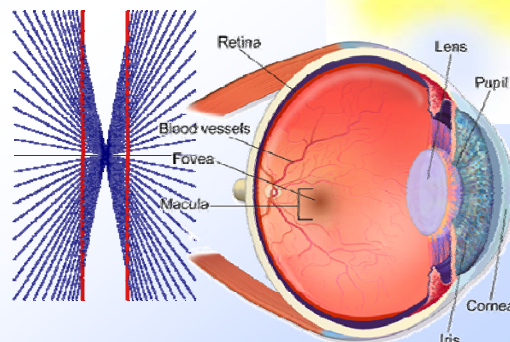


Fyzikální aspekty vidění...

aneb vidění je velká
biofyzikální věda...

Vladimír Kopecký Jr.

Fyzikální ústav
Matematicko-fyzikální fakulty
Univerzity Karlovy v Praze
kopecky@karlov.mff.cuni.cz



Kde se vzalo oko Evoluce vidění...



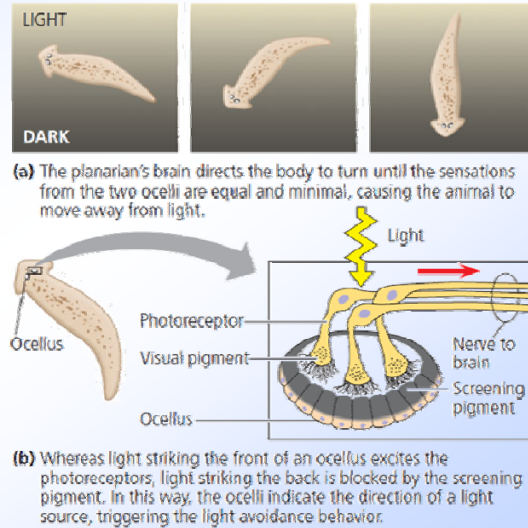
■ Oko se **vyvinulo** v evoluci **opakovaně** nejméně 40× až 60×
konvergentní evolucí

■ N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

Kde se vzalo oko

Evoluce vidění – bezobratlí...

- **Fotoreceptory** – čítí světla bz vidění u kroužkvců
- **Oční pohárek** – u ploštěnek, informace o intenzitě a směru světla bez vytvoření obrazu

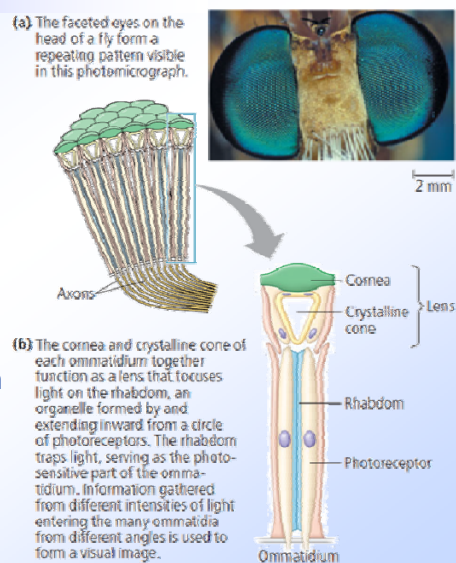


■ N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

Kde se vzalo oko

Evoluce vidění – bezobratlí...

- **Složené oko** – hmyz, korýši, mnohoštětinatí červi, mozaikový obraz → citlivost na pohyb 300 snímků/s (vs. Člověk 50 snímků/s)
- **Omatidia** (oční facety) – rohovka + krystalické tělísko ostří na rhabdom (pigmentové plátky na vnitřním kruhu receptorových buněk)
- **Vážky** – 30 000 omatidií s různým fokusem a funkcí
- **Oko s čočkou** – medúzy, mnohoštětinanci, pavouci a měkkýši, za pupilou čočka ostříčí na sítnici

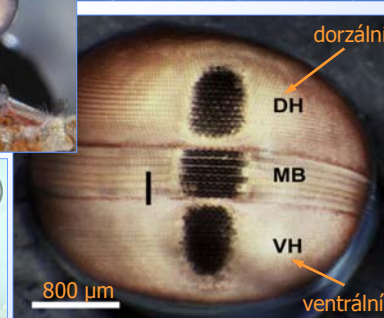


■ N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

Kde se vzalo oko

Evoluce vidění – bezobratlí...

- Vážky – 30 000 omatidií s různým fokusem a funkcí
- Strašek *Odontodactylus culifer* – 15 cm dravý koryš žijící na mělkém písčitém dně Indického a Tichého oceánu
- Laditelnost, devítibarevné čítí, detekce lineární i kruhové polarizace, jasu, monokulární stereopse...

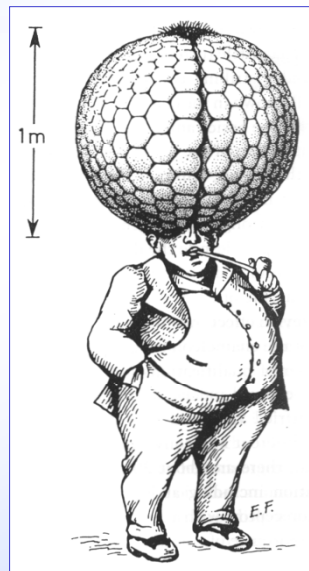


■ T.-H. Chiu, S. Kleinlogel, T. Cronin et al., Current Biology 18 (2008) 429–434.

Kde se vzalo oko

Evoluce vidění – bezobratlí

- **Složené oko** – rozlišení srovnatelné s lidským okem lze dosáhnout pouze zvětšením počtu omatidií → zcela nerealistické velikosti očí
- **Oko s čočkou** – medúzy, mnohoštětinanci, pavouci a měkčíši, za pupilou čočka ostříjí na sítnici

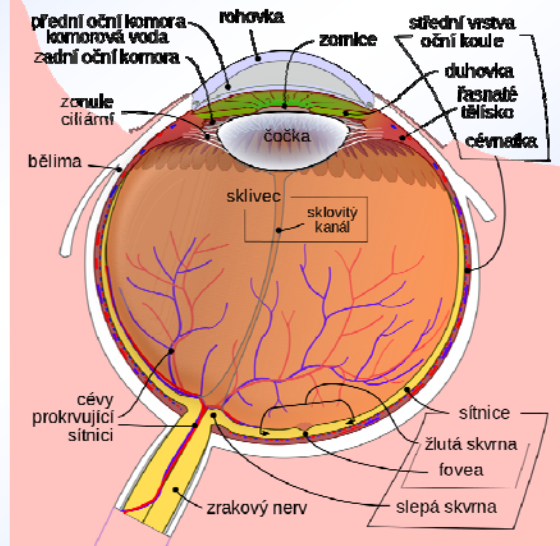


■ N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

Lidské oko

Anatomický popis

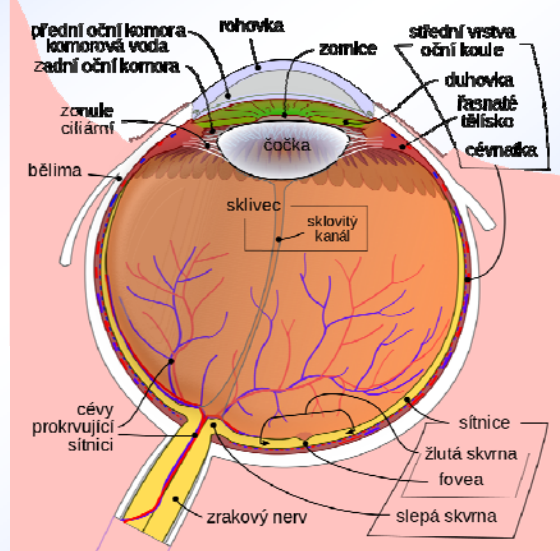
- **Sklera (bělma)** – tuhá bílá vnější vrstva oční koule → v předu přechází v **rohovku** – průhlednou nepohyblivou čočku
- **Choroidea (cévnatka)** – tenká vnitřní pigmentová vrstva → v předu přechází v **duhovku** → změna tvaru reguluje **pupilu** (vstupní aperturu)



Lidské oko

Anatomický popis

- **Řasnaté tělísko** – vytváří vodnatý komorový mok v pření komoře → ucpání kanálku → glaukom (zelený zákal)
- **Sklívec** – zadní komora vyplněna rosolem



Lidské oko

Optická soustava oka...

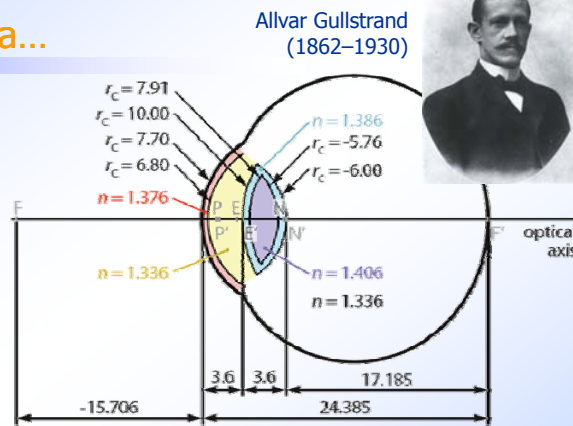
Indexy lomu n

- 1,00026 – vzduch
- 1,330 – voda
- 1,376 – rohovka
- 1,336 – komorová voda
- 1,337 – sklivce
- 1,406 – čočka střed
- 1,386 – čočka okraj

Optická mohutnost D

- Rohovka 43 (38–48) D
- Čočka 19 (17–26) D
- Suma 52–66 D

- Rohovka odpovídá za D
→ fixní → čočka je obklopena kapalinou s podobným n



Standardí **Přesné Gullstrandovo oko #1** založené na relaxovaném oku. Rozměry a poloměry křivosti udány v mm.

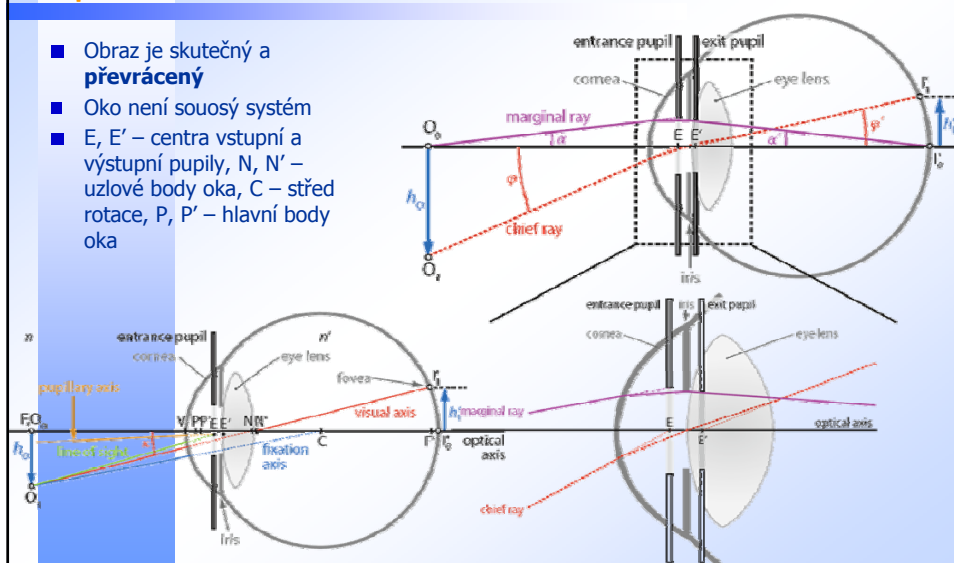
- **A. Gullstrand** – švédský oftalmolog, za aplikaci fyzikálních a matematických metod při studiu oka obdržel Nobelovu cenu 1911, zdokonalil oftalmoskop

■ M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Optalmology and Optometry, VCH 2014.

Lidské oko

Optická soustava oka

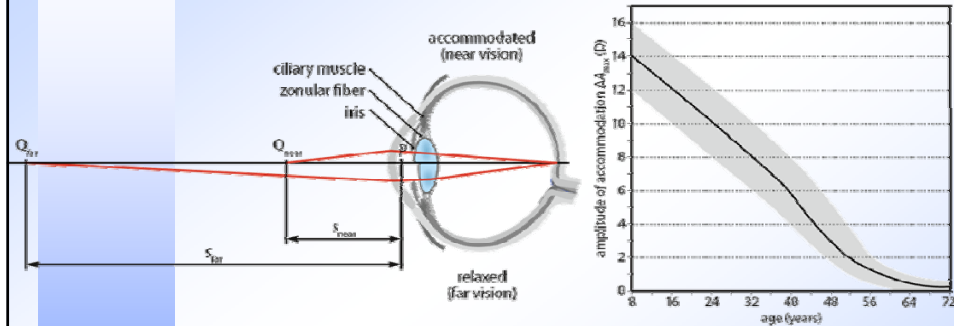
- Obraz je skutečný a **převrácený**
- Oko není souosý systém
- E, E' – centra vstupní a výstupní pupily, N, N' – uzlové body oka, C – střed rotace, P, P' – hlavní body oka



■ M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Optalmology and Optometry, VCH 2014.

Optická soustava oka

Mechanismus akomodace

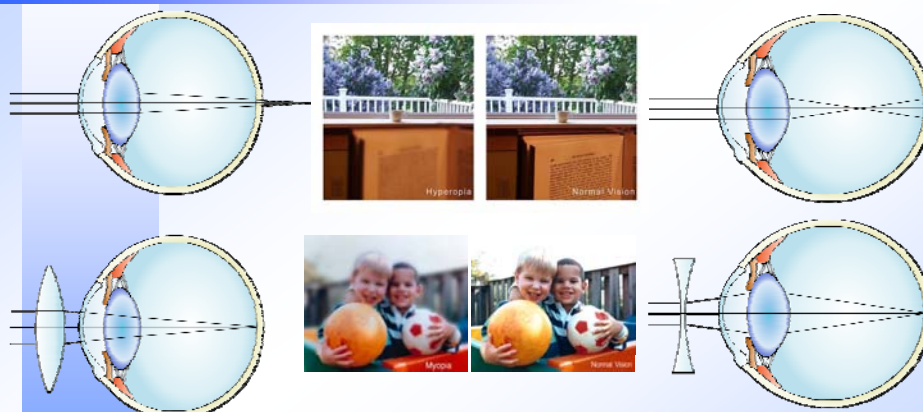


- **Vzdálený bod** (nekonečno) → relaxace ciliárních svalů → napnutí zonulárních vláken → zploštění čočky → nižší D
- **Blízký bod** (~20 cm) → kontrakce ciliárních svalů → uvolnění zonulárních vláken → sféritější čočka → vyšší D
- **Akomodační šíře** $\Delta A = 1/S_{\text{near}} - 1/S_{\text{far}}$ klesá s věkem → v mládí 10–15 cm (až 16 D)

■ M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Optalmology and Optometry, VCH 2014.

Optická soustava oka

Vady optické soustavy...

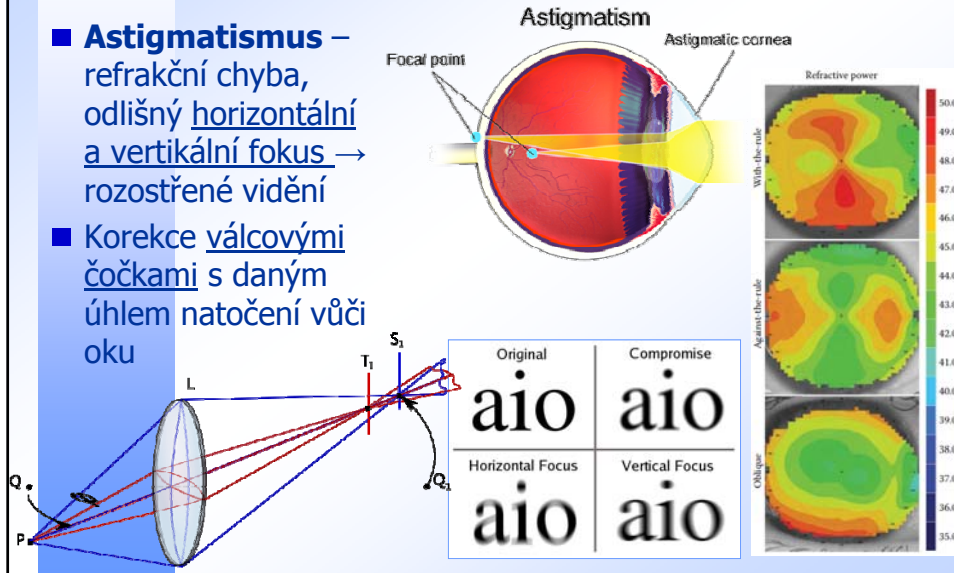


- **Dalekozrakost (hyperopie)** – kratší osa, větší optická mohutnost čočky → blízký bod > 20 cm → zaostření i sbíhavých svazků
- **Krátkozrakost (myopie)** – delší osa, větší optická mohutnost čočky → vzdálený bod z nekonečna do < 1,5–1,0 m

Optická soustava oka

Vady optické soustavy...

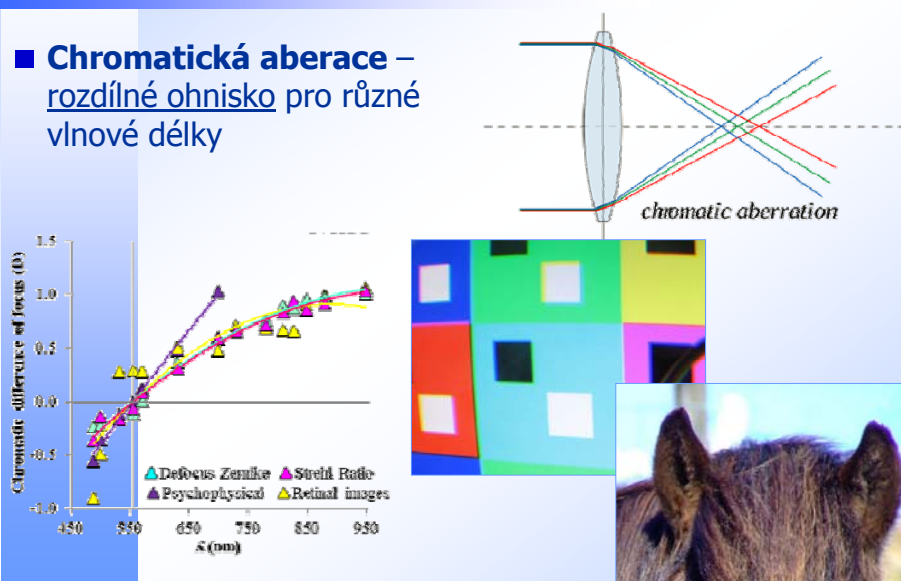
- **Astigmatismus** – refrakční chyba, odlišný horizontální a vertikální fokus → rozostřené vidění
- Korekce válcovými čočkami s daným úhlem natočení vůči oku



Optická soustava oka

Vady optické soustavy...

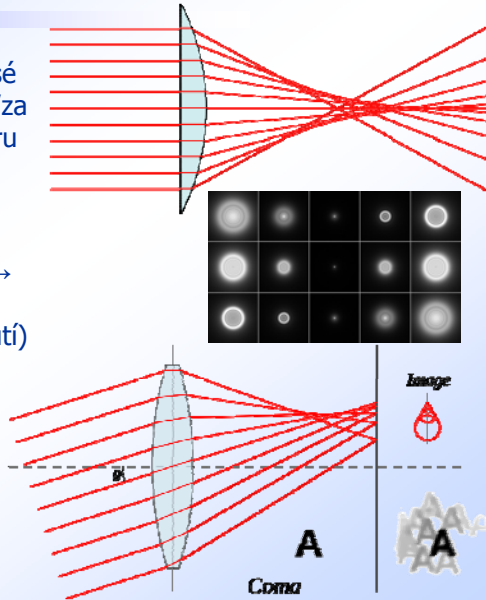
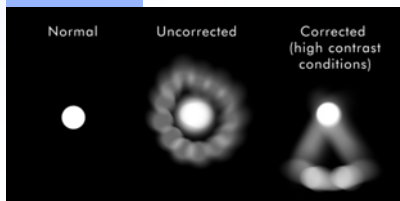
- **Chromatická aberace** – rozdílné ohnisko pro různé vlnové délky



Optická soustava oka

Vady optické soustavy

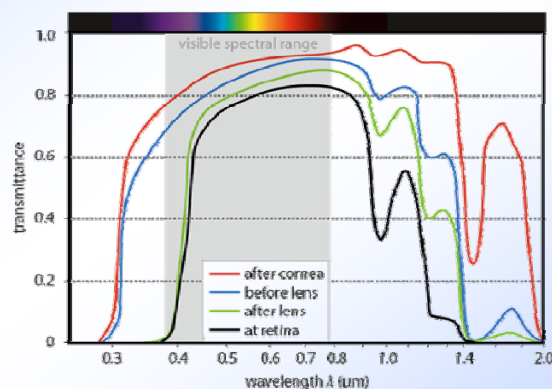
- **Sférická aberace** – mimo-osé paprsky jsou fokusovány před/za ohnisko vlivem sférického tvaru čočky
- **Koma** – nedokonalostí čočky dochází k distorzi obrazu → obraz má ohon jako kometa → keratokonus – onemocnění rohovky (mnohočetné vyklenutí) → nutné operovat



Optická soustava oka

Spektrální vlastnosti...

- Dominantní absorpce vody >600 nm
- Pro vlnové délky <600 nm absorpce proteinů a chromoforů
- Totální absorpce pod 400 nm a nad 1400 nm
- Propustnost >0,6 pro 420–920 nm



Spektrální propustnost po průchodu rohovkou (červeně), komorovou vodou (modře), čočkou (zeleně) a sklivcem (černě)

■ M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Ophthalmology and Optometry, VCH 2014.

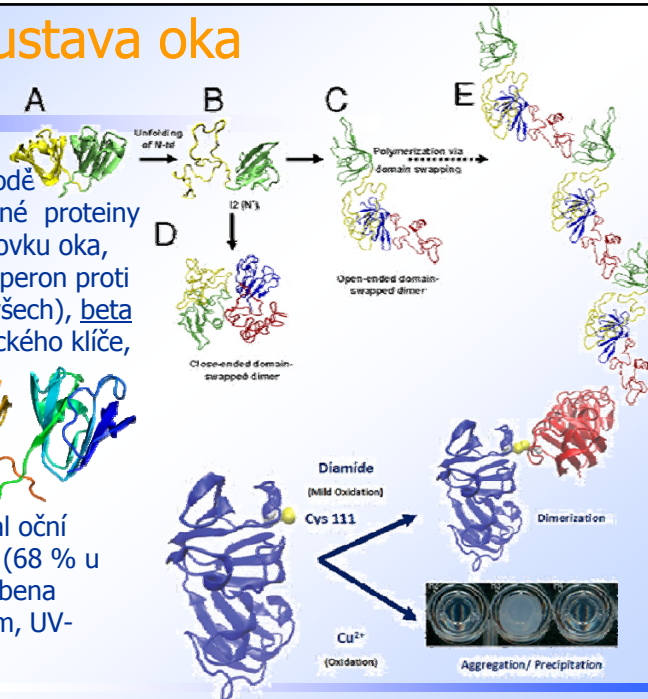
Optická soustava oka

Čočka

- **Krystaliny** – ve vodě rozpustné, průhledné proteiny tvořící čočku a rohovku oka, alfa – agregát, chaperon proti precipitaci (50 % všech), beta a gamma – motiv řeckého klíče, dimer



- **Šedý zákal** – zákal oční čočky, vlivem stáří (68 % u 80letých) → způsobena oxidativním stresem, UV-expozicí, úrazem



■ P. Das et al., PNAS 108 (2011) 10514–10519. Ramkumar et al. BBA 1864 (2018) 3595–3604.

Šedý zákal

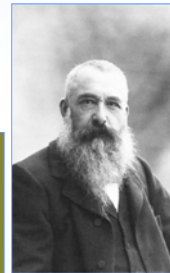
Malířství – Claude Monet...

- 1913 – konzultace s Dr. R. Leibachem v St. Thomas v Londýně (20/50) → chybná percepce barev → 1918 číslování tub (20/100)
- 1923 – operace šedého zákalu na pravém oku (20/200) → cyanopsie, použití brýlí špatné kvality → destrukce pláten z předchozího období
- 1924 – perfektní brýle od Zeisse → 6/9 korekce +10/+4 D, zakrývání levého oka



Posun barev a rozostření vlivem šedého zákalu (20/200)

U lekninů v Giverny 1900 (spolu s G. Hoschedé, L. Butler, Mme J. Durand-Ruel, G. Durand-Ruel,)



Claude Monet (1840–1926), foto Nadar 1899



■ A. Gruener, Brithis J. Gen. Pract. 64 (2015) 254–255. M. F. Marmor Arch. Ophthalmol 124 (2006) 1764.

Šedý zákal

Malířství – Claude Monet...

- A) fotografie skutečnosti
- B) obraz před obtížemi 1899, Natl. Gallery, Londýn (olej 89×92 cm)
- C) Simulace – střední šedý zákal
- D) Simulace – progresivní šedý zákal 20/200

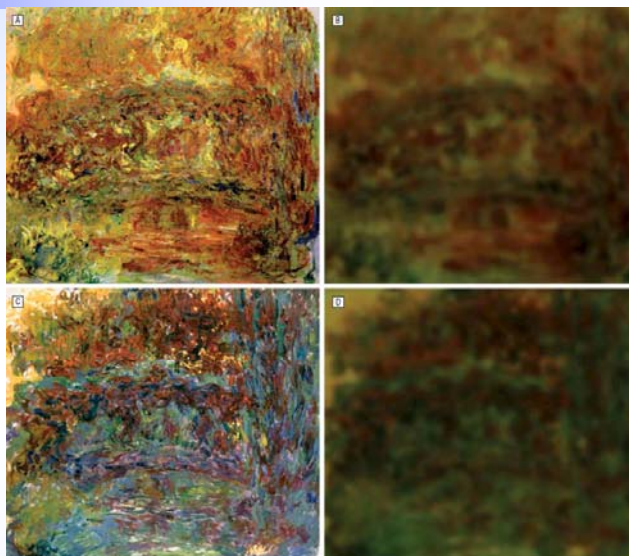


■ M. F. Marmor, Arch. Ophthalmol 124 (2006) 1764–1769.

Šedý zákal

Malířství – Claude Monet...

- A) Japonský most v Giverny 1918–1924 – s progresivním šedým zákalem do oranžové
- C) Japonský most v Giverny 1918–1924 – šedým zákalem do modra
- B) Simulace – progresivní šedý zákal 20/200
- D) Simulace – progresivní šedý zákal 20/200, cf. B & D se shodou barev vs. A & C



■ M. F. Marmor, Arch. Ophthalmol 124 (2006) 1764–1769.

Šedý zákal

Malířství – Claude Monet

- A) Lekniny kreslené se středním šedým zákalem 1915 (olej 130×150 cm, Musée Marmottan, Paříž)
- B) stejný obraz se simulovaným šedým zákalem
- C) Ráno se smuteční vrbou – plátno dokončené po operaci šedého zákalu 1915–1926 (olej na plátně 200×425 cm, Musée de l'Orangerie, Paříž)

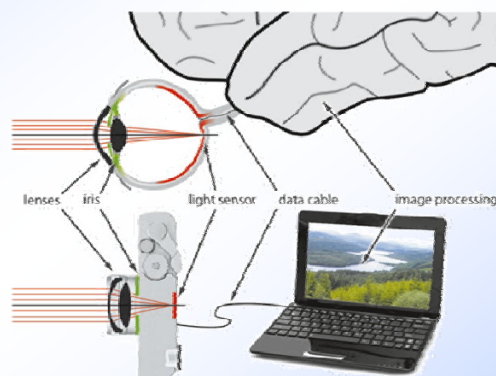


■ M. F. Marmor, Arch. Ophthalmol 124 (2006) 1764–1769.

Jak funguje vidění

Analogie s kamerovým systémem

- **Oko předzpracovává** signál neurony oční sítnice → sítnice je vychlíněním mezimozku
- **Sítnice oka morčete** (10^5 ganglionových buněk): tok informace 0,83 Mb/sec, resp. 0,1 MB/sec
- **Lidské oko** – 10× více ganglionů, tj. kolem 1 MB/sec
- **Nejvíce informací přijímáme zrakem!**
- **Sítnice obsahuje 70 % receptorů v těle!**



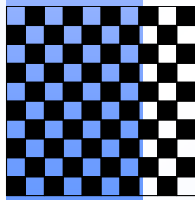
Sítnice na rozdíl od CCD předzpracovává signál. V analogii je oko CDD se zpětným osvětlením.

■ M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Optalmology and Optometry, VCH 2014.

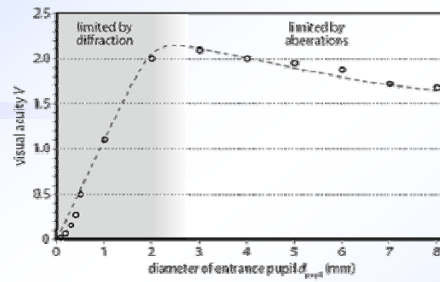
Ostrost zraku...

Fyzikální princip

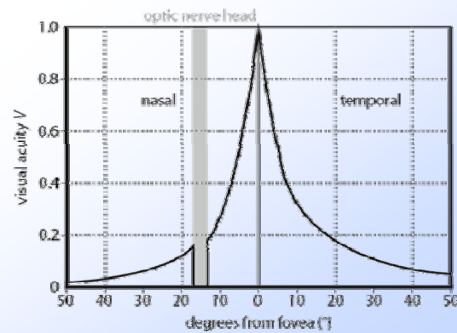
- **Úhlové vidění** 130° vertikálně, 160° horizontálně
- **Žlutá skvrna** 6–7° → max. rozlišení 1' (extrém až 30") → se vzdáleností klesá (60° 50× horší)
- Průměr čípků je 4,9 μm.
- Zdravé oko rozezná dva body tehdy, když jsou od sebe vzdáleny nejvíce o 1'



10×10 polí,
1,75 cm ze
vzdálenosti
6 m → 1'



Závislost ostrosti vidění na vstupní pupile



Závislost ostrosti vidění na vzdálenosti od fovea

Ostrost zraku...

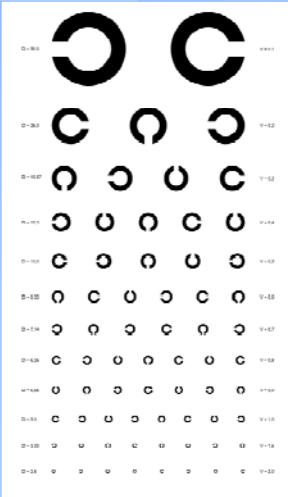
Snellenova tabule

- **Diagnostická pomůcka pro určení zrakové ostrosti**
- 1862 navrhl holandský oftalmolog Hermann Snellen (1834–1908)
- Standardní vzdálenost 6 m (20 ft)
- **Ostrost udávána zlomkem** – pacient přečetl / normální vzdálenost
- Normální 6/6 (20/20) → optotyp = 5', mezery & duktus = 1'
- 3 řádky výše → 2× velikost optotypu
- Písmena jsou zvláště volena (C, D, E, F, L, O, P, T, Z) → není standardní font
- Duktus = tloušťce mezer mezi linkami a mezere v C
- Výška & šířka optotypu = 5× duktus



E	1	20/200
F P	2	20/100
T O Z	3	20/70
L P E D	4	20/50
P E C F D	5	20/40
E D F C Z P	6	20/30
F E L O P Z D	7	20/25
P E F P O T E C	8	20/20
L E F O P P O T	9	
T O P L T C D O	10	
P E R L O C P T P	11	

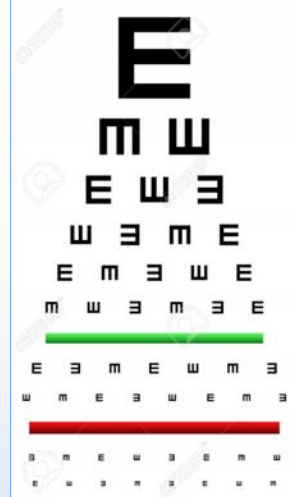
Ostrost zraku ... a další optotypy



Landotovo C/prstenec (též japonský vizuální test) 1879

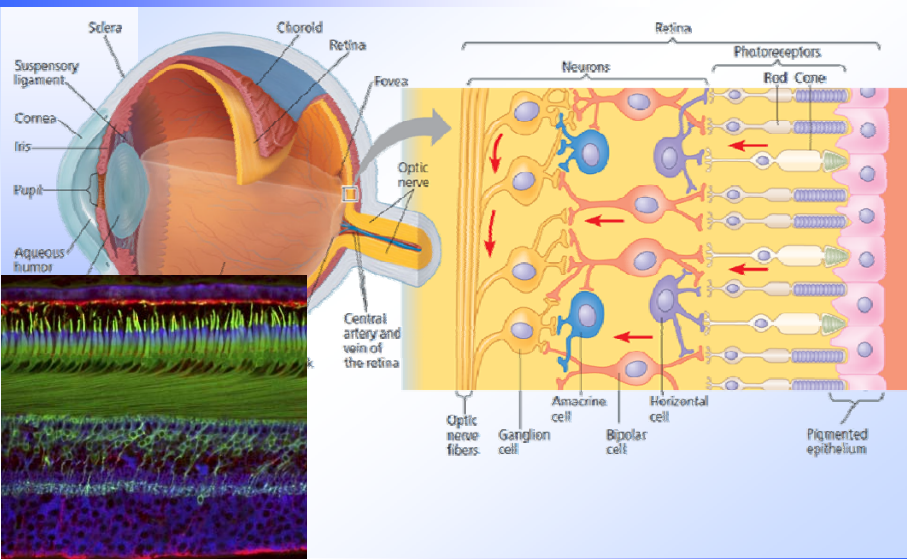


Golovinova-Sivtseva tabule pro azbuku z roku 1923



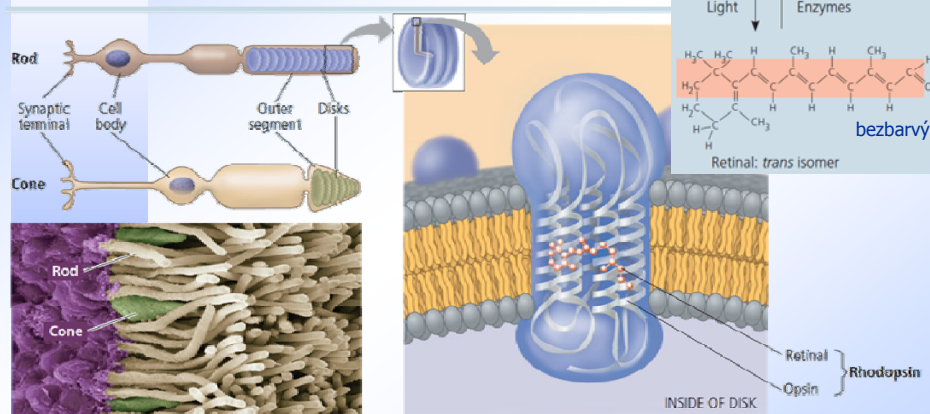
E-tabulka používaná v dětské oftalmologii

Barevné vidění Sítnice...



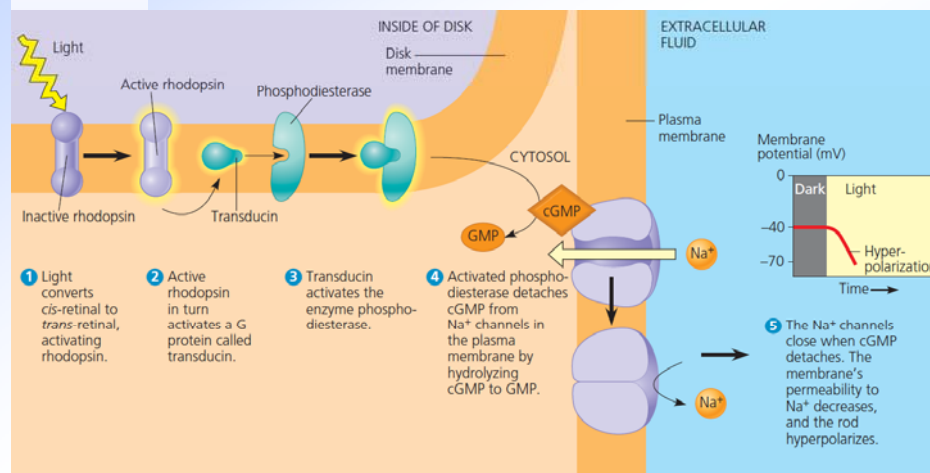
■ N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006. N.C.I. Ortuño-Lizarán – Nikon Sm.W.

Barevné vidění Sítnice...



- **Tyčinky** – 125 miliónů, vnímají intenzitu světla
- **Čípky** – 6 milionů, 150 000/mm² v makule, mírně vyšší citlivost pro barvu
- N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

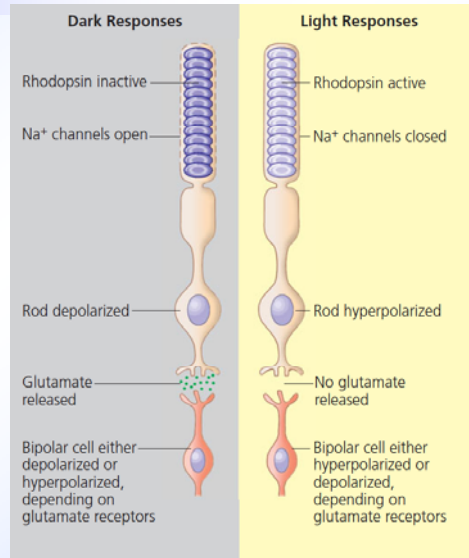
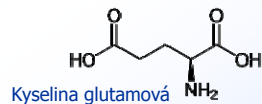
Barevné vidění Sítnice...



- N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

Barevné vidění Sítnice...

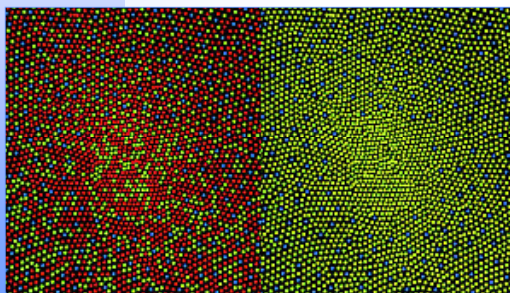
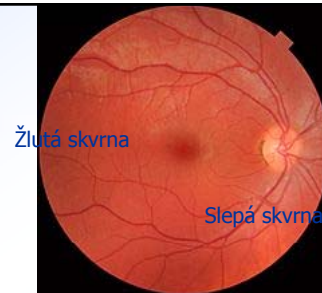
- **Tma** → rhodopsin neaktivní → membrána propustná pro Na^+ → depolarizovaná → uvolňuje glutamát jako neurotransmiter → inhibice/excitace u bipolární buňky
- **Světlo** → rhodopsin aktivní → Na^+ kanály uzavřeny → hyperpolarizace membrány → zastavení uvolňování glutamátu → excitace/inhibice u bipolární buňky



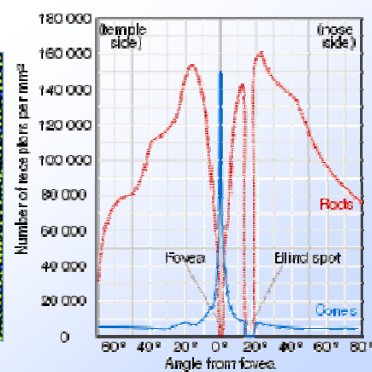
■ N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

Barevné vidění Sítnice...

- **Žlutá skvrna (macula lutea)** – oblast nejostřejšího vidění, 5,5 mm
- **Fovea** – jamka o průměru 0,5 mm, hustě pokryta čípků



Distribuce tyčinek a čípků (vlevo normální, vpravo protanotopie) – fovea téměř neobsahuje modrý opsin

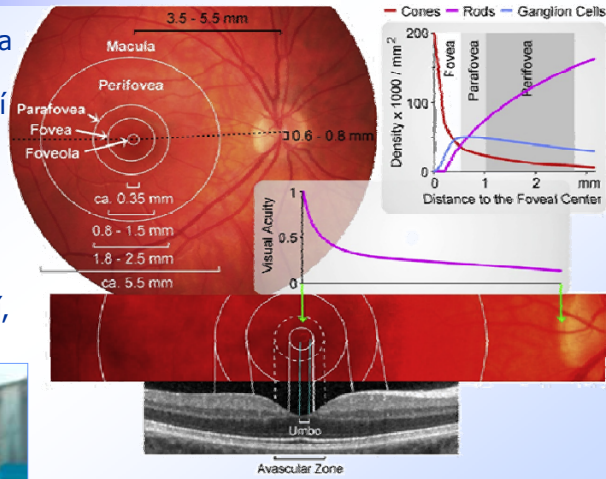


Distribuce tyčinek a čípků

Barevné vidění

Sítnice...

- **Fovea** – odpovědná za vysoké rozlišení v obrazu, barevné vidění
- Nerovnoměrné obrazové pole
- **Makulární degenerace** – progresivní ztráta centrální oblasti vidění, možné halucinace



■ A. Briggmann et al., Progress in Retinal and Eye Research 66 (2018) 49–84.

Makulární degenerace

Malířství – Edgar Degas

- 1870 – pečlivá detailní kresba
- 1880 – potíže se zrakem (20/40–50) → ztráta detailů, postupné zvýraznění stínů → impresionistická vize důsledkem onemocnění
- 1890 – zhoršení na 20/100–200 → kreslí pastely až do roku 1912

Nahoře originální plátna, dole simulovaný pohled skrze makulární degeneraci



1886, 20/50

1889–1900, 20/100

1905, 20/300

■ M. F. Marmor, Arch. Ophthalmol 124 (2006) 1764–1769.

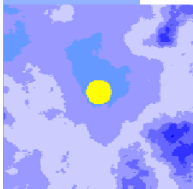
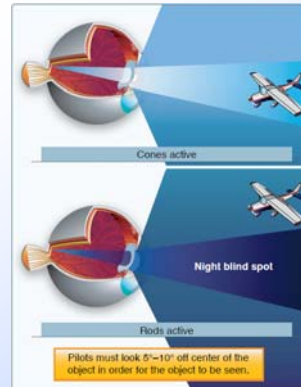
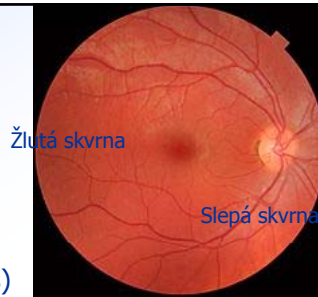
Edgar Degas
(1834–1917),
foto 1860



Barevné vidění

Slepá skvrna

- **Denní slepá skvrna** – vyústění zrakového nervu skrze sítnici bez fotoreceptorů
- Umístěna 12–15° ve směru spánku a 1.5° pod horizontem s rozměrem 7.5°×5.5° (v×š)
- Objevna 1660 francouzským fyzikem Edme Mariottem (1620–1684)
- **Noční slepá skvrna** – důsledek absence tyčinek ve fovee a jejich redukce v makule
- Lze užívat k odhadu rozměrů na obloze

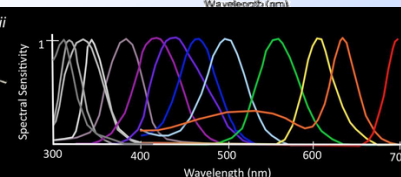
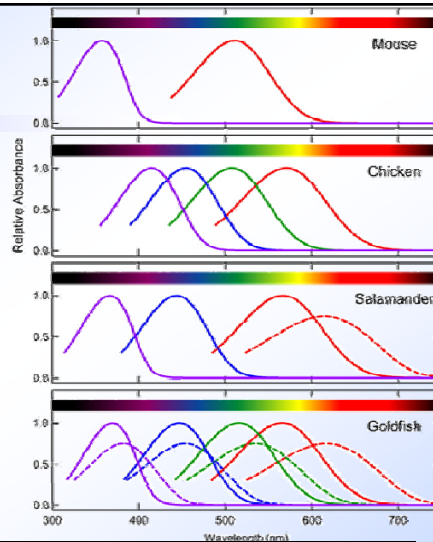


1 2 3 4 5 6
Pohled na 3 → hledání vzdálenosti kdy bod zmizí

Barevné vidění

Evoluce a princip...

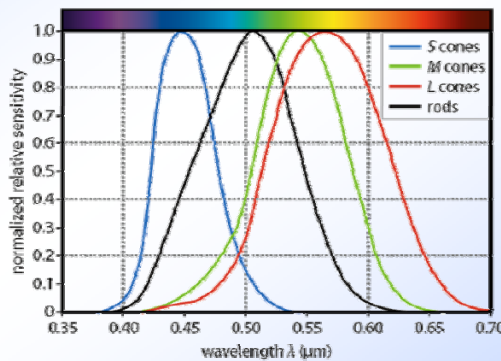
- **Ryby a plazi** – trichromatické vidění
- **Ptáci a želvy** – tetrachromatické vidění
- **Strašek** – třináct různých opsinů, min. devítibarevné vidění
- **Savci** – dichromatické vidění dané nočním životem v dobách dinosaurů → získání trichromacie → vačnatci v Austrálii (ne v J. Americe) → úzkonosé i ploskonosé opice nezávisle na sobě



Barevné vidění

Evoluce a princip

- **Savci** – dichromatické vidění dané nočním životem v dobách dinosaurů → získání trichromacie → vačnatci v Austrálii (ne v J. Americe) → úzkonosé i ploskonosé opice nezávisle na sobě
- **Duplikací genu pro zelenou** na chromozomu X → pravděpodobně pomocí Alu transpozonu → vznik červeného opsinu
- **Rozlišíme 10 milionů barev** při vzájemném porovnání a 256 tisíc nezávisle



Typ	Název	Rozsah	Vrchol
S	β	400–500 nm	420–440 nm
M	γ	450–630 nm	534–555 nm
L	ρ	500–700 nm	564–580 nm

■ M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Optalmology and Optometry, VCH 2014.

Barevné vidění

Purkyňův jev

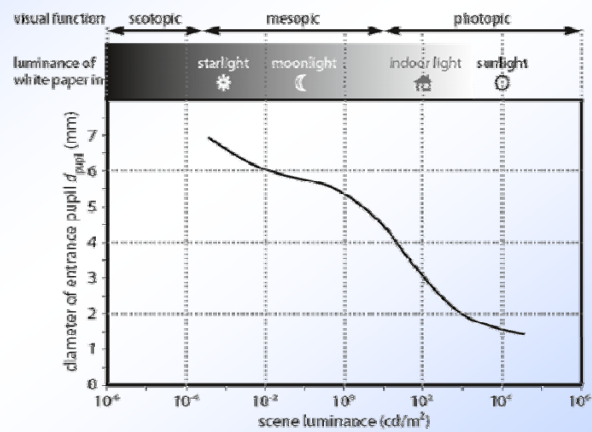
- **Posun citlivosti jasu** k modrému konci spektra při **nízké intenzitě osvětlení** → adaptace na tmě → přechod mezi užitím čípků a tyčinek → tyčinky s maximem na 507 nm
- Rozdílný kontrast barev při rozdílném osvětlení
- Užití **červeného světla** ve tmě → necitlivost tyčinek
- Ovlivňuje vjem u dvojhvězd
- Pojmenován po českém fyziologovi Janu Evngelistu Purkyněm (1787–1869)



Jak funguje vidění

Dynamický rozsah...

- Denní vidění – toku 200 erg/s
- Adaptace na tmu – 30–40 min
- **Soumračné vidění** – detekce toku 4×10^{-10} erg/s → zelené světlo v pupile 5×10^{-10} luxu
- Vidíme světlo z baterky na 10 km (5×10^{-17} W)



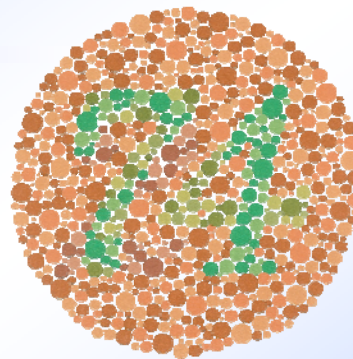
Rozsah osvitu detekovaný okem. Pro srovnání uvedeno vnímání bílého papíru

■ M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Optalmology and Optometry, VCH 2014.

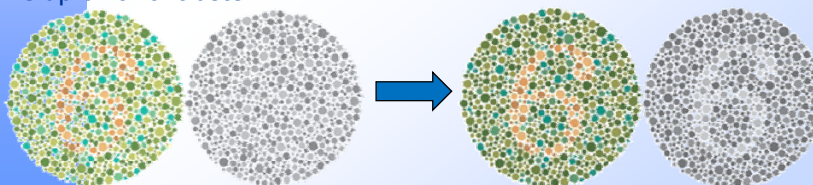
Barevné vidění

Barvoslepost...

- **Išiharův test barvosleposti** – zaveden Dr. Šinobu Išiharou (Univerzita Tokio) roku 1917
- Pamatujte, že barvoslepost (trpí jí 10 % mužů a 0,5 % žen) se vztahuje na červenou a zelenou barvu
- Barvoslepost ovlivňuje nejen nerozeznání čisté červené od zelené
- Dichromatici snadněji odhalí vojenské kamufláže
- Lze upravit kontrastem



„Normální“ člověk vidí číslovku 74, dichromatici a trichromatici 71 a achromatici nerozeznají nic...



Barevné vidění

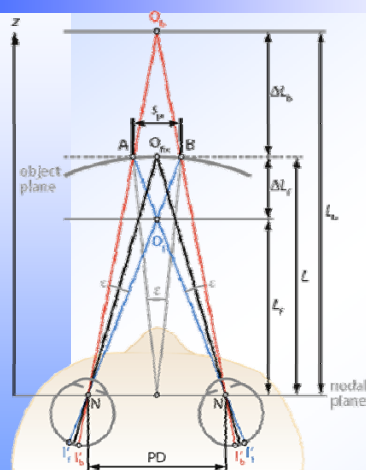
Barvoslepost

- **Achromacie** – černobílé vidění → absence čípků (nebo kombinace dichromacií)
- **Protanopie** – nerozlišení v zelené–žluté–červené oblasti spektra (neutrální bod 492 nm) → nemají červené receptory (2 %) nebo trichromaté s vadným opsinem (8 % mužů → vazba na X chromozom)
- **Deutanopie (Daltonismus)** – nerozlišení v zelené–žluté–červené (neutrální bod 492 nm) → nemají červené receptory
- **Tritanopie** – nerozlišují modro–žlutou část spektra → nemají modré receptory, vzácný defekt na 7 chromozomu (nevázaný na pohlaví)
- **Variabilita pro zelenou** – různé opsiny a nadbytečné kopie genu (rekordních 12) → nevidí lépe → **mozek se barvu učí!**



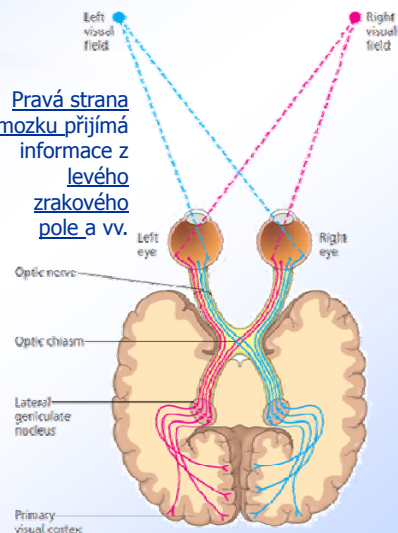
Oči vs. mozek

Stereopse



Funguje <500 m → paralaxa min 10" → dále (funguje i s jedním okem) perspektiva, překryv objektů, světlo a stín, relativní pohyb

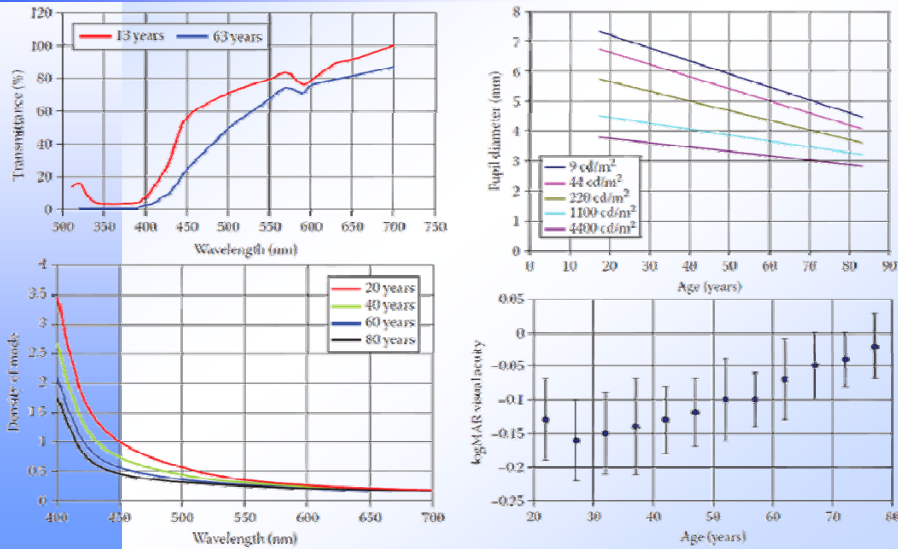
Pravá strana mozku přijímá informace z levého zrakového pole a vv.



Každý zrakový nerv obsahuje 1 milion axonů → spojují s interneurony v nucleus geniculatus lateralis → překlad pro kortex

- N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006.

Optická soustava oka Stárnutí



■ P. Artal (ed.): Handbook of Visual Optics. CRC Press 2017.

Haidingerův snop... Wilhelm von Haidinger (1795–1871)

- **Rakouský fyzik, geolog a mineralog**
- Ředitel rodinné porcelánky v Lokti
- 1840 – rada pro hornictví v c.k. Geologickém ústavu ve Vídni
- 1849 – ředitel Geologického ústavu
- 1865 – pasován na rytíře
- Člen c.k. Akademie věd ve Vídni
- Zakladatel společnosti „Freunde der Naturwissenschaften“



Wilhelm Karl Ritter von Haidinger na litografii J. Kriehubera z roku 1844

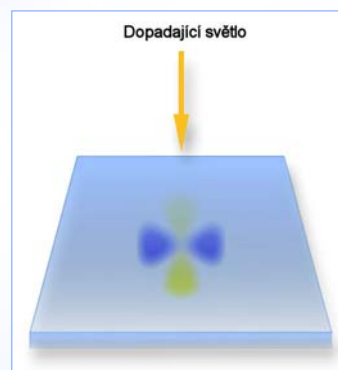
Haidingerův snop... Haidingerovy historické stopy

- **Objev dichroismu** pro cirkulární polarizaci u ametystu
- **Haidingerův snop** – percepce polarizace
- **Haidingerovy interferenční proužky** = interferenční proužky stejného sklonu
- **Hora** na Novém Zélandu
- **22km kráter** na přivrácené straně Měsíce na okraji Mare Nubium



- W. Haidinger: Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. Annalen der Physik 63 (1844) 29–39.

Haidingerův snop... Popis jevu



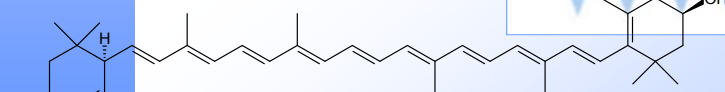
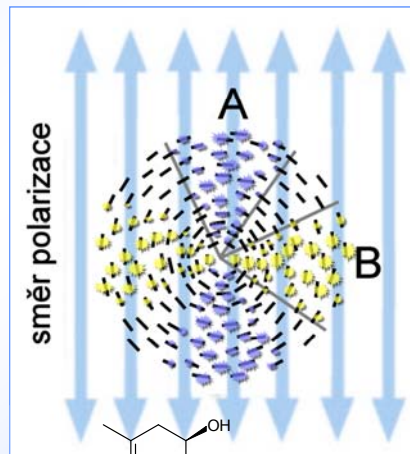
- **Kolmo na rovinu** polarizovaného světla je pozorován žlutý útvar motýlkovitého tvaru, v rovině pak šmolkově modrý
- Žlutý útvar má rozměr 3–5°
- Vjem Haidingerova snopu je individuální!

- W. Haidinger: Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. Annalen der Physik 63 (1844) 29–39.

Haidingerův snop...

Jak to že je to vidět?

- Barevnost → čípky sítnice
- Rozměr → žlutá skvrna (macula lutea) → jamka (fovea)
- **Lutein** (žluté barvivo) – účinně absorbuje modré záření s max. 458 a 485 nm (>540 nm neabsorbuje) při orientaci podél dlouhé osy molekuly
- Modrý obrazec vzniká pouze psychologicky

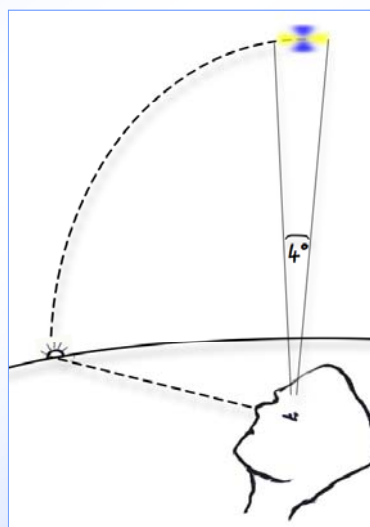


■ H. Helmholtz: Handbuch der physiologischen Optik. Leopold Voss, Leipzig 1867, p. 421.

Haidingerův snop...

Polarizace světla v přírodě...

- Ideální polarizace, daná Rayleighovým rozptylem, je 1 v úhlu 90° od Slunce a 0 směrem ke Slunci a antisolárnímu bodu
- Díky anizotropii molekul je teoretická maximální polarizace oblohy 0,922
- Reálná polarizace je 0,7–0,8
- **Neutrální body** bez polarizace
 - Babinetův – $15\text{--}20^\circ$ nad Sluncem
 - Brewsterův – $15\text{--}20^\circ$ pod Sluncem
 - Aragův – $15\text{--}20^\circ$ nad antisolárním bodem, citlivý na aerosoly



■ M. B. Fairbairn, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada 95 (2001) 248–251.

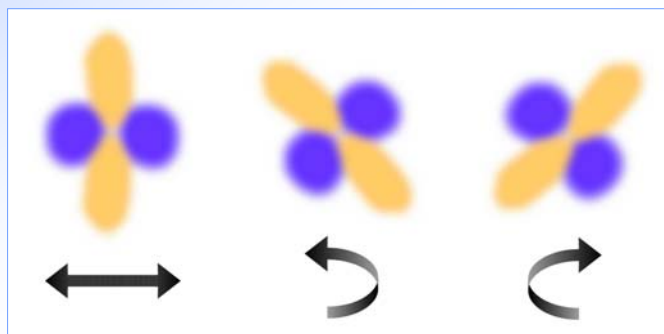
Haidingerův snop... ... a jak je vidět ve skutečnosti

- Rozhodně špatně... relativně velmi dobře na **LCD monitorech**, obstojně na obloze a sotva patrné na vodní hladině...
- Klesne-li polarizace pod 0,5 stává se jev nepozorovatelným



■ V. Kopecký Jr., Astropis 16, No. 3 (2009) 14–17.

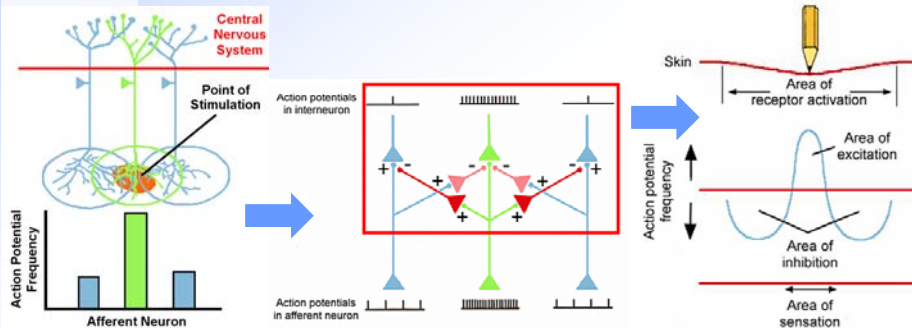
Haidingerův snop Sledujeme cirkulární polarizaci



- **Lineární polarizace** → obrazec nezávislý na sklonění hlavy
- **Kruhová polarizace** → obrazec zachovává orientaci vzhledem k rovině symetrie obličeje, je skloněn o ca. $\pm 45^\circ$
- Rotace obrazce po směru hodinových ručiček, tj. $+45^\circ$ = pravotočivá kruhová polarizace a v.v.

■ W. A. Shurcliff, Journal of the Optical Society of America 45 (1955) 399–399.

Optické iluze... Laterální inhibice



Neuron nejbliže ke zdroji stimulu produkuje akční potenciál silnější než periferie

Akční potenciály periferních neuronů jsou silněji inhibovány než v receptorním poli

Laterální inhibice zvyšuje kontrast

■ J. Fitzakerley: Sensory Physiology. University of Minnesota Medical School Duluth, 2014.

Optické iluze... Machovy pásy

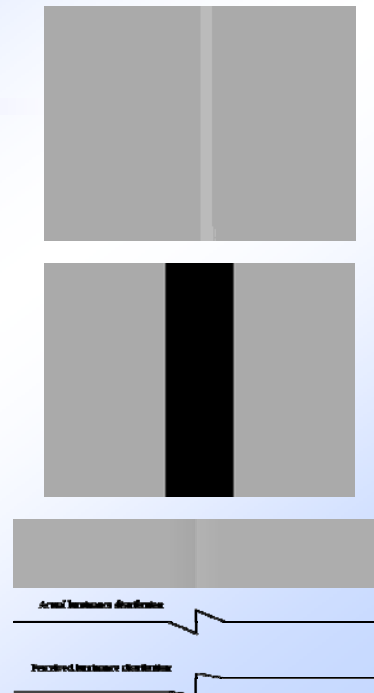
- Pojmenovány po rakouském fyzikovi **Ernstu Machovi** (1838–1916), který ji objevil roku 1865
- Iluze přehánění kontrastu mezi hranami ploch s mírně odlišným odstínem šedí
- Spouštěna **detekcí hran** (v rámci kontaktu ploch) v lidském zrakovém systému
- Vysvětlení na základě **laterální inhibice** → speciální posílení jasu
- Může mít vliv na vyhodnocování RTG lékařských snímků



Optické iluze...

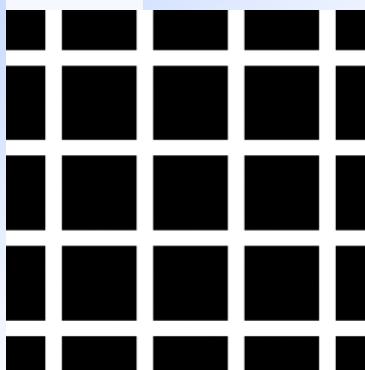
Cornsweetova iluze

- Objasněna americkým fyziologem Tomem Cornsweetem v roce 1960
- Jasnost obou obdélníků je shodná mimo středovou část (14 %) se zvýrazněnou hranou
- Pozorovateli se jeví levý obdélník tmavší než pravý
- Podobné Machovým pásům (nikoli shodné, sic!)
- Pozorovatel vnímá obrazec přiléhající ke zjasněné hraně jako jasnější a ke ztmavené jako tmavší oproti realitě
- Pozorované je na základě zkušenosti → **reflexivně** → nikoli na základě retinálních stimulů!

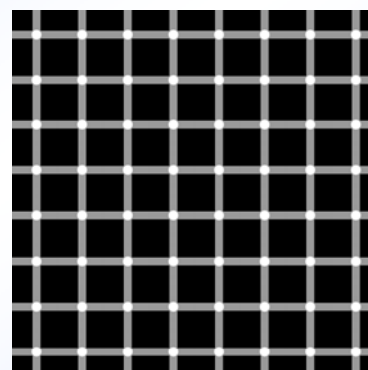


Optické iluze...

Hermanova a jiskrová mřížka...



- Vytvořena Ludimarem **Hermanem** 1870
- Tmavé fantomové body na průsečících → mizí v přímém pohledu

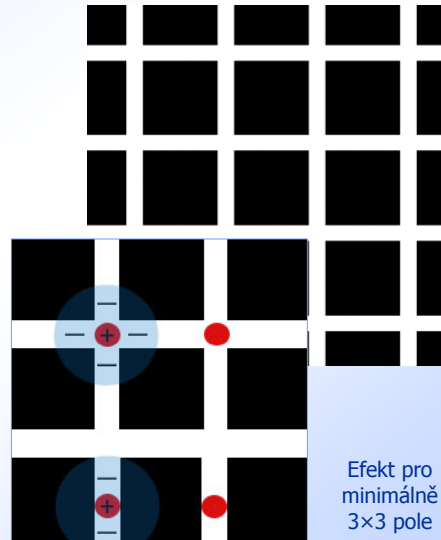


- Objevena E. a B. Lingelbachem a M. Schraufem 1994
- Světlé reálné body v přímém pohledu s **jiskrovou iluzí** mizejících tmavých bodů v okolí

Optické iluze...

Hermanova a jiskrová mřížka

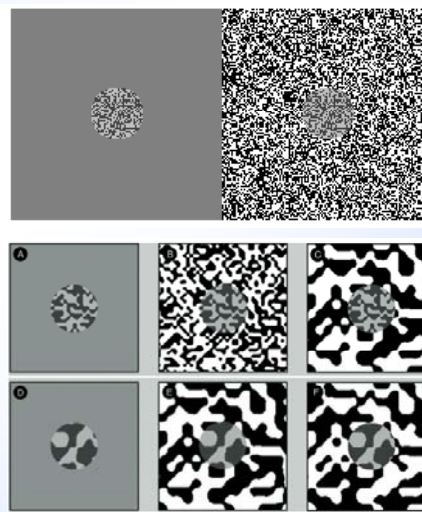
- Vysvětlení obou iluzí na základě **laterální inhibice**
- V percepčním poli jsou v malé oblasti excitovány fotoreceptory zvýšeným jasem → okolní fotoreceptory je inhibují
- Spojnice čar → více světlých ploch → jeví se tmavší
- Bílé čary v sevření tmavých ploch → jeví se jasnější



Optické iluze...

Chubbova iluze a duševní zdraví

- Popsána Charlesem Chubbem v roce 1989
- **Pozorovaný kontrast** objektu se mění v závislosti na **relativním kontrastu vůči zobrazenému poli**
- Založeno na laterální inhibici a efektu kontrastu
- Diagnostika schizofrenie – schizofrenici správně posuzují absolutní charakteristiky nikoli vztahy (normální člověk se nechá ošálit)

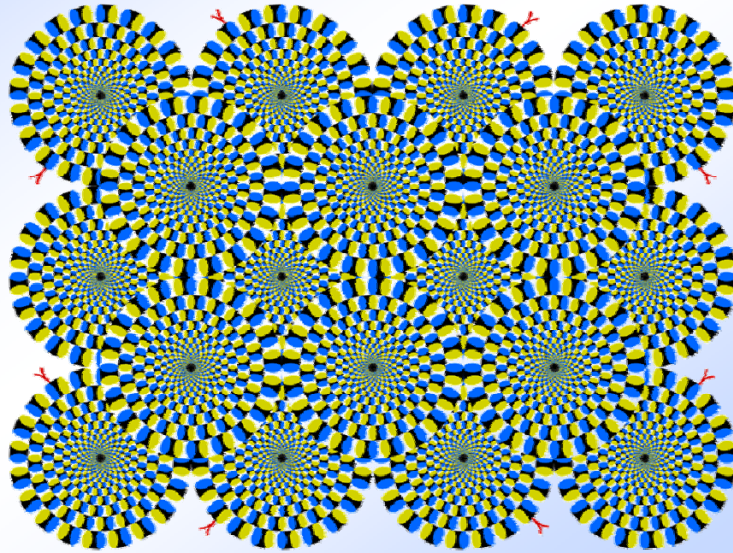


Chubbovy iluze – středový obrazec vždy shodný jeví se různě dle pozadí

Optické iluze...

Trvalé těkání očí

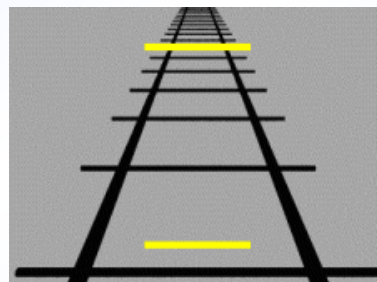
- Dojem pohybu kruhů vzniká v důsledku trvalých drobných pohybů očí
- Pohyby jsou nezbytné pro zrakový vjem



Optické iluze...

Ponzova iluze

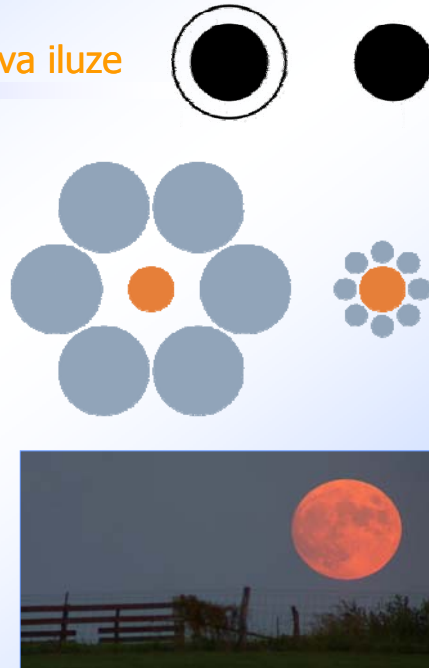
- Geometricko-optická iluze založená na lineární perspektivě
- Poprvé ukázána roku 1911 italským psychologem Mariem Ponzem (1882–1960)
- **Mysl určuje velikost objektu v závislosti na pozadí**
- Částečné vysvětlení Měsíční iluze → percepce vzdálenosti vysoko nad horizontem



Optické iluze...

Ebbinghausova a Deboeufova iluze

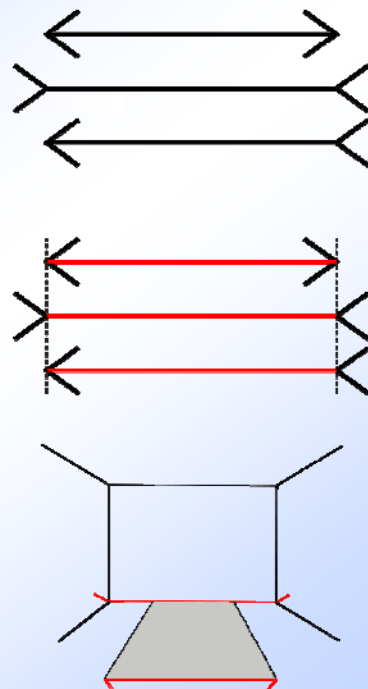
- Popsána 1900 německým psychologem Hermannem Ebbinghausem (1850–1909) → **percepce ovlivněna kontextem** → u studentů více než u dětí
- Popsána 1865 belgickým filozofem a matematikem Josephem Delboeufem (1831–1896)
- Kruh ohraničený prstencem se jeví **v závislosti na jeho bližší/větší vzdálenosti větší/menší** → iluze s porcí jídla na talíři
- Další části vysvětlení Měsíční iluze → percepce velikosti na horizontu → zvětšení Měsíce vs. zmenšení na obloze



Optické iluze...

Müller-Lyerova iluze

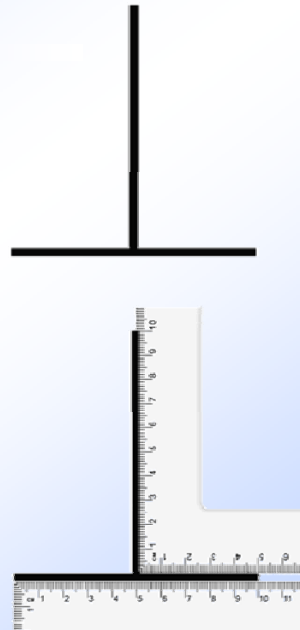
- Iluze navržena 1889 německým sociologem Franz Carl Müller-Lyerem (1857–1916)
- Šipky ven/dovnitř délky roztahují/smršťují, v kombinaci se posouvá vnímání středu úsečky k terminální části
- Vysvětlení **z perspektivy** – vizuální systém se učí vnímat úhly v klasických pravoúhlých objektech
- Vysvětlení **z geometrického středu** – pozice středu ovlivňuje vnímanou pozici objektu → bližší „biologické praxi“



Optické iluze...

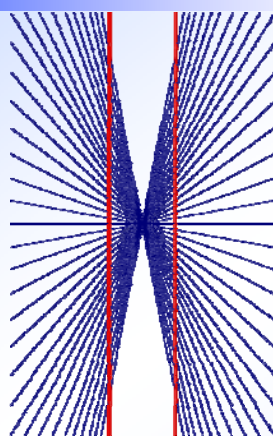
Vertikálně–horizontální iluze

- Lidé mají tendenci **přehánět vertikální rozměr oproti horizontálnímu**
- Vývojově závislé → chyba se snižuje u dětí od 8 do 14 let
- Gendrově závislé → muži lépe odhalí iluzi → možná souvislosti s hemisférickou asymetrií mozku a pohlavní diferencí
- Kulturně závislé → větší vnímavost v urbanizovaném světě

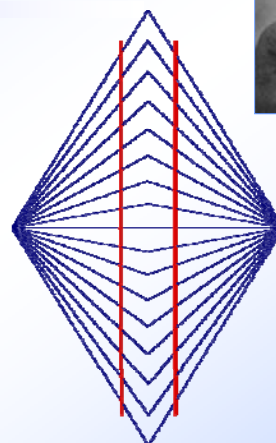


Optické iluze...

Heringova a Wundtova iluze



- **Heringova iluze** z roku 1861 je založena na přecenění úhlu v průsečíku → laterální inhibice? → efekt pohybu v perspektivě

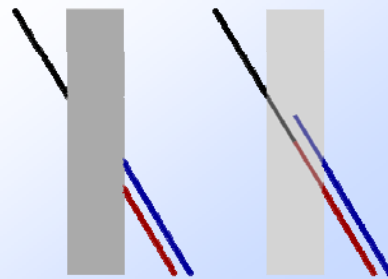
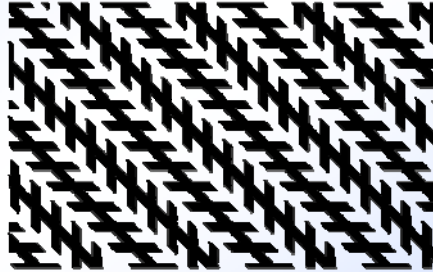


- **Wundtova iluze** je inverzním efektem k Heringově iluzi → vnímání obrazce v kontextu

Optické iluze...

Zöllnerova a Poggendorfova iluze

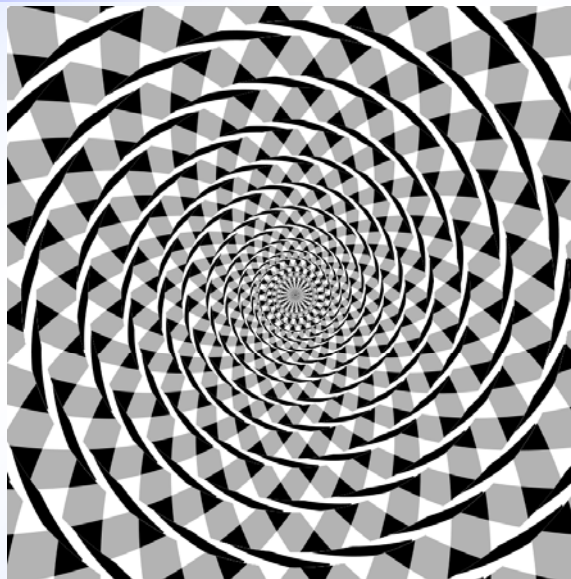
- Objevena 1860 německým astrofyzikem Johannem Zöllner (1834–1882), který referuje dopisem fyziku Johanu Poggendorfovi (1796–1877) a ten přichází z další variantou
- **Zöllnerova iluze** vytváří pomocí kratších linek iluzi hloubky → dlouhé čáry ubíhají od pozorovatele → podobné s Wundtovou a Heringovou iluzí
- **Poggendorfova iluze** závisí na zakrývajícím obdélníku (šířce a hraně) → lidé vnímají ostré úhly jako roztaženější



Optické iluze...

Fraserova spirála

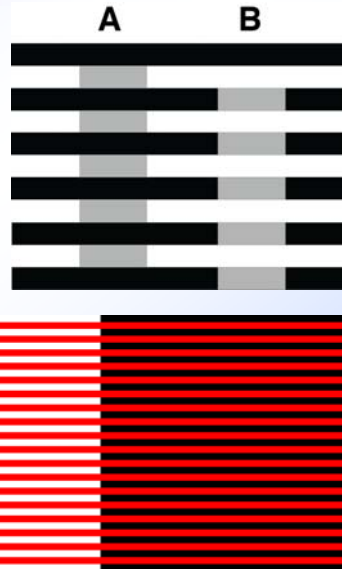
- Objasněna 1908 britským psychologem sirem Jamesem Fraserem (1863–1936)
- **Falešná spirála tvořená koncentrickými kruhy**
- Kombinace pravidelného vzoru s Zöllnerovou iluzí → fantomová torze → efekt zmizí při vybarvení obrazce



Optické iluze...

Bezoldův efekt a Whiteova iluze

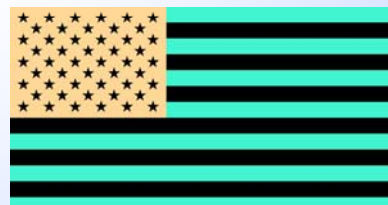
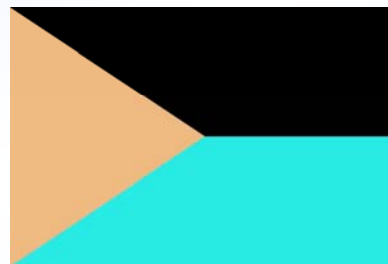
- **Whiteova iluze** posouvá jas obrazců i když mají stejnou opacitu → nelze vysvětlit laterální inhibicí! → **posun vlivem blízkého okolí a kontextu**
- **Bezoldův efekt**, pojmenován po německém meteorologu Wilhelmu von Bezoldovi (1837–1907)
- **Odstín barvy je vnímán ve vztahu k blízkým barvám** → Bezold–Brückeho posun – se zvyšující se intenzitou osvitu se vjem posunuje do modré (<500 nm) či žluté (>500 nm)



Optické iluze...

Paobrazy

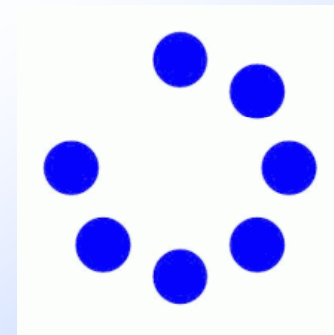
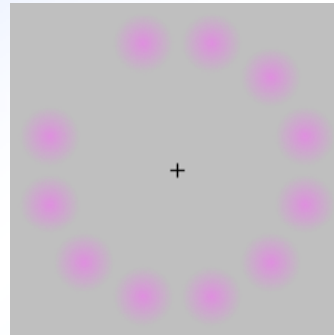
- Soustředěný pohled na obrázek po 5–60 s → pohled na bílou plochu → objevení se **negativního obrazu**
- Vznikají adaptací tyčinek a čípků na **nadměrnou stimulaci**
- Snaha udržet vyvážení barev (jako v jpg barevném prostoru fotografií)
- V běžném životě kompenzováno očními pohyby → jde o nereálnou situaci



Optické iluze...

Pac-Man neboli šeríkový zálečník

- Disky mizí na 0,1 s a další za 0,125 s
- Fixace středového bodu vede k **percepti modrozeleného pohybujícího se bodu**
- Efekt založen na percepci paobrazu, Troxlerově vyhasínání (fixace pole vede k vyhasnutí stimulu) a φ efektu (vyhasínání vede k vnímání pohybu → 1912 Maw Wertheimer a počátek Gestalt psychology)



Doporučená literatura

- N. A. Campbell, J. B. Reece: Biologie. Computer Press, Brno 2006. {skvělá učebnice VŠ biologie}
- M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Ophtalmology and Optometry, VCH Publishers 2014.
- P. Artal (ed.): Hanbook of Visual Optics. CRC Press 2017. {vše co jste chtěli o vidění vědět a báli jste se zeptat, náročnější text}
- Z. Veselovský: Etologie – Biologie chování zvířat, Academia, Praha 2005.
- R. Dawkins: Příběh předka, Academia, Praha 2008.
- V. Kopecký Jr.: Snopy páně Haidingera aneb Jak vidět polarizaci oblohy. *Astropis* 3/2009 14–17.
- Optické iluze na Wikipedii