

atomerőműben, extrém magas radioaktív sugárzási környezetben a reaktor falán megtelepedett gombafaj (16. ábra). A gomba fekete színű, mivel nagy mennyiségű melanint termel, amivel a magas háttérsugárzás ellen védekezik. A különleges gombát a Nemzetközi Űrállomáson tanulmányozzák tovább.

Legvégül megemlítjük egy nemrégiben publikált kutatás eredményeit [8], amelyben kifejezetten egy, az Enceladus óceánjáról mostanáig kialakított modell ismeretében potenciálisan életképes mikroorganizmus vizsgálatára összpontosítottak. Ez a metanogén (oxigénmentes környezetben az anyagcsere-folyamatai révén metánt termelő) és az archeák (prokarióta egysejtűek) csoportjába tartozó *Methanothermococcus okinawensis*, amely anyagcsereje során a molekuláris hidrogént és a szén-dioxidot metánná konvertálja. Ezek közül mindegyik összetevő megtalálható az Enceladus gejzírjeiből kiáramló anyagban. Földünkön ezek az organizmusok a japán partok mentén található mélytengeri hidrotermális kúrtók közvetlen környezetében élnek. Az egysejtűt vizsgáló kutatócsoport több metanogén szerkezetet is megvizsgált, de kísérleti körülmények között egyedül a *Methanococcus okinawensis* bizonyult túlélőnek, kiváltképp amikor az Enceladus gejzírjeiből kimutatott formaldehidet, szén-dioxidot és ammóniát is hozzáadták a mesterséges közegehez. Elméletileg tehát elég valószínű, hogy ha a jövőben *M. okinawensist* juttatnánk az Enceladus óceáni

kürtőinek közelébe, akkor ez a mikroorganizmus nagy valószínűséggel képes lenne ott megtelepedni.

## Irodalom

1. J. H. Waite Jr, et al: Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and  $^{40}\text{Ar}$  in the plume. *Nature* 460 (2009) 487–490.
2. F. Postberg, N. Khawaja, B. Abel, G. Choblet, C. R. Glein, M. S. Gudipati, B. L. Henderson, H.-W. Hsu, S. Kempf, F. Klenner, G. Moragas-Klostermeyer, B. Magee, L. Nölle, M. Perry, R. Reviol, J. Schmidt, R. Srama, F. Stolz, G. Tobie, M. Trierloff, J. H. Waite: Macromolecular organic compounds from the depths of Enceladus. *Nature* 558 (2018) 564–568.
3. H.-W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horányi, A. Juhász, N. Altobelli, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, S. Tachibana, S. Sirono, G. Moragas-Klostermeyer, R. Srama, Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. *Nature* 519 (2015) 207–210.
4. E. Landau: *New Clues to Ceres' Bright Spots and Origins*. NASA, 2015.
5. M. Neveu, S. J. Desch: Geochemistry, thermal evolution, and cryovolcanism on Ceres with a muddy ice mantle. *Geophys. Res. Lett.* 42/10, (2015) 197–206.
6. G. McCartney, G. Hautaluoma, A. Johnson: *Mystery Solved: Bright Areas on Ceres Come From Salty Water Below*. NASA, (2020)
7. Pálinskás G.: Túlélők kerestetnek! Élet extrém körülmények között. *Kémiai Panoráma* 2017/17
8. R.-S. Taubner, P. Pappenreiter, J. Zwicker, D. Smrzka, C. Pruckner, P. Kolar, S. Bernacchi, A. H. Seifert, A. Krajete, W. Bach, J. Peckmann, C. Paulik, M. G. Firneis, C. Schleper, S. K.-M. R. Rittmann: Biological methane production under putative Enceladus-like conditions *Nature Communications* 9 (2018) Article number: 748.

# MIÉRT KELETRE NÉZ A NAPOT MÁR NEM KÖVETŐ NAPRAFORGÓK (*HELIANTHUS ANNUUS*) VIRÁGZATA?

## 1. rész: környezetoptikai számítások és biológiai mérések

Horváth Gábor, Virágh Balázs, Horváth Dániel

ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium, Budapest

Slíz-Balogh Judit

ELTE Csillagászati Tanszék, Budapest

Horváth Ákos

Hamburgi Egyetem, Meteorológiai Intézet, Hamburg

Egri Ádám

Ökológiai Kutatóközpont, Vízi Ökológiai Intézet, Budapest

Jánosi Imre

Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz- és Környezetpolitika Tanszék, Budapest

A napraforgó (*Helianthus annuus*) virágzata a virágképzés után állandóan kelet felé néz, s ettől kezdve már nem követi a Napot. Habár e *Charles Darwint* és botanikus fiát [1] is izgató jelenség lehet-

séges okaira korábban számos magyarázatot is javasoltak, eddig még egyiket sem ellenőrizték kísérletileg. Cikkünkben a napraforgó-virágzat keleti irányulásának környezetoptikai magyarázatát adjuk [2]. A Nap égi mozgása csillagászati adatainak, az amerikai Boone County (aminek környékéről származik a házasított napraforgó), Közép-Olaszország, Közép-Magyarország és Dél-Svédország felhőzottségi adatainak, a Napot már nem követő, érett napraforgófej

Köszönjük *Érdei Báltint* emeritusz professzornak (ELTE Csillagászati Tanszék) a Nap égi pályájának számításában használt matematikai képleteket. Hálásak vagyunk *Pereszlényi Ádámnak* (ELTE Biológiai Fizika Tanszék) a napraforgó biológiájáról folytatott beszélgetésekért.

időfüggő dőlésszögének, valamint a napraforgófej virágzata és hátoldala fényelnyelési spektrumainak felhasználásával kiszámítottuk a virágzat és a fejhát által elnyelt fényenergiát a virágképzés kezdete (a napkövetés leállása) és a magok teljes érése között. Megállapítottuk, hogy ha a délutánok felhősebbek a délelőttöknél, akkor a keletre néző napraforgó-virágzat nyeli el a legtöbb fényenergiát, ami előnyt jelent a magfejlődés és magérés szempontjából, továbbá a virágzat nyugati orientációja előnyösebb lenne, mint a déli. Mindennek fő oka, hogy a napraforgó eredeti háziasítási és későbbi fő termesztési területein délután nagyobb az átlagos felhővalószínűség, mint délelőtt. Mivel a napraforgófej fotoszintetizáló zöld háta akkor nyelné el a legtöbb fényenergiát, amikor a virágzat nyugatra nézne, a zöld fejhát által elnyelt fényenergia maximalizálása nem magyarázhatja a virágzat keletre nézését. Ugyaneze-

ket az eredményeket kaptuk Közép-Olaszország és Közép-Magyarország esetében is, ahol a délelőttök ugyancsak kevésbé felhősek, mint a délutánok. Ezzel szemben Dél-Svédországban a délelőttök felhősebbek a délutánoknál, miáltal a nyugatra néző napraforgó-virágzat nyelné el a legtöbb fényenergiát. De a svéd napraforgók érett virágzata is keletre néz. Szerintünk a napraforgók érett virágzata genetikailag kelet felé rögzült irányának egyik oka, hogy háziasításuk egy olyan földrajzi régióban történt, ahol a délutánok felhősebbek a délelőttöknél. Cikkünk első részében a napraforgó-virágzatok keletre nézésének korábbi magyarázatairól szólnunk, majd a környezetoptikai számítási és biológiai mérési módszereinket írjuk le, a második részben pedig eredményeinket ismertetjük és elemezzük [2].

## Bevezetés

A napraforgó (*Helianthus annuus*, Linnaeus 1753) fejlődő virágzatot tartalmazó fiatal, még éretlen feje és a levelei egy darabig folyamatosan úgy változtatják irányukat, hogy felületük mindig közelítőleg a Nap felé irányuljon [1]. Napnyugtakor a napkövető, fiatal fej normálvektorának azimutiránya közel nyugatra mutat, éjjel pedig már jóval napkelte előtt visszafordul keletre. E jelenség neve heliotropizmus



*Horváth Gábor* fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



*Virágh Balázs Péter* az ELTE-n 2021-ben szerezte meg fizika BSc fokozatát a biofizikus szakirányon. „A napraforgóvirágzat (*Helianthus annuus*) állandó keleti irányának környezetoptikai magyarázata” című diplomamunkáját a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában írta Horváth Gábor témavezetésével. Az indiai klasszikus zenét előadói szinten műveli. A budapesti Ganapati Pakhawaj Zeneiskola alapítója, Pakhawaj és a klasszikus indiai zene művészetének terjesztője.



*Horváth Ákos* az ELTE-n végzett meteorológusként, majd az Arizonai Egyetemen (Tucson) szerzett MSc és PhD fokozatot légkörtudományból. Utána évekig a NASA Sugárhajtóművek Laboratóriumában (Pasadena) és a Miami Egyetemen volt vendégkutató. Fő kutatási területe a meteorológiai és vulkáni felhők műholdas távérzékelése a látható és infravörös hullámhossztartományban. Jelenleg a Hamburgi Egyetem Meteorológiai Intézetének Sugárzási és Távérzékelési csoportjában kutat.



*Horváth Dániel* szabadúszó autodidakta informatikus.



*Egri Ádám* az ELTE-n végzett biofizikusként, majd ott szerezte meg a PhD fokozatot a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Jelenleg az Ökológiai Kutatóközpont Vízi Ökológiai Intézetének tudományos munkatársa. Elsősorban izeltlábúak vizuális ökológiájával foglalkozik, különös tekintettel a látórendszerük spektrális és polarizációs érzékenységre.



*Slíz-Balogh Judit* a BME-n végzett matematikus-mérnökként, majd menedzserként dolgozott a Graphisoft SE szoftverfejlesztő cégnél. A Pázmány Péter Katolikus Egyetem Hittudományi szakán hittanári, majd az ELTE-n csillagász diplomát szerzett, ahol 2020 őszén doktorált a Fizika Doktori Iskola Részecskefizika és Csillagászat programjában. Fő kutatási területe az égi mechanika, azon belül a Naprendszer Lagrange-pontjainak kaotikus dinamikája és képalakító polarimetriája.



*Jánosi Imre Miklós* fizikus, az MTA doktora, az MTA Statisztikai Fizikai Tudományos Bizottság elnöke. 2021 elejétől a drezdai Max Planck Institut für Physik Komplexer Systeme vendégkutatója volt. 2021 szeptemberétől a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz- és Környezetpolitikai Tanszék vezetőjeként folytatja korábbi, több évtizedes ELTE-s pályáját.

(napkövetés). A levelek és a fej azimutiránya körülbelül  $12^\circ$ -kal lemarad a Nap azimutjától, ami közel 48 perc késésnek felel meg. Felhős napokon a fiatal napraforgófej azimutjának kelet-nyugati oszcillációja leáll és a fej normálvektora végig közel függőleges marad, de felhős időben az idősebb fej egy belső bioritmus miatt mindaddig oszcillál, amíg a szár még növekszik. Az optimális szint alatti vagy fölötti talajnedvesség megakadályozza a napkövetést még tiszta ég alatt is.

A vad és háziasított *Helianthus annuus* napraforgók mellett néhány vad rokonfajnál is megfigyelhető heliotropizmus. Számos más taxon is hasonlóságot mutat a virág(zat)ok napkövetésében: ilyen például a *Chrozophora tinctoria* (Euphobiaceae), *Xanthium strumarium* (Asteraceae), valamint számos sarkvidéki és alpesi faj [3].

A napraforgó tenyészidőszakában (földrajzi helytől függően márciustól szeptemberig) csak a tavaszi napéjegyenlőségkor (március 21-én vagy 22-én) kel és nyugszik a Nap pontosan a földrajzi keleti, illetve nyugati irányban. A tavaszi napéjegyenlőség előtt/után a Nap délkeleten/északkeleten kel és délnyugaton/északnyugaton nyugszik. A napraforgó virágképzése (a virágzás időszaka, különösen a porzók érése) körülbelül a vetés utáni 60. napon kezdődik [4]. E fejlődési szakaszban kezd a sok apró virágocskából álló éretlen virágzat nyílni, ami már nem követi a Napot, és normálvektorának azimutja állandóan keletre néz. Virágképzéskor a levelek fejlődése leáll, és a napraforgó erőforrásait a magtermelésre fordítja.

A napkövető, fiatal napraforgó leveleinek és fejének éjszakai mozgását nem a fény vezérli. Éjszaka a fej azimutjának nyugat-keleti szögsebessége  $26^\circ/\text{óra}$ , nappal pedig a kelet-nyugati elfordulása  $13^\circ/\text{óra}$  [5]. Az éjszakai elfordulás mechanizmusának kétszer nagyobb szögsebessége egy belső „rugószerkezetben” nappal felgyűlt energia felszabadulásának eredménye lehet oly módon, hogy a szár, mint rugó napközbeni aktív elfordulásába fektetett energia napnyugta után spontán visszafordulást eredményez [5].

A fiatal napraforgófej napkövetése egy feltételezett molekuláris jel és/vagy szerkezeti változás következtében lelassul, majd a virágképzés kezdetétől megáll [6]. Ezután a virágzat normálvektora végig keletre néz, amit csak a heves szelek és bőséges esők módosíthatnak [4]. A napot már nem követő, érett fej közel 25%-kal járul hozzá az egész napraforgó fényelnyeléséhez. A virágképzés után a virágzat normálvektora fokozatosan egyre lejjebb hajlik a fej növekvő súlya miatt, a levelek napkövetése pedig egyre csökkenő amplitúdóval folytatódik.

A napraforgószár irányított növekedése és napszaki (cirkadián) szabályozása a fiatal napraforgófej napkövetését és éjszakai reorientációját keleti irányba tolja el [7]. E heliotróp mozgás és az érett napraforgófej napkövetésének leállása nagyobb biomasszához és a virágzat rovarok általi hatékonyabb beporzásához vezethet. A napkövetésért a szár keleti és nyugati oldalának ellentétes fázisú növekedési mintázatai fele-

lősek. A fénykövető (fototróp) növekedés szabályozásában szerepet játszó gének (az óragének kivételével) eltérően fejeződnek ki a napkövető száruk ellentétes oldalain. A szakirodalomban az egymást kölcsönösen nem feltétlenül kizáró következő hipotetikus/spekulatív magyarázatok találhatók arra, hogy miért keletre néznek az érett napraforgó-virágzatok:

1. Az érett napraforgó-virágzat egy adott égtáj (azimut) felé való irányulása az égre nézés helyett hasznos lehet, mert ha keskenyebb az a sáv, ahol a magvő madarak megkapaszkodhatnak a napraforgófejen, akkor csökkenhet az általuk okozott magvesztés [8]. Ez azonban igaz a napraforgó-virágzat bármely azimutirányára is, miáltal nem magyarázza a keletre rögzült irányt.

2. A Napot már nem követő napraforgó-virágzat keletre nézésének az lehet az előnye, hogy a déli órákban csökkentheti a hőterhelést [4, 5]. Azonban szimmetriaokból kifolyólag, a nyugatra nézésnek is ugyanez lenne a termikus előnye.

3. Az érett napraforgó-virágzat keletre nézése lehetővé teszi, hogy több fényenergiát nyelhessen el a kora reggeli órákban, ami felgyorsíthatja a virágzatra lecsapódott harmat napkelte utáni felszáradását, miáltal csökkenhet a gombásodás veszélye [4]. Ezt az elképzelést kísérletileg még nem ellenőrizték.

4. Az érett napraforgó-virágzatok keleti irányultsága vonzóbbá teheti őket a beporzó rovarok számára, mivel így több napfényt nyelnek el reggel, amely időszak egybeesik a portokbeli virágpor megjelenésével [9]. Terepkísérletekben kimutatták, hogy a napraforgó-virágzat hőmérséklete hozzájárul, de nem kizárólagosan határozza meg a természetesen keletre néző és a mesterségesen nyugatra fordított napraforgó-virágzatok beporzókra kifejtett eltérő vonzerejét [7].

5. A Napot már nem követő napraforgó-virágzat keletre nézése csökkentheti a hőterhelést, különösen a délután magas besugárzású időszakában [8]. A hűvösebb virágzat, a virágpor életképességének és termékenységének javítása által, növelheti a termés hozamot, mert a pollen sterilitása  $30^\circ\text{C}$  fölött a hőmérséklettel nő [8, 10]. Azonban a napraforgó elterjedési régióiban délután a napsugárzás intenzitása helyett a léghőmérséklet a magasabb, így az általában több délutáni felhő miatt az összbesugárzás többnyire kisebb, mint délelőtt.

6. A napraforgófej magasabb hőmérséklete a mag gyorsabb éréséhez, de csökkent magtömeghez vezet [10]. A kelet felé néző napraforgófejek felületi hőmérséklete  $3-8^\circ\text{C}$ -kal alacsonyabb, mint azoké, amelyeket a déli órákban mesterségesen az ég felé irányítottak [4, 9]. Azonban szimmetriaokból ugyanez igaz a mesterségesen nyugat felé irányított napraforgófejekre is.

Bár a fiatal napraforgófej napkövetésének és éjszakai visszafordulásának már számos élettani részletére fény derült [6, 7], a Napot nem követő, érett napraforgó-virágzat keletre nézésének környezeti és/vagy növényfiziológiai okaira és ökológiai szerepeire még

mindig nincs kielégítő magyarázat. Cikkünkben az érett napraforgó-virágzat állandó keleti orientációjának környezetoptikai magyarázatát ismertetjük [2]. Eszerint, ha a délutánok felhősebbek a délelőttöknél, akkor a virágzat keletre nézése maximalizálja az általa elnyelt fényenergiát, ami előnyt jelent a magfejlődés és magérés szempontjából. Csillagászati (a Nap égi mozgása), meteorológiai (a felhőzet napi átlagos óránkénti változása) és növényfiziológiai (a napraforgófej időfüggő dőlésszöge és elnyelési spektrumai) adatok felhasználásával végzett számításainkkal megmutatjuk, hogy abban a földrajzi régióban, ahonnan a házasított napraforgó származik – például az Észak-Amerika keleti részén fekvő Boone County-ban [11], nem pedig Mexikóban, amint korábban feltételezték –, a kelet felé (és nem nyugatra vagy délre) néző napraforgó-virágzat nyel el maximális fényenergiát, mivel ott a délutánok általában felhősebbek a délelőttöknél. E magyarázat nem zárja ki néhány korábbi hipotézis érvényességét, amelyek az érett napraforgó-virágzatok keleti orientációjának ökológiai jelentőségét próbálták magyarázni.

## Számítási módszerek

A napraforgó-virágzat által elnyelt fényenergia

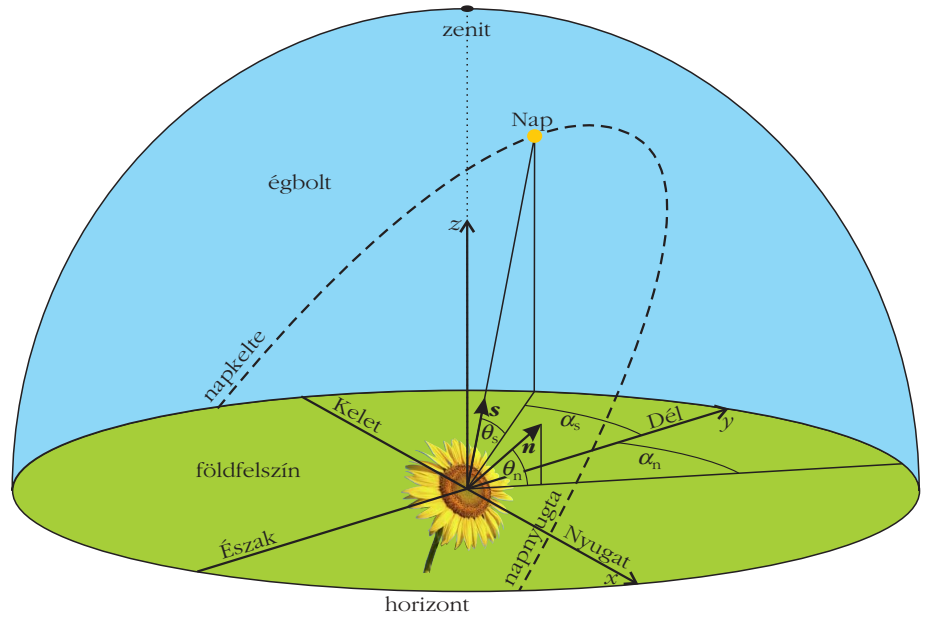
Az 1. ábra  $x$ - $y$ - $z$  koordináta-rendszerében legyen a napraforgó-virágzat felületének normálvektora

$$\mathbf{n} = (\cos\theta_n \sin\alpha_n, \cos\theta_n \cos\alpha_n, \sin\theta_n), \quad (1)$$

ahol az  $x$  és  $y$  tengelyek rendre nyugati és déli irányúak, a  $z$  tengely pedig függőlegesen fölfelé mutat, a normálvektor  $-90^\circ \leq \theta_n \leq +90^\circ$  elevációs szögét a vízszintestől mérjük ( $\theta_n > 0^\circ$  a horizont fölött és  $\theta_n < 0^\circ$  a horizont alatt), és az  $\alpha_n$  azimutszöget az óramutató járásával megegyező irányban mérjük az  $y$  tengelytől. Modellünkben a napraforgó virágképzése után az  $\alpha_n$  szög állandó, mivel a fej már nem követi tovább a Nap mozgását az égen, és a  $\theta_n(t)$  szög  $t$  idő szerinti változását (a fej fokozatosan növekvő súlya miatti csökkenését) a terepen mértük (lásd cikkünk 2. részében). A Nap felé mutató egységvektor:

$$\mathbf{s} = (\cos\theta_s \sin\alpha_s, \cos\theta_s \cos\alpha_s, \sin\theta_s), \quad (2)$$

ahol  $\theta_s$  és  $\alpha_s$  rendre az  $\mathbf{s}$  elevációs szöge és azimutszöge (1. ábra). Ha  $\theta_n = 0^\circ$  és  $\theta_s = 0^\circ$ , akkor a virágzat füg-



1. ábra. Az égbolt gömbi geometriája a napraforgó-virágzat síkjának  $\mathbf{n}$  normálvektorával és a Nap irányába mutató  $\mathbf{s}$  egységvektorral.

gőleges és a Nap a horizonton van, míg  $\theta_n = +90^\circ$  esetén a vízszintes virágzat a zenitre néz. A Nap június 21-én tetőzik (kulminál)  $\theta_s = 74.5^\circ$  elevációs szöggel Boone County (Kentucky, USA,  $39,0^\circ$  É,  $-84,75^\circ$  K) szélességén, amely régióból származik a házasított napraforgó [11].  $\alpha_n = -90^\circ, 0^\circ$  és  $+90^\circ$  esetén a virágzat rendre keletre, délre és nyugatra néz. Az északkeletre, délkeletre, délnyugatra és északnyugatra néző virágzatokat rendre a  $-180^\circ < \alpha_n < -90^\circ, -90^\circ < \alpha_n < 0^\circ, 0^\circ < \alpha_n < +90^\circ$  és  $+90^\circ < \alpha_n < +180^\circ$  azimutszögek jellemzik.

Az égboltról egy vízszintes felület által kapott teljes (globális) fénysugárzási intenzitás a direkt (közvetlen) és diffúz (szórt) sugárzások összege:

$$I_{\text{teljes}} = I_{\text{direkt}} + I_{\text{diffúz}}. \quad (3)$$

$$I_{\text{diffúz}} = D I_{\text{teljes}}, \quad (4)$$

ahol  $D$  a teljes besugárzás diffúz hányada. (3) és (4) felhasználásával kapjuk:

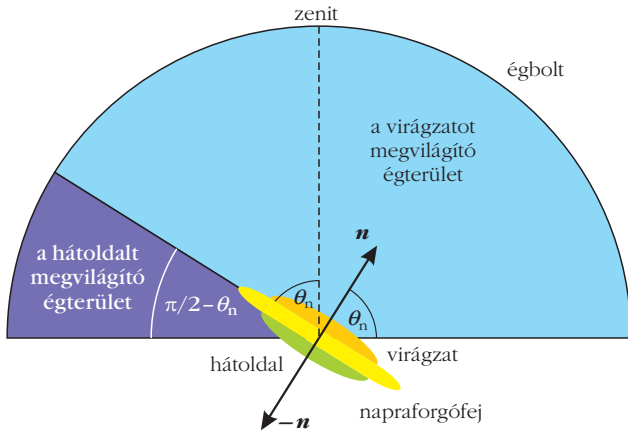
$$I_{\text{diffúz}} = I_{\text{direkt}} \frac{D}{1-D}. \quad (5)$$

A besugárzás szempontjából a következő két különböző meteorológiai helyzet a fontos:

1. A  $0 \leq \sigma(t) \leq 1$  időfüggő valószínűséggel előforduló felhős helyzetben a felhők gyakran eltakarják a Napot.

2. Az  $1-\sigma(t)$  valószínűséggel előforduló napos helyzetben a Napot csak ritkán takarják felhők.

A napraforgófej virágképzésének végétől számított  $i$ -edik nap napkeltéje és napnyugtája között a napraforgó-virágzat által elnyelt teljes fényenergia a direkt nap-sugárzásból elnyelt  $E_{\text{nap},i}(\theta_n, \alpha_n)$  energia, a felhős idő diffúz sugárzásából elnyelt  $E_{\text{diffúz},i}^{\text{felhős}}(\theta_n, \alpha_n)$  energia és a napos idő diffúz sugárzásából elnyelt  $E_{\text{diffúz},i}^{\text{napos}}(\theta_n, \alpha_n)$  energia összege:



2. ábra. Az égbolt azon  $(\theta_n + \pi/2)/\pi$  hányada (világoskék), ahonnan egy  $\mathbf{n}$  normálvektorú,  $\theta_n$  elevációs szögű napraforgó-virágzat diffúz égfényt kap, valamint az ég azon  $(\pi/2 - \theta_n)/\pi$  hányada (sötétkék), amelyből a napraforgófej  $-\mathbf{n}$  normálvektorú hátoldala diffúz besugárzásban részesül.

$$E_i = E_{\text{diffúz}, i}^{\text{felhős}}(\theta_n, \alpha_n) + E_{\text{nap}, i}(\theta_n, \alpha_n) + E_{\text{diffúz}, i}^{\text{napos}}(\theta_n, \alpha_n). \quad (6)$$

A  $\sigma(t)$  valószínűséggel előforduló felhős helyzet diffúz energiakomponense:

$$E_{\text{diffúz}, i}^{\text{felhős}}(\theta_n, \alpha_n) = Q \frac{\theta_n + \pi/2}{\pi} \int_{t_{\text{kelte}}}^{t_{\text{nyugta}}} \left\langle \sigma(t) \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} A_{\text{virág}}(\lambda) I_{\text{diffúz}}^{\text{felhős}}(\lambda, t) d\lambda \right\rangle dt, \quad (7)$$

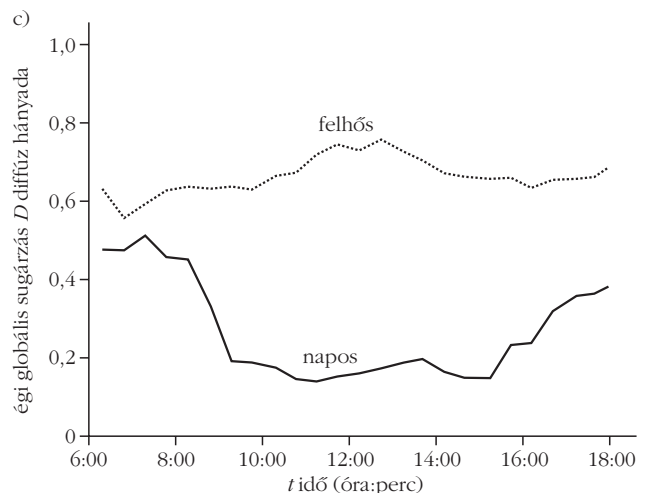
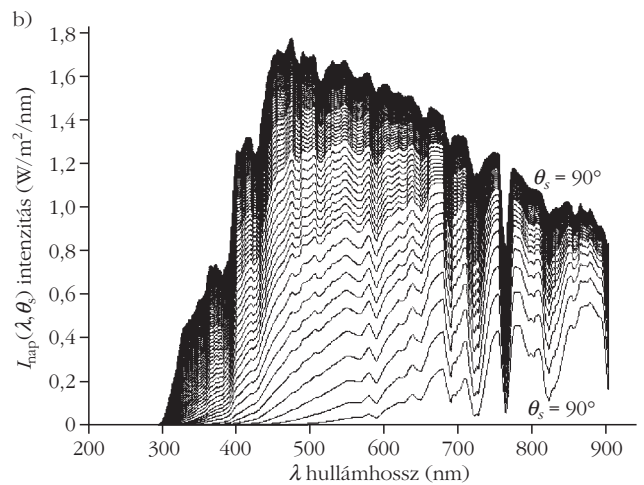
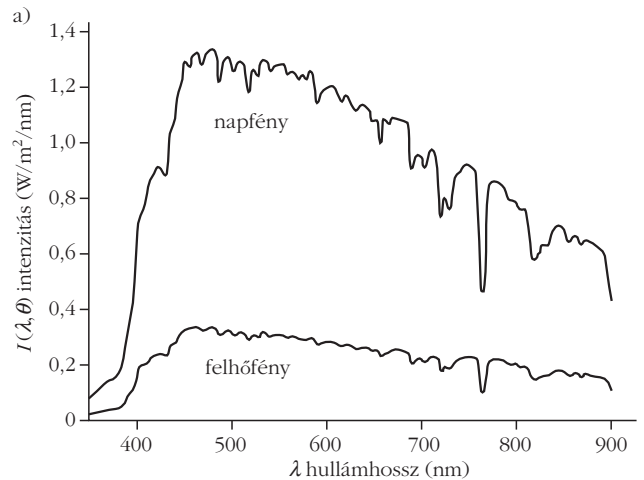
ahol  $Q$  a napraforgó-virágzat felülete,  $I_{\text{diffúz}}^{\text{felhős}}(\lambda, t)$  a felhős helyzetben egy vízszintes felületre eső diffúz fényintenzitás,  $\lambda_{\text{min}} = 400 \text{ nm} \leq \lambda \leq \lambda_{\text{max}} = 700 \text{ nm}$  a napraforgó fényelnyelése szempontjából fiziológiailag releváns hullámhossztartomány,  $t_{\text{kelte}}$  és  $t_{\text{nyugta}}$  rendre a napkelte és napnyugta ideje az  $i$ -edik napon (az  $i = 1$  naptól a fej már nem követi a Napot),  $A_{\text{virág}}(\lambda)$  a virágzat elnyelési spektruma, és  $(\theta_n + \pi/2)/\pi$  az égbolt azon hányada, ahonnan egy  $\theta_n$  elevációs szögű normálvektorú napraforgó-virágzat diffúz égfényt kap (2. ábra).

Számításainkban a virágképzés utáni első három hétben a fiatal (virágképzés utáni 2. heti), majd az idős (virágképzés utáni 4. heti) napraforgó-virágzat  $A_{\text{virág}}(\lambda)$  elnyelési spektrumát használtuk (lásd: cikkünk 2. része). A  $\lambda_{\text{min}} = 400 \text{ nm} \leq \lambda \leq \lambda_{\text{max}} = 700 \text{ nm}$

3. ábra. a)  $\theta_s = 53,5^\circ$  elevációs szögű Nap direkt fényének felhőtlen ég esetén mért  $I_{\text{nap}}(\lambda, \theta_s)$  spektruma, és  $\theta_s = 53,8^\circ$  elevációs szögű Nap mellett a felhős ég fényének  $I_{\text{felhős}}(\lambda, \theta_s)$  spektruma ([12] 2a ábrája alapján). b) A földfelszínre érő direkt napfény MODTRAN 3.7 modellből számolt  $I_{\text{nap}}(\lambda, \theta_s)$  spektruma a Nap vízszintestől mért  $\theta_s$  elevációs szöge függvényében  $\theta_s = 0^\circ$ -tól (horizont, legalsó görbe)  $\theta_s = 90^\circ$ -ig (zenit, legfelső görbe)  $1^\circ$  lépésközzel. c) Az éves átlagos diffúz és teljes (globális) sugárzás  $D$  hányadának napi változása napsütéses és felhős körülmények között 2017. júliusban Észak-Kínában ([14] 6. ábrája alapján).

spektrális tartományban, felhős időben az átlagos direkt sugárzás a direkt napsugárzás közel 20%-a (3.a ábra), amely hányad csak kis érzékenységgel az időjárás-változásra és a mérés idejére [12]. Az (5) és e 0,2 szorzótényező használatával a következőt kapjuk:

$$I_{\text{diffúz}}^{\text{felhős}}(\lambda, t) = \frac{D_{\text{felhős}}(t)}{1 - D_{\text{felhős}}(t)} 0,2 I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] \sin \theta_s^i(t), \quad (8)$$



ahol  $I_{\text{nap}}(\lambda, \theta_s)$  a beesési irányra merőleges egységnyi felületre eső direkt napfény intenzitása (3.b ábra) és  $D_{\text{felhős}}$  a teljes sugárzás diffúz hányada felhős helyzetben (3.c ábra). A meteorológiában az  $I_{\text{teljes}}$ ,  $I_{\text{direkt}}$  és  $I_{\text{diffúz}}$  intenzitásokat mindig vízszintes detektorfelülettel mérik, míg a 3.b ábra  $I_{\text{nap}}(\lambda, \theta_s)$  intenzitásai a direkt napfényre merőleges felületre lettek meghatározva. Ahhoz, hogy a detektorfelület e két különböző irányát figyelembe vegyük, be kellett vezetni a (8)-beli  $\sin\theta_s$  szorzótényezőt.

A MODTRAN (angolul: *MODerate resolution TRANsmittance code*) szoftver 3.7 verziójának segítségével, 1362,12 W/m<sup>2</sup> napállandó mellett és az 1976-os *US Standard Atmosphere* használatával történt a Föld felszínét érő  $I_{\text{nap}}(\lambda, \theta_s)$  intenzitások számítása [13].  $I_{\text{nap}}(\lambda, \theta_s)$  az egységnyi idő alatt, a beesési irányra merőleges egységnyi felületre, egységnyi hullámhossztartományban beeső energia. A 3.b ábra az  $I_{\text{nap}}(\lambda, \theta_s)$  görbéket mutatja a Nap 91 különböző elevációs szöge esetén.

A 3.c ábra az éves átlagos diffúz és teljes (globális) sugárzás  $D$  hányadának napi változását mutatja nap-sütéses és felhős körülmények között [14]. (7) és (8) felhasználásával kapjuk a felhős idő diffúz fényéből egységnyi felület által elnyelt diffúz energiát:

$$e_{\text{diffúz}, i}^{\text{felhős}}(\theta_n, \alpha_n) = \frac{E_{\text{diffúz}, i}^{\text{felhős}}(\theta_n, \alpha_n)}{Q} =$$

$$= 0,2 \frac{\theta_n + \pi/2}{\pi} \int_{t_{\text{kelte}}}^{t_{\text{nyugta}}} \left\langle \frac{\sigma(t) D_{\text{felhős}}(t) \sin\theta_s^i(t)}{1 - D_{\text{felhős}}(t)} \cdot \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} A_{\text{virág}}(\lambda) I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] d\lambda \right\rangle dt. \quad (9)$$

Ha  $I_{\text{direkt}}(\lambda, \theta_s)$  [J/(s·nm·m<sup>2</sup>)] a napraforgót megvilágító direkt sugárzás, akkor a virágzat által  $dt$  elemi időintervallumban és  $d\lambda$  elemi hullámhossztartományban elnyelt elemi  $dE$  direkt fényenergia:

$$dE = Q \cos\gamma I_{\text{direkt}}(\lambda, \theta_s) A_{\text{virág}}(\lambda) d\lambda dt, \quad (10)$$

ahol  $\gamma$  az  $\mathbf{n}$  és  $\mathbf{s}$  egységvektorok által bezárt szög, aminek koszinusza:

$$\cos\gamma = \mathbf{n} \cdot \mathbf{s} = \cos\theta_n \sin\alpha_n \cos\theta_s \sin\alpha_s +$$

$$+ \cos\theta_n \cos\alpha_n \cos\theta_s \cos\alpha_s + \sin\theta_n \sin\theta_s. \quad (11)$$

A napraforgó-virágzatra csak akkor esik direkt napfény, ha a következő feltétel teljesül:  $-90^\circ < \gamma < +90^\circ$ ,  $0 < \cos\gamma < 1$ , vagyis

$$0 < \cos\theta_n \sin\alpha_n \cos\theta_s \sin\alpha_s +$$

$$+ \cos\theta_n \cos\alpha_n \cos\theta_s \cos\alpha_s + \sin\theta_n \sin\theta_s < 1. \quad (12)$$

(10) felhasználásával, az  $1 - \sigma(t)$  valószínűséggel előforduló napos időben az egységnyi felületre eső direkt napfényből elnyelt energia:

$$e_{\text{nap}, i}(\theta_n, \alpha_n) = \frac{E_{\text{nap}, i}(\theta_n, \alpha_n)}{Q} =$$

$$= \int_{t_{\text{kelte}}}^{t_{\text{nyugta}}} \left\langle [1 - \sigma(t)] \cos\gamma(t) \cdot \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} A_{\text{virág}}(\lambda) I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] d\lambda \right\rangle dt, \quad (13)$$

$$\text{itt } \cos\gamma(t) = \cos\theta_n \sin\alpha_n \cos\theta_s^i(t) \sin\alpha_s^i(t) +$$

$$+ \cos\theta_n \cos\alpha_n \cos\theta_s^i(t) \cos\alpha_s^i(t) + \sin\theta_n \sin\theta_s^i(t) \quad (14)$$

faktor szükséges, mert a direkt napfény általában nem merőleges a napraforgó-virágzat felületére. (5) használatával, napos körülmények között egy vízszintes felületre eső diffúz sugárzás intenzitása:

$$I_{\text{diffúz}}^{\text{napos}}(\lambda, t) = \frac{D_{\text{napos}}(t)}{1 - D_{\text{napos}}(t)} I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] \sin\theta_s^i(t), \quad (15)$$

ahol a  $\sin\theta_s$  szorzótényező ismét szükséges a (8) levezetésekor említett okból kifolyólag. A 3.c ábra mutatja a  $D_{\text{napos}}$  éves átlagos diffúz hányad napi változását napos helyzetben [14]. (15) alkalmazásával, az  $1 - \sigma(t)$  valószínűséggel előforduló napos idő diffúz sugárzásából egységnyi felület által elnyelt energia:

$$e_{\text{diffúz}, i}^{\text{napos}}(\theta_n, \alpha_n) = \frac{E_{\text{diffúz}, i}^{\text{napos}}(\theta_n, \alpha_n)}{Q} =$$

$$= \frac{\theta_n + \pi/2}{\pi} \int_{t_{\text{kelte}}}^{t_{\text{nyugta}}} \left\langle \frac{[1 - \sigma(t)] D_{\text{napos}}(t) \sin\theta_s^i(t)}{1 - D_{\text{napos}}(t)} \cdot \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} A_{\text{virág}}(\lambda) I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] d\lambda \right\rangle dt, \quad (16)$$

ahol a  $(\theta_n + \pi/2)/\pi$  szorzótényező ismét az égbolt azon hányada, ahonnan a napraforgó-virágzat diffúz fényt kap (2. ábra). Végül a napraforgó-virágzat egységnyi felülete által elnyelt teljes energia a fej napkövetésének leállása és a végső magérés közti időszakban:

$$e_{\text{teljes}} = \sum_{i=1}^m e_i = \sum_{i=1}^m \left[ e_{\text{diffúz}, i}^{\text{felhős}}(\theta_n, \alpha_n) + e_{\text{nap}, i}(\theta_n, \alpha_n) + e_{\text{diffúz}, i}^{\text{napos}}(\theta_n, \alpha_n) \right], \quad (17)$$

ahol  $m$  a magérés utolsó napját jelöli.

## A napraforgófej hátoldala által elnyelt fényenergia

A napraforgófej hátoldala zöld (később sárgászöld) a klorofilltartalma miatt, ami fontos szerepet játszik a fotoszintézisben. Ezért érdemes meghatározni a fejhát által elnyelt fényenergiát a virágképzés és a teljes magérés között. A fejhátat is ugyanaz a három sugárzási komponens éri, mint a virágzatot, de a fejhát és a virágzat közti három fő különbség a következő:

1. A fejhát  $\mathbf{n}_{\text{hát}}$  normálvektora ellentétes irányú a virágzat  $\mathbf{n}$  normálvektorával (2. ábra):  $\mathbf{n}_{\text{hát}} = -\mathbf{n}$ .

2. A fejhátat az égbolt azon részéből származó diffúz fény világítja meg, ami a virágzatot diffúzan megvilágító égrész kiegészítője. Ezt a

$$\frac{\pi - 2 \theta_n(t)}{2 \pi}$$

faktorral lehet figyelembe venni, ami az éggömb azon hányada, ahonnan a  $\theta_n(t)$  elevációs szöggel bíró normálvektorú fej háta diffúz sugárzást kap (2. ábra).

3. A fejhát  $A_{\text{hát}}(\lambda)$  elnyelési spektruma eltér a virágzat  $A_{\text{virág}}(\lambda)$  elnyelési spektrumától (lásd cikkünk 2. részét).

E különbségek figyelembe vételével, a virágképzés és a teljes magérés közti időszakban a napraforgófej hátoldalának egységnyi felülete által elnyelt teljes fényenergia:

$$e_{\text{teljes, hát}} = \sum_{i=1}^m \left\{ e_{\text{diffúz, } i, \text{ hát}}^{\text{felhős}}[\theta_n(t), \alpha_n] + e_{\text{nap, } i, \text{ hát}}[\theta_n(t), \alpha_n] + e_{\text{diffúz, } i, \text{ hát}}^{\text{napos}}[\theta_n(t), \alpha_n] \right\}, \quad (18)$$

ahol  $m$  a teljes magérés utolsó napja, és a három energiakomponens a következő:

$$e_{\text{diffúz, } i, \text{ hát}}^{\text{napos}}[\theta_n(t), \alpha_n] = \frac{\pi/2 - \theta_n(t)}{\pi} \int_{t_{\text{kelte}}}^{t_{\text{nyugta}}} \left\langle \frac{[1 - \sigma(t)] D_{\text{napos}}(t) \sin \theta_s^i(t)}{1 - D_{\text{napos}}(t)} \cdot \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} A_{\text{hát}}(\lambda) I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] d\lambda \right\rangle dt, \quad (19)$$

$$e_{\text{diffúz, } i, \text{ hát}}^{\text{felhős}}[\theta_n(t), \alpha_n] = 0,2 \frac{\pi/2 - \theta_n(t)}{\pi} \int_{t_{\text{kelte}}}^{t_{\text{nyugta}}} \left\langle \frac{\sigma(t) D_{\text{felhős}}(t) \sin \theta_s^i(t)}{1 - D_{\text{felhős}}(t)} \cdot \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} A_{\text{hát}}(\lambda) I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] d\lambda \right\rangle dt, \quad (20)$$

$$e_{\text{nap, } i, \text{ hát}}[\theta_n(t), \alpha_n] = \int_{t_{\text{kelte}}}^{t_{\text{nyugta}}} \left\langle [\sigma(t) - 1] \cos \gamma(t) \cdot \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} A_{\text{hát}}(\lambda) I_{\text{nap}}[\lambda, \theta_s^i(t)] d\lambda \right\rangle dt, \quad (21)$$

Az idő teltevel a (21)-beli  $e_{\text{nap, } i, \text{ hát}}[\theta_n(t), \alpha_n]$  csak akkor nő, ha a fejhátat direkt napfény éri, aminek feltétele:

$$\begin{aligned} -1 < \cos \gamma(t) &= \\ &= \cos \theta_n \sin \alpha_n \cos \theta_s^i(t) \sin \alpha_s^i(t) + \\ &+ \cos \theta_n \cos \alpha_n \cos \theta_s^i(t) \cos \alpha_s^i(t) + \\ &+ \sin \theta_n \sin \theta_s^i(t) < 0. \end{aligned} \quad (22)$$

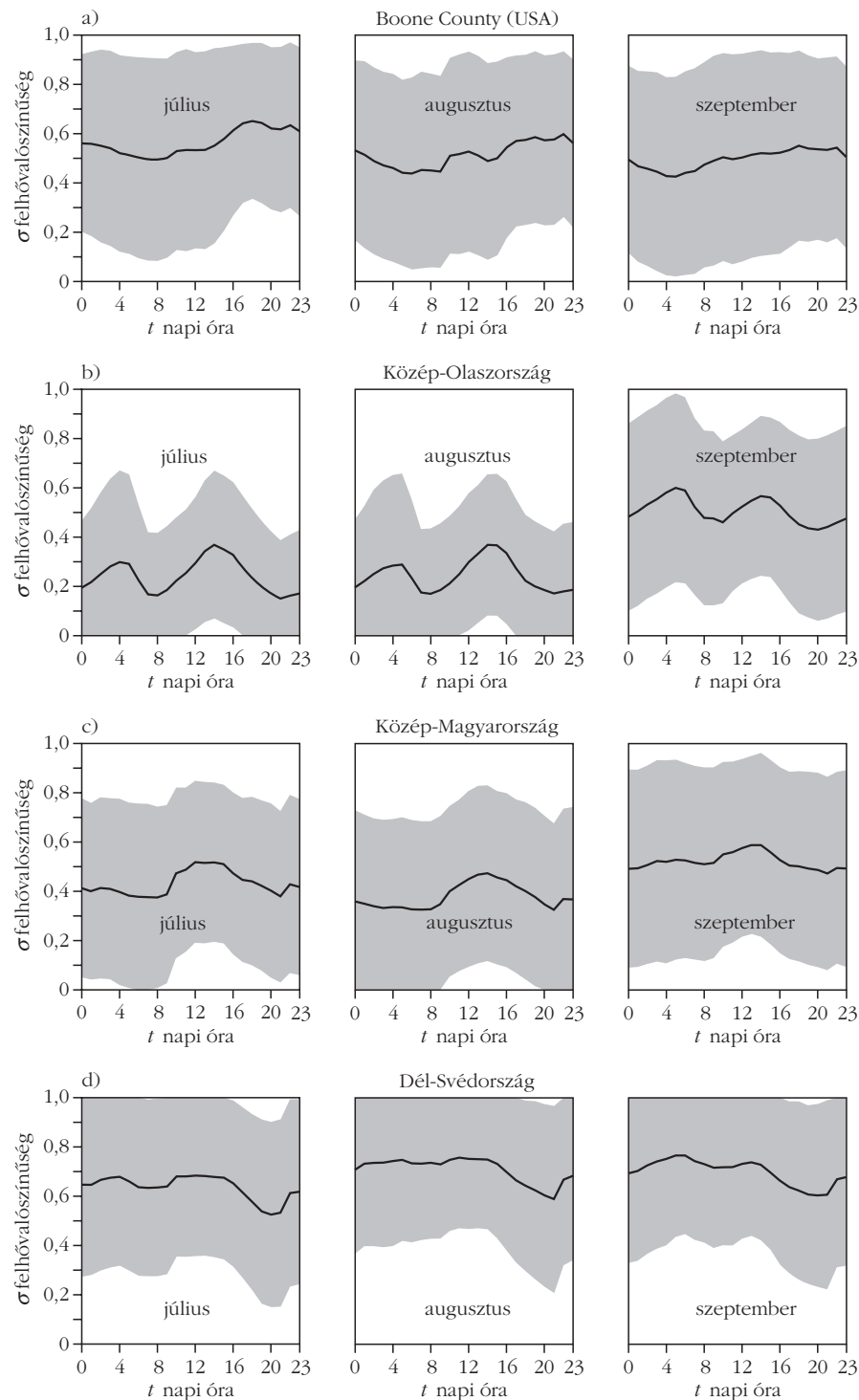
Mivel ekkor  $\cos \gamma(t) < 0$ , a (21)-beli  $\cos \gamma(t)$ -t meg kell szorozni  $-1$ -gyel. Számításainkban a virágképzés utáni első három hétben a fiatal (virágképzés utáni 2. heti), majd az idős (virágképzés utáni 4. heti) fejhát  $A_{\text{hát}}(\lambda)$  elnyelési spektrumát használtuk.

## A Nap elevációjának és azimutjának számítása az idő függvényében

A Nap vízszintestől mért  $\theta_s(t)$  elevációs szögét és a földrajzi déltől mért  $\alpha_s(t)$  azimut szögét (1. ábra) a  $t$  idő függvényében a VSOP 87 (*Variations Séculaires des Orbites Planétaires*) bolygóelméleten alapuló, kvázi-analitikus algoritmussal (*analytical Kepler's orbits modified with astronomical perturbations*) [15] számítottuk. E módszer az 1950–2050 közti időszakban  $0,01^\circ$  pontossággal adja meg a Nap égi helyét. Először kiszámoltuk a Nap geocentrikus ekliptikai, majd geocentrikus egyenlítői és végül geocentrikus horizontális koordinátáit, aminek eredményeként megkaptuk a  $\theta_s(t)$  és  $\alpha_s(t)$  szögeket.

## A felhővalószínűség napi menete

A 2009. január 1. és 2018. december 31. közti időszakra vonatkozó, 1 órás felbontású *Total Cloud Cover* (TCC: teljes ég felhőfedettsége) felhőzottségi idősorok a *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* ERA5 mérési eredményeiből származtak [16]. A földrajzi lefedettség térbeli felbontása  $0,25^\circ \times 0,25^\circ \approx 27 \text{ km} \times 27 \text{ km}$  volt. A TCC klimatológiai átlagértékeit úgy határoztuk meg, hogy a napraforgó vegetatív periódusában a szóban forgó 10 év napjainak minden órájában képeztük a felhővalószínűségek átlagát. Mivel a TCC egy dimenzió nélküli, 0 és 1 közti szám (0: tiszta ég, 1: borult ég), ezért az óránkénti klimatológiai középérték ekvivalens a felhőzottség időfüggő  $0 \leq \sigma(t) \leq 1$  valószínűségével. Meghatároztuk a  $\sigma(t)$  napi valószínűségi függvényt júliusban, augusztusban és szeptemberben Boone County-ban (Kentucky,



4. ábra. Napi átlagos  $\sigma(t)$  felhővalószínűség (fekete görbe)  $\pm$  szórás (szürke sáv) (a) Boone County-ban (Kentucky, USA,  $39,0^\circ$  É,  $84,75^\circ$  K), (b) Közép-Olaszországban ( $41,0^\circ$  É,  $15,0^\circ$  K), (c) Közép-Magyarországon ( $47,0^\circ$  É,  $19,0^\circ$  K) és (d) Dél-Svédországban ( $58,0^\circ$  É,  $13,0^\circ$  K) júliusban, augusztusban és szeptemberben.

USA,  $39,0^\circ$  É,  $-84,75^\circ$  K, 4.a ábra), Közép-Olaszországban ( $41,0^\circ$  É,  $15,0^\circ$  K, 4.b ábra), Közép-Magyarországon ( $47,0^\circ$  É,  $19,0^\circ$  K, 4.c ábra) és Dél-Svédországban ( $58,0^\circ$  É,  $13,0^\circ$  K, 4.d ábra). Boone County-ban, Közép-Olaszországban és Közép-Magyarországon a nyári délutánok átlagosan felhősebbek, mint a délelőttök, vagyis  $\sigma_{\text{delelőtt}} < \sigma_{\text{délután}}$ , míg Dél-Svédor-

szágban a nyári délelőttök átlagosan felhősebbek a délutánoknál, azaz  $\sigma_{\text{delelőtt}} > \sigma_{\text{délután}}$ .

## Mérési módszerek

Napraforgófej-dőlésszög mérése az idő függvényében

2020. július 6. és szeptember 11. között, egy budaörsi napraforgó-ültetvény egymás melletti 100 napraforgó-virágzata normálvektorának vízszintestől mért  $\theta_n$  elevációs szögét mértük ugyanazon egyedeken, közelítőleg hetente. A vizsgált napraforgókat az ültetvény egyik sorában választottuk ki.

Napraforgófejek elnyelési spektrumainak mérése

A szóban forgó napraforgó-ültetvényben mértük 3 fiatal (virágképzés utáni 2. heti) és 3 idős (virágképzés utáni 4. heti) napraforgófej virágzatának és hátának elnyelési spektrumait egy Ocean Optics STS-VIS spektrométerrel (Ocean Insight, Largo, USA). A méréseket teljesen borult ég alatt végeztük, hogy a megvilágítás izotróp és diffúz legyen. Először a virágzat és a fejhát  $R(\lambda)$  visszaverődési spektrumát mértük 3 fiatal és 3 idős napraforgón: a spektrométer fejét a célpontra irányítottuk 5 cm távolságból, majd egy másik spektrométert regisztráltunk úgy, hogy a spektrométerfejet a borult ég felé fordítottuk. Feltételezve, hogy a nem visszaverődő összes fényt elnyelte a napraforgó, e két spektrumot elosztva egymással, megkaptuk az  $R(\lambda)$  visszaverési spektrumot, amit kivontunk 1-ből, majd átlagoltunk a 3-3 növényre, végül megkapva az  $A(\lambda) = 1 - R(\lambda)$  elnyelési spektrumot.

## Irodalom

1. Darwin C., Darwin F.: *The Power of Movement in Plants*. D. Appleton & Co, New York, (1897).
2. Horváth G., Slíz-Balogh J., Horváth Á., Egri Á., Virágh B., Horváth D., Jánosi I. M.: Sunflower inflorescences absorb maximum light energy if they face east and afternoons are cloudier than mornings. *Scientific Reports* 10 (2020) 21597. (doi: 10.1038/s41598-020-78243-z) www.nature.com/articles/s41598-020-78243-z



3. Koller D.: Solar navigation by plants. In: *Photomovement*. (editors: Häder D. P., Leber M.) Elsevier, Amsterdam (2001) 833–896.
4. Lang A. R. G., Begg J. E.: Movements of *Helianthus annuus* leaves and heads. *Journal of Applied Ecology* 16 (1979) 299–305.
5. Leshem Y. Y.: Sunflower: a misnomer? *Nature* 269 (1977) (8 September) 102.
6. Vandenbrink J. P., Brown E. A., Harmer S. L., Blackman B. K.: Turning heads: The biology of solar tracking in sunflower. *Plant Science* 224 (2014) 20–26.
7. Atamian H. S., Creux N. M., Brown E. A., Garner A. G., Blackman B. K., Harmer S. L.: Circadian regulation of sunflower heliotropism, floral orientation, and pollinator visits. *Science* 353 (2016) 587–590.
8. Seiler G. J.: Anatomy and morphology of sunflower. In: *Sunflower Technology and Production*. (editor: Schneiter A. A.) American Society of Agronomy, Madison, WI, USA (1997) 67–111.
9. Lamprecht I., Maierhofer C., Röllig M.: Infrared thermography and thermometry of phototropic plants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 87 (2007) 49–54.
10. Ploschuk E. L., Hall A. J.: Capitulum position in sunflower affects grain temperature and duration of grain filling. *Field Crops Research* 44 (1995) 111–117.
11. Blackman B. K., Scascitelli M., Kane N. C., Luton H. H., Rasmusen D. A., Bye R. A., Lentz D. L., Rieseberg L. H.: Sunflower domestication alleles support single domestication center in eastern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (2011) 14360–14365.
12. Dengel S., Grace J., MacArthur A.: Transmissivity of solar radiation within a *Picea sitchensis* stand under various sky conditions. *Biogeosciences* 12 (2015) 4195–4207.
13. 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.
14. Liu P., Tong X., Zhang J., Meng P., Li J., Zhang J.: Estimation of half-hourly diffuse solar radiation over a mixed plantation in north China. *Renewable Energy* 149 (2020) 1360–1369.
15. Bretagnon P., Francou G.: Planetary theories in rectangular and spherical VSOP 87 solutions. *Astronomy and Astrophysics* 202 (1988) 309–315.
16. Hersbach H., Dee D.: ERA5 reanalysis is in production. *ECMWF Newsletter* 147 (2016) 7.

## ANOMÁLIÁK A MAGFIZIKÁBAN

– a magasabb rendű folyamatok következményei

Kálmán Péter, Keszthelyi Tamás  
BME, Fizikai Intézet

A neutron felefedezése után, az 1930-as évtized második felében az elméleti magfizikát [1–3] és nukleáris asztrofizikát [4] megalapozó munkák születtek. Ezt követően zajlott az első atombombák előállításához vezető Manhattan-terv, amelynek résztvevői alapvetően határozták meg a mag- és részecskefizika további fejlődését. A hidegháború pedig olyan hatást gyakorolt a mag-

és részecskefizikára, ami a kutatást részben a fegyvergyártás és atomreaktor-készítés irányába vitte el.

Ilyen légkörben, Nobel-díjas fizikusok népes táborával fémjelzetten alakult ki és vált szinte megkérdőjelezhetetlenné – különösen az alacsony energiák tartományában –, hogy az azonos előjelű,  $z_1$  és  $z_2$  töltésszámú, töltött részek közötti magreakciók hatáske- resztmetszete ( $\sigma$ )<sup>1</sup> a tömegközépponti koordináta- rendszerbeli  $\varepsilon$  mozgási energiájuktól

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{S(\varepsilon)}{\varepsilon} \exp[-2\pi\eta_{12}(\varepsilon)] \quad (1)$$

módon függ [5], ahol  $S(\varepsilon)$  az úgynevezett asztrofizikai faktor és  $\eta_{12}(\varepsilon) \propto z_1 z_2 \varepsilon^{-1/2}$  a Sommerfeld-paraméter. Mivel

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} S(\varepsilon) = S(0)$$

véges érték [5],  $\sigma(\varepsilon)$  alakjából látható, hogy

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sigma(\varepsilon) = 0,$$

vagyis  $\varepsilon \rightarrow 0$  esetén *tiltottá* válik a folyamat.



*Kálmán Péter*, az MTA doktora, nyugalmazott, a BME-n habilitált egyetemi docens az ELTE-n szerzett fizikusi diplomát. Főbb kutatási területei: a sugárzás és anyag kölcsönhatásának szemiklasszikus elmélete, ionkristályok mechanikai tulajdonságai, elektrooptikai és piroelektromos anyagok alkalmazásai, fizikai folyamatok intenzív lézerterekben és plazmakörnyezetben, valamint alacsonyenergiás magfizikai folyamatok.



*Keszthelyi Tamás*, PhD a fizikai tudomány kandidátusa, nyugalmazott egyetemi docens, a BME TTK volt dékánja, a Magyar Köztársasági Érdemrend Lovagkeresztjének birtokosa az ELTE-n szerzett fizikusi diplomát. Főbb kutatási területei: ionkristályok mechanikai tulajdonságai, fizikai folyamatok intenzív lézerterekben és plazmakörnyezetben, valamint alacsonyenergiás magfizikai folyamatok.

<sup>1</sup>A hatáske- resztmetszet ( $\sigma$ ) egy felület dimenziójú mennyiség.  $N\sigma\Phi$  az időegységenként végbemenő magreakciók száma, a hozam, ahol  $N$  a bombázott céltárgyrészek száma és  $\Phi$  a bombázó részek fluxusa, vagyis a felületegységenként egységnyi idő alatt beeső részek száma.