



MERKL OTTÓ – KELE PÉTER

# Eleven lámpások az éjszakában

A Magyar Rovartani Társaság 2011 óta kijelöli az év rovarát. 2015-re – internetes szavazás eredményeként – a nagy szentjánosbogarat (*Lampyris noctiluca*) választotta. Szerencsés egybeesés, hogy 2015 egyben a Fény Nemzetközi Éve is, hiszen a szentjánosbogaraknak az emberi szem számára legfeltűnőbb tulajdonsága az, hogy világítanak, és ezzel a biolumineszcencia legismertebb példájával szolgálnak.

## Biolumineszcencia és biofluoreszcencia

Mi a *biolumineszcencia*? Sokan gyorsan és könnyen odavetik: fény kibocsátása élőlények által. Ez a megfogalmazás azonban nem pontos, ugyanis a biolumineszcencia definíciójának alapvető eleme, hogy a fény biokémiai reakció eredményeként keletkezik (amely reakció természetesen élőlényekben zajlik). Ilyenkor egy enzim átalakítja a szubsztrátját, a reakció elsődleges terméke pedig egy gerjesztett állapotú molekula, amely a felesleges energiától foton kibocsátásával szabadul meg. Ezeket a

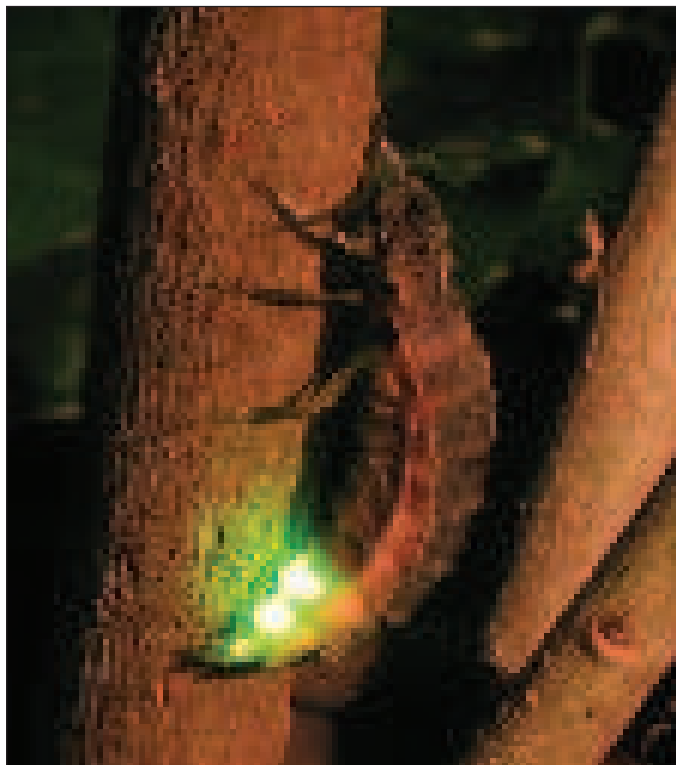
lámhosszú besugárzás tart. Számos hal, medúza, lábasfejű és más állat fluoreszkál a tengerek fotikus – nagyjából 80 méter mélységig terjedő, jól átvilágított – zónájában. A víz jobban elnyeli a hosszabb hullámhosszú fényt (a spektrum meleg színeit, tehát a vörös tartomány felé esőket), mint a rövideket (a hideg színeket, tehát az ibolya felé esőket és az ultraibolyát). A halak a mélyebbre hatoló hideg színeket átfordítják jobban látható meleg színekre, így fluoreszkálva jobban felismerik fajtársaikat.

A kétfajta világítási folyamat gyakran nem független egymástól: a gerjesztő fényforrást, ami a fluoreszkáláshoz szükséges, sokszor ugyanannak az állatnak a biolumineszcenciája szolgáltatja, vagyis a luciferin-luciferáz reakció csak közvetve

Az *Aequorea victoria* nevű medúzafaj, amelyből a GFP-t először izolálták, a fehérjét úgy gerjeszti, hogy egy biolumineszcens reakcióban – amelyben a luciferáz szerepét az aequorin, a luciferin szerepét pedig a cölaterazin játssza – cölateramid keletkezik. Ez a gerjesztett termék adja át a felesleges energiáját a GFP-nek. Fontos megjegyezni, hogy az energiaátadás során nem történik foton kibocsátása és elnyelése, hanem különböző elektronikus kölcsönhatások eredményeként kerül a cölaterazin alap-, a GFP pedig gerjesztett állapotba. Ezt



Nagy szentjánosbogár (*Lampyris noctiluca*) hímje  
(Forrás: <http://macroid.ru/showphoto.php?photo=142604>)



Nagy szentjánosbogár (*Lampyris noctiluca*) nősténye (Forrás: Wikimedia Commons)

szubsztrátokat gyűjtőnéven luciferineknek hívjuk, az enzimeket pedig luciferázoknak.

Van azonban az élővilágban a fénykibocsátásnak egy másik módja is: a *fluoreszcencia*. Ennek során rövidebb hullámhosszú (és nagyobb energiájú) fényt vagy más elektromágneses sugárzást elnyelő anyag nagyobb hullámhosszú (és kisebb energiájú) fényt bocsát ki, amíg a rövidebb hul-

vesz rész a fényjelenség kialakításában. A tengerek fénymentes – afotikus – zónájában fluoreszcencia nem is lehetséges másképp. Ilyenkor a fény kibocsátásáért közvetlenül a fluoreszcens fehérjék a felelősek, például a zöld fluoreszcens fehérje (GFP), melynek felfedezéséért *Martin Chalfie*, *Osamu Shimomura* és *Roger Y. Tsien* 2008-ban megkapták a kémiai Nobel-díjat.

a folyamatot biolumineszcencia-rezonancia energiáttranszfernek (BRET) hívjuk. A gerjesztett állapotú GFP ezt követően a rá jellemző energiájú foton kibocsátásával újra alapállapotba, vagyis újra gerjeszthető állapotba kerül.

Ha az izolált GFP-t ultraibolya fényvel gerjesztjük, valóban zölden fluoreszkál, ám a medúzát mégsem zöldnek látjuk. Ennek

az az oka, hogy az energiáttranszfer messze nem 100 százalékos: az enzimreakció eredményeként keletkező cölateramid molekulái az eseteknek csak töredékében gerjesztenek fluoreszcens fehérléket. Más esetekben a molekulák maguk bocsátanak ki fotont, és így kerülnek alapállapotba. A két fényjelenség (a biolumineszcencia és az energiáttranszfer következtében megfigyelhető fluoreszcencia) tehát együtt van jelen, az eredő szín így inkább a kék tartományba esik.

A szárazföldi élőlények közül a biofluoreszcencia leglátványosabb példái a skorpiók: az éjszaka aktív állatok ultraibolya fényvel megvilágítva kékeszöld fényben ragyognak, de a telihold, sőt a csillagfény ultraibolyáját hasznosítva is sugároznak, legalábbis műszerrel kimutathatóan. Ebben a jelenségben biztosan nincs szerepe elsődleges biolumineszcenciának, mert még a fosszilis skorpiómaradványok is fluoreszkálnak.



**Észak-amerikai parázbogár (*Phrixothrix*-faj) lárvája**  
(Forrás: <http://www.natgeocreative.com/photography/618649>)

A biolumineszcencia nagyon elterjedt az élővilágban: az evolúció során nagyjából 40 alkalommal jelent meg. Bár mintegy 700 genuszban fordul elő – a baktériumoktól a kovamoszatokon, a csalánzókon, a rovarokon és a lábásfejúeken át a halakig –, a fénykibocsátás kémiai reakciója és a folyamat szereplői nagyjából hasonlóak. Míg a különféle luciferintípusok száma kevés, a luciferázok változatosak.

### Világító bogarak

A bogarak körében a biolumineszcencia négy családban fordul elő, melyek viszonylag közeli rokonságban állnak egymással: valamennyien a pattanóbogár-szerűek (Elateroidea) családsorozatába tartoznak.

A *pattanóbogarak* (Elateridae) az egész Földön elterjedtek. Hímjeik és nőstényeik egymáshoz hasonlóak, szárnyasok, és kifejlett korukban is táplálkoznak. Mintegy 10 ezer fajuknak töredéke, nagyjá-

ból 200 világít, ezek zöme az Újvilág trópusi és szubtrópusi vidékein honos (Texastól Chilégig), illetve három faj Óceániában (egy-egy faj Tongán, a Fidzsi-szigeteken és Vanuaton). A sötét színű bogarak előtorának hátulsi szögleteiben egy-egy kerekded folt látható, mely zöld fényt bocsát ki. Harmadik világítószervük a hasoldalukon, az első potrohszelvényen helyezkedik el, és fénye vöröses (a Tongán élő fajnál az előtör két fényszerve hiányzik). Ebbe a családba tartozik a legnagyobb és legerősebb fényt világító bogár, a trópusi Amerikában élő, 4 centiméteres *Pyrophorus noctilucus* (spanyol néven *cucujo*), melynek fénye mellett akár olvasni is lehet. A pattanóbogarak fénye folyamatos, de a bogár a fény intenzitását változtatja, például ragadozó közeledtével az előtör fényszervei erősebben világítanak. A hasoldalon lévő vörös lámpás csak repülés közben működik, de akkor szintén folyamatosan, és kör alakú területet világít meg a bogár alatt. A pattanóbogaraknak a lárvája is zölden világít



**Kínai csillagbogár (*Diplocladon*-faj) lárvája**  
(Forrás: <http://www.insect-fans.com/bbs/forum.php?mod=viewthread&tid=39639>)

ivarok kommunikációját segíti, de még nem vizsgálták alaposan, illetve szinte biztosan az ellenség elriasztását is szolgálja. A Brazíliában élő *Pyrearius termitilluminans* lárvái azonban igen látványosan és egyértelmű céllal vetik be fényüket. Az egy méternél is magasabb természetvárok felszíne közelében járatrendszerű fűnek, amelynek nyílásain kidugják testük világító elülső részét. A fény odavonzza a rovarokat (legyeket és szárnyas természeteket), melyeket a pattanólárvák elkapnak és elfogyasztanak. Járataikban kamrák is találhatóak, ahol felhalmozzák a zsákmányt.

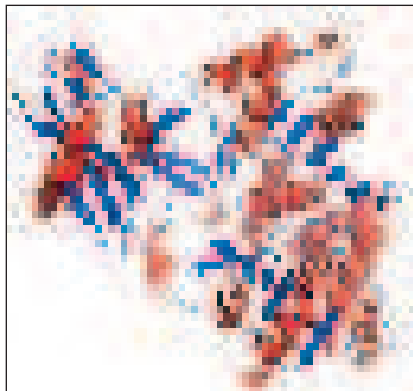
A *parázbogarak* (Phengodidae) mintegy 250 faja mind az Újvilágban él, Kanada déli részétől Chilégig. Nagyon rövid életű szárnyas, tollas csápú hímjeik nem táplálkoznak, és csak egyes fajaik világítanak. A lárvaszerű, röpképtelen nőstények és a lárvák ragadozók, leginkább ezerlábúakra vadásznak. Számos világítószervük van a fejükön, a torukon és a potrohukon. Egyes parázbogárlárvák felettébb látványos állatok. Ha nem zavarják őket, csak a fejükön lévő piros lámpás működik, ez valószínűleg a zsákmányszerzést segíti, hiszen a mászkáló lárv maga előtt megvilágítja a területet. Ilyenkor olyan a fénye, mint a parázsló cigarettáénak, és jelenlétét az emberi szem messziről észreveszi. Veszély esetén a lárv hirtelen bekapcsolja a testszelvényein sorakozó 11 pár zöld fényt, alighanem azért, hogy a támadóját elriassa. Ilyenkor az állat sötétben mozgó vasúti szerelvényre hasonlít, ezért angolul „vonatkuckacnak” (railroad worm) is nevezik. A kifejlett parázbogaraknál a fény valószínűleg nem játszik szerepet az ivarok egymásra találásában, a funkciója



**Dél-amerikai világító pattanóbogár (*Pyrophorus*-faj)**  
(Forrás: <http://www.zwallpix.com/glowing-click-beetle.html>)

(világítószervük az előtörön, vagy néha párosával a potrohszelvényeken sorakoznak). Petéik és bábjaik is enyhe zöld fényrel derengenek.

A pattanóbogarak fényének szerepét nem ismerjük pontosan. Lehet, hogy az



**Amerikai szentjánosbogárfaj (*Photinus pyralis*) luciferázának kristályszerkezete**  
(Forrás: Protein Data Bank: 1LCI)

náluk is inkább a védekezés vagy a mérgező testnedvekre való figyelemfelhívás.

A csillagbogarak (Rhagophthalmidae) nagyjából 30 faja Dél- és Délkelet-Ázsiában honos, észak felé Japánig. Fényük zöld színű. Szárnyas, rövid életű, nem táplálkozó hímjeik első 5–6 potrohszelvényén kétoldalt világítószervek sorakoznak. A lárvák és a lárvaszerű, röpképtelen nőtények is világítanak. Párzás előtt a nőtény felhajlítja a potrohát, és a 7. potrohszelvényén alul lévő

őket, fénye mérgező testnedveire figyelmezteti a ragadozókat. A lárvák világítószerveinek elrendeződése a nőtényekéhez hasonló. Csakúgy, mint a parászbogarak, a csillagbogarak is az ezerlábúak ragadozói.

### A negyedik család: a szentjánosbogarak

A világítani képes bogarak túlnyomó többsége, több mint 2000 faj a szentjánosbogarak (Lampyridae) családjába tartozik. Világító bogarakat Magyarországon – és egész Európában – csak a szentjánosbogarak között találunk: Európában 62 fajuk honos, közülük hazánkban három fordul elő. A közhiedelemmel ellentétben, a fajoknak csak egy része világít felnőttkorában, ám az imágóként nem világító – akár nappali életmódot folytató – fajok is világítanak lárvakorukban. A világító fajoknál a hímeknek és a nőtényeknek is vannak fényszerveik, mégpedig az 5–7. potrohszelvények hasoldalán. Fényük lehet folyamatos, de igen gyakran fajra jellemző frekvenciával és intenzitással villognak. Az egy helyen élő, ugyanazon fajhoz tartozó hímek néha egyszerre villognak, de a szinkronizált villogás leglátványosabb eseteit a délkelet-

frekvenciája segíti a hímek és a nőtények egymásra találását olyan területeken, ahol számos szentjánosbogár-faj fordul elő.

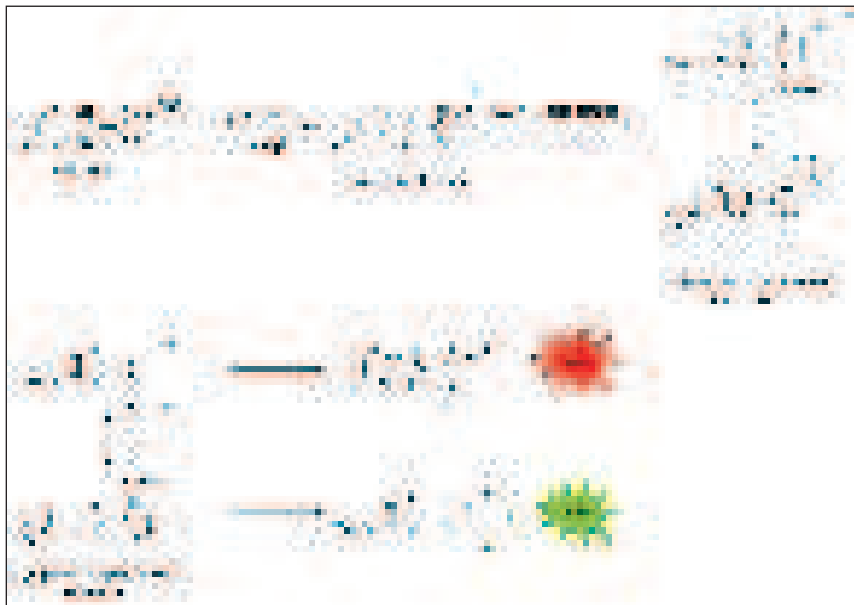
A szentjánosbogaraknál általában a hímek és a nőtények is szárnyasok, de néha a nőtény szárnyatlan, lárvaszerű; ilyen a nagy szentjánosbogár is. A nálunk is élő törpe-szentjánosbogárnak (*Phosphaenus hemipterus*) a hímje is szárnyatlan.

A kifejlett szentjánosbogarak nem vagy alig táplálkoznak, lárváik azonban ragadozók, és leginkább csigákra vadásznak. Akad azonban olyan eset, amikor az imágó is ragadozó, mégpedig elég sajátos módon. Az Észak-Amerika keleti felében élő *Photuris*-fajok az agresszív mimikri módszerét gyakorolják. Szárnyas nőtényeiket a helyiek a „végzet asszonyainak” (femmes fatales) nevezik, ugyanis ezek a velük egy helyen élő más, kisebb testű szentjánosbogarak (*Photinus*- és *Pyroctomena*-fajok) nőtényeinek villogását utánozzák. A megtévesztett hímek a párzás reményében leszállnak a „végzet asszonyához”, amely azonnal elkapja és felfalja őket. Korábban úgy gondolták, hogy a nőtény bogár csupán értékes fehérjéhez jut a zsákmányából. Később azonban kiderült, hogy felhasználja a kis hímekben lévő mérgező szteroidokat (lucibufaginokat), melyeket ő maga nem képes előállítani. A mérget a testében tárolja, majd a lerakott petéibe juttatja, így azok némi védelemben részesülnek.

Meg kell említeni, hogy a szakirodalom 1986-ban beszámolt egy, a fentiekkel rokonságban egyáltalán nem álló bogár fénykibocsátásáról is, melyet 2010-ben más forrás is megerősített. Egy braziliai holyvalárva (Staphylinidae) tor- és potrohszelvényein zölden világító vonalat figyeltek meg. Azt azonban, hogy valóban a bogár saját lumineszcenciájáról van-e szó, újabb megfigyelésekkel kell igazolni. Ki kell ugyanis zárni, hogy az állat világító baktériumokkal fertőződött, vagy világító bogarakat (például pattanóbogarakat vagy parászbogárlárvákat) fogyasztott.

### A bogárluciferin

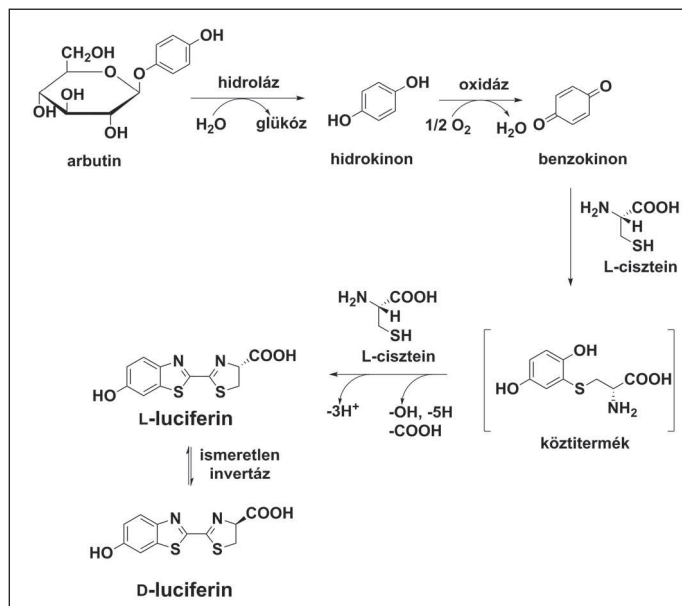
Bármelyik világító bogárról van is szó, a világítással járó folyamat szubsztrátja minden esetben ugyanaz: a bogárluciferin. Ez a vegyület máshol nem fordul elő, csak ezekben a bogarakban. Királis molekula, vagyis két, összetételében azonos alakban létezik, de a két alak atomjainak térbeli elrendeződése (konfigurációja) eltérő – olyan módon, ahogy a bal kéz és a jobb kéz egymásnak tükörképei, de sehogyan sem hozhatók egymással fedésbe, akárhogy is forgatjuk őket ugyanabban a sík-



**A világító bogarak fénykibocsátásának kémiai folyamata**

világítószervével csalogatja a hímeket; e családnál tehát a kifejlett bogarak párvalasztásban szerepet játszik a fény. A párosodott nőtény többé nem használja a hasoldali lámpását, viszont bekapcsolja a hátoldalán lévő, három sorban (kétoldalt és középen) sorakozó világítószerveit, ilyenkor fényei a csillagos égre emlékeztetnek. Miközben testét petéi köré hajlítja, hogy védelmezze

ázsiai *Pteroptyx*-fajoknál találjuk. Náluk a hímek és a nőtények is szinkronizáltan villognak, amivel még több fajtársukat csalogatják a közelbe, és a fákon százával-ezrével villódzó bogarak karácsonyi hangulatot teremtenek a trópusi tájban. E családban tehát az imágók egyértelműen a két ivar közötti kommunikációra használják fényüket: a villogás fajra jellemző



A luciferin bioszintézise

ban. A két tükörképet (enantiomert) a latin jobb (dexter) és bal (laevus) rövidítésével D és L betűvel jelöljük. A természetben a biológiailag aktív királis anyagok általában csak az egyik enantiomerből állnak, így például a fehérjéket szinte mindig L-aminosavak építik fel. Ezért is különleges, hogy a világító bogarakban a természetes L-aminosavból keletkező luciferinmolekula D-konfigurációjú.

Ezt a folyamatot szintén enzimek végzik, melyek szerkezetét azonban még nem ismerjük.

### A fény kibocsátása

A fénykibocsátással járó folyamat a szentjánosbogaraknál a légsővekkkel (és így oxigénnel) jól ellátott világítószerv hid-

mérgező vegyület, ezért a bogár glükozilált, ártalmatlan formáját, az arbutint tárolja, melyből a glükozidáz enzim segítségével szabadítja fel a hidrokintont.

Mivel a két kiindulási ciszteinmolekula L-enantiomer, nyilvánvalóan L-luciferin keletkezik. Csak hogy fénykibocsátásra csupán a D-luciferin képes. A létrejött L-enantiomert ezért át kell fordítani (invertálni) D-enantiomerré.

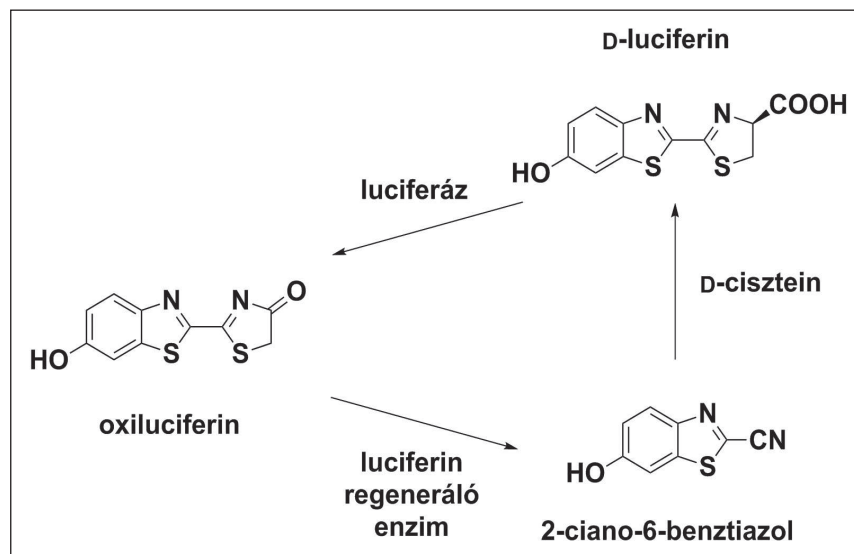
ris oxigén jelenlétében gerjesztett állapotú oxiluciferinné alakul át, és ekkor történik a fény kibocsátása. Mindkét lépést a luciferáz katalizálja. Az élővilágban csak a bogarakra jellemző, hogy a folyamatban ATP is részt vesz.

A reakciótermék, az oxiluciferin, nem vész kárba. Japán kutatók 1974-ben kimutatták, hogy az oxiluciferinből a cisztein aminosav jelenlétében ismét luciferin keletkezik. Más japán kutatók pedig 2001-ben megtalálták a folyamatban résztvevő luciferin-regeneráló enzimet (LRE). Az oxiluciferin vízfelvétellel, az LRE jelenlétében 2-ciano-6-hidroxi-benzotiazollá alakul, ez pedig D-ciszteinnel reagálva luciferinné (az utóbbi lépéshez nincs szükség enzimre).

A termék-oxiluciferinnek a közeg pH-jától függően két formája (tautomere) fordul elő. Savas közegben inkább a piros színű felelős forma (keto-forma), míg semleges és lúgos közegben a zölden világító tautomer (enol-forma) az uralkodó. A bogárcsoportra jellemző luciferáz pH-optimumától függően így a termék oxiluciferin az egyik, vagy a másik tautomer formát veszi fel, és ezzel meghatározza a kibocsátott szín hullámhosszát a zöldről (az emissziós maximum hullámhossza 536 nm), a már említett ritkább esetek vöröséig (622 nm). Egy adott bogárgenusz esetében a luciferáz enzim és így a szín is ugyanolyan. A szentjánosbogarak csoportjában azonban a luciferáz enzim változatosabb, ezért az ide tartozó fajok által kibocsátott fény színe eltérhet. A szentjánosbogarak luciferázai tehát „pH-szenzitívek”, a pattanóbogarakéi és a parázsbogarakéi pedig „pH-inszenzitívek”. A pH csökkenése mellett nehézfémek (réz és cink) kationjai, illetve a hőmérséklet emelése is a vörös felé tolja el a spektrumot.

### Irodalom

- Day J. C. 2014: *Fireflies and Glow-worms*. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, 210 pp.
- Hoffmann K. H. (szerk.) 2014: *Insect Molecular Biology and Ecology*. – CRC Press, Boca Raton, Florida, 428 pp.
- Leschen R.A.B., Beutel R.G. & Lawrence J.F. (szerk.) 2010: *Coleoptera, Beetles. Volume 2: Morphology and systematics (Elateroidea, Bostrichiformia, Cucujiformia partim)*. – In: Kristensen N.P. & Beutel R.G. (szerk.): *Handbook of Zoology/ Handbuch der Zoologie. A Natural History of the Phyla of the Animal Kingdom / Eine Naturgeschichte der Stämme des Tierreiches. Band 4. Arthropoda. Hälfte 2. Insecta. Part 39*. Walter de Gruyter, Berlin-New York, XIII + 786 pp.



Az oxiluciferin reciklációja

A luciferin bioszintézisének még nem pontosan ismert minden lépése, például az intermedier molekulák és a folyamatot katalizáló enzim(ek) sem. Annyi biztos, hogy a folyamathoz két L-cisztein- és egy hidrokinton-molekula szükséges. A hidrokinton

rogén-peroxidot tartalmazó sejtakotóiban (peroxiszómáiban) zajlik, két lépésben. Először a luciferinből adenzin-trifoszfát (ATP) hatására, magnéziumionok jelenlétében luciferil-adenilát képződik. A második lépésben a luciferil-adenilát molekulá-