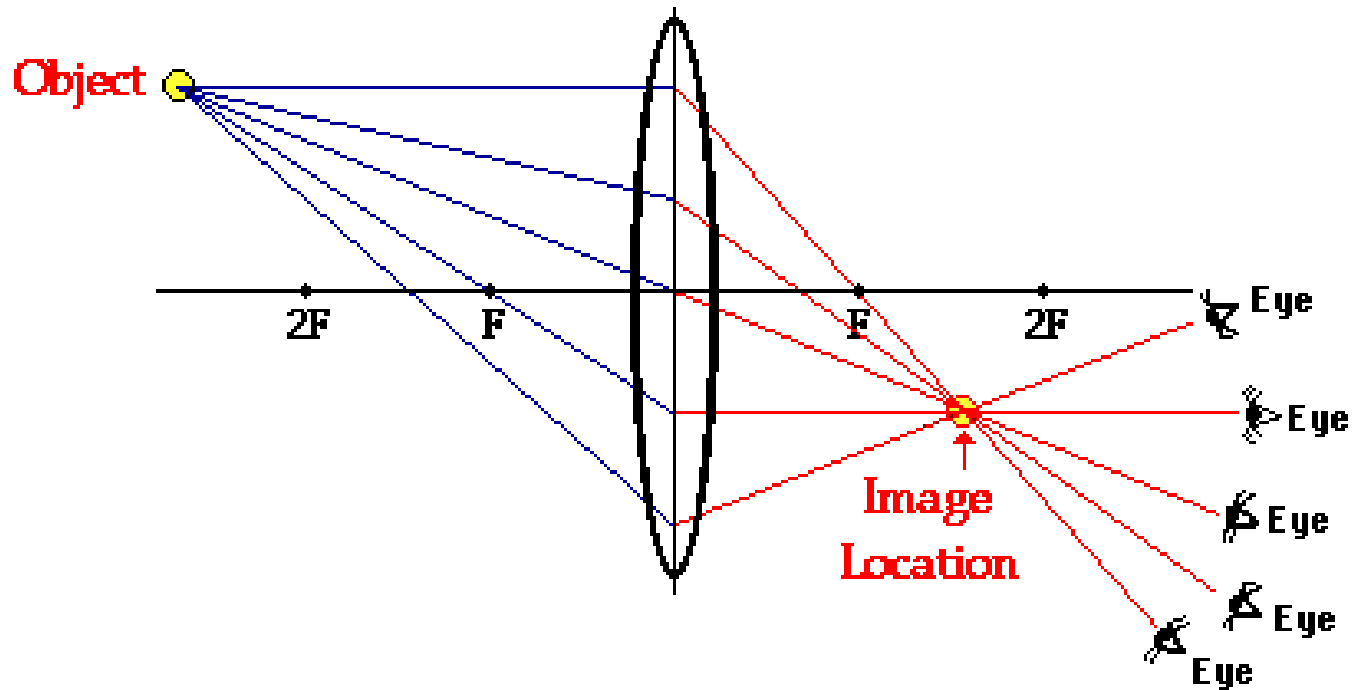


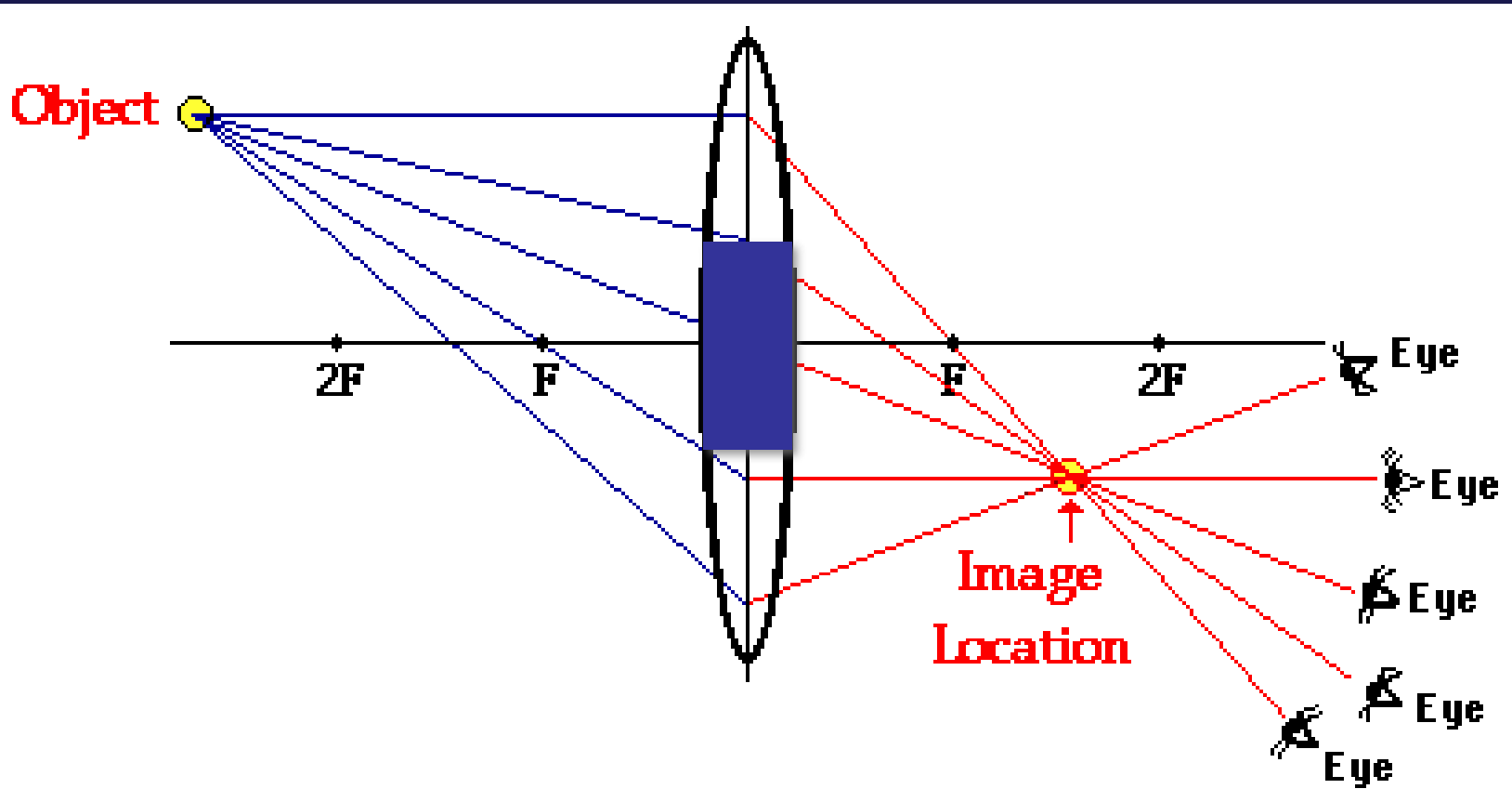
# Proseminář z optiky

10.1.2019

# Zobrazení spojnou čočkou – paprskový diagram

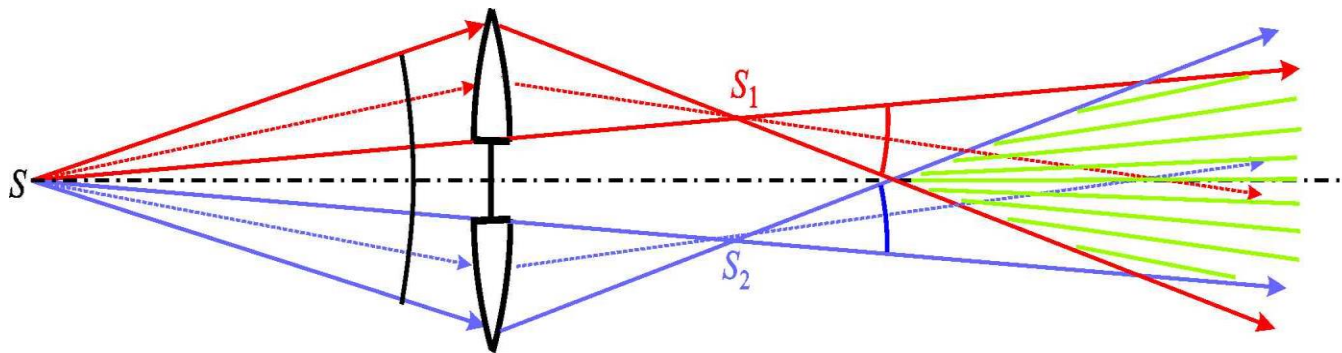


# Zobrazení spojnou čočkou se zakrytým středem – paprskový diagram



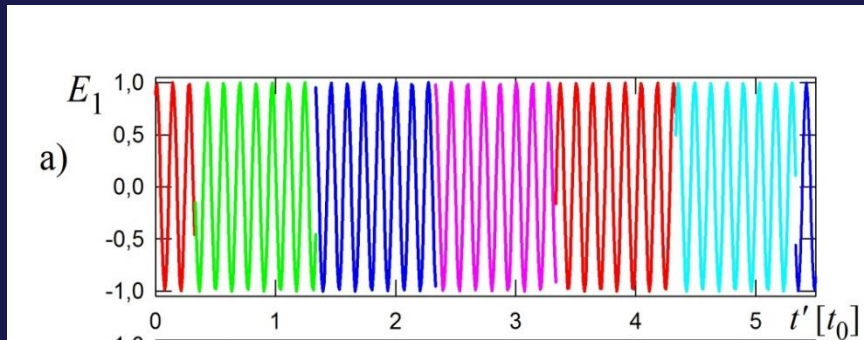
Zakrytí středu čočky nemění průchod okrajových paprsků zbytkem čočky,  
Z jednoho bodu předmětu stále vzniká jeden bod obrazu

## Billetova dvojčočka

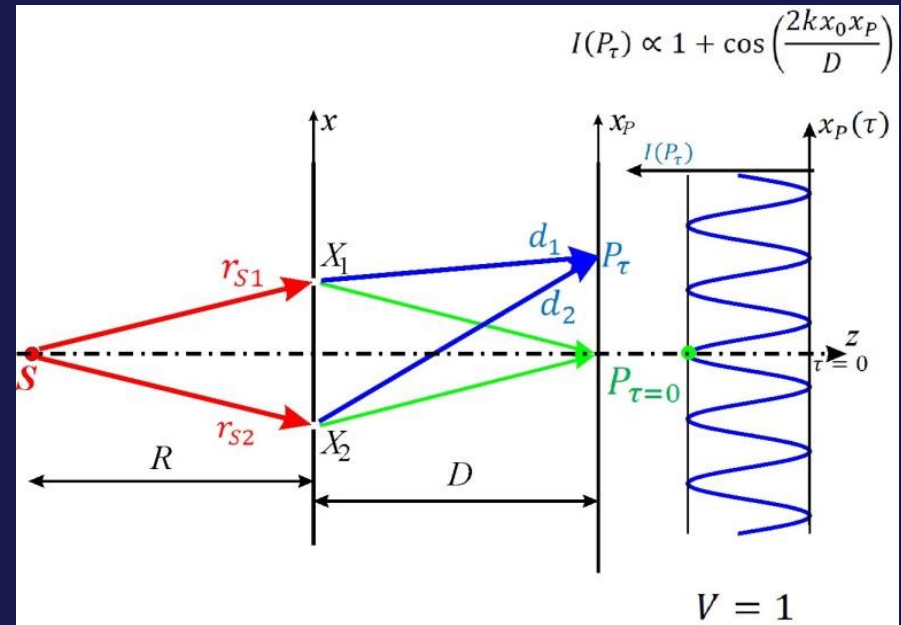


Příklad dělení vlnoplochy: Billetova dvojčočka.  $S_1$  a  $S_2$  jsou **obrazy zdroje  $S$**  vytvořené dvěma **vertikálně posunutými polovinami** čočky. Jedna část kulové vlnoplochy vycházející ze zdroje  $S$  je zpracována horní částí čočky (naznačeno červeně), zatímco druhá část téže vlnoplochy je využita k zobrazení pomocí spodní částí čočky. V interferenčním prostoru jsou zeleně naznačena místa maximální intenzity určená interferencí kulových vln vycházejících ze zdrojů  $S_1$  a  $S_2$ .

# Model chování běžného zdroje světla

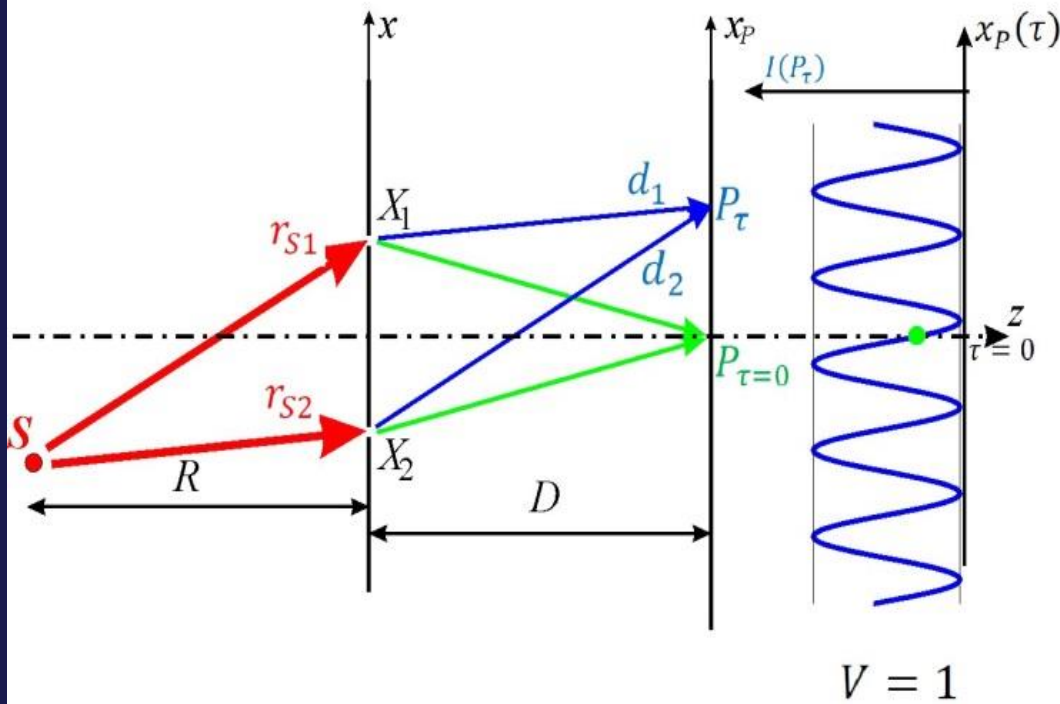


**Zdroj je časově proměnný.**  
Nejjednodušší model – změna fáze po době  $t_0$  - koherenční doba. Za tuto dobu doběhne vlnový balík na vzdálenost koherenční délky  $l_c = ct_0$ .



**Pokud je zdroj na ose difrakčních otvorů, jsou dráhy  $r_{S1}$  a  $r_{S2}$  stejné. Jednotlivé vlnové balíky dorazí na otvory ve stejný čas, pole v místě otvorů je zcela koherentní a výsledný IF obrazec má maximální viditelnost.**

$$I(P_\tau) \propto 1 + \cos \left[ \frac{kh}{D} \left( x_p + \frac{D}{R} x_s \right) \right]$$

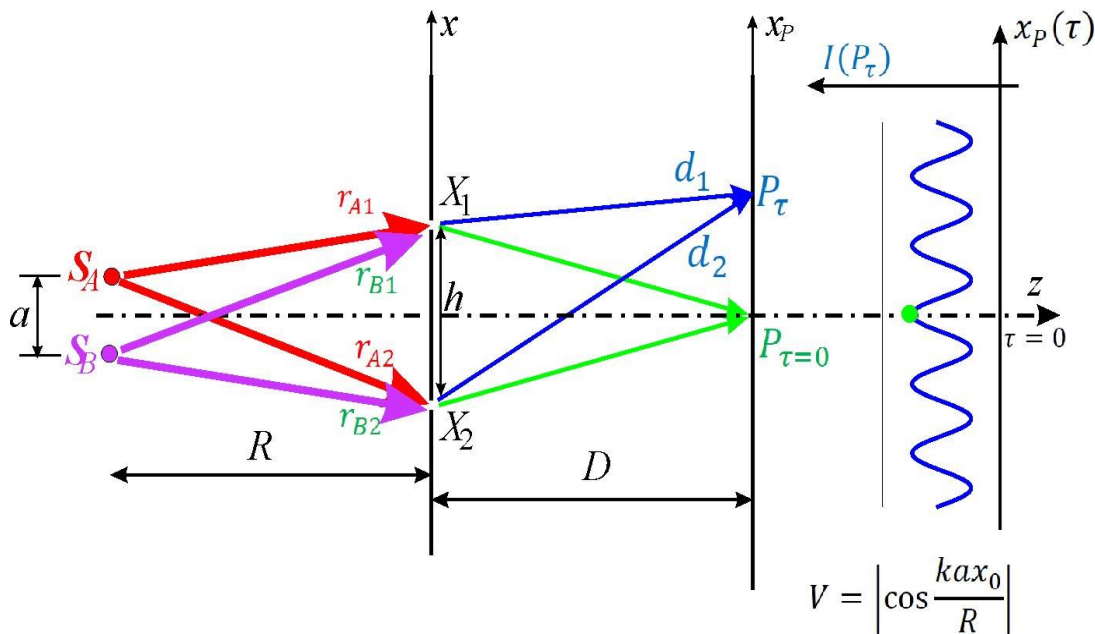


**Pokud je zdroj mimo osu difrakčních otvorů, jsou dráhy  $r_{S1}$  a  $r_{S2}$  různé. Pole v místě otvorů je zcela koherentní v případě, že rozdíl drah  $r_{S2}-r_{S1}$  je mnohem menší než koherenční délka  $l_C = c \cdot t_0$ . V tomto případě dorazí na difrakční otvory stejné, ale dráhově a fázově posunuté vlnové balíky.**

**Výsledný IF obrazec má pak maximální viditelnost a je posunutý vůči situaci, když zdroj byl na ose otvorů**

# Model koherence záření ze dvou nekoherentních bodových zdrojů

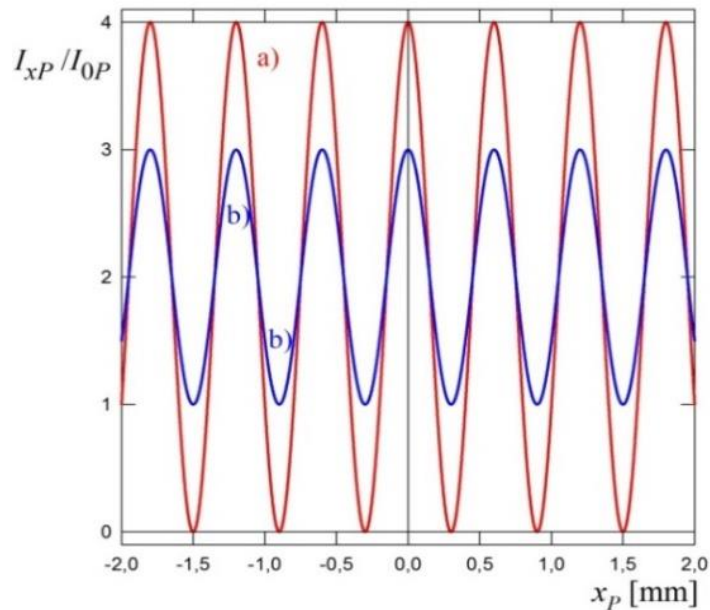
$$I(P_\tau) \propto 1 + \cos\left(\frac{kax_0}{R}\right) \cos\left(\frac{2kx_0x_P}{D}\right)$$



Interferenční obrazec je prostým součtem dvou navzájem posunutých interferenčních obrazů od obou zdrojů. Nevzniká žádná dodatečná interference při skládání obou obrazů, protože oba zdroje jsou navzájem nekoherentní, vlnové balíky do nich se setkávají během integrace náhodně a interferenční člen se vystředuje na nulu (viz. Model fázových skoků, časová koherence).

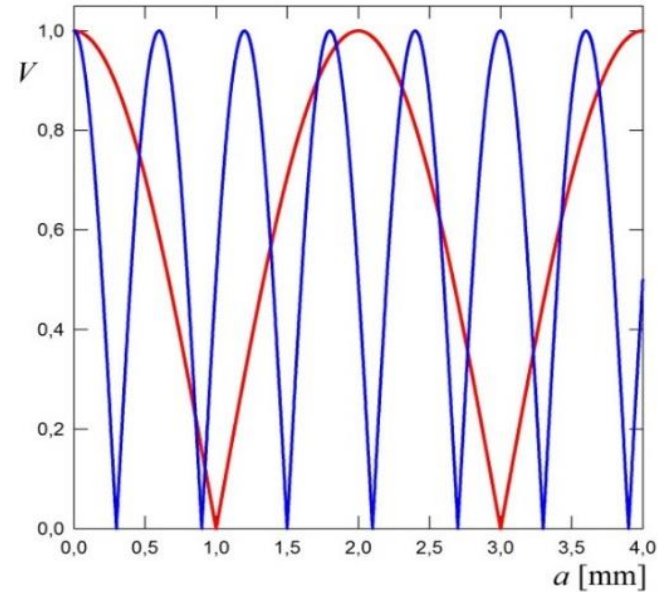
$$k=6 \cdot 10^8 \text{ deg m}^{-1} = 1,047 \cdot 10^7 \text{ rad m}^{-1}$$

$$h=1 \text{ mm}, \alpha=1 \text{ mm}, D=R=1 \text{ m}$$



$$k=6 \cdot 10^8 \text{ deg m}^{-1} = 1,047 \cdot 10^7 \text{ rad m}^{-1}$$

$$h=1 \text{ mm}, h=0,3 \text{ mm}, D=R=1 \text{ m}$$

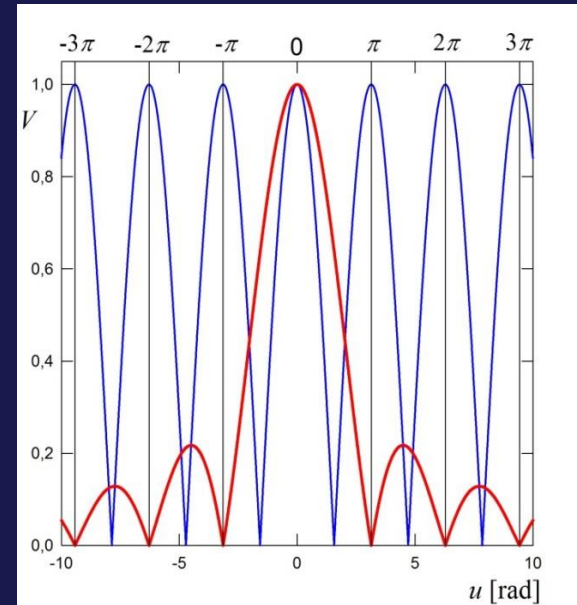
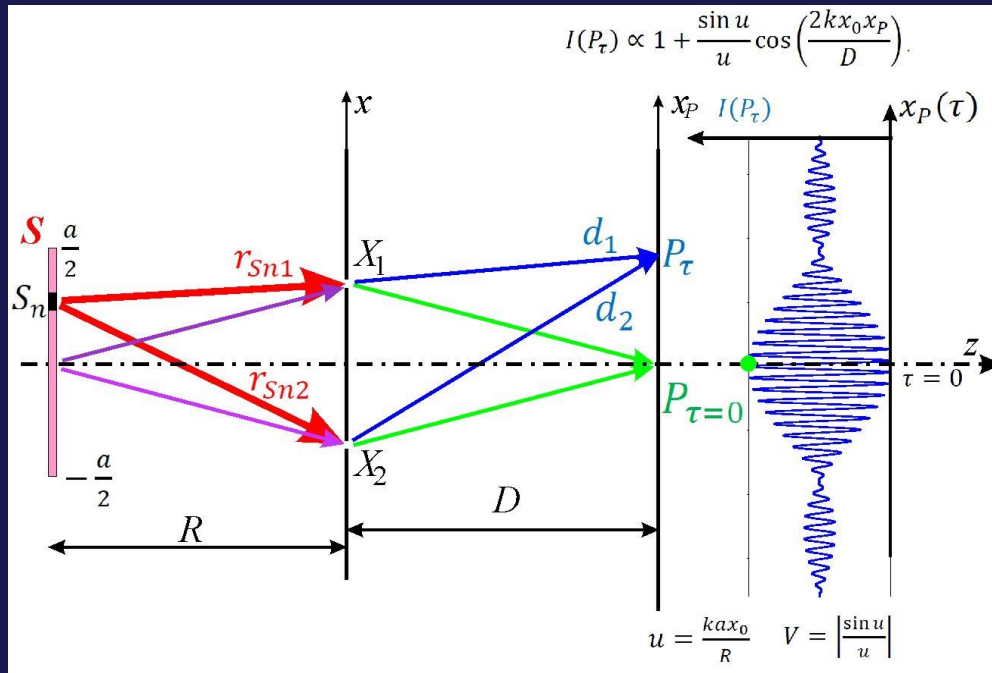


Závislosti **relativní intenzity** na poloze podél osy  $x_P$  :

- a) červeně pro jeden bodový monochromatický zdroj,
- b) modře pro dva nekoherentní bodové zdroje vzdálené 1 mm,
- c) červeně pro dva nekoherentní bodové zdroje vzdálené 0,31 mm,  
modře pro dva nekoherentní bodové zdroje vzdálené 0,6 mm



# Model koherence záření ze úsečky nekoherentních bodových zdrojů



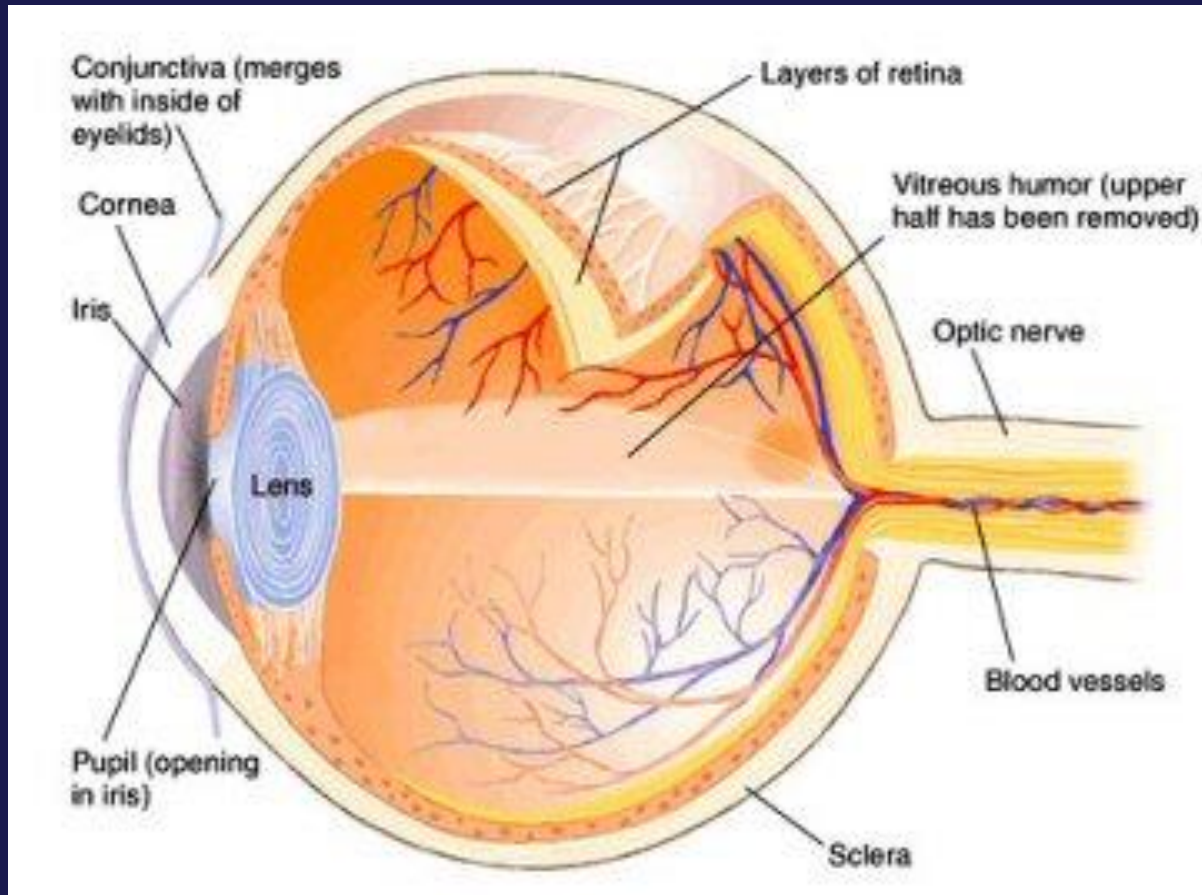
Interference v Youngově pokusu pro případ úsečky vyplněné nekoherentními body. Délka úsečky je  $a$ , vzdálenost bodů  $X_1, X_2$  je  $h = 2x_0$ .

**Viditelnost** (kontrast) interferenčních obrazců pro dva nekoherentní bodové zdroje vzdálené o  $a = \frac{2Ru}{kh}$  (modře), pro úsečku délky  $a = \frac{2Ru}{kh}$  vyplněnou nekoherentními bodovými zdroji (červeně).

# Lidské oko a vidění

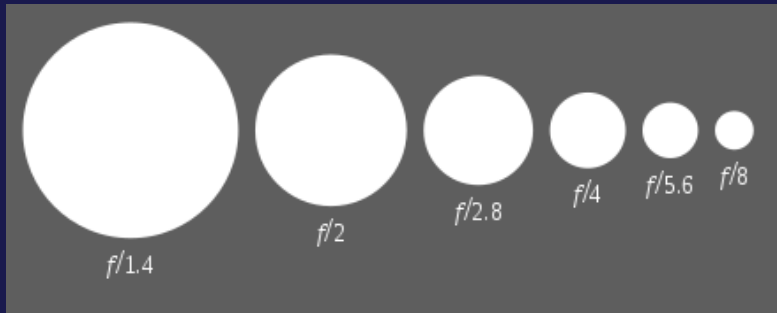
- Struktura oka
  - Duhovka (IRIS)
  - Rohovka
  - Čočka
- Sítnice
  - Fotoreceptory
  - Čas zpracování
  - Citlivost
- Zaostření
  - Akomodace čočky

# Struktura oka



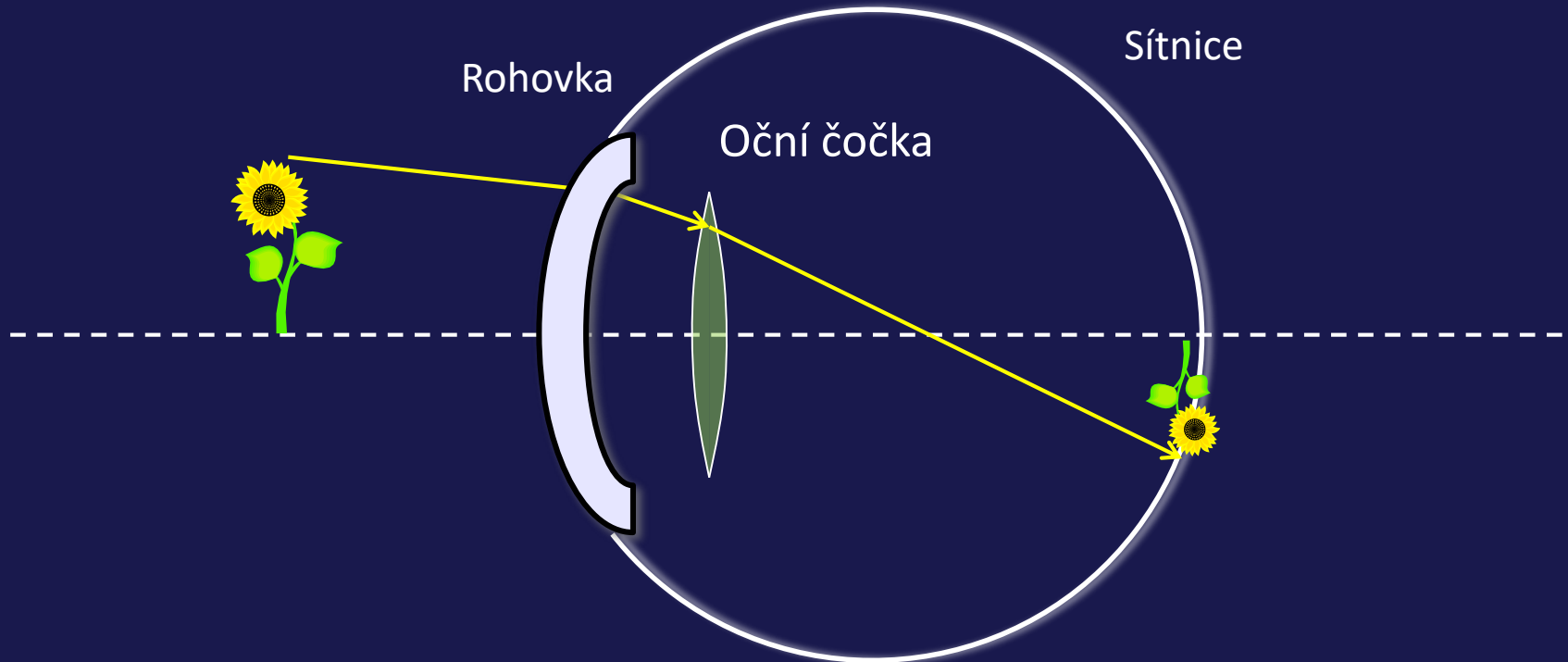
Duhovka je přibližně ekvivalentní cloně v kameře, rohovka a čočka jsou dvě čočky, a na sítnici je obraz zobrazen jako v CCD sensoru nebo filmu

# Struktura oka: Duhovka



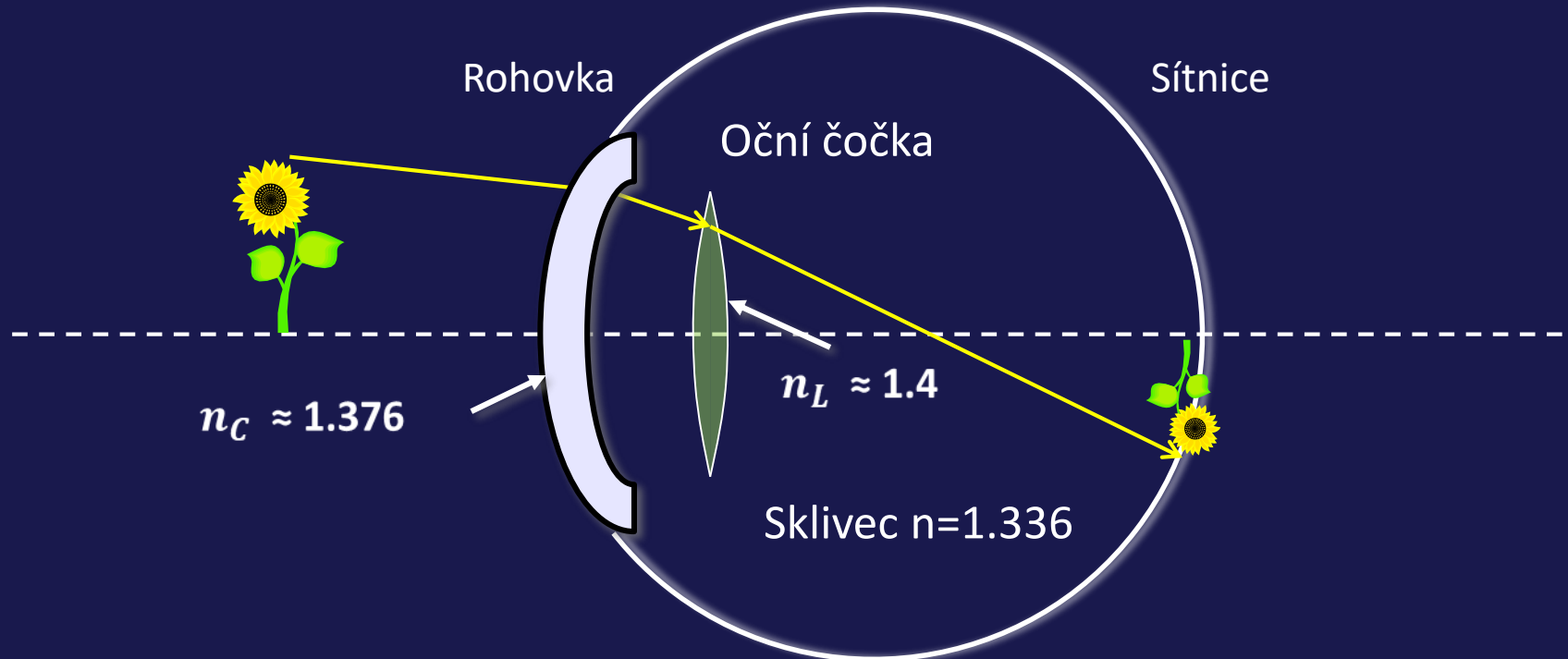
- Duhovka pracuje podobně jako clona ve fotoaparátu
- Rozšiřuje se za nízkého osvětlení a zužuje v jasném světle
- f-číslo (clonové číslo) oka se mění od  $f/2$  (velký otvor) k  $f/8$  (malý otvor)
- Běžná čočka kamer má obvykle, f-čísla v rozmezí  $f/2.8$  to  $f/22$ .

# Struktura oka: Rohovka a čočka



- V oku jsou dvě čočky, duhovka a oční čočka.
- Rohovka, která tvoří přední část oka, má velkou optickou mohutnost ( $D = \frac{1}{f} = 42D$ )
- Oční čočka má menší optickou mohutnost (15-20D) a její hlavní funkcí je doostření obrazu akomodací

# Struktura oka: Rohovka a čočka



- V oku jsou dvě čočky, duhovka a oční čočka.
- Rohovka, která tvoří přední část oka, má velkou optickou mohutnost ( $D = \frac{1}{f} = 42D$ )
- Oční čočka má menší optickou mohutnost (15-20D) a její hlavní funkcí je doostření obrazu akomodací

# Jak zaostřuje čočka kamery?

- Kamera se zaostřuje změnou vzdálenosti  $a'$  od čočky k obrazu na filmu nebo CCD detektoru, mění-li se vzdálenost předmětu  $a$  od kamery

Vzdálenost  
objektu

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

Ohnisková  
vzdálenost  
(pevná)

Obrazová vzdálenost  
(mění se, aby byla splněna  
rovnice, mění-li se  $a$ )

# Jak zaostřuje oko?

- Čočka je v neměnné vzdálenosti  $a'$  od sítnice, kde se vytváří obraz

Vzdálenost objektu  
(proměnná)

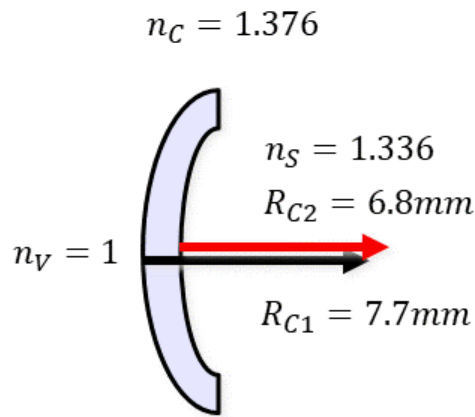
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$$

Ohnisková vzdálenost  
(proměnná, aby se  
splnila rovnice při  
změně  $a$ )

Obrazová vzdálenost (pevná)



# Rohovka



$n_c$  index lomu rohovky

$n_s$  index lomu sklivce

$$\frac{1}{f'_{1C}} = \frac{1}{R_1} \left( 1 - \frac{n_v}{n_c} \right) = \frac{1}{7.7 \times 10^{-3}} \left( 1 - \frac{1}{1.376} \right) = 129.9(1 - 0.727) = 35.5D$$

$f'_{1C}$  - Obrazová ohnisková vzdálenost při zobrazení mezi vzduchem a rohovkou

$$\frac{1}{f'_{2C}} = \frac{1}{R_2} \left( 1 - \frac{n_C}{n_S} \right) = \frac{1}{6.8 \times 10^{-3}} \left( 1 - \frac{1.376}{1.337} \right) = 147(1 - 1.029) = -4.3D$$

$f'_{2C}$  - Obrazová ohnisková vzdálenost při zobrazení mezi rohovkou a sklivcem

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'_{2C}} & \frac{n_C}{n_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'_{1C}} & \frac{1}{n_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{f'_{2C}} + \frac{n_C}{n_S} \frac{1}{f'_{1C}} & \frac{n_C}{n_S} \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{f'_C} = \frac{1}{f'_{2C}} + \frac{n_C}{n_S} \frac{1}{f'_{1C}} = -4.3 + 1.03 \times 35.5 = 32.3D$$

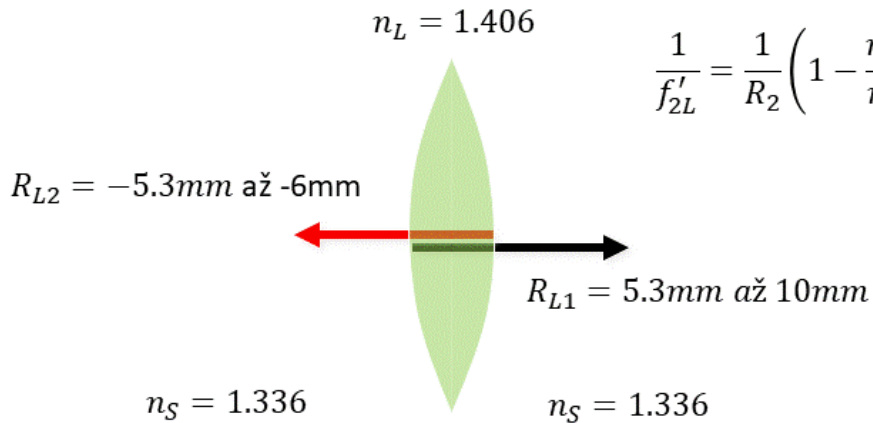
$f'_C$  - Obrazová ohnisková vzdálenost při zobrazení mezi vzduchem a sklivcem

$$\frac{1}{f_C} = -\frac{n_S}{n_V} \frac{1}{f'_C} = -1.336 \times 32.3 = -42D$$

$f_C$  - Předmětová ohnisková vzdálenost při zobrazení mezi vzduchem a sklivcem

$$\frac{1}{f'_{1L}} = \frac{1}{R_1} \left(1 - \frac{n_S}{n_L}\right) = \frac{1}{5.3 \times 10^{-3}} \left(1 - \frac{1.336}{1.406}\right) = 188(1 - 0.95) = 9.4D$$

$$\frac{1}{f'_{2L}} = \frac{1}{R_2} \left(1 - \frac{n_L}{n_S}\right) = \frac{1}{-5.3 \times 10^{-3}} \left(1 - \frac{1.406}{1.336}\right) = -188(1 - 1.05) = 9.4D$$



$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'_{2L}} & n_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'_{1L}} & n_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{f'_{2L}} + \frac{n_L}{n_S} \frac{1}{f'_{1L}} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{f'_L} = \frac{1}{f'_{2L}} + \frac{n_L}{n_S} \frac{1}{f'_{1L}} = 9.4 + 1.05 \times 9.4 = 19.3D$$

$n_c$  index lomu rohovky  
 $n_S$  index lomu sklivce  
 $n_L$  index lomu oční čočky

$f'_L$  Pro případ blízké akomodace  
 (čočka má maximální křivost)

$$\frac{1}{f_L} = -\frac{1}{f'_L} = 19.3D$$

Zobrazení mezi prostředními se stejným indexem lomu

## **Celková optická mohutnost optického systému oka**

Blízká akomodace ( $R_{1L} = 5.3mm, R_{2L} = -5.3mm$ )

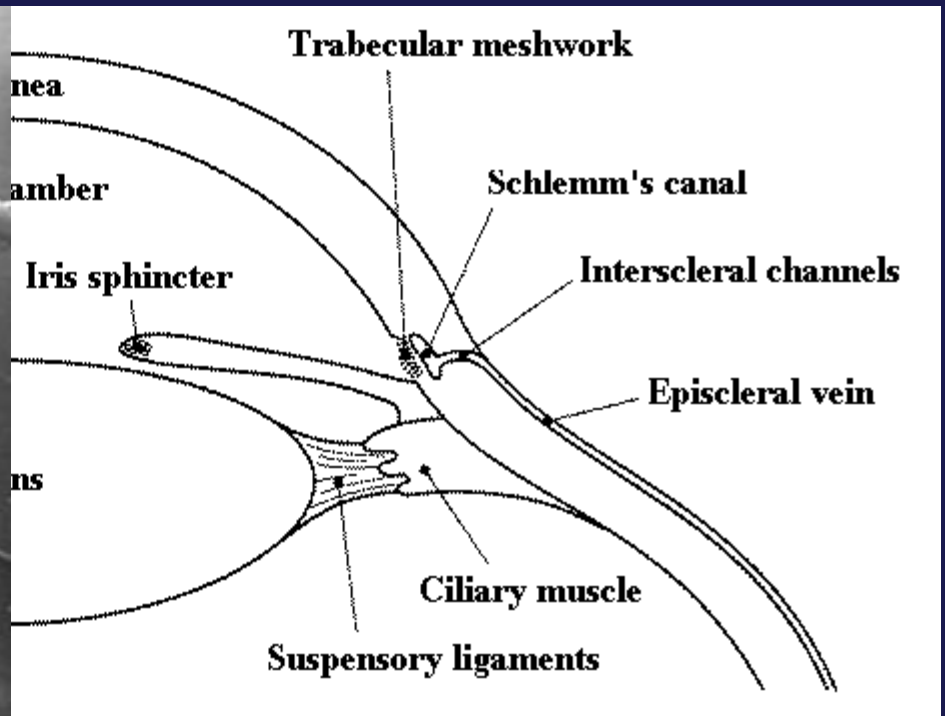
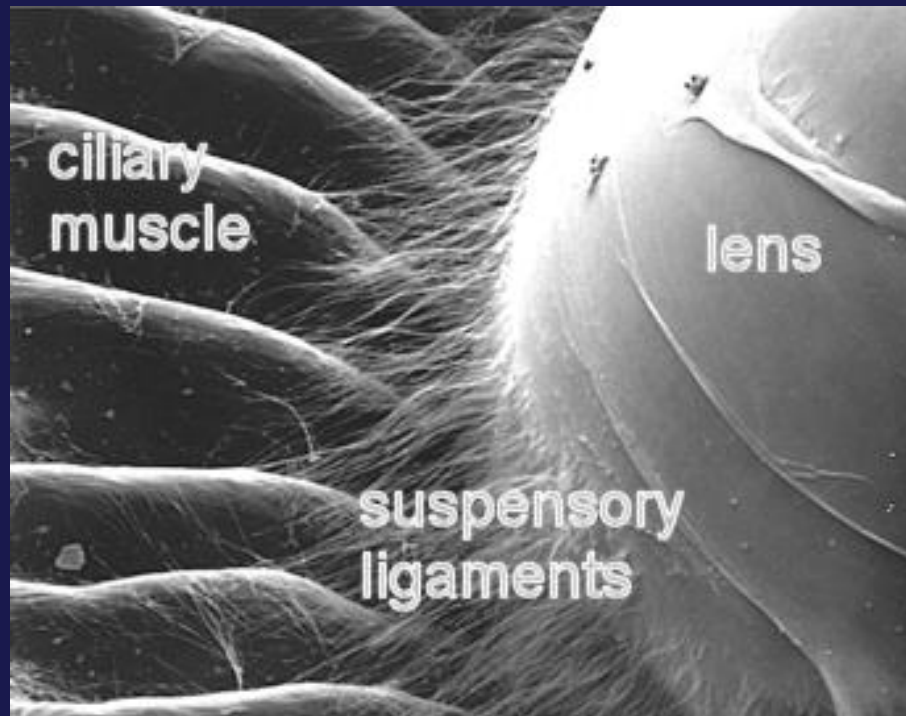
$$\frac{1}{f_{OKO}} = \frac{1}{f_C} + \frac{1}{f_L} = -42D - 19.3D = -61.7D$$

Vzdálená akomodace ( $R_{1L} = 10mm, R_{2L} = -6mm$ )

$$\frac{1}{f_{OKO}} = \frac{1}{f_C} + \frac{1}{f_L} = -42D - 15D = -57D$$

# Oční čočka : akomodace

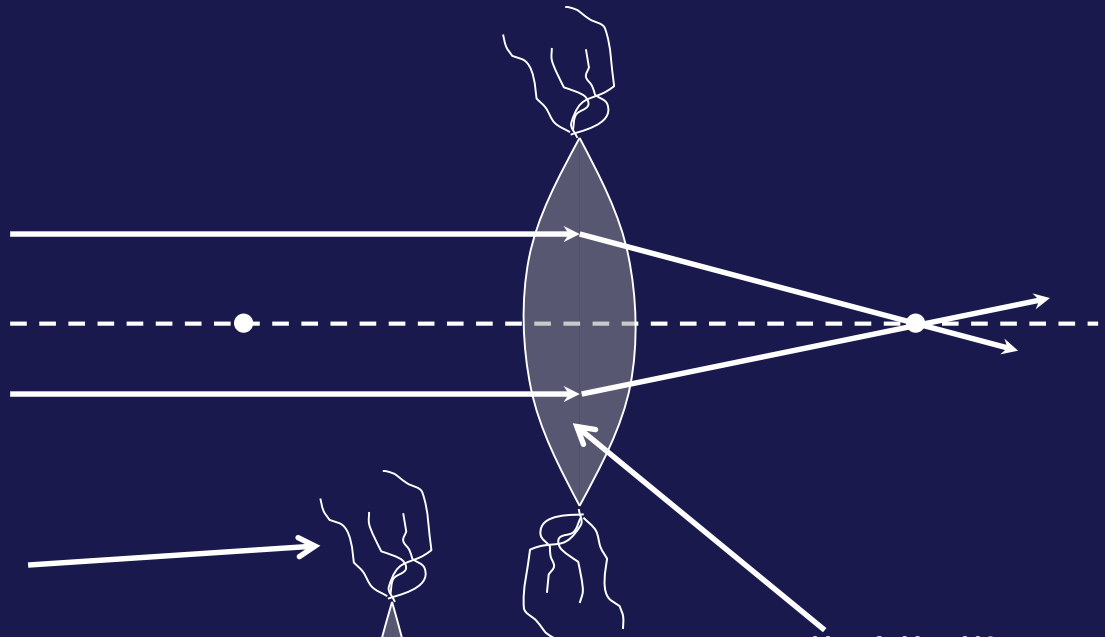
- Oční čočka mění ohniskovou vzdálenost změnou tvaru (poloměru) změnou napětí svalových vláken”



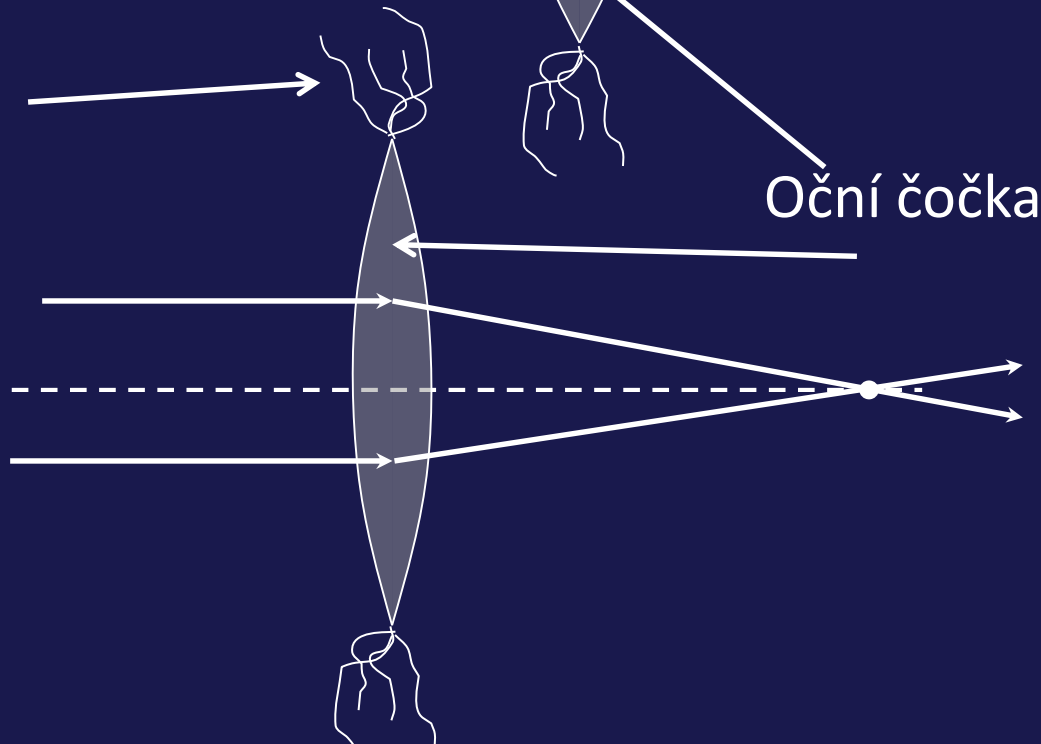
# Oční čočka : akomodace

Svaly se stahují, čočka se více zakřivuje, má větší optickou mohutnost, tj. kratší ohniskovou vzdálenost

Ligaments

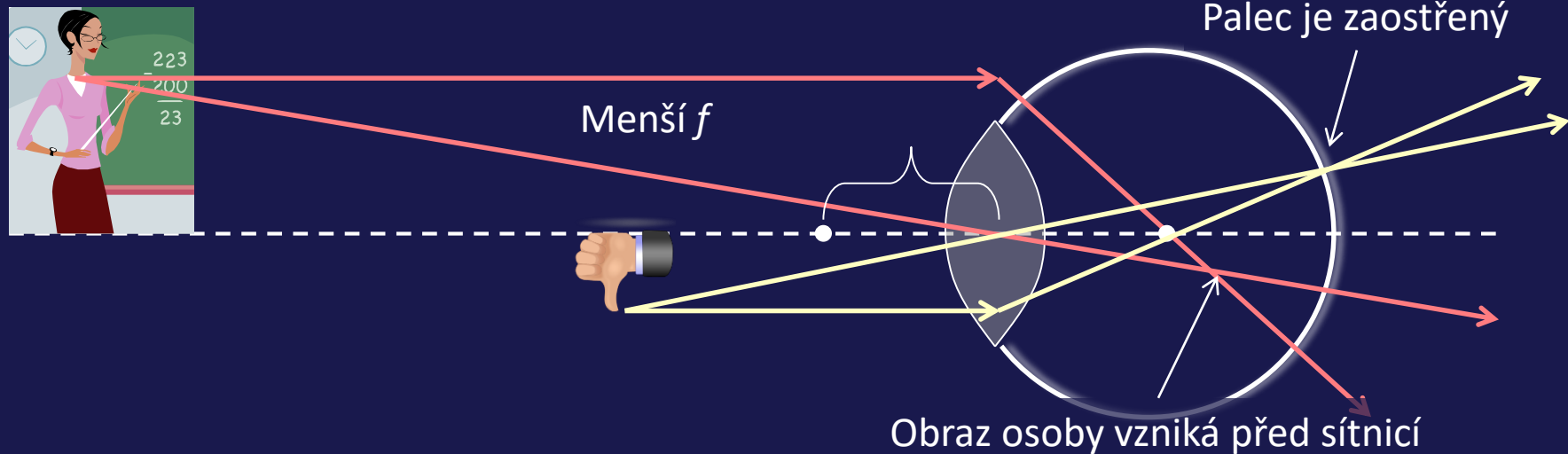
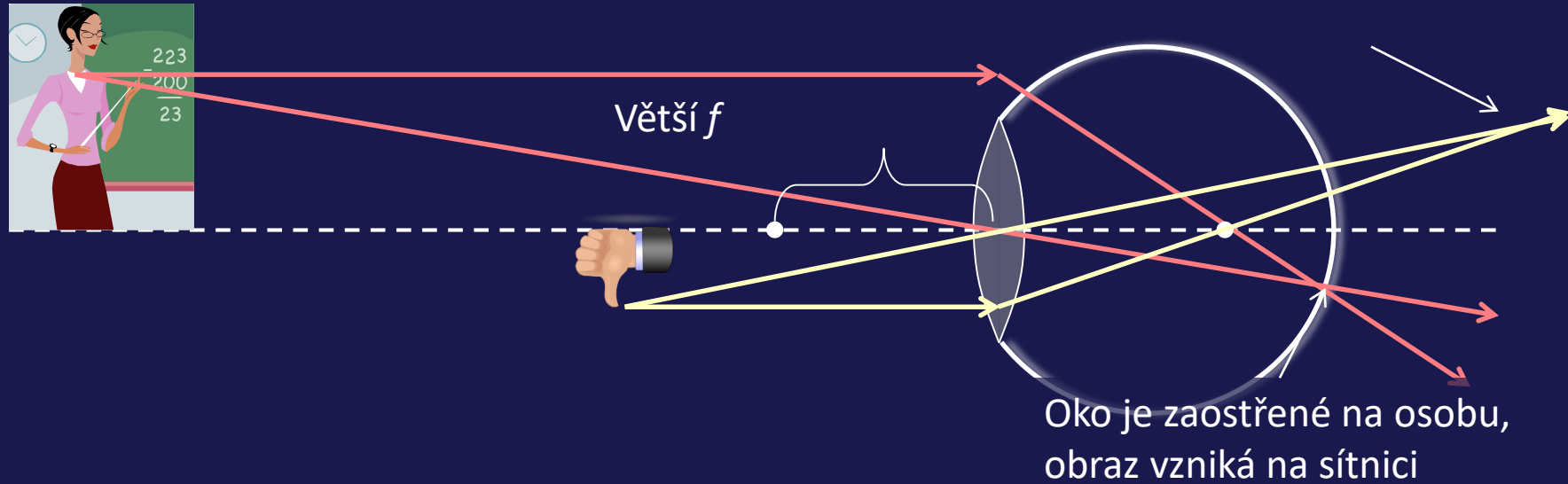


Svaly relaxují, meší zakřivení menší optická mohutnost, větší ohnisková vzdálenost

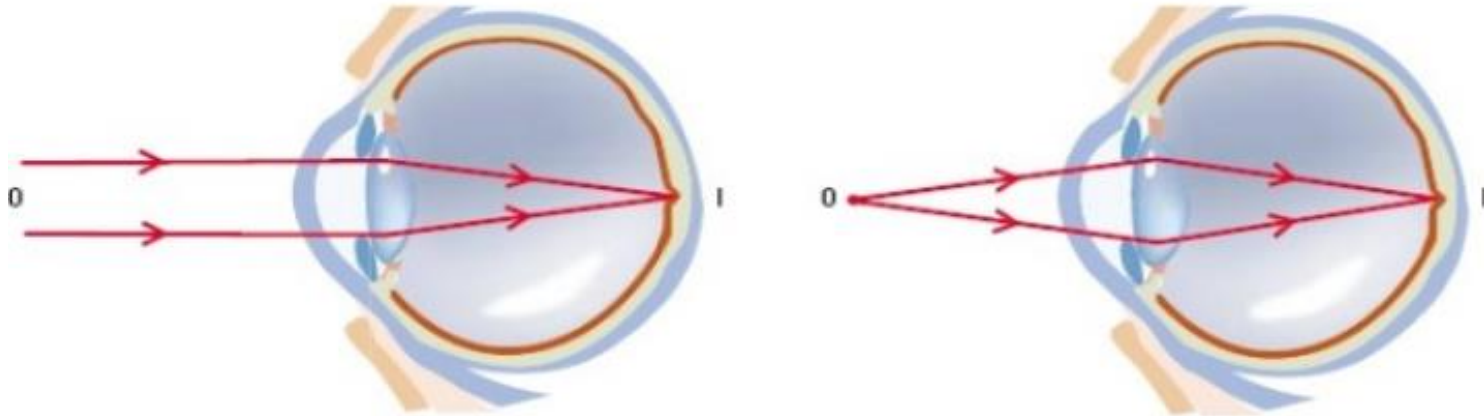


# Akomodace

Obraz palce vzniká za sítnicí



# Zaostření světelných paprsků



Světelné paprsky ze vzdálených objektů vstupují do oka paralelně  
Oko je neakomodované, obraz vzniká na sítnici

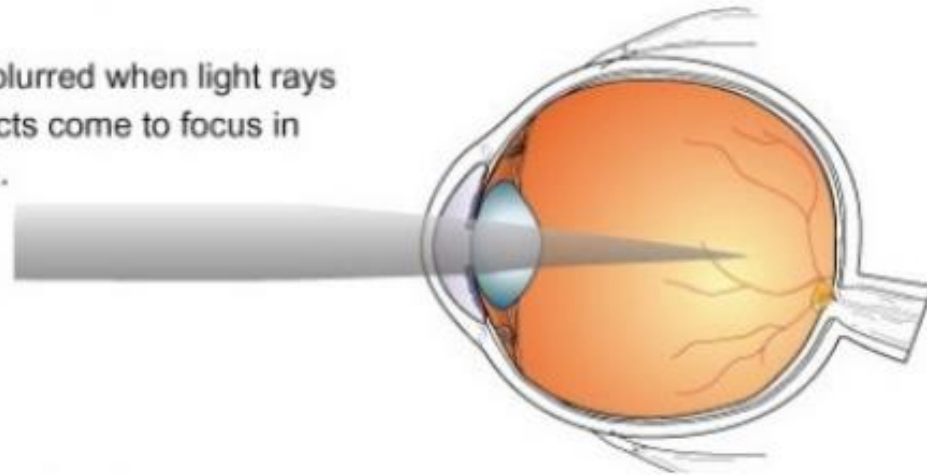
Světelné paprsky z blízkých objektů vstupují do oka jako  
divergentní svazek. Oční čočka akomoduje (zvětšuje zakřivení,  
aby vznikl obraz na sítnici)

# Oční vady – krátkozrakost

## Příčiny:

1. Oko je moc dlouhé
2. Rohovka a oční čočka v neakomodovaném stavu lámou paprsky příliš silně

Distant vision is blurred when light rays from distant objects come to focus in front of the retina.

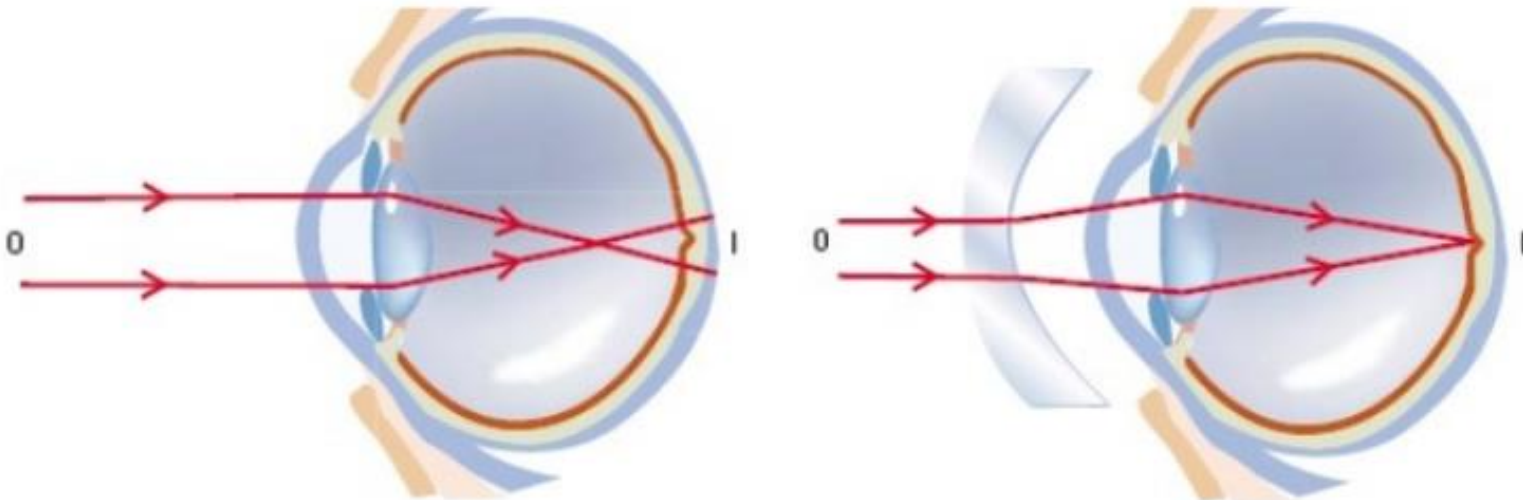




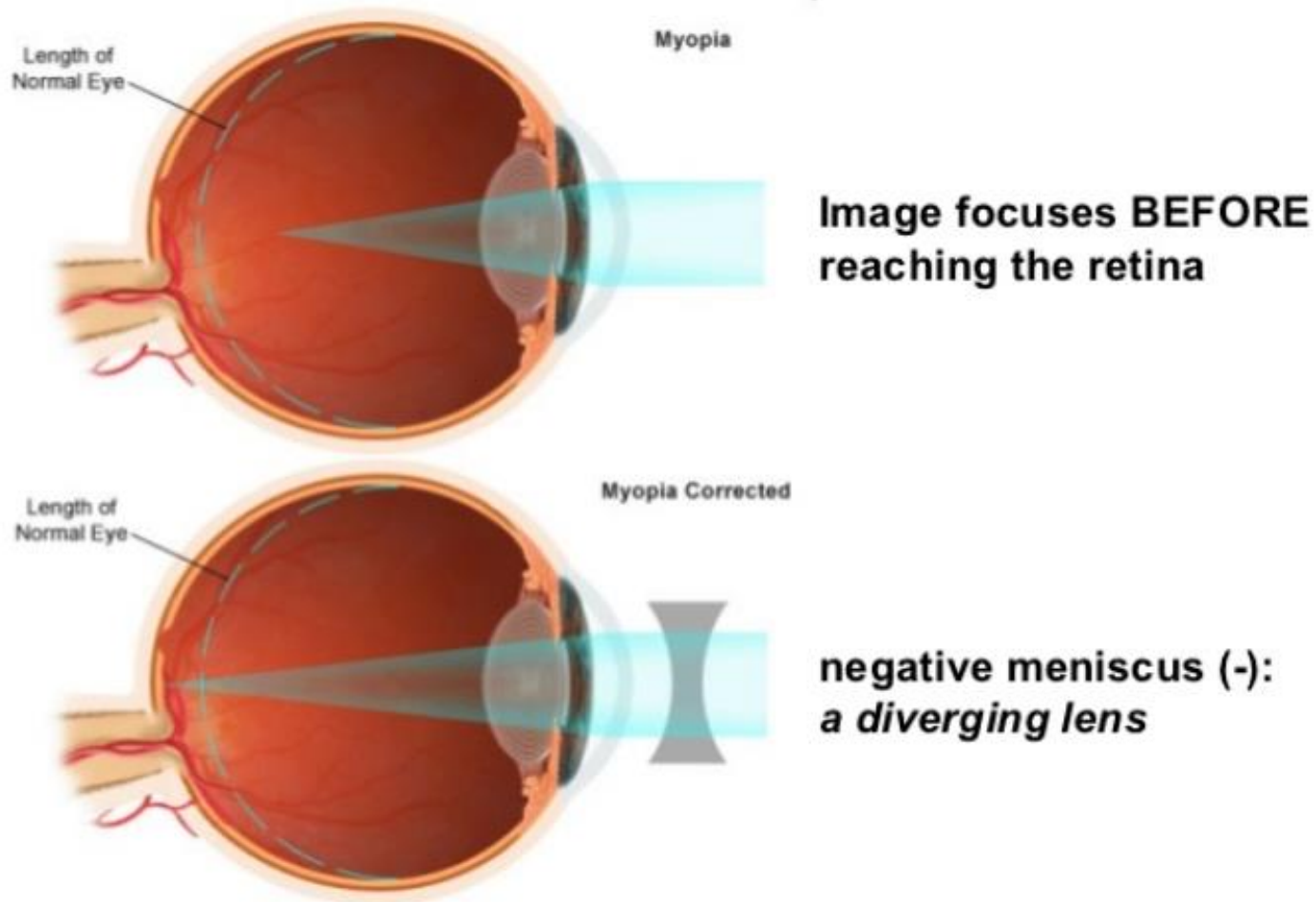
# Oční vady – krátkozrakost

Korekce pomocí rozptylné čočky

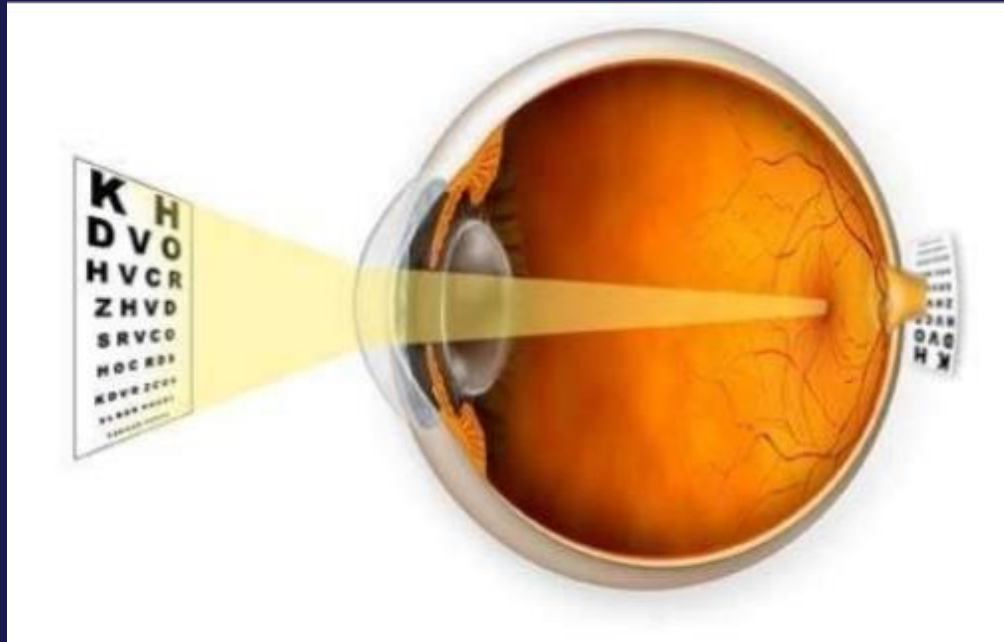
Po průchodu brýlemi nedopadají paprsky ze vzdáleného předmětu do oka rovnoběžně, ale mírně divergentně. V důsledku toho vzniká při stejné optické soustavě krátkozrakého oka po korekci obraz na sítnici



# Oční vady – krátkozrakost



# Oční vady – dalekozrakost



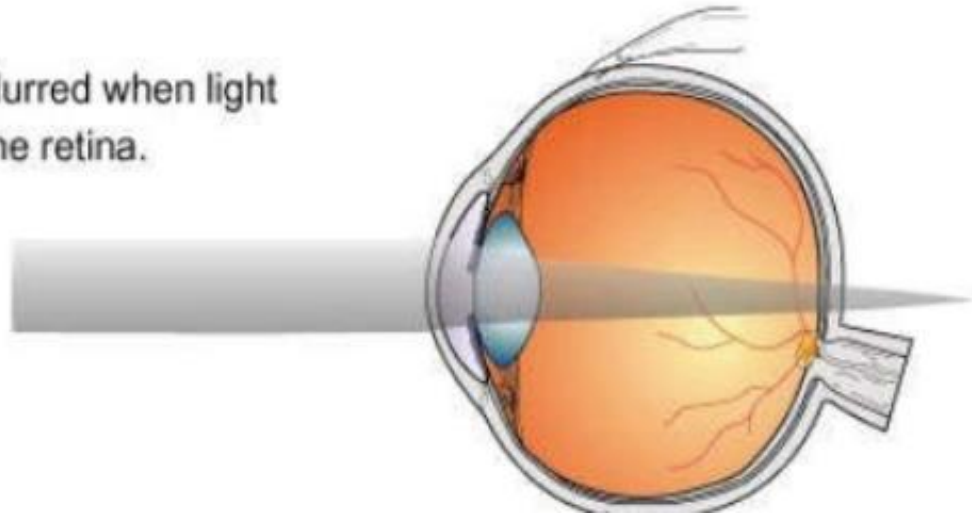
Neschopnost oka fokusovat světlo z blízkých objektů  
Vzdálené objekty oko vidí dobře  
Obraz blízkého předmětu vzniká za sítnicí

# Oční vady – dalekozrakost

## Příčiny:

1. Oko je moc krátké
2. Rohovka a oční čočka při maximálním možném zakřivení lámou paprsky příliš málo

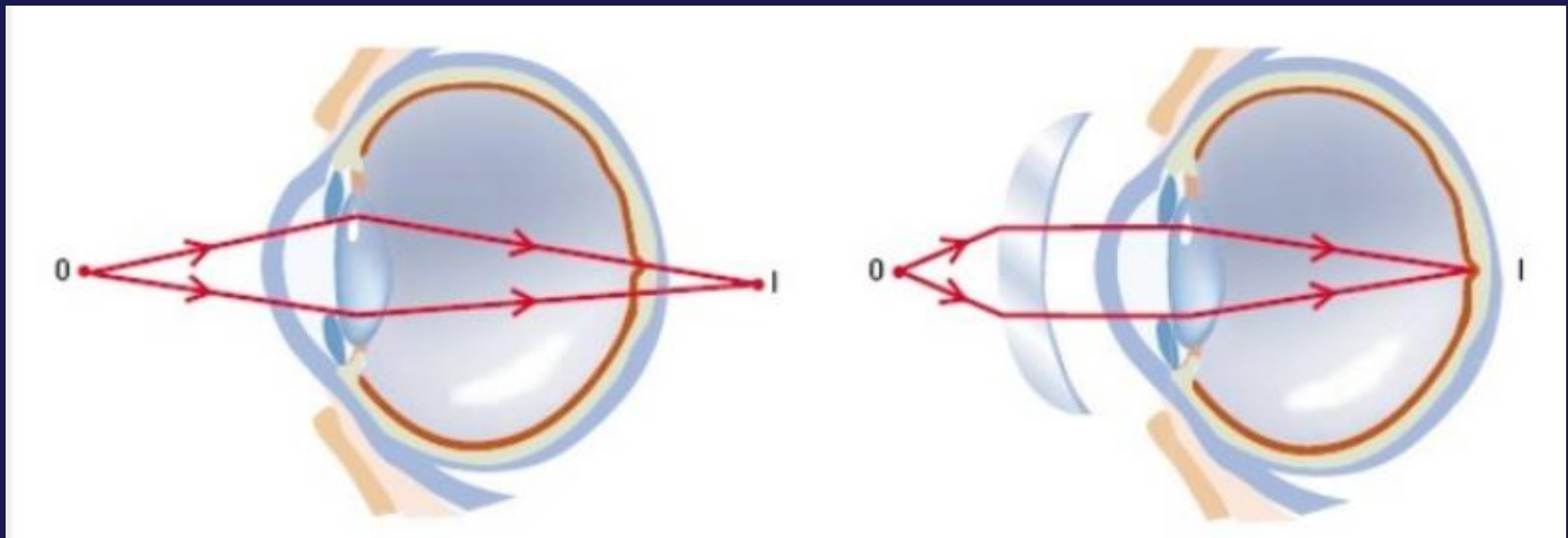
Distance vision is blurred when light rays focus behind the retina.



# Oční vady – dalekozrakost

Korekce pomocí spojných čoček

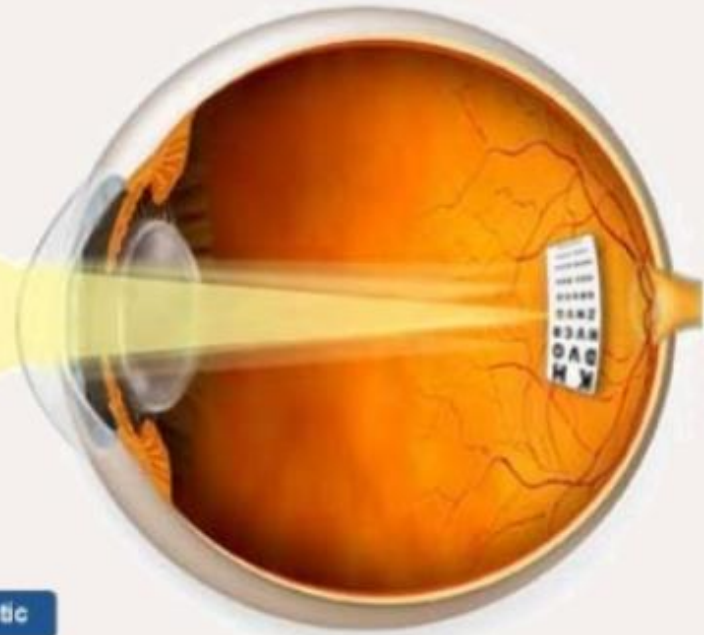
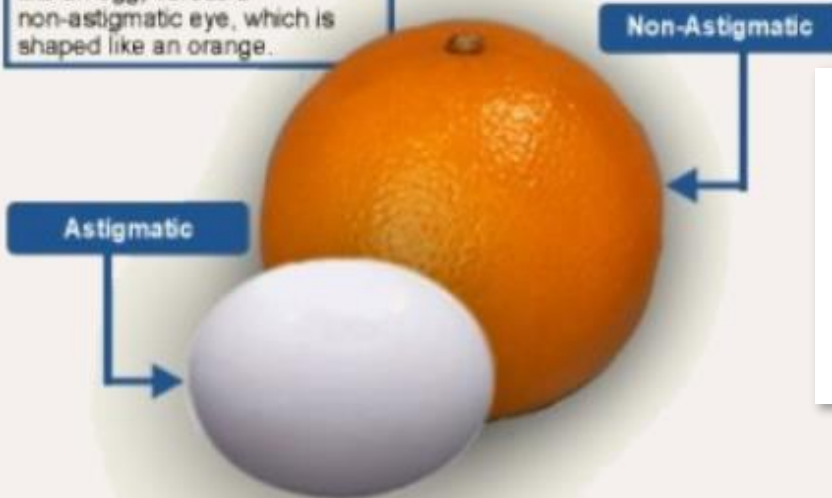
Po průchodu brýlemi dopadají paprsky z blízkého předmětu do oka méně divergentně. V důsledku toho optická soustava dalekozrakého oka zvládne po korekci zalomit paprsky tak, že obraz vznikne na sítnici.



# Oční vady – astigmatismus

## Astigmatism

In astigmatism, the front surface of the eye has an irregular shape like an egg, versus a non-astigmatic eye, which is shaped like an orange.



Příčina – tvar rohovky

# Struktura oka: sítnice

- Sítnice je detektorovou rovinou oka.
- Skládá se ze 3 základních vrstev, které mají funkce
  - Prokrvení a zásobování živinami (choroid)
  - Absorpce světla a konverze na elektrický signál (fotoreceptory)
  - Přenos signálu do mozku (nervové buňky)

Světlo



Vrstva s nervovými buňkami

Tyčinky a čípky (fotoreceptory)

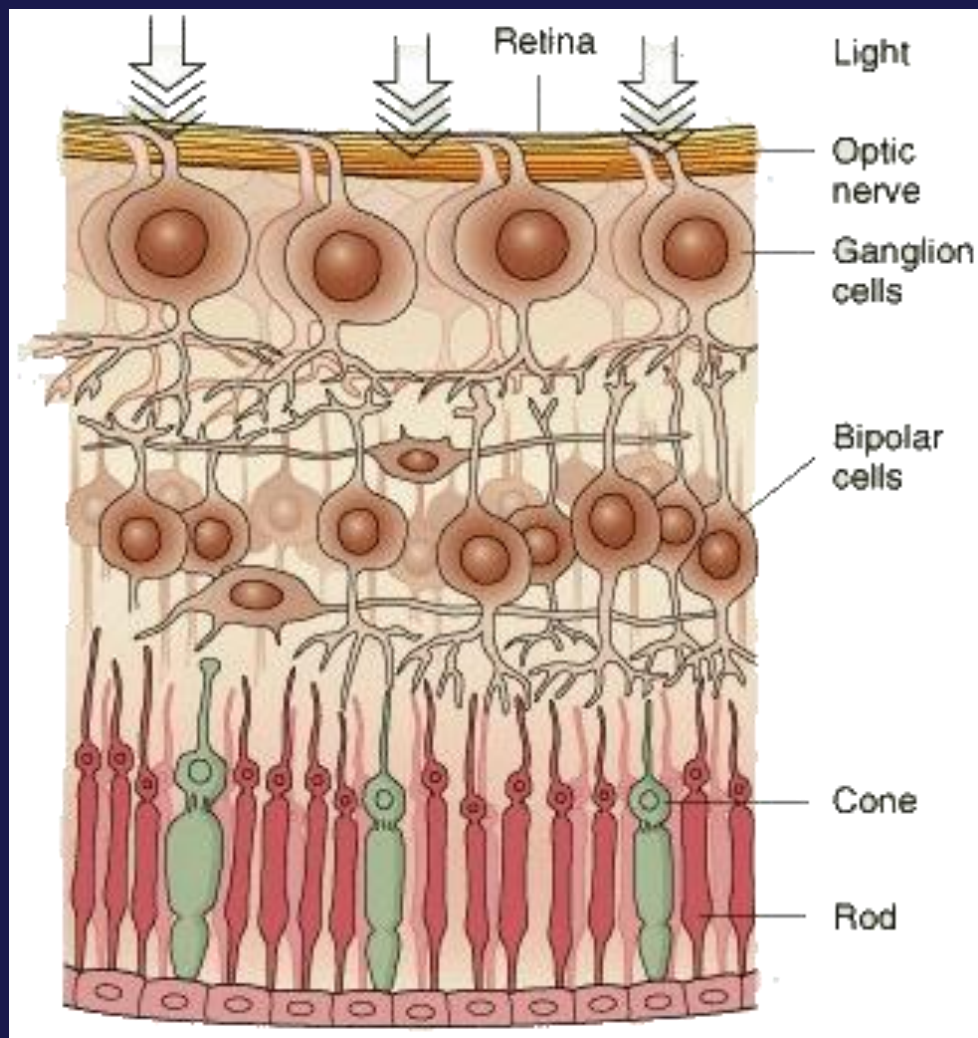
Choroid



Světlo



# Struktura sítnice



← nervové buňky

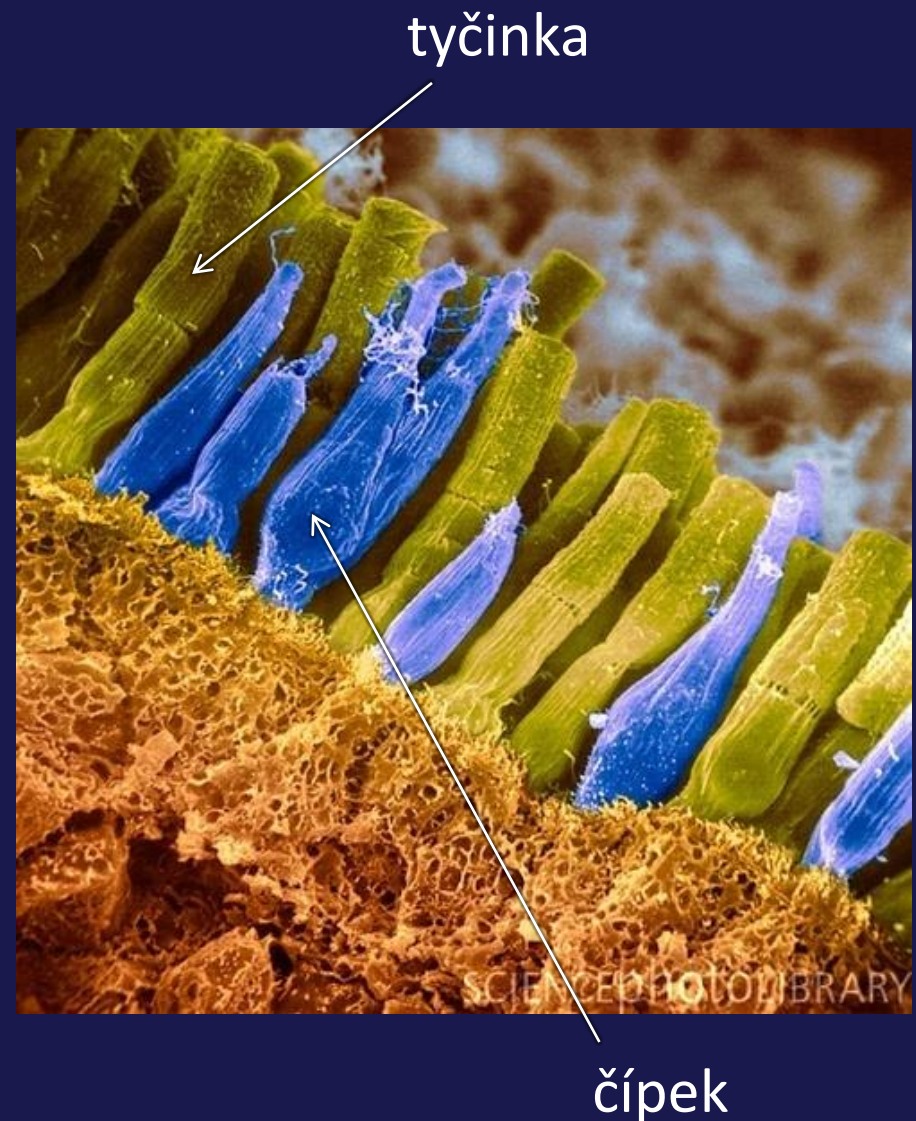
← Fotoreceptory

← Choroid



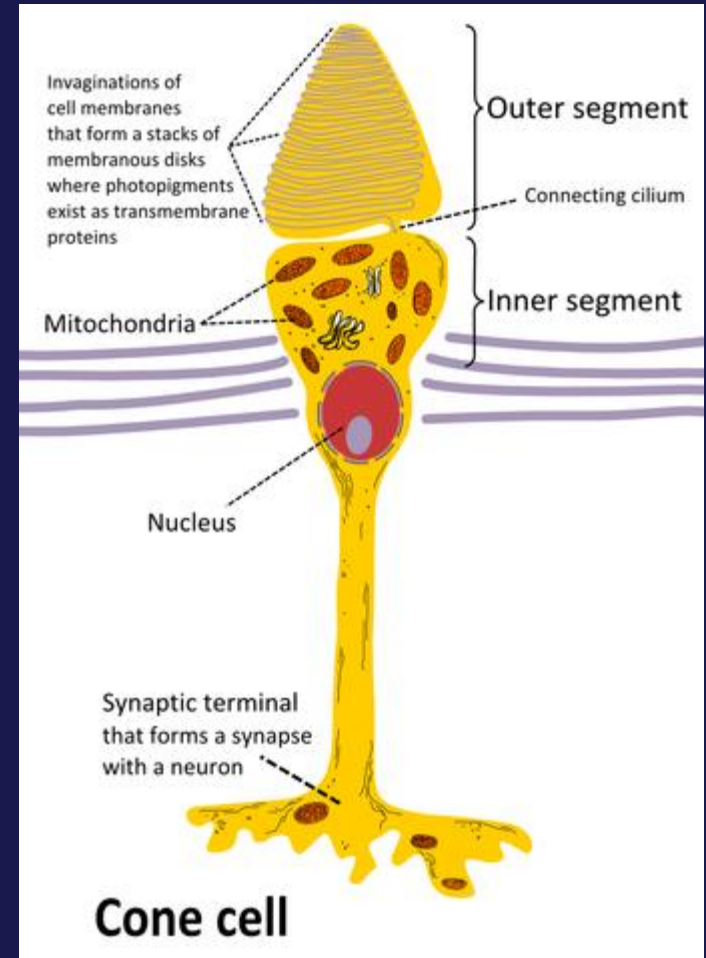
# Fotoreceptory: Tyčinky a čípky

- Světlo je detekováno a konvertováno na elektrický signál pomocí fotoreceptorů v sítnici. Jsou dva základní typy receptorů – tyčinky a čípky.
- Zobrazeno v pseudobarvách, tyčinky a čípky nemají ve skutečnosti jinou barvu



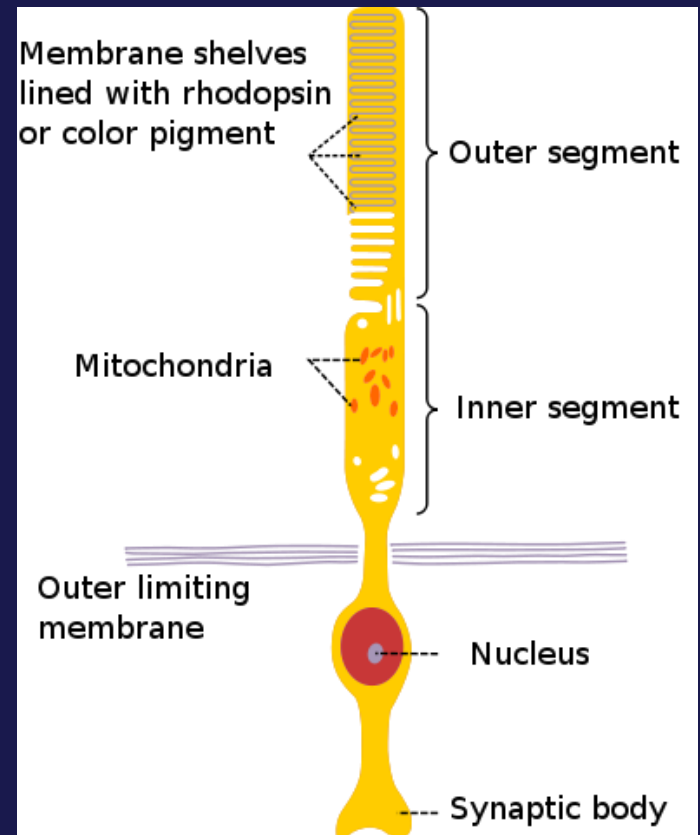
# Fotoreceptory: čípky

- Zodpovídají za detailní i barevné vidění
- Jsou soustředěny u středu sítnice, tato oblast se nazývá *fovea*
- Na sítnici je v průměru 5 milionů čípků



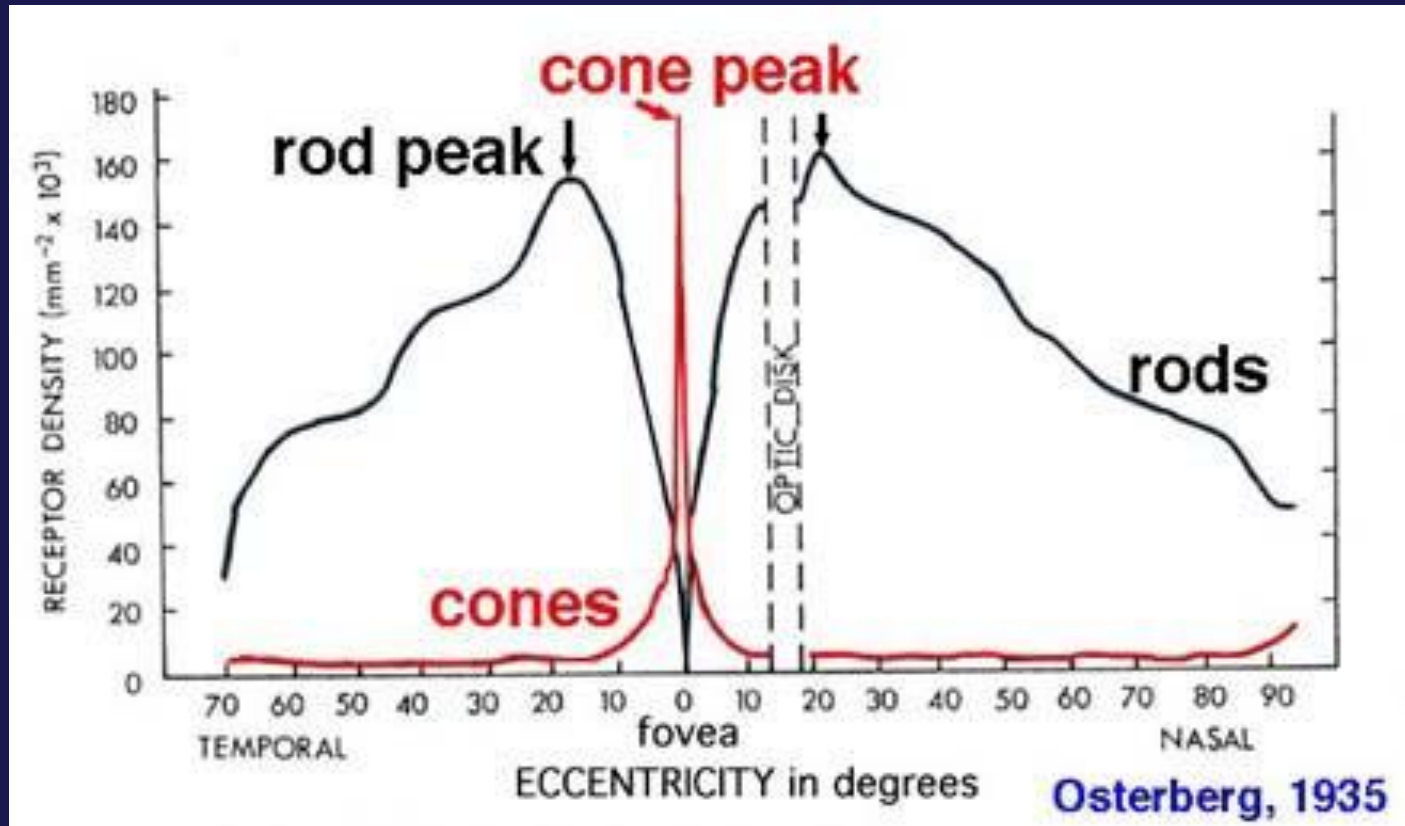
# Fotoreceptory : Tyčinky

- Odpovídají za vidění za nízkéhoosvětlení a periferní vidění
- Jsou přítomné všude kromě fovey
- Na sítnici je v průměru 125 milionů tyčinek



# Tyčinky a čípky

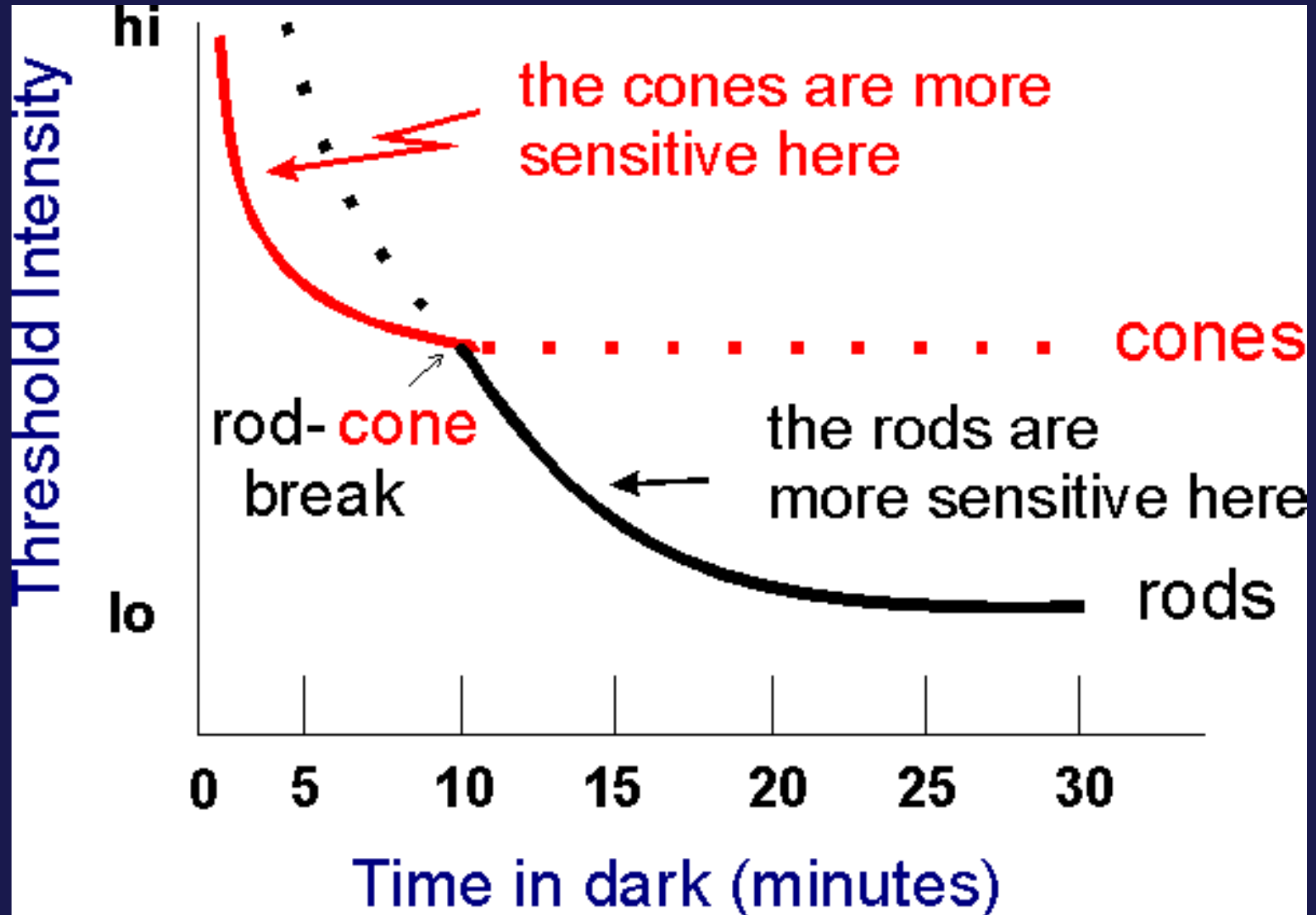
- Rozložení tyčinek a čípků na sítnici. Slepá skrvna je v důsledku spojení s optickým nervem



# Citlivost na světlo

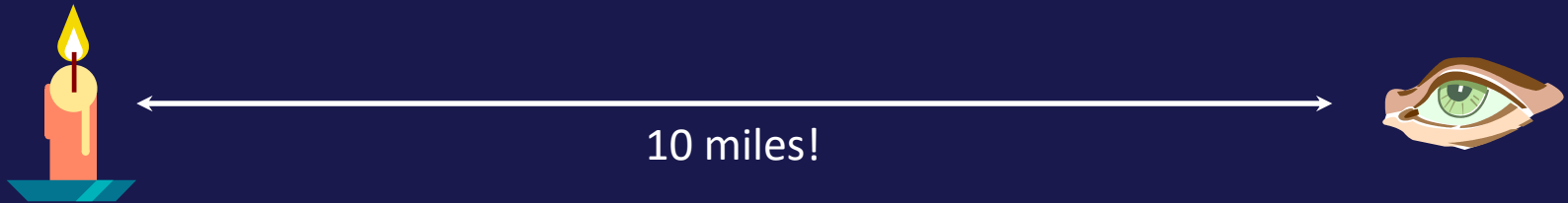
- Čípky:
  - Citlivé na jasně světlo, *fotopické* podmínky
  - Hustě rozloženy v oblasti fovea
  - Na jedno nervové vlákno připadá jen několik čípků
- Tyčinky:
  - Citlivé na nízkou intenzitu světla, *skotopické* podmínky
  - Rozloženy na celé sítnici
  - Na jedno nervové vlákno připadá až 1000 tyčinek.

# Adaptace na tmu



# Adaptace na tmu

- Asi p 30 minutách ve tmě je oko plně zadaptováno. Je vidět světlo svíčky na vzdálenost 10 mil.



- Adaptace na tmu je tedy velmi pomalá, ale umožňuje vidět světlo v širokém rozsahu intenzit.