



Lidský zrakový systém HVS (Human Visual System) a jeho základní charakteristiky

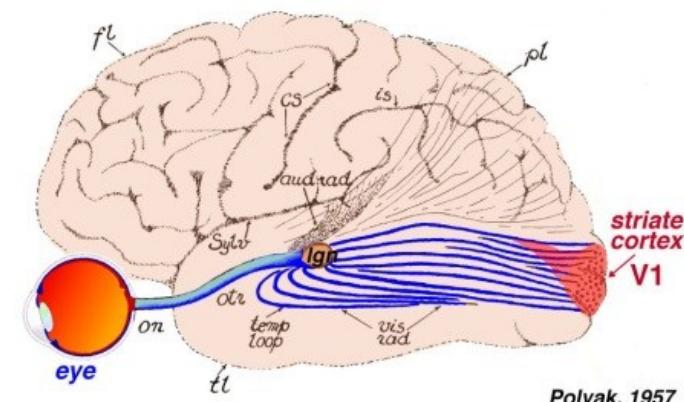
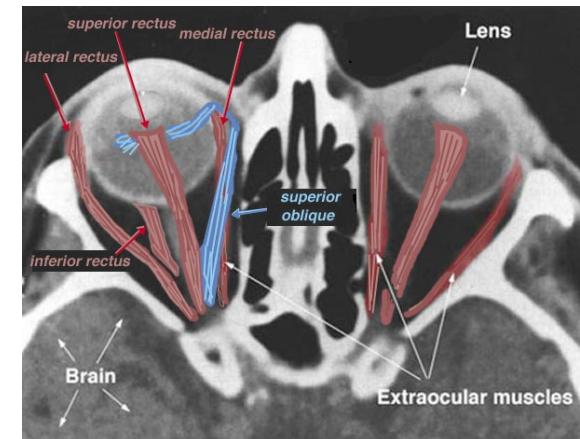
Karel Fliegel

(fliegek@fel.cvut.cz)



Obsah přednášky

- Základní optické vlastnosti lidského oka
- Sítnice
- Model receptivního pole
- Zraková kůra
- Funkce kontrastové citlivosti CSF
- Barevné vidění
- Binokulární vidění
- Základní funkční parametry



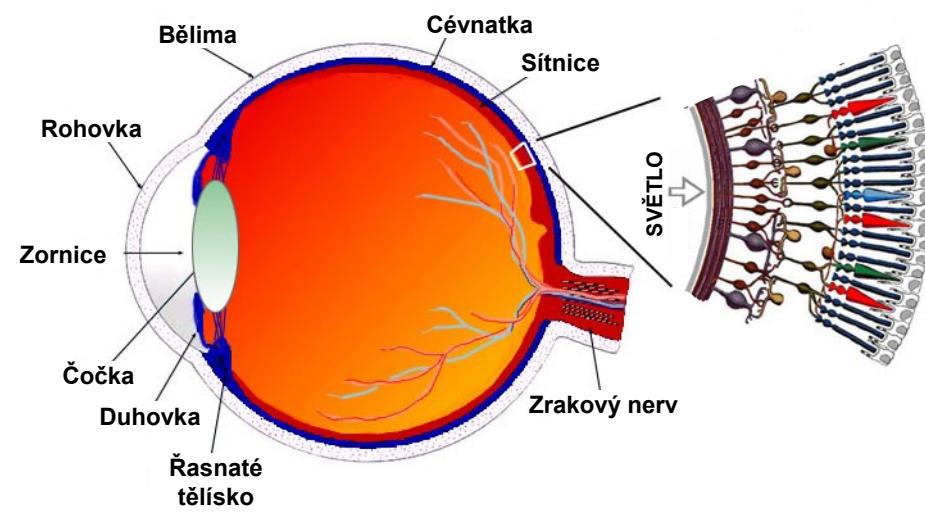
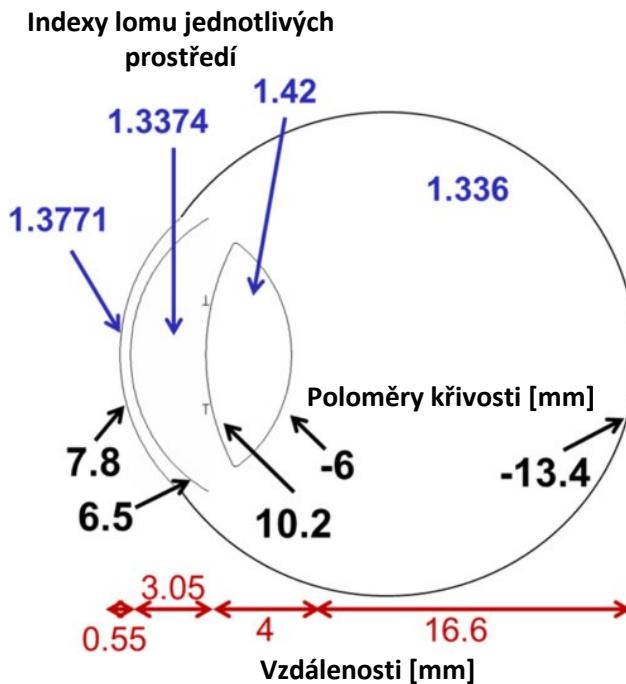
☐ Lidské oko jako optická soustava

❖ Světlo prochází několika prostředími

- Rohovka → komorový mok → vstupní pupila (2-8 mm, adaptace) →
- Čočka (akomodace) → sklivec → obraz na sítnici

❖ Světelné paprsky na sítnici vytváří obraz

- Optická mohutnost soustavy 58 až 70 dioptrií



❖ Zobrazení simulovaného obrazu na sítnici oka

Vstupní obraz (výška 10 cm, pozorovací vzdálenost 2 m)



❖ Zobrazení simulovaného obrazu na sítnici oka

Simulovaný obraz na sítnici oka



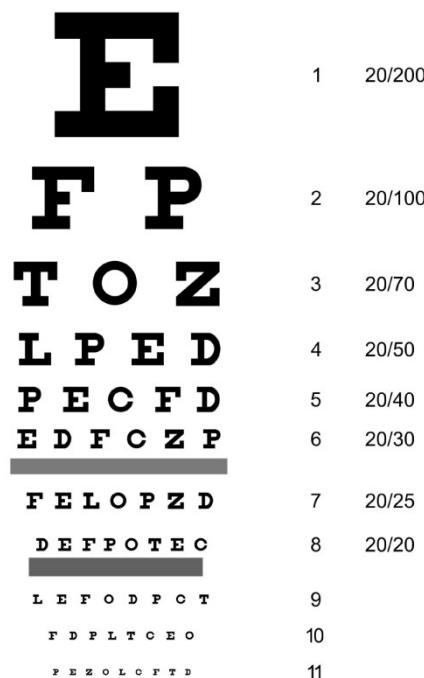
❖ Zobrazení simulovaného obrazu na sítnici oka

Snellenův test

(výška cca 30 cm, vzdálenost 2,8 m)

Snellen Test

www.provisu.ch

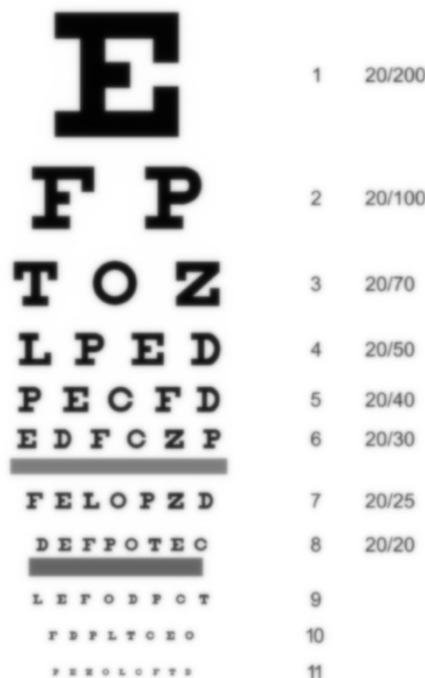


In order to perform this test, please follow the instructions:

Vstupní obraz

Snellen Test

www.provisu.ch



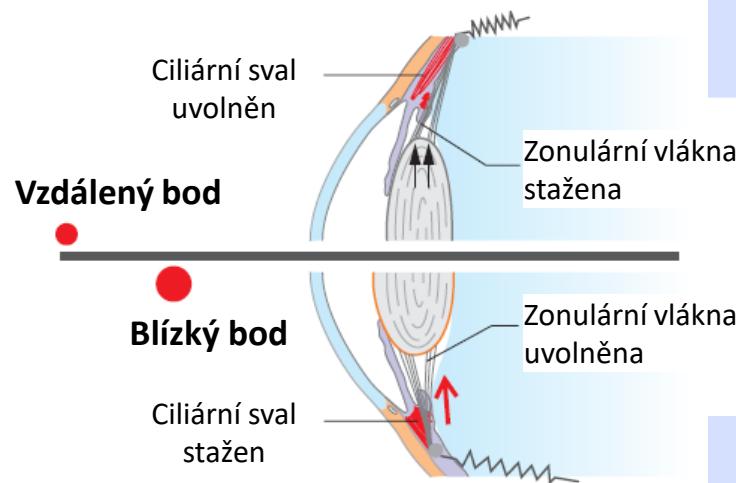
In order to perform this test, please follow the instructions:

Simulovaný obraz na sítnici

□ Lidské oko jako optická soustava

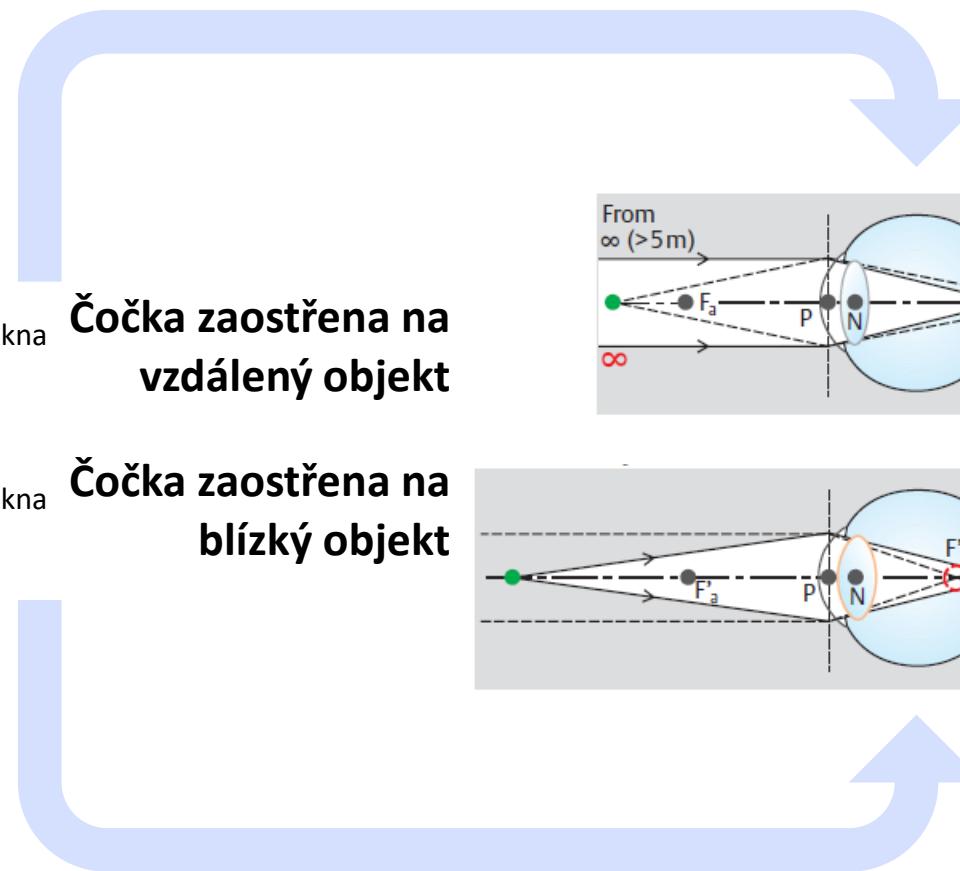
❖ Akomodace – ostření na blízké a vzdálené objekty

- Optická mohutnost soustavy 58 až 70 dioptrií



Čočka zaostřena na vzdálený objekt

Čočka zaostřena na blízký objekt

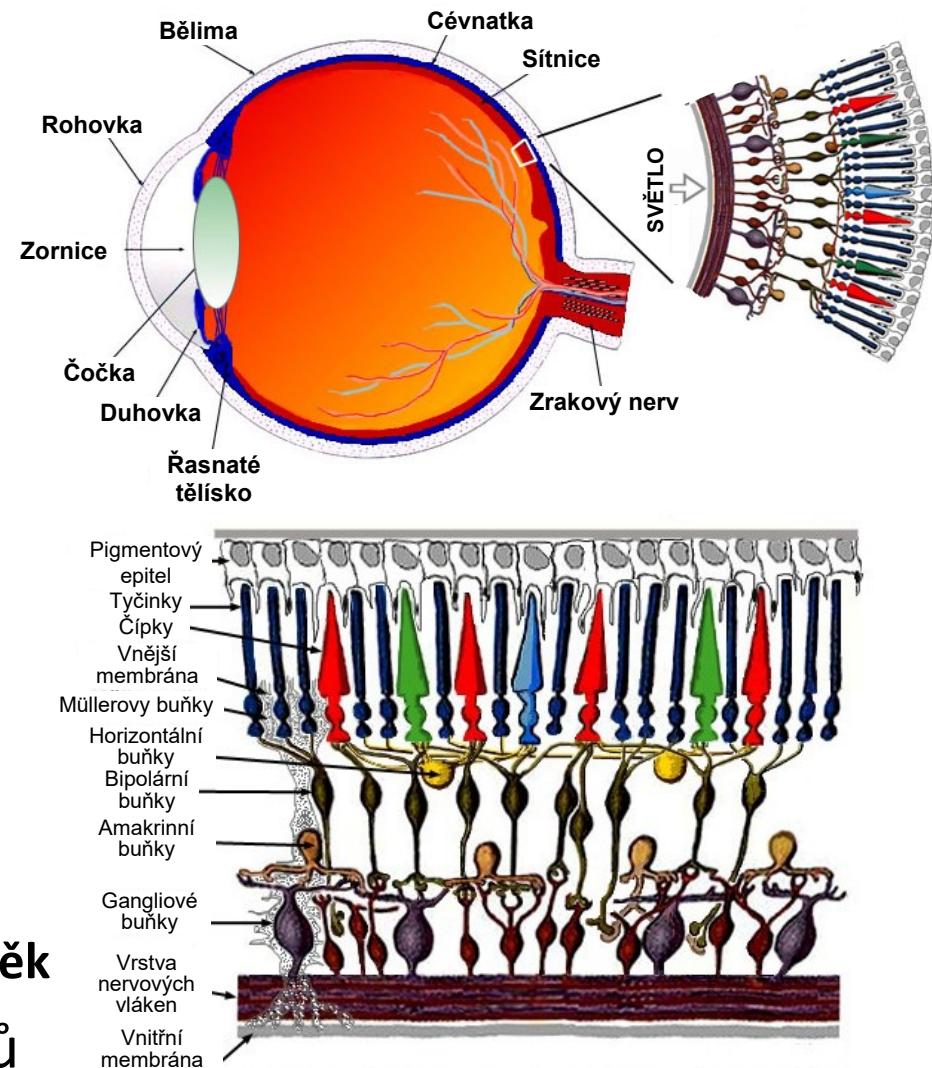


□ Sítnice (retina)

- ❖ **Tyčinky – skotopické ČB**
vidění, rychlé, jeden typ
- ❖ **Čípky – fotopické barevné**
vidění, pomalé, typ L, M, S

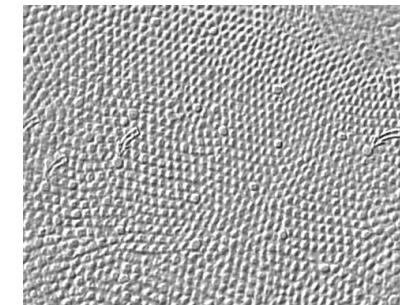
□ Vlastnosti sítnice

- Vychlípenina mozku
- Tloušťka asi 0,2 mm
- ~ 120 mil. tyčinek, $D = 2 \mu\text{m}$
- ~ 7 mil. čípků, $D = 1 - 6 \mu\text{m}$
- Slepá skvrna, $D = 2 \text{ mm}$ (nerv)
- Žlutá skvrna (fovea centralis)
- Několik typů neuronových buněk
- ❖ **Optický nerv** 800 000 axonů

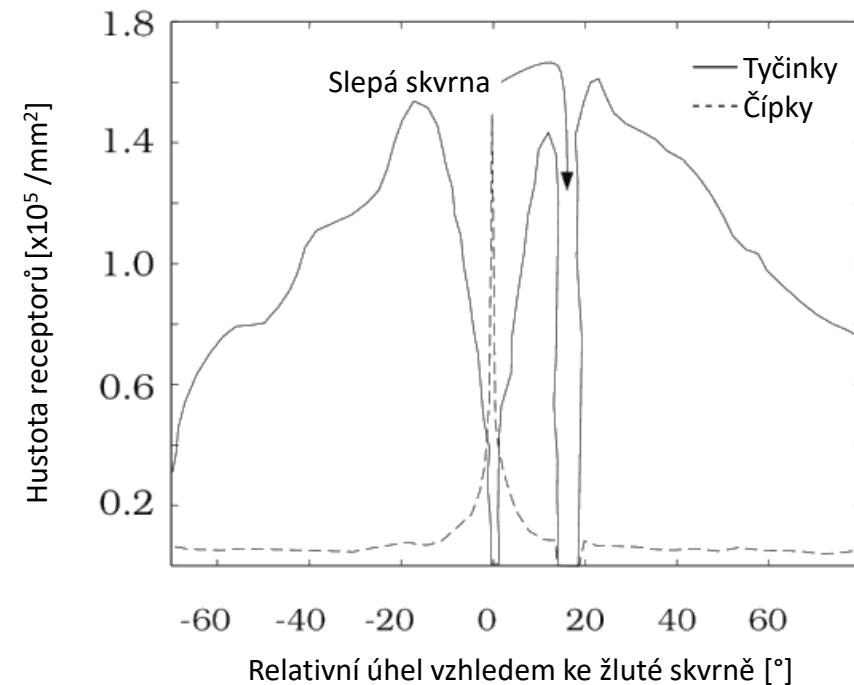
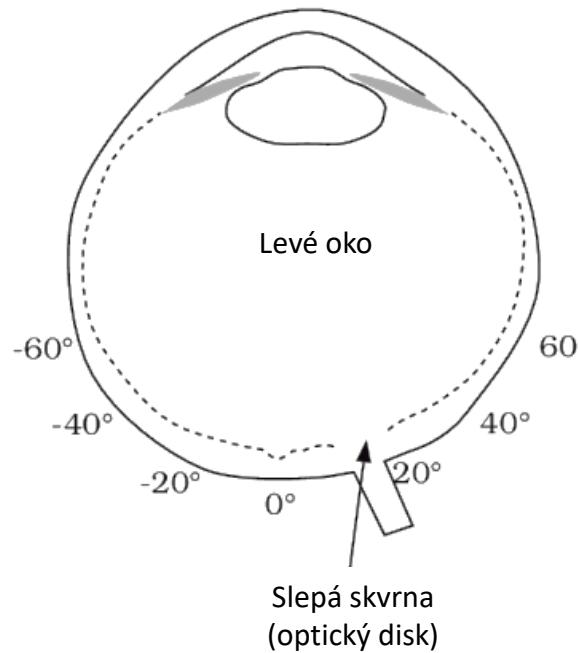


□ Hustota rozložení receptorů

- ❖ Čípky (cones) – barevné – fotopické vidění
 - Maximum koncentrace ve žluté skvrně (*fovea*)
- ❖ Tyčinky (rods) – černobílé – skotopické vidění
 - Minimum koncentrace ve žluté skvrně (*fovea*)



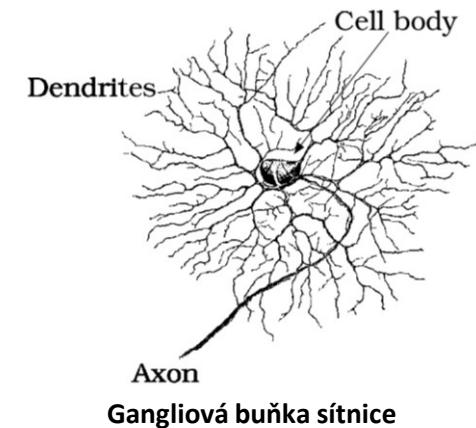
Rozložení buněk na sítnici
(nepravidelný vzorkovací rastr)



□ Specializace na sítnici

❖ Dělení vizuální informace do specializovaných paralelních nervových drah pro různé vizuální úlohy

- Dělení začíná u fotoreceptorů (tyčinky vs. čípky)
- Bipolární buňky integrují odezvu z mnoha fotoreceptorů (více jak 1 000)
- Tyčinkové bipolární buňky jsou propojeny přes amakrinní do ganglionových
 - ...



❖ Propojená skupina neuronů pro paralelní zpracování

- Vizuální tok (visual stream) nebo vizuální cesta (visual pathway)
 - Dělení do vizuálních cest začíná zřejmě na výstupech tyčinek/čípků
 - Každý čípek je propojen do asi 15 až 20 různých bipolárních buněk
 - Vizuální cesty komunikují informaci do specializovaných center mozku
 - Vizuální cesta nese prostorově-časovou (spatio-temporal) pro daný úkol

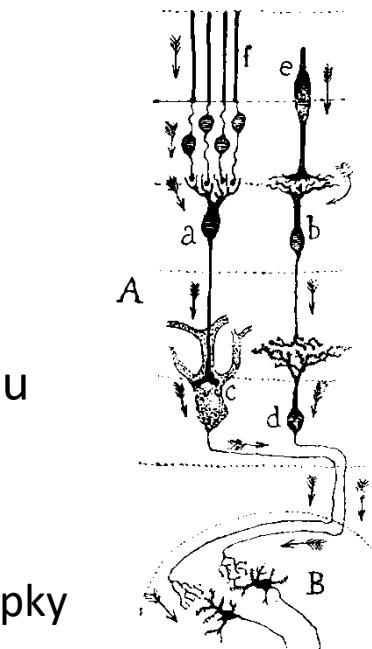
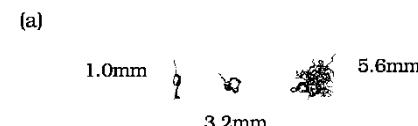
□ Vizuální cesty (visual streams)

❖ Metody klasifikace neuronů

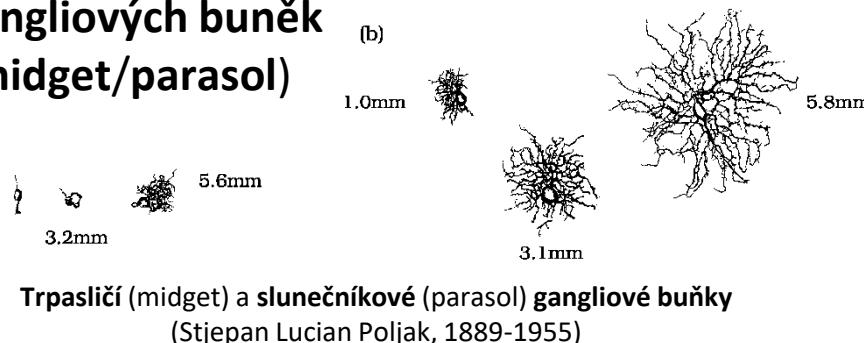
- **Morfologie** (morphology) – tvar a struktura neuronu
- **Elektrofysiologie** – elektrická odezva na různá buzení
- **Biochemie** – studium chemických látek stavby neuronu
- **Anatomie** – struktura propojení s jinými neurony
 - Nejlepší **klasifikace** - pokud dojde k souladu všech metod
 - Lze ukázat na příkladu **klasifikace fotoreceptorů tyčinky/čípky**

❖ Morfologie ganglionových buněk

- Výzkum u **savců** (S. Ramon y Cajal) a **primátů** (S. Poljak)
 - Identifikoval u primátů pět druhů ganglionových buněk podle velikosti a větvení dendritů (**midget/parasol**)
 - **Menší ganglionové buňky (midget) v blízkosti žluté skvrny**



Bipolární a ganglionové buňky
(Santiago Ramon y Cajal, 1852-1934)



Trpasličí (midget) a slunečníkové (parasol) ganglionové buňky
(Stjepan Lucian Poljak, 1889-1955)

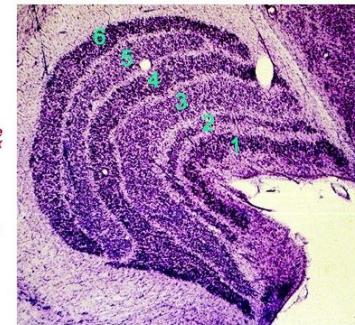
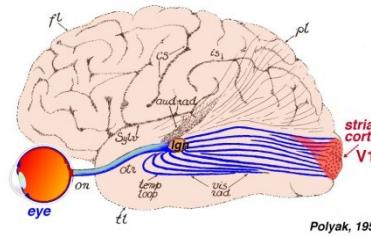
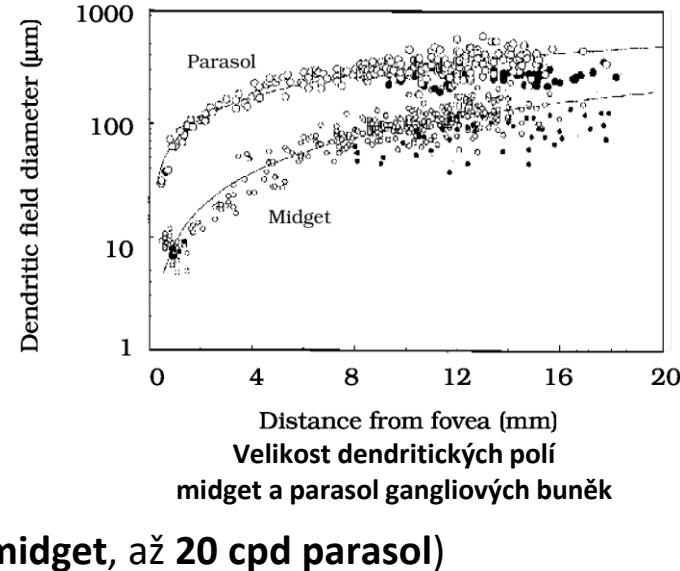
□ Vizuální cesty (visual streams)

❖ Morfologie ganglionových buněk

- **Velikosti dendritických polí buněk**
 - Rostou se **vzdáleností od žluté skvrny**
 - **Midget** a **parasol** buňky tvoří **dvě vizuální cesty**
 - **Oba typy** rozprostřeny po celé sítnici a kódují tak související **kopii obrazu** ze sítnice
 - Více **midget** (7-9x) buněk než **parasol**
 - Kódování obrazu v různých rozlišeních (až 60 cpd midget, až 20 cpd parasol)

❖ Projekce axonů zrakového nervu do LGN

- **LGN** obsahuje **šest vrstev**
 - **Vnější (3-6) – malé neurony (parvocellular)**
 - Zakončení axonů **midget ganglionových buněk**
 - **Parvocelulární dráha (parvocellular pathway)**
 - **Vnitřní (1-2) – velké neurony (magnocellular)**
 - Zakončení axonů **parasol ganglionových buněk**
 - **Magnocelulární dráha (magno.)**



Boční kolíkové tělíska
(LGN – lateral geniculate nucleus)

<https://www.cns.nyu.edu/~david/courses/perception/lecturenotes/V1/lgn-V1.html>
Wandell, B. A., Foundations of Vision, Sinauer Associates, 1995. (<https://foundationsofvision.stanford.edu/>)

□ Odezva ganglionových buněk na světlo

❖ Sekvence diskrétních impulsů (spikes, action potentials)

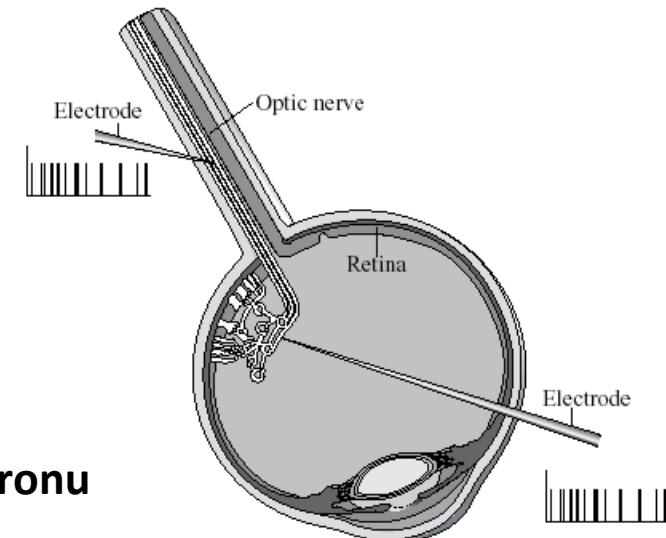
- Odezva měřitelná při **stimulaci světlem**
- Přiložením **elektrody k buňkám sítnice** nebo **vláknům optického nervu**

❖ Elektrofyziologie (electrophysiology)

- Měření elektrické odezvy v podobě **receptivního pole neuronu** (receptive field)
 - Oblast na sítnici kde světlo **vyvolá odezvu neuronu**
 - **Receptivní pole** závisí na vlastnostech celé vizuální dráhy (optika, neuron, ...)

❖ Organizace střed-okraj (center-surround)

- Vlastnosti **receptivních polí ganglionových buněk** objeveny **měřením**
 - Stimulace **velkým uniformním polem** – náhodná **sekvence akčních potenciálů**
 - Spontánní frekvence akčních potenciálů (average firing rate) **typicky 50 Hz**



Záznam akčních potenciálů ganglionových buněk
(mikroelektroda na sítnici nebo v optickém nervu)

Receptivní pole

☐ Neuronová síť sítnice lidského oka

❖ Ganglionové buňky na sítnici

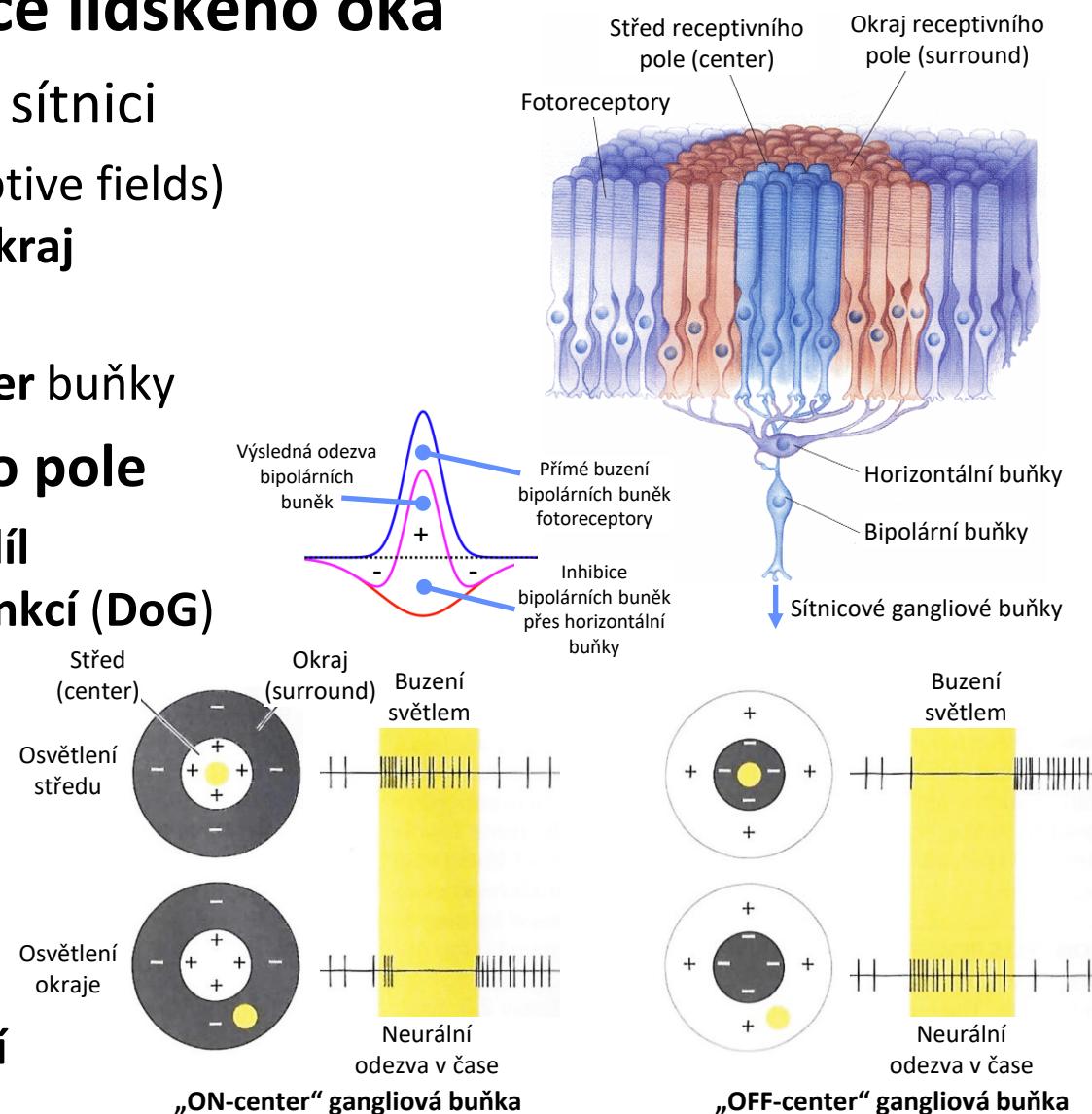
- Receptivní pole (receptive fields) mají strukturu střed-okraj (center-surround)
- ON-center a OFF-center buňky

❖ Odezva receptivního pole

- Modelována jako rozdíl dvou gaussovských funkcí (DoG)

❖ Analýza změn intenzity na sítnici

- Konvoluce s modelem receptivního pole
- Různé velikosti a tvary receptivních polí



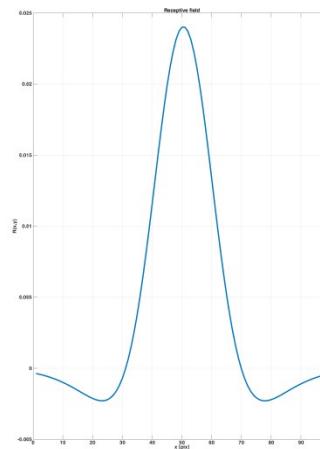
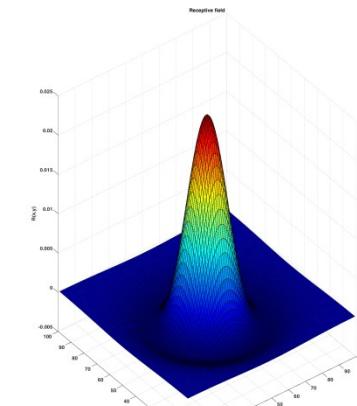
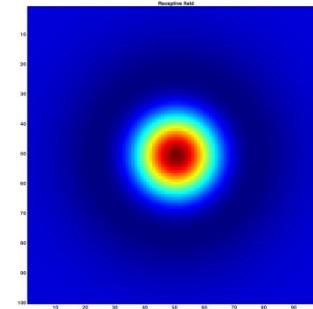
□ Model receptivního pole

❖ **Sítnicová receptivní pole (center-surround) modelována jako rozdíl gaussovských funkcí - Difference of Gaussians (DoG)**

- Obrazová informace **předána ze sítnice do vyšších center**
- **Obraz pro zjednodušený popis (LSI)** dán konvolucí

$$O(x, y) = I(x, y) * R(x, y)$$

- $O(x, y)$ - **výstupní obraz ze sítnice**
- $I(x, y)$ - **obraz reálné scény na sítnici** (po průchodu **optickou soustavou oka**)
- $R(x, y)$ - **rozptylová funkce bodu** (PSF, impulsová odezva) **receptivního pole**



Rozdíl 2D gaussovských funkcí
Difference of Gaussians (DoG)

Podle tvaru se někdy nazývá také „Mexický klobouk“ (Mexican hat).

□ Demonstrace vlivu receptivního pole

❖ Iluze (nejznámější) potvrzující vliv laterální inhibice

- **Machovy proužky** (Mach bands)
 - Ernst Waldfried Josef Wenzel **Mach** (1838 - 1916, Rakousko)
 - Zvýšení kontrastu na rozhraní mezi proužky
- **Hermannova mřížka** (Hermann grid)
 - Ludimar **Hermann** (1838 - 1914, Německo)
 - Tmavší kroužky v místě křížení bílé mříže na černém pozadí
- **Hermannova-Heringova mřížka** (Hermann-Hering grid)
 - Karl Ewald Konstantin **Hering** (1834 – 1918, Německo)
 - Světlejší kroužky v místě křížení černé mříže na bílém pozadí
- **Scintilační mřížka** (scintillating grid)
 - J. R. **Bergen** (1985) - popsáno v publikaci **Schrauf, M.** (1995)
 - Podobná **Hermannově mřížce** avšak v místě křížení bílé kroužky
 - Bílé kroužky – vjem osciluje mezi černou a bílou

Spillmann, L., The Hermann grid illusion: a tool for studying human perspective field organization, Perception, 23 (6), 1994.

Schrauf, M., Lingelbach, B., Wist, E., R., The scintillating grid illusion, Vision Research, 37 (8), 1997.

<https://www.illusionsindex.org/>

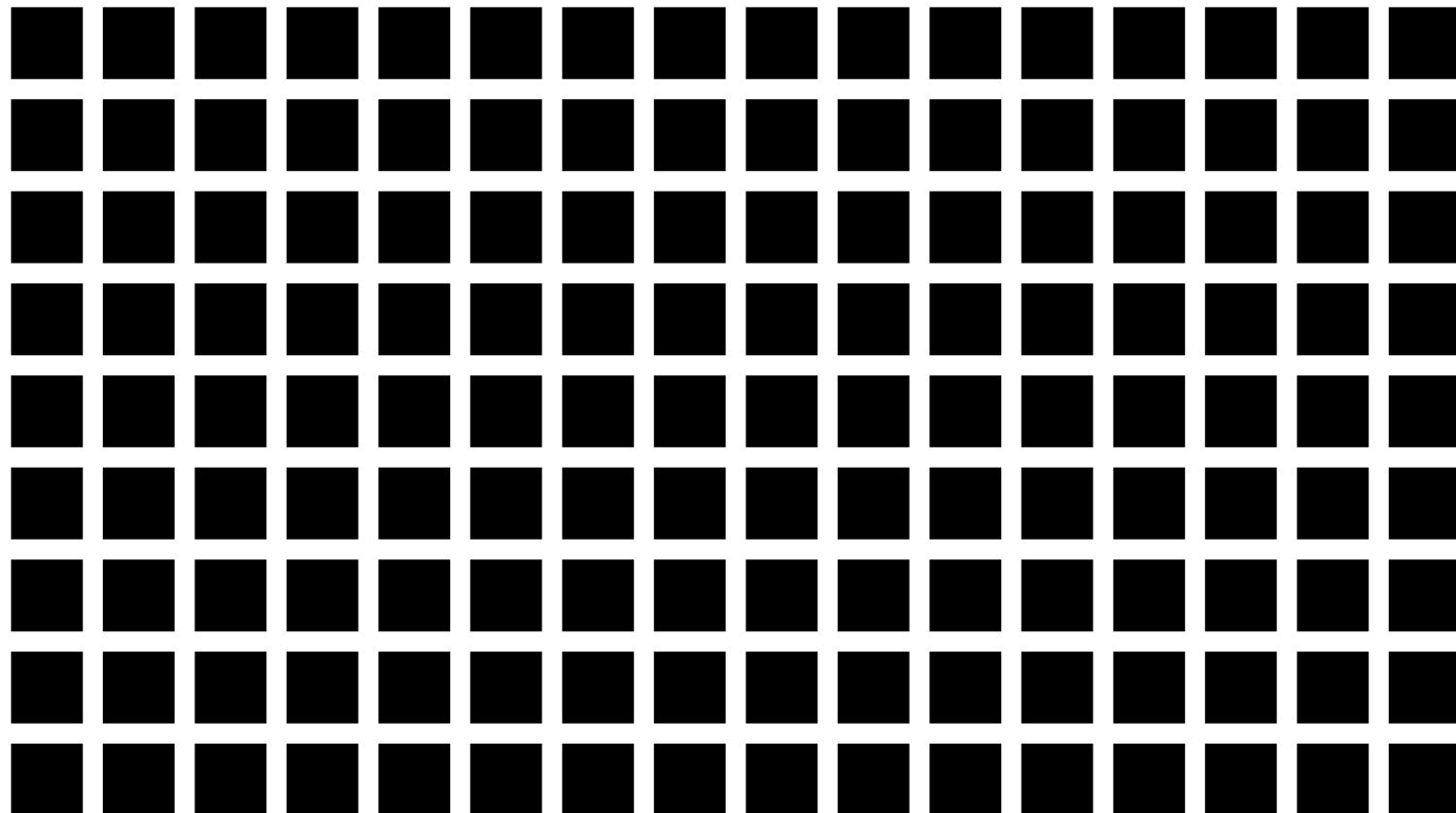
□ Demonstrace vlivu receptivního pole

- Machovy proužky (Mach bands)
 - Zvýšení kontrastu na rozhraní mezi proužky



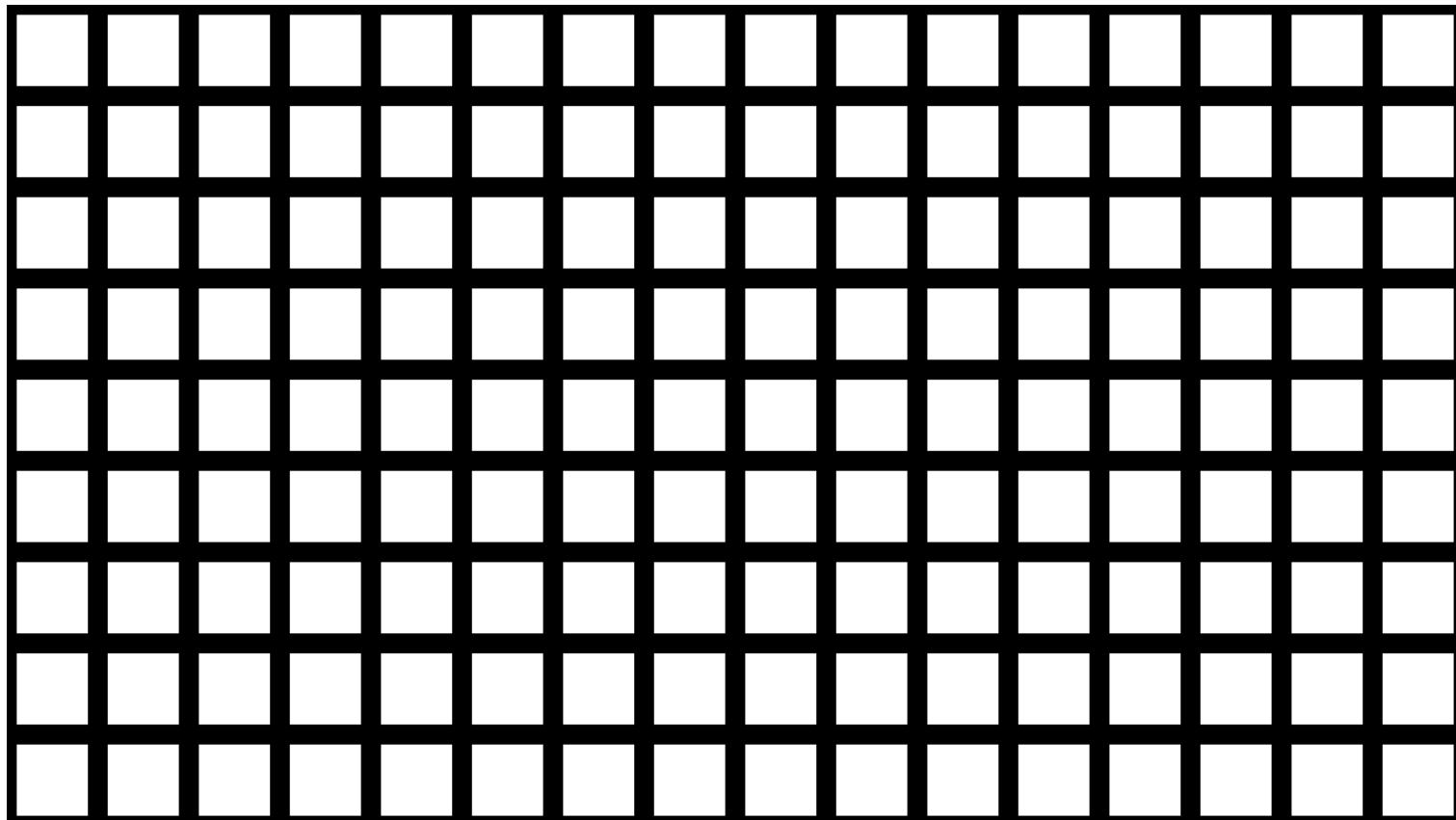
□ Demonstrace vlivu receptivního pole

- Hermannova mřížka (Hermann grid)
 - Tmavší kroužky v místě křížení bílé mříže na černém pozadí



□ Demonstrace vlivu receptivního pole

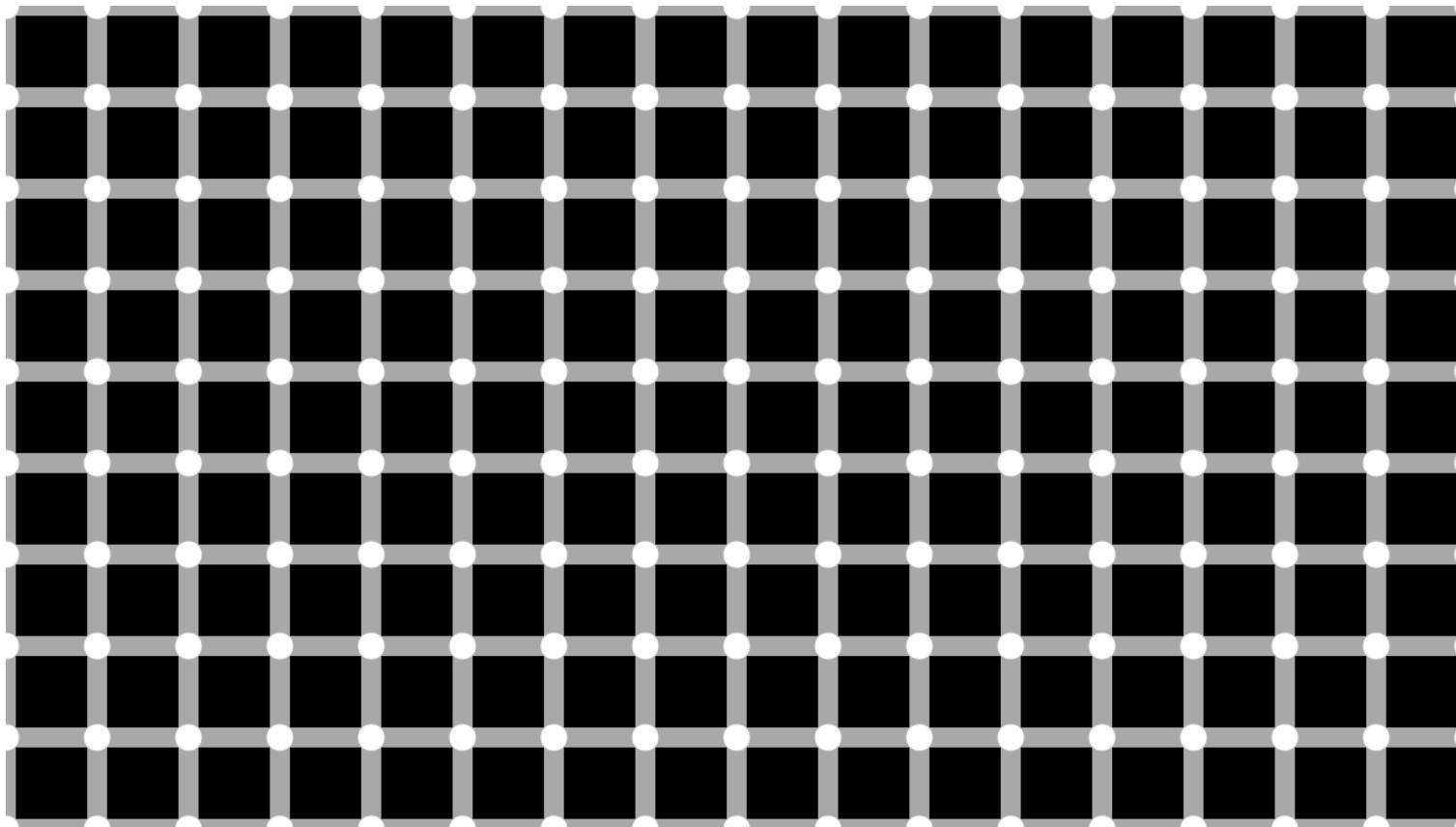
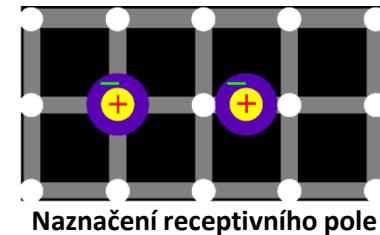
- Hermannova-Heringova mřížka (Hermann-Hering grid)
 - Světlejší kroužky v místě křížení černé mříže na bílém pozadí



Receptivní pole

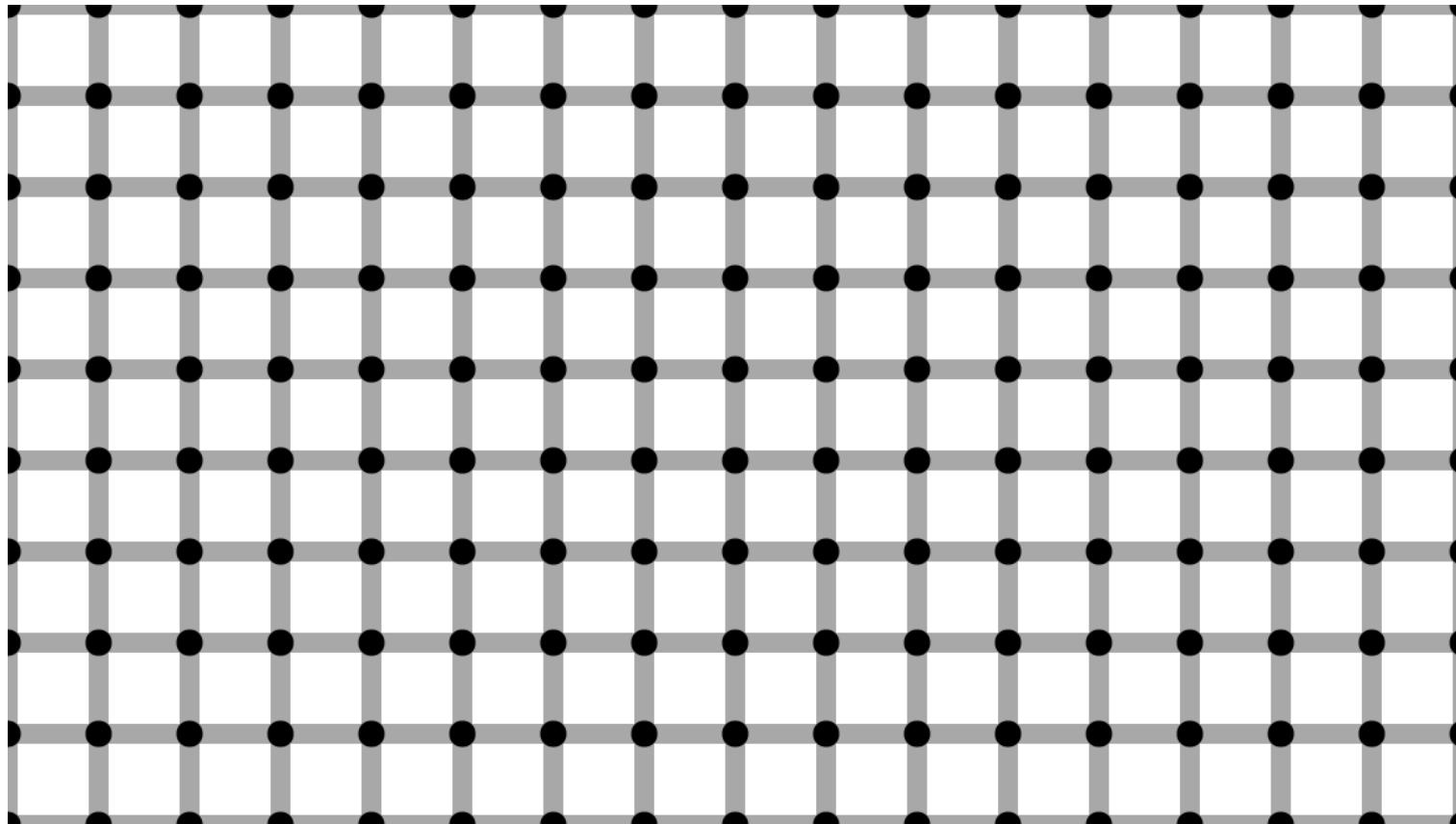
□ Demonstrace vlivu receptivního pole

- Scintilační mřížka (scintillating grid)
 - Bílé kroužky – vjem osciluje mezi černou a bílou



□ Demonstrace vlivu receptivního pole

- Scintilační mřížka (scintillating grid) – inverzní varianta
 - Černé kroužky – vjem osciluje mezi černou a bílou

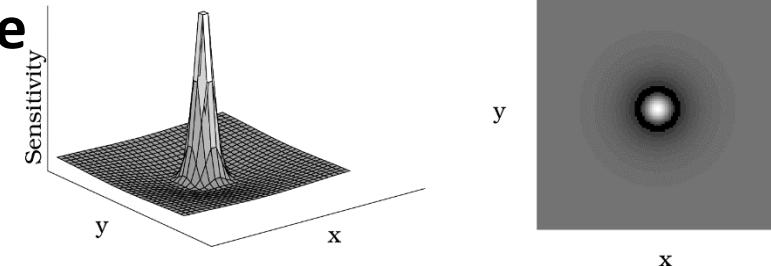


Receptivní pole

□ Odezva ganglionových buněk na světlo

❖ Dvoudimenziorní receptivní pole

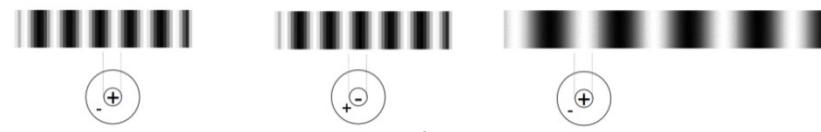
- Elektrofyziologická měření v ploše
 - Odezva neuronu na stimulaci světelným bodem v různých místech pole



Dvoudimenziorní odezva receptivního pole
(ON-center, OFF-surround ganglionová buňka sítnice)

❖ Kontrastová citlivost CSF (contrast sensitivity function)

- Popisuje **odezvu lineární soustavy** na **harmonické buzení**
 - Odezva neuronů na harmonické buzení s proměnnou frekvencí
- **CSF** závisí na **kontrastu nutném** k vyvolání **požadované odezvy** neuronu
 - Pokud **vzor nevyvolá odezvu** → nutno **zvýšit kontrast**
 - **Přizpůsobení vzoru** (prostorové frekvence) **receptivnímu poli** (jeho velikosti) → vyvolání **odezvy** vyžaduje **malý kontrast**
 - **Určení prahového kontrastu**
(contrast threshold)
 - **Převrácená hodnota CS** (contrast sensitivity)



Analýza odezvy

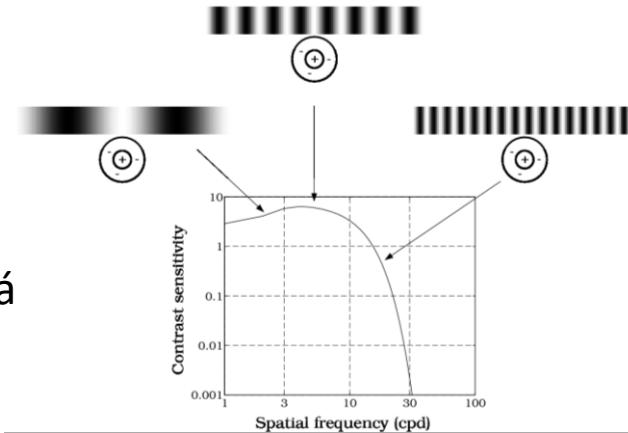
(receptivní pole ON/OFF vs. prostorová frekvence)

Receptivní pole

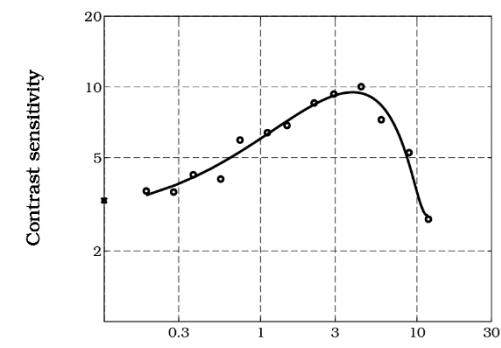
□ Odezva ganglionových buněk na světlo

❖ Kontrastová citlivost CSF (contrast sensitivity function)

- Popisuje **odezvu neuronu na harmonické buzení s proměnnou prostorovou frekvencí**
 - Poloha **vrcholu CSF** závisí na **velikosti receptivního pole**
 - Rychlosť **poklesu CFS** (nízké frekvence) vypovídá o **váze okolí** (surround) receptivního pole
 - Rychlosť **poklesu CFS** (vysoké frekvence) vypovídá o **velikosti středu** (center)
- **CFS má jeden vrchol**
 - Charakter **pásmové propusti** (bandpass)
 - **Vrchol CSF – střední kmitočet propusti**
- Při měření CSF je nutno (**dodržení linearity**)
 - Udržovat **konstantní střední intenzitu buzení**
 - Měnit pouze **kontrast buzení**
 - **Uvážení adaptace systému**



Vztah prostorové frekvence buzení, receptivního pole a výsledné funkce kontrastové citlivosti CSF



CSF neuronu parvocelulární vrstvy LGN opice
(nejlepší odezva okolo 5 cpd)

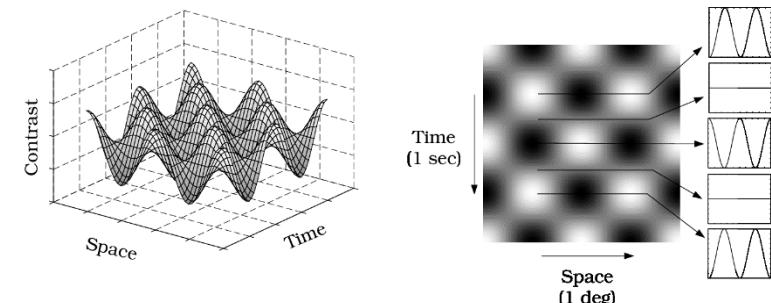
Wandell, B. A., Foundations of Vision, Sinauer Associates, 1995. (<https://foundationsofvision.stanford.edu/>)

Receptivní pole

□ Odezva ganglionových buněk na světlo

❖ Prostorově-časová analýza v kmitočtové oblasti

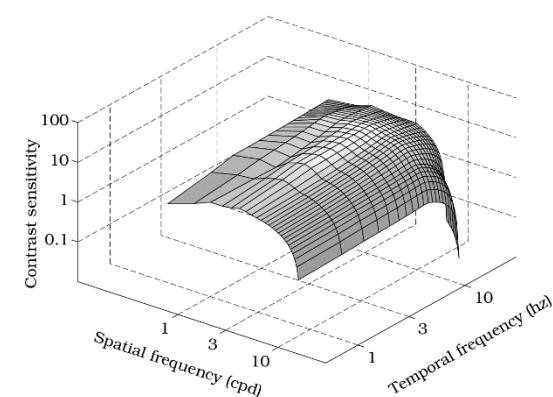
- Odezva na **harmonické buzení** v **prostoru a čase**
- Vzor získán **násobením** kontrastních **kosinusových vzorů**
 - Kosinusovka v prostoru a čase



Prostorově-časové znázornění harmonického stimulu
(contrast-reversing grating)

❖ Prostorově-časová CSF (spatio-temporal CSF)

- Podle **tvaru CSF** lze usuzovat na **charakter receptivního pole**
- **Časová CSF** se může pro **center a surround** lišit
- Důležitá je **otázka prostorově-časové separability**

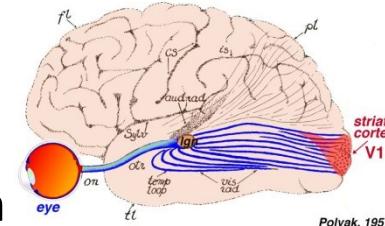


Prostorově-časová CSF pro parvocelulární neuron v LGN opice
(vertikální osa odpovídá amplitudě STH odezvě neuronu)

□ Primární zraková kůra V1 (primary visual/striate cortex)

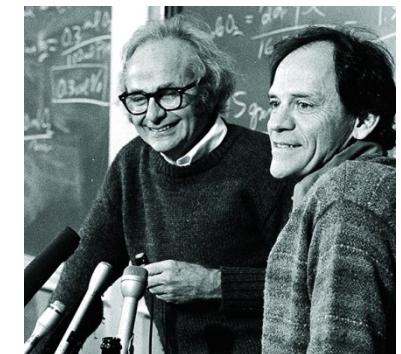
❖ Velká oblast zpracovávající zrakový signál z LGN

- Asi $1.5 \cdot 10^8$ neuronů (LGN $\sim 10^6$ neuronů), plocha $\sim 18 \text{ cm}^2$
- Původní studie primární zrakové kůry na kočkách/opicích
 - Dále studie využívaly PET a dnes hlavně fMRI
- Informace z různých typů ganglionových buněk podél dráhy → kůra
 - Magnocelulární/parvocelulární buňky → příslušné vrstvy zrakové kůry
 - Prostorové uspořádání ganglionových buněk → neuronů LGN → signály ve V1



❖ Receptivní pole primární zrakové kůry

- Receptivní pole V1 kvalitativně odlišné od polí v LGN
 - Kruhově symetrická v LGN → většinou asymetrická ve V1
 - Vybrané neurony V1 → odezva na pohybující se stimul
 - Vybrané oblasti V1 → binokulární odezva
 - Analýza tvaru, textury, pohybu a stereopse
 - Výzkum (průkopníci Hubel a Wiesel - na kočkách)

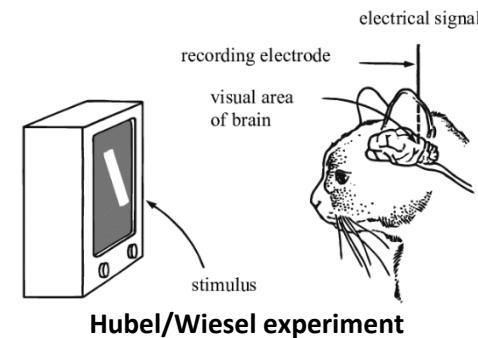


David Hubel a Torsten Wiesel
(Nobelova cena 1981)

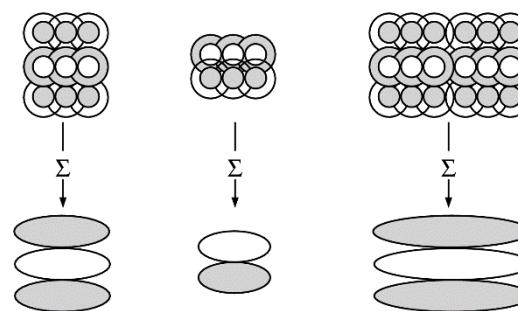
□ Primární zraková kůra V1 (primary visual/striate cortex)

❖ Receptivní pole primární zrakové kůry

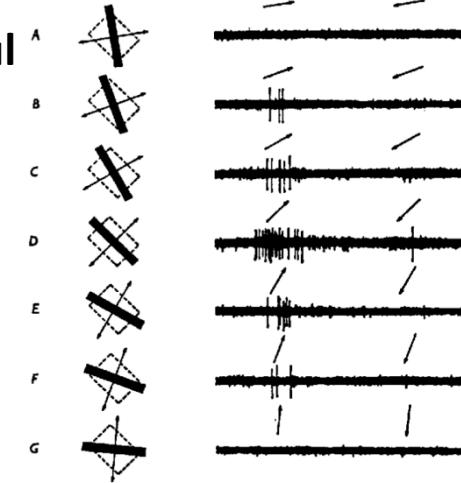
- Buňky jednoduché (simple) a složité (complex)
 - Jednoduché (simple) buňky → lineární (superpozice)
 - Složité (complex) buňky → neplatí superpozice
- Orientační selektivita (orientation selectivity)
 - Jednoduché (simple) buňky
 - Orientovaná receptivní pole → odezva na směrový stimul
 - Vlastnosti dány superpozicí odezv neorientovaných polí
- Směrová selektivita (direction selectivity)
 - Složité (complex) buňky
 - Odezva na pohyb stimulu v daném směru
 - Zpracování vstupů z magnocelulární dráhy



Hubel/Wiesel experiment



Receptivní pole s orientační selektivitou
(superpozice odezv neorientovaných
receptivních polí)

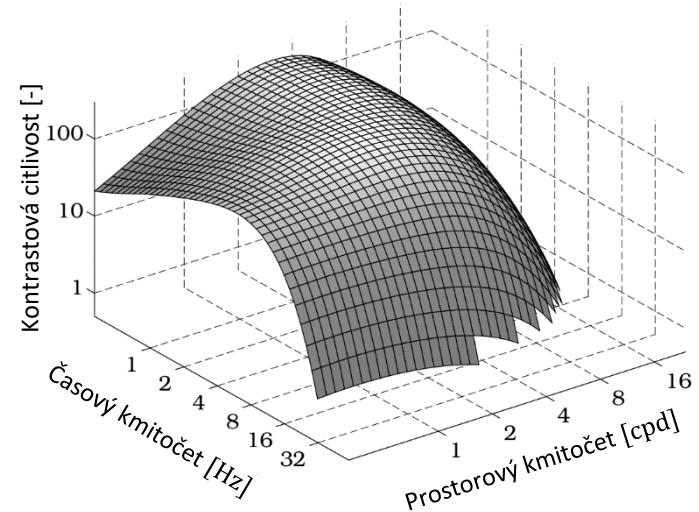
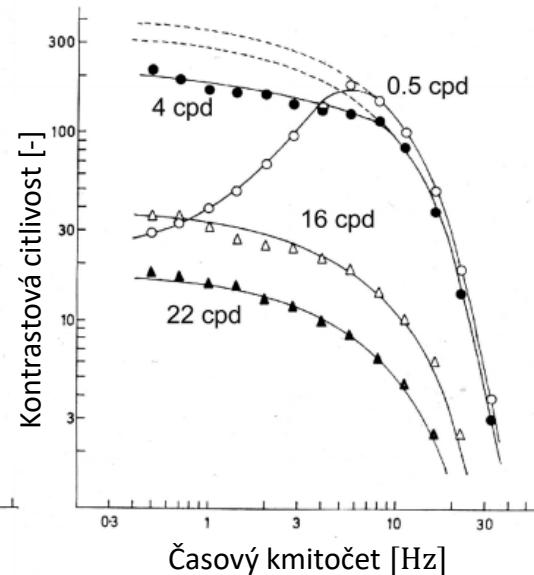
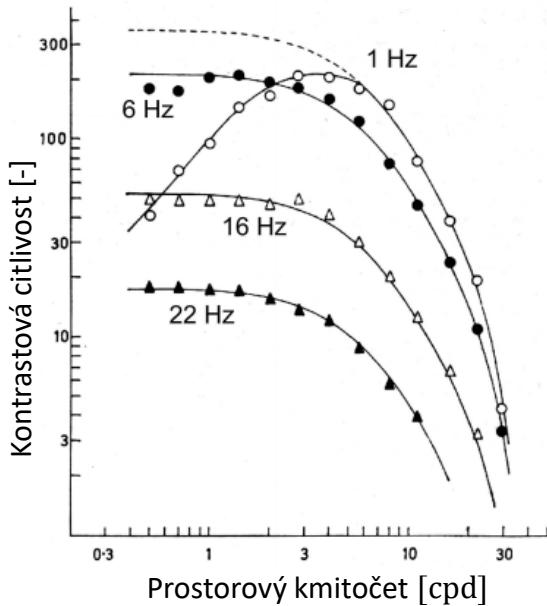


Směrová selektivita odezvy neuronu
(akční potenciál v závislosti na směru
pohybu a orientaci stimulu, receptivní
pole V1 u opice)

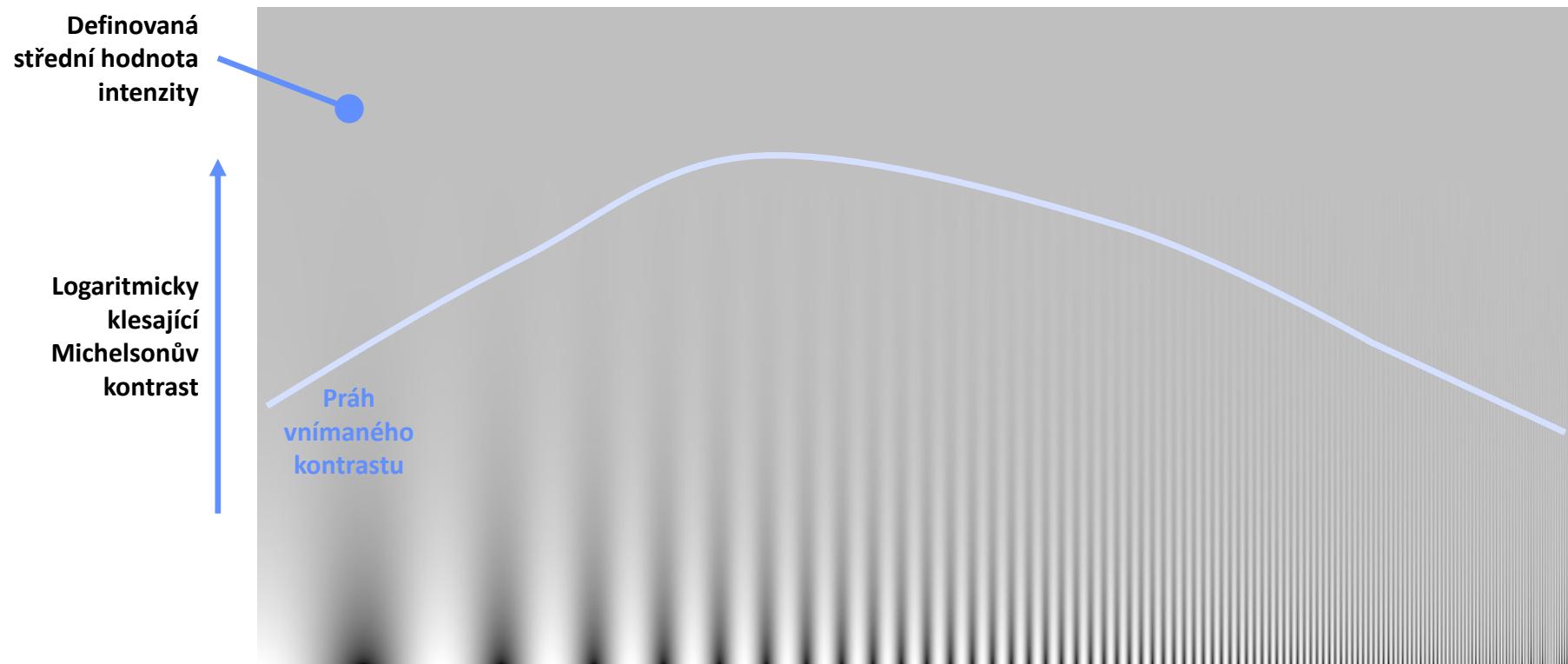
□ Odezva na vzory (pattern sensitivity)

❖ Závislost citlivosti na dalších parametrech

- Prostorově-časová CSF (spatio-temporal CSF)



- Campbell-Robsonův obrazec (sinusový průběh)
 - ❖ Slouží k přímému určení prostorové CSF



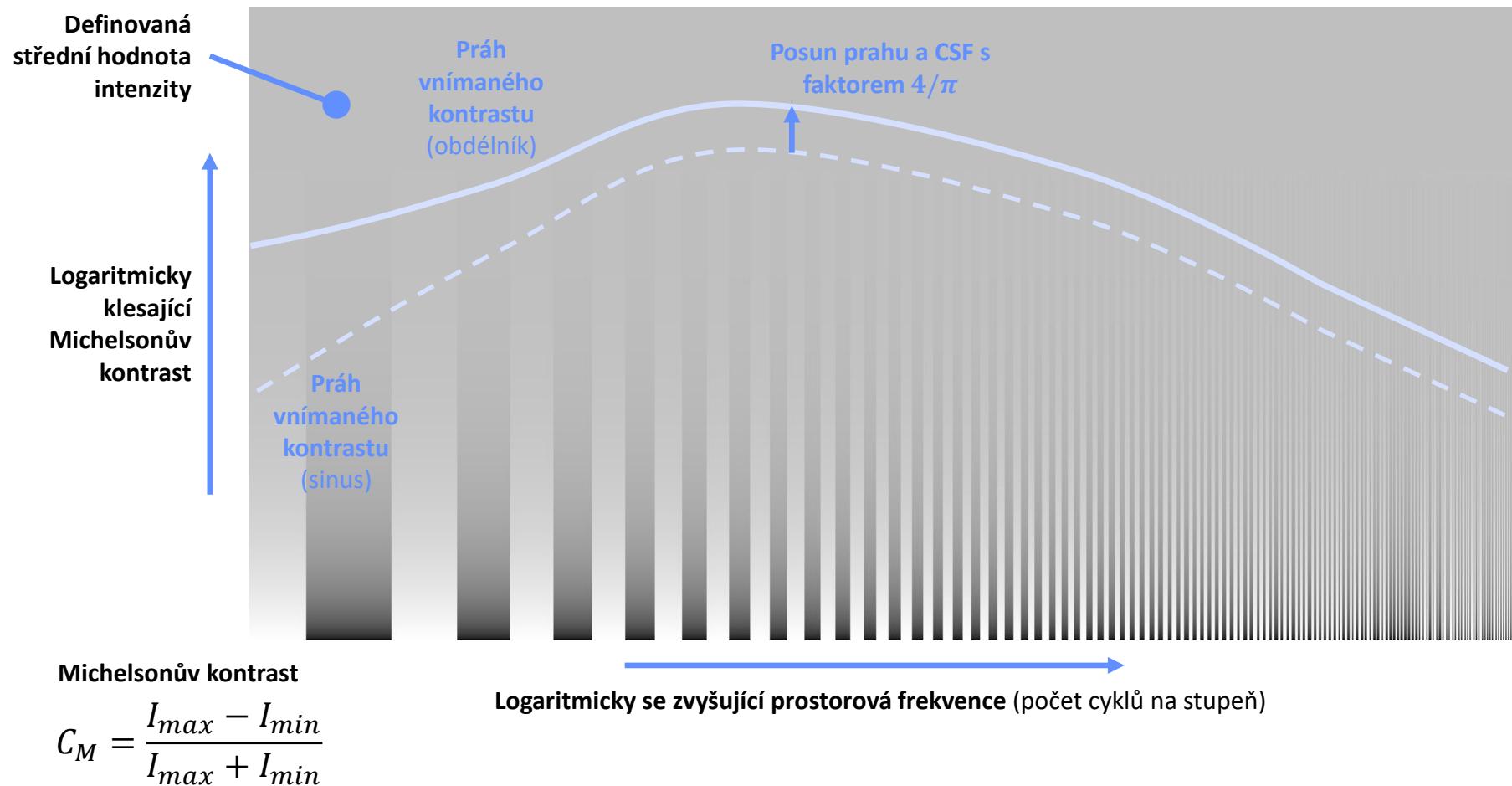
Michelsonův kontrast

$$C_M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Logaritmicky se zvyšující prostorová frekvence (počet cyklů na stupeň)

Campbell, F. W., Robson, J. G., Application of Fourier analysis to the visibility of gratings, J. Physiol., 1968.

- Campbell-Robsonův obrazec (obdélníkový průběh)
- ❖ Slouží k přímému určení prostorové CSF

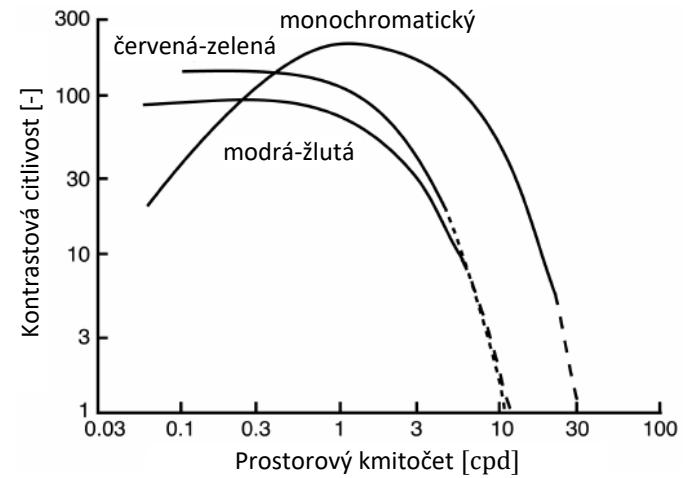
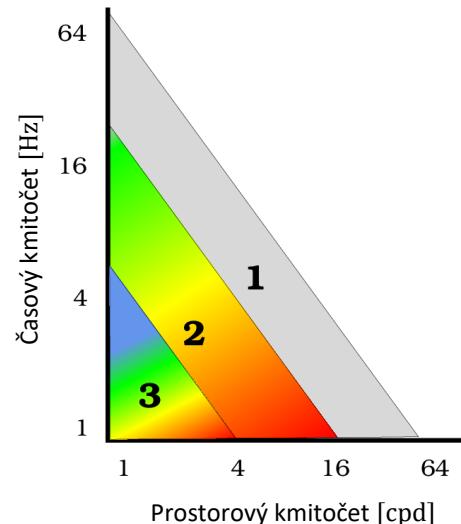


Campbell, F. W., Robson, J. G., Application of Fourier analysis to the visibility of gratings, J. Physiol., 1968.

□ Odezva na vzory (pattern sensitivity)

❖ Závislost citlivosti na dalších parametrech

- Větší omezení v oblasti vnímání barev
 - (3) Nejnižší prostorový kmitočet
 - Vjem proměnných vzorů modrá-žlutá, červená-zelená, světlý-tmavý (monochrom)
 - (2) Prostorový kmitočet nad 3-4 cpd
 - Nevnímáme detaily přechodů modrá-žlutá (mimo pásmo S čípků)
 - (1) Prostorový kmitočet nad 16 cpd nebo časový kmitočet nad 16 Hz
 - Vnímáme barevné změny jako monochromatický vzor nad střední barvou



□ Interpretace obrazu (image interpretation)

❖ Barevný vzhled (color appearance)

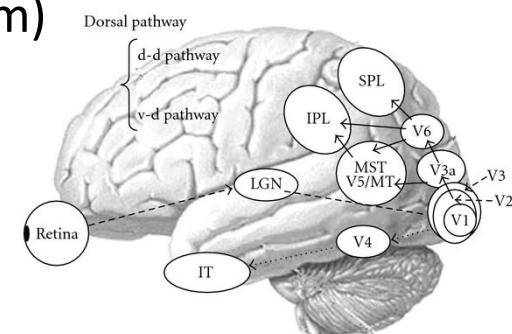
- Vizuální systém odhaduje spektrální odrazivost z odraženého světla
- Výpočetní analýza barev pomáhá porozumět pochodům
(spektrální charakteristiky, oponentní systém, ...)



Hermann von Helmholtz
(1821 – 1894, Německo)

❖ Pohyb a hloubka (motion and depth)

- Odhad pohybu a hloubky → úzce související výpočetní mechanizmy změny obrazu spojené s pohybem pozorovatele → informace o hloubce)
- Identifikovatelný vizuální/optický tok (visual stream) pro hodnocení pohybu → od sítnice až do oblasti MT (middle temporal / V5)

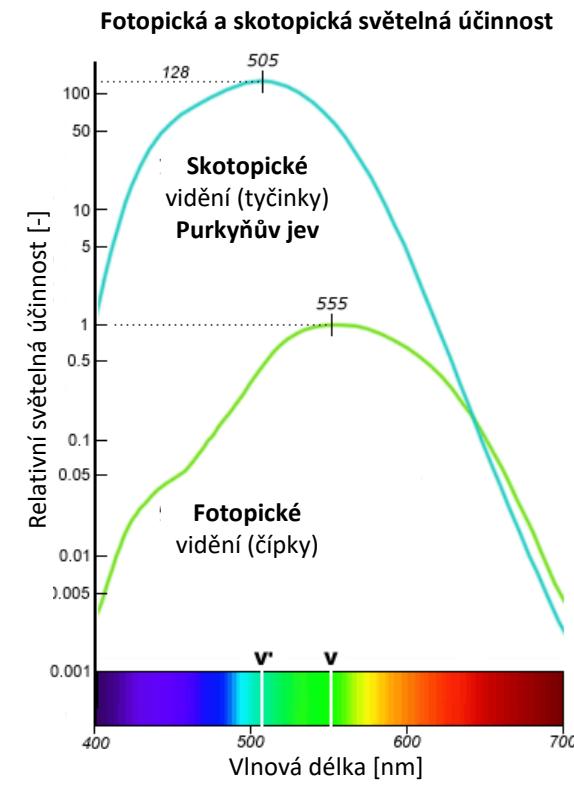
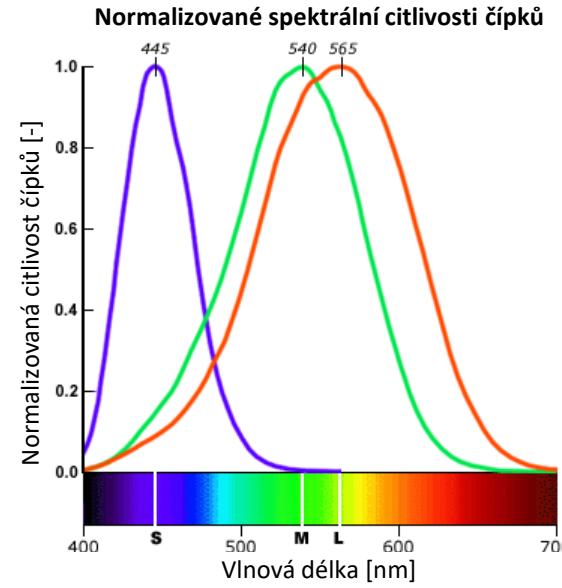
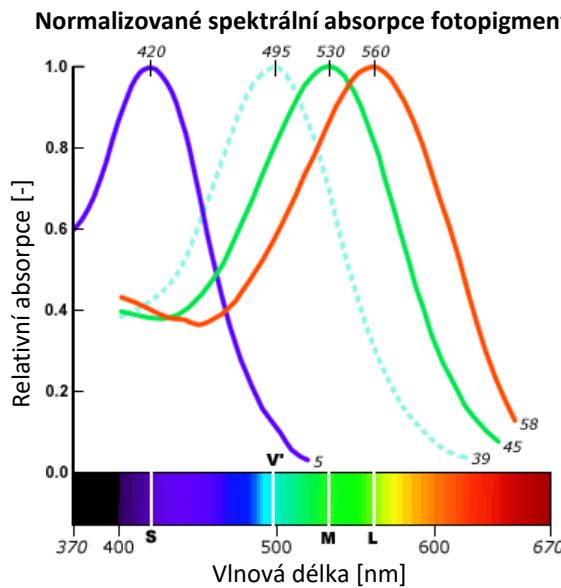


Zraková dráha a oblasti zrakové kůry
(poloha MT - middle temporal/V5)

□ Spektrální citlivost receptorů

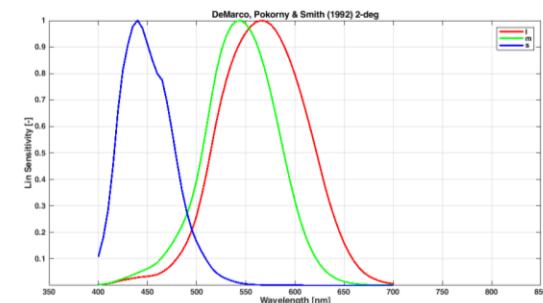
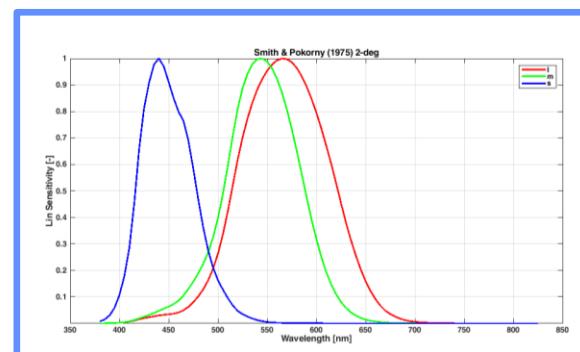
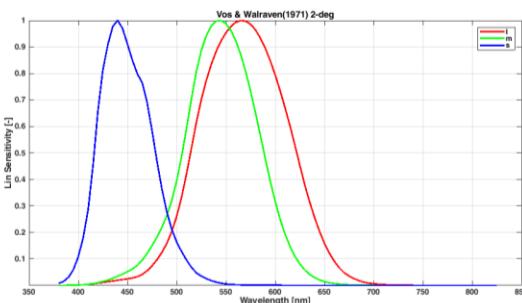
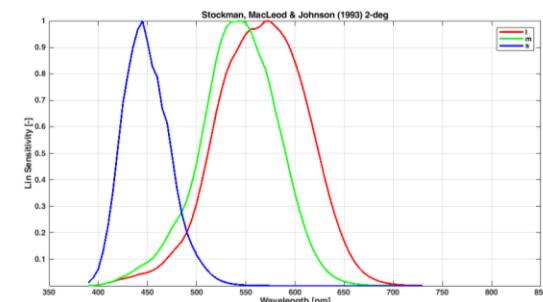
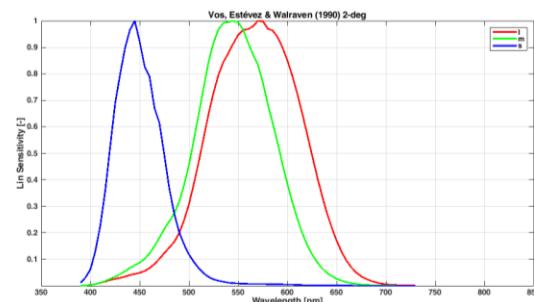
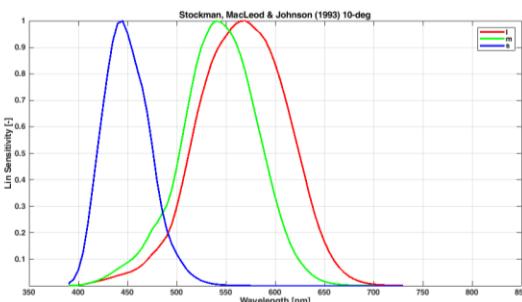
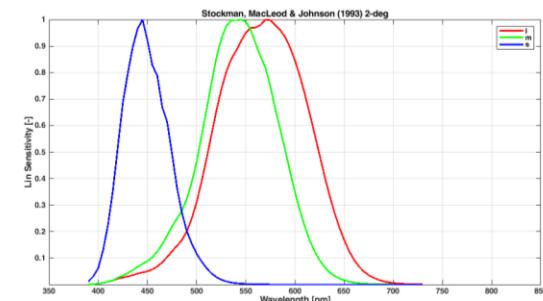
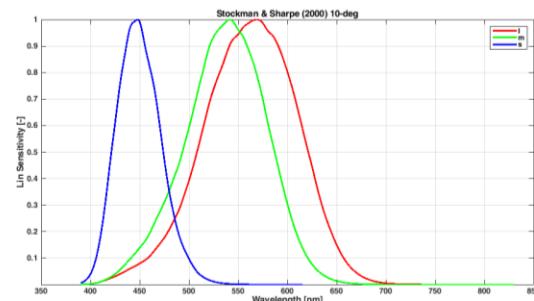
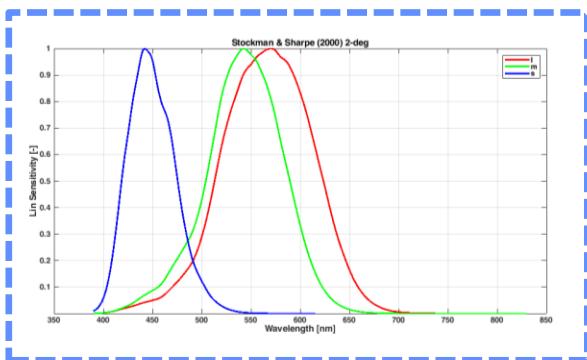
❖ Spektrální oblasti (vrchol absorpce, citlivost) pro tyčinky/čípky

- V' – skotopická (tyčinky) – 495 nm (505 nm)
- L – fotopická (čípky L) – 560 nm (565 nm)
- M – fotopická (čípky M) – 530 nm (540 nm)
- S – fotopická (čípky S) – 420 nm (445 nm)



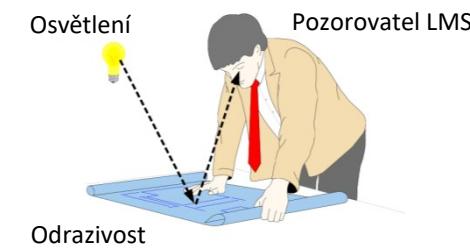
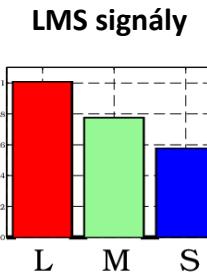
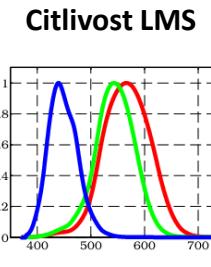
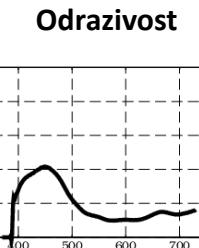
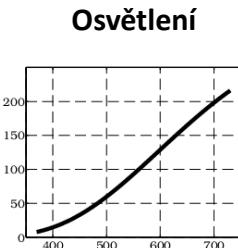
Barevné vidění

❖ Spektrální citlivosti LMS čípků (různé publikované průběhy)



❑ Barevný vzhled (color appearance)

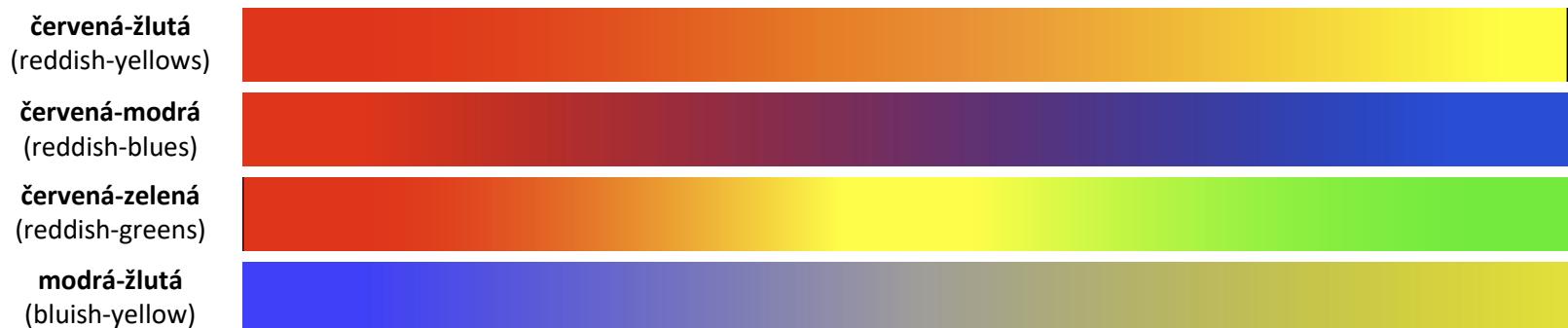
- ❖ Opakování (naprostých) základů →
- ❖ Trichromacie (kódování spektra)
 - Tři typy čípků (L, M, S) → rozdílné spektrální citlivosti
 - Výstupní signál (L, M, S) → odpovídá množství absorbovaných fotonů
 - Dvě spektrálně odlišná světla → stejná odezva čípků → stejný vjem (metamer)
 - Vysvětuje stejný vjem → nevysvětuje ale jaký vjem bude (color appearance)
- ❖ Barevný vzhled (základní pochody)
 - Barevná oponence (color opponency)
 - Vzhled závisí na rozdílu odezv čípků (R-G a B-Y)



□ Model barevného vidění

❖ Dvě základní teorie pro barevné vidění

- (a) Trichromatická (Thomas Young 1802, Hermann von Helmholtz 1850)
 - Funguje dobře např. pro aditivní experimenty
 - Nedokáže vysvětlit řadu problémů (tzv. oponentní chování)



- (b) Oponentní teorie (Ewald Hering 1892)
 - Tři oponentní kanály vysvětlují oponentní chování
 - Kanály bílá-černá (WS), červená-zelená (RG), žlutá-modrá (YB)



□ Model barevného vidění

❖ Vícestupňové modely

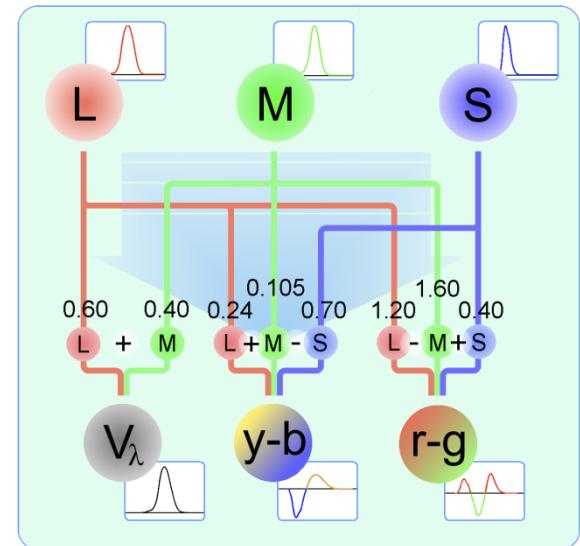
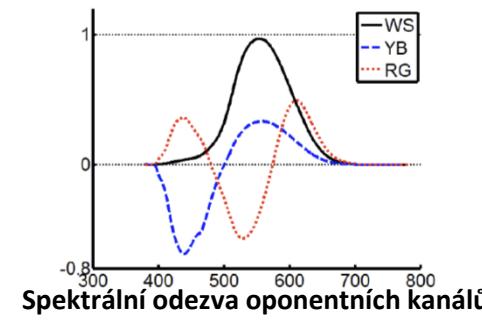
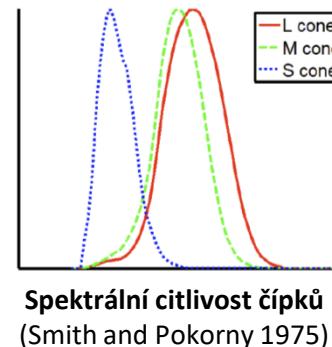
- Kombinace trichromatické a oponentní teorie
- Dokáží uspokojivě popsat řadu jevů vnímání barev
- Mají většinou dva (Johannes von Kries ~1900) až tři stupně (vrstvy)

❖ Model Ingling and Tsou (1977)

- Transformace L, M, S na $V_\lambda, y - b, r - g$

$$\begin{bmatrix} V_\lambda \\ y - b \\ r - g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.600 & 0.400 & 0.000 \\ 0.240 & 0.105 & -0.700 \\ 1.200 & -1.600 & 0.400 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}$$

- Transformace spektrálních citlivostí čípků

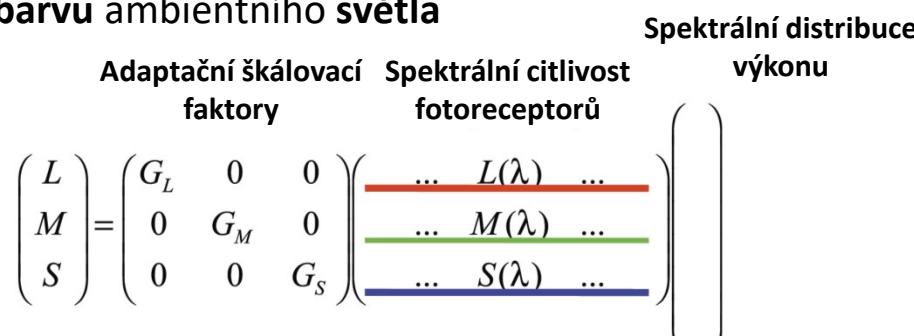


J. Carl R. Ingling and B. H.-P. Tsou. Orthogonal combination of the three visual channels. Vision Res., 17(9):1075–1082, 1977.

G. M. Machado, M. M. Oliveira and L. A. F. Fernandes, A Physiologically-based Model for Simulation of Color Vision Deficiency, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 15, no. 6, 2009.

❑ Barevný vzhled (color appearance)

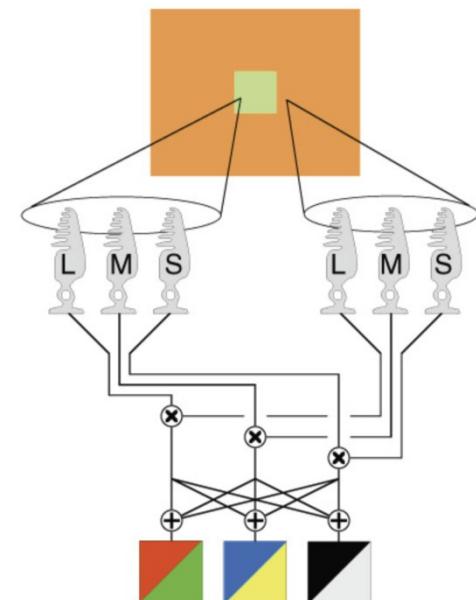
- Chromatická adaptace (chromatic adaptation)
 - Barevný vzhled → závisí také na kontextu
 - Čípky se adaptují na ambientní osvětlení
 - Teorie chromatické adaptace (Von Kries)
 - Určení zisků v jednotlivých kanálech L, M, S
 - Vyrovnání s ohledem na celkovou intenzitu a barvu ambientního světla



- Stálost barev (color constancy)
 - Schopnost vnímat barvy objektů → neměnné vůči barvě světelného zdroje



Johannes Adolf von Kries
(1853 – 1928, Německo)



Chromatická adaptace - von Kries
(určení zisku jednotlivých kanálů L, M, S podle průměrné odezvy L, M, S v okolí)

□ Porucha barvocitu (Daltonismus – John Dalton 1794)

- (I) Anomální trichromazie
 - Způsobena **posunem vrcholu citlivosti fotopigmentu**
 - (a) protanomálie (protanomaly) – **oslabené vnímání červené barvy (L – čípky)**
 - (b) deuteranomálie (deuteranomaly) – **oslabené vnímání zelené barvy (M – čípky)**
 - (c) tritanomálie (tritanomaly) – **oslabené vnímání modré barvy (S – čípky)**
 - (II) Dichromazie
 - Způsobena **chybějícím fotopigmentem**
 - (a) protanopie (protanopia) – **chybějící vnímání červené barvy (L – čípky)**
 - (b) deuteranopie (deutanopia) – **chybějící vnímání zelené barvy (M – čípky)**
 - (c) tritanopie (tritanopia) – **chybějící vnímání modré barvy (S – čípky)**
 - (III) Monochromazie
 - **Vzácná porucha** - přítomen pouze **jeden nebo žádný fotopigment**
 - (a) čípková (cone monochromacy) – **přítomen jeden fotopigment**
 - (b) tyčinková (rod monochromacy) – **žádný fotopigment**

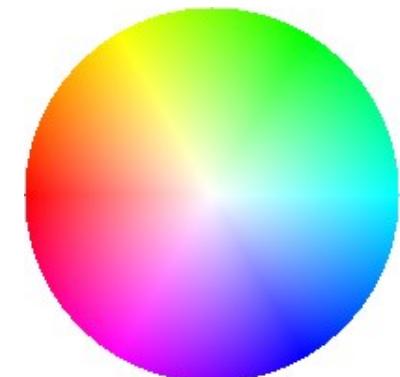
❖ Nejčastější jsou typy (Ia, Ib) a (IIa, IIb)

- Protanopie, protanomálie, deuteranopie, deuteranomálie

- Porucha barvocitu – simulace a ukázky
 - ❖ Anomální trichromazie – protanomálie



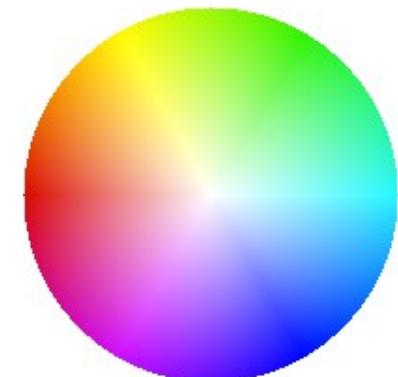
Normální



- Porucha barvocitu – simulace a ukázky
 - ❖ Anomální trichromazie – protanomálie



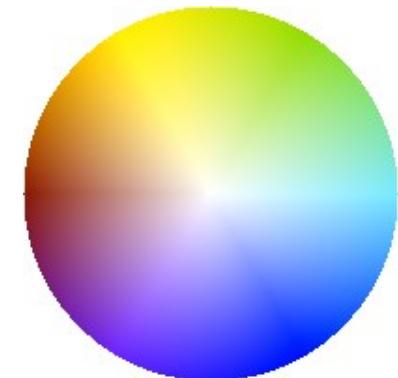
Protanomálie ($\Delta\lambda = 2$)



- Porucha barvocitu – simulace a ukázky
 - ❖ Anomální trichromazie – protanomálie



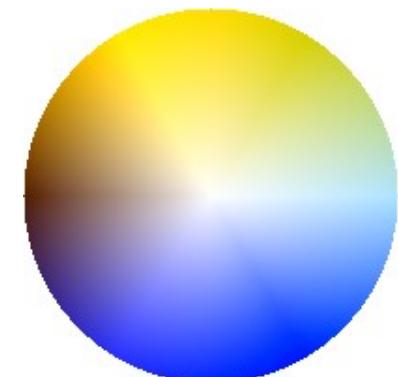
Protanomálie ($\Delta\lambda = 8$)



- Porucha barvocitu – simulace a ukázky
 - ❖ Anomální trichromazie – protanomálie



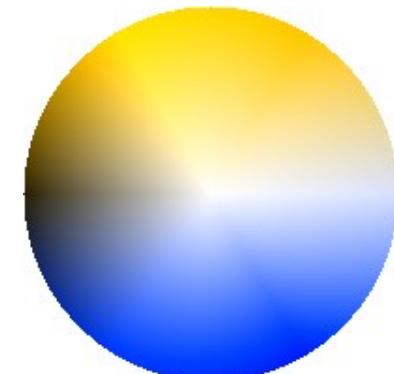
Protanomálie ($\Delta\lambda = 14$)



- Porucha barvocitu – simulace a ukázky
 - ❖ Anomální trichromazie – protanomálie



Protanopie ($\Delta\lambda = 20$)



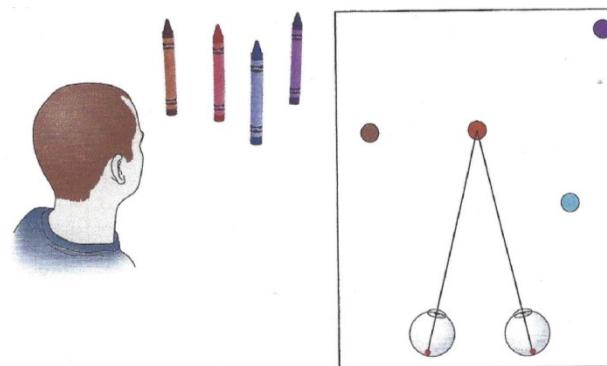
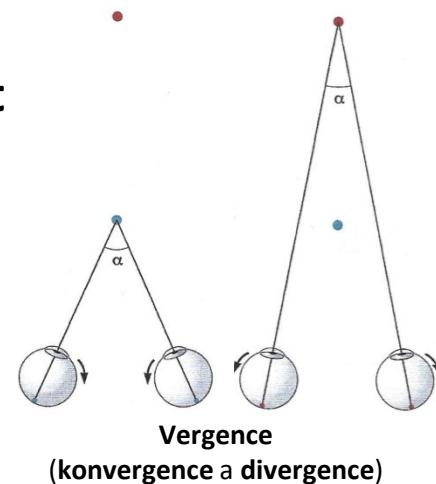
□ Binokulární vidění

❖ Vnímání scény pomocí dvou očí

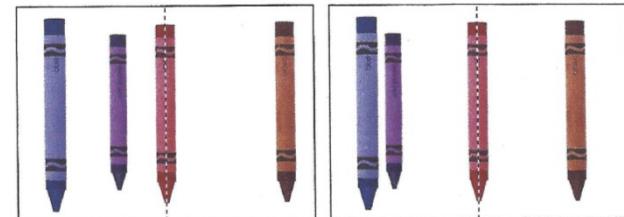
- Akomodace – proces **ostření oka na pozorovaný objekt**
- Vergence (konvergence/divergence) – pohyb očí při změně vzdálenosti pozorovaného objektu (přiblížování/vzdalování)

❖ Binokulární disparita

- Rozdíl mezi obrazy na sítnici levého/pravého oka



Pozorovaná scéna
(pozorovatel fixuje na červenou pastelku)

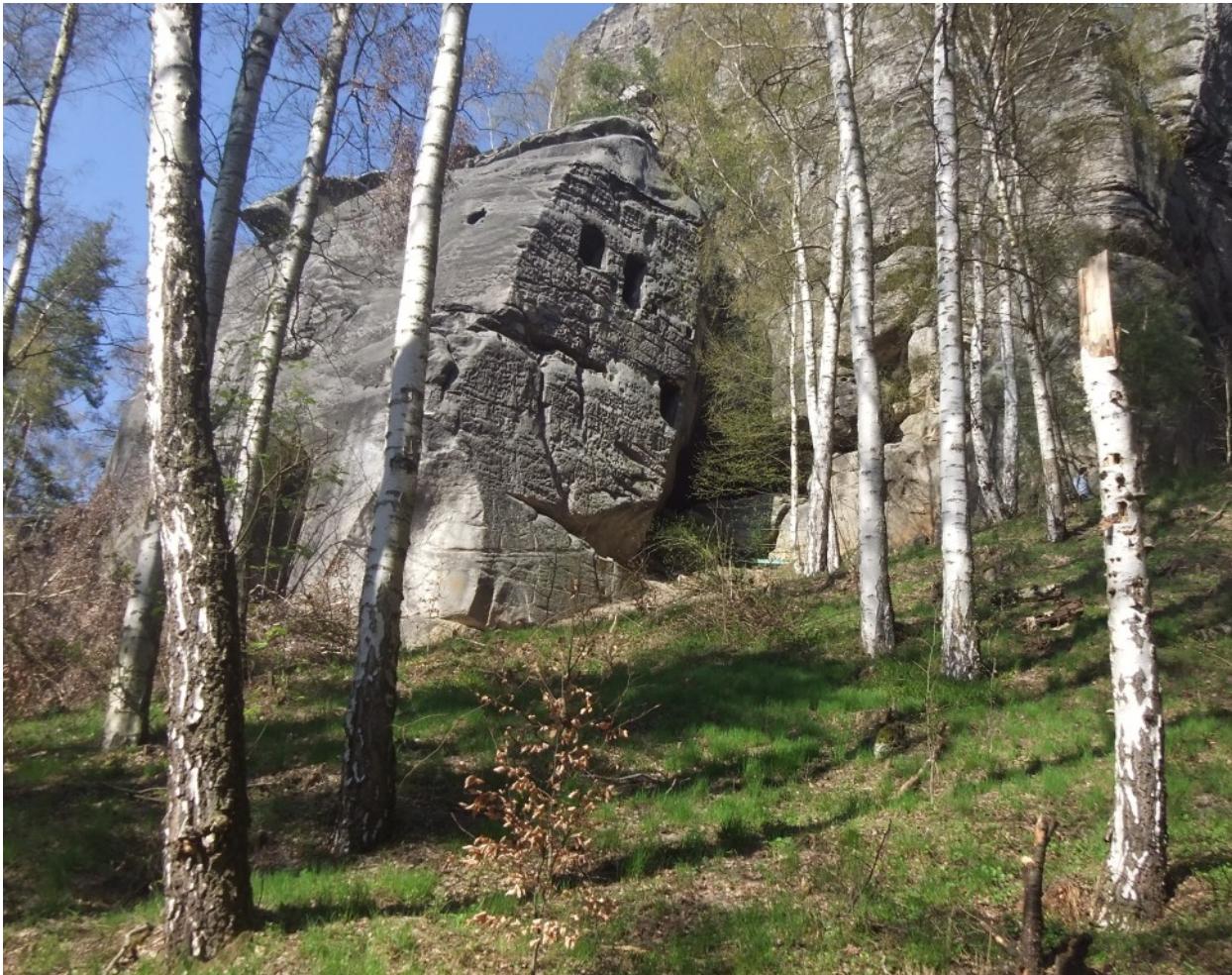


Obraz na sítnice levého/pravého oka
(pozorovatel fixuje na červenou pastelku)

Snímek pro levé oko



Snímek pro pravé oko



□ Random-dot Stereogram

❖ Původní představa o stereoskopickém vnímání

- **Stereopse** probíhá relativně vysoko v hierarchii vizuálního systému
 - Nejprve dochází k detekci objektů (obličeji, ...)
 - Následně jsou **disparity** objektů využity k upřesnění vjemu hloubky

❖ Tato představa byla vyvrácena

- Opačný postup
 - **Stereopse** může pomocí **nalézt objekty a povrchy v pozorované scéně** (např. odlišení šedé myši od stejně barevného pozadí – **stereopse u koček**)

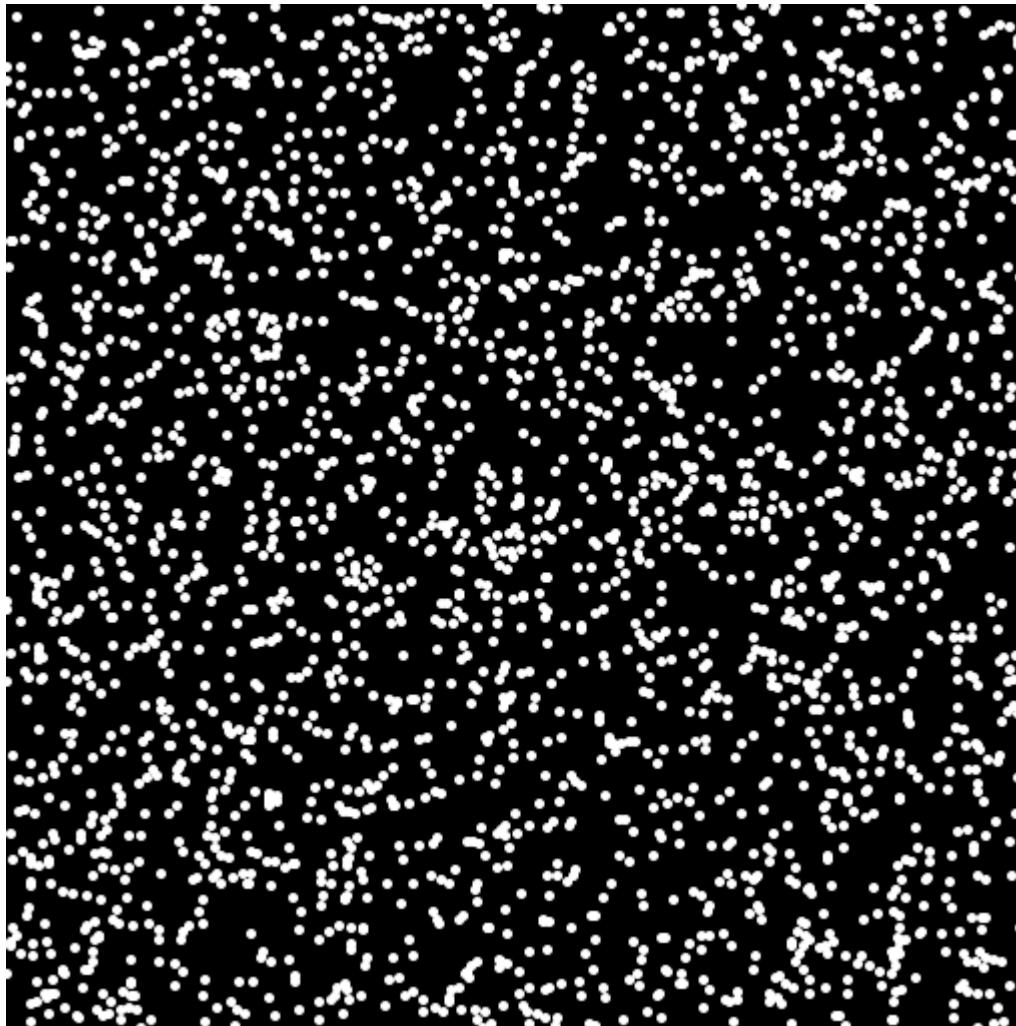


Béla Julesz (1928-2003)

- **Béla Julesz** (1928 - 2003, 1956 Maďarsko → USA), **Bell Laboratories**
 - Dokázal tuto hypotézu pomocí **Random-dot stereogramu (RDS)**
 - Objekty v RDS vnímáme jen díky stereopsi

Binokulární vidění

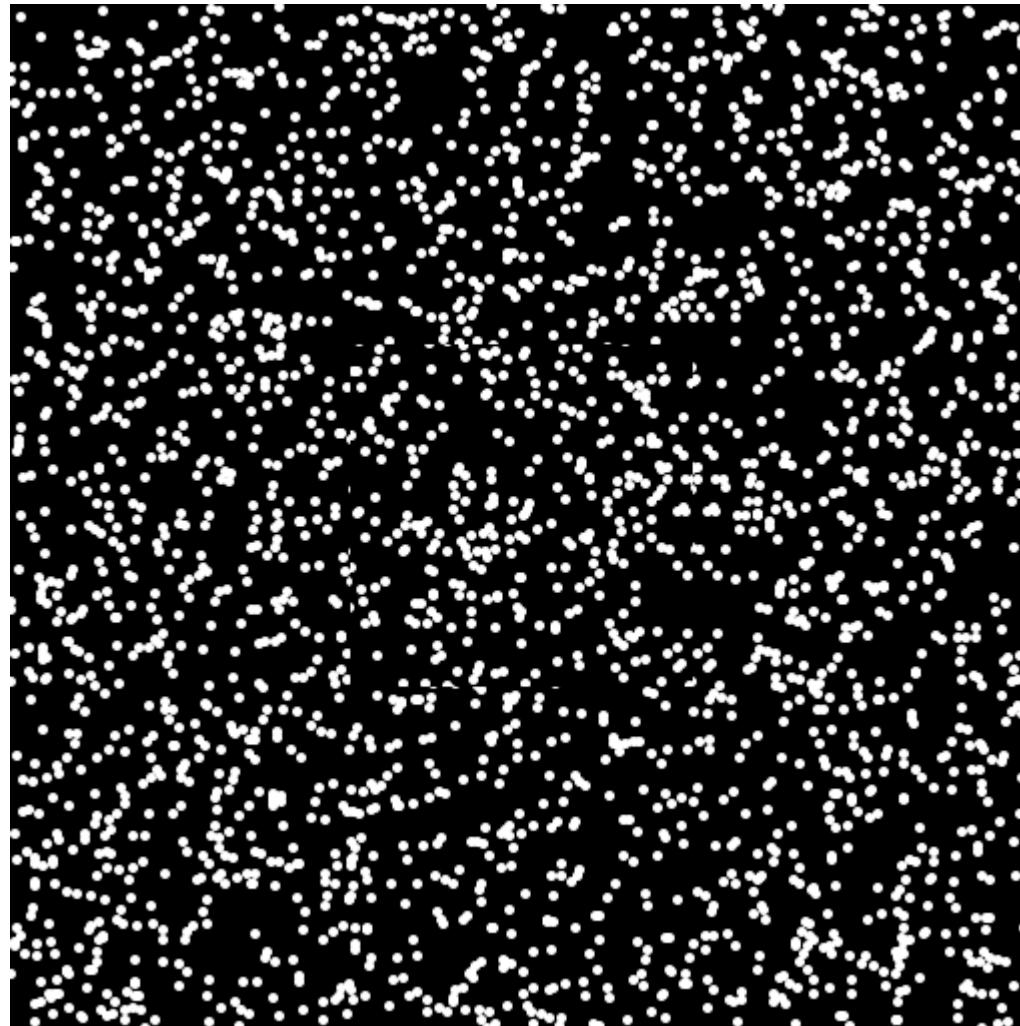
- ❖ RDS – matice náhodných teček (šum) pro levé oko



Levé oko
512 x 512 pixelů
1 % bílých bodů
Průměr 5 pixelů

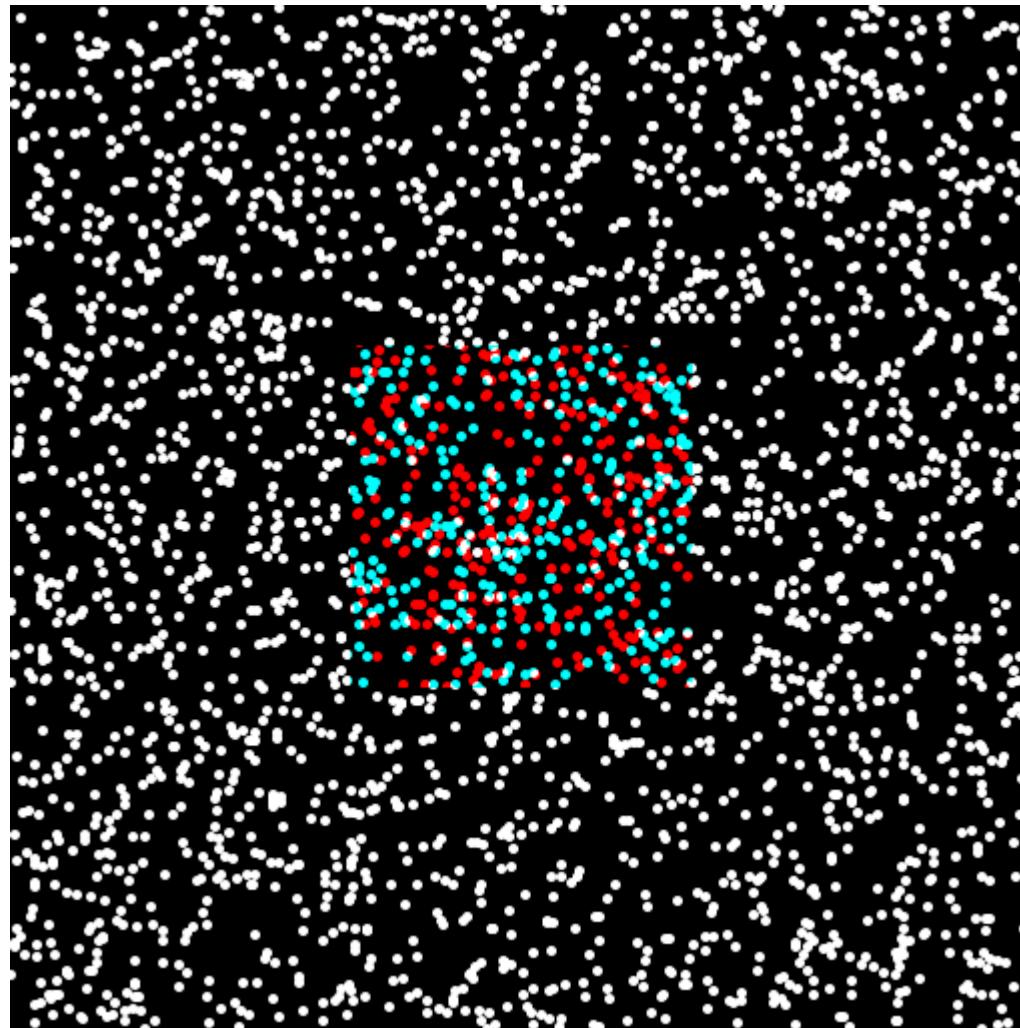
Binokulární vidění

- ❖ RDS – matice náhodných teček (šum) pro pravé oko



Pravé oko
512 x 512 pixelů
1 % bílých bodů
Průměr 5 pixelů

❖ RDS – anaglyf (červená/azurová)



Levé oko → azurová
Pravé oko → červená

Oddělení obrazů pro levé
a pravé oko pomocí
anaglyfových brýlí.



□ Úrovňové charakteristiky

❖ Weber-Fechnerův zákon

- Vztah mezi **fyzikální intenzitou podnětu** a **subjektivním vjemem intenzity** (počitkem)

$$\Delta S = \frac{\Delta L}{L}$$

- ΔS – změna intenzity subjektivního vjemu
- ΔL – malá změna fyzikální intenzity (jasu) podnětu
- L – fyzikální intenzita podnětu (jas) na receptor

- **Logaritmická závislost po integraci**

- Pro prahový kontrast platí (okolo 2 %)

$$C_0 = \frac{\Delta L}{L} = 0,02$$



Německý lékař Ernst Heinrich
Weber (1795 - 1878)



Německý psycholog
Gustav Theodor Fechner
(1801 - 1887)

□ Úrovňové charakteristiky

❖ Weber-Fechnerův zákon

- Vztah mezi **fyzikální intenzitou podnětu** a **subjektivním vjemem intenzity** (počitkem)
- Pro prahový kontrast platí (okolo 2 %)

$$C_0 = \frac{\Delta L}{L} = 0,02$$

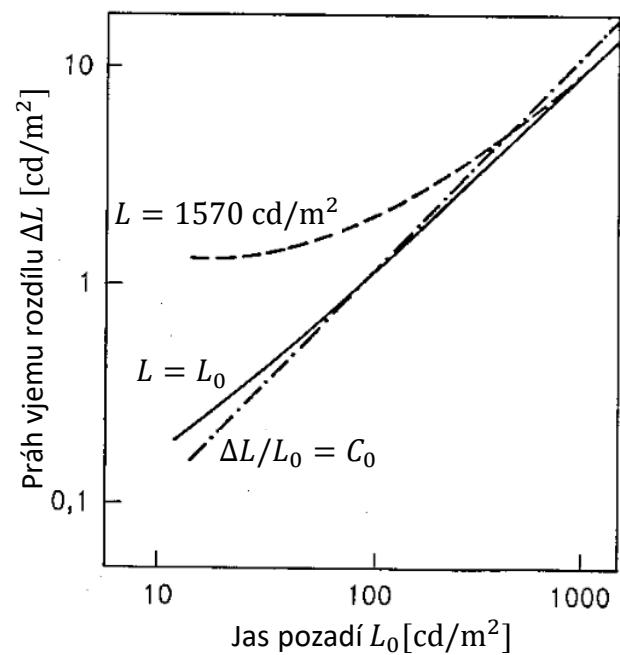
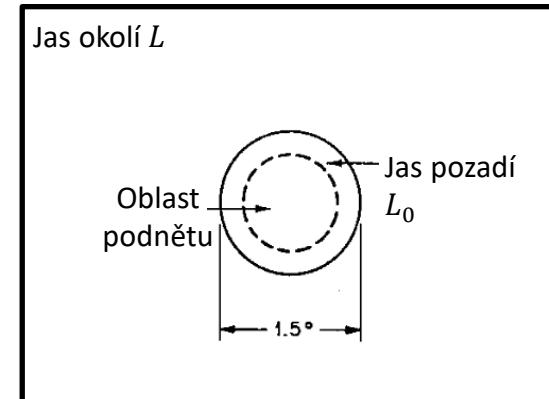
❖ Adaptační mechanismy

(~9 řádů, ~100 μlx až 100 klx)

- otevřání zornice – 2 až 8 mm (rychlé)
- organizace receptorů na sítnici (pomalé)
- chemické a morfologické změny, koncentrace pigmentu (pomalé až 40 minut)

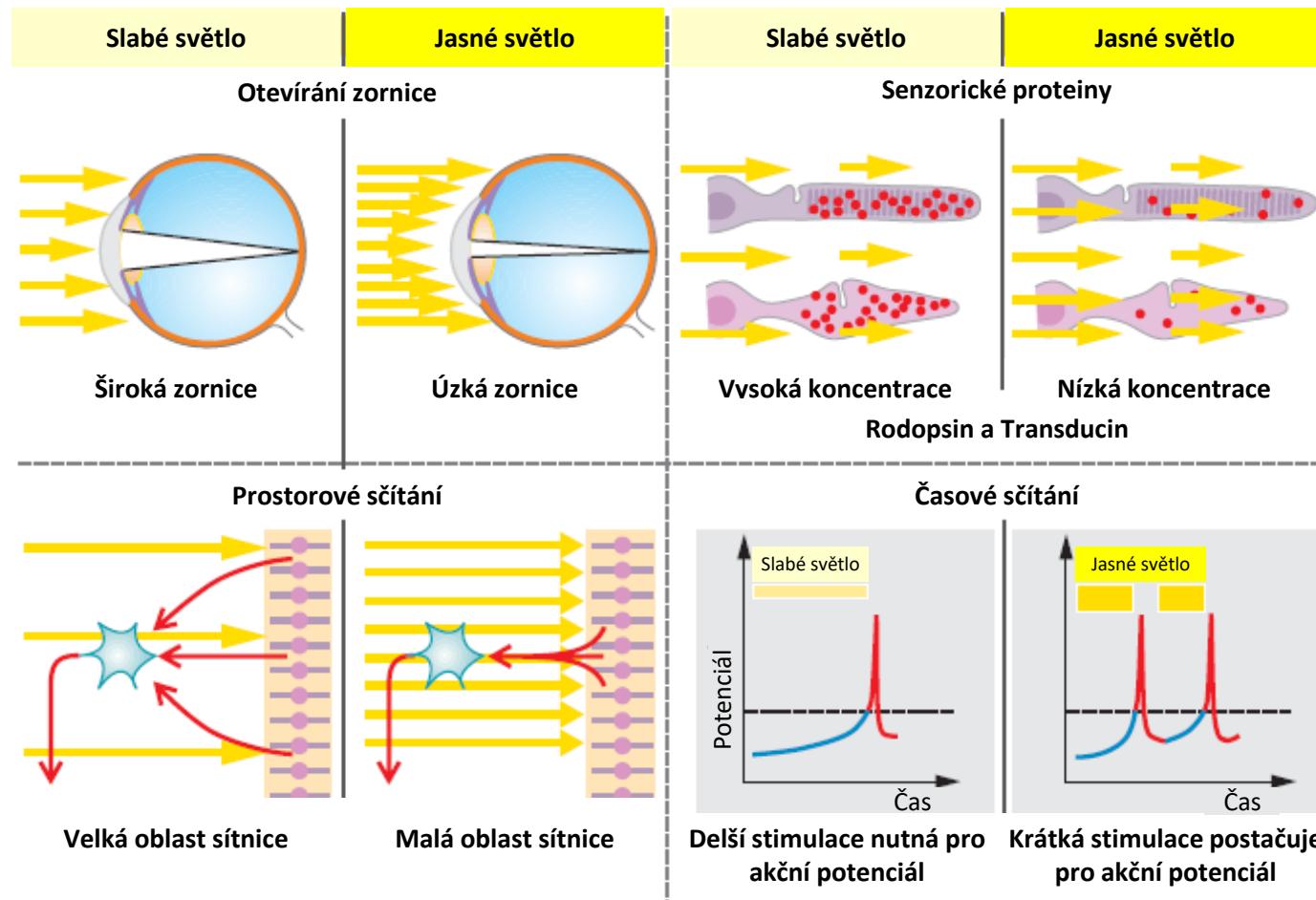
❖ Dynamicky po adaptaci

- 1:10 skotopické vidění
- 1:1000 fotopické vidění



□ Úrovňové charakteristiky

❖ Adaptační mechanismy



☐ Časové charakteristiky

❖ Ferry-Porterův zákon (Ferry-Porter law)

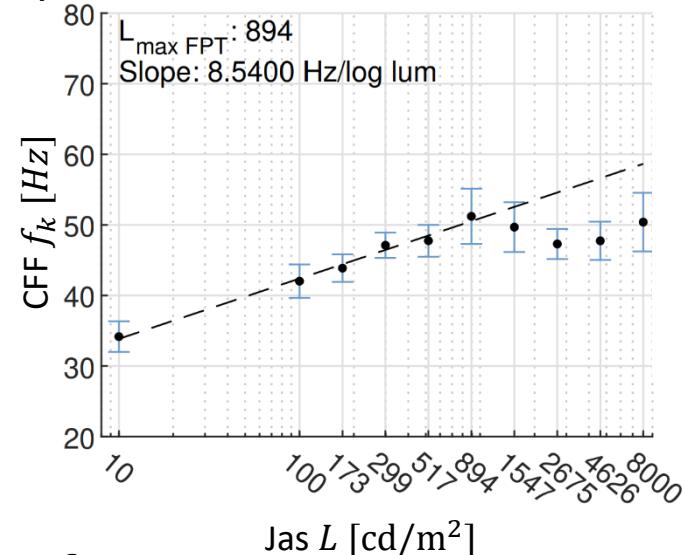
- **Mizí vjem blikání nad kritickým kmitočtem**
 - Kritický kmitočet blikání f_k [Hz]
(CFF – Critical Flicker Frequency)
 - Špičková hodnota jasu L [cd m^{-2}]

$$f_k = K_1 + K_2 \log L$$

❖ Talbotův zákon (Talbot-Plateau law)

- **Statický jas vnímán střední hodnota pro $f \geq f_k$**
 - Časový průběh jasu $L(t)$ [cd m^{-2}]
 - Průměrný vnímaný jas \bar{L} [cd m^{-2}]
 - Platí pro kmitočet blikání f vyšší než kritický f_k

$$\bar{L} = \frac{1}{T} \int_0^T L(t) dt, \quad f \geq f_k$$



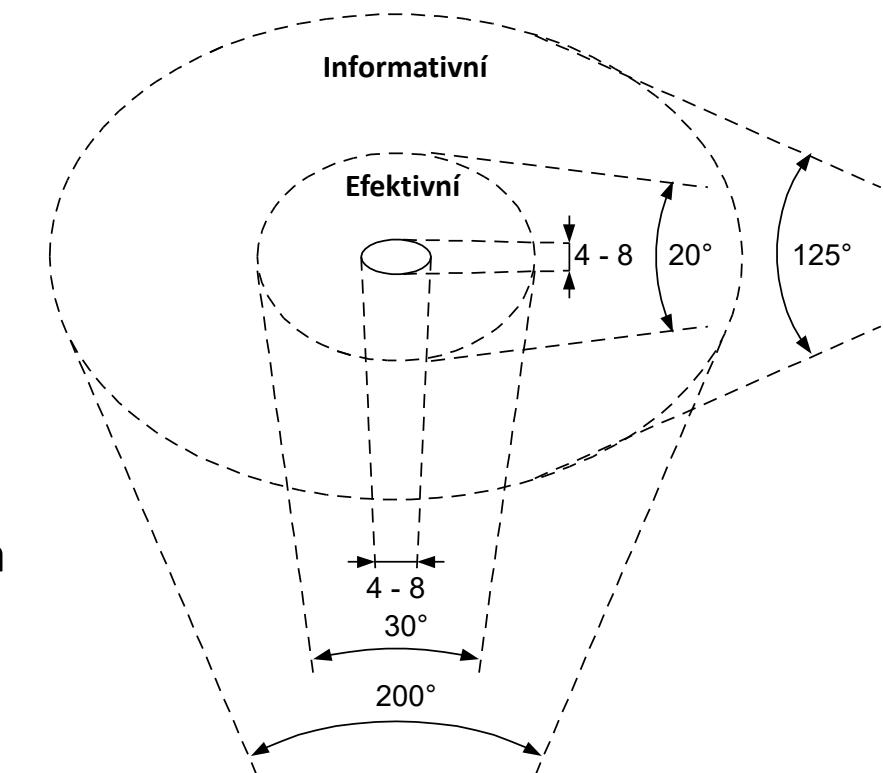
□ Zorné pole

❖ Základní oblasti vidění...

- Oblast **informativního** vidění
- Oblast **efektivního** vidění
- Oblast **nejostřejšího** vidění

❖ Podklad pro odvození požadavků na HDTV

- Optimální formát 16:9
- Pozorovací vzdálenost 3 x výška
- Plocha 0,8 až 1 m²
- Přibližně 2035 x 1145 bodů
- Rozlišení 30 cpd ($\sim 1'$ až $1,5'$)
- Detail 2,5 µm na sítnici $1'$ až $1,5'$ (10 až 12 čar/mm při 250 mm)



Použitá a doporučená literatura

- Wandell, B. A., **Foundations of Vision**, Sinauer Associates, 1995.
<https://foundationsofvision.stanford.edu/>
- Tovée, M. J., **An Introduction to the Visual System**, Cambridge University Press, 2008.
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=352995>
- Poynton, C. **Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces**, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2003.
- Machado, G. M., Oliveira M. M. , Fernandes, L. A. F. **A Physiologically-based Model for Simulation of Color Vision Deficiency**, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 15, no. 6, pp. 1291-1298, Nov.-Dec. 2009.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.113>
- Watson, A. B. **A formula for the mean human optical modulation transfer function as a function of pupil size**, Journal of Vision 13(6):18, 2013.
- Artal, P. **Optics of the eye and its impact in vision: a tutorial**, Adv. Opt. Photon. 6, 340-367, 2014.
- Artal, P. **The Eye as an Optical Instrument**, In: Al-Amri M., El-Gomati M., Zubairy M. (eds) Optics in Our Time, Springer, 2016.
- Stockman, A. **Colour & Vision Research Laboratory (CVRL)**, database, 2020.
<http://www.cvrl.org/>



Audiovizuální technika

Děkuji za pozornost!

