

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LX. évfolyam

11. szám

2010. november

HALÓJELENSÉGEK: A MAGAS SZINTŰ FELHŐK LÉGKÖROPTIKAI ÁLLAPOTJELZŐI

Farkas Alexandra

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Labor

A szivárványt mindenki ismeri, hiszen ezt a jelenséget nyaranta több alkalommal is megfigyelhetjük [1–2]. Azt is sokan tudják, hogy a jelenséget a hulló, közel gömb alakú vízcseppekben megtörő fény hozza létre. Ám nap mint nap jelennek meg az égen olyan légkör-optikai jelenségek is, amelyek sokunk figyelmét elkerülik. A halójelenségek – vagy röviden a halók – is ezen „ismeretlen” fényjelenségek közé tartoznak. Akkor alakulnak ki, amikor a légkörben jelen lévő jégkristályokban megtörnek vagy azokról visszaverődik a fény. Ezen folyamatok eredményeképpen szivárványszínűek vagy fehér fényűek lehetnek.

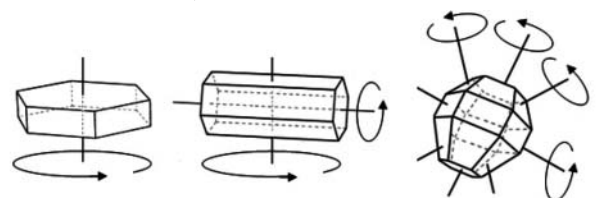
Halóképző jégkristályok

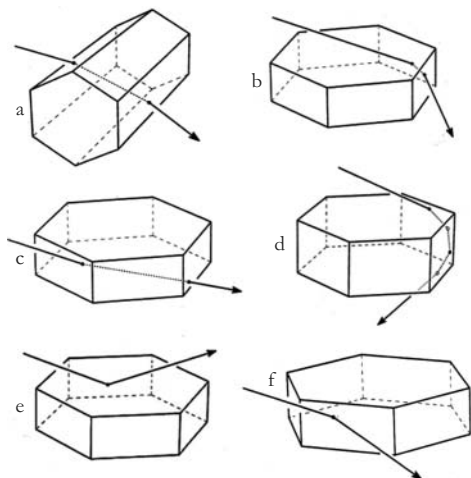
A halók rendkívül sokfélék lehetnek, hiszen a fény útja a kialakulásukban részt vevő jégkristályok jellemzőinek függvényében minden esetben különböző. A kialakult jégkristályok formája a keletkezés helyi adottságainak függvényében eltérő, de a víz tulajdonságából adódóan közös vonásuk, hogy hexagonális (hatszöges) szimmetriát mutatnak. $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékleten vízszintes, -4 és $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ között függőleges irányba mutató növekedés jellemző rájuk. Előbbi esetben hatszög alapú lap, utóbbiban pedig hatszög alapú hasáb kristályok keletkeznek. -9 és $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ között újra lapos, majd $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb hőmérsékleten ismét hasáb kristályok képződnek. $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt az oszlopok alsó és/vagy felső részére piramis formájú csúcsok is nőhetnek – ezt az alakot a továbbiakban gúla alakú kristályként említjük [3]. Ezek a különböző jégkristályformák és azok eltérő orientációja (1. ábra) más-más halójelenség kialakulását eredményezik, hiszen

állásuktól függ, hogy melyik lapon jut be, s aztán törnek meg a fény (2. ábra) [4–5].

Jégkristályok leggyakrabban a 8–10 km magasan elhelyezkedő magasszintű felhőkben (*cirrostratus*: fátyolfelhő, *cirrus*: pehelyfelhő, *cirrocumulus*: bárányfelhő) fordulnak elő, amelyek általában melegfront előtt láthatók. Ezekon kívül a zivatarfelhők visszamaradt üllőmaradványai és a repülőgépek kondenzcsíkjai is a jégkristályokból álló felhők közé sorolhatók. Jégkristályok speciális körülmények között a földfelszín közelében is megjelenhetnek. Ehhez arra van szükség, hogy a talaj közelében egy hidegebb és a felette található melegebb légréteg keveredhessen. Így a melegebb légrétegből vízpára juthat a hidegebbe, amely megfagyva apró jégkristályok kialakulását eredményezi. Ezt a jelenséget gyémántpornak nevezik. Mivel fagyponthoz közelében a vízcseppek még megmaradhatnak folyékony (túlhűlt) állapotban, a kifagyáshoz a levegőben található jégképző magvak

1. ábra. A halók kialakulásában szerepet játszó jégkristályok és azok esés közbeni lehetséges orientációja. A bal oldali lapkristály egyensúlyi helyzetben a vízszinteshez közel párhuzamosan lebeg. A középső oszlopkristály már többféle térbeli helyzetet vehet fel, hiszen függőleges és vízszintes tengely körüli forgása egyaránt lehetséges. A fő jellemzője azonban, hogy vízszintes tengelye a horizonttal közel párhuzamos. A jobb oldali gúlakristály esés közben szinte bármilyen irányulást fölvehet. A lehetséges orientációk miatt a rajta áthaladó fény útja is sokféle lehet, így e kristálytípus a halók egy különleges csoportjának kialakításáért felelős.





2. ábra. Néhány halójelenség kialakulásához szükséges jégkristály a rajta áthaladó fény útjával [8]. a) felső érintő ív, b) zenit körüli ív, c) bal oldali melléknap, d) 120°-os melléknap, e) alnap, f) parhélus kör.

mennyiségének függvényében $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra van szükség. Minél kevesebb jégképző mag található a levegőben, annál alacsonyabb hőmérsékleten megy végbe a folyamat [6–7]. A gyémántpor hóval borított hegységekben, illetve a sarkvidékek környékén gyakoribb, de különleges időjárási helyzetekben akár hazánkban is kialakulhat (például 2008. január 3-án Mogyoródon, 2010. február 4-én Isaszegen). E felszínközeli jégkristályokkal hóágyúk közvetlen környezetében is gyakran találkozhatunk.

Mind a magas szintű felhők, mind a gyémántpor esetében kialakulhatnak halójelenségek, amelyek erőssége a bennük lévő jégkristályok mennyiségétől és minőségétől függ. Ha kevés van e kristályokból, akkor a haló kialakulhat ugyan, de annyira halvány lesz, hogy nem észleljük. A leglátványosabb halók akkor jönnek létre, amikor a jégkristályok majdnem tökéletesen párhuzamosan állnak, azaz hossz tengelyük a vízszintessel $0,15^{\circ}$ -nál kisebb szöget zár be. Ez rendkívül ritkán, de lehetséges. A jégkristályok dőlése, billegése gyakran a $30\text{--}40^{\circ}$ -ot is elérheti, az ehhez kötődő halók tehát jóval gyakoribbak. A tapasztalatok szerint a nagyjából $0,01\text{ mm}$ -es jégkristályok esetében a fényt rövidülése miatt nem jönnek létre észlelhető halók. $0,04\text{ mm}$ -es jégkristályok mellett már kialakulhatnak halvány halójelenségek, de ahhoz, hogy a fenti tökéletesen vízszintes állás létrejöhessen, méretüknek meg kell haladnia a $0,1\text{ mm}$ -t. Az is problémát jelent azonban, ha a jégkristályok mérete ennél jóval nagyobb ($> 1\text{ mm}$). Ekkor szerkezetük aszimmetrikussá válhat, illetve lapjaik felületén apró hibák keletkezhetnek, amelyek nagyban befolyásolják a jégkristályon áthaladó fény útját. A látványos halók kialakulása szempontjából tehát nélkülözhetetlen a jégkristályok hibátlan morfológiája és a lehető legprecízebb vízszintes állása [8]. A fentiekén kívül lényeges a homogenitás is. Attól függően, hogy a jelenlévő jégkristályok egy- vagy többféle, különböző halók alakulhatnak ki. Ha egyszerre legalább két haló figyelhető meg, akkor halókomplexumról beszélünk.

Rendszeres megfigyelések

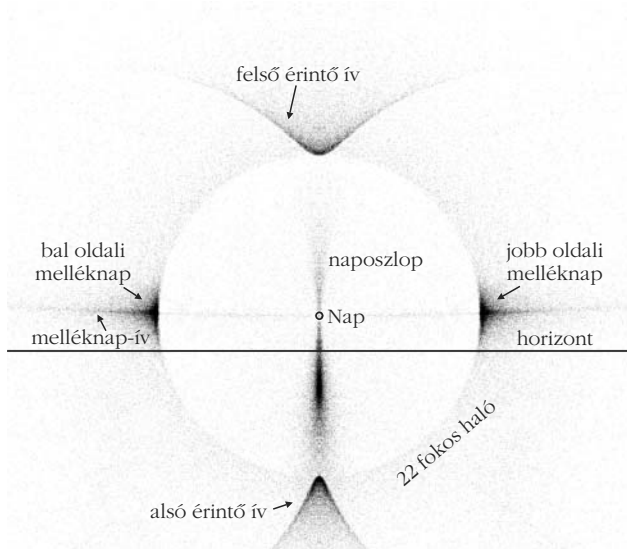
Annak ellenére, hogy a halójelenségek kialakulásához szükséges feltételek szinte bárhol fennállhatnak, aktív halómegfigyeléssel világszerte csupán néhányan foglalkoznak. Ennek oka részben abban keresendő, hogy a halók nagy része a Naphoz viszonylag közel látható, ahová az erős napfény miatt kevesen néznek. Ha azonban valamilyen tereptárgy – például egy nagyobb fa – mögé állunk, vagy a Napot valamilyen kezünk ügyébe eső tárggyal, vagy akár a kezünkkel kitakarjuk, akkor sokkal nagyobb eséllyel pillanthatjuk meg a halókat. A Nap kitakarása szemünk épsége érdekében is rendkívül fontos, hiszen az erős napfény (közvetlenül a Napba nézve) tartós szemkárosodást okozhat. Észleléseink hosszú távon történő rendszeres feljegyzése alapján a különböző helyszínekre statisztikai adatokat kaphatunk. A szerző 2007-ben 109 napon 312, 2008-ban pedig 87 napon 248 halójelenséget figyelt meg Budapest és Mogyoród területéről. Ezen adatok alapján látható, hogy a halók jóval gyakrabban jelennek meg az égbolton, mint a szivárvány. Az egyes halójelenségek gyakoriságát külön vizsgálva észrevehető, hogy egyesek jóval gyakrabban, míg mások csak nagyon ritkán fordulnak elő. Ennek oka a kialakulásukhoz szükséges körülményekben keresendő.

Gyakori halójelenségek

Az egyik leggyakrabban előforduló jelenség a 22° -os *haló*, ami észleléseim szerint 2007-ben 84, 2008-ban pedig 83 alkalommal tűnt fel. Ez a fényforrást – a Napot, vagy a Holdat – körülvevő 22° sugarú körív, amely véletlenszerűen elhelyezkedő hasábkristályokhoz kötődik. A fény az oldallapon bejutva úgy halad át a jégkristályon, mintha az egy 60° törőszögű prizma lenne. Így a szemközti oldallapon kilépő sugár az eredeti irányhoz képest 22° -kal tér el.

A másik leggyakoribb halójelenség a melléknap, amely a fényforrással egy vonalban, attól közel 22° -ra helyezkedik el. 2007-ben 125, 2008-ban 85 melléknap volt megfigyelhető. Időnként a Nap mindkét oldalán észlelhető, de sokszor csak az egyik oldalon alakul ki. Néha pusztán kis fehér foltként látszik, de általában színes: a Naphoz közel eső része piros, a külső pedig kékes színű. Évente néhány alkalommal akár rendkívül fényesen világíthat is. Kialakulása a vízszinteshez közel párhuzamosan álló lapkristályokhoz kötődik, a fény azok oldallapjain törik meg. A melléknap formája a napmagasságtól független, de annak növekedésével Naptól mért szögtávolsága kissé növekszik.

A melléknapok folytatásaként feltűnhet a fehér színű melléknap-ív is. Az *érintő ívek* a 22° -os halót érintik annak alsó és felső pontján – nevük ettől függően alsó, illetve felső érintő ív. A felső érintő ív gyakrabban, míg az alsó ritkábban látható. Az érintő ívek formája nagyban függ a napmagasságtól. Alacsony napállásnál a felső érintő ív V alakot formáz, majd a napmagasság növekedésével mint egy madár-



3. ábra. Gyakori halójelenségek 5° horizonttól mért napmagasság esetén.

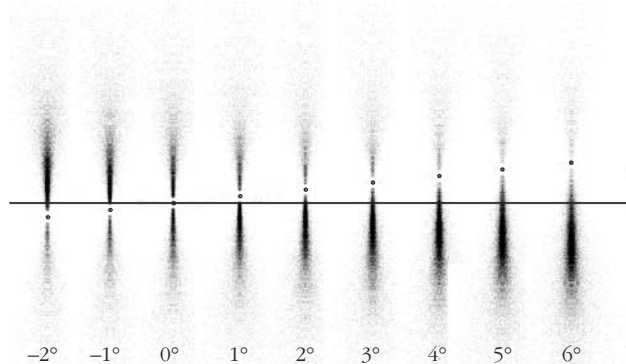
szárny kinyílik, végül pedig a két érintő ív összekapcsolódik, s ekkor már körülíró ívről, illetve körülírt halóról beszélünk.

A zenit körüli ív csak 32° napmagasság alatt figyelhető meg, s ahogyan a neve is mutatja, a zenit köré írható kör egy darabja. A napmagasság csökkenésével az ív egyre távolodik a zenittől, így mérete is egyre nagyobb lesz. Akkor a legerőteljesebb, ha a Nap 22° magasan jár (3. ábra).

A naposzlop az eddigiekkel ellentétben nem fénytörési, hanem fényvisszaverődési halójelenség (4. ábra). A jelenség gyakran halvány, látványosabb oszlopot csupán egy-kettőt láthatunk egy évben. Leggyakrabban sárga, pirosas vagy fehér színű, körülbelül 5–10° magasságig emelkedhet a napkorong felett. Ritkábban alatta is kialakulhat, vagy ennél nagyobb is lehet. Ahogy a jégkristályok dőlésének mértéke és a Nap helye változik, aszerint módosul a naposzlop mérete is. Nagyon ritkán más fényes égitestek is kialakíthatják (például Hold, Vénusz) [6, 8].

Ritka halójelenségek

Évente néhány alkalommal sokkal ritkább halójelenségeket is megfigyelhetünk, amelyek a különböző alakú és állású jégkristályok ideális helyzetéhez kötten alakulnak ki. Ráadásul néhány jelenség – például a parhélikus kör – kiterjedése igen nagy, akár az egész égboltot átívelő. Ahhoz, hogy ezek teljesen kialakulhassanak, rendkívül sok, hasonló tulajdonságú jégkristály jelenlétére van szükség. Ebből adódóan a ritka halójelenségek többnyire halványak, kevésbé kontrasztosak és rövid ideig láthatóak. Teljes parhélikus kört például 2008. április 5-én, augusztus 25-én és szeptember 1-jén figyeltem meg, azaz a 2 év alatt összesen 3 alkalommal álltak fenn a kialakulásához szükséges feltételek a vizsgálati helyszínemen. A ritka halók megpillantásához tehát kitartás és szerencse is



4. ábra. A naposzlop helyének változása a napmagasság függvényében.

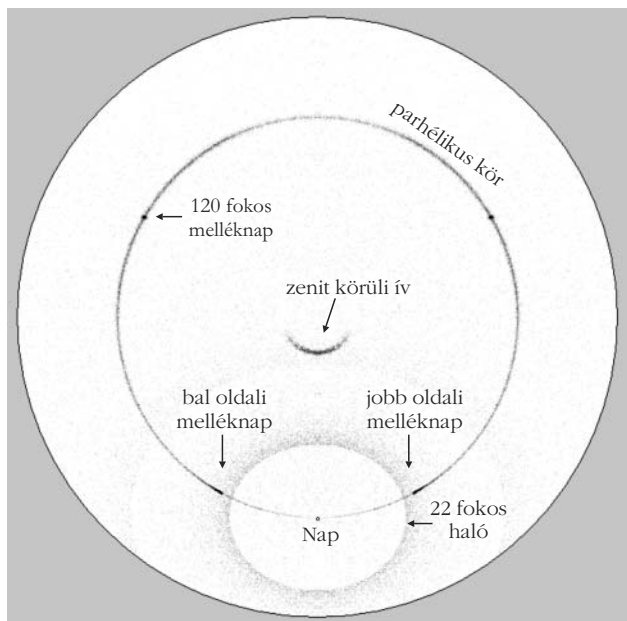
szükséges. Ezek formája és Naphoz viszonyított helyzete nagyban függ a napmagasságtól.

A felső oldalív a 22°-os haló fölött található, kialakulása csak 32° napmagasság alatt lehetséges. Az alsó oldalív alacsony napmagasság esetén a 22°-os haló két oldalán, míg magasabb napállásnál az alatt található [8]. A horizont körüli ív megjelenéséhez minimum 58° napmagasság szükséges, amely hazánkban csak május 2. és augusztus 9. között valósulhat meg. Az ív a horizonttal párhuzamos, a 22°-os haló alatt található. A 46°-os haló közel kétszer akkora távolságban helyezkedik el a Naptól, mint a 22°-os haló. A fénysugarak úgy haladnak át a jégkristályon, mintha az egy 90° törőszögű prizma lenne, így a kilépő sugár az eredeti irányhoz képest 46°-kal térül el [9]. Hasonló megjelenésük miatt a horizont körüli ív, az alsó és felső oldalív, illetve a 46°-os haló könnyen összetéveszthető. A többi látható jelenségtől a napmagasság alapján, valamint gyakorlott szem segítségével tudjuk őket megkülönböztetni [4].

A Parry-ívek William Edward Parry nevét viselik, mivel 1820. április 8-án egy látványos halókomplexum megfigyelése kapcsán ő írt le először ilyen jelenséget. Kialakulásukhoz a hasáb alakú jégkristályok hossztagolyának, illetve alsó és felső lapjának is párhuzamosnak kell lennie a horizonttal. A Parry-ívnek több fajtája ismert, ezek Naphoz viszonyított helyzete nagyban függ a napmagasságtól.

A parhélikus kör a Naptól kiindul és oda visszatérő, horizonttal párhuzamos, fehér fényű kör, amelynek középpontja a zenit (5. ábra). Létrejöttének egyik lehetséges módja, hogy a horizonttal párhuzamosan álló lapkristályok egyik oldalapjáról visszaverődik a fény.

Amennyiben a Nap közvetlen környezetében látványos halókomplexum látható, érdemes a hátunk mögé is nézni, ugyanis ritkán a Nappal szemközti oldalon is kialakulhatnak halójelenségek (6. ábra). Ezek közül leggyakrabban a 120°-os melléknapot figyelhetjük meg, ami egy fehér színű, fényes folt a Naptól 120° távolságra, azzal egy vonalban. Akkor érdemes keresni, amikor rendkívül élénk, fényes melléknappal, illetve látványos melléknap-ív vagy parhélikus kör látszik, hiszen ezek kialakulásában ugyanazok a jégkristályok játszanak szerepet. Szintén a Nappal ellentétes oldalon figyelhető meg – többévente egyszer – a Wegener-ív, a Tricker-ív, az alsó napív és a diffúz ívek. Ezek a jelensé-



5. ábra. Komplex halójelenség a zenit felől nézve.

gek akkor alakulhatnak ki, amikor a hibátlan lapokkal rendelkező hasábkristályok majdnem tökéletesen párhuzamosan állnak, azaz hossz tengelyük $0,15^\circ$ -nál kisebb szöget zár be a vízszintessel.

Ahhoz, hogy e jelenségeket hazánkban is megfigyelhessük, a felettünk lévő magasszintű felhőzetnek igen nagy területen, teljes egészében megfelelő jégkristályokból kell állnia. Ez rendkívül ritkán valószínű, 2005 óta hazánkban e jelenségekről a szerző által egyetlen megfigyelés sem született. A jelenségek megfigyelése nagyobb eséllyel lehetséges azokon a területeken, ahol a jégkristályok a talaj közelében is megjelennek. Ekkor csak a megfigyelő közvetlen környezetében, tehát jóval kisebb területen szükséges a megfelelő orientációjú jégkristályok előfordulása. E halók esetében a fényt is jóval bonyolultabb, mint az eddig tárgyaltak, ugyanis kialakulásukhoz a jégkristályon belül több belső visszaverődés is szükséges. Az ellennap a Nappal szemközi oldalon, az antiszoláris pontban megfigyelhető fehér folt. Kialakulására eddig nem született egységesen elfogadott magyarázat, de valószínűsíthető, hogy nem önálló jelenség, hanem csupán a fenti ívek erősödnek fel az itteni metszéspontban [8].

Számos olyan halójelenséget is ismerünk, amelyek megpillantásának feltétele, hogy lássuk a horizont alatti területeket (7. ábra). Ez például egy repülőgépről vagy egy magas hegy csúcsáról lehetséges. Legkönnyebben az *alnapot* fedezhetjük fel, amely a Nap alatti fehér színű, fényes foltként jelentkezik. Kialakulása rendkívül egyszerű: a horizonttal közel párhuzamosan álló lapkristályok alsó vagy felső lapjáról visszaverődő fény hozza létre. A fényt egyszerűsége miatt ez az egyik leggyakoribb jelenség, csupán a megfigyelés nehézsége miatt sorolható a ritka halójelenségek közé. A horizont alatti halók közé sorolhatjuk emellett az *almelléknapot*, az *alparhélikus kört*, a 120° -os *almelléknapot*, illetve a zenit körüli ív hori-

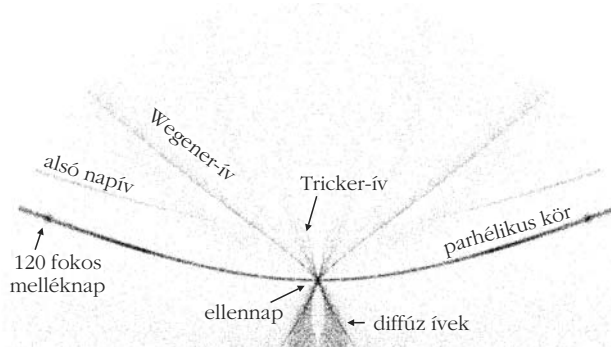
zont alatti párját: a nadír körüli ívet. Ezekről eddig csak néhány észlelés született. A 120° -os *almelléknapról* például 2008. december 7–8-án készült a világon az első felvétel [10].

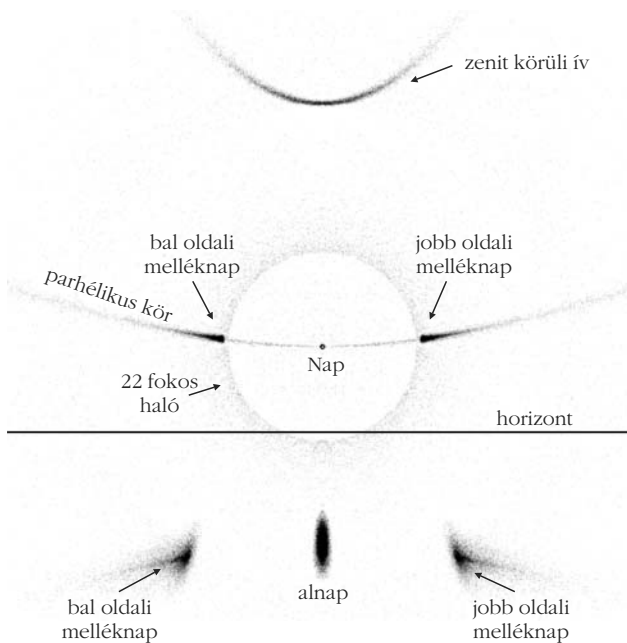
Szintén nagyon ritka jelenségek a gúla alakú kristály okozta fénytöréssel keletkező mutató halók. Amennyiben a jégkristályok elhelyezkedése véletlenszerű, akkor különböző méretű koncentrikus köröket láthatunk a fényforrás körül. Ezeknek sugara $9, 18, 20, 23, 24$ és 35° . Ha a jégkristályok rendezettebbek, azaz valamelyik lapjuk párhuzamosan áll a vízszintessel, akkor hurokszerű $9, 18, 20, 23, 24$ és 35° -os melléknapokat, illetve $6, 18, 20, 24$ és 35° -os érintő íveket is megfigyelhetünk [8]. Ezek közül a leggyakoribb jelenség a 9 és a 18° -os haló, amelyet 2007-ben 2-2 alkalommal figyeltem meg. A többi jelenséget a két év alatt nem tudtam megfigyelni.

A halók megfigyelésekor készített felvételek, a gyűjtött jégkristályok vizsgálata és az utólagos számítógépes modellezés alapján tisztázható, hogy a jelenség milyen körülmények között alakult ki. Az így megismert kristályformákat és azok lehetséges térbeli helyzeteit felhasználva a HaloSim [11] programban olyan jelenségek is kirajzolódhatnak, amelyekről eddig még nem készült semmilyen megfigyelés. Akad jó néhány olyan halójelenség is, amelyet már megfigyeltek, de kialakulásukra jelenlegi ismereteink alapján nem tudunk magyarázatot adni. Ezek hátterében eddig ismeretlen formájú jégkristályokat feltételezhetünk, amelyek kialakulásához speciális körülményekre van szükség. A fentiek alapján valószínűleg léteznek olyan jelenségek is, amelyeket szimuláció alapján sem ismerünk. Így amellet, hogy látványos – talán előttünk még soha nem dokumentált – jelenségeknek lehetünk tanúi, a további megfigyelésekkel a légköri folyamatokkal kapcsolatos információinkat is bővíthetjük. Egy adott halójelenség megfigyelésekor ugyanis visszakövetkeztethetünk arra, hogy milyen jégkristály alakította ki azt, s annak keletkezéséhez pedig milyen körülményekre van szükség. Eszerint tehát a halók a magas szintű felhők állapotjelzőiként is használhatók.

Mindezt más égitestek légkörének pontosabb megismerésében is kihasználhatjuk [12–16]. Ha ismerjük a légkör összetevőit és az adott körülmények között kialakuló jégkristályok tulajdonságait, akkor kikövet-

6. ábra. A Nappal szemközi halók hazánkban többévente egyszer figyelhetők meg.





7. ábra. Az alnap és az almelléknapok horizonttól való távolsága megegyezik a napmagassággal.

keztethetjük, hogy azokhoz milyen jelenségek kötődhetnek. A Mars légkörében például szén-dioxid jégkristályok, a Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titán légkörében pedig metán és etán jégkristályok képezhetik a halójelenségek kialakulásához szükséges fénytörő közeget. Valamilyen ezekhez kötődő jelenség jövőbeli sikeres megörökítése esetén sok új információt szerezhetünk az adott égitest légkörében fennálló felhőfizikai és aerodinamikai hatásokról.

Irodalom

1. Cserti J.: A szivárvány fizikája: Az esőcseppek fény szórásai jelenségei, I., II., III., *Fizikai Szemle* 55 (2005) 297, 349, 422.
2. Barta, A., Horváth, G., Bernáth, B., Meyer-Rochow, V. B.: Imaging polarimetry of the rainbow. *Applied Optics* 42 (2003) 399–405.
3. Geresdi I.: *Felbőfizika*. Dialóg Campus Kiadó, Budapest–Pécs, 2004, 272.
4. Farkas, A.: *Amikor megtörik a fény – Halójelenségek*. Tudományos diákköri dolgozat, ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék, bemutatva a XXIX. Országos Tudományos Diákköri Konferencia Fizika, Földtudományok, Matematika Szekciójának Meteorológia II. tagozatában, Nyugat-magyarországi Egyetem, Természettudományi és Műszaki Kar, Szombathely, 2009. április 7–9., 56.
5. Goda Z.: Kristálykert. *Élet és Tudomány* 49 (2008) 1556–1557.
6. Greenler, R.: *Rainbows, Halos, and Glories*. Cambridge University Press, New York, 1980, 195.
7. Ohtake, T., Jayaweera, K., Sakurai, K.: Observation of Ice Crystal Formation in Lower Arctic Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 39/12 (1982) 2898–2904.
8. Tape, W.: Atmospheric Halos. *Antarctic Research Series 64*, American Geophysical Union, Washington D.C., 1994, 143.
9. Minnaert, M.: *The Nature of Light & Color in the Open Air*. Dover Publications, New York, 1954, 362.
10. Riikonen, M.: Subhorizon plate crystal halos, *Ice crystal halos*. http://www.ursa.fi/blogit/ice_crystal_halos/index.php?title=subhorizon_plate_crystal_halos
11. Cowley, L., Schroeder, M.: HaloSim 3.6., <http://atoptics.co.uk>, 2004.
12. Cowley, L., Schroeder, M.: Forecasting Martian Halos *Sky&Telescope* 12 (1999) 60–64.
13. Können, G. P.: Symmetry in halo displays and symmetry in halo-making crystals. *Applied Optics* 42/3 (2003) 318–331.
14. Können, G. P.: A halo on Mars. *Weather* 61 (2006) 171–172.
15. Farkas A., Kereszturi, Á.: Halójelenségek kialakulása, jellemzése és megfigyelése a Földön, és a Földön kívül, II. rész. *Léggör* 54/4 (2009) 24–27.
16. Farkas A.: Possible extraterrestrial halo displays – a review, *European Planetary Science Congress 2010*, Róma, 2010. szeptember 19–25.



Világító jobb oldali melléknap, Budapest



Fényes körülíró ív, Budapest



22° haló, melléknapok, naposzlop, felső érintő ív, felső oldalív, zenit körüli ív, Budapest



Fényes naposzlop, Mogyoród



Jobb oldali melléknap naplementekor, Tardos



22° haló, bal oldali melléknap és rövid melléknap-ív, Mogyoród

