zetformáló 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 optikára volt és van szükségük. A számos lehetséges leképezési hiba kiküszöböléséért szüntelen harc folyt és folyik. Századunk elejére az optika tudománya, valamint az optikai üveggyártás 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 számításhoz még egy szakasz válogatott katonaírnokot vett igénybe. Manapság ezt a munkát számítógépek végzik.

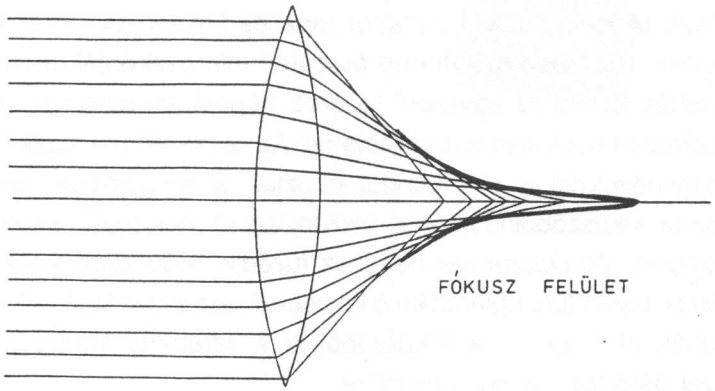
A lencsetökéletesítés előbb vázolt emberi-technikai módjától egy egészen eltérő módja is megvalósult. A biológiai evolúció során, több milliárd év alatt fejlődött ki az állatok, köztük a rovarok látórendszere; volt idő a szelekcióra, a viszonylag hibamentes optikai leképezőapparátusok „kikísérletezésére".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

Miután röviden áttekintjük az optikai lencsék tökéletesítéséért folytatott, híres kutatók nevével fémjelzett fejlesztőmunka történetét, valamint a főbb lencsehibákat, megvizsgáljuk egy vízirovar szemét. Látni fogjuk, hogy bár az ember már számítógépes tervezéssel részben megvalósította azt, amit a biológiai evolúció a rendelkezésére álló igen hosszú idő alatt, azért maradt még mit eltanulni, ellesni a természettől.

4.2. A geometriai optikai eszközök rövid története

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

Szférikus aberrácló esetén a lencse külső zónáinak fókusztávolsága 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. diakausztika), a 4.1. ábrán látható módon.



4. 1. ábra

A szemüveget Európában valószínűleg Firenzében, az 1300-as évek elején használták először. 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 lupeja) 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 empíria alapján csiszolták egytagú lencséiket. 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 össze-

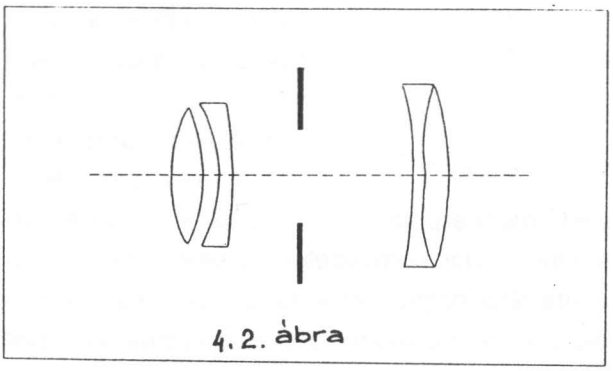
tett lencserendszerekkel küszöbölhetők ki, amelyek tervezése azonban bonyolult számításokat igényel. A képalkotás geometriai optikai törvényeit Gauss és Newton fogalmazta meg először egzakt formában.

A lencsés távcső és a mikroszkóp a lupehoz 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 *Sidereus Nuntius* című művében számolt be.) Az összetett mikroszkóp feltalálóinak az ugyancsak Middelburgi két *Jansent* (apa és fia) tartják, 1600 körülről. *Robert Hooke* 1665-ben mutatta be összetett mikroszkópját, melyben számos tökéletesítés történt az egyszerű lupehoz 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) lencséket, 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 elkönyvelhető korszak a XIX. sz. közepén zárult le, olyan elődökkel, mint *Newton, Huygens, Descartes, Euler, Abbe.* Euler elméleti meggondolásai alapján *Hall* 1753-ban, Dolland pedig 1757-ben a színi hibát (kromatikus aberrációt) részben kiküszöbölő (ún. akromatikus) lencséjű távcsövet készített, 1759-ben pedig megvalósították az első akromatikus mikroszkópobjektívet. 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 növekedik, így vörös fényre a fókusztávolság nagyobb, s fokozatosan csökken az ibolya felé. A színi hibát több lencse kombinációjával lehet csökkenteni. Ha N számú hullámhosszra kívánunk korrigálni, N-tagú lecserendszerre van szükség. A többi szín keveredése a képet kis mértékben színessé teszi.

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

Mi sem bizonyítja jobban az optikai rendszerek fejlesztésében a kutató mérnök (mint az empíria) és a fizikus (mint az elmélet) képviselőjének szoros együttműködési igényét, mint az, hogy 1884-ben a műszerész *Carl Zeiss,* a fizikus *Abbe* és az üveggyáros *Schott* együttműködése nyomán létrejött az azóta világhíressé vált Zeiss cég, mely nagy lendületet adott az optikák tökéletesítésének, fejlődésének. A fényképezés története is szorosan összefügg az optikai lencsék tökéletesedési folyamatával. *Daguerre* 1838-ban szabadalmaztatta az első használható fotográfiai eljárást. Az akkori fotolemezek azonban olyan érzéketlenek voltak még, hogy több perces 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 fényképészek. A híres *Petzval*-lencse egy ragasztott kettős tagból és két másik egyedi tagból áll a 4.2. ábra szerinti módon.



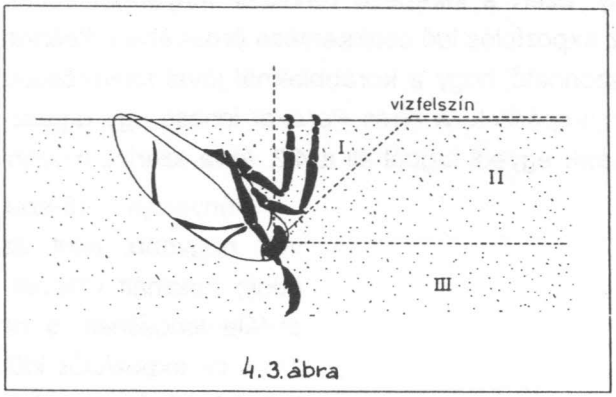
4.2. ábra

Fényereje 16-szor volt nagyobb, mint az addig használt Chevalier-féle lencsének, s ez 1/4 s-os expozíciós időt tett lehetővé. Az első, optikailag szinte hibamentes többtagú lencsék a múlt század végén jelentek meg. A lencsés távcsövek a XVIII. sz. végén élték reneszánszukat, miután Dolland létrehozta az akroma-

tikus objektíveket. De még így is számos hátrányuk volt a tükrösökével szemben, ezért a tükrös távcsövek napjainkra kiszorították a Galilei- és Kepler-féle lencsés távcsöveket.

A technikai optika leképezési hibák korrigálásával jelentős eredményeket ért el, de minden korrigált lencse és tükör 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, trükkel is szolgálhat egy optikai tervezőnek.

4.3. A Notonecta szeme



4.3. ábra

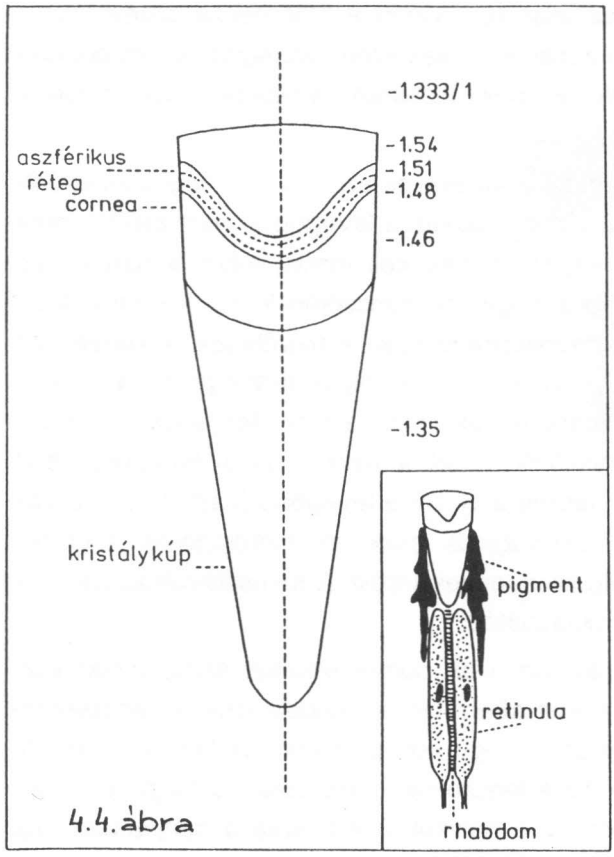
A *Notonecta* szeme tökéletesen alkalmazkodott a vízi élethez. A 4.3. ábrán látható a rovar szokásos prédaleső vagy nyugalmi testtartása. Az állat optikai környezetét ebben az esetben 3 különböző zónára oszthatjuk. Az I. zónában a *Notonecta* kiláthat a vízfelszín fölé, a levegőbe; a II-ban a totálreflexió 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 hossztengelye *30°*-os szöget zár be a vízfelülettel, feje a merev összetett szemekkel csak kis mértékben mozgatható. Ebből következően az előbb említett optikai zónákhoz a szem egyes zónáit rendelhetjük; egy adott zónát mindig ugyanaz-

zal a szemrégióval figyel az állat. Íly módon a *Notonecta* szeme optikai környezetének megfelelően zónás komplex szem. Az egyes szemzónákbeli kúpszerű elemi szemalkotók (ún. ommatidiumok) a feladatuknak megfelelő szerkezetűek és érzékenységűek.

A szemgeometria további különlegessége abból a szükségletből adódik, hogy a szemnek nemcsak a vízben, hanem a levegőben, mint kisebb törésmutatójú közegben is éles képet adónak kell lennie, mivel a hanyattúszó kétéltű. Ezt úgy éri el a poloska, hogy szemlencséjének (corneájának) külső felülete csaknem sík és az ommatidiumtengelyre merőleges. A képalkotásban 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 leképező rendszerének fókuszpontja alig változik a vízből a levegőbe (vagy fordítva) való átmenetkor, mivel a képalkotó sugarak csaknem merőlegesek a cornea külső felületére, így azok alig szenvednek törést. A fókusztávolság alig függ a cornea előtti közeg törésmutatójától.

Ha a hanyattúszó ommatidiumainak cornealencséje szimpla plan-konvex lenne, akkor nagy szférikus aberrációval rendelkezne. A lencsehibák tárgyalásánál nem hangsúlyoztuk, hogy egy plan-konvex lencse gömbi hibája különösen akkor nagy, ha a lencse sík oldala fordul a tárgy felé; márpedig a *Notonectá*nál éppen ez a helyzet. A 4.4. ábra a hanyattúszó egy ommatidiumát mutatja. Látható, hogy a cornea nem egyetlen homogén tagból áll. Egy vékony harangalakú fénytörő zóna – melyben a törésmutató folytonosan változik – választ el két különböző törésmutatójú homogén részt. A rovar ezzel az aszférikus réteggel biztosítja, hogy a cornealencsének ne legyen szférikus aberrációja a képalkotásban résztvevő paraxiális sugármenetre. A szemlencse fókuszpontja a kristálykúp csúcspontjára esik, ahol az ún. rhabdom kezdődik, amivel a rovar a fényt érzékeli.

A *Notonecta* élettere a zavaros, állott, fitoplanktonnal telített pocsolyák, kisebb vizek, ahol észrevétlenül beleolvadva a víz sárgászöld színébe, várhatja áldozatait. Ilyen környezetben a fényszóródás miatt viszonylag kis intenzitású fény esik csak az egyes szemlencsékre. Ezért a poloskának létszükséglete, hogy corneái ezt a kevés fényt egy pontba (a rhabdomra) tud-



4.4. ábra

ják koncentrálni. Ez a fókuszálás nem valósulhatna meg, ha nagy lenne a cornealencse szférikus aberrációja.

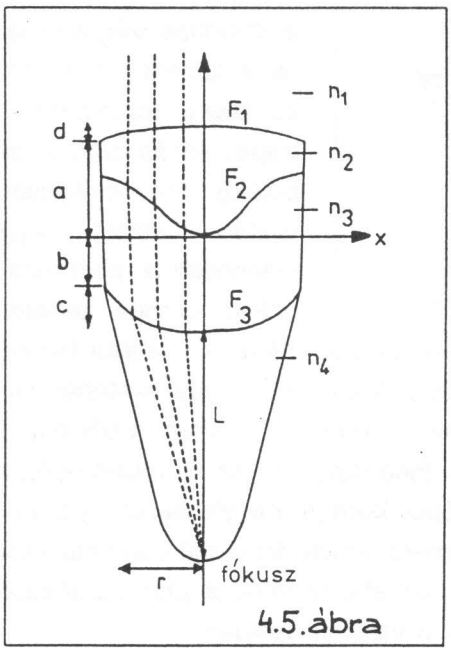
A hanyattúszó környezethez való alkalmazkodásának további érdekes momentuma, hogy a rhabdom érzékelő pigmentjeinek 560 nm-es fényhullámhosszon van abszorpciós maximuma; erre a hullámhosszra a legérzékenyebb tehát a *Notonecta* szeme. A zavaros, fitoplanktonnal telített vízben a nappali fény szóródik. Ha a szóródott fény intenzitását a hullámhossz függvényében ábrázoljuk, a maximum *560 nm*-nél adódik. Ez pont megegyezik a hanyattúszó rhabdomja érzékenységének maximumhelyével. Mivel a *Notonecta* életterében az említett fényszóródás miatt a megvilágítás intenzitásának egy maximuma van, és a hanyattúszó érzéksejtjei éppen erre érzékenyek leginkább, ezért a poloska számára szinte monokromatikusnak tűnnek a vízbeli fényviszonyok. Ezért a poloska nem érzékeli corneájának kis színi hibáját.

A 400-500 millió évvel ezelőtt kipusztult háromkaréjú ősrákok *(trilobiták)* egyes fajainak cornealencséje a *Notonectá*éhoz volt hasonló. Egy speciális negyedrendű felület választott el két homogén, különböző törésmutatójú lencsetagot. Elméleti számításokkal igazolni lehet, hogy e *trilobiták* cor-

nealencséjének 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 cornealencséikre eső gyér fény egy pontban fókuszálódjon. A szférikus aberráció kiküszöbölése biztosította corneájuk jó fénygyűjtő 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 is volt. Így vezet a fényviszonyokat illetően hasonló élettér két teljesen különböző faj szemének hasonló felépítésére.

4.3.1. A Notonecta szemlencséjének számítógépes tervezése

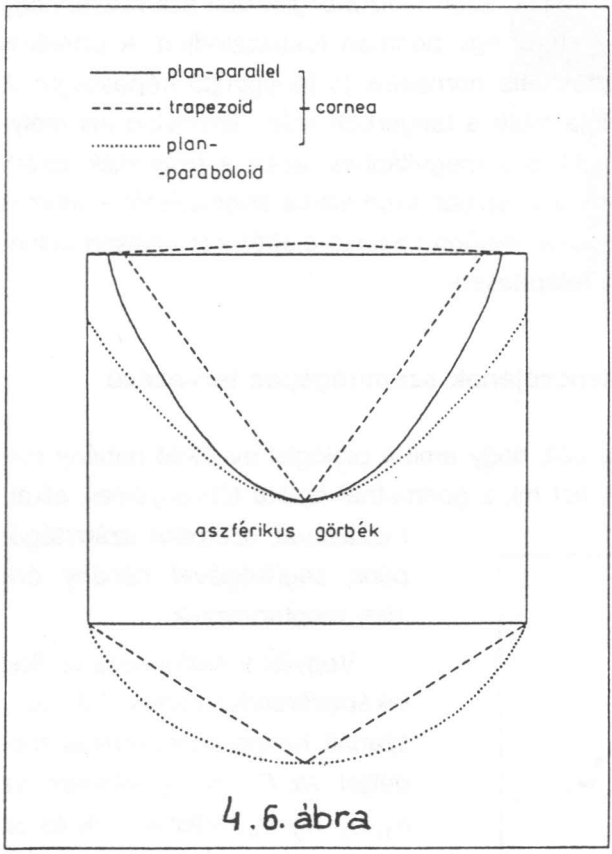
Tűzzük ki magunk elé azt a célt, hogy amit a biológiai evolúció néhány milliárd év alatt kikísérletezett, azt mi, a geometriai optika törvényeinek alkalmazásával, személyi számítógépünk segítségével néhány óra alatt megtervezzük.



4.5.ábra

Vegyük a *Notonecta* optikai leképezőrendszerének 4.5. ábra szerinti hengerszimmetrikus 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 ismertek. Keressük azt az F_2 felületet, mely úgy választja ketté az n_2 és n_3 törésmutatójú részeket, hogy a fókuszpont egzaktul 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.



4.6. ábra

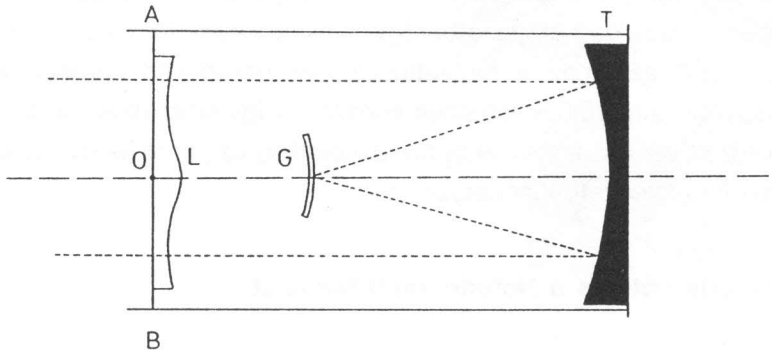
Felírva a *Snellius-Descartes*-féle törvényt, az egyes felületeken való törésre, egy bonyolult differenciálegyenletet kapunk a keresett F_2 felület metszetgörbéjére. Ezt az egyenletet megoldhatjuk személyi számítógépünkön is egy differenciálegyenlet megoldó programmal, s megkaphatjuk a keresett aszférikus görbét. A 4.6. ábrán a számítás végeredményeit láthatjuk különböző alakú (plan-paralell, trapézoid és plan-paraboloid) cornealencsék esetén. Látható, hogy különösen a plan-paraboloid cornea elméleti aszférikus görbéje nagyon hasonló a *Notonecta* valódi, 4.4. ábrán látható aszférikus görbéjéhez. A plan-paralell és a trapézoid cornea esetében látszik, hogy az F_2 felület a cornea felső felületén szalad ki a lencséből, míg a plan-paraboloid corneánál oldalt történik meg ugyanez. Az F_2 felület nyilván csak az alatta lévő corneatartományt 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 plan-paraboloid cornea esetén nagyobb, mint a másik két vizsgált esetben.

A hanyattúszó valódi cornealencséje jól közelíthető plan-paraboloid alakkal. Ezen alak alkalmazása érthetővé válik, ha tudjuk, hogy a *Notonectá*nak rendkívül kicsi *(40 μm)* átmérőjű cornealencséi, 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 hanyattúszó plan-paraboloid cornealencsét, mert így nagyobb átmérőjűek lehetnek corneái és így ommatidiumai is. Elértük tehát kitűzött célunkat, visszakaptuk elméletileg azt, amit az evolúció oly hosszú ideig tökéletesített, kísérletezett ki.

4.3.2. Amit egy optikus a Notonectától tanulhat

Az előbbiek 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 objektívokat, amelyek teljes nyílásnál is kifogástalan, kontrasztos képet adnak. Ilyen úttörő aszférizáló 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*-távcsővel lehet kiküszöbölni, amit 4.7. 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



4.7. ábra

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 4.4. ábrán láthatjuk, hogy a *Notonecta* aszférikus rétege nem éles határátmenet, 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, mintha ugrásszerűen (nagy gradienssel) változna. A hanyattúszó

esetében is hátrányos lenne az aszférikus rétegen való fényreflexió, csökkentené a látott kép kontrasztját, illetve a fénygyűjtőképességet. Azáltal azonban, hogy ebben a rétegben folytonosan, viszonylag kis gradienssel változik a törésmutató, jelentősen lecsökken a reflexió, élesebb lesz a leképezés, jobb a fénygyűjtőképesség.

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 szóbanforgó határfelületre; a lencsetagok összeragasztására pedig különleges gitteket, ragasztókat használnak, amelyek törésmutatója a lencsetagoké közé esik. Az ilyen többréteges bevonat fokozatos törésmutatóátmenetet biztosít; hatására csökken a reflexió, elmaradnak a szellemképek, nő az objektív fényáteresztő képessége, nő a kontraszt.

5. Reológiai érdekességek, avagy a kemény aszfaltot áttörő gyenge fűszál

5.1. Bevezetés

Napjaink nem éppen kellemes, sajnos elég gyakori zajszennyezője az útépítők légsűrítős betontörője. Kinek útja elvezet egy ilyen útfelbontási munkálat mellett, megszaporázza lépteit, s igyekszik mihamarabb kívülkerülni a betontörő hatóköréből. Azt azonban mindenki megfigyeli, mi erőfeszítés árán szakíthat ki gép és ember akár egy kis darabot is az út vagy járda aszfalt testéből, hogy izzad, rázkódik a gépkezelő, amint szapora ütéseket mérő gépének kemény hegyét az aszfaltnak feszíti. Bizony kemény egy munka. Tovább menve, elcsendesülvén a zaj, el is felejthetnénk az egészet, de ekkor megpillantunk a járda szélén egy kis púpot, amott egy másikat, de ez már „kifakadt", egy harmadikat, mely szétrepedt dudorból zöld növényke (fűszál, tarack) kandikál ki. Végre elérte a felszínt, puha testével legyőzte, átfúrta azt az anyagot, ami az előbb alig akart feltörni a kemény acélhegy