

# ***Svetlo a vizuálny systém človeka***

Juraj Kačur

ÚMIKT, FEI STU, Bratislava

## Obsah

- Svetlo
  - Vlastnosti
  - Delenia
- Vizuálny systém človeka
  - Ľudské oko
  - Vnímanie jasů
  - Vnímanie farby
  - Očné klamy
  - Stereoskopické vnímanie

2

Veľmi dôležitými rozhraniami medzi ľuďmi a strojmi sú také ktoré využívajú vizuálne vnemy. Právě cez ne je doručene najväčšie množstvo informácie. Pre správny návrh a použitie takýchto rozhraní v rôznych aplikáciách je dôležité zhrnúť a pochopiť základne informácie o svetle a tom ako je vnímané ľuďmi. Tato stáť sa preto bude zaoberať práve týmito aspektami.

# Svetlo

- Elektromagnetické vlnenie
  - Vyšlo to z Maxwellových rovníc, ktoré opisujú elektromagnetické pole
  - Rýchlosť šírenia svetla je konečná a závisí od prostredia (permitivity a permeability)
  - Dá sa vypočítať z Max. rovníc

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

- 299 792 458 m/s vo vákuu
- V každom inom prostredí je pomalšie, nezávisí od smeru

3

V nasledovnom sú zosumarizovane základne fyzikálne vlastnosti svetla, ktoré treba mať vždy na pamäti.

## Svetlo

- žiadne hmotné teleso/častica ju nemôže prekročiť ani dosiahnuť (relativita).
- Su 2 pohľady na svetlo: vlnový a časticový
- Fotón: prenos svetla (kvantum el. mag. energie)
  - Vlnovo časticové vlastnosti
  - Nulová hmotnosť, ale má nenulovú hybnosť
  - Prenáša energiu svetla, resp. elektomag. poľa
  - Energia fotónu súvisí priamoúmerne s jeho vlnovou dĺžkou a Planckovou konštantou

Poz.1 fázová rýchlosť ale môže byť vyššia

Poz. 2 úplne podrobne sa nevie čo svetlo presne je, ale vieme dobre popísať jeho vlastnosti a interakcie s okolím

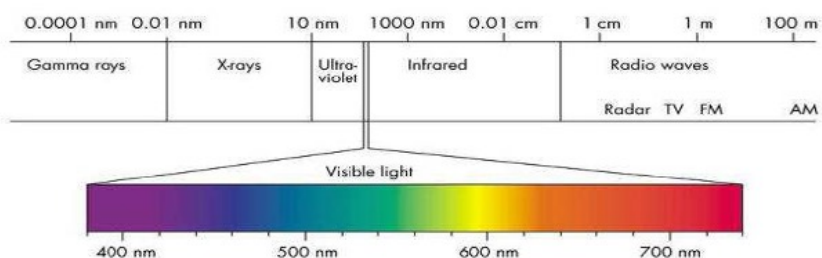
# Svetlo

- Vlastnosti svetla
  - Frekvenčný rozsah (viditeľné svetlo)
  - 390–790 nm., t.j. 379,4 THz- 768,7 THz
  - Ultrafialové vyššia ako svetlo, ale nižšie ako röntgenové žiarenie, delí sa na UVB a UVA, ničí pokožku
  - Infračervené menšie ako svetlo, ale väčšie ako mikrovlnné žiarenie, tepelné žiarenie, má viacero pod pásiem

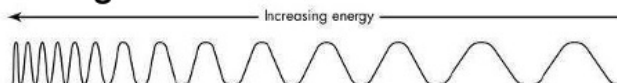
# Svetlo

- Vlastnosti svetla

- Svetlo ako súčasť el. mag. Vlnenia



- Energia žiarenia závisí od frekvencie



6

Treba si uvedomiť, že svetlo- je len veľmi mala časť celého elektromagnetického spektra ktoré využívame, resp. ktoré nás obklopuje. Na nasledovnom obrázku je hrubá vizualizácia polohy a šírky spektra viditeľného žiarenia, teda svetla. Niektoré živočíchy vnímajú el. Mag žiarenie aj iných frekvencií čo im poskytuje iný často krát rozšírený pohľad na okolité predmety a javy, ktoré môžu byť ľuďom skryté.

# Svetlo

- **Niektoré typy charakteristík svetla a ich delenie**
  - Fotometrické: svietivosť, svetelný tok, jas,..
  - Kolorimetrické: farba, frekvencia, ...
- **Svietivosť**
  - Vyjadruje hustotu svetelného toku v danom smere
  - Určuje sa len pre bodové zdroje žiarenia
  - Jednotka cd, Candela (základná jednotka)

7

Svetlo ma veľa vlastností ktore meriame, resp. vnímame. V nasledovnom sú vymenované a v stručnosti vysvetlene niektoré z nich. Dve hlavne delenia týchto charakteristík sú na fotometrické a kolorimetrické. Najprv budú spomenuté fotometrické veličiny, ktoré súvisia s “množstvom –intenzitou” vyžarovaného resp. dopadajúceho svetla.

# Svetlo

- Svetelný tok
  - Je to množstvo energie, ktoré prenesie žiarenie od zdroja za časovú jednotku (berie do úvahy aj frekvenciu a citlivosť ľudského oka)
  - Charakterizuje svetelný výkon žiarenia/ zdroja
  - Jednotka lm, Lumen
- Intenzita osvetlenia
  - Svetelný tok dopadajúci na jednotkovú plochu, (tok/plocha)
  - Jednotka Lx, Lux

8



## Svetlo

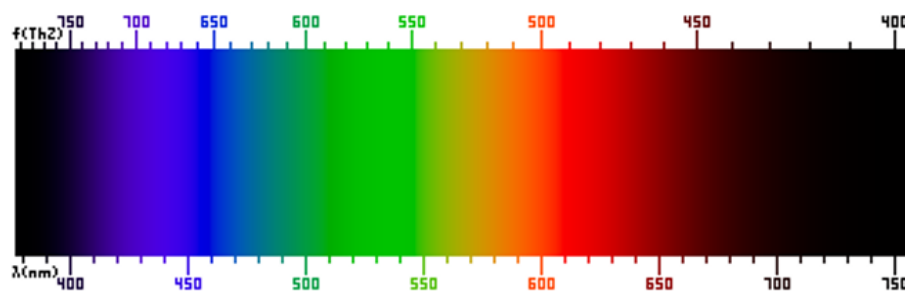
Napr. ak je plocha  $1\text{m}^2$ , vo vzdialenosti  $R$  od bodového zdroja so svetelným tokom  $I$  a jej normála je naklonená o uhol  $\alpha$ , intenzita osvetlenia je:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$

- V bežných miestnostiach by mala byť 1000 až 2000lx
- Noc 0,5lx, slnečný deň vonku 70000lx
- Oko vie zaznamenať už  $10^{-9}\text{lx}$  a je možné čítať už pri  $10^{-8}\text{lx}$

# Svetlo

- Farba, frekvencia
  - Rôzne frekvencie svetla vnímame ako odlišné farby
  - Rozloženie farieb podľa frekvencií



10

Medzi kalorimetrické parametre patri farba, resp. frekvencia svetla. Na nasledovnom obrázku je zobrazené frekvenčné spektrum viditeľného svetla a k nemu prislúchajúce frekvencie resp. vlnové dĺžky. Treba si všimnúť, že na oboch koncoch je čierna farba, čo súvisí s tým, že tie frekvencie už nevidíme - je to pre nás tma...

# Svetlo

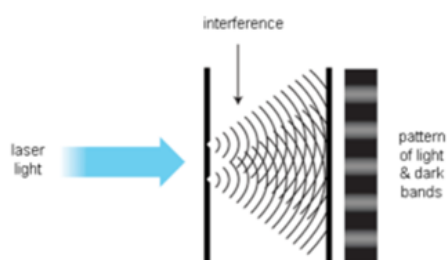
- Koherencia
  - Meria aký majú fázový vzťah jednotlivé el.mag. vlnenia
  - Súvisí to s možným vznikom interferencie, zvýraznenie alebo potlačenie žiarenia v istých miestach
  - Pre koherentné svetlo majú jeho jednotlivé zložky rovnaké fázy (interferenčné javy)
  - Pre nekoherentné, majú jeho zložky fázy náhodný charakter

11

Ďalšie špecifické a významne parametre el. mag. Žiarenia sú jeho polarizácia a koherencia, ktoré majú veľký význam pri rôznych senzoch, pozorovaných javoch, technológiách atď. Pri koherentných žiareníach môže dochádzať k výrazným interferenčným javom (keď sa tieto vlnenia sčítajú) vid. Obr. (body s maximálnym rozkmitom a naopak body kde je žiarenie nulové). Pri nekoherentných žiareníach tieto javy bežne nenastávajú.

## Svetlo

- Vysvetlenie a graficky príklad interferencie
- Ak je žiarenie koherentné (zložky sú vo fáze) a existuje viacero vlnení dochádza k priestorovému sčítaniu, isté oblasti väčšie iné menšie



12

Za štrbinami vzniká ohyb svetla- ako keby vznikli 2 zdroje svetla. Ich zložky sa sčítajú a v rôznych miestach sa môžu úplne vyrušiť, alebo zvýrazniť. Preto v týchto bodoch na tienidle vnikajú pravidelne pružky.

# Svetlo

- Polarizácia
  - El.mag. vlnenie ma dve zložky: mag. a elek. Sú vždy na seba kolmé v smere šírenia pola
  - Ich vzájomná fáza sa ale môže meniť/otáčať vzhľadom na smer šírenia
  - Dôležité pri odrazoch a lomoch
  - Typy (rovinná vlna, koherentné):
    - Lineárna: priestorovo kolmé zložky mag. a el. pola sú vo fáze, smer vektora bude stále rovnaký. Na ploche kolmej na šírenie vlnenia vytvárajú priamku so sklonom danou pomerom intenzít. Ak sú rovnaké tak 45st.

13

Ďalšia prakticky významná charakteristika el. Mag., žiarenia je polarizácia. Vyjadruje vzťah elektrickej a magnetickej zložky žiarenia medzi sebou- ich fázový posun, ktorý sa môže vďaka prechodu rôznymi látkami meniť. Rozlišujeme 3 základne typy polarizácie.

## Svetlo

- Kruhová: obe zložky majú rovnakú veľkosť, a majú voči sebe posun práve  $\pm\pi/2$ . Potom oba konce vykresľujú kružnicu na ploche kolmej na šírenie. (pravo, ľavo točivé)
  - Eliptická ostatné prípady fázových rozdielov alebo magnítúd. Vytvárajú elipsy.
- Každé odrazené svetlo vykazuje istú mieru polarizácie
- Polarizačný filter, potlačenie odrazov

# Svetlo

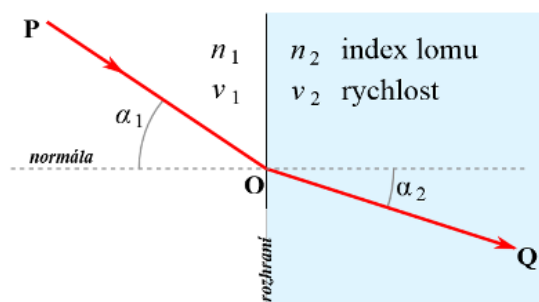
- Šírenie svetla
  - Lom
    - Dochádza k nemu keď sa prechádza z prostredia do iného prostredia, ktoré má iné vlastnosti
    - Súvisí s rozdielnymi rýchlosťami šírenia svetla v materiáloch
    - Frekvencia sa nemení ale mení sa vlnová dĺžka
    - Veľkosť lomu závisí aj od frekvencie (hranol rozklad svetla)
    - Presné vysvetlenie prečo dochádza k lámaniu poskytla až kvantová fyzika

15

Svetlo je ovplyvňované prostredím ktorým sa šíri a niektoré vlastnosti sa menia pri prechode medzi prostrediami ktoré majú rôzne vlastnosti. Bežne pozorovaným javom je lom svetla, ktorý je opísane v ďalšom texte a na obrázkoch

# Svetlo

– Lom je opísaný pomocou Snellovho zákona

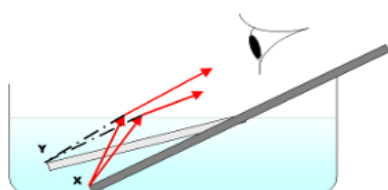


$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

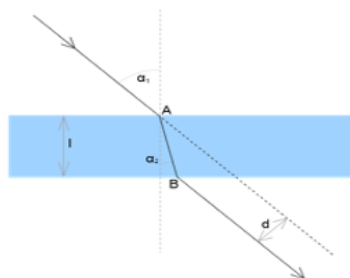


# Svetlo

Príklad lomu, prečo  
vnímame polohu  
predmetu vo vode  
inde



Lom na planárnej  
doske



- Chromatická aberácia, rôzne dĺžky sa ohýbajú odlišne

17

Ďalšou významnou vlastnosťou lomu je tzv. chromatická aberácia ktorá vyjadruje skutočnosť že jednotlivé frekvenčné zložky sa ohýbajú po prechode prostredím rôzne.

# Svetlo

## – Absorpcia

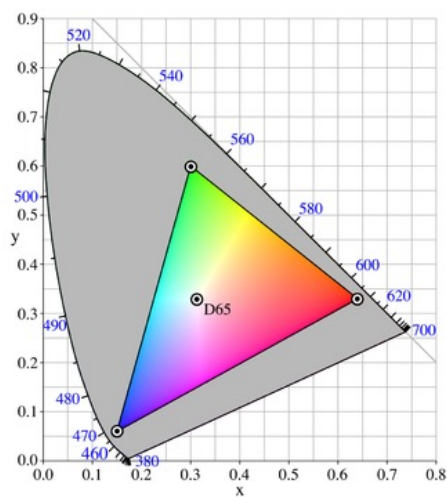
- Po dopade svetla na povrch je časť pohltená atómami a premení sa na povrchu na teplo
- Každý atóm pohlcuje svetlo istých frekvencií
- Farba povrchu je daná kombináciou frekvencií, ktoré nie sú pohlcované povrchom, ale sú odrazené
- Vytvárať väčšie množstvo farieb je možné kombináciou vhodných farieb (napr. RGB aditívny farebný model)
  - Biela všetky zložky rovnaké
  - Čierna žiadna nie je
  - Šedotónové: majú rovnaký pomer RGB, ale menšiu intenzitu

18

Svetlo pri dopadne na povrchy predmetov môže byť s časťou alebo úplne pohltene. Pričom jeho zložky môžu byť pohlcované rôzne čo závisí od vlastností povrchu. Tento jav sa nazýva absorpcia svetla

# Svetlo

- Existuje viacero farebných modelov, spôsobov ako vytvárať farby (napr. pre tlač, subtraktívny)
- Každý, ale nutne využíva 3 zložky
- Zobrazenie farebného trojuholníka (kombinácia R, G a B)
  - Mimo trojuholníka sa farby nedajú vyjadriť cez RGB



19

Pozn. farba je len vnem t.j. ako interpretuje frekvencie el. mag. vlnenia oči a mozog

## Vizuálny systém človeka

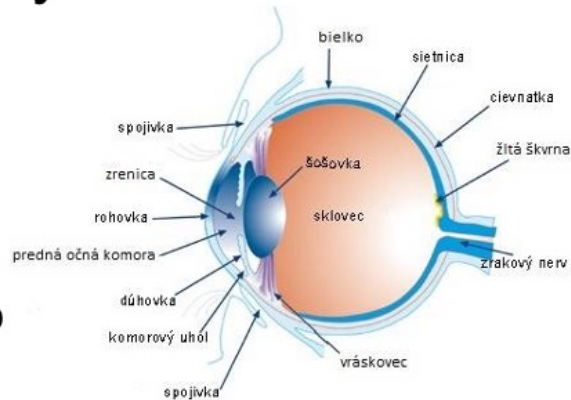
- Konštrukcia oka
- Vlastnosti oka
- Spracovanie obrazu mozgom
- Obmedzenia
- „Očné klamy“

20

Aby sme správne navrhli a používali vizuálne rozhranie nutne potrebujeme vedieť ako funguje vizuálny systém človeka, čo umožňuje a aké ma obmedzenia. Týmto aspektom bude venované zvyšná časť textu

# Vizuálny systém človeka

- Konštrukcia oka



- Vznik vnímaného obrazu

- Svetlo prechádza cez rohovku, komorovú tekutinu, šošovku, sklovec a dopadne na sietnicu. Fotoreceptory na sietnici zmenia svetlo na elektrický impulz, ten ide zrakovým nervom do mozgu. V mozgu sa vytvorí obraz

21

Na obrázku je znázornená fyzická konštrukcia oka s jednotlivými jeho časťami. V texte sú tieto časti popísane spolu s ich funkciou a významom.

## Vizuálny systém človeka

- Rohovka – ochrana oka
- Zrenica- otvor vstupuje ním do oka svetlo, jej veľkosť sa mení napr. v závislosti od množstva svetla
- Dúhovka- neprepúšťa svetlo, je farebná a unikátna, svaly v nej riadia otvor zrenice
- Sklovec- priehľadná tekutina, vyplní oko a udržuje v ňom stály tlak
- Sietnica- dopadá na ňu svetlo a sú na nej umiestnené svetlocitlivé bunky, receptory

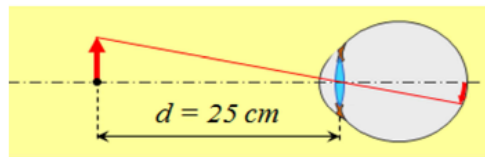
22

## Vizuálny systém človeka

- Očný nerv- vedie impulzy zo sietnice do mozgu
- Očná šošovka (spojka- dvojvypuklá) – slúži na akomodáciu zraku, jej predne zakrivenie sa mení pomocou svalov, čím sa zaostruje, ohnisková vzdialenosť je cca 12 cm

## Vizuálny systém človeka

- Akomodácia oka
  - Konvenčná zrková vzdialenosť - môžeme pozorovať bez únavy



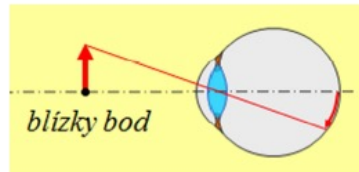
24

Oko nám umožňuje ostro vidieť na rôzne vzdialenosti. To je veľmi dôležité a je to umožnené tvarom šošovky, ktorá sa podľa potreby mení. Tato vlastnosť sa volá akomodácia oka. Pri nej vystupuje niekoľko dôležitých parametrov ktorým je venovaný nasledujúci text a vysvetľujúce obrázky.



## Vizuálny systém človeka

- Blízky bod – najmenšia vzdialenosť objektu, kedy ešte vidíme objekt zaostrený



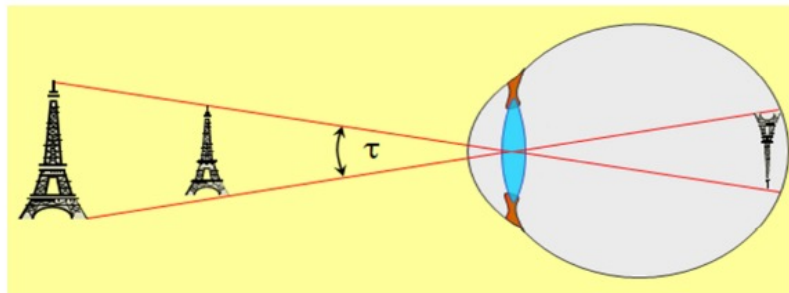
- Ďaleký bod- najvzdialenejší bod, ktorý sa na sietnici zobrazí ostro (súvisí s ohniskovou vzd.)



## Vizuálny systém človeka

– Zorný uhol- uhol zvierajúci lúčmi z krajných bodov objektu, ktoré prechádzajú stredom šošovky (sa tam krížia)

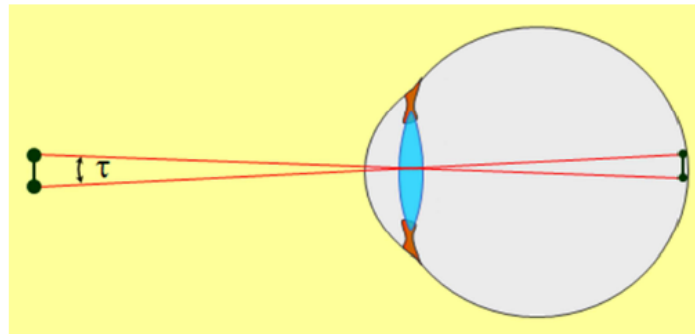
- Ten súvisí s veľkosťou vnímaného objektu
- Objekty ktoré majú rovnaký zorný uhol sú vnímané ako rovnako veľké



26

## Vizuálny systém človeka

- Ak je uhol viac ako 1 minúta, oko rozozná dva body od seba, ak je menej vníma ich ako jeden



# Vizuálny systém človeka

- Vnímanie jas a farieb
  - Svetlo citlivé bunky na sietnici
    - Tyčinky
      - citlivé na jas (úrovne šedej)
      - je ich podstatne viac (cca 130 miliónov)
      - preto v šere prestávame vidieť farby najskôr ale obrisy áno
    - Čapíky
      - farbo ciltivé
      - 3 druhy R, G, B
      - Je ich podstatne menej (cca 7 milinónov)

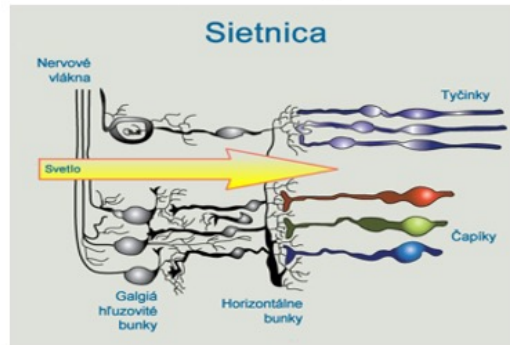
Pozn. pre spracovanie jas a farieb v dig. podobe postačujúce kvantovať R, G, B zložky na 8bitov, t.j. 256 úrovni

28

Človek vníma rozdielne jas a farebne zložky scény. To je dane počtom, typom a rozložením svetlo a farbo citlivých buniek. V nasledovnom sú spomenuté niektoré základne fakty o vnímaní jas a farieb. To že vnímame jas podrobnejšie je dane evolúciou, keďže v obmedzených podmienkach je na prežitie dôležitejšie detegovať tvary a pohyb ako samotne farby.

# Vizuálny systém človeka

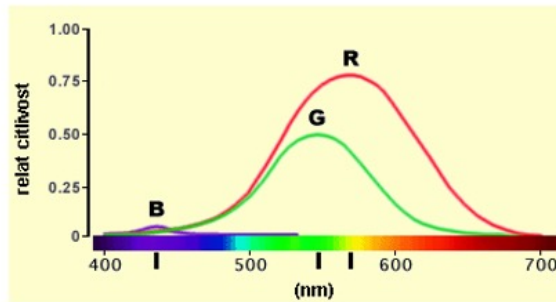
- Sietnica a nervové bunky



Pozn. Kódovanie jasovej a 3 farebných je možné, aj pomocou jasovej a 2 chromatických (3 farby sa dajú prenášať ako jas a rozdielové zložky)

## Vizuálny systém človeka

- Oko je rozdielne citlivé na rôzne frekvencie

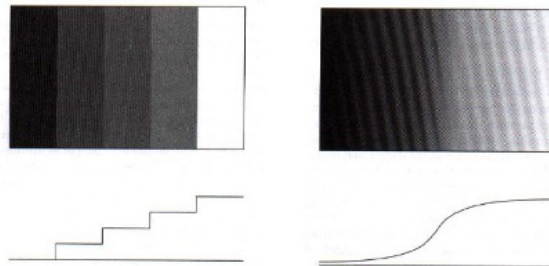


30

Zistilo sa že oko vníma intenzity farieb rôzne, na obrázku je znázornená citlivosť na rôzne farby, najväčšia je na červenú zložku.

## Vizuálny systém človeka

- Oko sa dokáže adaptovať na rôznu intenzitu
- Dôležitý je pomer jasů nie celkový jas obrazu
- Intenzita sa vníma nelineárne (log)
- Klam- Machove pásy, aj plynulý prechod sa javí ako skokový

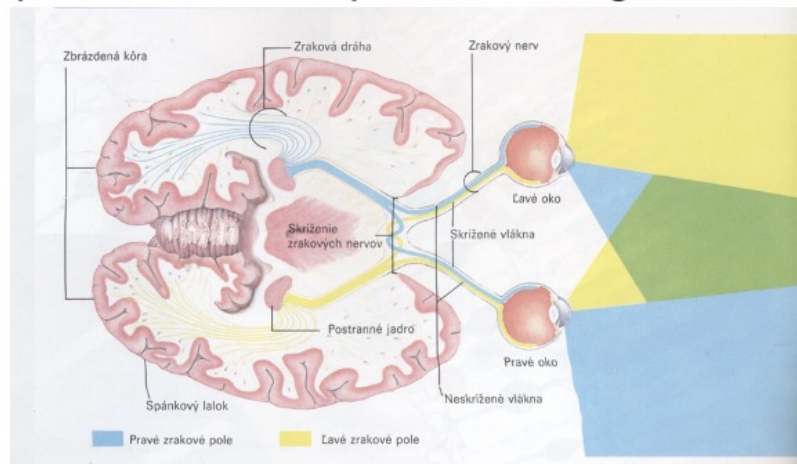


31

Pri vnímaní jasů človekom sú pozorované viaceré fenomény, niektoré z nich sú spomenuté ďalej aj s príkladom známeho očného klamu

# Vizuálny systém človeka

- Spracovanie el. impulzov v mozgu



32

Kvôli viacerým vážnym dôvodom sa ukázalo z hľadiska evolúcie veľmi dôležité aby oko bolo párový organ. Potom ale vystalo niekoľko problémov ako potenciálne rôzne obrazy z oboch očí vnímať a interpretovať. Na obrázku je schéma ako sú obe oči prepojené s mozgom ako aj zorné polia jednotlivých častí oka a ich prenos do mozgu. Existencia 2 očí nám umožňuje stereoskopické videnie, ktoré súvisí s vnemom hĺbky pozorovanej scény.



## Vizuálny systém človeka

- Stereoskopické videnie
  - Obraz z dvoch očí
  - Keď oči smerujú dopredu- ten istý objekt je vnímaný posunute
  - Čím väčší posun tým je bližšie k oku
  - Hĺbkové videnie dôležité pre predátorov na odhad vzdialenosti
  - Bylinožravce majú oči na stranách- veľký pozorovateľný priestor, ale nevedia odhadnúť vzdialenosť



## Vizuálny systém človeka

- Dynamika videnia
  - 50 obrázkov za sekundu vnímame ako spojitý jav
  - Vieme zaregistrovať zmenu v rámci niekoľkých milisekúnd
  - Kvôli tomu „mozog“ predvída pohyb
  - Aby keď niečo nastalo, už sme to s predstihom vedeli a tak to korešpondovalo s oneskorením oka (vnemu)

34

Posledným významný aspektom vnímania obrazu je jeho dynamika, teda, aké rýchle zmeny vie ešte oko spolu s mozgom zaregistrovať čo má význam pri spracovaní pohyb lichých scén, videa, atď.