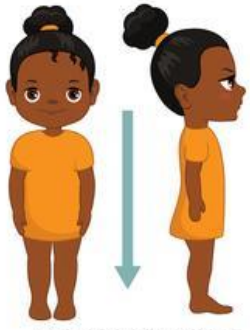
Rovnovážný systém

Zdeňka Bendová; 19.2. 2022

Udržovat rovnováhu



Udržovat vzpřímenou pozici hlavy a těla

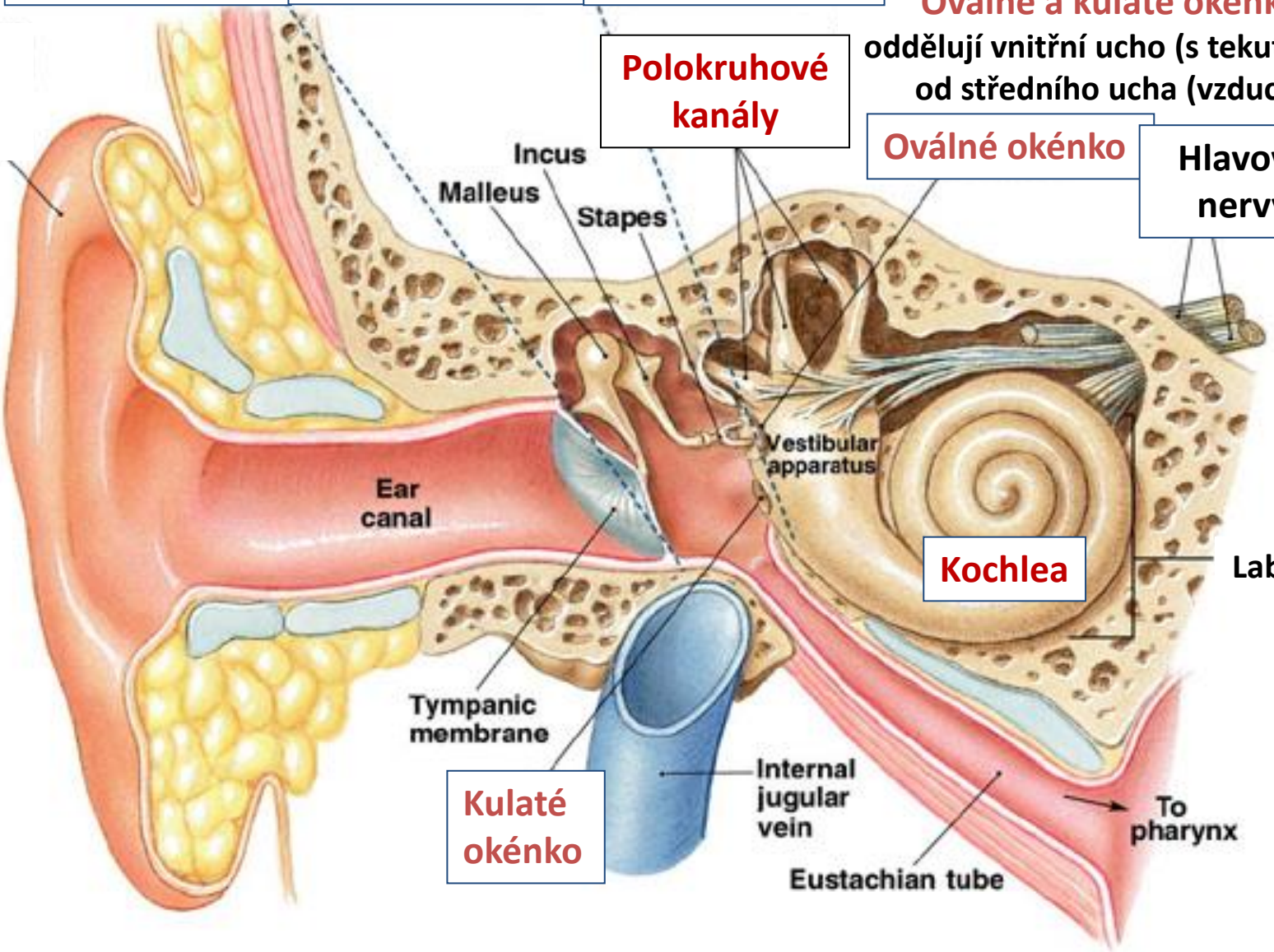
Spolu s proprioreceptory, signály z retiny a motorickými eferentními signály vytváří „vjem pohybu“.

Přispívá k náročnějšímu motorickému chování

Přemýšlení o fyziologii vnitřního ucha

Vnější ucho	Střední ucho	Vnitřní ucho

Oválné a kulaté okénko
oddělují vnitřní ucho (s tekutinou) od středního ucha (vzduch)

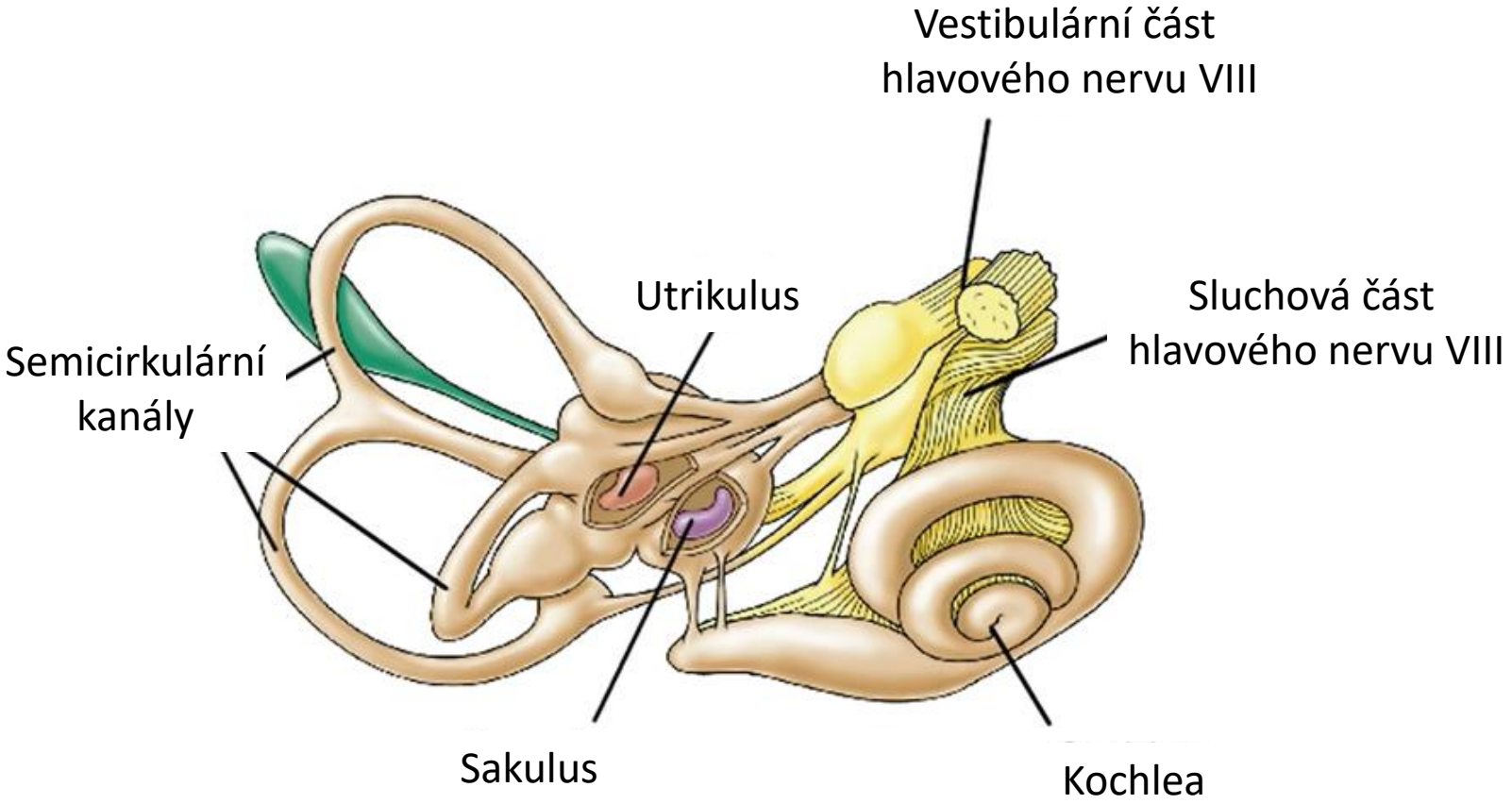


Copyright © 2007 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

Vestibulární systém má **pět receptorových orgánů**

Úhlové zrychlení – **3 polokruhovité kanálky** - detekují pohyb hlavy ve 3 rovinách

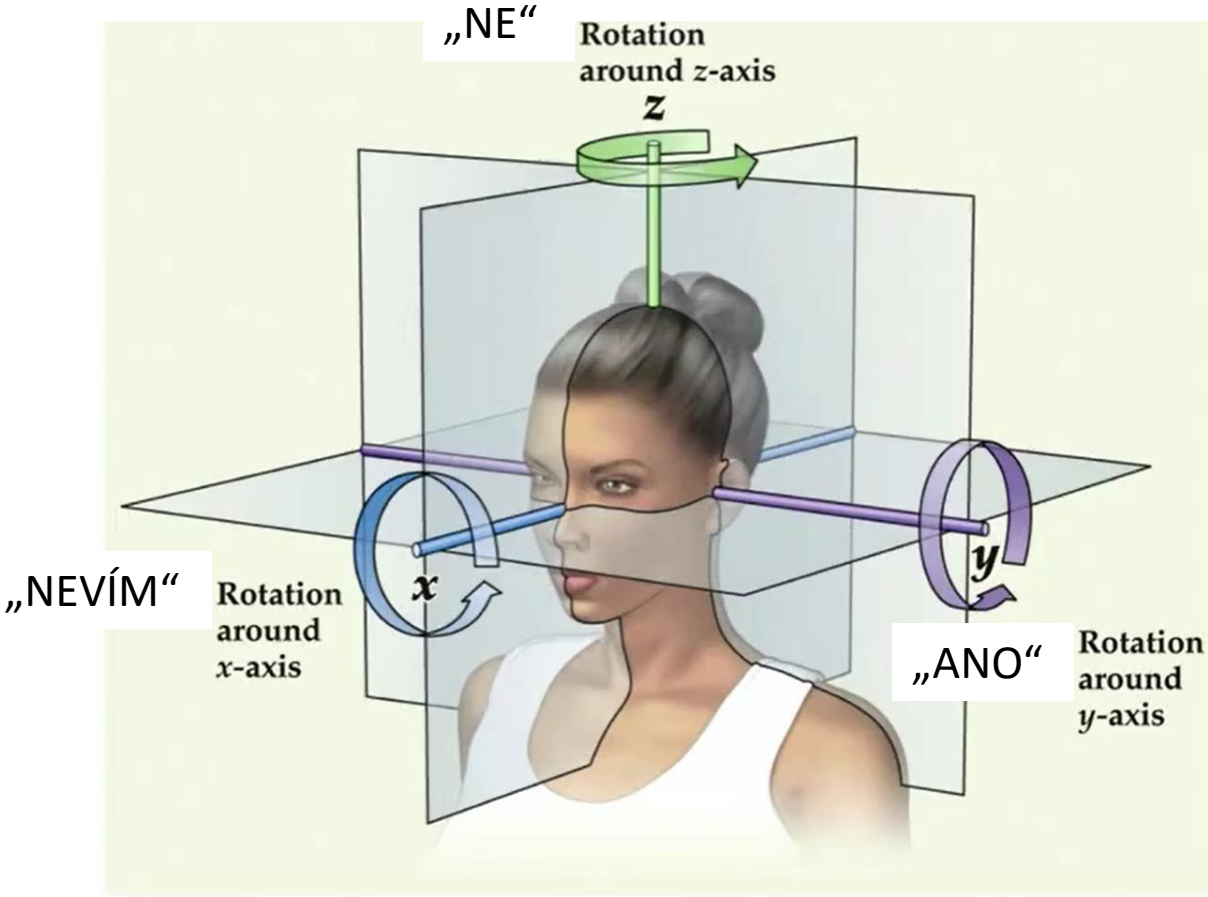
Lineární zrychlení – **utrikulus a sakulus** – zajišťují vertikální orientaci hlavy vzhledem ke gravitaci



Jak vnímáme pohyb

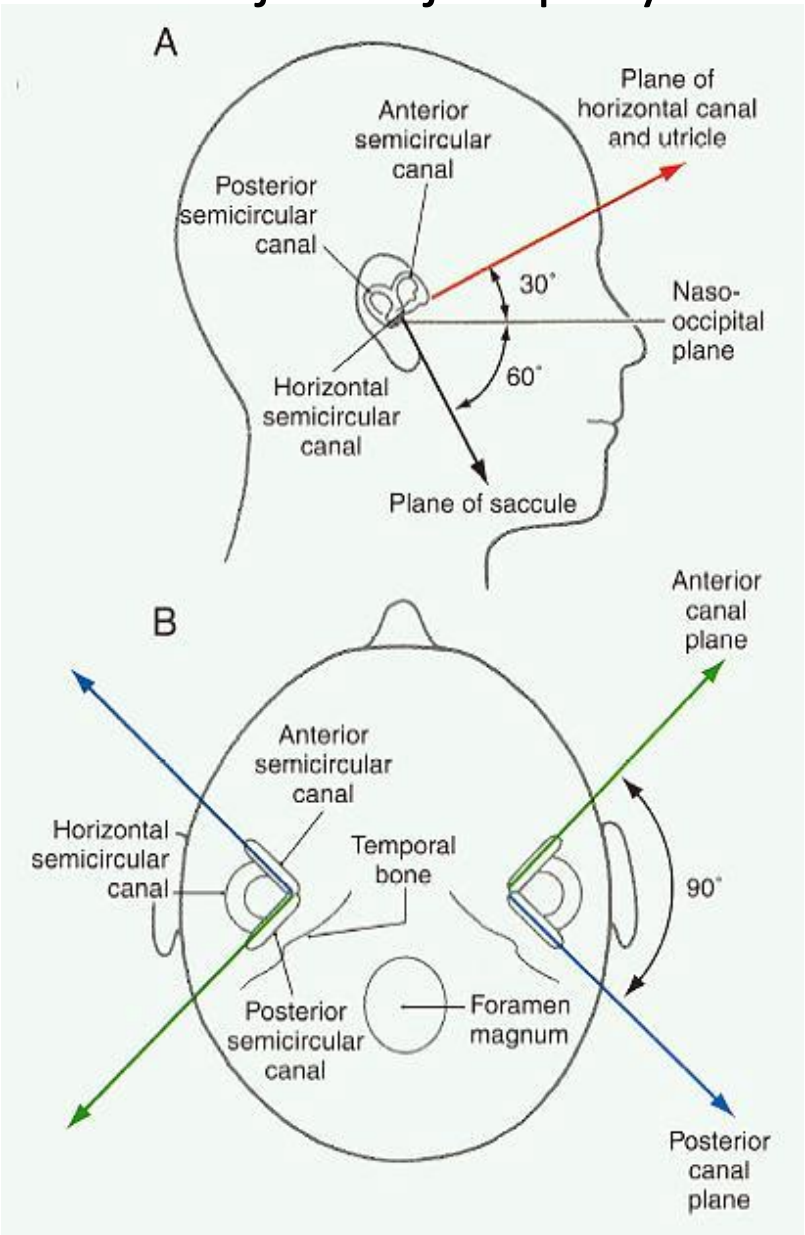
Rotace – semicirkulární kanály

Roviny – utrikulus (horizontální- náklon hlavy a laterální pohyb) a sakulus (vertikální – nahoru/dolů; dopředu/dozadu)



NEUROSCIENCE 5e, Box 14A
© 2012 Sinauer Associates, Inc.

Každý receptorový orgán je prostorově uložen tak, aby byl co nejcitlivější k pohybu ve svojí specifické rovině v 3D světě



Horizontální semicirkulární kanál a utrikulus leží v rovině, která je nakloněna relativně k naso-okcipitální rovině

Vertikální semicirkulární kanály leží v pravém úhlu jeden ke druhému, stejně tak utrikulus a sakulus

Každý receptorový orgán má vlastní senzorický orgán, který obsahuje senzorické buňky

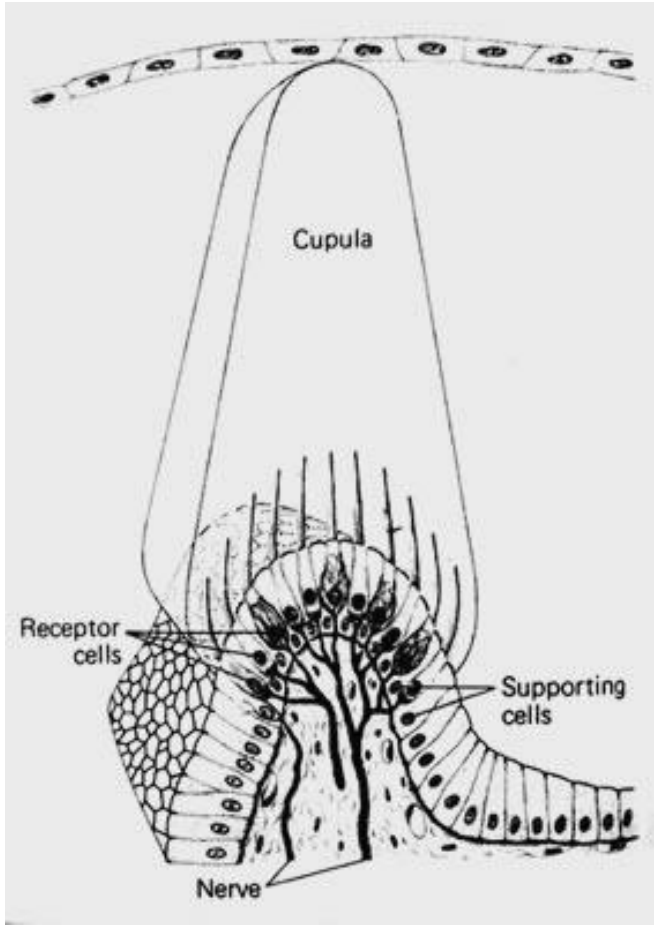
Ampula

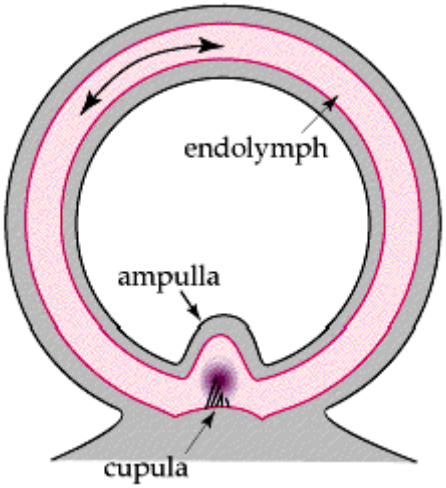
– senzorický orgán semicirkulárních kanálů

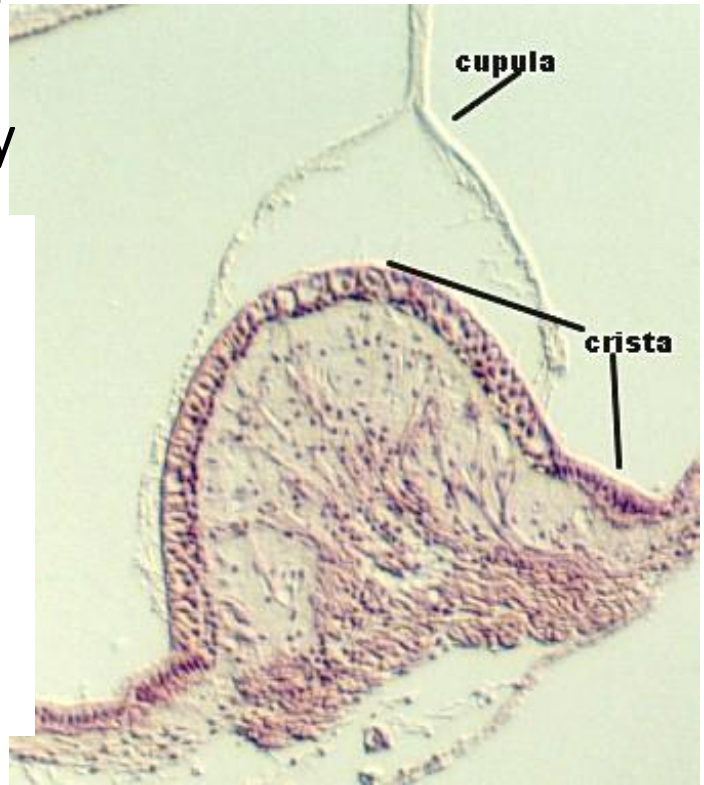
Senzorické epithelium = **krista**

– obsahuje receptorové buňky = **vláskové buňky**

kupula – želatinová hmota, která přehrazuje kanál a tvoří bariéru průtoku endolymfy







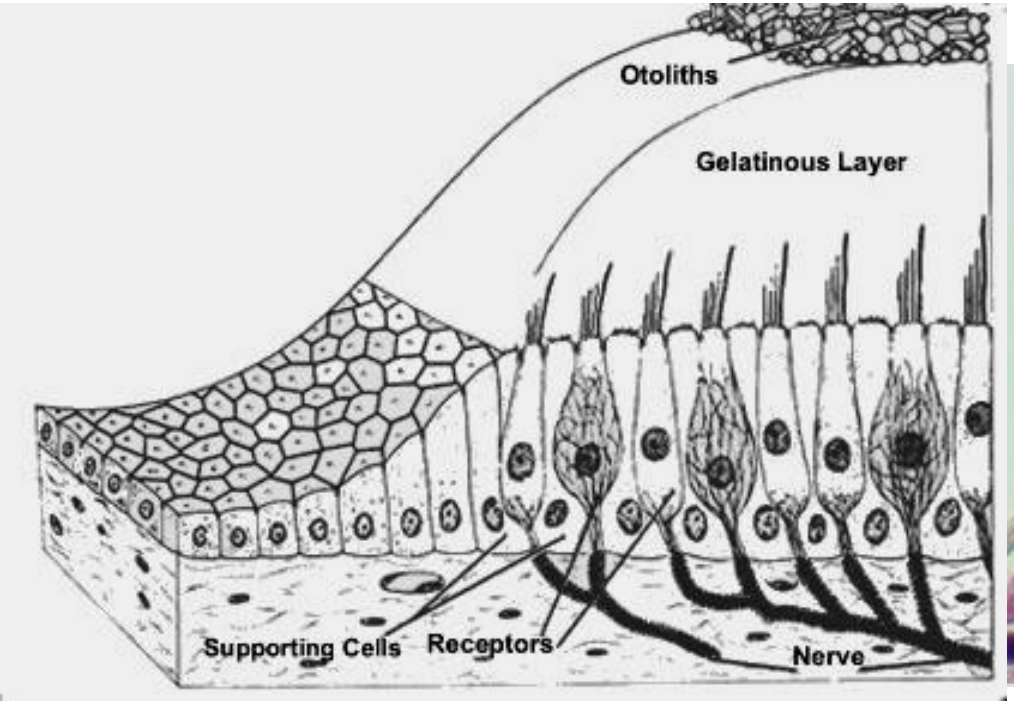
Makula

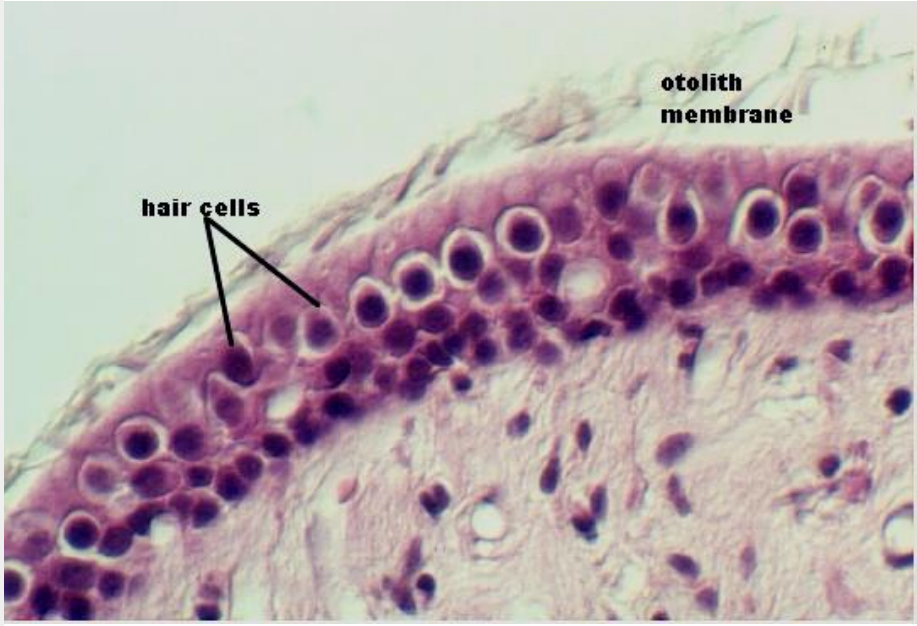
- senzorický orgán otolitických orgánů

senzorické epithelium obsahuje receptorové buňky

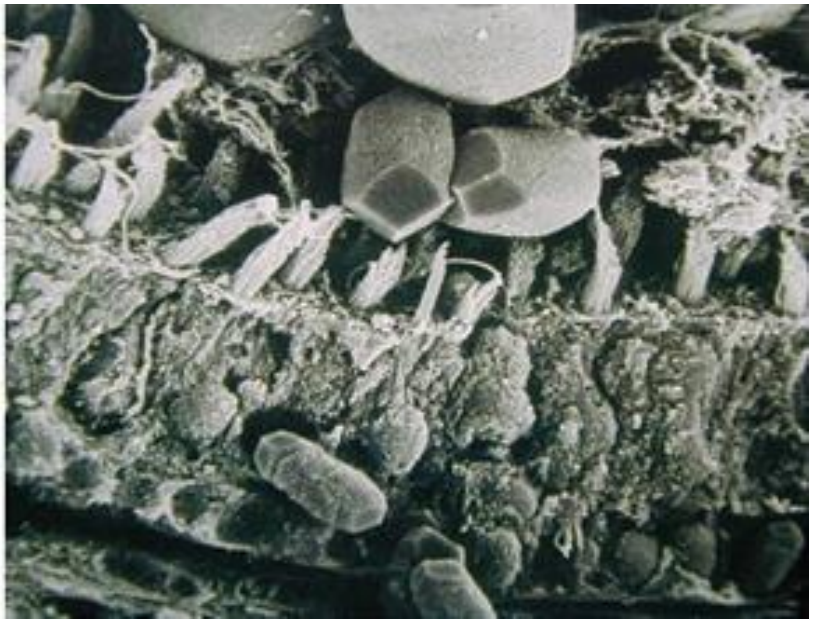
= **vláskové buňky**

želatinová vrstva pokrývá celou senzorickou plochu a na ní leží otolitická membrána s otolity (otoconia)



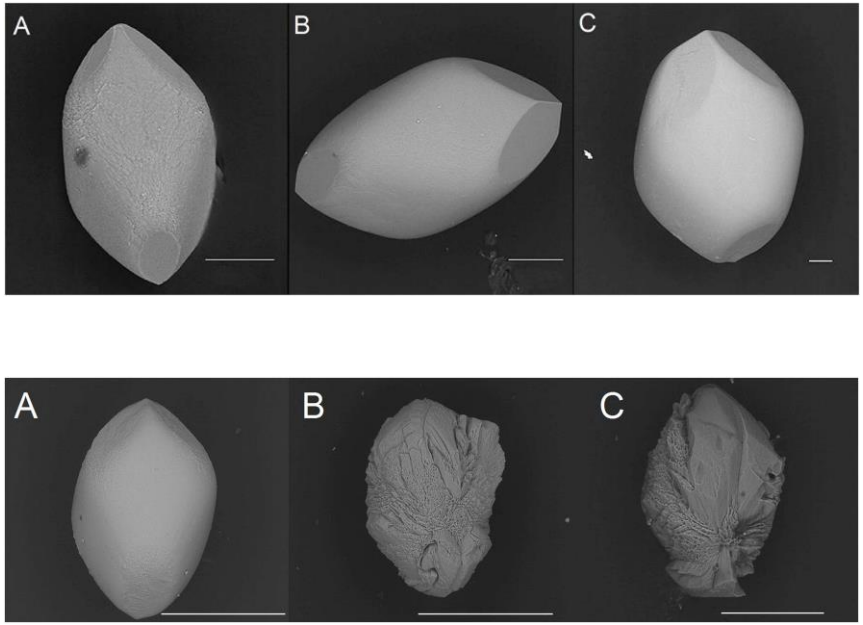


Otolity



https://www.d.umn.edu/~jfitzake/Lectures/DMED/InnerEar/VestibPhysiol/OtolithOrgans.html

Mohou mít různý tvar i vnitřní strukturu

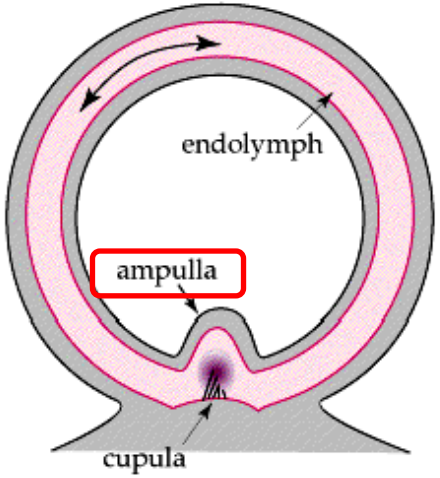


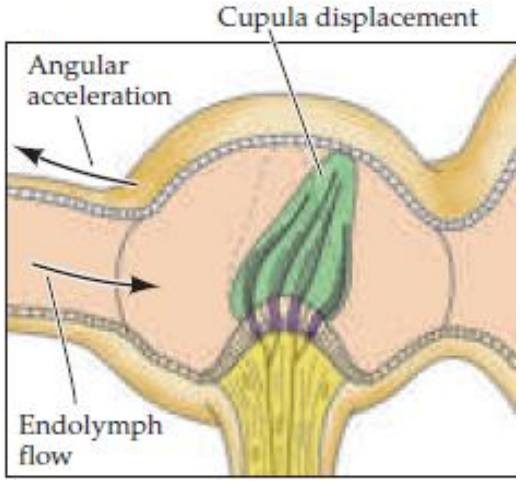
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175769.g004

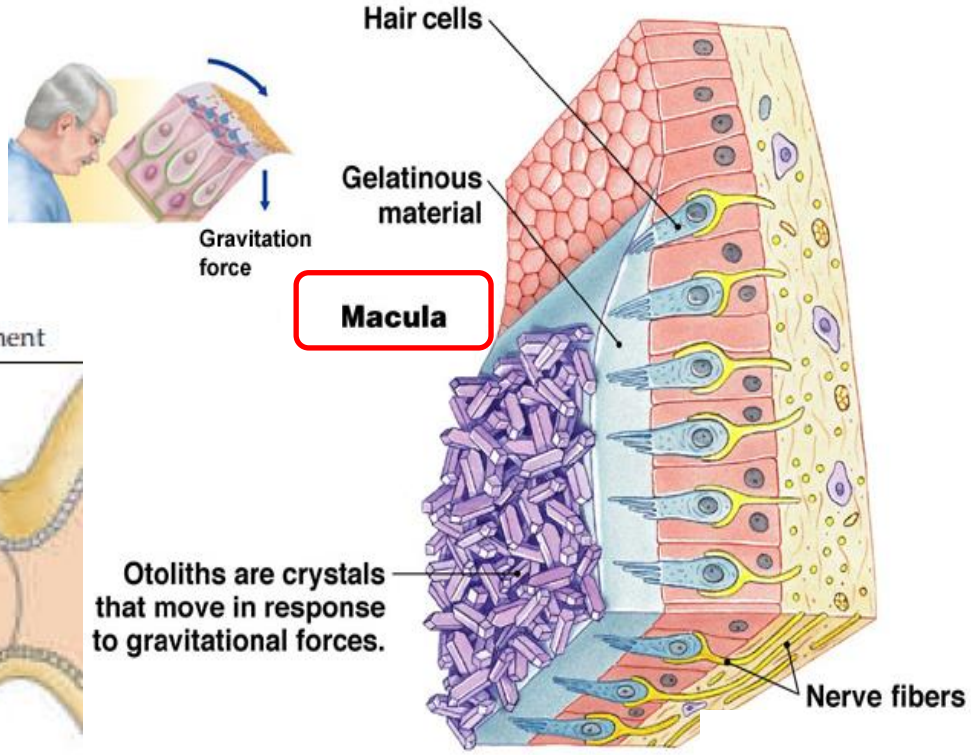
Vznik mechanické energie při pohybu hlavou

Při pohybu, setrvačnost endolymfy v kanálu produkuje sílu, která se zaráží o kupulu, přehrazující ampulu. Kupula je vychýlena – vl.b. spolu s ní

Otolity jsou těžké a při pohybu hlavy táhnou otolitickou membránu v relativním úhlu k senzorickému epitelu



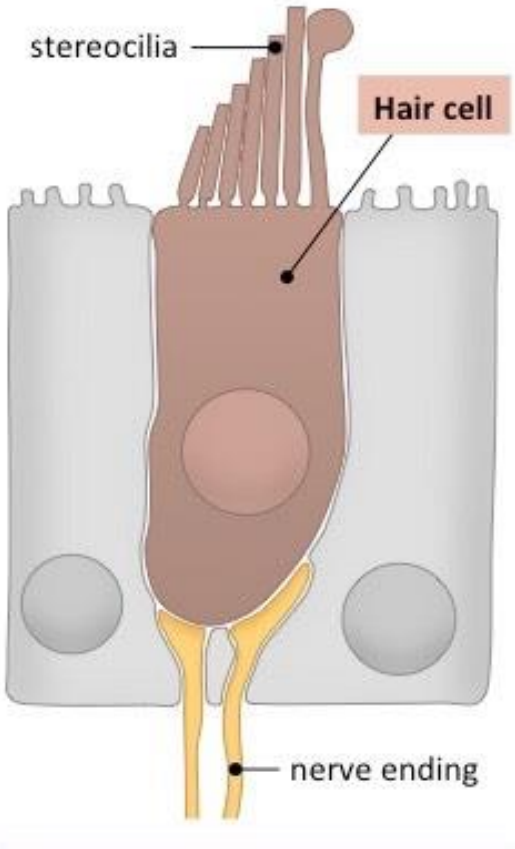




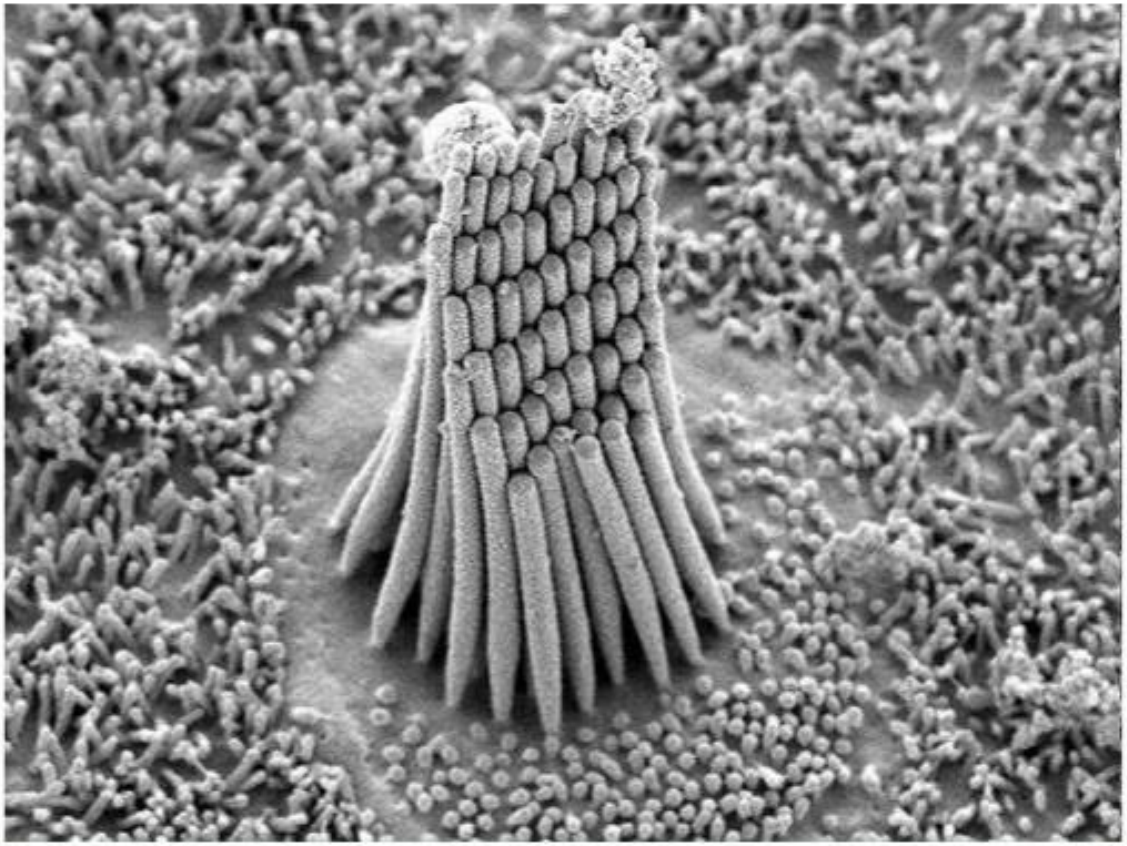
Copyright © 2007 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

Vlásková buňka – převodník mechanické energie v elektrickou

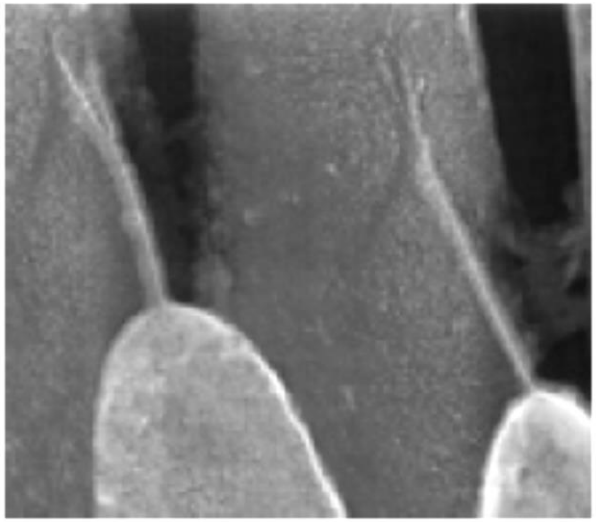
Stavba vláskové buňky

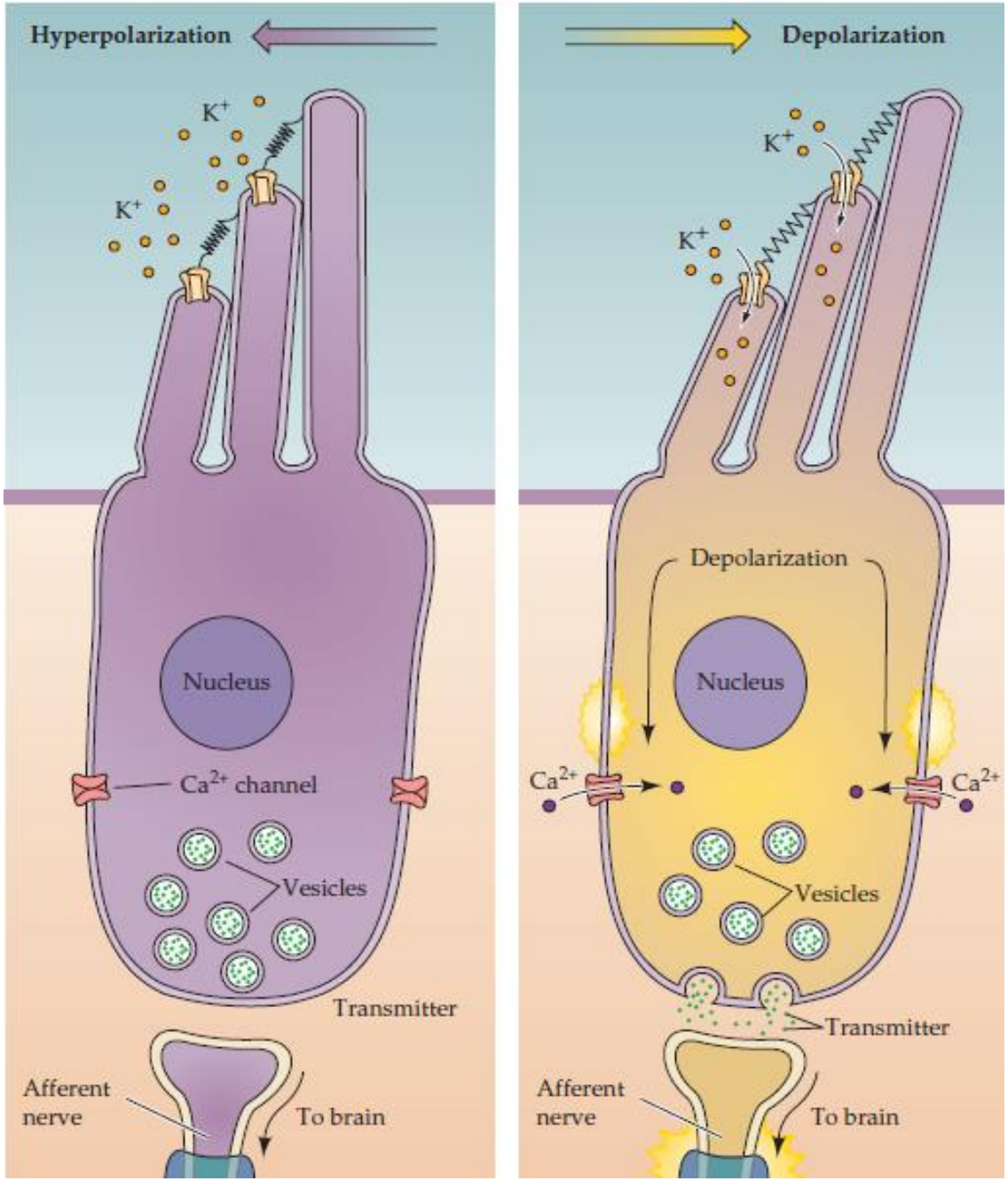


stereocilia svazku vláskových buněk



„Tip link“ , „gating springs“, vrátková pružina (struna)





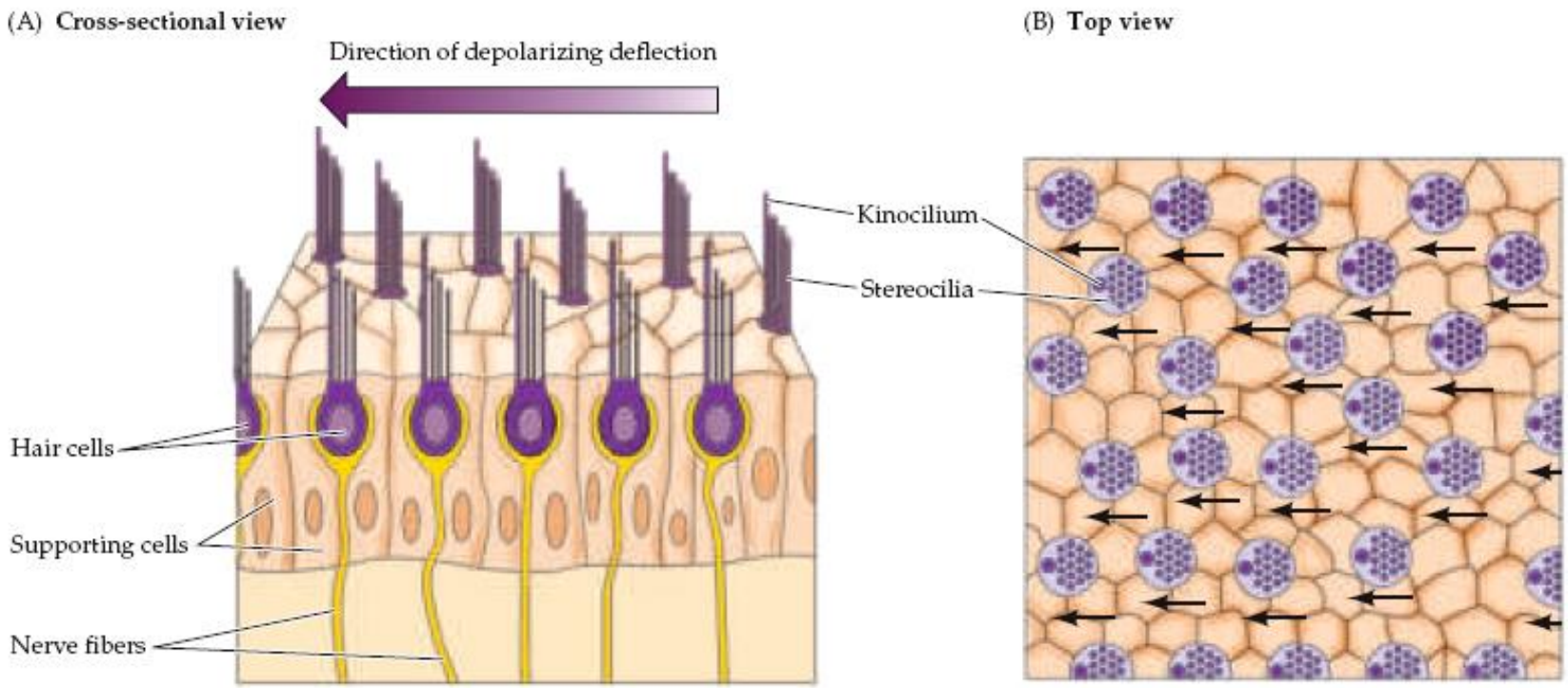
Jsou-li stereocilie vychýleny směrem k nejvyšší – depolarizace

(„tip link“ otvírají kationtové kanály a draslík vtéká do buňky po el.chem. gradientu).

Depolarizace otevře napěťově-závislé Ca^{2+} kanály v těle buňky a vápník vtéká dovnitř, glutamát se uvolňuje.

Jsou-li stereocilie vychýleny směrem od nejvyšší - hyperpolarizace

Morfologická polarizace vestibulárních vláskových buněk



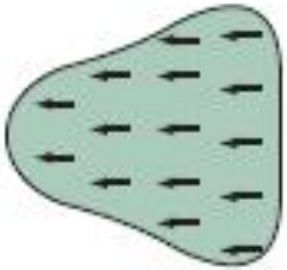
Kinocilia každé buňky jsou ve skupině buněk lokalizovány na stejné straně

V sakulu a utrikulu obsahuje otolitická membrána mělkou vchlípeninu – striolu, která rozděluje vl. buňky na dvě populace s opačnou morfologickou polaritou:

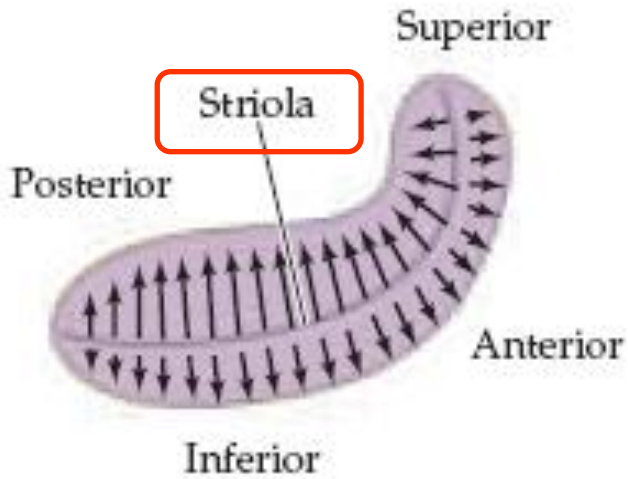
V ampule jsou vl. svazky orientovány jedním směrem

V sakulu kinocilia směřují od strioly

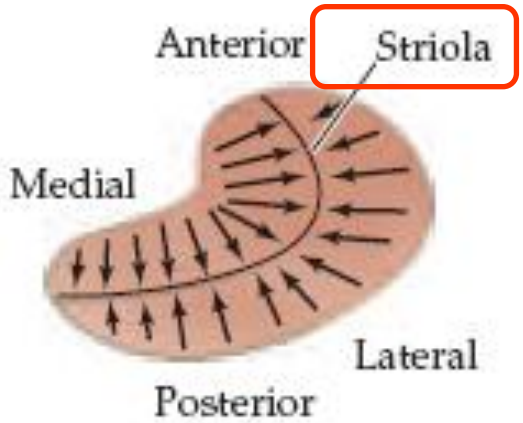
V utrikulu kinocilia směřují ke striole



Ampulla

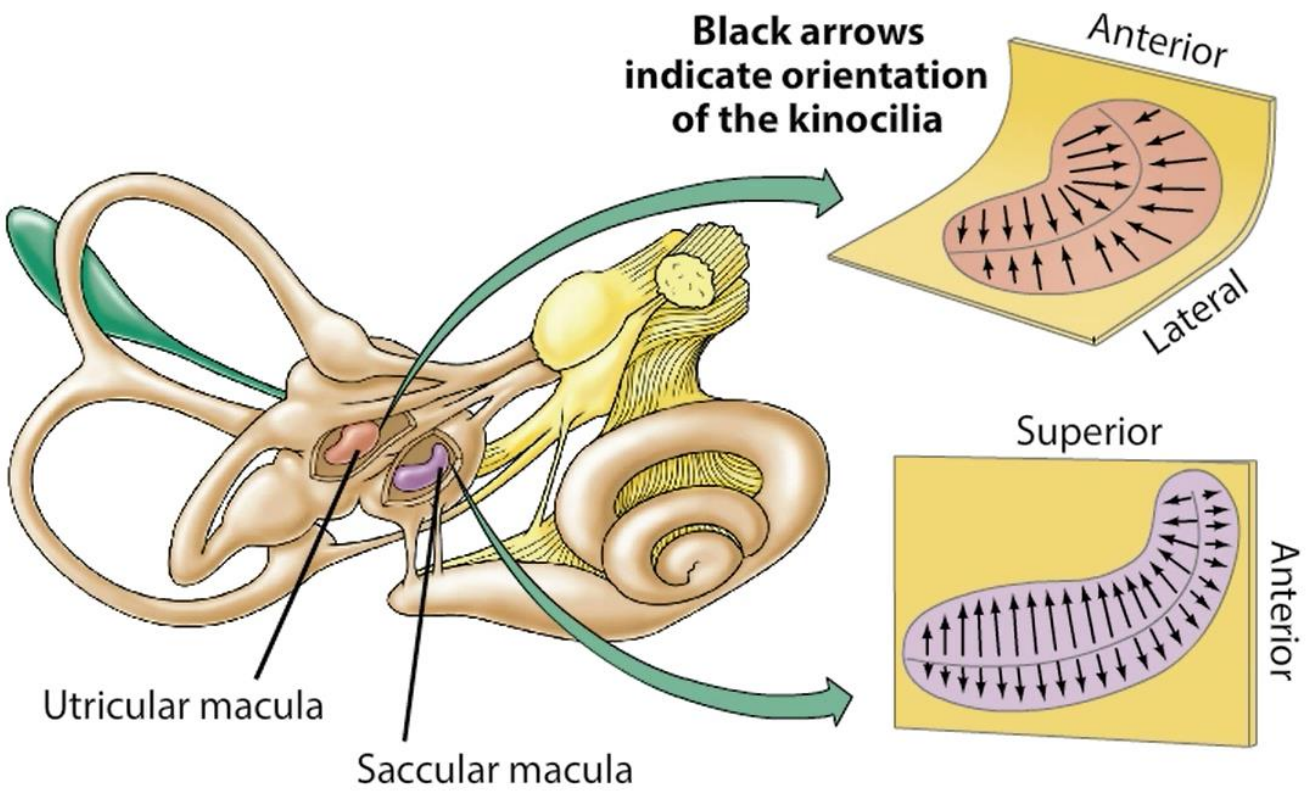


Sacculus

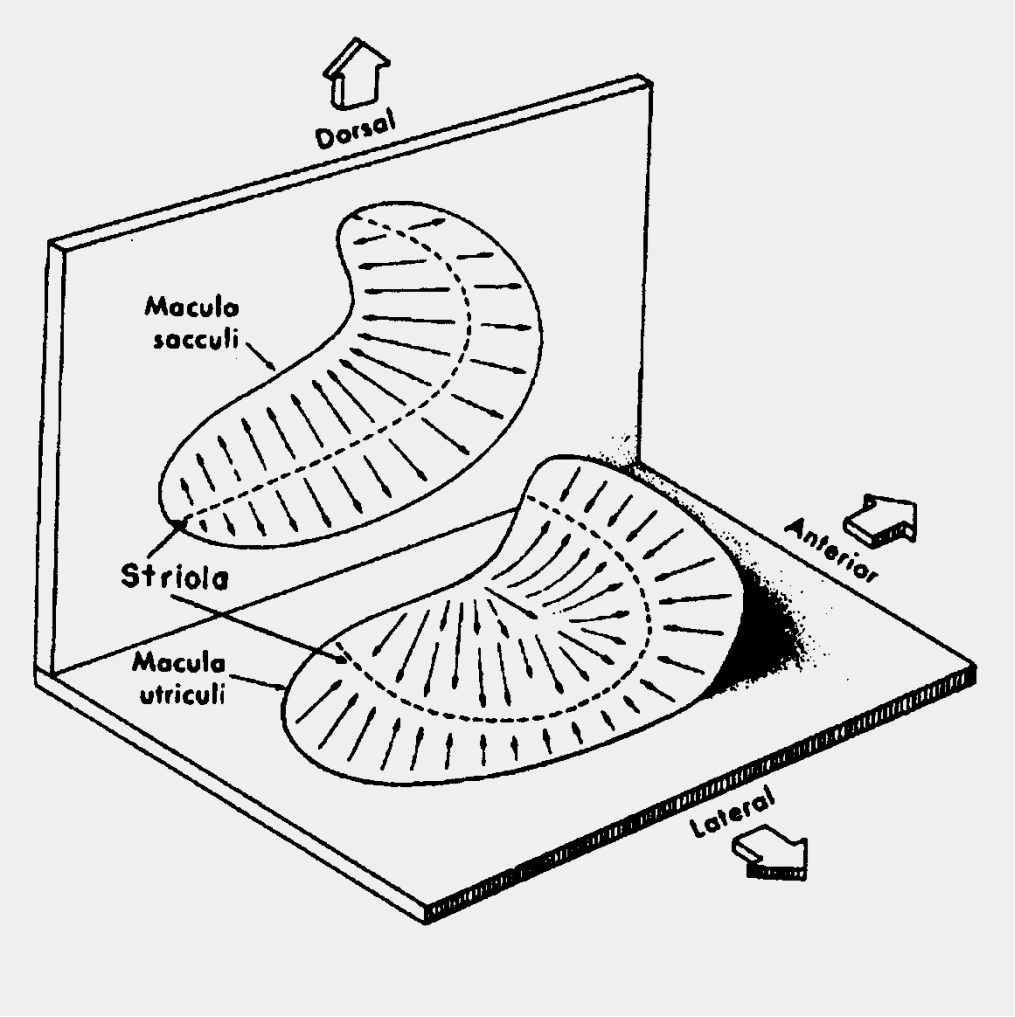


Utricle

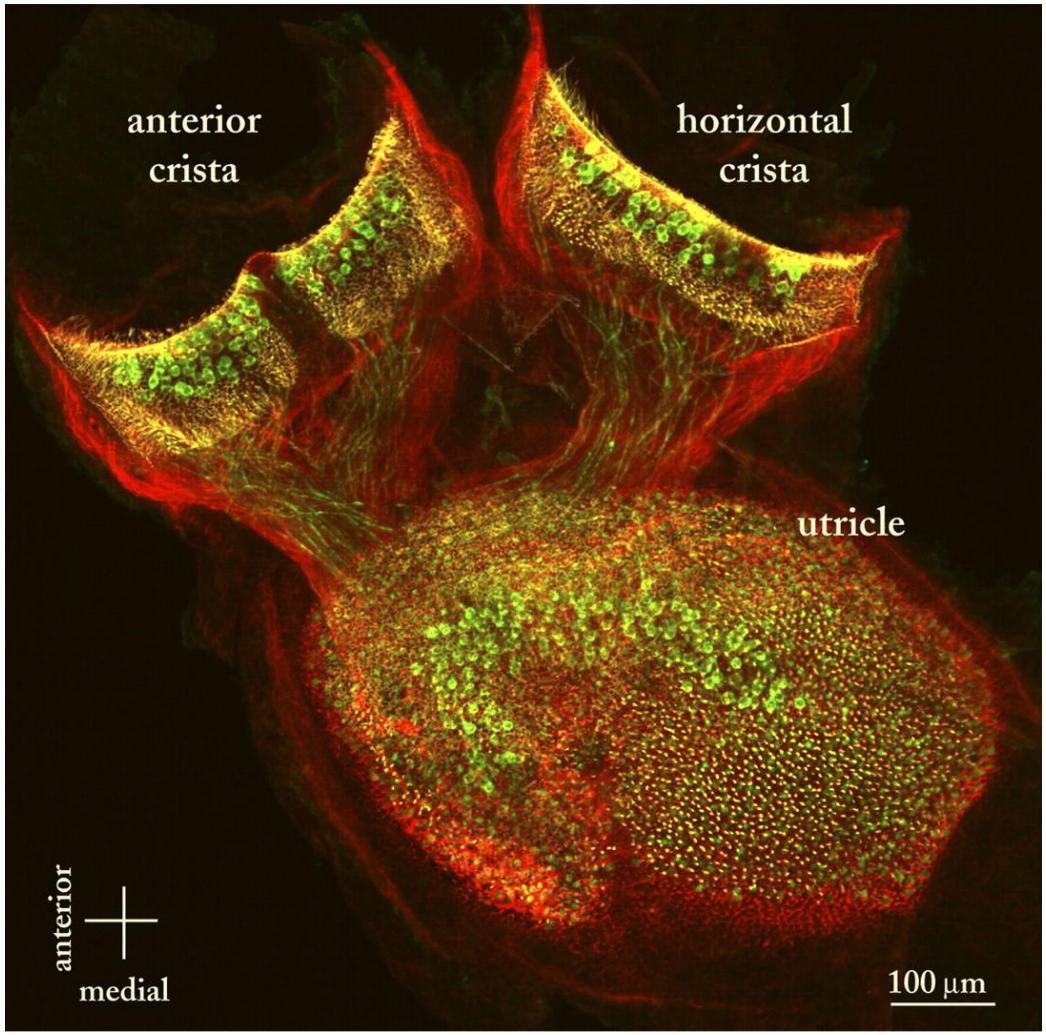
Vzájemná pozice sakulární a utrikulární makuly v jednom orgánu



Vzájemná pozice sakulární a utrikulární makuly v jednom orgánu

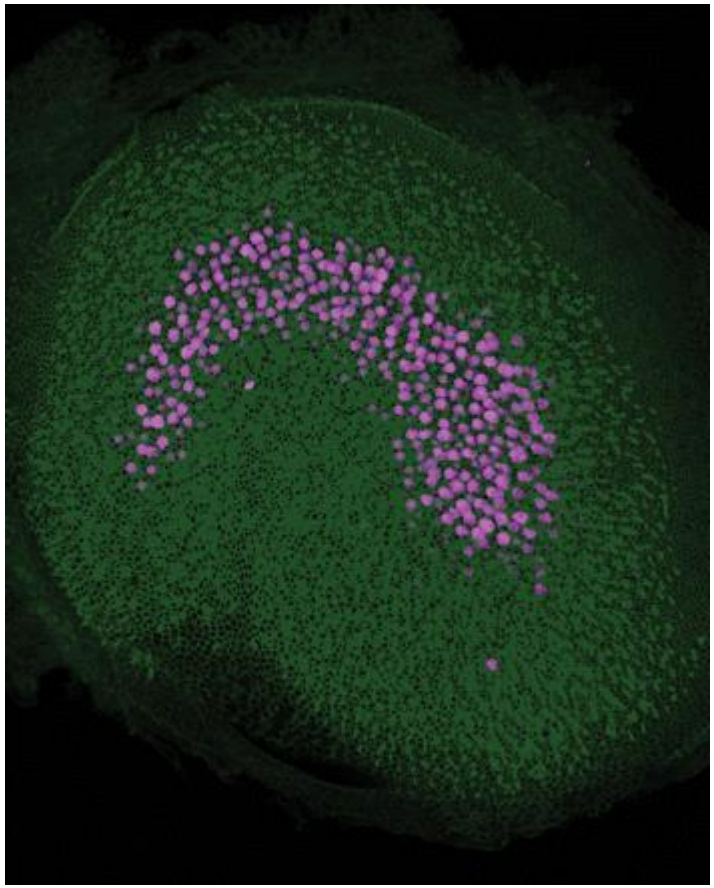


α- and β-III tubulin (red), calretinin (green), and phalloidin (yellow)



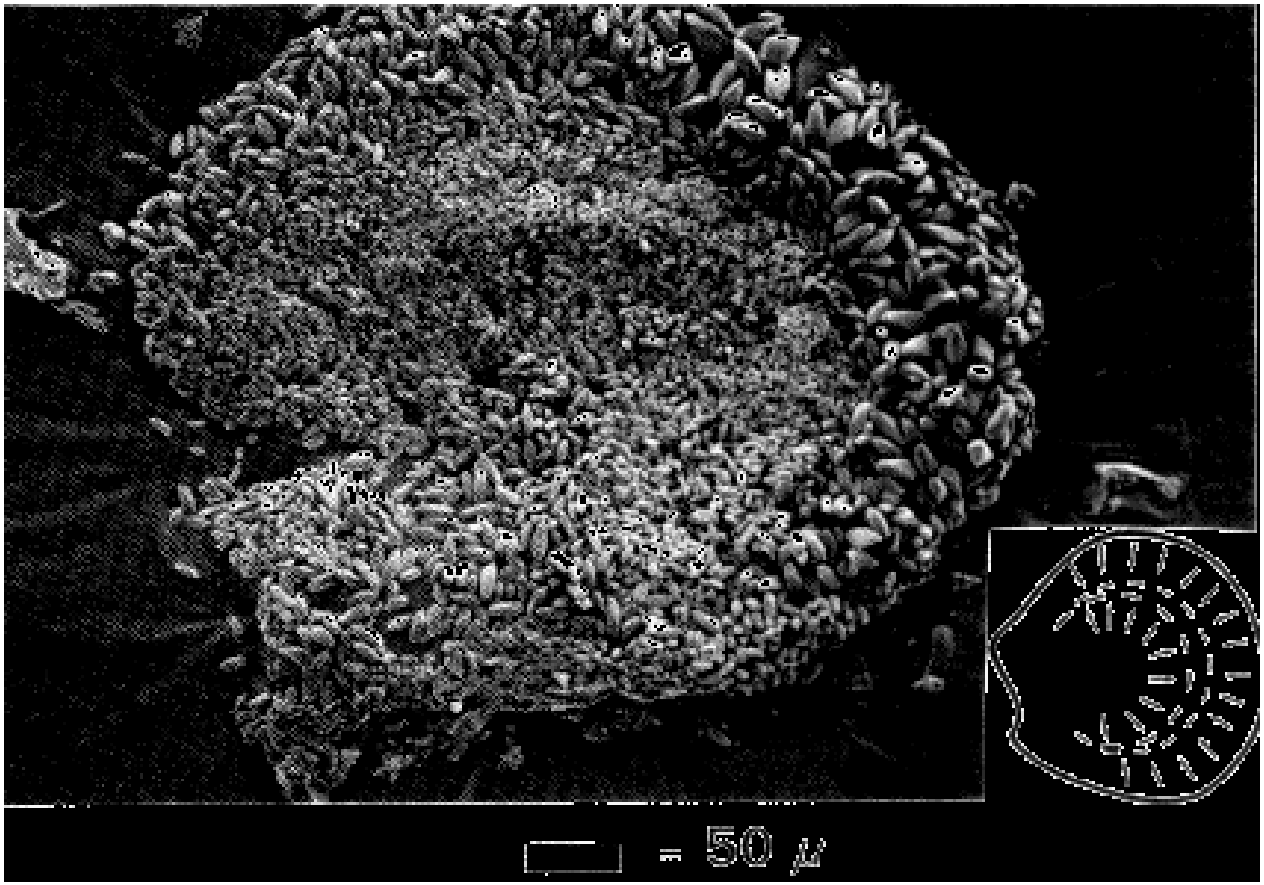
Li A et al. J Neurophysiol 2008;99:718-733

Journal of Neurophysiology



Neonatální myší utrikulus. Zeleně je značený F-actin a fialově oncomodulin který vymezuje striolu.

https://www.jneurosci.org/content/31/33.cover-expansion

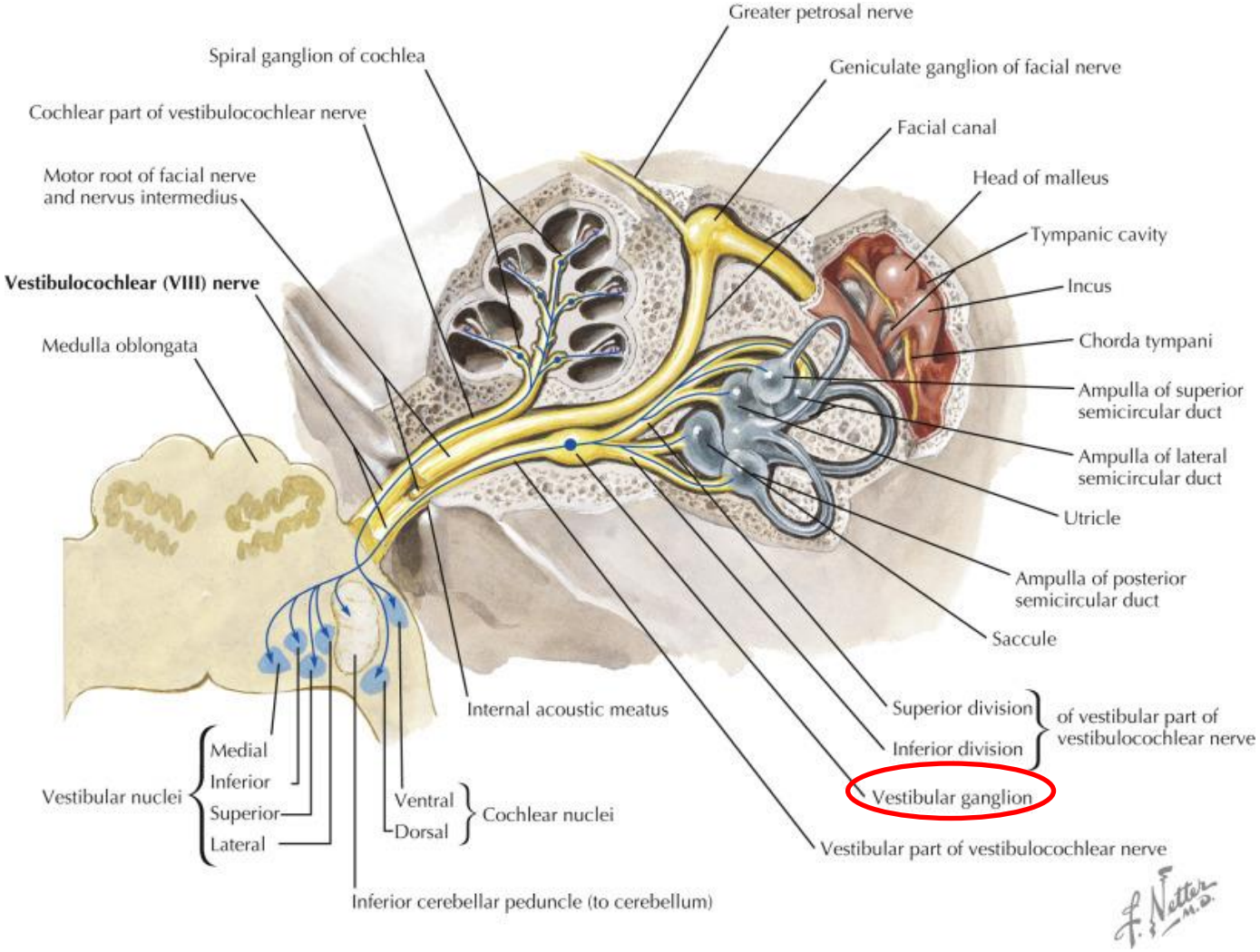

= 50 μ

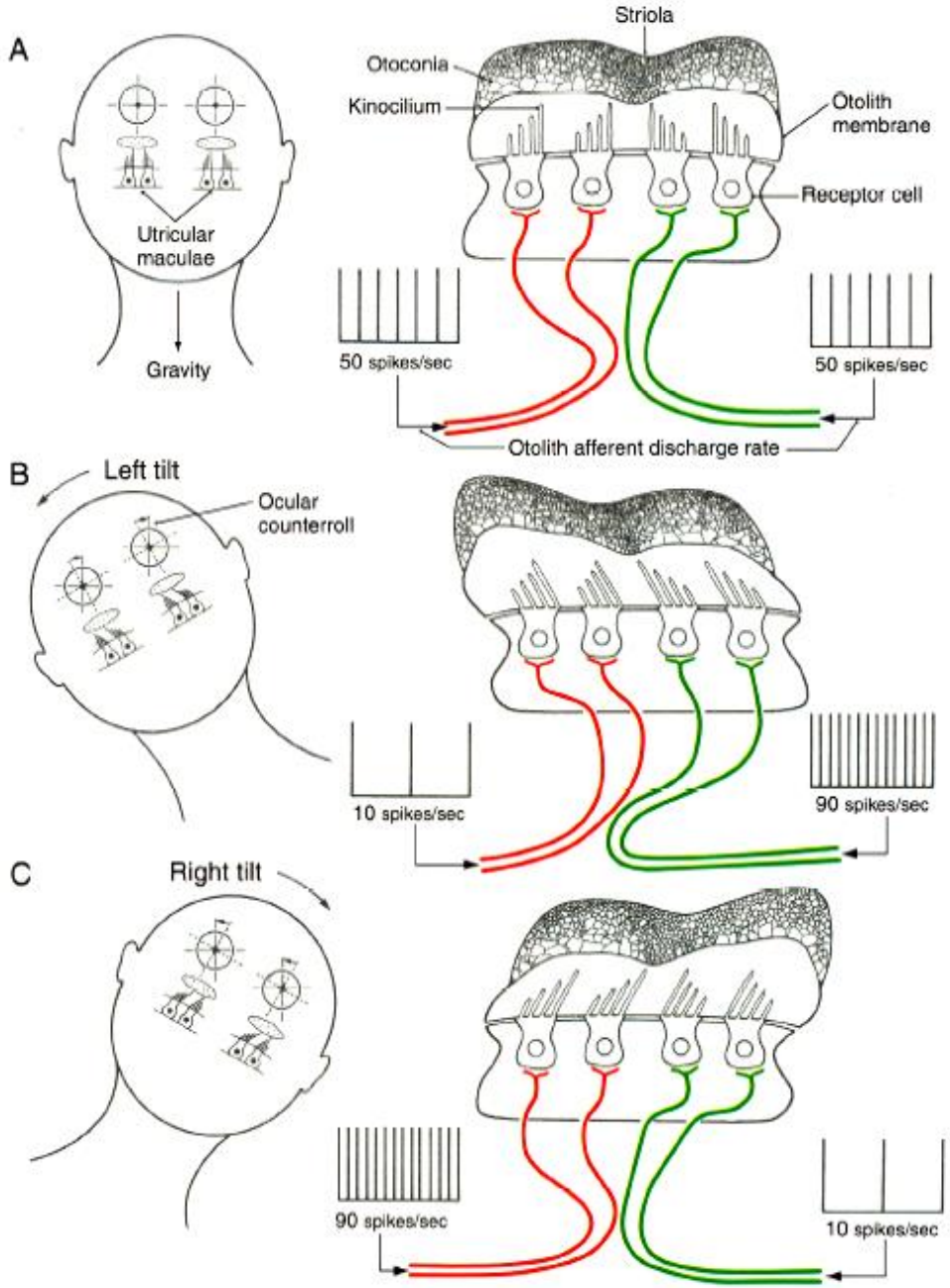
Co odečítá depolarizační signál vytvořený vláskovou buňkou?

1° senzorické neurony

jsou součástí VIII. hlavového nervu

- mají buněčné tělo ve vestibulárním gangliu – tzv. *Ganglion Scarpae*
- vedou do vestibulárních jader mozkového kmene a mozečku





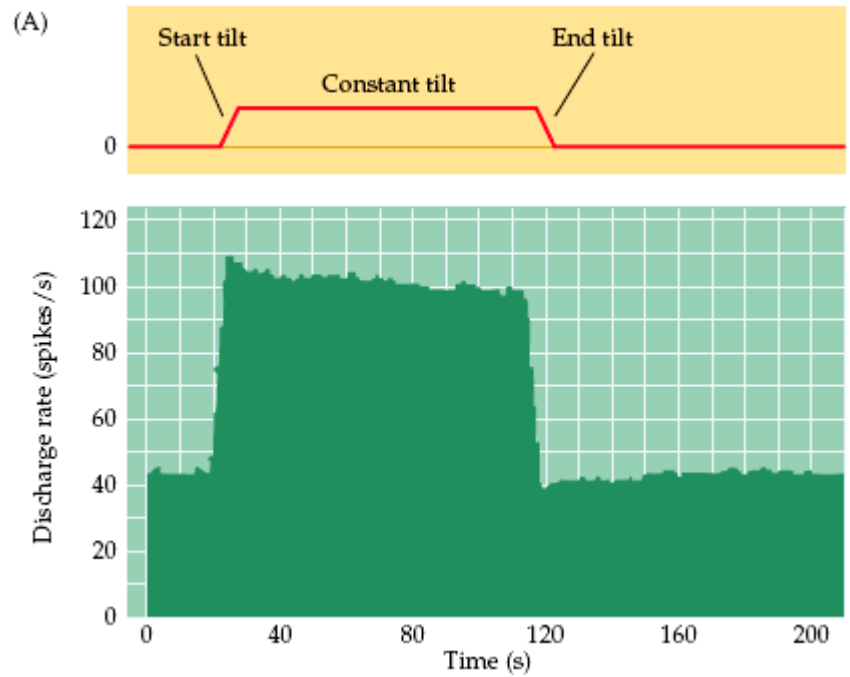
Transdukce v otolitickém orgánu

Reakce utrikulární makuly na náklon hlavy:

A) hlava rovně – primární neurony na obou stranách strioly pálí stejně
B) hlava doleva nebo doprava
c) vl. b. jsou buď aktivovány nebo inhibovány podle pozice strioly

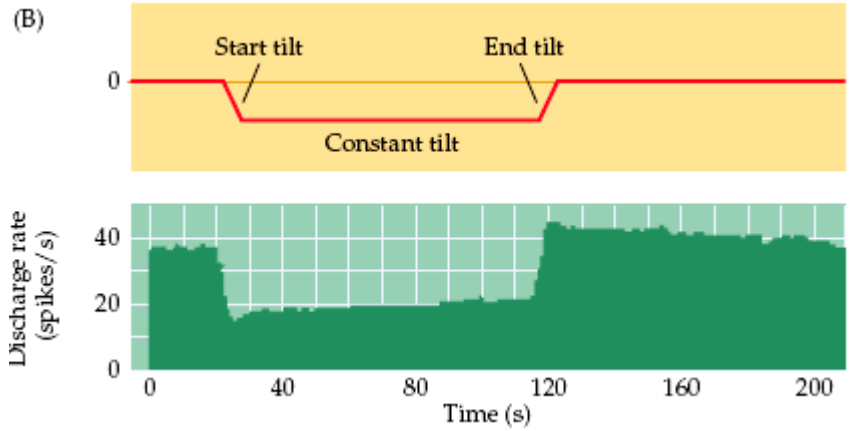
Makuly na jedné a druhé straně hlavy jsou k sobě v zrcadlové pozici, takže pohyb na jednu stranu má opačný efekt na buňky uložené v analogických pozicích na druhé straně hlavy

Reakce 1° neuronu z otolitického orgánu na náklon hlavy



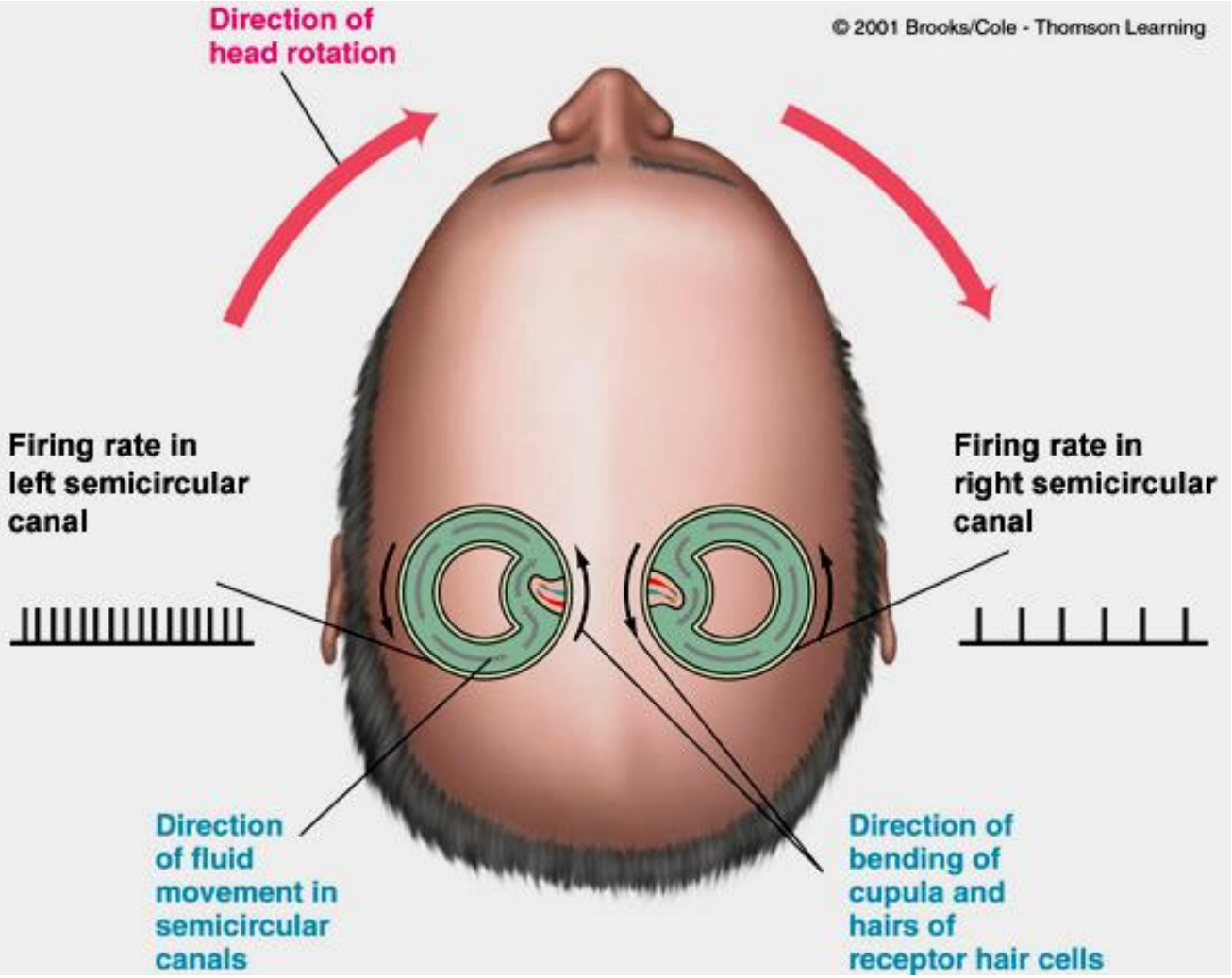
Náklon hlavy směrem specifickým pro měřenou buňku vyvolá vysokou frekvenci AP

tonická odpověď

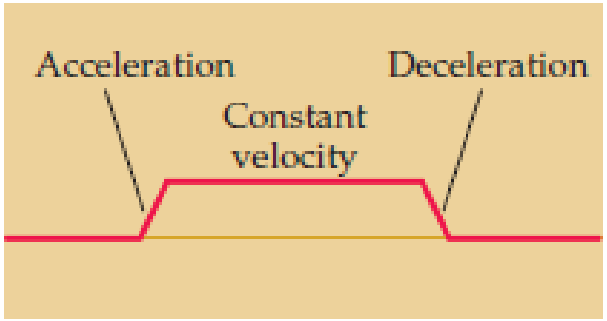


Náklon hlavy přesně směrem opačným vyvolá snížení frekvence AP až pod hladinu spontánní klidové frekvence AP

Transdukce úhlového zrychlení



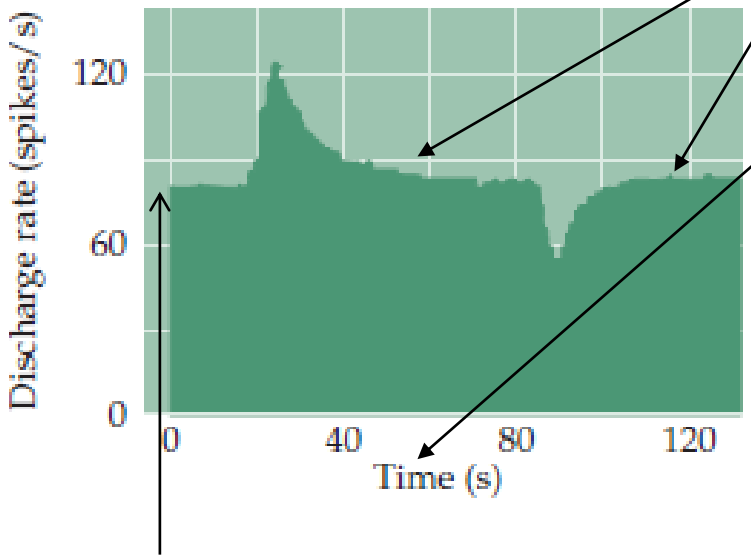
Reakce 1° nervu (axon vestibulárního nervu) z ampuly na úhlové zrychlení (rotace opice na židli)



Odpovídající kanál na druhé straně hlavy bude mít komplementární reakci

adaptace

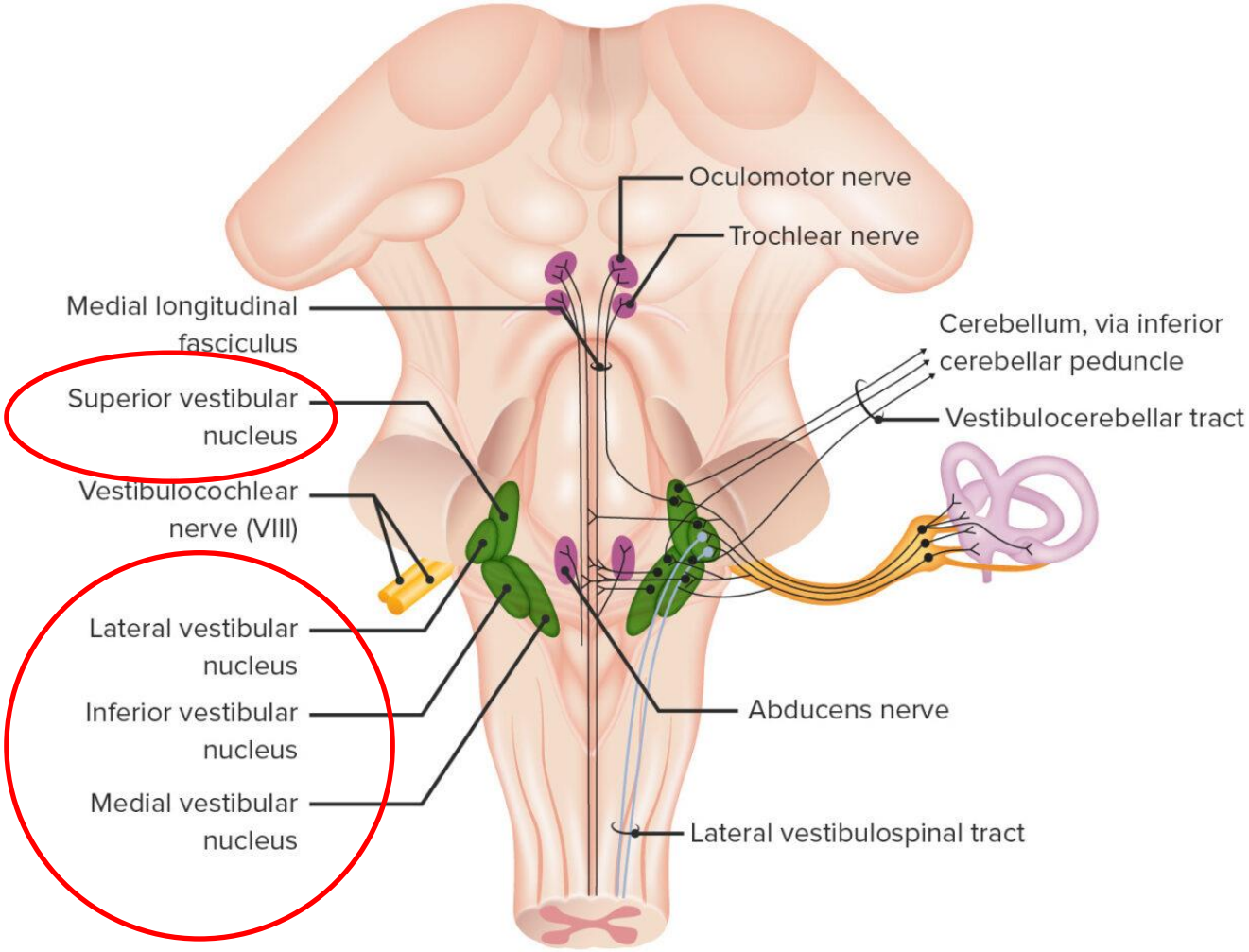
fázická odpověď



Rychlost adaptace – je čas, kdy se kupula vrátí do klidového stavu a vl.b. do rovné pozice. To může nastat ještě za pohybu, pokud je úhlová rychlost konstantní (v přírodě vzácné, ale lodě, letadla...ano)

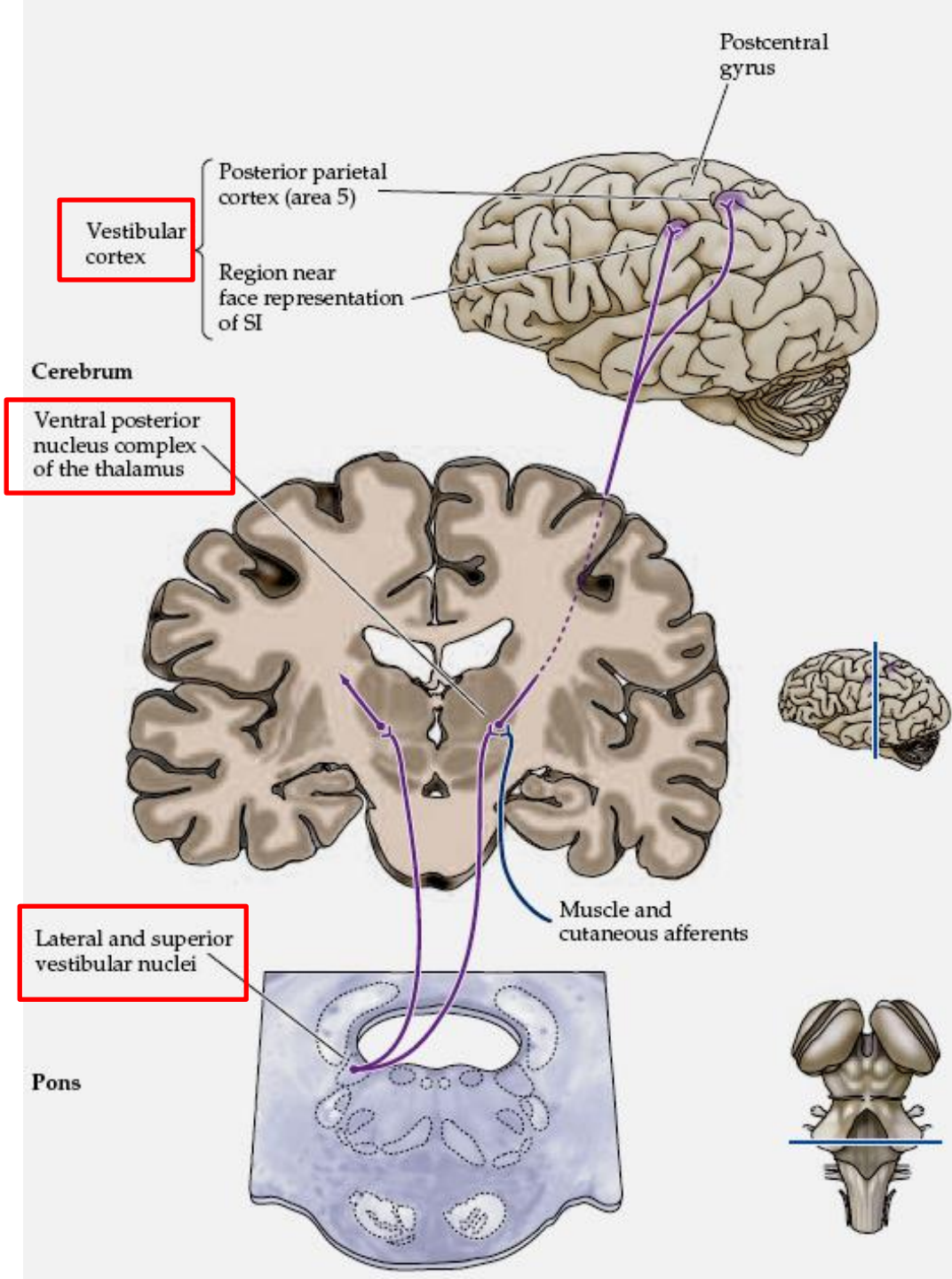
vysoká spontánní aktivita

Vestibulární jádra mozkového kmene jsou nezbytnou převodní strukturou pro vedení informací z VO do vyšších oblastí CNS

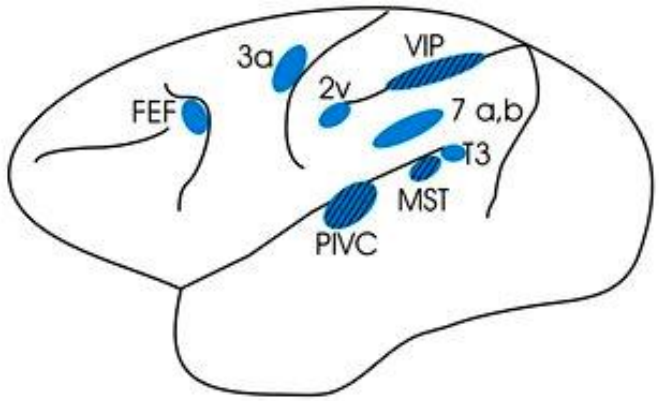


Vestibulární dráha do thalamu a míchy

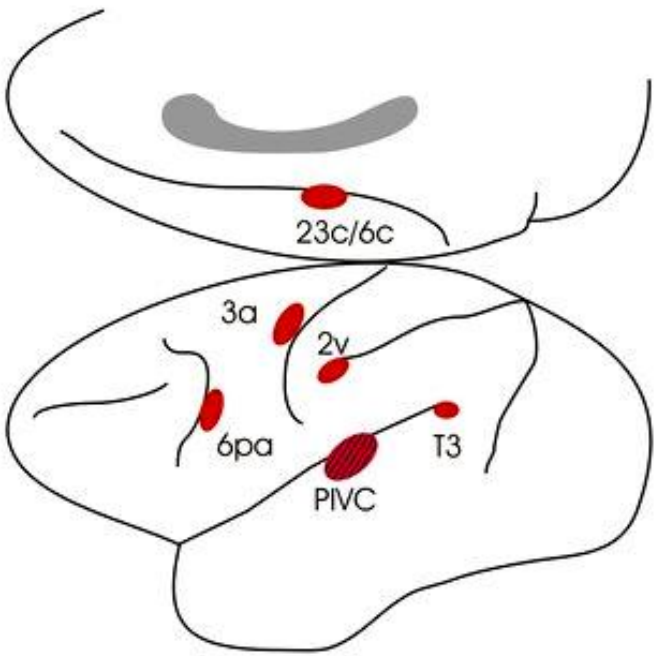
Neurony v parietálním kortexu reagují jak na zrakové a propriocepční, tak na vestibulární stimuly – řeší subjektivní vnímání orientace těla v prostoru



A.



B.



A) Oblasti kortexu které získávají informace z vestibulárních jader

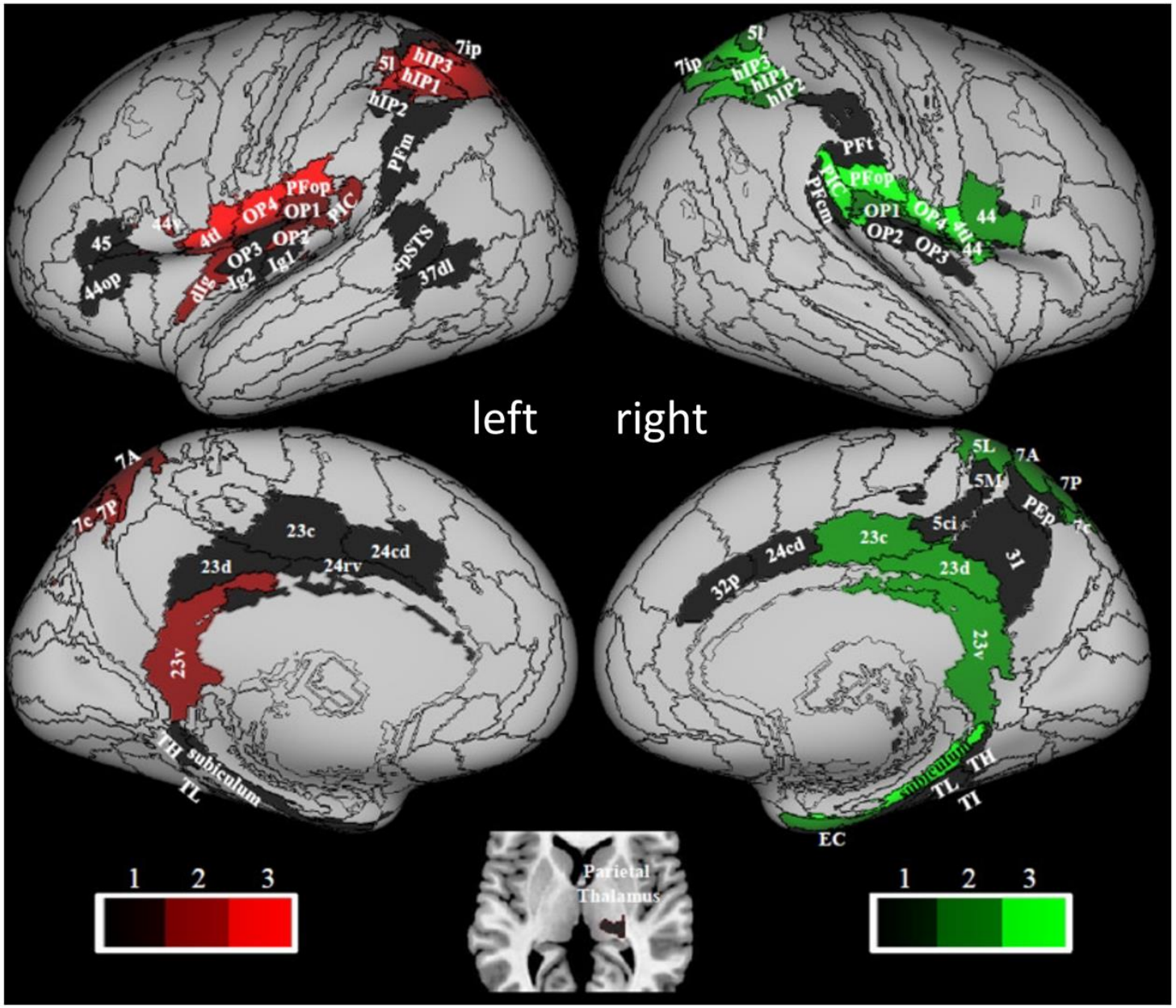
B) Korové oblasti, které projikují zpět do vestibulárních jader

FEF = frontální oční pole
část premotorického kortexu (oční pohyby)

MST = medial superior temporal oblast (multimodální - detekce pohybu zrakem- **„optický tok“**)

VIP = ventrální intraparietální oblast (multimodální – konstrukce representace blízkého extrapersonálního prostoru)

PIVC = parietoinsulovestibulární kortex (3D info z vestibulárního systému)



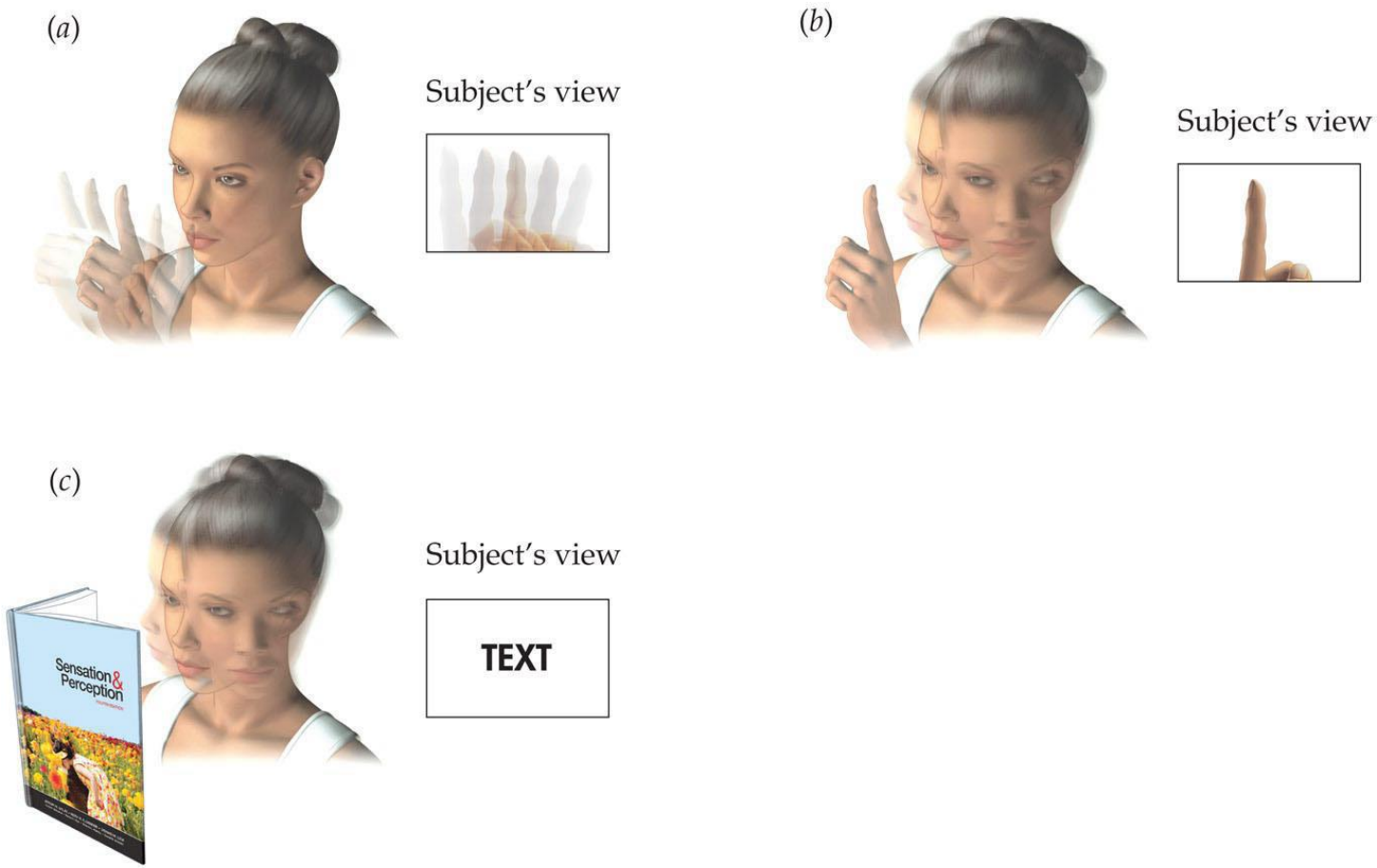
doi: 10.3389/fnint.2021.793634

Centrální projekce vestibulárního systému se účastní tří hlavních druhů reflexů

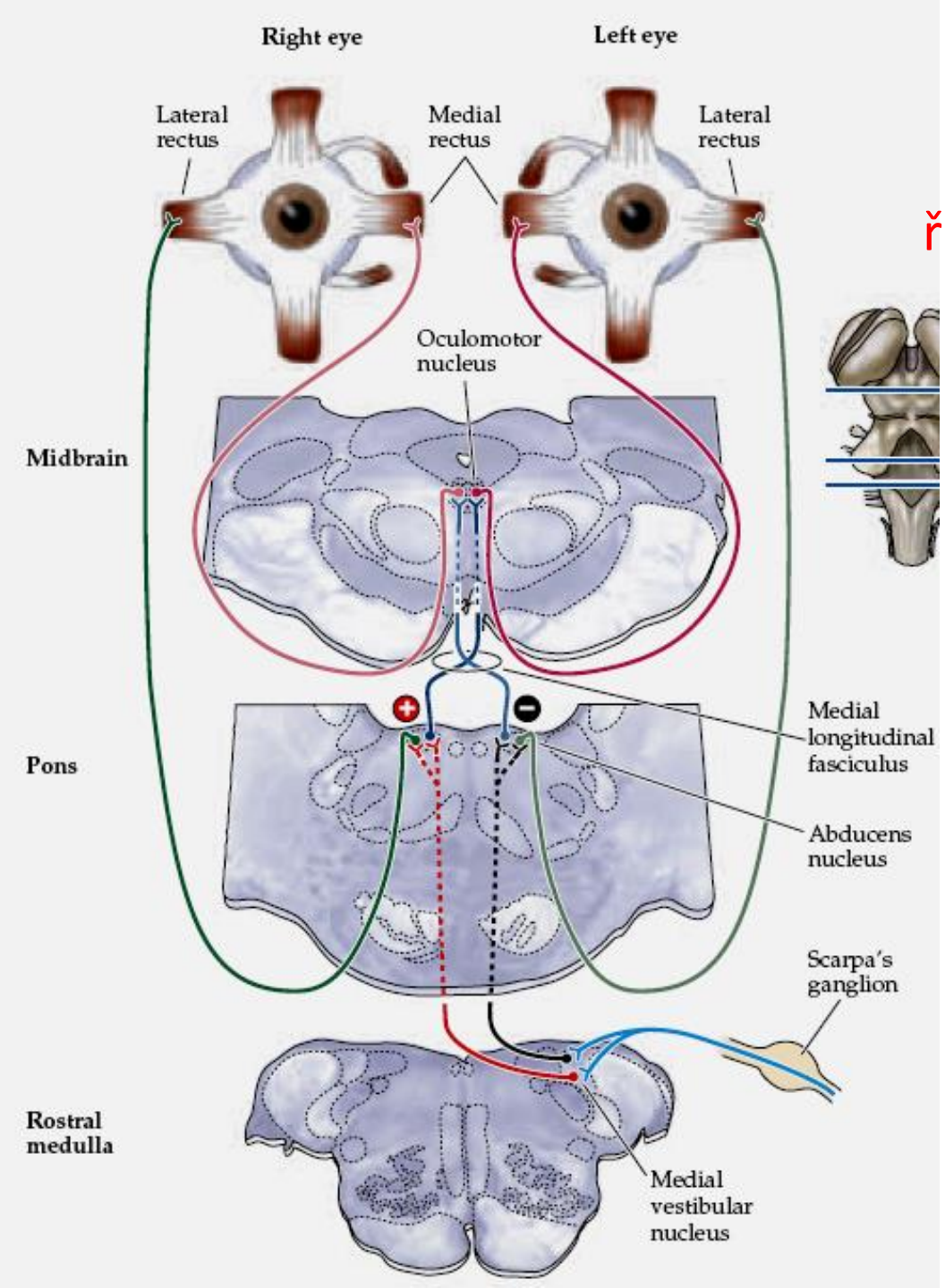
1. „Gaze“ = koordinace hlavy a očních pohybů směrem k fovee
   - stabilizace obrazu na retině během pohybu (vestibulo-okulární reflex – VOR)

2. Udržení postoje (vestibulo-cervikální – VCR a vestibulo-spinální reflex – VSR)

Vestibulo-okulární reflex



***SENSATION & PERCEPTION 4e*, Figure 12.1**
© 2015 Sinauer Associates, Inc.



VOR

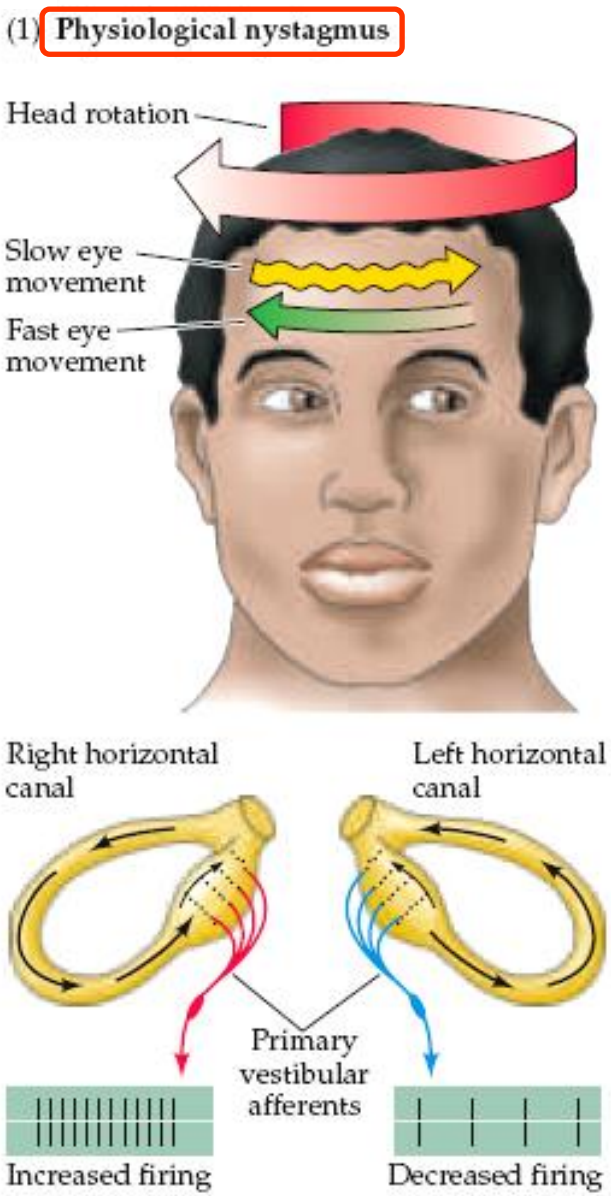
řídí oční pohyby, které jdou **proti pohybu hlavy**

Projekce VJ do jader kontralaterálního jádra abducens (VI.) a jádra okulomotorického nervu (III.) – excitační

Projekce do ipsilaterálního abducens - **inhibiční**

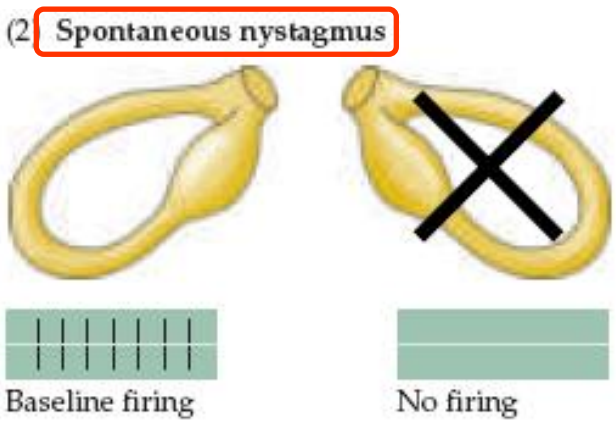
Př. Když hlava rotuje doleva, levý horizontální kanál posílá info do levého VJ, to aktivuje pravý abducens, který kontrahuje pravý rectus laterális. Oculomotoricus kontrahuje levý mediális – oko se stáčí doprava

VOR přetrvává i v bezvědomí, používá se proto pro zjištění stavu mozkového kmene u pacientů v kómatu



Když je hlava v klidu, výstup z nervů pravé i levé strany je stejný – žádný oční pohyb

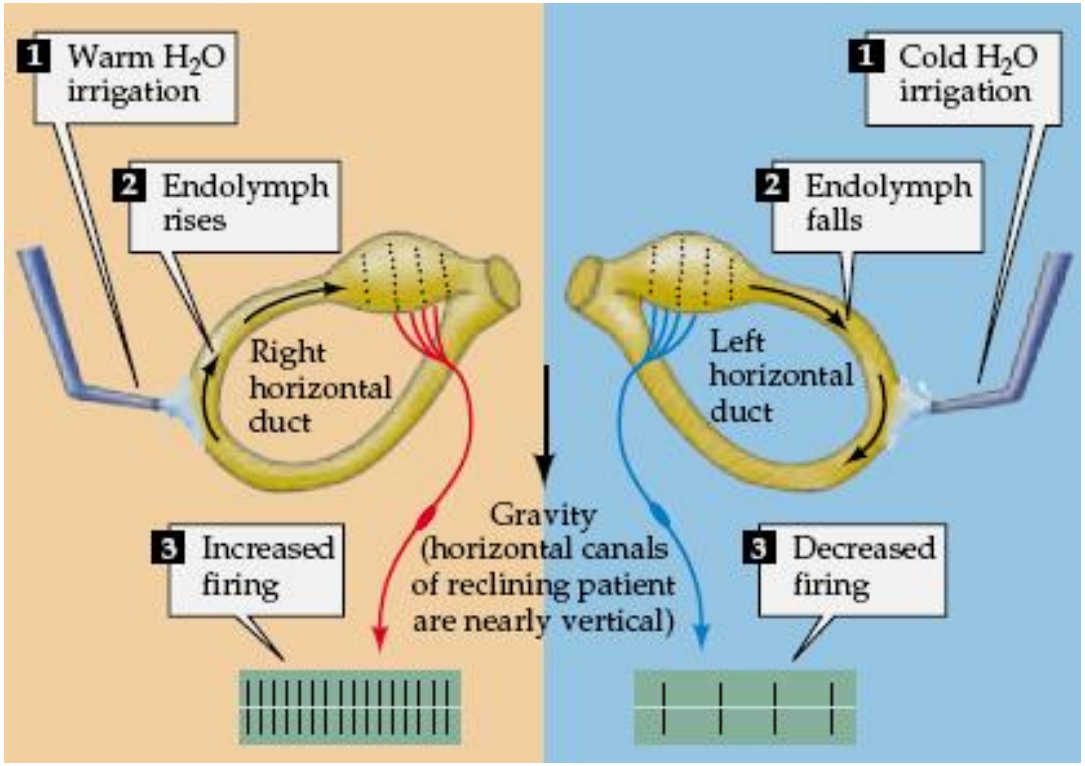
Když se hlava točí v horizontální rovině, výsledný rozdíl aktivit neuronů z pravé a levé strany určuje směr a míru očního pohybu – fysiologický nystagmus



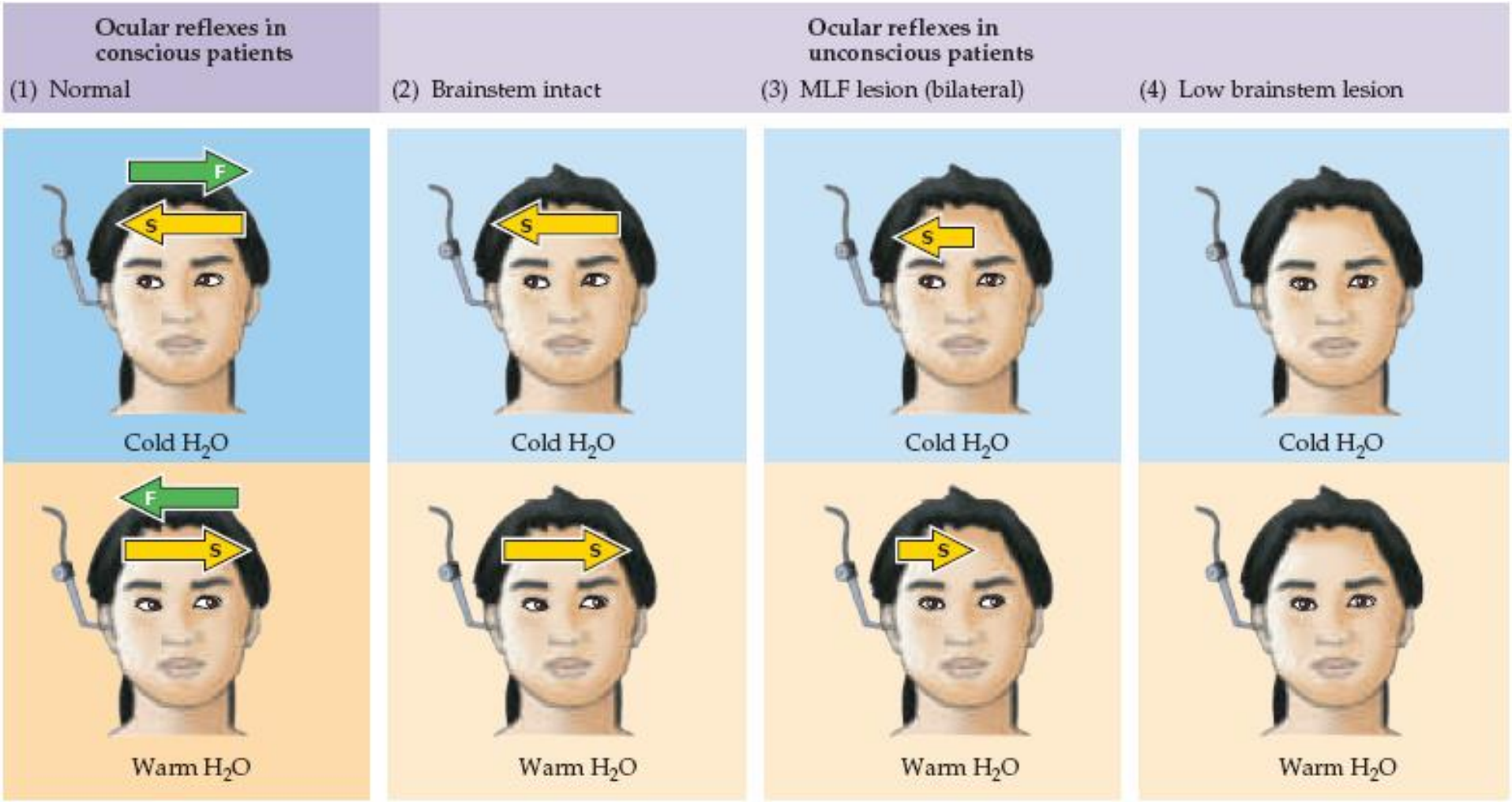
Při unilaterálním poškození vestibul. systému chybí kompenzační spontánní aktivita neuronů z jedné strany, takže vzniká oční pohyb i v klidu – spontánní nystagmus

„Caloric testing of vestibular functions“

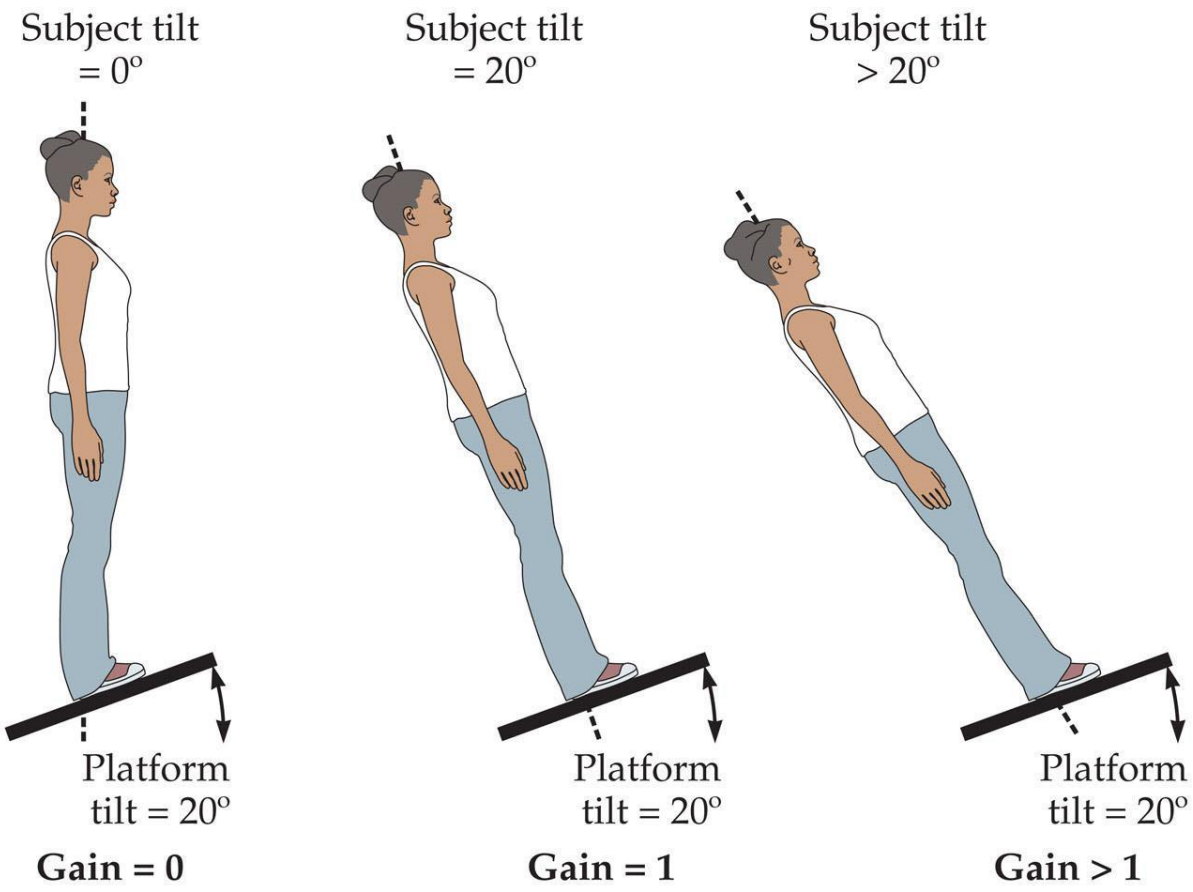
Diagnostická metoda pro určení integrity vestibul. systému. Ochlazování nebo ohřívání semicirk. kanálů se mění pohyb endolymfy při pohybu hlavou a tím výsledný poměr aktivit z pravé a levé strany a tím oční pohyby



Výsledné oční pohyby po ohřívání/ochlazování stejného ucha



Vestibulo-spinální a cervikální reflex



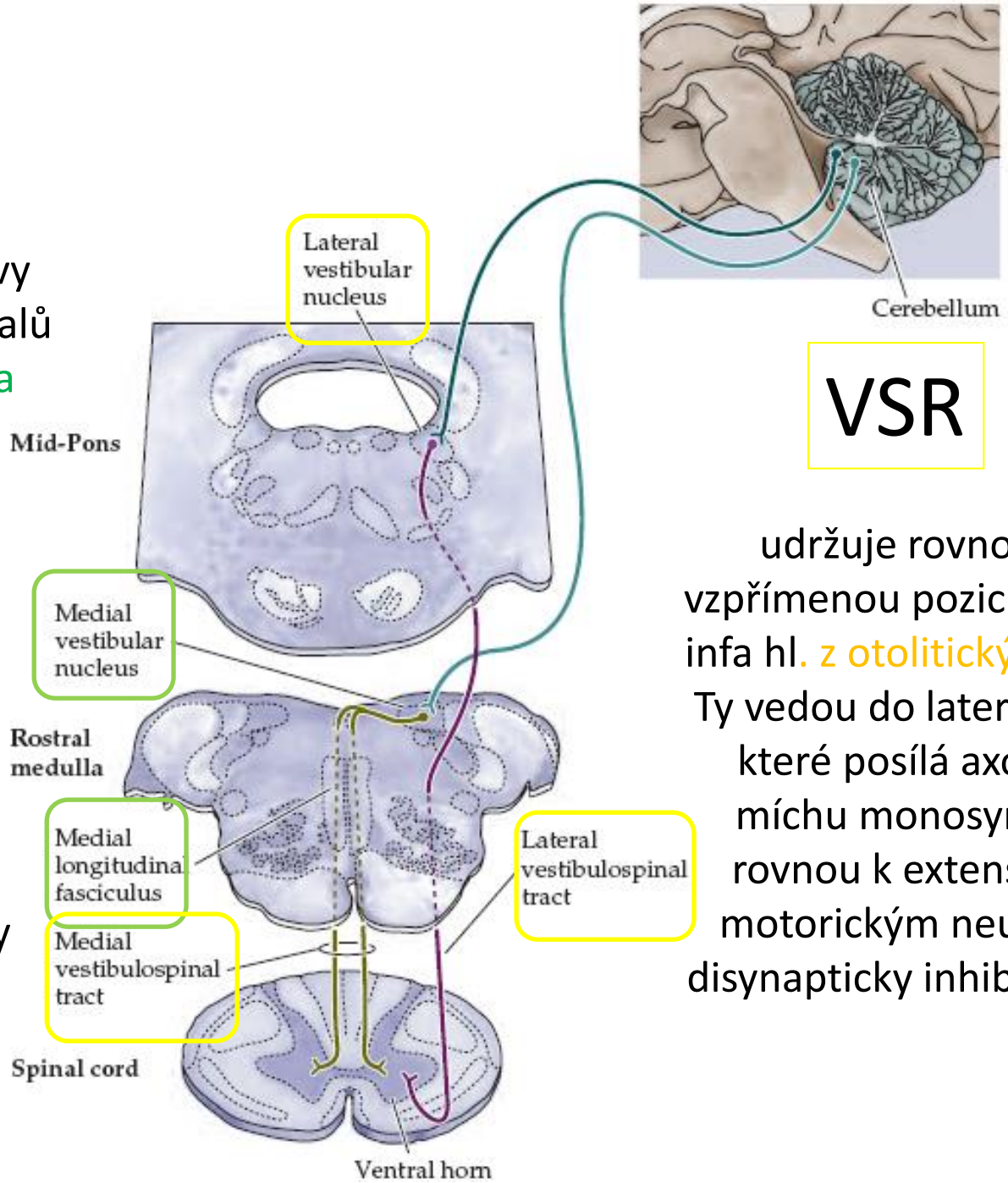
SENSATION & PERCEPTION 4e, Figure 12.26 (Part 2)

© 2015 Sinauer Associates, Inc.

VCR

reguluje pozici hlavy reflexní stimulací svalů krku jako reakci na stimulaci v semicirkulárních kanálech

Inervuje krční obratle, ze kterých jsou inervovány svaly krku



VSR

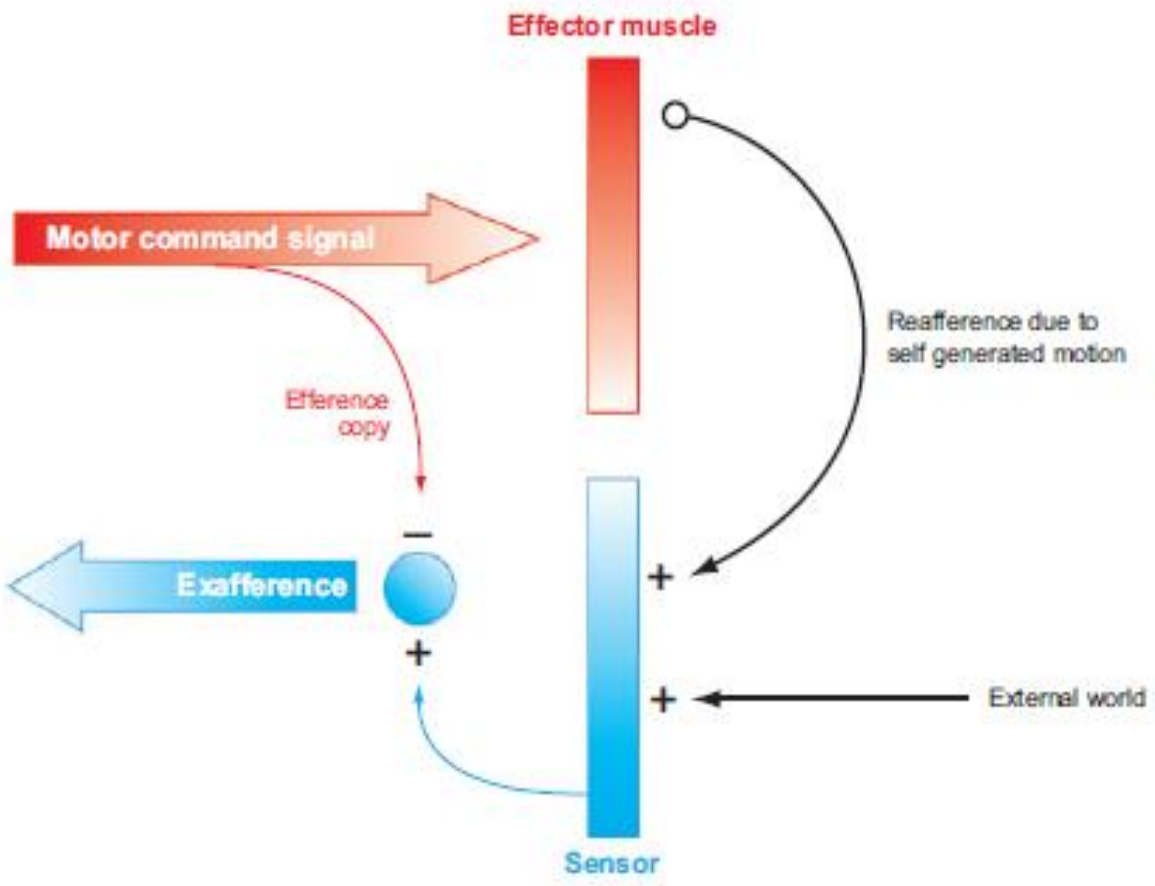
udržuje rovnováhu a vzpřímenou pozici těla podle infa hl. z otolitických orgánů. Ty vedou do laterálního VN, které posílá axony přes míchu monosynapticky rovnou k extensorovým motorickým neuronům a disynapticky inhibuje flexory

Rozlišení pasívního a aktivního pohybu hlavy

- Informace z vestibul. aparátu jsou kombinované s informacemi z jiných smyslů (zrak, proprio., svaly) což umožňuje vnímat vlastní pohyb

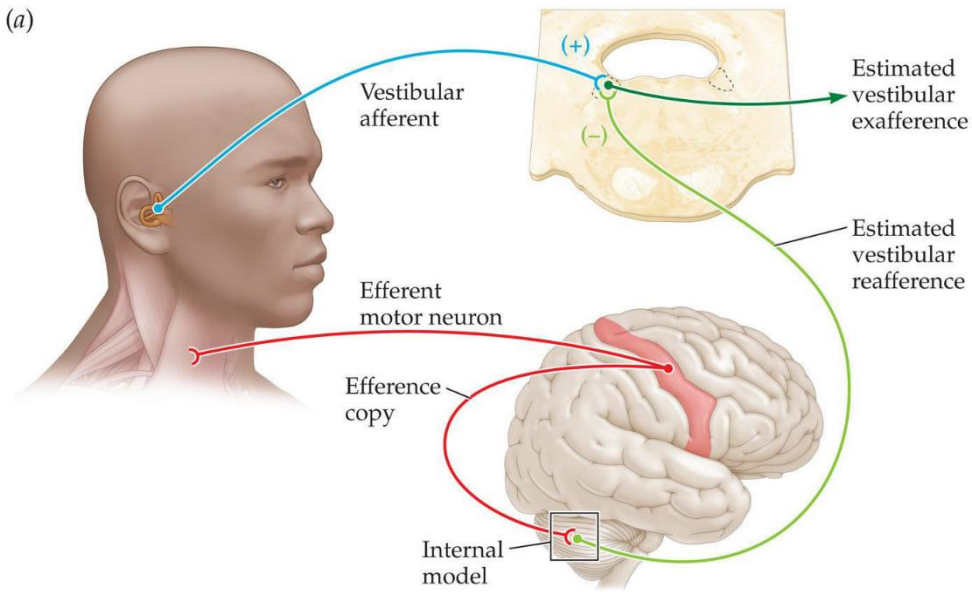
- **pasívní pohyb** – veze nás autobus (vestibulo+zrak)
- **aktivní pohyb** (vestibulo+zrak+proprio+**efferenční kopie motorického signálu**)

Princip reafference

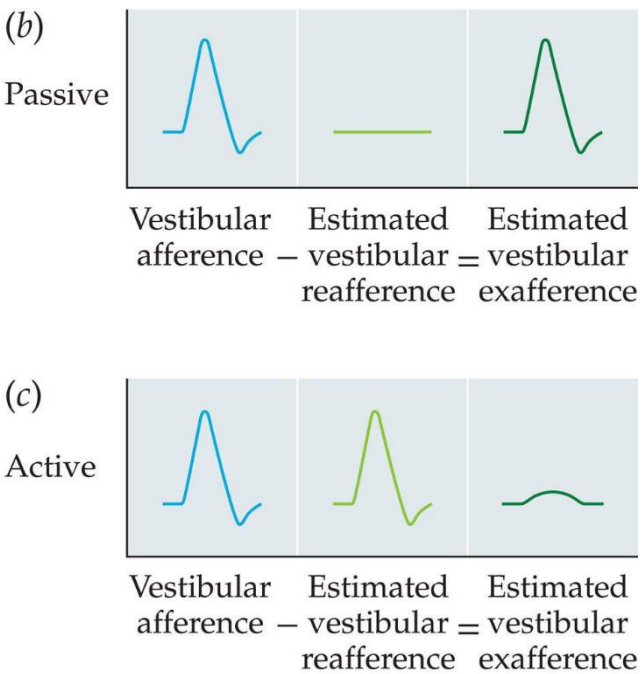


Vnitřní předpoklad senzorických následků řízené akce je derivován z kopie motorické efferentace. Od úrovně 1° neuronu nebo jeho 1. synapse, je porovnáván s aktuálním senzorickým vstupem. Ten, pokud nepřesáhne předpoklad, není poslán dál ke zpracování.

Vestibulární exafference = neuronální representace vnějšího světa

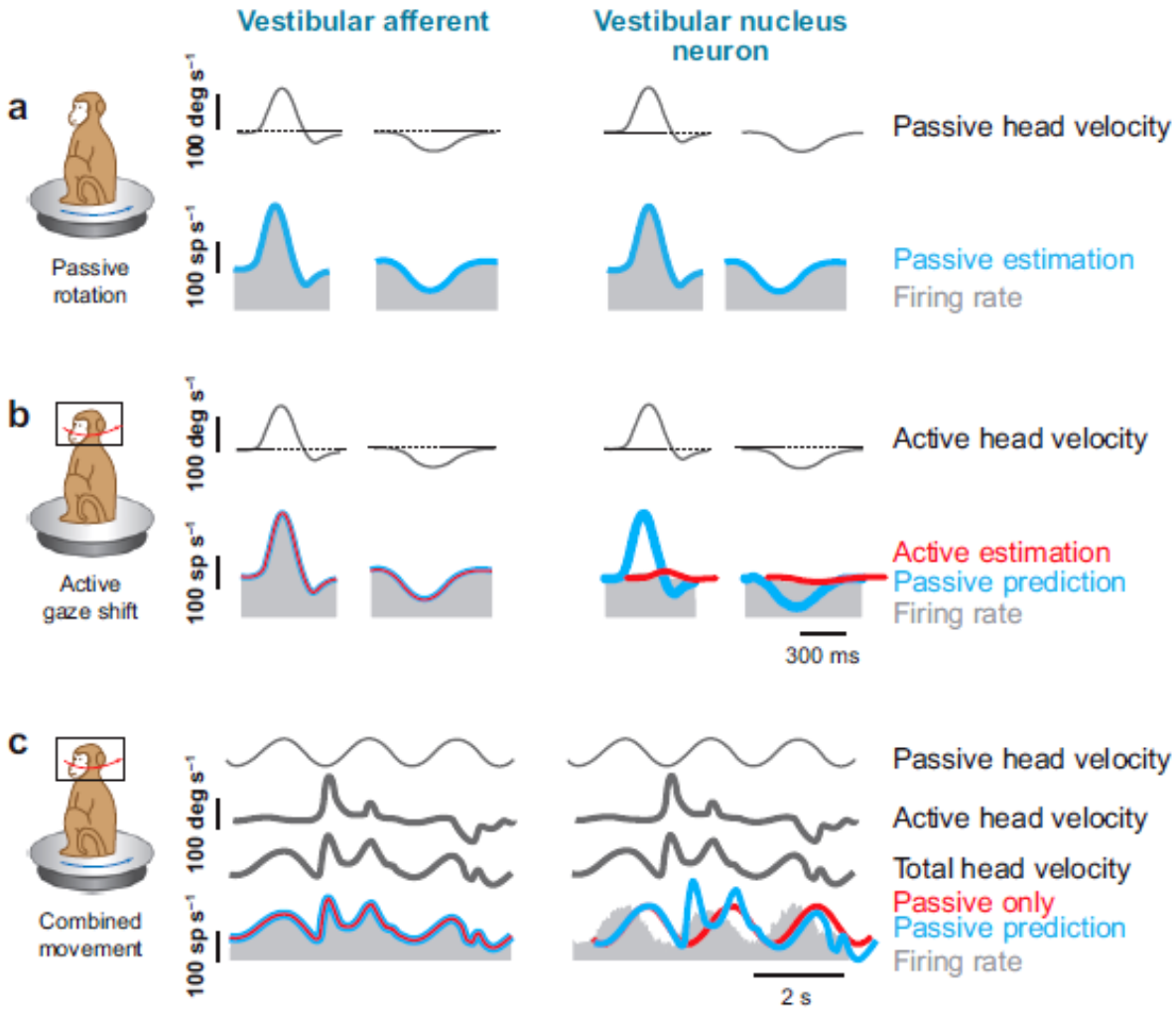


SENSATION & PERCEPTION 4e, Figure 12.20 (Part 1)
© 2015 Sinauer Associates, Inc.



SENSATION & PERCEPTION 4e, Figure 12.20 (Part 2)
© 2015 Sinauer Associates, Inc.

2° VO (vestibular-only) neurony rozlišují mezi senzorickým vstupem, který je výsledkem cílené akce a tím, který vzniká externě, pasívně, nezávisle na vůli

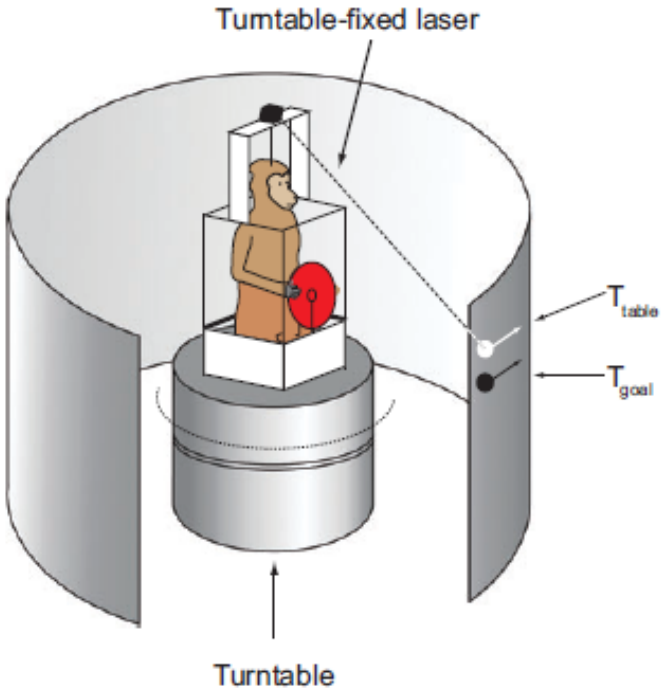


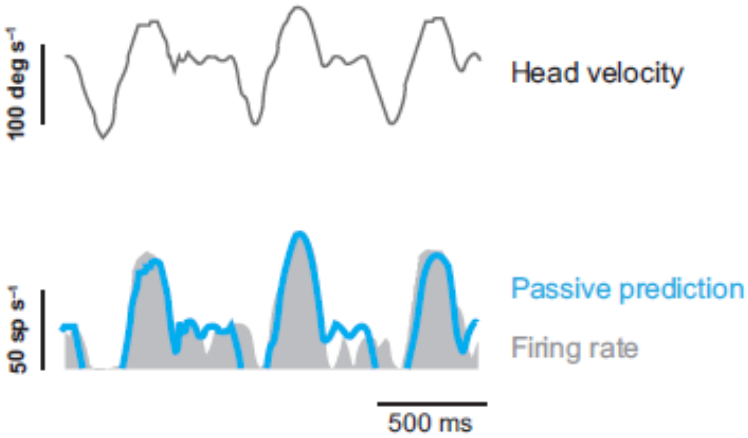
Pasívní rotace vyvolá předpokládanou reakci jak 1°, tak 2° neuronu

Aktivní rotace hlavy vyvolá reakci 1°, ale ne 2°neuronu
Info je systémem potlačena

Kombinovaná rotace vyvolá odpověď obou neuronů, 2° neuron reaguje selektivně na pasivní pohyb

Pasivní pohyb těla řízený vlastní vůlí nezpůsobí reafferenční kompenzaci





Ale! dá se vytrénovat (př. piloti, řidiči) a souvisí s motorickým učením

Vestibulární systém

- Reaguje na lineární a úhlové změny v pozici hlavy
- Jeho převodní jednotkou je vlásková buňka – mechanoreceptor
- Integruje informace ze zrakového a somatosenzorického systému již na na úrovni 2°neuronu vestibulárních jader
- Vestibulární jádra posílají informace do kortexu, mozečku, páteřní míchy i do jiných jader mozkového kmene – vstupy do velké většiny činností mozku
- Nepřetržitě integruje informační tok ze senzorických orgánů a tokem informací ke svalům

© kairn design 08