

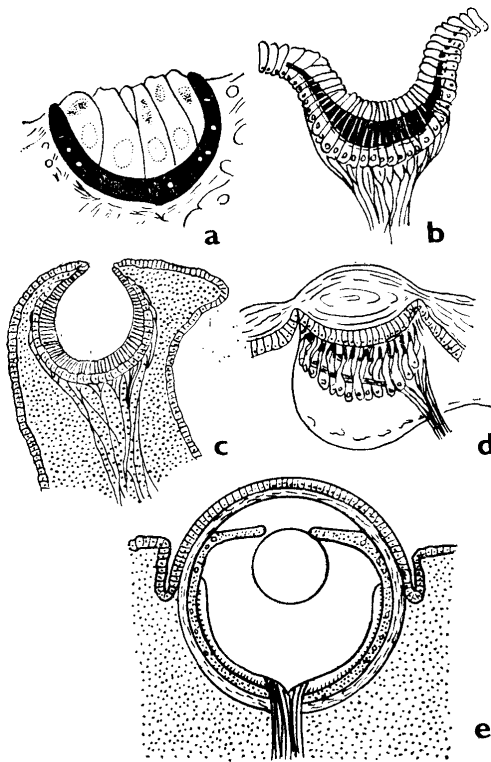
## 1. OKO - ORGÁN ZRAKU

*„Mozog si našiel spôsob, ako sa pozerat’ na vonkajší svet. Oko je časť mozgu, ktorá sa dotýka svetla.“*

*/Richard P. Feynman/*

### 1.1 ONTOGENÉZA A FYLOGENÉZA ZRAKOVÉHO ORGÁNU

Taký zložitý a jemný orgán, ako je oko cicavcov, sa musel vyvinúť z podstatne jednoduchších a menej dokonalých receptorov.



**Obr. 1.1. Fylogenzá zrakového orgánu**

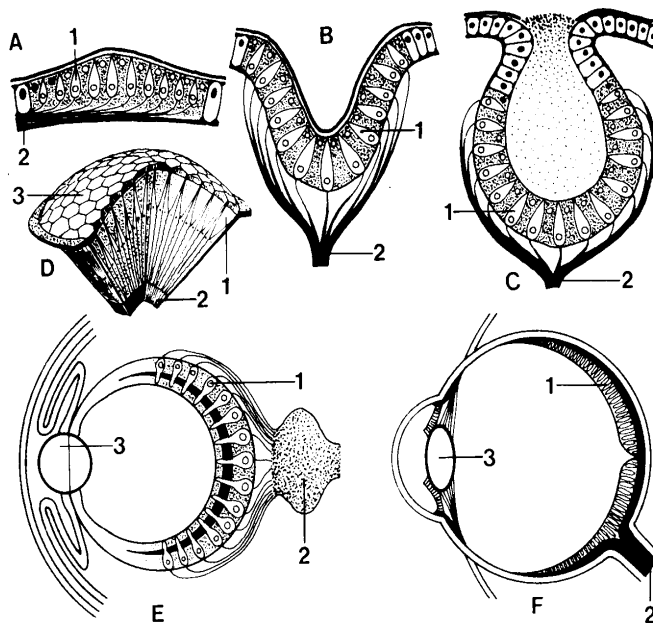
- a)** zrakový orgán v podobe nahromadenia niekoľkých buniek obklopených pigmentom (napr. u pijavice);
- b)** zrakový orgán v podobe prehĺbenia (u morskej hviezdice);
- c)** zrakový orgán v podobe camery obscury (mäkkýše);
- d)** oko doplnené šošovkou (škorpión);
- e)** oko stavovcov (na povrchu oka je rohovka, vo vnútri šošovka) [25].

Už na povrchu niektorých jednobunkových organizmov sú zrníčka podobné šošovke, ktoré môžu sústrediť svetlo; v niektorých prípadoch sú dokonca z vnútornej strany pokryté pigmentom. Tieto útvary sa pokladajú za prvotnú formu neskoršieho zložitého orgánu - oka. U vyšších živočíchov nájdeme už samostatné bunky, špeciálne prispôbené na funkciu prijímať svetlo - svetloreceptory. Takéto bunky môžu byť rozosiate po celej koži (napr. dážd'ovka) alebo sústredené na jednom mieste, kde zvyčajne vystieľajú prehĺbeniny (obr. 1.1a), ktoré už predstavujú podklad pre oko. Všeobecne je možné povedať, že receptory citlivé na svetlo sa ukryli v prehĺbeninách preto, aby boli chránené pred veľmi silným pôsobením svetla, ktoré znižuje ich schopnosť reagovať na pohybujúci sa tieň - predzvesť blížiaceho sa nebezpečenstva. Tieto tzv. „zrakové jamky“, uložené pod úrovňou tela, nájdeme napríklad u morských živočíchov (obr. 1.1b) - morská hviezdica). Aby sa „očná jamka“ chránila pred nepriaznivými vplyvmi, v ďalšom vývoji sa u živočíchov utvorila nad ňou jemná priesvitná ochranná membrána. Membrána sa rozličnými mutáciami premenila na primitívnu formu šošovky.

Máme teda pred sebou dva typy orgánu zraku: očnú jamku bez šošovky, ktorá dáva menej jasný obraz, ale približne rovnakých kvalít na všetkých miestach dna jamky a typ „oka s primitívnou šošovkou“, ktorá síce zaistí jasnejší obraz, ale kde sa súčasne prejavujú chyby šošovky.

Ďalším vývojom sa zo šošovky ako „krytu očnej jamky“ stáva orgán schopný meniť polohu svojho ohniska aj veľkosť vstupného otvoru do „očnej jamky“. Takýmto spôsobom sa potom reguluje ostrosť a jas obrazu premietnutého na svetlocitlivé bunky na dne očnej jamky.

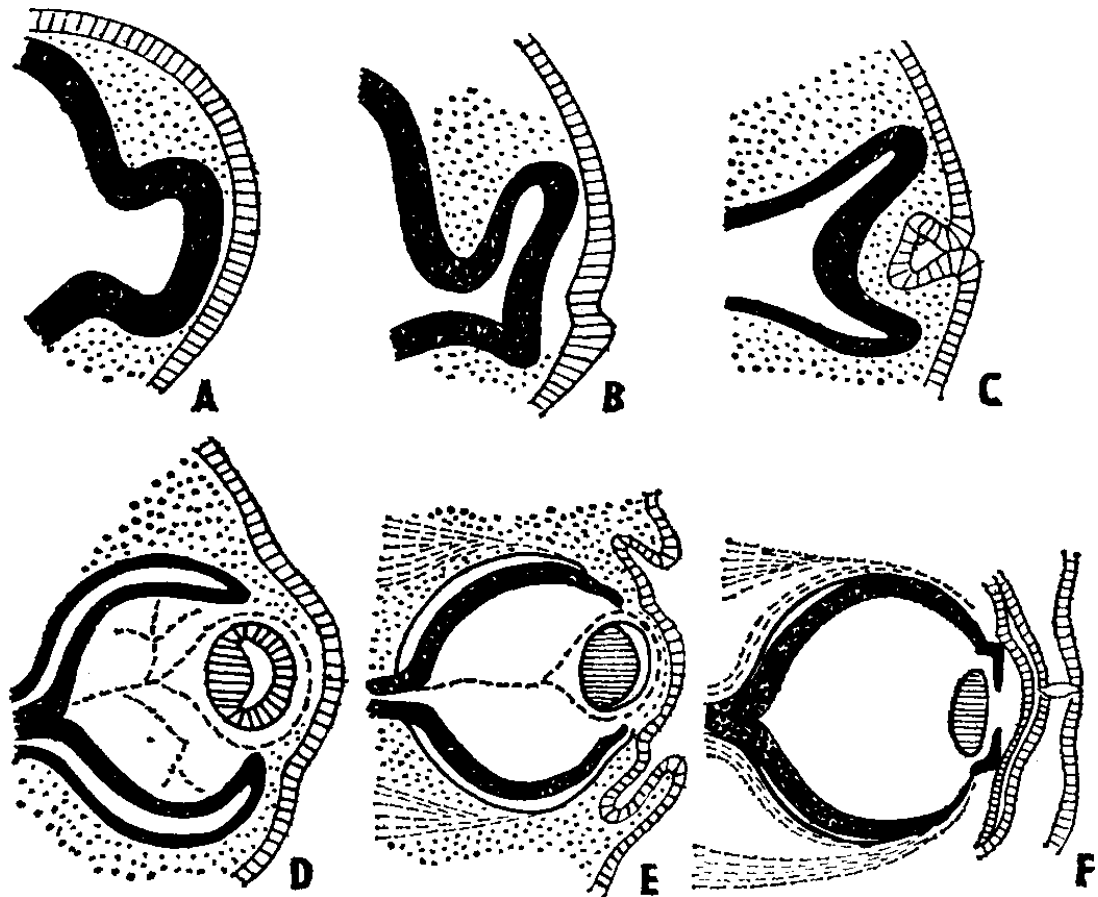
V rámci vývoja sa utvorili aj iné typy orgánu schopného prijímať svetlo. Objavili sa v podobe tzv. *fazetových očí* hmyzu (obr.1.2D). Pozostávajú z veľkého množstva jednotlivých buniek tvaru rúrky, pričom každá z buniek je schopná utvoriť obraz izolovane. Na konci každej takej rúrky je systém drobných šošoviek, tzv. *kutikulárne šošovky*, za ktorými sa nachádza ešte ďalšia, tzv. *cylindrická šošovka*.



**Obr. 1.2. Typy očí:** *A - ploché oko medúzy, B,C - miskovité oko morských ulitníkov, D - zložené oko hmyzu, E - oko hlavonožca, F- oko človeka; 1 - citlivé bunky (sietnica), 2 - nervové vlákno, 3 - šošovka (1-3 platí aj pre A-E)* [obrázok z učebnice biológie pre 3. roč. gymnázií]

Pomocou nej sa potom svetlo sústreďuje na svetlocitlivý nervový element, obsahujúci zvyčajne 7 buniek, združených okolo zrakovej tyčinky. Takáto konečná jednotka fazetového oka sa nazýva *omatídium*. Hmyz vidí fazetovým okom stovky „svetov“. Každá jednotka predstavuje samostatné oko, ktoré informuje o existencii svetla smerujúceho priamo na ňu (nereaguje na šikmé smery). Súčet signálov pomocou fazetových očí môže poskytnúť potrebnú informáciu. Fazetové oči môžeme v podstate pokladať za „detektory pohybu“ (pavúk má 8 fazetových očí).

U nižších živočíchov sa vyskytujú rozličné typy viac-menej dokonalých očí (obr. 1.2). Naproti tomu u vyšších živočíchov - u cicavcov - je situácia iná: svetlocitlivá časť oka cicavcov, tzv. *sietnica*, je na rozdiel od ostatných typov očí „prevrátená“. To znamená, že cicavce majú svetlocitlivé zakončenia obrátené nie smerom k miestu vstupu svetla do oka, ako je to pri jednoduchých „očných prehĺbeninách“, ale naopak, odvrátené od svetla. Preto musí svetlo na svojej dráhe ku svetlocitlivým zakončeniam preniknúť cez celú hrúbku sietnice.



*Obr.1.3. Vývoj oka človeka*

*A, B, C - utvorenie zrkavého pohárika na hlavovom konci zárodku v priebehu prvých týždňov vývoja plodu;*

*D - oko na konci druhého mesiaca vývoja;*

*E - diferenciacia štruktúr oka okolo 3.-4. mesiaca života;*

*F - približne na konci 5. mesiaca života sa končí vývoj základných štruktúr oka [25].*

## 1.2 ZLOŽENIE A ČINNOSŤ ZRAKOVÉHO ORGÁNU

### 1.2.1 SVETLO

Svetlo, pomocou ktorého vidíme, je iba nepatrnou časťou rozsiahleho spektra elektromagnetického vlnenia. Rozličné časti tohto spektra sa líšia rôznymi hodnotami premennej veličiny, ktorú nazývame *vlnová dĺžka*. Adekvátnym podnetom pre receptory zrakového analyzátora je energia elektromagnetického vlnenia v rozsahu vlnových dĺžok od 380 do 780 nm [7] (rozsah frekvencií od  $3,8 \times 10^{14}$  do  $7,8 \times 10^{14}$  Hz). Svetlo je každému známe od nepamäti. Problémom je vlastne proces videnia. O tejto problematike existovalo mnoho teórií, ktoré sa zhodli v tom, že existuje niečo, čo vchádza do oka a vytvára v ňom obraz predmetov. Ale to si nechajme do nasledujúcej kapitoly.

Citlivosť oka pri žiareníach rozličných vlnových dĺžok je rôzna. Keď napr. do oka dopadá raz žiarenie s vlnovými dĺžkami v žltej oblasti a druhý raz žiarenie s rovnakou energiou, ale s vlnovými dĺžkami v modrej oblasti spektra, bude prvý vnem silnejší ako druhý. Účinky žiarivej energie na náš zrak charakterizujú fotometrické veličiny, ktoré vychádzajú zo subjektívneho vnemu pozorovateľa.

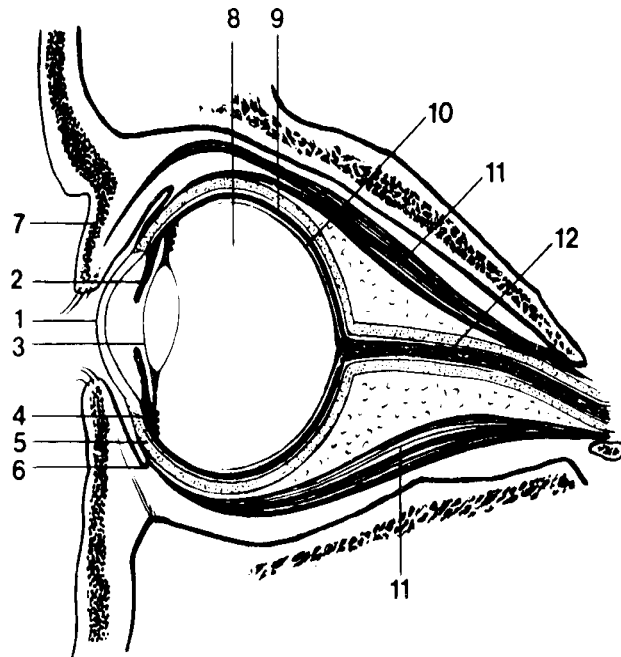
*Svetelný tok* predstavuje energiu vyžiarenú zdrojom za 1 sekundu. Musíme tiež poznať veľkosť priestorového uhla, do ktorého svetlo vchádza alebo plochu, ktorou prechádza. Jednotkou svetelného toku je lumen (lm). Táto jednotka sa však nedá odvodiť z doposiaľ známych fyzikálnych základných jednotiek, preto bola z historických aj praktických dôvodov zavedená ďalšia základná jednotka pre veličinu charakterizujúcu bodový zdroj svetla: *svietivosť*. Svietivosť bodového zdroja v danom smere je určená podielom svetelného toku vyžiareného zdrojom do malého priestorového uhla a veľkosti tohto priestorového uhla. Jednotkou svietivosti v sústave SI je kandela (cd; z latinského *candela* - sviečka). Pomocou kandelu sú odvodené ďalšie fotometrické jednotky. (Lumen predstavuje svetelný tok, vysielaný do priestorového uhla 1 steradiánu bodovým zdrojom, ktorého svietivosť sa vo všetkých smeroch rovná 1 cd.) Bodový zdroj svetla osvetľuje rovinnú plochu umiestnenú v jeho blízkosti nerovnomerne. Príčinou je rozdielny svetelný tok dopadajúci na pozorovanú plochu. Fotometrická veličina, ktorá charakterizuje účinky svetla na určitej ploche sa nazýva *osvetlenie*. Osvetlenie definujeme ako podiel svetelného toku a obsahu plochy ožiarenej svetelným tokom. Jednotkou osvetlenia je lux (lx). Lux je osvetlenie plochy, pri ktorom na každý  $m^2$  dopadá rovnomerne rozdelený svetelný tok 1 lm. Osvetlenie plochy pri kolmom dopade svetla je priamoúmerné svietivosti zdroja a nepriamoúmerné druhej mocnine vzdialenosti zdroja od plochy [1].

Ludské oko neregistruje amplitúdu vlnenia, ale jej intenzitu, to znamená strednú hodnotu energie dopadajúcu za jednotku času na jednotku plochy kolmo na smer šírenia vlnenia, ktorá je priamo úmerná štvorcu amplitúdy.

## 1.2.2 OKO

Zrakový analyzátor - orgán zraku tvorí jednotu troch zložiek: periférnej, prevodnej a zrkového centra v mozgovej kôre. Začína sa periférnou časťou - očnou guľou, ktorá je prispôbena na prijímanie a sústreďovanie svetla. Z očí vychádzajú zrkové nervy, ktorými sa nervové impulzy dostávajú do zrkového centra v mozgovej kôre v tylovom laloku mozgu.

Aby oči mohli plniť svoju funkciu, majú špeciálny pomocný ochranný a pohybový aparát. *Mihalnice (palpebrae)* chránia oči spredu pred vonkajšími vplyvmi. Ich základ tvorí kruhový mimický sval tváre. Pohyblivosť očnej gule všetkými smermi zaisťujú *tri páry okohybných svalov*.



**Obr. 1. 4. Oko:** 1 - rohovka, 2 - dúhovka, 3 - šošovka, 4 - vráskovec, 5 - bielko, 6 - spojovka, 7 - kruhový sval, 8 - sklovec, 9 - cievrovka, 10 - sietnica, 11 - očné svaly, 12 - zrkový nerv [7]

*Očná guľa (bulbus oculi)* je orgán približne guľovitého tvaru. U dospelého človeka má priemer asi 24 mm. Udržanie tvaru očnej gule je zaistené jej obalom a vyšším vnútroočným tlakom (normálne 2-3 kPa) voči okoliu. Steny očnej gule vytvárajú tri vrstvy. Vonkajšia vrstva je z kolagénového vlákna. Asi 4/5 vonkajšej vrstvy zaberá nepriehľadné *očné bielko (sclera)*. Asi 1/5 plochy obalov oka v prednej časti očnej gule tvorí priehľadná *rohovka (cornea)*. Cez rohovku vstupuje do oka svetlo. Rohovka je súčasťou optického systému oka a má väčší polomer zakrivenia ako očné bielko.

Stredná alebo cievnatá vrstva (*uvea*) je silno pigmentovaná. Popri funkcii izolátora svetla slúži na vyživovanie tkanív oka. Jej viditeľná časť, tzv. *dúhovka (iris)*, udáva farbu oka. Dúhovkou je regulovaný vstup svetla do oka, pretože tvorí pred šošovkou clonu. Obsahuje kruhové a radiálne hladké svalové vlákna. Jej hlavnou funkciou je regulovať, zvyšovať alebo znižovať množstvo svetla vstupujúceho do oka, pretože množstvo svetla dopadajúceho na sietnicu je úmerné ploche otvoru v dúhovke - *zrenici*

(*pupilla*). Dúhovka sa rýchle prispôsobuje náhlej zmene jas. Prítom reagujú obe zrenice súčasne i keď svetelný podnet pôsobí iba na jedno oko. Priemer zrenice sa môže rozšíriť z približne 2 mm na 8 mm (napr. v tme), čím sa zväčší množstvo dopadajúceho svetla až 16 násobne. Zúženie zrenice najčastejšie pozorujeme:

- 1) pri vnikaní väčšieho množstva svetla do oka (priamym osvetlením),
- 2) pri pohľade na blízko, kedy oči konvergujú.

Tento dej sa riadi osobitným automatickým reflexným mechanizmom - tzv. *pupilárnym reflexom* (čím viac svetla dopadá do oka, tým bude zrenica užšia a naopak). Zúženie zrenice chráni sietnicu pred poškodením väčším množstvom svetla a súčasne zmenšuje sférickú a chromatickú aberáciu šošovky. Dúhovka totiž ako clona prekryje okraje šošovky a zlepšuje tak hĺbkové videnie. Zúženie zrenice je sprievodným znakom akomodácie oka pri pozorovaní blízkych predmetov spolu s konvergenciou očí a akomodáciou šošovky. Smerom dozadu prechádza dúhovka do tzv. *vráskovca (corpus ciliare)*, v ktorom je tzv. akomodačný sval. Vo vráskovci sa tvorí tekutina, tzv. *komorový mok (humor aquosus)*, ktorý udržiava tlakovú rovnováhu v oku.

Najväčšiu časť strednej vrstvy oka tvorí tzv. *cievovka (chorioidea)*, ktorá slúži predovšetkým na vyživovanie zmyslovej časti sietnice.

Vnútornú, tzv. *nervovú vrstvu* obalov oka tvorí *sietnica (retina)*, ktorá vlastne vystieľa oko v podobe jemnej, celkom priehľadnej blany. Sietnica je vnútorne organizovaná ako mozog. Počas embryonálneho vývoja sa časť mozgu vysunie dopredu, pričom sa vyvinú dlhé vlákna, ktoré spájajú oko s mozgom. „Veľmi dôležité je, aby sme si uvedomili, že už sietnica o svetle „premýšľa“; porovnáva to, čo vidí v jednej oblasti s tým, čo vidí v druhej, aj keď si to neuvedomuje. Ľudia študujúci anatómiu a vývoj oka ukázali, že sietnica je v skutočnosti mozog [7].“ Farba sietnice je oranžovo-ružová, sú v nej krvné cievy a materiál zadnej steny oka, ktorý má tiež svoju farbu.

Povrchová vrstva sietnice priliehajúca k cievovke - tzv. *neuroepitel*, obsahuje špeciálne bunky schopné prijať a premeniť svetelné podráždenie na nervové impulzy. Tieto bunky majú výbežky v podobe *tyčínok* a *čapíkov*. Na nich sú napojené tzv. bipolárne bunky, ktorých výbežky majú spojenie s tzv. gangliovými bunkami sietnice. Čapíky sú pritom sústredené v priestore zorného pólu oka, v mieste zvanom *žltá škvrna (macula lutea)*. Jej priemer je asi 3 mm. *Stred žltej škvrny (fovea centralis retinae)* je miestom najostrejšieho videnia. Okrem čapíkov žltá škvrna prakticky neobsahuje iné bunky. Žltú škvrnu používame, keď chceme vidieť niečo pozorne, a keď vidíme najjasnejšie, nachádza sa v strede zorného poľa. Smerom od žltej škvrny pribúda počet tyčínok. Súčasne s tým aj sietnica nadobúda väčšiu hrúbku.

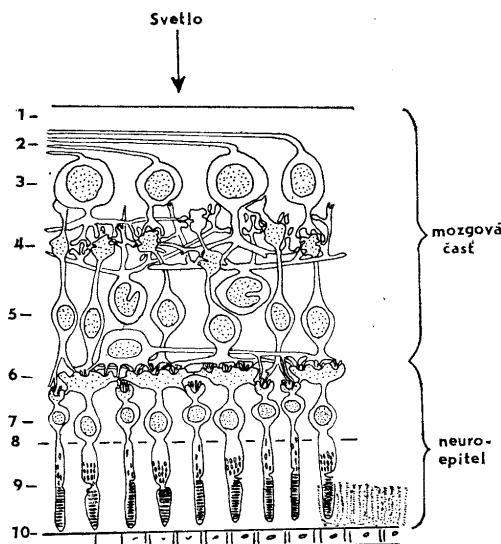
Výbežky gangliových buniek utvárajú *zrakový nerv (nervus opticus)* (priemer asi 1,5 mm), ktorý sa cez hrot očnice dostáva do lebkovej dutiny. Zrakový nerv je jedným z mozgových nervov; nie je to však nerv v pravom slova zmysle, ale vysunutý trakt bielej mozgovej kôry. Miesto, kde vystupuje zrakový nerv z oka, neobsahuje zmyslové bunky, preto nie je schopné prijať podráždenie. Nazýva sa *slepá škvrna (macula densa)*. (Niekdedy sa zvykne označovať aj ako *Mariotov bod*.) Nachádza sa smerom dovnútra k

nosu od miesta najostrejšieho videnia, žltej škvrny. Slepú škvrnu bežne nevnímame. O jej prítomnosti sa môžeme presvedčiť *Mariotovým pokusom* (experimentálna časť, stať 3.37).

Najväčšiu časť vnútra oka vyplňa *sklovce* (*corpus vitreum*). Je to rôsolovitá, tekutá, číra látka, ktorej 96% tvorí voda. Veľmi dôležitým útvarom pre ostré videnie je vo vnútri oka *šošovka* (*lens*), ktorá sa nachádza za dúhovkou na vráskovci fixovaná jemnými vláknami. Šošovka má veľmi zaujímavú štruktúru. Hoci je celá priesvitná, skladá sa zo série vrstiev ako cibuľa. V strede má index lomu 1,40 a na okrajoch 1,38.

### 1.2.3 FOTORECEPTORY SIETNICE

Sietnicu tvorí zrková (receptory s fotopigmentmi) a mozgová časť (nervové bunky s výbežkami).



**Obr. 1.5. Štruktúra sietnice**

- 1 - mozgová časť sietnice:** tvorí vnútornú časť,  
**2 - neuroepitel sietnice:** obsahuje svetlocitlivé elementy - tyčinky a čapíky a tvorí vonkajšiu časť sietnice.

Čísla označujú 10 vrstiev sietnice, ktoré tvoria: tyčinky a čapíky (9,8), horizontálne bunky (6), bipolárne bunky (5), amakrinné bunky (4), gangliové bunky a zrkový nerv (3,2) [25].

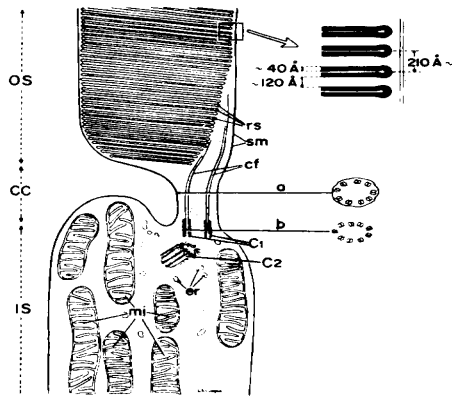
Najďalej od stredu oka pri ciefovke je vrstva pigmentového epitelu. Smerom k stredu nasleduje vrstva receptorov citlivých na svetlo - tyčínok a čapíkov. Vo vnútornej vrstve sú bipolárne bunky spojené s výbežkami gangliových buniek, ktorých neurity (hlavné výbežky nervov, tiež axony) sa zbiehajú v mieste vstupu zrkového nervu.

Sietnica obsahuje asi 130 miliónov receptorov, zatiaľ čo počet nervových vlákien v zrkovom nerve sa odhaduje na milión. Zaujímavosťou je, že každá bunka citlivá na svetlo nie je vláknom priamo spojená s optickým nervom, ale je spojená s mnohými inými bunkami, ktoré sú s optickým nervom vzájomne pospájané. Takáto konvergencia mnohých receptorov na málo neurónov je zvlášť charakteristická pre receptory na periférii sietnice (1000: 1), zatiaľ čo čapíky v žltej škvre sú zapojené iba vo veľmi malom počte na ďalšie neuróny v zrkovej dráhe. V žltej škvre platí vzťah 1 čapík na 1 nervové vlákno, ale už o niekoľko milimetrov ďalej od žltej škvrny platí vzťah 80:1 [24]. Táto nepatrná konvergencia v oblasti žltej škvrny súvisí s vysokou zrkovou ostrosťou popri nižšej svetelnej citlivosti.

Hustota čapíkov a tyčínok je v rozličných častiach sietnice rôzna. V mieste najostrejšieho videnia, v strede žltej škvrny, sa čapíky sústreďujú v počte niekoľko desiatok tisíc na  $\text{mm}^2$ . Smerom k periférii ich

hustota rýchlo klesá. Tyčinky sú najhustejšie lokalizované najmä v okolí žltej škvrny. Miesto vstupu zrakového nervu neobsahuje žiadne elementy citlivé na svetlo a je *slepým miestom sietnice*. V periférnejších častiach sietnice sa nachádzajú čapíky aj tyčinky, ktoré prevažujú, a hustota ktorých sa so vzdialenosťou od žltej škvrny postupne znižuje. Zaujímavým dôsledkom toho, že smerom k okrajom zorného poľa počet čapíkov klesá, je skutočnosť, že dokonca aj jasne sfarbené predmety strácajú svoju farbu, keď sa dostanú na okraj zorného poľa. Predmet vidíme oveľa skôr, ako sme schopní určiť jeho farbu.

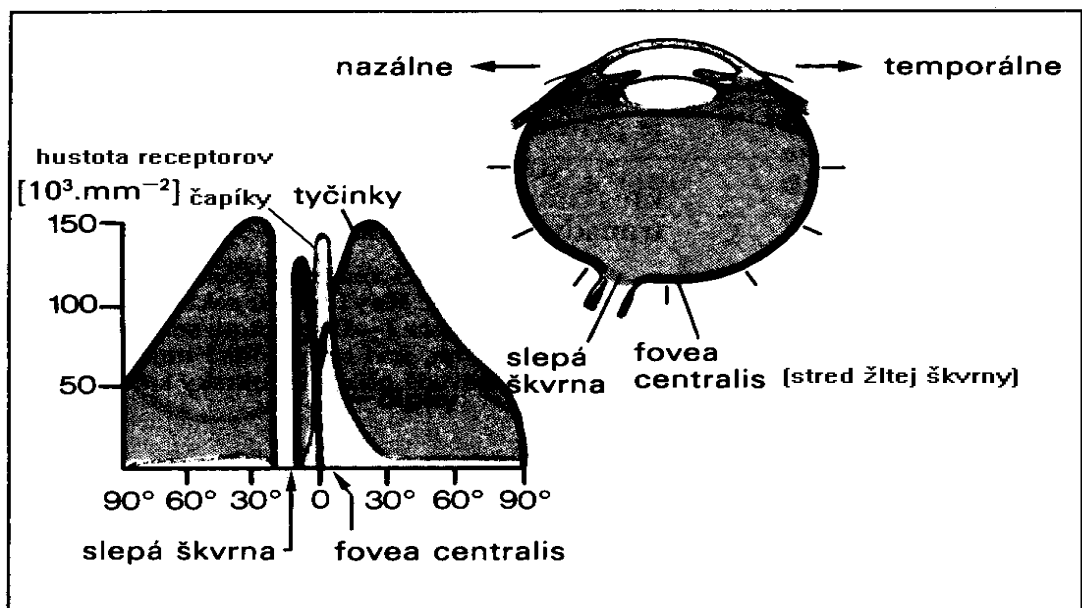
Tyčíniek je asi 120 000 000, sú citlivejšie ako čapíky a pomocou nich vidíme pri zníženom osvetlení, za šera a v noci. Slúžia na prijímanie čierneho-bieleho kontrastu. Čapíkov je asi 7 000 000 a vzhľadom na menšiu citlivosť umožňujú denné videnie [28]. Slúžia farebnému videniu a videniu detailov pri jasnom videní. Preto si ich činnosť vyžaduje vyššie intenzity svetla. Čapíky sú na seba natlačené tak, že na tangenciálnom reze tvoria vzorku medového plástu. Priemer čapíkov predstavuje asi 3-4 mikrometre a na jeden mm<sup>2</sup> je ich asi 12 000.



Obr. 1.6. Tyčinka pod elektrónovým mikroskopom [7]

Tyčinky pracujú nezávisle od aparátu denného videnia, ktorý predstavujú čapíky v sietnici. Medzi tyčinkami a čapíkmi sú recipročné vzťahy: keď pracujú čapíky, tyčinky sa utlmujú. Periféria sietnice je schopná pracovať už pri osvetlení 0,01 luxa, ale pri osvetlení prevyšujúcom 31 luxov pracujú už výlučne čapíky.

V čapíkoch a tyčinkách sú obsiahnuté tzv. zrakové pigmenty, ktoré sprostredkujú premenu svetelného podnetu na elektrické podráždenie receptorov.

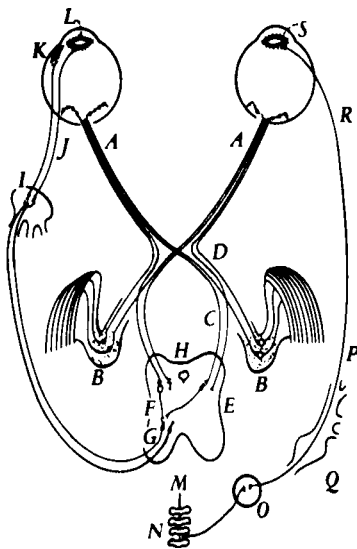


Obr. 1.7. Rozloženie tyčínok a čapíkov na sietnici oka [22]



## 1.2.4 FYZIOLOGIA ZRAKOVÉHO ORGÁNU

Akomodáciu šošoviek, pohyby očí, svaly, ktoré pohybujú okom a dúhovkou, riadi nervový systém (obr.1.8). Najväčšia časť informácií, ktoré vychádzajú z oka po optickom nerve A, sa rozdelí do dvoch zväzkov. Niekoľko vlákien však nejde priamo do vizuálneho centra v mozgu, kde „vidíme“ obrazy, ale idú do stredného mozgu H. Nimi sa meria osvetlenie a nastavuje sa clona dúhovky, alebo keď je obraz rozmazaný korigujú sa šošovky; v prípade, že je obraz zdvojený, snažia sa nastaviť oči na binokulárne videnie. Prechádzajú cez stredný mozog a späť sa napájajú na oko. K sú svaly, ktoré spôsobujú akomodáciu šošoviek, L sú ďalšie svaly, ktoré sú napojené na dúhovku.



**Obr. 1.8. Nervové medzispojenie pre mechanické ovládanie očí [7]**

Dúhovka má dva systémy svalov. Jeden tvorí kruhový sval L, ktorý pri podráždení dúhovku sťahuje a uzatvára. Je priamo spojený s mozgom prostredníctvom krátkych axónov a jeho činnosť je veľmi rýchla. Druhý, opozičný systém, tvoria radiálne svaly. Keď sa zotmie a kruhový sval sa uvoľní, radiálne svaly otvoria dúhovku. Nervový systém ovládajúci svaly je veľmi jemne vyvážený. Keď sa vyšle signál, aby sa jeden sval stiahol, automaticky sa vysiela aj signál na uvoľnenie druhého svalu. Avšak nervy, ktoré spôsobujú roztiahnutie dúhovky, nie sú známe, „nikto nevie, odkiaľ presne prichádzajú, ale vedú niekde dole do miechy, do oblasti hrudníka, z miechy vedú von hore cez krčné ganglie a späť do hlavy, aby nakoniec ovládli dúhovku [7].“ Tento signál neprechádza cez centrálny, ale úplne iný nervový systém. „Je to veľmi čudný spôsob zabezpečenia správnej funkcie [7].“

Ďalšou zvláštnosťou, ako sme už spomenuli, je umiestnenie buniek citlivých na svetlo, ktoré sú na opačnej strane - vnútorná strana je obrátená smerom von. Takže svetelné lúče, skôr ako sa dostanú k elementom citlivým na svetlo, musia prejsť cez niekoľko vrstiev iných buniek, kým sa dostanú k receptorom. Najprv prechádzajú vrstvou gangliových buniek, potom bipolárnych buniek, sieťou ich vlákien a opornými elementmi. Samotné nervové vlákna na svetlo nereagujú. V žltej škrvne je sietnica tenšia. Zostáva tam iba vrstva fotoreceptorov - čapíkov. Ostatné vrstvy sietnice na tomto mieste zanikli alebo sa zredukovali na minimum. Aj cievy obchádzajú žltú škrvnu a jej tkanivo sa vyživuje z okolia. Všetky tieto súvislosti umožňujú relatívne nerušený postup svetelných lúčov k husto uloženým receptorom na miesto najostrejšieho videnia.

### 1.3 PROJEKČNÝ SYSTÉM OKA, UTVÁRANIE VIZUÁLNEHO OBRAZU

Pri funkčnom rozbere sa oko zväčša porovnáva s fotografickým aparátom. (Podobne, ako sa utvorí optikou fotoaparátu obraz na matnici či filme, pracuje aj oko.) Vlastnú fotografickú komoru oka predstavuje optický systém oka, ktorý sa skladá:

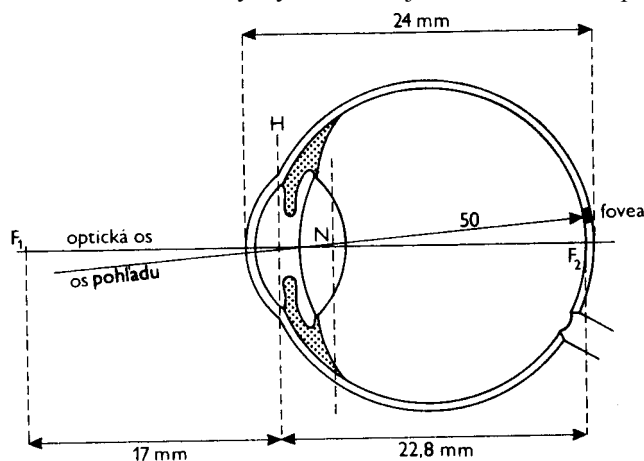
- z rozhrania medzi vzduchom a vonkajším povrchom rohovky (index lomu vzduchu = 1, index lomu rohovky = 1,38),
- z rozhrania medzi zadným povrchom rohovky a komorovou vodou (index lomu komorovej vody = 1,33),
- z rozhrania medzi komorovou vodou a šošovkou (index lomu šošovky = 1,40),
- z rozhrania medzi šošovkou a sklovcom (index sklovca = 1,34) [23].

Z uvedeného vyplýva, že najväčší lom lúčov nastáva na rozhraní vzduch-rohovka pri prechode svetla z prostredia opticky redšieho do prostredia značne hustejšieho. Optická mohutnosť tohto rozhrania vyjadrená v dioptriách predstavuje asi 39 až 43 D. Optická mohutnosť (prevrátená hodnota ohniskovej vzdialenosti šošovky vyjadrenej v metroch; jednotkou je dioptria) oboch povrchov šošovky je len okolo 16 D pretože šošovka je z každej strany obklopená tekutinou. (Na vzduchu by bola optická mohutnosť šošovky až 150 D.) Mechanizmom akomodácie sa mení zakrivenie plôch šošovky. Celková optická mohutnosť normálneho neakomodovaného oka je potom asi 59 D (43 + 16) [24].

Pigmentová vrstva cievky zamedzí vzniku bočných, nežiadúcich odrazov a zrenica prepúšťa len potrebné množstvo svetla. Sietnica, citlivá na svetlo, plní pritom funkciu filmu - negatívu.

Optický systém oka tvorí rohovka, komorová voda, šošovka a sklovec, ktoré majú celkový index lomu 1,33. Lúče svetla sa pri prechode optickým systémom lámu tak, aby na sietnici v ohnisku vznikol obraz. Optický systém oka má na okraji väčšiu optickú mohutnosť než na optickej osi. Táto *sférická aberácia* je príčinou toho, že zobrazovanie je tým neostrejšie, čím širšia je zrenica. U sférickej šošovky sa prejavuje určitá sférická aberácia. Rohovka, ktorá nemá tvar gule, je na okrajoch „plochejšia“ ako guľová šošovka, takže má menšiu sférickú aberáciu. Pomocou systému rohovka-šošovka sa dopadajúce lúče zaostrujú na sietnicu. Pri pohľade na blízke a vzdialenejšie predmety sa šošovka napína alebo uvoľňuje, čím prispôbuje polohu ohniska rôznym vzdialenostiam predmetov.

Svetlolomivý systém oka je veľmi zložitá optická sústava. Celý systém možno zjednodušiť



predstavou *redukovaného oka* (obr. 1.9).

**Obr. 1.9. Schéma redukovaného oka [24]**

*H* - hlavná rovina, *N* - uzlový bod.

Optický stred oka leží asi 7 mm za prednou plochou rohovky, sietnica je 17 mm za ním a rozmer očnej gule v optickej osi je asi 24 mm.

### 1.3.1 OPTICKÉ ZOBRAZOVANIE

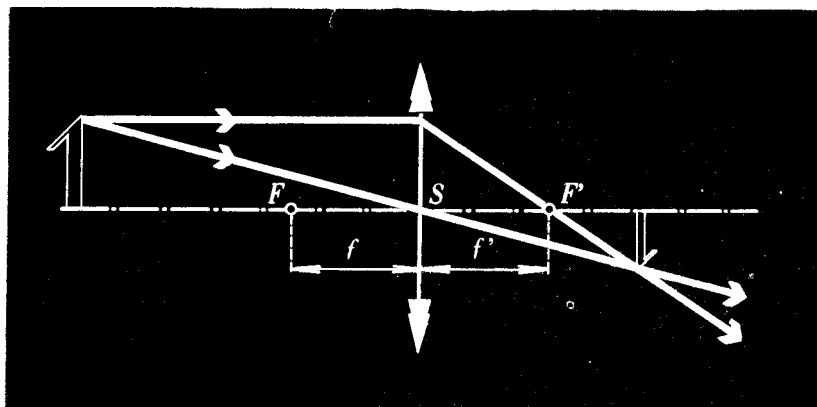
Pri výklade optického zobrazovania v škole sa vo vedomí žiaka vytvára predstava, že zobrazit' svietiaci bod (predmet) znamená spojiť lúče vychádzajúce z určitého bodu predmetu po prechode optickou sústavou opäť do jedného bodu. Tento bod je obrazom svietiaceho bodu predmetu a celkový obraz predmetu sa skladá z obrazov jednotlivých bodov. Príčinou spájania sa svetelných lúčov je ich lom alebo odraz (alebo kombinácia oboch dejov) na rozhraní optických prostredí.

Na konštrukciu obrazu potom možno použiť základné svetelné lúče (obr. 1.10):

- 1) zväzok lúčov rovnobežných s optickou osou sa po prechode spojnou optickou sústavou láme do obrazového ohniska optického systému,
- 2) lúč prechádzajúci predmetovým ohniskom spojenej optickej sústavy sa po prechode optickou sústavou pohybuje rovnobežne s optickou osou,
- 3) lúč prechádzajúci optickým stredom tenkej šošovky nemení svoj smer.

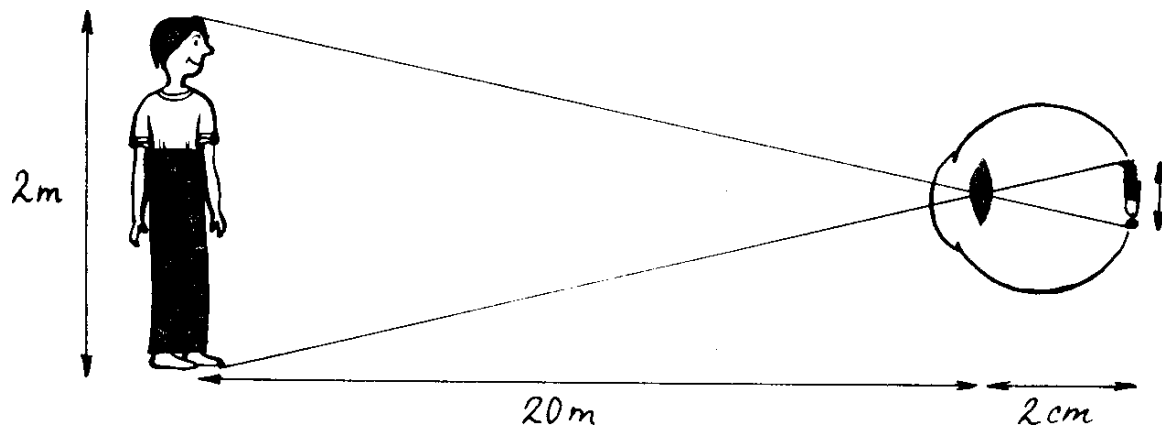
K fyziologickému procesu v oku dochádza, keď sa obraz pri pohľade oka do nekonečna utvorí pomocou jeho optického systému práve na sietnici. Keďže v danom prípade je ohnisko optického systému tesne pred sietnicou, utvorí sa na sietnici ostrý, zmenšený a stranovo aj výškovo prevrátený obraz (ako na matnici fotografického prístroja).

Už na základnej škole sa žiaci oboznámia s tým, že svetelný lúč sa pri prechode povrchom šošovky láme. Rovnobežný svetelný zväzok sa po prechode šošovkou zmení na rozbiehavý alebo zbiehavý svetelný zväzok. Šošovky, ktoré menia rovnobežný svetelný zväzok na zbiehavý, sa nazývajú spojky. Žiaci zisťujú vlastnosti obrazu utvoreného šošovkou pokusne. Presnejšiu predstavu o tom, ako a kde sa utvára obraz tenkou spojkou, získavajú žiaci geometrickou konštrukciou.



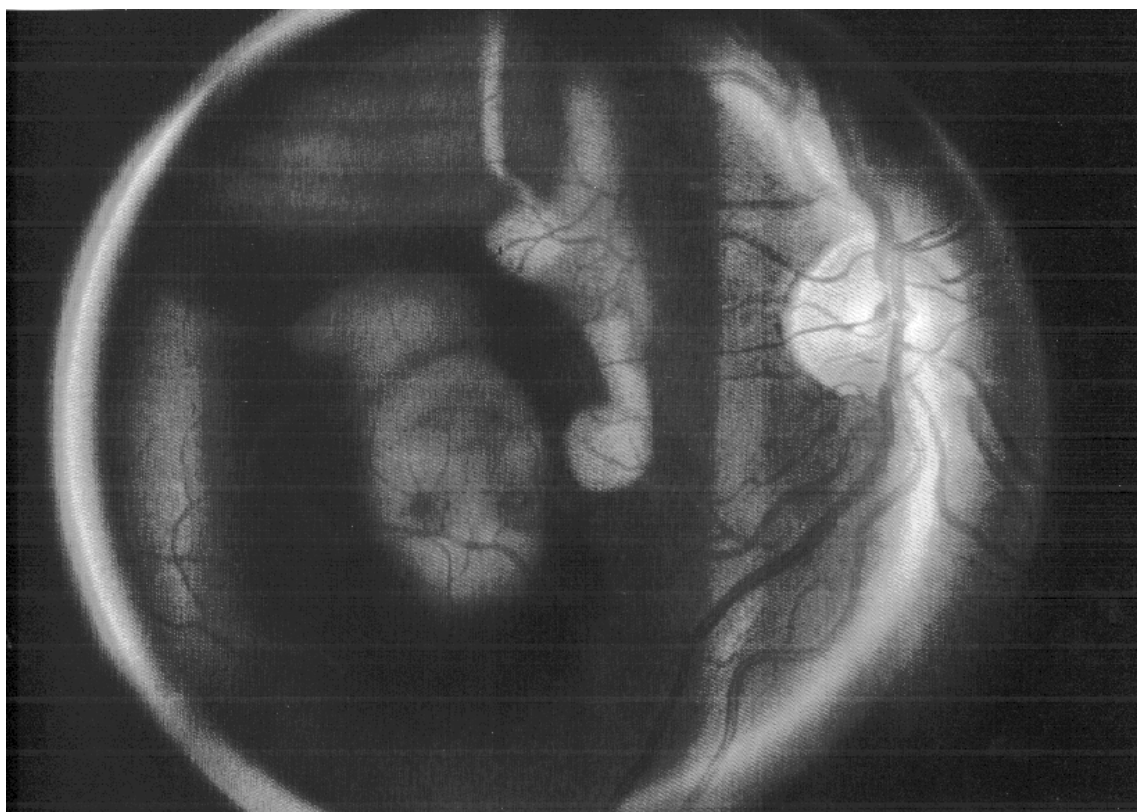
*Obr. 1.10. Zobrazenie predmetu spojkou - predmet je umiestnený pred spojkou vo vzdialenosti väčšej, ako je dvojnásobná ohnisková vzdialenosť spojky [3].*

Tiež sa oboznámia s tým, že očný mok, očná šošovka a sklovec tvoria spojnú optickú sústavu. Táto sústava utvára na sietnici skutočný a prevrátený obraz, menší, ako je pozorovaný predmet.



**Obr. 1.11.** Úlohou žiakov je určiť, aký veľký bude na ich sietnici obraz dvojmetrového človeka, ktorý stojí pred nimi vo vzdialenosti 20 metrov [4].

Na gymnáziu sa tieto predstavy ďalej rozvíjajú. Zavedú sa nové pojmy, zobrazovacia rovnica šošovky. Polohy a vlastnosti vzniknutého obrazu vyplynú z pokusov, geometrického zobrazovania a zo zavedených rovníc. Až potom prichádza na rad téma Oko ako optická sústava. Žiaci si zopakujú, že oko považujeme za spojnú optickú sústavu. Takže využívajúc predošlé vedomosti o zobrazovaní pomocou spojných optických sústav získané na hodinách optiky možno usúdiť, že obrazy predmetov utvorené na sietnici budú prevrátené. Skutočnosť, že je to naozaj tak, dokazuje aj nasledujúci obrázok.



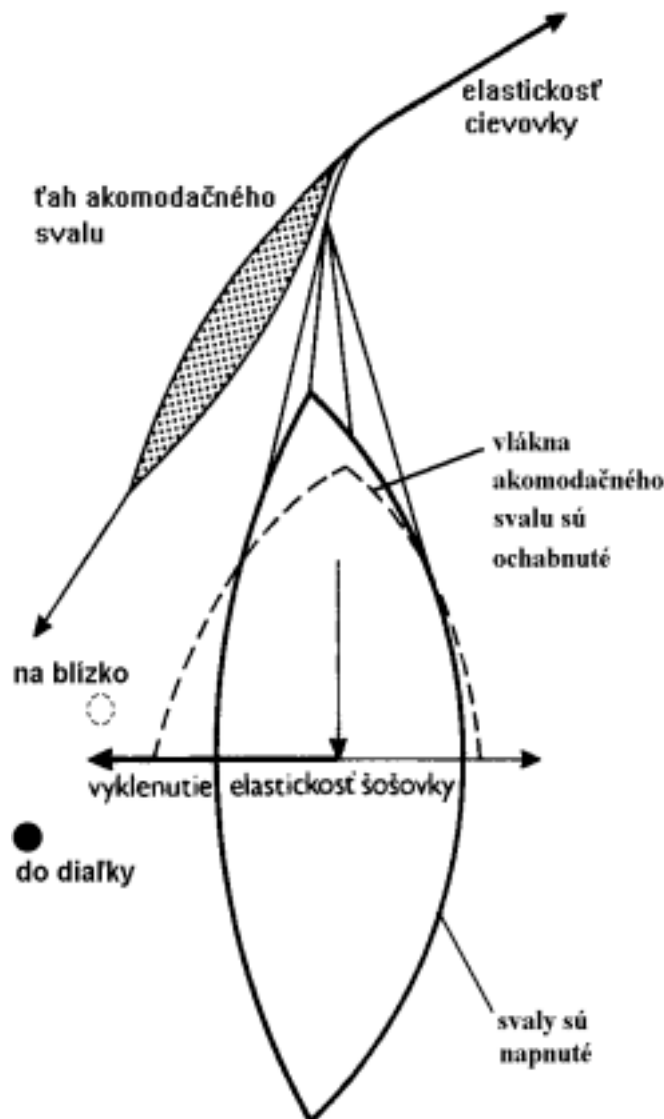
**Obr. 1.12.** Obraz dievčaťa s telefónom na sietnici oka

Táto snímka bola zhotovená špeciálne konštruovanou kamerou, ktorá bola nasmerovaná cez zreničku do oka. Fotografujúca osoba mala pohľad zaostrený na bradu a pery dievčaťa, preto sa práve ony zobrazili na žltej škvrne. Na obrázku sa táto oblasť javí ako trocha tmavšie miesto. Len čo sa svetlo dostalo cez rohovku a šošovku, obraz sa premietol na sietnicu. Vidíme, že obraz zachytení na sietnici je obrátený. My ho však vnímame po spracovaní v mozgu ako priamy. Vpravo na zábere vidno slepú škvrtu ako svetlú oblasť, zo stredu ktorej vychádzajú cievy. Práve v tomto mieste opúšťa očný nerv oko [21].

## 1.4 AKOMODÁCIA

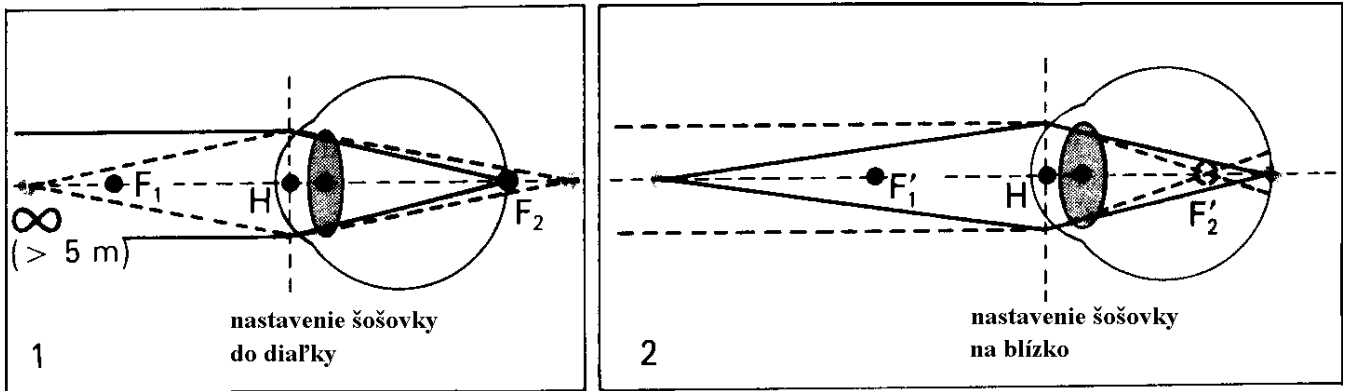
Schopnosť oka meniť zvýšenou činnosťou (zvýšiť, znížiť) optickú mohutnosť šošovky, a tým aj zaistiť ostrý obraz na sietnici, nazývame *akomodácia*. Akomodáciou sa obraz opticky zaostruje, aby padol na sietnicu tak ostro, ako si to okolnosti vyžadujú. (Pod akomodáciou v užšom slova zmysle rozumieme schopnosť oka prispôbiť sa videniu nablízko.) Pri akomodácii sa šošovka oka „zaguľatuje“, resp. splošťuje: pri pohľade doďaleka je šošovka ploskejšia, pri pohľade nablízko je hrubšia. Pri pohľade na bližšie predmety sa spolu s akomodáciou reflexne zúži zrenica. Súčasne so zaostrením obrazu do blízka sa osi očí pootočia do vnútra, aby sa obraz predmetu dostal na žltú škvrnu.

Ak je predmet vzdialený menej ako 5 m, treba na vytvorenie ostrého obrazu na sietnici zvýšiť celkovú lomivosť optického systému oka akomodáciou očnej šošovky. Najpodstatnejšou zmenou je zakrivenie prednej plochy šošovky, čiže zmenšenie jej polomeru zakrivenia.



Obr. 1.13. Mechanizmus akomodácie oka [24]

Čo sa deje pri akomodácii? V neakomodovanom oku sú lomné plochy šošovky menej zakrivené (obr. 1.13). Ich tvar je výsledkom vnútorného napätia a ťahu závesného systému. Počas akomodácie sa postupne kontrahuje akomodačný sval, čím sa uvoľní napätie závesného aparátu a zmenší sa napätie puzdra šošovky, ktorá sa vlastným elastickým napätím vyklenie [24]. Polomer zakrivenia sa mení najmä na prednej ploche. Akomodácia podlieha vôli, ale súčasne pracuje aj automaticky. „Vlastný mechanizmus akomodácie však ešte dobre nepoznáme. Podľa teórii, ktoré ho vysvetľujú, sa na akomodácii zúčastňuje okrem vráskovcových kontrakcií aj pružnosť šošovky, preskupovanie jej hmoty, pohyby sklovca a iné faktory [27].“



Obr. 1.14. Akomodácia oka pri pohľade do diaľky (1) a na blízko (2) [22]

Akomodácia má aj svoju hraničnú hodnotu. Pri neakomodovanom (relaxovanom) oku sa zväzok rovnobežných lúčov, teoreticky vychádzajúcich z nekonečne vzdialeného predmetu (tzv. *vzdialený bod* u normálne vidiacich osôb), spája na sietnici. Mierou maximálneho akomodačného úsilia je vzdialenosť *blízkeho bodu* (vzdialenosť najbližšia k oku, pri ktorej je videnie ešte ostré (asi 0,1 m)).

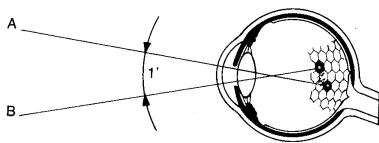
Najväčšie zvýšenie lomivosti šošovky, ktoré môžeme akomodáciou dosiahnuť, označujeme ako *akomodačná šírka*. Je to prakticky rozdiel medzi *bodom blízkeho videnia* a *bodom vzdialeného videnia* vyjadrený v dioptriách. (Tento rozdiel vyjadrený v metroch predstavuje *akomodačnú oblasť*. V emetropického oka mladého človeka akomodačná oblasť začína od 5-6 m a končí pri 20 cm.)

Bod vzdialeného videnia predstavuje bod, v ktorom sa začína optické nekonečno, čiže bod, od ktorého môže oko ostro vidieť predmety bez akomodácie. Bod blízkeho videnia definujeme ako najmenšiu vzdialenosť, v ktorej oko ostro vidí predmety pri maximálnej akomodácii. Pri pohľade bližšie od bodu vzdialeného videnia oko začína akomodovať, pri pohľade na bod blízkeho videnia je už maximálne akomodované.

Akomodačná šírka býva rozličná v závislosti od veku. S rastúcim vekom elasticita šošovky klesá a akomodačná schopnosť sa znižuje. Tento proces sa začína prakticky hneď od malička. Pri narodení predstavuje akomodačná šírka asi  $\pm 20$  dioptrií. S pribúdajúcim vekom sa znižuje (*presbyopia*), medzi 40. až 50. rokom života klesne až na 2,5 D a okolo 70-ho roku zaniká úplne, klesá na 0 (bod blízkeho videnia splynie s bodom vzdialeného videnia). (Dospelý človek musí na vzdialenosť 30-40 cm vyvinúť akomodačné úsilie, ktoré predstavuje asi +4D.) Po strate akomodačnej schopnosti ostane oko trvalo fokusované na určitú vzdialenosť v závislosti od fyzikálnych charakteristík každého oka.

## 1.5 PORUCHY ZRAKOVEJ OSTROSTI (REFRAKČNÉ CHYBY)

Zraková ostrosť (*visus*) spočíva v schopnosti oka rozlíšiť dva body ako dva. To je možné len vtedy, keď sa ich obrazy vytvoria na dvoch čapíkoch, medzi ktorými je aspoň jeden čapík nepodráždený (centrá obrazov na sietnici sú od seba vzdialené najmenej  $2 \mu\text{m}$ ). Tejto podmienke zodpovedajú dva svetelné body, z ktorých svetelné lúče dopadajú na sietnicu pod zorným uhlom  $\alpha$  väčším ako 1 minúta. (Pri veľkej hustote svetlocitlivých elementov stačí aj  $26''$  uhol - maximálna zraková ostrosť.) Z hodnoty  $1/\alpha$  ( $\alpha$  je v uhlových minútach) sa vypočíta zraková ostrosť; v normálnom prípade je zraková ostrosť 1. Zisťovaná zraková ostrosť sa vzťahuje na miesto najostrejšieho videnia, pretože smerom k perifériu sietnice ostrosť rýchlo ubúda, čo súvisí s rozložením čapíkov.

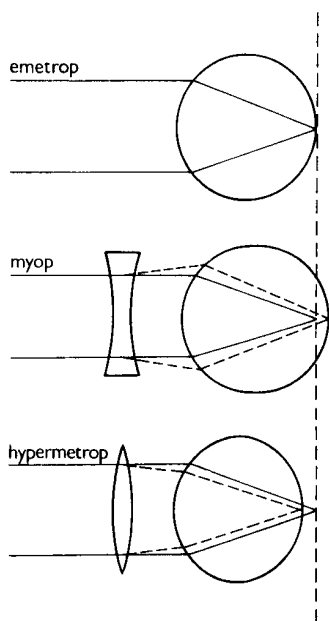


**Obr. 1.15. Funkčná jednotka sietnice**  
[26]

Ak obrazy bodov padnú na dva vedľa seba ležiace čapíky, oko ich nemôže rozlíšiť, preto vzniká vnem krátkej čiarky. Pri dobrej funkcii optického systému závisí zraková ostrosť od intenzity osvetlenia, kontrastu a od hustoty fotoreceptorov na danom mieste sietnice. Najväčšia ostrosť zraku je v žltej škvrne, čo úzko súvisí s maximálnou hustotou svetlocitlivých elementov - čapíkov.

Podmienkou ostrého videnia je dokonalá funkcia optického systému oka (hovoríme, že oko je *emetropické*). Najčastejšou príčinou zníženej zrakovej ostrosti bývajú refrakčné chyby. *Refrakciou* nazývame pomer medzi optickou mohutnosťou lomivých prostredí a medzi dĺžkou očnej gule.

Ak je porucha optického systému spôsobená odchýlkami v lomivosti alebo vo vzájomných vzdialenostiach lomivých plôch, vtedy hovoríme o *ametropii*. Ametropia môže byť sférická (*myopia* (krátkozraké oko) a *hypermetropia* (ďalekozraké oko)) a asférická (*astigmatizmus*). Sférické ametropie sa ešte delia na častejšie sa vyskytujúce *osové* (os očnej gule je príliš krátka alebo dlhá) a *refrakčné* či lomivé (príčina je v dioptrickom systéme oka) [24].

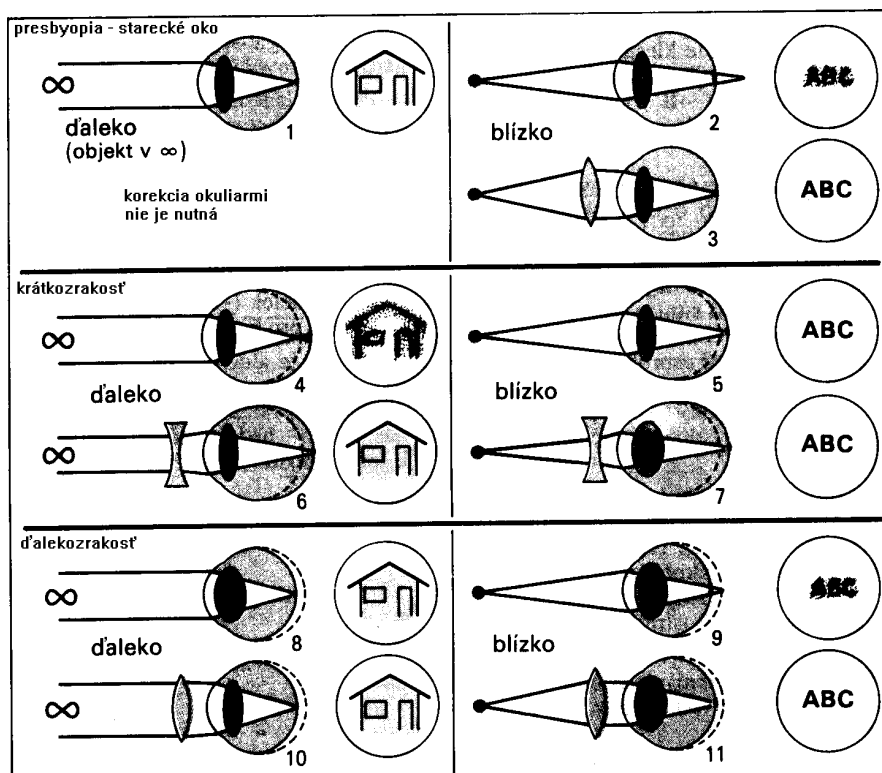


**Obr. 1.16. Osová ametropia** [24]

*Plná čiara predstavuje priebeh rovnobežných lúčov pri neakomodovanom oku, prerušovaná čiara zobrazuje priebeh lúčov po korekcii.*

Sférické refrakčné chyby sú spôsobené anomálnym lomom lúčov v optickom systéme oka. O astigmatizme hovoríme vtedy, keď sa lúče nelámu do jedného bodu pre asférické zakrivenie optického aparátu oka.

Obr. 1.17. Presbyopia, krátkozrakost' a ďalekozrakost' [22]



1 - 3: videnie na diaľku je neporušené, ale pre videnie na blízko (čítanie) je nutné používať okuliare so spojnou šošovkou;  
 4 - 7: rovnobežné lúče sa pretínajú pred sietnicou (4), vzdialený bod je blízko (5);  
 8 - 11: už pri pohľade do diaľky musí oko akomodovať ako na blízko (8).

Pri krátkozrakosti sa rovnobežné lúče pretínajú už pred sietnicou (zvyčajne preto, že očná guľa je príliš dlhá). Vzdialený bod je v konečnej vzdialenosti, posunutý smerom k oku, a to znamená, že aj bez akomodácie je myop (krátkozraký) schopný ostro vidieť bod vzdialený od oka menej než 5 metrov. (Pri ťažkej krátkozrakosti môže byť vzdialený bod len niekoľko centimetrov od oka.) U krátkozrakých sa ostrý obraz na sietnici vytvorí vtedy, keď do oka prídu divergentné lúče. Preto sa krátkozrakosť koriguje konkávnym sklom - rozptylkou, ktorá láme zväzok rovnobežných lúčov tak, akoby vychádzal od určitej konečnej vzdialenosti do oka. (Príklad: vzdialený bod je vo vzdialenosti 0,5 m, korekčná šošovka má optickú mohutnosť  $-2D$ ).

Pri ďalekozrakosti je očná guľa príliš krátka. Rovnobežné lúče sa pretínajú až za sietnicou. Hypermetrop (ďalekozraký) musí aj pri pohľade do diaľky vyvinúť väčšie-menšie úsilie, aby lúče, ktoré sa zbiehajú nedostatočne, urobil konvergentnejšími. Primeranou akomodáciou môže takto postihnutý človek posunúť spojnicu lúčov na sietnicu, a tak dosiahnuť ostré videnie bez korekcie sklami. Na rozdiel od emetropa musí ďalekozraký akomodovať už pri pohľade na vzdialené predmety. Jeho blízky bod je ďalej od oka. Túto refrakčnú vadu korigujeme pomocou konvexných šošoviek - spojok (+D), ktoré zabezpečia priblíženie blízkeho bodu. Ďalekozrakosť je lomivá, keď je rohovka ploskejšia, ako by mala byť. Osová ďalekozrakosť vzniká tak, že os očnej gule je od narodenia kratšia alebo zaostane vo svojom normálnom raste.

Normálna rohovka je ideálne hladká a lesklá. Zakrivenie rohovky však nie je vo všetkých rovinách ani za fyziologických okolností úplne rovnaké. Vo zvislej rovine je o niečo väčšie ako v rovine horizontálnej. Tento jav sa nazýva *fyziologický astigmatizmus*. Ak je astigmatizmus výraznejší, svetelné



lúče prechádzajúce cez jednu rovinu rohovky (niekedy aj šošovky), majú ohnisko vzdialenejšie, ako svetelné lúče prechádzajúce cez druhú rovinu. V dôsledku toho sa na sietnici vytvorí neostří obraz.

Pravidelný astigmatizmus je spôsobený nerovnakým zakrivením rohovky alebo šošovky v dvoch na seba kolmých rovinách (tzv. hlavné rezy, resp. osi astigmatizmu). Astigmatická rohovka je časťou rotačného elipsoidu. Poznáme aj nepravidelný astigmatizmus, ktorý vzniká po chorobnom procese alebo zjazvením rohovky. Ak povrch rohovky ostane hrboľatý, vťahnutý alebo nepravidelne vykľutý, lom svetelných lúčov cez pozmenený optický systém je úplne nepravidelný a v nijakej rovine nemôže vzniknúť jasný obraz [27]. Astigmatik v podstate nemôže dosiahnuť vytvorenie bodového obrazu na sietnici a jeho videnie nie je ostré.

Fyziologický astigmatizmus, pri ktorom rozdiel optickej mohutnosti v oboch rovinách nepresahuje 1D, nevyžaduje žiadne korekčné účinky. Ak pravidelný astigmatizmus znižuje zrakovú ostrosť, možno ho korigovať valcovými, čiže cylindrickými šošovkami. Nepravidelný astigmatizmus spôsobený nepravidelným prehýbaním povrchu rohovky je korigovateľný priložením kontaktných šošoviek, pričom medzery medzi rohovkou a kontaktnou šošovkou sa vyplnia slzami.

## 1.6 OSOBITOSTI OČÍ ŽIVOČÍCHOV

Vráťme sa teraz na chvíľu v závere kapitoly do biológie. Ľudské oko nie je jediným druhom oka. Ako sme už spomínali, takmer všetky stavovce majú podobné oči ako človek. Nižšie živočíchy majú mnoho iných druhov očí: očné škrvny, rôzne očné poháriky a iné menej citlivé orgány. Najjednoduchšie sú *ploché oči* morských lastúrnikov.

Medzi nestavovcami však existuje jeden druh vysoko vyvinutého oka - a to zložené oko hmyzu. Pozorným skúmaním sa zistilo, že povrch oka je zložený z pravidelných šesťhranných buniek. Tie vstupujú až do hĺbky oka, takže celé oko predstavuje systém tenkých rúrok na jednom konci pevne spojených a na druhom konci rozbiehajúcich sa všetkými smermi. Každá takáto rúrka predstavuje samostatné oko, ktoré môže pozorovať iba ohraničenú časť priestoru. Rúrok je dostatočne veľa, čo umožňuje hmyzu sledovať celý priestor v jeho okolí. Oko síce môže pozorovať vo všetkých smeroch súčasne, no neutvára ostrý obraz. Vytvára celý rad nezávislých obrazov. To umožňuje hmyzu určiť rýchlosť pohybujúceho sa objektu podľa toho, ako postupne vzniká v jednotlivých častiach oka jeho obraz.

Včela je hmyz, ktorého zrak skúmali biológovia veľmi podrobne. Oko včely je vytvorené z veľkého množstva zvláštnych buniek nazývaných omatídiá, ktoré sú kužeľovito uložené po povrchu gule na hlave včely.

Zistilo sa, že aj keď boli dva kúsky bieleho papiera takmer úplne rovnaké, včely zaregistrovali medzi nimi rozdiel. Včelie oko je totiž citlivé v širšom rozsahu spektra, ako je náš rozsah. „Naše oko vidí od 700 nm do 400 nm, od červenej po fialovú, ale včelie oko vidí až do 30 nm, t.j. po ultrafialovú oblasť! [7].“ Na základe toho vzniká mnoho pozoruhodných javov. Včely dokážu rozlíšiť aj tie kvety, ktoré sa nám zdajú byť rovnaké. Tiež sa zistilo, že včely nevidia v oblasti spektra, ktoré zodpovedá červenej farbe. Mohlo by sa teda zdať, že pre včely sú čierne. No nie je to tak. Aj naše oko pri podrobnom štúdiu červených kvetov dokáže postrehnúť, že väčšina z nich má mierne modrastý nádych, pretože dostatočne odrážajú ešte aj modrú farbu. A tú včela vidí.

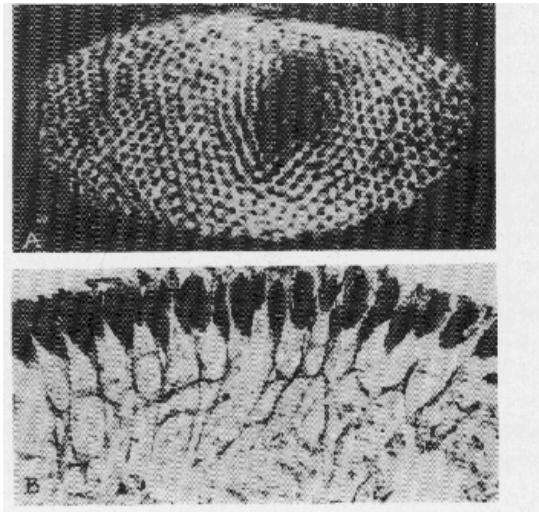
Ďalšou zaujímavosťou včelieho zraku je, že pri pohľade na kúsok modrého neba včela vie určiť smer, v ktorom je Slnko bez toho, aby ho videla. Oko včely je totiž dosť citlivé na polarizáciu svetla a rozptýlené svetlo oblohy je polarizované.

Hovorí sa, že včela postrehne blikot až do frekvencie 200 Hz, zatiaľ čo človek iba 20. Rozlišovacia schopnosť včelieho oka je však v porovnaní s našou veľmi slabá. V porovnaní so včelou sme schopní vidieť predmety, ktorých zdanlivá veľkosť je trikrát menšia [7]. V porovnaní s nami vidí včela dosť neostro a rozmazane.

Okrem včiel vidia farbu aj mnohé iné živočíchy. Zmyslový epitel sietnice holubov, sliepok a iných živočíchov, prispôbených prevažne na život pri dennom svetle, t.j. v podmienkach vyšších intenzít svetla, obsahuje prakticky len čapíky. Ryby, motýle, vtáky a plazy môžu vidieť farbu, no väčšina zvierat ju vidieť nemôže. Nočné živočíchy, prispôbené na život pri veľmi nízkych intenzitách svetla (sova,

netopier), majú zmyslový epitel sietnice zložený len z tyčiniek. „Vtáky farbu určite vidia, a to súvisí aj so sfarbením vtákov. Bolo by zbytočné, aby samčekovia boli takí krásne sfarbení, keby to samičky nemohli vidieť! Takže vývoj pohlavného sfarbenia, ktoré majú vtáky, je výsledkom toho, že samičky ho môžu vidieť [7].“ Najdokonalejšie rozoznáva farbu človek, pomerne dobre opice, kone, jelene, ovce, žirafy, veverice a morčatá.

Všetky stavovce majú oči podobné našim, všetky nestavovce majú slabo vyvinuté oči alebo zložené oči. Výnimkou je chobotnica. Nemá zložené oko alebo očnú škrvnu, ale má rohovku, viečko, dúhovku, šošovku, dve oblasti s vodou a vzadu má sietnicu. V podstate má rovnaké oko ako stavovce. Ukazuje sa, že sietnica chobotnice je tiež časťou mozgu, ktorá sa oddelila od mozgu v embryonálnom vývoji, rovnako ako u stavovcov, ale odlišné a zaujímavé je to, že bunky citlivé na svetlo sú na vnútornej strane oka, nie ako u človeka. „Chobotnica obrovská má najväčšie oči na svete. Našli sa aj také, čo mali priemer oka až 38 cm![7]“



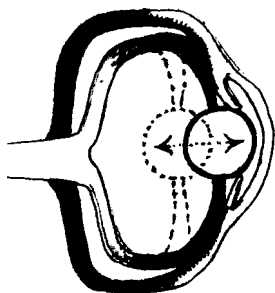
**Obr. 1.18. Zložené oko podkovitého kraba:**

- a) normálny pohľad,*
- b) prierez [7]*

Na obrázku č. 1.18a) je zložené oko kraba podkovitého. Má okolo tisíc omatidií. Na obrázku 1.18b) je prierez oka. Vidno tam omatidiá s nervovými vláknami, ktoré z nich vychádzajú do mozgu.

Zaujímavosťou sú aj oči žaby. Žaba očami vôbec nehýbe, iba ak sa pohne list, a v tom prípade kyve očami presne tak, že sa obraz nemení. Inak oči neotáča. Žaba vníma iba pohybujúce sa predmety. Môže byť obklopená dostatkom organizmov, ktoré jej slúžia za potravu, no keby sa nepohybovali,

zahynula by od hladu. „Ak nejaký vypuklý predmet vstupuje do zorného poľa jej oka, oko ho vidí vstupovať do vnútra a aj si pamätá, že je tam, ale stačí, keď vypneme na chvíľu svetlo, už naň zabudne a viac ho nevidí [7].“ Sietnica oka žaby má schopnosť zväčšovať ostrosť obrazu, pričom sa zvýrazňuje hlavne jeho obrys.



**Obr. 1.19. Oko rýb [14]**

Šošovka oka rýb má takmer tvar gule. Je to preto, aby optická sústava tohto oka mala dostatočne veľkú optickú mohutnosť, pretože relatívny index lomu šošovky oka ryby vo vode je veľmi malý. Oko ryby, podobne ako oko človeka má schopnosť akomodovať. Akomodácia oka pri väčšine rýb sa dosahuje zmenami vzdialenosti šošovky od sietnice pomocou svalov. Šošovka oka sokola sa môže takmer úplne sploštiť, takže na sietnici vzniká obraz aj veľmi vzdialených predmetov. Preto sokol vidí aj na veľké vzdialenosti.

Zrenice očí koni sú uložené v horizontálnej rovine. Horizontálne uloženie očí rozširuje zorný uhol v tejto rovine. Toto uloženie je veľmi dôležité pre živočíchy žijúce vo voľných priestranstvách, aby včas zbadali svojho nepriateľa. Naopak, mačky, tigre a líšky majú zrenice uložené vertikálne. Ich zrenice sa dajú rozšíriť dostatočne na to, aby dobre videli aj za tmy.

Mnohé živočíchy majú za sietnicou tenkú vrstvu, ktorá odráža svetlo ako zrkadlo. Preto sa pri odraze svetla zosilňuje pôsobenie svetla dopadajúceho do oka. Oči týchto živočíchov (napr. mäsožravcov) vo tme fluoreskujú. Treba si uvedomiť, že tu nejde o „videnie v tme“, ako sa niekedy mylne vysvetľuje schopnosť zvierat orientovať sa za šera. V absolútnej tme ani zvieratá nevidia nič. „Zdá sa, že u niektorých druhov sa na vyvolávaní svetla zúčastňujú svietivé baktérie žijúce v ich svietivých žľazách [29].“

Sietnica ľudského oka je takmer zhodná so sietnicou oka orla, ale rozmery nervových buniek v strednej časti sietnice oka orla sú menšie o 0,3 až 0,4 mikrometra. Význam tejto štruktúry spočíva v tom, že so zmenšovaním rozmerov nervových buniek sa zväčšuje rozlišovacia schopnosť oka, a tým aj ostrosť videnia. Neobyčajne ostrý zrak majú aj sysle. Sietnica ich oka obsahuje iba čapíky, a preto vidia len pri dobrom osvetlení. Slon a nosorožec vidia len nejasne a na vzdialenosť približne 30 metrov. Lev vidí tak dobre ako človek. Dravci vidia tak ostro ako človek pomocou osemnásobne zväčšujúceho ďalekohľadu.

Žiaden obyvateľ mora nemá taký ostrý zrak ako sépia\*, osmonoh\* a ostatné hlavonožce. Pre porovnanie na štvorčeku so stranou 1 mm na sietnici oka osmonoha je asi 64 000 buniek citlivých na svetlo, na sietnici sépie asi 150 000, kalmara 162 000, mačky 379 000, človeka 400 000 a sovy až 680 000. Oči morských živočíchov majú tiež schopnosť zväčšovať ostrosť obrazu a to tak, že zrkové nervy, na ktoré dopadá relatívne intenzívne svetlo, tlmia signály iných nervov, na ktoré dopadá menej intenzívne svetlo. Šošovka hlavonožcov nemôže meniť tvar ako šošovka stavovcov, teda jej chýba schopnosť akomodácie. Šošovky hlavonožcov sa dotýka morská voda, pretože hlavonožce majú v rohovke menší alebo väčší otvor. Hlavonožce majú ešte jednu zvláštnosť. Kým zrkové bunky v sietnici stavovcov sú obrátené smerom k mozgu, hlavonožce ich majú obrátené dovnútra oka, smerom k šošovke. Hlavonožce a všetky stavovce majú *komorové oči*.

Oči hlavonožcov sú veľmi veľké aj rozmerovo. Oči sépie sú iba 10-krát menšie ako ona sama. Ich ďalšou zaujímavosťou je veľmi úzka zrenica, ktorá sa podobá gréckemu písmenu omega  $\Omega$ . Keď je sépia podráždená, zrenica sa mimoriadne zväčší a zaokrúhli, ale jej mihalnice sa stiahnu. „Oči obrovských jedincov majú v priemere až 40 cm, sú teda najväčším známym zrkovým orgánom [29].“ Zistilo sa, že aj zraku zbavené osmonohy rozlišujú svetlo. Pociťujú ho celým povrchom tela, ktorý je pokrytý čuchovými, chuťovými bunkami a bunkami citlivými na svetlo [14].

---

\* **Poznámka:** *Sépie - desaťramenný dvojžiabrovec. Osmonoh - osemramenný hlavonožec. Chobotnica obrovská tiež patrí medzi hlavonožce.*

Oči človeka a niektorých živočíchov sú uspôsobené tak, aby sledovali určitý predmet súčasne: zorné pole pravého oka sa takmer nelíši od zorného poľa ľavého oka. Väčšina živočíchov však pozerá každým okom osobitne. Obrazy, ktoré pozorujú, ich sice neinformujú dostatočne o priestorovom usporiadaní predmetov, zato ich zorné polia sú oveľa širšie. Každé oko človeka vidí v horizontálnom smere v rozpätí uhla  $120^\circ$ , pričom sa obidva uhly čiastočne prekrývajú. Zajac bez toho, aby otočil hlavu, vidí nielen to, čo je pred ním, ale aj to, čo je za ním. Preto je tak ťažké priblížiť sa k zajacovi a nevyplašiť ho. Zajac však nevidí predmety, ktoré sa nachádzajú bezprostredne pred ním. Aby ich videl, musí otočiť hlavu nabok.

Sovy vidia len pred seba. Ich videnie je binokulárne. Tým sa líšia od väčšiny vtákov, ktorých oči sú schopné skôr obrátiť sa dozadu ako dopredu. Ak chcú sovy zmeniť smer pohľadu, musia nevyhnutne otočiť hlavu.

Holub dokáže dlhší čas bez mihnutia oka pozeráť priamo do Slnka. „Pokusy ukázali, že sietnica oka holuba sa nepoškodí ani priamym ožiarením laserovými lúčmi s energiou 0,05 J [14].“ Oko holuba má tiež osobitnú schopnosť registrovať iba objekty pohybujúce sa rovnakým smerom a nereagovať pritom na objekty, ktoré sa pohybujú inými smermi.

Slimák dokáže registrovať rádioaktívne žiarenie. „Je to „živý Geigerov-Müllerov počítač“ [14].“