

# Přednášky z lékařské biofyziky

Masarykova universita v Brně



**Biofyzika příjmu a zpracování informací**  
Biofyzika vnímání světelných podnětů

## **Předpokládané znalosti z optiky:**

- charakteristika viditelného světla, pojem světelného paprsku, rychlost světla, zákony odrazu a lomu světla (Snellův zákon)
- index lomu  $n = c/v$ , principy optického zobrazení, vztah mezi optickou mohutností čočky, jejími poloměry křivosti a indexy lomu prostředí i čočky
- znaménková konvence, zobrazovací rovnice čočky
- optická mohutnost, definice dioptrie, optická mohutnost složeného optického systému
- geometrie zobrazení spojnou a rozptylnou čočkou, vady čoček (barevná a sférická)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$

$$\Phi = D = S = \frac{1}{f} [m^{-1} = dpt = D]$$

# Fyzikální charakteristika viditelného světla:

**Viditelné světlo** – oblast elektromagnetického spektra vnímaná lidským okem, ohraničená vln. délkami 380 – 780 nm (záření ultrafialové, viditelné, infračervené)



- Zdroje viditelného světla: přirozené x umělé
- Podle spektrálního zastoupení: polychromatické x monochromatické
- Podle fázového charakteru: nekoherentní x koherentní

# Vidění

je příjem a zpracování informace o vnějším světě, zprostředkovaný fotony viditelného světla. Je to složitý fyzikální, fyziologický a psychologický proces, uskutečňovaný zrakovým analyzátozem.



# Proces vidění ovlivňuje řada činitelů:

## ■ Faktory působící na úrovni vnímaného subjektu:

stav tyčinek, čípků, zrak. dráhy, stav sítnice jako celku, stav optického systému oka

## ■ Faktory působící na úrovni pozorovaného objektu:

jeho velikost, vzdálenost od pozorovatele, osvětlení, kontrast proti pozadí, doba pozorování atd.

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

# Anatomie oka

Oko - kulatý orgán o průměru 24 mm, kostěný obal, 6 okohybných svalů.

## **Stěna oční koule:**

vnější - bělima (*sclera*), rohovka (*cornea*)

střední - živnatka (*tunica vasculosa bulbi*):

cévnatka (*chorioidea*), duhovka (*iris*),

řasnaté těleso (*corpus ciliare*), čočka (*lens*

*crystallina*), sklivec (*corpus vitreum*)

vnitřní – sítnice (*retina*)

# Anatomie oka



## Světlolomná prostředí

Rohovka

Přední komora  
naplněná  
komorovou vodou

Čočka

Sklivec



# **Model *Gullstrandův***

*(Alvar Gullstrand 1852 - 1930, švédský oftalmolog,  
Nobelova cena 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

# Nitrooční tlak

(dynamická rovnováha mezi tvorbou a odtokem komorové vody)

2,66 kPa (20 mmHg)  $\pm$  0,3 kPa

Odchyvky větší než 0,3 kPa jsou známkou vážnější oční poruchy.

# Akomodace

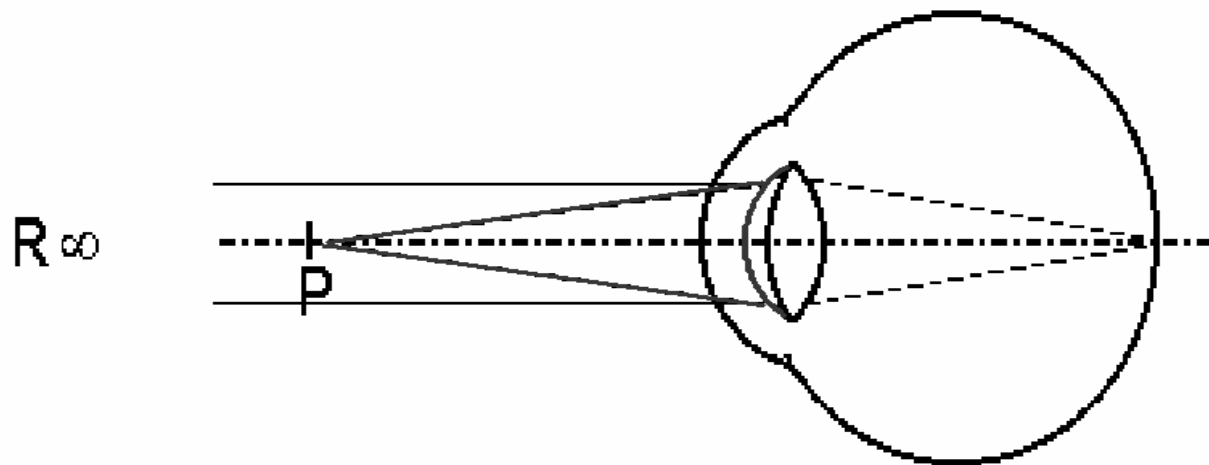
Schopnost oční čočky měnit svoji optickou mohutnost v závislosti na vzdálenosti pozorovaného objektu.

( **zvětšením** zakřivení přední plochy čočky )

*J. E Purkyně*

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

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



# Akomodační šíře

Rozdíl reciprokových hodnot vzdáleností obou bodů od oka, vyjádřený v dioptriích (rozdíl tzv. vergencí těchto bodů)

U emetropického oka je vergence vzdáleného bodu nulová, akomodační šíře je dána vergencí blízkého bodu.

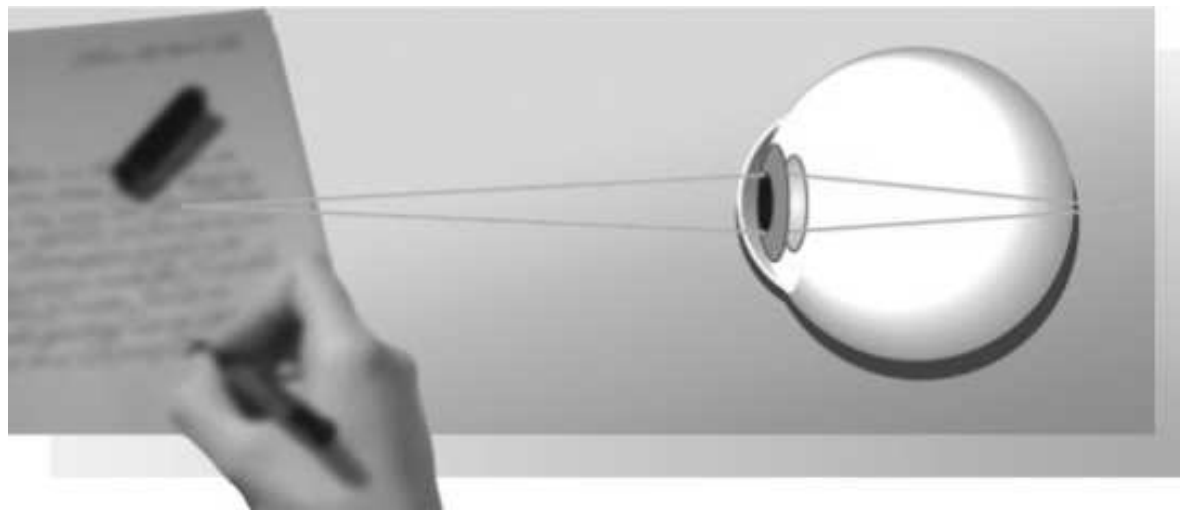
**Presbyopie** (starozrakost, vetchozrakost)

(jedinec již není schopen vidět ostře předměty v konvenční vzdálenosti 0,25 m)

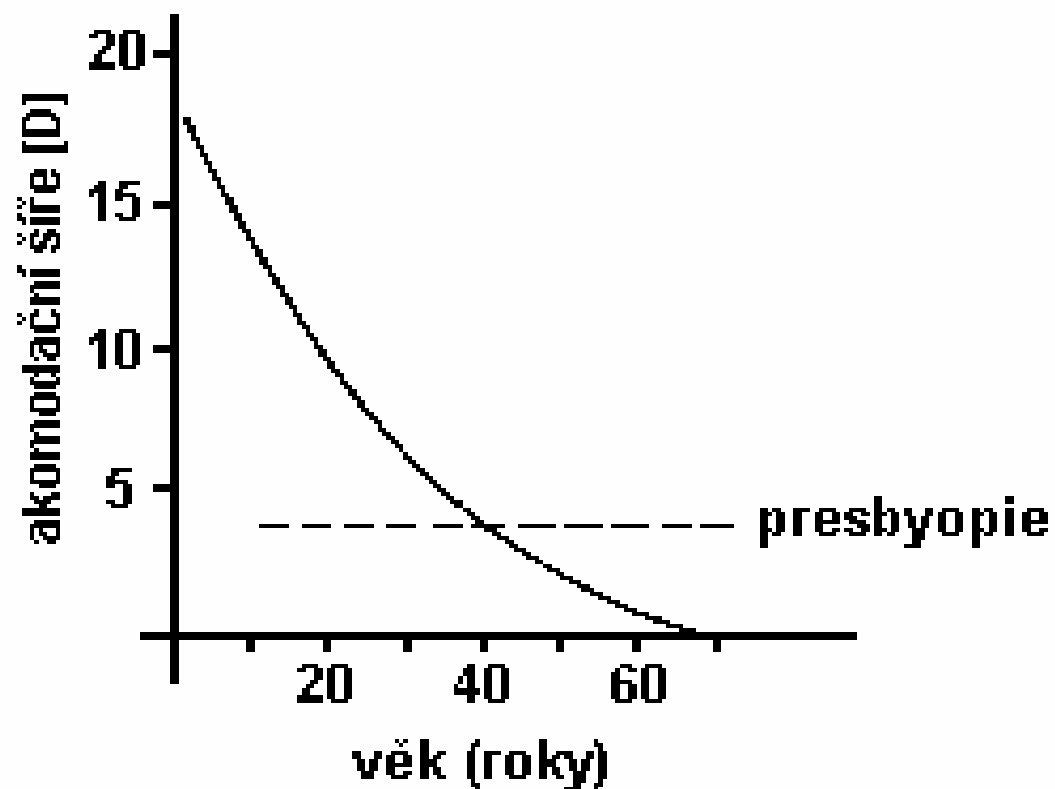
# Presbyopie

Nedostatek akomodační schopnosti musí být kompenzován spojnými čočkami, které posouvají blízký bod do konvenční vzdálenosti.

Tím se i daleký bod posune z nekonečna blíže k oku, takže presbyop s korekčními brýlemi nevidí ostře do dálky.



# Úbytek akomodační schopnosti s věkem



# Poruchy optického systému oka

Neleží-li obrazové ohnisko na sítnici nebo nezobrazuje-li optický systém oka bodově, je oko **ametropické**.

Ametropie (refrakční vady oka) lze rozdělit do dvou hlavních skupin, na ***ametropie sférické a asférické***.

Normálně vidící oko zobrazuje bodově a jeho obrazové ohnisko leží na sítnici. Takové oko se nazývá **emetropickým**.



# Ametropie sférické

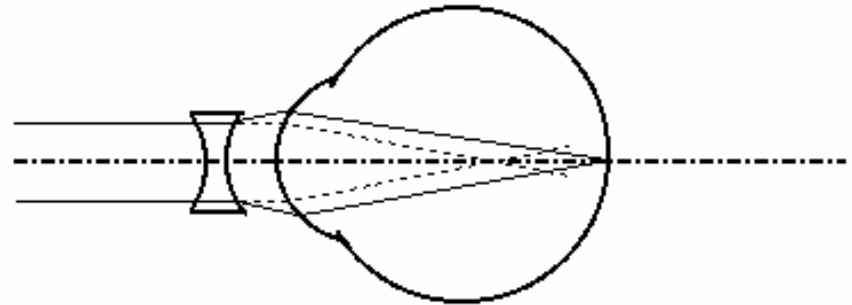
U sférických ametropií je zachováno bodové zobrazení, obrazové ohnisko však leží buď před sítnicí - **krátkozrakost** (myopie), nebo za sítnicí - **dalekozrakost** (hyperopie nebo hypermetropie).

Příčinou těchto ametropií může být buď odlišná délka oka - **ametropie osová (axiální)**, nebo jiné poloměry křivosti lámavých ploch či jejich změněné indexy lomu - **ametropie lomivá (refrakční)**.

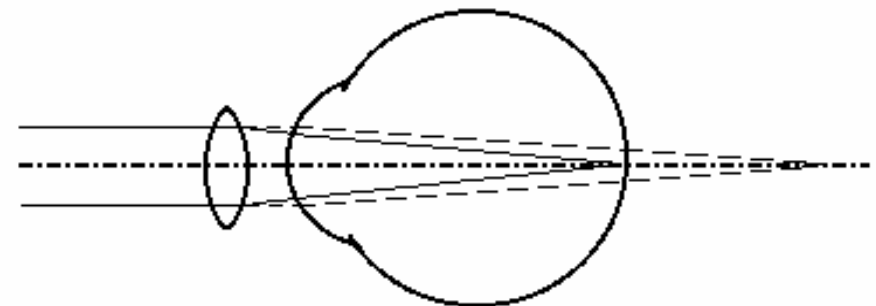
Daleký bod ametropického oka leží vždy v jiné vzdálenosti než v nekonečnu.

# Ametropie sférické

■ Krátkozrakost  
myopie



■ Dalekozrakost  
hyperopie, hypermetropie



# Krátkozrakost - myopie

Příčinou krátkozrakosti je buď příliš velká délka bulbu při normální lámavosti optického systému oka, nebo větší lomivost optických prostředí při normální délce bulbu. V obou případech se světelné paprsky vstupující do oka rovnoběžně protínají před sítnicí.

Daleký bod krátkozrakého oka leží v konečné vzdálenosti před okem a blízký bod je blíže k oku než u oka emetropického. Ke korekci krátkozrakosti se použije **rozptylka**. Rovnoběžné paprsky po průchodu rozptylkou vstupují do oka rozbíhavě a předmětové ohnisko se posune na sítnici.

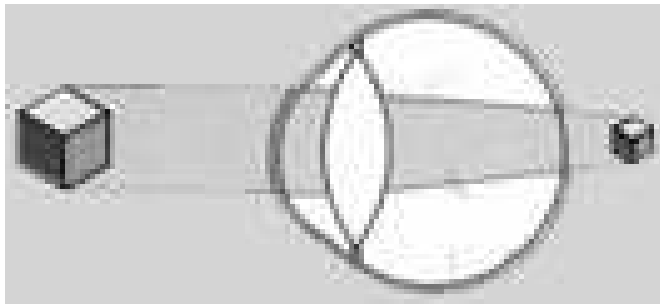
# Krátkozrakost - myopie



# Dalekozrakost - hyperopie, hypermetropie

U dalekozrakého oka délka bulbu příliš malá nebo lámavost optického systému menší než u oka emetropického. Rovnoběžné světelné paprsky se u dalekozrakého oka protínají za sítnicí, daleký bod je v konečné vzdálenosti za dalekozrakým okem a blízký bod je značně vzdálen od oka a může být buď před ním nebo za ním. Korekce vzdálenosti se provádí **spojkou** Po průchodu touto čočkou původně rovnoběžné paprsky vstupují do oka sbíhavě a předmětové ohnisko vzniká na sítnici .

# Dalekozrakost - hyperopie, hypermetropie

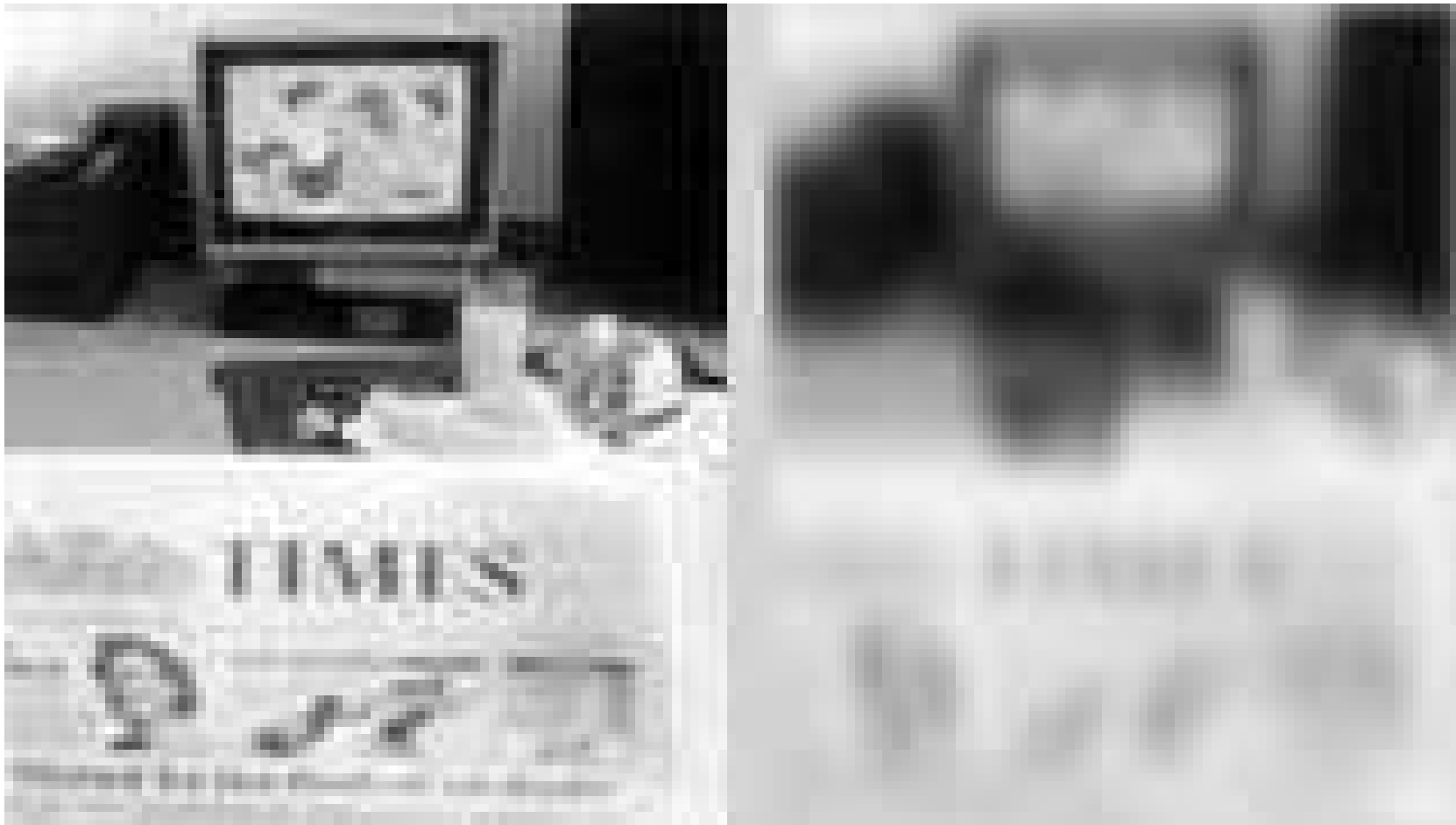


# Ametropie asférická

## ■ Astigmatismus

- stav optického systému oka, jehož lámavé plochy nemají souměrný sférický tvar. Na tomto místě je nutno připomenout, že prakticky každé oko je zatíženo astigmatismem malého stupně. Rohovka není nikdy ideálně sférická a její optická mohutnost ve svislé rovině bývá o 0,25 - 0,5 D větší než v rovině vodorovné. Tento tzv. fyziologický astigmatismus je vyrovnáván oční čočkou a nepůsobí potíže při vidění.

# Astigmatismus





# **Astigmatismus jednoduchý** (*simplex*)

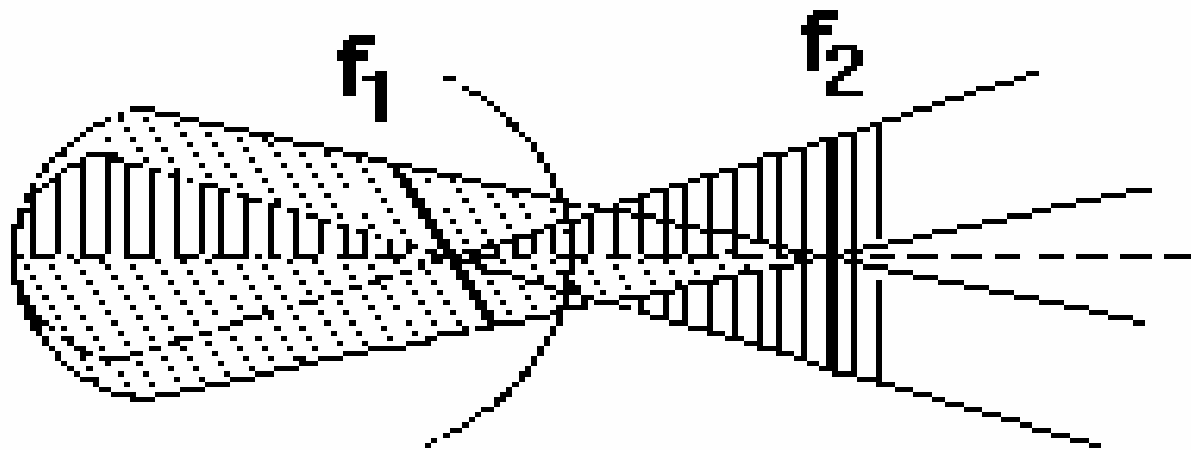
Jedna z fokál leží na sítnici, druhá buď před ní (astigmatismus jednoduchý myopický), nebo za ní (astigmatismus jednoduchý hyperopický).

# **Astigmatismus složený** (*compositus*)

Obě fokály jsou buď před sítnicí (astigmatismus složený myopický), nebo z sítnicí (astigmatismus složený hyperopický).

# Astigmatismus smíšený (*mixtus*)

Jedna z fokál je před sítnicí, druhá za sítnicí.



# Korekce astigmatismu

Jednoduchý astigmatismus korigujeme ***cylindrickými čočkami***, složený a smíšený astigmatismus ***torickými čočkami*** (torická lomivá plocha vzniká kombinací plochy cylindrické a sférické - viz dále). Korekcí se musí dosáhnout stavu, při němž by optická mohutnost soustavy astigmatické oko + korekční čočka byla v obou hlavních meridiánech stejná.

# Kontaktní čočky



Kontaktní čočky jsou optické pomůcky, které napravují refrakční vady oka. Jsou vyráběny z různých druhů materiálů (plastů). Podle tohoto materiálu se dělí na dvě základní skupiny:

- Měkké čočky
- RGP (pevné plynopropustné čočky)

# Kontaktní čočky

Každý zájemce o kontaktní čočky se musí podrobit očnímu vyšetření u oftalmologa či optometristy, nelze si čočky jen tak zakoupit!



# Sítnice – světločivá vrstva oka

(biologický detektor světla)

*analogie:* filmová kamera – fotografická emulze

televizní kamera – citlivá detekční vrstva

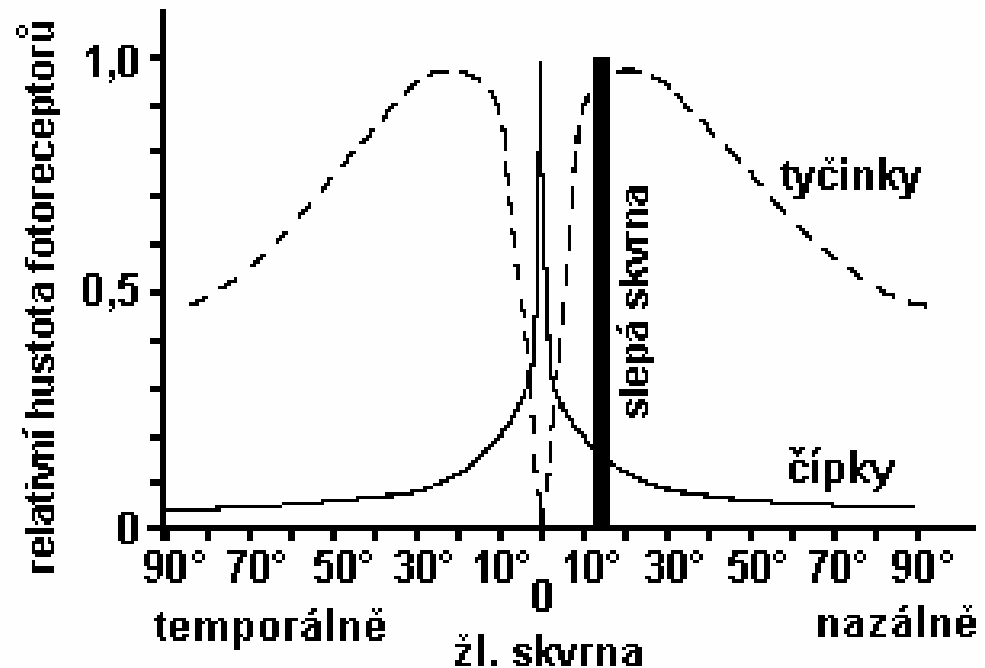
## Fotoreceptory – světločivé elementy

- Tyčinky (80-140 mil.) vidění za šera, zelenomodré světlo 507 nm
- Čípky (7 mil.) vidění za denního světla, detaily, barvy, žlutozelené světlo 555 nm.

Rozložení fotoreceptorů není pravidelné. Čípky se nejvíce vyskytují ve **žluté skvrně**, která je místem nejostřejšího vidění. Je to mělce prohloubené místo v sítnici při zadním pólu oka. Ostatní vrstvy sítnice jsou v tomto místě silně zredukovány, sítnice je tvořena prakticky jen vrstvou čípků a pigmentovým listem.

# Slepá a žlutá skvrna

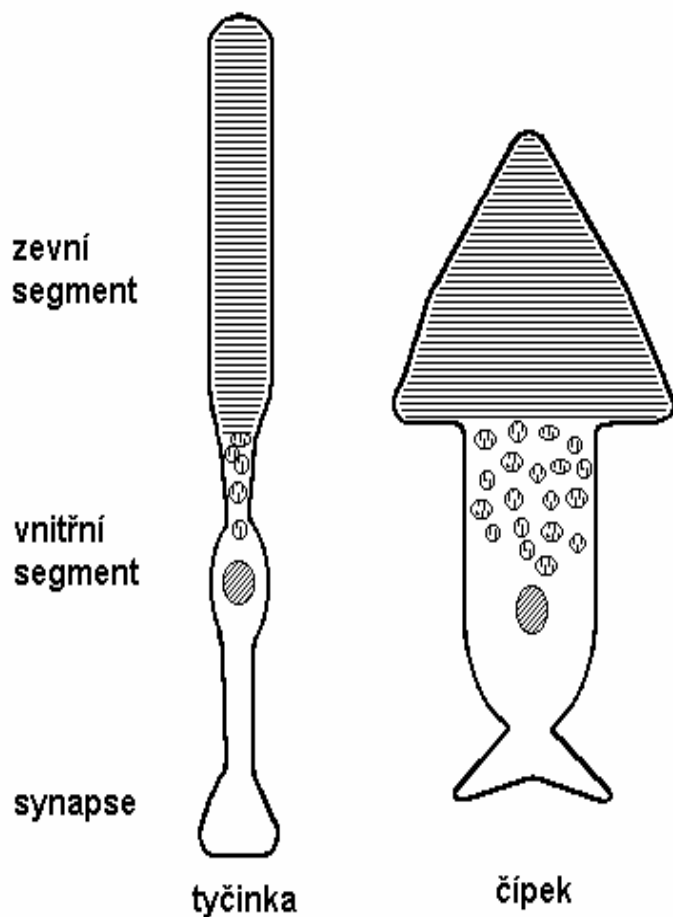
Od žluté skvrny k periférii čípků ubývá. Maximální hustota tyčinek je v kruhu asi 20° od žluté skvrny. Nervová vlákna vedoucí podráždění z fotoreceptorů se sbíhají nazálně od žluté skvrny, kde tvoří papilu zrakového nervu. Toto místo neobsahuje žádné fotoreceptory a nazývá se **slepá skvrna**.



Fotoreceptory a nervové buňky v sítnici vytvářejí složitou příčnou i podélnou neuronovou síť. Několik fotoreceptorů je synapticky vázáno na jednu bipolární buňku. Několik bipolárních buněk předává informaci jedné gangliové buňce, která je svým axonem odvádí do mozku. Tímto konvergentním uspořádáním vedení podráždění dochází k výrazné prostorové sumaci (světelná informace zachycená **90-150 milióny receptorů** je z oka odváděno asi **1 miliónem nervových vláken**). Tato konvergence je mnohem výraznější u tyčinek než u čípků.



# Schéma fotoreceptorů

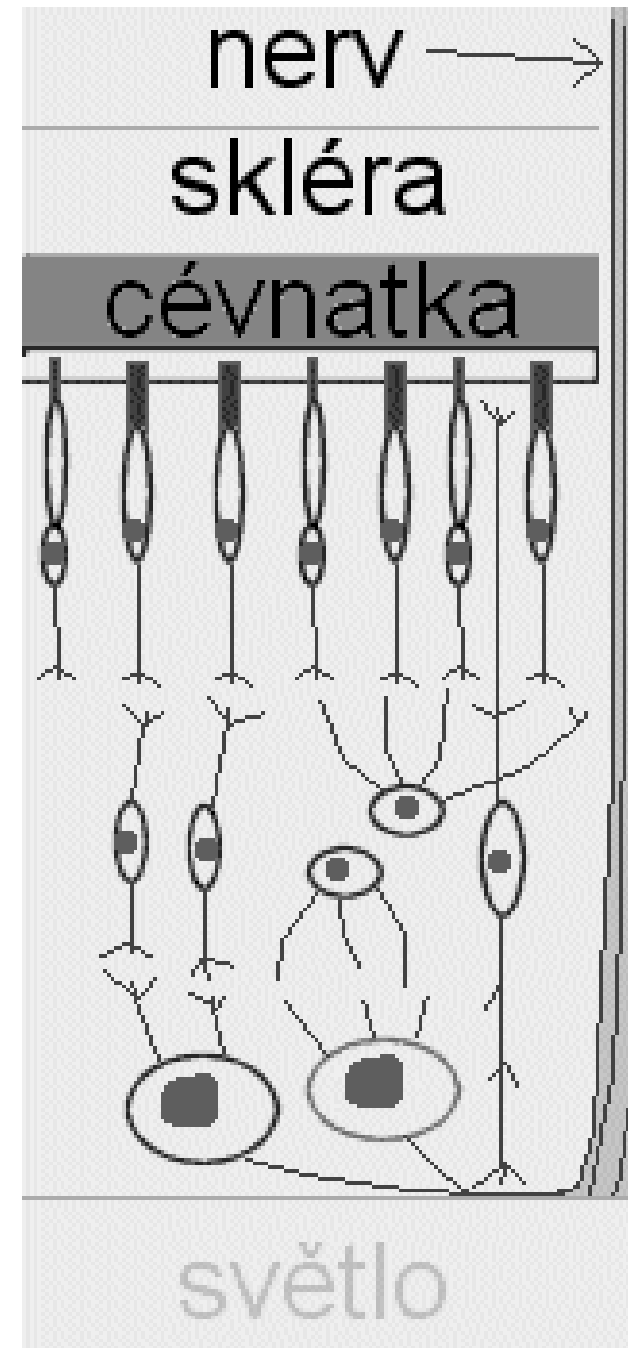


**Zvní segment** je v kontaktu s pigmentovým epitelem, skládá se z velkého počtu (700-1000) vrstevnatě uspořádaných membránových lamel obsahujících **zrakový pigment**.

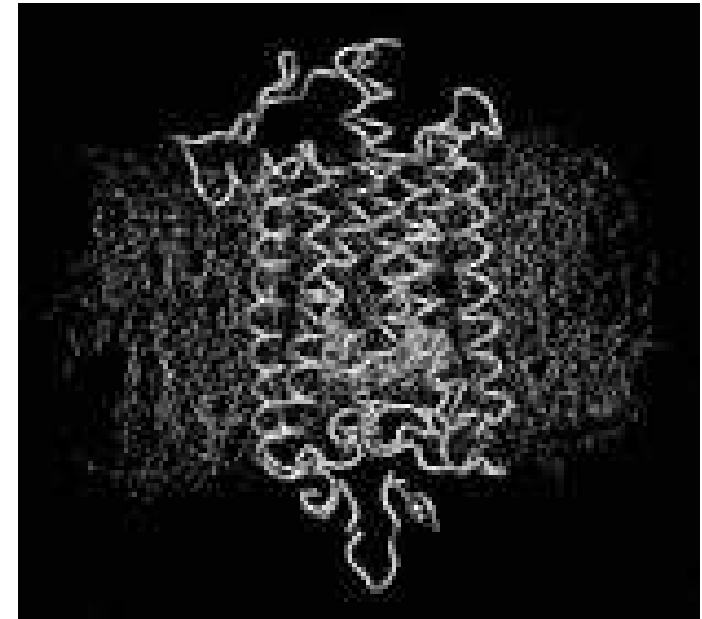
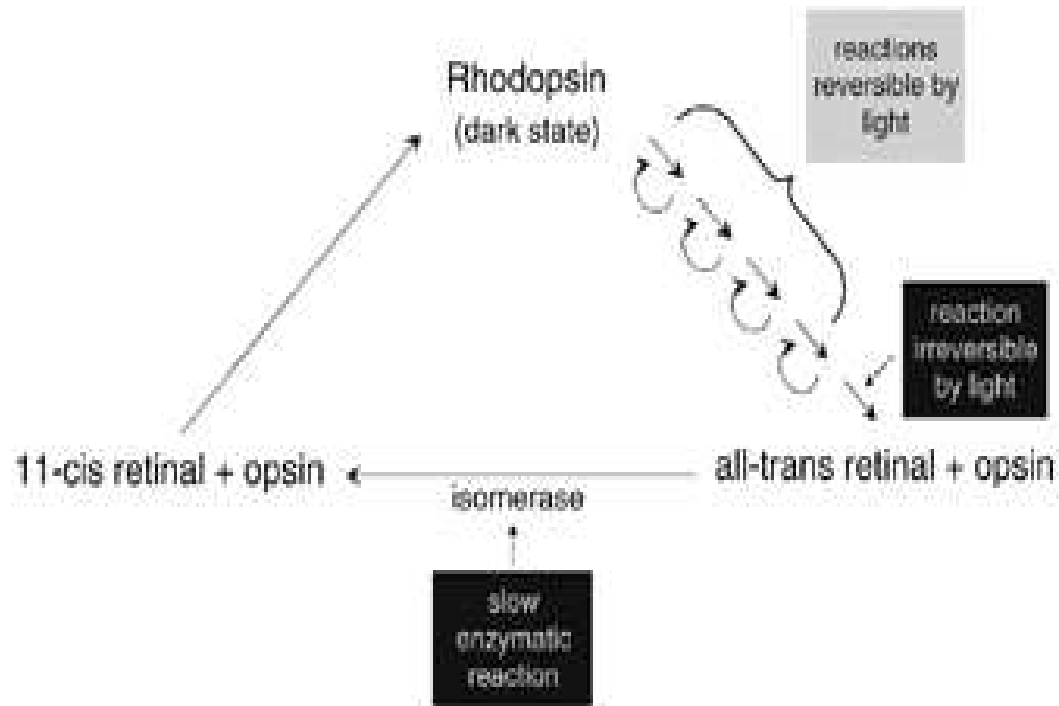
**Vnitřní segment** obsahuje jádro a velké množství mitochondrií. Je zakončen zduřením kulovitého nebo kuželovitého tvaru, místem synaptického spojení fotoreceptoru s druhým vertikálním neuronem sítnice - bipolární buňkou.

# Struktura sítnice ve směru postupujícího světla:

- Vrstva nervových vláken
- Vrstva gangliových buněk
- Vrstva bipolárních buněk
- Vrstva fotoreceptorů
- Pigmentový list

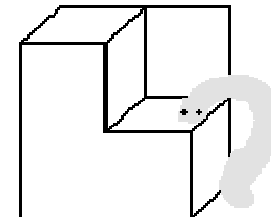
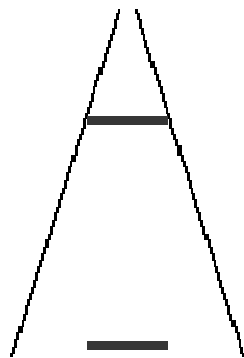
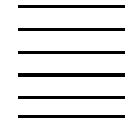
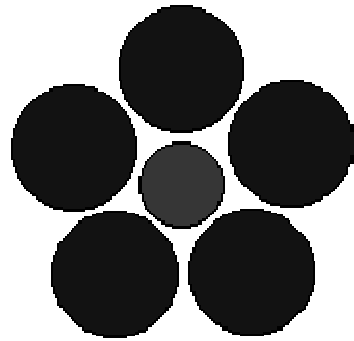
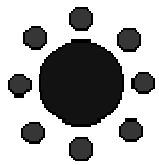


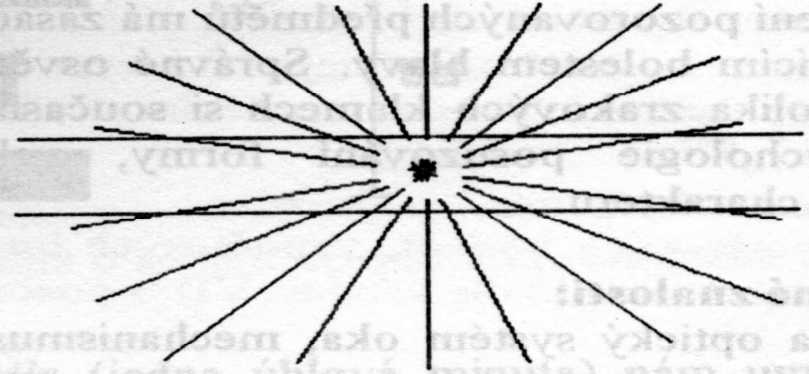
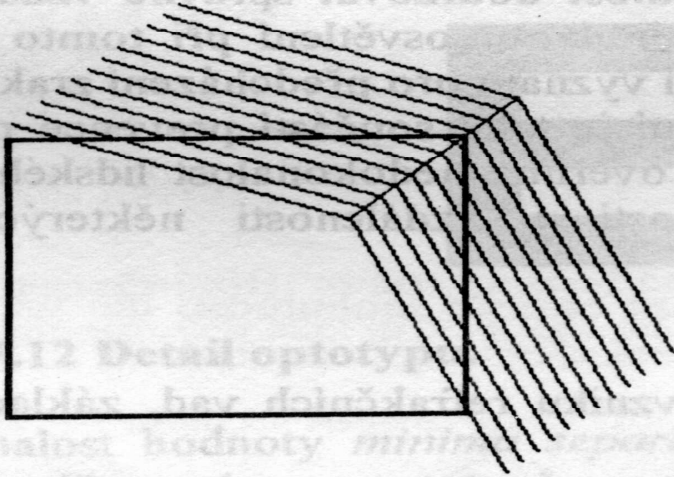
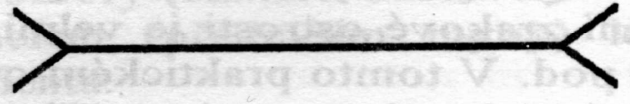
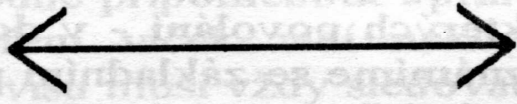
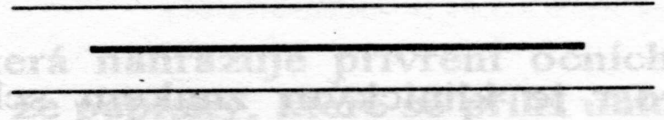
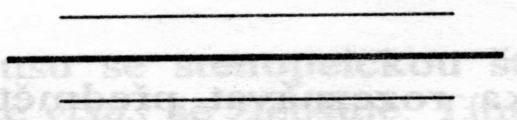
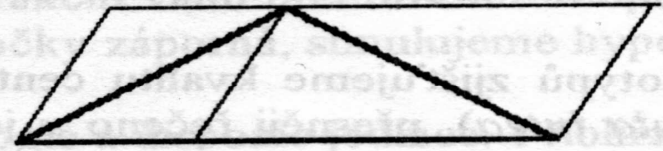
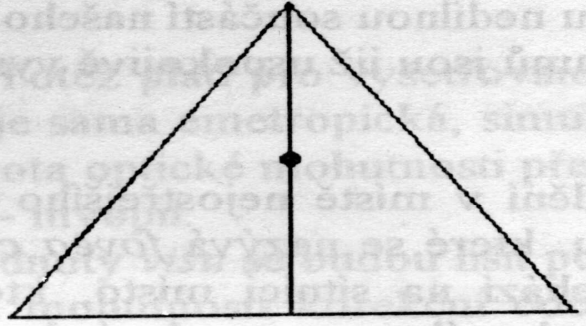
# Rhodopsin



Základem pro fotochemický proces, na jehož podkladě se ve smyslových buňkách sítnice odehrávají přeměny světelných impulsů, jsou sítnicové pigmenty. **Rhodopsin** - „**zrakový purpur**“ (zevní segment tyčinek)

# Zrakové klamy





Obř. 7.12 Detail optotyptu

(c) Znalost hodnoty *minimum* (angl.)

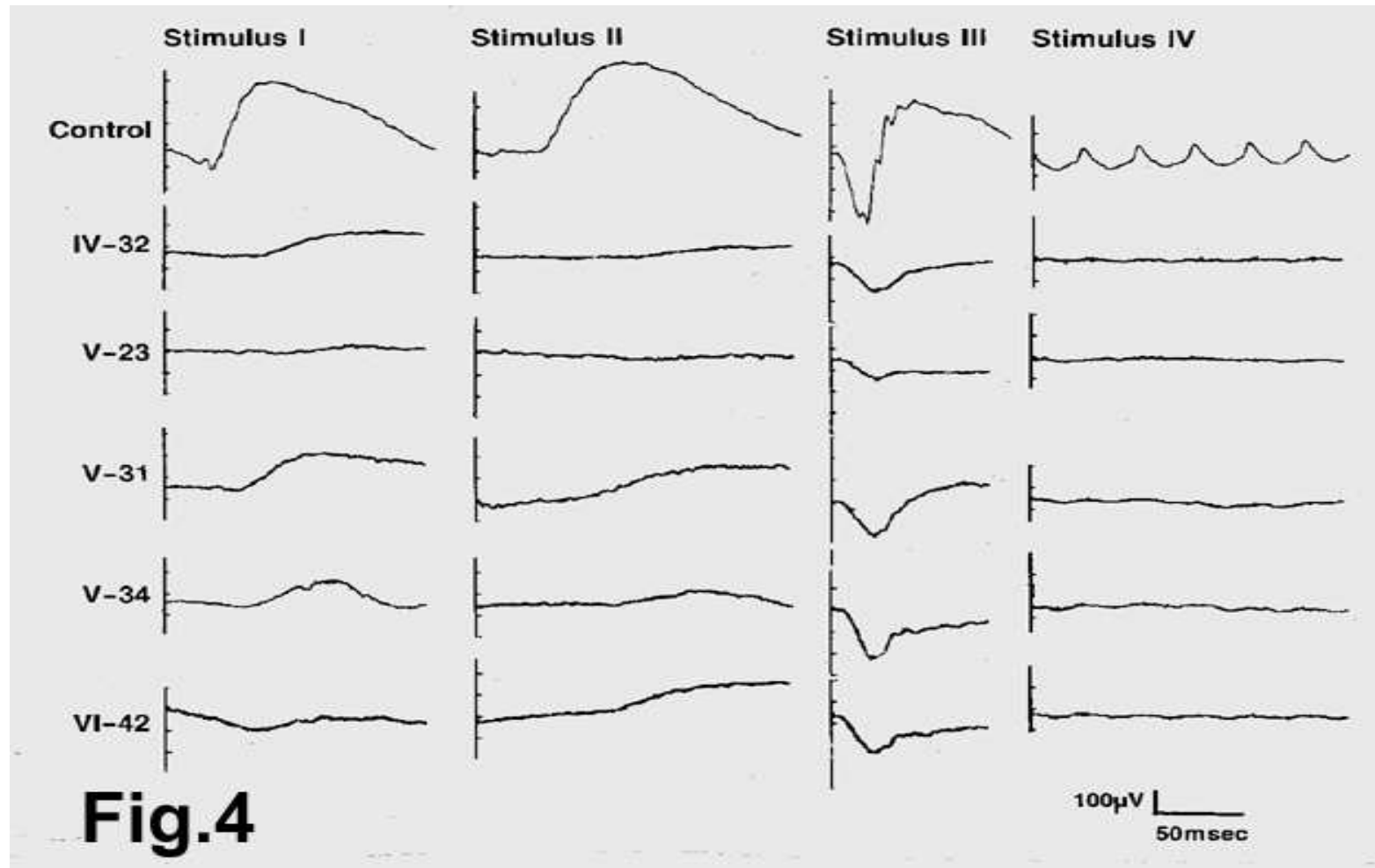
# Elektrické projevy sítnice

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

- **raný receptorový potenciál**
- **pozdní receptorový potenciál**

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

# Elektroretinogram (ERG)



# Meze lidského zraku:

zraková ostrost - testuje se pomocí

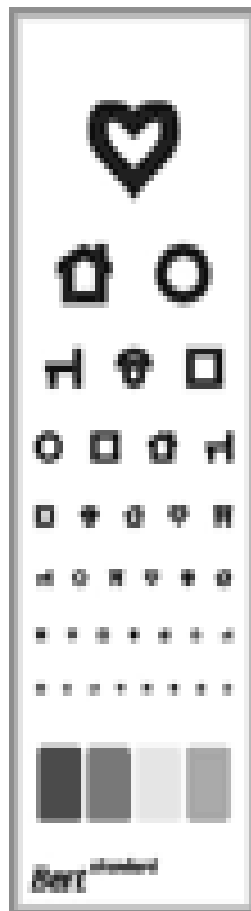
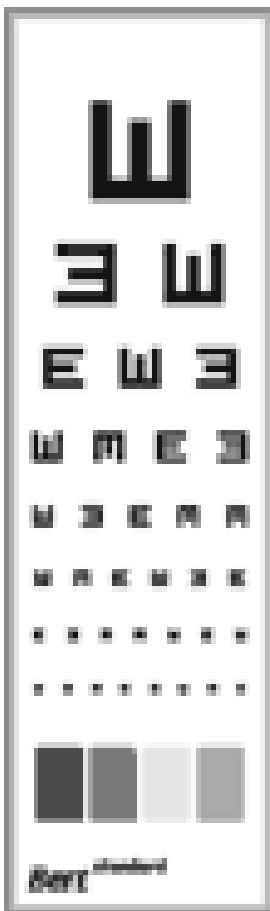
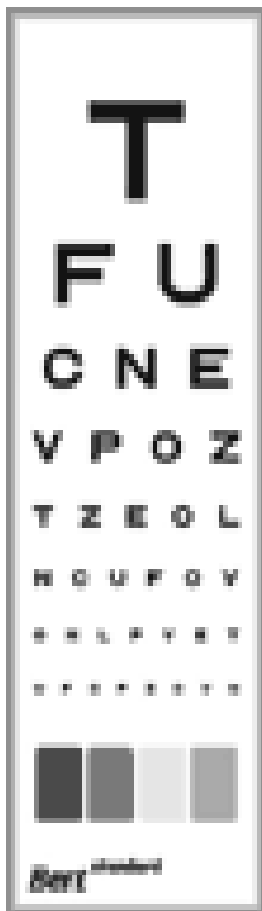
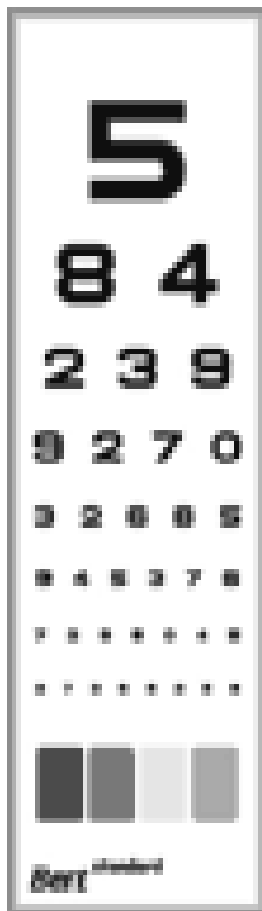
***Snellenových optotypů*** (viz praktika) - dána úhlem jedné obloukové minuty

- limit citlivosti: 2-3 fotony během několika milisekund
- kritická frekvence splývání světelných impulsů: 5 - 60 Hz v závislosti na jasů
- omezení vlnovými délkami světla: 400 - 700 nm
- mez stereoskopického vidění: rozdíl stereoskopické paralaxy menší než dvacet úhlových vteřin



# Vyšetřování zrakové ostrosti





# Barevné vidění

Barvy dělíme:

- **základní**
- **doplňkové**, tj takové, které vzájemným smísením dají počitek neutrální šedé a bílé barvy. Každá vnímaná barva je charakterizována barevným tónem, světlostí a sytostí.

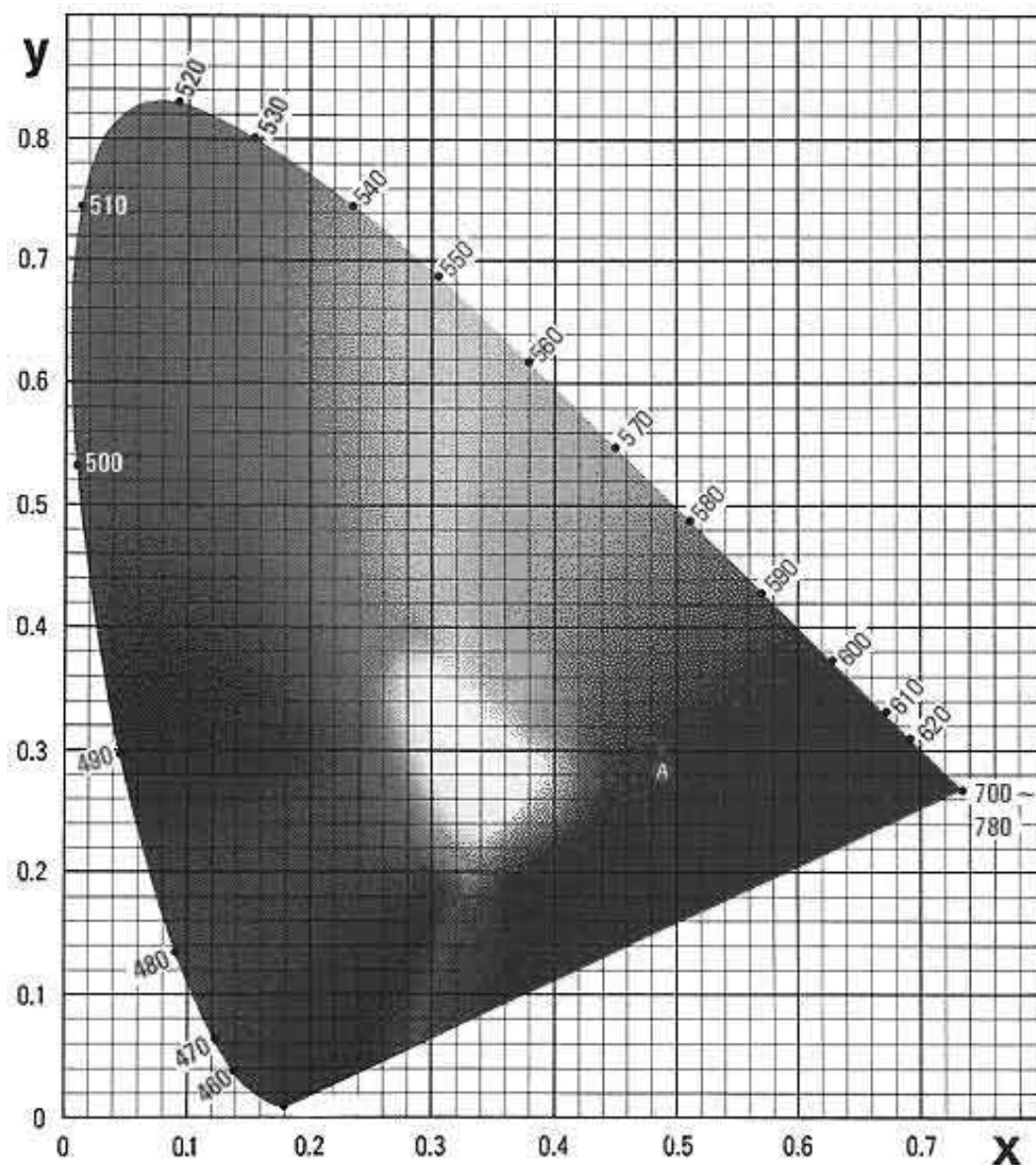
**barevný tón** je určen vlnovou délkou světla,  
**světlost** intenzitou světla  
**syťost** barevností počitku.



*J. E. Purkyně*

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**

$$x + y + z = 1$$

# Barvocit

*Schopnost správného vnímání barev lidským okem*

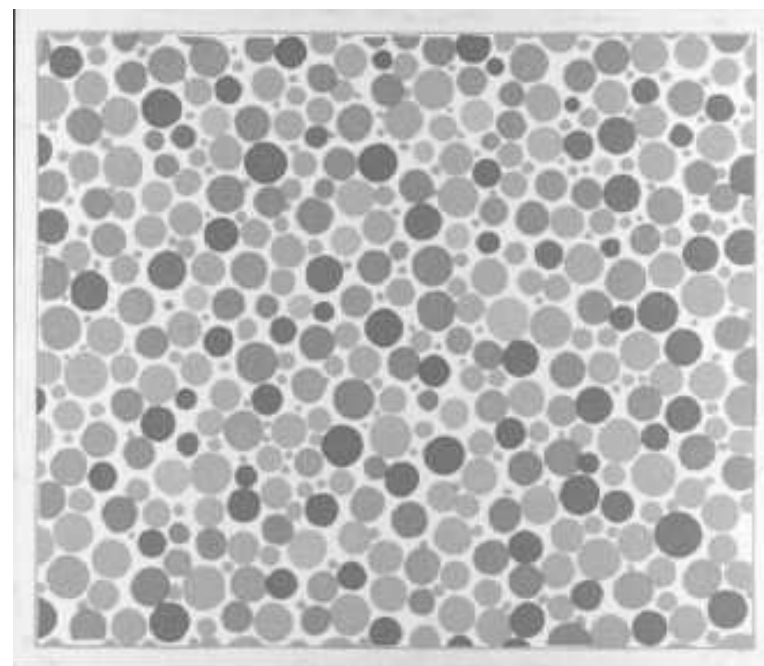
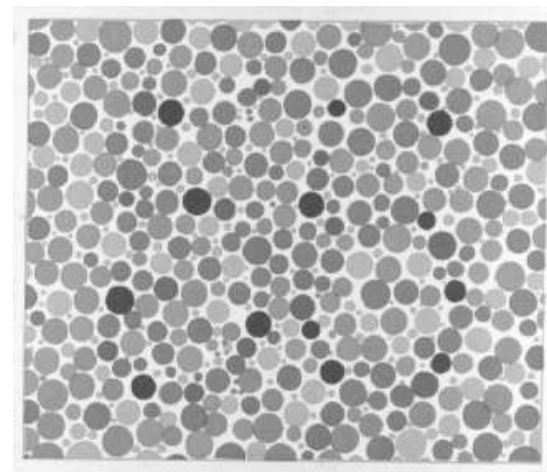
Mechanismus vnímání barev není sice ještě jednoznačně rozřešen, všeobecně je však přijímána tzv. **trichromatická teorie**, spojená se jmény Helmholtze, Lomonosova a Younga. Jednotliví autoři se liší jen v charakteristice tří základních barev. *Helmholtz* za ně považoval červenou, zelenou a fialovou, *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.

# Fotometrické veličiny:

- Svítivost  $I$  [cd - kandela]
- Světelný tok  $\Phi$  [lm - lumen]
- Osvětlení  $E$  [ $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2} = \text{lx}$  - lux]

- a) *1 cd je svítivost absolutně černého tělesa o ploše  $1 \text{ cm}^2$  při teplotě tuhnutí platiny ( $1755 \text{ }^\circ\text{C}$ ) za normálního atmosférického tlaku, pozorovaného kolmo k ploše.*
- b) *1 lm je světelný tok vycházející z bodového zdroje o svítivosti 1 cd do prostorového úhlu 1 sr (steradiánu).*
- c) *1 lm dopadající kolmo na plochu  $1 \text{ m}^2$  dává osvětlení 1 lux.*  
Osvětlení povrchu je nepřímo úměrné druhé mocnině jeho vzdálenosti od bodového zdroje světla.

# Dobrou chuť!!!



Volské oko – slavnostní pokrm okulistů,  
optometrů, oftalmologů aj.