

## OKO - katero je boljše: sestavljeno oko žuželk ali oko, podobno kameri, kakršno ima človek?

### Razvoj očesa

Nasprotniki Darwinove teorije evolucije radi navedejo oko kot značilen primer organa, ki je tako zapleten, da se ni mogel razviti brez vpliva višje sile. Morda je razlog za argumente dvomljivcev v evolucijo le dejstvo, da znanost ne pozna vseh podrobnosti celotne zgodbe. Naravno selekcijo spodbujajo vplivi okolja, zaradi katerih nastajajo postopne spremembe, ki organizmom pomagajo v borbi za preživetje. Vsa bitja res ne potrebujejo zapletenega očesa v obliki fotografske kamere, kot je npr. človeško. S preučevanjem organov, ki zaznavajo svetlobo pri različnih živalskih vrstah, od enostavnih do bolj kompleksnih, lahko danes biologi v veliki meri sestavijo mozaik poti, ki je privedla do razvoja različnih vrst očesa. Čeprav so morda videti oči nižjih živalskih vrst v primerjavi s človeškim očesom nadvse primitivne, pa lahko v nekaterih lastnostih naše oko daleč prekašajo. Predvsem so očesa pri različnih vrstah razvita optimalno za okolje, v katerem živijo.

Zamislimo si, da imamo na razpolago veliko število različnih sestavnih delov, da sestavimo napravo za zaznavanje okolice na osnovi elektromagnetnega valovanja: različne senzorje, optične in električne elemente, kot so leče, zrcala, žice, stikala ipd. Tako ima narava vse mogoče kemijske sestavne dele, od enostavnih molekul do zapletenih proteinov. Vendar pa velja pogoj, da sestavimo napravo čim bolj ekonomično glede na neko konkretno nalogo. Najpreprostejša naprava je verjetno en sam foto-senzor (fotoreceptor), ki zaznava le razliko med svetlobo in temo. Takšen svetlobni organ imajo enoceličarji, kot je na primer evglena (slika 1), ki zaznava svetlobo ne glede na smer. To ji omogoča uravnavanje življenjskega ritma glede na dan in noč.



**Slika 1:** Evglena in njeni fotoreceptorji, slika vzeta s strani:

[http://www.google.si/images?hl=sl&q=evglena&um=1&ie=UTF-8&source=univ&ei=CWwXTJTwAuSJOPq8iOUK&sa=X&oi=image\\_result\\_group&ct=title&resnum=4&ved=0CC4QsAQwAw](http://www.google.si/images?hl=sl&q=evglena&um=1&ie=UTF-8&source=univ&ei=CWwXTJTwAuSJOPq8iOUK&sa=X&oi=image_result_group&ct=title&resnum=4&ved=0CC4QsAQwAw)

Za zaznavanje smeri, iz katere prihaja svetloba, moramo uporabiti več ločenih senzorjev glede na smer žarkov vpadne svetlobe. To lahko izvedemo na več načinov. Uporabimo lahko skupino senzorjev,

ki so različno usmerjeni, ali pa omejimo del žarkov s poglobitvijo skupine senzorjev v votlinico. Dobimo nekaj, kar je podobno kameri z luknjico (camera obscura). Takšno oko imajo še danes npr. nautilus, vrsta podvodnih mehkužcev z lepimi zavitim hišicami (slika 2). Nautilus je tudi ime podmornici kapitana Nema iz znanstveno-fantastičnega romana *Dvajset tisoč milj pod morjem* (1870) francoskega pisatelja Julesa Verna.



**Slika 2:** Kamera z luknjico (camera obscura) in nautilus; vzeto iz:

[http://www.google.si/#hl=sl&source=hp&q=camera+obscura&aq=1&aqi=g10&aql=&oq=camera&gs\\_rfai=&fp=607f21767070c0de](http://www.google.si/#hl=sl&source=hp&q=camera+obscura&aq=1&aqi=g10&aql=&oq=camera&gs_rfai=&fp=607f21767070c0de)

in

[http://www.google.si/#hl=sl&source=hp&q=nautilus&aq=f&aqi=g10&aql=&oq=&gs\\_rfai=&fp=607f21767070c0de](http://www.google.si/#hl=sl&source=hp&q=nautilus&aq=f&aqi=g10&aql=&oq=&gs_rfai=&fp=607f21767070c0de)

Kamera z luknjico deluje tako, da prepušča le žarke, ki prihajajo od predmeta v določeni smeri in tvorijo obrnjeno sliko na nasprotni steni, vse druge žarke pa zastre. Spomnimo se, kakšno sliko dobimo, če postavimo pred steno svečo. Množica svetlobnih pramenov, ki izhaja iz plamena, se na steni prekriva, kar povzroča razmazano podobo. Ko damo med plamen in steno zaslon z luknjico, pa moteče pramene, ki padajo v različnih smereh na isto točko slike, izločimo. Z manjšanjem luknjice je slika vse bolj ostra, vendar pa tudi šibkejša, saj se zbere vanjo manj svetlobe.

Naslednja izboljšava vidne naprave, oz. prilagoditev očesa na naravno okolje, če opazujemo razvoj organizma, je prekritje luknjice s prosojno mrežo in napolnitev votline s snovjo, ki ima optimalni lomni količnik glede na okolje, v katerem organizem živi. Izbočeno zrklo namreč deluje kot leča: pri prehodu svetlobe v oko se žarki lomijo, kar pomaga pri tvorbi slike. Snov v očesu je prilagojena na življenjsko okolje organizma: pri prvih večceličnih organizmih je prilagojena na stik z vodo, pri prehodu na kopno pa se snov prilagodi na lomni količnik zraka.

Sledi razvoj naprave za ostritev slike: pri človeku je to leča, ki ji z mišicami prilagajamo ukrivljenost in s tem spreminjamo goriščno razdaljo. Pri nekaterih redkih organizmih pa najdemo tudi drugačen način za ostritev slike. Deluje na principu hidrodinamičnih sprememb v leči (pretakanje tekočin, spreminjanje osmotskega tlaka). Šele pred nedavnim je bil patentiran izum preprostih očal s spremenljivo dioptrijo na osnovi spreminjanja tlaka tekočine v prosojnih posodicah, ki tvorita lečo.

Razvoj od enega senzorja do takšnega ali drugačnega kompleksnega vidnega organa je, kot vemo danes iz primerjave še živečih organizmov in iz preučevanja ostankov fosilov, potekal skozi evolucijo večkrat, v nekaj deset neodvisnih razvojnih poteh, pri čemer je vsakič vodil do organa z optimalnimi fizikalnimi lastnostmi za potrebe preživetja. Zaznavanje smeri je seveda nujno potrebno za izogibanje plenilcem.

## Oko žuželk

Pri majhnih živalih, kot so npr. žuželke, ni dovolj prostora za oko v obliki votline (camere obscurae). Narava je tukaj ubrala drugačno razvojno pot očesa. Množico senzorjev je sestavila neposredno v t.i. sestavljeno oko (slika 3), pri katerem je vsak očesni element opremljen z drobno lečo in svetlobnim vodnikom z neprosojno steno, ki omejuje smer vpadnih žarkov na izbran receptor.



**Slika 3:** Sestavljeno oko kačjega pastirja; vzeto iz: <http://sl.wikipedia.org/wiki/Oko>

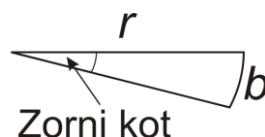
Takšno oko je po eni strani preprostejše, saj ni zmožno ustvariti tako natančne slike okolice kot oko v obliki kamere, ima pa tudi številne prednosti. Predvsem je dosti tanjše (nekaj mm), pri nekaterih žuželkah lahko prekriva dobršen del glave in lahko zato posreduje sliko zelo velikega vidnega polja brez potrebe po obračanju očesa ali glave. Zaradi enostavne zgradbe ima tudi hitrejši odziv: muha zazna npr. časovne spremembe s frekvencami  $300\text{ s}^{-1}$ . Razlog je verjetno v tem, da posredujejo informacije o gibanju posamezni očesni elementi brez posebnih usklajevanj z drugimi receptorji in obdelav celotne slike, ki poteka v sami mrežnici npr. človeškega očesa.

## Ločljivost

Ločljivost sestavljenega očesa je tem boljša, čim manjši je očesni element in s tem zajema manjši kot vpadnih žarkov. Če si predstavljamo očesni element kot lupino krožnega izseka (ponazorjeno kot lok  $b$  na sliki 4), je zorni kot  $\varphi$  (v radianih) tega elementa enak:

$$\varphi = b/r, \quad (1)$$

kjer je  $r$  polmer elementa,  $b$  pa krožni lok. Za dobro oko ali optično pripravo naj bo ta kot čim manjši. Naloga: osveži si spomin o pretvorbi med radiani in kotnimi stopinjami.

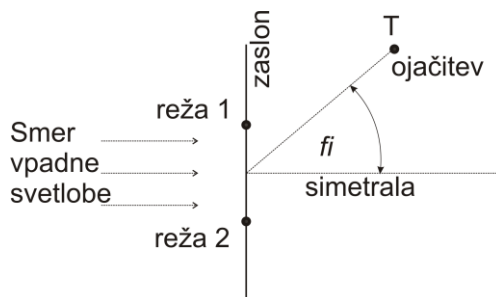


**Slika 4:** Krožni izsek očesnega elementa in zorni kot  $\varphi$

Po drugi strani pa očesni element ne sme biti pretirano majhen zaradi valovne narave svetlobe. Spomnimo se na interferenco valov na vodni gladini, ki jo povzročata nihajoča vira. Enako velja za svetlobo, ki prehaja skozi bližnji reži (Youngov poskus), če je seveda valovna dolžina primerljiva z razmikom med režama,  $b$ . Pogoji za konstruktivno interferenco svetlobe z valovno dolžino  $\lambda$  je:

$$b \cdot \sin \varphi_n = n \cdot \lambda, \quad (2)$$

pri čemer je  $n$  red ojačitve ( $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ ),  $\varphi_n$  pa ustrezni kot glede na simetrarno rež (slika 5).



**Slika 5:** Interferenca za dve ozki reži: piki na zaslonu predstavljata ozki reži, skozi kateri prehaja svetloba z leve proti desni. Namesto zaslonu z dvema režama raje uporabimo uklonsko mrežico z mnogo režami, pri kateri so maksimumi (ojačitve) svetlobne intenzitete na desni bolj izraziti.

Interferenca se pojavi tudi, če svetimo skozi eno samo režo. Interferenčna slika je sicer bolj razmazana, enačba pa enaka (2), velja pa za kot med ničelnim maksimumom (na simetrijski osi) in prvim minimumom; v enačbi (2) vzamemo  $n = 1$ . To se sklada z Rayleighevim pogojem, da še razlikujemo preslikavi dveh točkastih virov: najmanjši zorni kot med njima  $\varphi_{\min}$  izračunamo po enačbi (2) za  $n = 1$ , torej  $\varphi_{\min} = \arcsin(\lambda/b)$ , če je  $b$  velikost odprtine optične priprave.

Za majhne kote se Rayleighev pogoj poenostavi, saj imata kot (v radianih) in njegov sinus zelo podobni vrednosti (preveri z računalnikom!), tako da velja za minimalni kot med točkama, da ju še razlikujemo z očesom ali optično pripravo:

$$\varphi_{\min} = \lambda/b. \quad (3)$$

Za velikost očesnega elementa  $b$  moramo torej poiskati kompromis: ne sme biti ne premajhna zaradi enačbe (3) ne prevelika zaradi enačbe (1). Najmanjšo in optimalno velikost dobimo, če kombiniramo obe enačbi:  $\varphi_{\min} = \lambda/b = b/r$ . Tako dobimo optimalno velikost  $b$ :

$$b = \sqrt{r \cdot \lambda} \quad (4)$$

Za sestavljeno oko muhe z debelino (premerom) nekaj mm in valovno dolžino svetlobe 400 nm dobimo za velikost očesnega elementa približno 30 mikronov. V primerjavi s človeškim očesom imajo sestavljena očesa muhe približno 30 krat slabšo ločljivost. Odprtina našega očesa (zenica) je velika nekaj milimetrov, zato je interferenčna omejitev dosti bolj prizanesljiva, velikost receptorjev na mrežnici je lahko manjša. Ta je nekaj mikronov, ločljivost očesa pa je reda kotne sekunde. Velikost svetlobnih receptorjev na mrežnici je optimalna za dano velikost zenice. Tudi če bi bili manjši, ločljivost očesa zaradi vpliva interference ne bi bila nič boljša.

## Sestavljanje slike

Najpreprostejša sestavljena očesa, npr. vinske mušice, imajo nekaj 1000 očesnih elementov. Vsak element ima svoj receptor, ki posreduje svoj del slike opazovanega predmeta v možgane. To so ti. apozicijska sestavljena očesa, njihova ločljivost je, kot smo videli, omejena z velikostjo očesnih elementov. Pri nočnih žuželkah (vešče), ki vidijo v pogojih šibke svetlobe, ali pri kačjih pastirjih, ki so sposobni zaznati mikroskopski plen v letu na razdalji nekaj metrov, pa je očesna zgradba bolj zapletena. Imajo t.i. superpozicijska sestavljena očesa, pri katerih več leč in optičnih vodnikov sosednjih očesnih elementov tvori sliko celotnega opazovanega predmeta na skupini več receptorjev. S tem dobijo več svetlobe in tudi ostrejšo sliko. Očesa sestavlja nekaj 10 000 očesnih elementov.

**Tabela 1:** Primerjava med lastnostmi človeškega očesa in očesa žuželk

Tehnične karakteristike	človeško oko	sestavljeno oko
velikost/debelina	2 cm	0,5 mm
vidno polje	omejeno	veliko
doseg	25 cm – $\infty$	mm – nekaj m
ločljivost	1' (= 0,35 mm/1 m)	10'
časovni odziv	1/25 s	1/300 s

## Zgledi praktične uporabe načel sestavljenega očesa

V robotiki se je razmahnil razvoj tankih senzorjev po zgledu najpreprostejšega sestavljenega očesa muh. Ponuja se široka uporabnost cenениh, nekaj mm tankih kamer, ki bi jih lahko nalepili na poljubno ploskev in bi bile zmožne hitrega prepoznavanja preprostih oblik. V avtomobilu bi lahko npr. takšna kamera hitro zaznala, ali je glava voznika omahnila zaradi utrujenosti.

Teleskop z imenom “mušje oko” (slika 6) so razvili za detekcijo kozmičnih delcev z zelo visoko energijo. Sestavlja ga mreža detektorjev v obliki krožnih polobel. Vidno polje tako sestavljenega teleskopa obsega celotno poloblo, iz signala, ki ga da množica detektorjev, pa lahko znanstveniki ugotovijo smer in energijo vpadnega delca.



**Slika 6:** Teleskop “mušje oko” v Utahu, ZDA; vzeto iz: <http://www.cosmic-ray.org/>

Slikanje razpršenih slik: delovanje superpozicijskih oces, npr. kačjih pastirjev, še ni povsem raziskano.

Nekateri znanstveniki menijo, da sestavljanje slik ni namenjeno le povečanju intenzitete svetlobe, ki jo zaznava posamezni receptor, temveč da se signali seštevajo tako, da se pri tem z upoštevanjem faznih razlik slika tudi izostri. Idejo je preskusila skupina znanstvenikov pri konstrukciji naprave za zajemanje razpršenih slik kosti v tkivu, kot jih dobimo npr. če roko presvetlimo s širokim snopom laserske svetlobe. Z uporabo detektorja, sestavljenega iz množice senzorjev in posebnega algoritma za sestavljanje posameznih signalov jim je uspelo dobiti osnovno informacijo o razporejenosti kosti.

### **Poskusa:**

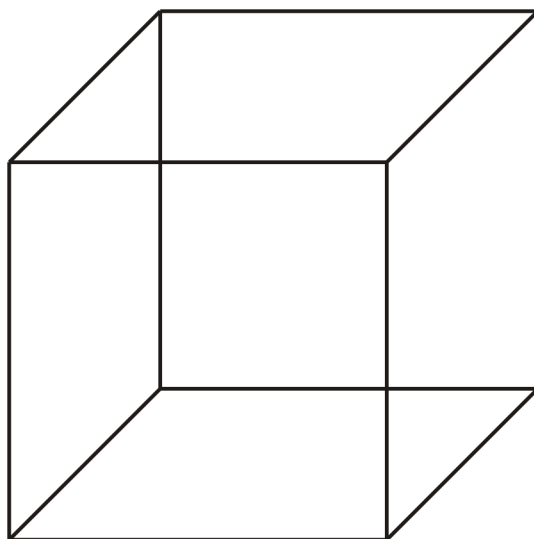
#### Slepa pega:

Na bel list papirja nariši križec ali zvezdico in krožec. Križec in krožec naj bosta relativno majhna (velikost kakega pol centimetra) in oddaljena kak decimeter ter v isti vodoravni liniji. Če hočeš opazovati z desnim očesom, z roko zakrij levo oko, papir pa zelo približaj desnemu očesu, tako da je križec naravnost pred njim. Potem zelo počasi odmikaj list proč od očesa, pri tem pa je križec ves čas naravnost pred očesom. Pogled imej ves čas usmerjen v križec. Na neki oddaljenosti papirja ti krožec popolnoma izgine iz pogleda.

Razlaga: na delu mrežnice, kjer izhajajo iz očesa vidni živci, ni vidnih receptorjev (slepa pega). Nekateri živalske vrste, pri katerih se je razvilo oko v obliki kamere po ločeni razvojni poti, npr. hobotnice, pa nimajo slepe pege. Oko je pri njih nastalo kot podaljšek kože, pri vretenčarjih pa kot podaljšek možganov.

#### Kocka:

Model kocke, kot ga prikazuje slika 7, sproščeno opazuj nekaj časa. Kaj opaziš? Ali je po tvojem mnenju ta pojav posledica delovanja očesa ali le interpretacija možganov?



**Slika 7:** Model kocke: kaj je spredaj in kaj zadaj?