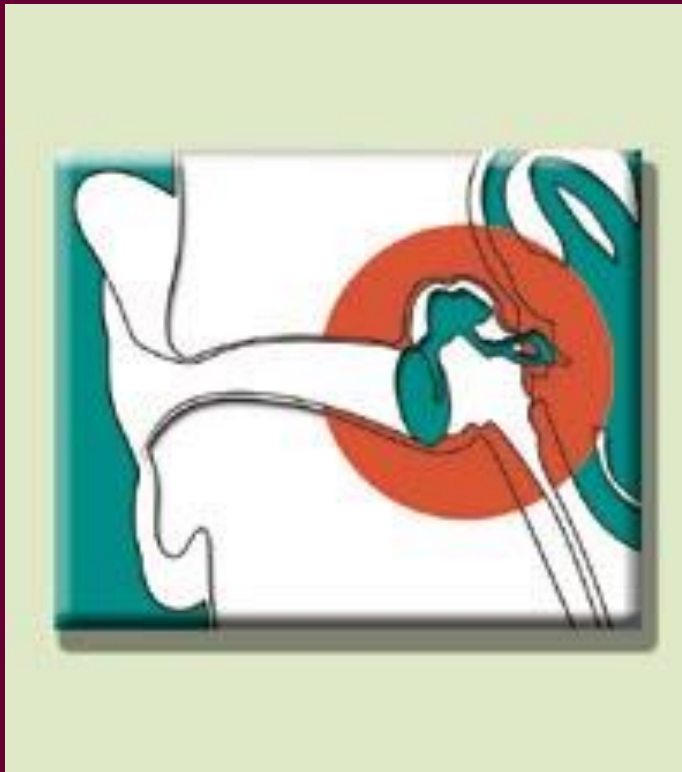


# Přednášky z lékařské biofyziky

Biofyzikální ústav LF MU v Brně



**Úvod do  
biofyziky  
receptorů**

**Biofyzika  
sluchového  
analyzátoru**

# Obsah přednášky

- Obecné poznatky o smyslovém vnímání
- Vnímání zvuku
  - Vlastnosti zvuku
  - Biofyzikální funkce ucha
- Biofyzikální funkce vestibulárního systému

# Biofyzika vnímání

Obecná charakteristika smyslového vnímání

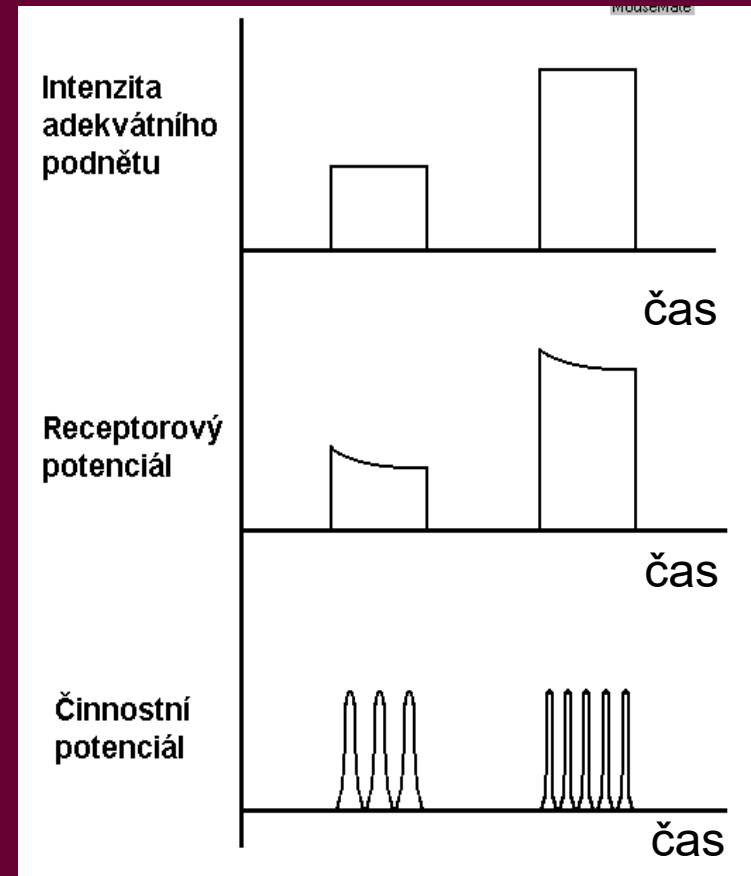
- **Smyslové vnímání** - příjem a uvědomování si informací
  - a) z vnějšího prostředí: Zrak, sluch, čich, chuť a hmat
  - b) z nitra organismu: informace o poloze, aktivním i pasivním pohybu (vestibulární aparát, nervová zakončení v muskuloskeletálním systému), změnách složení vnitřního prostředí a bolest.
- Komplexní pocity: hlad, žízeň, únava aj.

# Rozdělení receptorů

- **a) Podle druhu působící energie:**
  - mechanoreceptory
  - termoreceptory
  - chemoreceptory
  - fotoreceptory
- adekvátními a neadekvátní podněty
- **b) Podle složitosti:**
  - volná nervová zakončení (bolest)
  - smyslová tělíska (senzitivní nervové vlákno + vazivový obal)
  - smyslové buňky (součásti smyslových orgánů)
- - **specificita**
- **nespecifické:** receptory bolesti - reagují na různé podněty.
- **c) Dle místa vzniku podnětů a způsobu jejich zachycení:**
  - telereceptory (zrak, sluch, čich),
  - exteroceptory (z povrchu organismu - kožní cití, chuť),
  - proprioceptory, ve svalech, šlachách a kloubech - informují o poloze i pohybu těla,
  - interoceptory - ve vnitřních orgánech
- Biofyzika považuje receptory především za měniče energie.

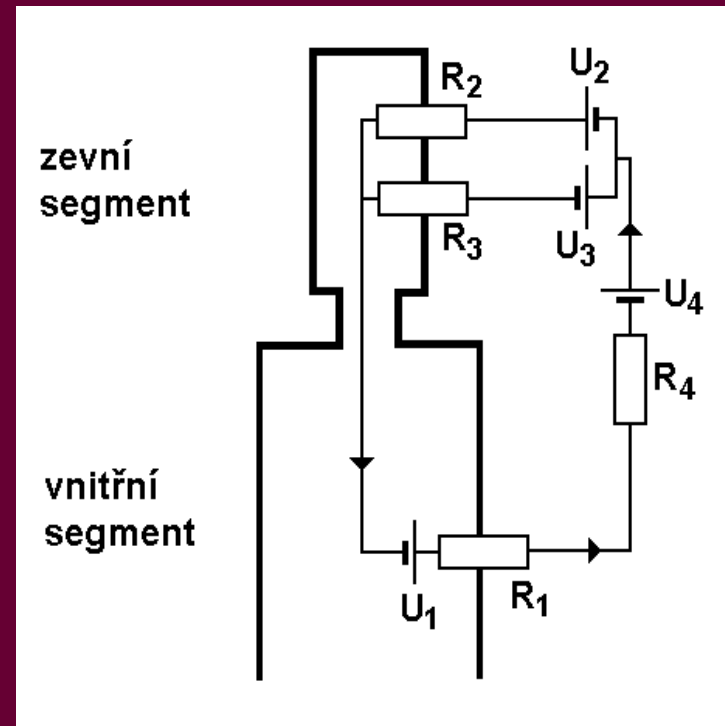
# Převodní funkce receptorů

- Primární odpověď smyslové buňky na podnět: **receptorový potenciál** (budivý, generátorový) **proud** úměrný intenzitě podnětu. Receptorový potenciál spouští **činnostní potenciál**.
- Amplitudová modulace receptorového potenciálu se mění ve frekvenčně modulovaný akční potenciál.
- **Vyšší intenzita podnětu (receptorového potenciálu) vyvolává četnější akční potenciály.**



# Smyslová buňka

- Typická smyslová buňka má dva segmenty:
- **Vnější segment** odpovídá adekvátnímu podnětu (mikroklky, cilie, mikrotubulární nebo lamelární struktury).
- **Vnitřní segment** (mitochondrie)
- Elektrické pochody v receptorové buňce:
- Zdroj napětí je v membráně vnitřního segmentu - **difuzní potenciál  $K^+$**  (velikost  $U_1$ , rezistance  $R_1$  je dána permeabilitou pro příslušné ionty).
- Depolarizace smyslové buňky je způsobena vzrůstem membránové permeability pro kationty ve vnějším segmentu ( $R_2, U_2; R_3, U_3$ ). V průběhu depolarizace tok kationtů směřuje z vnějšího do vnitřního segmentu.
- V podpůrných buňkách jsou přídatné zdroje napětí ( $U_4, R_4$ ).



# Biofyzikální vztah podnětu a počítku

- **Intenzita počítku roste s intenzitou podnětu nelineárně.** Dříve se soudilo, že intenzita počítku je úměrná logaritmu intenzity podnětu (*Weberův-Fechnerův zákon*). Intenzita počítku je  $I_R$  a intenzita podnětu  $I_S$ , pak:

$$I_R = k_1 \log I_S.$$

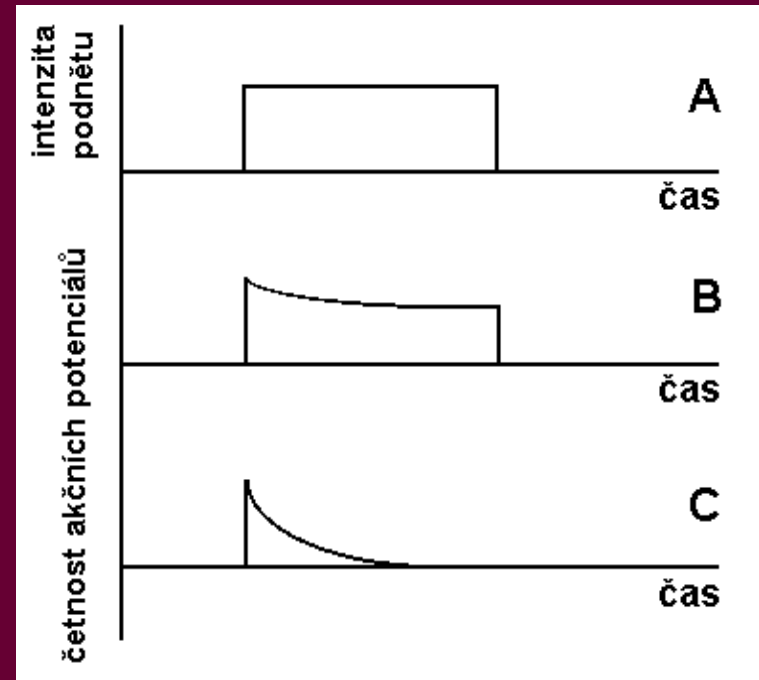
- Dnes vztah vyjadřujeme mocninou (*Stevensův z.*):

$$I_R = k_2 I_S^a,$$

- $k_1$  a  $k_2$  - konstanty,  $a$  - exponent specifický pro smyslovou modalitu (číslo menší než jednička pro zvuk a světlo, někdy ale větší – např. vnímání tepla, hmatové stimuly).
- **Vztah počítku k hraničním intenzitám podnětu lépe vyjadřuje zákon mocniny.**

# Adaptace

- Je-li intenzita podnětu déle konstantní, snižuje se u většiny receptorů dráždivost. Tento jev se nazývá **adaptace**. Stupeň adaptace je pro různé receptory různý. U vnímání bolesti je adaptace nízká - ochranný mechanismus.



## Průběh adaptace

A - podnět,

B - receptor s pomalou adaptací,

C - receptor s rychlou adaptací



# Biofyzika vnímání zvuku

- **Fyzikální vlastnosti zvuku:**
- **Zvuk** - mechanické kmity pružného prostředí,  $f = 16$  až  $20\ 000$  Hz.
- Pružným prostředím se šíří jako kmity částic kolem rovnovážných poloh. V plynu a kapalině se šíří jako **vlnění podélné** (střídavé zhušťování a zředování částic), v pevných látkách též jako vlnění příčné.
- Rychlost šíření - **fázová rychlost (c)** závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, především na pružnosti a teplotě.
- Součin  $\rho \cdot c$ , kde  $\rho$  je hustota prostředí, je **akustický vlnový odpor (akustická impedance)**. Poměr akustických impedancí dvou prostředí určuje velikost odrazu při dopadu zvukové vlny na jejich rozhraní.
- **Zvuk: jednoduchý** (čistý) nebo **složený**. Složené zvuky: **hudební** (periodický charakter) a **nehudební** - hluk, šum (neperiodický charakter).

# Hlavní znaky zvuku: **výška, barva a síla**

- **Výška** je určena kmitočtem.
- **Barva** zastoupením harmonických kmitočtů ve spektru.
- **Síla**, přesněji **intenzita** - množství energie prošlé za 1 s plochou  $1 \text{ m}^2$ , kolmou ke směru šíření vlnění. Intenzita zvuku je **akustický měrný výkon** [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

# Hladina intenzity

- Srovnání intenzit dvou zvuků umožňuje veličina zvaná **hladina intenzity**. Vzhledem k velkému rozpětí slyšitelných intenzit ( $>10^{12}$ ) byl zaveden logaritmický poměr s jednotkou bel (B), v praxi decibel (dB). **Hladina intenzity  $L$ :**

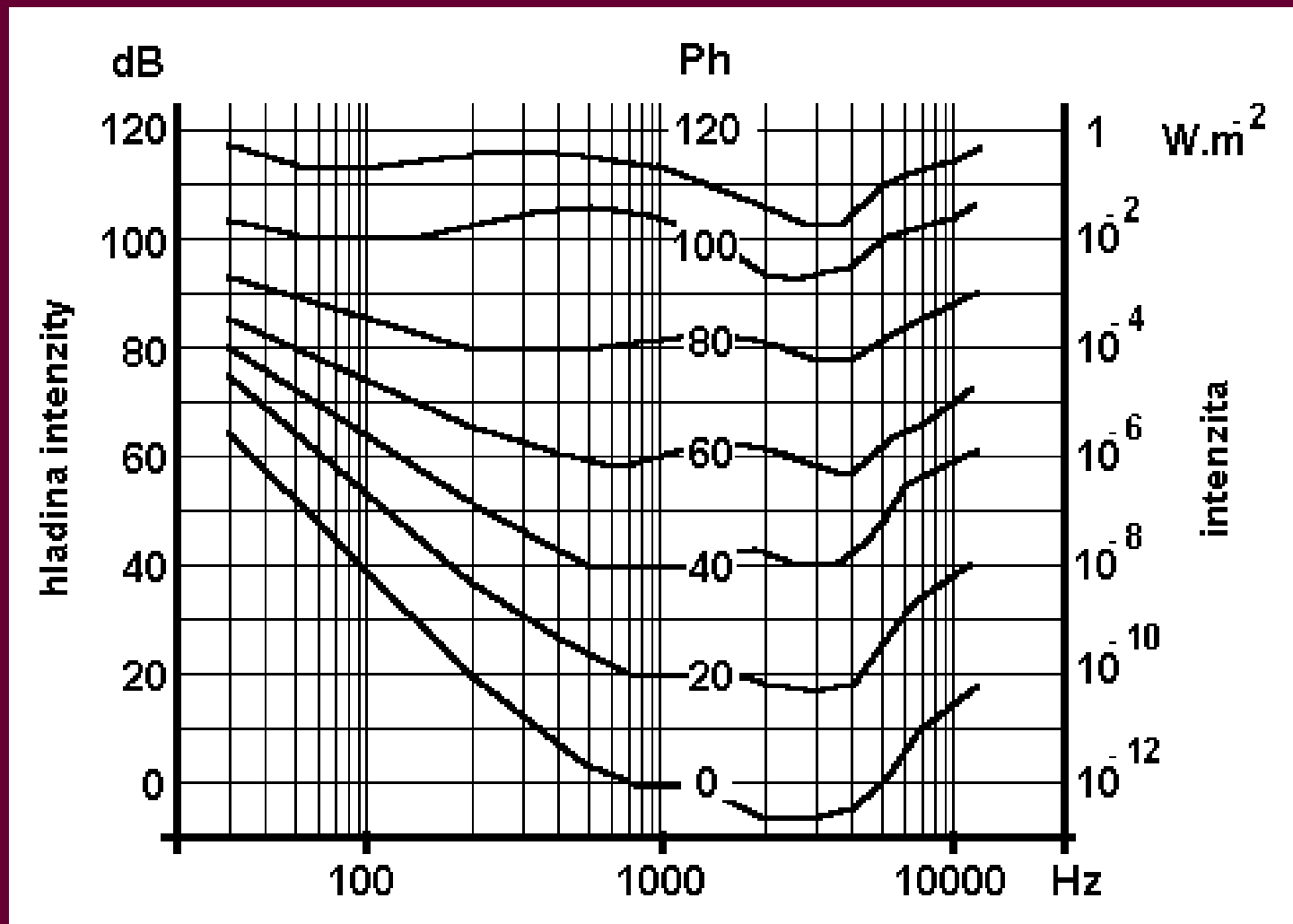
$$L = 10 \cdot \log(I/I_0) \quad [\text{dB}]$$

- Referenční intenzita zvuku (prahová intenzita tónu 1 kHz)  $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (referenční akustický tlak  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ ).

# Hlasitost, sluchové pole

- **Hlasitost** je subjektivně vnímaná intenzita přibližně úměrná logaritmu intenzity zvukového podnětu. Ucho je **nejcitlivější** pro frekvence 1-5 kHz.
- **Jednotka hlasitosti: 1 son.** Odpovídá při naslouchání oběma ušima počitku vyvolanému referenčním tónem o 40 dB.
- **Hladinu hlasitosti udáváme ve fónech (Ph).** 1 fón odpovídá hladině intenzity 1 dB pro referenční tón. Pro jiné tóny se hladina hlasitosti od hladiny intenzity liší.
- 1 Ph je nejmenší rozdíl hlasitosti, který ucho dovede rozlišit. Pro tón 1 kHz odpovídá zvýšení hlasitosti o 1 Ph zvýšení fyzikální intenzity o 26%.
- Spojíme-li v grafu prahové intenzity slyšitelných frekvencí, dostaneme **nulovou izofónu** (křivku stejné hlasitosti).
- Pro každou frekvenci lze najít intenzitu, při níž pocit zvuku přechází v bolest - **práh bolesti**. Oblast hladin intenzity mezi prahem slyšení a prahem bolesti je **sluchové pole**.

# Sluchové pole



# Hladina hlasitosti některých zvuků



**Druh zvuku**

**Šepot**



**ticho v lese**

**normální hovor**



**pouliční hluk**

**Sbíječka**



**tryskový motor**

**Hladina hlasitosti  
[Ph]**

**10 - 20**

**20 - 30**

**40 - 60**

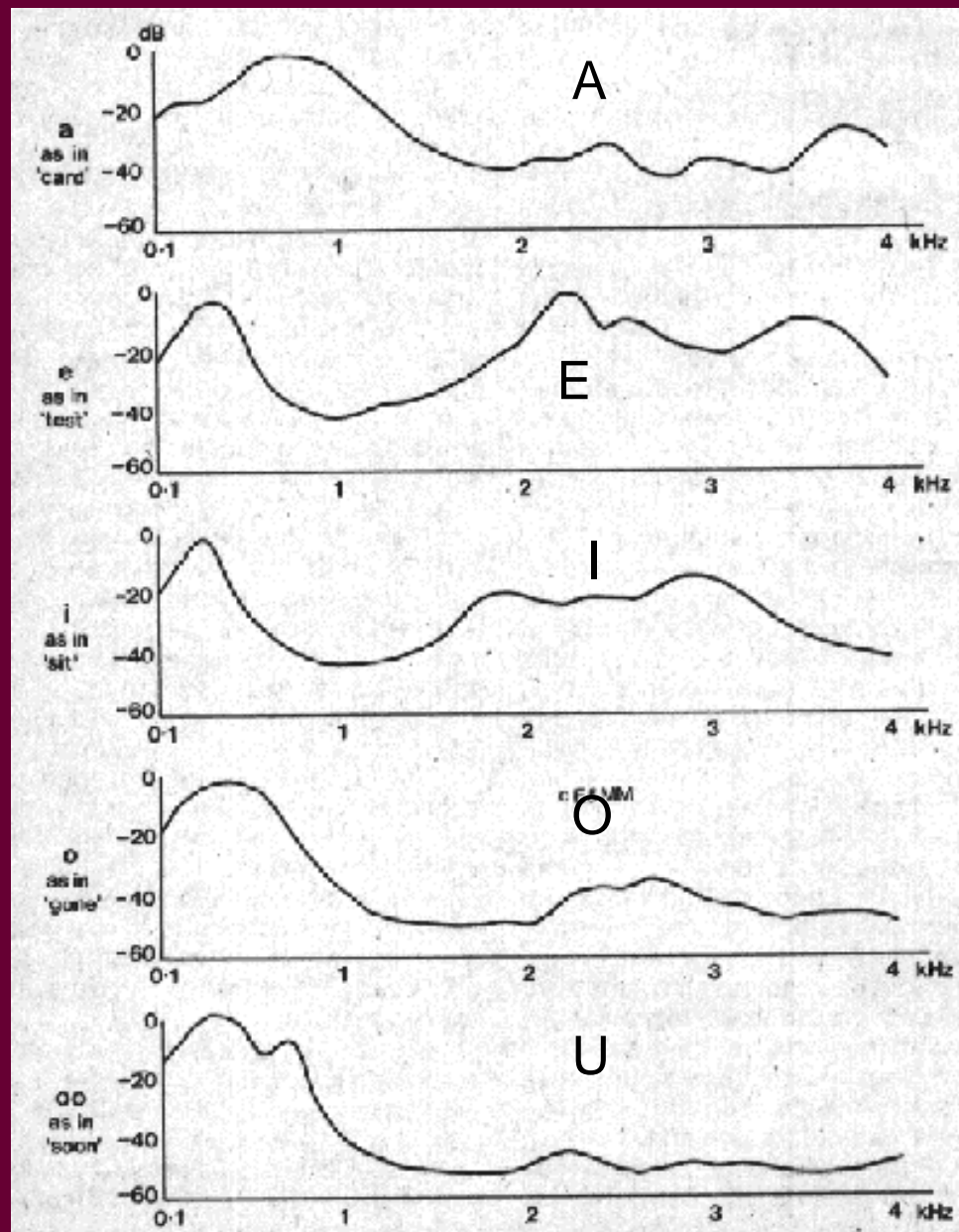
**60 - 90**

**100 - 110**

**120 - 130**

# Zvukové spektrum

- Analýzou složených zvuků dostáváme frekvenční rozložení amplitud a fází jejich složek - **zvukové spektrum**.
- U samohlásek: **pásové spektrum**. Harmonické frekvence základního tónu tvoří skupiny - **formanty** - pro danou samohlásku charakteristické.
- Souhlásky: neperiodické, mají spojité (šumové) akustické spektrum.



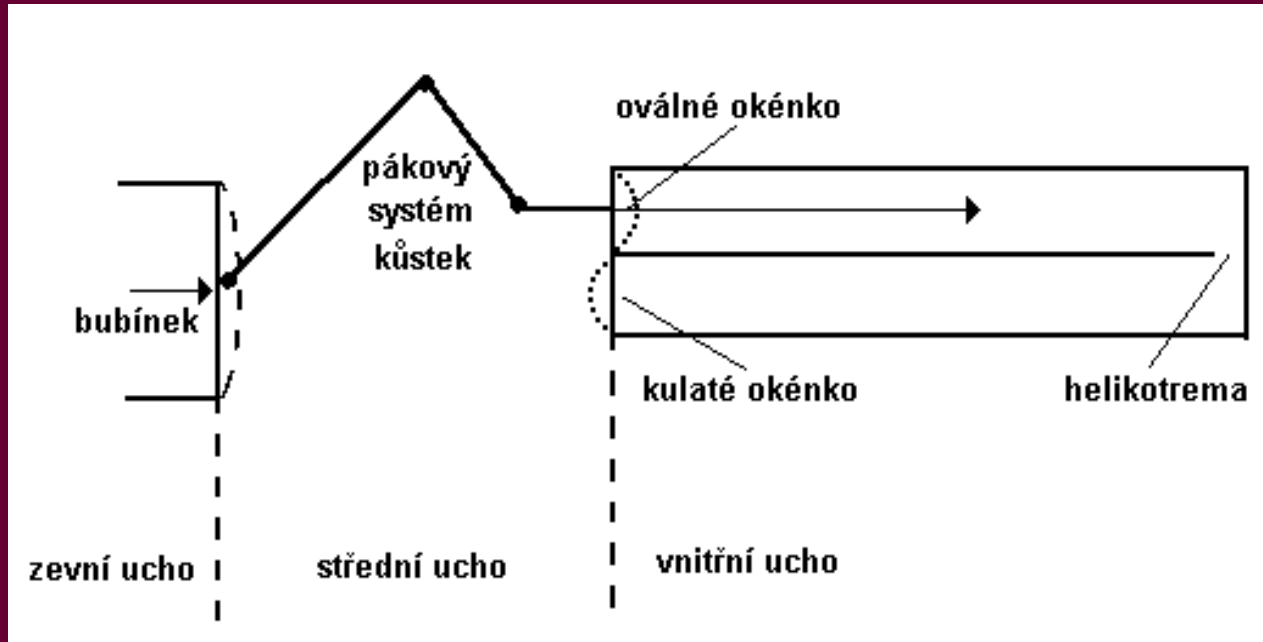
# Biofyzikální funkce ucha

- Převod zvuku do vnitřního ucha se děje pomocí ucha vnějšího a středního.
- **Zevní ucho:** boltec a zevní zvukovod. Optimálně slyšitelné zvuky dopadají zepředu pod úhlem asi  $15^\circ$  vzhledem k ose uší.
- **Zevní zvukovod je rezonátor**, zesiluje kmitočty 2-6 kHz s maximem v pásmu 3-4 kHz, (+12 dB). Uzávěr zvukovodu zhoršuje slyšení o 40 - 60 dB.
- **Střední ucho:** bubínek (asi  $60 \text{ mm}^2$ ) a sluchové kůstky - kladívko, kovadlinka a třmínek. Rukojeť kladívka je přirostlá k bubínku, třmínek k oválnému okénku ( $3 \text{ mm}^2$ ). **Eustachova trubice** vyrovnává tlaky na obou stranách bubínku.
- **Velký rozdíl akust. impedancí** vzduchu ( $3,9 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a tekutiny vnitřního ucha ( $15\,700 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) by vedl k velké ztrátě intenzity (asi 30 dB) - vyrovnáno poměrem ploch a změnou amplitudy a tlaku zvukového vlnění (ve vzduchu velká amplituda a malý tlak, v tekutém prostředí naopak).
- Převod akust. vlnění z bubínku na menší plochu oválného okénka (20x zvýší tlak).



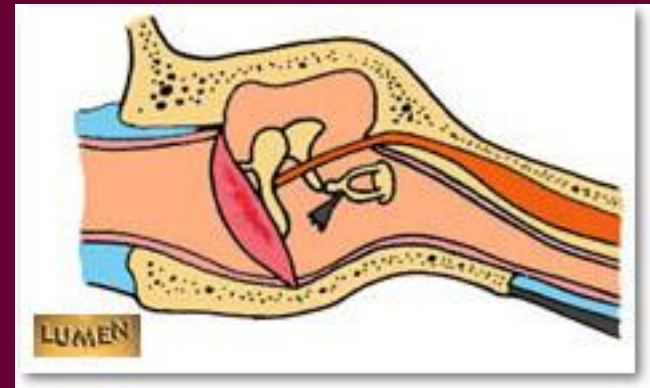
# Pístový převod akustického vlnění

a pákový systém kůstek. Kladívko a kovadlinka tvoří nerovnoramennou páku (1,3x zvětší sílu). Tzv. **pístový převod**.



## Ochrana před silnými zvuky:

Pružné spojení kůstek a reflexní činnost svalů (*m. stapedius*, *m. tensor tympani*) tlumí silné zvuky až o 15 dB.



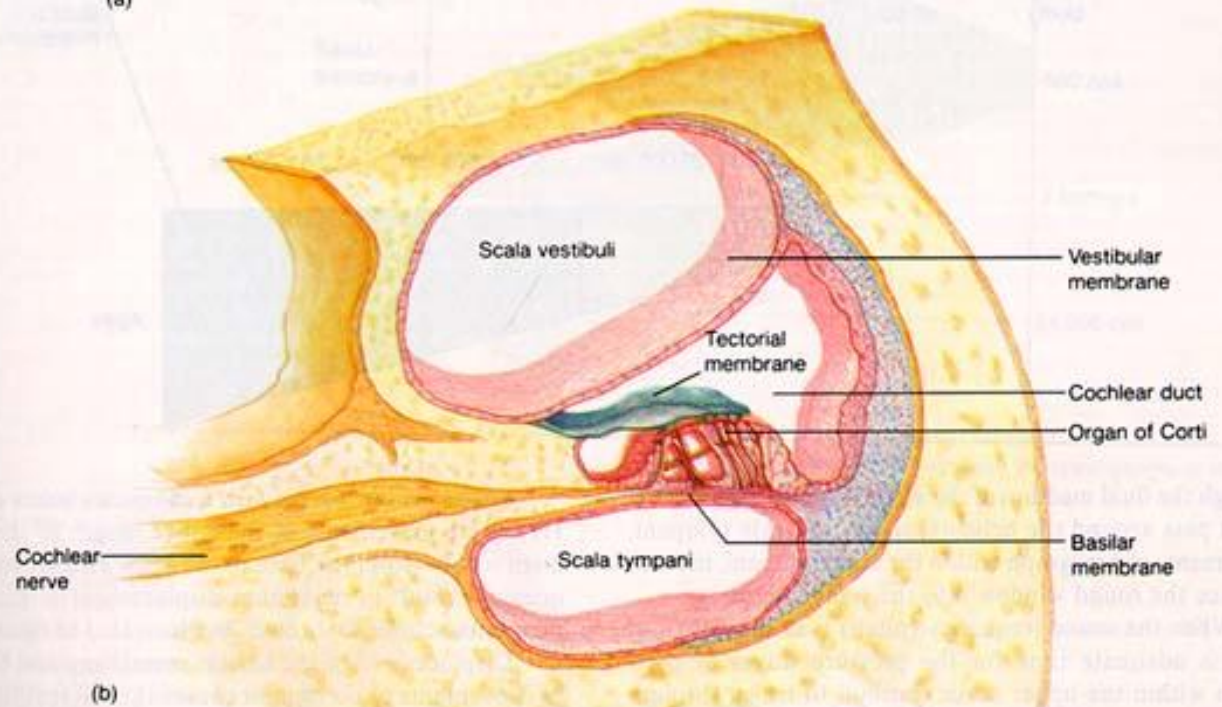
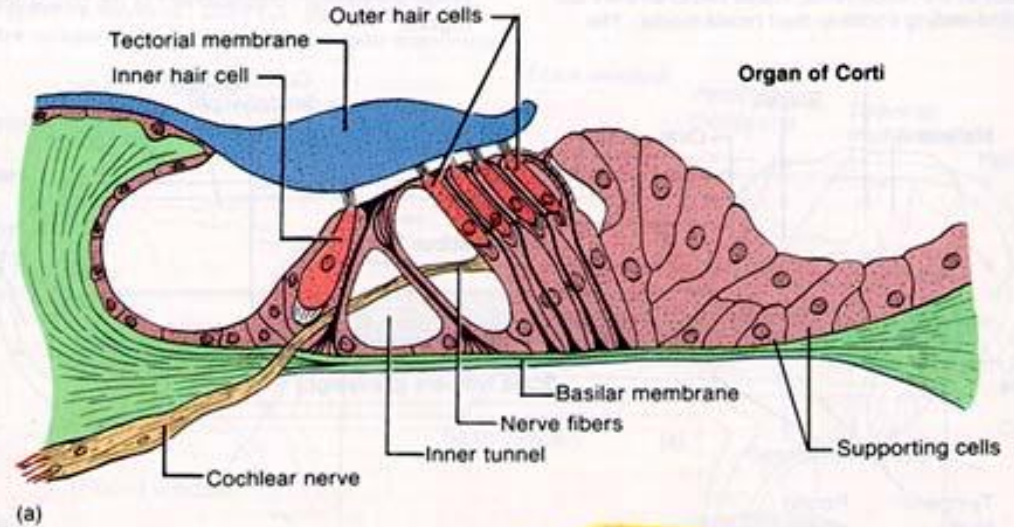
# Mechanismus recepce akustických signálů

- **Vnitřní ucho** je uloženo ve skalní kosti jako labyrint, v němž jsou receptory sluchového a vestibulárního analyzátoru.
- Sluchová část labyrintu je tvořena spirálním, asi 35 mm dlouhým kostěným kanálkem - **hlemýžděm - cochleou**. Základnu hlemýždě odděluje od středoušní dutiny přepážka se dvěma okénky.
- Na oválné okénko nasedá třmínek, níže uložené okrouhlé okénko je volné.
- Hlemýžd' je rozdělen na dvě části podélným kostním výběžkem *lamina spiralis* a pružnou **membrana basilaris**. *L. spiralis* je nejširší při bázi hlemýždě, kde je *memb. basilaris* nejužší, asi 0,04 mm (0,5 mm při vrcholu hlemýždě).
- Zde je v bazilární membráně **helikotrema**, spojující prostor nad (*scala vestibuli*) a pod bazilární membránou (*scala tympani*).

# Cortiho orgán

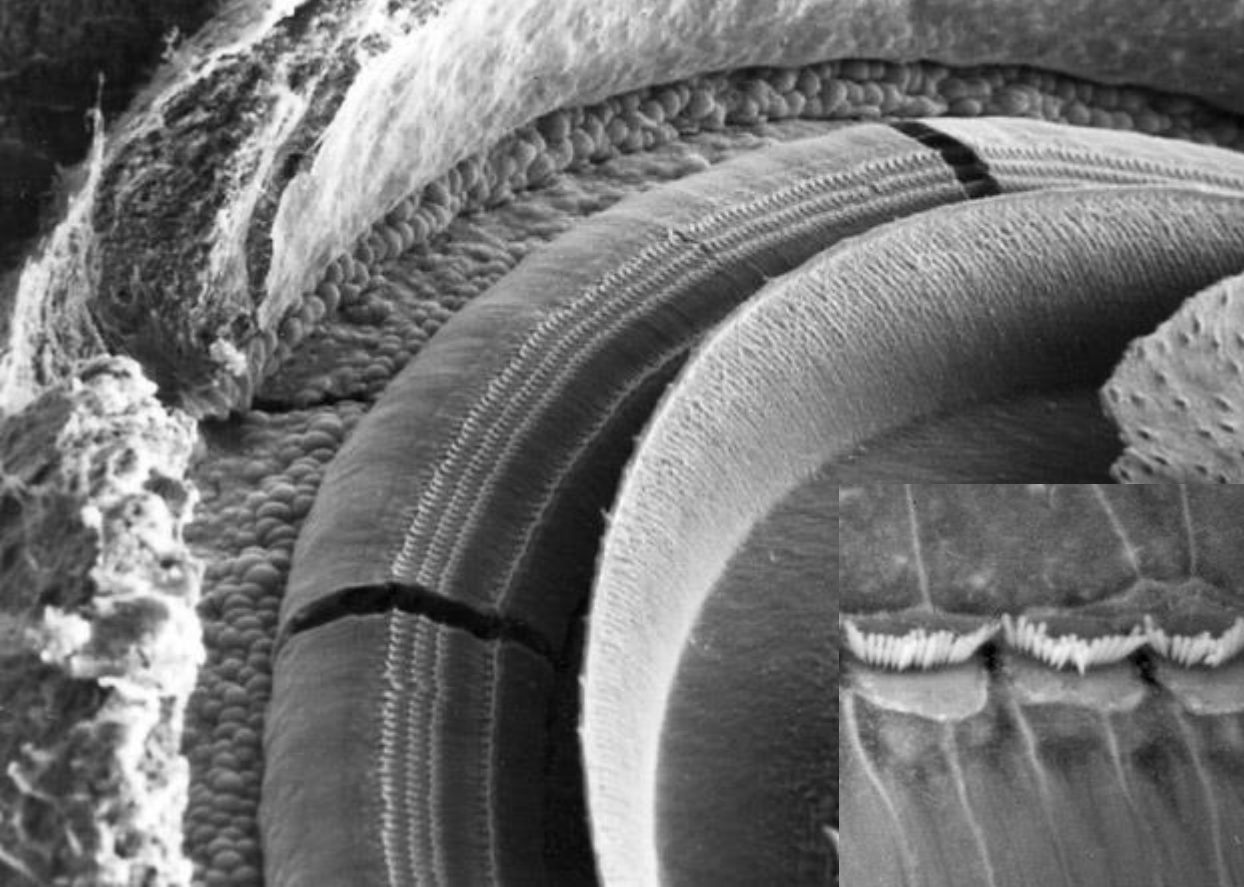
•<http://www.sfu.ca/~sanders/l33098/Ear.f/corti.html>

The organ of Corti (a) is located within the cochlear duct of the cochlea (b).

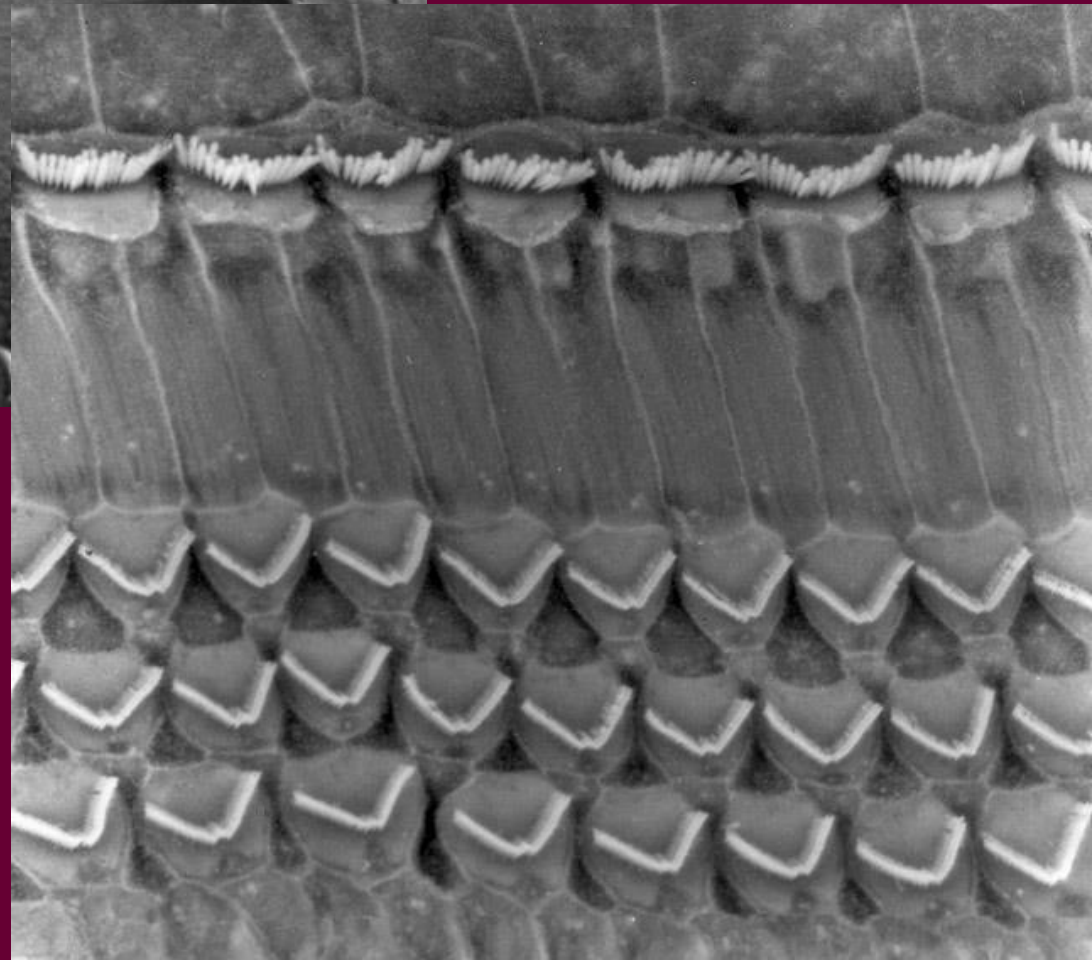




[www.sickkids.on.ca/  
auditorysciencelab/p  
ictures1.asp](http://www.sickkids.on.ca/auditorysciencelab/pictures1.asp)



Obrázky získané pomocí SEM. Cortiho orgán s řadami vláskových buněk. Nahoře celkový pohled po odstranění vestibulární (Reissnerovy) a tektorální membrány. Vpravo detail vláskových buněk



# Cortiho orgán

- **perilymfa** - iontové složení jako likvor, bílkovin 2x více.
- **endolymfa** - obsah bílkovin jako likvor, avšak jen 1/10 iontů  $\text{Na}^+$  a 30x víc  $\text{K}^+$  - připomíná intracelulární tekutinu.
- **Cortiho orgán**: obkladné, nosné a smyslové buňky.
- Smyslové buňky C. orgánu: **buňky vláskové** (vnitřní a vnější). V hlemýždi je asi 4000 vnitřních a 20 000 zevních vláskových buněk.
- Smyslové vlásky - stereocilie - deformuje **tektoriální membrána**. Ohnutí vlásků k *lamina spiralis* vede k depolarizaci, ohnutí vlásků ke *stria vascularis* způsobuje hyperpolarizaci.
- Podráždění zevních buněk vibracemi vyvolá jejich aktivní vibrační pohyb o stejné frekvenci, který se přenáší přes tektoriální membránu na vnitřní vláskové buňky. Takto dochází i k **zesílení vibrací**.
- Od vnitřních buněk vychází asi 95% neuronů (20 axonů od jedné buňky), od zevních buněk asi 5% neuronů - nervová zakončení 10ti zevních buněk se spojují v 1 axon. Nervových vláken vychází z hlemýždě asi 25 - 30 tis.

# Mechanismus vnímání zvuku

- **Békésyho teorie postupující vlny.** Zvuk rozkmitá bazilární membránu a oblast maxima rozkmitu se posouvá s kmitočtem od vrcholu hlemýždě k bázi.
- Předpoklad: smyslové buňky jsou **citlivé i na změnu rychlosti** výchylky tektonické membrány.
- Receptory v hlemýždi asi provádějí hrubou frekvenční analýzu, další zpracování přísluší sluchovým centřům.
- Zvuk přichází k receptorům trojím způsobem: **Vedením kůstkovým, vedením kostním** (práh asi o 40 dB vyšší) a vedením vzduchovým (kruhovým okénkem - málo).

# Elektrické jevy spojené s recepcí zvuku

- Perilymfa a endolymfa se liší v obsahu  $K^+$  a  $Na^+$ . Endolymfa se obsahem  $K^+$  blíží intersticiu. Mezi endolymfou a perilymfou je klidový potenciálový rozdíl **+ 80 mV - endokochleární potenciál**.
- Velké vláskové buňky C. orgánu mají proti perilymfě záporný potenciál -80 mV. **Potenciálový rozdíl mezi endolymfou a vláskovými buňkami je asi 160 mV.**
- Podráždění C. orgánu budí **kochleární mikrofonní potenciál**, snímatelný z hlemýždě. Při vyšších frekvencích se maximum mikrofonního potenciálu posouvá k bázi hlemýždě, v souladu s teorií postupující vlny. C. orgán není jen měnič energie, ale spíše biologický zesilovač.
- **Negativní sumační potenciál** je způsoben podrážděním vnitřních vláskových buněk Cortiho orgánu.
- Mechanismus vzniku výsledného **akčního potenciálu** vedeného sluchovým nervem není dosud zcela vysvětlen. Předpokládáme: Kochleární mikrofonní potenciál a též negativní sumační potenciál se podílejí na vzniku akčního potenciálu.

# Otoakustická emise

- Vnitřní ucho je samo též zdrojem zvuku, který se může objevit po podráždění zvukem z okolí i spontánně. Tyto zvuky jsou ovšem tak slabé, že je sami většinou nemůžeme zaslechnout. Vznikají patrně chvěním zevních vláskových buněk s frekvencí 500 – 4500 Hz.
- Zjišťuje se především jejich výbavnost u novorozenců.





# Biofyzikální funkce vestibulárního systému

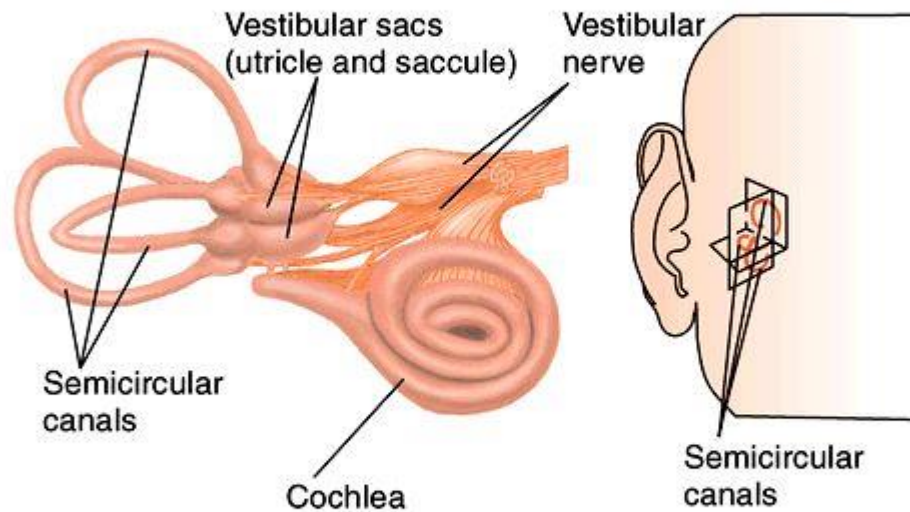
- **Vestibulární systém** - vnímání polohy a zrychlení - umístěn v kanálcích skalní kosti, labyrintu. Tvořen třemi **polokruhovitými kanálky**, ležícími ve třech vzájemně kolmých rovinách. Kanálky vycházejí z **utrikulu**, spojeného se **sakulem**. Komunikují s *ductus cochlearis*.
- Jedno ústí každého kanálku je rozšířeno v **ampulu**, přepaženou ampulární **kristou**. Na spodině utrikulu je vyvýšenina **macula utriculi**, na stěně sakulu **macula sacculi**. Ampulární kristy a makuly jsou tvořeny smyslovým epitelem, složeným z **vláskových buněk** a buněk podpůrných. Součástí v.ú. jsou gelatinózní **kupuly** na ampulárních kristách a **statolitové membrány** na makulách. Jejich funkcí je dráždit stereocilie smyslových buněk. Na statolitových membránách jsou **statokonie** - krystalky  $\text{CaCO}_3$  - zvyšují hmotnost gelatinózní membrány.

# Biofyzikální funkce vestibulárního systému

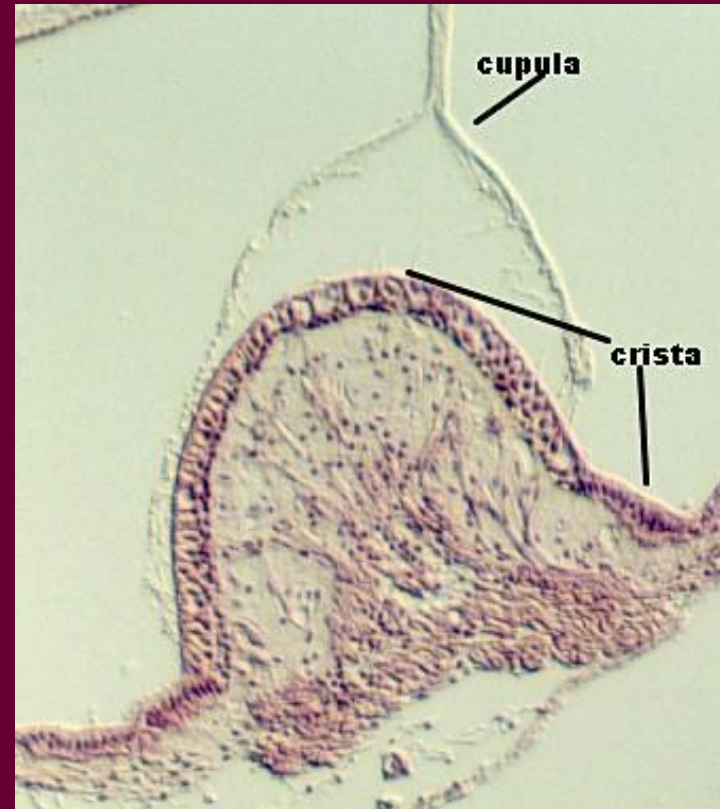
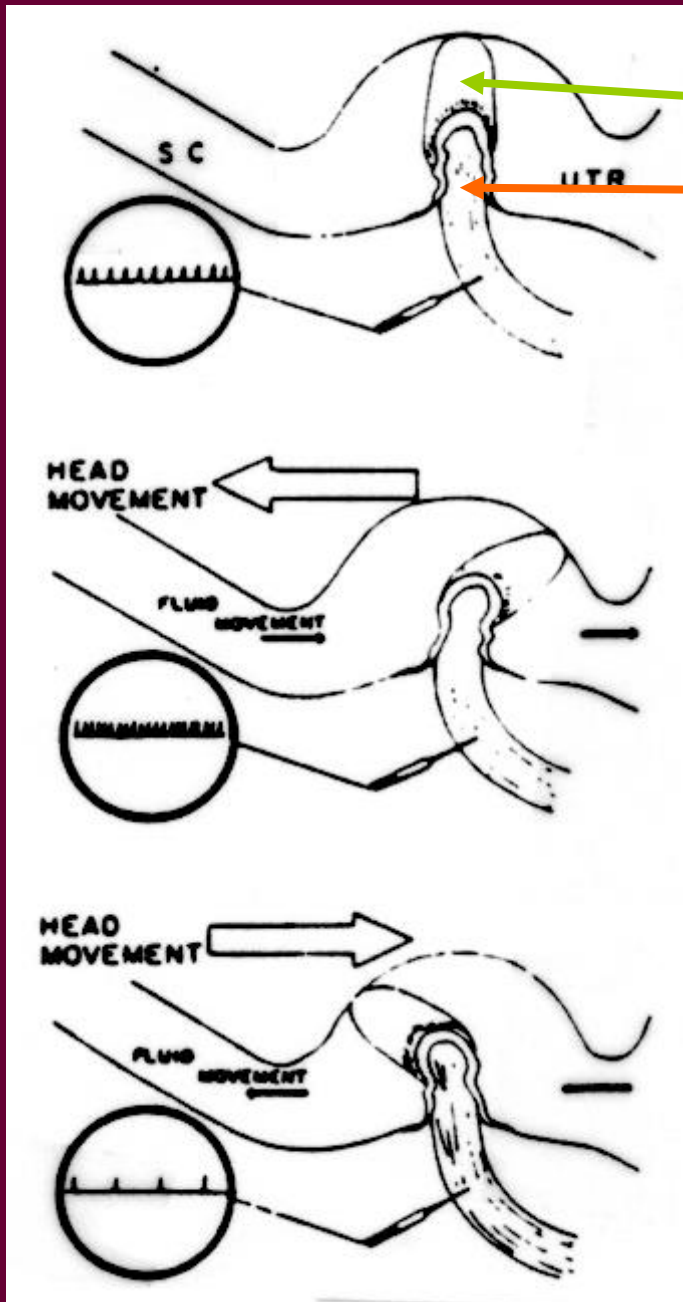
- **Polokruhové kanálky umožňují analýzu rotačního pohybu hlavy.** Receptory ampulárních krist reagují na úhlové zrychlení. Kupuly krist pracují jako záklopy, které se prouděním endolymfy vychylují a dráždí ohýbáním vlásky smyslových buněk.
- **Receptory utrikulu a sakulu reagují na lineární zrychlení a gravitaci.** Při změně polohy hlavy se statolitová membrána posune vůči vláskům smyslových buněk, které tím podráždí. Největší význam mají pro udržení vzpřímeného postavení těla, tj. pro tzv. **statické reflexy**.

# Statokinetický orgán

## ► The Labyrinths of the Inner Ear



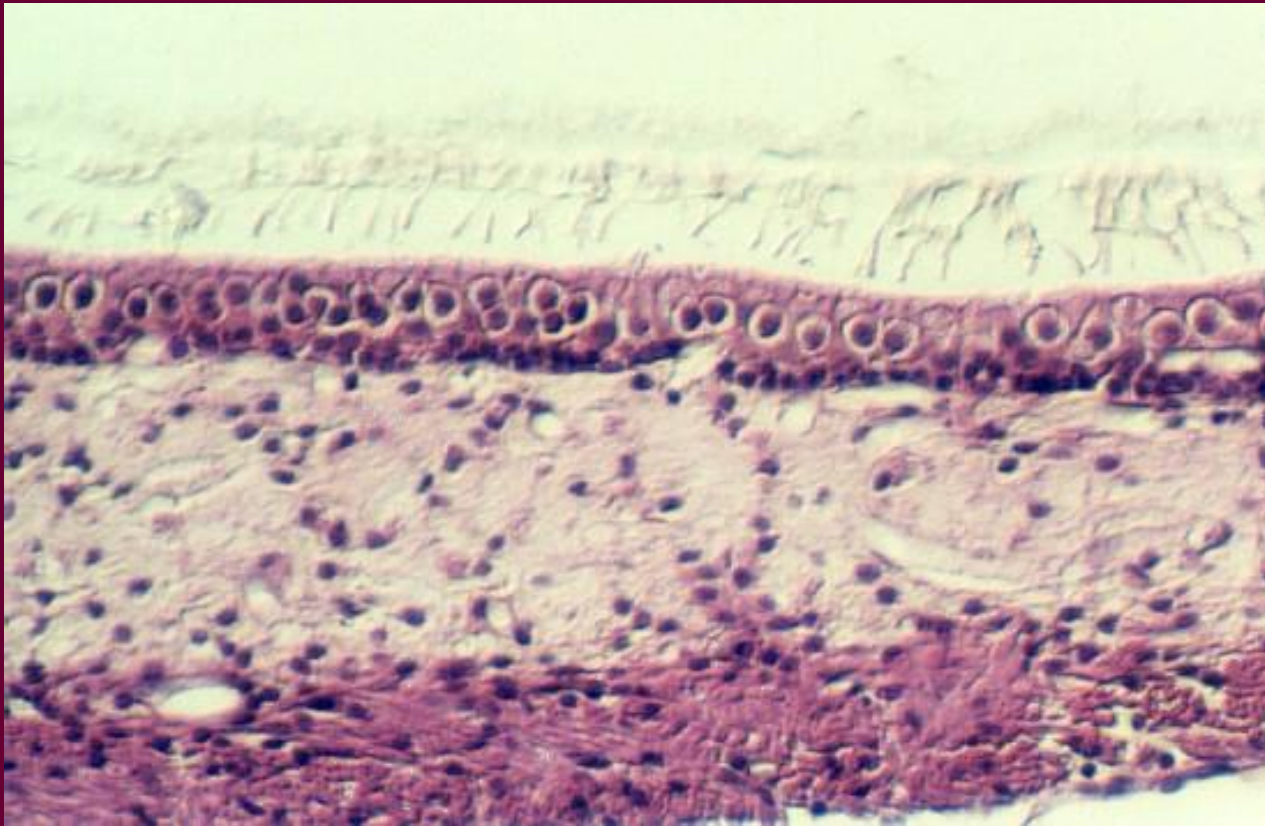
# Funkce kupul a ampulárních krist



•<http://cellbio.utmb.edu/microanatomy/Ear/crista1.jpg>

•<http://www.bcm.tmc.edu/oto/studs/rotation.gif>

# Statolitová (otolitová) membrána v sakulu



•[cellbio.utmb.edu/.../Ear/organization\\_of\\_the\\_inner\\_ear.htm](http://cellbio.utmb.edu/.../Ear/organization_of_the_inner_ear.htm).

Autor:  
**Vojtěch Mornstein**

Obsahová spolupráce:  
Ivo Hrazdira, Carmel J. Caruana

Grafika:

- - -

poslední revize: listopad 2018