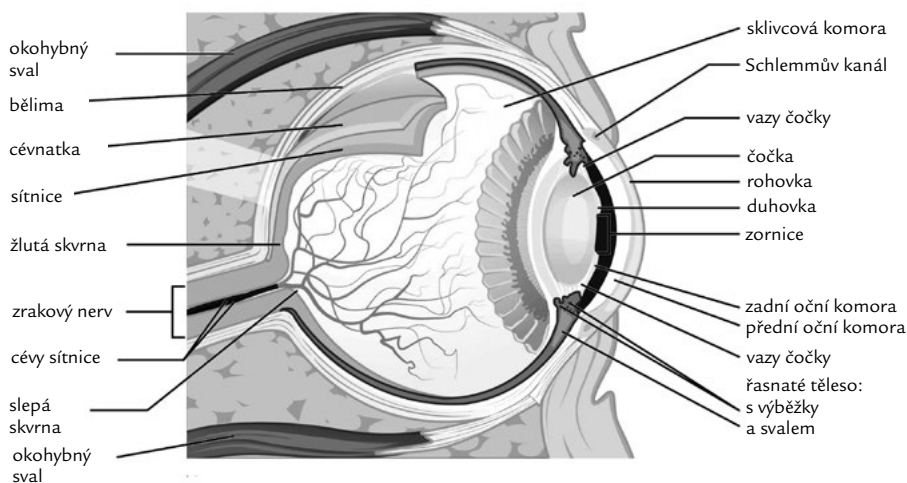


ZRAK

Oko má tak komplikovanou stavbu, že mu Charles Darwin ve svém přelomovém díle *O původu druhů* věnoval zvláštní pasáž. Slavný biolog se předem obával, že právě objasnění evoluce oka a zraku bude pro jeho teorii nepříjemně tvrdý oříšek. Na druhé straně byl Darwinův současník, německý fyzik a lékař Hermann von Helmholtz, trpce zklamán nevalnou kvalitou oka z hlediska optiky a došel k závěru, že tu příroda nijak skvělou práci neodvedla.

Ať už v oku vidíme evoluční brak, nebo naopak mistrovské dílo, nic to nemění na skutečnosti, že jeho prostřednictvím přijímáme informace o okolním



Oko člověka

V přední části kryje oko rohovka, za kterou se nacházejí oční komory vyplněné tekutinou, tzv. komorovou vodou. Mezi přední a zadní komorou se nachází duhovka, přes kterou otvorem zornice prochází světlo do nitra oka. Zornice se stahuje nebo roztahuje jako clona a reguluje množství světla vstupující do oka. Za zornicí prochází světlo čočkou. Ta je upnutá na řasnaté těleso, které tahem svých svalů mění tvar čočky a dovoluje nám zaostření obrazu na sítnici. Zadní strana oka je na vnější straně kryta bělímou, na kterou se upínají okohybné svaly. Pod bělímou se nachází cévnatka prostoupená tepénkami a žilkami zajišťujícími prokrvení oka. Cévy prostupují až do řasnatého tělesa, kde se z krve tvoří komorová voda. Ta se dostává do očních komor Schlemmovým kanálem. Na cévnatku nasedá sítnice se světločivnými buňkami. Z těch putují nervové vzruchy zrakovým nervem do mozku. Tam, kde zrakový nerv prostupuje sítnicí, chybí světločivné buňky a vzniká tzv. slepá skvrna. Nejvyšší nahromadění světločivných buněk se nachází v malé oblasti sítnice označované jako žlutá skvrna. Když dopadá světlo do žluté skvrny, vidíme nejméně.

Betts J. G. et al.: *Anatomy and physiology*. Houston: Rice University, 2017.

světě v neuvěřitelném množství i kvalitě. Zrak nám dovoluje rozlišit bezpočet tvarů a miliony barev a jejich odstínů. Vděčíme za to sítnici oka, která funguje jako jedinečný převodník, v němž se mění fotony světla na elektrický náboj. Elektrický stimul je následně zrakovým nervem odveden do mozku, kde na něj reagují podrážděním neurony zrakového centra.

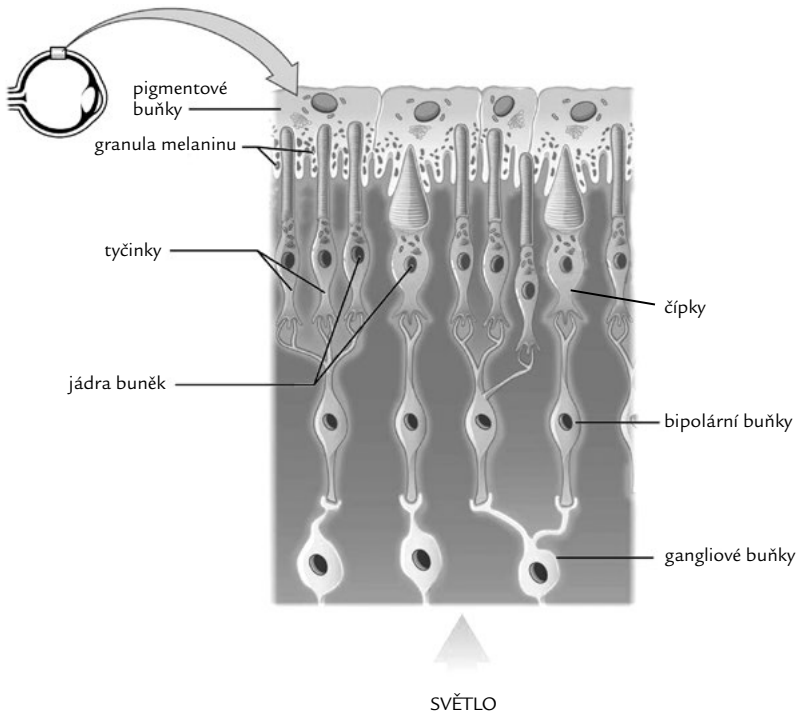
Zrak nám nezprostředkovává jen přímo nabyté zkušenosti. Dovoluje nám čerpat ze zkušeností a myšlenek, které nasbíraly předchozí lidské generace a „zakonzervovaly“ je pro další pokolení. Díky tomu můžeme dnes číst Epos o Gilgamešovi vyrytý do hliněné tabulky babylónským písařem před bezmála čtyřmi tisíci lety. Můžeme si prohlížet z harddisku počítače vyvolané snímky povrchu Jupiterova měsíce Europa pořízené v roce 1996 kosmickou sondou Galileo. Zrak nám dovolí, abychom se potěšili Shakespearovým sonetem, filmovým westernem *Tenkrát na Západě* nebo malbami Šestatřicet pohledů na Fudži japonského mistra Kacušky Hokusai. Za to všechno a mnohé další vděčíme zraku.

MISTŘI OSTRÉHO ZRAKU

Na vzdálenost tří kilometrů rozezná člověk s dobrým zrakem objekt velikosti lidské postavy. Ve tmě na stejnou vzdálenost rozliší, jestli auto svítí jedním, nebo dvěma reflektory. Orel skalní (*Aquila chrysaetos*) zahlédne na tři kilometry králíka přikrčeného k zemi. Proč máme oproti orlům tak chabý zrak?

Už zběžný pohled prozradí, že člověk má oči ve srovnání s orlem poměrně malé. Velké druhy orlů s hmotností kolem deseti kilogramů mají oko stejně velké jako urostlý muž, který měří bezmála dva metry. Největšíma očima se v poměru k rozměrům těla pyšní orel klínoocasý (*Aquila audax*). Tento australský dravec s třímetrovým rozpětím křídel váží až šest kilogramů. Jeho oko měří v průměru přes tři centimetry a v předozadním směru dokonce tři a půl centimetru. Větší oko má už jen africký pštros dvouprstý (*Struthio camelus*). Bezmála čtyřcentimetrové pštrosí oko předčí velikostí dokonce i mozek uložený v pštrosí lebce. V poměru k velikosti těla ale oko pštrosů nijak mimořádné není, protože tyto ptáci často dorůstají výšky přes dva metry a hmotnosti přes sto kilogramů.

Zdatnost orlího zraku netkví jen ve velikosti oka. Zadní stěna oka dravců je znatelně zploštělá. Díky této inovaci se obraz vzdálených předmětů promítá orlovi na větší plochu sítnice, než když dopadá na kulovitou sítnici v oku člověka. Dravci mají navíc na sítnici nacpáno mnohem víc světločivných buněk. Zatímco sítnice lidského oka má na milimetru čtverečním asi 40 000 buněk reagujících na světlo, poštolce obecné (*Falco tinnunculus*) se jich na stejnou plochu vejde skoro dvakrát tolik. V místě, které zajišťuje nejostřejší obraz, se nám na jednom milimetru čtverečním tísňí kolem 200 000 světločivných



Sítnice oka

V sítnici oka probíhají reakce, které převádějí energii světelného záření na nervový vzruch. Ten pak putuje zrakovým nervem do zrakových center mozku. Na vnějším okraji sítnice se nacházejí pigmentové buňky s granuly barviva melaninu. Tato granula pohlcují světlo a brání jeho odražení zpět do oka. Na pigmentované buňky nasedají světločivné buňky, které jsou v sítnici zastoupeny tyčinkami a čípkami. Tyčinky reagují na slabé světlo, ale nerozlišují barvy. Pomáhají nám vidět za zhoršených světelných podmínek. Čípky reagují odlišně na světlo různých vlnových délek a dovolí člověku rozlišit tři základní barvy – modrou, zelenou a červenou. Pro svou práci potřebují čípky intenzivní světlo.

Vzruchy vzniklé ve světločivných buňkách převádějí bipolární buňky do gangliových buněk, které pak tento vzruch svými výběžky předávají do zrakového nervu.

Betts J. G. et al.: *Anatomy and physiology*. Houston: Rice University, 2017.

buněk. Orel jich má v milimetru čtverečním této tzv. žluté skvrny kolem jednoho milionu. Rozdíl mezi lidskou a orlí sítnicí můžeme přirovnat k zrnitému obrazu na monitoru starého televizního přijímače a vysokému rozlišení obřích moderních obrazovek.

Ani teď ale nejsme ve výčtu evolučních zlepšováků oka dravců u konce. Lidské oko obdařila příroda jen jednou žlutou skvrnou o průměru asi pěti milimetrů. K ptákům byla mnohem štedřejší. Některým opeřencům dala do vínku protáhlou žlutou skvrnu, díky které pták vidí ostře celý obzor, a nikoli jen jeho malý výsek. Na sítnici dravců se nacházejí hned dvě žluté skvrny spojené pásem hustě nahloučených světločivných buněk.

Mezi ptáky jsou dravci výjimeční i tím, že mají podobně jako člověk trojrozměrné tzv. binokulární vidění. Oči mají otočené dopředu a jejich zorná

pole se velkou měrou překrývají. To dovoluje dravcům „obejmout“ předměty zrakem a vnímat je prostorově. Významný je tento efekt pro přesný odhad vzdálenosti. Pro sokola stěhovavého (*Falco peregrinus*) útočícího střemhlavým letem rychlostí 380 kilometrů v hodině na holuba letícího rychlostí kolem 140 kilometrů v hodině je to přímo nutnost. Velmi dobré binokulární vidění mají také sovy (*Strigiformes*). Mezi hady těžší z této vymoženosti např. tropické bičovky (*Ahaetulla*).

Binokulárním viděním příroda rozhodně neplýtvá. Mezi bezobratlými se jím mohou pyšnit jen kudlanky (*Mantodea*). Ty však vnímají trojrozměrně pouze pohyblivé cíle. Pokud se cíl nepohybuje, kudlanka ho vidí „placatě“. Bohatě jí to stačí, protože ji ze všeho nejvíc zajímá kořist, a ta bývá pohyblivá. Statické objekty, jako jsou kamínky nebo větvičky, se obvykle k jídlu nehodí, a kudlanka proto na hodnocení jejich obrazu neplýtvá silně omezenou kapacitou svého nervového systému.

Za obrácení očí dopředu a překrývání jejich zorných polí platí živočichové zúžením celkového zorného pole. Proto si prostorové vidění nemohou dovolit obratlovci žijící v neustálém ohrožení. Atak vedený ze „slepého úhlu“ by je mohl stát život. Tito tvorové mají oči po stranách hlavy a každým okem si hlídají polovinu prostoru kolem sebe. Zatímco při prostorovém vidění musí obě oči svůj pohyb při sledování cíle vzájemně koordinovat, tvorové, kteří vystačí s plošným obrazem, pohybují každým okem nezávisle, a nejednou proto vypadají, jako kdyby silně šilhali.

Za skutečné mistry v šilhání platí chameleoni (*Chamaeleoninae*). Dokážou sledovat každým okem nezávisle něco jiného. Když je ale potřeba, umějí práci obou očí zkoordinovat. V tomto umění za nimi nezaostávají ani někteří ptáci. U opeřenců někdy vede šilhání do všech stran k tomu, že pro určité úlohy přednostně využívají jen jedno oko. Například samci brodivých ptáků pisil čáponohých (*Himantopus himantopus*) se s větší chutí dvoří samičkám, které vidí levým okem. Sokol stěhovavý se přibližuje k vyhlídnuté kořisti tak, aby ji měl pod kontrolou pravého oka. Vrány kaledonské (*Corvus moneduloides*) patří k rozeným ptačím kutilům. Můžeme je zastihnout např. při výrobě jednoduchých nástrojů z větviček nebo když s nimi následně dobývají hmyz ze škvír. Používají k tomu své „oblíbené“ oko. Některé vrány preferují pravé oko, jiné zase upřednostňují levé. Poměr mezi očními „praváky“ a „leváky“ je v populaci vran novokaledonských zhruba vyrovnaný.

Protože je levé oko ovládáno pravou polovinou mozku a naopak, umožní preference jednoho oka odpovídající mozkové hemisféře, aby se specializovala na zvládání úkolů náročných na kontrolu zrakem. Ptáci pak dosahují v dané činnosti vyššího mistrovství, než kdyby zaměstnávali obě oči stejně.

Rozdíly v ostrosti zraku mezi jednotlivými příslušníky živočišné říše jsou

propastné. Pokud budeme kvalitu zraku měřit počtem „řádek“, které oko daného tvora rozliší pod zorným úhlem jednoho obloukového stupně, pak ostrozrací draví ptáci, jako je orel klínoocasý, rozliší kolem 150 řádků na obloukový stupeň. Člověk se zdravým zrakem jich odliší kolem šedesáti. Pokud se nám obraz rozmáže natolik, že odlišíme méně než deset řádků na obloukový stupeň, jsme prakticky slepí. Pro kočku (*Felis silvestris f. catus*) je ale taková ostrost zraku naprosto normální. Většina hmyzu vidí opravdu mizerně a rozliší nejvýše jeden řádek na stupeň. Korýši (*Crustacea*) vidí ještě hůř. Rozliší jeden řádek, jen když jim v zorném poli zabírá alespoň deset úhlových stupňů.

Velké rozdíly v ostrosti zraku různých živočichů dokázali využít někteří pavouci křížáci (*Araneoidea*). Větávají do svých sítí tzv. stabilimentum z bílých vláken vytvářejících nápadný kříž. O účelu téhle „ozdoby“ se vědci dlouho přeli, protože se jim zdálo nelogické, aby pavouci výstražným znamením upozorňovali potenciální kořist na nastraženou síť. Modelování zraku různých tvorů však odhalilo, že letící moucha domácí (*Musca domestica*) stabilimentum nevidí, ani když se mu přiblíží na dvacet centimetrů a pavouk trůní přímo uprostřed kříže. Šídlo *Anax junius* ale zahlédne kontury stabilimenta na vzdálenost jednoho metru a z dvaceti centimetrů už ho vidí zcela zřetelně. Má tedy čas se sítí vyhnout. Pro pavouka je to důležité, protože šídlo pro něj představuje příliš velké sousto. Síť by takovou kořist nezadržela a náraz letícího hmyzu by ji těžce poškodil. Podobně vidí stabilimentum už na vzdálenost několika metrů ptáci. I oni mají dost času na to, aby se takové překážce za letu vyhnuli, a ušetří tak pavoukovi práci s rozsáhlou rekonstrukcí poničené sítě.

VÝHODY ROZMAZANÉHO VIDĚNÍ

Navzdory všem zjevným výhodám ostrého zraku můžeme v přírodě potkat živočichy, kteří vidí překvapivě rozmazaně, a přitom je pro ně zrak životně důležitý. Jedním z nich je skákavka skleníková (*Hasarius adansonii*). Jak jméno tohoto asi sedm milimetrů dlouhého pavouka napovídá, loví různý hmyz dlouhým skokem na nic netušící kořist. Zvládá výpady dlouhé i několik centimetrů a zjevně musí mít perfektní smysl pro odhad vzdálenosti.

Člověk odhadne správně vzdálenosti kromě jiného i díky tomu, že se mu překrývají zorná pole obou očí a vidí prostorově. Stejný optický trik prostorového vidění využívají i další savci a někteří ptáci. Vzdálenost se však dá poměrně spolehlivě odhadnout i v případě, že si lovec prohlíží kořist jen jedním okem. Umí to třeba chameleoni. Ti mění zaostření oka tak, aby se kořist dostávala střídavě do ohniska a pak zase mimo. Chvilí ji vidí ostře a chvíli zase rozmazaně. Chameleon tak bezpečně pozná vzdálenost, na jakou se musí přiblížit ke kořisti, aby na ni mohl vystřelit svůj dlouhý „teleskopický“ jazyk.

Skákavka skleníková na to jde jinak. Dopředu se dívá hned čtyřma očima. Prostřední pár očí má trubicovitý tvar a je zatažen hluboko do nitra pavoučího těla. Zorné pole je velmi úzké, což skákavka kompenzuje velkou pohyblivostí těchto zrakových orgánů. Speciálními svaly zamíří skákavka oko žadáním směrem. Hlavní pár očí tak nabízí skákavce podobný pohled, jako když si člověk ve tmě svítí baterkou. Vidí z okolí jen malou osvětlenou část, ale pohybem kuželu světla z baterky může libovolně pátrat na všechny strany. Postranní oči mají podstatně jednodušší stavbu a jsou vysoce citlivé na jakýkoli pohyb. Právě s pomocí těchto očí skákavka zjišťuje, kam má upřít zrak párem hlavních očí.

Zorná pole středového páru očí skákavek se nepřekrývají tak jako u prostorově vidících savců nebo ptáků. Jak tedy odhaduje vzdálenost pro skoky na kořist? Sítnice očí skákavky skleníkové má světločivné buňky uspořádané hned do čtyř vrstev. Druhá nejhlubší vrstva je citlivá jen na zelené světlo. Přitom ale zelená část světelného spektra není na této vrstvě zaostřená a obraz je proto rozmazaný. Jak se pavouk blíží ke kořisti, vidí ji v zelené části světla stále rozmazanější. A právě podle toho odhadne vzdálenost a při skoku se strefí.

Tento zcela unikátní systém pro odhad vzdálenosti mají všichni pavouci skákavky. My si ho můžeme přiblížit pohledem na fotografii s ostrým popředím a rozmazaným pozadím. Stačí nám na ni jen mrknout a je nám hned jasné, že ostrý objekt a rozmazané pozadí se nenacházejí od objektivu ve stejné vzdálenosti. Tím však naše dovednosti končí. Nikdo nedokáže přesně určit, jak daleko je ostrý předmět v popředí od rozmazaných předmětů v pozadí.

Měření vzdálenosti rozostřeným zrakem využívá při lovu také oliheň *Sepioteuthis lessoniana*. Ta upoutala vědce prapodivným chováním. Loví u srázů korálových útesů, kde si vybírá kořist mezi rybami, kraby a dalšími obyvateli tohoto neuvěřitelně pestrého světa. Potlouká se kolem skalisek, a jakmile narazí na potenciální kořist, začne se pohupovat na místě. Chvilku stoupá k hladině a vzápětí zamíří zpět do hlubin. Jako na gumě poskakuje v průzračné vodě a zcela jistě je díky tomu nápadnější, než kdyby se nehnutě vznášela na jednom místě. Je to zjevně poněkud neopatrné jednání. Oliheň se však bez něj neobejde, protože si „poskakováním“ vyměřuje finální atak a odhaduje, jak je od oběti daleko. Její oko má na zadní stěně oční komory světločivnou sítnici podobně jako člověk. K oku olihně však ze zadu těsně přiléhá nervová uzlina, která na sítnici silně tlačí a vytváří na ní jakousi bouli. V oku „poskakující“ olihně se promítá obraz cíle útoku na sítnici a přechází i přes bouli, kde se rozostří. Oliheň tak vidí obraz kořisti střídavě ostrý a rozmazaný. Podobně jako skákavky z toho dokáže přesně určit vzdálenost, jakou musí překonat při ataku.

OKO Z MINERÁLŮ

Měkkýš chroustnatka zrnitá (*Acanthopleura granulata*) žije v přílivové zóně při pobřeží Karibského moře. Měkké tělo jí chrání schránka složená z osmi velmi tvrdých a pevných štítků. Základ materiálu tohoto brnění tvoří organický chitin a nerost aragonit. Chroustnatka žije pod vypouklou schránkou jako pod pokličkou. Dokáže se přimknout k podkladu a pevně se k němu přisát.

Mohlo by se zdát, že se chroustnatka z bezpečí své pancéřované schránky o okolní dění příliš nezajímá. Ani po potravě se nemusí nijak zvlášt' rozhlížet. Svalnatým jazykem opatřeným několika řadami extrémně tvrdých zubů se škrabává z povrchu kamenů vrstvičky mikroorganismů. K tomu, aby se nasytila, jí stačí pomalíčku lézt z místa na místo a „olizovat“ kamení pod sebou. Přesto chroustnatka okolí vnímá. A kupodivu kvůli tomu nemusí vykuknout ze svého bezpečného úkrytu. Svět sleduje stovkami očí velmi nenápadné, ale o to důmyslnější konstrukce.

Těsně pod schránkou skrývá tento živočich na mnoha místech těla malá políčka tvořená světločivnými buňkami. Vypadá to, jako kdyby měla chroustnatka po těle rozesetou spoustu miniaturních očních sítnic překrytých pevnou schránkou. Může jimi vůbec vidět? Ano, může. A také se jejich prostřednictvím dívá. Ve štítcích schránky mají chroustnatky vsazena průhledná okénka o průměru necelé desetiny milimetru tvořená čirým minerálem. Mají dokonce vyklenutý tvar, takže fungují jako miniaturní čočky. „Okénka“ soustředí paprsky světla přímo na světločivné buňky.

Koordinují stovky miniaturních oček svou činnost a skládají své dílčí obrázky do jednoho obrazu? Kdepak. Každé očko pracuje zcela samostatně, nezávisle na druhých. Okénky ve schránce se nabízí chroustnatce série pohledů do okolí, podobně jako když ostraha banky sleduje nejrůznější místa budovy na panelu obrazovek napojených na systém bezpečnostních kamer.

Čočky zasazené do schránky chroustnatky jsou z optického hlediska překvapivě kvalitní. Rozlišovací schopnost jednotlivých políček světločivných buněk je ale z hlediska lidských nároků na vidění naprosto nedostatečná. Každé políčko je tvořeno zhruba stovkou těchto buněk a jednotlivá oka nabízejí podobně hrubý obraz, jako kdybychom si my okolní svět zobrazili různými odstíny šedi na desetkrát deseti políčkách. Je jasné, že takovými očima bychom se jen těžko kochali pohledem na tajemný úsměv da Vinciho Mony Lisy.

Chroustnatkám hrubý obraz generovaný „minerálním okem“ bohatě stačí. Jejich život běží loudavým tempem. Po vlhkém kamení příbojové zóny se přemisťují šnečí rychlostí. I kdyby měly ostřížít zrak, nebyl by jim mnoho platný, protože v moři neexistuje mnoho tvorů tak pomalých, aby před nimi chroustnatka stačila včas prchnout. Její obranná strategie je založena na tom, že se pevně přichytí podkladu a přitiskne k němu okraje schránky. Pak je pro

každého nepřítele těžké chroustnatku od podkladu odtrhnout a zaútočit na měkkou spodní stranu jejího těla.

Stovky oček rozmístěných po povrchu schránky hlídají celý prostor nad chroustnatkou. Pokud se nad živočichem „setmí“, protože na něj dopadne stín jiného tvora, stačí, aby se přimkl ke kameni. Zrak chroustnatek je „nerozbitný“. Když se nějaké oko nenávratně poškodí, obranyschopnost to nijak zvlášť nepostihne. Okolní očka práci ztraceného zrakového orgánu převezmou. Záhadou zůstává, jak chroustnatka informace získané prostřednictvím stovek očí nakonec zpracuje a vyhodnotí. Má totiž velmi primitivní nervový systém, který se zdá pro zvládnutí takového úkolu naprosto nedostatečný.

SVĚT BAREV

Sluneční záření dopadající na zemský povrch má různé kmitočty. Člověk a většina savců z něj vnímají jen poměrně úzký výsek. Naše oko zachytí záření s vlnovou délkou od 390 do 770 nanometrů (1 nanometr je miliardtina metru). Ultrafialové záření s ještě kratšími vlnami ani delší vlny infračerveného záření za normálních okolností nevidíme.

Sítnice oka člověka a spolu s ní i sítnice většiny obratlovců je uzpůsobena k vnímání světla prostřednictvím dvou typů buněk. Silné světlo aktivuje světločivné buňky označované jako čípkky. Ty jsou u mnoha živočichů zodpovědné i za vnímání barev. Za zhoršených světelných podmínek přicházejí ke slovu tyčinky reagující na kontrast.

Funkce oka, sítnice a světločivných buněk závisí na souhře dvou základních molekul. První vzniká modifikací pigmentů karotenoidů, které se nacházejí ve velkém množství v rostlinách. Živočichové je obvykle přijímají s potravou. Býložravci konzumují karotenoidy přímo z jejich rostlinného zdroje. Masožravci je získávají zprostředkovaně z těla své kořisti. Druhou základní komponentou nutnou pro vidění je bílkovina opsin. Modifikovaný karotenoid se váže na opsin a vytváří tak základní komponentu pro zachycení světla. Pokud na ni dopadne foton, mění se nejprve tvar modifikovaného karotenoidu a následně i prostorové uspořádání opsinu, který je pevně zabudován do membrán světločivných buněk. V reakci na změnu tvaru molekuly opsinu se aktivuje světločivná buňka. Opsinů je v oku hned několik typů a každý je připravený pro vnímání světla určité vlnové délky - tedy barvy.

Lidské oko je vybaveno pro zachycení modré, zelené a červené barvy. Kombinací těchto vjemů pak vnímáme další barvy a jejich odstíny. Když se například díváme na žlutou barvu květu pampelišky, dostává náš mozek silné podněty z buněk sítnice reagujících na červenou a zelenou složku světla.

Naopak, buňky citlivé na modré světlo reagují jen velmi slabě. Náš mozek řeší „barevnou“ rovnici:

hodně červené + hodně zelené + málo modré = X.

A kalkulací dospěje k výsledku:

X = žlutá.

Teprve nedávno se ukázalo, že na barvy reaguje jen malá část světločivných buněk, které jsou k tomu v sítnici předurčeny. Plně dvě třetiny buněk z výbavy pro barevné vidění posílají do mozku „černobílý“ signál. Nebarevné vidění je pro nás zjevně mnohem důležitější, protože jeho prostřednictvím získáváme informace o obrysech a tvarech. Dovoluje nám například při přecházení rušné silnice rozlišit přijíždějící automobil od nedaleko zaparkovaného vozidla. Fakt, zda je přijíždějící auto červené nebo zelené, je ve srovnání s rizikem, že nás přehlédnutý vůz přejede, zcela podružný. Odlišení zelené a červené samozřejmě nabývá na důležitosti, když sbíráme jahody a potřebujeme vybírat jen plně dozrálé plody. Tuto informaci nám však v sítnici oka spolehlivě zajistí i malý počet buněk, jež se rozlišení obou barev ujmou.

Barvy pro nás přesto mají velký význam. Jejich prostřednictvím vnímáme některé detaily prostorového upořádání okolí a lépe pak koordinujeme své pohyby a aktivity. Barvy nás také varují před riziky. Nejednou nebezpečný živočich má pestré výstražné zbarvení. Jako varování působí žluto-černé pruhy sršňů (*Vespa*), černo-bíle pruhovaná jedovatá ryba s případným názvem perutýn pruhovaný (*Dendrochirus zebra*), černo-červené skvrny amerického ještěra korovce jedovatého (*Heloderma suspectum*) nebo barevně kontrastní oranžovo-černé zbarvení křídel amerického motýla danaa stěhovavého (*Danaus plexipus*).

➤ Pro více informací viz obr. Vlnové délky světla v barevné příloze.

VÝHODY BAREVNÉHO VIDĚNÍ

Výhody barevného vidění jsou patrné u madagaskarských lemurů sífaků malých (*Propithecus verreauxi*). Ti mají světločivné buňky pro zelené a červené světlo kódované jediným genem. Jedna varianta genu zajistí vnímání červené a druhá varianta dovolí rozlišit zelenou barvu. Gen je vázán na pohlaví tak, že samci mají jen jeden výtisk genu, zatímco samice jím disponují ve dvou kopiích. Žádný ze samečů proto zelenou od červené nerozezná. Všichni jsou barvoslepí a vidí buď jen zelenou, nebo jen červenou. U samic záleží na tom, jaké varianty genu po rodičích zdědí. Pokud dostane dcera do vínku od matky

a otce odlišné varianty, vidí jak červenou, tak i zelenou. Pokud ale zdědí dvě stejné varianty genu, je barvoslepá jako samci.

V tlupách sifaků malých bývá v průměru necelá čtvrtina samic, které rozeznají červenou od zelené. V některých tlupách jich může být více, v jiných se nenajde ani jedna. Zajímavé je, že tlupy s výhradně barvoslepými zvířaty během období sucha výrazně strádají, zatímco tlupám, kde alespoň jedna samice rozezná zelenou od červené, se vede poměrně dobře.

Vysvětlení je celkem jednoduché. Sifakové se živí ovocem a při jeho hledání se řídí zrakem. Barvoslepi lemuři dokážou odlišit plody od listů. Nerozeznají však podle barvy zralé červené ovoce od nezralých zelených plodů. Nezralé ovoce přitom obsahuje méně živin a často se v něm nacházejí i látky, které mají odpudivou chuť, snižují celkovou stravitelnost potravy, nebo jsou dokonce jedovaté. Pokud se v tlupě vyskytuje samice s úplným barevným viděním, vodí ostatní lemury tam, kde se nabízí zralé ovoce s vysokým obsahem cukrů a dalších důležitých živin. Lemuři z barvoslepých tlup zhubnou během období sucha i o pětinu. Naopak jejich protějšky z tlup se samicemi schopnými odlišit zelenou a červenou ztratí za stejné období často jen 5 % tělesné hmotnosti.

Ve vzácných případech mohou podobným způsobem rozšířit své barevné vidění i lidé. Geny pro světločivné bílkoviny se mohou vyskytovat v různých formách. Někdy jsou tyto formy nefunkční a výsledkem je pak barvoslepost. Lidé postižení tzv. daltonismem neodliší červenou a zelenou barvu podobně jako sifakové. Jindy jsou ale varianty genů funkční a každá dává vzniknout světločivnému proteinu citlivému na světlo poněkud jiné barvy. Tyto geny jsou opět vázané na pohlaví a muži je dědí jen v jednom výtisku. Ženy však mohou zdědit od rodičů dvě různé varianty genu pro daný světločivný protein a vnímavost jejich očí k barvám citelně naroste. Byl popsán případ, kdy takto dědičně disponovaná žena rozeznávala barvy v zelené a červené části spektra s mnohem vyšší citlivostí než většina lidí.

BAREVNÍ PŘEBORNÍCI

Někteří obratlovci vidí jen černobíle. Například velryba grónská (*Balaena mysticetus*) či její příbuzná velryba biskajská (*Eubalaena glacialis glacialis*) sice mají v sítnici tyčinky i čípky, ale čípky postrádají molekuly opsinu klíčové pro zachycení světla. Čípky velryb jsou tedy slepé a zrak velryb stojí i padá s tyčinkami. Velryby proto vidí dobře v přítmí mořských hlubin. Problémy naopak mívají v silném slunečním jasu u hladiny. Oslnění sluncem možná vysvětluje, proč se tyto velryby tak často nevyhnou nastraženým rybářským sítím a uvíznou v nich. Používáním sítí nápadně pestrých barev

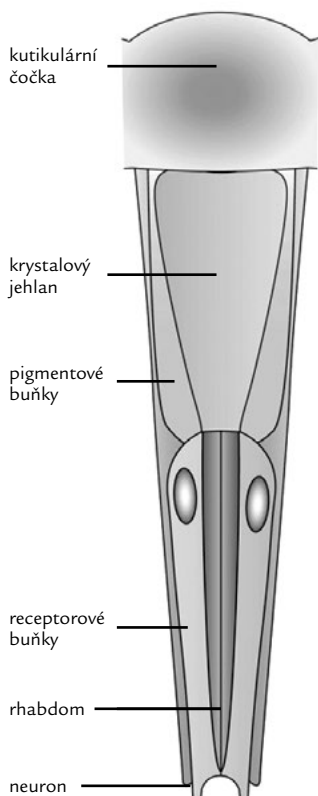
těmto nehodám nezabráníme, protože pro černobílý velrybí zrak nejsou „křiklavé“ barvy zřetelnější.

Mezi obratlovci vládne nejdokonalejším barevným viděním ptáci. Oko mají uzpůsobené k vnímání hned čtyř základních barev. Oproti člověku jsou sítnice oka opeřenců navíc vybaveny světločivnými buňkami schopnými reagovat i na vlnové délky posunuté do fialové části spektra.

Barevné vidění významně přispívá k vysoké ostrosti zraku některých opeřenců. Obecně platí, že ptačí oko není přeborník v registrování barevných kontrastů. V tomto ohledu je průměrný ptačí zrak desetkrát horší než lidský. Existují ale výjimky. Jednou z nich je nevelký americký dravec káně Harrisova (*Parabuteo unicinctus*). Na rozdíl od „velkookých“ ptáků, jako je orel klínocasý, nemá tato káně oči příliš velké a nedostala tedy do vínku nijak zvláštní předpoklady pro ostré vidění. Tento handicap si však více než dostatečně kompenzuje viděním barevným. Pokud se kořist liší svým zbarvením od pozadí, rozezná ji káně Harrisova na dvakrát větší vzdálenost než člověk. To je u ptáka s hmotností kolem jednoho kilogramu a tomu odpovídající velikosti očí výkon skutečně úctyhodný. Káně využívá svůj barevně ostrý zrak k lovu v lesích, kde se střídají malé ostře osvětlené plochy s podobně velkými ploškami schovanými ve stínu. Orientace zrakem je v takovém prostředí velmi náročná.

V živočišné říši najdeme tvory s ještě důkladnější výbavou pro vnímání různých barev, než jakou disponují ptáci. Patří k nim i straškové (*Squilla*). Tato zvláštní skupina mořských koryšů se vyvíjela samostatně po dlouhých 400 milionů let. Výsledkem jejich evoluční odyseje jsou i velké oči složené z jednotlivých malých oček, tzv. omatidií. Straškovo oko vypadá, jako kdyby mu přes něj přejela miniaturní motorka a otiskla tam pneumatiku. Středem oka se totiž táhne šest rovnoběžných řad tvořených zcela zvláštními omatidii. Očka ze středové „linky“ jsou vybavena světločivnými buňkami citlivými až na šestnáct různých barev. To je opravdu bohatá kolekce. Skoro by se chtělo říct – až příliš bohatá.

Už počátkem 19. století došel britský učenec Thomas Young k závěru, že barevné vidění je zprostředkováno čidly, která se nacházejí v sítnici oka a jsou citlivá k různým barvám. Neuniklo mu, že za příliš široké spektrum čidel k mnoha různým barvám platí oko daň v podobě omezené hloubky zorného pole. Young z toho vyvodil, že by živočichové měli vystačit s dvěma až čtyřmi čidly pro různé barvy. To je optimální kompromis. Dovoluje dostatečné rozlišení barev a přitom příliš neomezuje ostré vidění do hloubky zorného pole. Většina tvorů se Youngem zformulovaného pravidla drží. Strašek jím však během evoluce z nějakého důvodu pohrdl. Proč? K čemu potřebuje přehnaně dokonalé barevné vidění?



Oko hmyzu

Složené oko hmyzu se může skládat z několika mála jednoduchých očí, tzv. omatidií, ale může ho tvořit i několik tisíc těchto oček, tak jako u ováda *Tabanus lineola* (vlevo).

Omatidium má stejný základ jako oko hlavonožců nebo obratlovců a jeho stavbu řídí obdobné geny. Navrchu je kryto kutikulou, která je obdobou rohovky oka savců. Je vypouklé tvarovaná a slouží proto i jako čočka. Dalším optickým prvkem omatidia je krystalový jehlan, který rovněž přispívá k lomu paprsků světla dopadajícího do oka. Krystalový jehlan je od rušivého světla z vedlejších omatidií chráněn pigmentovými buňkami. Jako sítnice slouží v omatidiu receptorové buňky, které v místě vzájemného kontaktu vytvářejí tzv. rhabdom neboli zrakovou tyčku. Axony receptorových buněk odvádějí nervové vzruchy do nervových uzlin sloužících hmyzu jako mozek.

Foto: Thomas Shahan, Wikimedia.

Schéma: Nilsson D.-E., Almut Kelber A.: A functional analysis of compound eye evolution. *Arthropod Structure and Development* 36, 2007, 373–85.

Záhada zraku strašků se ještě prohloubila, když se ukázalo, že barvy vnímají neuvěřitelně mizerně. Mají třeba problém odlišit modrou od zelené. Nehnou tedy s úkolem, jaký hravě zvládá člověk vybavený jen třemi typy světločivných buněk.

Každé z šestnácti typů barevných čidel v oku straška reaguje na svou barvu s mnohem nižší citlivostí, než s jakou rozeznává barvy člověk. Korýš se však obejde bez složitých „kalkulací“, jaké vyžaduje od mozku lidský zrak. Zatímco

my zaznamenejme žlutou barvu až poté, co náš vysoce výkonný mozek posoudí sílu podnětů zachycených barevnými čidly pro červenou, zelenou a modrou barvu, primitivní straškově nervová soustava dostává barvy z oka už „roztríděně“. Sice jen nahrubo, ale to straškově nevadí. Hlavní je, že nervová soustava nemá se signály z oka mnoho práce a neztrácí jejich tříděním čas.

Pro straška je rychlá práce zraku nesmírně důležitá. Pokud by se ve zvířecí říši konal šampionát v boxu, byl by strašek ve své váhové kategorii horkým favoritem. Jeden pár končetin na hrudi má zformovaný do podoby kyje a těmi dokáže udeřit rekordní rychlostí a neuvěřitelnou silou. Při dopadu na kořist se straškův kyj pohybuje rychlostí přes 800 km/h. Ani ta nejstřelhitější se pohybující kořist nebývá dost rychlá, aby stačila před jeho úderem uhnout. Úder končetiny straška je tak rychlý, že se za nohou vytváří ve vodě vakuová bublina, jež se vzápětí hroutí. Prudký kolaps bubliny dokonce vyvolá ve vodě slabý světelný záblesk tzv. sonoluminiscencí. Pokud má strašek kontrolovat takhle rychlý úder, pak se mu bleskově pracující oko určitě hodí.

Strašci nejsou jediní živočichové, u kterých to evoluce s výbavou pro barevné vidění poněkud přehnal. Australský otakárek *Graphium sarpedon* má hned patnáct různých zrakových „čidel“ pro barvy. Jedno reaguje na ultrafialové světlo a další na fialovou část spektra viditelnou i lidským okem. Pro různé odstíny modré si australský otakárek vyhradil tři různá čidla. Ve velkých očích tohoto motýla nalezneme i speciální čidlo pro modrozelenou a k tomu i čtveřici čidel zařízených na detekci zelených odstínů. Červenou část spektra registruje otakárek hned pětící čidel.

Motýli potřebují rozeznávat barvy při hledání květů rostlin a také ke zhodnocení hry barev na křídlech příslušníků vlastního druhu. Mnohé druhy však zvládají tyto úkoly s podstatně chudší výbavou světločivných buněk, než jakou dala příroda do vínku „patnáctibarevnému“ otakárkovi z Austrálie. Jeho asijský příbuzný otakárek *Papilio xuthus* například vystačí se šesti typy barevných čidel.

Graphium sarpedon je na tom ve skutečnosti velmi podobně, a dokonce naplňuje zásadu formulovanou Thomasem Youngem. K rozeznávání barev používá jen čtyři typy čidel, zbývajících jedenáct plní speciální úkoly. Motýlovi pomáhají například při identifikaci rychle se pohybujících objektů na pozadí sluncem ozářené oblohy nebo při vyhledávání barevných objektů ukrytých v zelené vegetaci. Všechny tyto dovednosti se otakárkovi náramně hodí. Rychle se pohybující objekt může být buď partner vhodný ke zplození potomstva, nebo hladový hmyzožravý pták. A spolehlivé vyhledávání květů jako zdroje kaloricky vydatného nektaru může být pro hladového motýla otázkou přežití.