

Jak naše oči vidí

Zdeněk Bochníček, Katedra obecné fyziky, Přírodovědecká fakulta MU, Brno

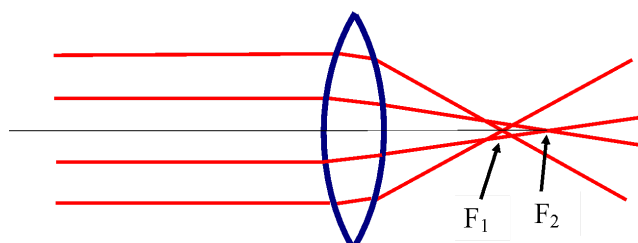
Úvod

Zrak je nejdůležitějším smyslem a oko samotné je současně optickou zobrazovací soustavou. Experimenty přímo využívající vlastních očí studentů tak mohou ukázat nejen vlastnosti lidského zraku, ale i obecné vlastnosti šíření světla a zobrazení.

V tomto příspěvku bude představeno několik pokusů, které nevyžadují s výjimkou částečného zatemnění žádné náročnější pomůcky a lze je snadno provádět s mnoha studenty současně.

Otvorová vada

Oko, jako spojná optická soustava, podléhá zobrazovacím vadám. Jednou z nich je vada otvorová, při které, v případě sférické čočky, jsou okrajové paprsky lámány více, než paprsky blízké optické ose, viz obr. 1. Reálné sférické čočce tak nelze přiřadit jedinou ohniskovou délku. Otvorovou vadu nejsnáze potlačíme tak, že clonkou omezíme vstupující paprsky pouze na oblast blízkou optické ose.

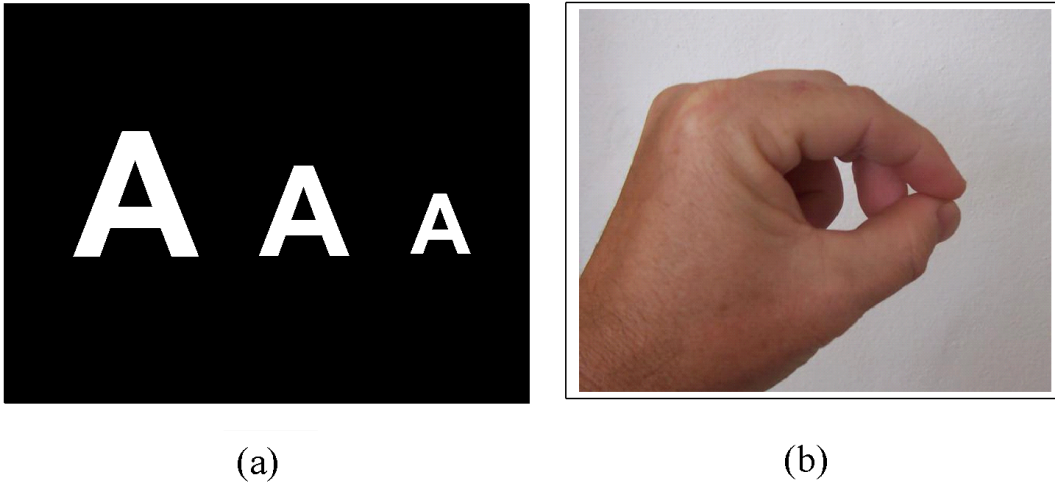


Obr. 1: Při otvorové vadě jsou okrajové paprsky lámány více, než paprsky středové. Ohnisko F_1 pro okrajové paprsky je proto blíže čočce, než ohnisko F_2 paprsků paraxiálních.

Lidské oko svojí stavbou otvorovou vadu snižuje: oční čočka není sférická a index lomu čočky není homogenní. Přesto vada není zcela odstraněna a snižuje ostrost vidění zejména za slabého osvětlení, kdy jsou zorničky široce otevřeny. Přesvědčíme se o tom následujícím pokusem:

Z tmavého neprůhledného papíru zhotovíme clonku s jednoduchým symbolem, např. písmenem „A“. Je dobré připravit vedle sebe několik stejných symbolů různé velikosti, aby byl efekt dobře patrný i pro pozorovatele z různých vzdáleností (viz obr. 2a). Clonku podložíme bílým průsvitným papírem jako matnicí. Můžeme také obrázek připravit v některém kreslicím programu a vytisknout na tiskárně na obyčejný papír. Pokud takto přes sebe přeložíme dvě kopie, bude kontrast mezi černou a bílou dostatečný. Clonku osvětlíme zezadu silnějším zdrojem uzavřeným do neprůhledného krytu. Pozorujeme v téměř zatemnělé místnosti, aby zorničky byly co nejvíce otevřeny. Při pozorování prostým okem nevidíme všechny symboly dostatečně zřetelné, podle vzdálenosti, ve které se nacházíme. Dáme-li těsně

před oko malý otvor, náš zrak se zřetelně zostří. Jako tuto clonku můžeme použít kousek neprůhledného papíru s propíchnutou dírkou. Velmi pohodově je vytvořit otvor pomocí palce, ukazováčku a prostředníčku vlastní ruky, viz obr. 2b. Tento otvor máme vždy „po ruce“ a navíc můžeme silou stisku prstů spojitě měnit jeho velikost.



Obr. 2: Prosvětlené symboly pro sledování otvorové vady (a), vytvoření malého otvoru pomocí tří prstů (b).

Hloubka ostrosti

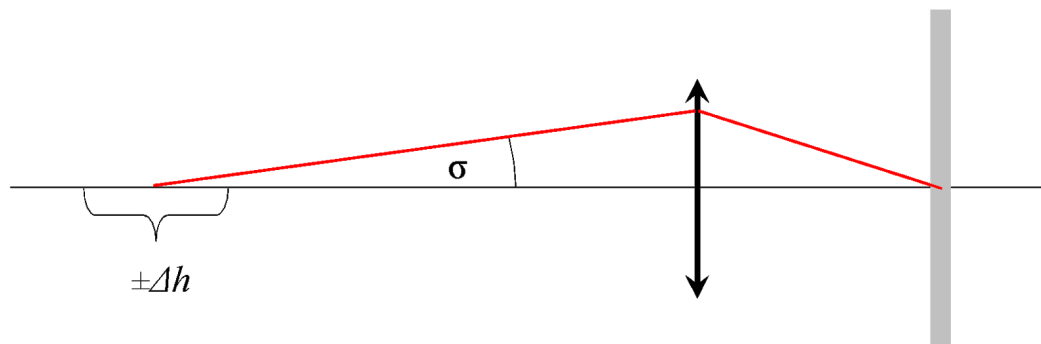
V předchozím pokusu jsme si ukázali, jak zvýšit ostrost vidění zdravého oka správně zaostřeného na danou vzdálenost. Podobně můžeme dosáhnout i korekce očních vad – krátkozrakosti nebo dalekozrakosti. Zúžení vstupní pupily před čočkou nemá za následek pouze potlačení otvorové vady, ale také zvýšení hloubky ostrosti. Hloubkou ostrosti myslíme interval předmětových vzdáleností, ve kterém se nám jeví obraz předmětu stále ostrý. Existence nenulové hloubky ostrosti je dána jednak omezeným rozlišením našeho oka – tj. omezenou schopností oka či jiného zobrazovacího prvku ostrost obrazu posoudit – a jednak ohybem světla na vstupní pupile zobrazovací soustavy, který vznik obrazu nevyhnutelně doprovází. Z vlnové teorie zobrazení vyplývá pro hloubku ostrosti vztah:

$$\Delta h = \pm \frac{\lambda}{2 \sin^2 \sigma},$$

kde λ je vlnová délka a σ úhlová apertura, viz obr. 3. Vidíme, že zmenšení průměru vstupní pupily, tedy zmenšení apertury, vede ke zvětšení hloubky ostrosti. S využitím hloubky ostrosti můžeme dosáhnout ostrého vidění i pro předmět v kratší vzdálenosti, než je blízký bod, a nebo naopak ve větší vzdálenosti než bod daleký.

Nejsnáze se o tom přesvědčíme následujícím pokusem. Vezměme kus papíru s drobným textem a umístíme jej do blízkého bodu. Pak papír přiblížíme asi na polovinu vzdálenosti od oka. V této poloze již naše oko nezaostří a vidíme obraz rozmazaný. Dáme-li před oko malý

otvor, bude obraz opět ostrý. Krátkozrací lidé mohou podobným způsobem dosáhnout i bez brýlí ostrého obrazu z míst za dalekým bodem.

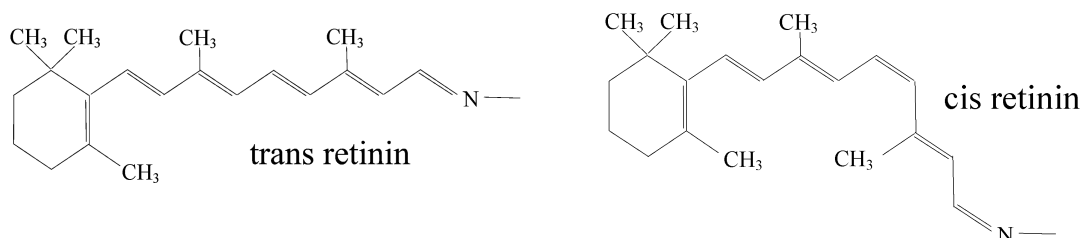


Obr. 3: Hloubka ostrosti jako interval předmětových vzdáleností, ve kterém vidíme obraz na pevně umístěném stínítku ostře.

Využívání malého otvoru ze tří prstů se autorovi tohoto textu stalo každodenní pomůckou při čtení malých písmen na displeji mobilního telefonu, na obalech potravinářských výrobků apod.

Barevné vidění a rekonstrukce rodopsinu

Světlo je v oku detekováno ve světločivných buňkách: tyčinkách a čípcích. Vlastní detekce je realizována absorpcí fotonu molekulou rodopsinu, jejíž část, skupina zvaná retinin, tím změnila izomerii z trans na cis, viz obr. 4. Aby molekula mohla detekovat další foton, musí rodopsin získat zpět původní trans izomerii. Tato rekonstrukce není okamžitá, ale trvá určitou dobu, řádově jednotky až desítky sekund. Můžeme říci, že se oko „unaví“ a musí si po jistou dobu „odpočinout“. Víme, že silným světlem jsme „oslepeni“, to znamená, že po snížení intenzity světla vidíme hůře po dobu, než se naše oko na méně světla adaptuje¹. Tento jev lze velmi názorně demonstrovat s využitím barevného vidění.



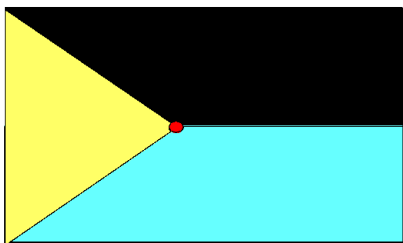
Obr. 4: Změna izomerie části molekuly rodopsinu po absorpci světelného kvanta.

Jak známo barevné vidění zajišťuje trojice druhů čípků s maximem citlivosti v oblastech červeného, zeleného a modrého světla. Reálné barvy jsou pak tvořeny směsí signálů z těchto detektorů. Pokud posvítíme do oka například zeleným světlem, unaví se nejvíce čípkový

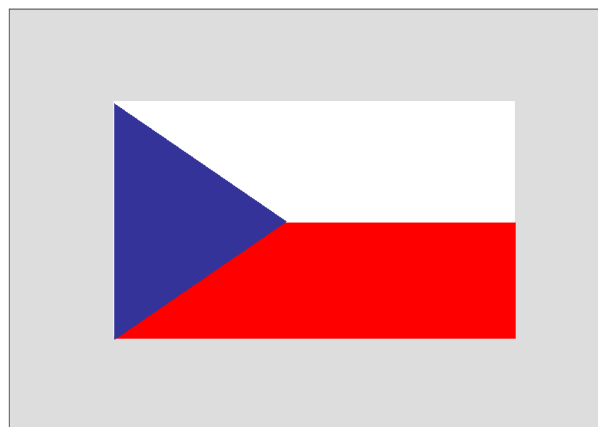
¹ Adaptace oka na změnu intenzity osvětlení probíhá více mechanismy, nejen tím popsaným v textu.

vnímající zelené světlo a následný barevný vjem je touto únavou zkreslen. Pokus můžeme uspořádat následujícím způsobem:

V mírně zatemnělé místnosti promítneme dataprojektorem na plátno obrázek z obr. 5a) a vyzveme studenty, aby bez pohnutí očima sledovali červený bod uprostřed. Vyčkáme asi 20s poté změníme obraz na čistě bílý. Na bílé homogenní ploše nyní studenti uvidí obraz jako na obr. 5b). Vysvětlení je jednoduché. Pokud po jistou dobu nepohnutě sledujeme určitý barevný obraz, unaví se v daném místě sítnice ty čípky, které detekují vlnové délky jež jsou v barvě významně obsažené. Tyrkysová je směsí zelené a modré, pozorování tyrkysové barvy tedy unaví zelené a modré čípky. Po osvětlení sítnice bílým světlem vnímáme barvu červenou, protože červené čípky jsou nejvíce odpočinuté. Podobně žlutá barva unaví červené a zelené čípky a při následném sledování bílé plochy máme vjem barvy modré. Barva bílá unaví čípky všechny, naopak barva černá nechá všechny odpočívat. Proto se nám zdá bílá část státní vlajky bělejší než bílé okolí. Zelená není na vlajce obsažena, ale snadno zjistíme, že její falešný vjem získáme po předchozím sledování fialové barvy.



(a)



(b)

Obr. 5: Skutečný obrázek (a) a následná zraková iluze (b) při demonstraci „únavy“ světločivných buněk.

Pokus může modifikovat do zábavnější formy, kterou můžeme nazvat *Dohoň šneka*. Pozorujme upřeně po 20 s bílý křížek na obr. 6. Při následném pohledu na bílou plochu vidíme šneka, který před naším zrakem stále uhýbá a my se na něj nedokážeme podívat přímo, nemůžeme ho očima dohonit. Falešný obraz je vytvořen na části sítnice mimo žlutou skvrnu a jakákoliv snaha přesunout jej do místa nejostřejšího vidění je marná. S pohybem oka se současně pohybuje i obraz.



Obr. 6: Obrázek pro iluzi „Dohoň šneka“.

Ještě jednou adaptace oka na změnu intenzity

Ještě jednou se vrátíme k únavě světločivných detektorů v oku a obecně k adaptaci oka na nižší intenzitu osvětlení. Adaptace probíhá v každém jednotlivém oku odděleně a toho vyžívá následující experiment, který adaptaci působivě předvede.

V zatemněné, ale silně osvětlené místnosti požádáme studenty, aby si jedno oko zakryli a druhé nechali široce otevřené. Počkáme asi 30s. Potom zhasneme a necháme svítit jen velmi slabý zdroj rozptýleného světla. Pozorujeme-li nyní oběma očima současně, je to oko, které bylo za silného osvětlení otevřené, jakoby slepé. Dobře to uvidíme také tak, že střídavě odkrýváme jedno a druhé oko.