

1989
6
120.évf.

Természet Világa

Természet Világa

A TUDOMÁNYOS
ISMERETTERJESZTŐ
TÁRSULAT
FOLYÓIRATA

Megindította
Szily Kálmán 1869-ben

A TERMÉSZETTUDOMÁNYI
KÖZLÖNY
120. ÉVFOLYAMA

1989. 6. sz. június

HORVÁTH GÁBOR

Biooptika

avagy
mit tanulhat az optikus egy vízirovartól?

Biooptika

avagy
mit tanulhat az optikus egy vízirovartól?

Bevezetés

Az optikai lencse az egyik olyan találmány, amely nagy hatással volt az emberiség fejlődésére. Az optikai lencséknek és az azokat tartalmazó eszközöknek köszönhető, hogy az ember behatolhatott a mikro- és makrokozmoszba (a fénymikroszkóppal, ill. az optikai távcsövekkel), s a múlandó, ritka vagy nehezen megfigyelhető, a tudományos kutatás számára fontos jelenségeknek hiteles, objektív dokumentációját kaphatta meg (a fényképező- és filmfelvevő gépekkel). A csiszolt üvegdarab mély világnézetformáló hatással bírt; gondoljunk csak Galileire, aki egyszerű távcsövével és szellemi éleslátásával kora uralkodó teológiai nézeteinek szemmel látható cáfolatát szolgáltatta.

Az optikai lencse fontos szerepe miatt a felhasználóknak egyre tökéletesebb optikákra volt és van szükségük. A számos lehetséges leképezési hiba kiküszöböléséért szüntelen harc folyt és folyik. Századunk elejére az optika tudománya, valamint az optikai üvegyártás kifejlesztette azokat az objektíveket, amelyek a képalkotási hibákat részben kiküszöbölik. A múlt században ebben a munkában vett részt Petzval József magyar mérnök-fizikus is, aki az első, viszonylag nagy fényerejű felvevőlencséjének tervezéséhez szükséges nagy mennyiségű számítás-hoz még egy szakasz válogatott katonáinakot vitt igénybe. Manapság ezt a munkát számítógépek végzik.

A lencsetökéletesítés előbb vázolt emberi-technikai módjától egy egészen eltérő módja is megvalósult. A biológiai evolúció során, több milliárd év alatt fejlődött ki az állatok, köztük a rovarok látóapparátusa; volt idő a szelekcióra, a viszonylag hibamentes optikai leképezőapparátusok „kikísérletezésére”. S ez az a pont, ahol a biooptika új ötleteket adva segítségére lehet egy tervező optikusnak.

Cikkünkben, miután röviden áttekintjük az optikai lencsék tökéletesítéséért folytatott, híres kutatók nevével fémjelzett fejlesztőmunka történetét, valamint a főbb lencsehibákat, megvizsgáljuk egy vízirovar látóapparátusát. Látni fogjuk, hogy bár az ember már számítógépes tervezéssel részben megvalósította azt, amit a biológiai evolúció a rendelkezésére áll

igen hosszú idő alatt, azért maradt még mit eltanulni, ellesni a természettől.

A geometriai optikai eszközök rövid története

Amióta üveget tudnak előállítani s azt öblösüveggé formálják, bárki megfigyelheti annak nagyító hatását. Seneca már megemlítette ezt aényt. Az első hiteles feljegyzés a csiszolt üveg nagyító-lencsekénti használatáról Alhazentől származik. Roger Bacon már leírta az egyik legjellemzőbb lencsetökéletlenséget, a gömbi hibát (szférikus aberrációt).

Szférikus aberráció esetén a lencse külső zónáinak fókusz-távolsága kisebb, mint a központi részeké. Ez a lencsét határoló felületek gömbi mivoltában gyökerező hiba, aminek eredményeként egy, az optikai tengelyen levő pontnak nagy nyílásszögű sugárnyalábbal alkotott képe nem pontszerű, hanem egy fókuszfelület (ún. diakauszтика), az 1. ábrán látható módon.

A szemüveget valószínűleg Firenzében, az 1300-as évek elején találták fel. Az egyszerű nagyító (lupe) az 1600-as években vált elterjedt kutatóeszközzé. Descartes ősmikroszkópja az 1630-as évek végén vált ismertté. A mikroszkóp egyik legeredményesebb tökéletesítője és korai alkalmazója a holland Leeuwenhoek volt. A kor színvonalán igen fejlett ősmikroszkópja (valójában lupéja) tette lehetővé számára, hogy a botanika, állattan, bakteriológia, szövettan, élettan, kémia és az orvostudomány úttörő mikroszkópos megfigyelőjévé, jeles művelőjévé váljon.

A gyűjtőlencse első készítői csupán az empiria alapján csiszolták egytagú lencségeket. Az ilyen egytagú lencsének azonban számos leképezési hibája van, s ezt már az 1500-as években felismerték, mikor a camera obscura nyílásába egyszerű gyűjtőlencsét helyeztek. Ezen hibák csakis összetett lencserendszerekkel küszöbölhetők ki, amelyek tervezése azonban bonyolult számításokat igényel. A képalkotás geometriai optikai törvényeit Gauss és Newton fogalmazta meg először egzaktt formában.

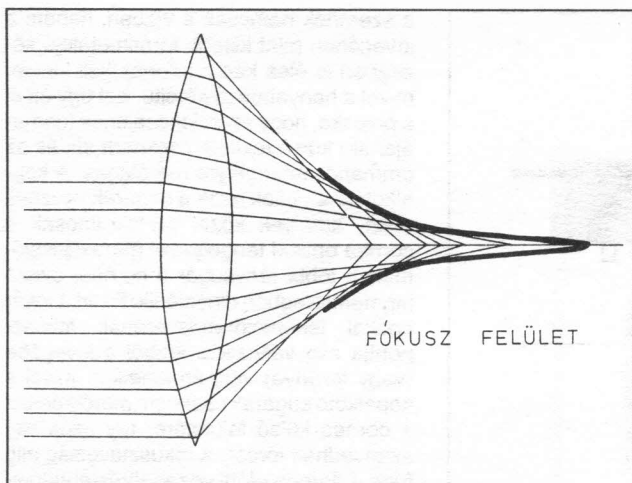
A lencses távcső és a mikroszkóp a lupéhez hasonlóan Hollandiából származik, Middelburgból. Az itt működő szemüvegkészítő mesternek, Lippersheynek tulajdonítják 1608-ból az ún. holland távcső feltalálását, amit Galilei már 1609-ben sikerrel fel is használt, észleléseiről Siderrus Nuntius című művében számolván be.

Az összetett mikroszkóp feltalálónak az ugyancsak middelburgi két Jansent (apa és fia) tartják, 1600 körül. Mikroszkópjuk szerkezete megegyezik az 1611-ben ismertté vált Kepler-féle távcsőével. Robert Hooke 1665-ben mutatta be összetett mikroszkópját, melyen számos tökéletesítés történt az egyszerű lupéhez képest, de még így sem vetekedhetett Leeuwenhoek ősmikroszkópjával. Az összetett mikroszkópnál már kisebb nagyításoknál is sok gondot okoztak a lencsehibák, amiket sokáig nem tudtak kiküszöbölni.

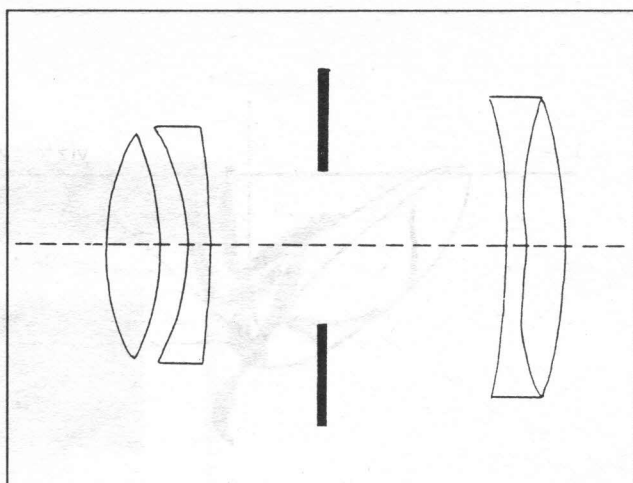
Az első viszonylag jó minőségű okulár megvalósítása Huygens és Descartes nevéhez fűződik 1630–1680 körül. Ők terveztek először olyan (ún. aplanatikus) lencségeket, amelyek határoló felületeit úgy számították ki, hogy azok kiküszöböljék a szférikus aberrációt az optikai tengellyel párhuzamos sugármenetre.

A lencsehibák kiküszöbölésének folyamata napjainkig tartott, s tart még most is, de egy viszonylag nagyobb eredményeket elkönnyelhető korszak a 19. sz. közepén zárult le olyan elődökkel, mint Newton, Huygens, Descartes, Euler, Abbe. Euler elméleti megfontolásai alapján Hall 1753-ban, Dolland pedig 1757-ben a színi hibát (kromatikus aberrációt) részben kiküszöbölő (ún. akromatikus) lencsés távcsövet készített, 1759-ben pedig megvalósították az első akromatikus mikroszkópjektívet.

A kromatikus aberráció eredete a diszperzió jelensége, vagyis hogy a lencsék anyagának törésmutatója függ a fény hullámhosszától. A szokásos lencseanyagoknál a törésmutató a vöröstől az ibolyáig csökken, így vörös fényre a fókusz-távolság nagyobb s fokozatosan csökken az ibolya felé. A színi hibát lencsék kombinációjával lehet csökkenteni. Ha N számú hullámhosszra kívánunk korrigálni, N-tagú lencserendszerre van szükség. A



1. ábra. A sferikus aberráció miatt egy, az optikai tengelyen levő pontnak nagy nyílásszögű sugárnyalábbal létrehozott képe egy fókuszfelület lesz



2. ábra. A Petzval-objektív felépítése

többi szín keveredése a képet kismértékben színessé teszi.

1750-től kezdve jellemző, hogy felismerték: a jó minőségű lencsék tervezéséhez nem elegendők az empirikus összefüggések, igényes elméleti számítások is szükségesek. Eulernek 1762-ben az akromátokról (színi hibától mentes, akromatikus lencséről) írt értekezése mutatja ezt a tendenciát. 1825-ben többtagú, ragasztott lencsék kezdtek el alkalmazni, s kémiai megfontolásokkal már az üveg minőségét is javítani igyekeztek.

Mi sem bizonyítja jobban az optikai rendszerek fejlesztésében a kutatómérnök (mint az empiria) és a fizikus (mint az elmélet) képviselőjének szoros együttműködési igényét, mint az, hogy 1884-ben a műszerész Carl Zeiss, a fizikus Abbe és az üvegyáros Schott együttműködése nyomán létrejött az azóta világhíressé vált Zeiss cég nagy lendületet adott az optikák tökéletesítésének, fejlődésének.

A fényképezés története is szorosan összefügg az optikai lencsék tökéletesedési folyamatával. Daguerre 1838-ban szabadalmaztatta első használható fotográfiai eljárását. Az akkori fotolemezek olyan érzéketlenek voltak még, hogy többperces expozíciós időre volt szükség. Akkoriban a fotokémiai eljárás megváltoztatására nem volt új találmány, ezért a leképező rendszer fényerejét voltak kénytelenek megnövelni az expozíciós idő csökkentése érdekében. Petzval Józsefnek (1807–1891) köszönhető, hogy a korábbiaknál jóval fényerősebb lencsét használhattak a fényképezéshez. A híres Petzval-lencse egy ragasztott kettes tagból és két másik egyedi tagból áll a 2. ábra szerinti módon. Fényereje 16-szor volt nagyobb, mint az addig használt Chevalier-féle lencsének, s ez 1/4 s-os expozíciós időt tett lehetővé. A Petzval-lencse titka az a speciális alakú felület, amely a két különböző törésmutatójú, homogén

lencsetagot elválasztotta egymástól, s a gömbi hiba kiküszöbölését szolgálta a Descartes–Huygens-féle felületekhez hasonlóan. Az első, optikailag szinte hibamentes többtagú lencsék a múlt század végén jelentek meg.

A lencses távcsövek a 18. sz. végén éltek reneszánszukat, miután Dolland létrehozta az akromatikus objektíveket. De még így is számos hátrányuk volt a tükrösökével szemben, ezért a tükrös távcsövek napjainkra kiszorították a Galilei- és Kepler-féle lencses távcsöveket.

A kiküszöbölendő főbb lencsehibák, a reflexió, az asztigmatizmus, a görbült fókuszfelület, a torzítás, a diffrakció, a hullámhosszfűggő áteresztés, a műszeres polarizáció, a kóma hiba stb. nehéz feladat elé állítják a kutatókat. A diffrakció, a hullámhosszfűggő áteresztés és a műszeres polarizáció nem szüntethető meg, csak csökkenthető; az asztigmatizmus, a görbült fókuszfelület, a kóma hiba, a színi és gömbi hiba bizonyos határok között jól korrigálható többtagú optikai rendszerekkel. A torzítás a lencsefelületek gondos csiszolásával, a reflexió pedig anyaguk jó megválasztásával, reflexiócsökkentő rétegekkel iktatható ki.

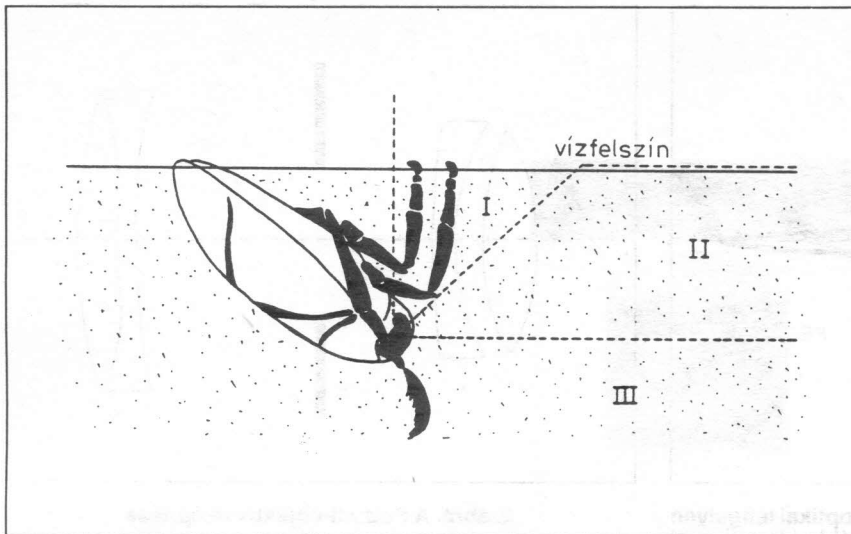
A technikai optika a leképezési hibák korrigálásával jelentős eredményeket ért el, de minden korrigált lencse és tükrös többnyire csak annak a célnak felel meg teljesen, amelyre tervezték. Univerzálisan hibamentes lencserendszert lehetetlen készíteni a sokszor egymásnak ellentmondó követelmények miatt.

Néhány főbb hibát korrigáló lencserendszer tervezése is nehéz feladat. Megkönnyítheti azonban a tervezést, ha felhasználjuk a biooptika interdiszciplináris eredményeit. A hanyattúszó vízipoloska (*Notonecta glauca*) összetett szeme például több jó ötlettel, trükkal is szolgálhat egy optikai tervezőnek. Ezért a továbbiakban ezzel a vízirovarral foglalkozunk.

A Notonecta vízi életmódhoz való tökéletes alkalmazkodása

Az eredetileg szárazföldi rovarok néhány faja a vizet újrachólitotta, mint fő életteret. Ezek képviselői a vízipoloskák. A leggyakoribb vízipoloskák a hanyattúszók (*Notonectidae*) családjába tartoznak. Ezek hosszú, erősen szőrös, evezőként szolgáló hátulsó lábukkal nagy lendülettel élénken úszkálnak a vízben (apró pocsolókban, tavakban), hassal felfelé. Domború hátuk világos színű, az úszáskor felfelé fordított lapos hasuk pedig sötét. Ragadozó életmódot folytatnak, apró vízi vagy a vízbe pottyant élőlényekre vadásznak. Elülső és középső lábaikkal megragadott zsákmányukat először megszúrják, majd az áldozat testneveit a vízfelszínen kiszívják. Időnként feljönnek a víz felszínére levegőt venni, miután újra lebukva egy kis légszákot visznek magukkal, amelyet vízhatlan szőreik, illetve fedőszárnyaik rögzítenek.

Ennek a légszákknak több funkciója is van. Egyrészt levegőtartalék, másrészt fizikai kopolytúként is működik, azaz a légzés során az oxigénben elszegényedett levegő a vízben oldott oxigén révén felgyűlik, a leadott széndioxid pedig a vízben feloldódik. Ezt a gázcsere elősegíti, hogy a vízben oldott levegőben nagyobb az oxigén részaránya, mint a normál légkörben. A légszák a poloska víz alatti légzése miatt fokozatosan fogy, ezért időnként fel kell frissítenie. Az oxigénkészlet így mégis hosszabb időre (órákra) elegendő, mint a vízből ezen fizikai kopolytúval szerzett utánpótlás nélkül. (Érdekességként megjegyezzük, hogy a fenékjáró vízipoloskák a kezdeti bőrlégzés után már egész életükben ilyen fizikai kopolytúval lélegeznek anélkül, hogy egyszer is kiemelkednének a vízből.)



3. ábra. A *Notonecta* szokásos prédaleső testtartása és optikai környezetének különböző zónái

Ezt a rovar testét fedő dús, igen vékony kitinszörökből álló bundában megrekedő apró légbuborékok teszik lehetővé.)

A hanyattúszók míg zsákmányukra lesnek vagy nyugalmi állapotban vannak közvetlenül a vízfelület alatt, négy lábukkal a víz felületi hártájába kapaszkodva várakoznak. Ekkor alulról is, fölülről is veszély leselkedik rájuk. Ezért jön jól hasuk sötét és hátuk világos színe, ugyanis így fölülről egybeolvadnak a sötét víztükörrel, alulról pedig mivel testüket vékony levegőhártya, a légszák borítja, a totálreflexió miatt ugyanolyan tükrözőnek, illetve világosnak látszanak, mint a víztükör. A légszák további funkciója, hogy a felhajtóerőt megnövelvén, megkönnyíti a vízpoloskának a felszínen való tartózkodást, lebegést.

A hanyattúszók, mint általában minden vízirovar összetett szeme nem gömb alakú, hanem laposabb, ellipszoid formájú. Így kevésbé emelkedik ki a kitenpáncéltól, s ezért sokkal kisebb közegellenállást okoz. Ez segíti a ragadozó életmód miatt szükséges gyors mozgást a vízben.

A *Notonecta* szeme érzékeny a fénypolarizációra. A levegőben repülő, új élettartartást kereső vízpoloska már messziről felismeri a vízfelületeket. Ezt segíti, hogy különbséget tud tenni az égbolt közvetlen fényének és az égbolt vízfelületről reflektált sugárzásának polarizációja között.

A *Notonecta* nemzetségnek Magyarországon 5 faja található, leggyakoribb a *Notonecta glauca*, de a többi faj sem ritka (*N. obliqua*, *maculata*, *viridis* és *lutea*). Az egyes fajok csak bizonyos helyeken fordulnak elő. Ugyanabban a vízi élettérben leggyakrabban 2-3 fajuk él együtt.

A *Notonecta* szeme mint ragadozóknak igen fejlett érzékelőapparátusa van, mellyel a zsákmánya felől jövő különböző jeleket fogja fel. Kétféle mechanizmust is hasz-

nál. A felületi hártájába kapaszkodó négy szétterpesztett lábával érzékeli a vízbe pottyant apróbb rovarok keltette felületi hullámokat, s az egyes lábaihoz érkező hullámok érkezési időkülönbsége alapján akár 3° pontossággal is be tudja tájolni az áldozat helyét. Így bármilyen helyzetben is lebeg a poloska a felszín alatt, rögtön prédája irányába fordulhat. Ezután fejlett, viszonylag éles és fényerős képet adó szemére támaszkodva közelíti meg a zsákmányállatot.

A *Notonecta* szeme

A *Notonecta* szeme is tökéletesen alkalmazkodott a vízi élethez. A 3. ábrán látható a rovar szokásos prédaleső vagy nyugalmi testtartása. Az állat optikai környezetét ebben az esetben 3 különböző zónára oszthatjuk. Az I. zónában a *Notonecta* kiláthat a vízfelszín fölé, a levegőbe; a II-ban a totálreflexió miatt a poloska a vízfelületet mint tükröző síkot látja; a III-ban pedig a rendes vízi környezetét figyelheti meg. A hanyattúszóra jellemző, hogy testtartása nagyon állandó, a test hossz tengelye 30°-os szöget zár be a vízfelülettel, feje a merev, összetett szemekkel csak kismértékben mozgatható. Ebből következően az előbb említett optikai zónákhoz a szem egyes zónáit rendelhetjük; egy adott zónát mindig ugyanazzal a szemrégióval figyel az állat. Ily módon a *Notonecta* szeme optikai környezetének megfelelően zónás komplex szem. Az egyes szemzónákbeli kúpszerű elemi szemalkotók (ún. ommatidiumok) a feladatuknak megfelelő szerkezetűek és érzékenységek.

A szemgeometria további különlegesége abból a szükségletből adódik, hogy

a szemnek nemcsak a vízben, hanem a levegőben mint kisebb törésmutatójú közegben is éles képet adóknak kell lennie, mivel a hanyattúszó kétélű. Ezt úgy éri el a poloska, hogy szemlencséjének (corneájának) külső felülete csaknem sík és az ommatidiumtengelyre merőleges. A képalakításban csak azok a sugarak vesznek részt, amelyek közel párhuzamosak a cornea optikai tengelyével (paraxiálisak), mert a többi fénysugár a corneát övező pigmentrétegben elnyelődik. Ezért a rovar optikai leképezőrendszerének fókuszpontja alig változik a vízből a levegőbe (vagy fordítva) való átmenetkor, mivel a képalakító sugarak csaknem merőlegesek a cornea külső felületére, így azok alig szenvednek törést. A fókusz távolság alig függ a cornea előtti közeg törésmutatójától.

Ha a hanyattúszó ommatidiumainak cornealencséje szimpla plán-konvex lenne, akkor nagy szférikus aberrációval rendelkezne. A lencsehibák tárgyalásánál nem hangsúlyoztuk, hogy egy plán-konvex lencse gömbi hibája különösen akkor nagy, ha a lencse sík oldala fordul a tárgy felé; márpedig a *Notonecta*-nál éppen ez a helyzet. A 4. ábra a hanyattúszó egy ommatidiumát mutatja. Látható, hogy a cornea nem egyetlen homogén tagból áll. Egy vékony, harang alakú fénytörő zóna – melyben a törésmutató folytonosan változik – választ el két különböző törésmutatójú homogén részt. A rovar ezzel az aszférikus réteggel biztosítja, hogy a cornealencséjének ne legyen szférikus aberrációja a képalakításban részt vevő paraxiális sugármenetre. A szemlencse fókuszpontja a kristálykúp csúcspontjára esik, ahol az ún. rhabdom kezdődik, amivel a rovar a fényt érzékeli.

A *Notonecta* élettéré a zavaros, állott, fitoplanktonnal telített pocsolyák, kisebb vizetek, ahol észrevétlenül beleolvadva a víz sárgászöld színébe, várhatja áldozatait. Ilyen környezetben a fényszóródás miatt viszonylag kis intenzitású fény esik csak az egyes szemlencsére. Ezért a poloskának létszükséglete, hogy corneái ezt a kevés fényt egy pontba (a rhabdomra) tudják koncentrálni. Ez a fókuszálás nem valószínűleg meg, ha nagy lenne a cornealencse szférikus aberrációja.

A hanyattúszó környezethez való alkalmazkodásának további érdekes momentuma, hogy a rhabdom érzékelő pigmentjeinek 560 nm-es fényhullámhosszon van abszorpciós maximuma; erre a hullámhosszra a legérzékenyebb tehát a *Notonecta* szeme. A zavaros, fitoplanktonnal telített vízben a nappali fény szóródik. Ha a szóródott fény intenzitását a hullámhossz függvényében ábrázoljuk, a maximum 560 nm-nél adódik. Ez a pont meg egyezik a hanyattúszó rhabdomja érzékenységi maximumhelyével. Mivel a *Notonecta* élettérében az említett fényszóródás miatt a megvilágítás intenzitásának egy maximuma van és a hanyatt-

űszó érzéksejtjei éppen erre érzékenyek leginkább, ezért a poloska számára szinte monokromatikusnak tűnnek a vízbeli fényviszonyok. Ezért a poloska nem érzékeli corneájának kis színű hibáját.

A 400–500 millió évvel ezelőtt kipusztult háromkaréjú ósrákok (trilobiták) egyes fajainak cornealencséje a Notonectához volt hasonló. Egy speciális negyedrendű felület választott el két homogén, különböző törésmutatójú lencsetagot. Elméleti számításokkal igazolni lehet, hogy e trilobiták cornealencséjének szintén nem volt szférikus aberrációja; a korrekciót a negyedrendű felület szolgáltatta. Ezek a trilobiták a tengerfenéken, zavaros vízben, rossz megvilágítású környezetben éltek, vagy szürkületkor, illetve éjszaka aktivizálódó állatok voltak. Ezért létszükséglet volt számukra, hogy a cornealencsére eső gyér fény egy pontba fókuszálódjon. A szférikus aberráció kiküszöbölése biztosította corneájuk jó fénygyűjtő és koncentráló képességét. A víz szelektív fényabszorpciója miatt a tengerben már viszonylag kis mélységben is szinte monokromatikus a megvilágítás, ezért a trilobiták szférikus aberrációtól mentes corneája egyben kromatikus aberrációtól mentes volt. Így vezet a fényviszonyokat illetően hasonló élettér két teljesen különböző faj szemének hasonló felépítésére.

A Notonecta szemlencséjének számítógépes tervezése

Tűzzük ki magunk elé azt a célt, hogy amit a biológiai evolúció néhány milliárd év alatt kikísérletezett, azt mi a geometriai optika törvényeinek alkalmazásával, személyi számítógépünk segítségével néhány óra alatt megtervezzük.

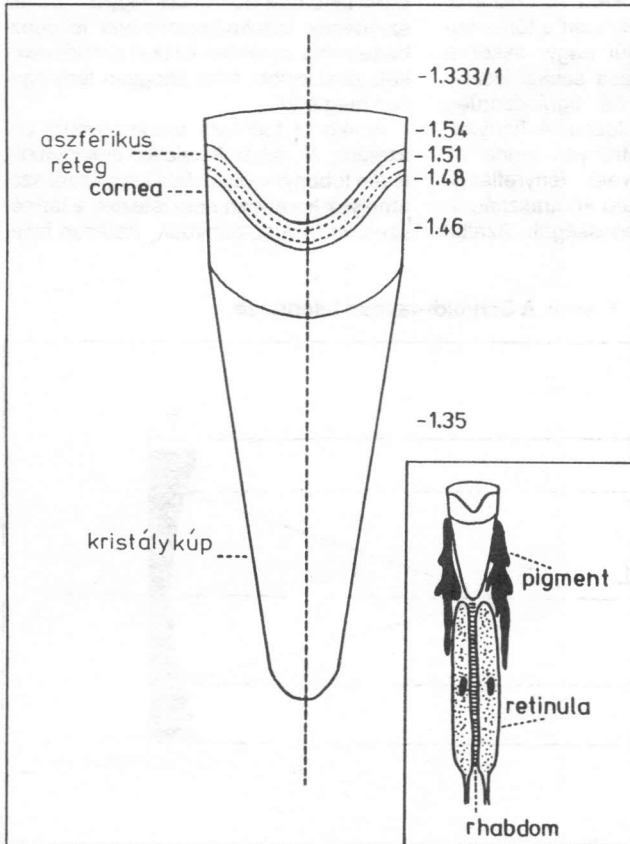
Vegyük a Notonecta optikai leképezőrendszerének 5. ábra szerinti henger-szimmetrikus modelljét. Az F_1 és F_3 felületek, az n_1, n_2, n_3, n_4 törésmutatók és az a, b, c, d, r, L geometriai paraméterek ismeretek. Keressük azt az F_2 felületet, mely úgy választja ketté az n_2 és n_3 törésmutatójú részeket, hogy a fókuszpont egzaktnál a kristálykúp csúcspontjára (a rhabdomra) essen bármely, az optikai tengellyel párhuzamos, a cornealencsén átmenő sugármenetre, vagyis paraxiális sugármenet esetén ne legyen szférikus aberrációja a cornealencsének.

Felírva a Snellius–Descartes-féle törvényt az egyes felületeken való törésre, egy bonyolult differenciálegyenletet kapunk a keresett F_2 felület metszetgörbéjére. Ezt az egyenletet megoldhatjuk személyi számítógépünkön is egy differenciálegyenlet-megoldó programmal, s megkaphatjuk a keresett aszférikus gör-

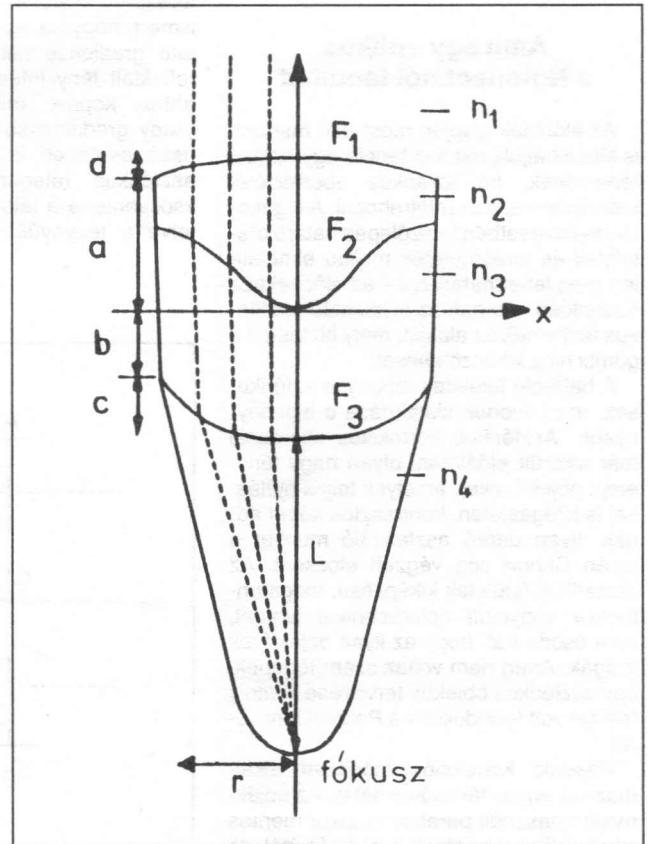
bét. A 6. ábrán a számítás végeredményeit láthatjuk különböző alakú (plán-parallel, trapezoid és plán-paraboloid) cornealencsék esetén. Látható, hogy különösen a plán-paraboloid cornea elméleti aszférikus görbéje nagyon hasonló a Notonecta valódi, a 4. ábrán látható aszférikus görbéjéhez. A plán-parallel és a trapezoid cornea esetében látszik, hogy az F_2 felület a cornea felső felületén szalad ki a lencséből, míg a plán-paraboloid corneánál oldalt történik meg ugyanez. Az F_2 felület nyilván csak az alatta levő cornea-tartományt képes korrigálni a gömbi hiba alól. Ebből következik, hogy az a maximális átmérő, amely átmérőjű cornealencsét az F_2 felület korrigálni képes a szférikus aberrációtól, a plán-paraboloid cornea esetén nagyobb, mint a másik két vizsgált esetben.

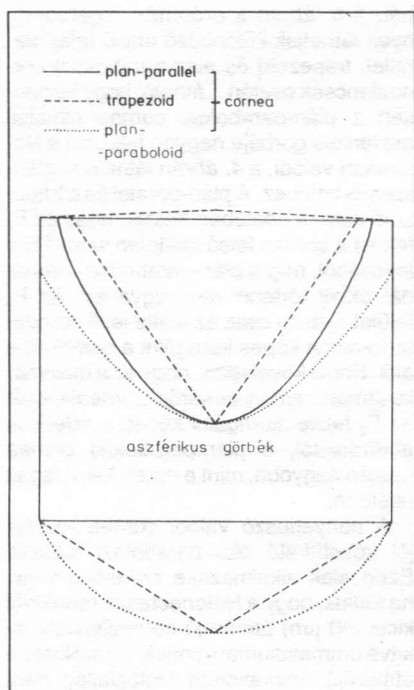
A hanyattűszó valódi cornealencséje jól közelíthető plán-paraboloid alakkal. Ezen alak alkalmazása érthetővé válik, ha tudjuk, hogy a Notonectának rendkívül kicsi ($40 \mu\text{m}$) átmérőjű cornealencségei, illetve ommatidiumai vannak. Ennél kisebb átmérőjű ommatidium biológiailag nem lenne működőképes, hiszen a zavaros környezetből így is csak kevés fény esik egy ommatidiumra. Ezért alkalmaz a hanyattűszó plán-paraboloid cornealencsét, mert így nagyobb átmérőjűek lehetnek corneái és így ommatidiumai is. Elértük

4. ábra. A Notonecta ommatiduma, optikai leképezőrendszere és annak törésmutató-eloszlása



5. ábra. A Notonecta optikai leképezőrendszerének modellje





6. ábra. Az elméletileg számított aszférikus görbék különböző alakú cornea-lencsék esetén

tehát kitűzött célunkat, visszakaptuk elméletileg azt, amit az evolúció oly hosszú ideig tökéletesített, kísérletezett ki.

Amit egy optikus a Notonectától tanulhat

Az előbbieken alapján most már magunk is kitalálhatjuk, mit kell tennie egy optikai tervezőnek, ha szférikus aberrációtól mentes lencsét akar létrehozni. A legáltalánosabb esetben tetszőleges határolófelületek és törésmutatók mellett elméletileg meg lehet határozni – az előzőekhez hasonlóan – annak az elválasztó aszférikus felületnek az alakját, mely biztosítja a gömbi hiba kiküszöbölését.

A határoló felületek többnyire szférikusak, mert ilyenek kialakítása a legkönnyebb. Aszférikus korrekciós eljárással már sikerült előállítani olyan nagy fényerejű objektíveket, amelyek teljes nyílásnál is kifogástalan, kontrasztos képet adnak. Ilyen úttörő aszferizáló munkát a japán Canon cég végzett elsőként. Az aszférikus felületek kiképzése, megmunkálása bonyolult optotechnikai feladat, nem csoda hát, hogy az ilyen objektívek drágák. Amíg nem voltak számítógépek, egy aszférikus objektív tervezése komoly feladat volt (gondoljunk a Petzval-lencsére).

Hasonló korrekciós módszert alkalmaznak egyes távcsöveknél is. Az objektívként használt paraboloid tükör mentes a kromatikus és szférikus aberrációtól, de

a kómahiba továbbra is fellép. Ezért csak kis térszögbe eső égitestekről lehet kifogástalan képet kapni. Ezt a hátrányt az ún. Schmidt-távcsövel lehet kiküszöbölni, amit 7. ábránk mutat. A T homorú tükör azáltal, hogy az O görbületi középpontján átmenő AB síkban egy vékony, negyedrendű felülettel határolt L korrekciós lemezt helyeznek el, szinte teljesen tökéletes, kómahibától mentes képet ad a T tükörrel koncentrikus G gömbfelületen (illetve az e mentén meggörbített fotoemulziós rétegen). Ezen negyedrendű felület alakját az előzőekhez hasonlóan lehet meghatározni. A Schmidt-kamerával, illetve válfajaival nagy látótér mellett nagy fényerő érhető el. Az első Schmidt-távcsövet 1931-ben készítették.

A Notonecta egy másik fontos trükkre is megtaníthat bennünket. A többtagú lencserendszereknél a határfelületeken, ahol a törésmutató ugrásszerűen változik, a fényvisszaverődés komoly gondokat okoz, ugyanis a fényképeken reflexiók miatt szellemképek keletkeznek (reflexhiba), csökken a kontraszt, a kép elmosódott lesz. A lencsetagok száma a varioobjektíveknél 12–15 is lehet. Megfelelő korrekció nélkül ezeknél igen felerősödne a reflexhiba. A hanyattúszó cornealencséje azonban megmutatja az utat, ahogyan ez a hiba kiküszöbölhető. A 4. ábrán láthatjuk, hogy a Notonecta aszférikus rétege nem éles határatmenet, hanem a törésmutató fokozatosan változik egy viszonylag vékony sávban az egyik lencsetag törésmutatójáról a másikéra. Az optikából ismert, hogy ha egy felületen a törésmutató gradiense nem túl nagy, akkor a reflektált fény intenzitása sokkal kisebb ahhoz képest, mint ha ugrásszerűen (nagy gradienssel) változna. A hanyattúszó esetében is hátrányos lenne az aszférikus rétegen való fényreflexió, csökkentené a látott kép kontrasztját, illetve a fénygyűjtő képességet. Azáltal

azonban, hogy ebben a rétegben folytonosan, viszonylag kis gradienssel változik a törésmutató, jelentősen csökken a reflexió, élesebb lesz a leképezés, jobb a fénygyűjtő képesség.

Valahogyan utánozni kell a hanyattúszó folytonosan változó törésmutatóját a lencserendszerek határfelületeinél. Ezt megtehetjük az ún. sokréteges reflexmentesítéssel, aminek lényege, hogy sok, egymástól csak kis mértékben különböző törésmutatójú réteget gőzölögtetnek fel a szóban forgó határfelületre; a lencsetagok összeragasztására pedig különleges gitteket, ragasztókat használnak, amelyek törésmutatója a lencsetagoké közé esik. Az ilyen többréteges bevonat fokozatos törésmutató-átmenetet biztosít, hatására csökken a reflexió, elmaradnak a szellemképek, nő az objektív fényáteresztő képessége, nő a kontraszt.

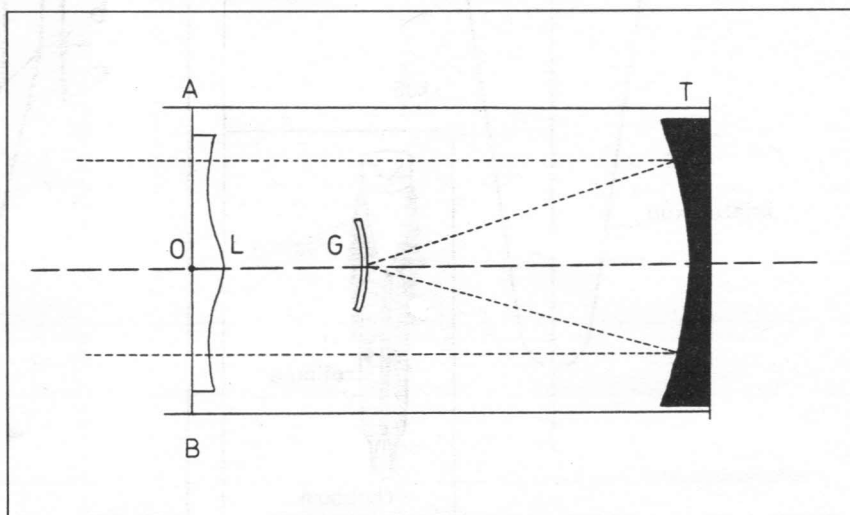
Utóhang

Az optikai fejlesztőmérnökök, kutatók nem a Notonecta vagy a trilobiták szemének tanulmányozásával jöttek rá az aszférikus korrekciós módszerre, illetve a sokréteges reflexmentesítésre. A valóságban attól teljesen függetlenül, évtizedek során szívós kutató-fejlesztő munkával hozták létre ezekkel az eljárásokkal a mai csúcsoptikákat.

A természetet maga is már jóval az ember előtt kifejlesztette, kikísérletezte a szóban forgó korrekciós módszereket. Ezért például a Notonecta vagy a trilobiták szemének tanulmányozásával felfedezhette volna az ember ezeket a módszereket; jóval előbb, mint ahogyan ténylegesen megtette.

Amikor a technika eredményeiről beszélünk, általában feltalálást emlegetünk, lévén többnyire olyan találmányokról szó, amelyek korábban nem léteztek a természetben. A tudományban általában felfe-

7. ábra. A Schmidt-távcső felépítése



dezek történnek, mivel a természetben meglevő, működő folyamatok, törvényszerűségek megismeréséről, az emberiség számára való tudatosulásról van szó. A cikkben vázolt korrekciós módszerek esetében az optikusok teljesen maguktól találták ki és hozták létre a korábban nem létező aszférikus felületű, sokréteges lencsüket, itt tehát feltalálásról van szó. Mivel azonban a természet már jóval korábban produkált ilyesmit, ezért az ember akár fel is fedezhette volna azt.

A bionikára – melynek egyik ága a biooptika – igen jellemző ez a feltalálás-felfedezés kettősség. Számos olyan találmánya van az embernek, amely szigorúan véve felfedezés, hiszen az élővilág tanulmányozása során jutottak az illető öltre s utánozták le a természetet; s ugyancsak sok olyan tényleges találmány létezik, melyről utóbb kiderült, akár jóval korábban is felfedezhette volna az ember. ■

A főbb lencsehibákról röviden

Gömbi hiba (szférikus aberráció): Ha a lencsét határoló felületek szférikusak, a lencse külső zónáinak fókusz távolsága kisebb, mint a belsőké, így nem létezik egzakt fókuszpont. Ez a hiba rekeszeléssel, több lencse megfelelő kombinálásával, speciális határfelületekkel, ill. törésmutató-eloszlásokkal megszüntethető, de csak egy adott tárgytávolságra és viszonylag keskeny lencsezónákra.

Színi hiba (kromatikus aberráció): A lencse anyagának törésmutatója és így a lencse fókusz távolsága hullámhosszfüggő (diszperzió). Monokromatikus fényben a diszperzióknak nincs jelentősége. Általában, nem monokromatikus fény esetén n számú hullámhosszra n -tagú lencserendszerrel teljesen ki lehet küszöbölni ezt a hibát.

Reflexhiba: Az optikai elemeket rögzítő segéd tartókról reflektált fény gyakran a fóképtől jóval kisebb fényerejű, kissé eltolódott mellékképeket okoz. A tartók matt fekete festékkel való bevonásával csökkenthető ez a hiba. A reflexhiba másik megnyilvánulási formája, hogy a lencse határfelületén is reflektálódik a fény, ami csökkenti az áteresztőképességet és szintén zavaró, eltolódott mellékképek megjelenéséhez vezet. Ez különösen többtagú lencserendezéseknél hátrányos a sok határfelület miatt. A reflektált fény intenzitása a lencsék határfelületeinek speciális rétegekkel való bevonásával csökkenthető.

Asztigmatizmus: Ferdén beeső fénynyaláb esetén a lencsén megtört nyaláb sehol sem húzódik össze ponttá, hanem egy helyen viszonylag éles vonallá, távolabb pedig erre merőleges másik vonallá. Az ilyen fókuszvonalak felléptekor beszélünk asztigmatizmusról.

Kóma (üstökös) hiba: A főtengelytől távoli tárgypontból kiinduló, ferde és nagy nyílású sugárnyaláb lencsén való áthaladása után pontszerű kép helyett üstökös

kómához (csóvához) hasonló fényfolt mutatkozik. A szélső sugarak rekeszelésével csökkenthető ez a hiba.

Képgömbület (képződőhajlás): A lencse főtengelyére merőleges, nagy, sík tárgy képe gömbült felületen keletkezik ekkor. Az asztigmatizmussal szorosan összefüggő jelenség.

Torzítás: Akkor jön létre, ha a lencse oldalnagyítása a kép különböző részein eltérő. Ha az oldalnagyítás a széleken kisebb, ill. nagyobb, mint középen, hordó, ill. párna alakú torzításról beszélünk.

Diffrakció: Az optikai elemeket rögzítő segéd tartókon elhajló fény gyakran éles, fényerős diffrakciós vonalak formájában zavarja a főképet. A fényút, ill. a tartók elrendezésének megfelelő kialakításával csökkenthető ez a hiba.

Hullámhosszfüggő áteresztés: A lencse anyagának abszorpciója és így áteresztőképessége hullámhosszfüggő. A közönséges üveg pl. az ultraibolya sugarakat nagymértékben elnyeli (ezért csak nehezen lehetne lebarolni nyáron egy üvegházban); a kőszó kristály kiválóan áttereszt az infravörös sugarakat (ezért az infrakamerák lencséinek jó anyagául szolgál).

Műszeres polarizáció: A lencsét alkotó anyag megváltoztatja a fény polarizációját, ami nagyon zavaró a polarizációt megcélzó méréseknél.

x

A TERMÉSZET VILÁGA ARCKÉPCSARNOKA



PETZVÁL JÓZSEF
(1807–1891)

Magyar matematikus és mérnök, a fényképezés úttörője, 1840-ben megszerkesztette a nagy fényerejű akromatikus fotoobjektív lencserendszert, mely a megvilágítási időt is tetemesen lecsökkentette