

# A KOZMIKUS FÉNY VÉGZETE

Kolláth Zoltán,<sup>1,2</sup> Dömény Anita<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nyugat-magyarországi Egyetem, TTMK, Matematika és Fizikai Intézet

<sup>2</sup>MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, KTM Csillagászati Intézet

Mire gondolhatunk a fény nemzetközi évében? A fény csodákra képes. Információözön áramlik a segítségével, embereket gyógyít sebészeti beavatkozásokban. De „árnyoldalai” is léteznek.

A kozmikus fény is az év egyik kitüntetett szereplője, de vajon mennyire van még alkalmunk rá, hogy megfigyeljük? Több mint két évtizede küzdünk jó néhányan a felesleges, bután megvalósított világítás ellen hazánkban. Napjainkban már lehetne okosan is világítani, a technika adott hozzá. Sokszor elhangzott, leírtuk: ha nem teszünk semmit, akkor gyermekeink, unokáink úgy nőnek fel, hogy nem ismerik az igazi égbolt és a Tejút látványát. Sajnos ez a vészjóslat a fény nemzetközi évére többé-kevésbé beteljesedett. A szerzők egyike ismeretterjesztő és szakmai előadásai elején rendszeresen felteszi a kérdést: „Ki látta már a Tejutat?” Az egyik utóbbi alkalommal kétosztálynyi 11–12. évfolyamos gimnazista ült a sorokban. Senki sem emelte fel a kezét. Pár fotó levetítése után egy leányzó bátoritanul jelentkezett. A többiek tényleg nem látták még az égboltot úgy, ahogyan mindenkinek látnia kellene, hiszen a Tejút élményéhez mindenkinek joga volna. Ez már a vég?

Hasonlóan szomorú a statisztika más minták esetén is. Fizika alapszakos hallgatók között – akik elvileg érdeklődhetnek kozmikus környezetünk iránt – sem volt jobb az arány 50%-nál. Vajon mi az igazi oka e kétségbeejtő eredménynek? Az említett gimnázium városából 20-30 km-t utazva találunk olyan nemzeti parkot, védett területet, ahol könnyedén láthatók még az égbolt halvány jelenségei is. Még nem tűnt el teljesen a Tejút a fejünk felől. A képernyőről áramló információözön vonja el figyelmünket a tényleges tapasztalástól? Mennyire felelősek a fizika-, földrajztanárok és a szülők azért, mert nem rángatják ki a gyerekeket az ég alá, hogy felnézzenek egy pillanatra? Még lenne rá esély. De mindenképpen tennünk kell a fényszennyezés visszaszorításáért, mert a népesség többségének lakóhelyén már valóban nem látható a Tejút. Egy másik alkalommal, immár csillagászok és csillagászhallgatók között rögtönzött felmérésből az derült ki, hogy többségük nem látta még az állatövi

fényt, az ellenfény látványához pedig a száz kérdésből mindössze néhánynak volt szerencséje. Pedig ők tényleg érdeklődnek a csillagászat iránt...

## Világítási trendek

A Tejút és az éjszakai égbolt többi jelenségének láthatóságát a nem megfelelően tervezett és kivitelezett világítási rendszerekből, világítótestekből érkező zavaró fény rontja. A fényszennyezés nem csak a városi életet érinti, hiszen egy nagyváros éjszakai fénykupolája akár 100 km távolságból is látható. De nem volt ez mindig így: a történelem során világításra használt eszközök és technológiák is változtak. A fényforrásokban megjelenő technikai fejlődés a múltban mindig együtt járt a kibocsátott fény mennyiség növekedésével. 2010-ben Tsao és munkatársai érdekes összefüggésre jutottak [1]. Áttekintve az angliai és egyéb forrásokat, azt kapták, hogy az elmúlt 300 évben az egy főre jutó éves fényenergia egyenesen arányos az egy főre eső GDP és a fény adott időpontban vett árának hányadosával. A fényforrásokban bekövetkező fejlődés, a növekvő fényhasznosítás mindig a világításmennyiség és a felhasznált energia növekedésével járt együtt. Az összefüggés hátterében lényegében az volt, hogy a fény segített a termelékenység növekedésében – az üzemek éjszaka is működhetnek, akár kültéren is dolgozhatnak az emberek. Az extra termelés pedig megadja a lehetőséget a többletvilágításra. Tsao és munkatársai felisme-

Salgótarján, 2015. február 17: balra az állatövi fény, jobbra a Tejút látszik a Medves-fennsíkről fényképezve. (MTI fotó, Komka Péter)



résüket arra használták, hogy a féلvezető alapú világítás, azaz a LED-ek hatását előre jelezzék. Ugyanis egy újabb világítási forradalom küszöbén állunk, 2030-ig tovább növekedhet a LED-ek fényhasznosítása, tovább csökkenhet a fény ára.

A technikai és gazdasági trendeket előre vetítve az előbbi cikk szerzői azt kapták, hogy az eddigi szabályszerűséget követve a 2005-ös szinthez képest (20 Mlmh/év/fő világátlag) akár 10-szeresére növekedhet a kibocsátott fényenergia szintje, és mivel a Föld népessége növekszik, az összes fényár még inkább növekszik. A jövő fényes, de borús az egészségügyi, ökológiai és csillagászati szempontokból. Ne feledjük, a LED-ek már a spájzban vannak! A probléma mértéke pedig még jelentősebb, ha azt is megnézzük, éjszaka hogyan működik a szemünk.

Tsao és munkatársai tanulmányukban a normál (fotopos) látásnak megfelelő fényáramokról beszéltek. A nátriumlámpáról fehér fényre áttérés során jelentős növekménnyel jár, ha az éjszakai (szkotopos) látásra kifejtett hatást nézzük: a városok fénykupolája még drasztikusabban növekedhet.

## Hogyan látunk éjszaka?

Éjszaka nemcsak a kevesebb fény, de szemünk eltérő működése miatt is jelentősen megváltoznak látási képességeink. Szemünk csodálatos érzékszerv, egy pillanatra akár a Napba is nézhetünk (amit persze kerülni kell, mert rövid idő alatt is károsodást okozhat), a sötéthez szokott szem pedig csupán a csillagok fénye mellett is érzékeli például az úttest sötétebb és világosabb részei közötti eltéréseket. Szemünk alkalmazkodik környezetünk megvilágításához. Hogy mennyire fényesnek látunk valamit, nemcsak annak fizikailag mérhető fényességétől függ, hanem attól is, hogy mennyire vagyunk sötét vagy világos helyen, és mennyi időnk volt alkalmazkodni környezetünk adott állapotához. Normál körülmények között gyorsan alkalmazkodik a szemünk, és tökéletesen látunk. Ehhez a pupilla tágulása elegendő segítséget ad, erős fényben a pupilla pedig összehúzódik. Azonban a szembogár átmérőjének változása csak egy kisebb részét adja látásunk alkalmazkodóképességének.

A retinán négyféle látósejt található. Ezek közül háromfelét, a csapokat nappali látásunkban használjuk. A három különböző csap teszi lehetővé a színérzékelést, mivel azok külön-külön a kék, a zöld és a vörös tartományban érzékenyek. Nem az ember színlátása a legjobb, egyes állatok retinája négy különböző receptort tartalmaz – például több madárfajnak a közeli-ultraibolyában érzékeny sejtjei is vannak, sőt néhány esetben még egy ötödik színre érzékeny csap is meg-

jelenik. Színlátásunk azonban csak a nappali és a korai szürkületi fénytartományban működik, utána minden szürkévé válik. Ennek oka a csapok korlátozott érzékenysége. A csapok működésének gyengülésével látásunkban a negyedik látóideg, a pálcika veszi át a főszerepet. Mivel pálcikából csak egy típus van, ami a kékeszöld tartományban a legérzékenyebb, a szürkületben fokozatosan elveszítjük színlátásunkat. A színek elvesztéséért az kárpótól bennünket, hogy hihetetlenül kevéske fény mellett is látunk valamit környezetünkben. Tudnunk kell, hogy az éjszakai látás

nagyon sokban különbözik a nappalitól. Látásélességünk nagymértékben csökken, elveszítjük a látás kontrasztját, és különösen abban az irányban, ahol nappal a legélesebb a látásunk, gyakorlatilag semmit sem látunk. Ha mindezzel tisztában vagyunk, az segít

abban, hogy olyan dolgokat is megpillantsunk, amelyek érzékelésünk határán vannak.

Mi az oka a kétféle látás közötti óriási különbségnek? A látógödörben, a sárgafolt közepén – ahol a legélesebb látásunk kialakul a retinán –, 2 mm átmérőjű felületen körülbelül 150 000 csap található. Ez a mennyiség szükséges az emberi szem körülbelül 1 ívperces felbontóképességéhez. A csapok teljesen kitöltik a látógödört, nem marad hely a pálcikáknak. Ezért éjszaka éppen ott van egy második vakfoltunk, ahova elsőként fordítjuk a szemünket. (Az elsődleges vakfolt ott van, ahol az idegszálak elhagyják a szemgolyót, egyszerű kísérlettel meggyőződhetünk létezéséről.) A látógödörtől távolodva a csapok sűrűsége nagyon gyorsan csökken, helyet adva a pálcikáknak. Éjszaka a perifériás látásunk a jobb. Mindezekből az következik, hogy nem szabad oda néznünk, ahol látni szeretnénk valamit, hanem egy kicsikét mellé, s akkor rögtön feltűnnek az égbolton a halvány foltok is. A megfigyelésnek ezt a módját elfordított látásnak nevezzük.

Az egyik legfontosabb, amit sötétben ismernünk kell, a szemünk alkalmazkodása a gyengébb fényviszonyokhoz, a sötétadaptáció. A pálcikákban a látóbíbor (rodopszin) az a molekula, amelyik akár egy foton hatására is átalakul és lebomlik, lehetővé téve a fényingerület létrejöttét. Azonban erős fény hatására gyakorlatilag az összes rodopszin elbomlik. A rodopszin visszaalakulása viszonylag időigényes, erős fényből sötétbe jutva körülbelül fél órára van szükség ahhoz, hogy a látóbíbor többsége ismét jelen legyen a pálcikákban. Sokak talán meglepődnek, hogy a csillagoségbolt-parkokban sem fekete az égbolt. A szemünk sokkal érzékenyebb annál, mint ami a csillagok közötti területek derengésének megfigyeléséhez szükséges. A természetes holdmentes éjszakai égbolt is legalább százszor fényesebb, mint az ingerküszöbünk. Csak akkor érzékeljük feketének az égboltot, amikor visszakerülünk a természetes fények közé, lebutítva szemünket.



A FÉNY  
NEMZETKÖZI ÉVE  
2015

# KOZMIKUS

# FÉNY



A fényszennyezés jövőbeni alakulása szempontjából nagyon fontos különbség az éjszakai, azaz szkotopos és a nappali, azaz fotopos látás között a spektrális érzékenységek eltérése. Az 1. ábrán szemléltetesként bemutatjuk a két érzékenységi görbét. Jól látható, hogy éjszakai látásunk a fotopos látáshoz képest kicsivel rövidebb hullámhosszakon – a kék felé eltolódva – éri el maximális érzékenységét. Ebből következik, hogy az égbolt mesterséges fénylését, a települések fénykupoláját eltérő intenzitásúnak érzékeljük a szín függvényében, ha az a szkotopos látás tartományába esik. A következő fejezetben részletesebben is megvizsgáljuk, milyen kedvezőtlen következményei lehetnek ezen eltérésnek.

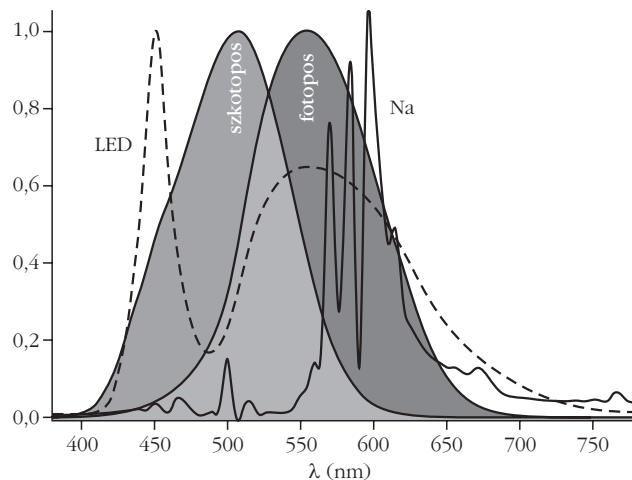
## Az égbolt mesterséges fénylése

Új típusú világítás (jelen esetben a LED) bevezetésének valószínűsíthető hatásainak értelmezéséhez egy mérőszám kell, amely könnyen meghatározható, és közvetlen kapcsolatban van a mesterséges fények ökológiai hatásaival. Az égbolt fényssűrűsége a fényszennyezés egyik könnyen mérhető, globális jellemzője. Az égbolt fénylésének mesterséges komponense egyértelműen meghatározza az éjszakai égbolt csillagászati objektumainak (Tejút, állatövi fény, ködök, halvány csillagok) láthatóságát. Az égbolt fényssűrűsége közvetlen kapcsolatban van a mesterséges fények ökológiai hatásával, ezenkívül arányos a települések teljes fényvesztésével. Ebből kifolyólag fontos, hogy megfelelő pontossággal legyen mérhető.

Az égbolt mesterséges fényessége azért is lényeges, mert a fényszennyezés egyetlen hazai törvényi definíciójában, az országos településrendezési és építési követelményekről szóló 253/1997. (XII. 20.) Korm. rendelet (OTÉK) módosításában (211/2012. [VII. 30.] Korm. rendelet, Magyar Közlöny 2012. 103.) szerepel:

„Fényszennyezés: olyan mesterséges zavaró fény, ami a horizont fölé vagy nem kizárólag a megvilágítandó felületre és annak irányába, illetve nem a megfelelő időszakban világít, ezzel káprázást, az égbolt mesterséges fénylését vagy káros élettani és környezeti hatást okoz, beleértve az élővilágra gyakorolt negatív hatásokat is.”

Az égbolt teljes fényssűrűsége a természetes és a mesterséges források hatásainak összegéből tevődik össze. A természetes források (csillagok, Tejút, állatövi fény, természetes légkörfény) okozta fényssűrűség sem állandó. Például a légkörfény erőssége függ a naptevékenység szintjétől. A földfelszínen mérhető, látható mesterséges fények mértéke függ a légkör állapotától, az átlátszóságától. Ennek megfelelően a két komponens szétválasztása, az égbolt mesterséges fényssűrűségének meghatározása összetett feladat. A mesterséges fények égbolton megfigyelhető hatása erősen függ továbbá a légkör fizikai tulajdonságától: a páratartalom, az aeroszolok aránya jelentősen megváltoztatja a fény szóródását a légkörben. Szerencsére létezik olyan inverziós eljárás [2], amellyel a légköri



1. ábra. Az emberi szem nappali (fotopos) és éjszakai (szkotopos) látásának érzékenységi görbéje és két fényforrás spektruma.

paramétereket közvetlenül az égbolt fényssűrűség-eloszlásának mérésével is megbecsülhetjük.

Az égbolt fényssűrűségének inverziójához kidolgozott modellek alkalmasak arra is, hogy a világításban bekövetkező változások hatásait megjósoljuk. A csillagos égbolt megfelelő látványának szempontjából nagyon fontos, hogy mit látunk szabad szemmel az égbolton. Ehhez arra van szükség, hogy a szkotopos látásnak megfelelően elemezzük a lehetséges változásokat. Tekintsünk etalonnak egy olyan nátriumlámpával megvalósított világítást, ahol a lámpatestek teljesen ernyőztek, azaz a felső téréfélbe jutó fényáramhányad (ULOR, upward light output ratio) zéró. Az ULOR megmutatja a világítótestből a horizont síkja fölé távozó fényáramot a berendezés teljes fényáramához képest. A hasonló geometriájú (teljesen ernyőzött) 4400 K korrelált színhőmérsékletű LED-es világítás esetén a városok fénykupolájának fényssűrűsége a szkotopos látás tartományában körülbelül háromszorosára nő az etalnonhoz képest. Ennek oka leolvasható az 1. ábráról: a LED spektruma jobban beleesik a szem éjszakai érzékenységi görbéjébe, mint a nátriumlámpa színei.

A fénykupola teljes fényessége jól jellemezhető a megfigyelő helyén számolt, a forrás irányára merőleges felületen értelmezett vertikális megvilágítással. Ebben az esetben a szkotoposan értelmezett növekmény háromszoros. Meg kell jegyeznünk, hogy a normál fotopos fényssűrűség esetén a LED és a nátriumlámpás világítás között csak minimális eltérést találunk. A fotopos vertikális megvilágításban kifejezve hatszázaléknyi növekedést kapunk, amit az okoz, hogy a kék fény jobban szóródik a légkörben, mint a hosszabb hullámhosszú sugárzás.

Tételezzük fel, hogy a lámpatest teljes fényáramának 15%-a szóródik vissza az úttestről és a talajról az égbolt irányába, a Lambert-eloszlást követve. Ha ezen felül a teljes fényáram 5%-a közvetlenül a horizont síkja fölé vetül, ez újabb növekményt jelent az égbolt fényességében. Az égbolt felé közvetlenül távozó sugarak intenzitása közelítőleg a zenittel bezárt szög



2. ábra. Szekszárd fénykupolája a világítási rekonstrukció előtt (föül) és után (alul).

et tartalmazó, de teljesen ernyőzött lámpatestekkel elérhető, hogy az égbolt szkotopos látványa ne romoljon. A számítások szerint, a fönti feltételek mellett a nátriumlámpa 6%-nyi horizont fölé irányuló fényáramát tudjuk éppen kompenzálni a jól megvalósított, teljesen ernyőzött LED-es berendezéssel, ha a fényforrás színhőmérséklete 4400 K. Ebben az esetben nem változik az égbolt éjszakai látásnak megfelelő látványa. Alacsonyabb színhőmérséklet esetén pedig javulás érhető el. Ez lenne az igazi cél!

## Az elmélet próbája a mérés

Az égbolt fénysűrűségének mérésére alkalmasak lehetnek a csillagászatban alkalmazott CCD-kamerákra alapuló mérőrendszerek (például az USA nemzeti parkjaiban rendszeresített ilyeneket [4]), azonban ezek az eszközök terepi viszonyok között meglehetősen körülményesen használhatók, és a mérések elvégzése is időigényes. Jól bevált áthidaló megoldást tett lehetővé a digitális tükörreflexes (DSLR) fényképezőgépekben tapasztalt rohamos fejlődés. A profi és félprofi kategória kamerái kellően érzékenyek ahhoz,

negyedik hatványával növekszik (Garstang-féle modell [3]). A fénykupolából származó szkotopos vertikális megvilágításban számolva, az ernyőzött lámpatestekhez képest durván 2,6-2,7-szeres növekedéssel számolhatunk azonos színhőmérséklet esetén.

Ha az ernyőzött nátriumlámpás lámpatesthez hasonlítjuk a nem megfelelő geometriájú 4400 K színhőmérsékletű világítást, akkor együttesen már közel nyolcszorosára növekedhet az égbolt teljes fényessége – csupán 5% ULOR esetén! Ilyen mértékű változás jelentős negatív hatással lehet a Tejút és a halvány csillagok szabadszemes láthatóságára, így tovább csökkenhetnek azon területek, ahol a gyerekek megismerhetik az éjszakai égbolt igazi látványát. Mindez kulturális örökségünk egy részének elvesztését is jelenti.

A tapasztalat szerint a meglévő, lecserélendő világítások között kevés a teljesen ernyőzött, leginkább 5% feletti ULOR-értékek jellemzőek. Ez esetben, a fenti számokat figyelembe véve, 4400 K színhőmérsékletű LED-

hogy a fényszennyezésmentes helyeken is pontos mérési adatokhoz jussunk [5, 6], ráadásul a mérések jól reprodukálhatóak. Ha a település fénykupoláját különböző távolságokból és irányokból is lefényképezzük, akkor az összességében kapott információ-mennyiség elegendő ahhoz, hogy viszonylag kevés földfelszíni méréssel jól jellemezzük a fényszennyezés állapotát [2].

Az éjszakai égbolt fénysűrűség-eloszlásának mérése és a mérések párhuzamos numerikus modellezése lehetőséget ad arra, hogy objektív módon, számszerűen jellemezzük a világítási rekonstrukciók fényszennyezésre gyakorolt hatását. A mérések inverziójából számos további hasznos információ kapható: véges helyen készült mérésekből interpolálható és térképezhető a védett természeti területek fényszennyezetttségének helyzete. A városon kívülről készült felvételek alapján meghatározható a településről távozó teljes fényáram mértéke, becsülhető a közvetlenül a horizont fölé vetülő fényáram aránya. A folyamatos

mérések és monitorozások alapján jellemezhetjük a világítási rekonstrukciók hatásait.

Előzetes eredményeink születtek Szekszárd város közvilágítási korszerűsítése kapcsán. Ebben az esetben a fényképfelveteleken közvetlenül is látható, hogy a horizont síkja fölé vetülő fényáramarány határozottan csökkent a rekonstrukció után (2. ábra). A két felvétel készítése és feldolgozása azonos módon történt, garantálva a közvetlen összehasonlíthatóságot. A város fénykupolájának fotopos fénysűrűsége egyértelműen csökkent (lásd a címlap képeit), és az égbolt szkotopos fénylése is kismértékben alacsonyabb lett. Ez a változás a modellszámítások szerint jól korrelál azzal, hogy mennyire változott a felső tér-félbe sugárzott fényáramarány.

## Összefoglalás

A közvilágítás jellege jelentős változások előtt áll. Elindultak a tömeges világítási rekonstrukciók, amelyek során Magyarországon a döntően nátriumlámpás megoldásokat fehér fényű LED-es lámpatestek váltják fel. A fehér fényre áttérésnek vannak előnyei, de ugyanúgy hátrányai is, különösképpen ökológiai, tájképi és egészségügyi, azaz a fényszennyezéshez kapcsolódó szempontokból.

Tsao és társai [1] előrejelzései szerint világviszonylatban elég „borús” az éjszakai égbolt jövője – egyes helyek fénykupolái a legrosszabb esetben akár többszörösükre is növekedhetnek. És itt nem csak a csillagászatról van szó: a kékben erős fehér fényű világítás túlzott térhódításának a melatonin hormon elnyomásában jelentős szerepe lehet, ami már közegészségügyi problémákat is felvet. Az állatvilágot pedig még nem is említettük... A fényszennyezés szabályozása érdekében olyan jogalkotásnak kellene megindulnia, amellyel a teljes kibocsátott fénymennyiség és energiafelhasználás is radikálisan korlátozható lenne.

A rekonstrukciók után várható állapot nagymértékben függ attól, hogy mennyire használjuk ki a LED-es technológiában rejlő pozitív lehetőségeket. A fényáram szabályozásával az éjszaka jelentős részében csökkenthetők a fény környezeti hatásai. Megfelelő optikai tervezéssel kihasználható a LED-ek jól irányítható sugárzása, és elkerülhető, hogy a fény közvetlenül a horizont fölötti irányokba távozzon. A fényfor-

rás színhőmérsékletének megválasztása is kritikus az ökológiai és tájképi hatások szempontjából. A LED fényének irányíthatóságát és szabályozhatóságát kihasználva elérhetnénk azt a régi vágyat, hogy csak oda, akkor és olyan mértékben világítsunk, amennyire szükség van. Pozitív példa mutatkozik a már említett rekonstrukció esetén, ahol a világítás megfelelő geometriája kompenzálja a színhőmérséklet növekedését. Ha törekednénk a legfeljebb 3000 K-es színhőmérsékletre – és ahol lehetséges, a ténylegesen borostyánsárgás világítás alkalmazására –, akkor akár vissza is fordíthatnánk a fényszennyezés növekedését.

Mindeközben a kutatók egyik feladata, hogy dokumentálják a változásokat. Tervezzük, hogy elvégezzük a nemzeti parki területek teljes fényszennyezett-ségének felmérését, hosszabb távon pedig az ország teljes fényszennyezettségi térképének elkészítését. A téma művelésére külön doktori program indult a Nyugat-magyarországi Egyetem Kitaibel Kálmán Természettudományi Doktori Iskolájában két új hallgatóval. Reméljük, hogy a fényszennyezés elleni tudományos küzdelemben szereplő lelkes fiatalok száma tovább növekszik a fény nemzetközi évében.

Csak bízhatunk abban, hogy 2015 nem a felelőtlen világítás, a felesleges fények elburjánzásának növelését jelenti majd, hanem minden szinten ráeszmélünk arra, hogy jobban oda kellene figyelni a felesleges és túlzott világítás okozta problémákra. Ezért kell még hatásosabban, közösen dolgoznunk 2015-ben – talán akkor a következő generációk is ismerni fogják a Tejtűt igazi látványát.

## Irodalom

1. Tsao, J. L. és mtsai: Solid-state lighting: an energy-economics perspective. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 (2010) 354001.
2. Kolláth, Z., Kránitz, B.: On the Feasibility of Inversion Methods Based on Models of Urban Sky Glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 139 (2014) 27.
3. Garstang, R. H.: Model for Artificial Night-Sky Illumination. *Publ. Ast. Soc. Pacific* 98 (1986) 364–375.
4. Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C. B., Moore, C. A.: Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera. *Publ. Ast. Soc. Pacific* 119 (2007) 192.
5. Kolláth, Z.: Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park. *Journal of Physics: Conference Series* 218 (2010) Issue 1, id. 012001.
6. Akkaynak, D. és mtsai: Use of commercial off-the-shelf digital cameras for scientific data acquisition and scene-specific color calibration. *Journal of the Optical Society of America A* 31 (2014) 312.



# SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!**  
**Adószámunk: 19815644-2-41**

