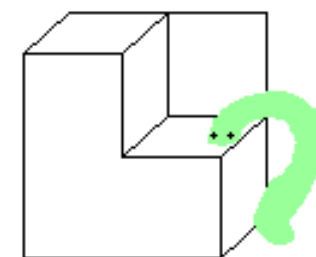
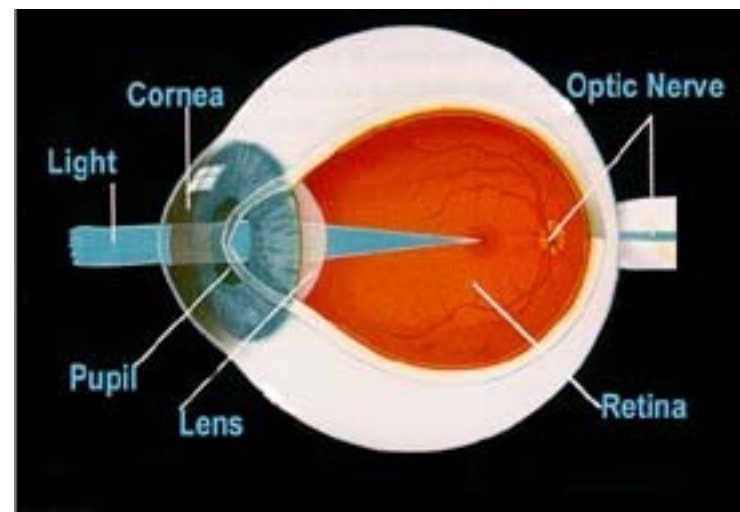


# Přednášky z lékařské biofyziky

Biofyzika vnímání světelných podnětů



# Obsah přednášky

## Základní vlastnosti světla

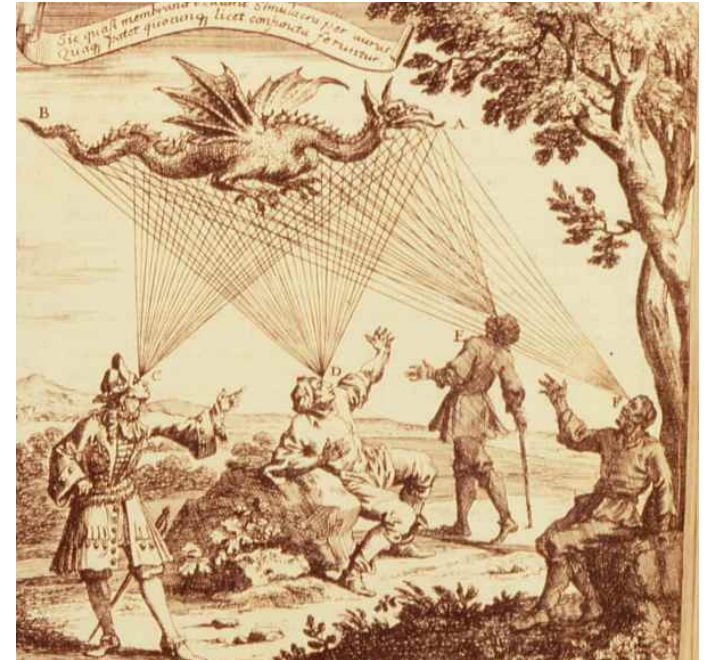
(přehled předpokládaných středoškolských znalostí)

## Anatomie oka

## Optické vlastnosti oka

## Sítnice – biologický detektor světla

## Barevné vidění



# Základní vlastnosti světla (připomenutí)

Viditelné elektromagnetické záření:

$$\lambda = 380 - 760 \text{ nm}$$

Kratší vlnové délky – **Ultrafialové světlo (UV)**

Delší vlnové délky – **Infračervené světlo (IR)**

**Viditelné světlo – (VIS)**

Prostředí, kterým se světlo šíří, se nazývá **optické prostředí**.

V homogenním prostředí se světlo šíří přímočaře, kolmo k vlnoplochám, čáry směru šíření se označují jako **světelné paprsky**.

**Rychlost světla** (ve vakuu, přesně)

$$c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 300\,000\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

# Zdroje viditelného (VIS) světla

**Přirozené**

**Umělé**

**Přirozené: Slunce**

**Slunce** je zdrojem energie pro život a nelze si představit život člověka bez něj.

**Umělé:** žárovky, fluorescenční zdroje, laser...

# Polychromatické a monochromatické světlo, koherence

**Polychromatické či bílé světlo** je světlem o různých vlnových délkách.

**Monochromatické světlo** je světlem o jediné vlnové délce.

Dle svého „fázového“ charakteru může být světlo

- **Koherentní** - Koherentní světlo jsou světelné vlny jsoucí vzájemně „ve fázi“, tj. mají stejnou fázi v téže vzdálenosti od zdroje. Světlo emitované laserem je koherentní.
- **Nekoherentní** - Světelné vlny nejsou vzájemně „ve fázi“. Světlo žárovek nebo Slunce je nekoherentní.

# Odraz a lom světla

**Odraz – zákon odrazu:** Úhel odrazu  $\alpha'$  je roven úhlu dopadu. Odražený paprsek se šíří v rovině dopadu.

**Lom:** Když světlo prochází z jednoho prostředí do druhého, jeho svazek mění směr na rozhraní mezi dvěma prostředími. Tato vlastnost optického prostředí je popsána **indexem lomu**

$$n = c/v \text{ [ bezrozměrová veličina]}$$

$n$  – index lomu prostředí

$c$  – rychlost světla ve vakuu

$v$  – rychlost světla v prostředí

index lomu vakua je 1

# Odraz a lom světla

## Snellův zákon (zákon lomu)

$\alpha$  – úhel dopadu (v prostředí 1)

$\beta$  – úhel lomu (v prostředí 2)

(úhly měříme od kolmice!)

$n_1, n_2$  – indexy lomu

$v_1, v_2$  – rychlosti světla v daných prostředích

$n$  je velký: velká optická hustota)

$n$  je malý: malá optická hustota

$n_1 > n_2$  – dochází k lomu od kolmice

$n_1 < n_2$  – dochází k lomu ke kolmici

# Obecné principy optického zobrazení

**Skutečný obraz** (lze promítnout): sbíhavost paprsků

**Neskutečný obraz** (nelze promítnout): rozbíhavost paprsků

**Optická osa** – osa centrovaného systému optických rozhraní

**Ohnisko** - bod, v němž se reálně nebo virtuálně protínají paprsky dopadající na čočku (zakřivené zrcadlo) rovnoběžně s optickou osou. Rozlišujeme přední (předmětové) ohnisko a zadní (obrazové) ohnisko

**Ohnisková vzdálenost**  $f$  [m] je vzdálenost ohniska od středu čočky nebo zrcadla

**Poloměry křivosti** jsou kladné (záporné), pokud je příslušná čočka nebo povrch zrcadla konvexní (konkávní).

**Optická mohutnost** (síla čočky): převrácená hodnota ohniskové vzdálenosti

$$\phi = D = S = 1/f \quad [\text{m}^{-1} = \text{dpt} = \text{D (dioptrie)}]$$

**Spojné čočky:**  $f$  a  $\phi$  jsou kladné

**Rozptylné čočky:**  $f$  a  $\phi$  jsou záporné



# Rovnice čočky

Paprsky rovnoběžné s optickou osou se lámou do obrazového ohniska (u spojných čoček), nebo tak, že se zdají vycházet z předmětového ohniska (u rozptylky). Směr paprsků procházejících středem tenké čočky se nemění.  
Rovnice čočky:

$a$  – vzdálenost předmětu od středu čočky [m]

$b$  – vzdálenost obrazu od středu čočky [m]

## Znaménková konvence:

$a$  je kladné před čočkou, záporné za čočkou;

$b$  je záporné před čočkou (obraz je neskutečný), kladné za čočkou (obraz je skutečný)

# Rovnice „brusičů čoček“

$f$  – ohnisková vzdálenost [m]

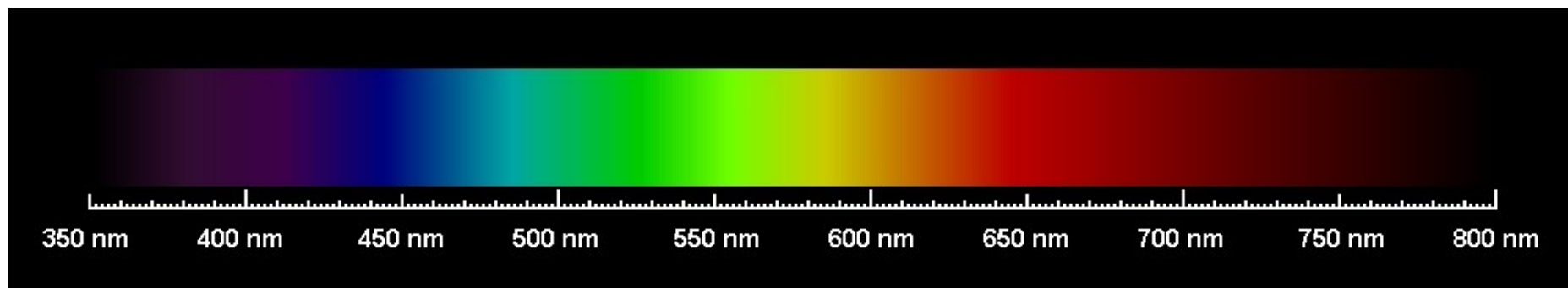
$n_2$  – index lomu čočky

$n_1$  – index lomu okolního prostředí

$r_1, r_2$  – poloměry křivosti čočky

# Viditelné spektrum

Lidské oko je citlivé na světlo od vlnové délky zhruba od 380 nm (fialové) do asi 760 nm (červené). Náš zrakový analyzátor vnímá tento rozsah vlnových délek jako spojitě duhové spektrum. **Nazýváme je viditelné spektrum. Viz obrázek.**

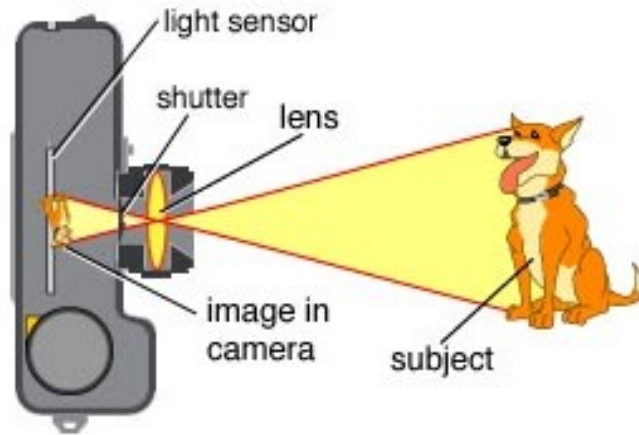


# Anatomie oka

# Jak pracuje lidské oko?

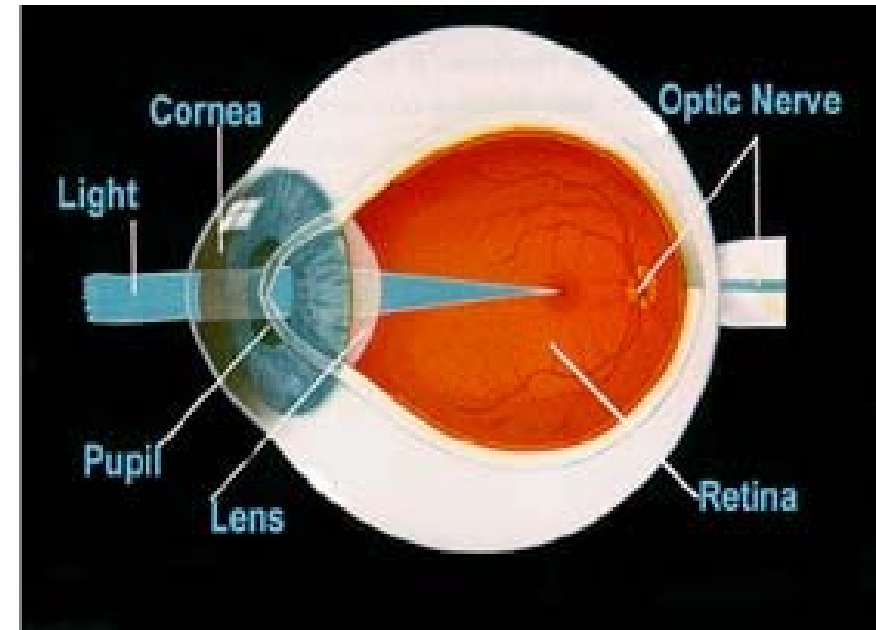
Jednotlivé části oka pracují podobným způsobem jako části (digitálního) fotografického přístroje. Každá část je důležitá pro zřetelné vidění.

shutter =  
závěrka,  
mechanická  
část filmových  
fotografických  
přístrojů



<https://kids.britannica.com/kids/assembly/view/87818>

**Fotografický  
přístroj**



**Lidské oko**

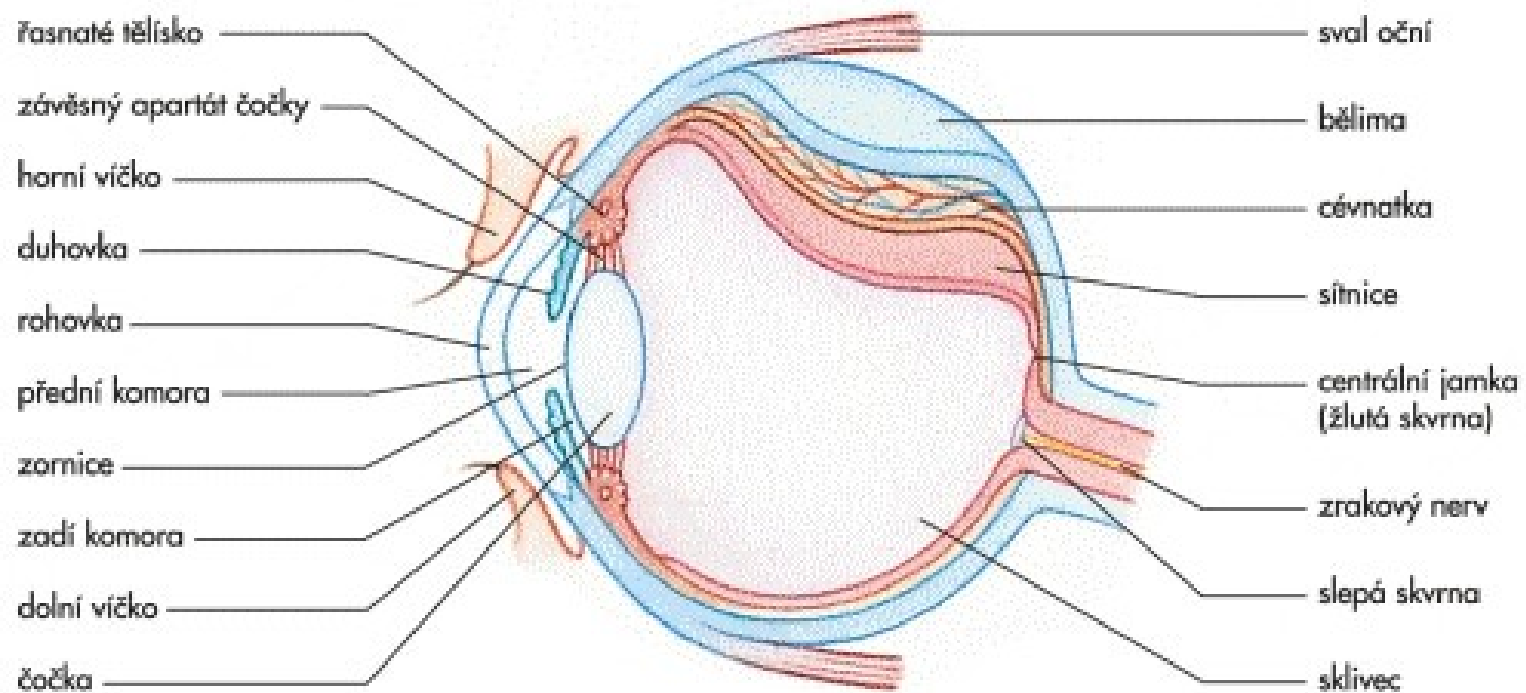
# Zrakový analyzátor má 3 části:

**oko** - z biofyzikálního hlediska nejlépe prozkoumaná část, v níž optickou a fotochemickou cestou vzniká primární obraz vnějšího světa,

**optické dráhy** - systém nervových buněk, tvořících kanál, jímž se informace zachycená a zpracovaná okem dostává do mozku,

**zrakové centrum** - oblast mozkové kůry, v níž si obraz vnějšího světa uvědomujeme

# Anatomie oka



# Anatomie oka

Tuhá nejzevnější vrstva oka se nazývá **bělima** (*sclera*), udržuje tvar oka.

Přední asi šestina této vrstvy se nazývá **rohovka** (*cornea*). Veškeré světlo musí při vstupu do oka nejdříve projít přes rohovku. K bělimě je připojeno 6 **okohybných svalů**.

**Cévnatka** (*chorioidea*, hlavní část živnatky - *uvey*) je druhou vrstvou oka. Obsahuje cévy, které zásobují krví struktury oka.

Přední část cévnatky přechází do dvou struktur:

■ **Řasnaté těleso** (*corpus ciliare*) – obsahuje svaly a je spojeno s čočkou. Kontrakce a relaxace těchto svalů způsobují změny zakřivení čočky při zaostřování (akomodaci).



# Anatomie oka

- **Duhovka** (*iris*) – barevná část oka. Barva duhovky je dána barvou vazivové tkáně a pigmentovými buňkami. Méně pigmentu způsobuje, že oči jsou modré, více pigmentu způsobuje hnědé zbarvení. Duhovka je přizpůsobivá blána s otvorem uprostřed, nazývajícím se **zornice** (*pupilla*).
- Uvnitř oka se nacházejí dva kapalinou vyplněné oddíly oddělené čočkou. Větší zadní oddíl obsahuje čirou gelovitou látku zvanou **sklivec** (*corpus vitreum*).
- Menší přední oddíl obsahuje čirou vodnatou tekutinu zvanou **komorová voda** (*humor aquosus*).
- Tato část oka je rozdělena na dva oddíly zvané přední a zadní komora (před duhovkou a za duhovkou). Komorová voda je produkována řasnatým tělesem.

# Anatomie oka

Duhovka má dva svaly:

*M. dilator pupillae* zmenšuje duhovku a tím zvětšuje zornici a množství světla vstupujícího do oka;

*M. sphincter pupillae* duhovku zvětšuje a zmenšuje zornici stejně jako množství světla vstupujícího do oka.

**Průměr zornice se mění od 2 do 8 mm.**

To znamená, že množství světla vstupujícího do oka se může změnit nejméně 16-násobně.

# Anatomie oka

Průhledná **čočka** (*lens crystallina*) je umístěna těsně za duhovkou. Je to čirá dvojbypuklá struktura s průměrem přibližně 10 mm. Je udržována v oploštěném stavu tahem vláken závěsného aparátu. Čočka může měnit svůj tvar, protože je připojena ke svalům řasnatého tělesa, které působí *proti tahu* závěsných vláken.

Jestliže jsou ciliární svaly

**relaxované, zakřivení čočky se zmenšuje**, dochází k oploštění čočky;

**kontrahované, zakřivení čočky se zvětšuje**, čočka je vypuklejší (což je její přirozený stav).

Tyto změny umožňují oku přizpůsobit optický systém oka pro pozorování vzdálených i blízkých předmětů.

Čočka je složena ze 4 vrstev, ve směru od povrchu ke středu to jsou: kapsula, subkapsulární epitel, kůra a jádro.

# Nitrooční tlak

(důsledek dynamické rovnováhy mezi tvorbou a odtokem komorové vody)

Fyziologická hodnota (individuálně variabilní):

**2,66 kPa (20 mmHg)**

Odchyvky větší než cca 10 % jsou známkou vážnější oční poruchy, např. hrozícího zeleného zákalu (glaukomu).

# Optické vlastnosti oka

# Model *Gullstrandův*

*(Alvar Gullstrand 1852 - 1930, švédský oftalmolog, NC za medicínu v r. 1911)*

Vychází z představy oka jako centrované optické soustavy se schopností automatického zaostřování, nebere však ohled na určité rozdíly v zakřivení přední a zadní plochy rohovky ani na rozdíly v indexu lomu jádra a okraje čočky.

# Základní parametry Gullstrandova modelu oka

## Indexy lomu:

rohovka.....	1,376
komorová voda.....	1,336
čočka .....	1,413
sklivec.....	1,336

## Optické mohutnosti:

rohovka .....	42,7 D
čočka uvnitř oka .....	21,7 D
oko jako celek .....	60,5 D

## Poloměr křivosti:

rohovka .....	7,8 mm
přední plocha čočky .....	10,0 mm
zadní plocha čočky .....	-6,0 mm

## Poloha ohnisek

(měří se od vrcholu rohovky):

ohnisko předmětové .....	-14,99 mm
ohnisko obrazové .....	23,90 mm
poloha sítnice .....	23,90 mm



**Allvar Gullstrand**

1852 – 1930

# Akomodace

Schopnost oční čočky měnit svoji optickou mohutnost v závislosti na vzdálenosti pozorovaného objektu. Děje se tak především **zvětšením** zakřivení přední plochy čočky.

*J. E Purkyně*

**Bod daleký** - *punctum remotum* (R)

**Bod blízký** - *punctum proximum* (P)



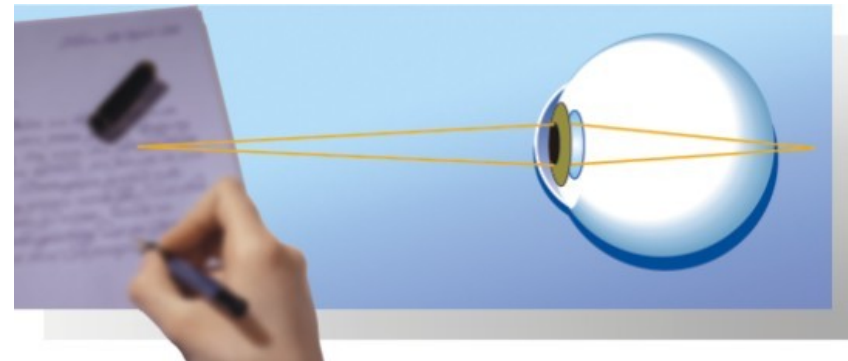
# Akomodační šíře, presbyopie

Rozdíl *reciprokých hodnot vzdáleností* obou bodů od oka, vyjádřený v dioptriích (rozdíl tzv. vergencí těchto bodů), se označuje jako akomodační šíře.

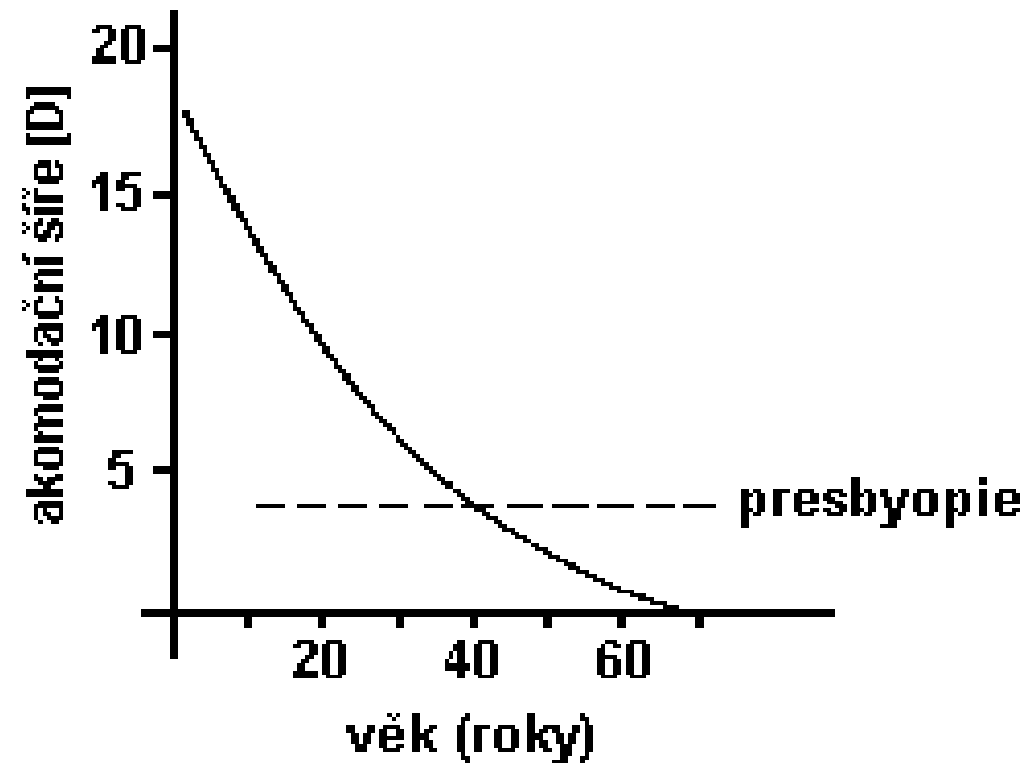
U emetropického oka je vergence vzdáleného bodu nulová ( $1/\infty = 0$ ), akomodační šíře je dána vergencí blízkého bodu.

**Presbyopie** (starozrakost, vetchozrakost, stařecká dalekozrakost)

Jedinec již není schopen vidět ostře předměty v konvenční vzdálenosti 0,25 m nebo bližší. Je způsobena zmenšením pružnosti čočky a ochabováním ciliárních svalů po překročení 40 let.



# Úbytek akomodační schopnosti s věkem



# **Sítnice – biologický detektor světla**

# Sítnice – biologický detektor světla

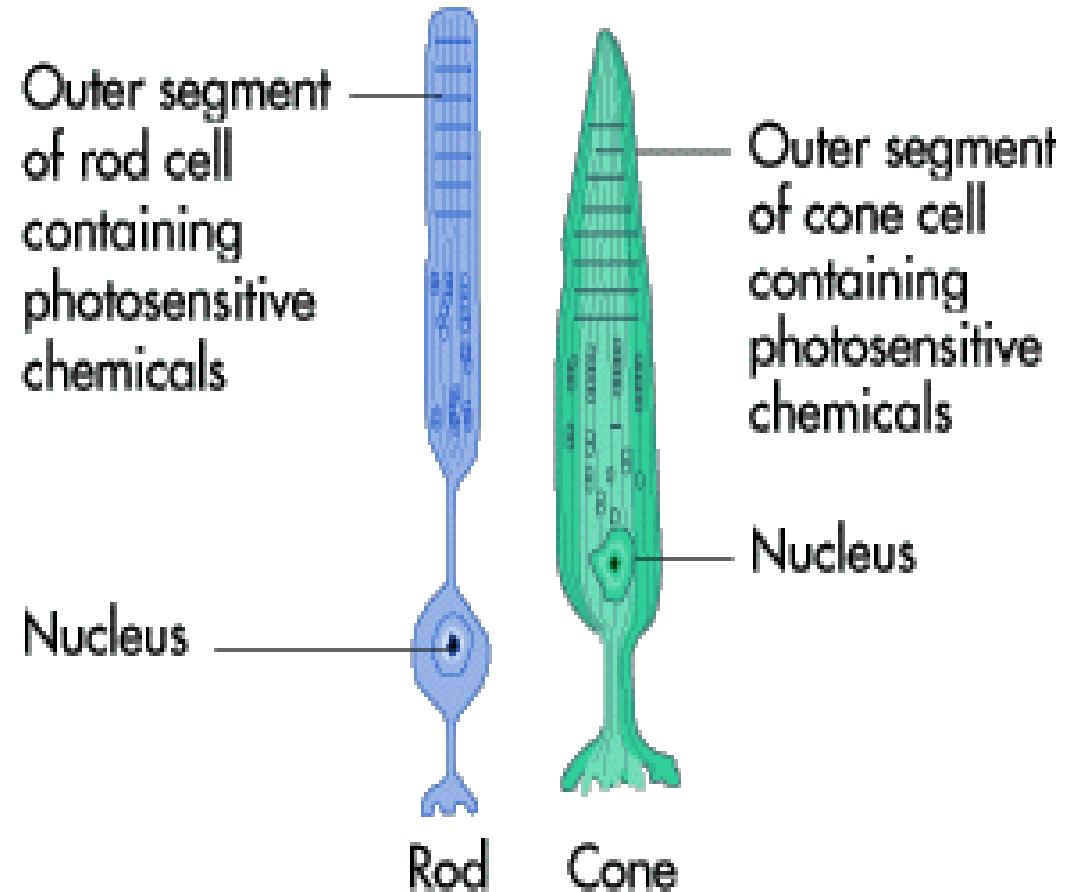
**Sítnice** – část oka citlivá na světlo. Obsahuje **tyčinky** odpovědné za vidění při slabém osvětlení a **čípky** zodpovědné za vidění barev a detailů. Jakmile na tyto dva typy buněk dopadne světlo, dojde k sérii složitých biochemických reakcí.

Vnější segment tyčinek je dlouhý a tenký, zatímco vnější segmenty čípků mají spíše kuželovitý tvar.

V centrální části sítnice se nachází **macula lutea (žlutá skvrna)**. Uprostřed makuly se nachází oblast zvaná **fovea centralis**. Zde se nacházejí pouze čípky a jejich vysoká hustota umožňuje rozlišování detailů.

# Tyčinky a čípky

Vnější segment tyčinky nebo čípku obsahuje fotosenzitivní látky. V tyčinkách je touto látkou **rodopsin**. Světlem aktivovaný rodopsin začne vytvářet elektrické impulsy, které jsou dále vedeny optickým nervem. Analogické látky v čípcích jsou označovány jako **barevné pigmenty** nebo **jodopsin**. **Sítnice obsahuje asi 100 milionů tyčinek, které rozlišují intenzitu světla, a asi 7 milionů čípků, které umožňují barevné vidění.**



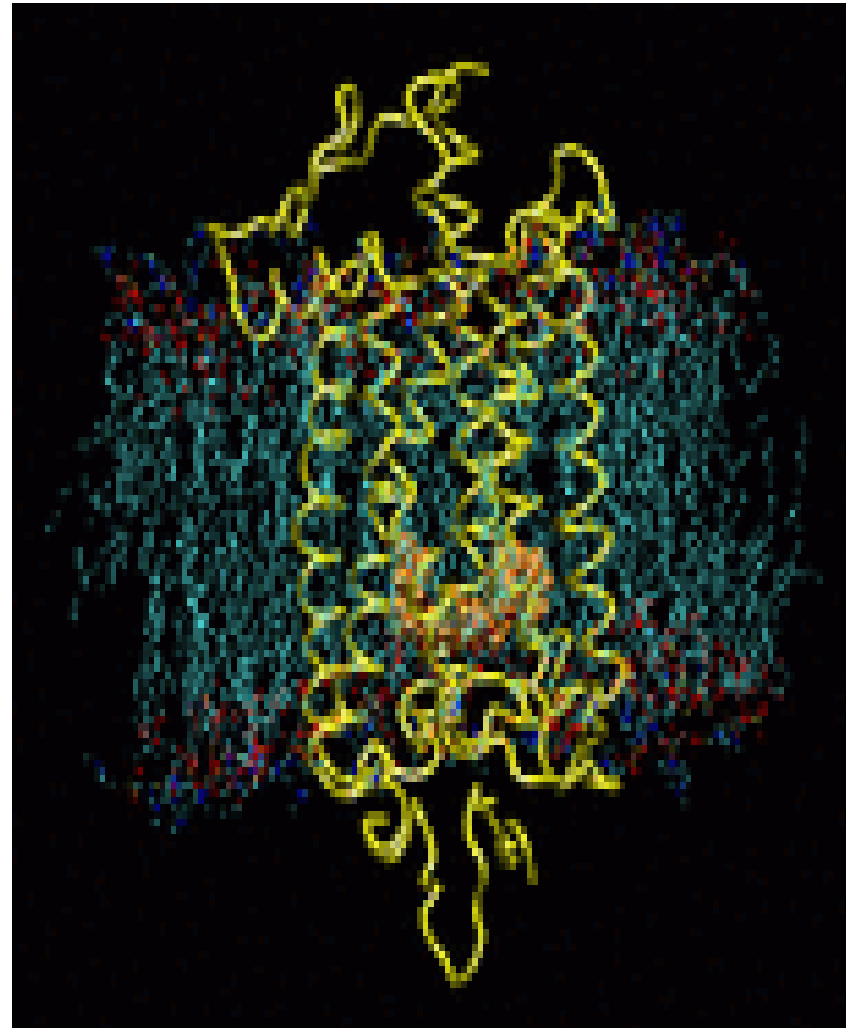
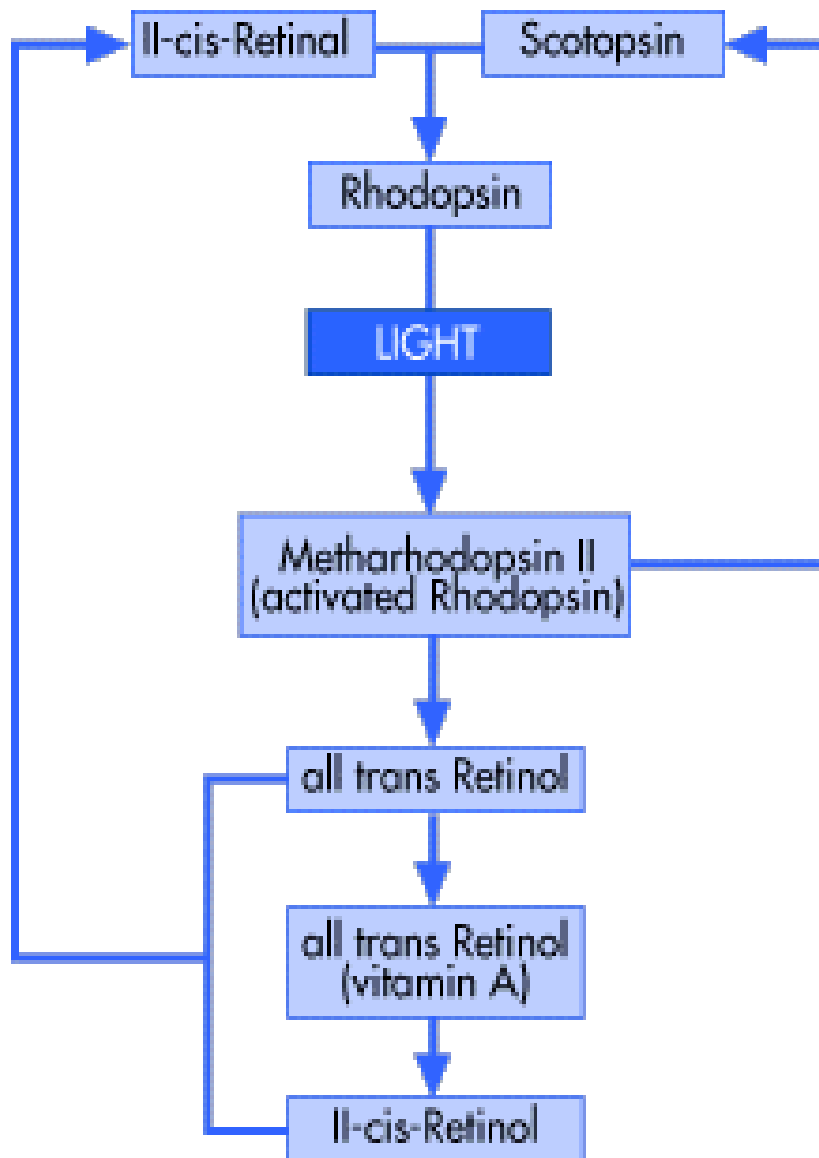
# Rodopsin

Jakmile světlo dopadne na fotosensitivní molekulu **rodopsinu**, nastane fotochemická reakce. Rodopsin je komplex tvořený bílkovinou zvanou **scot(opsin)** a **11-cis-retinalem**, jehož prekursorem je **vitamin A** ( $\Rightarrow$  nedostatek vitamínu A způsobuje problémy s viděním).

Jestliže je rodopsin vystaven světlu, dochází k jeho rozpadu, a to v důsledku změny 11-cis-retinalu na **all-trans-retinal**. K této reakci dojde během několika *triliontin* sekundy ( $10^{-18}$ ). 11-cis-retinal je „zprohýbaný“, zatímco all-trans-retinal má přímou molekulu, což jej činí chemicky nestabilním.

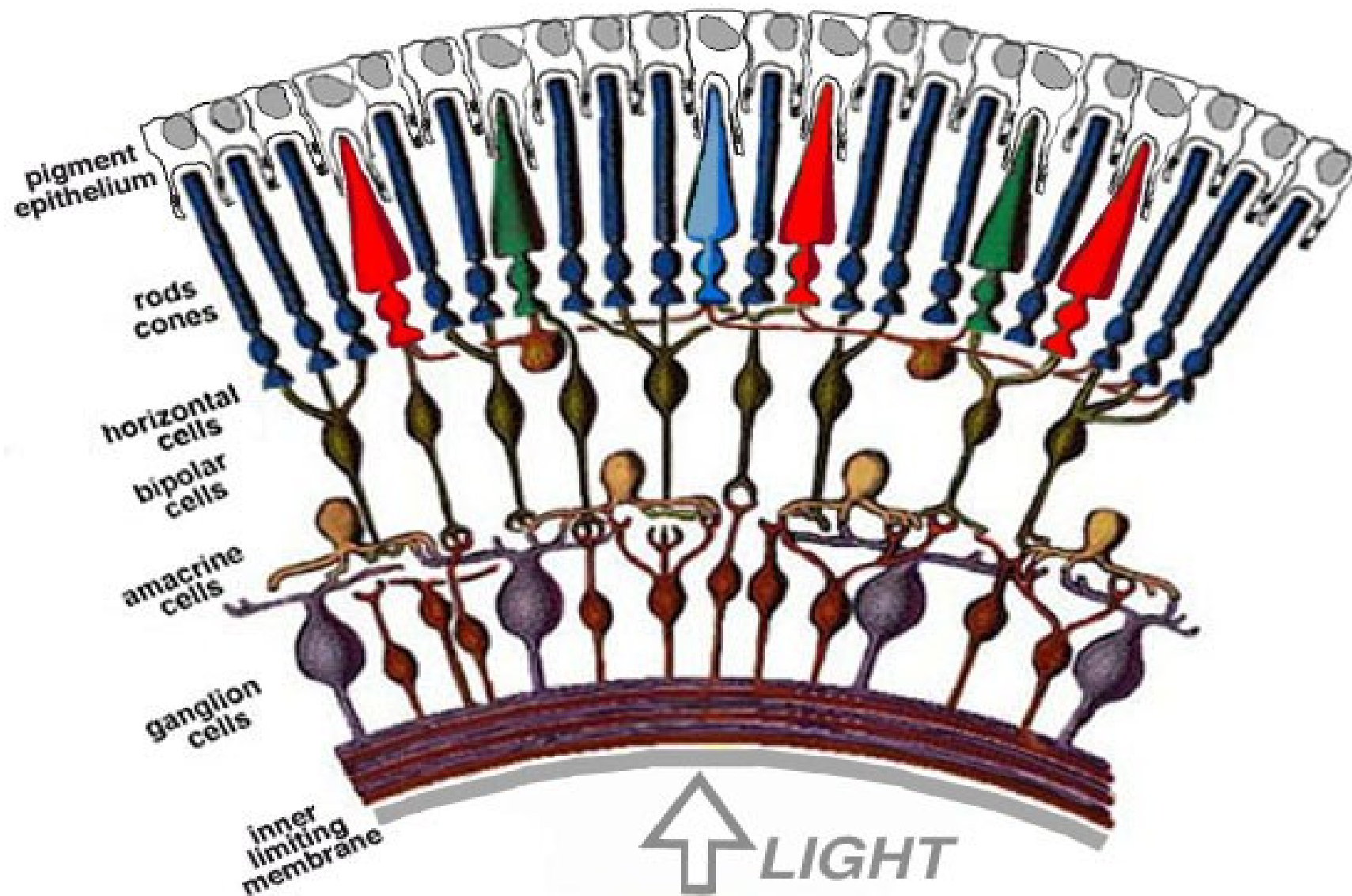
Za vznik elektrického podráždění odpovídá **metarhodopsin II** (aktivovaný rodopsin). Následuje schéma celého procesu včetně obnovy rodopsinu.

# Biochemie rodopsinu



Představa uspořádání rodopsinu jako transmembránové bílkoviny.

# Struktura sítnice

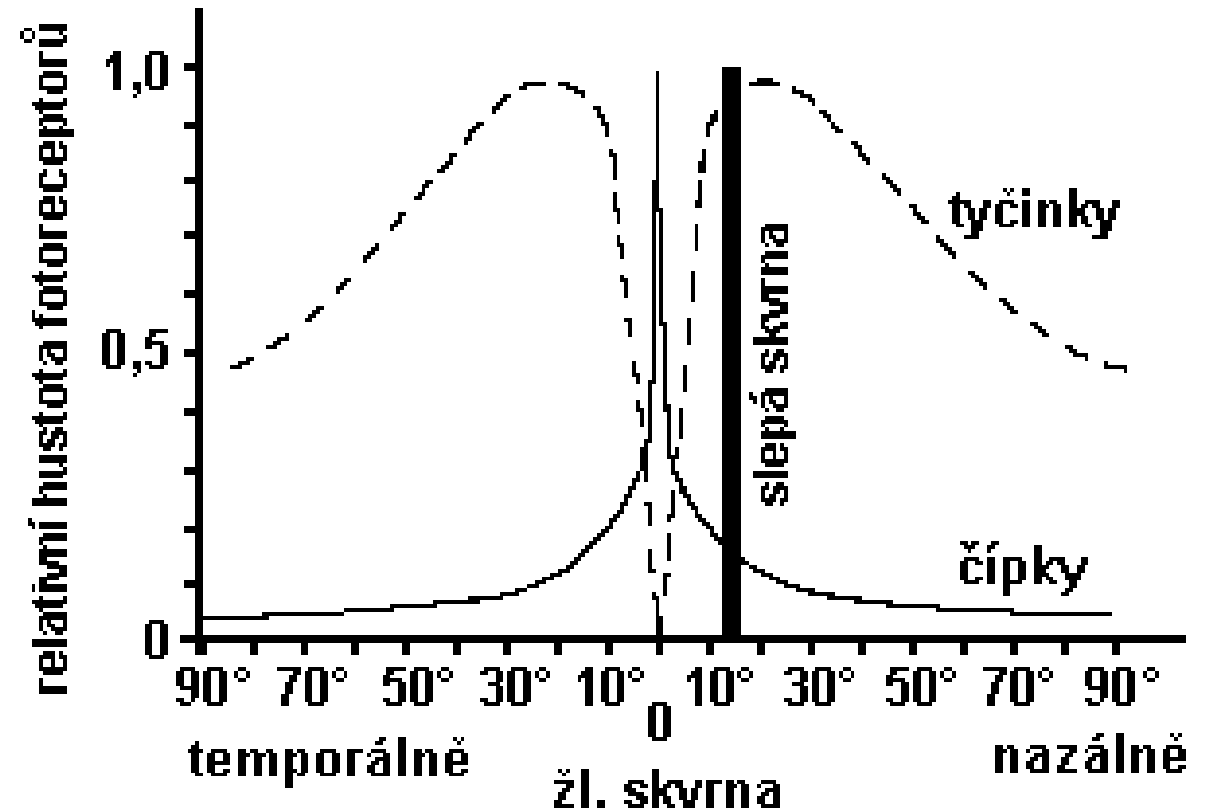




# Slepá a žlutá skvrna

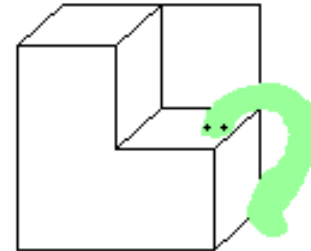
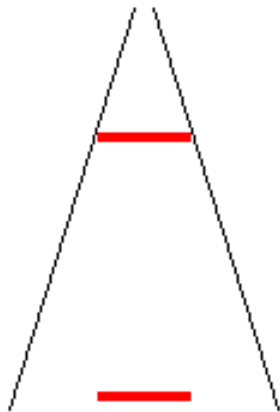
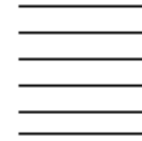
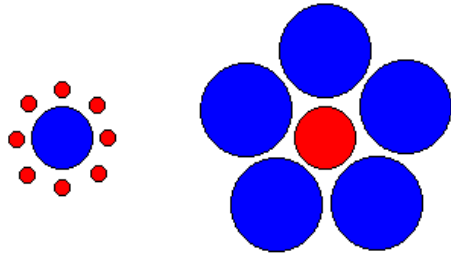
Od žluté skvrny k periférii čípků ubývá. Maximální hustota tyčinek je v kruhu asi 20° od žluté skvrny (úhel je měřen od zadního vrcholu čočky).

Nervová vlákna vedoucí podráždění z fotoreceptorů se sbíhají nazálně od žluté skvrny, kde tvoří papilu zrakového nervu. Toto místo neobsahuje žádné fotoreceptory a nazývá se **slepá skvrna**.



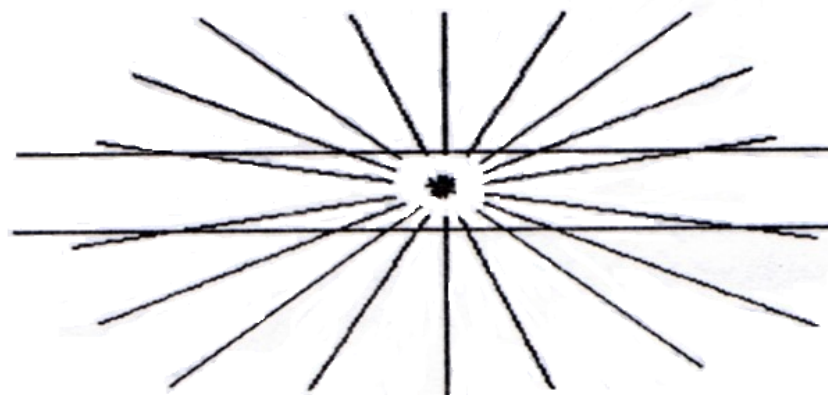
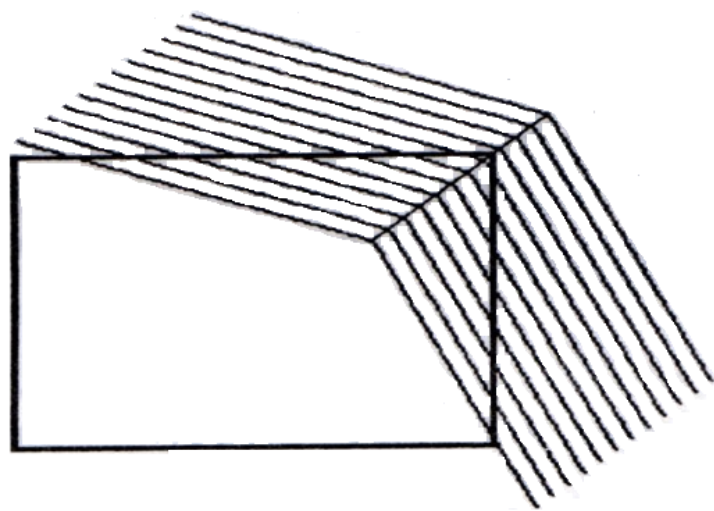
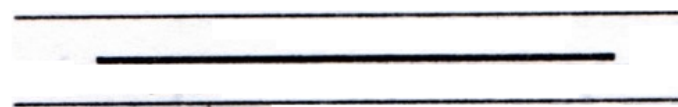
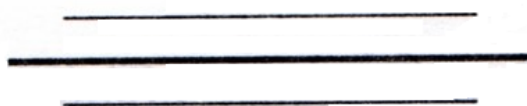
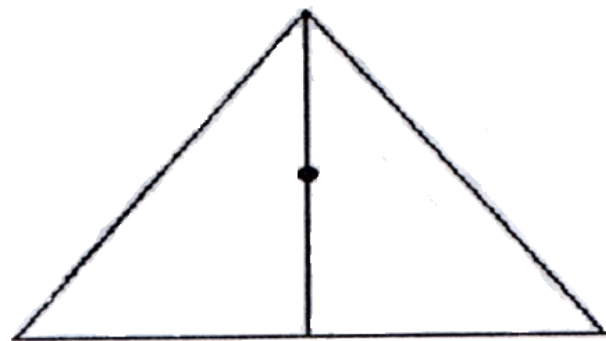
# Zrakové klamy

ukazují na úlohu zrakové části mozkové kůry při zpracování zrakové informace



# Zrakové klamy

pokračování



# Elektrické projevy sítnice

Elektrická aktivita sítnice je v úzkém vztahu k fotochemickým reakcím, probíhajícím ve fotoreceptorech při dopadu světla.

Rozlišujeme:

**raný receptorový potenciál**

**pozdní receptorový potenciál**

**Elektroretinografie (ERG)**, snímání pomocí unipolárních svodů, amplituda signálu je 100 - 400  $\mu\text{V}$ .

Podrobnější popis ERG je v jiných přednáškách

# Barevné vidění

# Barevné vidění

Barvy dělíme na:

**základní** a

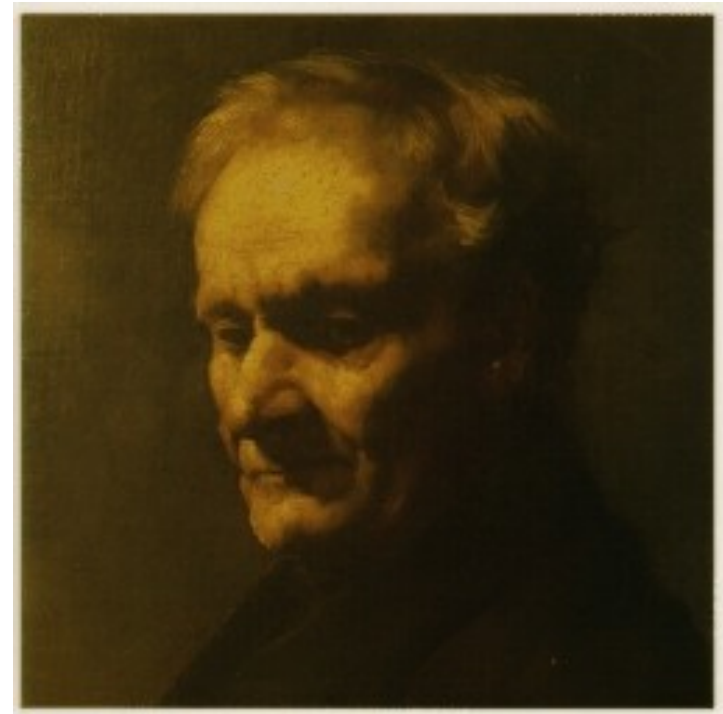
**doplňkové**, tj takové, které vzájemným smísením dají počitek neutrální šedé a bílé barvy.

Každá vnímaná barva je charakterizována barevným tónem, světlostí a sytostí.

**barevný tón** je určen vlnovou délkou světla,

**světlost** intenzitou (jasem) světla.

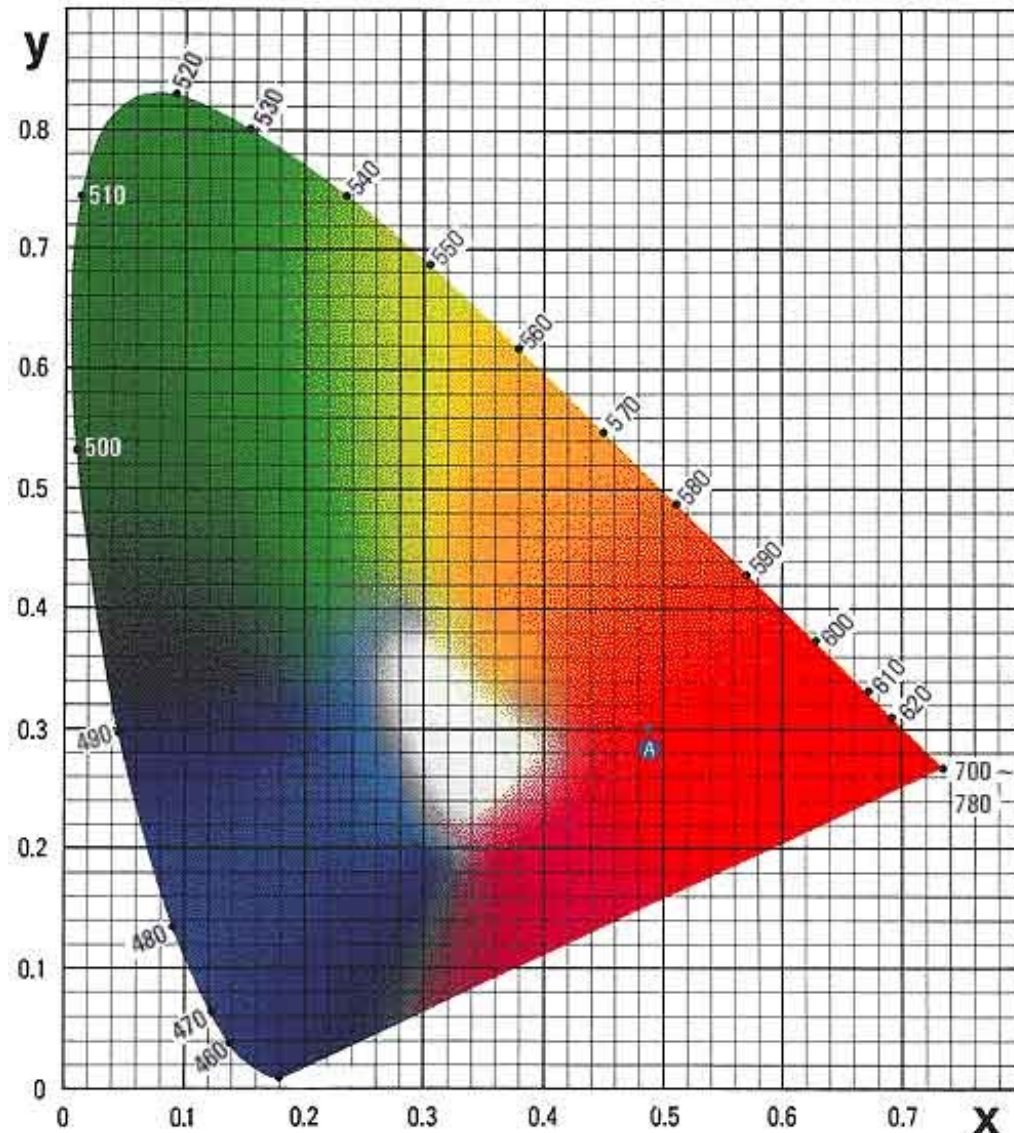
**sytost** barevností počitku.



*J. E. Purkyně (1787 – 1869)*

změna poměrné světelnosti barev při adaptaci oka na tmu – PURKYŇŮV JEV

# Barevný trojúhelník CIE



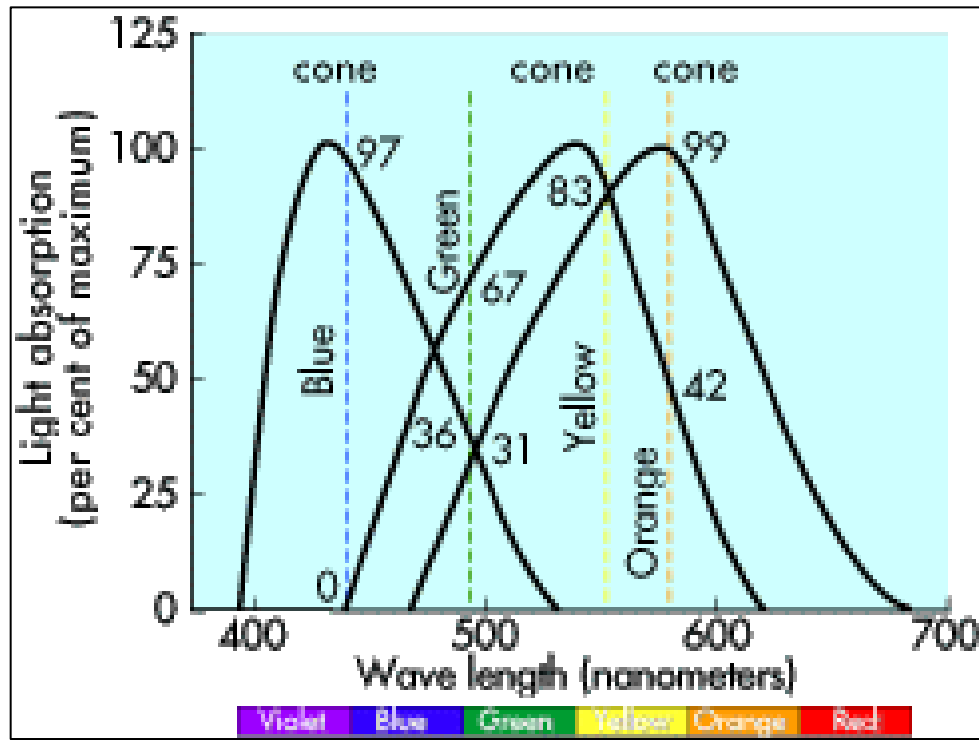
**x – červená b.  
650 nm,**

**y – zelená b.  
530 nm**

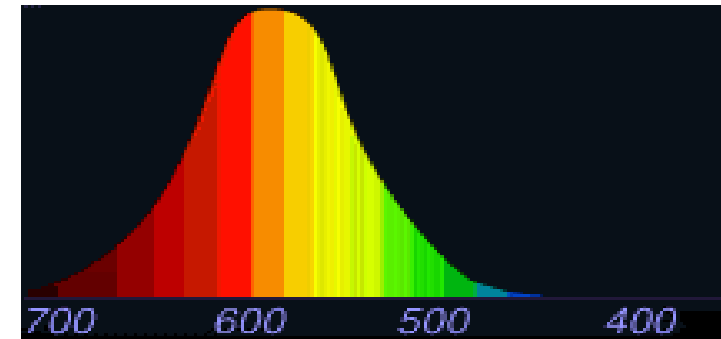
**z – modrá b.  
460 nm**

**$x + y + z = 1$**

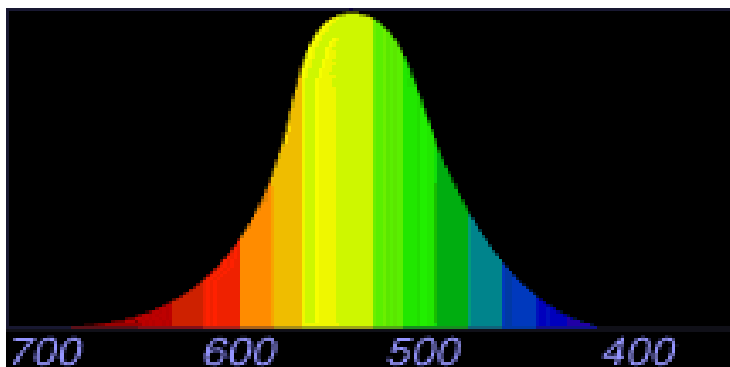
# Barevné vidění – spektrální citlivost



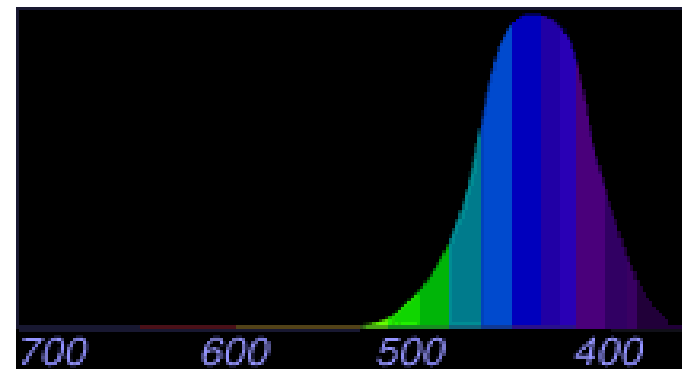
Čípky citlivé na červenou barvu



Čípky citlivé na zelenou barvu

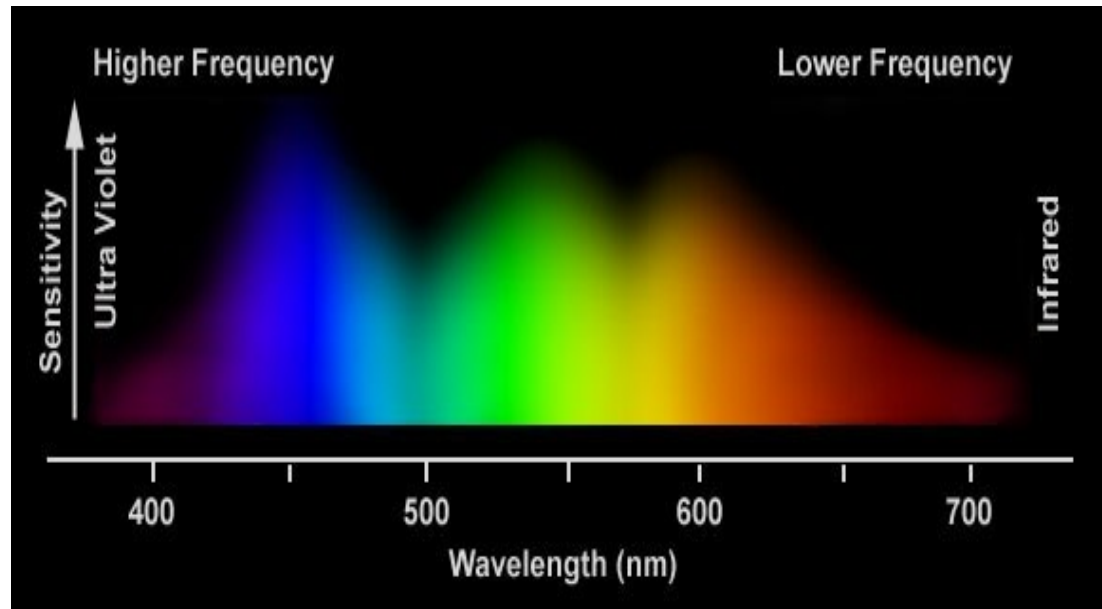


Čípky citlivé na modrou barvu

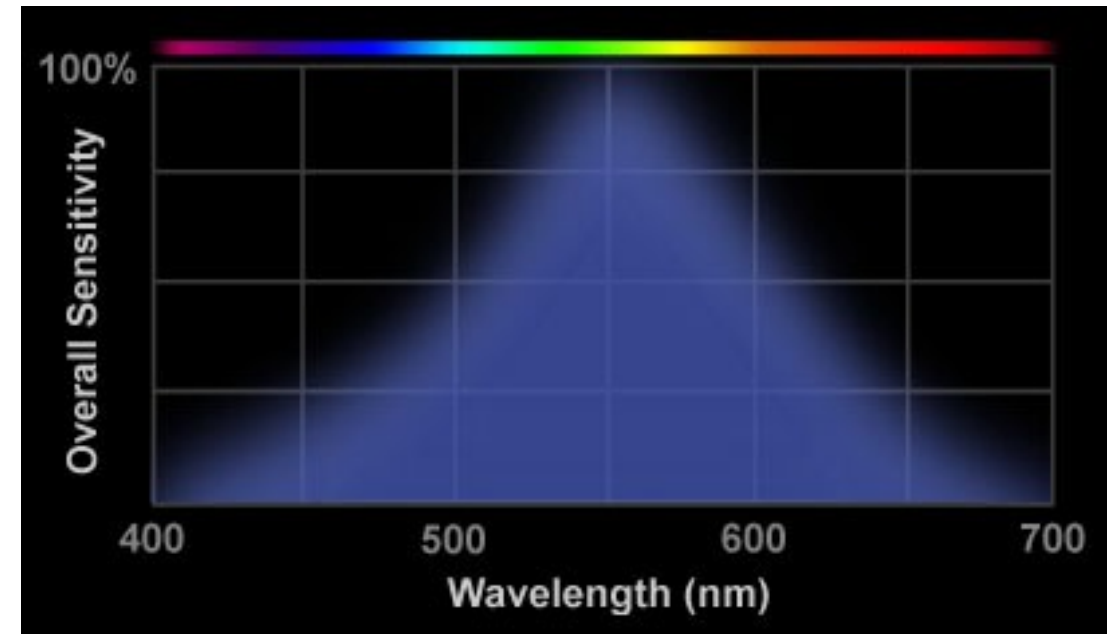




# Citlivost oka na vlnovou délku



Čípky „sumárně“



# Barvocit

## Schopnost správného vnímání barev lidským okem.

Mechanismus vnímání barev není sice ještě jednoznačně rozřešen, všeobecně je však přijímána tzv. **trichromatická teorie**, spojená se jmény Helmholtze, Lomonosova a Younga.

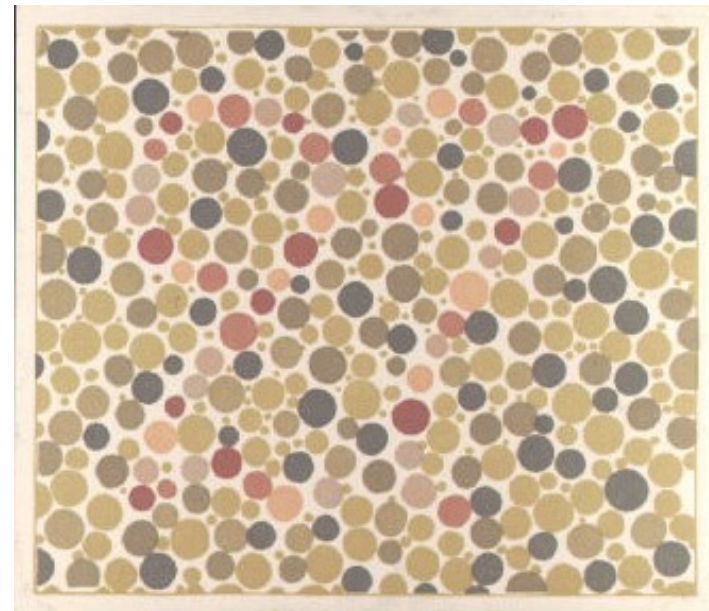
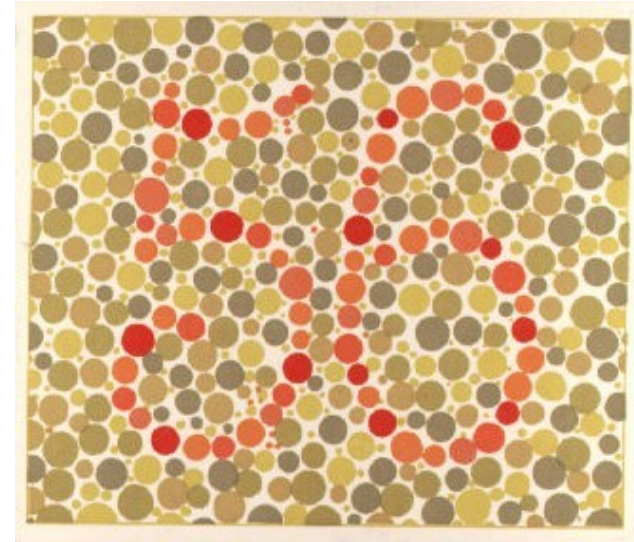
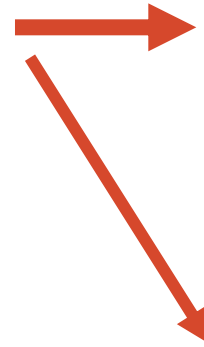
Jednotliví autoři se liší jen v charakteristice tří základních barev. *Helmholtz* za ně považoval červenou, zelenou a fialovou, *Lomonosov a Young* červenou, žlutou a modrou.

- **Monochromáti** - vnější svět vnímají pouze v odstínech šedi
- **Dichromáti** – částečná ztráta barvocitu, v sítnici chybí mechanismus pro vnímání jedné ze základních tří barev
- **Trichromáti** – jedinci s normálním barvocitem

# Vyšetřování barvocitu

**Pseudoizochromatické tabulky** různých autorů (Stillingovy, Velhagenovy, Ischiharovy, Rabkinovy). Číslice nebo písmena jsou sestavena z okrouhlých barevných políček v záměnné barvě. Dichromát daného typu písmeno či číslici nerozezná.

**Vyšetření anomaloskopické.** Nagelův anomaloskop je modifikovaný spektrální fotometr, pomocí něhož se barvocit určuje ze vztahu vyšetřovaného k vidění červené a zelené barvy.



# Meze lidského zraku

**zraková ostrost** - testuje se pomocí Snellenových optotypů (viz praktika a navazující přednáška) - dána úhlem jedné obloukové minuty

**limit citlivosti** fotoreceptoru: 2-3 fotony během několika milisekund

**kritická frekvence splývání** světelných impulsů:  
5 - 60 Hz v závislosti na jasu

**omezení vlnovými délkami** světla: 380 - 760 nm

**mez stereoskopického vidění:** úhel stereoskopické paralaxy menší než dvacet úhlových vteřin

**Autoři**

**Vojtěch Mornstein, Lenka Forýtková**

**Obsahová spolupráce:**

**Ivo Hrazdira, Carmel J. Caruana**

**Poslední revize: září 2024**