (mechano-elektronikai) jelátalakításban részvevő struktúrák és a jelátalakítás biofizikai alapjai
8. A térbeni /sztereo hallás fizikai alapjai

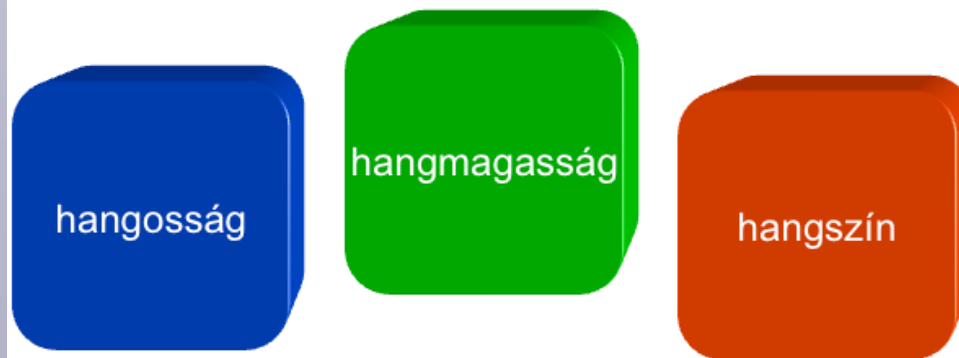
infrahang

hallható hang

ultrahang



a hangok szubjektív jellemzői



A hang és az ember

Fizikai értelemben a hang mechanikai rezgés
A hullámterjedés folyamán a közeg fizikai jellemzői (kitérés, nyomás, sűrűség) változnak
- frekvencia és amplitúdó

A hang a külvilág és az ember – az ember és ember közötti információ közlés egyik módja és eszköze

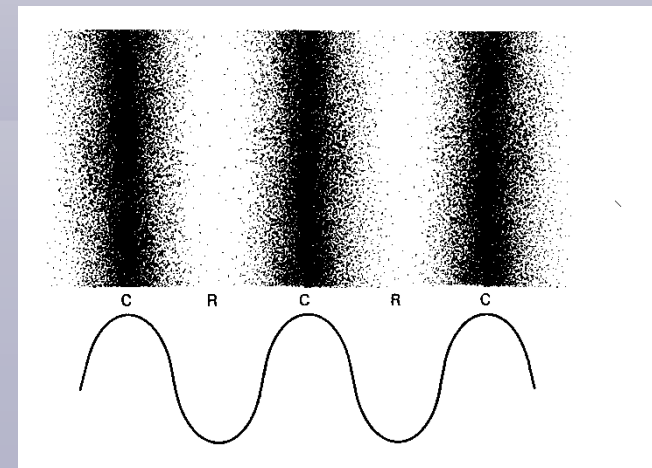
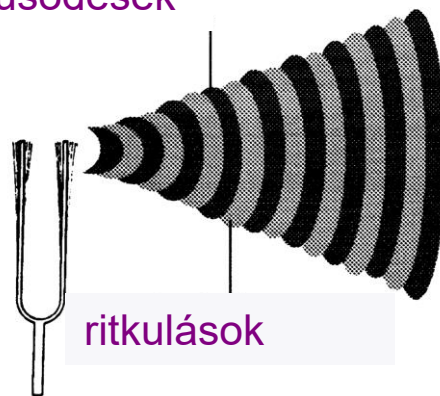
A hang az kifejező eszköz a művészeknek

A hang élvezeti cikk a zenerajongónak

A hang (a zaj) méreg az aludni vágyónak



periodikus
sűrűsödések



Mindenféle hullámra jellemzőek a következő alapjelenségek

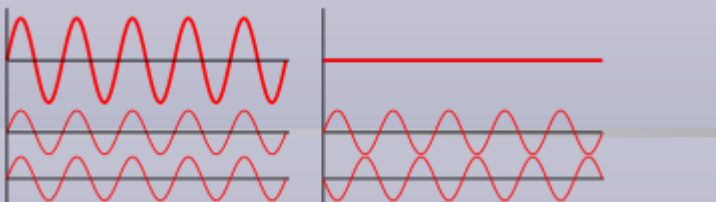
Egyenesvonalú terjedés – a hullám egyenes vonalú terjedése homogén közegben.

Visszaverődés– a hullám irányának megváltozása a felületen – ahol a közeg tulajdonságai megváltoznak – való áthaladás nélkül.

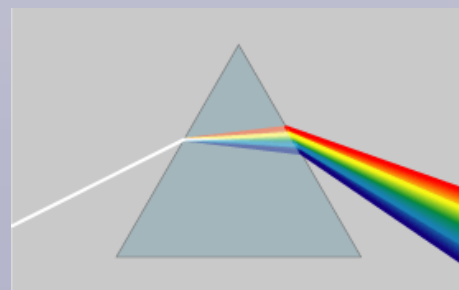
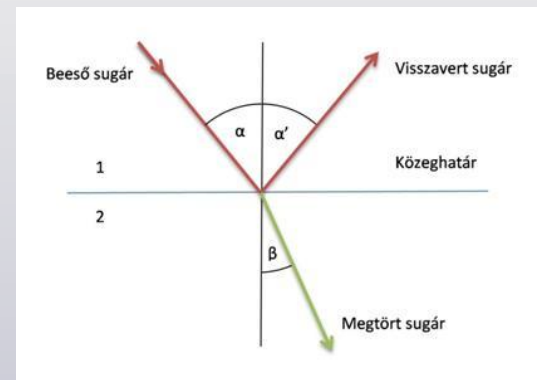
Törés – a hullám irányának megváltozása a felületen – ahol a közeg tulajdonságai megváltoznak – való áthaladással.

Szórás – a hullámhosszhoz hasonló méretű nyíláson áthaladó hullám körkörös „irányban” való tovább terjedése, szétterjedése.

Interferencia – két találkozó hullám szuperpozíciója, fázishelyes összeadódása (erősítés és kioltás is lehetséges a helytől függően).



Diszperzió – a hullám frekvenciák szerinti szétválása.



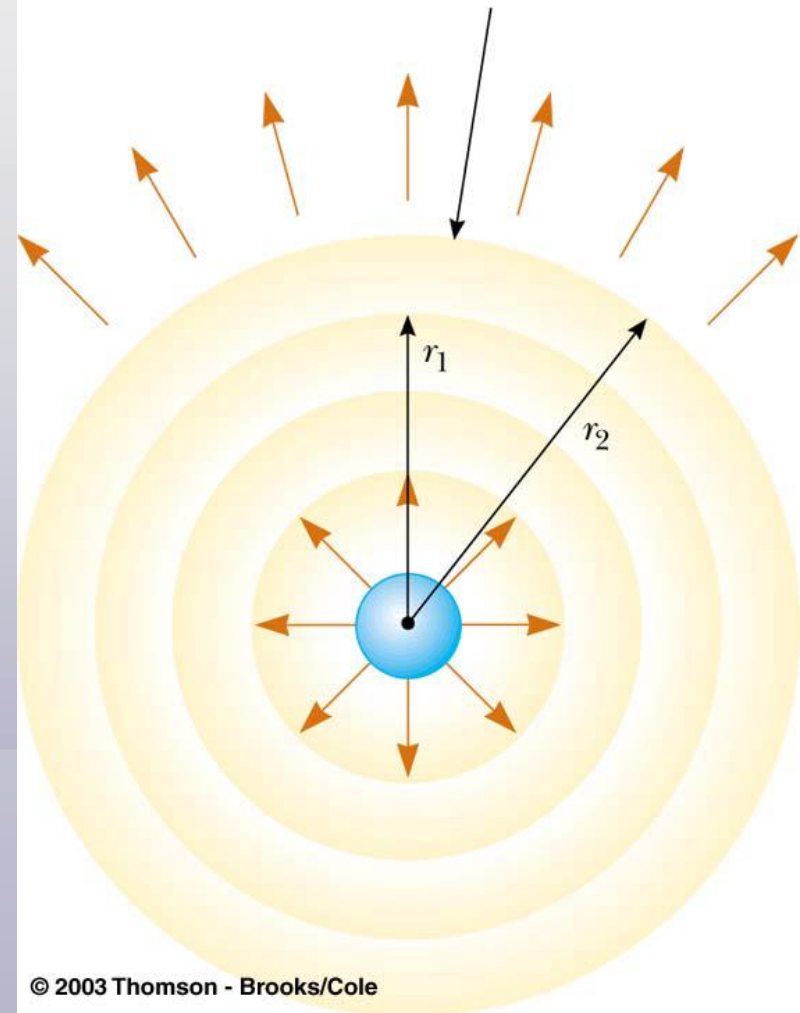
A hanghullám térbeli terjedése

$$I = \frac{\Delta E}{A \Delta t} = \frac{P}{A}$$

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Az intenzitás a távolság négyzetével arányosan csökken

Gömb felület alakú hullámfront

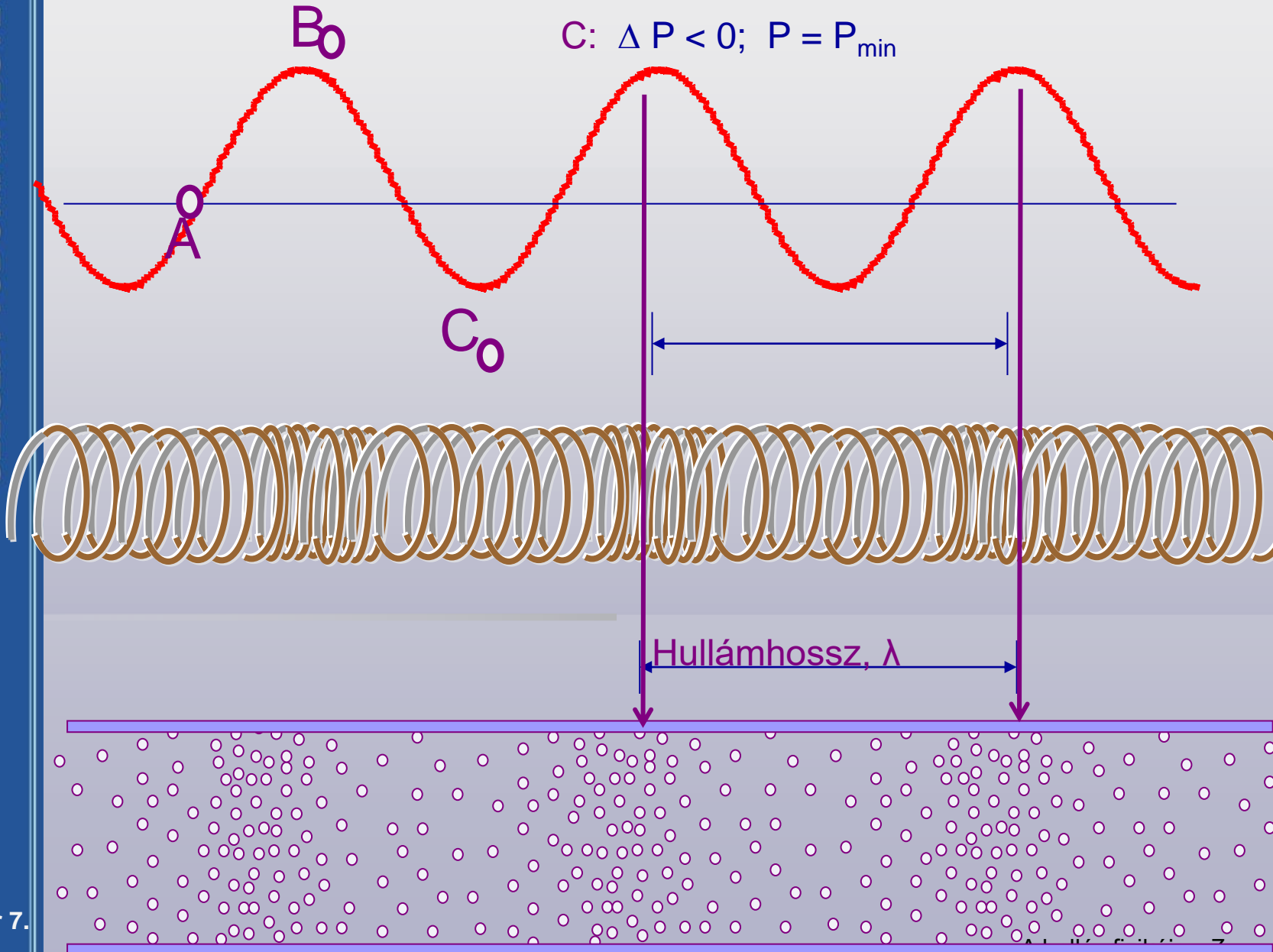


Egyenes mentén terjedő hullám

A: $\Delta P = 0; P = P_0$

B: $\Delta P > 0; P = P_{max}$

C: $\Delta P < 0; P = P_{min}$



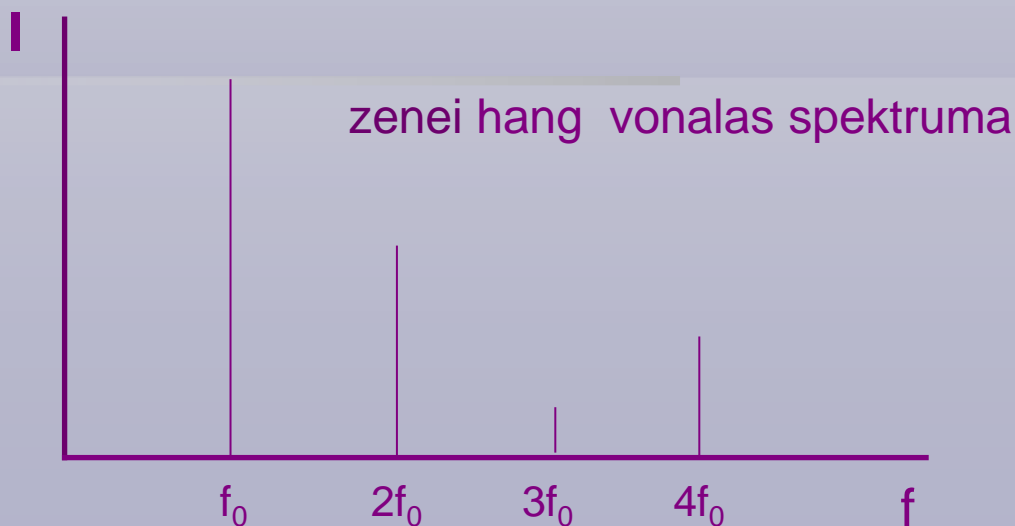
A hang jellemzői 1.

Hangmagasság:

- a frekvencia adja a magasságot –minél nagyobb, annál magasabb
- ember esetében a hallható tartomány: kb. 20 – 20 000 Hz
- alatta: infrahang, felette ultrahang

Hangszín:

- a különböző hangforrások azonos magasságú hangjai eltérően szólnak
- ok: az azonos magasságú alaphang mellett felharmonikusok is szólnak
- alaphang frekvenciája f_0 , a felharmonikusoké $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$ stb.



A hang sebessége

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Folyadékokban és gázokban,

ahol B a kompressziós modulus, a folyadék/ gáz uniform nyomással (minden irányból egyforma nagyságú) szembeni ellenálló képességét jellemzi.

Definíció szerint az infinitezimálisan kicsiny nyomásnövekedés, és az ennek eredményeképpen bekövetkező

relatív térfogatcsökkenés_hányadosa. $B = \Delta p / \Delta V$

SI mértékegysége a pascal, dimenziós alakja: $M^1L^{-1}T^{-2}$.

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

Szilárd anyagokban

$$v_{air} = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{\frac{T}{273 K}}$$

A levegőben,

ahol T az abszolút hőmérséklet

A hang jellemzői 2.

Hangerősség (hangosság, hangintenzitás):

a hanghullám által egységnyi felületen át, időegység alatt szállított energia [W/m²].

Az emberi fül rendkívül széles, ~ 12 nagyságrendet átölelő intenzitástartományban képes érzékelni a hangokat.

A hangerősség jellemzésére logaritmikus skála alkalmazása célszerű.

Ingerküszöbnyi hangosságú a még éppen hallható intenzitású hangot. Hozzávetőleges értéke:

$$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ez kb. 10⁻⁵ Pa nyomásnak felel meg

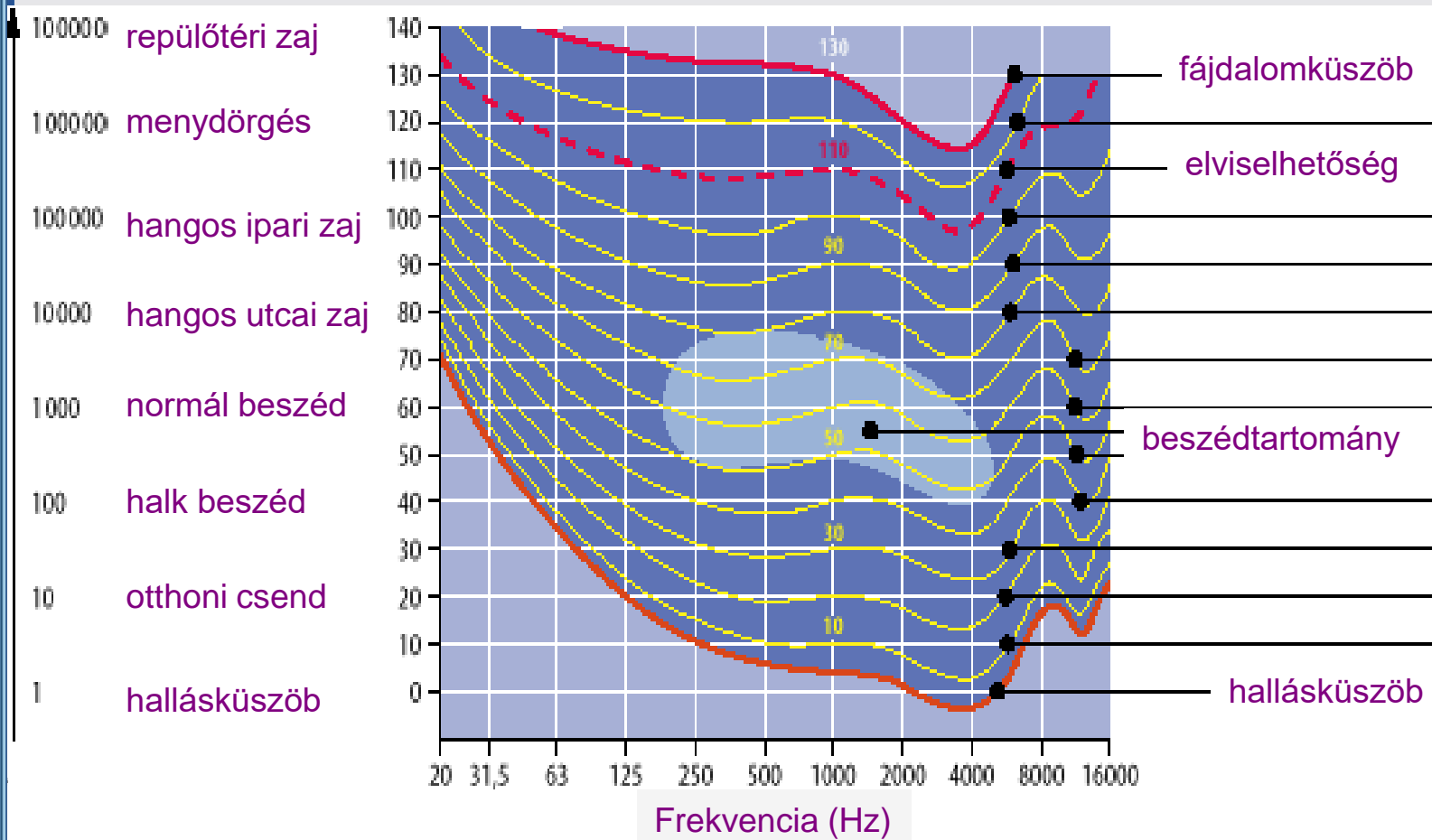
Egy adott I intenzitású hang hangosságát az ún. decibel skála segítségével jellemezzük:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]$$

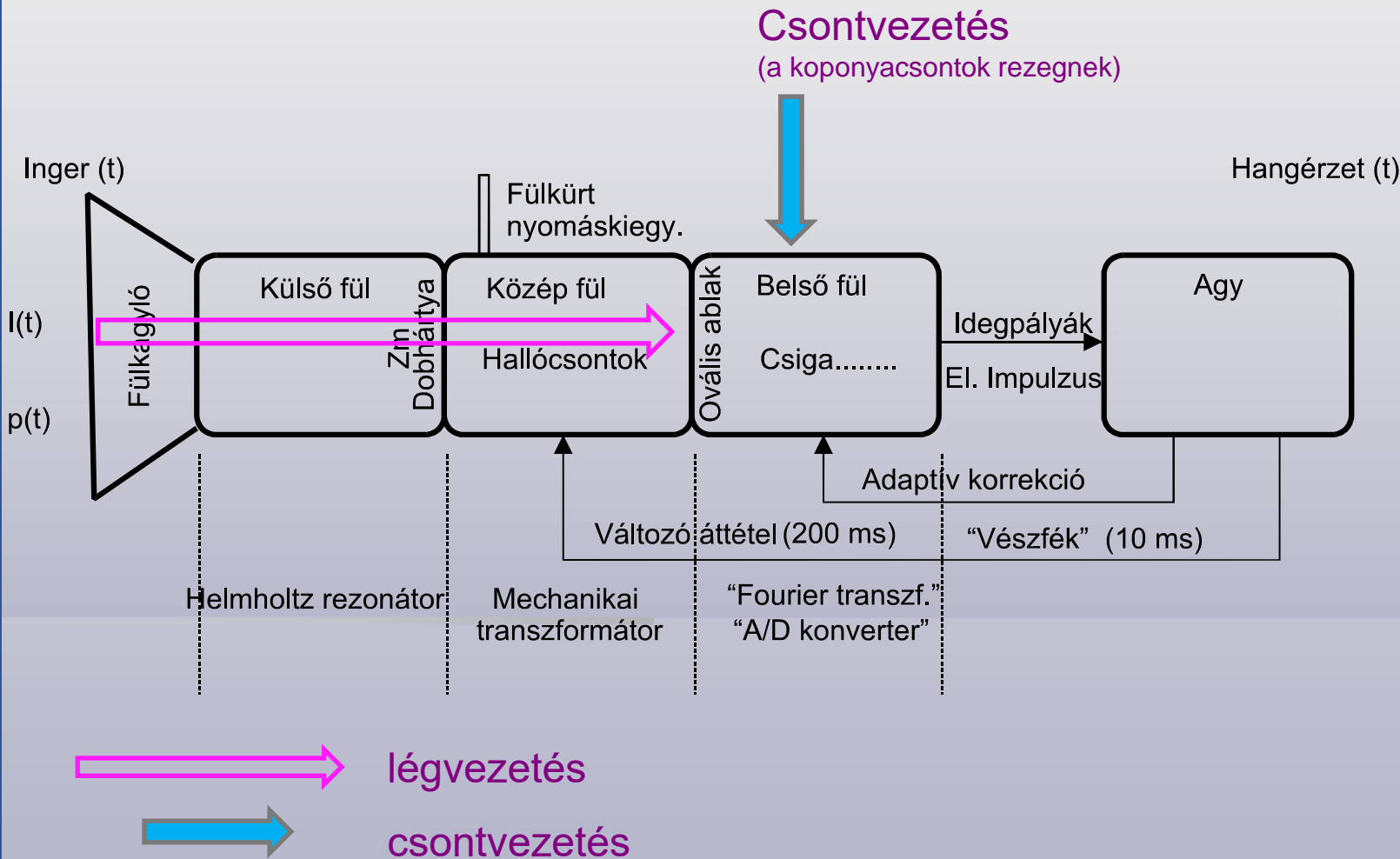
Pl. 100-szoros intenzitásváltozás 20 dB hangosság különbségnek felel meg.

Az emberi hallás intenzitás és frekvencia menete

(a rácsok a tényleges, mérhető intenzitást, a görbék a szubjektív hallásérzetet jelölik!)

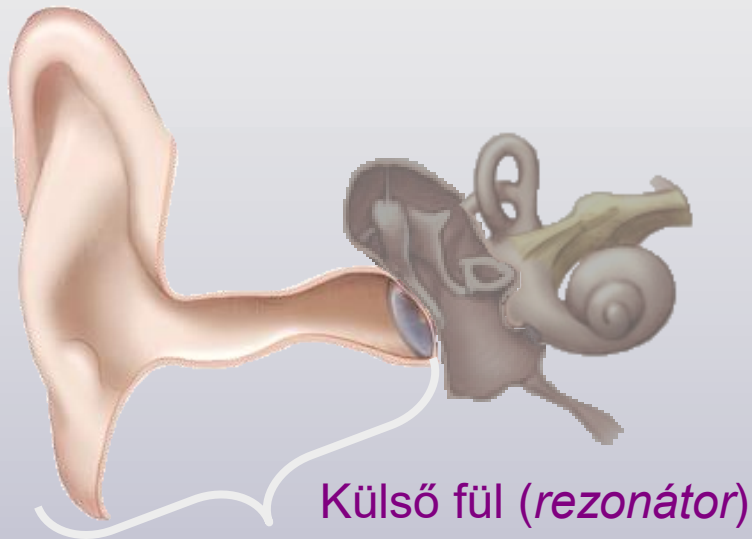


A hallás „blokk-sémája”



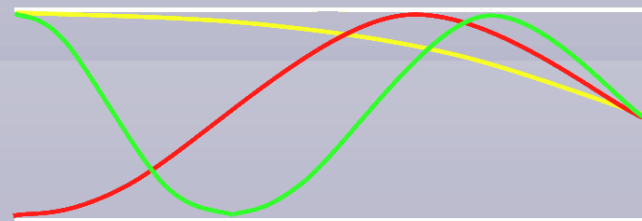
Forrás: Csiszár János: Hírányagok jellemzői, érzékszerveink

A fül felépítése - fizikus szemmel 1.



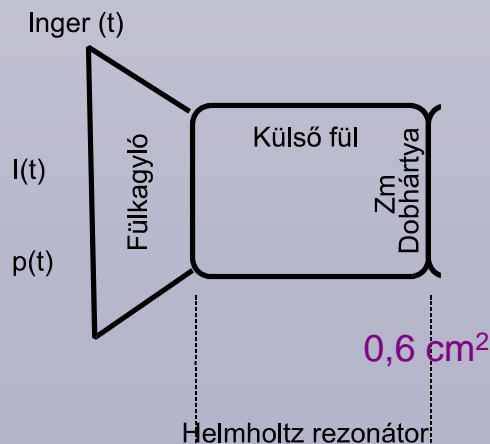
1. Összegyűjti és fókuszálja a hangot
2. Védelem
3. Rezonancia (üregrezonátor)

$L \sim 28 \text{ mm}$

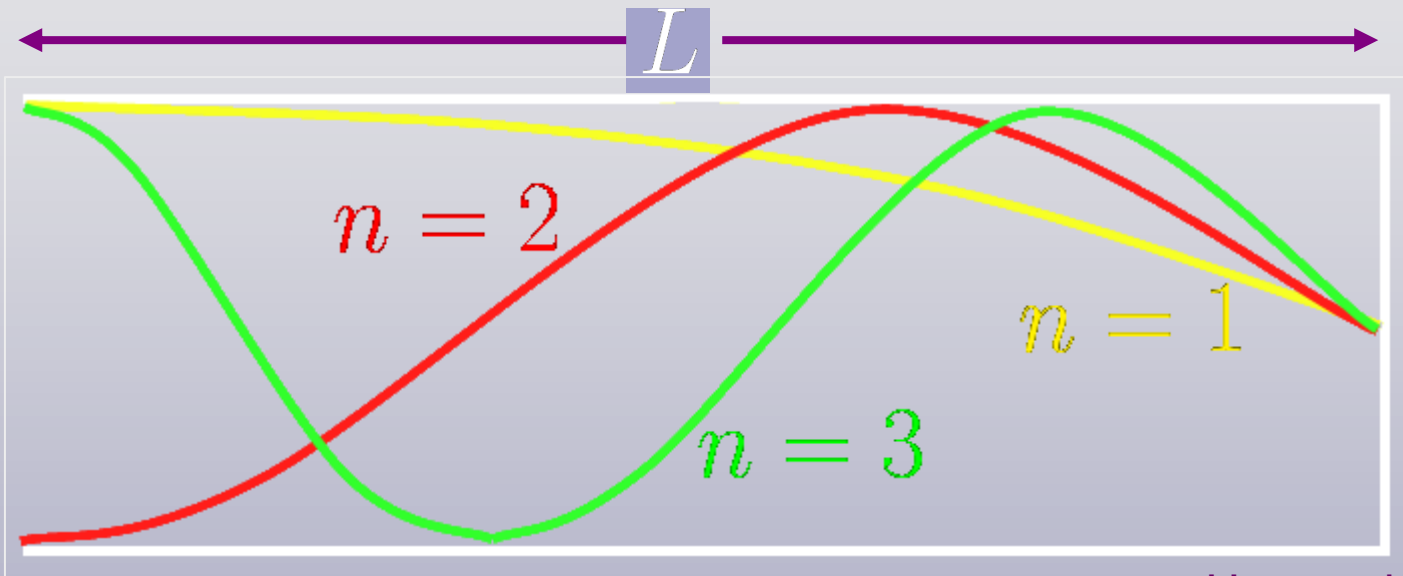


Ez az alapharmonikusra számolva:

$F_1 \sim 3000 \text{ Hz}$



Egyik végén zárt üregrezonátor

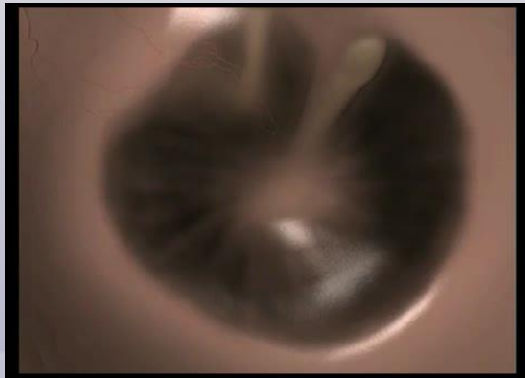


frekvencia \rightarrow
$$F_n = \frac{nc}{4L}$$
 \leftarrow Hang sebesség
340 m/s

módus \rightarrow

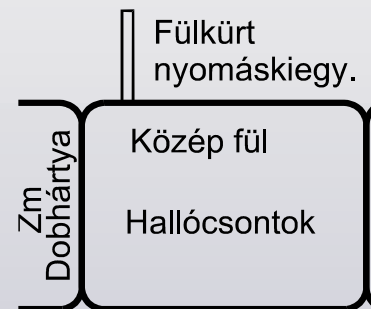
A dobhártya rezgése a mechanikai átalakítás első lépése

a dobhártya nem áll tényleges feszítés alatt
(bár: *dobhártya* feszítője, a *m. tensor tympani* szabályozza)



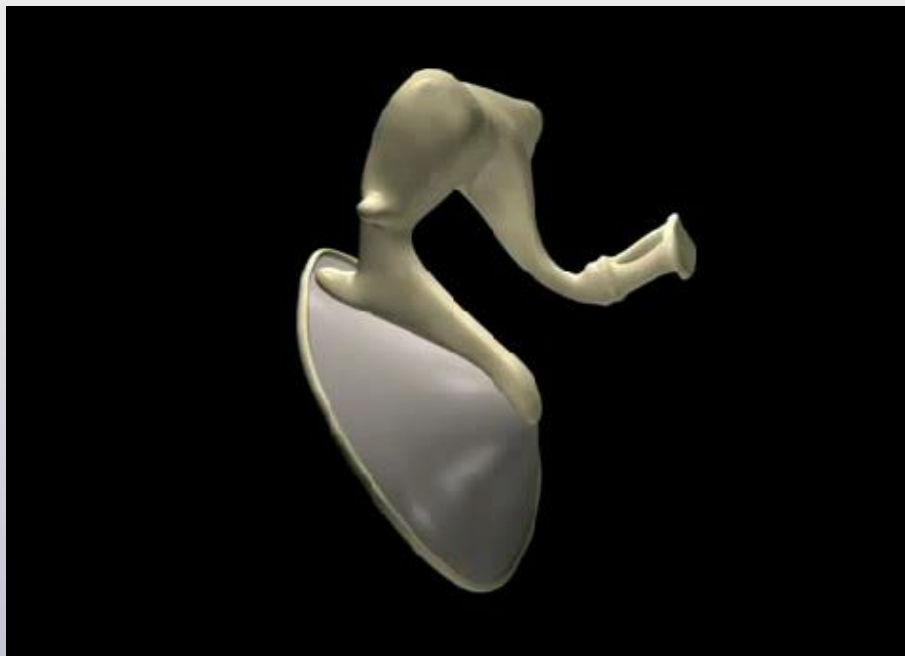
az azonos amplitúdóval rezgő pontok izovibrációs görbét alkotnak

A fül felépítése - fizikus szemmel 2.

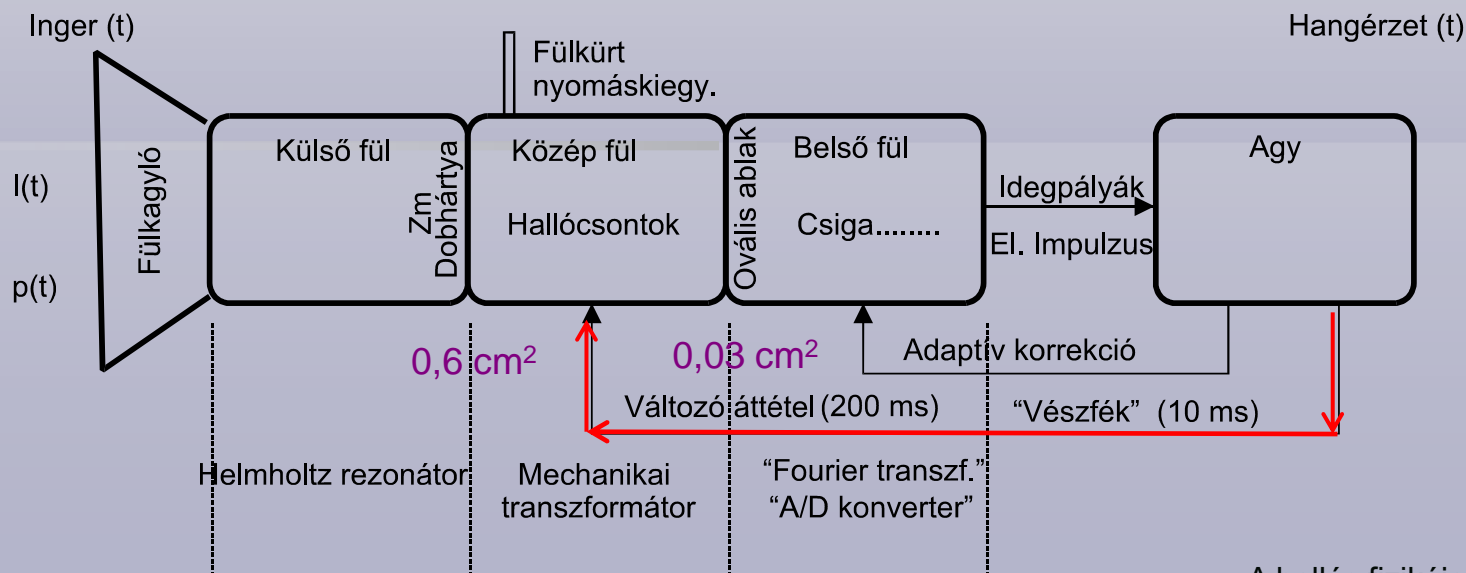


A hallócsontocskákat feszes ízületek kapcsolják össze egymással,

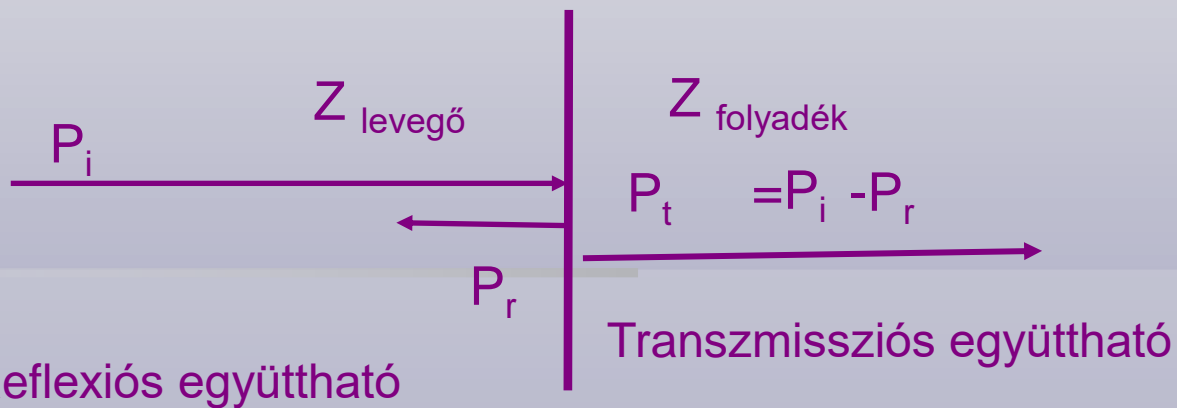
A fül anatómiája - fizikus szemmel 3.



A dobüreg falához szalagokkal rögzülnek
A csontok egymással bonyolult emelőrendszerrel alkotnak



Mechanikai csatolás



A csillapítás mértéke: $\tau = 10^{-3} \text{ } 30 \text{ dB}$

Az erősítő, csatoló középfül (hallócsontocskák) nélkül alig jutna energia a belső fülbe

A dobhártya és a kengyel talpa - a nyomás átvitele – impedancia illesztés

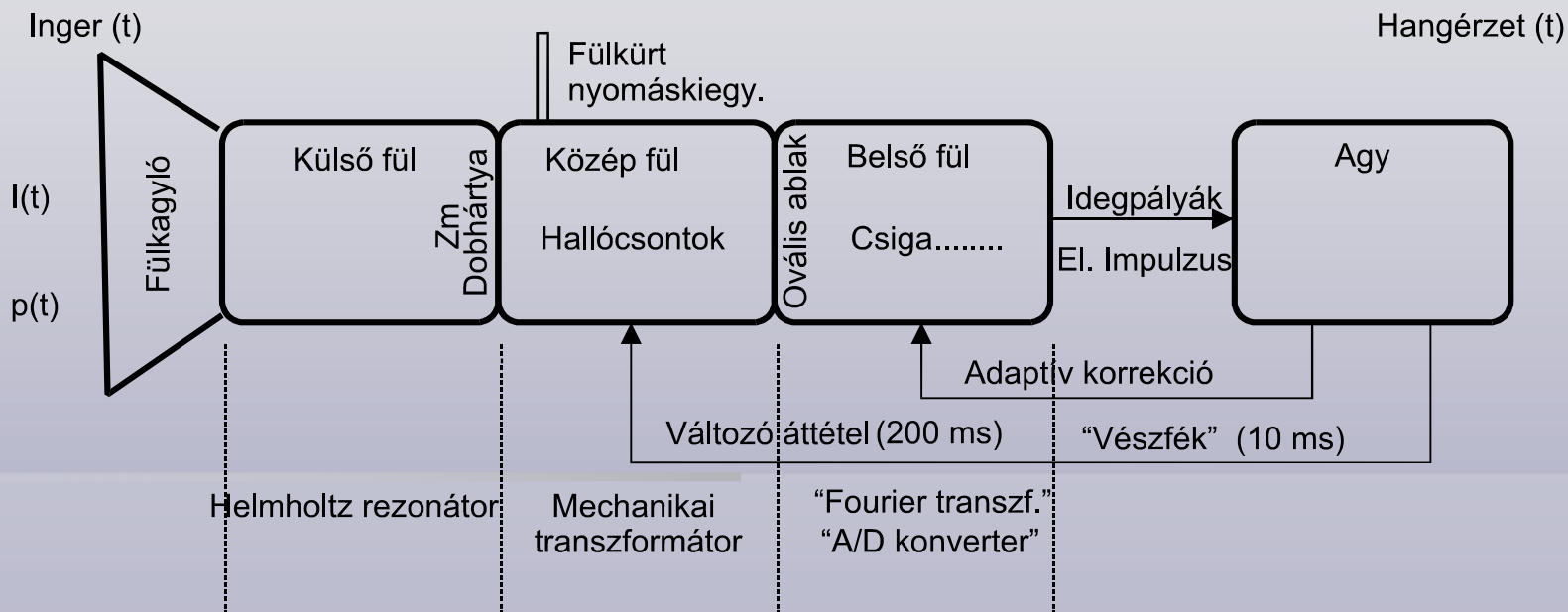


A dobüregben a nyomás $1,3 \cdot 19 \sim 25$ -szörösre a hang intenzitása 625 -szörösre emelkedik, **ami 28 dB**

u.i.: $\frac{I_e}{I_1} \sim \frac{p_e^2}{p_1^2}$ **dB=10log625=10x2.795**

A belsőfül feladatai

- a hang frekvencia szerinti szétbontása
- mechano-elektromos átalakítás



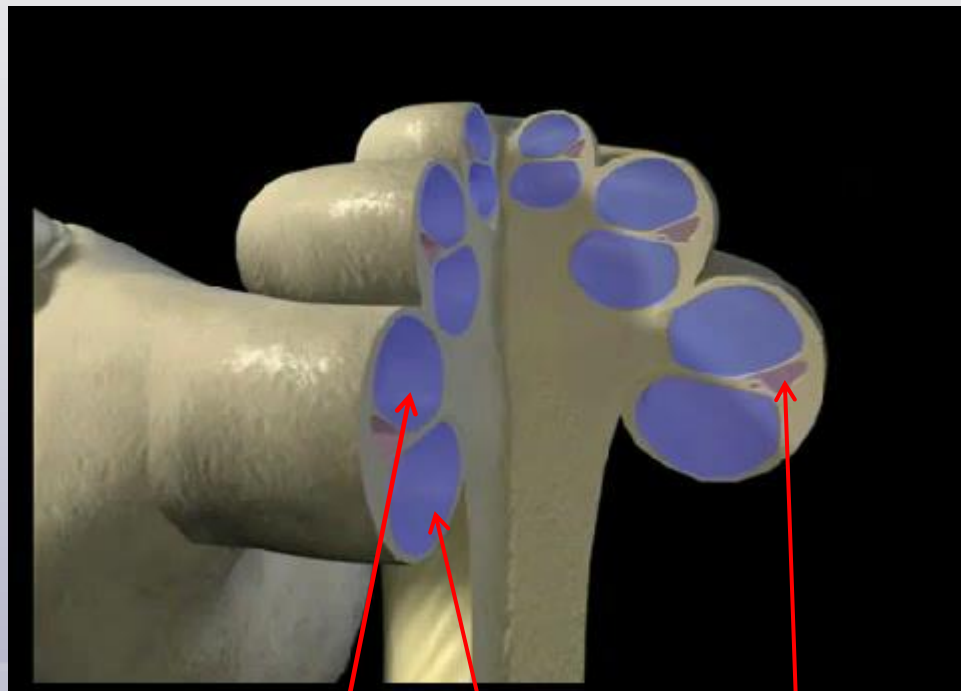
A csiga $2\frac{3}{4}$ csavarulatú struktúra kihajtvva 33-35 mm hosszú
 Belül 3 részre osztott
 Folyadékkal teli
 A külső folyadékterek
 közlekednek egymással



Külső fül (rezonátor)

Belső fül
 (frekvencia analizátor)

A belső fül felépítése - anatómia



scala vestibuli

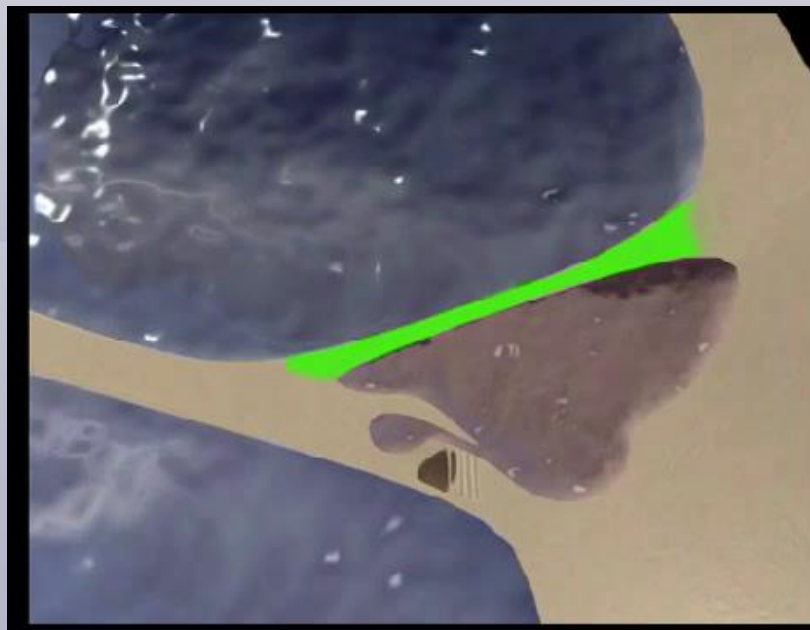
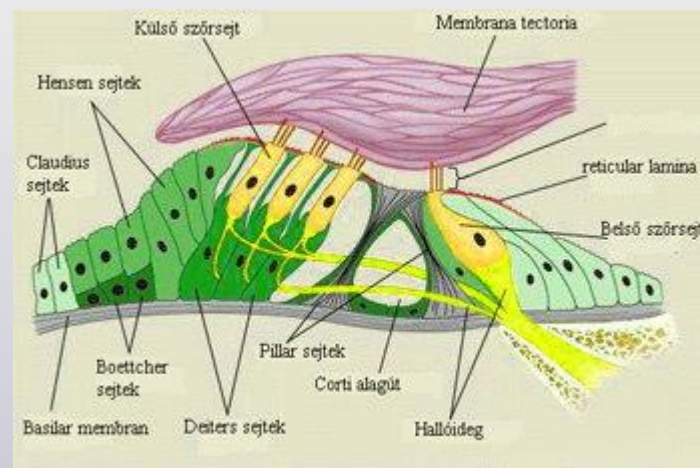
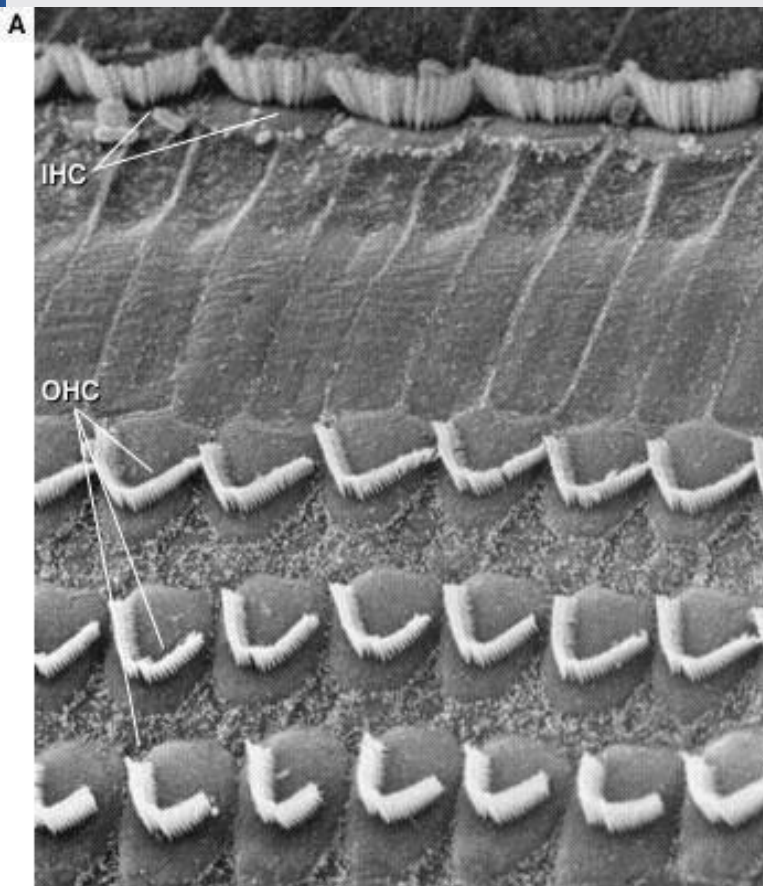
scala tympani

scala media - endolimfa

A perilimfával töltött alsó és felső folyadéktér a csiga csúcsában (helicotrema) egymással közlekedik

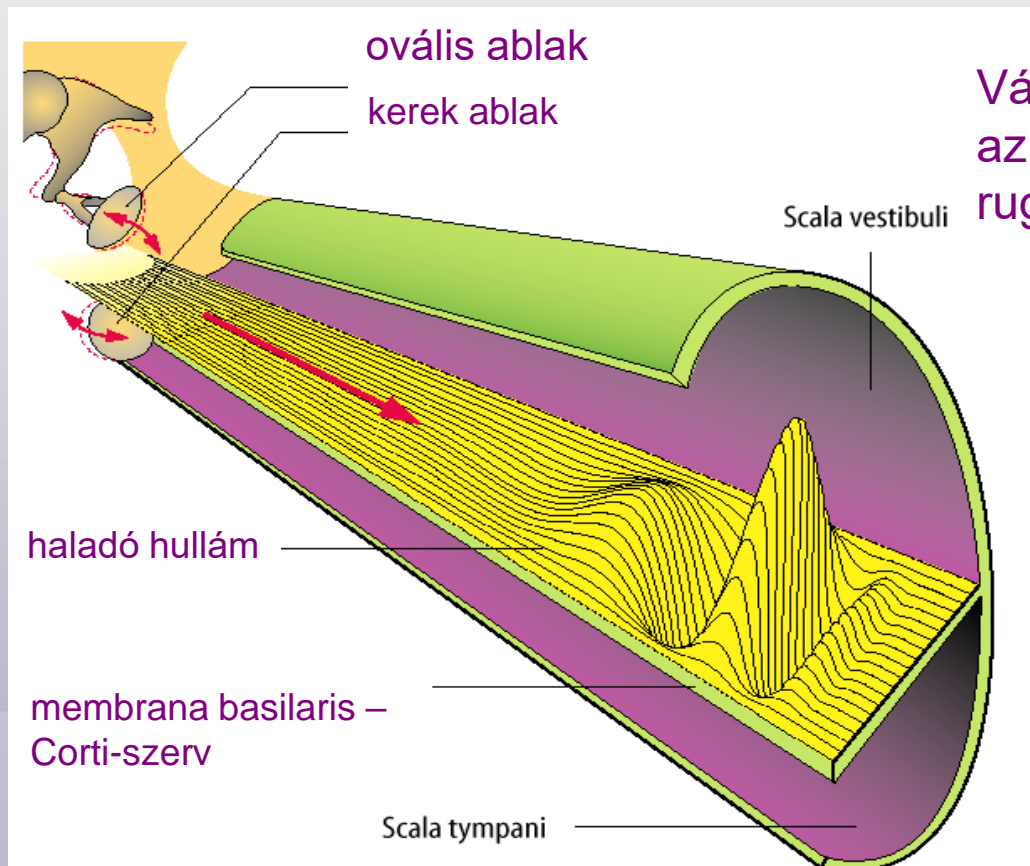
A folyadék összenyomhatatlan-ovális ablak be - kerek ablak ki

A szőrsejtek funkciói



külső (20000) és belső (3500)
szőrsejtek

Az alaphártyán a folyadék rezgése hullámszerűen terjed



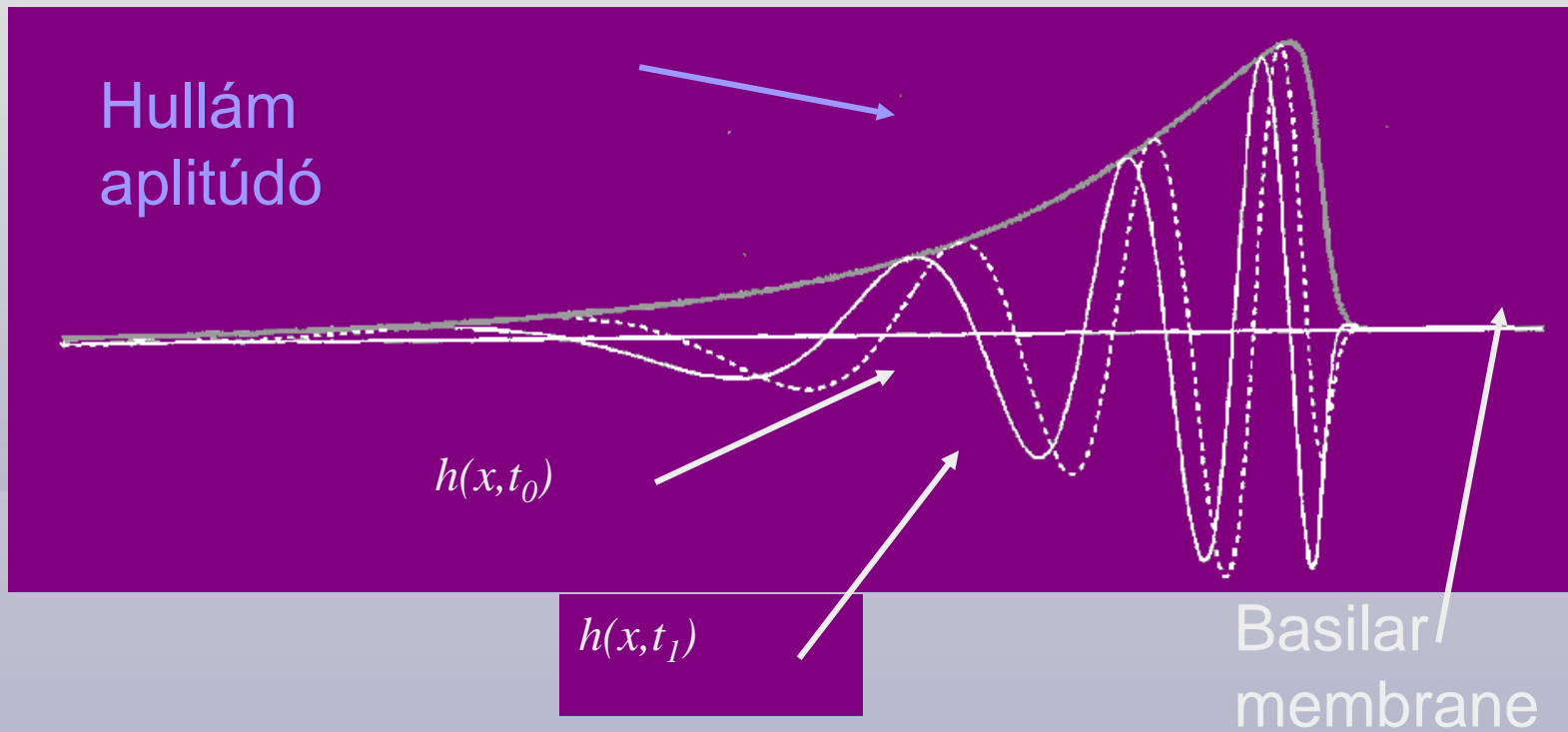
Változik:
az alaphártya szélessége,
rugalmassága

Békésy kérdései és
válaszai

Helyteória

- Helmholtz egyszerű rezonanciaként magyarázta a hangok leképezését
- Frekvencia és intenzitás-függő hatások – maximumok
- Felbontás (1 kHz - 0,3 % = 3 Hz)

A membrana basilarison kialakuló hullámok



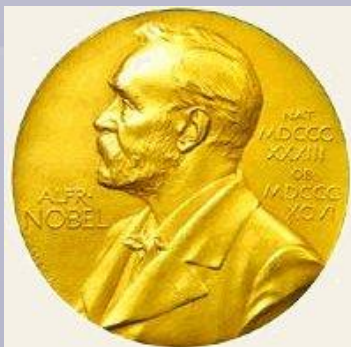
W. R. Zemlin, *Speech and Hearing Science* (Allyn and Bacon, Boston, 1998)



Békésy György

Budapest, 1899. jún. 3. – Honolulu, 1972. jún. 13.

1961-ben „a belső fül csigájában létrejövő ingerületek fizikai mechanizmusának felfedezéséért” orvosi-élettani Nobel-díjat kapott



További díjazottak:

Melvin Calvin

Ivo Andrić

Robert Hofstadter

Rudolf Mössbauer

Dag Hammarskjöld



GEORG VON BÉKÉSY

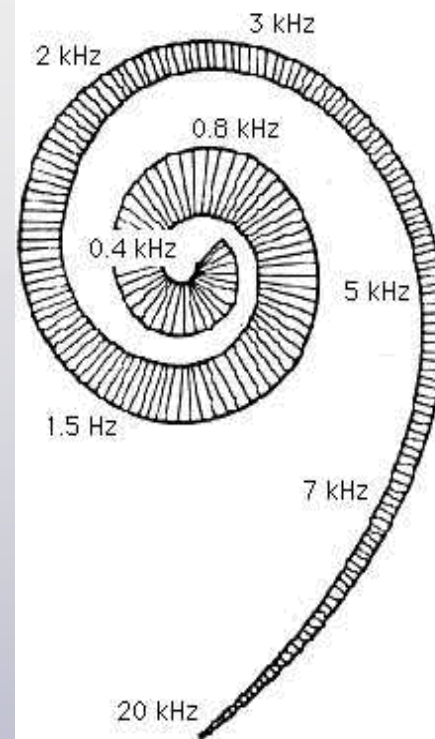
Concerning the pleasures of observing, and the mechanics of the inner ear

Nobel Lecture, December 11, 1961

Trying to do science in an unscientific way

For me, the most stimulating book on hearing was Helmholtz's *Die Lehre von den Tonempfindungen*. It was published in 1863. Although some of its details are not confirmed by measurements with today's instruments, the basic concepts still retain their value, and Helmholtz's method of viewing physiology and psychology in physical terms is today just as fresh as the day it was written. Helmholtz's magnificent start, however, was followed by stagnation in auditory research, and for almost 100 years the universities taught about the same thing. The whole field of acoustics made very little progress compared with the tremendous achievements in other areas of physics.

This may seem surprising, since acoustics and concepts of waves continued to influence the development of physics, particularly theoretical physics; and there are many instances in which acoustical concepts served to



PLEASURES OF OBSERVING-INNER EAR MECHANICS 739

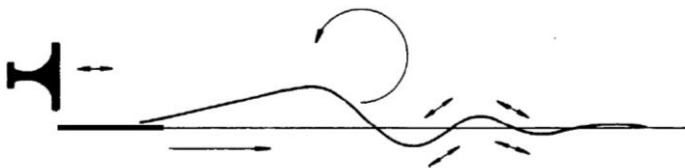
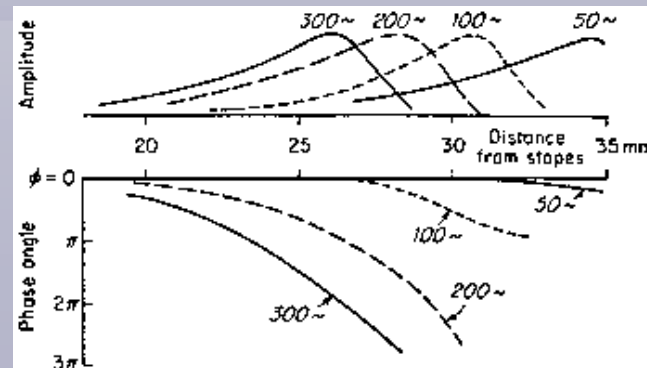
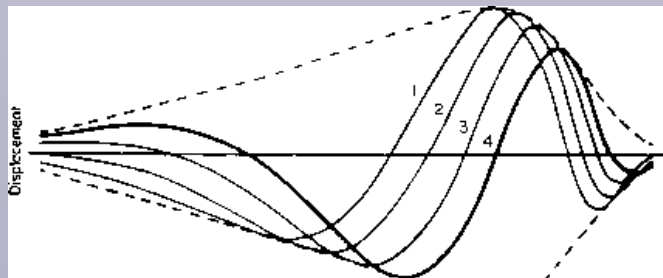
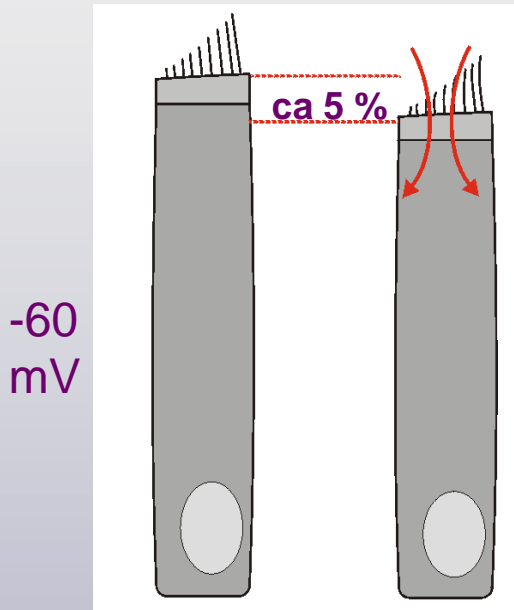


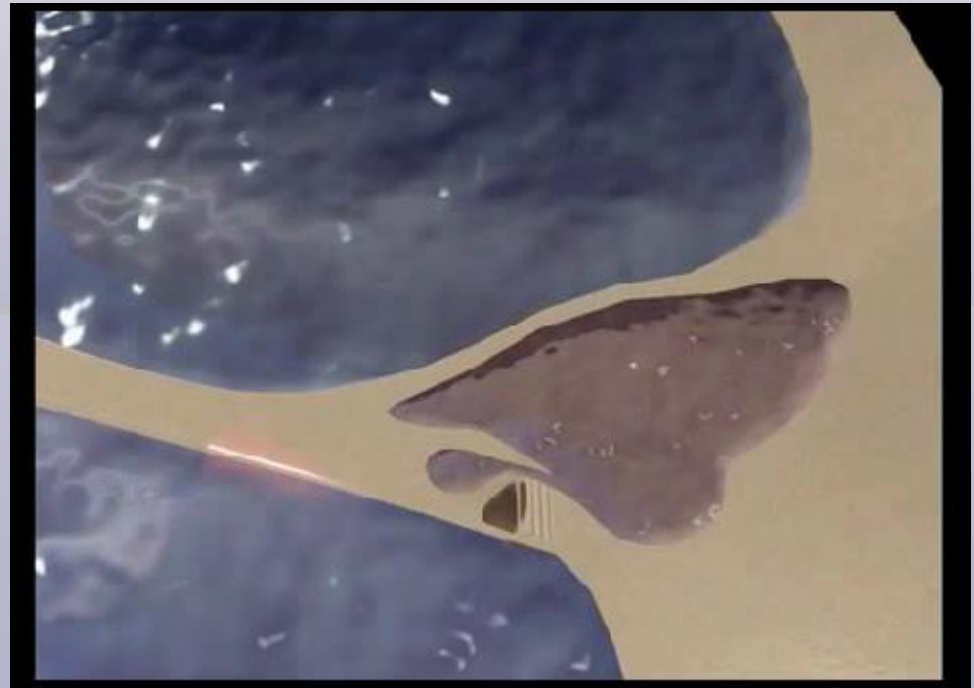
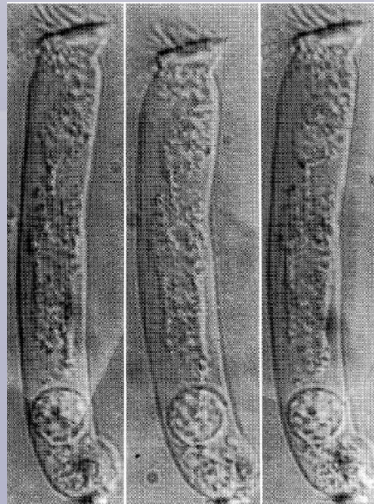
Fig. 18. Travelling wave along the human basilar membrane, showing the formation of eddies in the surrounding fluid.



A külső szőrsejtek aktív szerepe a frekvencia analízisben



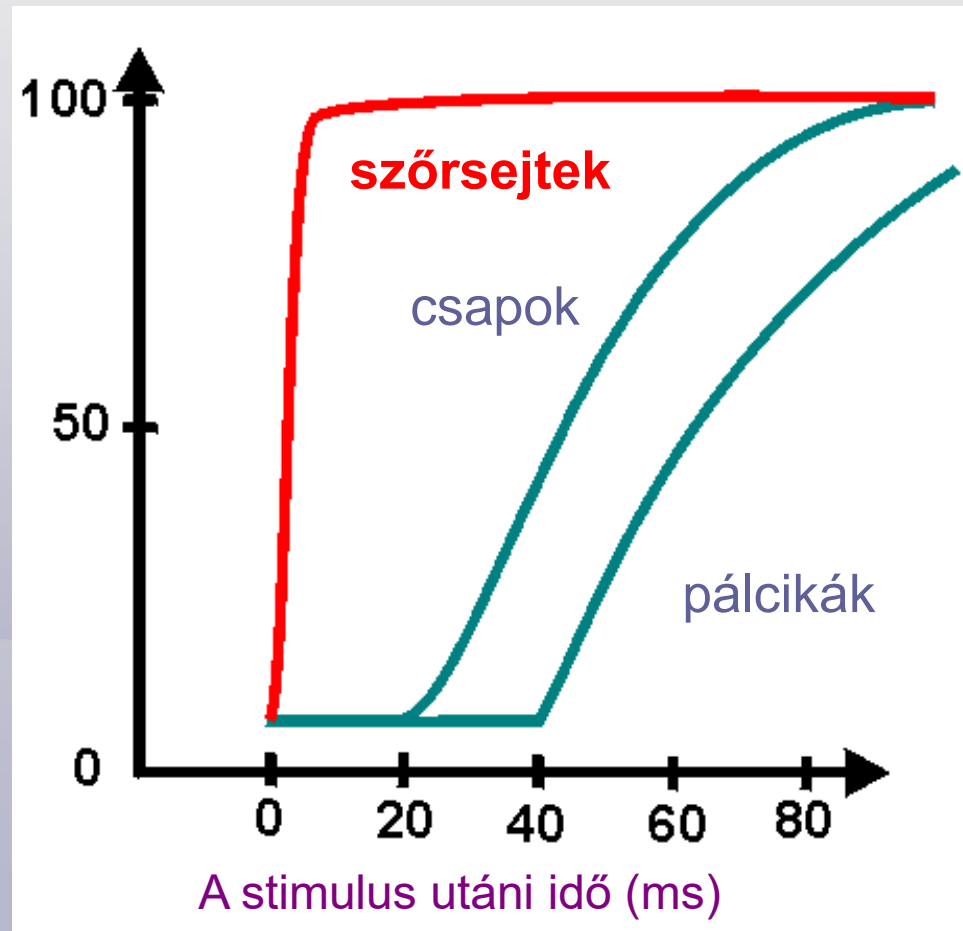
A haladó hullám finom hangolása
Meváltoznak a folyadékmozgás lokális feltételei – hang elnyomás/kiemelés a fájdalom küszöbnél az alaphártya elmozdulása $\sim 3\mu\text{m}$



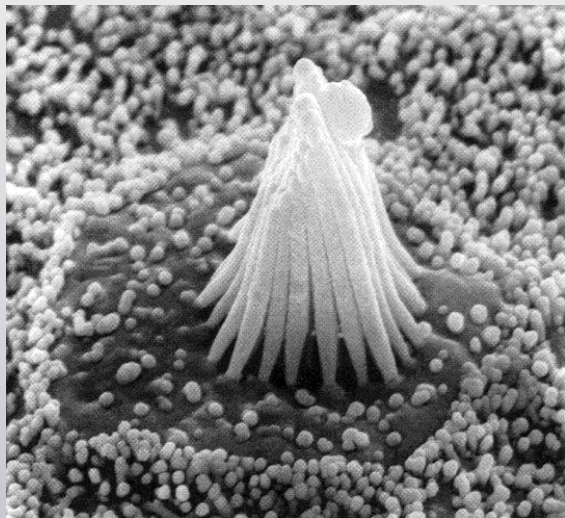
Külső szőrsejtek erősítő funkciója

- ▶ Nyugalomban érintik a fedőhártyát (m. tectoria), a belsők nem
- ▶ M. basilaris kilengése → sztereociliumok elhajlanak → depolarizáció → alakváltozás (megrövidülés)
 - Sejthártyában levő **presztin**, anioncsatornákhöz hasonló szerkezet
 - ▶ A vakon végződő pórusban mozgó anion a feszültségérzékelő
 - ▶ Depolarizáció során az anion a citoplazma felé mozog → a sejt megrövidül
 - ▶ Hiperpolarizáció során ellentétes változás következik be
 - A **megrövidülés növeli** a passzív vándorló hullám maximumát, élesebbé válik a **m. basilaris kilengése** → belső szőrsejtek sztereociliumai elhajlanak → depolarizáció
 - A belső szőrsejtek ingerküszöbe 50-60 dB-lel magasabb mint a külsőké (suttogásnál nem éri el a belsők ingerküszöbét)
 - A fiziológiás hallásküszöb → erősítő funkció eredménye
- ▶ Nagyon érzékenyek az ipari zajra

A szőrsejtek gyorsan reagálnak – a hangok nem mosódnak össze



A mechano-elektromos átalakítás jellegzetességei

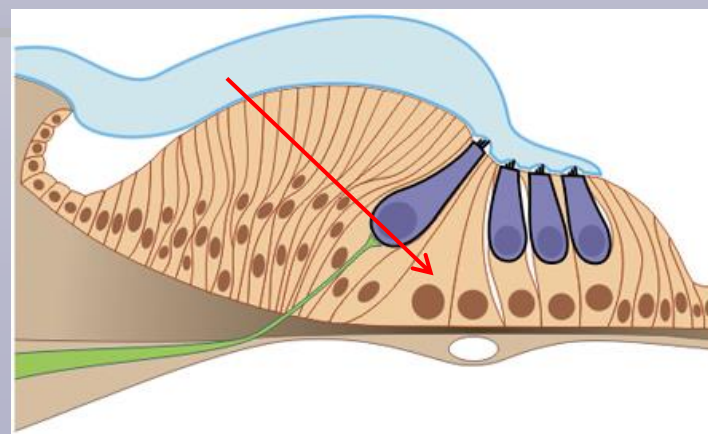
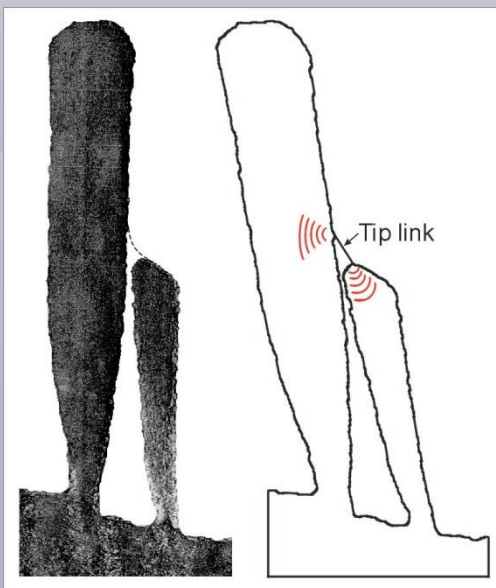


A szőrsejteken mechanoszenzitív cíliumok találhatóak

A nyúlvány 1 nm-nél kisebb elmozdulása már stimulust jelent

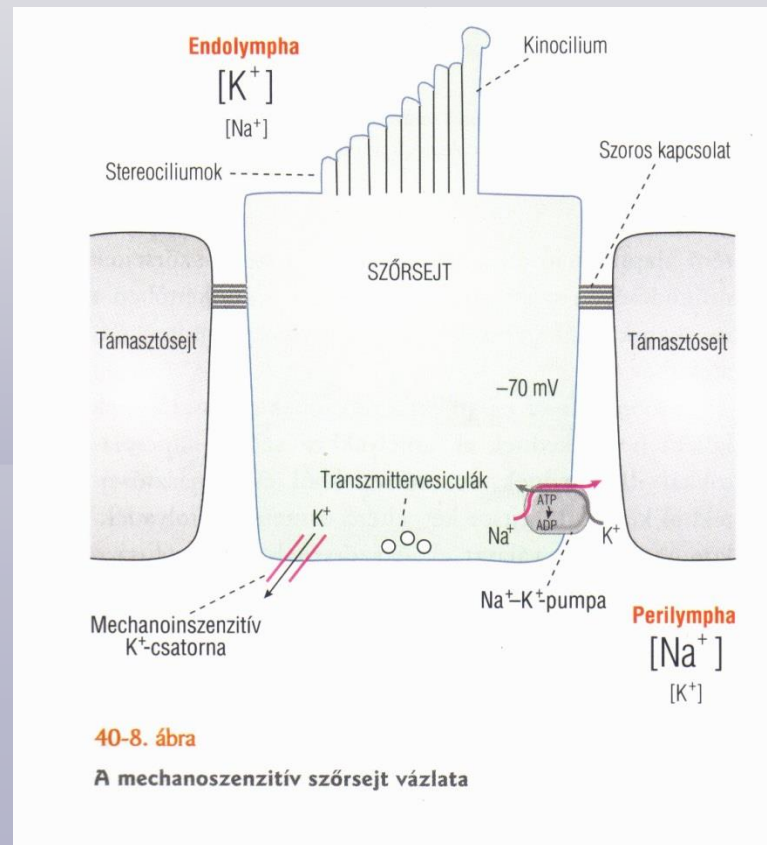
általában csak néhány kation (K^+) csatorna nyílik egy nyúlványon

a beáramló K^+ depolarizálja a szőrsejtet-
erre kémiai átvivő anyag szabadul fel

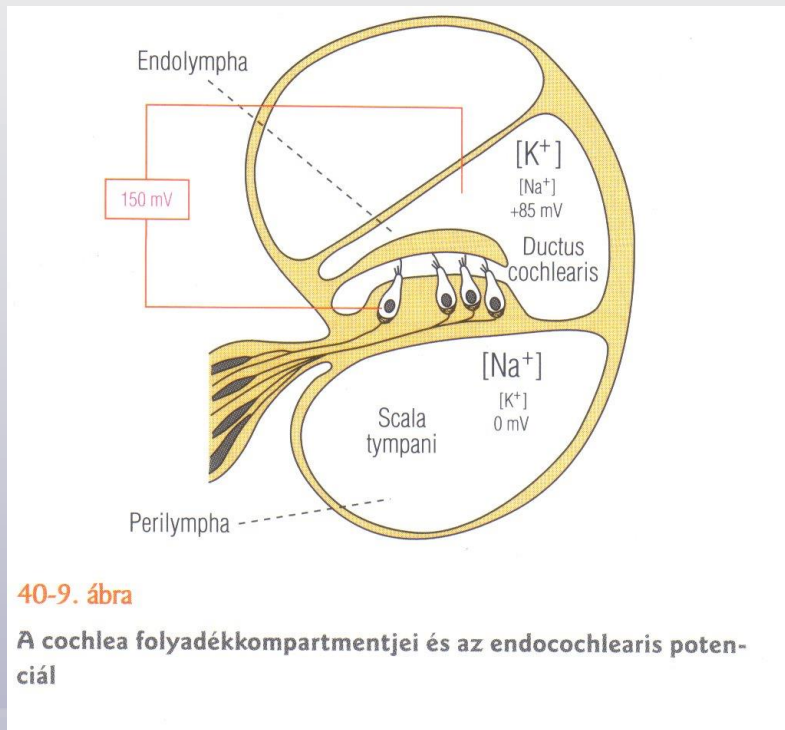


Mechanotranszdukció a szőrsejtekben

- ▶ Belső sejtek- afferens rostok 90%
- ▶ Külső sejtek – főleg efferens rostokat erősítő funkciójuk van
- ▶ Mindkettőben a mechanikai energia elektromos jellé alakul



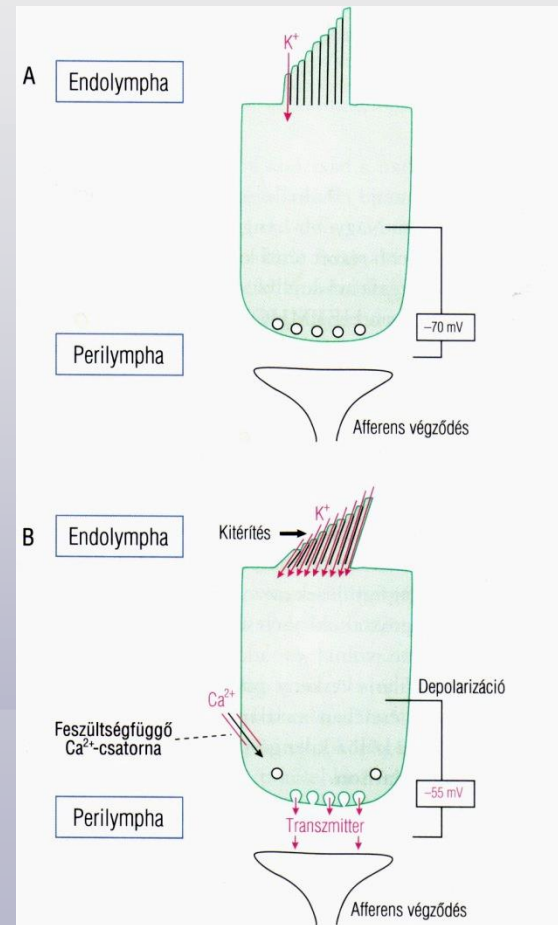
- Endolimfa és a szőrsejtek között kb 150 mV elektromos potenciálkülönbség van
 1. Csillók elhajlása a nagyobb csilló felé nyitja a kationcsatornákat
 2. Depolarizáció- AP az afferens rostokban



40-9. ábra

A cochlea folyadékkompartmentjei és az endocochlearis potenciál

- Szőrsejtek csúcsi részén tip-link- a csillók egységes nyalábként működnek
- Ioncsatornák nyitása/zárása
- Szőrsejtek csúcsán mechano-szenzitív kationcsatornák



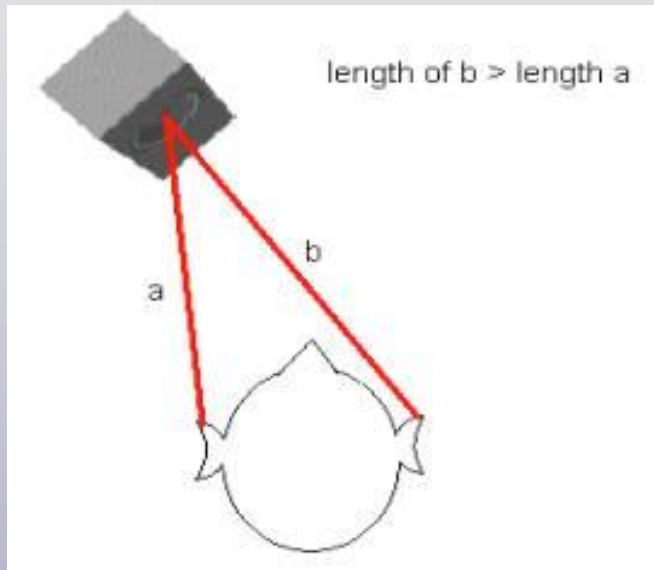
40-10. ábra

Mechanoelektromos transzdukción a szőrsejtekben

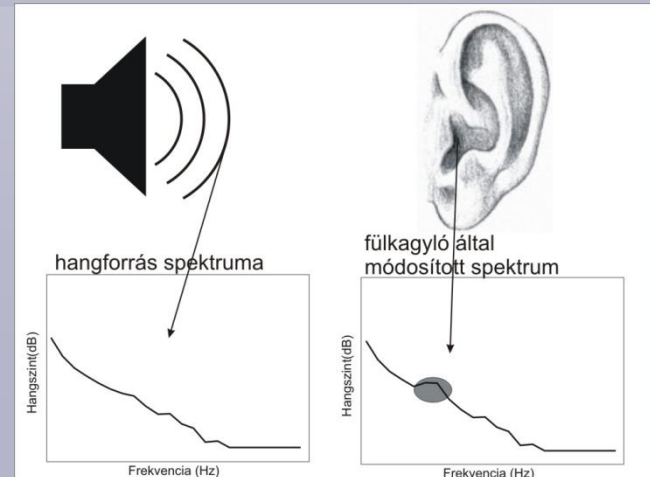
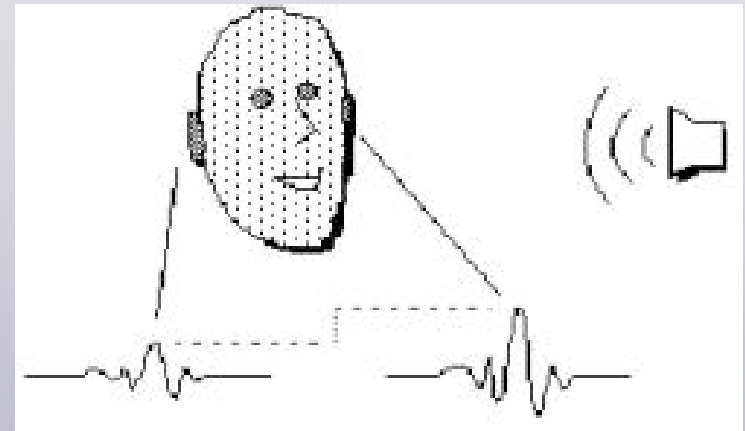
- A) A szőrsejt nyugalmi állapotban
 B) A szőrsejt depolarizációja a stereociliumok kitérésének hatására

Térbeli lokalizáció

fülek közötti idői különbség

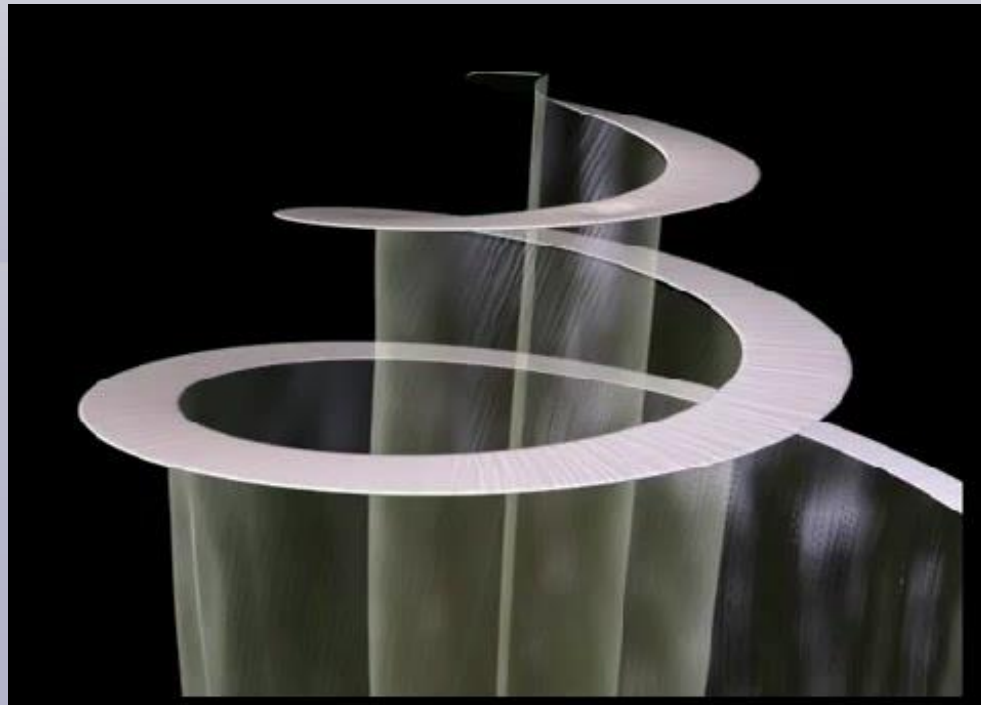
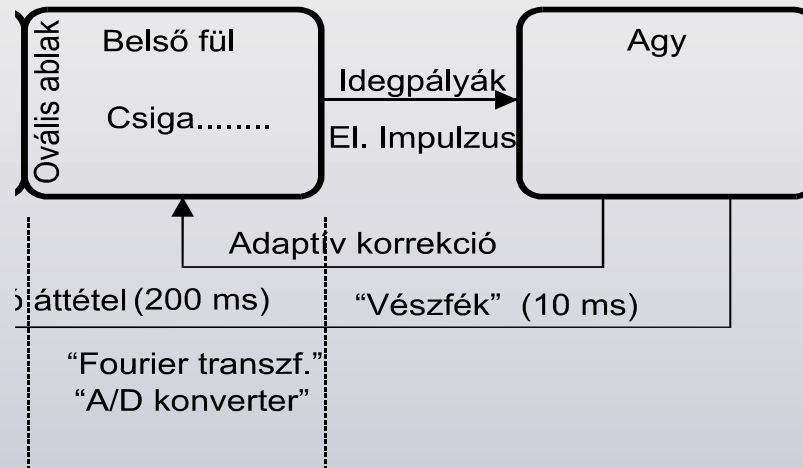


fülek közötti hangerőkülönbség

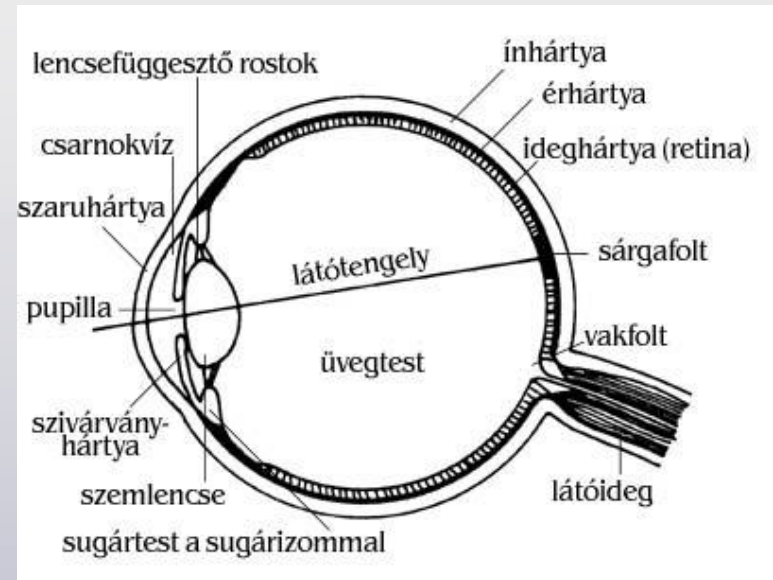




Hangérzet (t)



Látószervünk működése (fizikai alapok) (tankönyv 309-322 old.)



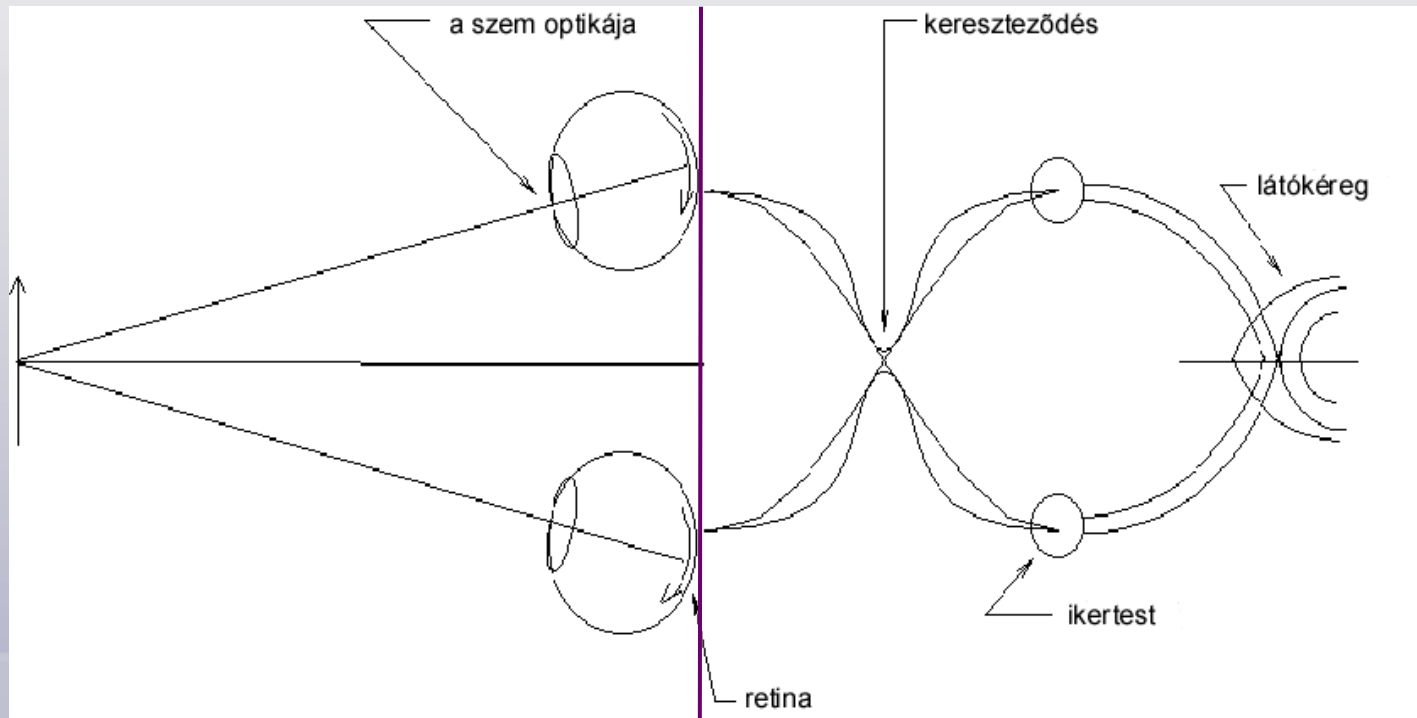
- bemenő optikai rendszer
- fiziológiai - biológiai jelfeldolgozás
- agyi mechanizmusok: pszichológiai jelfeldolgozás
- környezetből származó fény - **inger**, vagy -**stimulus**
- idegi gerjesztések: fény- **érzet**
- feldolgozott információ: fény - **észlelet**

- A szem működése (egyszerűsítve):
 - A szembe érkező fénysugarak 2 helyen törnek meg (nagyon):
 - Szaruhártya
 - Lencse- több átmenet van
 - Áthaladnak az üvegtesten
 - Retinára érkeznek, ahol kicsinyített fordított állású kép keletkezik
 - A fényt a receptorok detektálják
 - biológiai erősítőn halad át- az idegi elemek ingerületbe jönnek- előzetes jelfeldolgozás a retinán
 - A már kódolt ingerületet átveszik további idegsejtek és látóidegként kilépnek
 - A látóideg részlegesen átkereszteződik
 - Thalamusban átkapcsolódik
 - Látópályaként jut az agykéreg nyakszirtlebenyébe

Látószervünk működése, 2

- a szem leképező mechanizmusa (részletesen lsd. 3. gyakorlat és a hozzá tartozó jegyzet)
- **retina: csapok és pálcikák: a fényinger (a foton energiája) ideg ingerületté való alakítása**
- az agy felé továbbítandó ingerületek kialakulása a retinában
- idegpályák mechanizmusa
- agyi feldolgozás: észlelet kialakulása
 - a mentális kép összetevői: forma, mozgás, szín információk
 - asszociációk kialakulása: tárgy (pl. betűkép) azonosítása

Az emberi látórendszer felépítése - sematikus ábra



Két (nem identikus) kép keletkezik - ezekből 1 kép lesz (térlátás)

Ennek a résznek a fizikájáról lesz szó!

(ennek is van!!!)

A fényerősség:

olyan „optikai sugárzás, amely közvetlenül látásérzékletet kelt”.
olyan fizikai mennyiség, amely kifejezi a fényforrás, az emberi látás tartományában észlelhető fényének nagyságát. Jele: I; Mértékegysége: kandela (cd)

A fényáram:

a fényforrásból az adott térszögbe kisugárzott látható teljesítmény. Jele: Φ ; Mértékegysége: lumen (lm)

Lumen: 1 lumen fényáramot sugároz ki az 1 kandela fényerősségű pontszerű fényforrás, 1 méter sugarú gömb 1m^2 felületére. Ezt az 1m^2 -es gömb felületet 1 szteradián térszögnek nevezik.

A megvilágítás

az adott területre eső fényáram mértékegysége. A fényáram (mértékegysége lumen) elképzelhető úgy, mint a jelen lévő látható fény összege; a megvilágítás pedig, mint az adott területre eső fényáram intenzitása. Egy lux az a megvilágítás, amelyet 1 lumen fényáram 1 négyzetméteren létrehoz:

$$1\text{lx} = \frac{1\text{lm}}{1\text{m}^2} = \frac{1\text{cd} \cdot \text{sr}}{1\text{m}^2}$$

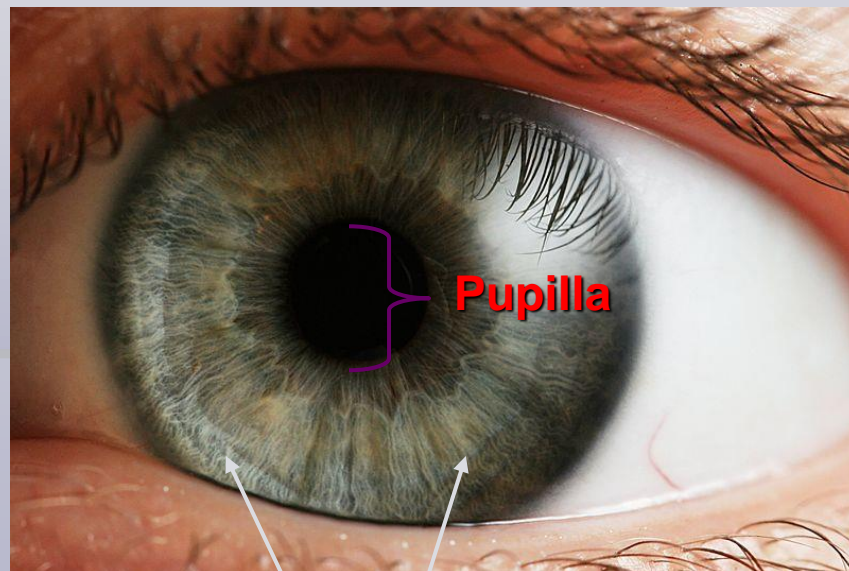
Egy adott mennyiségű fény nagyobb területen elosztva halványabban fogja azt megvilágítani, azaz a megvilágítás mértéke fordítottan arányos a terület nagyságával.

A pupilla szabályozza a szembe jutó fény mennyiségét

- *Fény adaptáció:* a környezeti fénysűrűséghez való igazodás, pupilla átmérő csökken a növekvő fénysűrűséggel: 8 ... 2 mm
- *látóélesség* nő növekvő fénysűrűséggel, csökkenő pupilla átmérővel
- a pupilla átmérő változási sebessége fénysűrűség változásának függvénye

Fényerősség (I_v): kandela (cd)
SI alapegység

Vonatkozhat fényforrásra és megvilágított felületre is.
A relatív fénysűrűségkülönbséget a kontraszt



Petr Novák, Wikipedia

http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Eye_iris.jpg

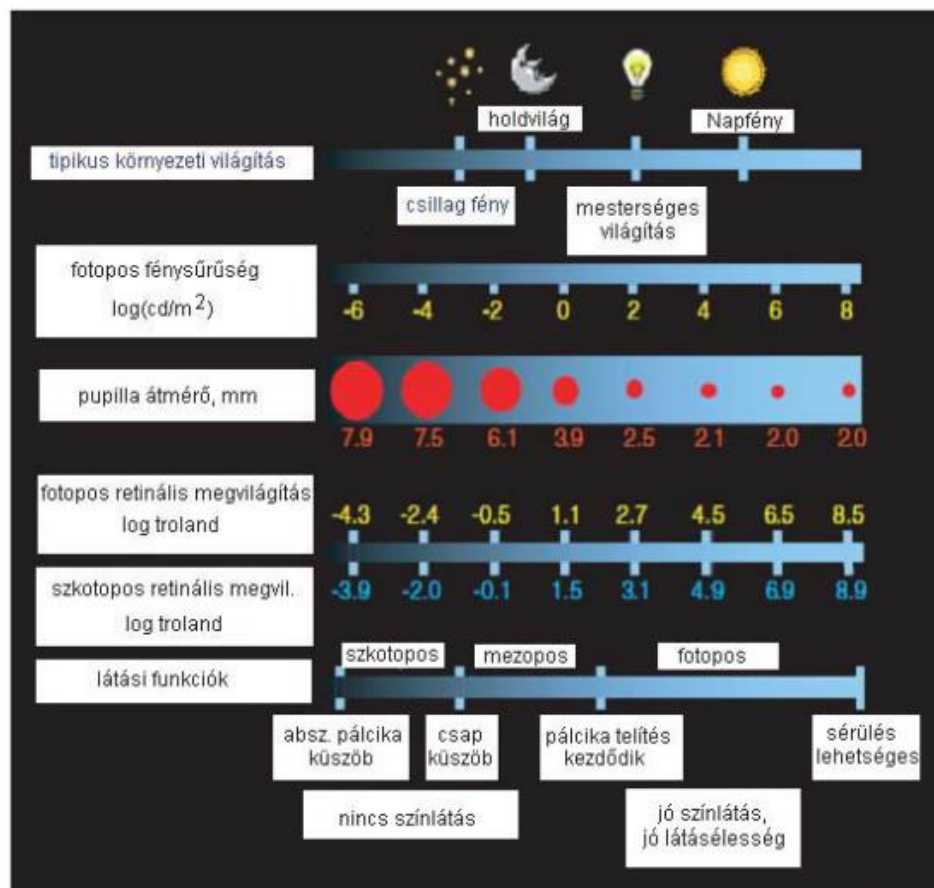
Iris

A megvilágítás/látás összefüggései

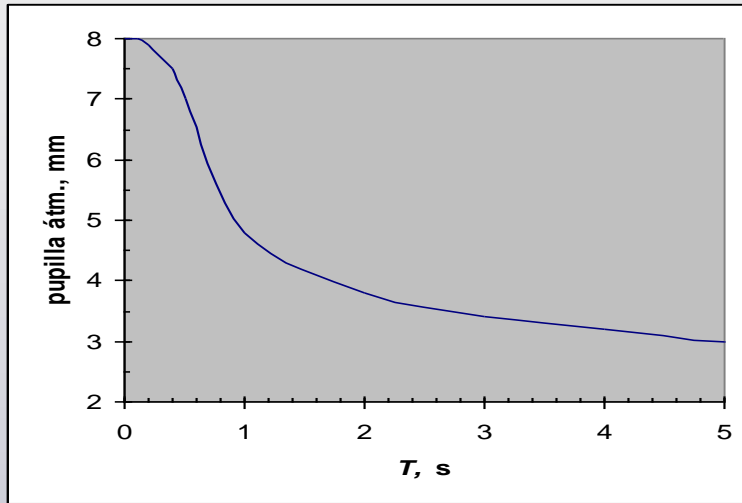
~(néhány) 5 cd/m^2 –
 $(10^{-2}) 5 \times 10^{-3} \text{ cd/m}^2$

Mind a csapok, mind a pálcikák aktívak ebben a fénysűrűségi tartományban

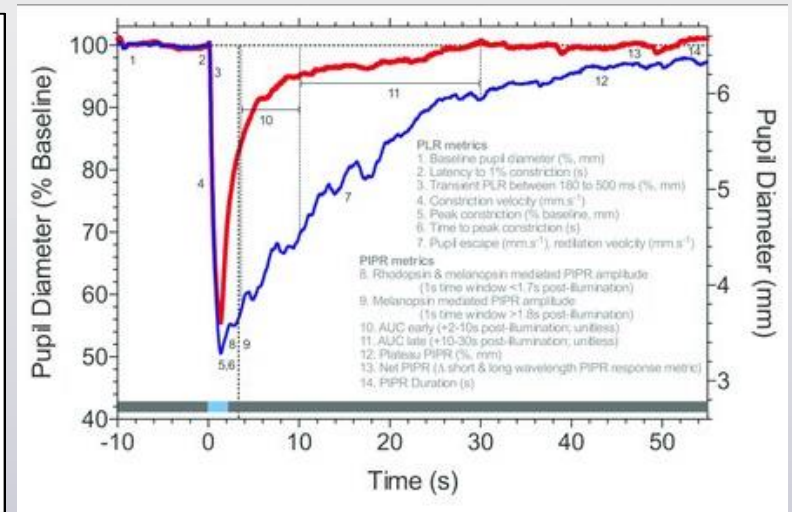
Tipikus feladatok:
 vasútvilágítás,
 éjszakai vezetés,
 közvilágítás, légi irányítás...



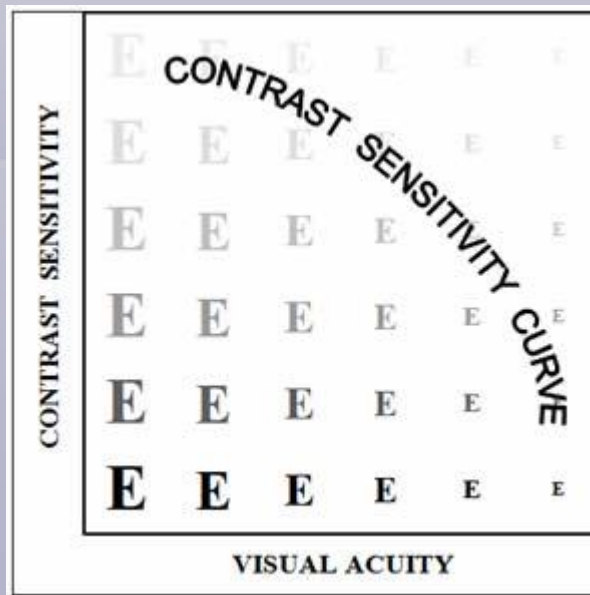
A pupilla átmérő változása



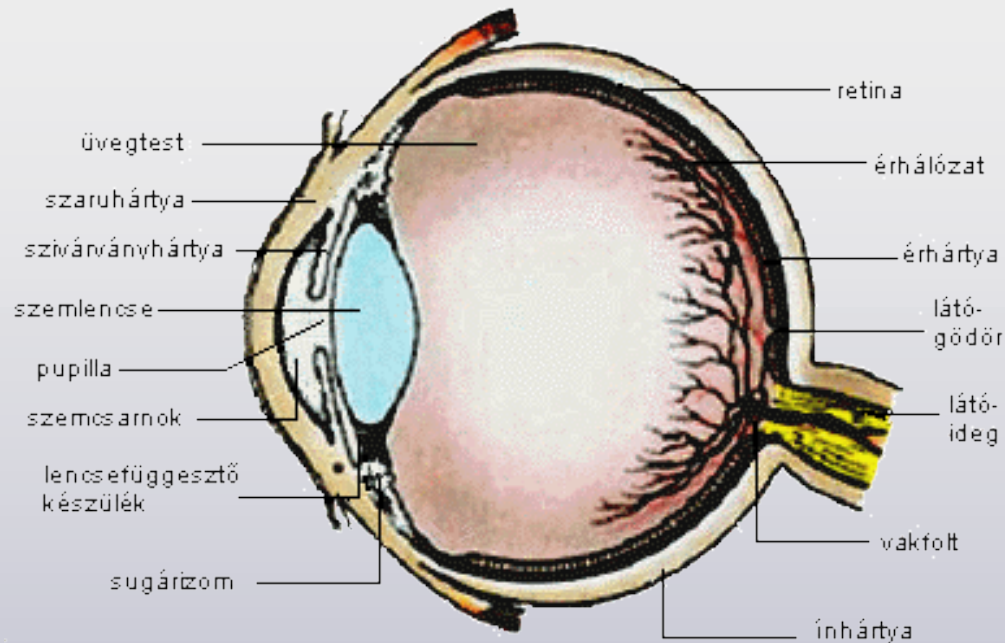
Pupilla átmérő változása: sötétből-világosba (300 cd/m^2)



Pupilla átmérő relatív változása: világosból sötétbe (azonos- piros és ellenoldali –kék) való adaptáció esetén



A látásban nagyság és kontraszt érzékelés van



A lencse

A szemlencse fizikája:

törőképesség változásai (a görbület változik)

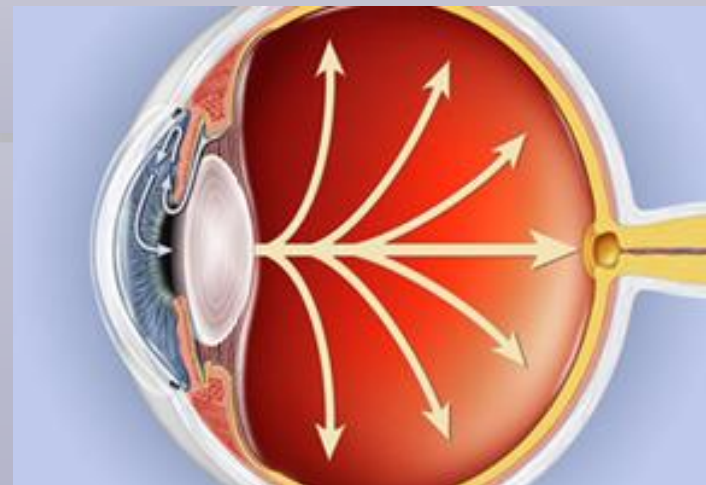
akkomodáció mechanizmusa (lencse függesztő rostok)

életkorfüggőség, presbyopia,

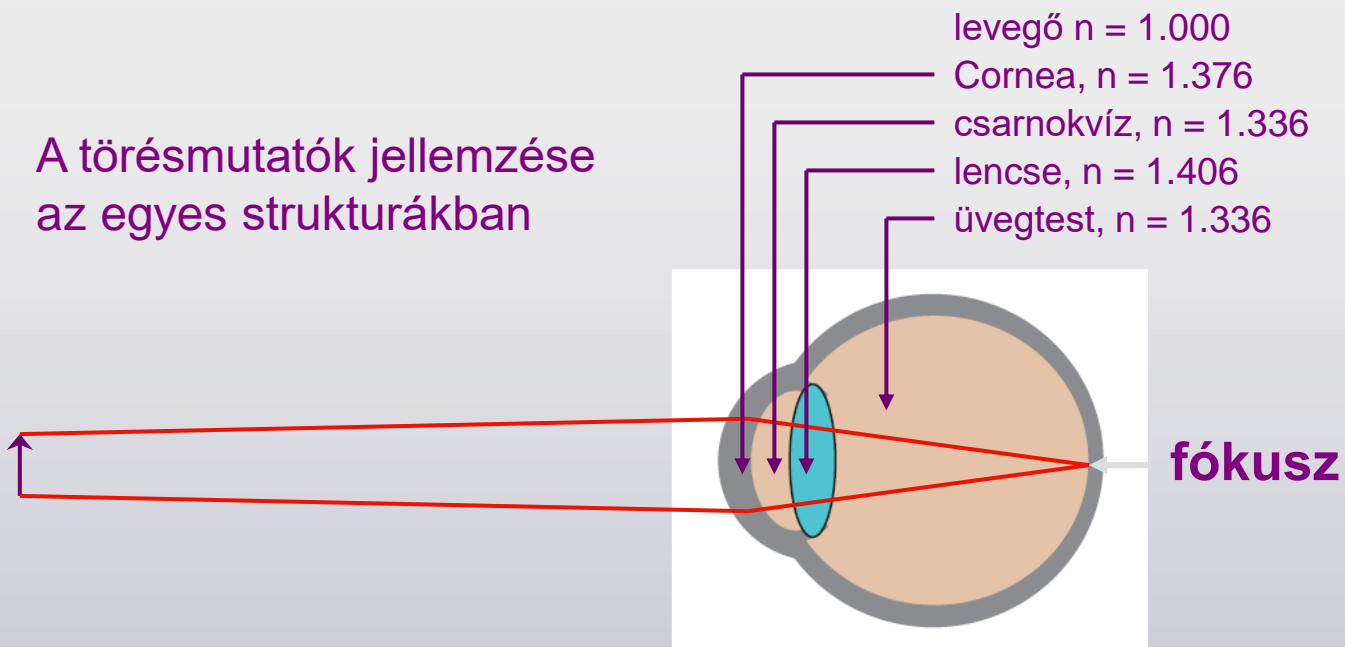
cataracta -szürkehályog (a lencse fényáteresztő képessége változik meg)

A szem belső nyomása (meghatározza az alakját)
 (Intraocularis nyomás)
 értéke: 10-16 Hgmm,
 mérése –a szemgolyó behorpaszthatósága
 a csarnokvíz keringése
 a pupilla szerepe a csarnokvíz elfolyásában

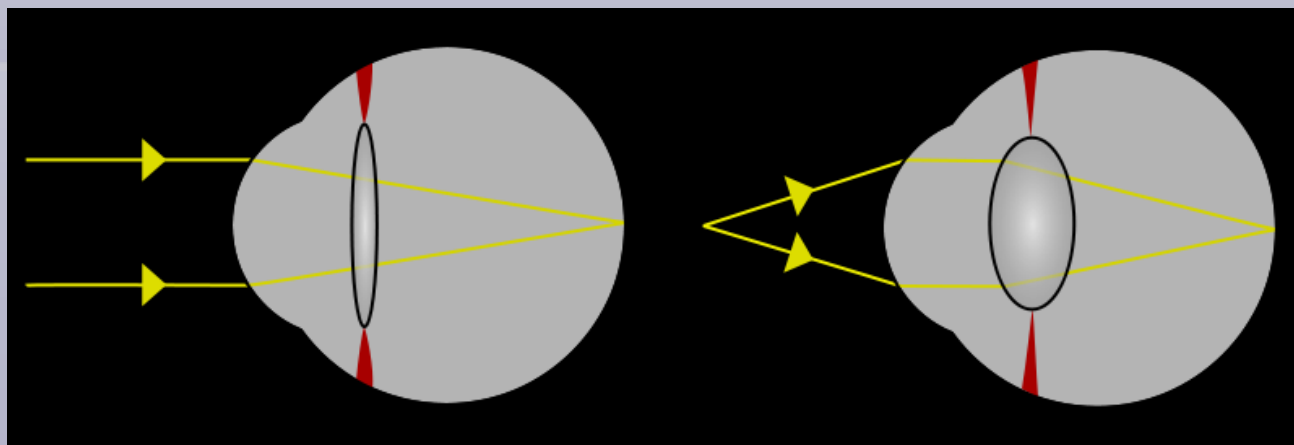
krónikus belnyomás emelkedés
 glaucoma (zöldhályog) – egyik fajtája



A törésmutatók jellemzése az egyes strukturákban



Akkomodáció



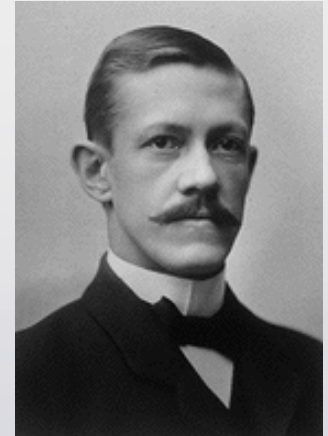
Gullstrand model alapján meghatározott alapvető paraméterek

Allvar Gullstrand

1852 – 1930

Nobel Award – 1911

Swedish ophthalmologist



❖ törésmutató:

cornea.....	1.376
aqueous humour.....	1.336
lencse.....	1.413
üvegtest	1.336

❖ Törőerők:

cornea	42.7 D
lencse – a szembelsejében.....	21.7 D
teljes szem	60.5 D

❖ Görbületi sugarak:

cornea	7.8 mm
lencse – külső fal.....	10.0 mm
lencse – belső fal.....	-6.0 mm

❖ Fókuszok lokalizációja:

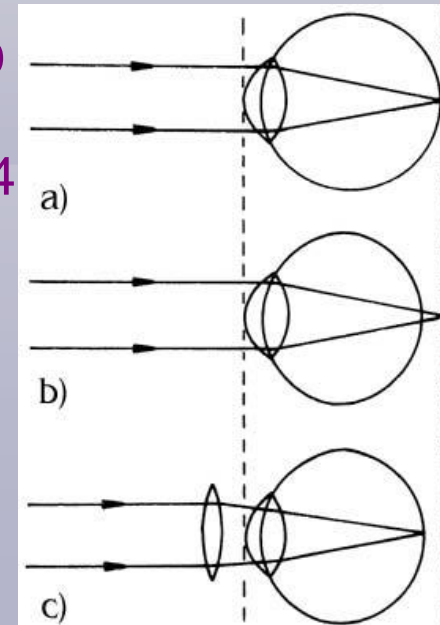
(a corneától mérve) :

front (object) focus.....	-14.99 mm
back (image) focus	23.90 mm
retinae location.....	23.90 mm

A szem akkomodációs képessége

- Mekkora az a fókusz-távolság, amely változik az egészséges szem akkomodációja során?
 - $P_{\text{akkomodáció}} = P_{\text{távolpont}} - P_{\text{közelpont}}$
 - $P = 1/f$
 - $1/f = 1/d_{\text{tárgy}} + 1/d_{\text{kép}}$
 - A képtávolság a szem átmérője (lencse - retina) = 2 cm
 - $1/f_{\text{távolpont}} = 1/d_{\text{tárgy}} + 1/d_{\text{kép}}$
 $P_{\text{távolpont}} = 1/\text{végtelen} + 1/0.02 = 0 + 50 = 50 \text{ D}$
 - $1/f_{\text{közelpont}} = 1/d_{\text{tárgy}} + 1/d_{\text{kép}}$
 - $P_{\text{near point}} = 1/0.25 + 1/0.02 = 4 + 50 = 54 \text{ D}$
- $$P_{\text{akkomodáció}} = P_{\text{távolpont}} - P_{\text{közelpont}} = 50 \text{ D} - 54 \text{ D} = 4$$

Ha elvesz a képesség- lencsével korrigálható



Látótér

(Átismételni a poláris koordinátákat)

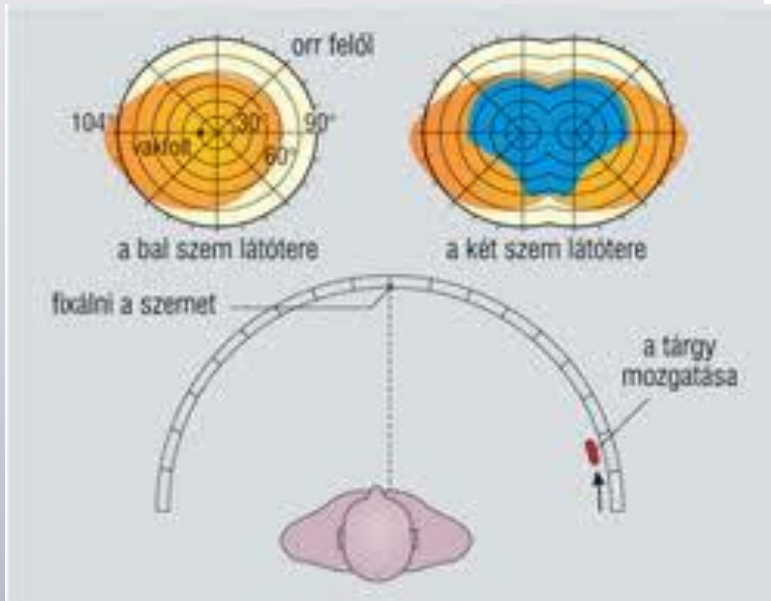
látótérvizsgálat : a beteg látóterének egyes részei milyen erősségű fényt képesek érzékelni-

statikus perimetria : előre kiválasztott pontokban mérjük meg a látótér érzékenységét

kinetikus perimetria: ismert méretű és intenzitású jelet mozgatunk a periféria felől a látótér centruma felé

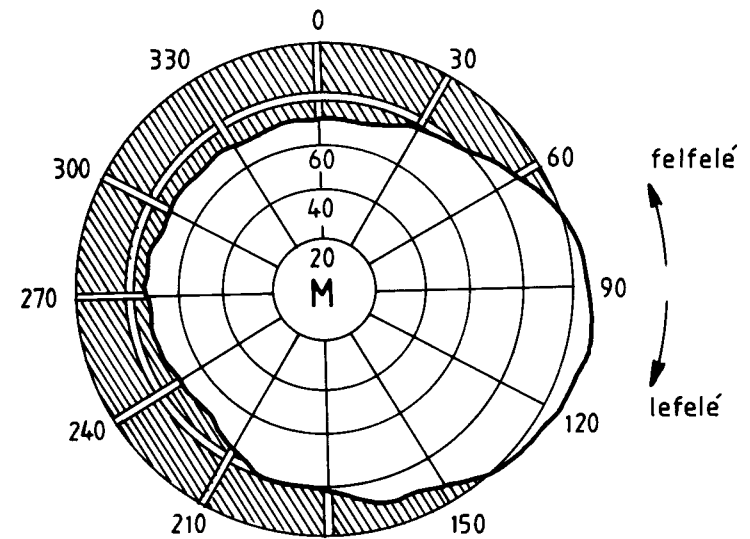
Jelentősége: zöldhályog (glaukóma) diagnosztikájában és gondozásában, valamint neurooftalmológiai betegségekben

Egy szemmel (jobb)

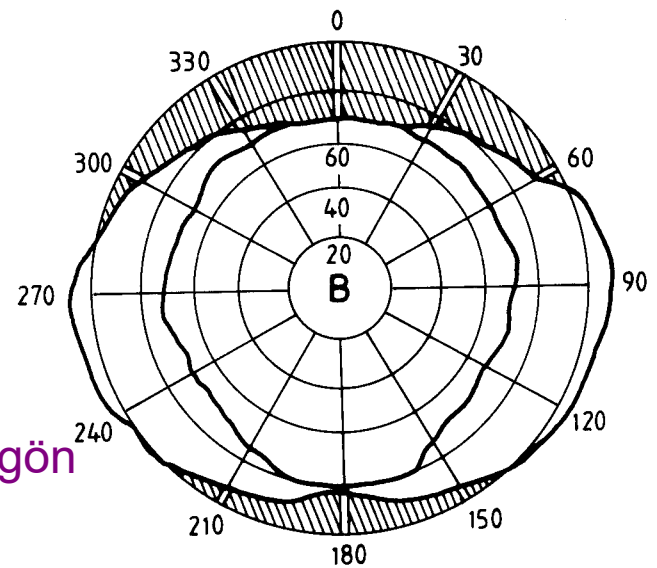


Két szem esetén

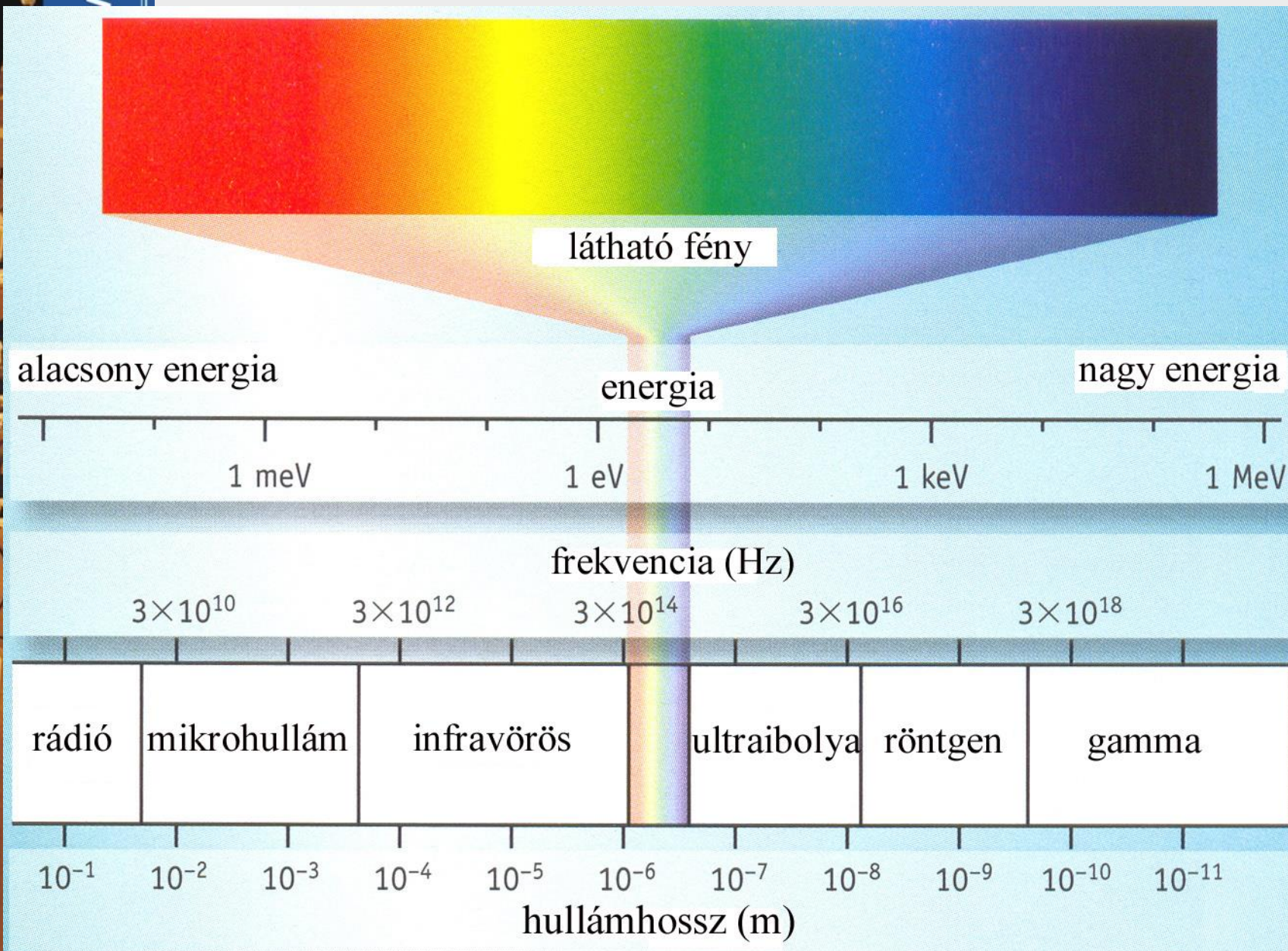
A legélesebb kép a látómező 2-30° kúp szögön belül.



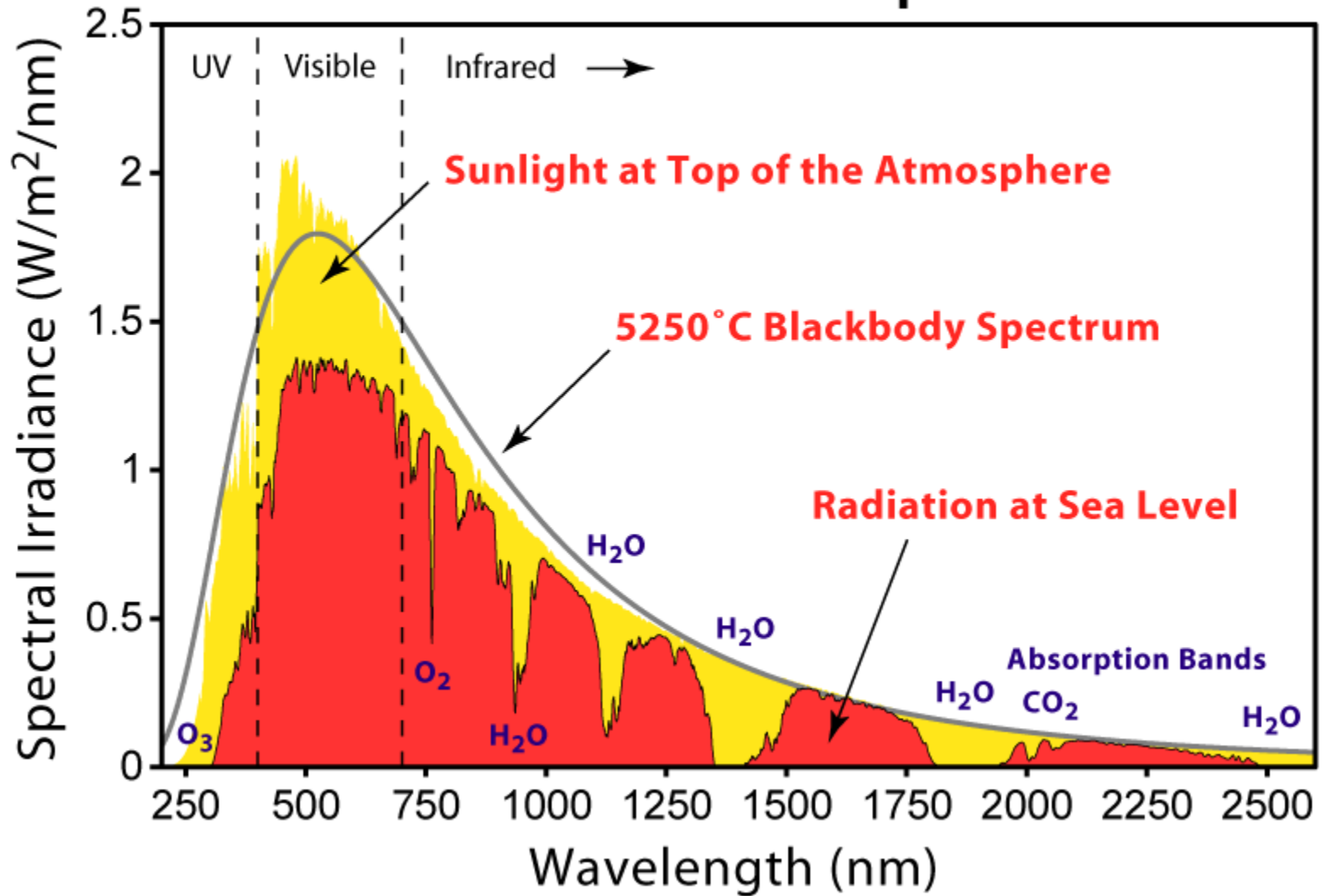
a)



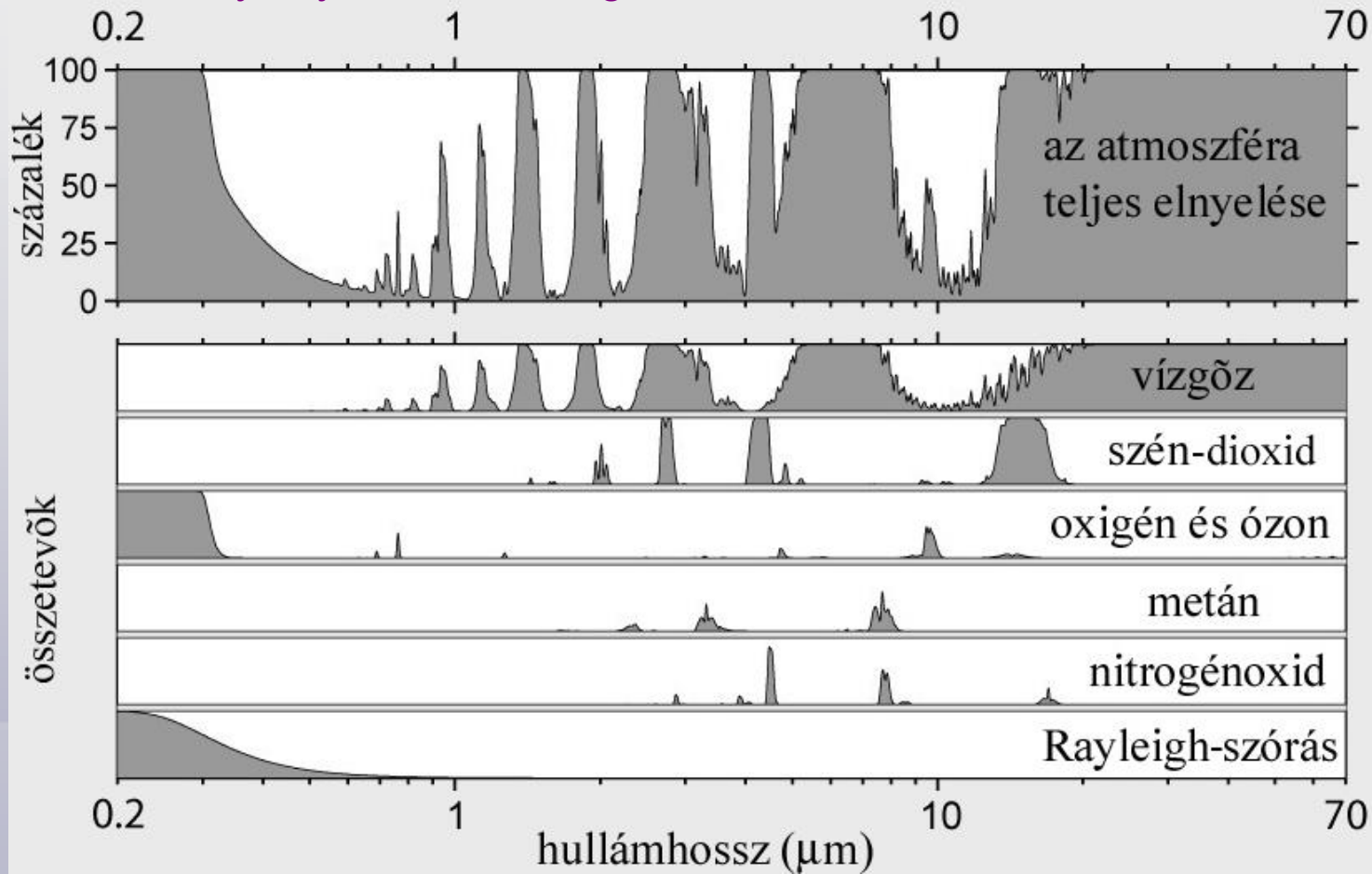
b)



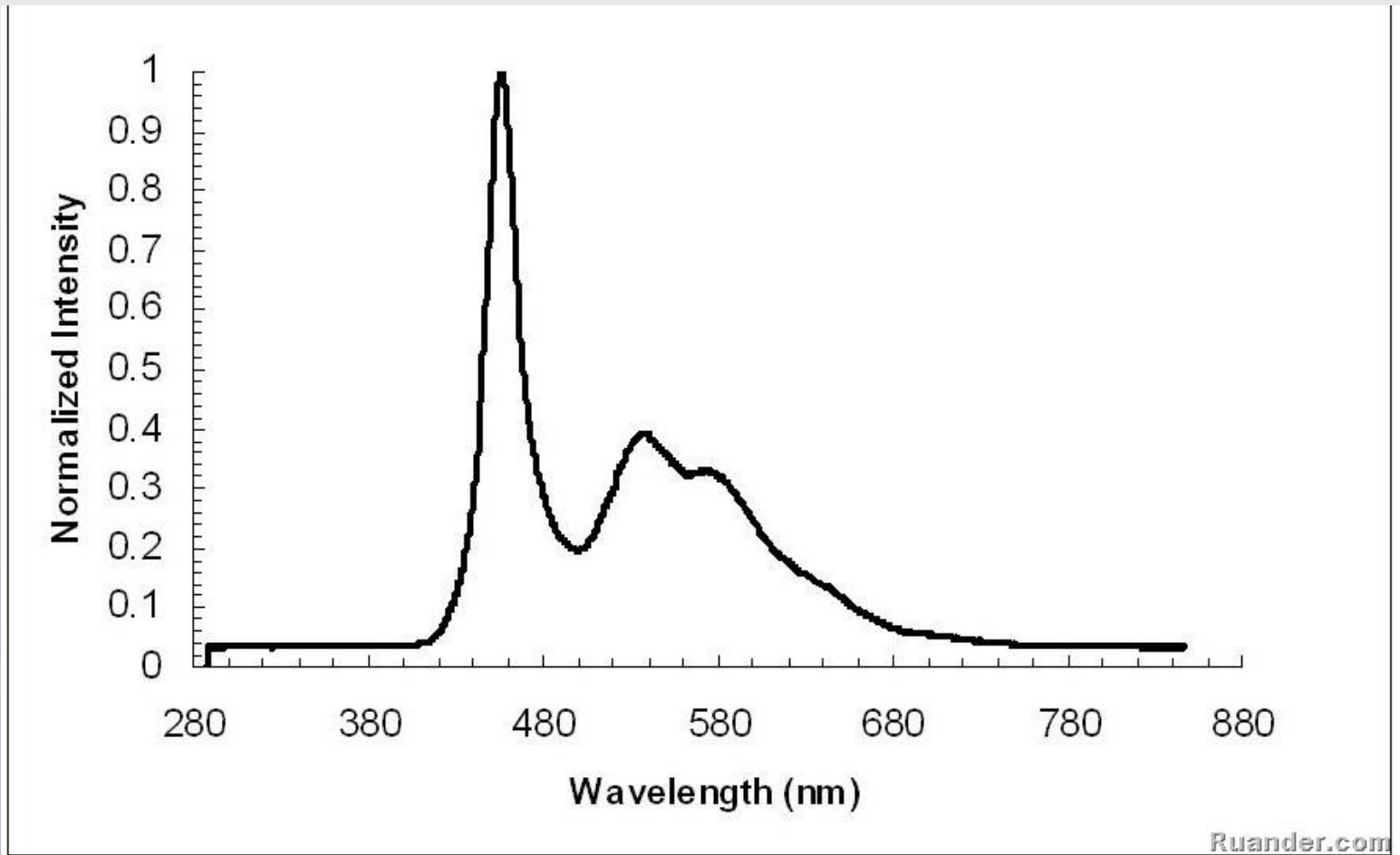
Solar Radiation Spectrum



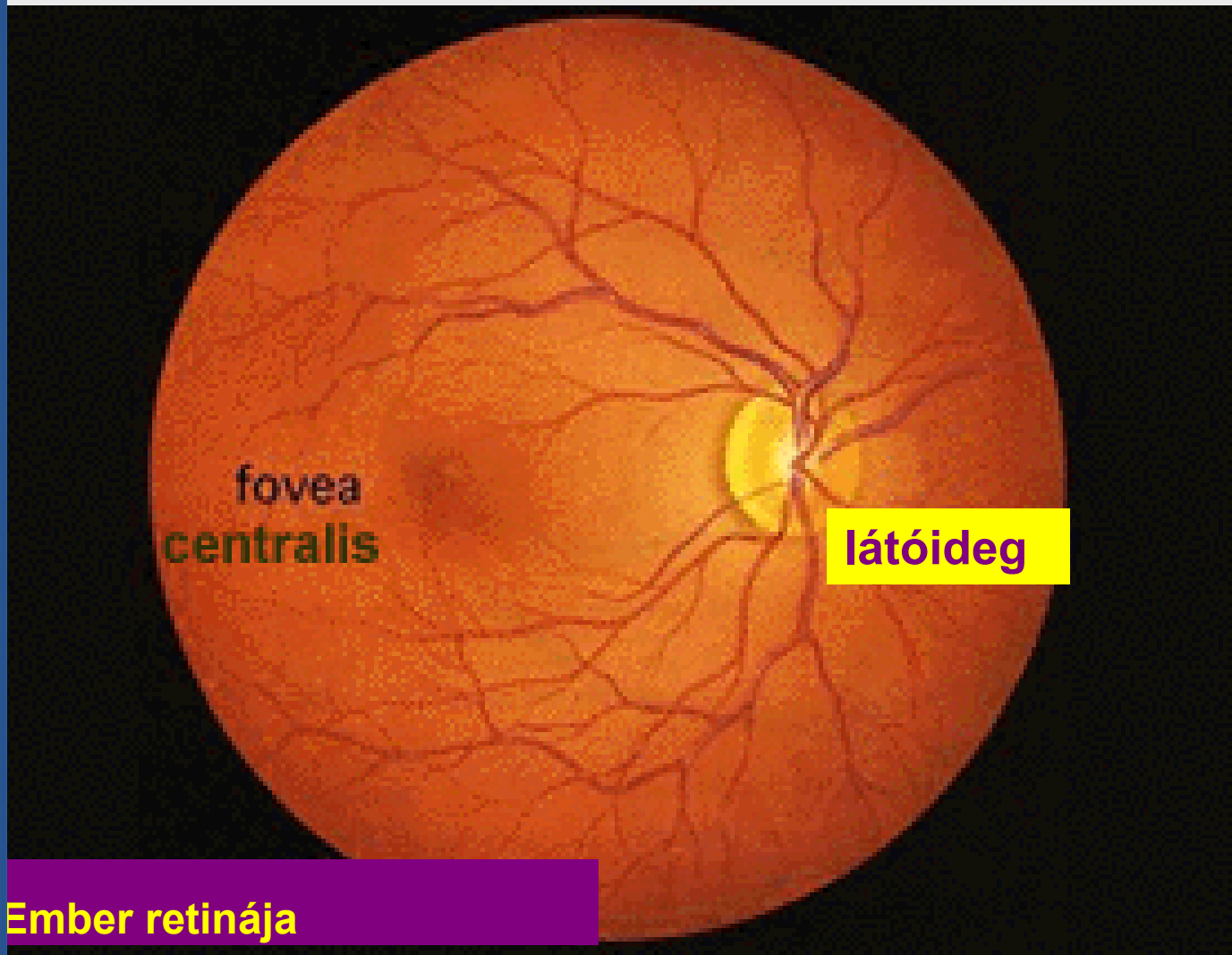
Fényelnyelés a földi légkörben



Milyen a mesterséges fehér fény spektruma
 3 LED kevert fénye (kék-zöld és piros)



Ruander.com

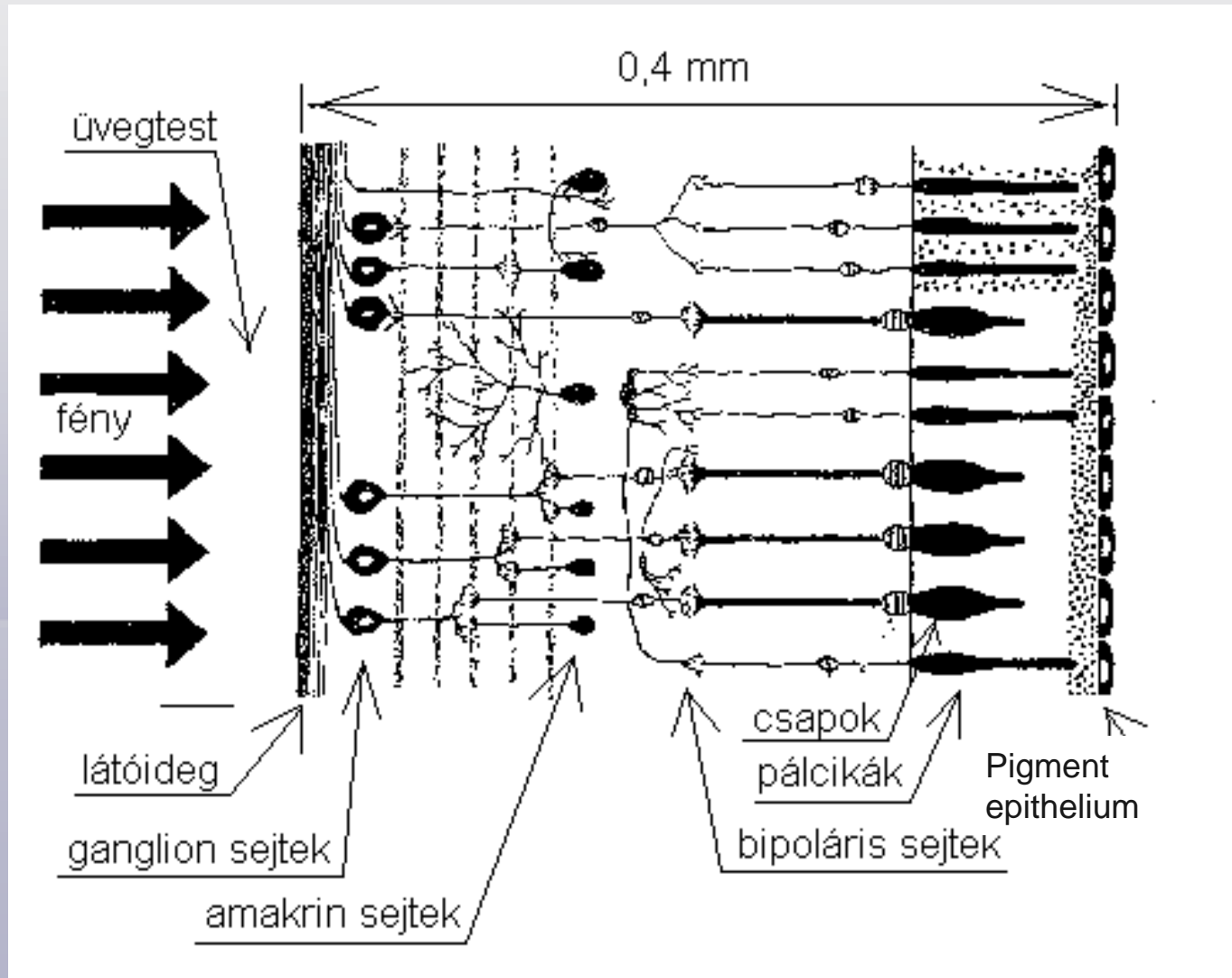


fovea
centralis

látóideg

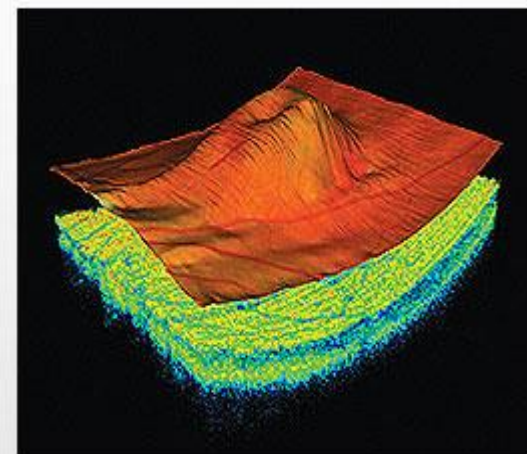
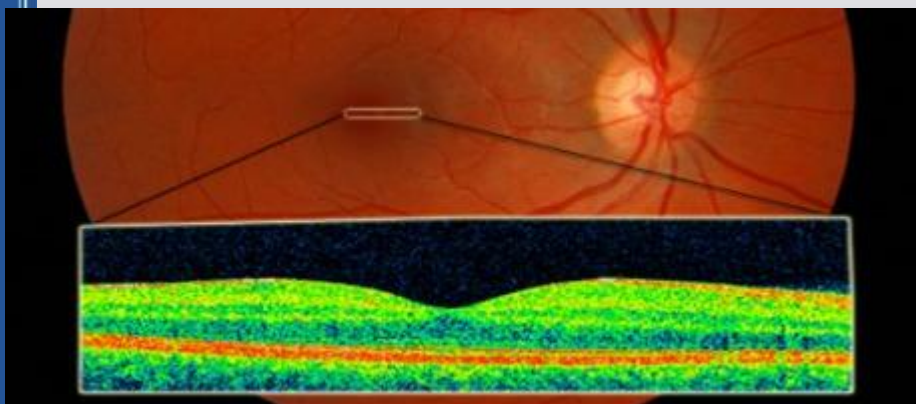
Ember retinája

A retina szerkezete

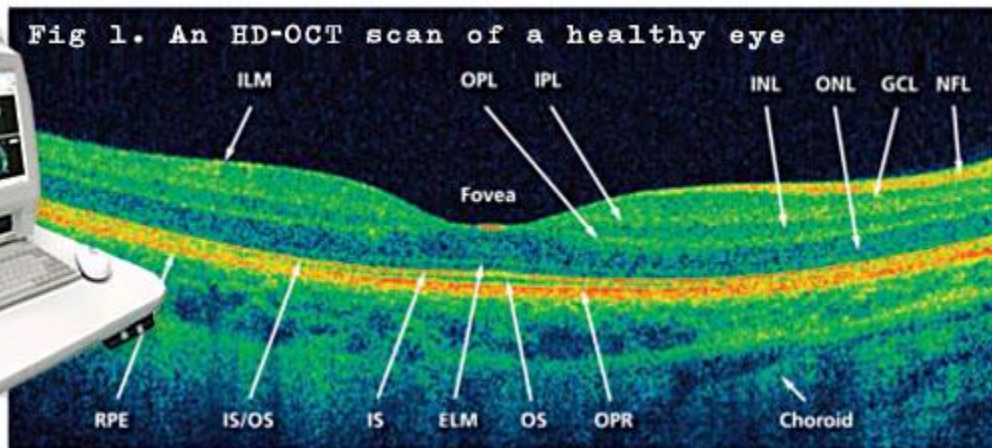
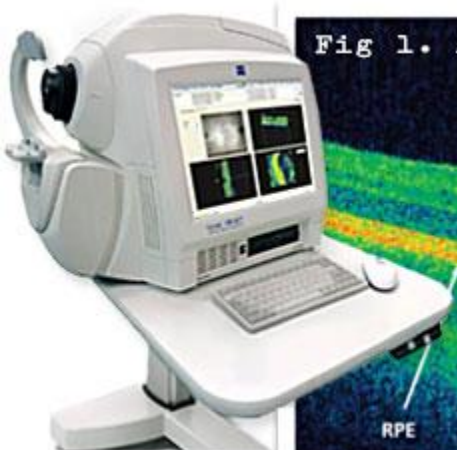


OCT –optikai koherencia tomográfia

A direkt és indirekt oftalmoszkópia mellett az elmúlt évtizedekben a képalkotó eljárások közül a szemészeti ultrahang, majd az angiográfia után az optikai koherencia tomográfia (OCT) megjelenésével - 1995-ben számoltak be -következett be jelentős előrelépés a diagnosztikában

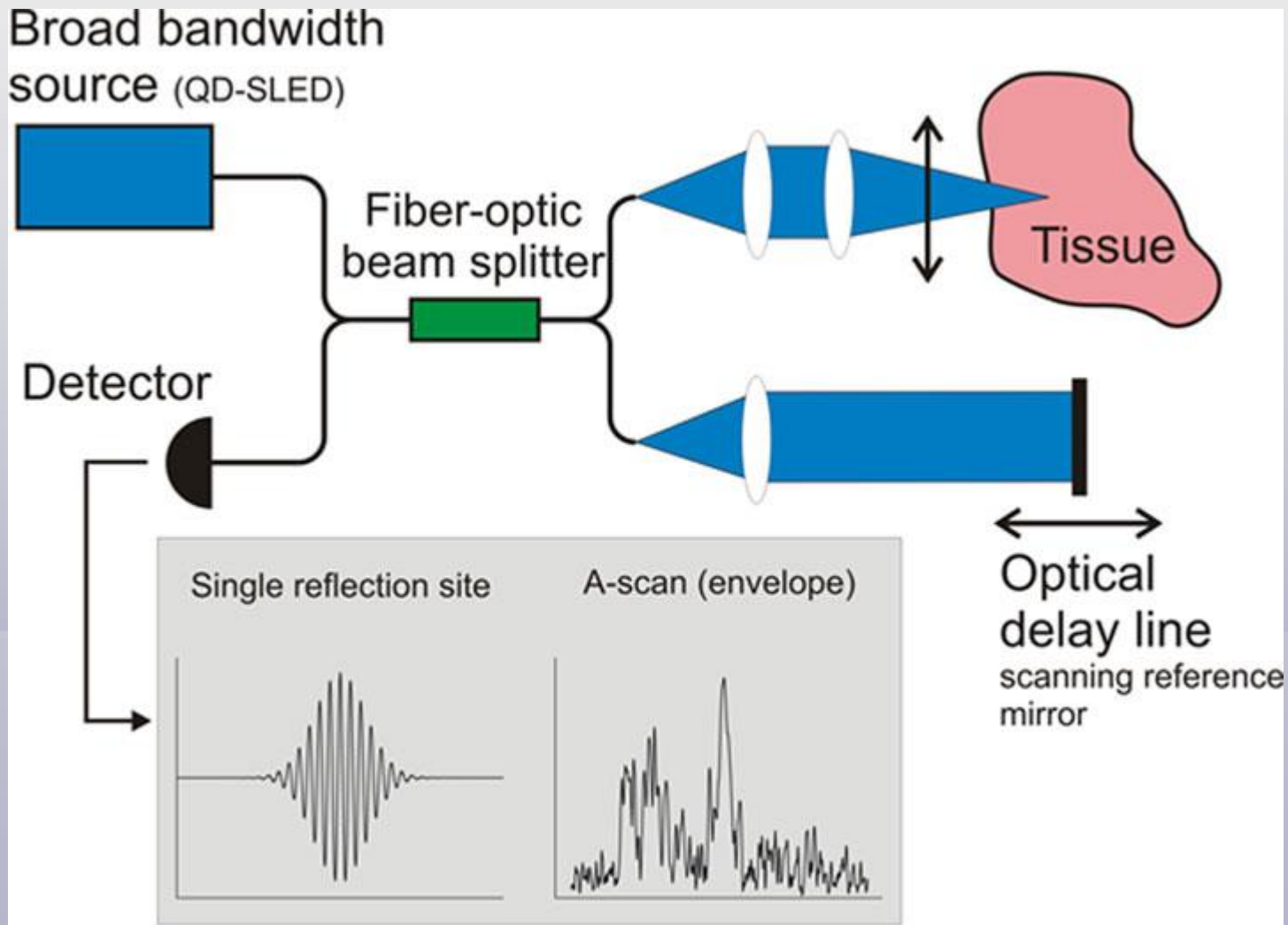


3 Dimensional OCT Image



Az egymás melletti síkmetszetekből készül a 3D rekonstrukció

A koherencia tomográfia elve (a laser fényt ketté osztjuk- a mintáról visszavert és az eredeti interferenciáját analizáljuk (time domain-frequency domain)



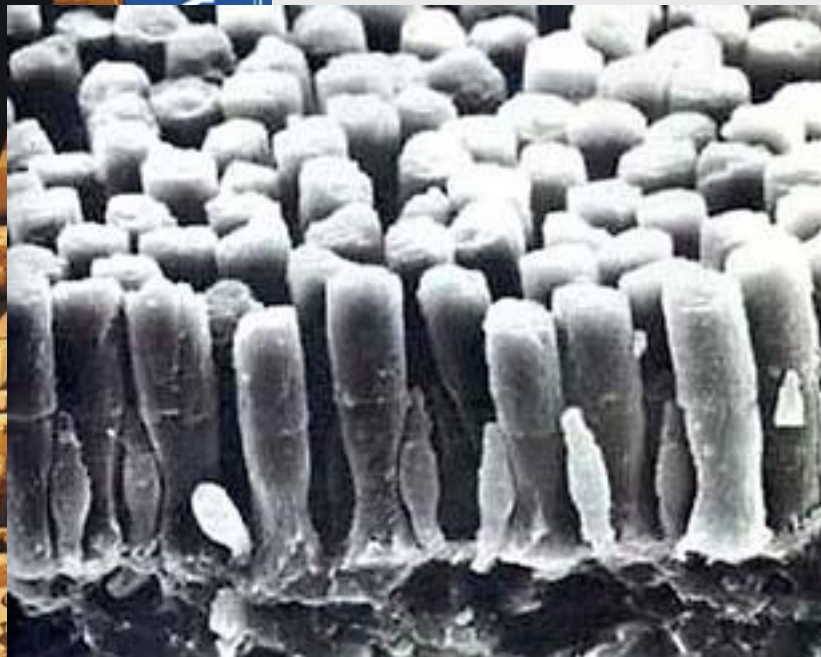
Az optikai jel feldolgozása a retinán

- A cornea és szemlencse leképezi a külvilágot a retinára: **fény inger** kép
- A retinán fényérzékelők: csapok (nappali és színlátás) és pálcikák (szürkületi látás) alakítják az ingert **ideg-ingerületté**
- további sejtek a retinában előfeldolgoznak, majd az agy felé továbbítják a jelet, ahol kialakul a **fény észlelet kép**

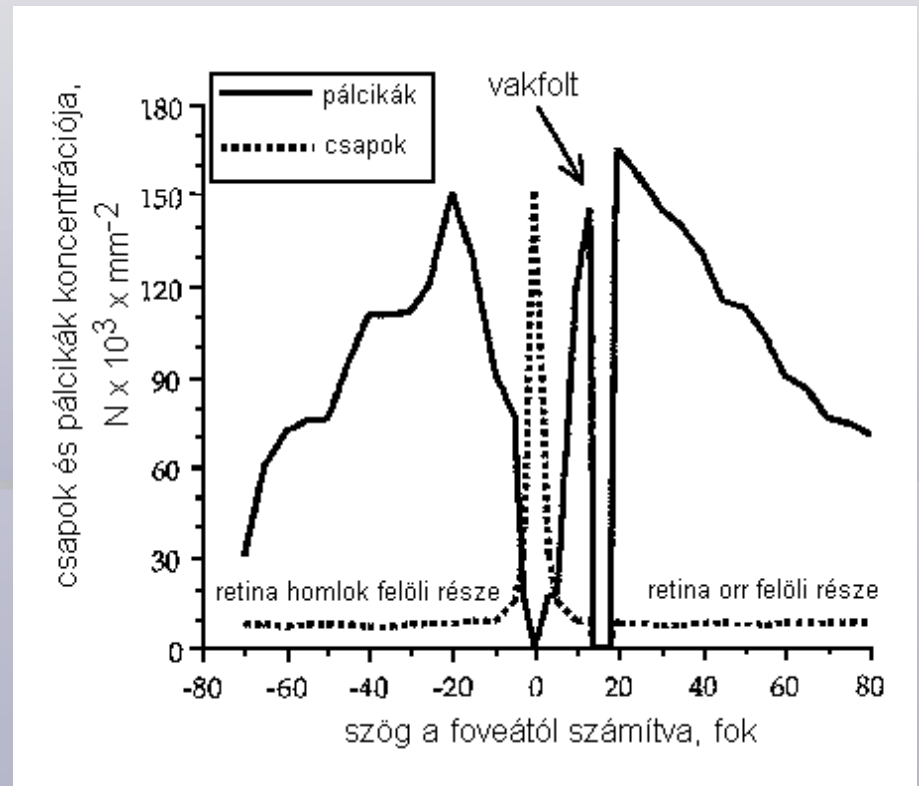
Fényérzékelő sejtek

- csapok koncentrációja nagy a **foveában** (látógödör, sárga folt)
- pálcika koncentráció nagy a periferiális tartományokban
- fovea központi tartománya a **foveola**
- ~ 120 millió **pálcika (sötétben látás)** és
- ~ 5 millió **csap (színlátás)**
- ~ 1,25 millió látóideg (erőteljes előfeldolgozás van a retinában)

A receptorok



A retina elektronmikroszkópos képe: a pálcikák és a közöttük a csapok

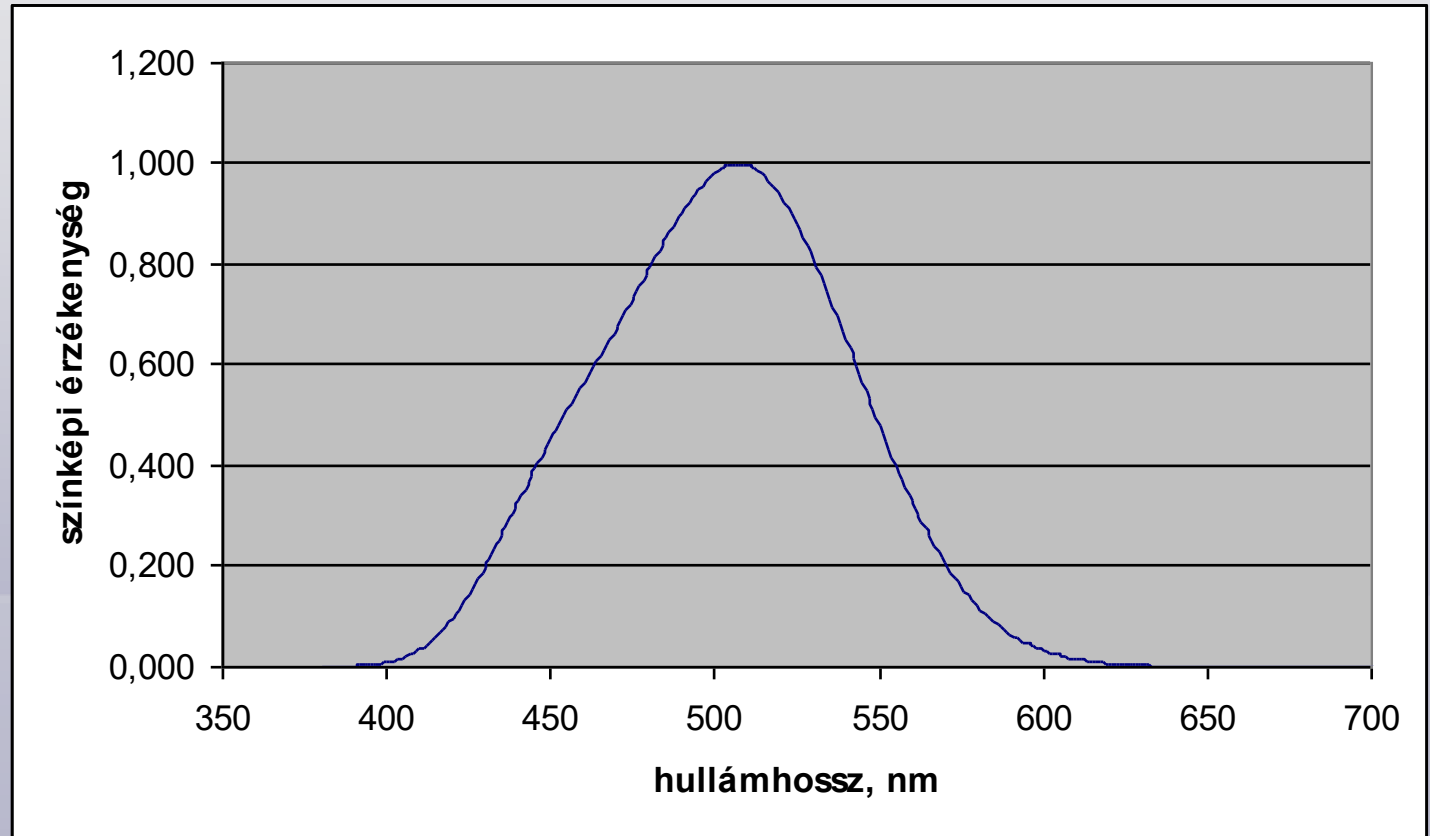


A nappali látás receptorai a csapok

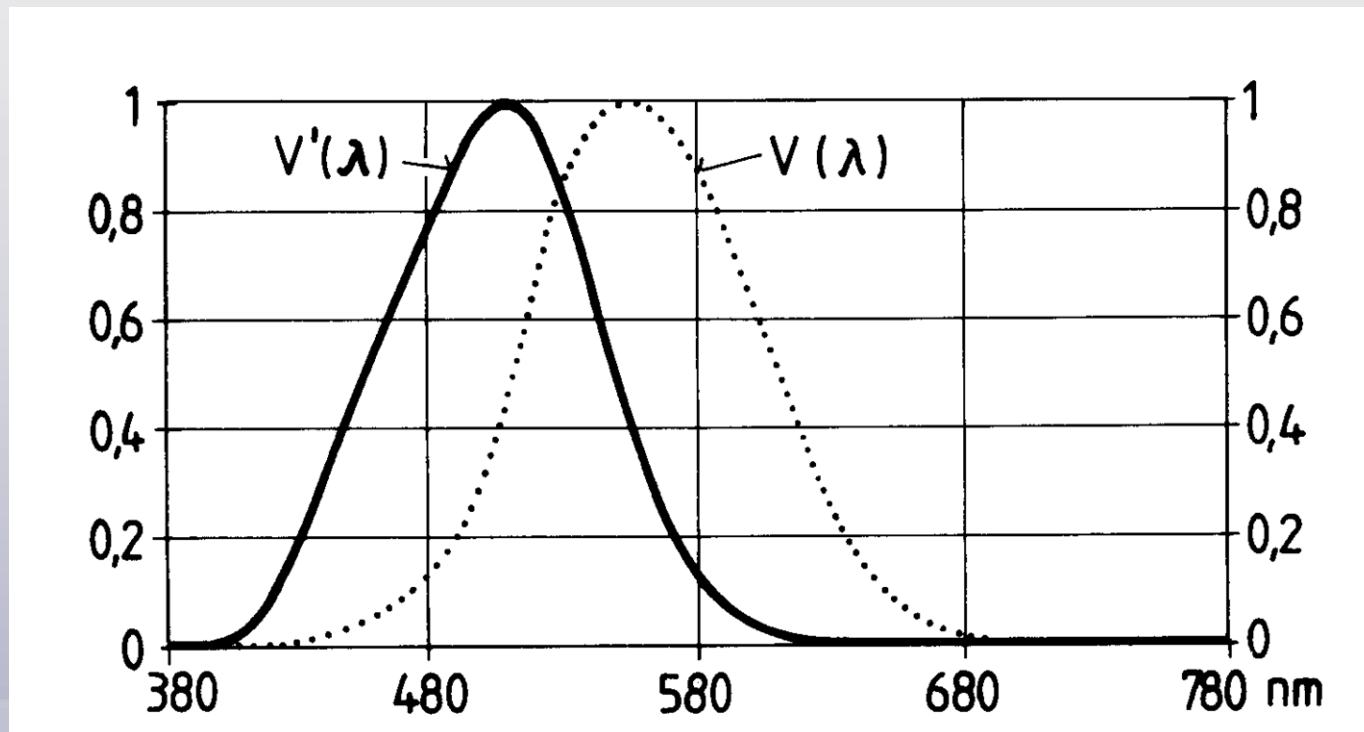
Az éjszakai látás receptorai a pálcikák (a csapoknál kb. ezerszer érzékenyebbek)

A csapok és pálcikák eloszlása a retinán

Pálcika látás színeképi érzékenysége



A szem érzékenységi görbék



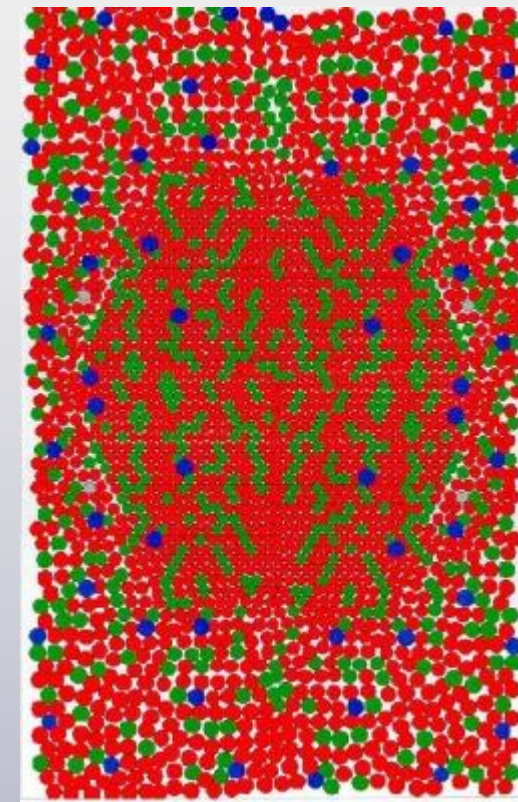
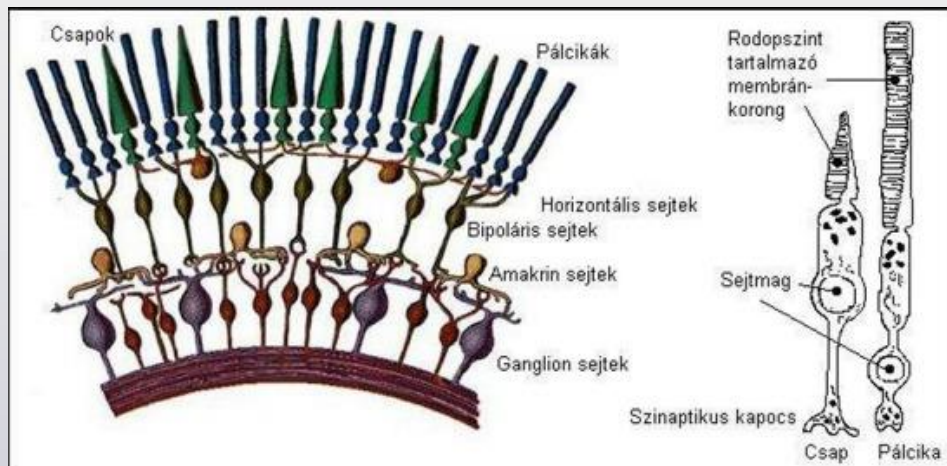
$V(\lambda)$ fotopiás látás;

$V'(\lambda)$ scotopiás látás

Scotopia: a szem alkalmazkodása sötétséghez

Kromatikus aberráció hatása látásunkra

- rövidhullámhosszú sugarak (kék fény) erősebben törnek meg, mint a hosszúhullámhosszú sugarak (vörös fény)
- ha a kék fényre fókuszálunk (A), vörös gyűrű jelenik meg
- ha a zöld fényre fókuszálunk (B), magenta (bíbor) gyűrűt látunk
- ha a vörös fényre fókuszálunk (C), kék gyűrűt látunk
- **sose használjunk egyszerre vörös és kék színt információ megjelenítésre!**



Világosban – sötétben látás

világosban-, fotopiás-látás: csap látás; 3 cd/m^2 felett
 sötétben-, szkotopiás-látás: pálcika látás; 10^{-3} cd/m^2 alatt
 alkonyi-, mezopos-látás: a két tartomány között, mind a csapok, mind a pálcikák aktívak~

- ~ 65% vörös
- ~ 32 % zöld
- ~ 2-3% kék

Világosban – sötétben látás

- világosban-, fotopiás-látás: csap látás;
 3 cd/m^2 felett
- sötétben-, szkotopiás-látás: pálcika látás;
 10^{-3} cd/m^2 alatt
- alkonyi-, mezopiás-látás: a két tartomány között, mind a csapok, mind a pálcikák aktívak

A foton energiájából hogyan lesz elektromos jel?

Fényérzékeny molekula a rodopszin [opszin (7 egységből álló transzmembránhélix) és 11-cisz-retinal (pigment)]

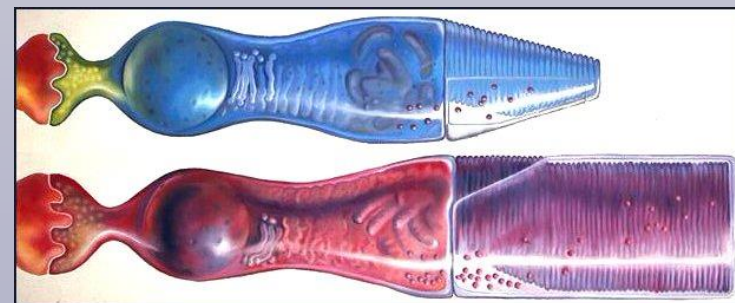
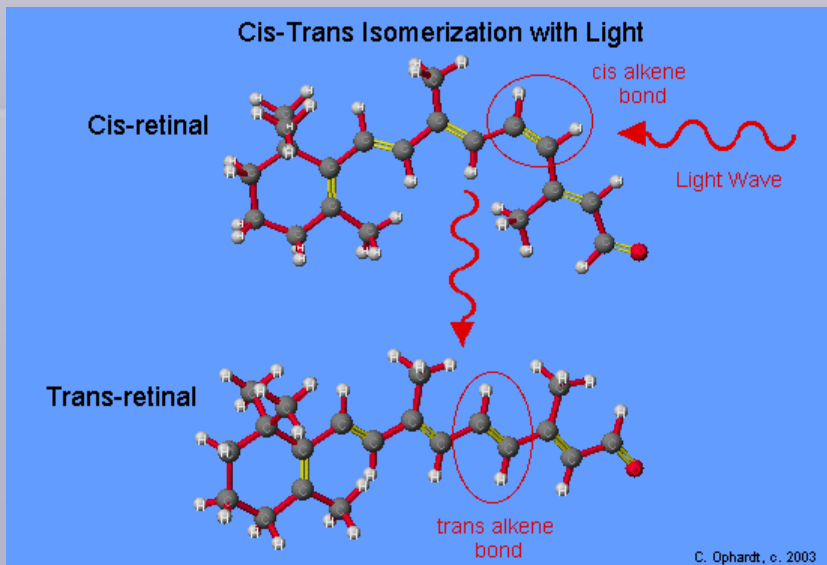
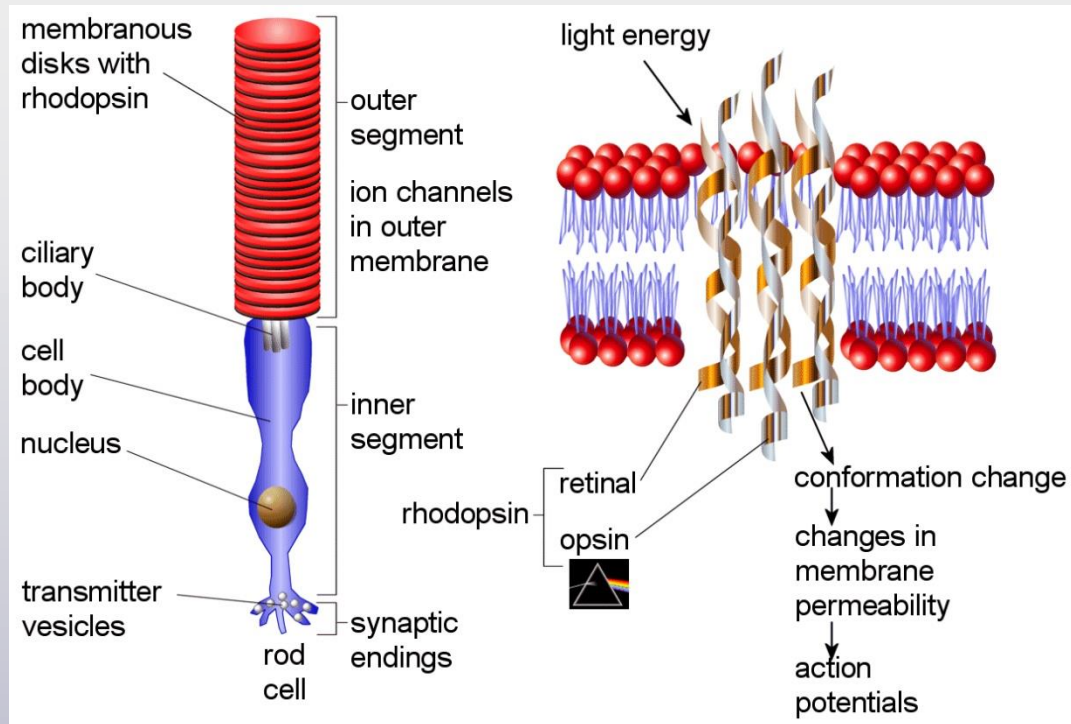
Egy foton hatására: 11-cisz-retinalból transz-retinal képződik

(a molekula kiegyenesedik) □ itt nem részletezendő

mechanizmus után Na^+ csatornák záródnak (megszűnik a külső és belső szegmens közötti nyugalmi „sötét” áram, a receptoron potenciál változás lesz (hiperpolarizálódik))

A pálcikákban egy, a csapokban háromféle rodopszin van (abszorpciójuk más és más)

A hiperpolarizált sejt(ek) retinális kapcsolatokon át kapuzzák a ganglion sejteket és elindul útjára az ingerület



A háromféle csaptípus elnyelési görbéi – A színérzet

Kék csúcs: 420 nm-nél

Zöldcsúcs: 535 nm-nél

Vörös csúcs: 565 nm-nél
(valójában inkább sárga!)

„fehér” – érzet: a háromféle csap

egyenlő

mértékben

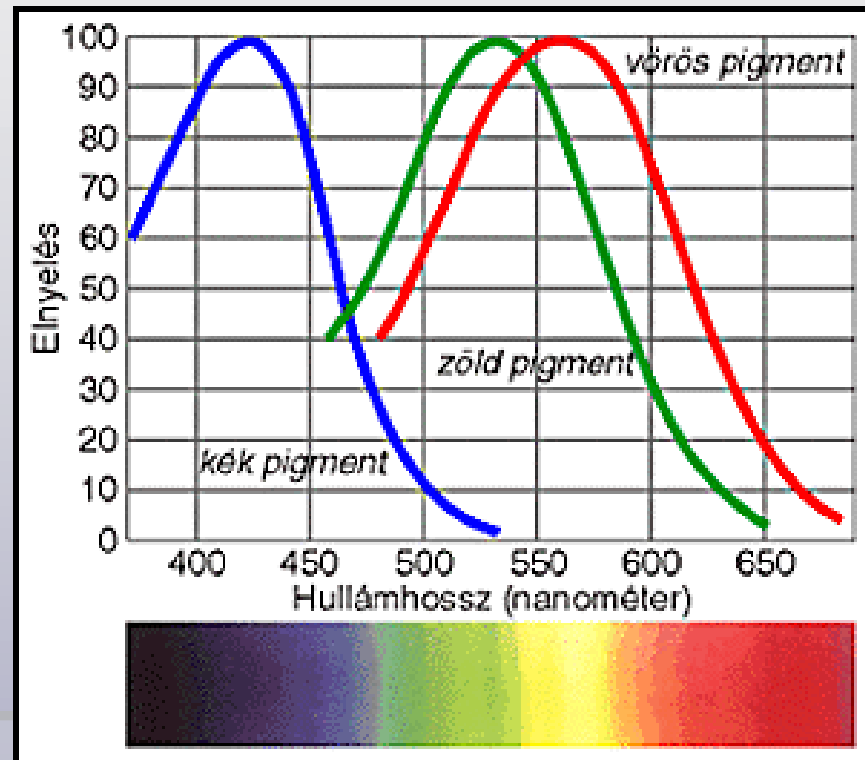
kerül

ingerületbe

színes érzet: a színes fény hullámhossz

eloszlásától

függ



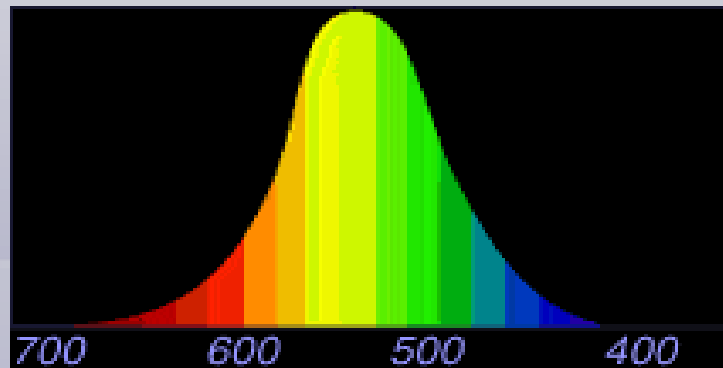
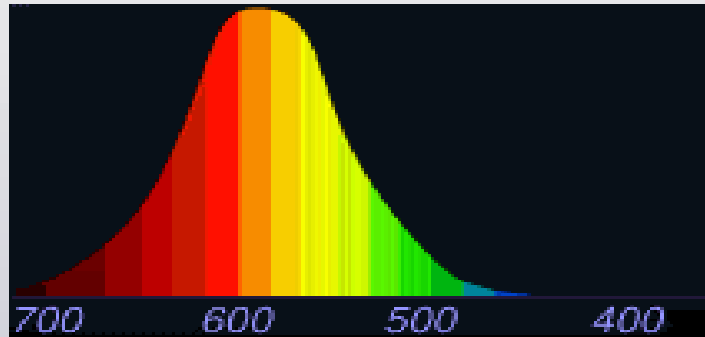
L (long), hosszú hullámhosszon
érzékeny

M (medium), közepes hullámhosszon
érzékeny

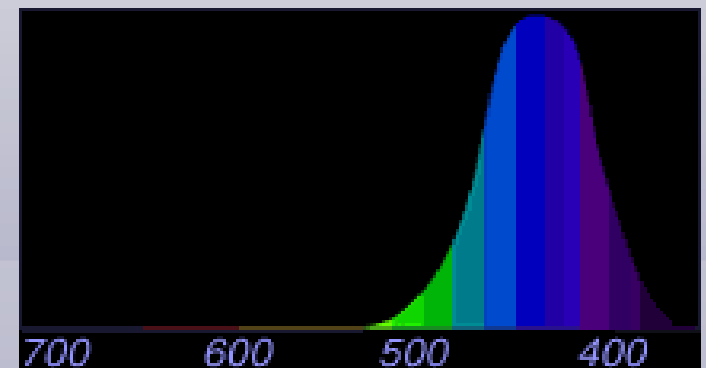
S (short), rövid hullámhosszon
érzékeny

Színlátás- spektrális érzékenység

“vöröre érzékeny” vagy “L” csapok

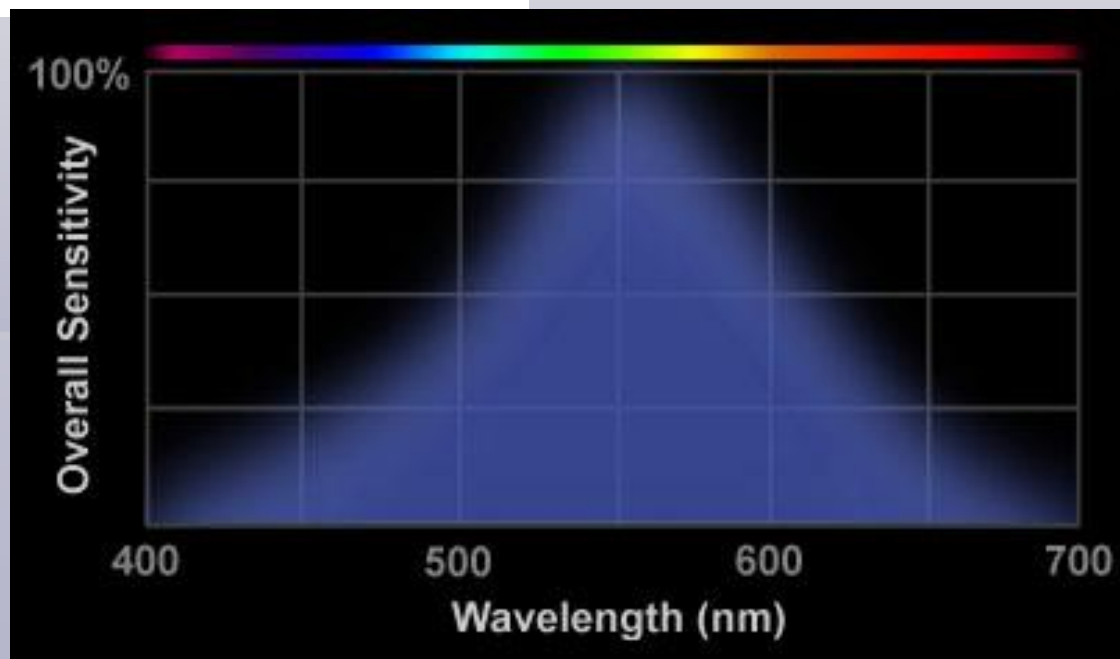
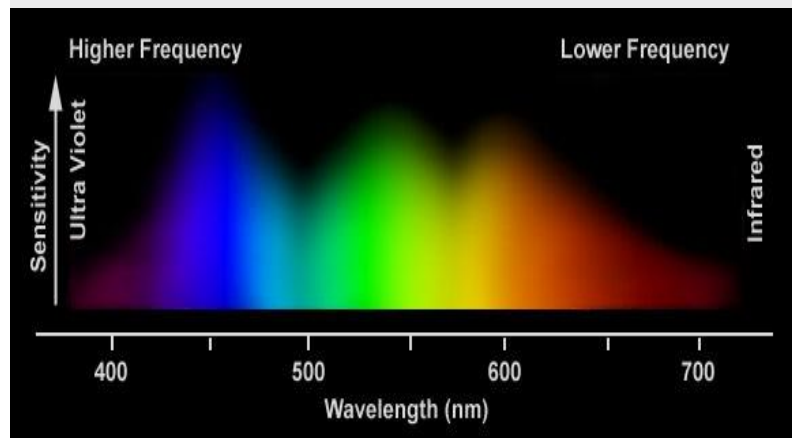
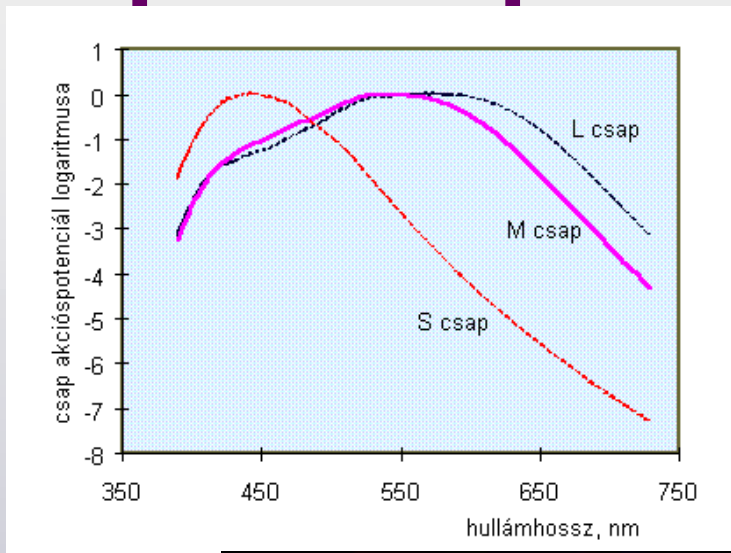


“zöldre érzékeny” vagy “M” csapok



“kékre érzékeny” vagy “S” csapok

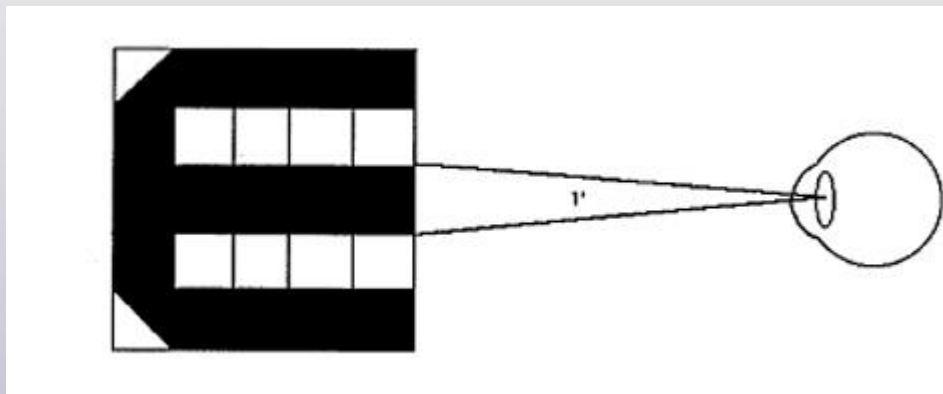
Csapok színeképi érzékenysége



Az éleslátás korlátai

1. látószög:

az egész ábra 5 szögperc, elemi részlete 1 szögperc alatt látszik



Legalább ekkora szöget kell bezárnia két pontszerű részletről érkező képalkotó sugárnak ahhoz, hogy azokat különállóként érzékeljük

2. Inger intenzitás- megvilágítás (1-10 foton/ms)
3. Időbeli felbontás (5-60 kép/sec-megvilágítástól függően)
4. A megvilágító- visszavert fény hullámhossza (380-760 nm)
5. a térlátás korlátai