

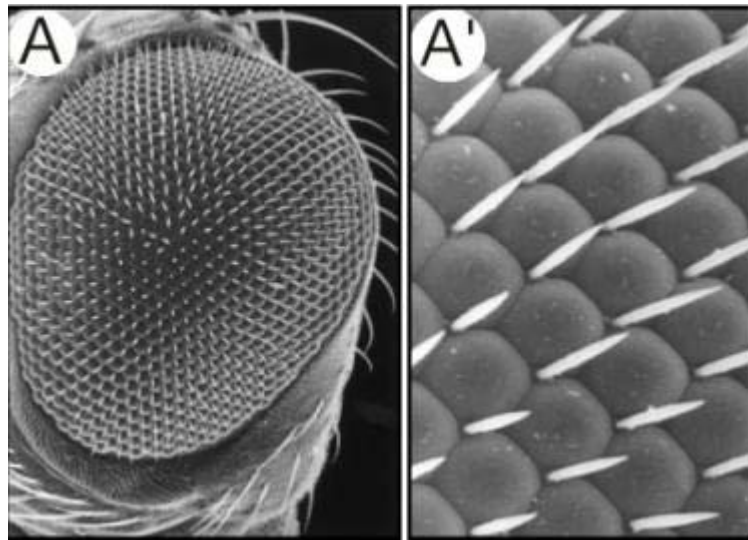
Rovarok látása

A rovarok látásának tanulmányozása érdekes kérdéseket vet fel, ha tudjuk, hogy az életkörülményeik rendkívül sokszínűek – például egyes rovarok nappal, míg mások éjszaka aktívak. A legkülönbözőbb helyeken is megtalálhatóak, a sivatagtól a gleccserekig. Ezen kívül találunk olyan fajt is, a poszméhet [1], amely a világ szinte összes táján előfordul – Grönlandtól az Amazonasi őserdőn keresztül a Himalája hegyeiig.

Mivel látásról van szó, jogosan vetődhet fel a kérdés, hogy vajon mennyiben látnak másképpen a rovarok, mint az emberek. A rovarok szemének rövid ismertetése után erre a kérdésre is megpróbálok választ adni, majd a szemben lejátszódó biokémiai folyamatokra térek ki.

Összetett szem felépítése

Az összetett szem alapjaiban különbözik a gerincesek szemétől, mind morfológiáját mind funkcionalitását tekintve. Az összetett szem háromszögrácsba rendeződött alapelemekből áll, az ommatidiumokból (2. ábra) [2].



2. ábra. *Drosophila* (gyümölcslégy) összetett szemének elektronmikroszkópos képe. Jól láthatóak a háromszögrácsba rendeződött ommatidiumok felszíne

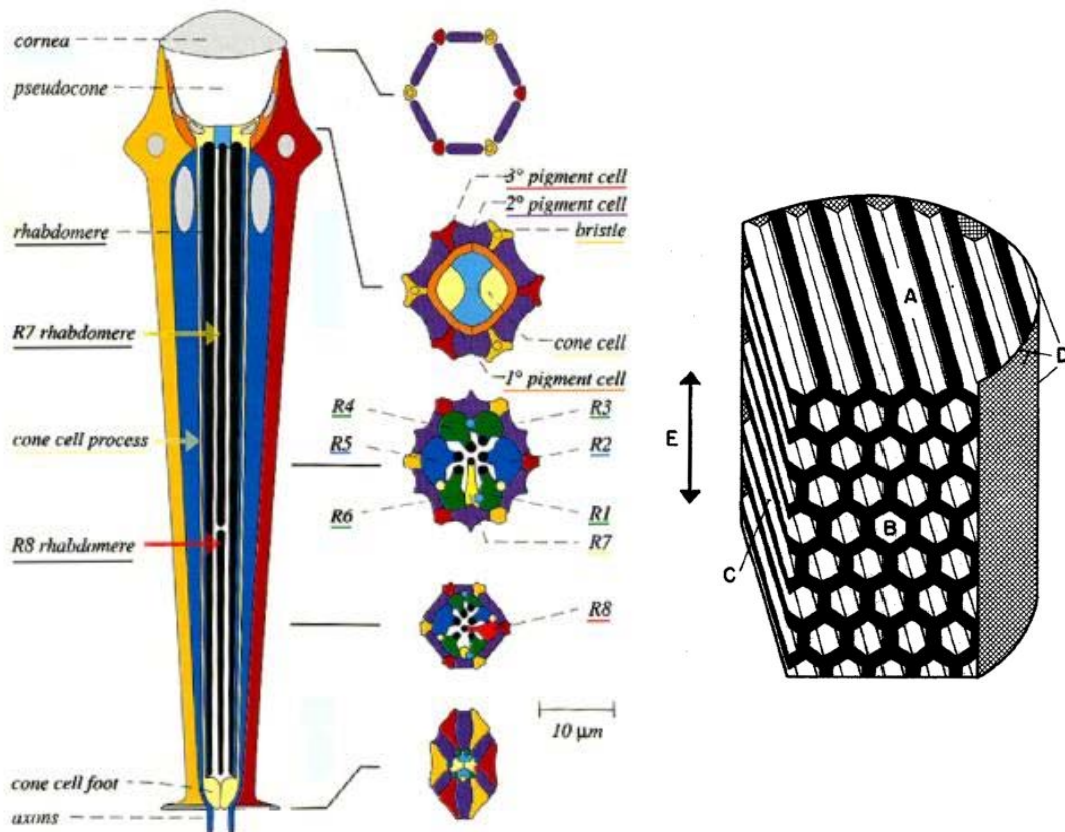
A szem felületén, az ommatidium felső részén helyezkedik el a cornea, ami lencseként fókuszálja a fényt az ember szemlencséjéhez hasonlóan (egy vázlatos rajz látható a 3. ábrán). Közvetlenül ez alatt helyezkedik el egy átlátszó kristályos rész, a pseudocone. A fény, miután ezeken áthaladt és némi fénytörést szenvedett, keresztülhalad az ommatidium tengelyén, ahol a fotoreceptorok találhatóak. Összesen nyolc hosszúkás szerkezet helyezkedik el itt, a rhabdomerek, amelyek a beérkező fényt detektálják. A rhabdomer szálak kb. 0,5 μm átmérőjűek, éjszaka aktív rovaroknál ez a vastagság nagyobb is lehet [2]. A belsejükben is érdekes szerkezetet lehet sejteni. Az ommatida tengelyére merőleges irányba rendeződött méhsejt szerű hatszöges rácsú elektronsűrű terület található kb. 120A és kb. 250A ráctávolsággal (3. ábra) [2]. Ez a nm alatti szerkezet valószínűleg a polarizált fény érzékelésében játszhat szerepet – a legtöbb rovar ugyanis képes érzékelni a fény polarizációját is. A rhabdomerek mindegyikéhez egy-egy retinula sejt kapcsolódik (R1-R8),



1. ábra: A mézelő méh közeli képe (BBC News, 2006 ápr. 27.)

melyek feladata az ingerületek továbbítása az idegsejtek felé. Az ommatidiumokat egymástól pigment és merevítő sejtek választják el. A pigment sejtek feladata, hogy a fény ne szóródjon át az egyikből a másikba.

Kisebb szemcséjű és ritkább, kristályos pigment granulák a retinula sejtekben is megtalálhatóak az ommatida tengelyéhez közel, melyek a fény érzékelésében játszanak szerepet [2].



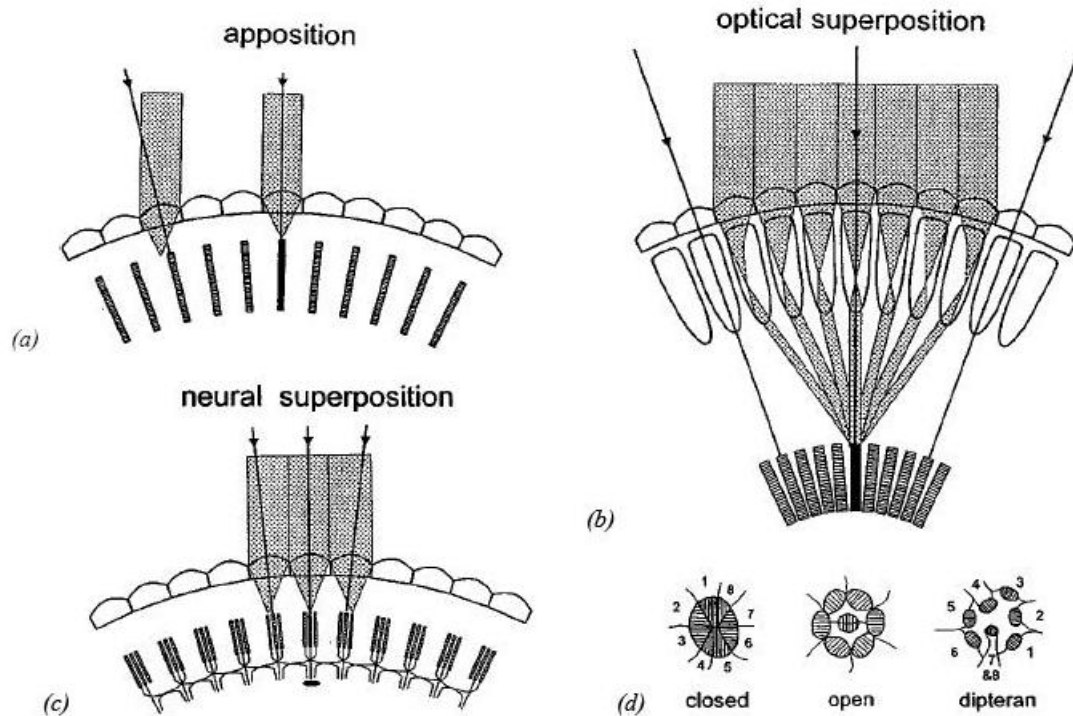
3. ábra: Bal oldal: Az összetett szem alapelemének, az Ommatidiumnak a felépítése. Jobb oldal: Egy rhabdomere rúd finomszerkezete nm alatti skálán [2]

Rovarok látásmódja

Az összetett szem fő problémája, ha a fény fizikáját vesszük alapul, az alapvető konstrukciójának a hibájából fakad. Minthogy a szem ommatidiumokból áll, melyek mindegyikében egy lencse található, szükséges, hogy ezek elég kicsik legyenek. A kis lencsék felbontását viszont a fény hullámtermészete korlátozza, ugyanis a kis objektumok egy bizonyos méret alatt már résként működnek, és diffraktálják a fényt fókuszálás helyett [3]. Emiatt egy összetett szem felbontása nagyjából 1° körüli lehet (egymástól 1° szöggel eltérő két pontot tud még különválasztani) [4]. Ez nagyjából 100-ad része az emberi szem felbontásának, ami sokkal nagyobb apertúrájának köszönhető. Ahhoz hogy egy összetett szemnek hasonló felbontása legyen, mint az emberi szemnek, ugyanakkora lencséből kellene állnia, és így 6m sugarú lenne [5].

Egy másik fontos kérdés a szem érzékenysége, vagyis egyszerűen szólva hogy milyen sötétben képes működni (mennyi fotont képes észlelni egységnyi idő alatt). Az emberi szem alsó határa, ha a szemben található fotoreceptorokat átlagosan 1 foton beütés ér 40 percenként [4]. A rovarok hasonló érzékenységu szemeik is lehetnek (gondoljunk az éjjeli lepkékre, amelyek csillagfényénél is képesek repülni). Összehasonlításképpen: erős napfényénél $4 \cdot 10^7$, nappali szobai világosságnál $4 \cdot 10^4$, holdfényénél 40, csillagfényénél 0,004

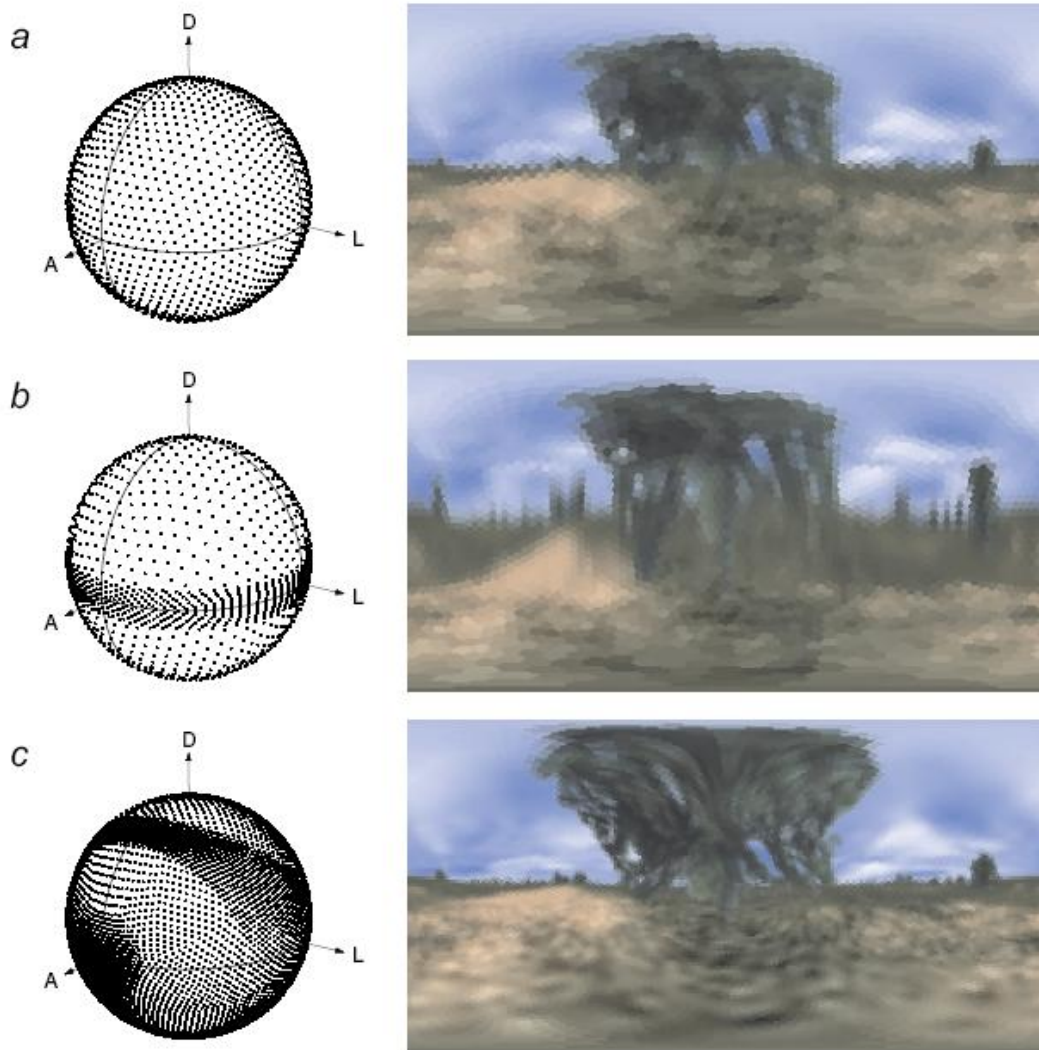
foton éri átlagosan másodpercenként a szem egy receptorát. Az éjjeli rovarok szeme annyiban különbözik a nappali rovarokétól, hogy nagyobb ommatidák (melyek így több fényt engednek a receptorokhoz), illetve vastagabb rhabdomerek (így nagyobb valószínűséggel képes a szem egy fotont észlelni) találhatóak bennük, valamint hogy a fotodetektorok integrálási ideje is nagyobb [4]. Ezen kívül egyéb speciális optikai és neurális tulajdonságaik is vannak, amik segítik a látást a sötétben is [4]. Ezekre a trükkökre láthatunk példát a 4. ábrán.



4. ábra: Különbözőképpen módosult összetett szemek: a. Hagyományos b. Optikai szuperpozíció: az ommatidiumok között nincsen fényelnyelő pigment réteg, így egyik lencsén beérkező fény a másik ommatidiumban detektálódhat, nagyobb apertúrát eredményezve ezáltal c. Neurális szuperpozíció: egy ommatidiumban több, helyföggő érzékelő receptor található

A fotoreceptorok nagy integrálási ideje viszont a mozgó tárgyak elmosódottságát növeli. Ez nem csak az éjjeli, de a nappali rovarok esetén is problémát jelenthet, mivel a rovarok nagyon gyors irányváltásokra is képesek. Egyes esetekben a néhány 1000 fok/másodperc, de rutinszerűen a néhány 100 fok/másodperc fordulási sebességet is elérhetik [6].

A látás minőségét, ahogyan például a számítógép monitorokét is, alapvetően meghatározza a felbontás. A rovarok összetett szeméről általában elmondható, hogy egy speciális életkörülményhez adaptálódott [7]. Az állat leginkább használt látóterében a receptorok sűrűsége nagyobb, így onnan több vizuális információt képesek kapni. Erre láthatunk egy példát az 5. ábrán. A sivatagi hangyák és a molnárkák sík területeken élnek, ahol nagyjából a horizonton helyezkednek el a lényeges információk, így a szemükben is ezekre a területekre jut a legtöbb receptor és a legjobb felbontás. Ezzel ellentétben például a szitakötőknél a repülés során a közvetlenül előttük található, illetve a prédák követéséhez és megragadása előtti pozicionálásnál használt lefelé található térrész hordoz fontos információkat, így az ezek megfigyeléséhez használt területei a szemnek nagyobb felbontású képet közvetítenek az állatnak [7].



4. ábra: Különböző receptor sűrűségű összetett szemek által látott táj. a. Homogén receptor modell. b. Megnövelt felbontás a horizont mentén, mint a sivatagi hangyák és molnárkák esetén. c. Megnövelt felbontás két különböző helyen, mint a szitakötőkénél. A: egyenesen előre néző receptorok, D: Lefelé néző receptorok, L: horizontális irány [7]

Receptorok, vizuális pigmentek

A repülő rovarok UV-kék-zöld trikromatikus látásmódja a filogenetikus és molekuláris vizsgálatok szerint a devonkori őseikre vezethető vissza [8]. Látásmódjuk a sokszínúsége sokszor az ökológia és az életmódjuk közötti különbségekből adódik.

Egy egyedben található spektrális receptorok száma akár a hatot is elérheti [9], érdekesség hogy a szem bizonyos részein egyetlen receptor is lehet [10]. Az általuk látható tartomány lehet igen keskeny (300-480 nm [10]) és a legszélesebb, amit valaha megfigyeltek az állatokon (300-700 nm). Összehasonlításképpen, az ember 420-680nm-es tartományt látja. Ezen kívül egy fajon belül a szem különböző helyein található receptorok spektrális érzékenysége is sokféle lehet [11].

A vizuális pigmentek, amik a szembe érkező fényt detektálják, egy fényérzékeny chromophore molekulából és egy opsin fehérjéből állnak. A chromophore molekula az opsin fehérje belsejében helyezkedik el, ahogy a 2. ábra is mutatja. Az opsin aminosóportjával való kölcsönhatás a nagyobb hullámhosszok felé tolja a chromophore alacsony hullámhosszú érzékenységet (377-400 nm) [12]. Ha fény éri, a chromophore molekula a cisz konformációból a transzba alakul, ezáltal detektálja a fényt.

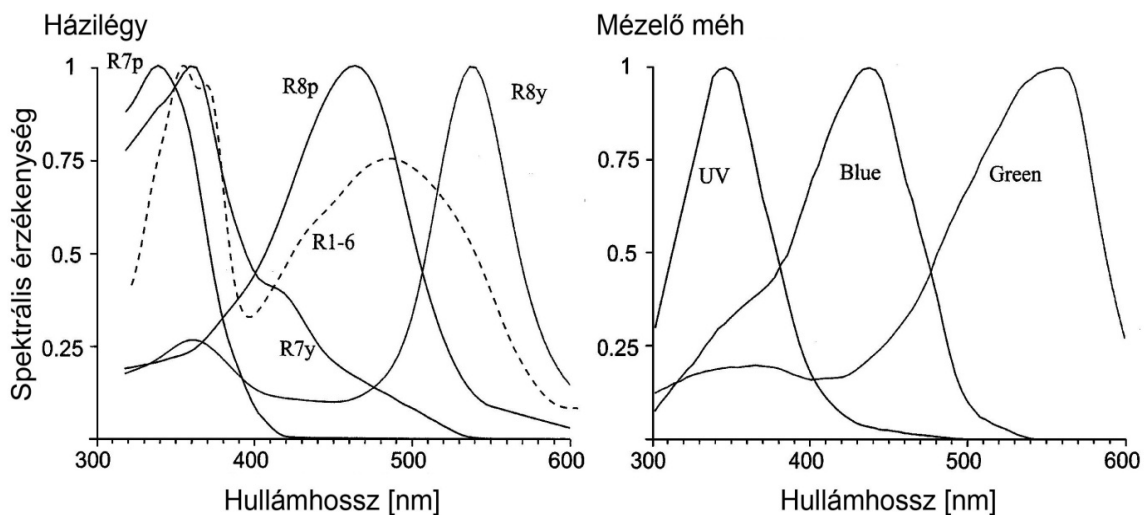
A legtöbb rovar egy, vagy maximum két különböző chromophore molekulát használ (11-cisz retinál, vagy 11-cisz hidroxyretinál). Az előbbi lehetett a legegyszerűsített kialakult chromophore, míg az utóbbit a rovarok csak a késő kréta kortól kezdve használták [12]. Ennek az időbeli különbségnek a magyarázata az lehet, hogy a 11-cisz hidroxyretinál szintéziséhez több molekuláris oxigén kell, ami csak a krétakor után volt nagy mennyiségben jelen a légkörben. Ezeket különbözőképpen kombinálva az opsin fehérjékkel, a rovarok hat különböző spektrális érzékenyséű receptort képesek előállítani [13].

A szem spektrális érzékenységét ugyanakkor nem csak a benne található fényérzékelő molekulák abszorpciós spektruma fogja meghatározni, hanem ezek egymáshoz képesti térbeli elhelyezkedése. Ha ugyanis egy ommatidában a kék vizuális pigmentek közelebb helyezkednek el a szem felszínéhez, akkor a felszíntől távolabb lévő pigmenteket már jóval kevesebb kék fény fogja érni, mivel annak nagy részét már elnyelték a kék vizuális pigmentek [8].

A rovarok legnagyobb részénél találhatóak zöld és UV receptorok, és habár léteznek csak ezt a két receptort használó fajok, a kék receptorok szintűgy nagyon elterjedtek [14]. A piros receptorok ezzel szemben leginkább a lepkékben találhatóak [8]. Nagyon érdekes kérdés, hogy bizonyos rovaroknál található olyan szűrő pigmenteket (un. scening pigment), amik még a fotoreceptorok előtt találhatóak, így a spektrum egy részét kiszűrik még mielőtt elérné a fotoreceptorokat. Egyes szentjánosbogaraknál olyan rózsaszín felületéresztő szűrőként működő pigmenteket is találhatóak, amik a fotoreceptorok viszonylag széles érzékenységét egy nagyon keskeny sávra szűkítik le – ahol egyébként ezek az állatok is világítanak – és így a változatos háttérből könnyen kiszűrrik a fajtársaik jelzéseit [14].



6. ábra: Az opsin geometriája, közepén a pirossal jelzett chromophore molekulával



6. ábra: Különböző, elterjedt rovarok szemének spektrális érzékenysége [8].

Érdeemes megemlíteni, hogy bizonyos esetekben a szem nem az összes részén található meg minden receptor. Mézelő méheknél például a szem alsó részében – ami így az ég felől jövő fényt észleli – szinte teljesen hiányzanak a zöld receptorok, és csak kék és UV receptorok találhatóak [15].

Hivatkozások

- [1] P.H. Williams, „A preliminary cladistic investigation of relationships among the bumble bees (Hymenoptera, Apidae)” Syst. Entomol. 10:239-55
- [2] T.H. Goldsmith and D.E. Philpott, 1957 „The microstructure of the compound eyes of insects” J. Biophysic. and Biochem. 3, 429-440
- [3] W. Reichard, 1966 „Quantum sensitivity of light receptor sin the compound eye of the fly *Musca*” Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 30:505-15
- [4] M. F. Land, 1997 „Visual acuity in insects” Annu. Rev. Entimol. 42:147-77
- [5] K. Kirschfeld, 1976 „The resolution of lens and compound eyes” Neural Principles in Vision, ed. F. Zettler, R. Weiler, pp. 354-70 Berlin: Springer
- [6] M.F. Land, 1993 „The visual control of courtship in the fly *Poecilobothrus nobilitatus*” J. Comp. Physiol. A 173:595-603
- [7] T. R. Neumann, 2002 „Modeling Insect Compound Eyes: Space-Variant Spherical Vision” Proc. 2nd Int. Workshop Biol. Motiv. Comp. Vis. 360-367, Springer-Verlag, Berlin
- [8] A.D. Briscoe and L. Chittka, 2001 „The evolution of color vision in insects” Annu. Rev. Entimol. 46:471-510
- [9] R.C. Hardie, 1986 „The photoreceptor array of the dipteran retina” Trends Neurosci. 9:419-23
- [10] M. Gogala, 1967 „Die spektrale Empfindlichkeit der Doppelaugen von *Ascalaphus macaronius* Scop. (Neuroptera, Ascalaphidae)” Z. Vergl. Physiol. 66:386-404
- [11] D.G. Stavenga, 1992 „Eye regionalization and spectral tuning of retinal pigments in insects” Trends Neurosci. 15:213-18
- [12] T. Seki and K. Vogt, 1998 „Evolutionary aspects of the diversity of visual pigment chromophores int he class Insecta” Comp. Biochem. Physiol. B 119:53-64
- [13] J. Kitamoto et. al., 1998 „Two visual pigments in a single photoreceptor cell: identification and historical localisation of three mRNAs encoding visual pigment opsins int he retina of the butterfly *Papilio xuthus*” J. Exp. Biol. 201:1255-61
- [14] T.W. Cronin et. al., 2000 „Tuning of photoreceptor spectral sensitivity in fireflies (Coleoptera:Lampyridae)” J. Comp. Physiol. A. 186:1-12
- [15] R. Menzel and W. Backhaus, 1991 „Colour vision in insects.” In The Perception of Colour, ed. P Gouras, 6:262-93 London: Macmillan