

Hallás

A külső fültől a ganglionsejteken át a
kéregig

Transzdukció

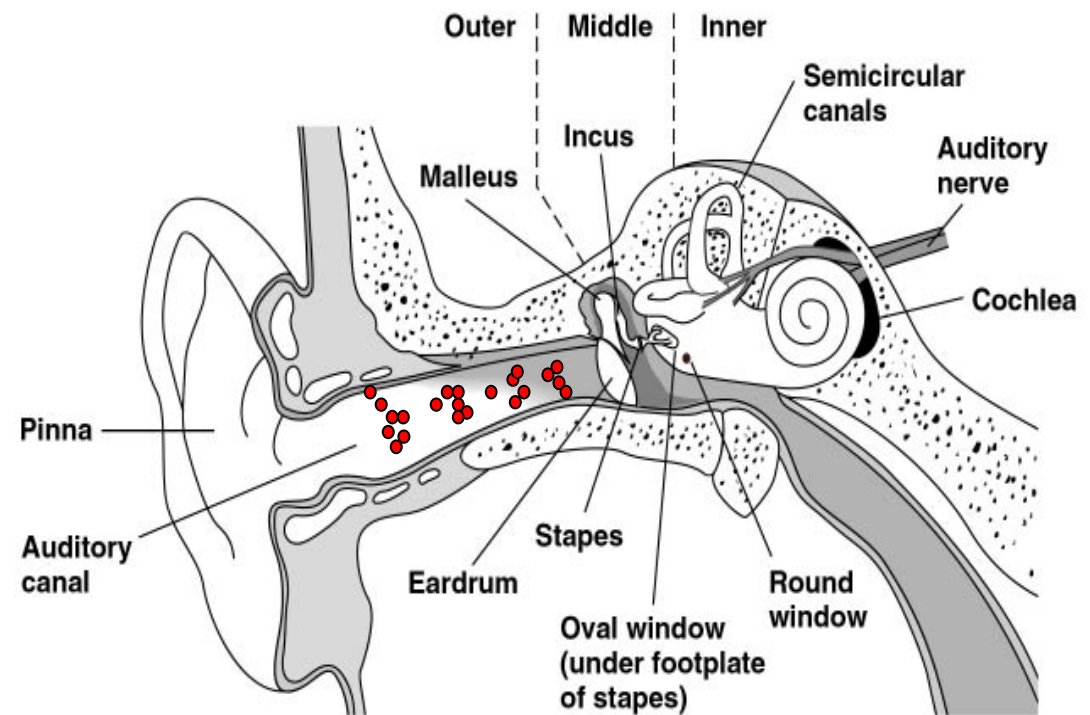
Ami a látásnál a fény, ...

- ... az a hallásnál a hang
- Egy rugalmas közegen – a levegőn – keresztül terjed (sűrítés, ritkítás)
- Vezetési sebesség: 340 m/s
- Ahhoz, hogy halljuk: ezt a mechanikus energiát a fülünk „elkapja”, receptor-szervéhez továbbítja és elektromos jellé alakítja át

A fül részei

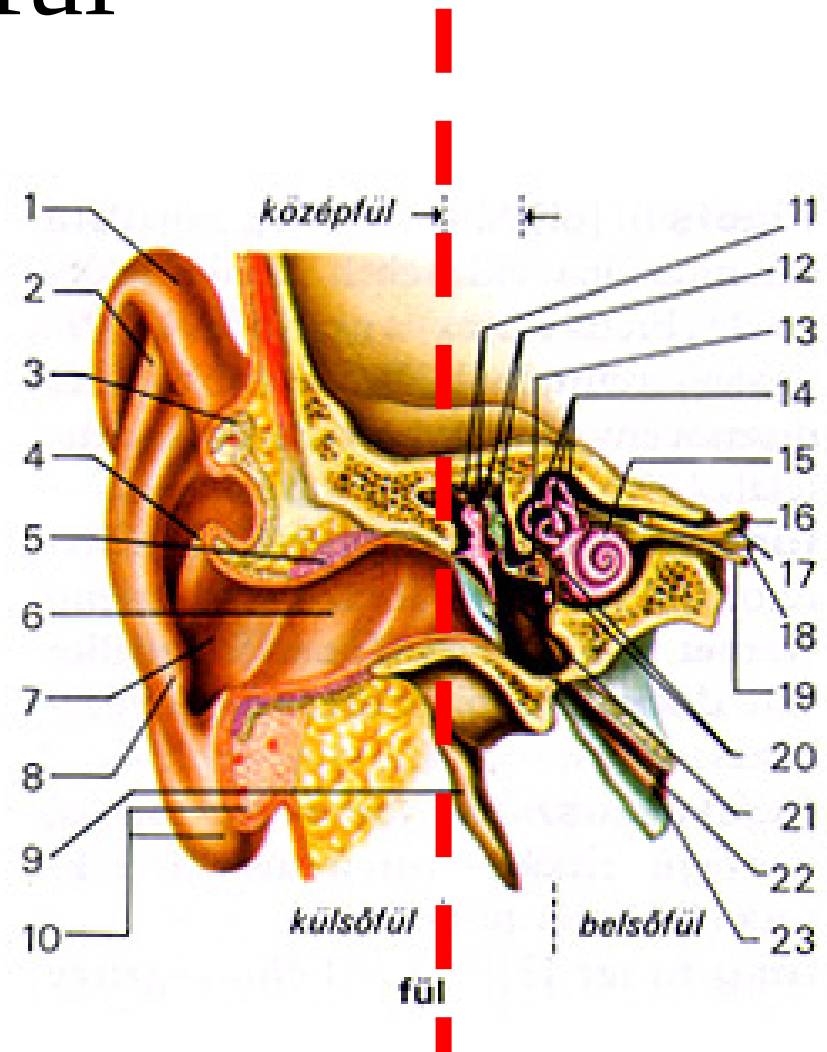
- Három funkcionális rész

- Külső fül
- Középfül
- Belső fül

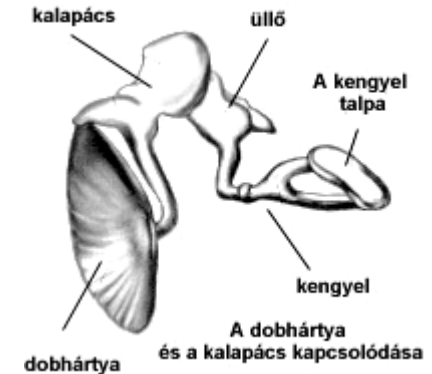


Külső fül

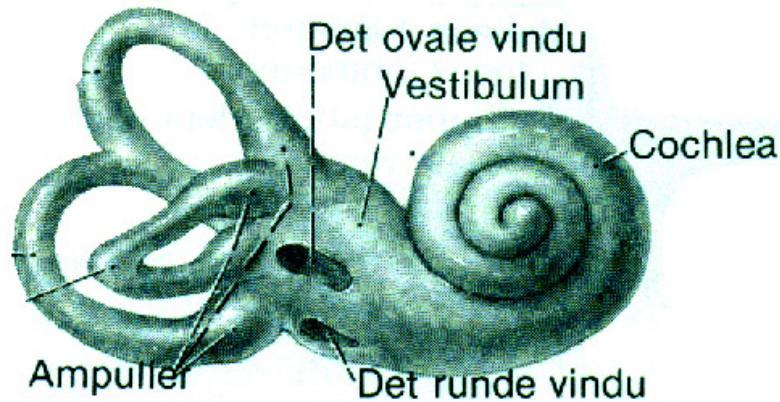
- A fül látható része
- Porcos
- Összegyűjti az elektromágneses sugárzást
- Kagylóz és egy csatornán át továbbít hangot
 - Hallójárat
 - Végén: dobhártya (tympanum)
 - 9 mm-es átmérőjű hártya



Középfül



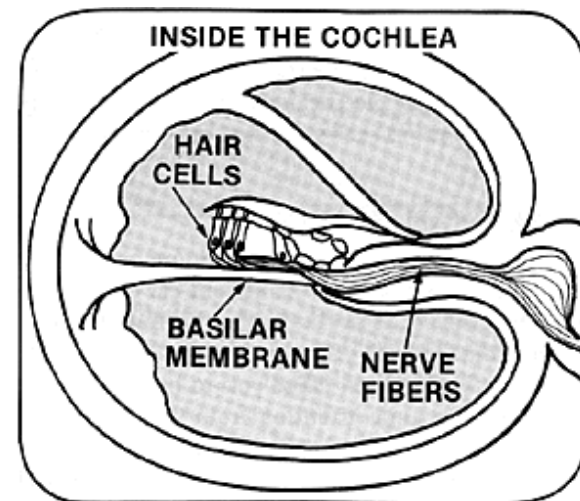
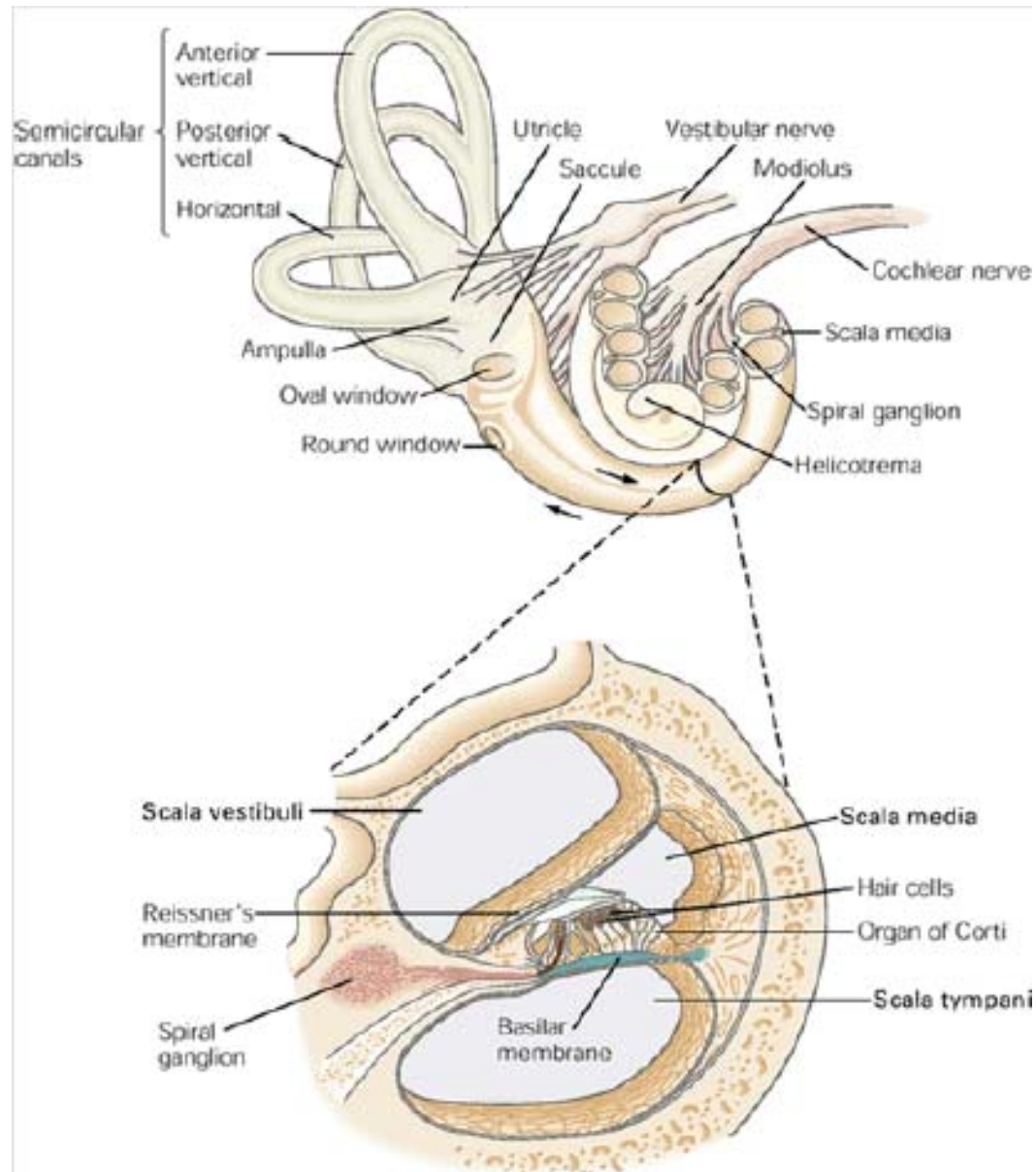
- Egy levegővel telt „tasak”
- Eustach-kürtön keresztül garattal kapcsolat
- A mechanikus energiát 3 itteni csontocska mozgása viszi tovább
 - Kalapács (malleus) – kapcsolódik a dobhártyához + ligamentummal üllőhöz
 - Üllő (incus) – ligamentummal kengyelhez
 - Kengyel (stapes) – ovális ablak, csiga része
 - Kalapács és üllő: evolúciós állkapocs-maradvány hüllőktől



Belső fül

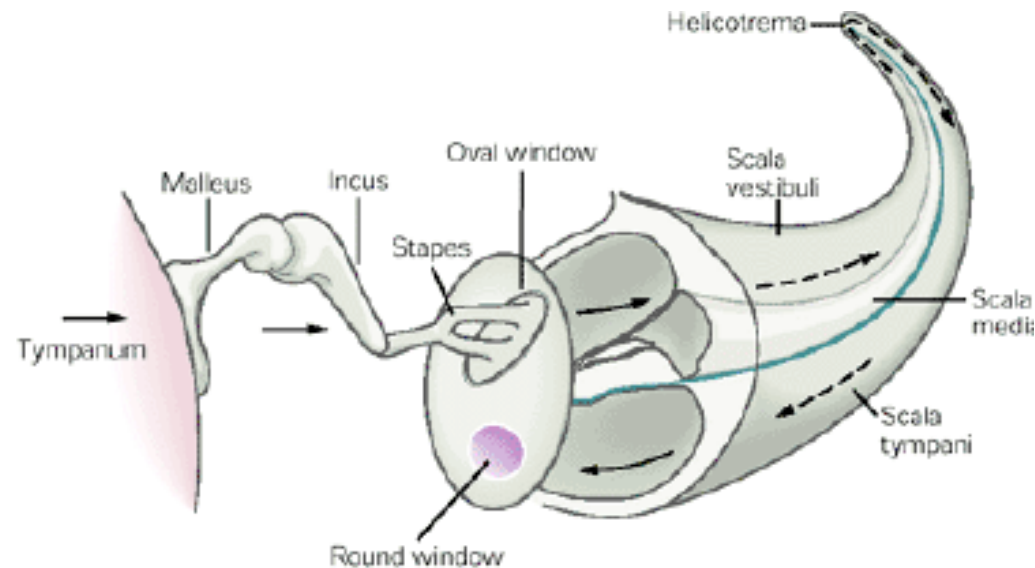
- A hallás szempontjából legfontosabb struktúra: a CSIGA (cochlea)
 - A hártyákat leszámítva fala kemény, ütésálló csont
 - Összecsavart, benne 3 folyadékkal teli csatorna
 - Vesztibuláris csatorna (alapján: ovális ablak)
 - Legalsó: dobcsatorna (alapjánál kerek ablak)
 - Középső: csigavezeték
 - Határolók
 - veztibuláris és csigavezeték között – Reissner membrán (vestibuláris membrán)
 - Dobcsatorna és csigavezeték között – alaphártya, a transzdukció helye
- } kommunikálnak
helicotrema

A csiga és keresztmetszete



A folyamat röviden

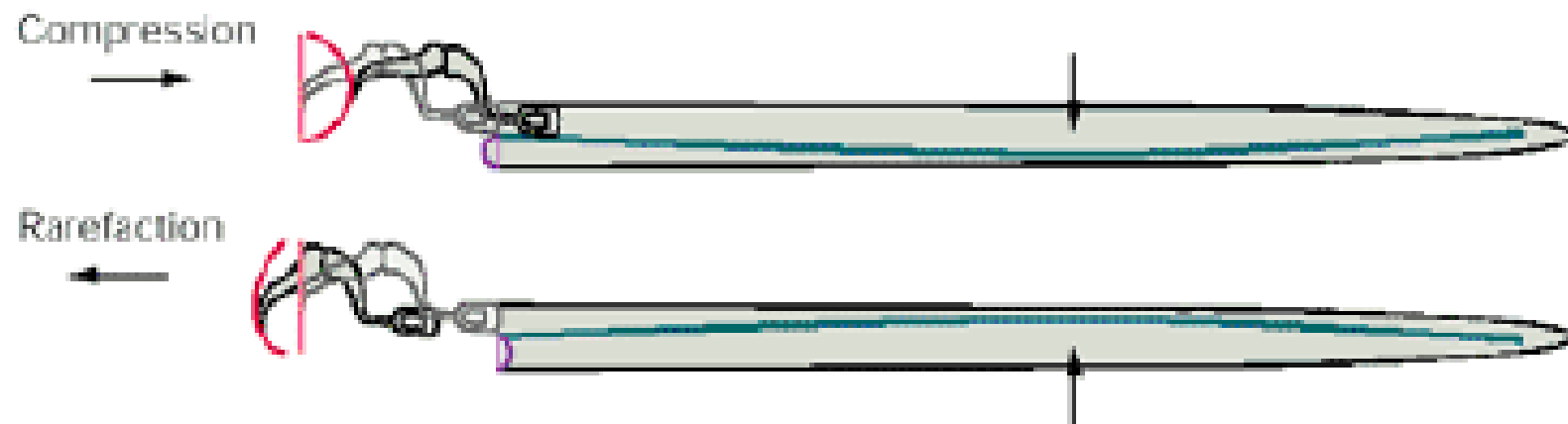
- A légnyomásban kiváltott változás megnyomja a dobhártyát – ez megmozgatja a kalapácsot – a csontocska-komplexum is megmozdul – kengyel meglöki az ovális ablakot
- Tovább: ovális ablak mozgása – folyadék kitérése – hártyák mozgása



A csiga funkcionális anatómiája

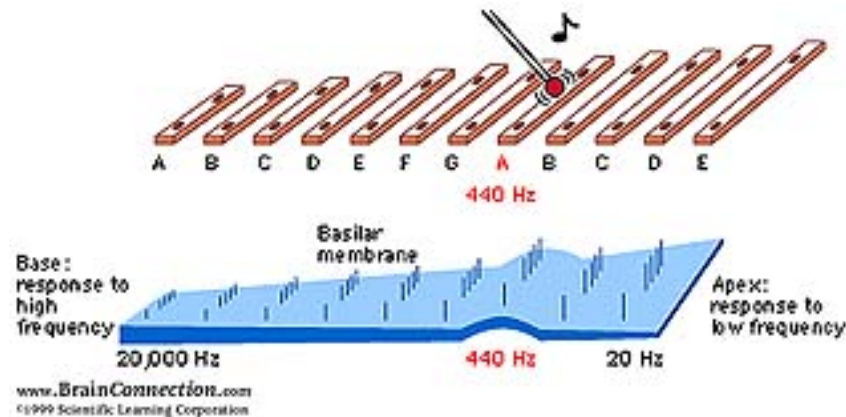
- Legfontosabb: az alaphártya mechanikai tulajdonságai
- Hossza: 33 mm
- Felmerülő kérdés: teljes hosszában uniform-e?

Ha igen ...



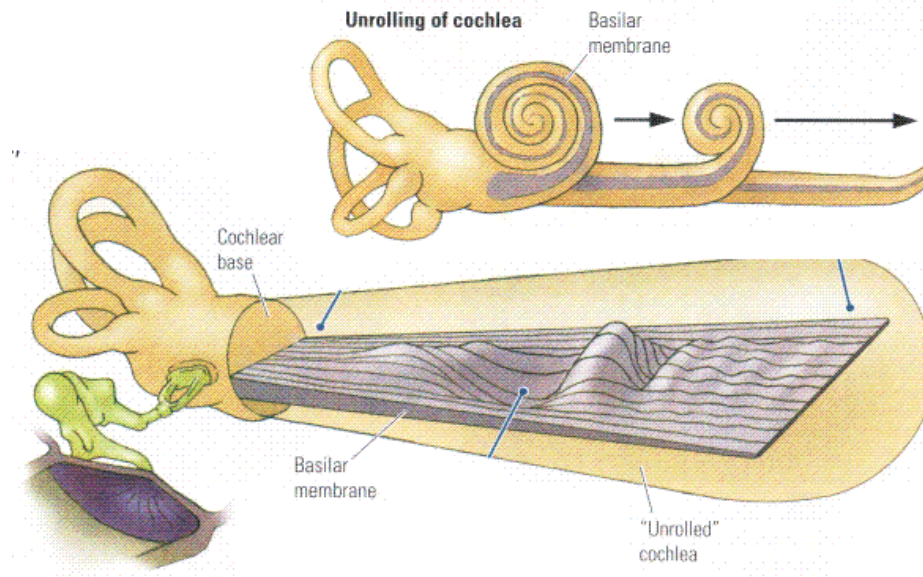
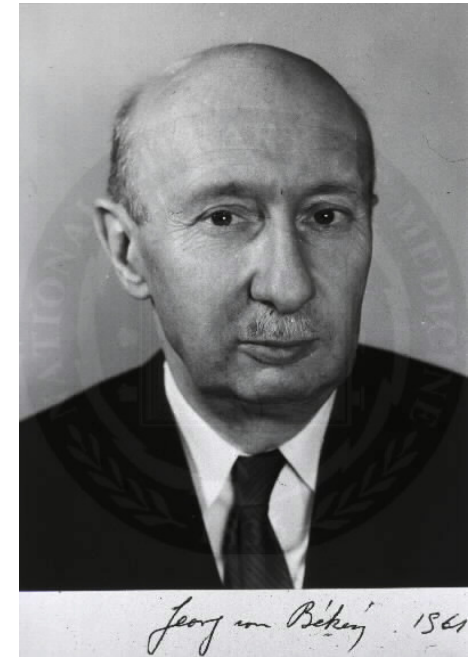
De nem ...

- Helyette
 - csúcsi rész kb. ötször szélesebb mint az alapja
 - Csúcsnál vékony és laza, alapnál vastagabb és feszeesebb



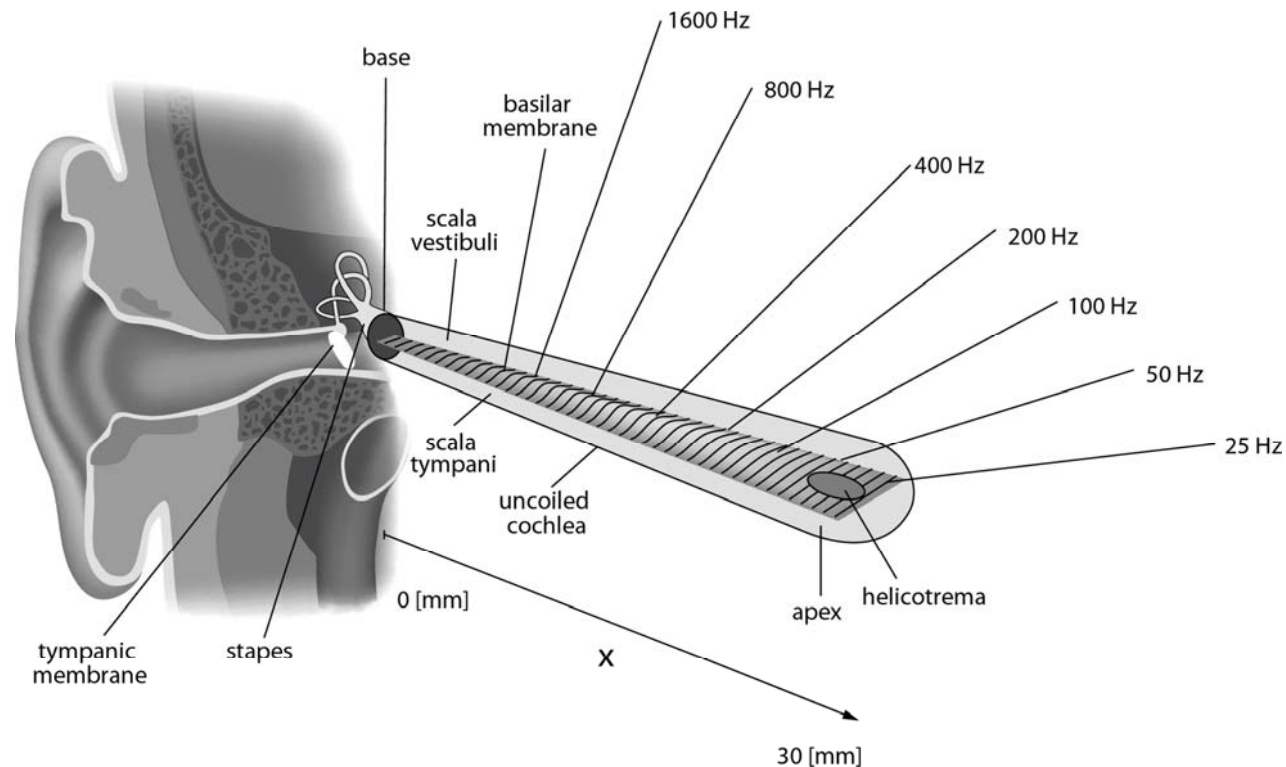
Hanginger esetén

- Fel – le mozgással reagál, egy adott pozícióban a legnagyobb amplitúdóval, de nem az egész hártya ugyanabba az irányba
- Felismerője: Békésy György (1961)
- Utazó hullám



Frekvenciák kódolása

- Csúcs: legalacsonyabb frekvenciák – kb. 20 Hz
- Ezzel ellentétben: alap – kb. 20 KHz



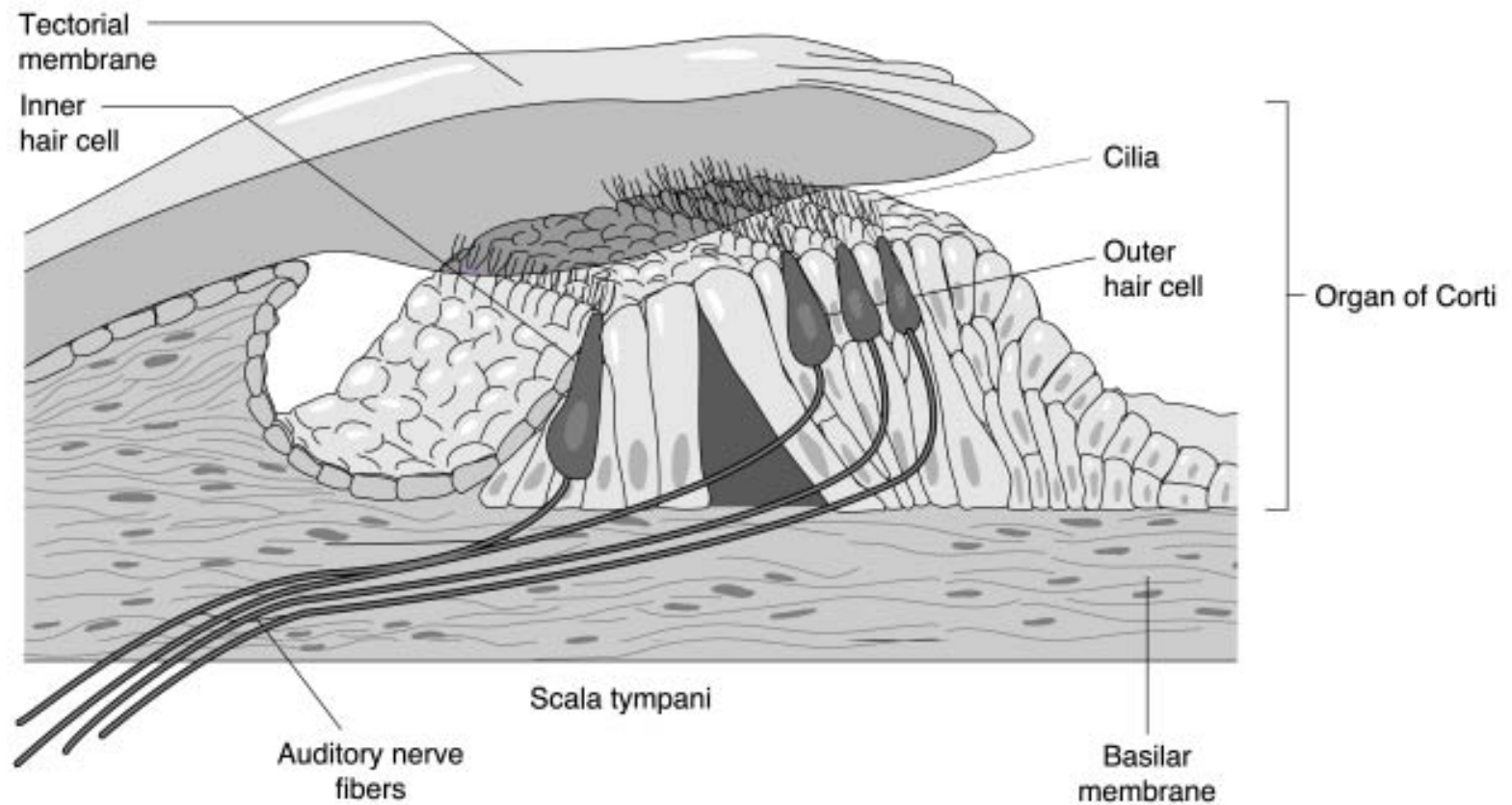
Tonotópia

- Fontos, hogy az összefüggés folyamatos, de nem lineáris!
- Helyette: logaritmikus
- Hang – minden egyes frekvencia komponens egy utazó hullámot hoz létre, mely független a mások által kiváltott hullámoktól
- Az utazó hullám amplitúdója arányos a megfelelő frekvencia-komponens intenzitásával
- Minden egyes utazó hullám csúcskitérését az alaphártya azon részén éri el, mely a releváns frekvencia komponensnek felel meg

A receptorok helye – a Corti-szerv

- A receptor szerv neve: Corti-szerv, benne a szőrsejtekkel és támasztósejtekkel
- Kb. 16000 szőrsejt, melyet kb. 30000 afferens ideg idegez be (agyba infót, mint VIII. agyideg)
- Mind a szőrsejtek, mind az idegek tonotopikusak (a logaritmikus térképpel együtt)

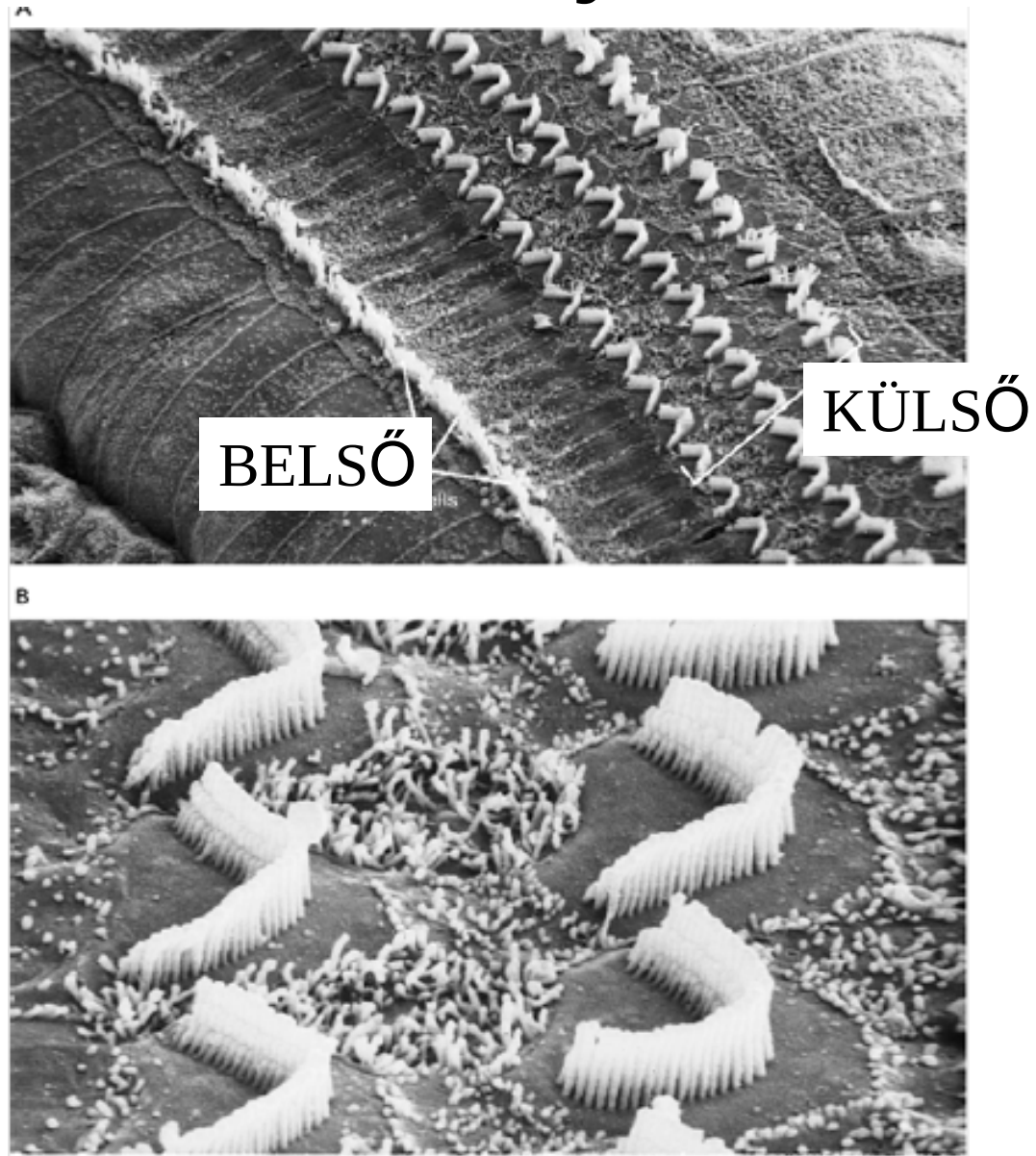
A Corti-szerv



Szűrsejtek

- Belső szűrsejtek
 - Egy sorban helyezkednek el, kb. 3500
- Külső szűrsejtek
 - 3 sorban, kb. 12000, támasztósejtek (Deiters') veszik körül
- Kettő közötti tér: oszlopsejtek

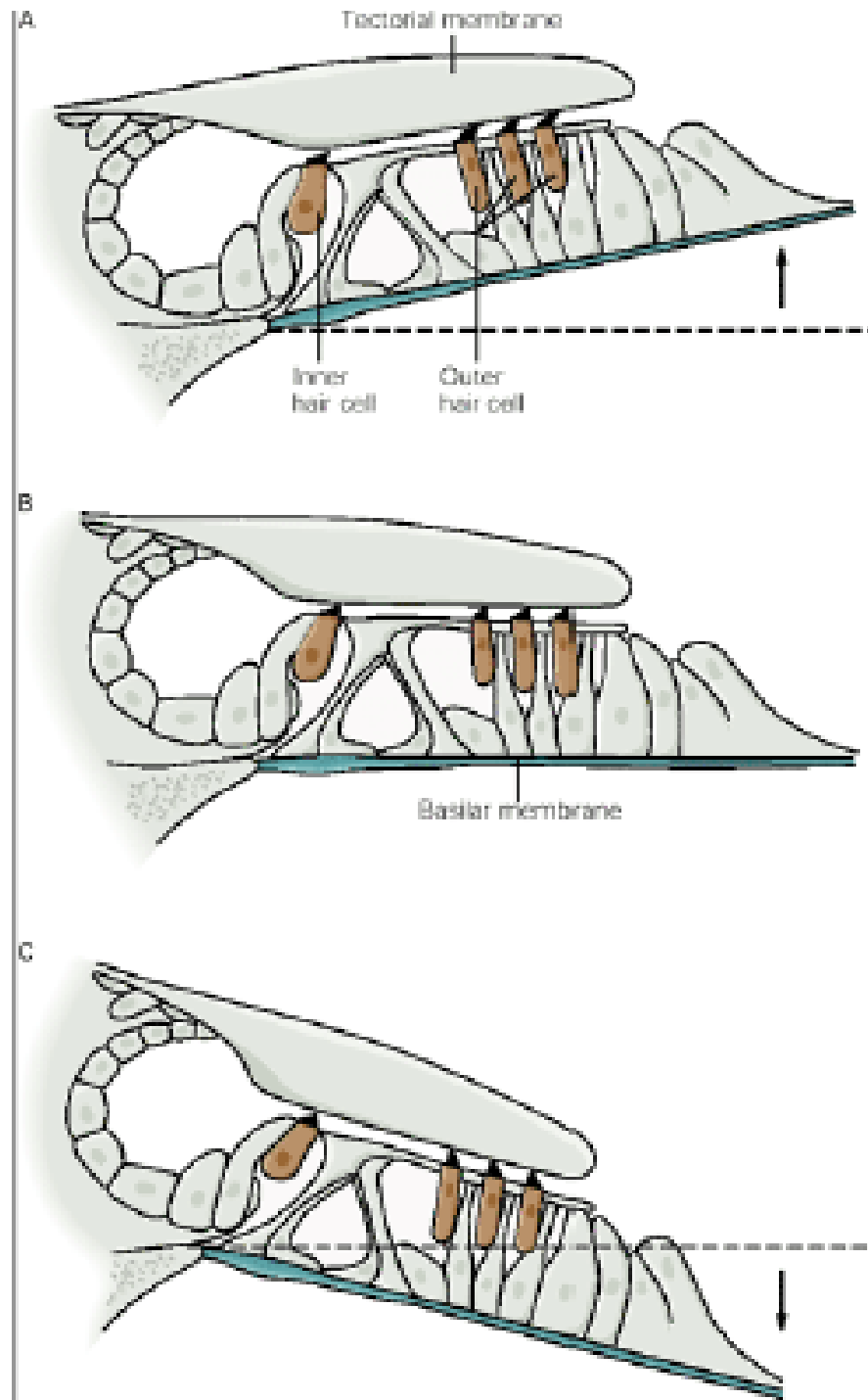
Szőrsejtek



Fedőhártya

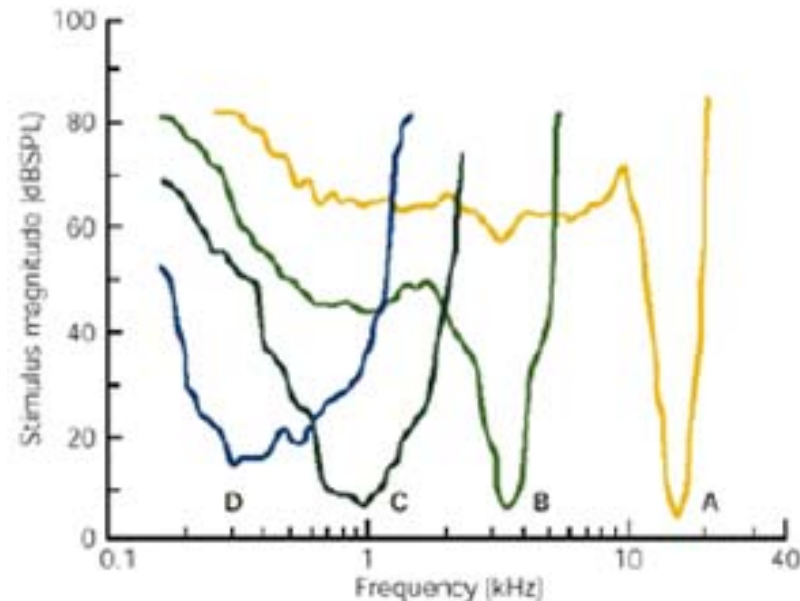
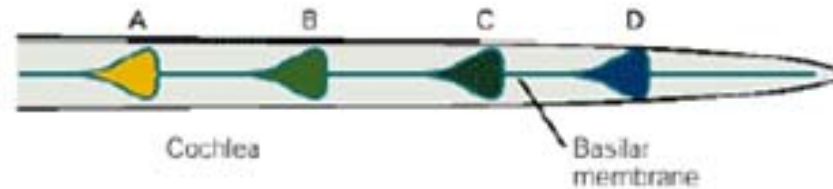
- Alaphártyához kapcsolódó, vele szomszédos hártya
- Alapját az interdentális sejtek rögzítik
- Másik végével a Corti-szerv felé lóg, a külső szőrsejtek leghosszabb stereociliái érintkeznek vele
- A mozgó alaphártya miatt mozog a Corti-szerv is, a fedőhártya elmozdítja a szőröket
- Felfelé mozgás – depolarizáció, lefelé mozgás – hiperpolarizáció

A folyamat



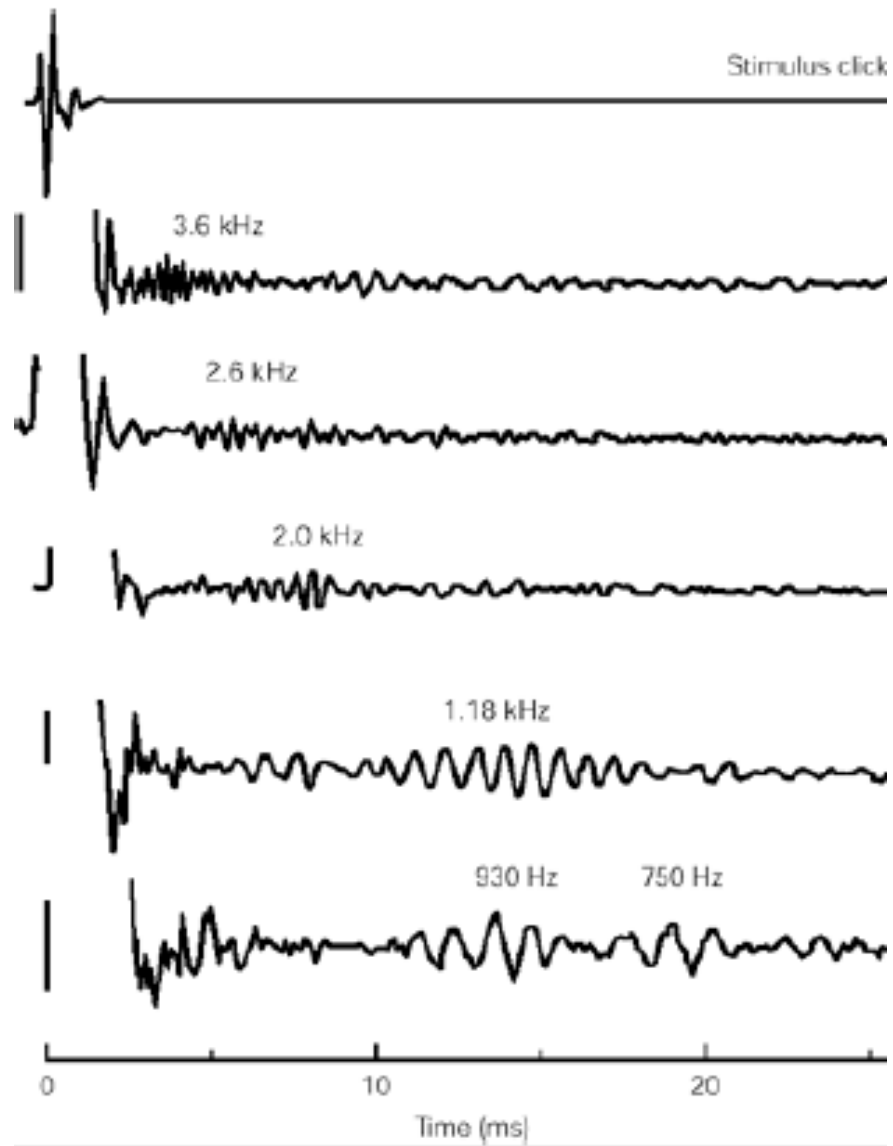
Szőrsejt hangolási görbéje

- Van preferált frekvencia, itt elég minimális erősség



- A csiga érzékenysége nagyon jó (matematikai modellek támasztják alá), a frekvencia-érzékenység túl éles – ezek mind azt sugallják, hogy a csigának aktív szerepe van a hangenergia felerősítésében
- Kísérleti bizonyítékok: alacsony intenzitású hang – a hártya mozgása nagyon érzékeny a frekvenciára – hangolása éles
- Tehát: a csiga egy mechanikus erősítőt tartalmaz

Kiváltott otoacoustic emisszió

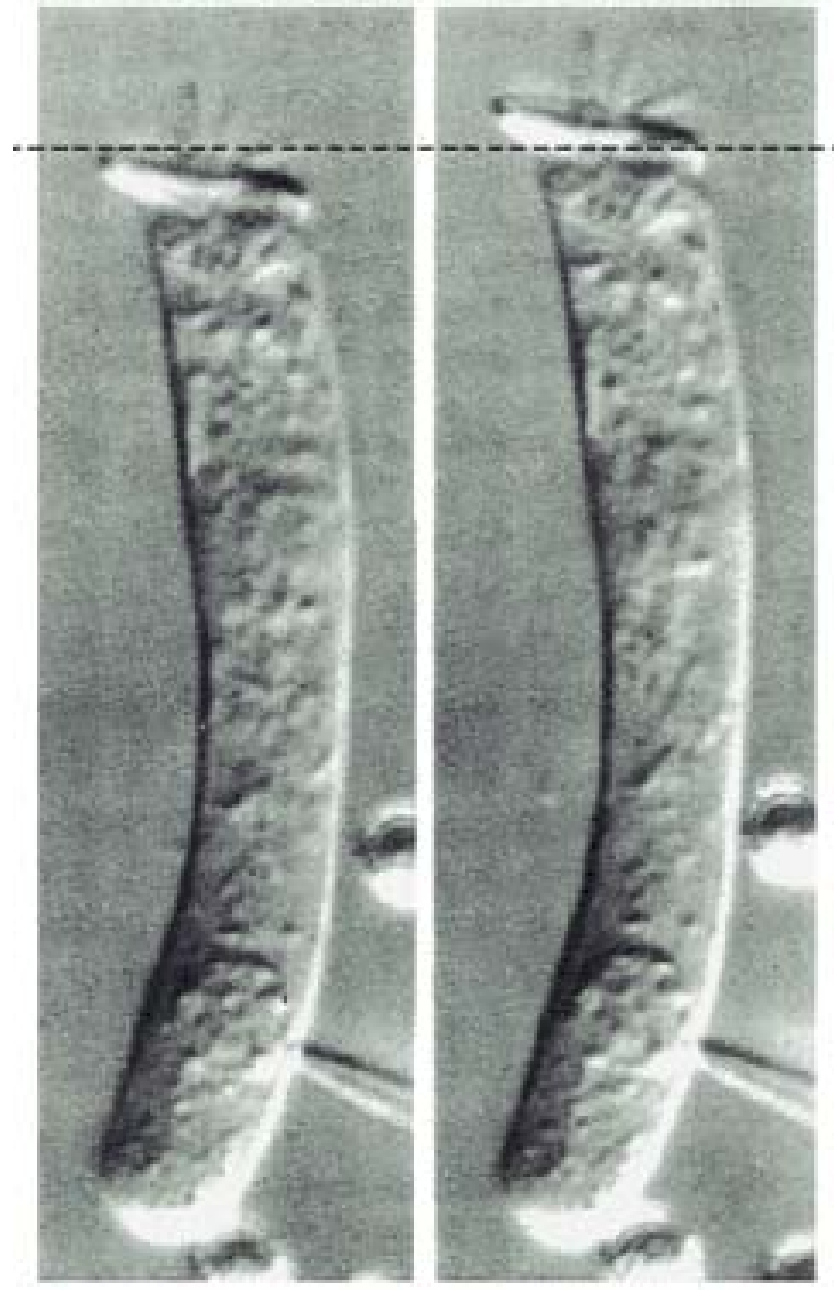


Spontán otoacoustic emisszió

- Külső inger nélkül is kiváltható
- Lényege: a szőrsejtek stereociliái a hang megjelenése után is mozgásban maradnak, visszafelé hullámokat produkálnak
- Amit ebből kapunk: a külső szőrsejtek elsődleges szerepe a jelerősítés!!!

Menete

- Mechanikus ingerből receptorpotenciál generálása, közben a szőrök mérete változik
- Sejttest összehúzódása – depolarizáció, megnövekedése - hiperpolarizáció

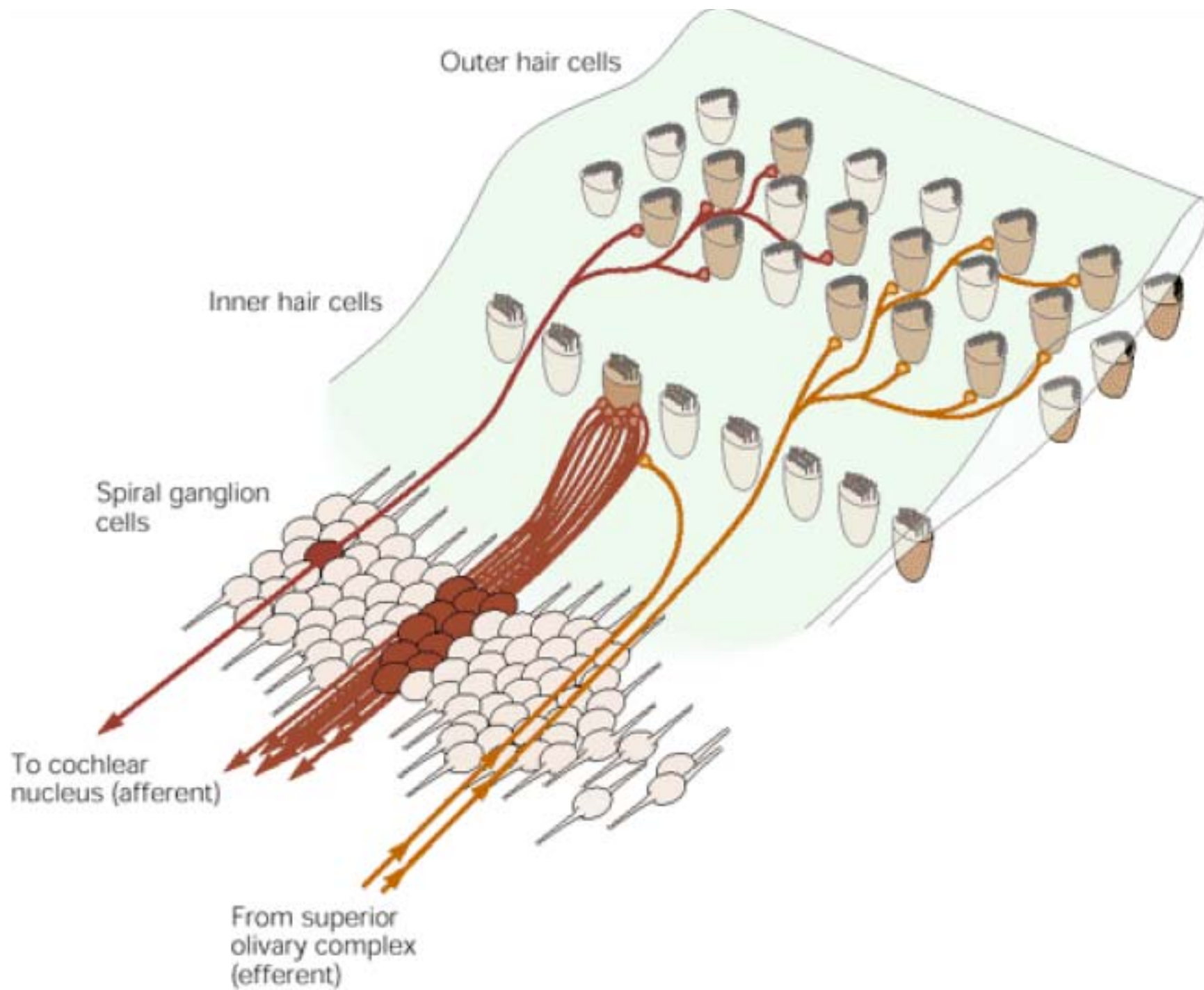


Idegi feldolgozás

- További út: szőrsejtektől neuronokig
- Neuronok: cochlearis ganglionban – spirális ganglionok (csigában lévő spirális struktúrában belül vannak)
- Kb. 30000 ganglionsejt idegzi be a belső fül szőrsejtjeit
- A jelátvitel kémiai jellegű (főként glutamát)

Beidegzés

- Mintázata külső és belső szőrsejt esetén más
- A cochlearis ganglionsejtek legalább 90%-a belső szőrsejten végződik
- Bármely axon csupán 1 szőrsejtet idegez be, de minden belső szőrsejt kimenetét számos idegrostnak továbbítja
- Következmények
 1. Neurális infó főként belső szőrsejtből
 2. Több úton feljuttatott infó
 3. Tonotópia, mely már a postsynapticus belső szőrsejteknél elkezdődik



Mi a helyzet a külső szőrsejtekkel?

- Relatíván kevés ganglionsejt idegzi be őket, ezeknek elágazó termináljai más külső szőrsejtekhez
- Tényleges szerepük, illetve a hozzájárulás aránya nem tisztázott

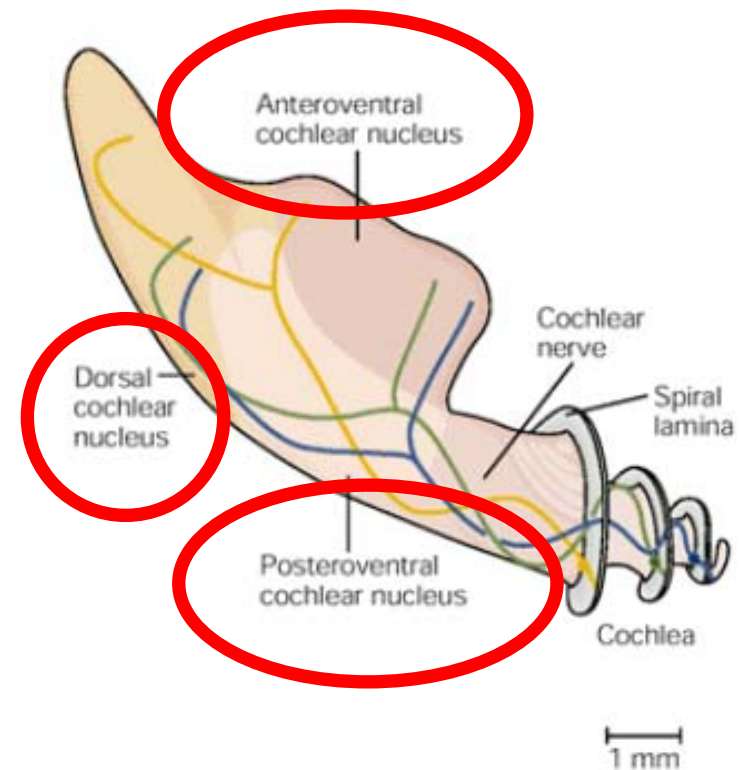
Cochlearis idegszálak

- A cochlearis idegekben az axonok akusztikus érzékenysége a spirális ganglionsejtek beidegzési mintázatát tükrözi
- Bármely axon a leginkább egy adott hangfrekvenciájú ingerlésre érzékeny, ettől való eltérés kivált ugyan választ, de csak nagyobb intenzitás esetén
- Ugyanúgy V-alakú hangolási görbe

- A válaszkésztség küszöbértéke axonról axonra változik
- A legérzékenyebb idegrostok (0 dB körül) – spontán aktivitás nagy arányban, mérsékelt intenzitású ingerlés esetén (40 dB) szaturáló válasz
- Ellentettje: kis spontán aktivitás, magas küszöb, de gradált válasz 100 dB felett
- A neuronális válaszkésztségben való különbségek a belső szőrsejtek és az afferens idegszálak közötti szinapszisoknál ered

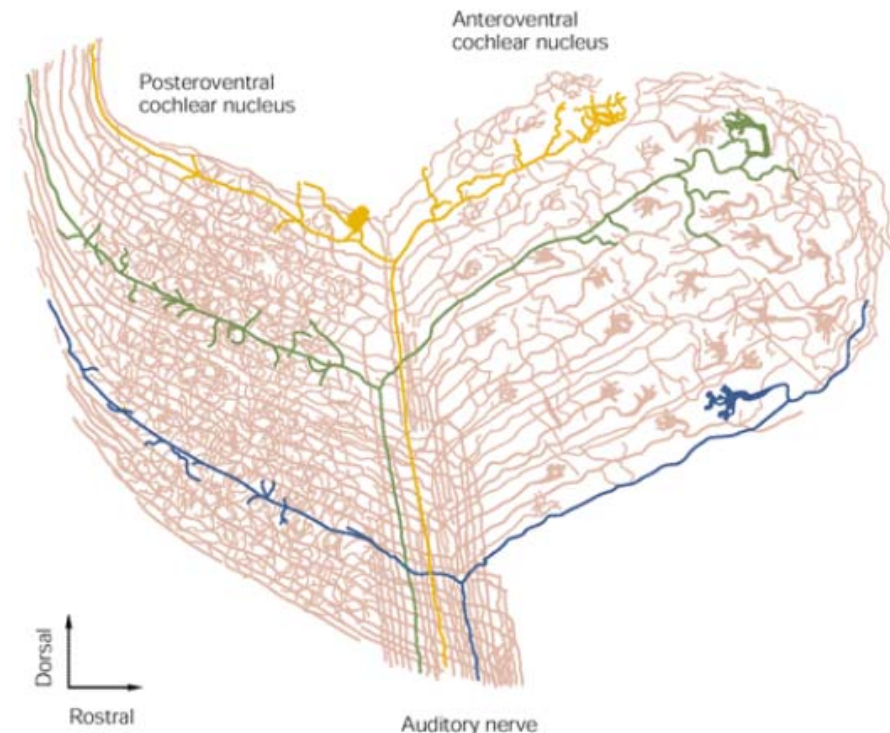
Az út tovább ...

- A VIII. agyideg cochlearis komponensének axonjai a cochlearis mag komplexumában végződnek, mely a híd és a nyúltvelő találkozásánál helyezkedik el
- 3 fő része van
 - Dorzális cochlearis nucleus
 - Anteroventralis cochlearis nucleus
 - Posteroventralis cochlearis nucleus
- Mindhárom tonotopikus szerveződésű



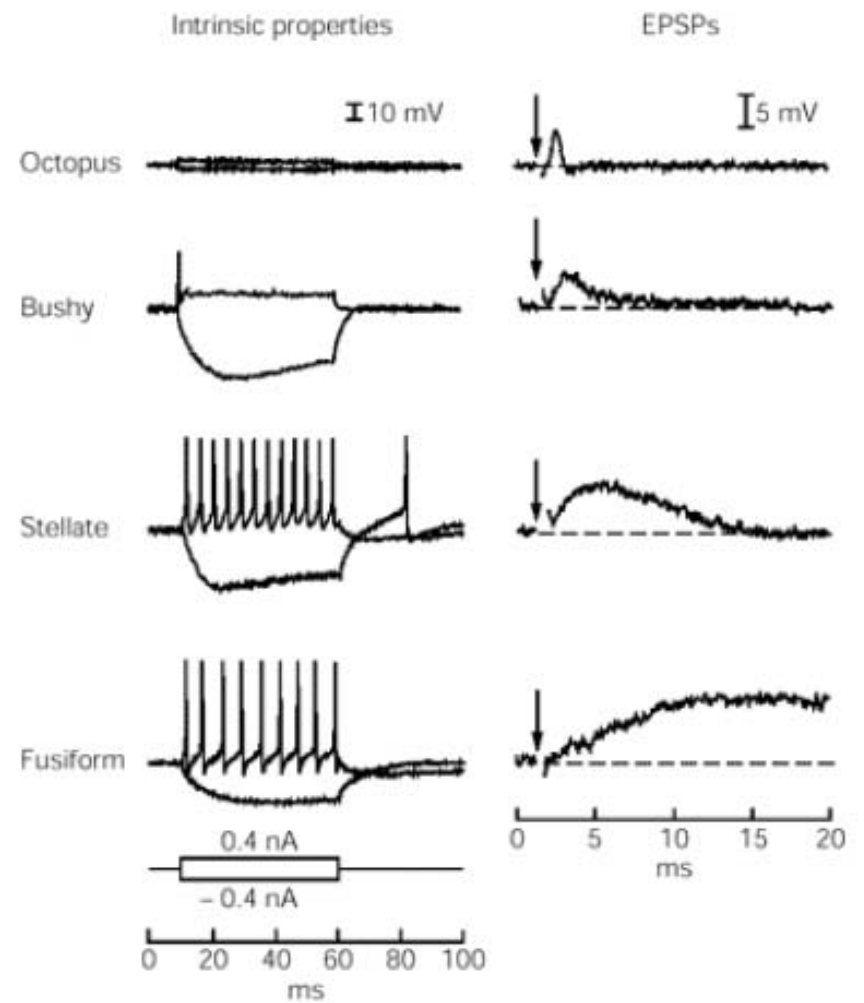
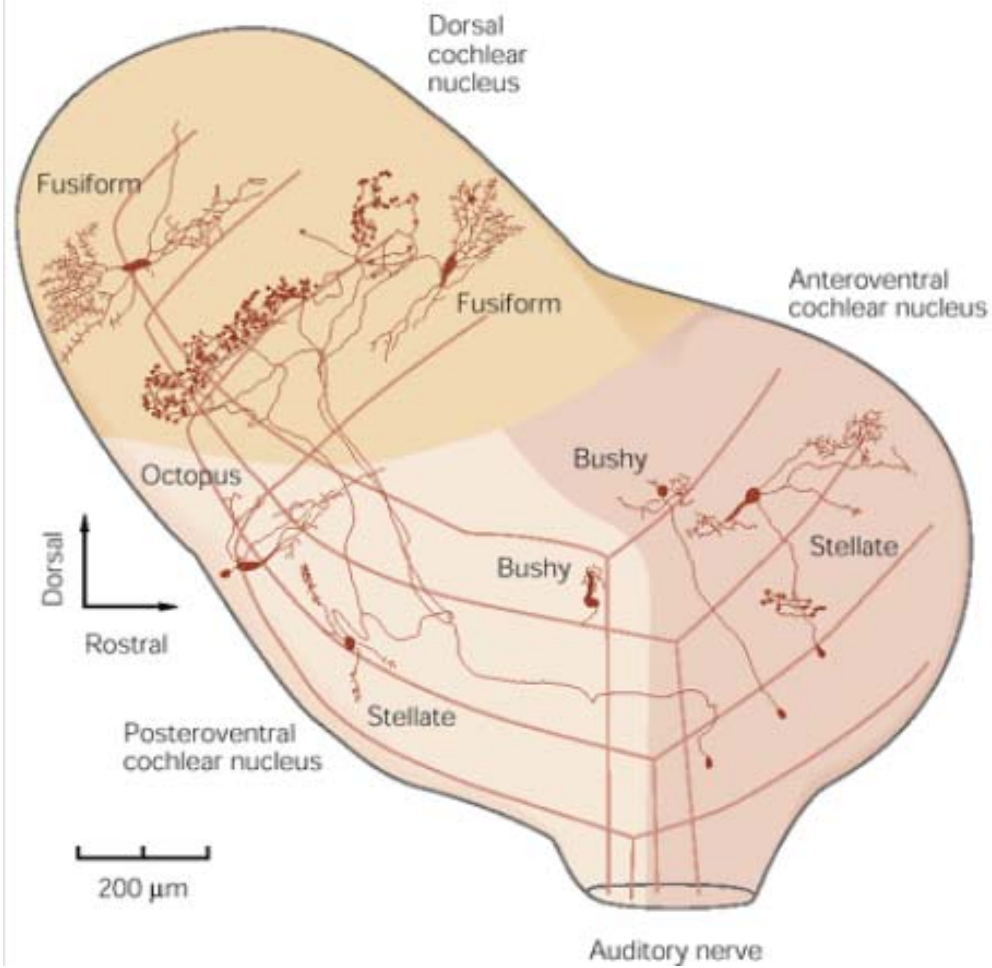
Axonok - elágazódások

- Minden egyes auditoros idegrost elágazódik, amint az agytörzsbe ér
- A felszálló ágak az anteroventralis nucleusban végződnek, a leszállók a dorzálisban és a posteroventralisban



Neuronok

- Dendritikus alakjuk szerint számos fajtájuk van
- Ventrális – 2 fajta
 - Csillagos (stellate) – szimmetrikus dendritek, frekvenciát kódol
 - Bokros (bushy) – a hang kezdetére válaszol – időzítés
- Dorzális
 - Fusiform sejtek – számos frekvenciára EPSP, IPSP – lokalizáció
 - Tuberculoventralis sejt – megkésett gátló kimenet – visszhangra adott válasz elnyomása



Agytörzsi relay nucleusok

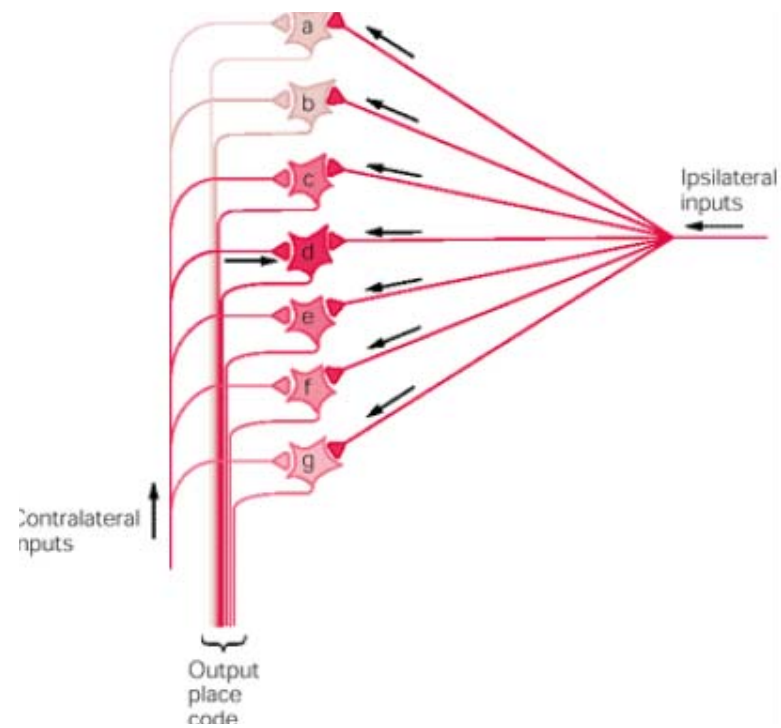
- A különböző nucleusokban lévő sejtek számos agytörzsi nucleusba projektálnak – tehát: rengeteg pálya, ezekből csak egy párra koncentrálnak a könyv
- Három fontos elv
 - Párhuzamos feldolgozás – más vonások más pályán
 - Projekció speciális relay nucleusokhoz, már itt elkezdődik az információ szeparálása
 - Kiterjedt kapcsolat az agytörzs két oldalának struktúrái között

Felfelé vezető utak

- Legkiemelkedőbb kimenet – anteroventrálisból a trapezoid test felé, mely a híd magasságában található – superior oliva complex 3 nucleusa
 - Oliva superior lateralis
 - Oliva superior medialis
 - Trapezoid test nucleus
- Bemenetet kap a trapezoid test a posteroventrálisból is – oliva superior lateralis
- A dorzális nem projektál a híd szintjére

Oliva superior medialis

- Lokalizációban fontos szerep
- Két fül közötti időkülönbség
– maximuma: 700 μ s
- Az oliva superior medialis már 10 μ s-nyit meg tud különböztetni
- Csak akkor reagál, ha mindkét fülből kap AP alapú bemenetet
- Hangeredet-lokációs térkép



Oliva superior lateralis

- Szintén a lokalizációban érintett, de kulcsingerként az intenzitást alkalmazza
- Azonos oldali egyenesen oda megy, ellenoldali a trapezoid test nucleuson keresztül
- Tonotopikus szerveződésű
- A két információ „súlya”: alacsony frekvencia esetén időkülönbség, magas frekvencia esetén intenzitás-különbség

Az út tovább ...

- Lemniscus lateralis on keresztül középagy
- Néhányan a lemniscus lateralis nucleusaiban végződik, de a legtöbb – középagy colliculus inferior

Colliculus inferior

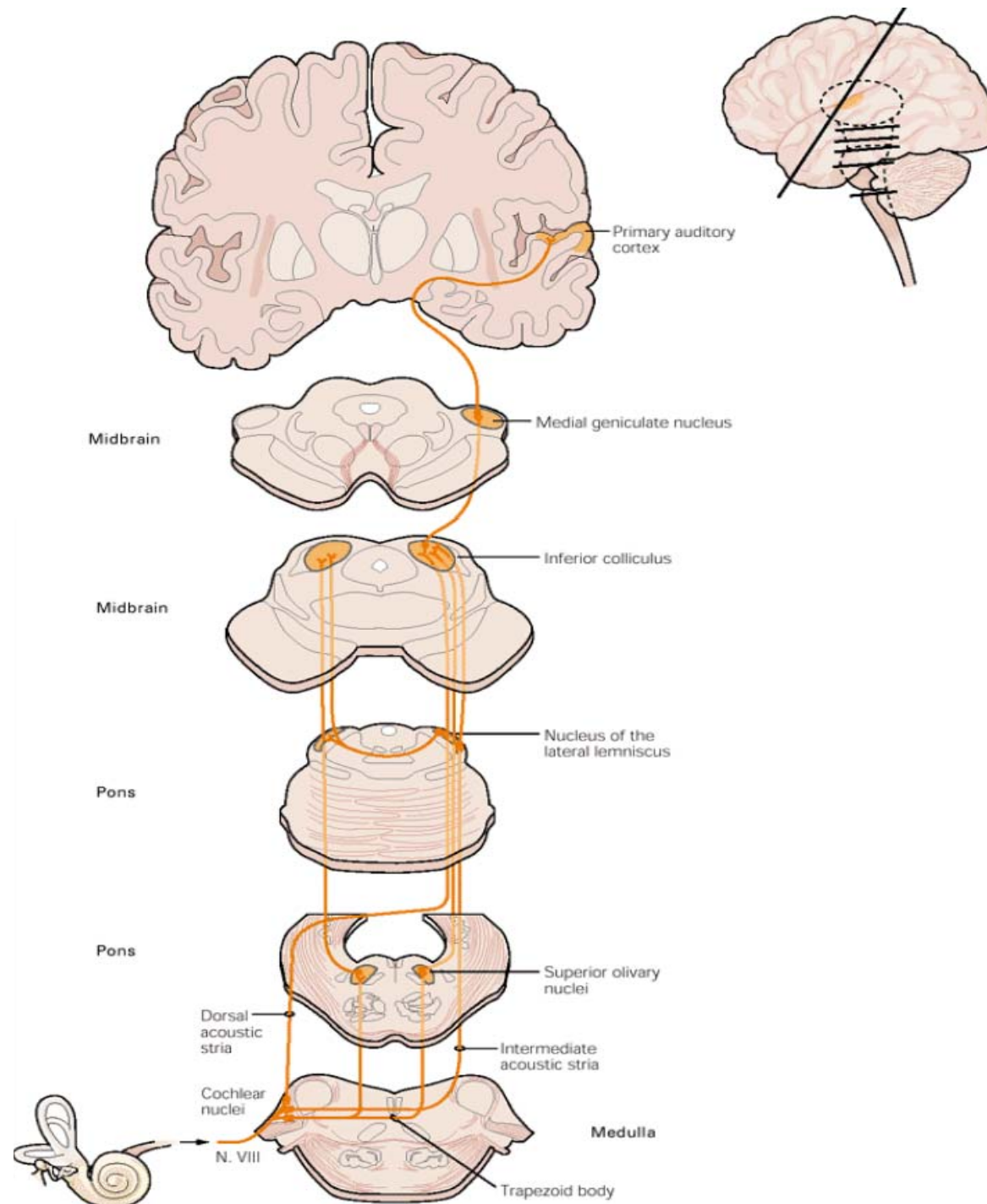
- Két fő része van
 - Dorzális rész
 - 4 neuron-réteg – auditoros és szomatoszenzoros inputot kapnak
 - Funkcionális jelentősége???
 - Ezalatt centrális nucleus
 - Tonotopikus
 - Nagyon komplex
 - A lemniscus lateralist alkotó projekciók mindegyikéből jön ide input

Thalamus - CGM

- Corpus geniculatum mediale
- Legalább 3 alosztálya van, legtöbbet tanulmányozott: ventrális/laterális nucleus (principal)
 - Bemenet a centrális nucleusból a colliculus inferior brachiumán keresztül
 - Tonotopikus (frekvencia alapján)
- A CGM többi része multimodális

A kéreg

- Temporális lebeny dorzális felszíne
- Principal nucleusból főként A1-be (Br41-42)
- Tonotópia (alacsony – rostrálisan, magas – caudalisan)
- 2 típusú váltakozó zónára osztható fel
 - „összeadás” oszlopok – mindkét fülből, bár az ellenoldali erősebb
 - „elnyomás” oszlopok – egyik oldal serkenti, másik gátolja

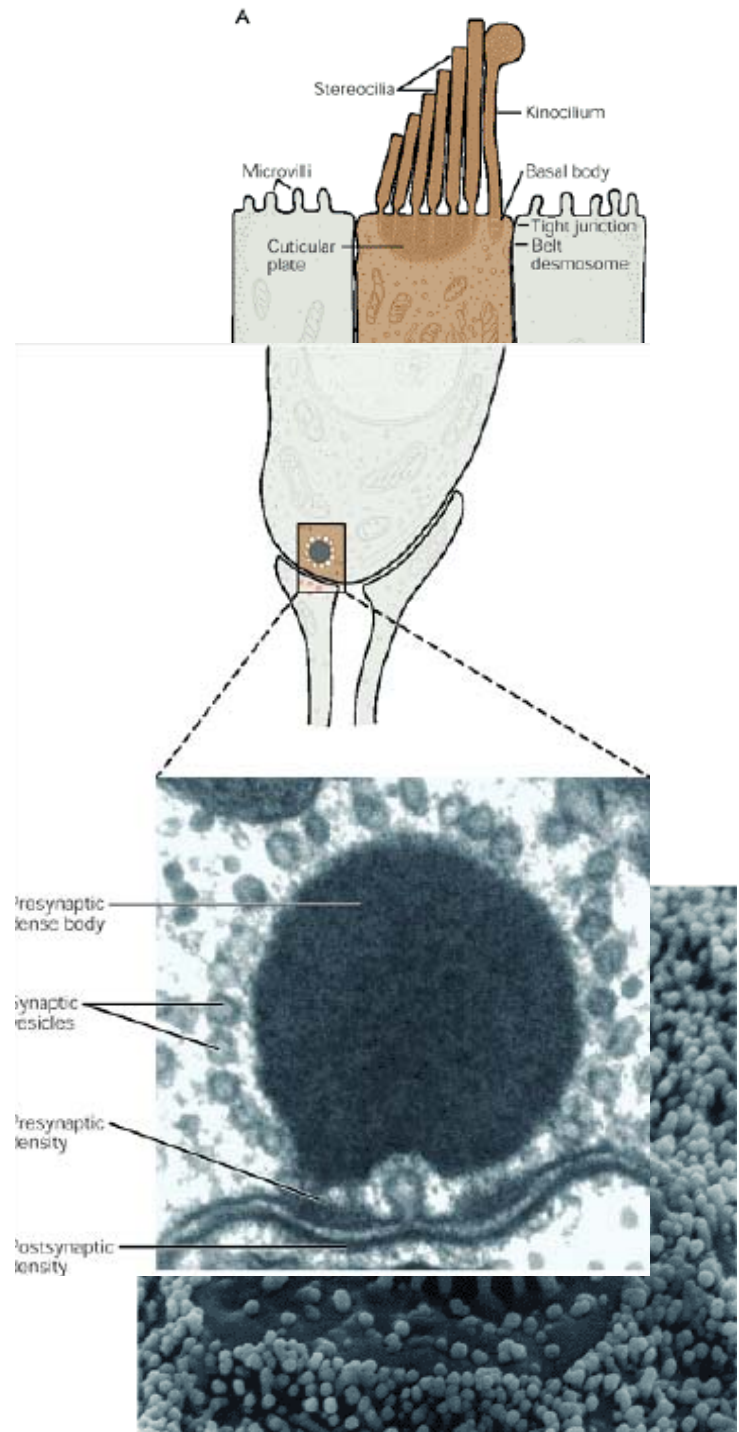


A következő csapás övön alul ...

Szenzoros transzdukció

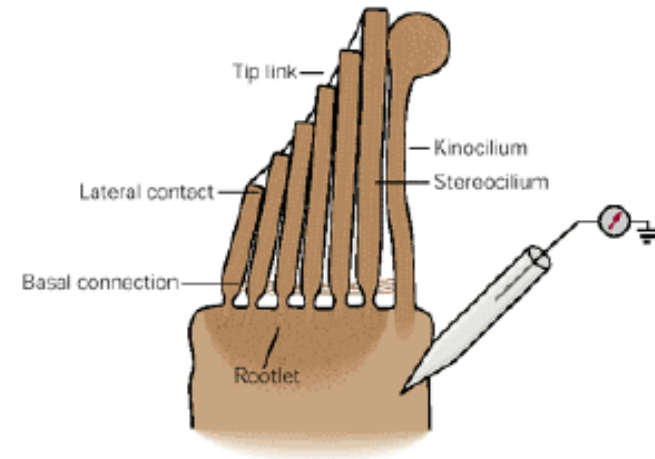
A szőrsejt

- Oszlopszerű alak dendrit és axon nélkül
- Csúcsánál támasztósejtekkel kapcsolat
- Endolymphában „úszik”, ez tartja elkülönítve az extracelluláris folyadéktól egy tight junction-on keresztül
- Emellett egy köztes junction – belt desmosome
- Szőrköteg – hatszög mintázatban stereociliumok
- Stereocilium – merev henger, váza aktin filamentum köteg, melyet protein fibrinek kötnek össze, magját egy plazmamembrán csőtokja fedi be



Stereocilium

- Hosszának legnagyobb részében átmérője fix
- A végén azonban elkeskenyedik
- Emiatt az aktin filamentumok száma is drasztikusan lecsökken
- Ezek egy gyökerecskét (rootlet) alkotnak, egy aktin filamentumokból álló hálóba horgonyozva
- Fejlődésük során legelső – kinocilium, mely a transzdukcióhoz nem szükséges

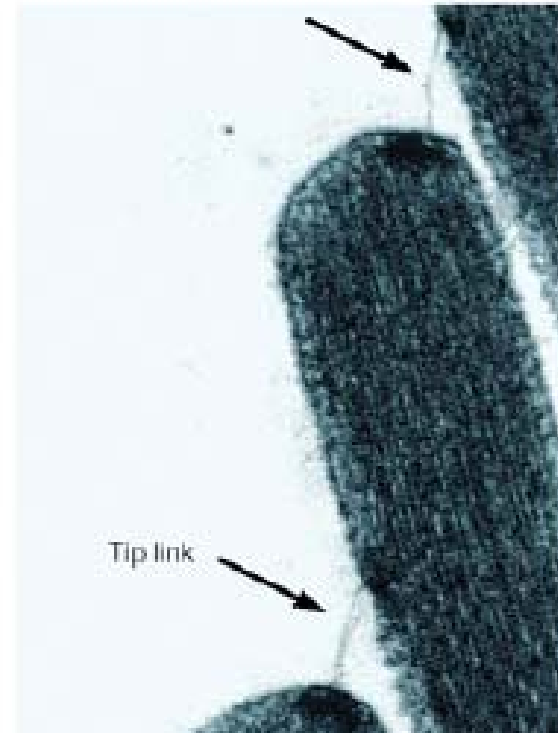
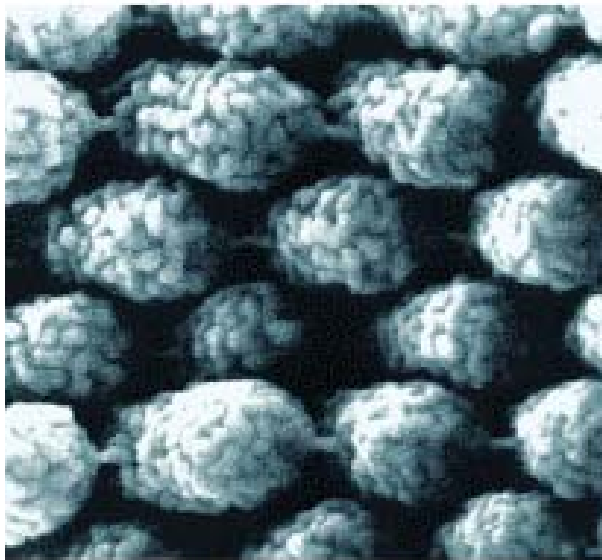


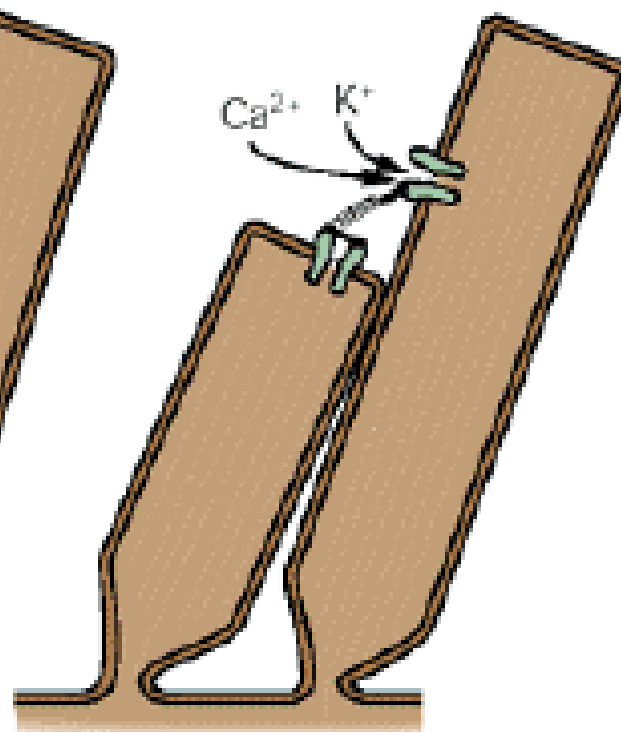
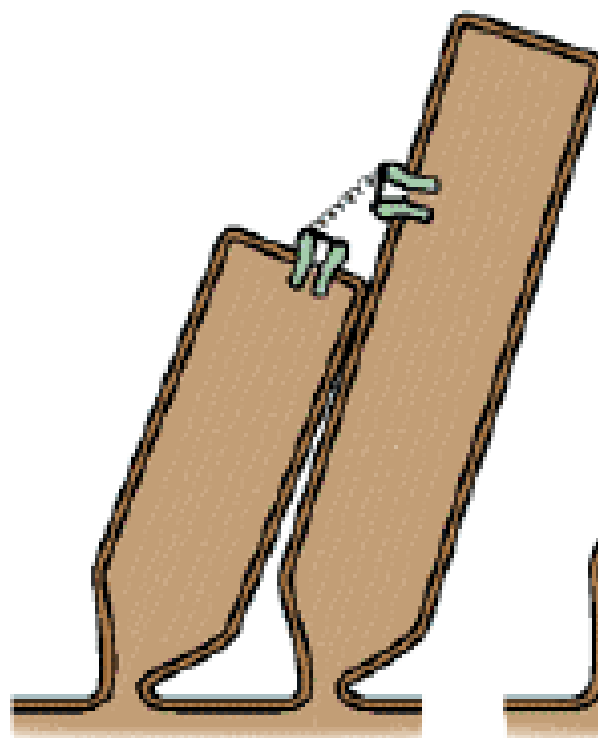
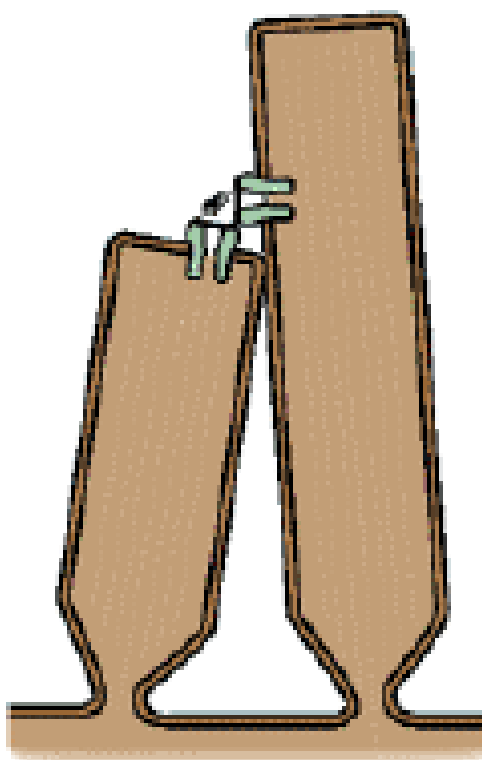
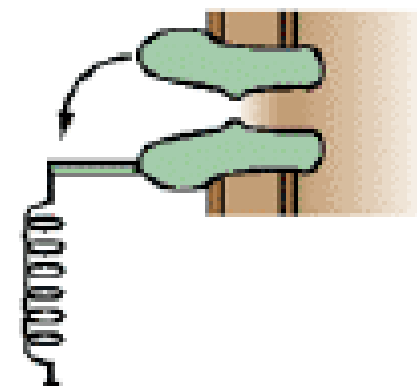
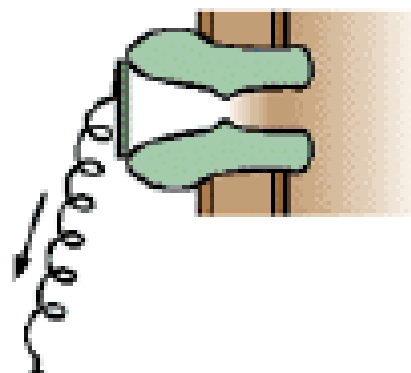
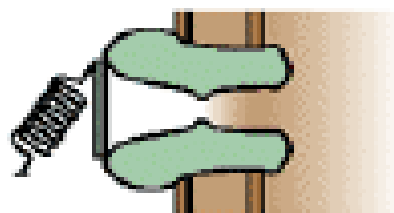
A folyamat

- Mechanikus ingerlés – receptor-potenciál – ioncsatornák kapuzása
- A szőrsejt válasza függ: inger erőssége és ingerlés iránya
- Alapállapot: a csatornák kb. 15%-a nyitva
- Pozitív inger – magas sarka felé tér ki – depolarizáció
- Negatív inger – rövid sarka felé – hiperpolarizáció
- A RP gradált – amplitúdó emelkedésekor a RP nagyobb lesz, míg el nem éri a szaturáció maximumát
- Legfontosabb kation-áram: K^+ -áram, max koncentrációja az endolymphában – antibiotikumok nagy mennyiségben blokkolják

Folytatása ...

- Amiben nagyon egyedi: a csatornákat a szőrsejtben lévő elasztikus struktúrák feszülése és annak változása nyitja illetve zárja
- Az egyes stereociliumok tip linkekkel vannak összekötve, ezek kapuzzák az ioncsatornákat



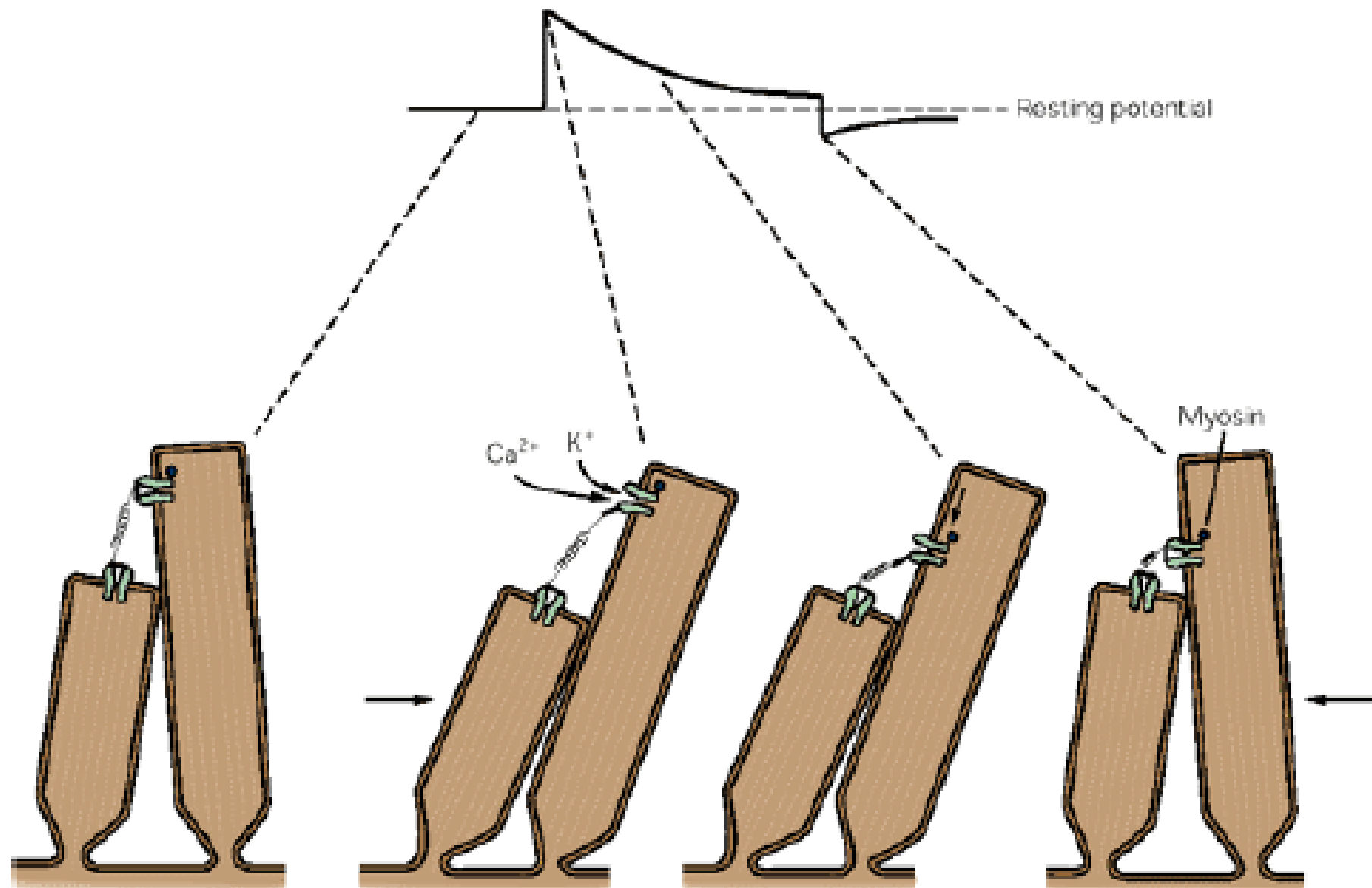


Ami még más ...

- Nincs second messenger, ami felerősítene illetve visszacsatolna
- Miért jó, hogy itt nincs?
- Gyorsabb lesz a válasz
- Emiatt jó lokalizáció (10 μ s ... lásd hamarabb)
- DE: a válaszkészség nem konstans
- Hosszantartó ingerlés hatására adaptáció!

Adaptáció

- Resetting mechanizmus
- Időkonstansa 25 ms – lassabb lényegesen, mint a transzdukció
- Mértéke a Ca^{2+} koncentrációval növekszik
- A „rekalibráció” myozin segítségével történik, gyakorlatilag a csatorna mozgatásával ezt az új helyzetet definiálja alapállapotnak



Irodalom

- Kandel – Schwartz – Jessell: Principles of neural science
 - 30. – 31. fejezet