

Az éghajlatváltozás egyik – a teljes besugárzással egyenrangúan fontos – tényezője, a planetáris albedó (a Föld fényvisszaverő-képessége) tényleges változásai meglepően kevéssé ismertek. Cikkünkben a földi és műholdas albedómegfigyelések publikált adatai alapján rávilágítunk arra, hogy a planetáris albedóban jellegzetes éjszakai, évszakos, éves és naptevékenységi ciklussal összefüggő változások figyelhetők meg, és több évtizedre visszamenően nem látható benne egyirányú trend. A legegyszerűbb eredményeket a földi obszervatóriumokban relatív méréssel végezhető földfényvizsgálatok adják.

## Földfény szonáta?

*Beethoven* közismert *Holdfény szonátájának* első tétele olyannyira gyászzenejellegű, hogy nehéz kapcsolatba hozni a telihold fényével. Az első tétel sokkal inkább emlékeztet arra a hamuszürke derengésre, amit újhholdkor a napsütötte holdsarló mellett szabad szemmel is látható napárnyékos holdfelszín ver vissza. A Holdfény szonáta (németül: *Mondscheinsonate*) elnevezés *Ludwig Rellstab* német zenekritikus-költőtől származik, aki Beethoven halála után néhány évvel először hasonlította az első tétel hatását a Luzerni-tó fölötti holdsütéshez [1]. A címadást sokan kritizálták, de ha Rellstab a Hold túlvilágot idéző sejtelmes derengésére gondolt, akkor a címet akár találnak is tarthatjuk. Az ellentmondás teljesen nem oldódik fel, ugyanis e derengés valójában nem holdfény, hanem földfény (németül: *Erdschein*). Lehet, hogy a szonáta német címének nem a *Mondschein*, hanem az *Erdschein* címet kellett volna adni?

E cikk a Föld fényvisszaverő-képességével (a planetáris albedóval) kapcsolatos eredményekbe és rejtelmekbe ad betekintést. Összefoglaljuk ezen albedó lényegét, klímatudományi jelentőségét, mérési módszereit, valamint betekintést adunk a műholdas és földi obszervatóriumi mérésekkel végzett eredményekbe. Úgy tűnik, a földfény-megfigyelési hálózat kiterjesztésével egyszerű albedómeghatározási módszer állhatna már évtizedek óta rendelkezésre.

## Az albedó és jelentősége

A Napból érkező *TSI* (Total Solar Irradiance, teljes napsugárzási teljesítménysűrűség)  $\approx 1366 \text{ W/m}^2$  egy része visszaverődik a Föld felhőzetéről és felszínéről. A visszavert és beérkező sugárzás arányát fényvisszaverő-képességnek, más néven albedónak nevezzük, amelynek értéke a Föld esetén  $A \approx 0,3$ . Egyszerűen kiszámítható a Föld üvegházhatás nélküli  $T_e$  egyensúlyi hőmérséklete: a Stefan–Boltzmann-állandó bevetésével adódó

$$T_e \approx 45,8 \cdot \sqrt[4]{TSI(1-A)} \text{ K} \approx 255 \text{ K}$$

összefüggésből világosan látszik, hogy egy bolygó egyensúlyi hőmérsékletét a *TSI* besugárzás és az *A* albedó egymással egyenrangúan befolyásolja. Az albedó növekedése első közelítésben a Földön lehűlést okoz, csökkenése pedig melegedést, de a Földnél a valóságos hatás ennél jóval összetettebb az óceán-szárazföld-légkör bonyolult kölcsönhatásai miatt.

A Föld albedóját a felszín 2/3 részét borító óceánok és az 1/3-nyi részt kitevő szárazföldek, valamint a teljes földfelszín mintegy 2/3 részét fedő felhőzet együttesen alakítják ki. A számos különleges tulajdonsággal rendelkező víz ( $\text{H}_2\text{O}$ ) fényvisszaverő-képessége rendkívül széles tartományban ingadozik. A folyékony víz albedója az Egyenlítő közelében, a felszínre merőleges beesési szögnél 0,05, de nagyobb beesési szögek esetén (a pólusokhoz közelebb) jóval nagyobb. A jég albedója 0,32–0,38; a régebbi hóé 0,45, a friss hóé 0,85. A vízgőz a fényre átlátszó, de a felhők a fény 0,1–0,85 részét képesek visszaverni, a cseppmérettől, a víz- vagy jégtartalomtól, a felhővastagságtól és a napsugárzás beesési szögétől függően. Összességében elmondható, hogy az óceánfelszín a beeső fény mintegy 0,1 részét veri vissza. A szárazföld ennél többet reflektál (annál többet, minél világosabb), a vastag felhőzet pedig a beeső fény 0,6–0,9 részét. Az erdők albedója viszonylag kicsi (a tűlevelűeké körülbelül 0,1, a lombhullatóké  $\sim 0,15$ ).

A felhőzet a légkör sugárzási tulajdonságaira meghatározó jelentőségű. Tekintettel arra, hogy a Föld felszínének körülbelül 2/3 részét felhőzet fedi, ugyanakkor a Holdon nincsenek felhők, a Föld úgynevezett Bond-féle albedója a Holdénál (0,110) sokkal nagyobb: a legfrissebb elfogadott érték 0,306. A vastag felhőzetbe burkolózó Vénusz Bond-albedója 0,770, míg a Marsé 0,250.

## A planetáris albedó mérési módszerei

A planetáris albedó meghatározásának első becslési módszere a felhős és felhőtlen területek időjárásviszonyainak részletes megfigyelésén alapult. Majd – szinte véletlenül – létrejött egy másik földi módszer is, de a



*Szarka László Csaba* geofizikus–mérnök, az MTA rendes tagja, soproni egyetemi tanár. Az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézet kutatója (1977–2010), az MTA Titkárság Kutatóintézeti Főosztály vezetője (2010–2015), az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont főigazgatója (2016–2018). 2019-ben – nyugdíjasként – az Eötvös 100 koordinációs testület elnöke volt. Elektromágneses geofizikával és környezeti kérdésekkel foglalkozik.

műholdak eljövételével az űrbéli albedómérések lettek a meghatározók. A NASA kétféle rendszeres albedómérést végez: az egyik a Terra és Aqua műholdjaira telepített MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) műszerek adatait, a másik a Suomi NPP és JPSS műholdakra telepített CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) műszerek adatait használja. A műholdas albedómérések korlátja, hogy a téralapú meghatározások minden esetben abszolút méréseket igényelnek. Az ilyen módszerrel nyert mérési eredményeket a mérőműszer metrológiai jellemzőinek lassú időbeli változása (az úgynevezett drift) túlságosan is befolyásolhatja. Ezért elvileg sokkal megbízhatóbbak az egyszerű relatív mérést igénylő földi obszervatóriumi módszerek. A véletlenül felfedezett földfénymódszer éppen ilyen.

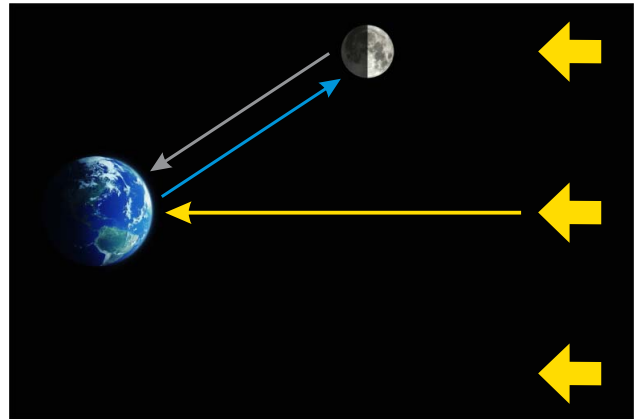
## A földfény és mérési módja

Cikkünkben földfény alatt a Hold napárnyékban lévő oldalának hamuszürke derengését értjük, azaz a Föld Nap által megvilágított részéről a napárnyékos holdfelszínre érkező, majd onnan visszaverődő, összesen tehát kétszer (egyszer a Földről, egyszer a Holdról) reflektált napfényt. Angolul: Earthshine. (A légkörpárában földfény – angolul: Earthlight – alatt a Föld felszíne és légköre által visszavert fény értendő [2]). A földfényjelenség magyarázatát (1. ábra) már *Leonardo da Vinci* is megadta.

A földfény erőssége mintegy tízezred része az igazi holdfényének. 1928-ban a francia *André Danjon* olyan macskaszem-fotométert készített, amelyben közvetlenül összehasonlítható volt a Hold napsütötte és napárnyékos részének fényessége. Felismerve, hogy a földfény/holdfény fényességarány kizárólag a Föld fényvisszaverő-képességétől függ, a magyar származású *Bakos Gusztáv* kapcsolatot igyekezett találni az 1958-as év (a Nemzetközi Geofizikai Év) jelentős időjárás eseményei és a földfényintenzitás között [4], ám az összehasonlításhoz az időjárás adatok túl hiányosnak bizonyultak. Az addigi tapasztalatok alapján 1995-ben *Steve Koonin* és munkatársai a kaliforniai Big Bear Solar Observatory-ban hozzákezdtek a földfény szisztematikus földi obszervatóriumi megfigyeléséhez.

## Albedóváltozások

A Föld-légkör rendszer albedójának idő- és térbeli változása a földi éghajlatváltozásra különösen nagy jelentőséggel bír. Az albedó folyamatos megfigyelése elvileg különfé-



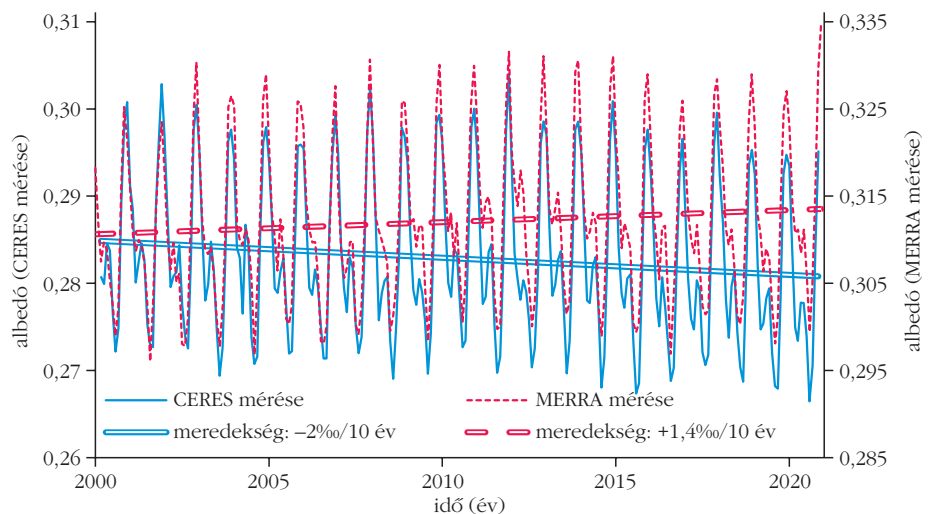
1. ábra. A földfény kialakulásának elve [3]. A Hold „égi tükröként” veri vissza a Földre a Föld által odatükrözött napfényt.

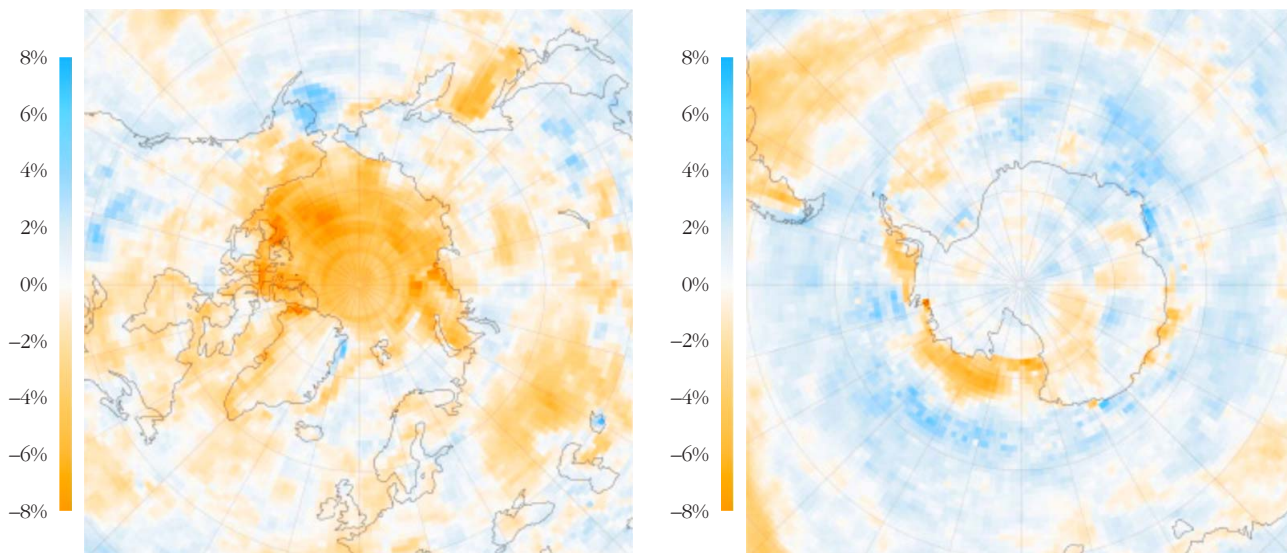
le természeti jelenségek, sőt a levegőszennyezés, vagy az ember felszín alakító tevékenysége nyomon követésére is alkalmas. A hosszú időn át tartó egyirányú változások ugyanis emberi hatást valószínűsítnek. Vajon mit mutatnak a megfigyelési eredmények?

## Műholdas mérések

Az albedó megfigyelés elsősorban műholdakra támaszkodik. A légkör tetejére vonatkozó (Top of Atmosphere, TOA) adatbázisok a következők: Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) vagy TAL-AVHRR), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS vagy TAL-MODIS), és Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES); regionális jellegű Climate Monitoring Satellite Application Facility (CM SAF), valamint egy összeillesztett Diagnosing Earth's Energy Pathways in the Climate system (DEEP-C). Albedó adatok találhatóak a NASA *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*-ban (MERRA) is.

2. ábra. A CERES (folytonos görbe) és MERRA (szaggatott görbe) albedó adatok és trendjük (dupla görbék) 2000 és 2020 között [5]. A CERES szerint 10 év alatt mintegy 2‰-kel csökken, míg a MERRA adatai szerint 1,4‰-kel nő az albedó.





3. ábra. Az albedó változása a sarkvidékeken 2000. március 1. és 2011. december 31. között [6].

A műholdas albedómérésről számos átfogó jellegű tanulmány jelent meg. A planetáris albedó hosszú idejű változásáról azonban meglehetősen kevés konkrét idősort publikáltak, és azok trendje nem teljesen egyértelmű. A 2. ábrán például a CERES és a MERRA idősorok határozottan ellentmondanak egymásnak [5].

A NASA által közvetlenül közzétett, pillanatnyilag legfrissebb idősorok a 2000 és 2011 közötti időszakra vonatkoznak [6]. A sarkvidékek albedóváltozási térképein (3. ábra) látható nagy ( $\pm 8\%$ -ig terjedő) időbeli változások eredete részben a felhőzetre, részben a felszínre vezethető vissza. Az Antarktiszról mutatott albedóváltozási térképben például érdekesség, hogy csak Nyugat-Antarktisz albedója csökken, a többi területé inkább nő, összhangban azzal, hogy geofizikai (gravitációs műholdas és geotermikus) megfigyelések szerint kizárólag Nyugat-Antarktiszon fogy a jég mennyisége, másutt inkább növekszik. Az albedóváltozásoknak sajátos kiváltó (geológiai–geofizikai, hidrológiai, meteorológiai, biológiai–növényborítottsági stb.) okai vannak.

A 4. ábra azt mutatja, hogy a planetáris albedó (az albedó globális havi átlagértékei) időbeli változásá-

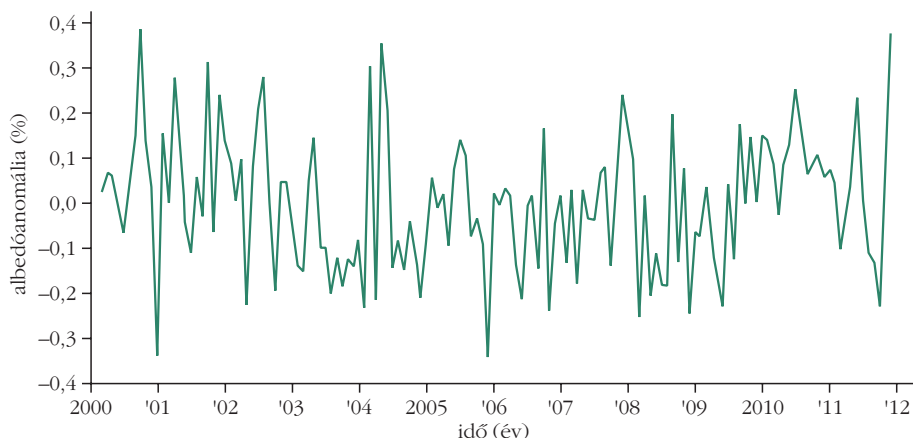
ban 2000 és 2011 között csak tizedszázalékos nagyságrendű változás ment végbe. Ugyanezen az ábrán az is kivehető, hogy a planetáris albedó 2000–2005 között határozottan csökkent, majd 2010-ig lassan visszaemelkedett.

## A földfény változásai

Koonin és munkatársai földfénymegfigyelései [7–9] logikus és egyértelmű eredményeket adtak. Megállapították, hogy az albedó egyetlen éjszaka folyamán akár 5%-kal is képes megváltozni. Ennek oka elsősorban a Föld túloldalán végbemenő esetleges időjárás-változás. Azt is kimutatták, hogy az albedóváltozásnak éjjel időjárás-változás hiányában is van egy karakterisztikus menete, ugyanis ahogy az idő múlik, a Föld forgása miatt a Földnek mindig más és más felszínrészéről vetül a fény a Holdra. Az albedóban természetesen évszakos változások is megfigyelhetők. Télen az északi félgömb albedója nagyobb (mert az a fehérebb, a hótakaró miatt), nyáron (a déli félgömb téli időszakában) pedig a déli félgömbé. A planetáris albedó éves menetében 5–8%-os tavaszi csúcsokat találtak. Ezeknek nem is annyira a létezését, hanem a mértékét tartották maguk a szerzők is meglepően nagyok. (A tavasz és a nyár közötti albedócsökkenés valószínű oka a déli félgömbnél nagyobb szárazföld/óceán arányú északi félgömb növényzetének kiszáradása lehet.)

Néhány éves idősor birtokában ugyanez a kutatócsoport a földfény 1995 óta mért éves átlagértékeinek alakulását egyébként forrásokból ismert

4. ábra. A százalékban mért planetárisalbedó-anómália időbeli változása [6].





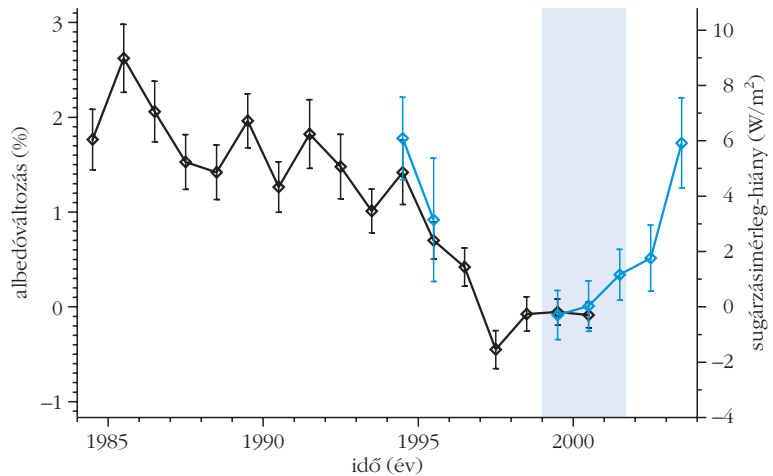
albedóadatokkal összehasonlítva mutatta be (5. ábra) [8].

Az 5. ábra szerint a planetáris albedóban 1985-től 1997-ig tapasztalt csökkenést a 21. század legelső éveiben növekedés váltotta fel. Arról, hogy a Hold árnyékos fele egyre „világosabbá” vált, 2006-ban még az MTI is hírt adott: „A 2000. évtől kezdve az adatok azt mutatták, hogy a Föld albedója nőni kezdett, tehát a Föld egyre kevesebbet tart meg a Nap melegéből. A globális felmelegedés tükrében ez meglepőnek tűnik, s a kutatók most éppen erre hívják fel a figyelmet. Mivel más úton kapott adatok is alátámasztják ezt a megfigyelést, és bizonyos módszerekkel az adatokat már 60 éve gyűjtik, a tudósok most úgy vélik: nem lehetetlen, hogy egy nagyjából tíz éves periódusú rendszeres ingadozásról van szó, melynek oka még nem ismert.” A hosszabb időszakra vonatkozó trendváltozások (így a „nagyjából tíz éves periódusú jelenség”) még tisztábban látszanak abból a tanulmányból, amely az 1999 és 2014 közötti 16 éves időszakra mutatta be az albedó menetét [9]. A 6. ábrát látva a naptevékenységi ciklusokat ismerők számára kézenfekvő és nyilvánvaló, hogy a földfény változása a ~11 éves naptevékenységgel van szoros összefüggésben.

Különbéle összehasonlításokból (7. ábra) úgy gondoljuk, hogy a földfény a Földön kívüli jelenségek közül leginkább a naptevékenységgel és a helioszféra (napmágnestér) változásaitól elválaszthatatlan galaktikus kozmikus sugárzással mutatja a legszorosabb kapcsolatot.

## Összefoglalás és következtetések

Az albedó földfényalapú mérése egyszerű relatív mérés: a Hold napárnyékos és napsütötte része fényerő-ségarányának meghatározásán alapszik. Egyszerűsége mellett megbízható is: a mérési eredmények nem pusztán összhangban vannak az összehasonlíthatatlanul drágább és bonyolultabb feldolgozású műholdas albedóeredményekkel, hanem azokhoz képest egyértelműbb képet adnak. Az éjszakai, évszakos, éves és évtizedes léptékű változásokból a földfény Bakos Gusztáv által megsejtett időjárási és éghajlati összefüggései meglepően jól követhetők. Nem lehet eléggé hangsúlyozni, hogy a planetáris albedóban nincs egyirányú trend (ami, ha lenne, nagy valószínűséggel emberi hatást tükrözne). Az egyes területeken (például Nyugat-Antarktiszon) tapasztalt jelentős dinamikájú albedóváltozások ellenére a planetáris albedó hosszú időtávon alig változik. Több évtizedes léptékben a tapasztalt időbeli változás Földön kívüli jelenségekkel, leginkább a galaktikus kozmikus sugárzással mutat szor-



5. ábra. Rekonstruált (fekete) és a Big Bear Solar Observatory-ban földfényméréssel meghatározott (kék) éves reflexiós anomáliák (1994–1995 és 1999–2003), az 1999–2001 közötti átlagértékhez viszonyítva. A jobb oldali függőleges skála  $W/m^2$ -ben mutatja a sugárzási mérleg hiányát [9].

ros összefüggést. Habár a Big Bear Solar Observatory mellett egyéb mérőhelyek (a Krím-félszigeten, a Kanári-szigeteken és Hawaiiin) is létesültek a földfény megfigyelésére, és a földfény mérését a világűrbe is szeretnék kivinni [11], a földfény földi obszervatóriumi mérése érdemtelenül elhanyagolt [12–16].

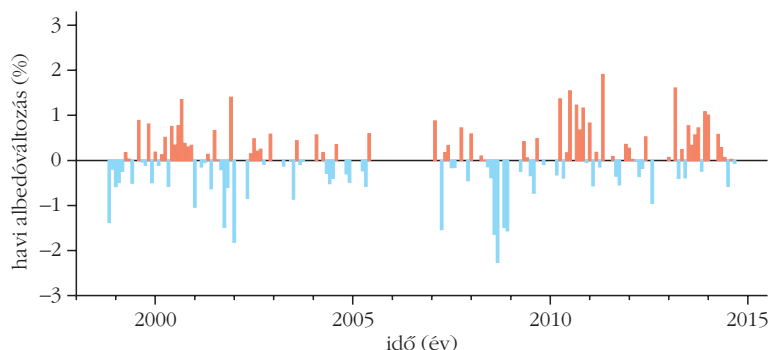
Amint a földfénymérésben kitüntetett szerepet játszó S. E. Koonin amerikai fizikus 2021-ben megjelent tudomány- és klímapolitikai könyvében [17] írja, a kutatóknak nem több, és nem kevesebb a kötelessége, mint hogy beszámoljanak mindarról, amit tudnak, és mindarról, amit nem. És hogy a megfigyelési eredményeknek jóval, összehasonlíthatatlanul nagyobb a jelentősége, mint a különféle modellezéseké. Jelen tanulmány az albedó terén e kérdést kívánta körüljárni.

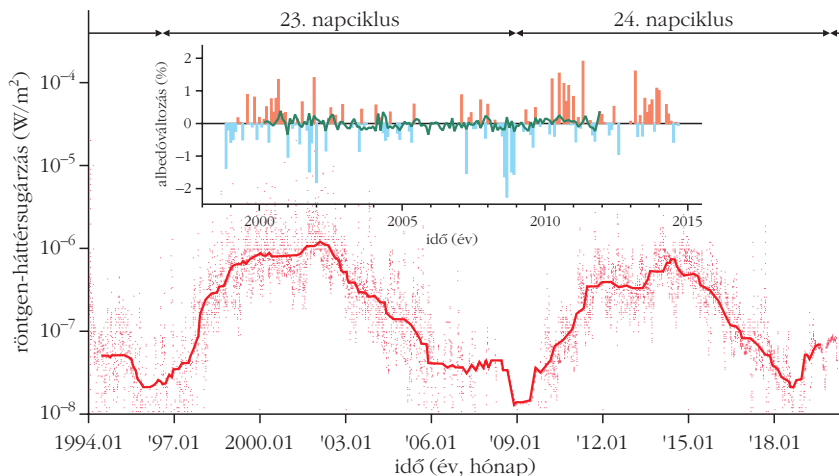
A Holdfény szonáta harmadik tétele – a gyászos első és a gyermekien egyszerű második tételt követően – nehéz, de reménytelen munkára hív.

## Irodalom

- Schwarm B: Moonlight-Sonata. *Encyclopedia Britannica*, 10 Apr. 2016, <https://www.britannica.com/topic/Moonlight-Sonata> (2021. július 21.)
- Horváth G, Bernáth B, Suhai B, Barta A: First observation of the fourth neutral polarization point in the atmosphere. *J. Opt. Soc. Am. A* 19/10 (2002) 2085–2099.

6. ábra. Az albedó havi átlagának időbeli változása 1998–2014 között, földfénymérések alapján [9].





7. *ábra.* Felső grafikonpár: a földfény időbeli változása 1998–2014 között (megegyezik a 6. *ábrával* [9]) és a NASA 2000–2011 közötti időszakra közzétett albedógrafikonja (megegyezik a 4. *ábrával* [6]). A két időszakos léptéke azonos. Alsó grafikon: a röntgen-háttérsugárzás az 1–8 Å tartományban [10].

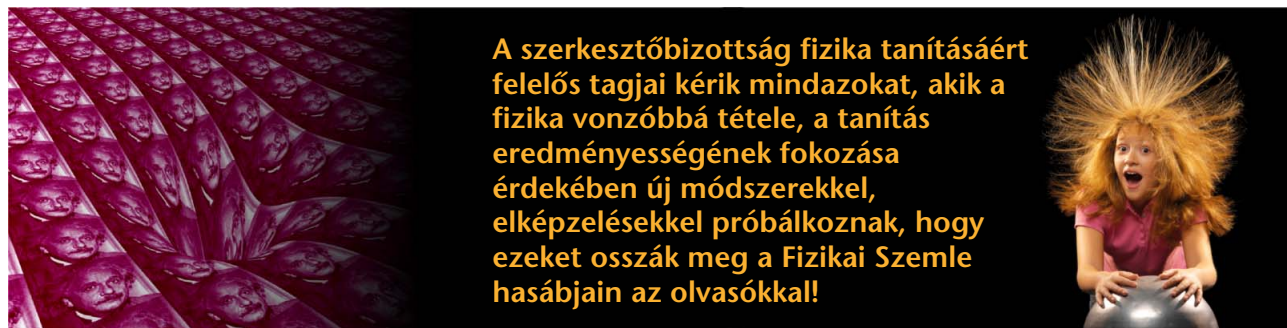
3. Seronik G.: *Earthshine Delight*. (2013). <https://skynews.ca/EARTHSHINE-DELIGHT/>
4. Bakos G: Measures of the Earthshine. *SAO Special Report #162* (1964) <http://cdsads.u-strasbg.fr/pdf/1964SAOSR.162....B>
5. Koutsouyiannis D: Rethinking Climate, Climate Change, and Their Relationship with Water. *Water* 13 (2021) 849. <https://doi.org/10.3390/w13060849>
6. NASA (2021): *Measuring Earth's Albedo by NASA*. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/84499/measuring-earthsalbedo?src=ve> (2021. július 12.)
7. Goode P R, Qiu J, Yurchyshyn V, Hickey J, Chu M-C, Kolbe E, Brown C T, Koonin S E: Earthshine observations of the Earth's reflectance. *Geoph. Res. Lett.* 28 (2001) 1671–1674. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000GL012580>
8. Pallé E, Goode P R, Montañés-Rodríguez P, Koonin S E: Changes in Earth's Reflectance over the Past Two Decades. *Science* 304 (2004) 5675, 1299–1301. [http://research.iac.es/galeria/epalle//reprints/Palle\\_et\\_al\\_Science\\_2004.pdf](http://research.iac.es/galeria/epalle//reprints/Palle_et_al_Science_2004.pdf)
9. Pallé E, Goode P R, Montañés-Rodríguez P, Shumko A, Gonzalez-Merino B, Martinez Lombilla C, Jimenez-Ibarra F, Shumko S, Sanroma E, Hulist A, Miles-Paez P, Murgas F, Nowak G, Koonin S E: Earth's albedo variations 1998–2014 as measured from ground-based earthshine observations. *Geoph. Res. Letters* 43 (2016) 4531–4538, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL068025>
10. SID Monitoring Station: *X-ray Background Flux in the range 1 to 8 Å*. (2021). <https://sidstation.loudet.org/solar-activity-en.xhtml>
11. Löffler T, Petri J, Fléron R, Thejll P, Klinkner S: Feasibility study of high precision measurement of Earth Albedo in space. *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-5621, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5621>, 2021.
12. Thejll P, Flynn C, Gleisner H, Mattingly A: Earthshine: not just for romantics. *Astronomy & Geophysics*, 49 (2008), 3, 3.15–3.20, <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2008.49315.x>

13. Agrawal D C: Apparent magnitude of earthshine: A simple calculation. *Eur. J. Phys.* 37/3 (2016). [https://www.researchgate.net/publication/281146827\\_Apparent\\_magnitude\\_of\\_earthshine\\_A\\_simple\\_calculation](https://www.researchgate.net/publication/281146827_Apparent_magnitude_of_earthshine_A_simple_calculation)
14. Agrawal D C: Earthshine and moonshine are equivalent astronomical phenomena: addendum to 'Apparent magnitude of earthshine: a simple calculation'. *Eur. J. Phys.* 37/4 (2016), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/37/4/049401>
15. Kraus S F: Measuring the Earth's albedo with simple instruments. *Eur. J. Phys.* 42 (2021) 035604. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/abe8e4>
16. Thejll P, Gleisner H, Flynn C: Influence of celestial light on lunar surface brightness determinations: Application to earthshine studies. *Astronomy & Astrophysics* 573 (2015) A131.
17. Koonin S E: *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*. BeBella Books Inc, Dallas, 2021

## Epilógus

A földfény- és CERES adatok idősorát 2017-ig kiegészítő, 2021. szeptember 8-án megjelent cikk [E1] a korábbiaktól eltérő következtetésre jut. A vezető szerző szeptember 30-i nyilatkozata szerint „17 év igen csekély albedóváltozása után nagy meglepetésként ért bennünket a legutóbbi három év adataiból kirajzolódó jelentős albedócsökkenés” [E2]. A MERRA-ról október 1-jén jelent meg friss publikáció [E3]. Eszerint a földfelszín elérő napsugárzás kontinensnyi léptékű, időben változó mintázatok, és némileg eltérő trendeket mutat. Az új tanulmányok meglepő fordulatai a kérdéskör jelentőségét és – a szerző véleménye szerint – a klímatudomány alapkérdésének megoldatlanságát jelzik.

- E1. Goode P R, Pallé E, Shoumko A, Shoumko S, Montañés-Rodríguez P, Koonin S E: Earth's Albedo 1998–2017 as Measured From Earthshine. *Geoph. Res. Lett.* 48/17 (2021) e2021GL094888, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021GL094888>
- E2. AGU Press Release, September 30, 2021: *Earth is dimming due to climate change*. <https://news.agu.org/press-release/earth-is-dimming-due-to-climate-change/>
- E3. Wang Z, Zhang M, Wang L, Qin W: A comprehensive research on the global all-sky surface solar radiation and its driving factors during 1980–2019. *Atmospheric Research* (2021), 105870, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809521004269>



**A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!**