

# GÖMBIHI BAMENTES EGY- ÉS KÉTFÓKUSZÚSÁG: A TRILOBITALENCSEK MAGJÁNAK OPTIKAI SZEREPE – I. RÉSZ

Egri Ádám, Horváth Gábor  
ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

A háromkaréjos ósrákok (trilobiták) kültakarója testszövetbe ágyazódott kalcitból állt [1]. A trilobiták túlnyomó része összetett szemekkel rendelkezett, amelyek lencsési ugyancsak kalcitot tartalmaztak [2–5]. Az első, szemmel rendelkező trilobiták 520 millió évvel ezelőtt jelentek meg a kambriumban, és nagyjából 220 millió éve haltak ki a perm-triász átmenet idején. Csak a megkövesedett bőrszövet (kutikula) és a szemlencsék őrződtek meg, a fotoreceptorok és minden egyéb belső szerv nyomtalanul lebomlott az évszázmilliók alatt. A trilobitaszemek három fajtáját különböztetjük meg: holochroális, schizochroális és abatochroális [6].

A holochroális szem a legősibb a három közül. Ezt sok apró, 10-20  $\mu\text{m}$  átmérőjű, egymás mellett szorosan elhelyezkedő, hatszög vagy kör keresztmetszetű, domború felső és alsó törőfelületű kalcitlencse alkotja. Mivel a kalcit kettőtörő kristály, ezért a belőle álló lencse két képet alkot a lencsétől két különböző távolságban. Egyedül a kristálytani  $c$  tengely mentén haladó fénysugár nem válik ketté a kalciton való áthaladáskor. Minden trilobitafaj szemlencséjében a kristálytani  $c$  tengely megegyezett az optikai tengellyel, így a kettőtörésből adódó képalkotási probléma minimális volt. Bizonyos trilobitafajok holochroális szeme a fénygazdag környezethez alkalmazkodott, míg másoké a fényszegény viszonyokhoz [7]. A vese alakú holochroális összetett szemmel rendelkező trilobiták inkább a gyéribb fényintenzitásokhoz alkalmazkodtak, és egészen a perm végéig jelen voltak a Földön.

A schizochroális összetett trilobitaszemek egészen nagyok voltak és viszonylag kevés (maximum pár száz) lencsét tartalmaztak [6]. Az alul és felül domború schizochroális lencsék 100-350  $\mu\text{m}$ -es mérete jóval nagyobb volt a holochroális lencsékénél. A schizochroális lencsék ritkán pakolva helyezkedtek el, jól elkülönülve egymástól [6]. Általában két fő elemük volt: a kalcitból álló felső lencsetag és az alsó lencsetag, ami valamilyen szerves anyagból épült föl [6]. Például a *Crozonaspis struvei* trilobitafaj alsó és felső lencsetagját elválasztó határfelület hullámos volt. E Huygens-i hullámos törőfelület szerepe az volt, hogy kiküszöbölje a lencse gömbi hibáját [8–10]. Az alsó lencsetag  $n = 1,40$ - $1,53$  közepes törésmutatójának köszönhetően csökkentette a fénysugarak lencsén belüli visszaverődéseit, miközben a nagy törésmutatójú ( $n = 1,66$ ) kalcitból álló felső lencsetagból a kis törésmutatójú ( $n = 1,36$ ) testfolyadékba jutottak [9, 11].

A *Dalmanitina socialis* trilobita felső lencsetagjának alsó felülete közepén egy apró kitüremkedés volt, ami kétfókuszúságot kölcsönzött a lencsének [12]. Ezért e faj annak ellenére láthatott egyszerre élesen távoli és közeli tárgyakat, hogy a szemlencséje merev volt.

A *Phacops rana milleri* és *Eldredgeops rana rana* trilobiták alsó lencsetagjának közepe nagyon elvékonyodott, vagy teljesen hiányzott, továbbá a lencse közepében egy mag fordult elő, aminek anyaga az alsó lencsetagéhoz hasonlított [13]. Néhány más trilobitafaj szemlencséjében is voltak ilyen magok, de kevésbé markánsan. A schizochroális szemek holochroális ősből eredeztethetőek [14].

A schizochroális trilobitaszemeknek a ma élő állatok körében is léteznek megfelelői: például bizonyos rovarlárvák pontszemei (*stemma*) ugyancsak két lencsetagból állnak [15]. A schizochroális szemre különleg leginkább hasonlító szemmel a Strepsipterák rendjébe tartozó rovarok rendelkeznek. Szemlencséik az apró, összetett szemhez képest nagyok. Minden lencséjük alatt egy-egy retina található [16]. E feltűnő alaki hasonlóságból kifolyólag feltételezhető, hogy az egyes schizochroális trilobitalencsék alatt is 1000 vagy akár még több fotoreceptor alkotott önálló retinát [6, 14].

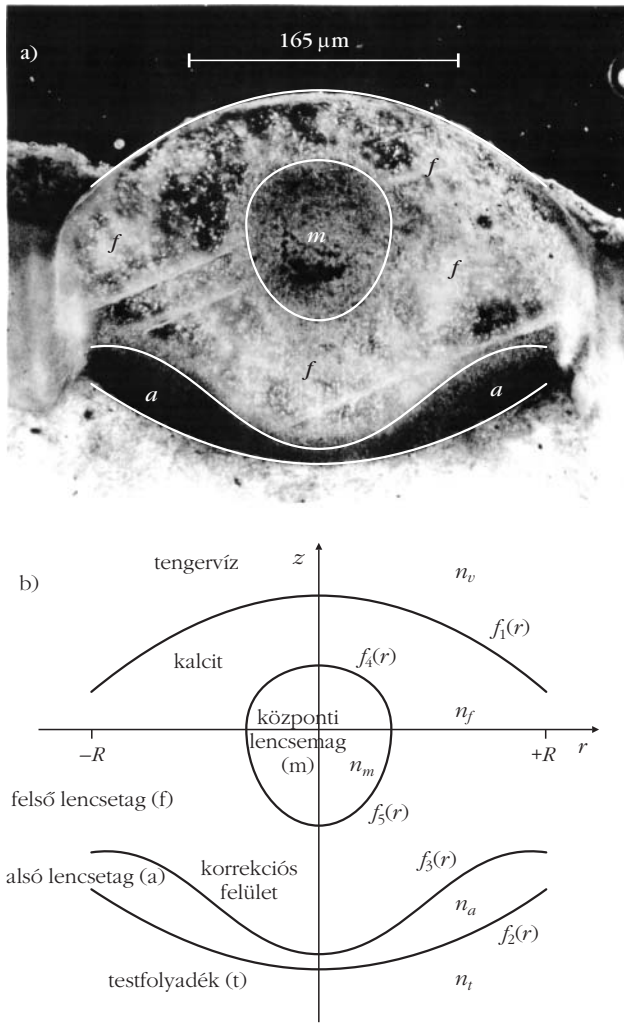
Az abatochroális trilobitaszem a schizochroális szemhez hasonló, de a lencsék között nincs kutikuláris elválasztó réteg, és a lencsék rendezetlenebbül helyezkednek el benne [17]. Az abatochroális szemű *Neocobboldia chinlinica* alsó lencsetagján volt egy apró dudor, ami a lencse kétfókuszúságához vezetett, így e trilobita is egyszerre láthatott élesen közelre és távolra. A trilobitaszemekről további érdekes részletek olvashatók [14] és [18]-ban.

A trilobitalencsék központi magjának elméletileg lehetett mechanikai szerepe is (például szilárdság növelése), bár ez nem valószínű, mivel maga a felső lencsetag, amely tartalmazta e rejtélyes magot, kalcitból állt, ami önmagában is elég erős anyag. A lencsemagnak inkább optikai szerepe lehetett. Úgy gondoljuk, hogy a lencsemag az egy- vagy kétfókuszúságot biztosította a gömbi hiba kiküszöbölése mellett. Cikkünkben e föltevést vizsgáljuk meg egy tipikus, maggal rendelkező trilobitalencsén végzett számítógépes sugárkövetéssel. Bemutatjuk az ezzel kapcsolatos eredményeinket [19] és megmutatjuk, hogy melyek azok a körülmények, amelyek esetén a lencse egy vagy két éles fókusszal rendelkezik.

## Vizsgálati módszerek

### A központi maggal rendelkező trilobitalencse alakja

A központi lencsemag homogénnek tűnő volta arra enged következtetni, hogy korábban is homogén lehetett [6]. A fosszilis maradványok szerint a megkövesedés során a lencsemag helyzete, mérete és alakja



1. ábra. (a) A szilur kori *Dalmanites* központi magot tartalmazó szemlencsájének főtengelybeli, optikai tengellyel párhuzamos metszete [8] 3. ábrája, 664. oldal). *m*: központi lencsemag; *f*: felső lencsetag; *a*: alsó lencsetag. (b) A *Dalmanites* szemlencsájének törőfelületeit leíró függvények.  $f_1(r)$ : külső (felső) lencsefelület;  $f_2(r)$ : belső (alsó) lencsefelület;  $f_3(r)$ : az alsó és felső lencsetag határfelülete;  $f_4(r)$ : a lencsemag felső felülete;  $f_5(r)$ : a lencsemag alsó felülete;  $R$ : a lencse sugara;  $n_v$ : a tengervíz törésmutatója;  $n_f$ : a felső lencsetag törésmutatója;  $n_a$ : az alsó lencsetag törésmutatója;  $n_m$ : a lencsemag törésmutatója;  $n_t$ : a testfolyadék törésmutatója;  $z$ : a lencse optikai tengelye, ami egyben a forgásszimmetria tengelye is.

nem változott [14]. A szilur kori *Dalmanites* trilobitafaj tipikus maggal rendelkező szemlencsáját vizsgáltuk (1.a ábra). A szemlencse optikai tengellyel párhuzamos főtengelymetszete [8]-ból származik. A legkisebb négyzetek módszerével a főtengelymetszetben a következő öt függvényt illesztettük a törőfelületekre az  $r$ - $z$  koordináta-rendszerben (1.b ábra):  $f_1(r)$  a külső lencsefelület,  $f_2(r)$  a belső lencsefelület,  $f_3(r)$  az alsó és felső lencsetag határfelülete,  $f_4(r)$  a központi lencsemag felső felülete,  $f_5(r)$  a mag alsó felülete, ahol  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ . Ez az öt függvény szolgáltatja a vizsgált lencse matematikai modelljét, ahol az optikai tengely maga a  $z$  tengely, ami egyben a forgásszimmetria tengelye is. Feltételeztük, hogy a külső lencsefelszín tengervízzel érintkezett (hiszen a trilobiták tengerben éltek), aminek törésmutatója  $n_v = 1,33$ , a belső lencse-

felület pedig az  $n_t = 1,36$  törésmutatójú testfolyadékkal. A kalcitból álló felső lencsetag törésmutatója  $n_f = 1,66$ . Az alsó lencsetag  $n_a$  és a lencsemag  $n_m$  törésmutatóját szabad paramétereknek vettük.

A szilur kori *Dalmanites* szemlencsáját leíró öt függvény alakja a következőnek adódott (1. ábra):

$$\begin{aligned}
 f_1(r) &= A_1 + B_1 r^2, \\
 f_2(r) &= A_2 + B_2 r^2, \\
 f_3(r) &= A_3 + B_3 \cos(C_3 r), \\
 f_4(r) &= \begin{cases} A_4 \sqrt{1 - \frac{r^2}{B_4^2}} & |r| \leq B_4, \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}, \\
 f_5(r) &= \begin{cases} A_5 \sqrt{1 - \frac{r^2}{B_5^2}} & |r| \leq B_5, \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$A_1 = 0,572039 R, \quad B_1 = -0,425220 / R,$$

$$A_2 = -1,065815 R, \quad B_2 = 0,358080 / R,$$

$$A_3 = -0,774962 R, \quad B_3 = -0,224472 R,$$

$$C_3 = 3,368190 / R, \quad A_4 = 0,268429 R,$$

$$B_4 = 0,316354 R, \quad A_5 = -0,437346 R,$$

$$B_5 = B_4,$$

ahol  $R$  a lencse sugara és  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

### Sugárkövetés a lencsén keresztül

Az előbbieken definiált lencsére (1. ábra) háromdimenziós számítógépes sugárkövetést alkalmaztunk.

### Egy fénysugár és a törőfelület metszéspontja

Képzelnünk el a 3-dimenziós térben egy törőfelületet, amit az  $f(x, y)$  kétváltozós függvény ír le, és egy fénysugarat, ami a  $\mathbf{p}_0 = (p_{0x}, p_{0y}, p_{0z})$  pontból indul az  $\mathbf{e}_0 = (e_{0x}, e_{0y}, e_{0z})$  egységvektorral jellemzett irányba (2. ábra). A fénysugár útja paraméteres formában a következőképpen írható le:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}(t) &= \mathbf{p}_0 + \mathbf{e}_0 t \rightarrow x(t) = x_0 + e_{0x} t \\
 & y(t) = y_0 + e_{0y} t \quad (2) \\
 & z(t) = z_0 + e_{0z} t,
 \end{aligned}$$

ahol  $t$  a paraméter. A fénysugár és az  $f(x, y)$  felület metszéspontjához tartozó  $t$  érték a következő egyenletből számítható:

$$f(x_0 + e_{0x} t, y_0 + e_{0y} t) = z_0 + e_{0z} t. \quad (3)$$

### Fénytörés a lencse felületein

Miután meghatároztuk a fénysugár metszéspontját a törőfelülettel, a Snellius–Descartes-törvény segítségével kiszámítható a megtört fénysugár iránya. Az  $f(x,y)$  törőfelület normálvektora (2. ábra):

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2}{|\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2|}, \quad \text{ahol } \mathbf{e}_1 = \left(1, 0, \frac{\partial f(x,y)}{\partial x}\right), \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_2 = \left(0, 1, \frac{\partial f(x,y)}{\partial y}\right).$$

A határfelületen áthaladó, majd megtört fénysugár új irányát megadó egységvektor:

$$\mathbf{e}_{\text{új}} = \frac{\mathbf{e}_{\text{előző}}}{n} - \left(\cos\beta - \frac{\cos\alpha}{n}\right)\mathbf{N}, \quad (5)$$

ahol  $\alpha$  és  $\beta$  a bejövő és megtört fénysugár beesési merőlegestől mért szöge, és  $n = n_{\text{új}}/n_{\text{előző}}$  a relatív törésmutató (2. ábra): ha  $n_{\text{előző}} = n_0$ , akkor  $n_{\text{új}} = n_1$ , és ha  $n_{\text{előző}} = n_1$ , akkor  $n_{\text{új}} = n_2$ .

### A lencse alatt kialakuló fényintenzitás eloszlása

A lencsén és annak  $f_1(r), f_2(r), f_3(r), f_4(r)$  és  $f_5(r)$  függvények által leírt, (1) szerinti törőfelületein áthaladó sugarakat tanulmányoztuk (1. ábra). Ezt az öt függvényt a  $z$  tengely körül megforgatva kapjuk a forgásszimmetrikus szemlencse 3-dimenziós modelljét. Képzeljünk el egy ilyen lencsét, amit felülről világítunk meg az optikai tengellyel párhuzamos, kör keresztmetszetű fénynyalábbal! Ekkor a nyaláb és a lencse is forgásszimmetrikus, ezért a geometriai optikai probléma 2-dimenzióssá egyszerűsíthető: osszuk föl a megvilágító homogén nyaláb keresztmetszetét  $m$  darab koncentrikus zónára (például  $m = 10$  a 3. ábrán). A  $k = 1$ -hez tartozó zóna egy  $r$  sugarú körlap, míg azon zónák amelyekre  $1 < k < m$ , gyűrűk, amelyek vastagsága:

$$r = \frac{R}{m}, \quad (6)$$

ahol  $R$  a lencse sugara és  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ . A  $k$ -edik zóna területe:

$$A_k = (k r)^2 \pi - [(k-1)r]^2 \pi = (2k-1)r^2 \pi = \frac{(2k-1)R^2 \pi}{m^2}, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

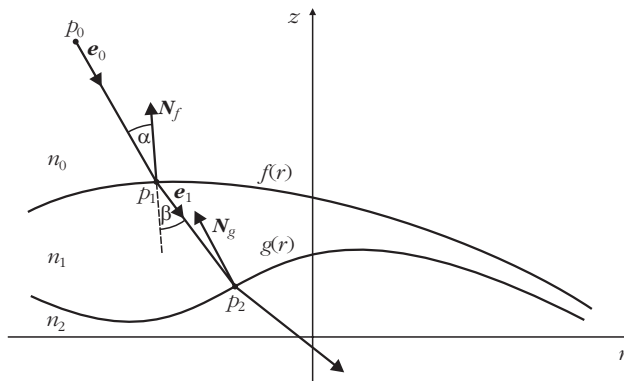
a bejövő nyaláb keresztmetszete pedig (3.a ábra):

$$A_{\text{nyaláb}} = R^2 \pi. \quad (8)$$

A teljes nyaláb fényerőssége:

$$P_{\text{nyaláb}} = I_{\text{nyaláb}} A_{\text{nyaláb}}, \quad (9)$$

ahol  $I_{\text{nyaláb}}$  a homogén nyaláb intenzitása. A  $k$ -edik zóna fényerőssége:

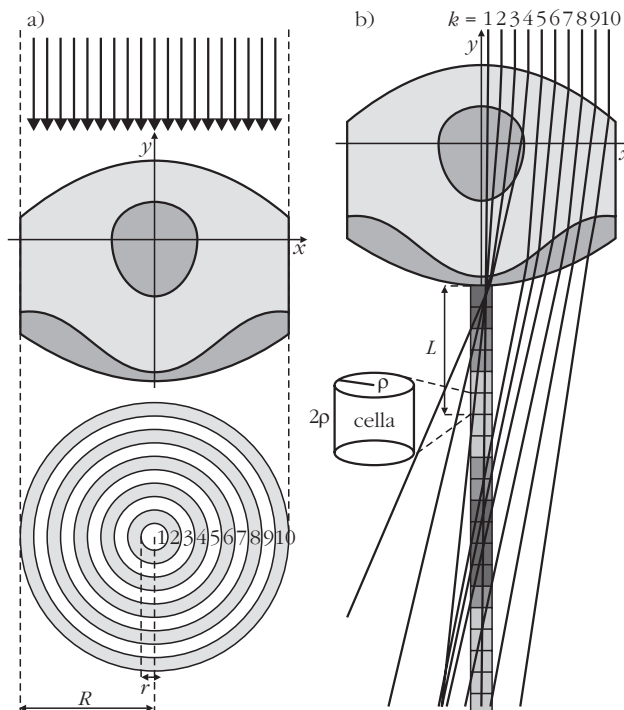


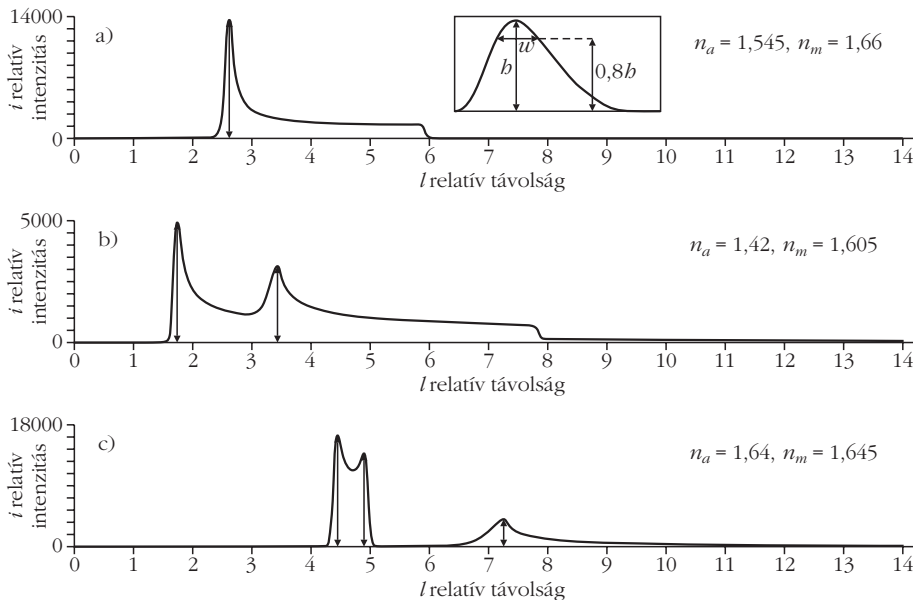
2. ábra. A  $P_0$  pontból  $\mathbf{e}_0$  irányba induló fénysugár útja két törőfelületen keresztül, ahol a felületek metszetét leíró függvény  $f(r)$  és  $g(r)$ . A különböző tartományok törésmutatói  $n_0, n_1$  és  $n_2$ . A fénysugár először a  $P_1$  pontban tör meg és  $\mathbf{e}_1$  irányában halad tovább. Az  $\alpha$  és  $\beta$  a bejövő és megtört fénysugár beesési merőlegestől mért szöge. Az  $f(r)$  és  $g(r)$  függvények normálvektorait  $\mathbf{N}_f$  és  $\mathbf{N}_g$  jelöli rendre a  $P_1$  és  $P_2$  pontban. Az  $\mathbf{e}_0, \mathbf{e}_1, \mathbf{N}_f$  és  $\mathbf{N}_g$  egységvektorok.

$$P_k = \frac{P_{\text{nyaláb}} A_k}{A_{\text{nyaláb}}} = I_{\text{nyaláb}} A_k, \quad (10)$$

ahol  $A_k$  a  $k$ -edik zóna keresztmetszetének területe. Kiszámítottuk a lencse alatt az optikai tengely mentén a fényintenzitást. Definiáltunk egy henger alakú,  $14R$  hosszúságú,  $\rho = 0,002R$  sugarú tartományt, amit  $2\rho$  hosszúságú elemi cellákra osztottunk föl (3.b ábra). Így az optikai tengely mentén a lencse alatt 3500 elemi cellát kaptunk. Az optikai tengellyel párhuzamo-

3. ábra. (a) A beeső párhuzamos sugarakból álló fénynyaláb felosztása  $m = 10$  zónára. (b) Sugárkövetés a központi maggal rendelkező trilobitallencsén keresztül az optikai tengelyen kialakuló intenzitásmintázat számításához. Minél sötétebb egy cella (sugár:  $\rho$ , magasság:  $2\rho$ ), annál több fénysugár halad át rajta.





4. ábra. Példák a központi maggal rendelkező trilobalencse (1. ábra) optikai tengelyének mentén kialakuló  $i = I/I_{nyaláb}$  relatív intenzitás az  $l = L/R$  relatív távolság függvényében. (a) Egy intenzitáscsúcs,  $n_a = 1,545$ ,  $n_m = 1,66$ . (b) Két intenzitáscsúcs,  $n_a = 1,42$ ,  $n_m = 1,605$ . (c) Három intenzitáscsúcs,  $n_a = 1,64$ ,  $n_m = 1,645$ . Az (a) betétabráján látható a  $Q = b/w$  csúcstelenség definíciója, ahol  $b$  a csúcs magassága,  $w$  pedig a csúcs  $i = 0,8b$  magasságához tartozó szélessége.

san beeső fénynyaláb mellett egy adott lencsezónából érkező minden beeső fénysugár az optikai tengely ugyanazon pontjában, azaz ugyanabban az elemi cellában metszi az optikai tengelyt. A metszéspontot minden egyes fénysugárra a fönt bemutatott sugárkövetéssel számoltuk. A számítás első lépéseként minden cellához 0 értéket rendeltünk. Ezután  $m = 500\,000$  fénysugár útját követtük végig a lencsén keresztül. A  $k$ -edik beeső fénysugár a  $k$ -edik gyűrűzóna járulékát képviselte. A megtört fénysugár lencséből való kilépése után kiszámítottuk az optikai tengellyel való metszéspontját, és meghatároztuk azon cellákat, amelyekben áthaladt. Minden olyan cella tartalmát, amit érintett a nyomon követett fénysugár, a következő mennyiséggel növeltük:

$$\Delta I_k = \frac{P_k}{A_{cella}}, \quad (11)$$

ahol  $A_{cella} = \rho^2 \pi$  a cella keresztmetszetének területe. (10) és (11)-ből következik:

$$\Delta I_k = \frac{I_{nyaláb} A_k}{\rho^2 \pi}. \quad (12)$$

Az összes  $m$  fénysugárra elvégezve az előbbi eljárást, az optikai tengelyen a cellákban (3.b ábra) megkapjuk az  $I$  intenzitást a lencsétől mért  $L$  távolság függvényében (3.b ábra). A továbbiakban az  $i = I/I_{nyaláb}$  relatív intenzitást és a lencsétől mért  $l = L/R$  relatív távolságot tekintjük.  $\Delta n_a = \Delta n_m = 0,0025$  törésmutatófelbontással vizsgáltuk, hogy az  $i(l)$  függvény alakja miként függ az alsó lencsetag és a központi lencsemag  $n_a$  és  $n_m$  törésmutatójától a következő paramétertartományokban:

$$\begin{aligned} n_a &= 1,545, n_m = 1,66 & 1,36 < n_a < 1,68, \\ & & 1,52 < n_m < 1,74. \end{aligned} \quad (13)$$

A paraméterek így módon történő behatárolásának magyarázata a következő: az alsó lencsetag  $n_a$  törésmutatója nem lehetett kisebb, mint az alatta levő testfolyadéké ( $n_t = 1,36$ ) és nem lehetett sokkal nagyobb, mint a fölötte levő kalcité ( $n_f = 1,66$ ). Másrészt, a lencsemag  $n_m$  törésmutatója nem lehetett kisebb, mint a száraz kité ( $1,56$ ) és nem érte el a guaninét ( $1,80$ ).  $n_a$  és  $n_m$  különböző értékei eltérő  $i(l)$  görbékhez vezetnek egy (4.a ábra), kettő (4.b ábra) vagy három (4.c ábra) csúccsal. Így a központi maggal bíró trilobalencsék a törésmutatóktól függően egy-, két-, illetve háromfókuszúak lehetnek. Minden  $i(l)$  görbét Gauss-simításnak vetettük alá:

$$i(D)_{simított} = \int_{k=-\alpha}^{\alpha} i(l) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(l-k)^2}{2\sigma^2}} dk, \quad (14)$$

ahol  $\sigma = 0,02R (= 10$  cellahossz) és  $\alpha = 5\sigma$ . Az  $i(l)$  relatív intenzitásgörbén minden csúcs és környezete egy fókuszstartományt alkot. A fókuszstartomány élességét a

$$Q = \frac{b}{w} \quad (15)$$

mennyiséggel definiáltuk, ahol  $b$  az intenzitáscsúcs magassága,  $w$  pedig az  $i = 0,8b$  magassághoz tartozó szélessége (4.a ábra). A  $Q$  mennyiséget a gömbi hiba kiküszöbölése mérőszámának tekintjük. Egy adott intenzitáscsúcs  $w$  szélességének  $0,8b$  magassághoz való rendelése önkényesnek tűnik, azonban ha kisebbre választjuk az intenzitást (például  $i = 0,5b$ ), akkor egyre nehezebbé válik két közeli intenzitáscsúcs automatikus fölismerése (4.c ábra). Így tehát nagy  $b$  és kicsi  $w$  vezet nagy  $Q$  értékekhez, azaz éles fókuszáláshoz. Csúcsnak azokat a helyeket tekintettük, amelyekre igazak a következő feltételek:

$$i(l_{i-1}) < i(l_i) > i(l_{i+1}) \text{ és } Q \geq 4000. \quad (16)$$

Tapasztalataink azt mutatták, hogy a  $Q^* = 4000$  küszöbérték megfelelő volt, hogy minden intenzitáscsúcsot föl tudjunk ismerni. Természetesen, az  $i(l)$  alakja függ  $m$ -től is. Ha  $m$  túl kicsi, akkor hamis eredményt kapunk. Megvizsgáltuk, hogy miként függ  $m$  nagyságától az  $i(l)$ , és arra jutottunk, hogy ha  $m < 10^3$ , akkor  $i(l)$  erősen változik  $m$ -mel, míg ha  $m > 10^5$ , akkor már nincs jelentős változás az  $i(l)$ -ben, hiába növeljük  $m$ -et.

### A 2-dimenzióra egyszerűsített és a valódi 3-dimenziós sugárkövetés összehasonlítása

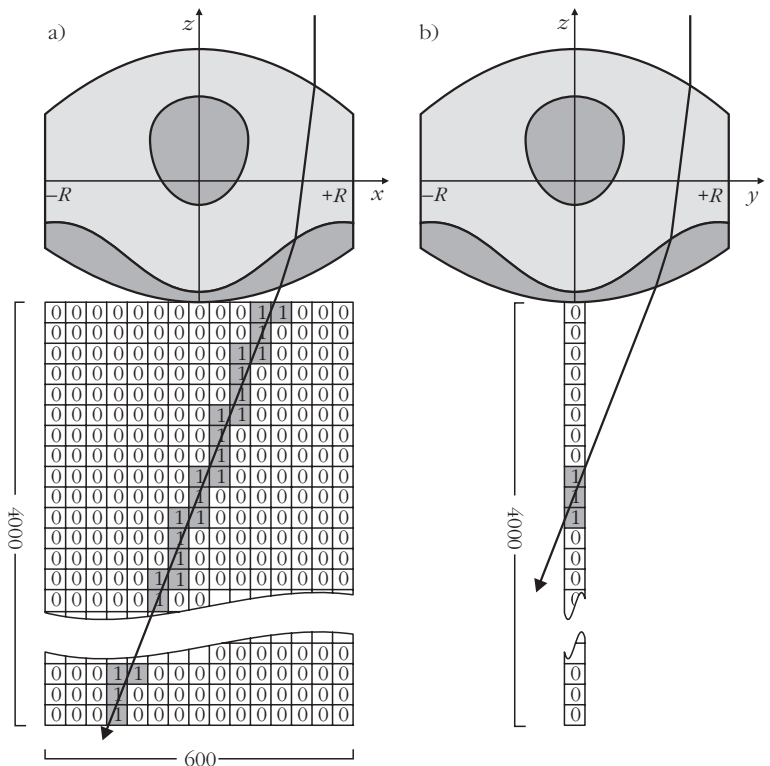
Hogy megbizonyosodjunk arról, hogy jó eredményt kapunk a fönti 2-dimenziósra egyszerűsített sugárkövetéssel, 3-dimenziós számításokat is végeztünk. A sugárkövetés folyamata teljesen hasonló három dimenzióban is, csak a törőfelületeket leíró  $f_1(x, y)$ , ...  $f_5(x, y)$  függvények ekkor kétváltozósak  $(x, y)$  és 3-dimenziós vektorokkal kell számolnunk. Egy korábbi munkánkban [20] éppen e módszert alkalmaztuk, ahol napsütötte vízcseppek alatt kialakuló fényintenzitás-mintázatokat számítottunk. A 3-dimenziós számításban a lencse alatti  $x$ - $z$  síkban egy  $600 \times 4000$  elemből álló mátrixot definiáltunk (5. ábra). Kezdetben minden mátrixelem 0 értéket kapott. Minden fénysugár útját végigkövettük a lencsén, majd miután alul kilépett abból, meghatároztuk azon mátrixelemeket, amelyeket a vizsgált sugár érintett, majd 1-gyel növeltük a mátrixelemek értékét.  $4 \cdot 10^6$  fénysugarat követtünk így nyomon, amelyek egy, a lencse fölötti, az optikai tengelyre merőleges, négyzet alakú tartományból érkeztek. A számítás végére a mátrix a lencse alatti térfogatban levő hengersizmetrikus intenzitáseloszlás főtengelemzetével arányosan töltődött fel értékekkel. A mátrix 300-adik oszlopa tartalmazta az optikai tengelyen mérhető intenzitáseloszlást. A 2- és 3-dimenziós számolás eredményét összevetve, ugyanazt az eredményt kaptuk. Mivel a 3-dimenziós térben végzett sugárkövetés sokkal több számítógépidőt igényel, ezért a 2-dimenzióra egyszerűsített sugárkövetést alkalmaztuk.



Cikkünk II. részében a számítógépes sugármenet-követéssel kapott paleo-biooptikai eredményeinket mutatjuk be a *Dalmanites* trilobita központi magot tartalmazó szemlencséje esetén.

### Irodalom

- Whittington, H. B.: *Fossils Illustrated 2 – Trilobites*. Boydell Press, Woodbridge, England, 1992.
- Towe, K. M.: Trilobite eyes: calcified lenses in vivo. *Science* 179 (1973) 1007–1009.
- Clarkson, E. N. K.: The visual system of trilobites. *Palaeontology* 22 (1979) 1–22.
- Levi-Setti, R.: *Trilobites*. (2nd ed.) University of Chicago Press, Chicago and London, 1993.
- Thomas, A. T.: Developmental palaeobiology of trilobite eyes and its evolutionary significance. *Earth Science Reviews* 71 (2005) 77–93.
- Levi-Setti, R.; Clarkson, E. N. K.; Horváth, G.: The Eye: Paleontology. In: *Frontiers of Biology – Italian Encyclopedia. Part I. Origin and Evolution of Life. Section 7. Construction of the Organism*. Eds.: D. Baltimore, R. Dulbecco, F. Jacob, R. Levi-Montalcini (2002) 379–395.
- McCormick, T.; Fortey, R. A.: Independent testing of a paleobiological hypothesis: the optical design of two pelagic trilobites reveals their relative palaeobathymetry. *Paleobiology* 24 (1998) 235–253.
- Clarkson, E. N. K.; R. Levi-Setti: Trilobite eyes and the optics of Des Cartes and Huygens. *Nature* 254 (1975) 663–667.



5. ábra. A központi maggal rendelkező trilobitalencse alatti intenzitáseloszlás számítása az  $x$ - $z$  síkban definiált  $600 \times 4000$  méretű mátrixban, aminek elemeit kezdetben 0-ra állítjuk. Minden egyes cella értékét, amit érint egy fénysugár 1-gyel növeljük. Példaként két ilyen fénysugarat láthatunk [(a), (b)], amelyek a  $\mathbf{p}_A = (0, 75 R, 0, R)$  és  $\mathbf{p}_B = (0, 0, 75 R, R)$  pontokból indultak, ahol  $R$  a lencse sugara.

- Horváth, G.: Geometric optics of trilobite eyes: a theoretical study of the shape of aspherical interface in the cornea of schizochroal eyes of phacopid trilobites. *Mathematical Biosciences* 96 (1989) 79–94.
- Horváth, G.; Clarkson, E. N. K.: Computational reconstruction of the probable change of form of the corneal lens and maturation of optics in the post-ecdysial development of the schizochroal eye of the Devonian trilobite *Phacops rana milleri* Stewart 1927. *Journal of Theoretical Biology* 160 (1993) 343–373.
- Horváth, G.: The lower lens unit in schizochroal trilobite eyes reduces reflectivity: on the possible optical function of the intralensar bowl. *Historical Biology* 12 (1996) 83–92.
- Gál, J.; Horváth, G.; Clarkson, E. N. K.; Haiman, O.: Image formation by bifocal lenses in a trilobite eye? *Vision Research* 40 (2000) 843–853.
- Lee, M.; Torney, C.; Owen, A. W.: Magnesium-rich intralensar structures in schizochroal trilobite eyes. *Palaeontology* 50 (2007) 1031–1038.
- Clarkson, E.; Levi-Setti, R.; Horváth, G.: The eyes of trilobites: The oldest preserved visual system. *Arthropod Structure and Development* 35 (2006) 247–259.
- Horváth, G.; Clarkson, E. N. K.; Pix, W.: Survey of modern counterparts of schizochroal trilobite eyes: structural and functional similarities and differences. *Historical Biology* 12 (1997) 229–263.
- Buschbeck, E.; Ehmer, B.; Hoy, R.: Chunk versus point sampling: visual imaging in a small insect. *Science* 286 (1999) 1178–1180.
- Zhang, X. G.; Clarkson, E. N. K.: The eyes of Lower Cambrian eodiscid trilobites. *Palaeontology* 33 (1990) 911–933.
- Horváth, G.: *Biooptika: a geometriai optika biológiai alkalmazásai*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2004.
- Egri, Á.; Horváth, G.: Possible optical functions of the central core in lenses of trilobite eyes: spherically corrected monofocality or bifocality. *Journal of the Optical Society of America A* 29 (2012) 1965–1976.
- Egri, Á.; Horváth, Á.; Kriska, G.; Horváth, G.: Optics of sunlit water drops on leaves: Conditions under which sunburn is possible. *New Phytologist* 185 (2010) 979–987. + cover picture + electronic supplement.