

# Természet Világa

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY 124. évf. 11. sz. 1993. NOVEMBER ÁRA: 55 Ft

## Természet Világa

A TUDOMÁNYOS  
ISMERETTERJESZTŐ TÁRSULAT  
ÉS A HÍRLAPKIADÓ VÁLLALAT  
FOLYÓIRATA

Megindította 1869-ben  
SZILY KÁLMÁN

A TERMÉSZETTUDOMÁNYI  
KÖZLÖNY  
124. ÉVFOLYAMA

1993. 11. sz. november

HORVÁTH GÁBOR

# Az állatvilág Schmidt-teleszkópja?

---

A fésűskagyló különös látórendszere

HORVÁTH GÁBOR

# Az állatvilág Schmidt-teleszkópja?

## A fésűskagyló különös látórendszere

A fésűskagyló különös alakjával is felhívta már a figyelmet, rendszertanilag nagy fésűnek nevezik, latinul *Pecten maximus*. Környezetét a csillagászati Schmidt-teleszkóphoz hasonló felépítésű szemekkel figyel. Minden szemben egy biológiai gömbtükrő van, az argentea és előtte egy vastag szemlencse található. Ennek részben az a feladata, hogy az argentea gömbi hibáját csökkentse és ezzel a szem fénygyűjtő és kontrasztátvivő képességét növelje. A gömbi hibát csak részben korrigálja a lencse speciális felülete. A fésűskagyló szemének optikai tulajdonságai számítógépes módszerrel is vizsgálhatók. Ezek eredménye szerint a *Pecten* szemében az evolúció során végbement optimalizáció korántsem olyan nagy, mint azt eddig hitték. Erre a biológusokat a Schmidt-távcsővel való szoros analógia vezette. E ritkaságszámba menő szerkezeti és optikai sajátosságok háttérben egyedülálló, kétrétegű retina húzódik. Itt a felső neuronhálózat feladata az ellenség árnyékvetésének és mozgásának észlelése, míg az alsónak a globális megvilágítási viszonyok érzékelése.

A csigák és kagylók két könnyen megkülönböztethető vizuális viselkedési módot mutatnak. Az egyik a fényorientáció, amikor vagy a nagyobb fényintenzitású régiók felé mozognak, vagy pedig azzal ellentétes irányban. A másik jellegzetes vizuális viselkedési mód az, hogy sok faj képes a fényintenzitás hirtelen változásaira is válaszolni; ez kagylóknál héjuk összehárásával, szifójuk és lábuk visszavonásával, míg a csigáknál testük házukba való visszahúzásával és az aljzathoz való szoros odatapa-

dással mutatkozik meg. Az első viselkedési fajta a lakóhely kiválasztását szolgálja, míg a második védekezés az árnyékvető ellenségek ellen.

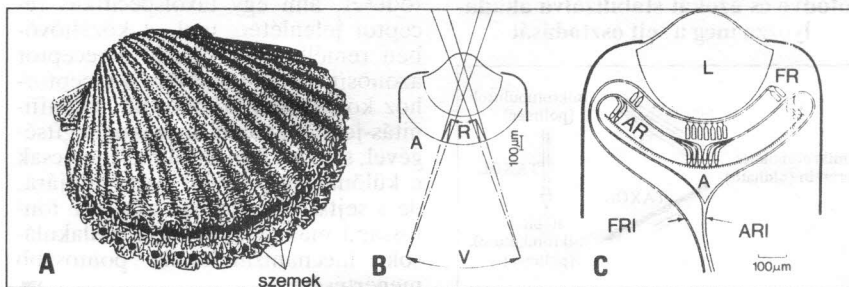
Az orientációs viselkedés leginkább a csigákra jellemző, de más csoportokban is előfordul. Annak ellenére, hogy a kagylókban hiányzik a fototaxis előfeltételének számító feji szem-pár, sok kagyló pontos vizuális orientációra képes. A fésűskagyló különböző fajtái például pozitív vagy negatív fototaxist mutatnak, amiben a köpenyszéli szemek játszanak fontos

szerepet. Az árnyékválasz inkább a kagylókra jellemző, bár a csigáknál is előfordul.

A két különböző viselkedésért gyakran két eltérő receptorcsoport a felelős. Így pl. az éti csiga (*Helix pomatia*) tapogatókarján lévő szemek az orientációban vesznek részt. Az árnyékhatásokat, melyekre ezek a szemek érzéketlenek, az állat héjának elülső részén lévő köpenyrégió érzékeli.

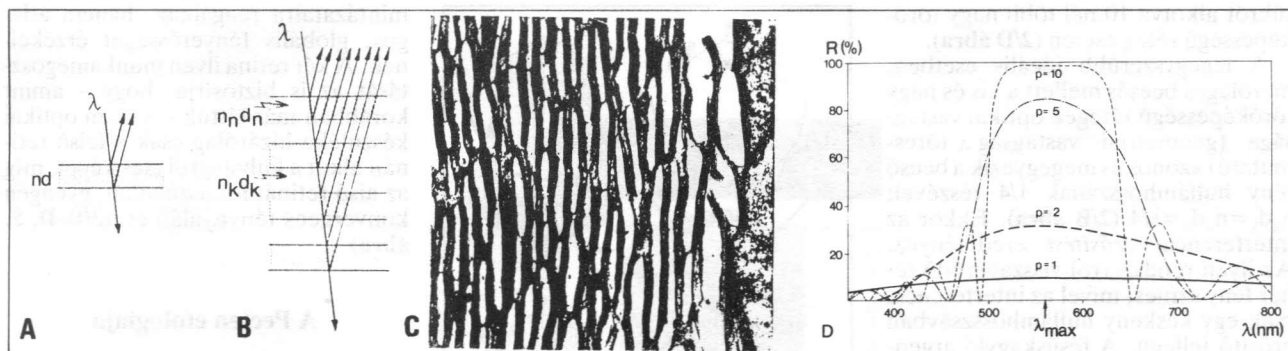
Általánosságban is igaz, hogy a puhatestűek e két különböző vizuális viselkedésében két eltérő receptorfajta érintett. Ez talán a legjellemzőbb módon a *Pecten* kettős retinájában mutatkozik meg.

1. ábra. (A) A fésűskagylónak több tucat, megközelítően 1 mm átmérőjű, kékeszölden irizáló szeme van egyenletes eloszlásban a köpenye szélén. (B) A *Pecten*-szem képkalkotása. A szemlencse által alkotott virtuális V képet a tükröző (A) argentea képezi le valódi R képpé a felső retinán. (C) A *Pecten*-szem kettős retinája. L: lencse, FR: felső retina, AR: alsó retina, A: argentea, FRI: felső retina idegkötege, ARI: alsó retina idegkötege



### A *Pecten* optimalizált tükrőlencsés szeme

A fésűskagyló szemei füzérszerűen helyezkednek el az állat laposabb teknőjének pereme fölött, a köpenyen (1/A ábra). Számuk 50–100 között változik fajtól függően; látóterük függőlegesen 90–110°, vízszintesen 300°. A szem szokatlan sajátága, hogy pupilláján keresztül a külvilág fordított képe figyelhető meg, amit a szem fenekét borító tükröző gömbreteg, az argentea (ez szó szerint ezüstözött felület, valamiféle fényes sző-



2. ábra. (A) Interferenciás vékonyfilm-reflexió. Merőleges beesés mellett erősítő jellegű az interferencia, ha a vékonyréteg optikai vastagságára fennáll az  $nd = \lambda/4$  összefüggés, ahol  $n$  a vékonyréteg törésmutatója,  $d$  a geometriai vastagsága,  $\lambda$  a beeső monokromatikus koherens fény hullámhossza. (B) Ideális sokréteges interferencia-tükör, melyben merőleges beesés mellett minden határfelületi interferencia erősítő jellegű, ha  $n_k d_k = n_n d_n = \lambda/4$ , ahol  $n_n$  a  $d_n$  ill.  $d_n$  vastagságú vékonyrétegek kicsi, ill. nagy törésmutatója. (C) Elektronmikroszkópos keresztmetszeti felvétel a *Pecten* fésűskagyló *argenteájáról*. Fehér: guaninkristályok ( $n_n = 1,83$ ), szürkésfekete: citoplazmarétegek ( $n_k = 1,34$ ). (D) Elméletileg számított  $R$  reflexiós görbesereg egy ideális,  $\lambda/4$ -es guanin-víz sokréteges interferenciatükör esetén a  $\lambda$  hullámhossz és a  $p$  rétegszám függvényében

nyeg) hoz létre. Ennek a nagy reflexivitású (visszaverő-képességű) biológiai tükörnek köszönhető a szem pupillájának fényesen irizáló, kék színben ragyogó megjelenése.

A *Pecten*-szem egy konkáv gömbtükör és egy viszonylag nagy fókusz-távolságú, speciális elülső felületű lencse kombinációja (1/B ábra). A szemek nagyok, átlagban 1 mm átmérőjűek. Az *argentea* legnagyobb vastagsága 40  $\mu\text{m}$ , a lencsée ellenben 1240  $\mu\text{m}$ . A lencse puha, kocsonyás állagú, optikailag homogén anyag, törésmutató a centrumtól kifelé fokozatosan csökken. Mindkét optikai elemnek külön-külön nagy a gömbi hibája (a szférikus aberrációja)! Ezért az előbbi fókusz-távolságok csak a fókuszált nyaláb legkisebb átlagos beszkülési helyét jellemzik a lencse optikai centrumától mérve.

Számos, éjszaka is aktív vagy fénysegregény környezetben élő gerinces (pl. a macskafélék vagy a porcoshalak) szemében is található tükröző *tapetum lucidum*, amelynek az a feladata, hogy a szem fényhasznosítását növelje, miközben a fény a retinán kétszeri oda-vissza áthalad. A *Pecten*-szem *argenteájának* azonban nem ez a szerepe, hanem az optikai leképezésben van feladata, a szemlencse alkotta virtuális képet mint tárgyat képezi le a retinára valódi képpé, az 1/B ábrán látható módon. A pusztán a szemlencse által alkotott kép ugyanis a lencse nagy fókusz-távolsága miatt jóval a szemén kívül helyezkedne el!

A *Pecten*-szem relatív apertúrája (viszonylagos nyílása) a fókusz-távolság és a pupilla átmérőjének hányadosa, kb. 0,6, ami az állatvilágban a

legkisebb ismert értékek közé tartozik. Ez kiváló fénygyűjtő-képességet jelent. Ennél kisebb relatív apertúra csak az éjjeli aktív *Anoplognathus pallidicollis* bogár szuperpozíciós szemében fordul elő ( $A=0,5$ ). Hasonlóan kis relatív apertúrájú ( $A \approx 0,6-0,8$ ) szuperpozíciós, ill. egyszerű szemei vannak még néhány éjjeli, ill. szürkületi folyami ráknak, ganajtúró bogárnak, ill. póknak. Az ilyen nagy nyílású gömbtükörnek azonban nagy a gömbi hibája. A *Pecten*-szemben egy pontoszerű távoli fényforrás gömbi hiba miatt elkent képe akár 25  $\mu\text{m}$  átmérőjű is lehetne, ha csak egyedül az *argentea* venne részt a leképezésben, míg a retinasejtek távolsága a felső retinában (ahol az optikai kép keletkezik) középpont csak 5  $\mu\text{m}$ , a széleken pedig csak 10  $\mu\text{m}$ . Így a csak *argenteás* leképezésű *Pecten*-szem térbeli optikai felbontóképessége a nagy szférikus aberráció következtében igen gyenge lenne.

A szemlencse belső felülete gömb, külső felülete pedig harang alakú (1/C ábra). A lencse részleges feladata, hogy a nagy apertúrájú *argentea* szférikus aberrációját csökkentse speciális külső felületével, ezen túlmenően persze részvetel az optikai leképezésben is. Az ilyen, gömbi hibától mentes optikai rendszer felbontóképességének csak a pupillaris fényelhajlás szab határt. A *Pecten*-szemben a felső retinára eső diffrakciós Airy-korong átmérője kisebb 1  $\mu\text{m}$ -nél, ami azt jelenti, hogy a térbeli felbontást csak a retina sejtstruktúrája korlátozza (5–10  $\mu\text{m}$ ), s nem pedig a szem optikai felbontóképessége.

A közel homogén retina a szemlencse és az *argentea* közti területet telje-

sen kitölti: anyagának törésmutatója 1,35. Két fő sejtrétegből áll (1/C ábra), amelyek az *argenteához* közelebb eső alsó és a fölötte levő felső retinát képezik. A felső retina az *argenteával* koncentrikus, gömbi; a szemlencse és az *argentea* alkotta kép itt keletkezik. A fénynek a fotoreceptorokon végbe-menő abszorpciója elsődlegesen az árnyék- és kontrasztérzékelést teszi lehetővé, gátlást váltva ki a *Pecten* felső retinájának ideghálójában. Hasonló gátlómechanizmus működik az állatvilág zöménél a vizuális neuronhálózataiban.

### A *Pecten-argentea* mint biológiai tükör

A *Pecten* gömbi szemfenekét kitöltő *argentea* szerkezete hasonló bármely más biológiai tüköréhez, de azotól eltérően funkciója a felső retina ún. *ciliáris* rétegén való képalkotásban van. A *Pecten-argentea* nagy fényvisszaverő képességét vékonyfilm-interferencia eredményezi (2. ábra). A tükrözésért felelős struktúra váltakozóan nagy és kis törésmutatójú rétegekből áll, melyek vastagsága összemérhető a fény hullámhosszával. Az ilyen struktúra minden határfelületén a beeső fény egy része visszaverődik (2/A ábra) és a rétegvastagságtól, a törésmutatóktól, a beesési szögtől, valamint a hullámhossztól függően a határfelületekről tükröződő fényhullámok interferencia útján erősítik vagy gyengítik egymást (2/B ábra). Ha az interferencia erősítő jellegű, a rendszer reflexiója rohamosan nő, a rétegszám növekedésével, szinte tökéletes, közel 100% reflexiójú, széles spektrális sávú

tükröt alkotva 10-nél több nagy törésmutatójú réteg esetén (2/D ábra).

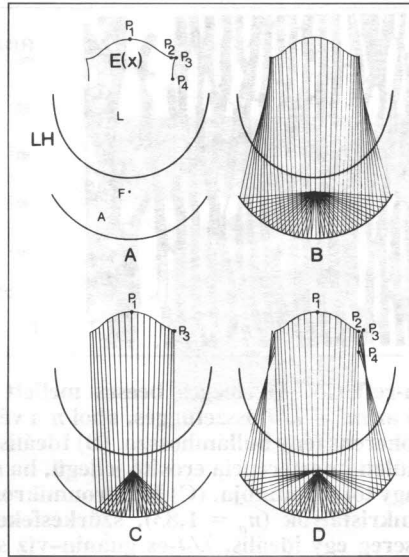
A legegyszerűbb ideális esetben, merőleges beesés mellett a kis és nagy törésmutatójú rétegek optikai vastagsága (geometriai vastagság  $x$  törésmutató) azonos és megegyezik a beeső fény hullámhosszával  $1/4$  részével:  $n_k d_k = n_n d_n = \lambda/4$  (2/B ábra). Ekkor az interferencia erősítést eredményez. Az ilyen rendszerről visszaverődő fehér fény színes, mivel az interferencia csak egy keskeny hullámhosszával erősítő jellegű. A fésűskagyló argenteája által reflektált fény hullámhosszának félszélessége a látható spektrumnak közel  $1/3$  része (2/D ábra)!

A Pecten-argentea kis törésmutatójú ( $n_k=1,34$ ) citoplazmába ágyazott nagy törésmutatójú ( $n_n=1,83$ ) guanin-kristályokat tartalmaz, melyek érintőlegesen helyezkednek el az argenteában; átlagos felszínük  $1 \mu\text{m}^2$  (2/C ábra). A reflektált fény kékeszöld színű; a reflexiós görbe maximuma az  $500 \text{ nm} \leq \lambda \leq 550 \text{ nm}$  intervallumba esik, alakja hasonló a sokréteges elsőrendű interferenciás tükrökre levezethető elméleti görbékéhez (2/D ábra). Elektronmikroszkópos vizsgálatok szerint az argentea közepén 30 egymásra lapolódó guanin-kristály-rétegből áll, a kristályok vastagsága átlagosan  $d_n=80,5 \text{ nm}$  (2/C ábra). Az ideális interferencia-tükrökre jellemző  $4n_n d_n = \lambda$  feltételből  $\lambda = 580 \text{ nm}$  adódik, ami valamivel nagyobb, mint a reflexiós maximum hullámhossza, de eléggé közeli ahhoz, hogy közel ideális biológiai tükröknek tekintsük a Pecten argenteáját.

A Pecten és rokonainak (*Chlamys*, *Spondylus*, *Amussium*) köpenyszéli szemeiben két egymásra rétegződő retina található, mindegyik külön idegköteggel járul hozzá a látóideghez (1/C ábra). Mindkét retinában kb. 500 receptorsejt van. Elektrofiziológiai mérések szerint a felső retina sejtjei a megvilágítás ingadozásakor tipikus 'OFF'-választ adnak – azaz csak a fényintenzitás csökkenésére reagálnak –, míg az alsó retina sejtjei 'ON'-típusúak, azaz a megvilágítás erősödésére tüzelnek.

Az ON-válasz a megvilágítás fennálltáig tart, bekapcsoláskor kissé nagyobb frekvenciával, ami később a fényintenzitástól függő kisebb értéken állandósul. Az OFF-válasz kizárólag a fényerősség csökkenését követően jelentkezik bizonyos késéssel, időtartammal és frekvenciával. A késés értéke annál kisebb és az OFF-válasz frekvenciája valamint időtartama annál nagyobb, minél nagyobb a megelőző fényerősség és minél hosszabb időtartamú.

Elektronmikroszkópos vizsgálatok alapján a felső retina sejtjeinek cili-



3. ábra. (A) A Pecten-lencse elméletileg számított elülső felületének  $E(x)$  tengelymetszete a szem egy tipikus paraméterkonfigurációja esetén.  $F$ : fókuszpont,  $A$ : argentea,  $L$ : lencse,  $LH$ : lencse hátsó felszíne. Látható a megoldás  $P_2, P_3$  és  $P_4$  közötti széli elágazása. (B) Mint (A), de a szembe sugarmentellel együtt. (C) Az  $E(x)$  egyik lehetséges,  $P_1$  és  $P_3$  közötti megoldása a sugarmentellel. (D) Az  $E(x)$  másik,  $P_1, P_2$  és  $P_3, P_4$  közötti megoldása a sugarmentellel

umszerű nyúlványai vannak, melyeknek fotoreceptív funkciójuk van, közel szabályosan rendezett lamelláris (lemezes) szerkezetet alkotnak a retina szemlencséhez közelebbi részén. Az alsó retina sejtjeinek más szerkezete, s a sejtek vékony nyúlványai viszonylag rendezetlen fotoreceptív microvilláris réteget képeznek a retina legalsó részén. Ezek a microvillik a sejttest külszerű kiterjedését övezik, a más gerinctelenek szemében is megtalálható, ún. rhabdomot formálva.

A felső retina receptorai a látótér helyi fényerősség-csökkenéseire választanak, különösen pedig a mozgó tárgyakra. Mivel a felső fotoreceptorok OFF-típusúak, a látótérben mozgó világos tárgyak kilépő élére reagálnak, míg sötét mozgó objektumok esetén a belépő élre, amint azt mozgó fekete-fehér csíkos mintázattal folyó stimulációs kísérletek is alátámasztották. Az OFF-típusú felső receptorok kiváló mozgásdetektálást tesznek lehetővé. Ha a retinát fény éri, az a felső receptorok akciós potenciálját gátolja, amit egyes elképzelések szerint az alsó retina ON-válasza idézhet elő.

Az alsó retina ON-típusú sejtjei – a felső receptorokkal ellentétben – nem a látótér fényintenzitásának tér-idő-

mintázataira reagálnak, hanem átlagos, globális fényerősséget érzékelnek. A két retina ilyen munkamegosztását az is biztosítja, hogy – amint korábban már láttuk – a szem optikai készüléke kizárólag csak a felső retinán alkot a külvilágról éles képet, míg az alsó retinát fókuszátlan, gyengén konvergens fénynyaláb éri (3/B–D, 5. ábra).

### A Pecten etológiája

A Pectenek a tengeri epibentosban szabadon élnek. Általában igénytelenek, de a sótartalomra, hőmérsékletre és az üledék minőségére viszonylag érzékenyek. A láb által kiválasztott, rugalmas, hajszerű fonalakkból álló bisszuszt általában csak fiatal korban használják fel a horgonyzáshoz. Fő ellenségük a tengeri csillag, aminek támadásakor úszva menekülnek előle a teknők gyorsan ismétlődő összecsapásával. Aszimmetrikus alsó és felső teknőjük búbja mellett kétoldalt lemezszerű füleket viselnek, amelyeknek úszáskor hidrodinamikai szerepük van. (1/A ábra).

A Pecten számára fontos vizuális stimulációk három csoportra oszthatók: (i) az optikai környezetben a fényerősség térbeli eloszlása, (ii) a fényintenzitás árnyékvetés okozta csökkenése és (iii) az optikai környezetbe a fényerősség-eloszlás mozgás okozta időbeli változása. Ezek a stimulációk különböző viselkedésmintákat eredményeznek. A környezetbeli, térbeli globális fényerősség-elosztás irányítja a fésűskagylók tendenciózus úszásirányát, és ennek megfelelően azt az irányt, amelybe tapogatószervük kinyúlik. Ezeket a reakciókat az alsó retina közvetíti. Habár ott nem keletkezik finom felbontású kép, bizonyos fokú térbeli orientáció mégis lehetséges, csupán a köpeny peremén egyenletesen elszórva elhelyezkedő, mintegy 60 szem alsó retinájának eltérő, a környezet globális fényerősség-eloszlásától függő érintőleges „outputmintázata” alapján is. Egyetlen szemnek ugyanis csak mintegy  $50^\circ$ -os nyílásszögű látótere van, s a 60 szem egyedi látótere összességében közel  $300^\circ$ -os panorámát fog át vízszintesen, ami telotaxisos vizuális orientációt tesz lehetővé.

Minden Pecten-faj egyformán reagál az árnyékvetésre és a mozgásra: visszavonja tapogatószervét és nagyon gyorsan összehúzza teknőit vagy elúszik a helyről. A két héj rendszerint nincs szorosan összehúzva, de ismételt vizuális inger tartós és teljes becsukódást eredményez. A Pecten maximumnál az árnyékvetés és mozgás nem vált ki úszást, de a tapogatókar és a köpeny kémiai vagy mechanikus ingerlése igen.

Etológiai vizsgálatok szerint a fényintenzitás csökkenésére a *Pecten varius* a legérzékenyebb; már 5,4%-os diffúz fényerősség-csökkenésre is reagál, míg az irányított, lokális fényintenzitás-csökkenésre még érzékenyebb, már 0,52%-os változás is kiváltja az említett választ. Ez a közel egy nagyságrendnyi érzékenységbeli eltérés a globális, ill. lokális fényerősség-ingadozás esetén azzal magyarázható, hogy az előzőt az *alsó retina* érzékeli, amelyen *nem keletkezik kép*, míg az utóbbit a *felső retina*, amelyre a környezetet *finom felbontású képe* vetül.

A *Pecten maximus* teknői összezárásával válaszolnak a mozgó sötét objektumokra, ha azok az állat állásához képest minimum 2°-os szögben mozdulnak el. A *Pecten maximus* nagy, közel 1 mm átmérőjű szemeiben ez a 2°-os elmozdulás kb. 9 μm-t jelent a felső fotoreceptorok közti átlagos távolsággal. Az a tény, hogy a *Pecten* szemében a fény a tükröző szemfenék által reflexiós képképződés előtt egyszer

már fókuszálatlanul áthaladt a felső retinán, mintegy 2-es faktorral csökkenti a képkontrasztot, s ennek fényében figyelemre méltó optikai teljesítménynek számít, hogy a szemek mégis a retina szemcsézetségének megfelelő térbeli felbontással rendelkeznek.

A *Pecten* látórendszeréhez sok szempontból hasonló szemek fordulnak elő számos más puhatestűnél is, de egyiknél sem mutatható ki olyan nagyfokú optimalizáció, mint a fésűkagylóknál.

### A *Pecten*-szem optikai sajátságainak számítógépes vizsgálata

A *Pecten* szemének anatómiáját és a retina elektrofiziológiáját alaposan felderítették már a biológusok. A lényeges információk összegyűjtése után lehetőség nyílt a kuriózum-számba vehető látórendszer optikai sajátságainak tesztelésére is. A Pec-

ten-szembeni leképezési viszonyok felderítésében nagy segítséget nyújt a szem geometriai optikájának számítógépes modellezése, amellyel vizsgálható, hogy pl. a *Pecten*-lencse optimális frontfelülete hogyan függ a szem optikai és geometriai paramétereitől, és az elméleti frontprofilok összevetethetők a valódival.

Ezekben a vizsgálatokban kvantitatív módon nem használhatók a különböző típusú Schmidt-rendszerű csillagászati távcsövek (4. ábra) optikájában felhalmozott ismeretek, mert egyrészt a bonyolultabb Schmidt-rendszerű teleszkópoknak (pl. a Schmidt-Cassegrain vagy a Baker Super-Schmidt-távcsöveknek) más a felépítésük, mint a *Pecten*-szemé, másrészt pedig mindenfajta Schmidt-típusú teleszkóp relatív méretei (pl. relatív apertúrája) jelentősen különböznek a *Pecten*-szem paramétereitől.

Közelítő formulák levezethetők a Schmidt-távcső vékony korrekciós lemeze aszférikus felületének alakjára

### Schmidt-rendszerű csillagászati távcsövek

Ahhoz, hogy összehasonlíthassuk a *Pecten*-szem geometriai optikáját a hasonló felépítésű Schmidt-rendszerű csillagászati távcsövekével, röviden szólnunk kell az utóbbiakról is.

A csillagászati tükrös távcsövekben az égitestekről jövő fény először egy nagyobb, primer konkáv tükörrre esik, ahonnan visszaverődve a fókusziszkban a tárgyról valódi kép keletkezik. Ezt a képet vagy közvetlenül egy segéd-tükörrel fotolemezre irányítják, vagy szabad szemmel figyelik meg. Ez az elrendezési típus a manapság használatos távcsövek legelterjedtebb formája; az első ilyen teleszkópot *Newton* készí-

tette 1668-ban (4/A ábra). A *Newton*-féle tükrös távcsőben egy kis síktükör vetíti ki oldalra a képet. Az anasztigmatikus paraxiális (a pontot pontra leképező, optikai tengely közelében futó, azzal kis szöget bezáró sugarakkal működő) képképződéshez paraboloid alakú primer tükörfelület szükséges, ekkor viszont a nem paraxiális képképződés kóma hibás lesz, ami jelentősen leszűkíti a használható látóteret.

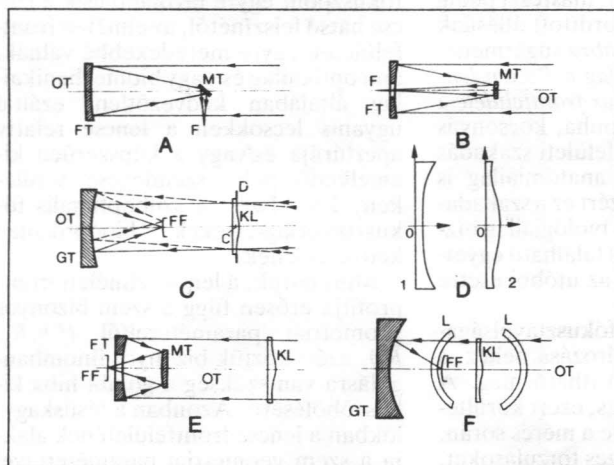
Más típusú tükrös távcsövekben szintén két tükör van, de a segéd-tükör nem sík; a *Cassegrain-távcsőben* pl. konvex felület (4/B ábra). Az anasztigmatikus paraxiális képképződés biztosításához parabolikus primer tükör esetén hiperbolikus segéd-tükör szükséges.

A tükrös távcsövek egyik legkedvezőtlenebb sajátságát, hogy csak nagyon kis használható látószögük van, ami mentes a kóma hibától, speciális alakú korrekciós lemezeknek a fókusziszk elé elhelyezésével lehet enyhíteni. Ezeket az átlátszó, fénytörő lemezeket úgy tervezik, hogy olyan kóma hibát idézzenek elő, ami éppen kompenzálja a primer tükör kóma hibáját. Ezt az elvet az 1930-as évek elején *Schmidt* találta fel, s róla *Schmidt-rendszerű távcsőnek* nevezték el (4/C ábra).

Amíg egy parabolikus tükör paraxiális fénysugarakra ezakt képet alkot, de nagyon kóma hibásat a már kis (tengelytől mért) szögeltérésekre is, addig egy gömbtükör, gömbületi középpontjában egy rekeszsel, önmagával koncentrikus, széles szférikus felszín mentén egyenesletes, de viszonylag nagy gömbi hibával rendelkező képképződést eredményez. *Schmidt* a rekesznyílásba egy vékony, fénytörő korrekciós lemezt helyezett, melynek egyik oldala sík volt, a másik viszont olyan alakúra volt kiképezve, hogy kompenzálja a gömbtükör szférikus aberrációját (4/C ábra). A korrekciós lemez optimális negyedrendű alakjára különböző elméleti formulákat lehet levezetni, kettő ezen felületek közül a 4/D ábrán látható.

Egyes, bonyolultabb optikai leképezőrendszerek is a Schmidt-elrendezést használják. Az egyik legfontosabb ezek közül a *Schmidt-Cassegrain-távcső*, amelyben a korrekciós lemez mögött két tükör helyezkedik el (4/E ábra), valamint a *Baker Super-Schmidt-távcső*, mely egy gömbtükörből, egy korrekciós lemezből és két, azt övező konvex-konkáv lencséből áll (4/F ábra).

4. ábra. A *Newton*- (A), *Cassegrain*- (B), *Schmidt*- (C), *Schmidt-Cassegrain*- (E) és *Baker Super-Schmidt*-távcső (F) felépítése. (D) A Schmidt-típusú távcsövek korrekciós lemezének két különböző alakú frontprofilja erős torzításban. FT: főtükör, MT: melléktükör, F: fókuszpont, OT: optikai tengely, FF: fókuszfelület, D: diafragma, KL: korrekciós lemez, L: lencse, C: a gömbtükör görbületi centruma, GT: gömbtükör



(4/D ábra), melynek relatív apertúrája  $A=3$ . Ugyanakkor a Pecten-szemnél  $A=0,6$ , valamint a korrekciós lencse nagyon vastag a szem méreteihez képest, nem úgy, mint a Schmidt-teleszkópban. Ezért a Schmidt-távcső optikája legfőbb kvalitatív összevetésre alkalmas.

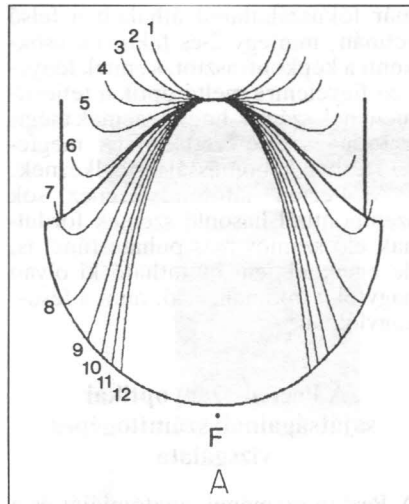
A továbbiakban a fésűskagyló szemlencséje frontfelületének optimális alakjáról szólnunk a szem törésmutatóinak és geometriai paramétereinek függvényében, valamint összevetjük az elméletileg számított lencseprofilokat a valódiakkal és ezáltal vizsgáljuk a Pecten-lencse gömbi hibára való korrekciójának mértékét és optimalizációs fokát.

### A Pecten-lencse optimális frontprofilja

A Pecten-szem optikai paramétereit a homogén lencse és retina  $n_1$  és  $n_2$  törésmutatója. A szemlencse előtt tenger víz van, lévén a fésűskagyló tengeri állat. A hengersizmetrikus szem geometriai paramétereit a lencse  $a$  tengelyvastagsága, az argentea és a lencse hátsó felszíne közti  $b$  tengelytávolság, a szem  $r$  sugara, valamint a lencse hátsó felszíne és az argentea  $R_1$  és  $R_a$  görbületi sugara.

Az elméleti vizsgálat során keresendő az a frontprofil, mely biztosítja, hogy minden paraxiálisan beeső fény sugarát ugyanazon  $F$  fókuszponton bocsásson az optikai tengelyt a szemlencsén való fénytörés és az argenteán való tükröződés után, függetlenül az optikai tengelytől mért radiális távolságtól. Ez más szavakkal azt jelenti, hogy a szemnek nincs szférikus aberrációja, vagyis egyetlen egzakt  $F$  fókuszponton rendezkedik. Mivel a geometriai optikai egyenletek a keresett frontfelület főmetszetére olyan közönséges differenciálegyenlethez vezetnek, amit analitikusan nem lehet megoldani, ezért számítógépes numerikus módszerekhez kell folyamodnunk.

A 3/A ábrán az elméletileg meghatározott  $E(x)$  frontprofil mutatja a Pecten-szem egy tipikus paraméterkonfigurációjára. Látható, hogy a széleken a megoldás nem egyértelmű, itt az  $E(x)$  görbe kettéágazik. Hogy megértsük ezt a perem menti elágazást, tekintsük a 3/B ábrát, mely a fény sugarmentét mutatja a szemben. Az  $F$  fókuszpontból kiindulva, bizonyos paraméterkonfigurációkra az argentea által tükrözött és a lencse hátsó felülete által megtört sugarak úgy tartanak össze, hogy egymást metszik a lencse peremtartományában. A megoldás peremi elágazásának oka ez a konvergencia és keresztesződés. Az elágazás miatt két különböző lehetőség



5. ábra. A Pecten-lencse elméleti frontprofilja a lencse hátsó felszíne és az argentea közti  $b$  tengelytávolság függvényében két különböző fókusz-távolság esetén. A  $b$  értéke  $220 \mu\text{m}$ -ről csökken  $110 \mu\text{m}$ -re az 1. görbétől a 12-ig,  $\Delta b = 10 \mu\text{m}$  lépésközzel. Az argentea metszetének görbeserege nincs feltüntetve

adódik gömbi hibától mentes optikai rendszer létrehozására: (i) olyan rendszer, melyben a lencse frontfelülete megegyezik az elméletileg számított,  $P_1$  és  $P_3$  közti frontprofillal (3/A ábra), ennek sugarmentét a 3/C ábra mutatja; (ii) olyan rendszer, melyben a lencse frontfelülete megegyezik az elméletileg meghatározott  $P_1$ - $P_2$  és  $P_4$ - $P_3$  közti frontprofillal (3/A ábra), ennek sugarmentét a 3/D ábrán látható.

Az (i) esetben (3/C ábra) a lencse frontfelülete sima, folytonos, az (ii) esetében (3/D ábra) viszont  $P_2$ ,  $P_4$ -nél szakadása van. Egy ilyen szakadás kedvezőtlen lenne, egyrészt a rajta fellépő fényelhajlás miatt, ami csökkentené a szem fénygyűjtő- és kontrasztátvivő képességét, másrészt pedig a kép peremi részei fordított állásúak lennének (lásd a 3/D ábra sugarmentét). Ezért biooptikailag a Pecten-lencse egyedüli realizitikus frontfelülete a 3/C ábra szerinti! A puha, kocsonyás állagú lencsében egy felületi szakadás biomechanikailag és anatómiailag is kedvezőtlen lenne. Ezért ez a szakadásos elméleti megoldás biológiailag bizvást elvethető. Nem is található egyetlen ismert példa sem az utóbbi esetre az állatvilágban.

A Pecten-szem  $f$  fókusz-távolságának kísérleti meghatározása nehéz, s csak pontatlanul valósítható meg. A lencse puha, kocsonyás, ezért körültekintően kell bánni vele a mérés során, elkerülendő az esetleges torzulásokat. A fókusz-távolság mérése elvégezhető

ép szemem (*in situ*), ill. kioperált szemlencsén is. A preparált lencsén történt mérések azonban átlagban 50%-kal nagyobb értéket adnak  $f$ -re, mint az *in situ* mérések. Az eltérés oka egyrészt az, hogy a lencsének nincs egyetlen egzakt fókuszpontja, hanem a gömbi hiba miatt egy komplex, kiterjedt fókusz-tartománnyal állunk szemben, másrészt pedig a mérések során általában használatos feltevés, mely szerint a lencse optikai és geometriai centruma megegyezik, jelentős hibaforrás.

A szem fókusz-távolsága meghatározza a kép helyét a retinán. A lencse törése és az argentea tükröződése által alkotott képnek a felső retinára kell esnie, ezért a Pecten számára optimális fókusz-távolság meghatározható az elméletileg számolt frontfelületek alakjának a valódi frontprofillal való összevetése által. A  $f$  variálásával így megkereshető az az elméleti frontfelület, amelynek alakja a legjobban illeszkedik a Pecten-lencse valódi külső felületére.

### A Pecten-szem optimalizációjának foka

A Pecten fésűskagyló az optikailag, mechanikailag és morfológiailag egyaránt sokkal kedvezőbb utat választotta a két lehetséges mód közül, hogy szemlencséje sima, szakadástól mentes frontprofiljával csökkentse szemének gömbi hibáját. A Pecten-szemben csak olyan frontfelületek jöhetnek szóba, amelyek nagy relatív apertúrát, nem túl csúcsos, kevésbé sérülékeny frontprofilot és kocsonyás, viszonylag kis törésmutatójú lencseanyagot biztosítanak, tehát pl. a 5. ábra 5., 6. vagy a 7. profiljához hasonlók. Az elméletileg meghatározott frontprofilokat elemezve s összevetve azokat a valódiakkal, az alábbiak szögezhetők le.

A szemlencse elméleti, optimális frontfelületének alakja erősen függ a szem  $f$  fókusz-távolságától. Amint az  $F$  fókuszpont egyre távolabb esik a lencse hátsó felszínétől, az elméleti frontfelületek egyre meredekebbé válnak, ami optikailag és/vagy biomechanikailag általában kedvezőtlen, ezáltal ugyanis lecsökken a lencse relatív apertúrája és/vagy a kúpszerűen kiemelkedő puha szemlencse sérülékeny lesz. Ezért a szuboptimális fókusz-távolság-értékek biooptikailag kedvezőtlenek.

Mint láttuk, a lencse elméleti frontprofilja erősen függ a szem bizonyos geometriai paramétereitől ( $f, b, R_a, R_1$ ), ezért közöttük bizonyos finomhangolásra van szükség a gömbi hiba kiküszöbölésére. Azonban a fésűskagylókban a lencse frontfelületének alakja a szem geometriai paramétereivel együtt oly változékony, hogy ez a fi-

nomhangoltság nem teljesül. Bizonyos paraméterkonfiguráció esetén az elméleti frontfelület jól egyezik a valódival, más esetekben azonban nagy eltérések adódnak. Az elméleti és valódi frontfelület közti eltérés a szélek felé még a legjobb illeszkedésű esetekben is eléggé nagy.

Mindebből az szűrhető le, hogy a Pecten-lencse szférikus aberrációt kiküszöbölő hatása nem olyan nagy, mint eddig hitték azt a biológusok a Schmidt-teleszkóppal való analógia alapján. A fésűskagylók szemében tagadhatatlanul van bizonyos korrekció a gömbi hibára, de korántsem olyan tökéletes és finomhangolt módon, mint a kihalt *schizochroális* szemű trilobitákban vagy a *Notonecta* vízipoloskában. [Utóbbi szemének biooptikájáról a Természet Világa 120, 246–251 (1989) oldalain olvashatunk.]

A viszonylag passzív életmódú fésűskagylóknak nincs szükségük annyira tökéletesen optimalizált, finomhangolt szemekre ahhoz, hogy optikai környezetükben érzékeljék az árnyékhatásokat és az ellenség mozgását, minek hatására visszahúzzák szifójukat és lábukat, összezárják teknőiket, vagy elmenekülnek; de táplálkozásukban sincsenek szemükre hagyatva. Egy gömbi hibától teljesen mentes szemű fésűskagyló az árnyék- és mozgásdetektálás szempontjából nem élvezne szelekciós előnyt olyan fajtársaival szemben, melyeknél csak bizonyos fokú korrekció történt a szférikus aberrációra. Ugyanakkor a Pectenek azáltal, hogy szemük gömbi hibáját speciális lencseprofiljuk csökkenti s így viszonylag jól látnak, mégis szelekciós előnyben részesülnek (előbb veszik észre pl. az ellenség közeledését) hasonló életmódú más fajtársaikkal szemben, melyeknek nincsenek ilyen nagy optimalizációs fokú érzékeny szemek.



A bionika a biológiai rendszerekben alkalmazott fizikai elvek konkrét technikai megvalósításával foglalkozó modern tudomány, a „természet trükkjeinek lemásolója”. Schmidt a róla elnevezett távcső optikai elvét 1931-ben magától találta fel, habár fel is fedezhette volna a Pecten fésűskagyló szemének tanulmányozása által. Nem így történt, hiszen a Pecten-szem anatómiáját és optikai leképezését csak 1965-ben tárta fel részleteiben M. F. Land. Ezt az elszalasztott tudománytörténeti lehetőséget azonban részben pótolja egy másik, újabb keletű konkrét optikai alkalmazás, aminek inspirálója éppen a Pecten-szem volt. A panorámikus gyűrűlencséről (elterjedt angol nevén *Panoramic Annular Lens*, röviden PAL) van szó, amit Greguss Pál professzor fejlesztett ki, s aminek számos optotechnikai alkalmazása ismert. De erről majd egy másik cikkben olvashatunk.



Természettudományi Közöny 124. évf. 11. szám