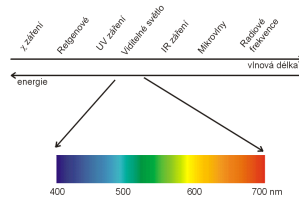


Vidění z pohledu fyzika (fyziky)

- Zkusíme prozkoumat fyzikální, biofyzikální, fyziologické a snad i psychologické aspekty lidského zraku.
- Jak vidíme?
- Proč nevidíme jinak?
- Jak vnímáme barvy?
- Jak nás zrak klame?
- ...

Spektrum



Charakteristiky světla

- Rozsah vlnových délek: $\lambda = 390 - 760$ nm
- Odpovídající frekvence: $f = 769 - 395$ THz
- Odpovídající energie: $E = 3,18 - 1,63$ eV

Získáno ze vztahů:

- souvislost frekvence, vlnové délky a rychlosti světla

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- energie fotonu (h je Planckova konstanta)

$$E = h \cdot f$$

- energie 1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J

Proč vidíme zrovna v této oblasti?

- Slunce září maximálně na vlnových délkách kolem 500 nm. Vyzařování je dáno zákony záření černého tělesa, které závisí na povrchové teplotě T .

- Wienův posunovací zákon,

kde $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ m·K.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

- Stefanův-Boltzmannův zákon,

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W·m⁻²·K⁻⁴.

$$M_e = \sigma \cdot T^4$$

Vyzkoušejte si následující aplety:

[Vyzařovací diagram hvězd v závislosti na povrchové teplotě 1](#)

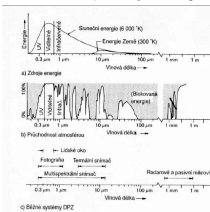
[Vyzařovací diagram hvězd v závislosti na povrchové teplotě 2](#)

Teplotu zvolte 6000 K, což je přibližně povrchová teplota Slunce. Srovnajte také,

jak vyzařují hvězdy s vyšší a nižší povrchovou teplotou.

Plocha pod křivkou reprezentuje celkovou vyzařovanou energii, vrchol odpovídá vlnové délce, na které hvězda září nejvíce.

- Atmosféra v tomto rozsahu vlnových délek minimálně pohlcuje elmag. záření.



Graf a) ukazuje rozložení energie záření pro jednotlivé vlnové délky (viz předchozí snímek).

Graf b) ukazuje propustnost atmosféry pro různé vlnové délky elmag. záření.

Graf c) ukazuje různé typy snímačů, které zachycují elmag. záření o různých vlnových délkách. Věnujte si logaritmického měřítka na ose x.

Proč nevidíme v UV?

- Tvrdší záření s vyšší energií (UV, RTG, ...) by trvale poškodilo tkáň (viz dále: zachycení světla barevnými pigmenty – rhodopsin)
- Je problém vytvořit optickou soustavu, která zobrazuje tvrdší záření – neexistuje materiál, který by dobře lámal UV záření a byl by tedy vhodný pro čočku (nenajdeme materiály s rozumným indexem lomu)
- Více se projevují částicové vlastnosti světla
- Hmyz ale částečně vnímá UV záření – dáno jiným principem oka, složené oko vidí jinak a UV záření jej nepoškodí

Proč nevidíme v IR?

- Pro měkké záření (IR, mikrovlny, ...) jiné problémy
- V oblasti IR záření září samotné lidské tělo – rušilo by detektor (oko)
- IR záření se snadněji ohýbá (více se projevují vlnové vlastnosti – difrakce, interference)
 - bod se díky difrakci vždy zobrazí trochu „rozmazaně“ jako ploška o průměru d , přibližně platí

$$d = \frac{\lambda \cdot f}{D}$$

- kde λ je vlnová délka, f je ohnisková vzdálenost a D je průměr čočky
- na základě těchto parametrů diskutujte, jaké bychom museli mít oči, abychom viděli dobře v IR záření

Stavba lidského oka



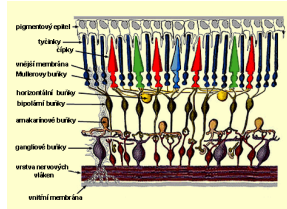
Popis částí

- Rohovka
 - první složka lámavého aparátu (objektivu)
 - chráněna víčkem, mrkání zvlhčuje povrch (nedostatečné mrkání zvyšuje zrakovou únavu – např. při soustředěném pohledu na obrazovku počítače frekvence mrkání klesá)
 - částečně filtruje UV záření, které by mohlo poškodit sítnici
- Duhovka
 - barevná část oka
 - její součástí je zornice = clona (vstupní otvor do čočky)
 - pomocí rozšiřování nebo zužování zornice se reguluje množství světla, které do oka vstupuje
 - Průměr je asi $D = 2-6$ mm

• Čočka

- Základní část zobrazovacího aparátu
- Na lámání paprsků se ale podílí i ostatní části – rohovka a sklivce.
- Nemá přesné kruhový tvar, zakřivení není všude stejné a může se měnit (akomodace)
- Také index lomu není všude stejný, ale spojitě se mění
- Tyto vlastnosti přispívají k odstranění zobrazovacích vad
- Mít čočku s proměnlivým indexem lomu je sen konstruktérů optických přístrojů
- Ohnisková vzdálenost je asi $f = 10$ cm

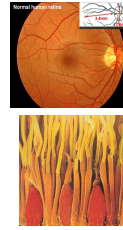
Stavba sítnice



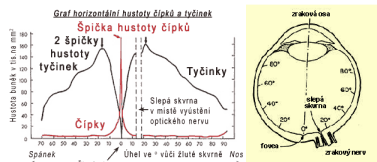
Světlo přichází zespodu – prochází tedy nejprve vrstvou pomocných a nervových buněk, teprve poté dopadá na světločivné buňky

Sítnice

- Má několik vrstev
- Světločivné buňky
 - tyčinky (vnímají jas)
 - 3 druhy čípků (vnímají barvy – zhruba RGB)
- Nervové a pomocné buňky
 - složitá síť propojení horizontálně i vertikálně
- Cévy k zásobování krví
- Vývojově jde o část mozku
- Signál je částečně zpracováván a vyhodnocen již v sítnici

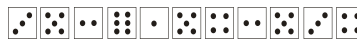


Rozložení buněk (prostorová citlivost)



Ostré vidění

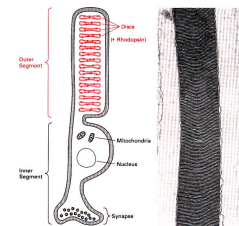
- Zorné pole jednoho oka je 130° ve vertikálním a 160°–164° v horizontálním směru (od -60° do +104° je to dáno nosem a očnicí)
- Při binokulárním vidění (při pohledu oběma očima) je zorné pole od -104° do +104°
- Ostře ale vidíme asi jen 2% celého zorného pole
- Oko má velkou periferní citlivost a je schopno rychle přestřevovat
- Pokud periferně zaznamenáme pohyb (nebezpečí), oko rychle přestřevuje – předmět se posune do oblasti, kde vidíme nejostřeji (žlutá skvrna)



Tyčinky

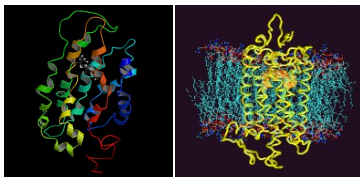
- Asi 130 milionů buněk
- Vnímají jas, aktivují se ve slabším osvětlení
 - proto v horším osvětlení špatně vnímáme barvy
- Rozloženy s vyšší hustotou po okrajích sítnice – máme dobré periferní vidění
- Reagují rychleji než čípky, mají menší setrvačnost (dobře zaznamenávají pohyb)
- Maximum vnímání je asi pro 500 nm
- Obsahují barvivo rhodopsin s molekulou retinalu
 - pohlcením fotonu se molekula retinalu deformuje, deformace vyvolá změny v celém rhodopsinu a to vyvolává nervový vzruch
- K navrácení komplexu do původního stavu je potřeba energie a enzymy (mezi nimi vitamín A)

Řez tyčinkou a fotografie



Rhodopsin

- Složitý protein
- Důležitá složka molekuly retinalu (viz dále)
- Samotná molekula rhodopsinu je ukotvena v lipidové membráně



Animace

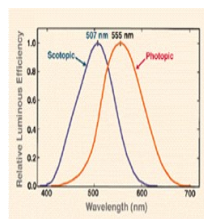
- Na obrázku vidíme strukturu retinalu, červeně je znázorněno místo, kde dochází ke změně na jiný izomer
- V následujících animacích je znázorněno chování rhodopsinu a retinalu po pochlacení fotonu



Čípky

- Asi 6–7 milionů buněk
- Zajišťují barevné vidění, potřebují vyšší jas
- Jsou trojho druhu – obsahují různý pigment, který je citlivý na různé oblasti spektra
 - podobně jako RGB model
 - čípky nejvíce reagující na modrou – maximum citlivosti kolem 440 nm
 - na zelenou kolem 530 nm
 - na červenou asi 560 nm
- Ostatní barvy vznikají skládáním barevných vjemů
- Nejhustěji rozmístěny ve žluté skvrně
- Oproti tyčinkám mají větší setrvačnost

Citlivost čípků a tyčinek

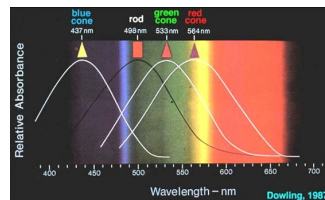


- Photopic – křivka pro všechny čípky – tedy součet citlivostí RGB (maximum pro 555 nm)
- Scotopic – křivka pro tyčinky (maximum pro 507 nm)

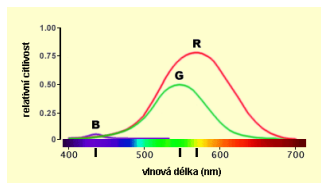
Souvislost s digitálním fotoaparátem

- Celkem až 137 milionů buněk – odpovídá to 137 megapixelům?
- Aby ano, musela by mít každá buňka své nervové vlákno (=> svazek stejně široký jako oko)
- Ve skutečnosti mají svá nervová vlákna jen buňky ve žluté skvrně, ostatní jsou pospojovány
- Rozlišovací schopnost je tedy nižší, signál se zpracovává již na úrovni sítnice, z periferních buněk je signál sloučen

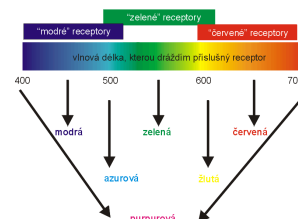
Citlivost na barvy a jas



Skutečné měřítko



Barevné pigmenty

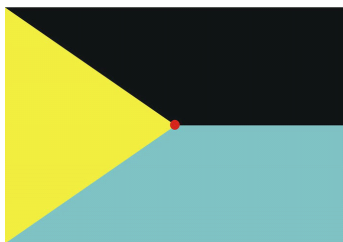


Barevné vidění

- Jednotlivé barvy tedy vnímáme jako složení barevných vjemů ze tří druhů buněk
- Barevnost předmětů je tedy dána tím, jaké vlnové délky vyzařuje (a tedy jaké pohlcuje a jaké odráží)
- Oko není schopno rozlišit od sebe čisté barvy duhy a barvy získané skládáním
 - např. žlutou můžeme získat čistou ze spektra bílého světla nebo smícháním červené a zelené
 - oko nerozpozná rozdíl

Únava fotoreceptorů

- pokud delší dobu sledujeme plochu s jednou barvou, čípky reagující na tuto barvu se unaví
- ostatní čípky nejsou vytiženy
- přesunutím pohledu na bílou plochu reagují nejvíce „odpočaté“ čípky
- uvidíme obraz v doplňkových barvách



Opět únava buněk

R

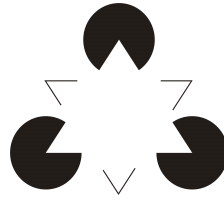
A ještě jednou



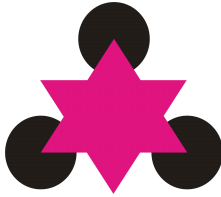
Jak vnímá mozek?

- Zrakový vjem je interpretován na základě předchozích zkušeností
- Mozek někdy dokresluje chybějící tvary
- Svou roli hraje paměť a prostorové vnímání
- Na interpretaci je založeno množství klamů (zejména prostorových a barevných)

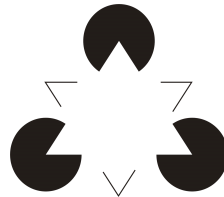
Co vidíte v tomto obrázku?



Kuk!



A teď?



Další optické klamy

Několik odkazů na stránky s optickými klamy, sami jistě najdete spoustu dalších.

- [BlueCat](#)
- [tech-loner](#)
- [Iveta Kulhavá](#) [http://www.izetka.cz/izetka_kulhava/Optické_klamy.htm](#)
- [Bolehlav](#)
- [Afrodita](#)

Rozlišovací schopnost oka

- dána biologicky hustotou buněk
- dá se odvodit fyzikálně?

$$\Delta \varphi = \frac{1,22 \sin \frac{2, f \lambda}{D}}{f}$$

$\Delta \varphi$ – uhlavá rozlišovací schopnost

f – ohnisková délka oční čočky

λ – vlnová délka světla

D – vstupní průměr čočky

Několik číselných údajů

- Průměr čípků: 0.001 až 0.005 mm
- Celkový počet čípků: $6-7 \cdot 10^6$
- Celkový počet tyčinek: $130 \cdot 10^6$
- Hustota čípků v centru žluté skvrny: 100–280 tisíc/mm²
- Limitní prostorová rozlišovací schopnost oka: asi 1' (úhlová minuta)