



PRODUKCE ELEKTŘINY A ELEKTROSENZORY OBRAŤLOVCŮ





Elektrorecepce (elektrocepcce)

- schopnost vnímat elektrické impulzy
- vodní živočichové – voda je lepším vodičem elektrického proudu než vzduch (vysoký obsah iontů)
- všichni strunatci mohli vnímat elektřinu, během evoluce však tuto schopnost ztratili
 - elektrolokace (detekce objektů na základě jejich různého elektrického odporu a vodivosti)
 - vnitrodruhová komunikace (**elektrokomunikace** modulací elektrických vln)
 - **obranné a útočné chování** (omráčení kořisti, odehnání predátora)

Bioelektromagnetismus

- = produkce elektrického, magnetického nebo elektromagnetického pole živým organismem
- membránový a akční potenciál, toky iontů v nervech a svalech
- použití jakéhokoliv svalu včetně srdce tvoří elektrické pole, které může být detekováno jiným živočichem
- elektroreceptory
- produkce elektrického pole uvnitř vs. vně těla
- př.: EEG - vyšetřovací metoda (sledování činnosti mozku); EEG-křivka zachycuje aktuální mozkovou aktivitu. Přístroj snímá elektrické potenciály vznikající při práci mozku pomocí elektrod připevněných na povrch hlavy. Tyto informace po zesílení zpracovává a zapisuje křivku na papír nebo obrazovku.

Elektrorecepční orgány

Nadtřída: Bezčelistnatci (*Agnatha*)

= mihule

Nadtřída: Čelistnatci (*Gnathostomata*)

Linie: Paryby (*Chondroichthyes*)

- příčnoústí (*Elasmobranchii*) = žraloci, rejnoci

Linie: *Teleostomi*

- chrupavčití (*Chondrostei*) = jeseteři
- kostnatí (*Neopterygii*) = kostnaté ryby (*Teleost*)
- dvojdyšní (*Dipnoi*), latimérie
- ptakořitní savci (*Monotremata*)

Pasivní elektrolokace

- živočich vnímá slabá elektrická pole generovaná ostatními živočichy
- poprvé pozorována u příčnoústých – Lorenzin ampule jsou citlivé na změny slabých elektrických polí (1960), pak objevení ampulárních receptorů u kostnatých ryb vyvinutých nezávisle (1971)
- = žraloci, rejnoci



Smyslový mechanismus – ampulární receptory citlivé na nízkofrekvenční stimuly (pod 50 Hz)

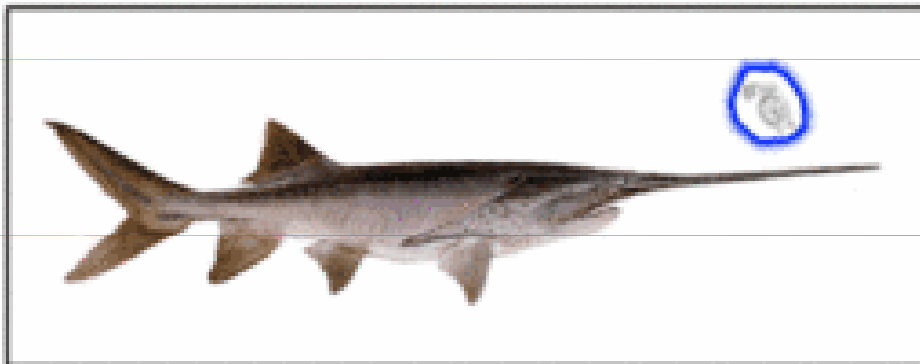
Aktivní elektrolokace



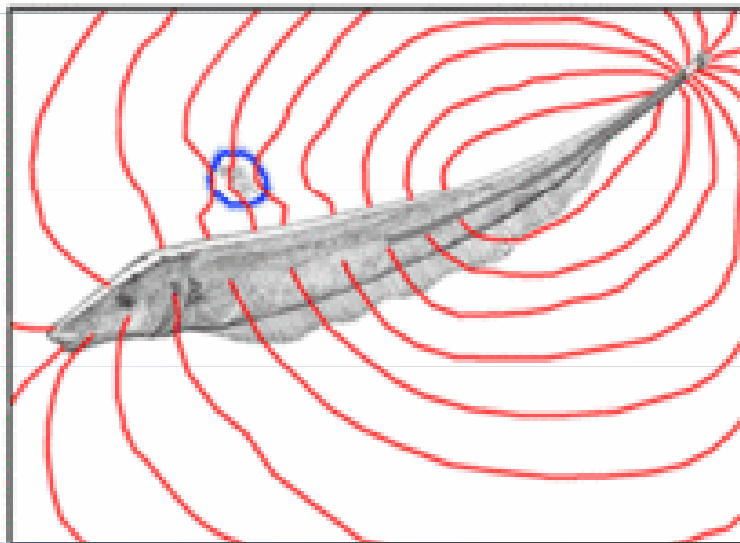
- k vnímání okolního prostředí tvoří živočich vlastní elektrické pole a detekuje jeho změny způsobené přítomností jiných objektů pomocí elektroreceptčních orgánů
 - důležitá v kalné vodě s nízkou viditelností
 - vývoj z postranní čáry (detekce pohybu)
 - silně elektrické ryby (elektrický úhoř)
 - slabě elektrické ryby (úhoři – Gymnotiform, Mormyriiform) – aktivně generují malé ($< 1\text{ V}$) elektrické impulzy použitím elektrického orgánu na ocasu sestávajícího ze 2-5 vrstev modifikovaných svalových buněk (elektrocytů); amplituda elektrického pole je okolo 1 mV/cm
 - výboj elektrického orgánu (electric organ discharge – **EOD**)
- Smyslový mechanismus** – tuberózní elektroreceptory citlivé na vysokofrekvenční stimuly (20-20.000 Hz)

Pasivní vs. aktivní elektrorecepce

A



B



A: PASIVNÍ - Veslonos americký (*Polyodon Spathula*) vnímá elektrické pole emitované zooplanktonem (*Daphnia*)

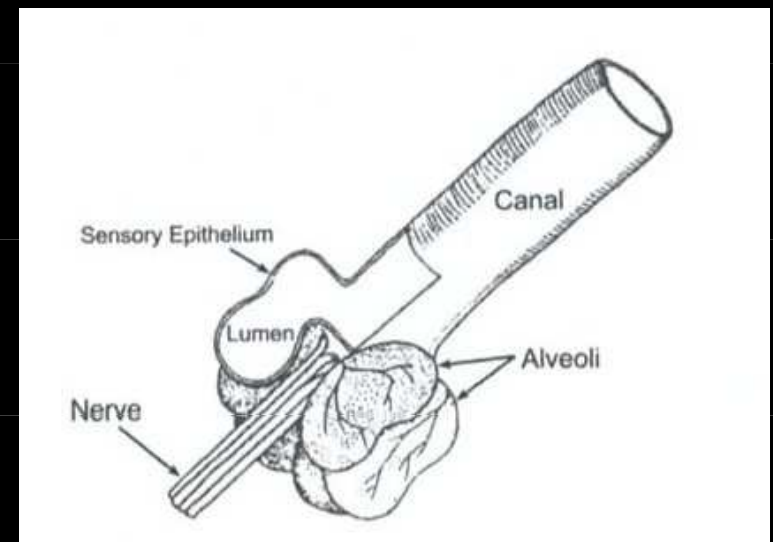
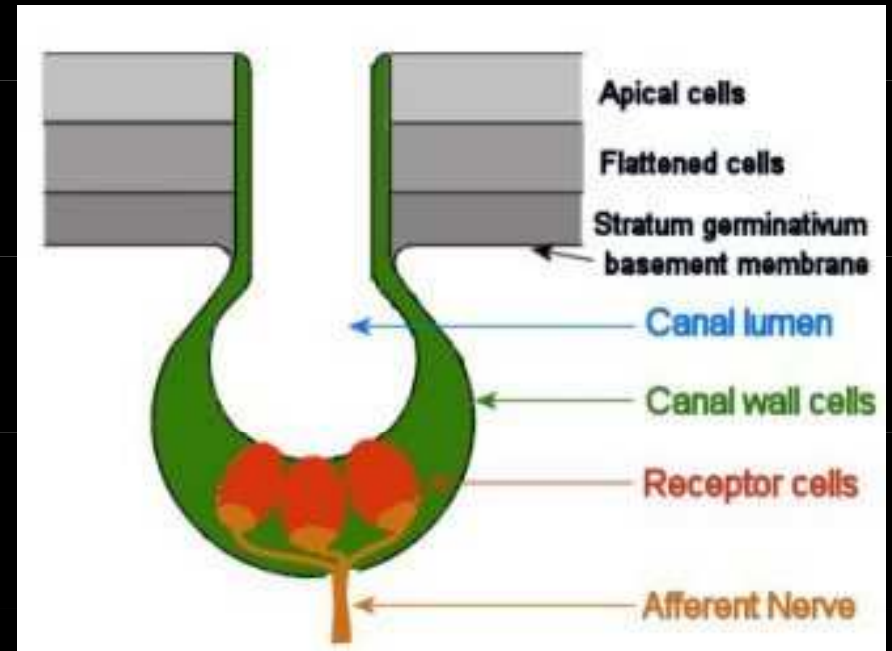
B: AKTIVNÍ - Slabě elektrická ryba nožovka kolumbijská (*Apteronotus leptorhynchus*) emituje elektrické pole výbojem elektrického orgánu (EOD) na ocasu. Objekty s jinou vodivostí než je okolní voda způsobují změny elektrického pole tvořeného živočichem. Zooplankton má větší vodivost než je okolní voda a proto bude lokálně zesilovat elektrické pole.

Elektroreceptory

- tvoří kanály vedoucí na kožní povrch
- na dně každého kanálu jsou epiteliální vláskové buňky tvořící excitační synapse
- aferentní nerv pak přenáší akční potenciály do mozku
- některé receptory jsou citlivé na vnější elektrická pole, zatímco jiné jsou citlivé na změny produkce vlastních elektrických výbojů (EOD)

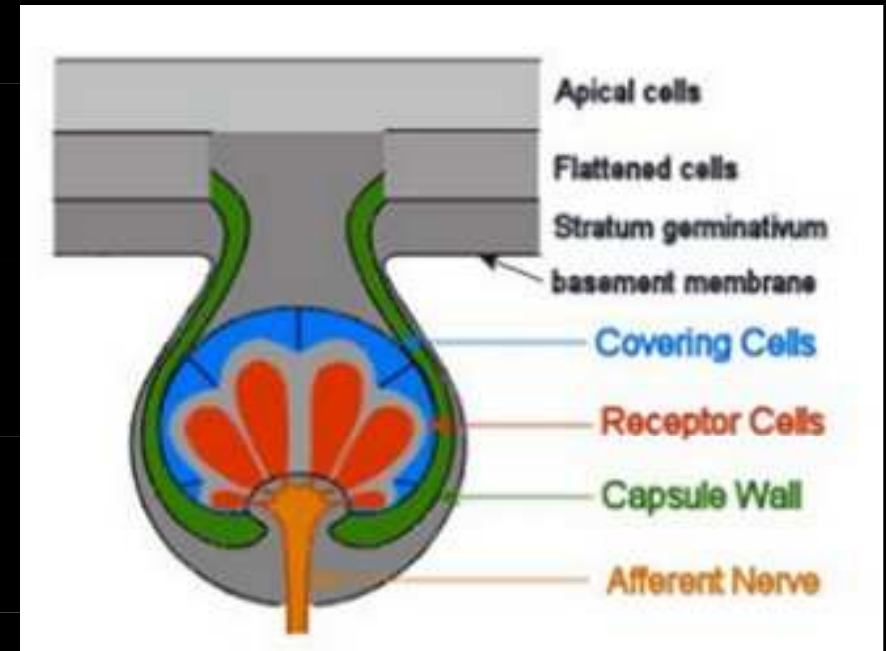
Ampulární receptory

- u „neelektrických“ druhů ryb jako jsou žraloci
- receptory zachycují velmi slabé a nízké frekvence od 0,2 do 20 Hz a jsou používány k detekci kořisti
- kanál vyplněný rosolem vede ze smyslových receptorů ke kožnímu povrchu
- pasivní elektrorecepce



Tuberózní receptory

- zachycují mnohem vyšší frekvence v rozmezí od 30 do 1500 Hz
- jen u dvou skupin kostnaných ryb: *Mormyriiform* a *Gymnotiform*
- epiteliální buňky jsou vodivě spojené se smyslovými receptorovými buňkami k vnějšímu prostředí
- dvě skupiny receptorů: citlivé na změny frekvence a citlivé na změny amplitudy
- oba typy jsou spuštěny elektrickými podněty a mají za výsledek neurotransmisi signálu (výboj elektrického orgánu, pohyb ...) stejně jako jiné smysly (chuť nebo čich)
- aktivní elektrorecepce



Řečňoústí (*Elasmobranchii*)

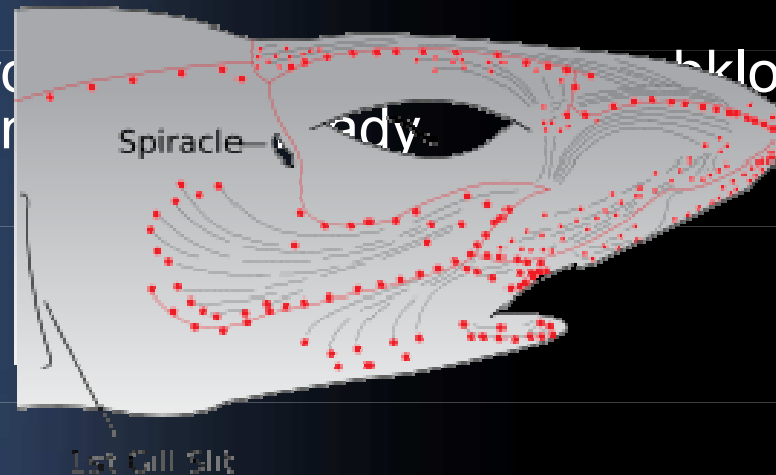
- žraloci jsou elektricky nejcitlivější živočichové
- lov a navigace (+ GMP)
- sledování „magnetických dálnic“ podél mořského dna, detekce zahrabaných rejnoků nebo ryb skrytých pod pískem
- *bílý žralok* – vysoce citlivý, důležité pro přežití - ploutvonožci (lachtani a lvouni) hnízdí na skalnatých ostrovech, které jsou výsledkem tektonické aktivity (vyšší magnetická aktivita)
- pomoc při chycení kořisti – při skusu se jejich oči „otáčí v sloup“ (v momentu úderu jsou tedy dočasně slepí) - proto se spoléhají na elektrické podněty
- zraněná kořist vytváří asi 3x silnější elektrické pole než kořist nezraněná



Lorenziniho ampule - jemné lahvovité buňky vyplněné elektricky vodivým rosolem, s okolím jsou spojeny póry na spodní straně rypce

- ampule jsou prodloužením postranní čáry
- základní funkční jednotkou jsou modifikované vláskové buňky
- negativní náboj uvnitř ampulí způsobuje elektrickou změnu ve vláskových buňkách → uvolnění neurotransmiteru do sousedních smyslových nervů → přenos signálu do mozku → interpretace stimulu

- shluky na vrcholu rypce, pod každým okem
- klopající nozdry, pod



Elektrický úhoř



- schopnost generovat vysokonapěťové elektrické šoky
- používá také nízkonapěťové impulzy pro navigaci a detekci kořisti v kalné vodě
- tuto schopnost mají i ostatní *Gymnotiformes* (nahohřbetí)

Ptakořitní savci (*Monotremes*)

Ptakopysk vodivný (*Ornithorhynchus anatinus*)



- využívají spojení mechano- a elektrorecepce
- v pokožce zobáku je přes 850 tisíc jamek s nervovými zakončeními
- ptakopysk (*Ornithorhynchus anatinus*) má 40.000 elektroreceptorů, ježura (*Zaglossus bruijnii*) 2.000 a ježura (*Tachyglossus aculeatus*) jen 400



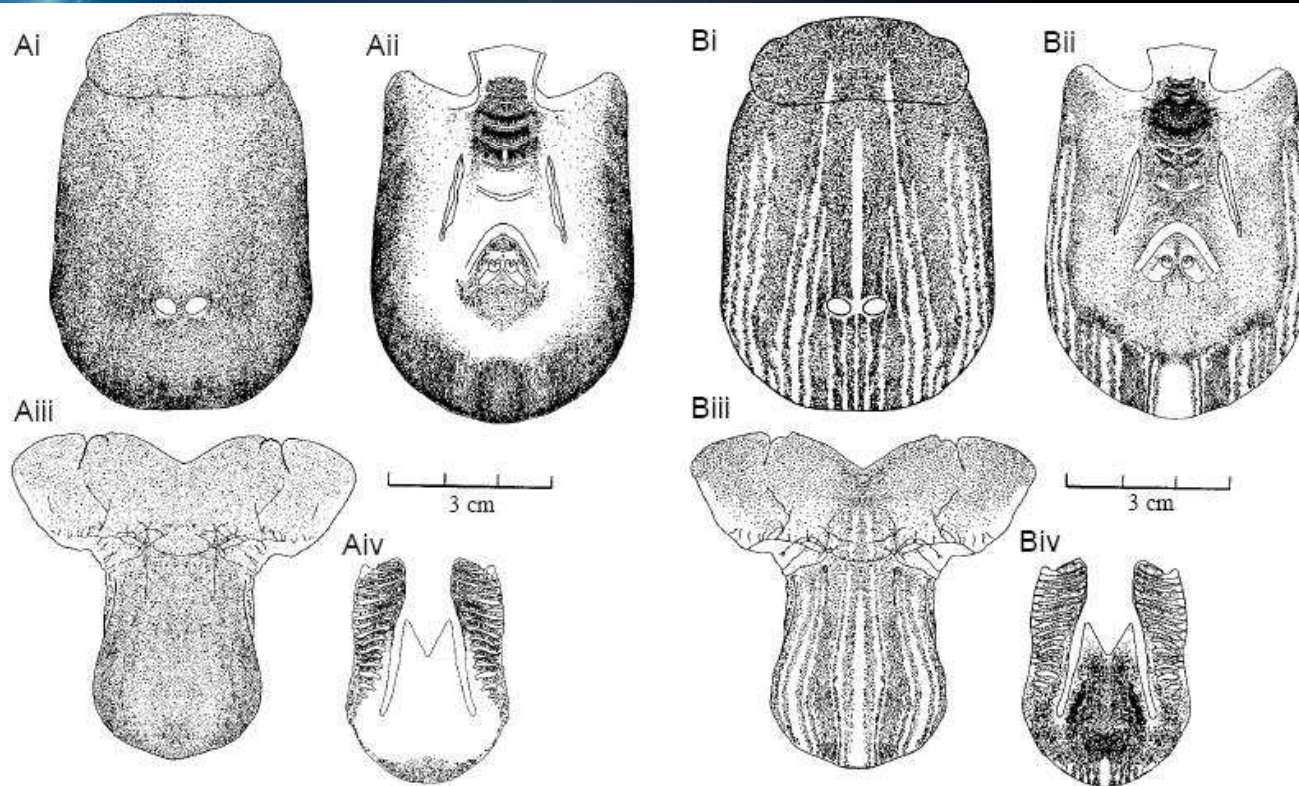


Fig. 2. Distribution of push-rod mechanoreceptors (A) (visible as a touch dome in the dissecting microscope) and (B) mucous electroreceptors (visible as a large pit) in platypus. Note the parasagittal arrays of electroreceptors. The total number of electroreceptors, counting both the outside (i,iii) and the inside (ii,iv) surfaces of both the upper (i,ii) and lower (iii,iv) bills, is approximately 40 000. There are approximately 60 000 mechanoreceptors. (Taken from Manger and Pettigrew, 1996, with permission.)

Platypus Long-billed echidna Short-billed echidna

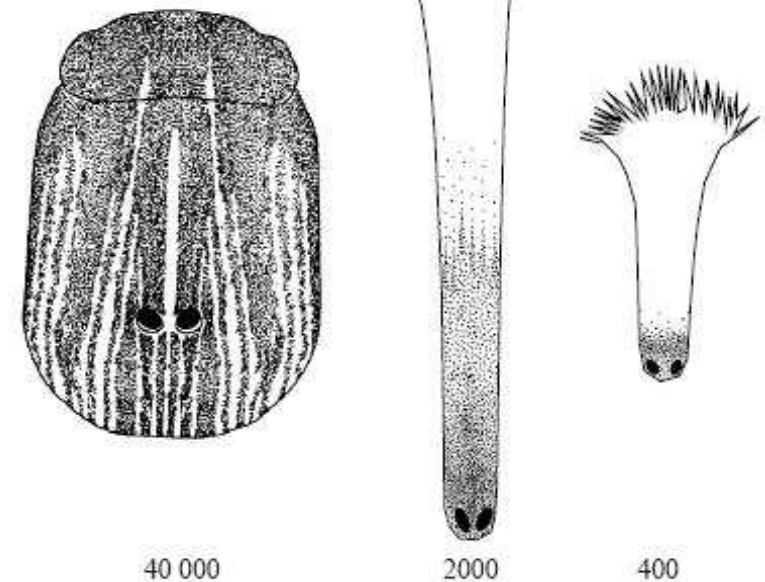


Fig. 5. Electroreception as revealed by bill sensory organs of the three extant monotremes: the platypus *Ornithorhynchus anatinus*, from East Coast Australian waterways, has 40 000 electroreceptors; the long-billed echidna *Zaglossus bruijnii*, from wet tropical montane forest, has 2000; the short-billed echidna *Tachyglossus aculeatus*, widely distributed from alpine areas to desert, has only 400. Interpretation of this polarity is problematical from the living forms (which some have used to argue that the echidna is plesiomorphic and the platypus highly derived). Fossil and molecular data show that echidnas diverged only recently and that, therefore, they must have lost the high degree of electroreception found in platypus. (Platypus bill taken from Fig. 2, Manger and Pettigrew, 1996, with permission.)

- inervované póry podobné ampulárním elektroreceptorům u ryb
- **3 typy receptorů v zobáku:** mechanoreceptor a dva typy elektroreceptorů (jamky odvozené ze sekrečních váčků serózních a mukózních žláz, každá obklopená epitelem, otevírají se, když je zobák ponořený ve vodě)
- reflex ve formě trhavého pohybu hlavy vyvolaný elektrickými podněty v jejich směru
- detekce elektrického pole o menší síle než $20 \mu\text{V}/\text{cm}$

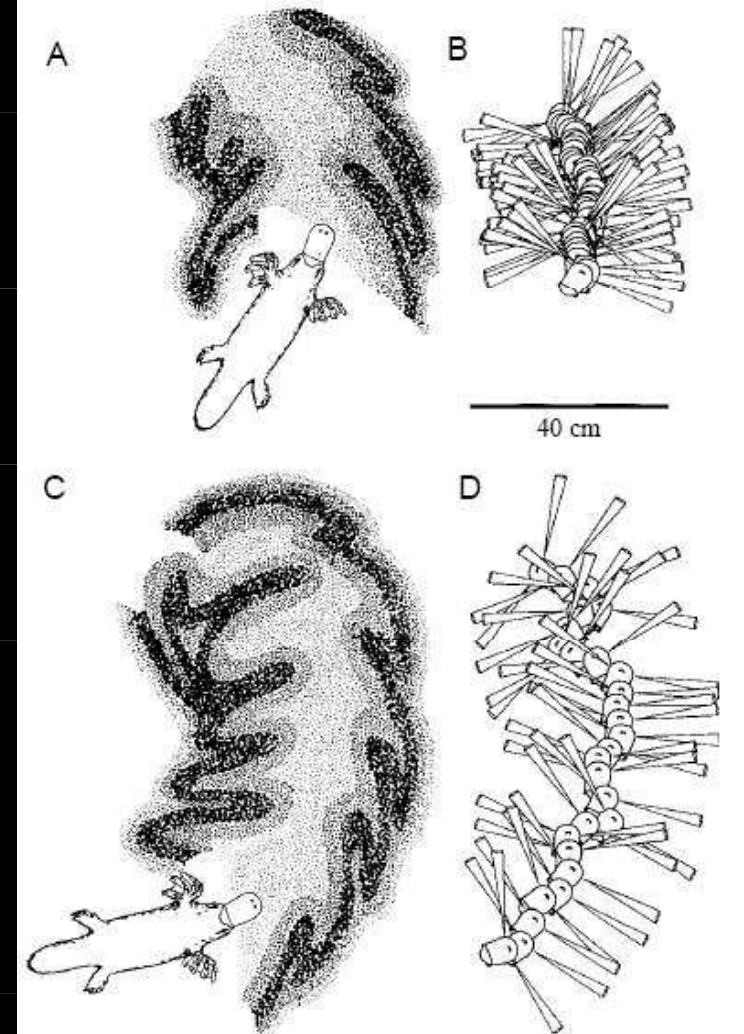


Fig. 4. Scanning head movements of a hunting platypus and the path taken by the axis of greatest sensitivity of the electrosensory system. The preferred axis was defined from thresholds for eliciting head saccades in response to a square-wave electrical stimulus. (A,B) Quiet swimming. (A) The area, extrapolated to benthos, that would be swept out by the axis of greatest sensitivity (light stipple, 10° ; dark stipple, 20°). (B) The axis of each bill (narrow cone shape) at 100 ms intervals. (C,D) As in A,B, but after contact with the prey. Note the threefold increase in area covered in the same time in the active phase triggered by contact with the prey ($0.114 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ compared with $0.042 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). (Taken from Manger and Pettigrew, 1995, with permission.)

Srovnání elektrorecepce u elektrických ryb a ptakořitných savců

Podobně:

- 1) Evoluce podobných strategií různým způsobem. Elektrorecepce ptakořitných savců se vyvinula nezávisle na systému ryb. Různé základy smyslových orgánů, různé mechanismy smyslové transdukce a různé podpůrné role mechanorecepce.
- 2) Prahová úroveň vnímání celého živočicha je mnohem nižší než individuálních receptorů, což je výsledkem signálních pochodů mnoha elektroreceptivních aferentních vláken.
- 3) Elektroreceptor je excitován katodovým proudem a odpovídá na velmi nízké frekvence stimulu.
- 4) Receptor je chráněn na bazální straně epiteliálním pórem (žláznaté jamky u ptakořitných savců, ampula u ryb).

Rozdíly:

	Ptakovysk	Elektrická ryba
Nerv	Trigeminální (V. hlavový nerv)	Octavo-laterální (VIII. hlavový nerv)
Zpracování informace	Přední mozek	Zadní mozek
Směr zdroje elektrického pole	Přímý	Nepřímé odvození algoritmem
Nervové zakončení	Nahé; bez epiteliálních receptorových buněk; řetězec 16 vláken	Epiteliální buněčná transdukce
Spojení s mechanorepcí	ano	ne