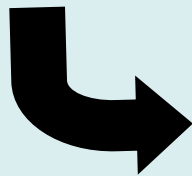


Az érzékelés biofizikájának alapjai

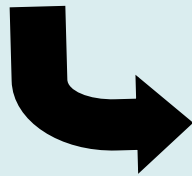
2025. 03. 13.
Liliom Károly

Az érzékelési folyamat

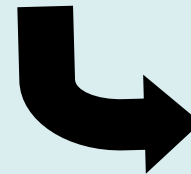
külső, belső
környezet
ingerei



inger-
specifikus
transzducer

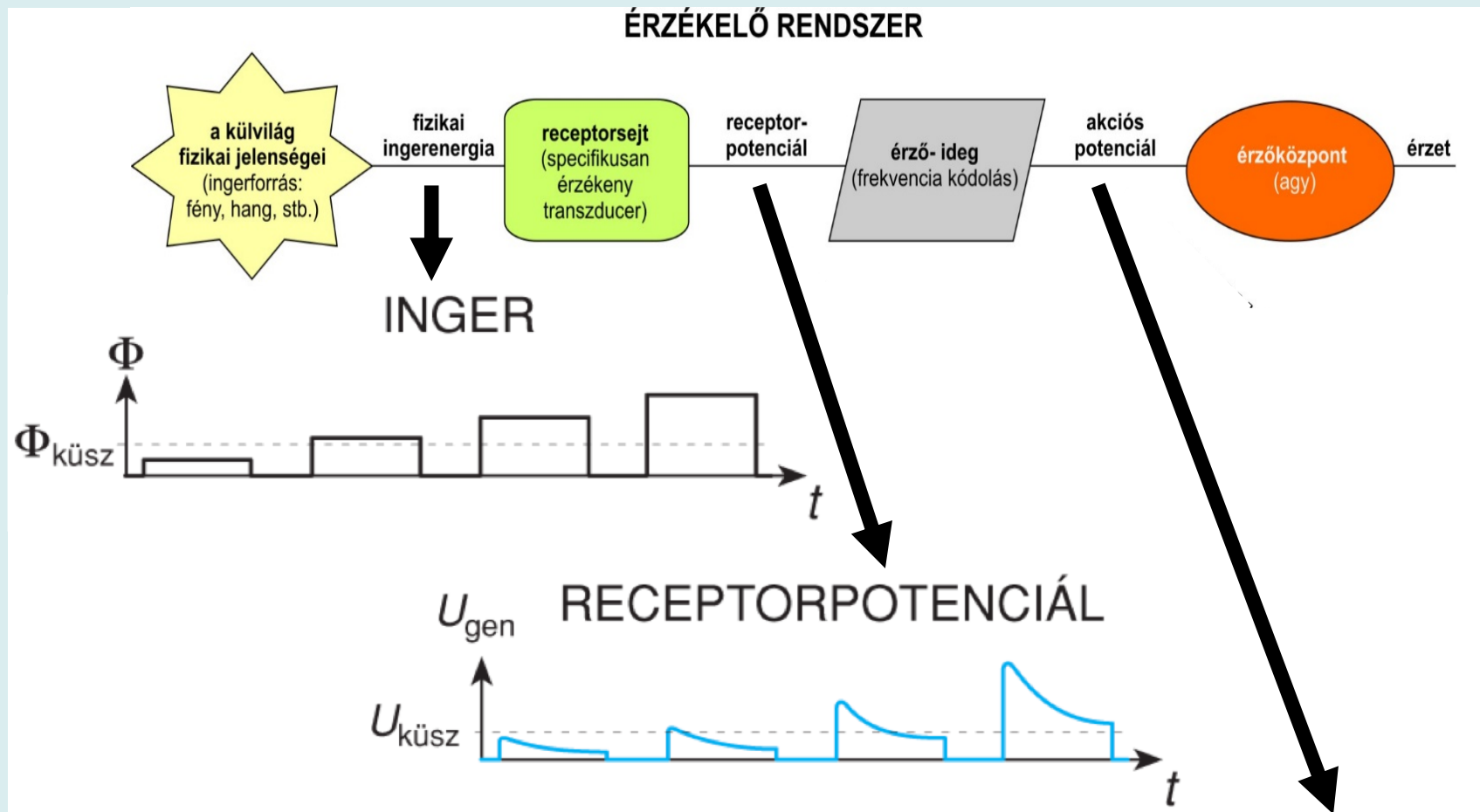


neuron



központi
idegrendszer

Az érzékelőrendszer általános felépítése

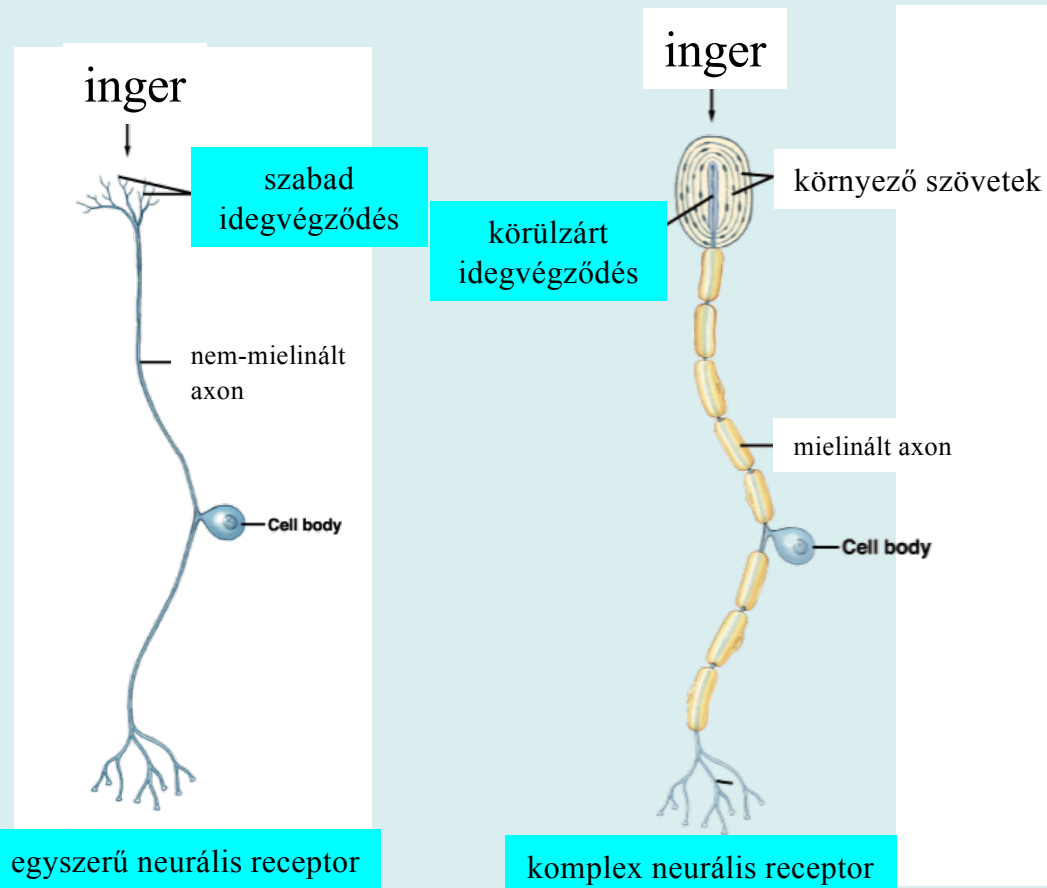


Az inger jellemzői:
milyen, hol, mennyi, meddig?



Receptorsejtek általános felépítése

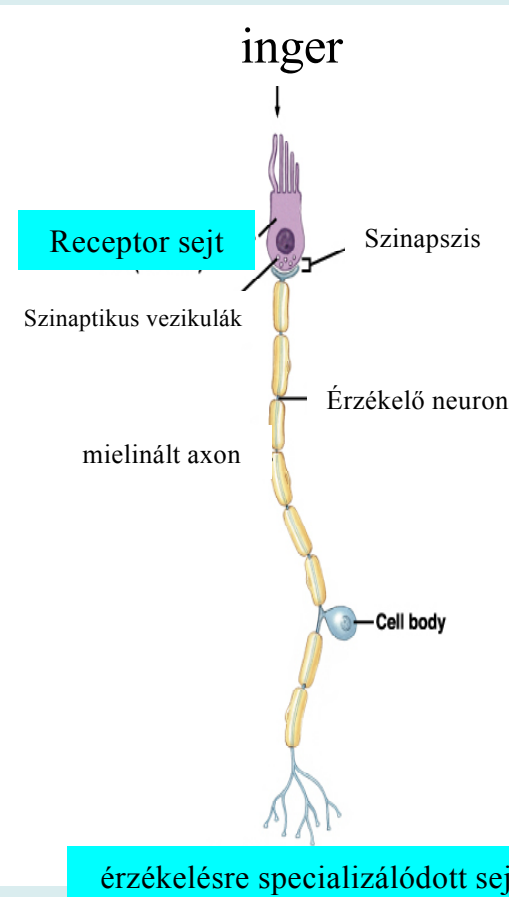
Primer receptor



pl. bőrrceptorok

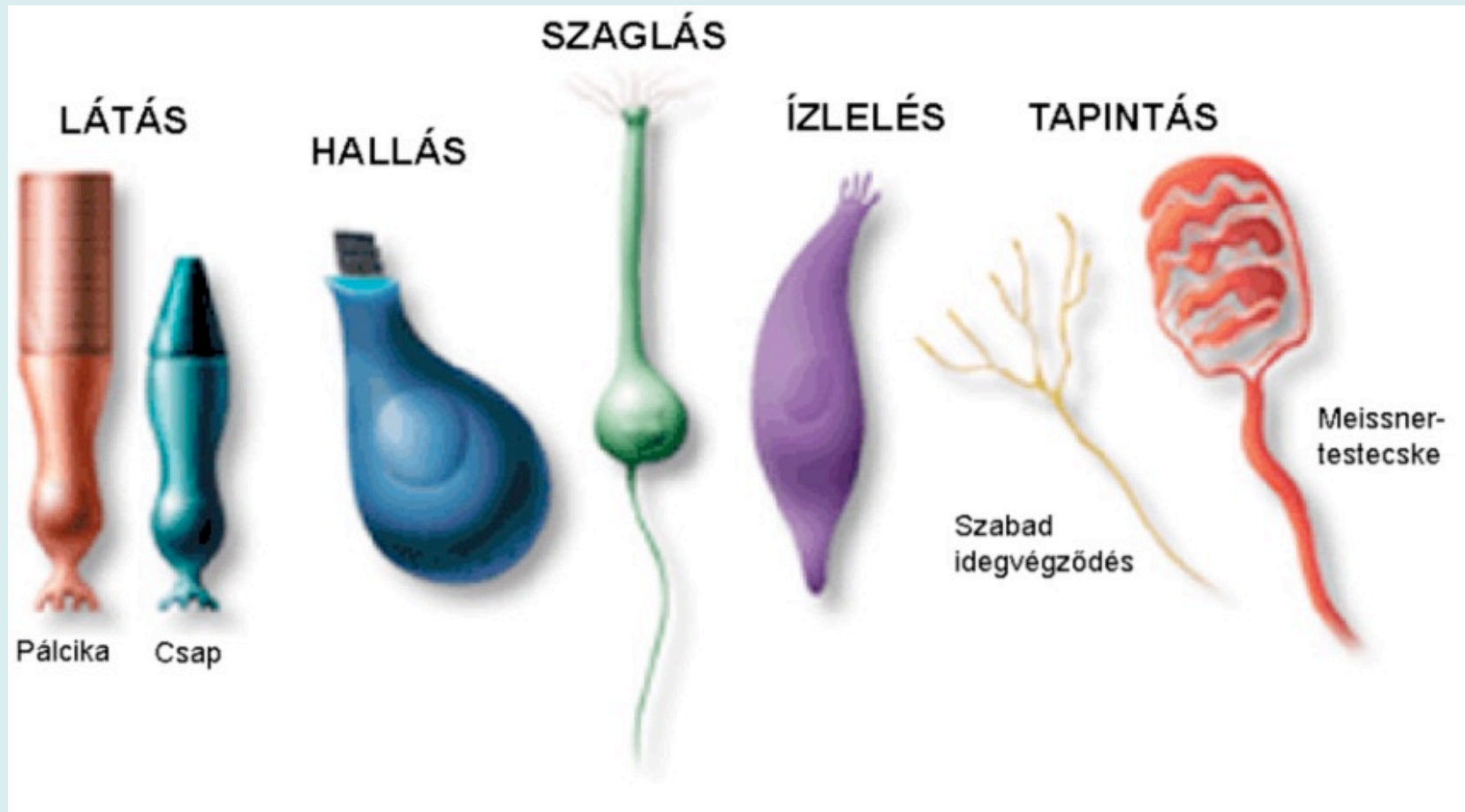
pl. izomorsó

Szekunder receptor

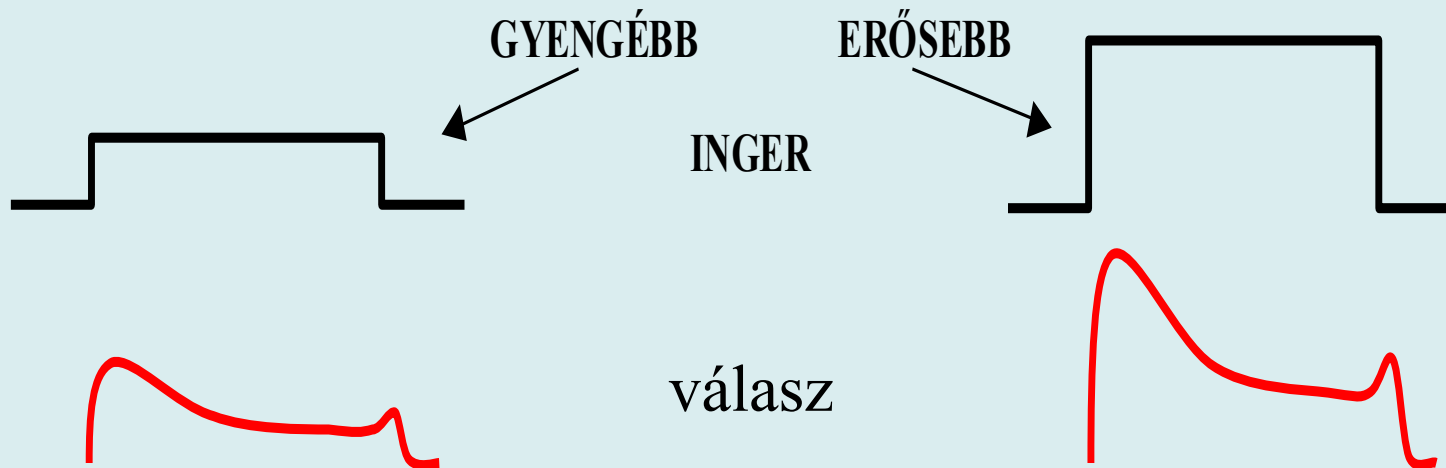


pl. hallás, látás

RECEPTORSEJTEK



Receptor válasza az adekvát ingerre



Az általános receptorválasz:

*a receptor nyugalmi potenciáljának
megváltozása = receptorpotenciál*

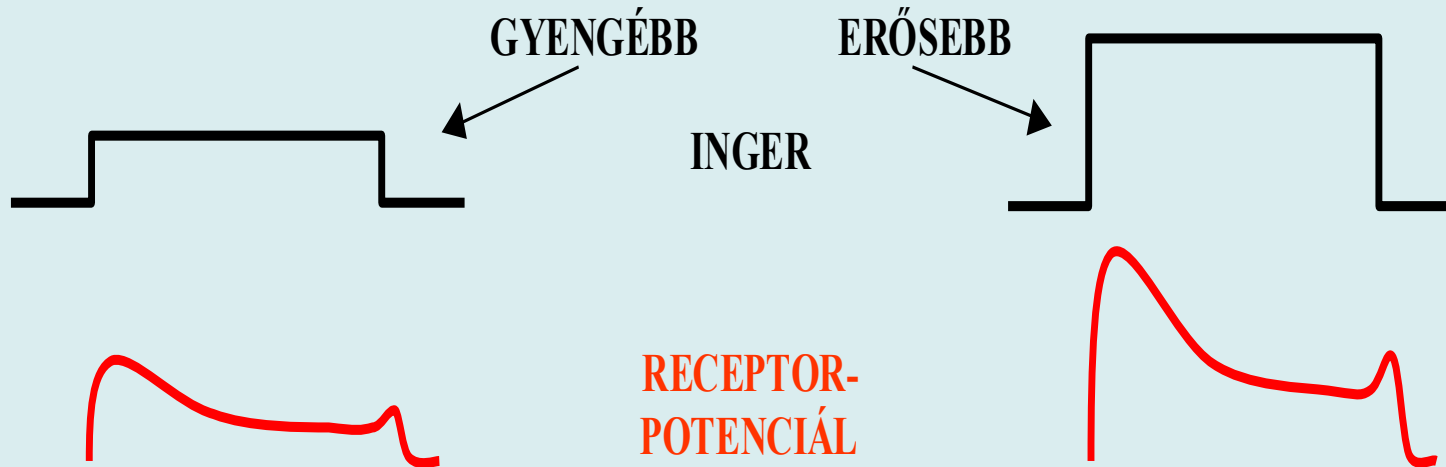
amplitúdója arányos az inger amplitúdójával

időtartama azonos az inger időtartamával

helyi potenciálváltozás

Jelátalakítás = TRANSZDUKCIÓ

nem-elektromos jel átalakítása elektromos jellé

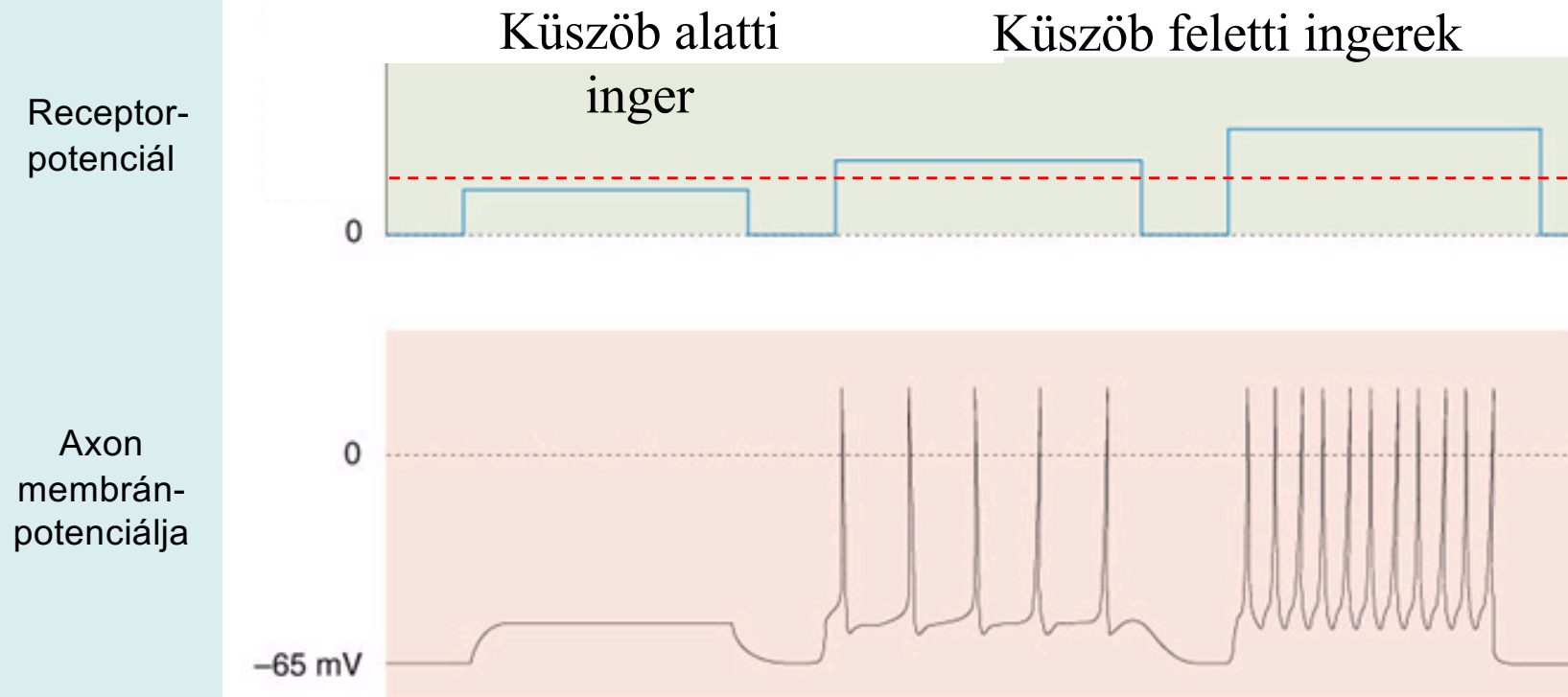


INGER

KÓD

- | | | |
|----------------|---|--|
| MILYEN? | ⇒ | A receptor típusa |
| HOL? | ⇒ | A receptormező lokalizációja |
| MENNYI? | ⇒ | A receptorpotenciál amplitúdója |
| MEDDIG? | ⇒ | A receptorpotenciál időtartama |

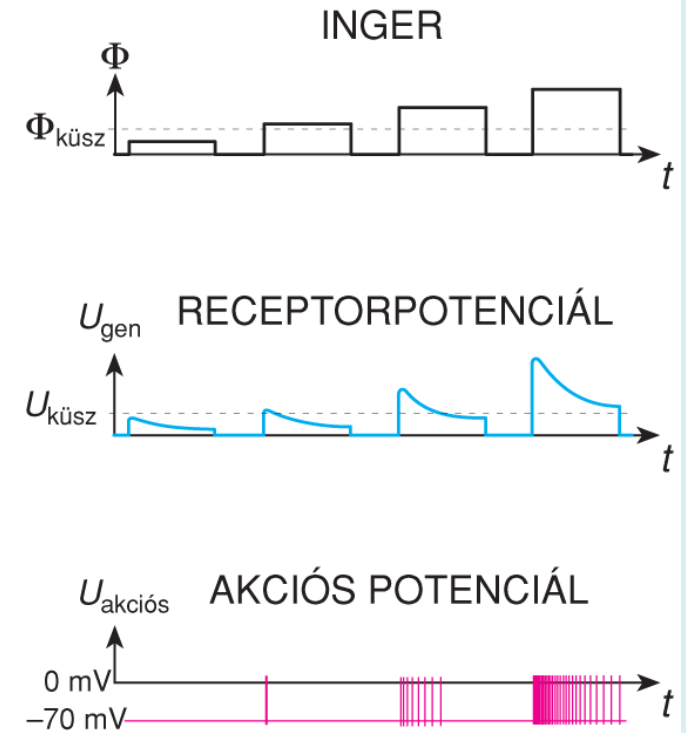
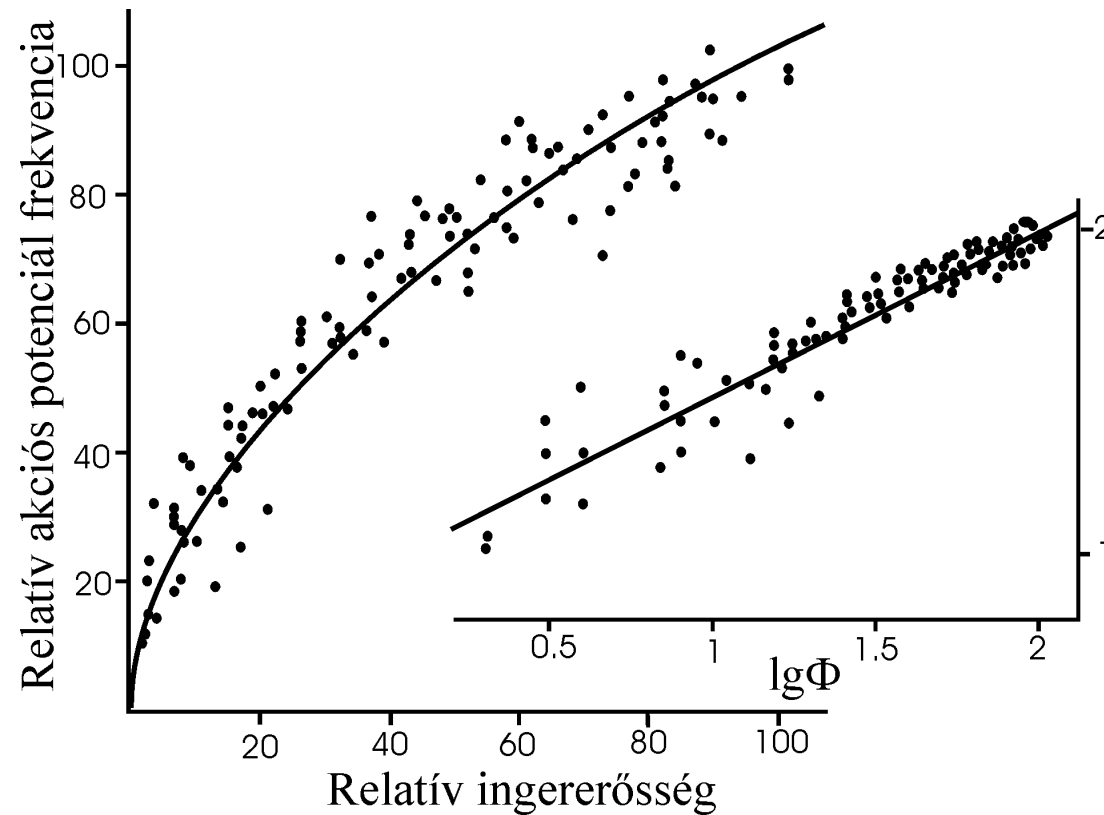
A receptorpotenciál hatása az ingerelhető membránra

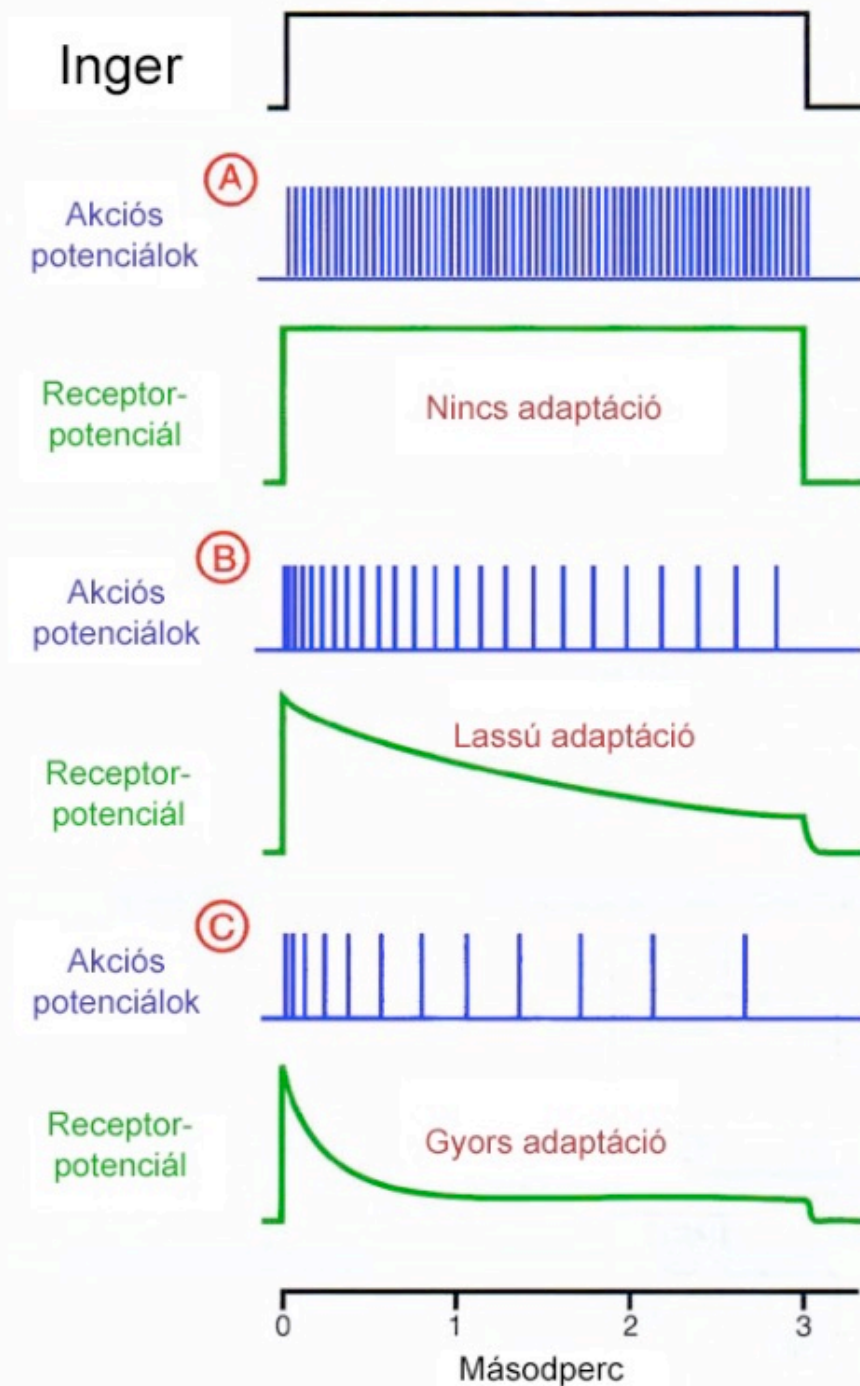


depolarizáció
(gátló szinapszisoknál
hiperpolarizáció)

akciós potenciál
*Állandó amplitúdójú,
frekvenciamodulált jel*

Az AP-frekvencia és az ingererősség kapcsolata



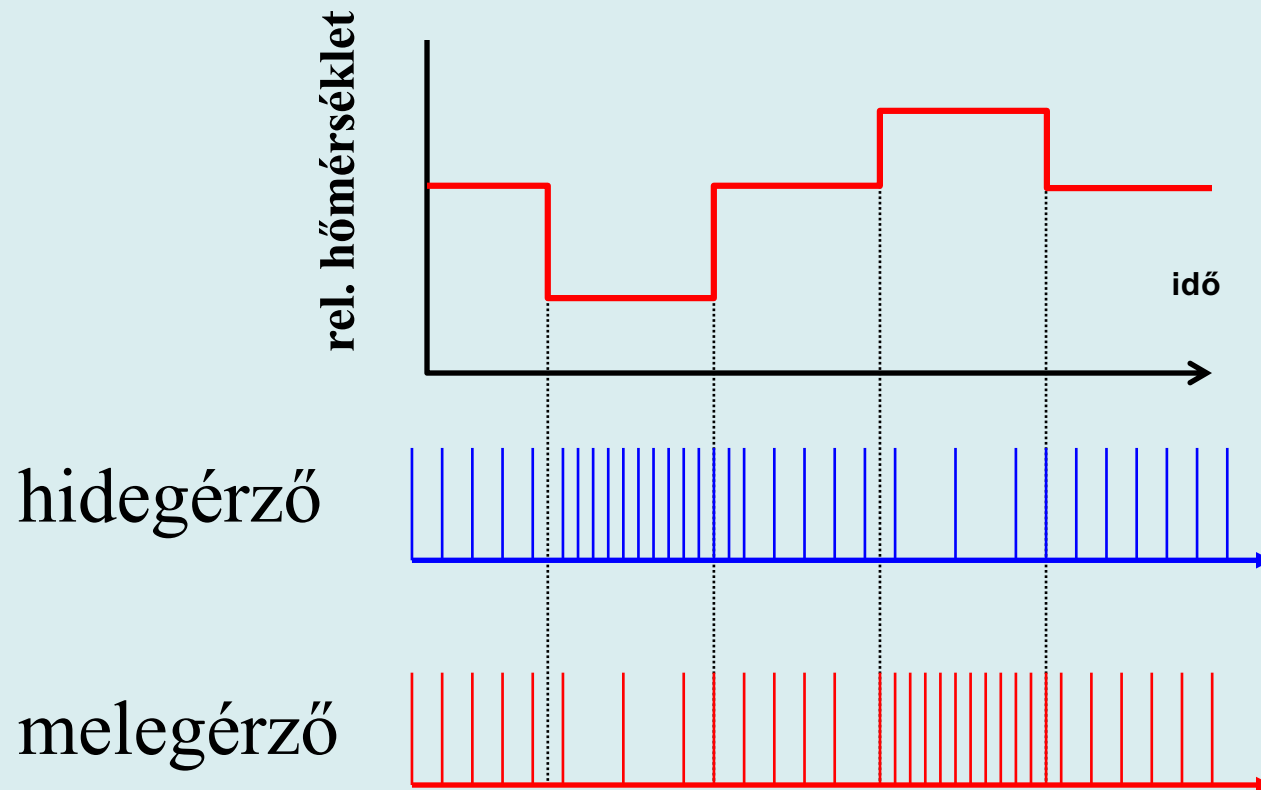


Adaptáció: a receptorpotenciál amplitúdójának csökkenése

Lassan, vagy nem teljesen
adaptálódó (tónusos) receptorok:
hideg, fájdalom
Minden ami veszélyes lehet!

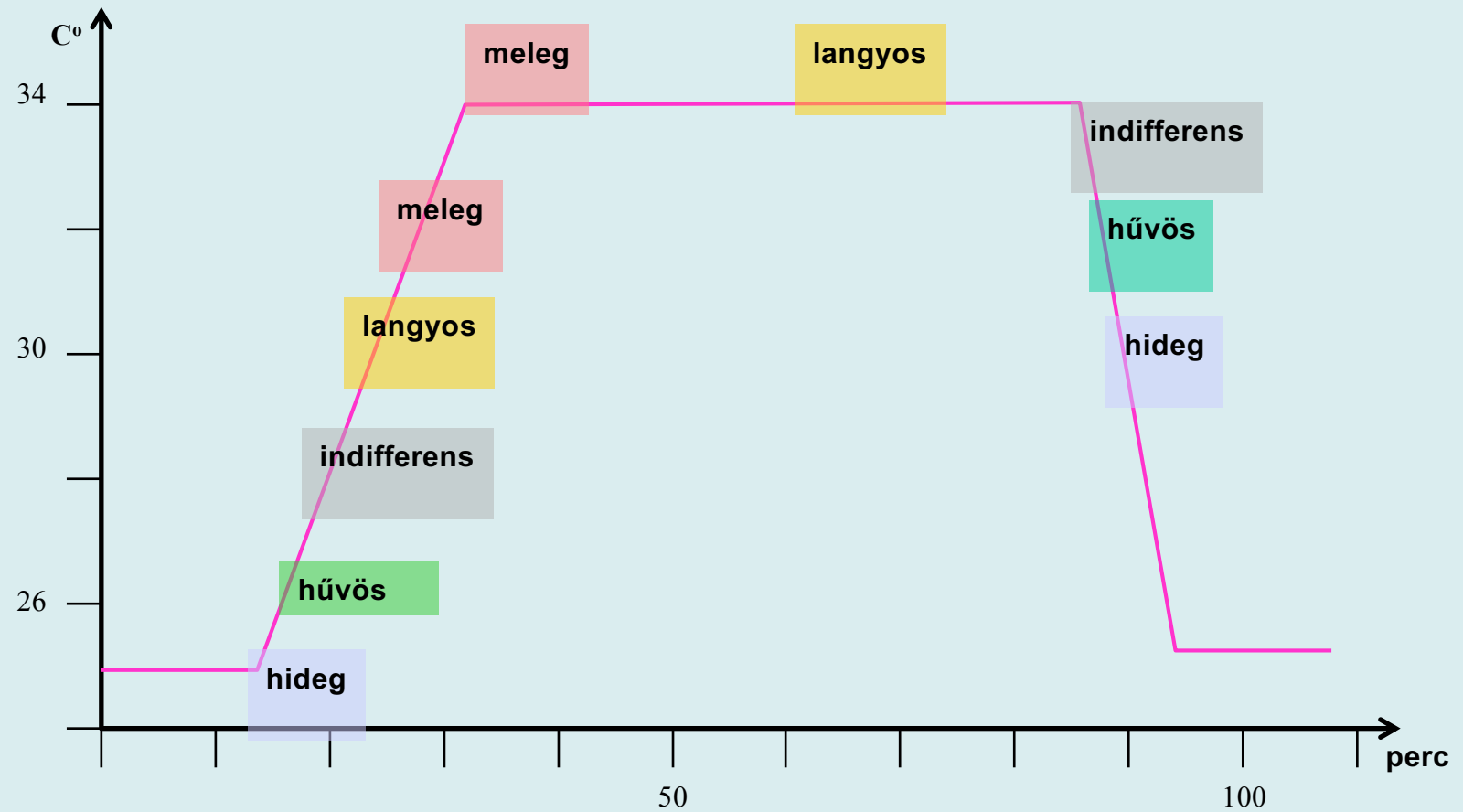
Gyorsan adaptálódó
(fázisos) receptorok:
tapintás, szaglás, hőérzet

Folytonos működésű receptorok

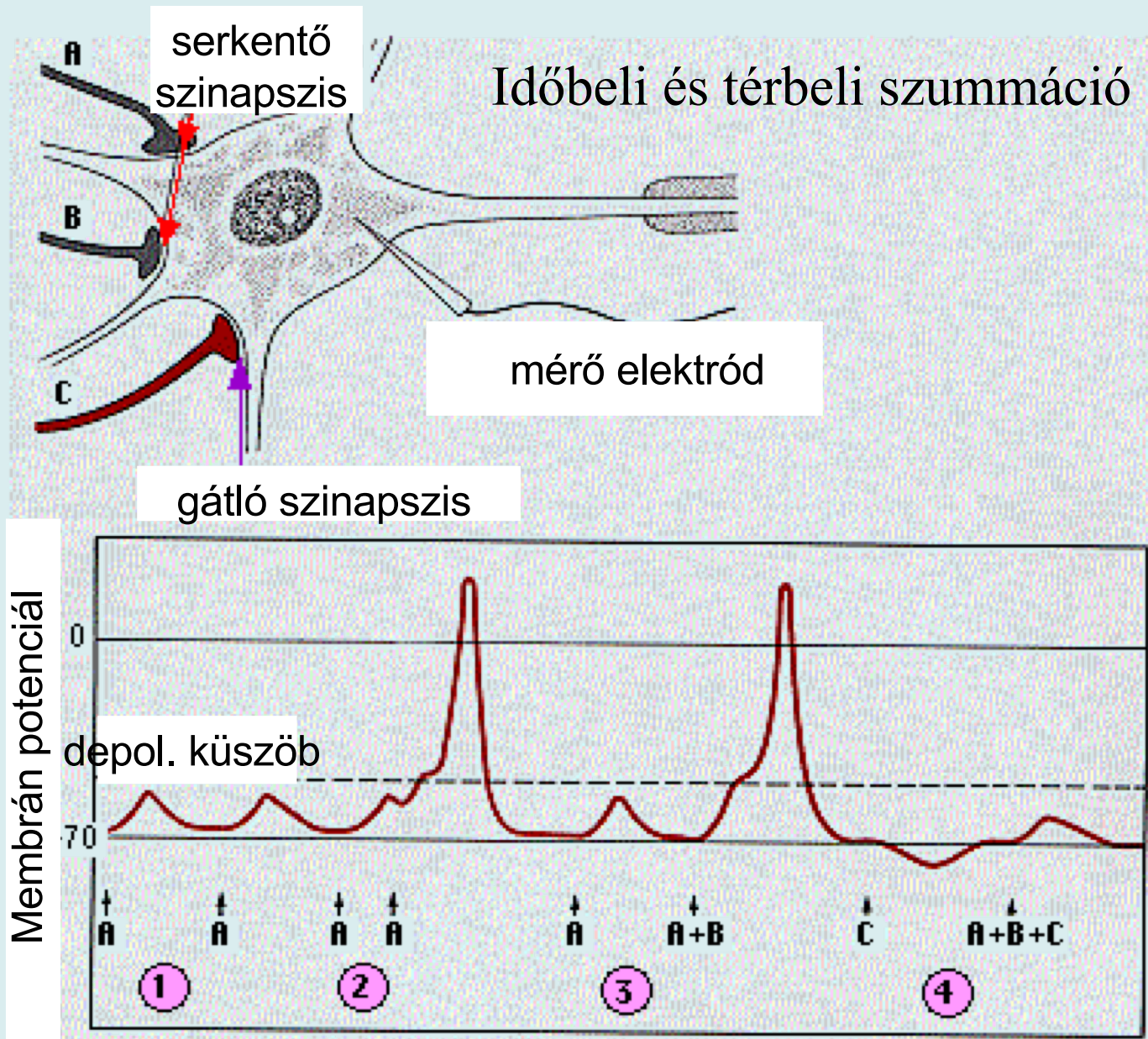


Változatlan körülmények között állandó frekvenciájú akcióspotenciál-sorozatot generálnak. Az adekvát paraméter változása frekvencia-csökkenést vagy -növekedést idéz elő.

A hőérzet változása lassú melegítés majd hűtés során



A központi idegrendszerben módosulhatnak a jelek



tipikus
módosulások:

serkentés,

gátlás,

konvergencia,

divergencia

Az információ módosulása a feldolgozás során (1)

receptív mező neuron1

primer érző neuron

Térbeli szummáció

szekunder érző neuron

receptív mező neuron2

20 mm

Pl. ujjbegy

primer érző
neuron

szekunder érző
neuron

két jelet érzékel

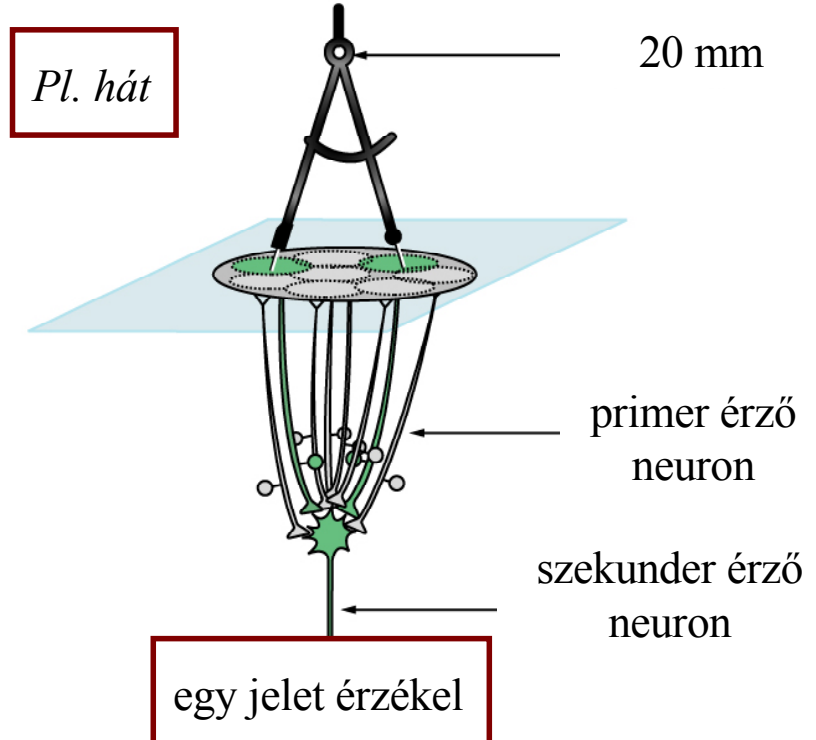
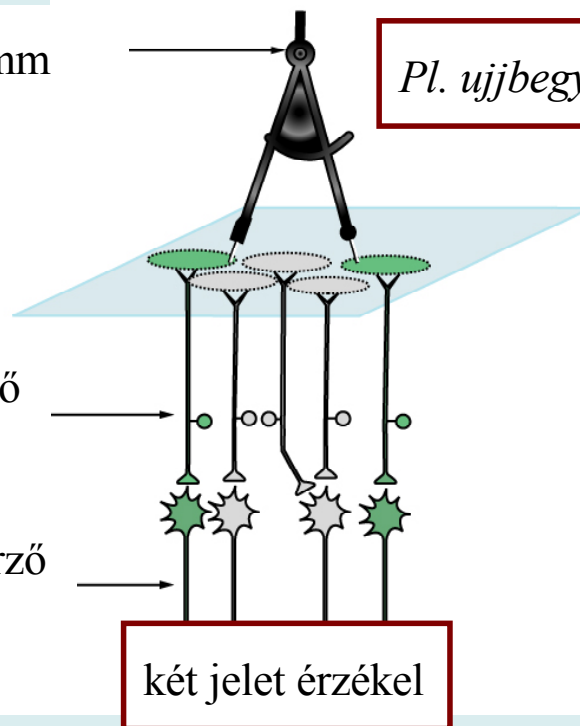
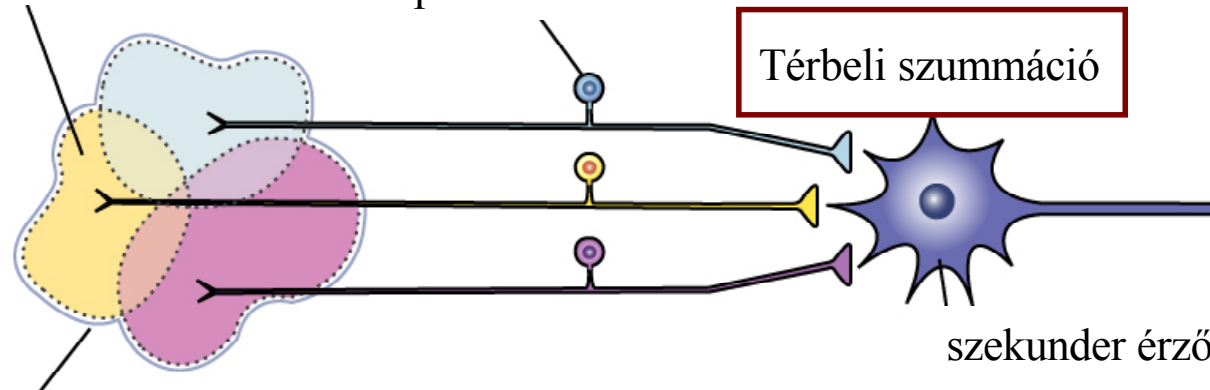
Pl. hát

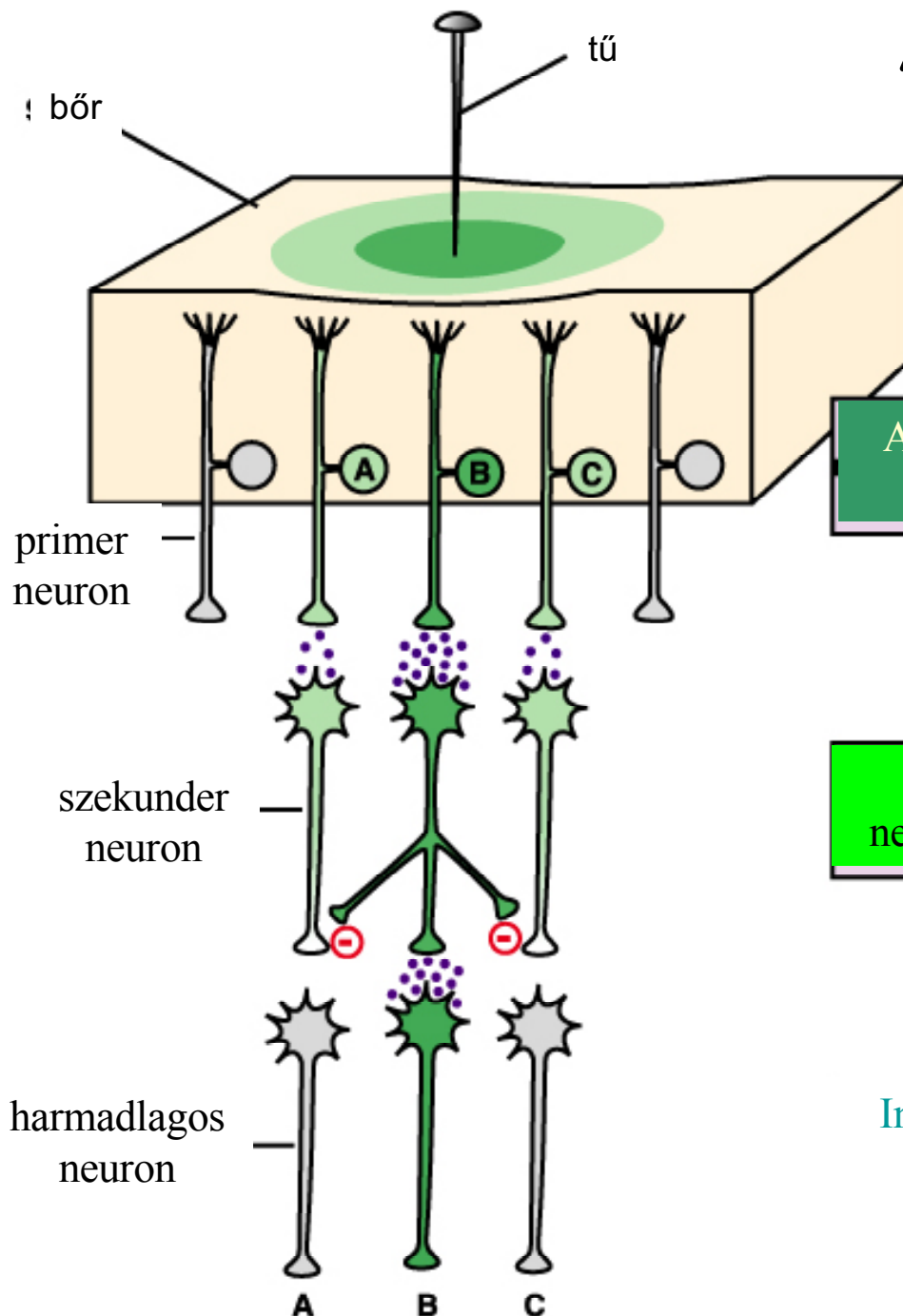
20 mm

primer érző
neuron

szekunder érző
neuron

egy jelet érzékel





Az információ módosulása a feldolgozás során (2)

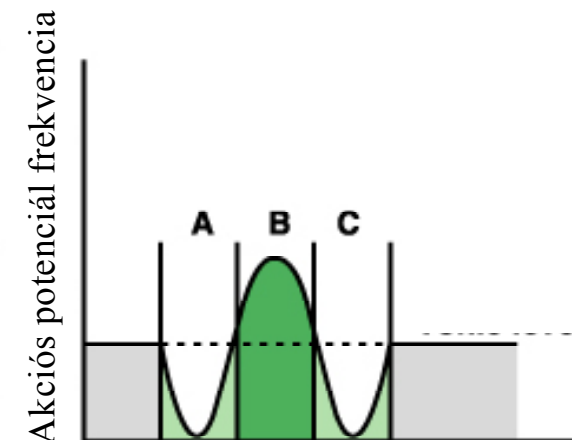
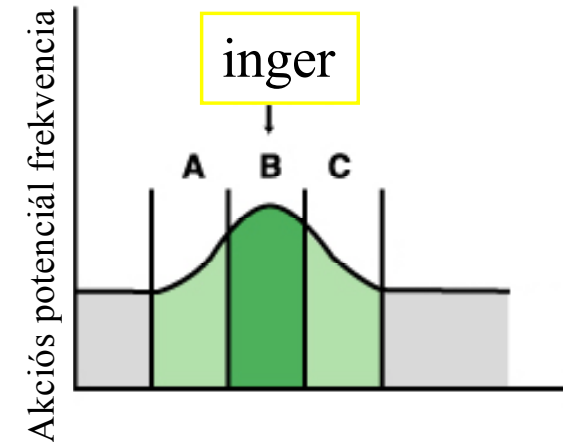
inger

AP frekvencia ~
ingererősség

Szomszédos
neuronok gátlása

Ingerület csak a
"domináns"
neuronon

inger



Pszichofizika

kapcsolat az inger mennyiségi jellemzői és a
szubjektív tapasztalás között

az érzeterősség mennyiségi jellemzése

Az érzékelési küszöb vizsgálata

Abszolút küszöb – *az inger felismeréséhez szükséges legkisebb ingererősség*

döntés módszere = igen / nem válasz

Különbségi küszöb : *két inger megkülönböztetéséhez szükséges legkisebb különbség*

kényszerített döntés módszere = kötelező választani

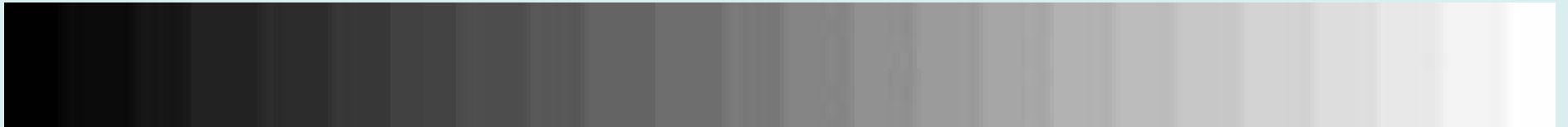
Különbségi küszöb: a megkülönböztetéshez szükséges
különbség nagysága

$$\text{legkisebb érzékelhető különbség} = I - I_0$$

különbözőnek
felismert intenzitás

háttér intenzitás

$$\text{LÉK} = I - I_0$$



A **LÉK** = $I - I_0$ nem állandó érték, nagyobb I_0 esetén nagyobb LÉK-re van szükség



Ernst Weber (1795-1878)

Ernst Weber - I_0 és a LÉK (ΔI) viszonya

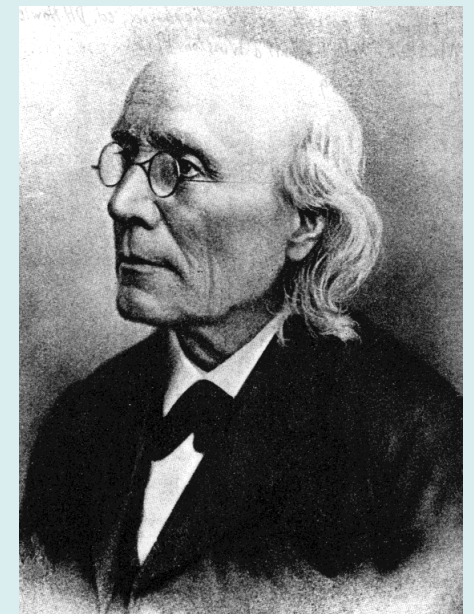
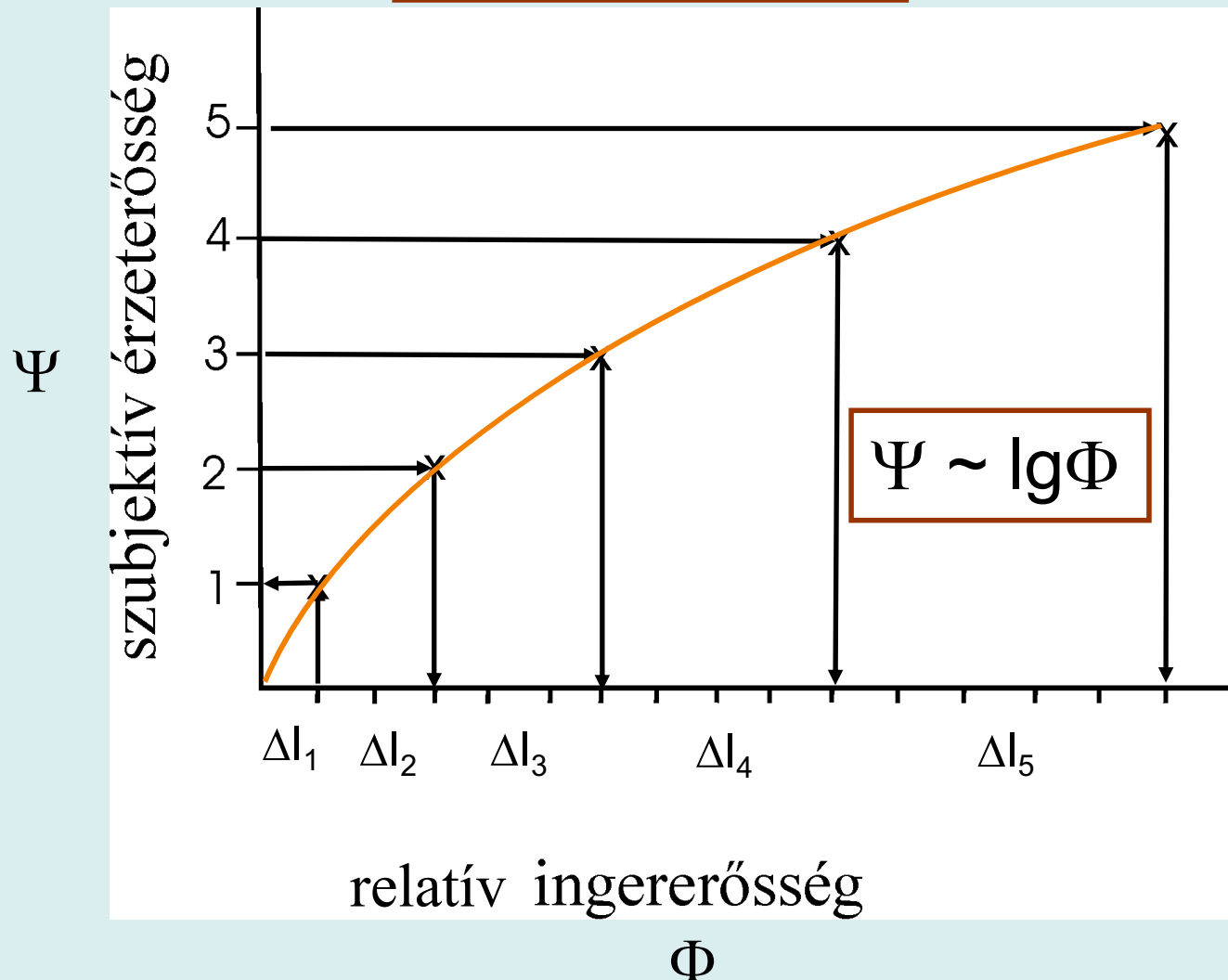
$$\frac{\Delta I}{I_0} = k$$

k : Weber-tört – meghatározása mérések alapján

<i>inger</i>	<i>Weber-tört</i>
Fényesség	0,079
Hangosság	0,048
Tapintás	0,022
Nyomás	0,02
Ízlelés (sós)	0,083
Elektromos sokk	0,013

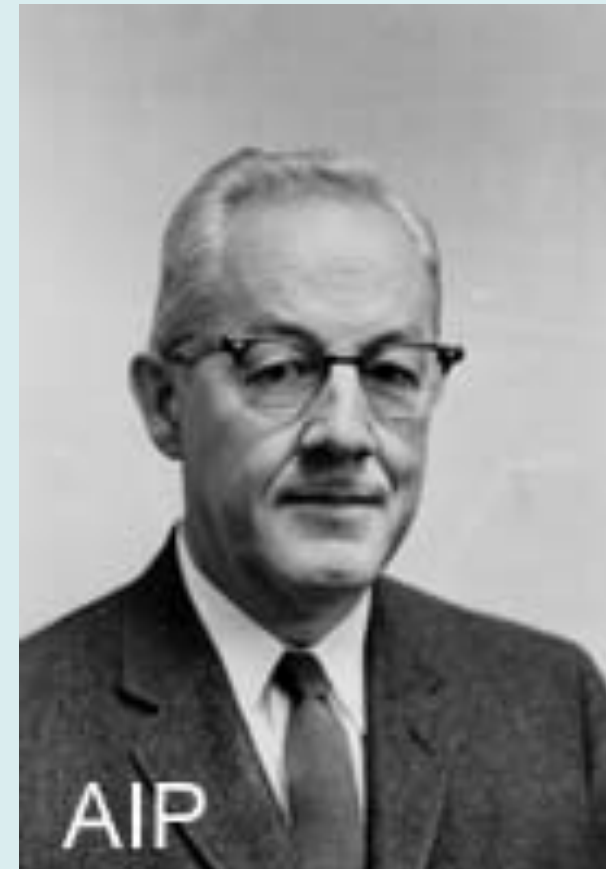
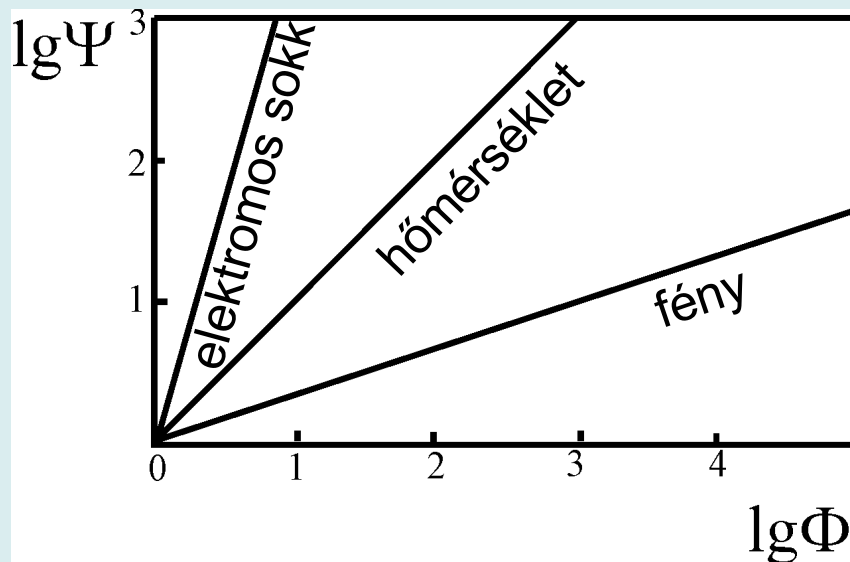
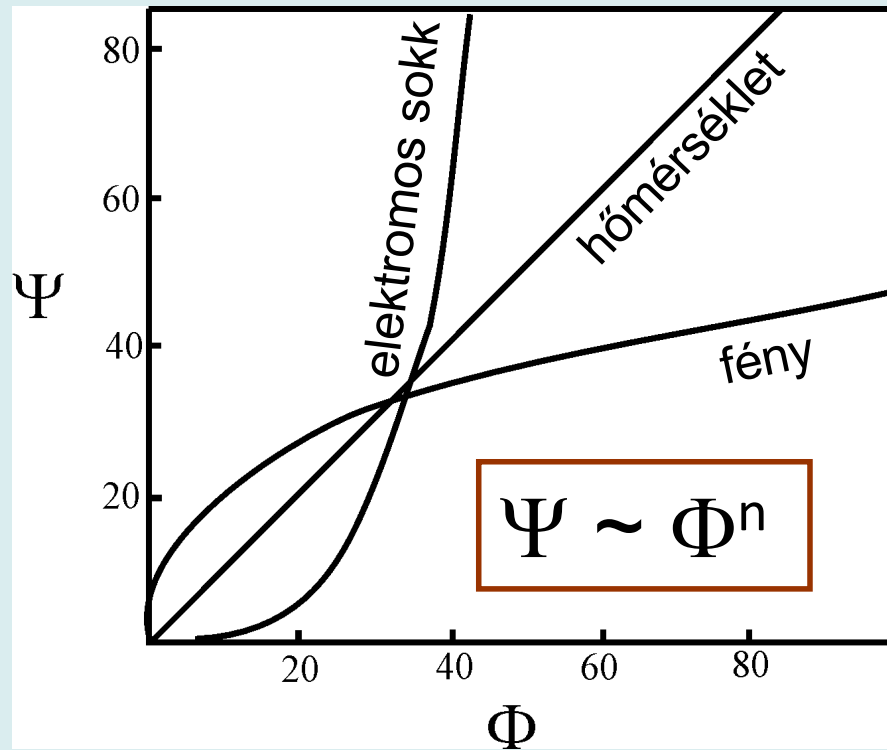
Fechner feltételezte, hogy az ingererősség minden relatív változása azonos mértékben változtatja az érzeterősséget.

$$\Phi = \Delta I / I \sim \Delta \Psi$$



Gustav Theodor Fechner
(1801-1887)

Kapcsolat az ingererősség és az érzeterősség között mérések alapján - Stevens



Stanley Smith Stevens
(1906-1973)

A különböző modalitásoknak megfelelő hatványkitevő (n) értékek

MODALITÁS	„n”	MODALITÁS	„n”
HALLÁS, hangosság (1000 Hz)	0,3	HŐÉRZÉKELES, környezeti hőmérséklet	1,0
LÁTÁS, fényesség (5°-os fényfolt, sötét szokott szem)	0,33	LÁTÁS, hosszúságbecslé s	1,0
LÁTÁS (villanás fényessége)	0,5	NYOMÁS (nyomásérzet a tenyéren)	1,1
SZAGLÁS (kávéillat)	0,55	ÍZLELÉS (só)	1,3
Vibráció (ujj, 250 Hz)	0,6	NYOMÁS (súlyérzékelés)	1,45
NYOMÁS Vibráció (ujj, 60 Hz)	0,95	NYOMÁS Erő (kézi erőmérő)	1,7
SZAGLÁS (heptán)	0,6	ELEKTROMOS ÁRAMÜTÉS (bőr)	3,5
ÍZLELÉS (szacharin)	0,8	ELEKTROMOS ÁRAMÜTÉS (fog)	7.0

Pszichofizikai törvények

Weber – Fechner :

$$\Psi \sim \lg \Phi$$

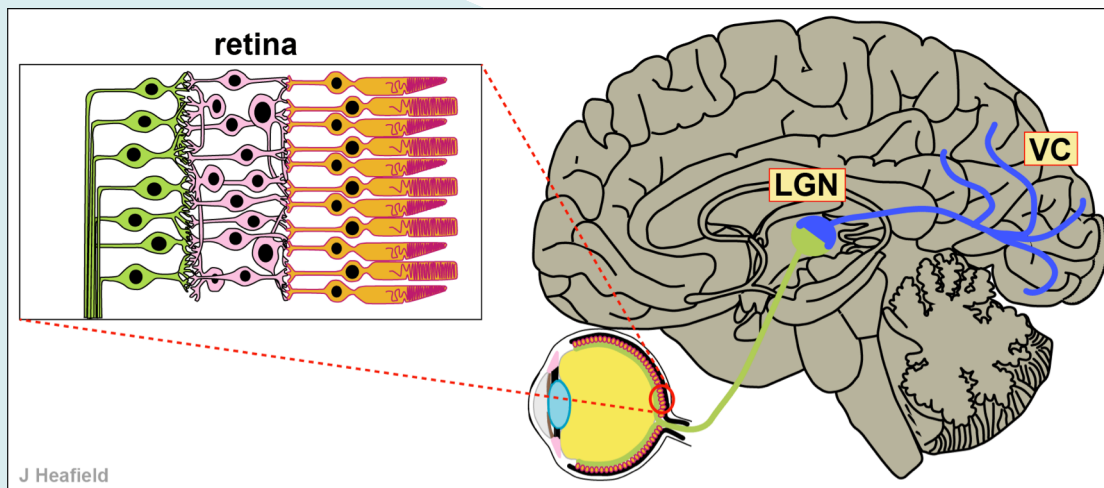
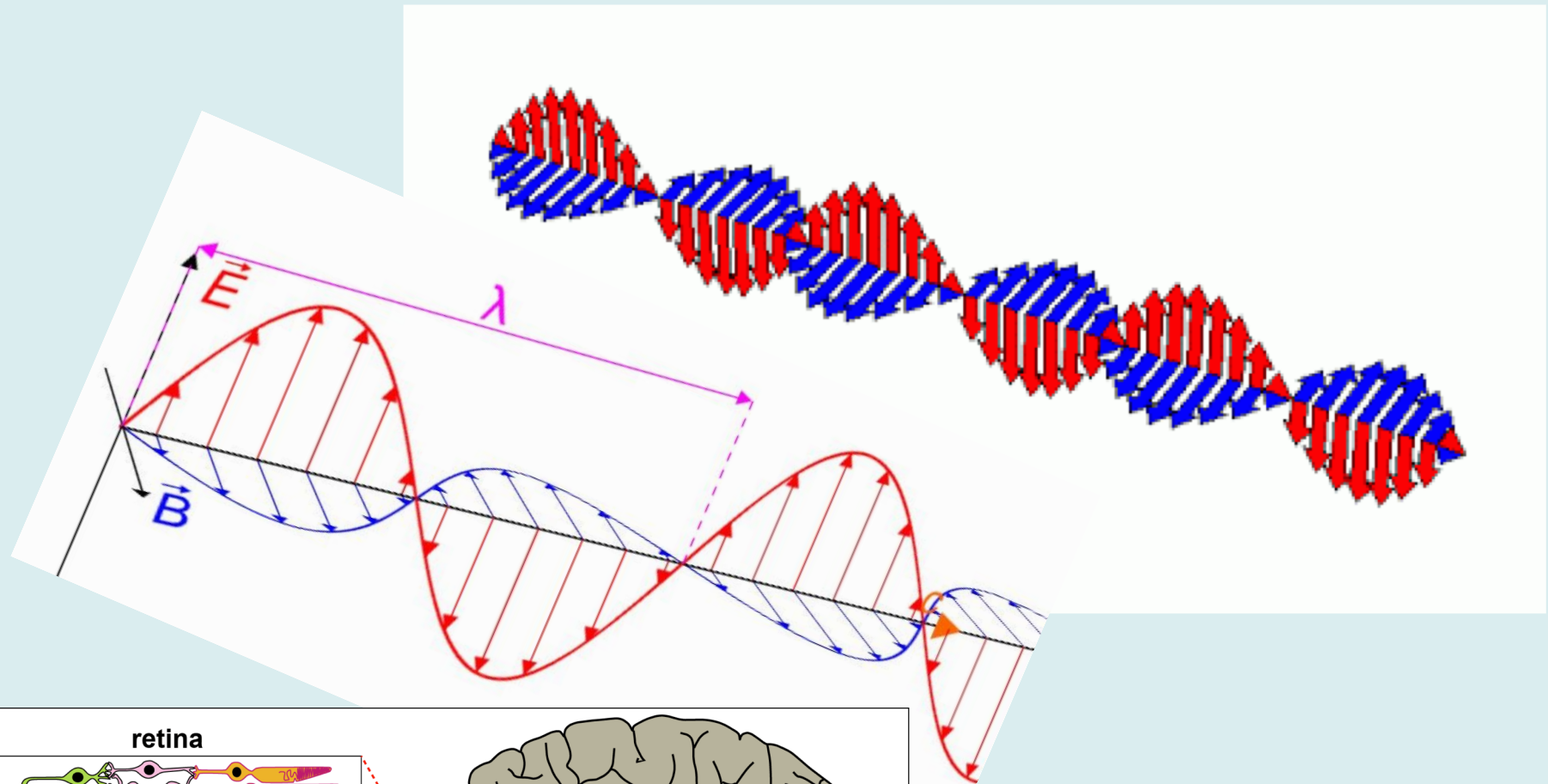
Differencia-vizsgálatok esetén jobb megközelítés

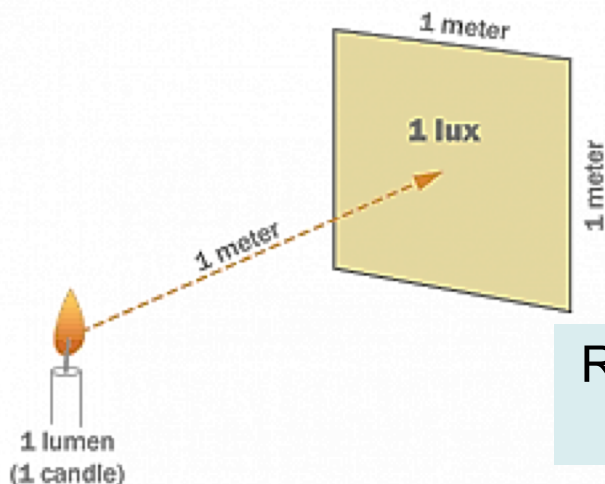
Stevens :

$$\Psi \sim \Phi^n$$

Érzeterősség becslése esetén jobb megközelítés

A látás biofizikája





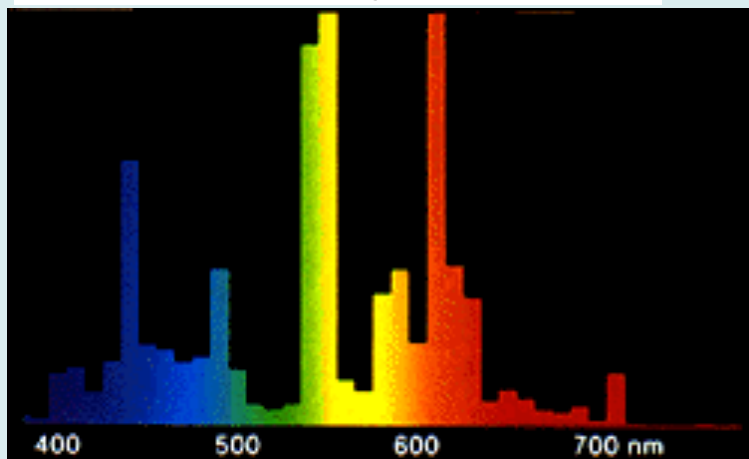
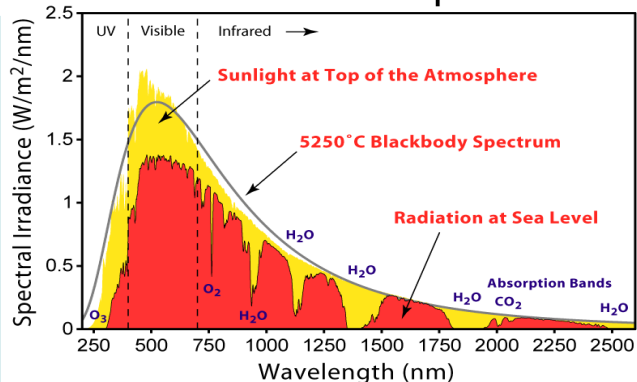
$$\phi = \int_{400nm}^{800nm} \frac{dJ(\lambda)}{d\lambda} \phi(\lambda) d\lambda$$

Láthatósági függvény

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

Referencia: 1 új gyertya (candela) = 1/683 W/sr 555 nm-en.
(2046K-es 1 cm² platina hőmérsékleti sugárzó)

Solar Radiation Spectrum

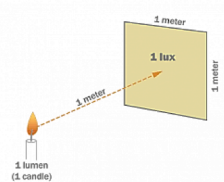


Fénycső emissziós spektruma

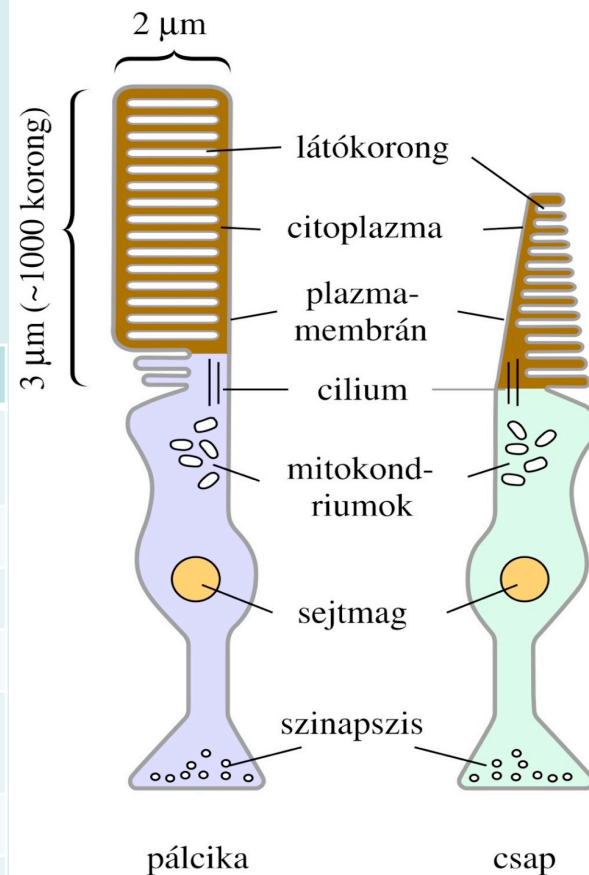
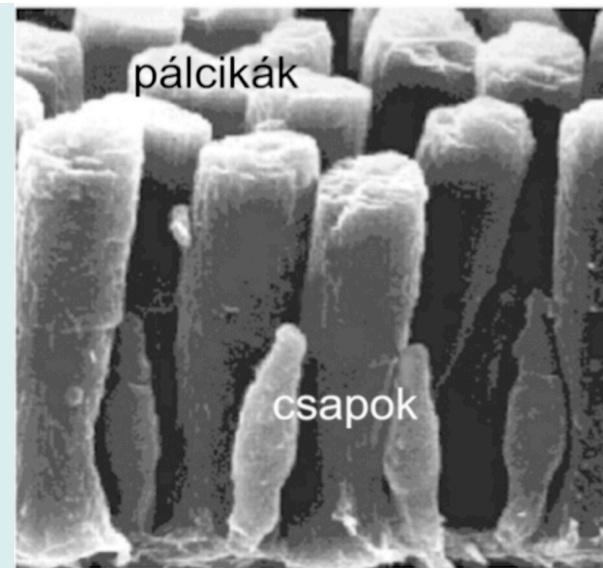
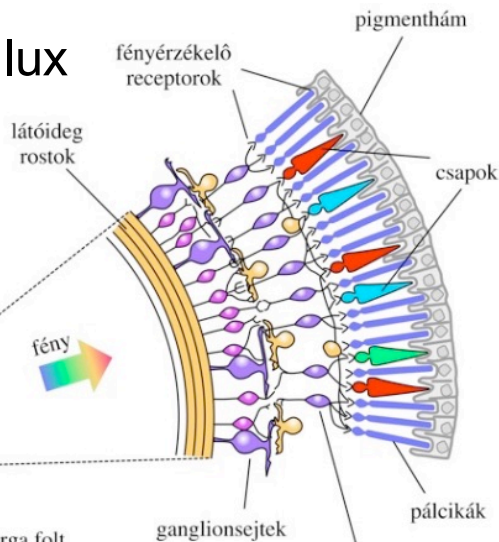
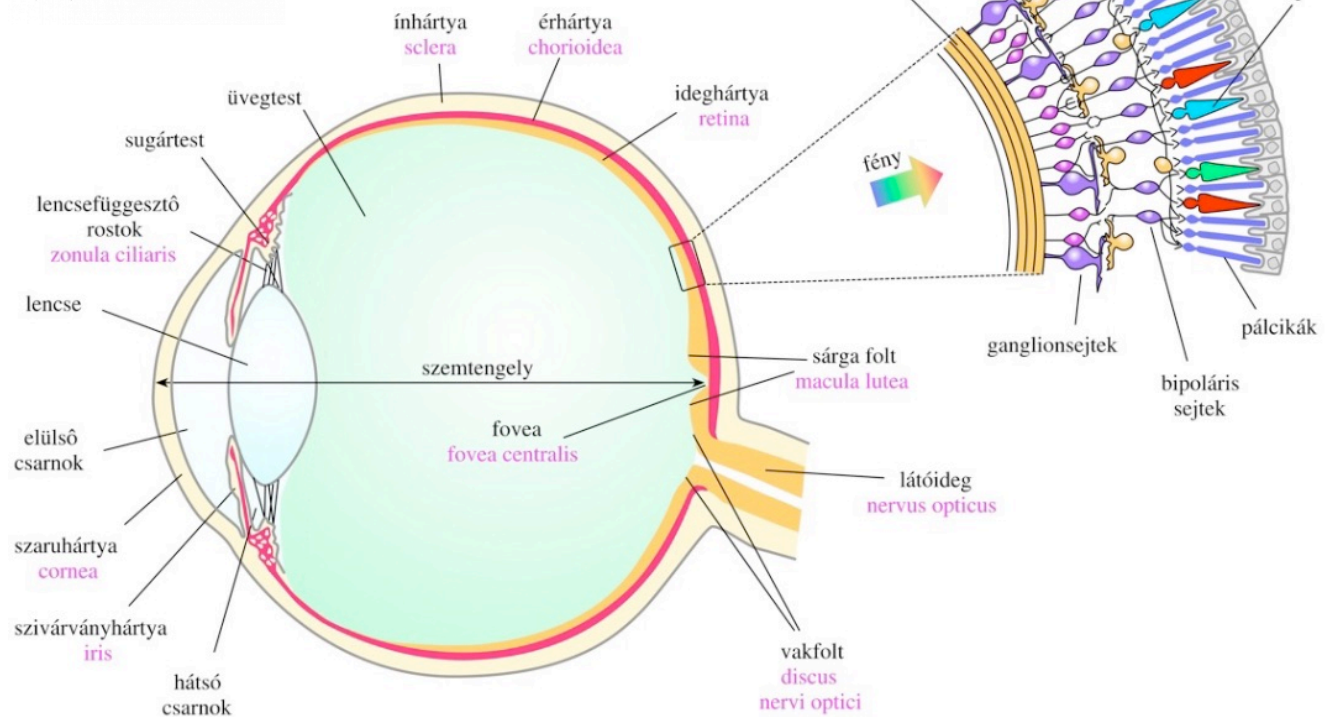
	SI		CIE	
F	Sugárzó fluxus <i>Radiant flux</i>	W	Megvilágítási fluxus (fényáram) <i>Luminous flux</i>	lm
I	Fényero <i>Radiant intensity</i>	W/sr	Fényero <i>Luminous intensity</i>	cd
E	Irradiancia <i>Irradiance</i>	W/m ²	Megvilágítás erősség <i>Illuminance</i>	lux
L	Radiancia <i>Radiance</i>	W/(m ² ·sr)	Felületi fényesség (fényssűrűség) <i>Luminance</i>	nit

Megnevezés	értéke [cd]
viaszgyertya	1
petróleumlámpa	35
100 W-os kriptonizzó	120
vetítőlámpa	1.500
Nagy fényerejű lámpa	9.000

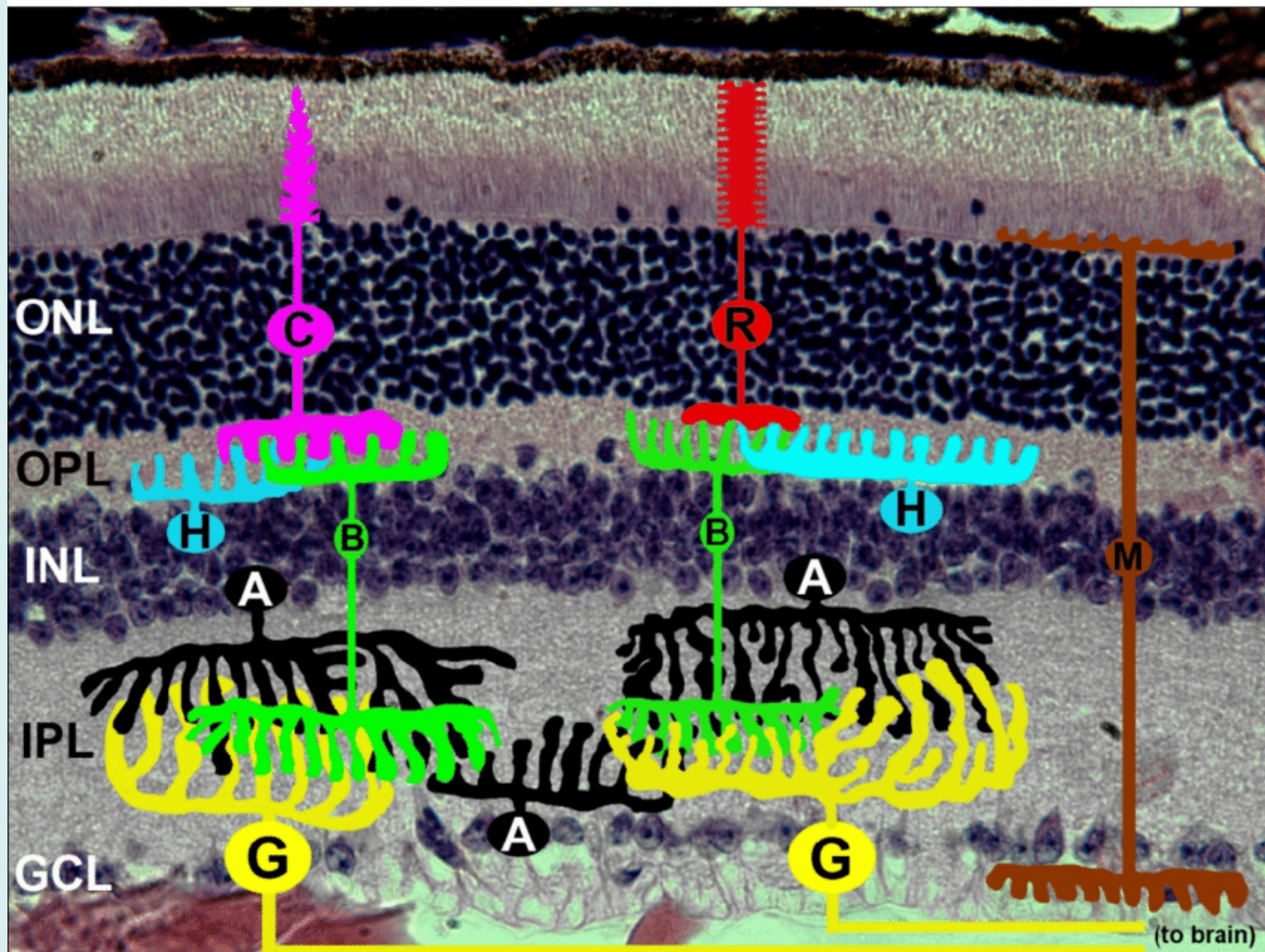
Quantity		Unit	
Name	Symbol ^[nb 8]	Name	Symbol
Luminous energy	Q_v ^[nb 8]	lumen second	lm·s
Luminous flux, luminous power	Φ_v ^[nb 8]	lumen (= candela steradians)	lm (= cd·sr)
Luminous intensity	I_v	candela (= lumen per steradian)	cd (= lm/sr)
Luminance	L_v	candela per square metre	cd/m ²
Illuminance	E_v	lux (= lumen per square metre)	lx (= lm/m ²)
Luminous exitance, luminous emittance	M_v	lux	lx
Luminous exposure	H_v	lux second	lx·s
Luminous energy density	ω_v	lumen second per cubic metre	lm·s·m ⁻³
Luminous efficacy	η ^[nb 8]	lumen per watt	lm/W
Luminous efficiency, luminous coefficient	V		



Óriási átfogás: 10^{-9} - 10^5 lux

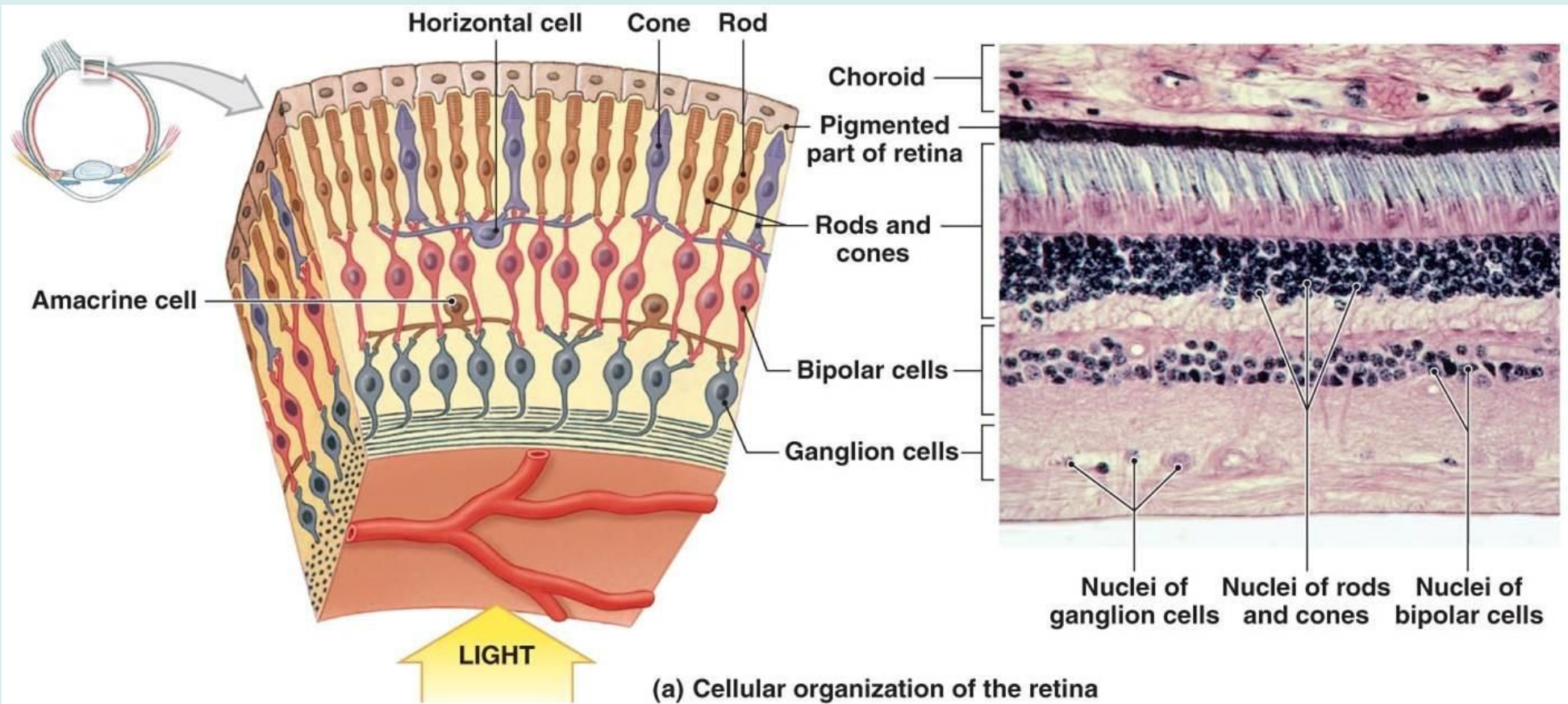


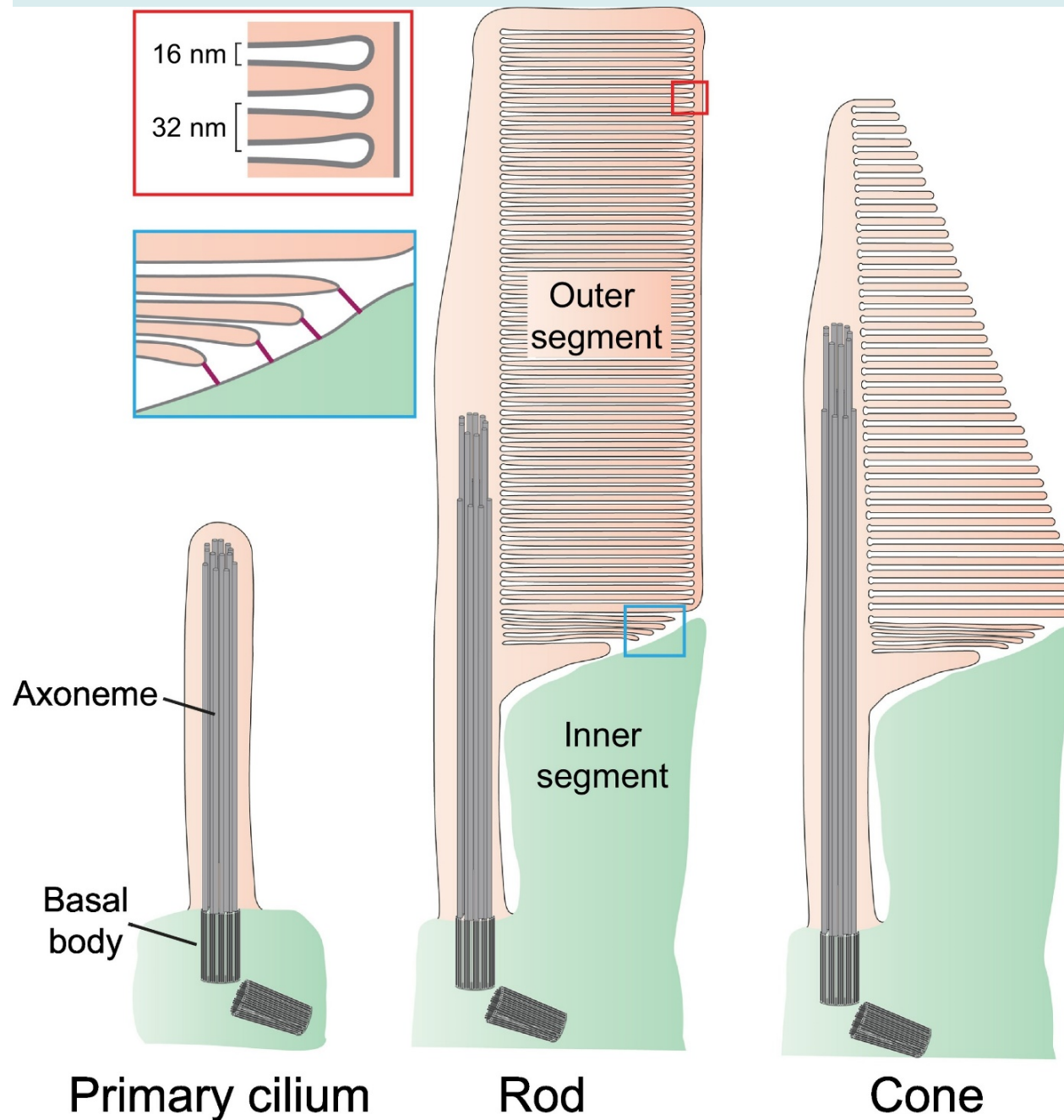
Pálcikák	Csapok
Akár 1 foton szenzitivitás	Kisebb érzékenység, nagy intenzitást is érzékel
Telítésbe megy közepes intenzitásnál	Nincs / nagyon magas telítési intenzitás
Leginkább a preiférián található	Fovea centralis-ban nagy sűrűségben
Nagyobb fokú konvergencia	Alacsony konvergencia
Alacsonyabb felbontás	Maximális felbontás (~1-3μm-es limitáló képméret)
Csak egyfajta van -> nincs színérzékelés	3-féle van -> színekódolás
Nagyobb képfrekvencia-érzékenység	~20 Hz maximális képfrekvencia



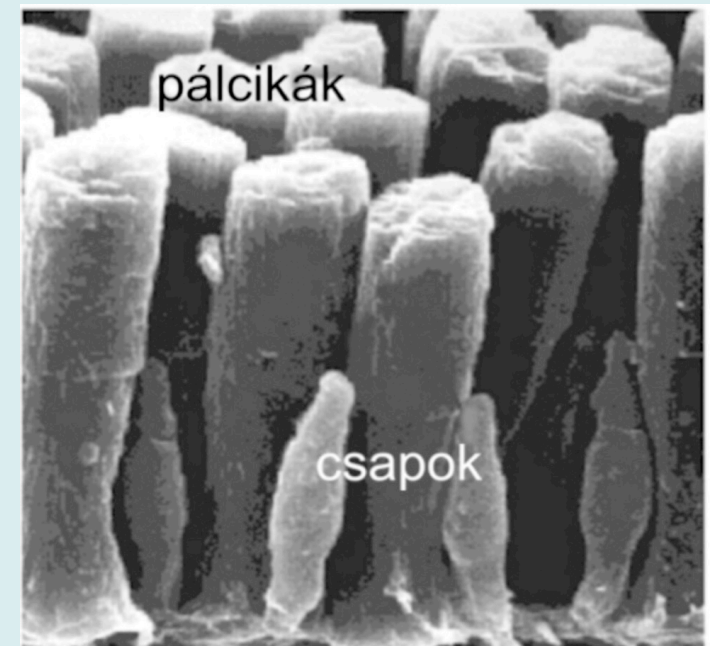
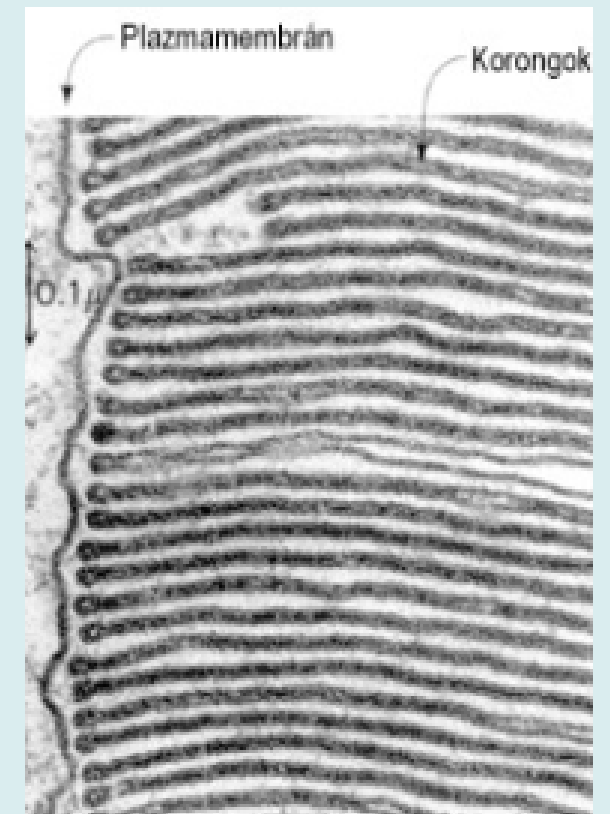
Cantrup, Rob & Kaushik, Gaurav & Schuurmans, Carol. (2012). Control of Retinal Development by Tumor Suppressor Genes. 10.5772/28870.

Structure and connectivity of the mature retina. Animated neurons are drawn on top of a photomicrograph of a hematoxylin & eosin stained adult retina. Rod and cone photoreceptors are located in the ONL, horizontal, amacrine and bipolar cell interneurons and Müller glia are located in the INL, and RGCs and displaced amacrine cells are in the GCL. Light enters the eye and is first processed by the outer segments of rod and cone photoreceptors in the ONL. This information is then passed to the OPL, where connections between photoreceptors and bipolar cells are made, and signals are modulated by horizontal cells. Finally, bipolar cell axons pass visual information to RGC dendrites in the IPL—signaling that is refined by amacrine cells. Information is finally transmitted by RGC axons to the brain for further processing. (A, amacrine cell; B, bipolar cell; C, cone photoreceptor; G, retinal ganglion cell; GCL, ganglion cell layer; H, horizontal cell; INL, inner nuclear layer; IPL, inner plexiform layer; M, Müller glia; ONL, outer nuclear layer; OPL, outer plexiform layer; R, rod photoreceptor).



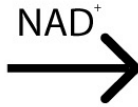
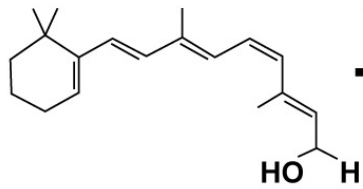


Trends in Cell Biology

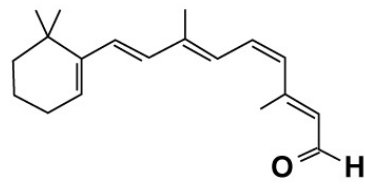


A

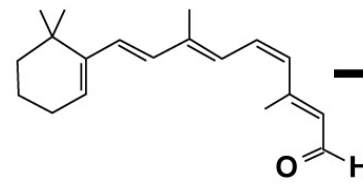
Retinol (Vit A)



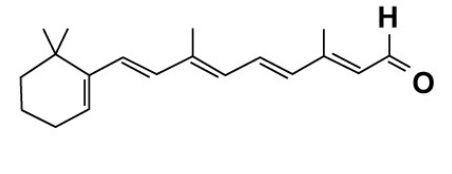
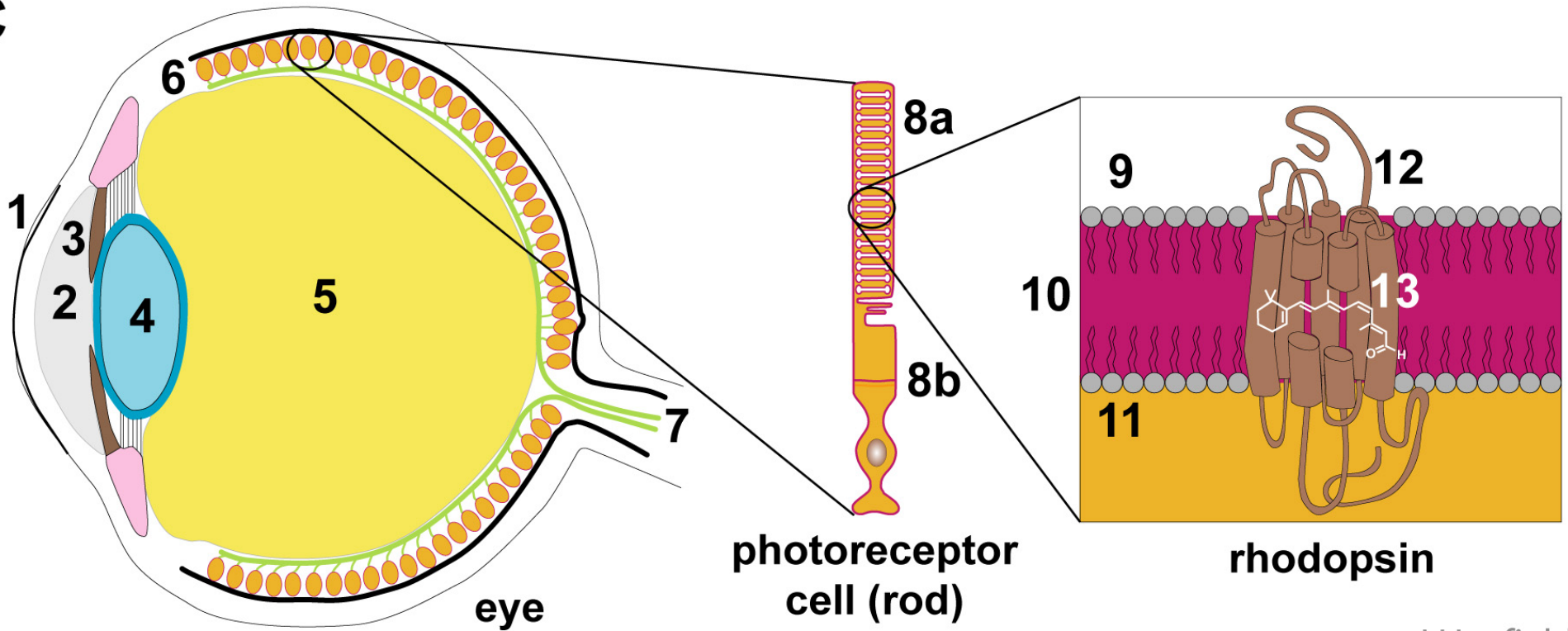
11-cis Retinal

**B**

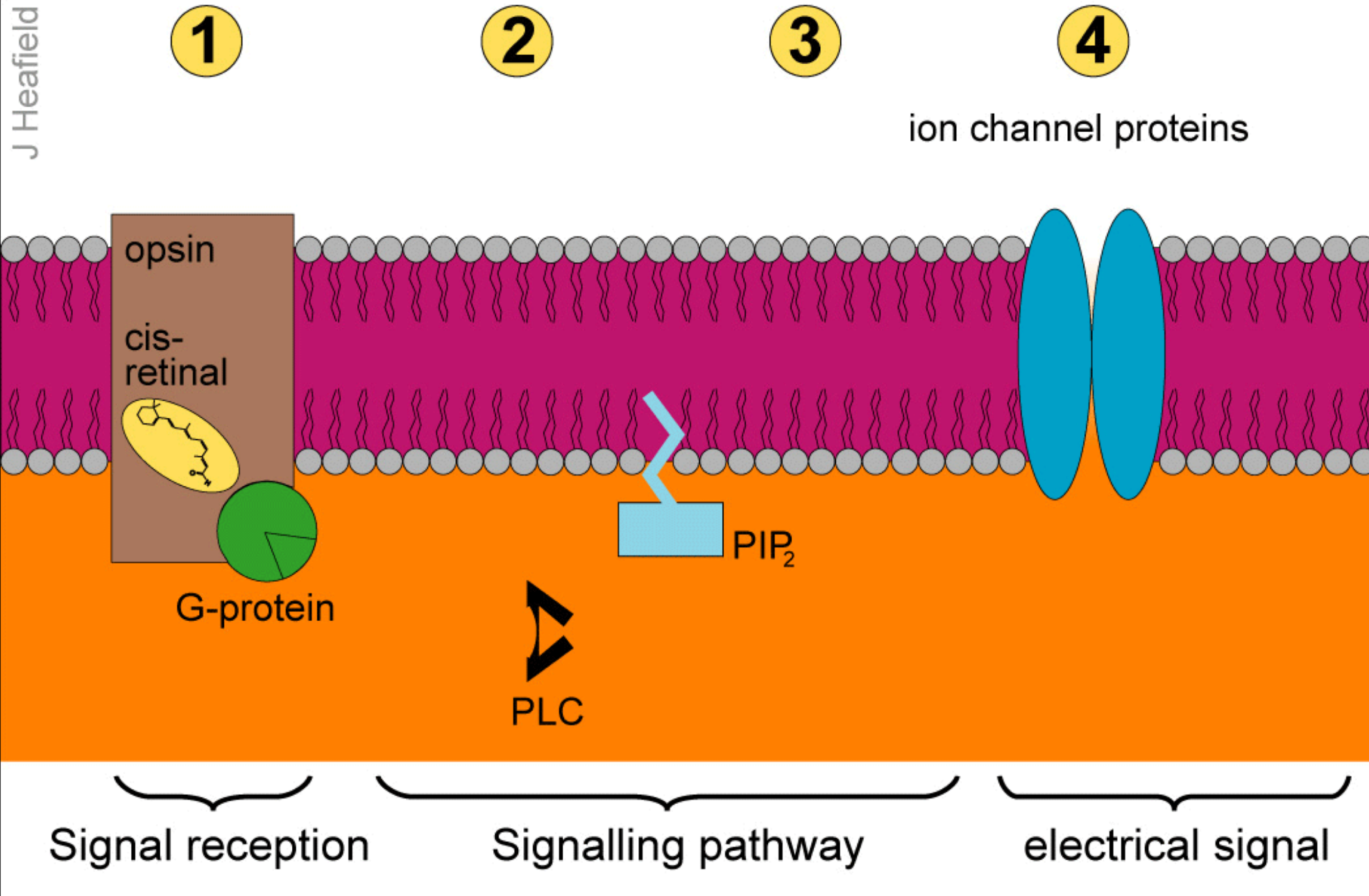
11-cis Retinal



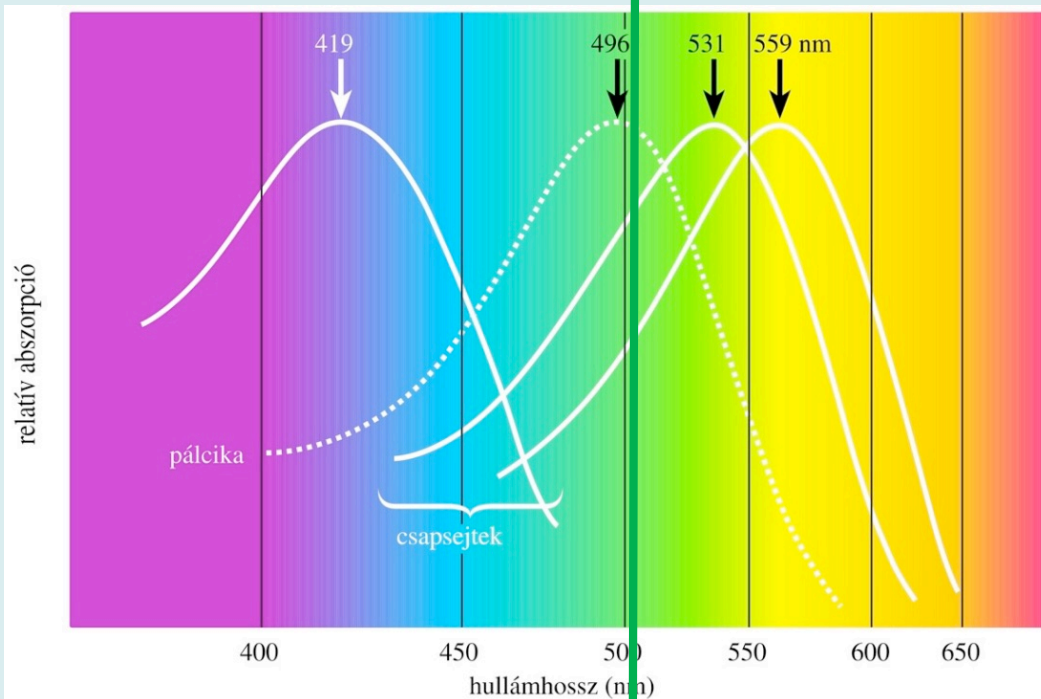
All-trans Retinal

**C**

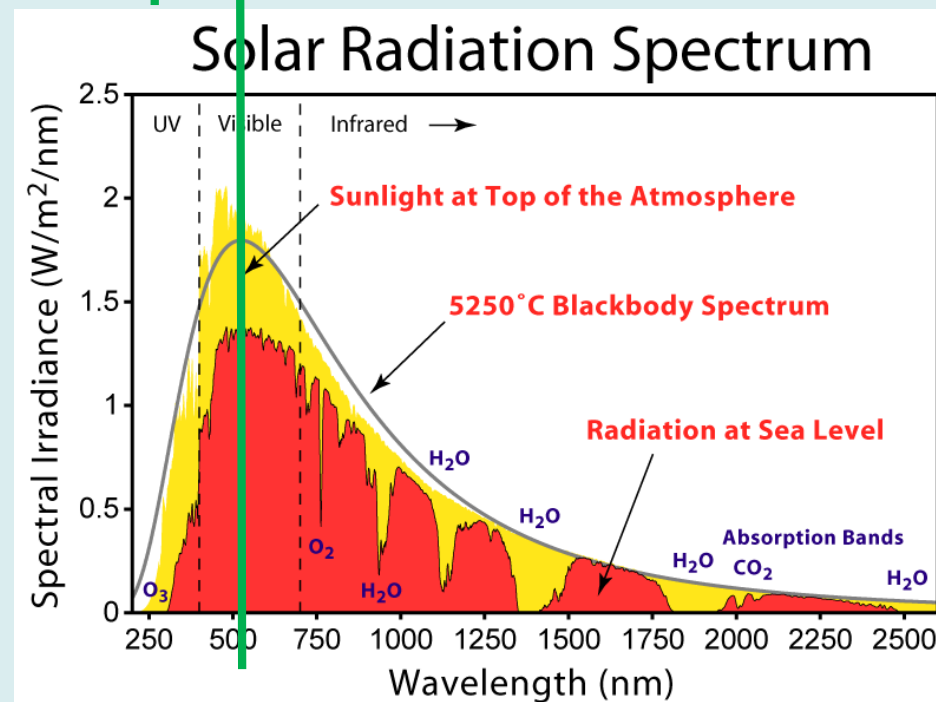
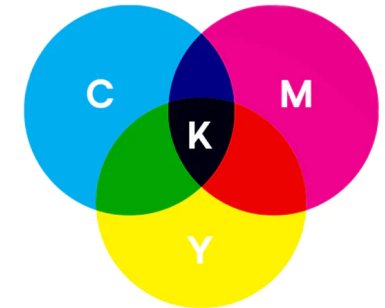
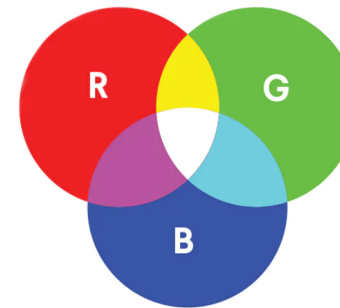
J Heafield



Rhodopszin → Transducin ($T\alpha\text{-}\beta\gamma$) → foszfodiészteráz → cGMP → Na⁺ csatorna ZÁR → hiperpolarizáció



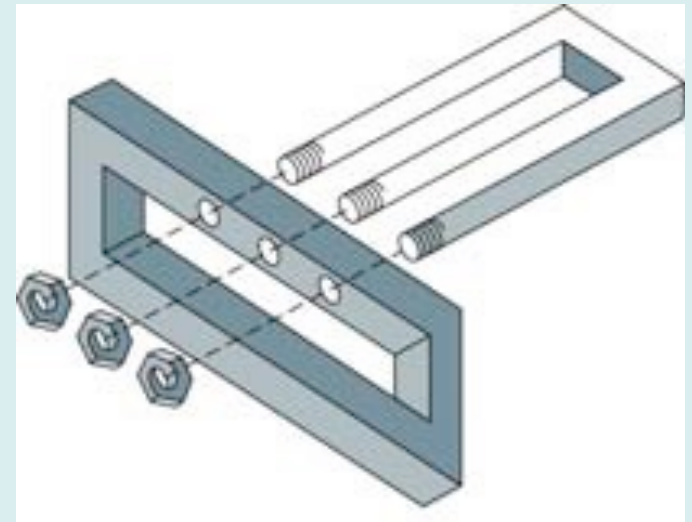
Additív színekódolás

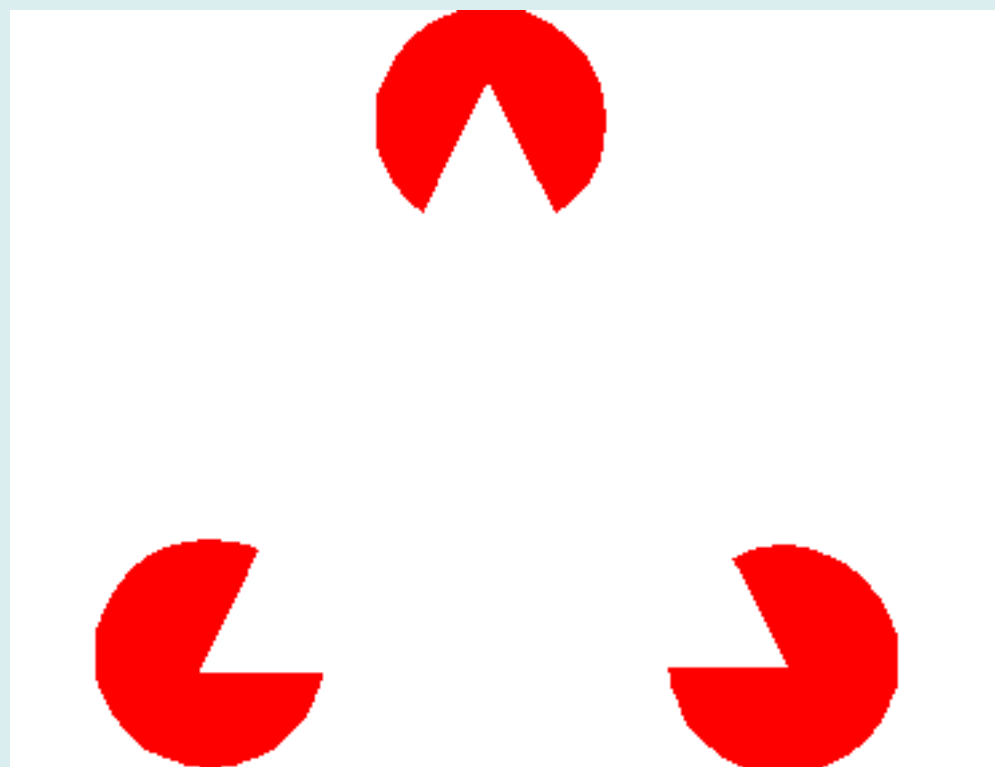
$$X = rR + gG + bB$$


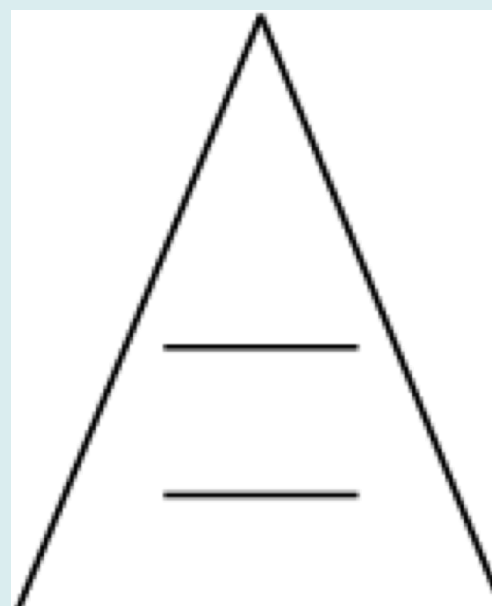
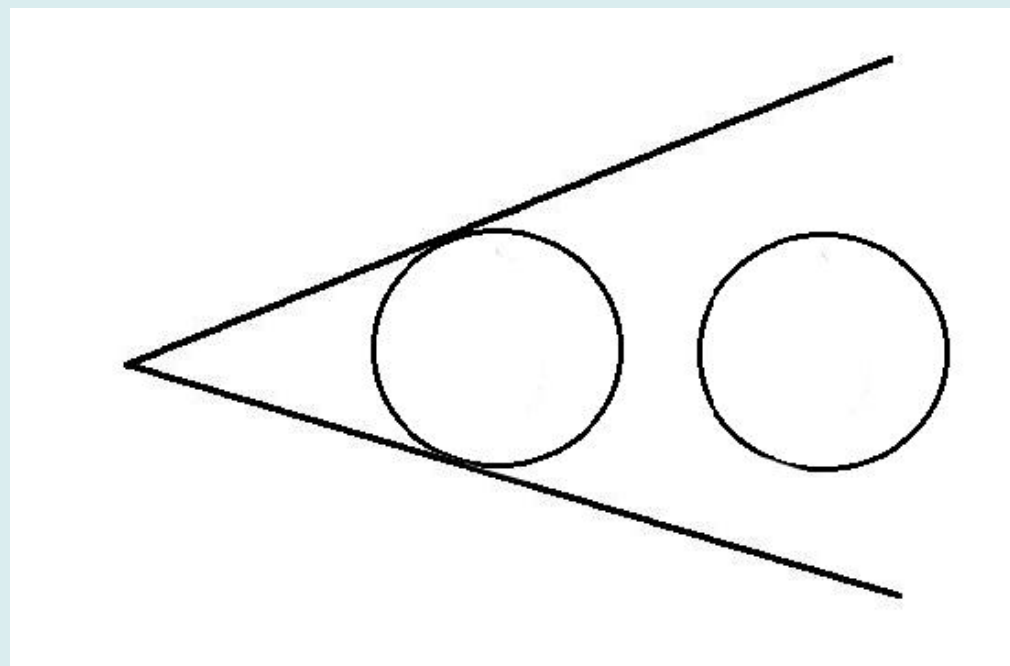
Percepció (észlelés) -

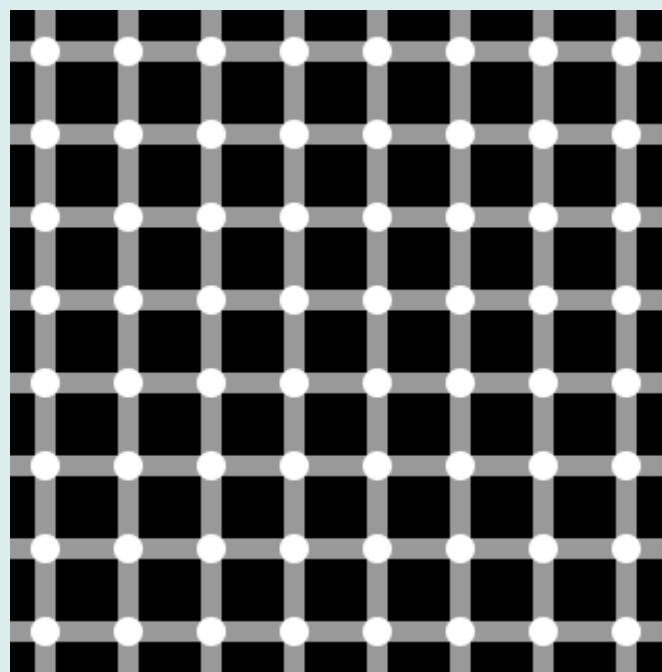
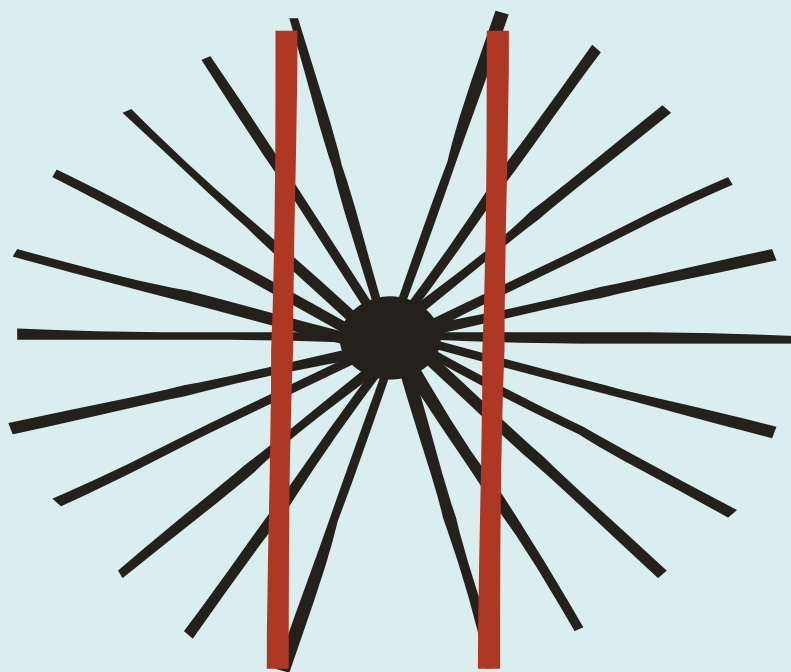
- a bejérkező ingerek (információ) elemzését
- a beérkező információ rendszerezését
- a rendszerbe foglalt információ megértését

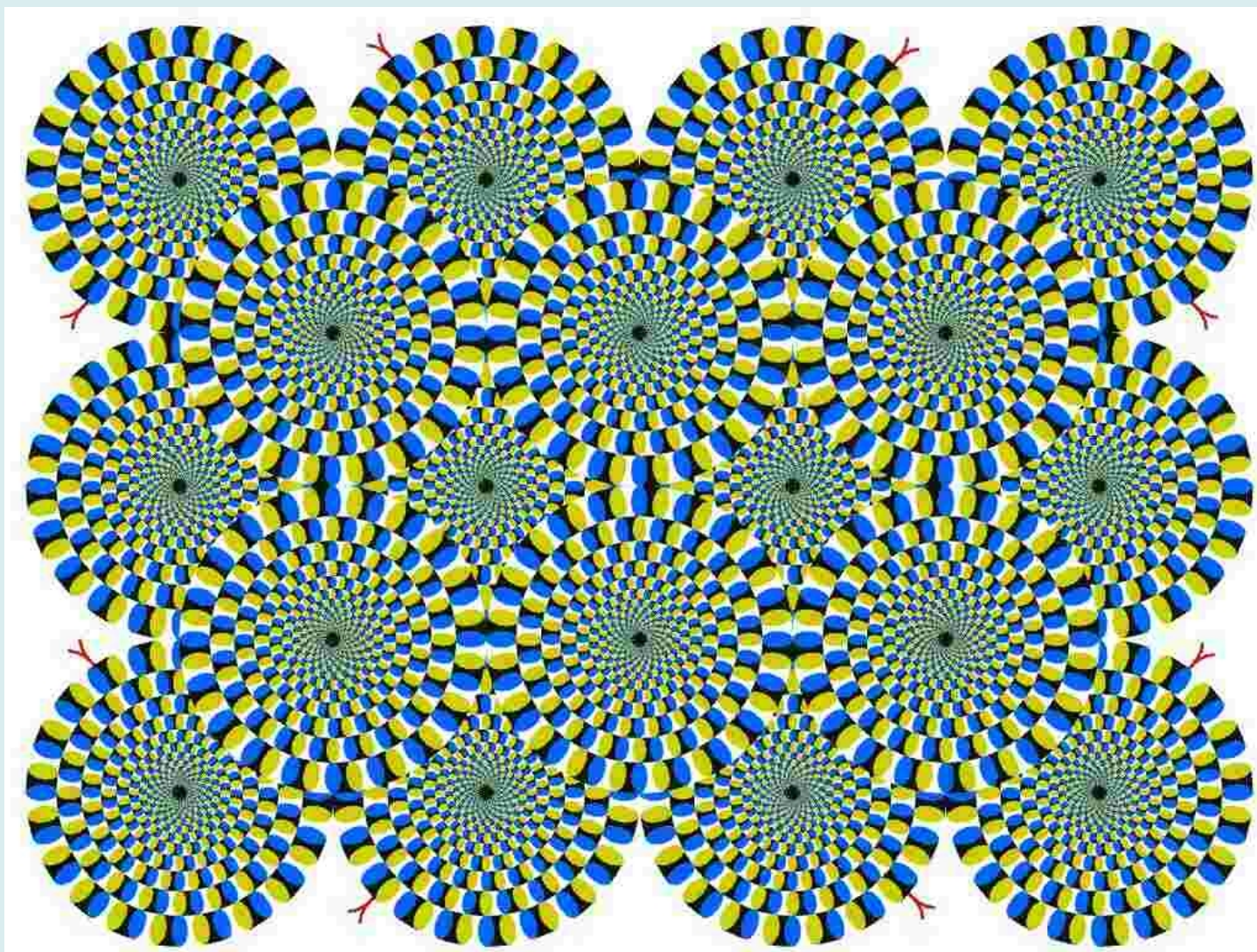
A percepció “téves” is lehet – az illúziók
félreértelmezett vizuális ingerek

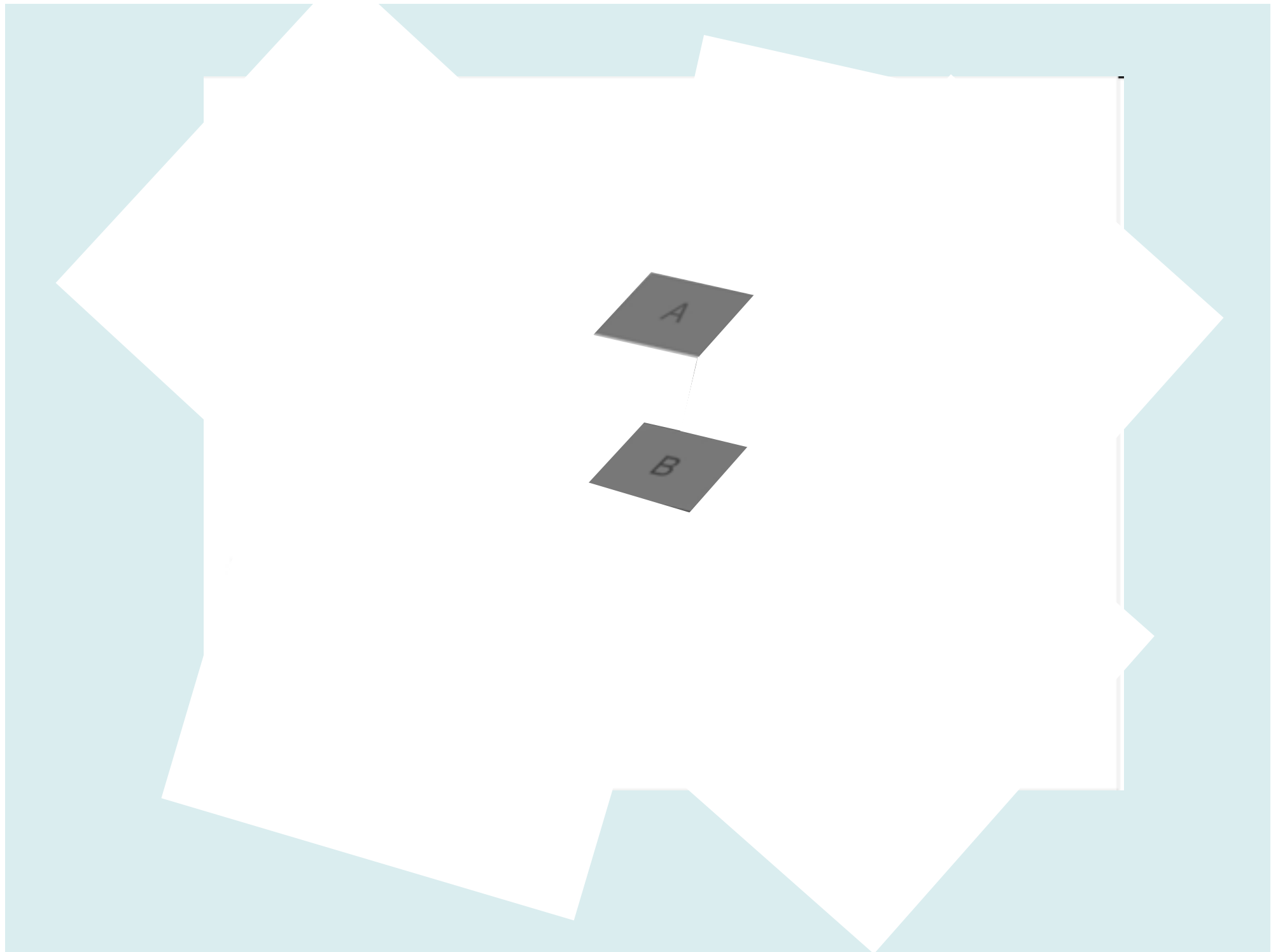






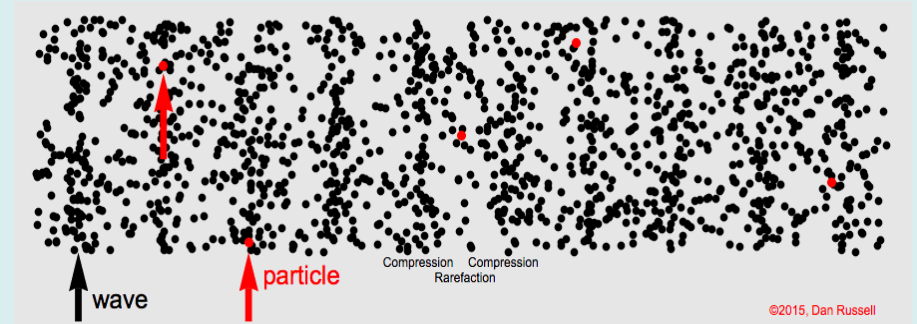
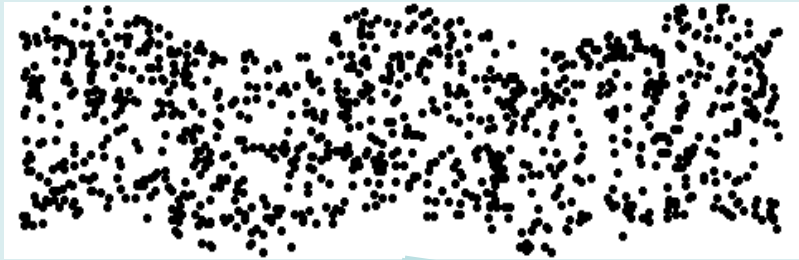






A hallás biofizikája

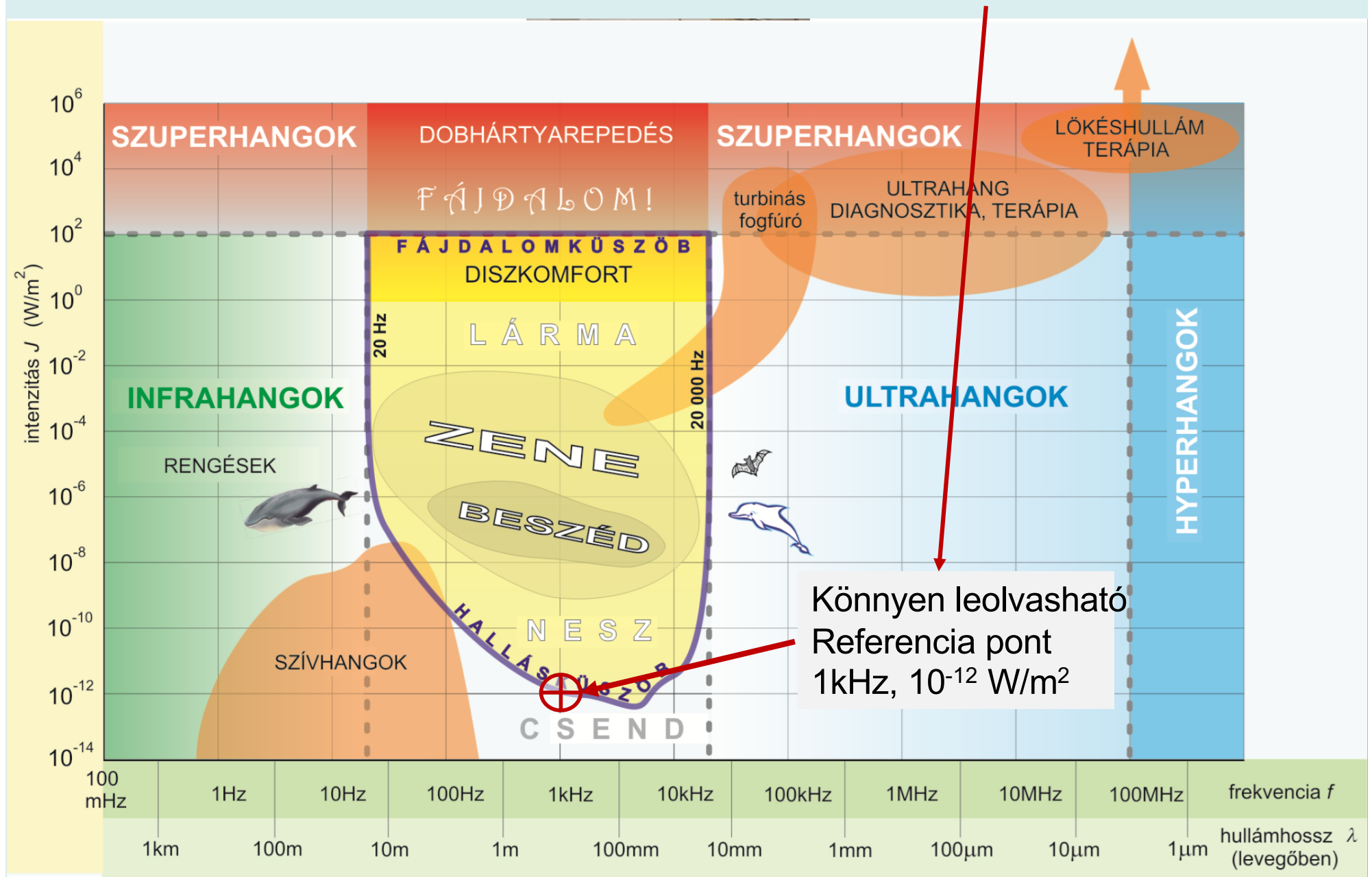
Gitárhúr: Transzverzális



Levegőben → Longitudinális



Nagyon széles intenzitás tartományt fed le a hallás → Log-os skálát érdemes használni
dB skála kényelmes és ismert: $10 \cdot \log(J/J_0)$

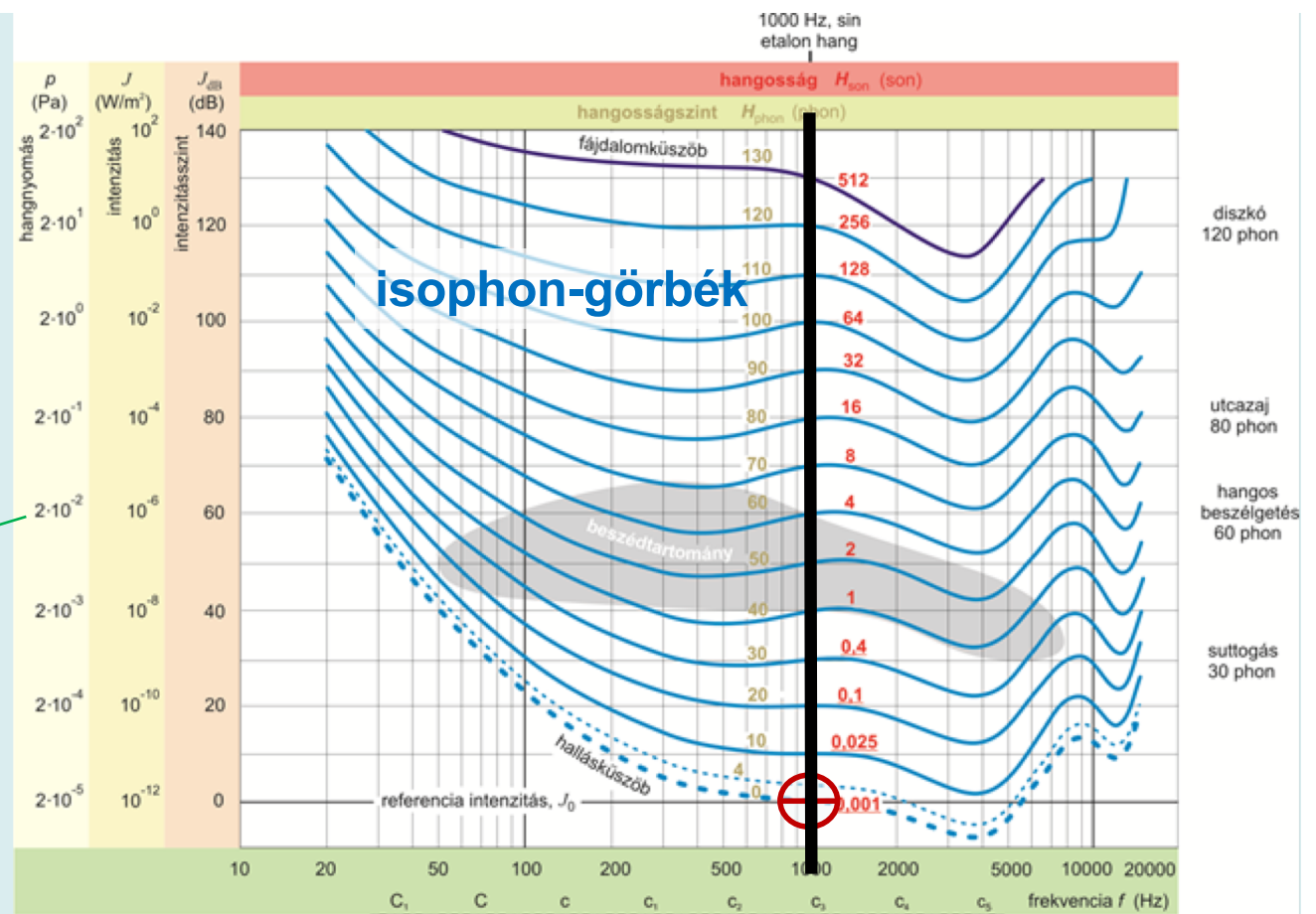


$$J = p_{\text{eff}}^2 / Z$$

$$Z = c \cdot \rho$$

$$J_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(J/J_0)$$

kompresszív érzékelés



hangforrás	hétköznapi, zenei hangosságfogalmak, ill. a halláskárosodás határai	hangosság szint (phon)	hangosság (son)
rakéta, puskalövés (a fül mellett)	dobhártyarepedés	180	
sugárhajtású repülőgép (közelről)	fájdalomküszöb	130	512
diszkó (a hangfalnál), ordítás a fülbe (20 cm)	éppen elviselhető	120	256
légkalapács	nagyon hangos	110	128
nagyon zajos üzem	nagyon hangos	100	64
kiabálás (1,5 m), áthaladó metrószervevény	<i>ff</i> (fortississimo), 2 órától halláskárosodás	90	32
erős városi forgalom, hangos zene	<i>ff</i> (fortissimo), 8 órán túli halláskárosodás	80	16
autó belső terének zaja (kb. 120 km/óránál)	hangos, <i>f</i> (forte)	70	8
hangos beszélgetés, WC lezuhás, porszívó	<i>mf</i> (mezzoforte)	60	4
iroda, számítógép, nyomtató zaja	<i>mp</i> (mezzopiano)	50	2
normális beszélgetés	beszédhangere, <i>p</i> (piano)	40	1
suttogás, könyvtár, órakeztyegés	nagyon halk <i>pp</i> (pianissimo)	30	0.4
szívhangok, rádióstúdió alaphangja	nagyon halk, <i>ppp</i> (pianississimo)	20	0.1
avar zizegése, macska dorombolása	éppen hallható	10	0.025
süket szoba	hallásküszöb (ember, fiatal)	0	0.001

$$J_{\text{dB}} = 10 * \log(J/J_0)$$

Kompresszív formát kétféle egyszerű görbe tud mutatni

LOG

Weber-Fechner

→ legyen akkor a dB-skála!

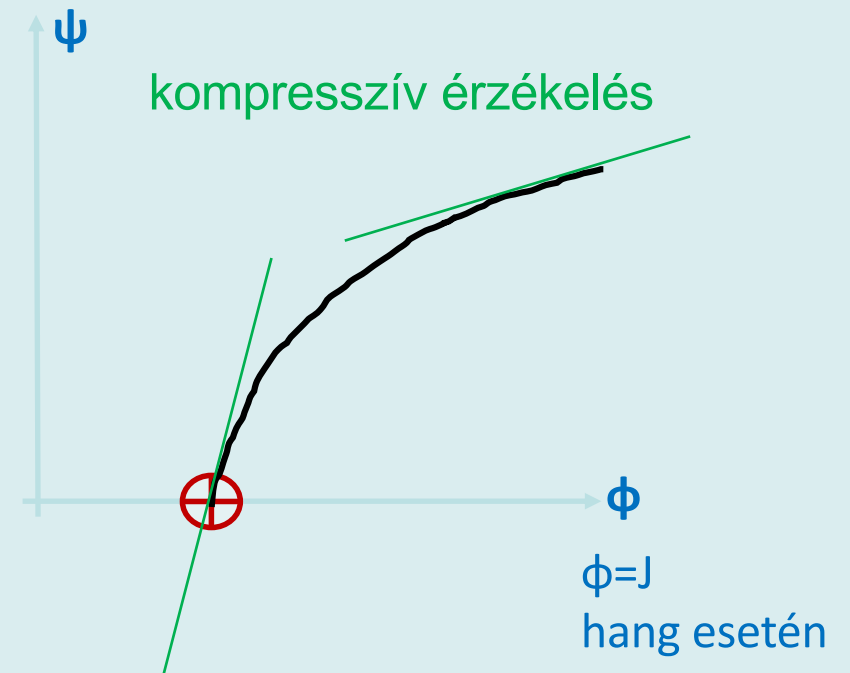
→ 1kHz-en: Phon=dB

HATVÁNY

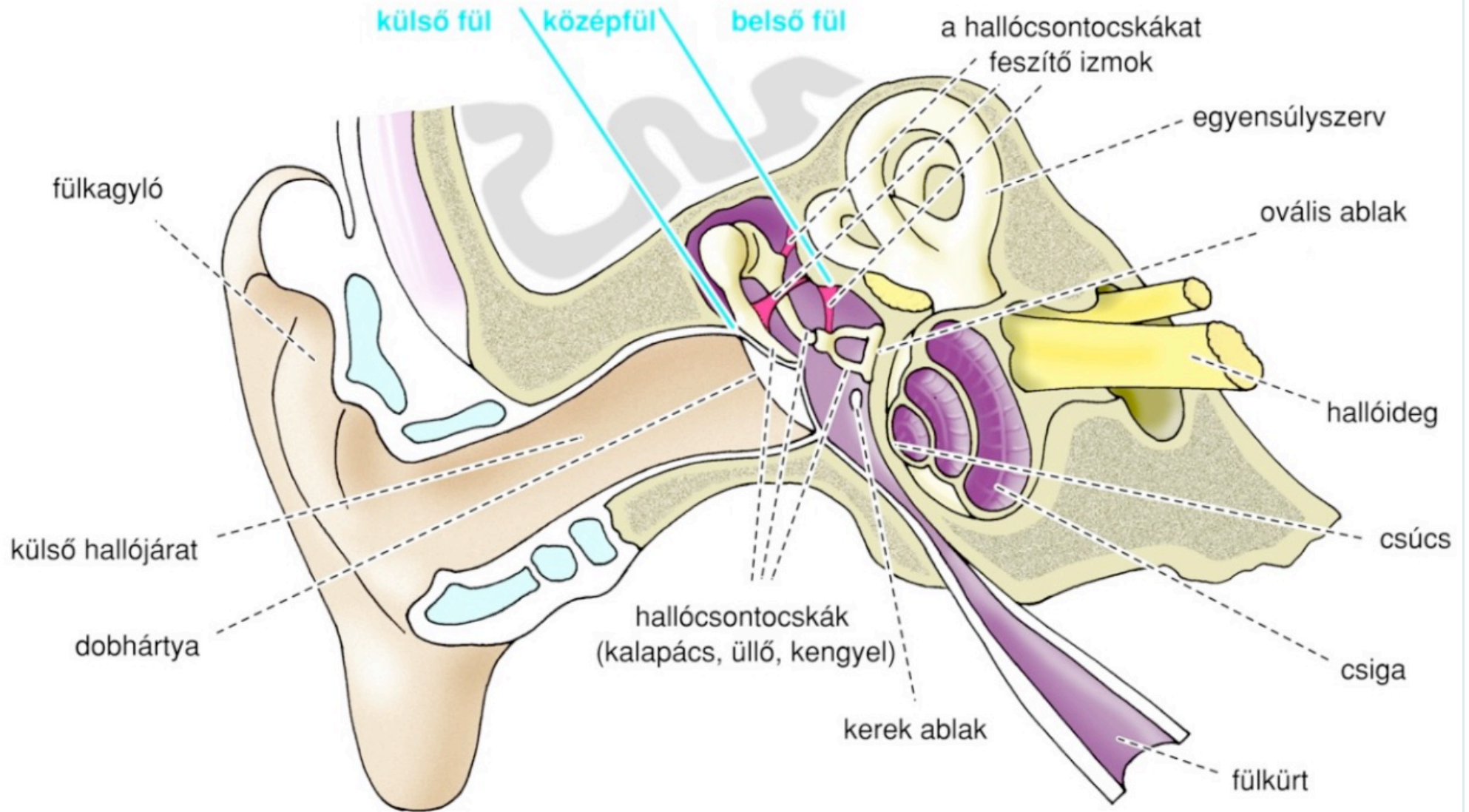
Stevens

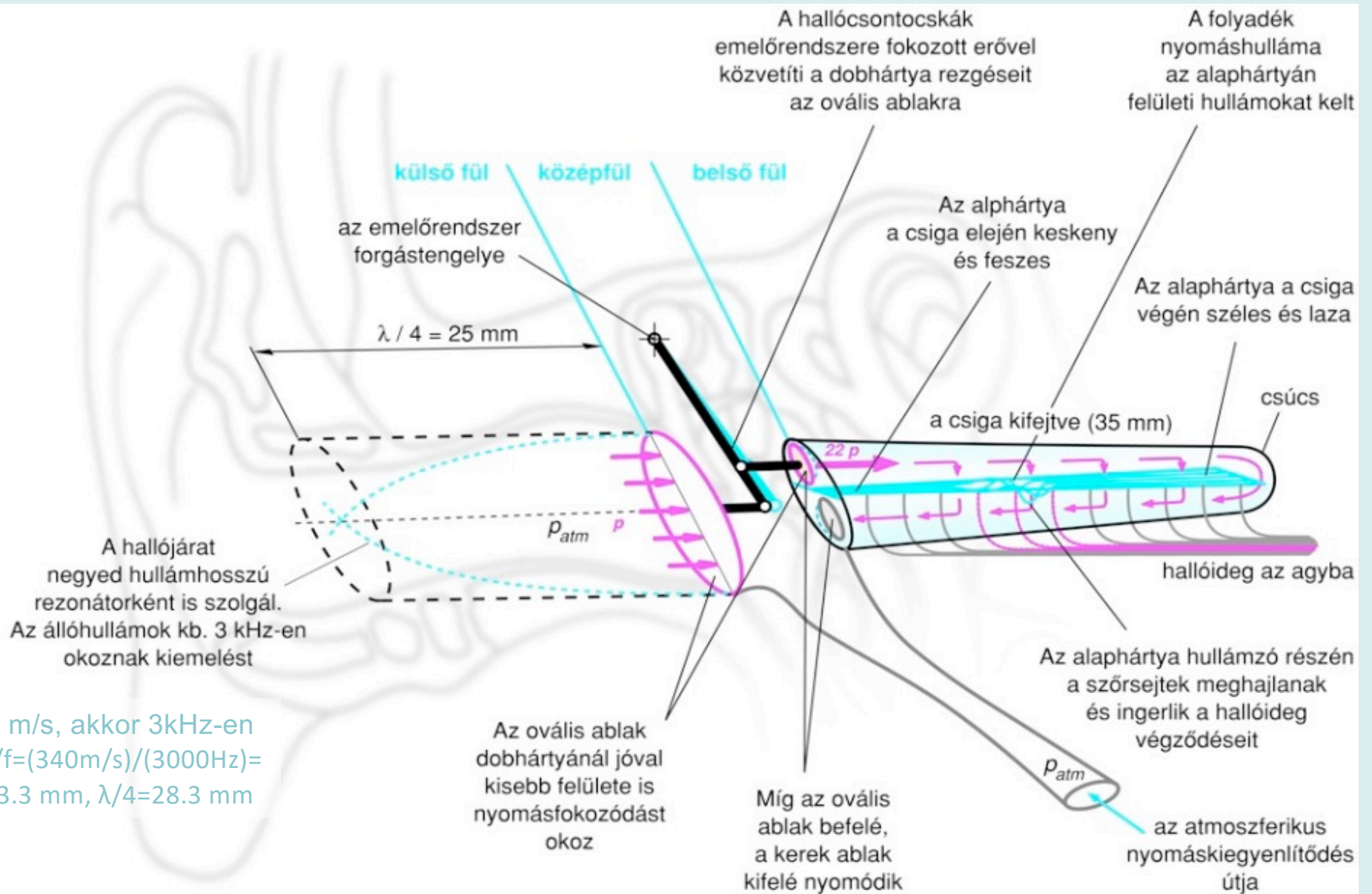
$$\psi = k * (J/J_0)^n$$

Átlagos esetben, és kerekítve
 $k=1/16$, $n=0.3$



A hallószerv anatómiája



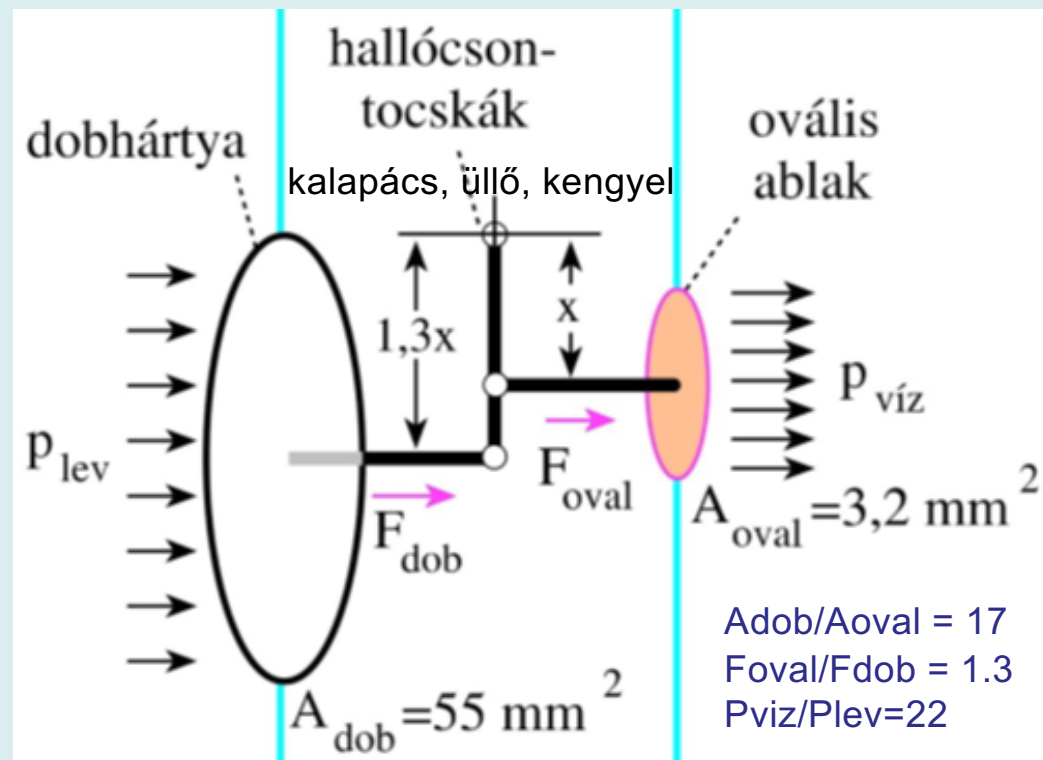
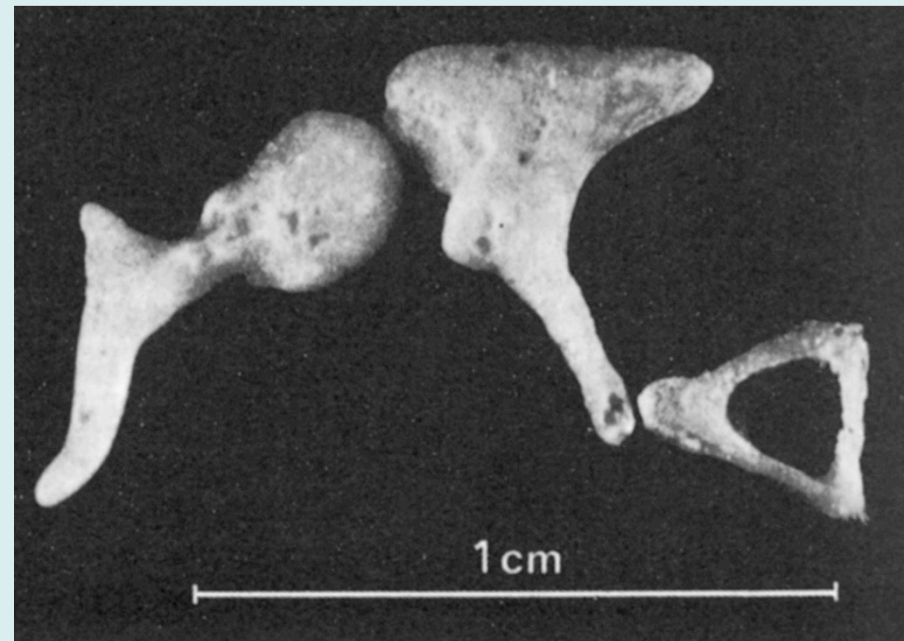


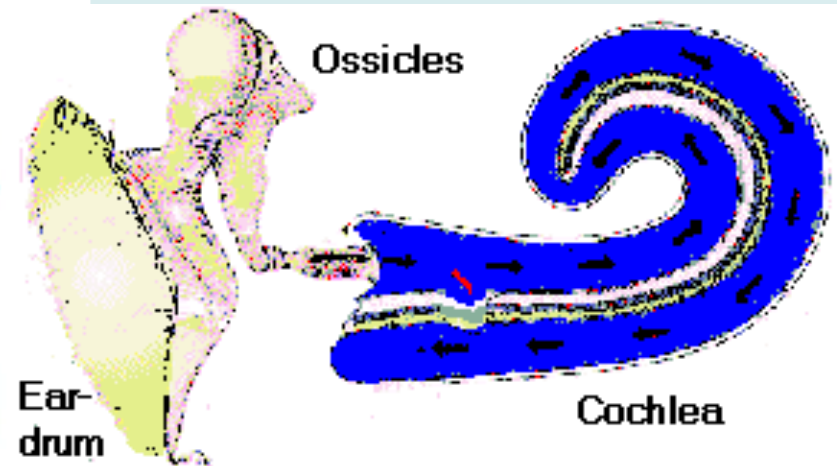
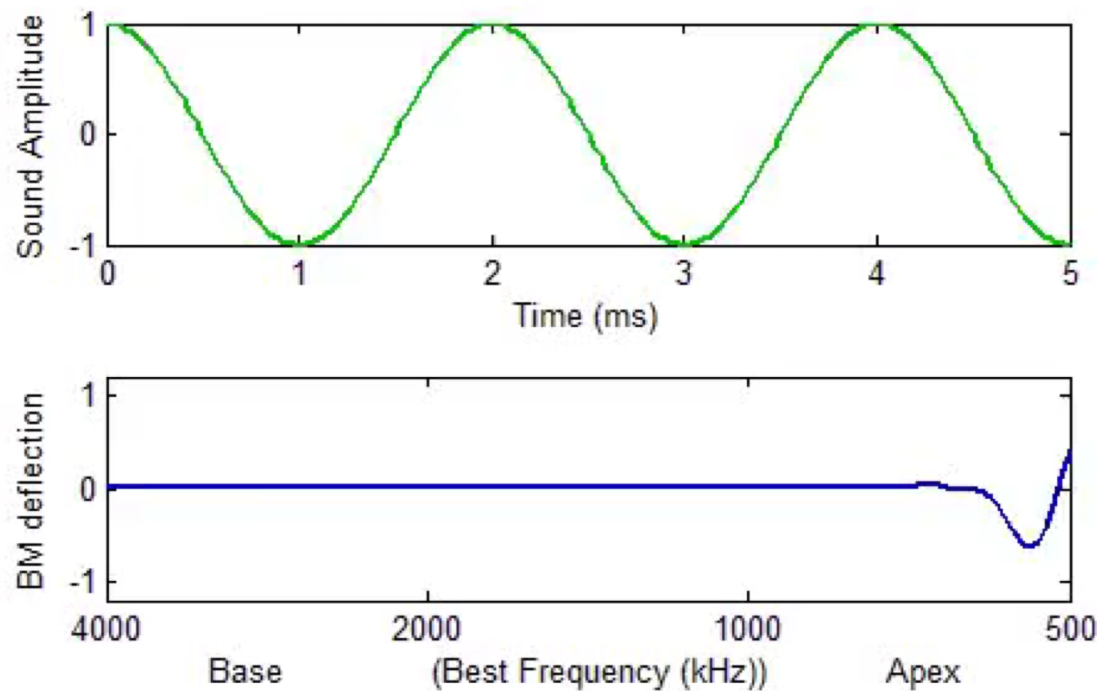
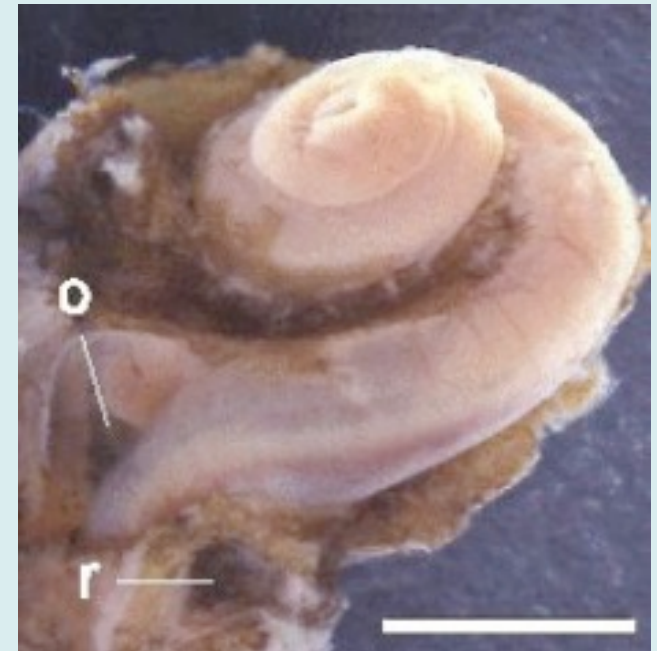
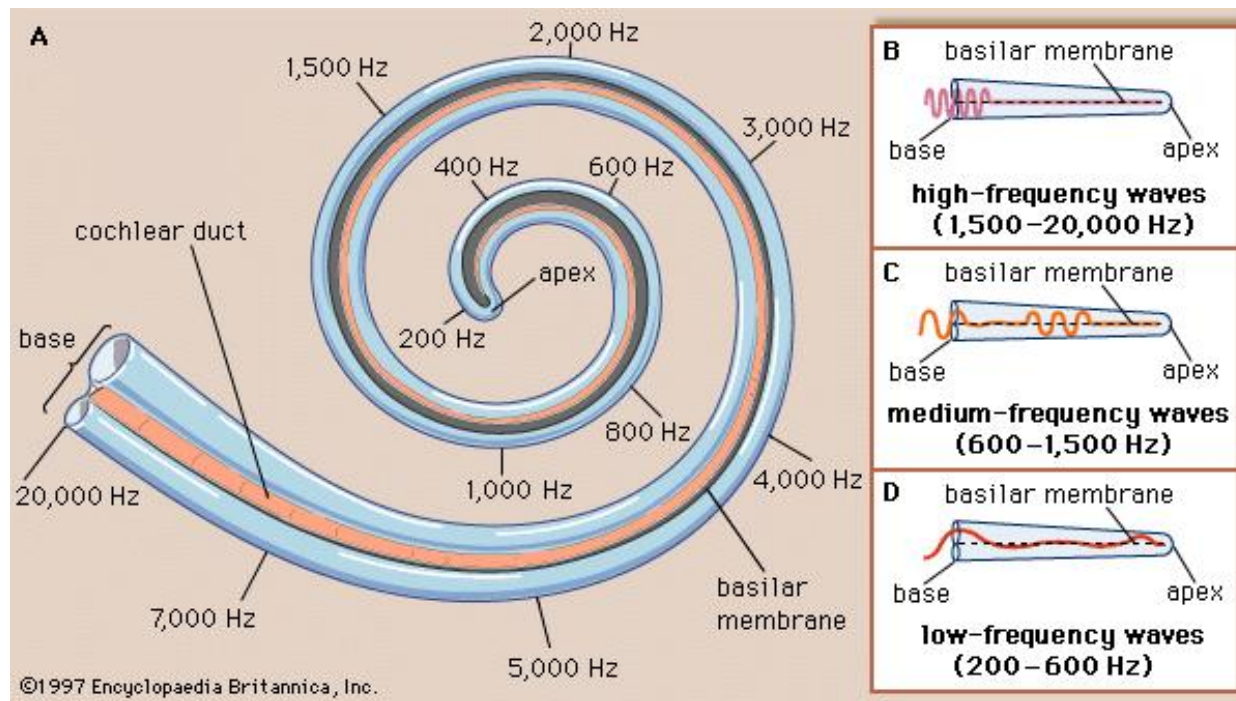
340 m/s, akkor 3kHz-en
 $\lambda = c/f = (340 \text{ m/s}) / (3000 \text{ Hz}) = 113.3 \text{ mm}$, $\lambda/4 = 28.3 \text{ mm}$

Akusztikus impedancia illesztés!

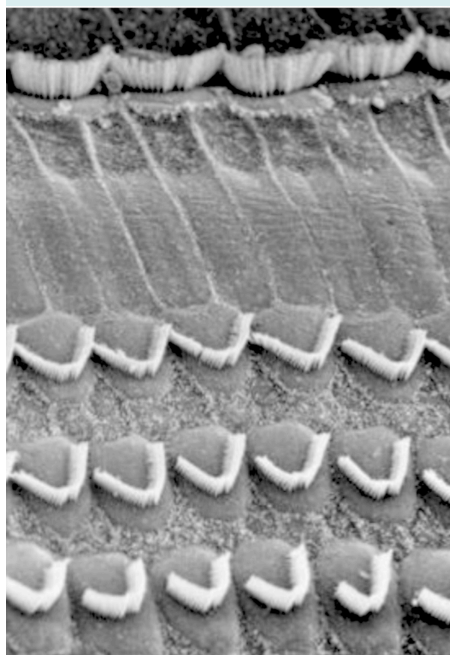
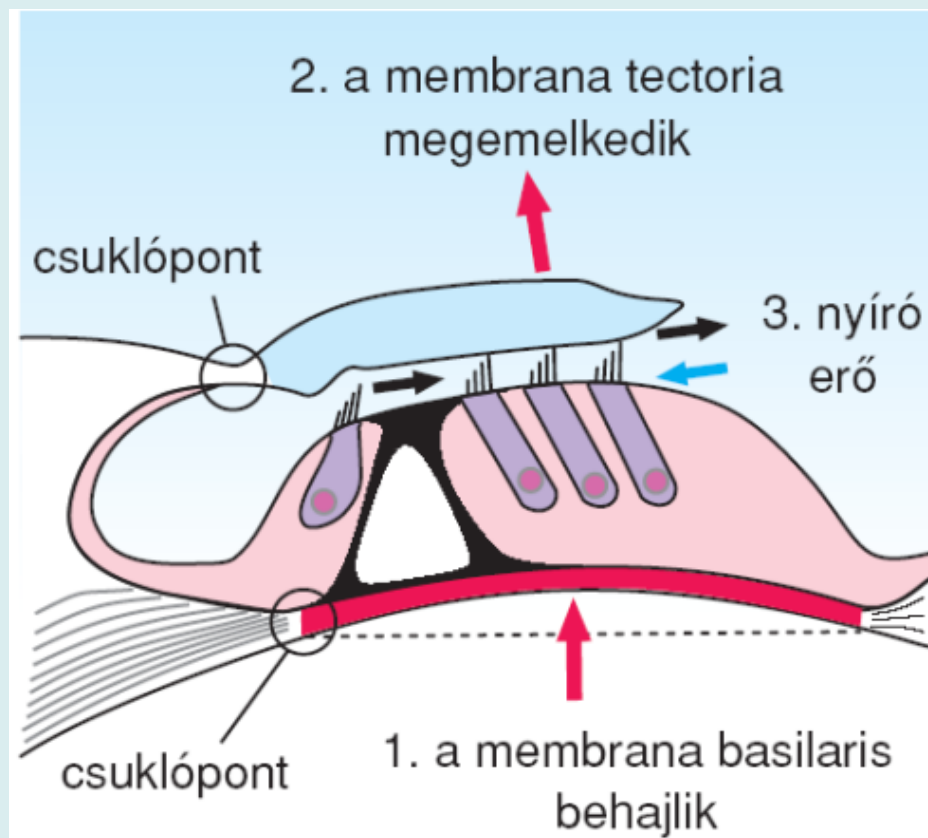
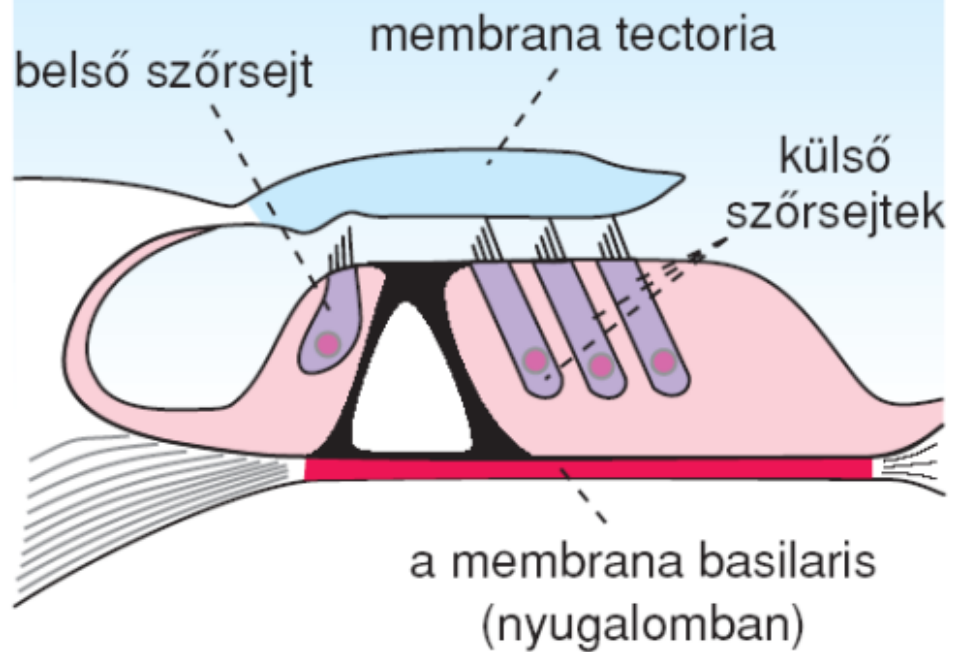
$$R = \frac{J_R}{J_0} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

**Passzív rendszer,
teljesítmény-
erősítés nincsen**

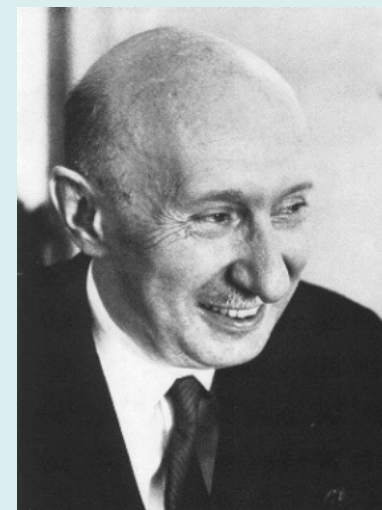


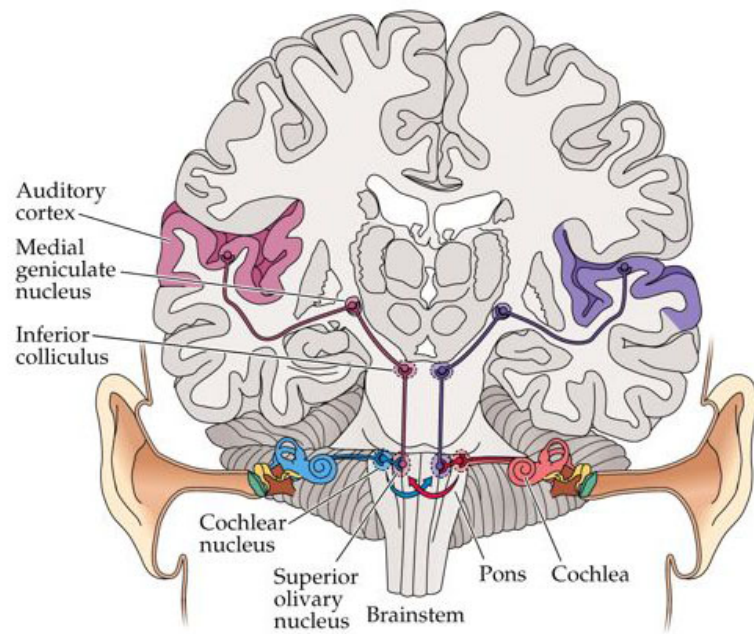
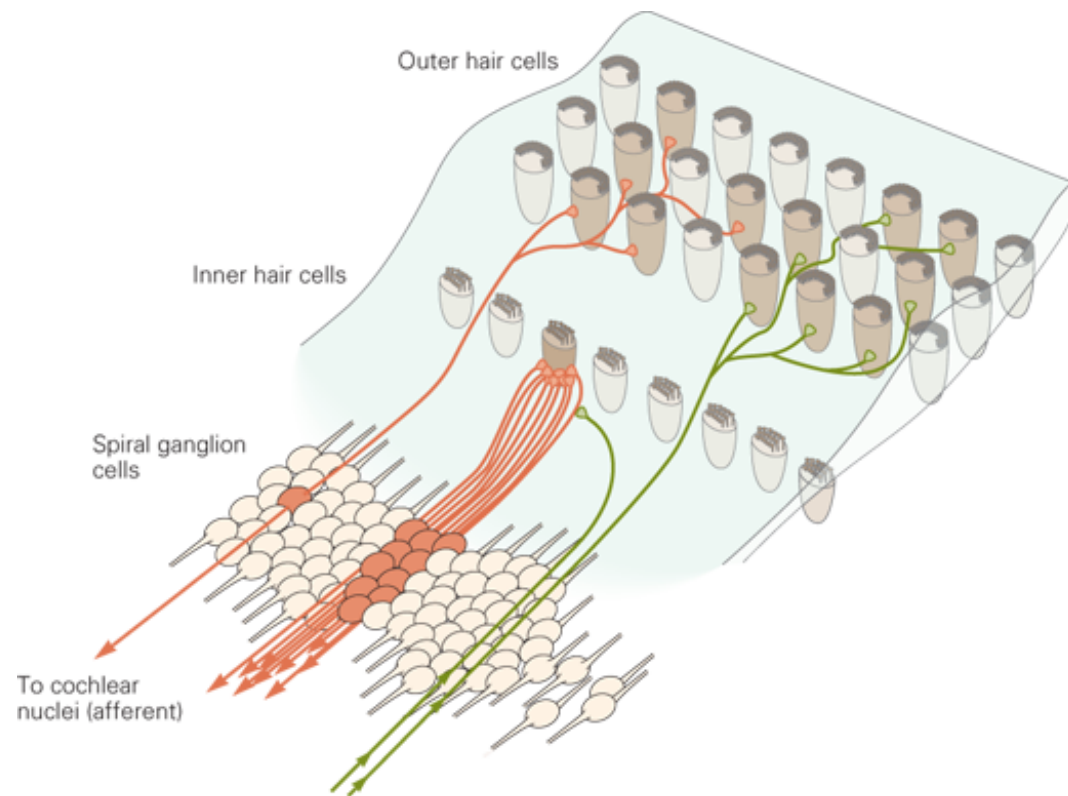






Békésy György Nobel-díj 1961





© 2001 Sinauer Associates, Inc.

Basilar Membrane

Support cells (green)

Outer Hair Cells (3 rows)

Inner Hair Cells (1 row)

Spiral Ganglion Neurons

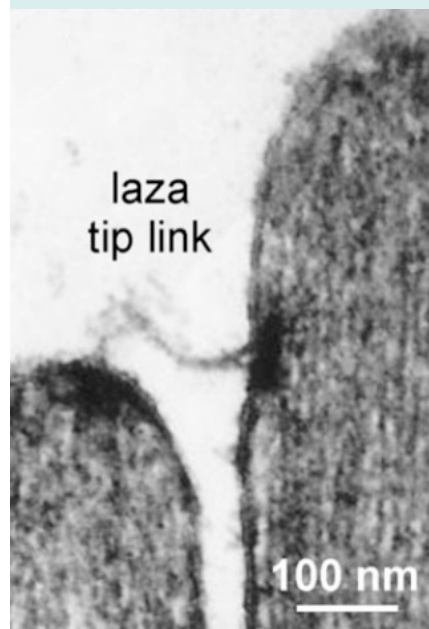
Scala Tympani

$[Na^+] > [K^+]$

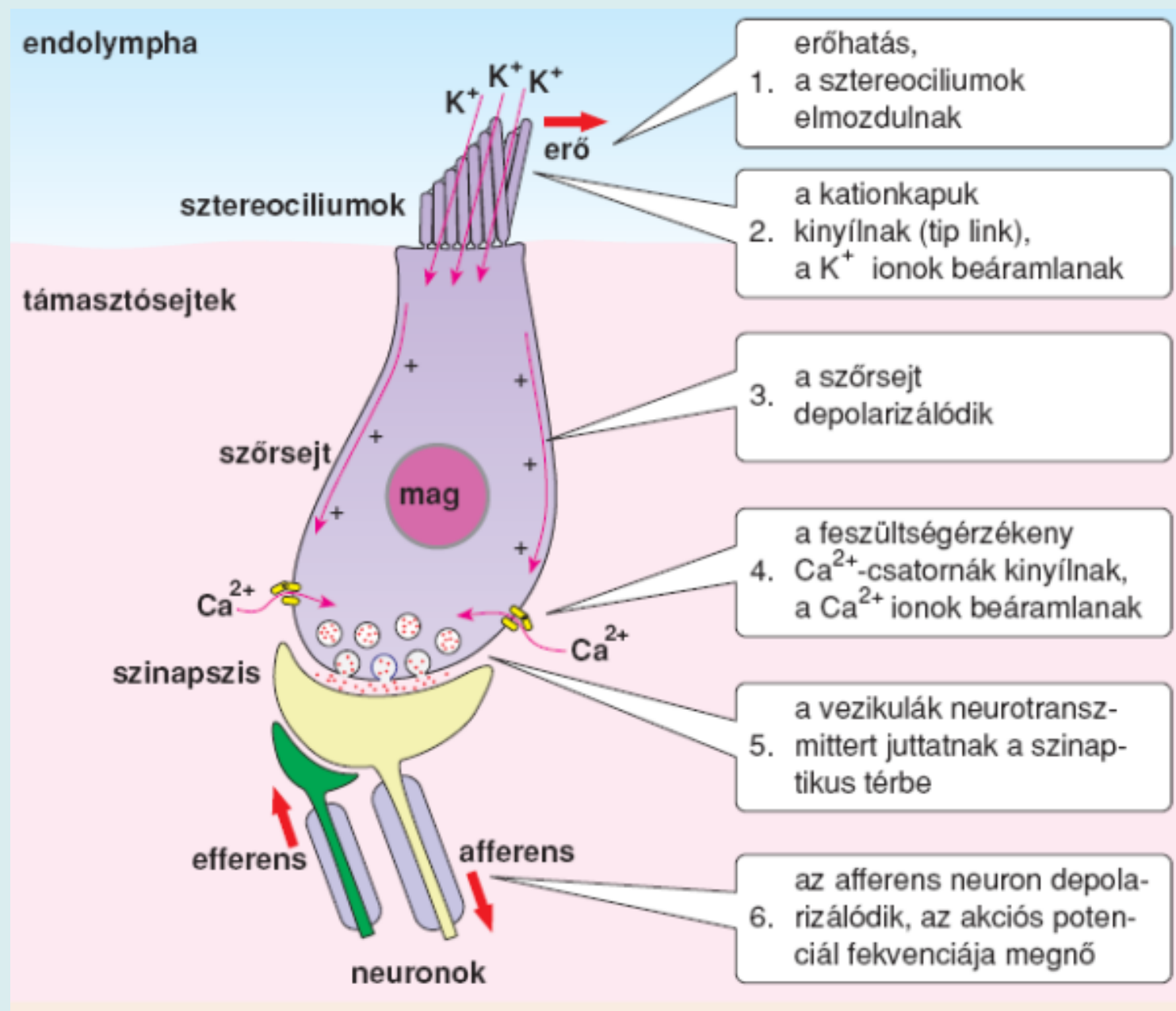
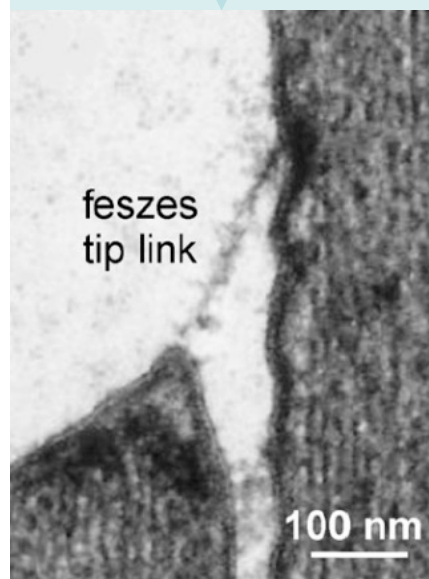
Scala Media

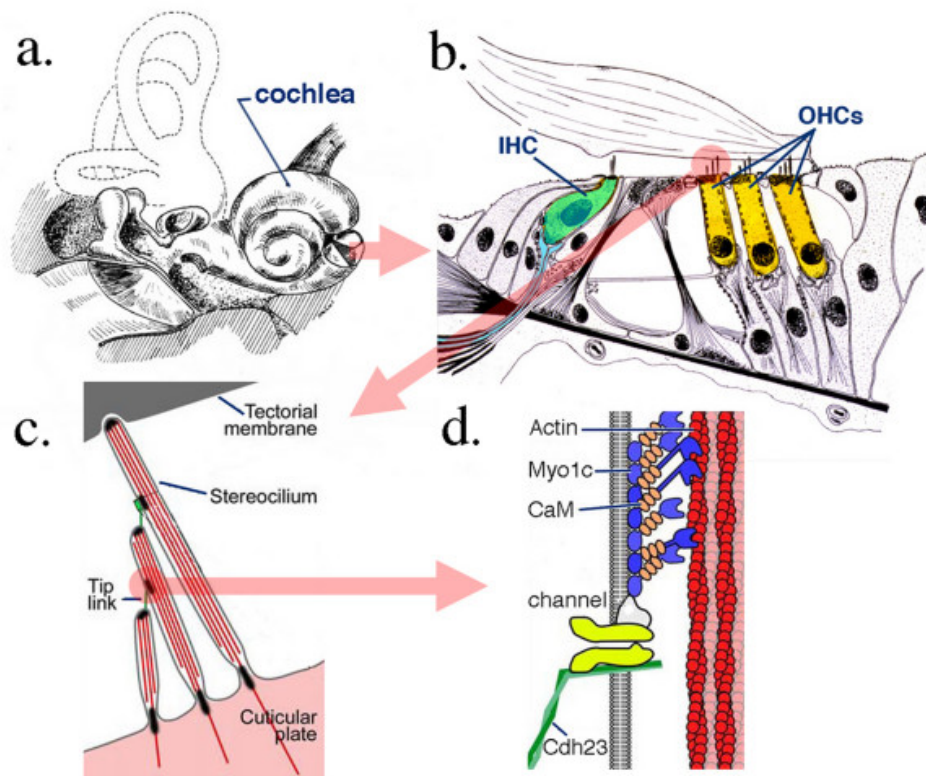
$[K^+] > [Na^+]$

Adapted from Bodmer, 2008



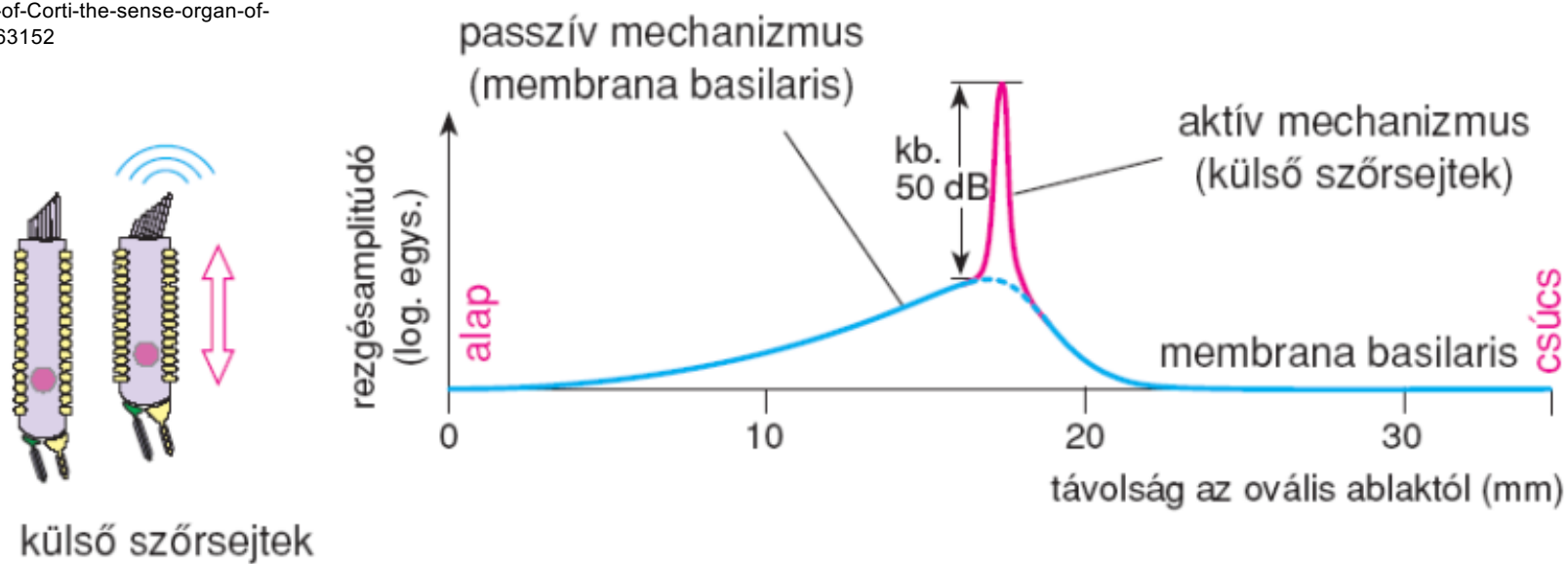
Nyíróerő



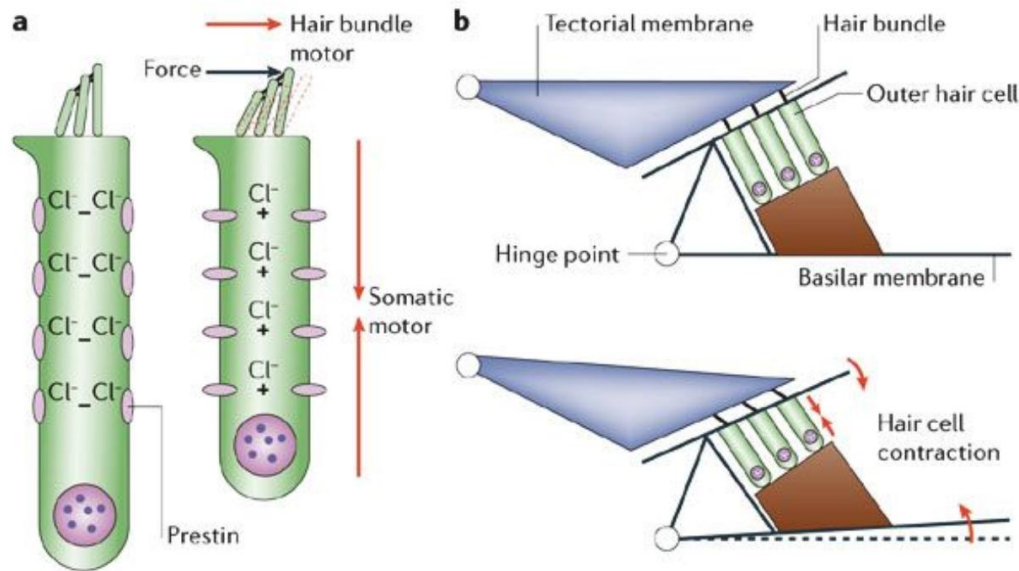


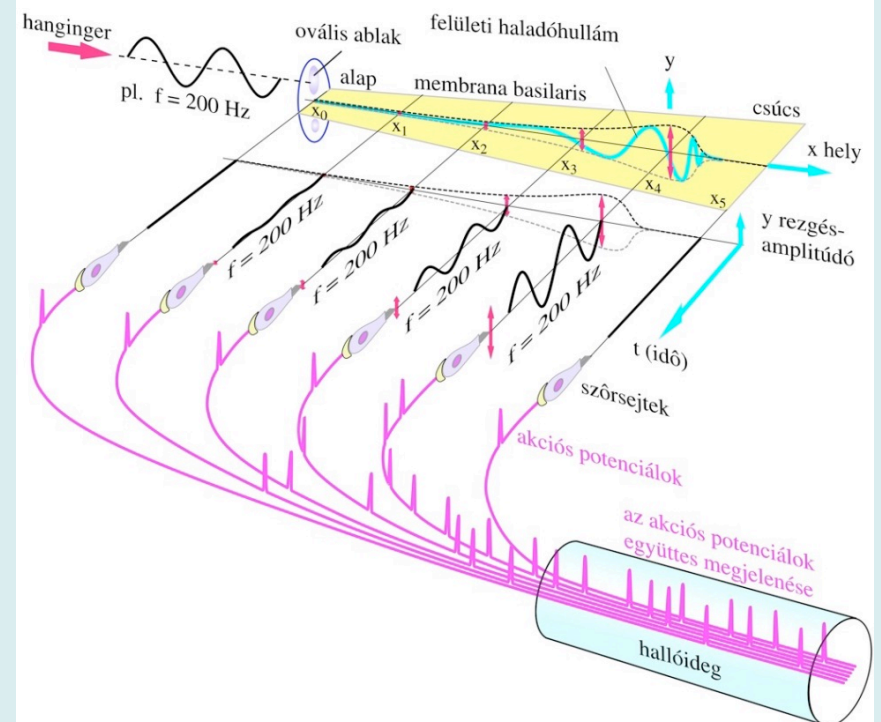
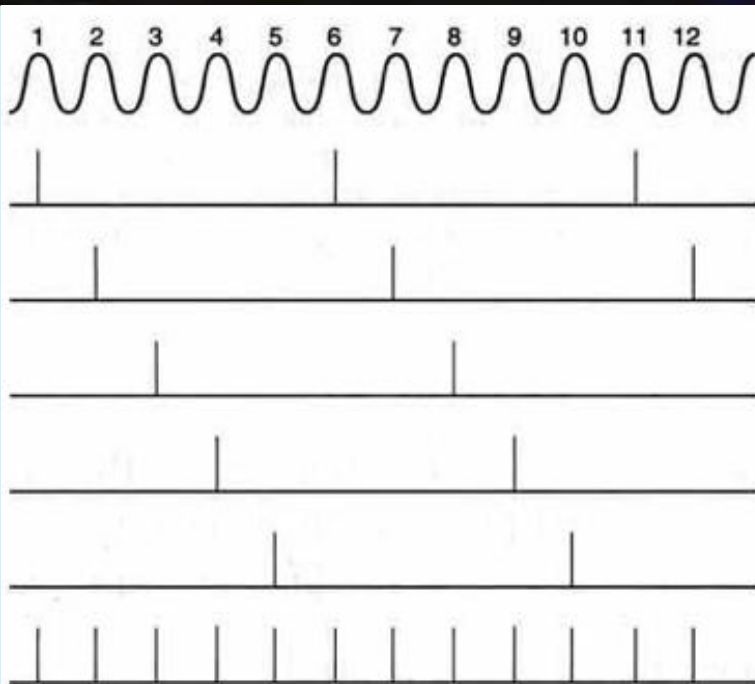
https://www.researchgate.net/figure/Anatomical-details-of-inner-ear-cochlea-and-organ-of-Corti-the-sense-organ-of-mammalian_fig1_215763152

Aktív frekvencia-pontosítás



The diagram illustrates the function of the motor protein prestin in Outer Hair Cells (OHCs). The top graph shows the membrane potential over time, with a peak labeled "Depolarization" and a trough labeled "Hyperpolarization". The bottom part shows a sequence of OHCs where the motor protein "prestin" (represented by yellow ovals) changes its conformation in response to the membrane potential, leading to cell volume changes.



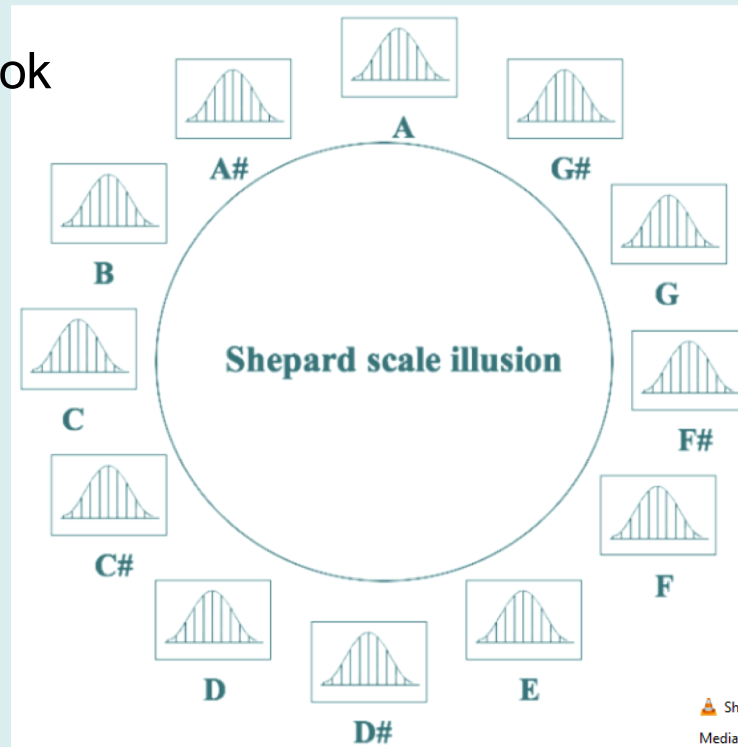


Röplabda-elmélet:
Több idegsejt egyidejű tüzelése

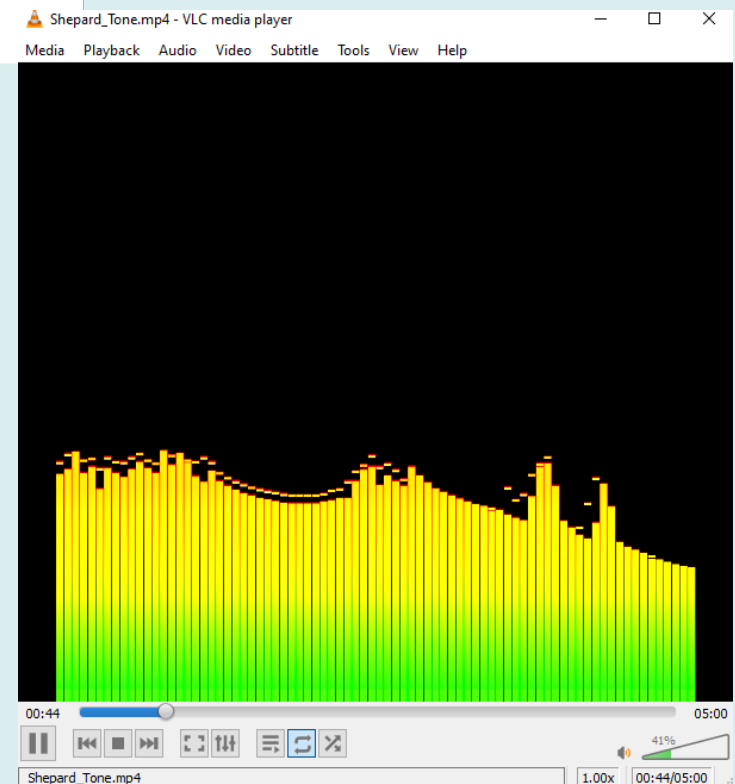
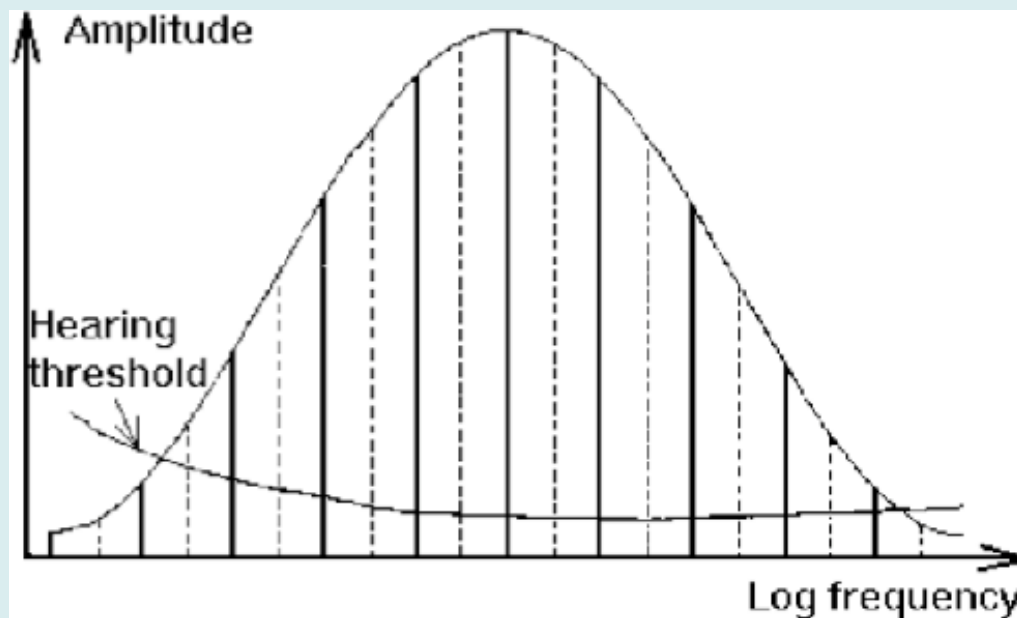
Ezzel összességében nagyobb
AP-frekvencia érhető el.
(egy sejtre max 1kHz az AP-
frekvencia)

Akusztikus csalódások

Shepard-skála



Folyamatosan
emelkedő hangszín
érzetét kelti



A ritmus, és a frekvencia, a térbeli orientáció együtt kerül feldolgozásra

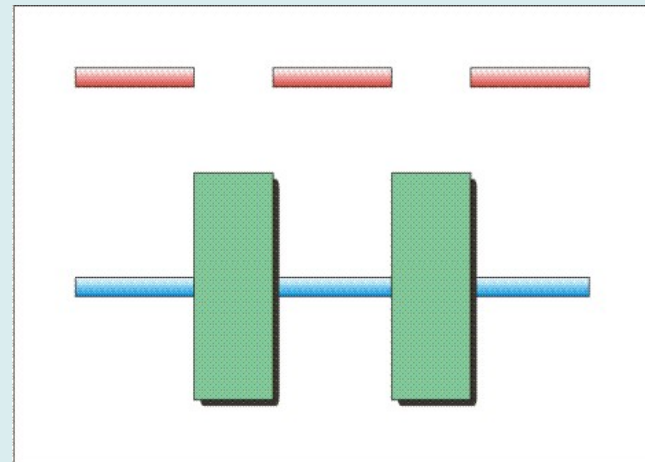


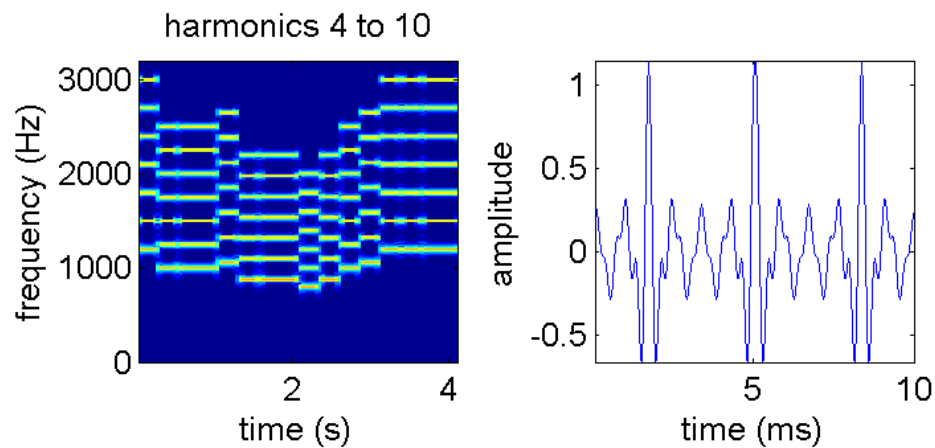
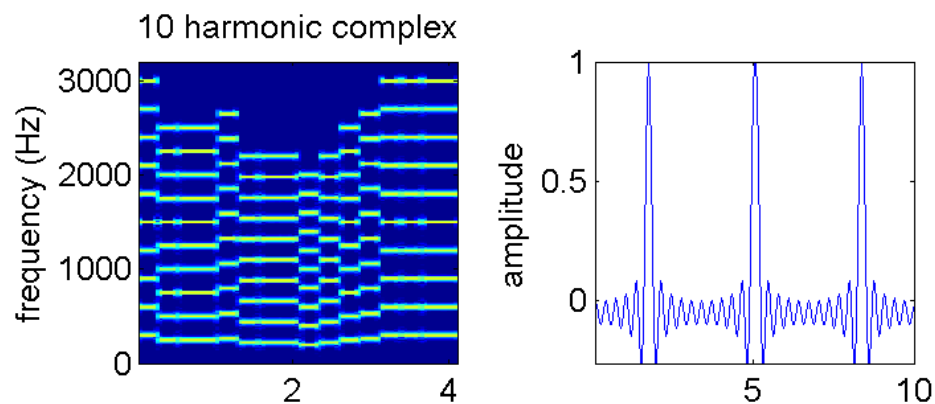
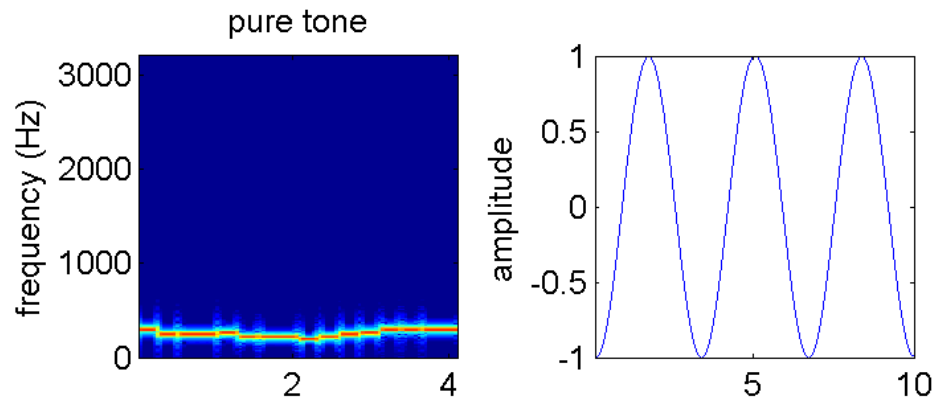
Ritmus: halljuk-e a ritmust?

Attól függ a zajok milyen frekvenciájúak.
Az elnyomó zajoknak nem elsősorban a mennyisége számít, hanem az időbeli és spektrális elhelyezkedése



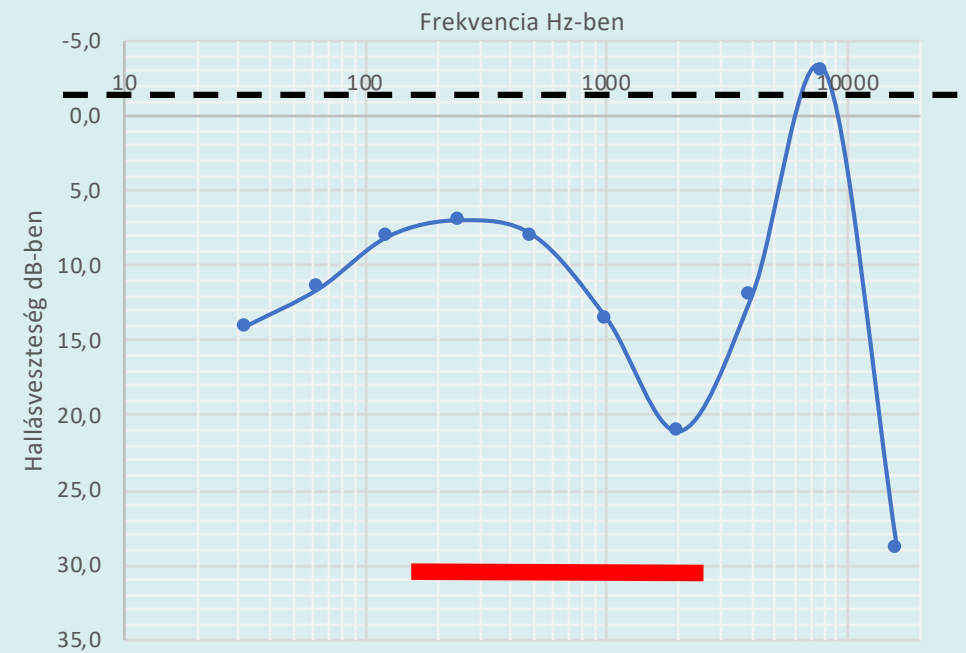
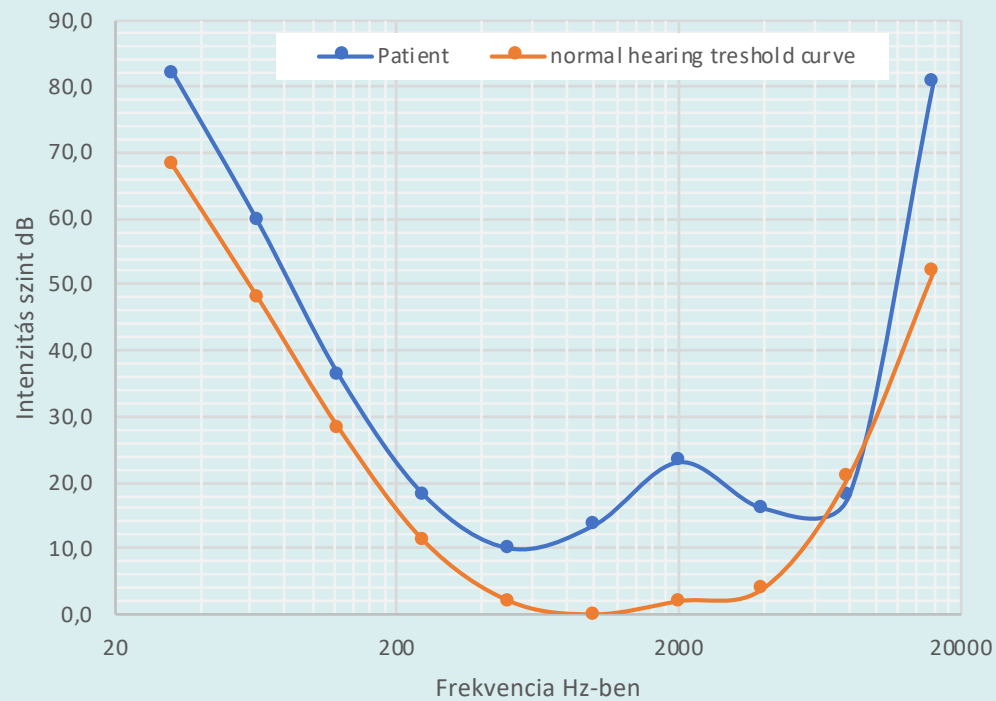
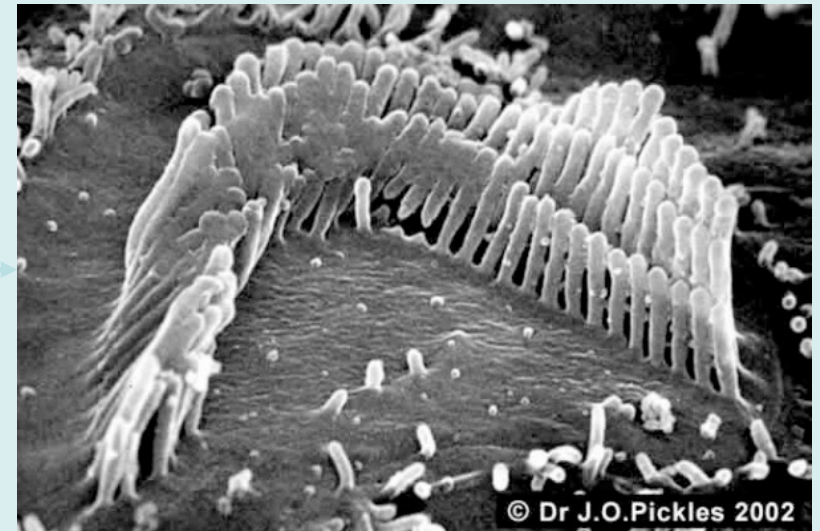
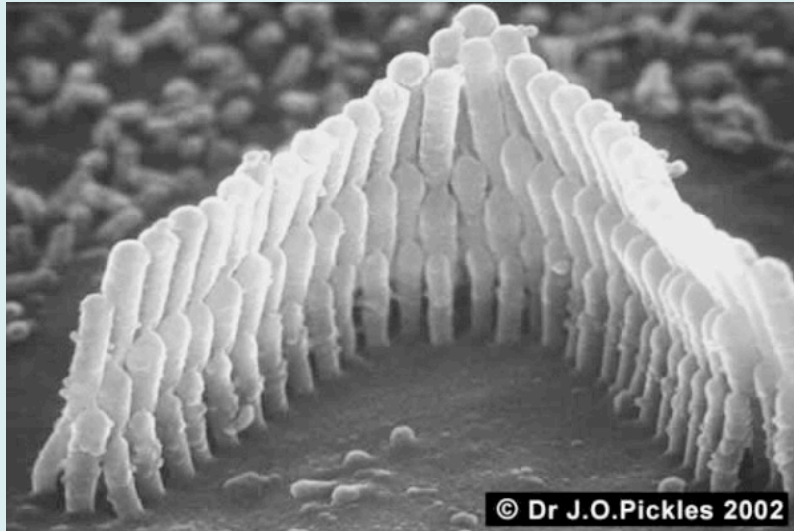
Kiegészíti a hiányzó részeket a feldolgozó rendszer.

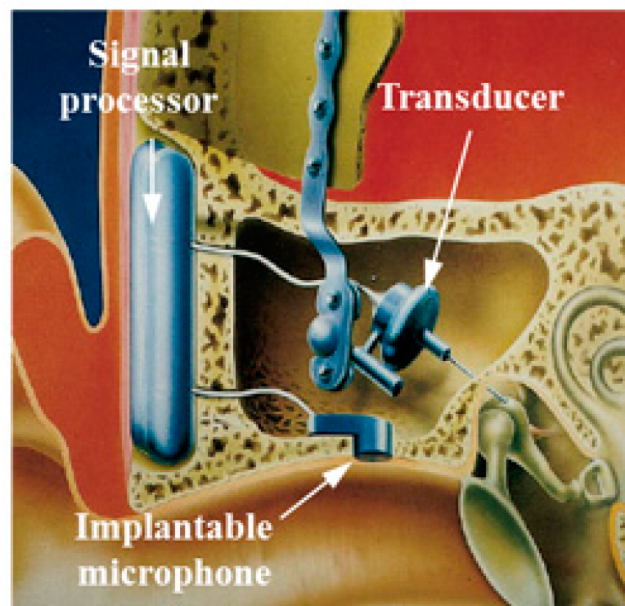




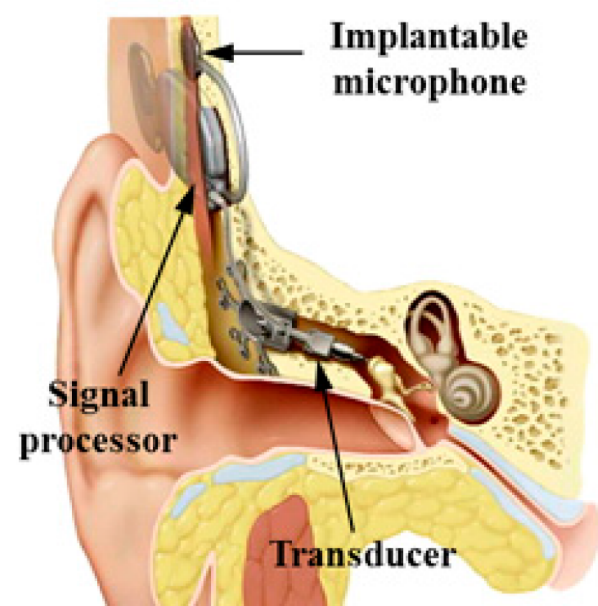
Mégis hallani véljük az alaphangot

Halláskárosodás

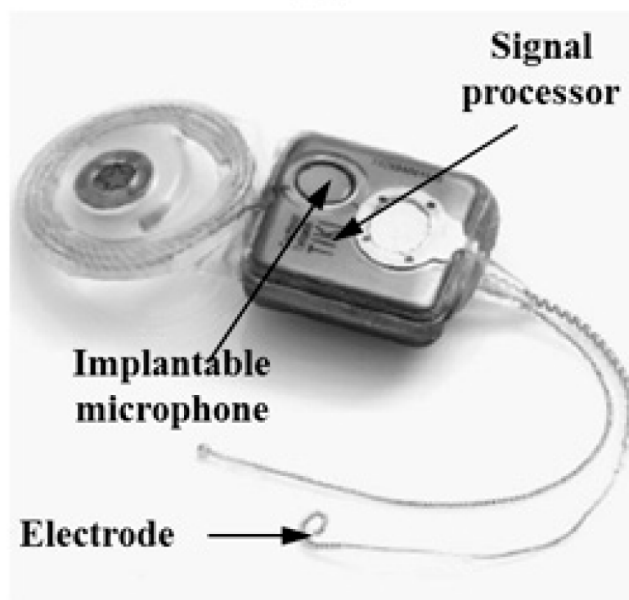




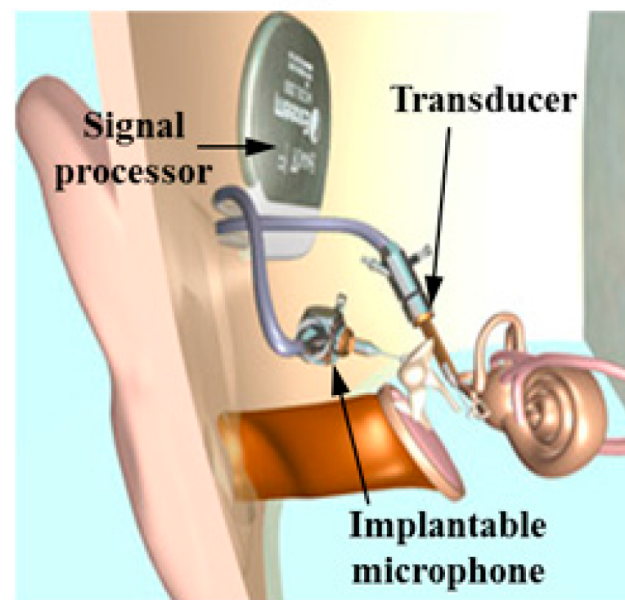
(a)



(b)



(c)



(d)

Kapcsolódó fejezetek:

Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika

IV. 1.

Gyakorlati jegyzet: Szenzor, Audiometria