

Halojelenségek kialakulása, jellemzése és megfigyelése a Földön, és a Földön kívül

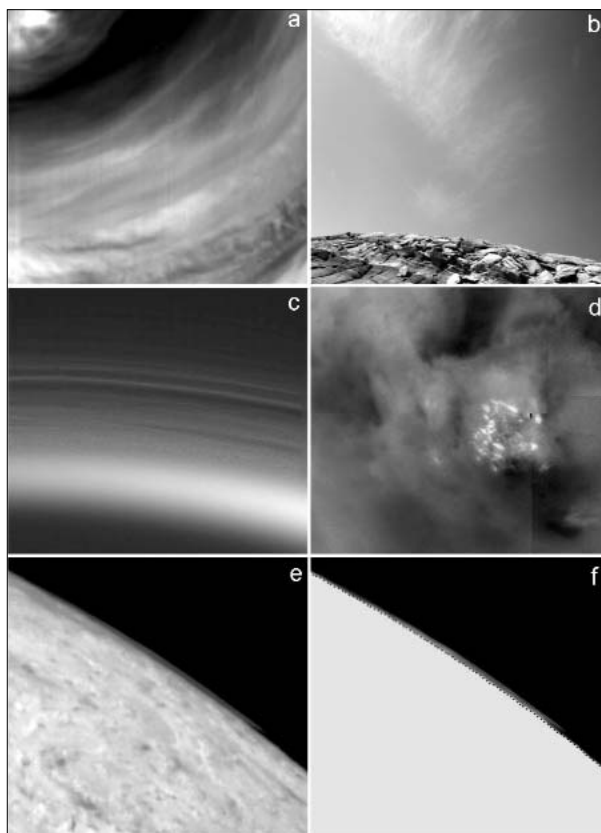
II. rész

Mivel a halojelenségek az őket kialakító jégkristályok jellemzőibe engednek bepillantást, más égitestek légkörében megfigyelve az ottani aeroszlokról adnak információt, utalva a légköri folyamatokra és a felszín alakító klímára is (Gyenizse 2008, Kereszturi 2008). Bár perdöntő megfigyelés még nem született ebben a témakörben, de sok olyan új ismeret van már, amely érdekes a meteorológiával foglalkozó közösségnek - ezeket tekintjük át az alábbiakban, minden égitestnek a halók szempontjából releváns jellemzőit bemutatva.

Naprendszerünkben a nagybolygókon és holdjaikon kívül az üstökösök, és a velük rokonítható Kuiper-objektumok, valamint a Neptunuszon belülré tévedt képviselőik: a kentaurok bírnak még időszakos, alkalmi atmoszférával (Bérczi et al. 2002), amelyekben aeroszlok és ezekkel kapcsolatban halojelenségek alakulhatnak ki. Itt a légkörök anyaga közel folyamatosan

áramlik ki a világűrbe, és a felszínről kaphat utánpótlást. Elvileg az üstökösmagokból kiszabaduló anyagok, főleg a H_2O , szilárd kristályokat alkothat, azonban ezek szerkezete alig ismert.

Érdekesebbek a Vénusz, a Mars, az óriásbolygók, a Titan és a Triton holdak légkörei (I. ábra) (I. táblázat). Átlátszóság szempontjából érdemes megemlíteni, hogy a Jupiter és a Szaturnusz esetében a látható legfelső felhőszintek ammónium-szulfid kristályokból állnak. Az Uránusznál magas szintű szmog- és ködtakaró csökkenti a mélyebbre jutó fény mennyiségét, ott maguk a felhők alig vehetők észre, míg a Neptunusz esetében a szmogréteg hiányzik, ezért látványosak a felső metánfelhők.



1 ábra - Felhők néhány égitesten: a) infravörös műholdfelvétel a Vénusz felhőiről, b) cirrusfelhő alakzatok a Mars egén, c) magas-szintű fotokémiai szmogrétegek a Titan légkörében, a hold korongjának peremén, d) néhány kilométer átmérőjű konvektív metánfelhők csoportja a Titan déli sarkvidékén a magasból tekintve, e) és f) köd avagy felhő a Triton hold korongjának peremén (balra az eredeti, jobbra a kontrasztfokozott felvétel) (NASA, ESA, JPL, SSI)

égitest	folyékony aeroszol	szilárd aeroszol	nappali égbolt látványa
Vénusz	kénsav cseppek	kevés magas szintű vízgég, kénartalmú szemcsék	A Nap sosem látszik, látótávolság 4-6 km
Föld	víz-cseppek	vízgég, por	derült/borult, kék ég, fehér-szürke felhők, színes naplementék
Mars	nincs (talán a lebegő porszemek felületén speciális viszonyok között vékony vízfilm lehet)	vízgég, szén-dioxid jég	rózsaszín ég, fehér felhők, fákó rózsaszín vagy kék naplementék
óriásbolygók	víz-cseppek	ammónium-szulfid, vízgég	általában kék ég, főleg fehér, részben sárgás, barnás felhők
Titan	metán-etán cseppek	szénhidrogének	rózsaszín ég, sárgás felhők
Triton	-	nitrogénjég?	sötét és átlátszó, enyhén rózsaszín ég

I. táblázat - Az égitestek néhány légköroptikai szempontból fontos jellemzője

A négy óriásbolygó légköri jellemzői hasonlítanak egymásra. Felhőikben eltérő összetételű rétegek azonosíthatók. A legmélyebb megfigyelhető rétegekben vízcseppekből, illetve folyékony víz-ammónia keverékből állnak. Ezek felett vízgég felhők következnek, majd szilárd ammónium-szulfid, végül pedig ammóniakristály felhők (néhol kevés kén-hidrogénnel keverve). Legfelül ködréteg jellemző, amely főleg az Uránusz és kevésbé a Szaturnusz esetében viszonylag gyengén látszik át. Az Uránusznál, és az aeroszlokból szegényebb Neptunusznál a legfelső felhőszintet metánjég felhők adják. Ennél a két távolabbi óriásbolygónál a metán fotokémiai reakciói során acetilén (C_2H_2), etán (C_2H_6), metilacetilén (CH_3C_2H), propán (C_3H_8), diacetilén (C_4H_2), és bután (C_4H_{10}) képződik, amelyek lefelé ereszkedve kondenzációs magvakként szolgálnak. Az ammóniafelhőkben köbös rendszerben kiváló, átlátszó kristályok jellemzőek, az ammónium-szulfid felhőknél már rosszabb lehet a kristályok átlátszósága. Mélyebben a vízgég, illetve a folyékony vízszemcsék

alkotta felhőket feltehetőleg a Földön megfigyeltékhez hasonló szerkezetű szemcsék alkotják. A továbbiakban a szilárd felszínnel és jelentős légkörrel bíró égitesteket tárgyaljuk, (Vénusz, a Mars, a Titan, a Triton), valamint általánosságban vizsgáljuk a ritka légkörű jégholdak esetét.

A Vénusz légköre eléggé átlátszatlan, amelyben a felszín felett 48–70 km közötti magasságban főleg kén-savból és hidrogén-szulfidból álló, emellett fluort és klórt is tartalmazó felhőtakaró jellemző. A felhők szintjén 0,1–1 bar közötti légnyomás és nagyságrendileg 1 kilométeres látótávolság lehet. A hármass felhőzóna homogén felső rétege főként fotokémiai felhőkből áll, míg az inhomogénebb középső és alsó rétegnél a gáz fázisból történő kondenzációval keletkezhet. A felhőket főleg folyadékcseppek alkotják, de szilárd kristályok is előfordulnak, amelyek szulfátok vagy kloridok lehetnek (Knollenberg *et al.* 1980). A felhőzóna felett és alatt is ködréteg figyelhető meg, és köd jellegű aeroszolok fényelnyelését 80 km magasan is megfigyelték. A légkörben vízgőz is van (Schofield *et al.* 1982). Nagy magasságban kevés vízgőz kristály is lehet, amely szerepet játszhat a magasszintű köd kialakulásában. A felhőket 1–2 mikrométeres szemcsék alkotják, míg a felhőszint alatti ködöt szubmikronos részecskék. Néhány bizonytalan megfigyelés utalt arra, hogy amikor a Vénusz a Földhöz közel, alsó együttállás környékén jár, 15–25 fokos szögön van a Naptól, megvilágított része fényesebb, mint várható lenne – ez a 22 fokos halók visszaverődésével is magyarázható (O’Leary 1966). Az átlátszatlan légkör miatt a napkorong a felszínről közvetlenül nem pillantható meg, ennek megfelelően halojelenségek csak a légkörnek a felhők által uralt zónáiban lennének megfigyelhetők.

A Mars légköre a Földénél közel 100-szor ritkább, és a ritka gázanyag, valamint a felszín csekély hőkapacitása miatt változékony. Az atmoszféra átlátszósága is ingadozó, derült időben kevés sugárzást nyel el. Azonban főleg télen, a sarki területeken alacsonyszintű ködök és felhők is előfordulnak, elsősorban éjszaka. Ekkor az erősen lehűlt felszín felett túltelítetté váló légkörben a vízpára ködöt alkot és a felszínre is kifagy. A légköri aeroszolt átlátszó víz- és szén-dioxid jég, valamint átlátszatlan por, illetve ezek keveréke alkothatja.

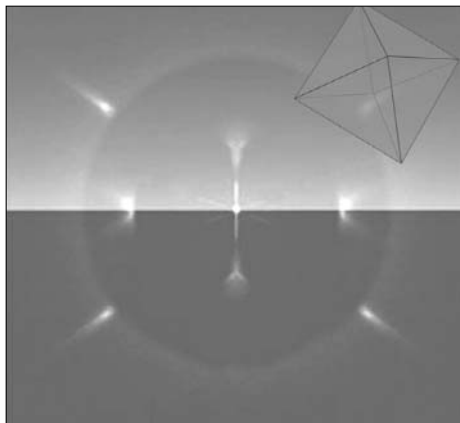
A Marson magasszintű szén-dioxid felhők a felszín felett 100 km környékén jellemzők, kristályaik kb. 1 mikrométeresek lehetnek. Feltehetőleg felfelé emelkedő melegebb, és egyre túltelítetté váló légtömegekből válnak ki, és enyhe árnyékot is vetnek a felszínre (Montmessin *et al.* 2006). A cirrusz jellegű, vízgőz kristályokból álló felhők főként az északi félteke nyári időszakában jellemzőek. (Lee *et al.* 1990).

A Marson az északi félteke nyarán földi mintára havazásnak nevezett jelenség tapasztalható – ez a bolygó „nedves” időszaka. Az északi nyári napforduló környé-

kén a sarkvidéken még kevés a felhő, és ha megjelennek, kb. 10 kilométer magasan lebegnek. Mintegy 50 marsi nappal a helyi napforduló után már éjszakánként lehűl annyira a légkör, hogy a sötétben állandóak lesznek a magasszintű felhők, amelyek reggelig kitartanak. A hőmérséklet további csökkenésével párhuzamosan egyre alacsonyabban jelennek meg. Ugyanakkor a hűvös éjszakákon, közvetlenül a felszín felett, a mintegy 700 méteres magasságig érő köd is rendszeressé válik. A köd feletti felhők a planetáris határréteg tetején keletkeznek, belőlük éjszaka hópolyhek, vagy jégkristályok hullanak. Ezek eleinte esés közben elszublimálnak, de a hűlő idővel párhuzamosan egyre mélyebbre jutnak, és végül el is érik a felszínt. A hulló jégkristályok mellett az éjszakai ködből is csapódhat ki H_2O a felszínre. Ez délelőtt még egy ideig világos „dér” formájában figyelhető meg, és a tél közeledtével egyre tovább marad meg a nap további részében is. Itt tehát napi ciklus zajlik: a nappal felmelegedő felszínről a jég elszublimál, a felerősödő turbulenciák pedig átkeverik az alsó, plane-táris határréteget, egyenletesen elosztatva benne a víz-gőzt és a felkapott port. A határréteg tetején a hőmérséklet csökkenésével a vízpára jégkristályokként kiválik és felhőket alkot, amelyekből főleg éjszaka hó hullik. A marsi légköri relatív nedvességtartalma a nap közepén, a legmelegebb időszakban mindössze 4–8% körüli. A planetáris határrétegben lévő H_2O -mennyiség pedig összesen kb. 40 mikrométer egyenérték körül lehet – azaz ilyen vékony réteget alkotna, ha folyékony formában az egész Mars felszínén egyenletesen kiválna.

A vízgőz hexagonális szerkezetével ellentétben a CO_2 jégkristályok négyszöges szimmetriával rendelkeznek. Ez azonban nem jelenti azt, hogy csak kocka alakú jégkristályok képződhetnek. Kialakulhatnak tetraéder, oktaéder, dodekaéder, kuboktaéder, 12 oldalú rombdodekaéder, sőt 24 oldalú hexakiszoktaéder formák is. Az áttetsző lapokból felépülő jégkristályok legnagyobb valószínűség szerint véletlenszerűen forognak a levegőben, mindenféle szabályosság nélkül. A különféle formájú CO_2 jégkristályokban megtörő napfény sokféle jelenséget hozhat létre, melyek külseje a földi halojelenségektől eltérő. (2. ábra) A kocka alakú jégkristályok esetében 81 fok sugarú, az oktaéder és a tetraéder esetében 39 fok sugarú, a rombdodekaéder esetében 30 fok sugarú, a kuboktaéder esetében pedig 26 fok illetve 39 fok sugarú körív alakulhat ki. A földihez hasonlóan a marsi jégkristályok esetében is feltételezhetünk valamilyen szabályos elrendeződést. Lehetséges például, hogy a jégkristályok úgy forognak a levegőben, hogy közben alsó lapjuk a horizonttal közel párhuzamos. Ezek jelenlétében a földi melléknepokhoz illetve érintő ívekhez hasonló jelenségek tűnhetnek fel a marsi égbolton. Az oktaéder alakú jégkristályok 4, a kuboktaéder jégkristályok 8, a dodekaéder jégkristályok pedig

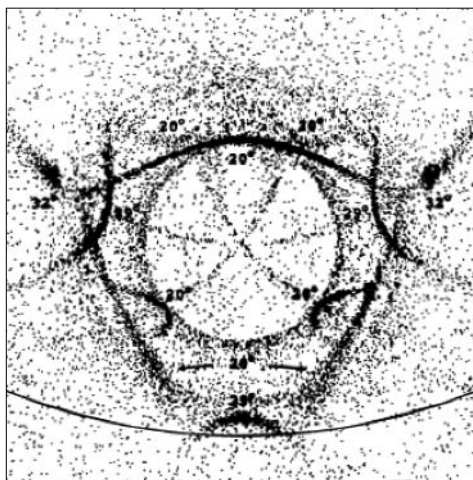
12 marsi melléknapot alakíthatnak ki. Ezek formája, Naphoz viszonyított helyzete és erőssége nagyban függ a napmagasságtól és a CO₂ jégkristályok méretétől (Cowley *et al.* 1999).



2. ábra - Oktaéder alakú szén-dioxid kristály és az általa szimulációval kialakított halojelenségek a Marson (Les Cowley, <http://atoptics.co.uk>)

A Titan légkörének magas rétegeiben – kb. 80–120 km-en – hosszú molekulaláncú szénhidrogének keletkeznek, főleg a Nap UV sugárzásának köszönhetően. Ezek átlátszatlan szmogréteget alkotnak. Ennél mélyebben, de a felszín felett akár 50 km-es magasságig figyelhetők meg felhők, amelyek kicsapódott metán és etán csepkekből, illetve kristályokból állhatnak. A kondenzációs magvakat talán tholinok (összetett szerves anyagok keveréke) képezik (Bartha & Toon 2006). Az aeroszolok a becslések alapján főleg 1–3 mikrométeresek, és azokat etán is alkothatja, kísérletileg igazolt kondenzáció útján (Bauerecker & Dartois 2009).

A metán és etán jégkristályok tulajdonságaikból adódóan kialakíthatnak halojelenségeket. (III. ábra) Ahhoz, hogy a jelenségek valóban létrejöjjenek, több



3. ábra - Metán és etán jégkristályok által szimulációval kialakított halojelenségek a Titanon (in Können 2004)

feltételnek kell teljesülni. Amellett, hogy a jégkristályoknak átlátszónak és hibátlan morfológiájúnak kell lenniük; értelemszerűen meg kell süsse őket a Nap. Ennek lehetősége a rendkívül sűrű felhőzet miatt kérdéses. A két legfontosabb anyag közül a metán jégkristályok nagyobb eséllyel alakíthatnak ki halókat, mivel a feltételezések szerint rengeteg lehet belőlük. A négyszöges szimmetriával rendelkező jégkristályok kocka, piramis, oktaéder és kuboktaéder formát vehetnek fel. A véletlenszerűen elhelyezkedő kocka alakú jégkristályok 48 fok, a piramis 20 és 29 fok, az oktaéder 29 fok, a kuboktaéder pedig 20, 29 és 48 fok sugarú körívet alakíthatnak ki.

Az etán jégkristályok hexagonális szimmetriával rendelkeznek, így formájuk a vízjéghez hasonlóan hatszög alapú lap és hasáb lehet. Ritkábban a hasábkristályok végeire piramis formájú csúcsok is nőhetnek, így a Titan légkörében feltételezett halojelenségek tárgyalásakor ezt a formát is meg kell említenünk. Az etán szimmetriája ugyan azonos a vízével, de törésmutatója nagyobb; így a kialakuló jelenségek már nem azonosak a földi jelenségekkel. A véletlenszerűen elhelyezkedő hasábkristályok – a földi 22 fokos halo helyett – itt 32 fok sugarú körívet alakítanak ki. Emellett ez a jégkristály is létrehozhat melléknapotokat illetve különféle érintő íveket (Können 2003, Können 2004).

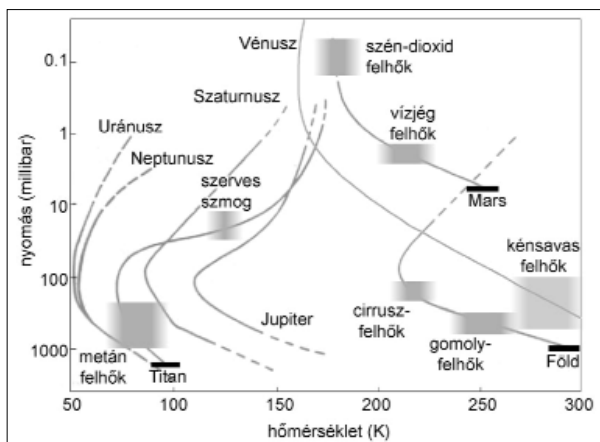
A Huygens leszállóegység 2005. január 14-én a Titan légkörébe való leereszkedéskor több műszerével is figyelte az égboltot, de semmilyen légköroptikai jelenséget nem figyelt meg. Halojelenségek megörökítésére a légkör felső részénél lett volna a legnagyobb esély, mivel itt még elég vékony a felhőréteg ahhoz, hogy a jégkristályok felületét megfelelő erősségű napsütés érje (Tomasko *et al.* 2008).

A Triton fagyos és ritka nitrogénlégkörében helyenként ködöt sikerült megfigyelnie a Voyager-2-űrszondának. A viszonylag sűrűbb felhők 8 km-es magasság alatt, a ritkább köd efelett volt jellemző. Az ezeket alkotó nitrogénjég szemcsék mérete 0,7 és 2 mikrométer között lehetett (Rages & Pollack 1992). A felszínről a gejzír jellegű kitörések sötét, poros anyagot lövellnek a légkörbe.

Az égbolton feltűnő halojelenségek mellett ismerünk olyan földi jelenségeket is, melyek a felszínen elhelyezkedő jégkristályok okozta fénytörés vagy fényvisszaverődés miatt alakulnak ki. Ilyen jelenségeket feltételezhetünk a jégfelszínnel rendelkező holdakon is (pl. az Európán vagy az Enceladuson). Az Enceladus déli pólusának környezetében működő gejzírek kidobódott anyagfelhőiben többféle gázt (szén-dioxid, metán, ammónia, nitrogén) illetve jég szemcséket azonosítottak (Szalai 2008). Mivel a kijutó anyagfelhő egy része visszahullik a felszínre, a szétszóródó jégkristályok elvben alakíthatnának ki halojelenségeket. Ezen jégkristályok azonban feltételezhetően túl nagyok és formájuk a

kilökődés okán valószínűleg nem szabályos, így a jelenségek kialakítására kevésbé alkalmasak.

A földi halojelenségek megörökítésekor a megfigyelők igyekeznek minél nagyobb látószögű fényképezőgépet használni. Érdeemes lenne az űrszondák leszállóegységeire is állandóan az égboltot figyelő, nagy látószögű kamerát elhelyezni. Így valamelyik halojelenség jövőbeli sikeres megörökítése esetén sok új információt szerezhetünk az adott égitest légkörében fennálló felhőfizikai és aerodinamikai hatásokról (4. ábra).



4. ábra - A jelentősebb légkörrel bíró égitestek átlagos p/T görbéi, néhány égitestnél a felhők szintjével, összetételével. A rövid sötét vonalak a felszíneket jelzik. A Vénusz esetében ez nincs feltüntetve, mivel ott 90000 mbar nyomás és 720 K hőmérséklet uralkodik, ezért jobbra kívül esik az ábrázolt térségen.

Farkas Alexandra, Kereszturi Ákos

Hivatkozások

- Bartha, E.L., Toon, O. 2006: Methane, ethane, and mixed clouds in Titan's atmosphere: Properties derived from microphysical modeling. *Icarus* 182, 230-250.
- Bauerecker S. Dartois, E. 2009: Ethane aerosol phase evolution in Titan's atmosphere *Icarus* 199. 564-567.
- Bérczi, Sz., Hargitai H., Illés E., Kereszturi Á., Opitz A., Sik A., Weidinger T. 2002: Bolygólégkörök atlasza. ELTE TTK Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, Uniconstant, Budapest-Püspökladány, 2002.

- Cowley, L., Schroeder M. 1999: Forecasting Martian Halos, *Sky & Telescope*, 1999/12, 60-64.
- Cowley, L. 1998-2009 Atmospheric Optics, <http://atoptics.co.uk>
- Farkas, A. 2009: Amikor megtörik a fény - Halojelenségek, Tudományos diákköri dolgozat, 56.
- Gyenyizse P. 2008: Planetomorfológia - In: Lóczy D. (szerk.): Geomorfológia II. Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs, pp. 305-362.
- Kereszturi, A. 2008: Klimatikus planetomorfológia speciális kollégium anyaga, ELTE TTK FFI Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék.
- Knollenberg, R. G.; Hunten, D. M. 1980: The microphysics of the clouds of Venus - Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment, *Journal of Geophysical Research*, 85, 8039-8058.
- Können G. P. 2003: Symmetry in halo displays and symmetry in halo-making crystals, *Applied Optics*, Vol. 42, No. 3, 318-331.
- Können G. P. 2004: Titan halos, *Proceedings of the International Conference "Titan - from discovery to encounter"*, 13-17. April 2004, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, ed.: Karen Fletcher, ESA Publications Division, 323-330.
- Lee, P.; Ebisawa, S.; Dollfus, A. 1990: Crystal clouds in the Martian atmosphere, *Astronomy and Astrophysics* 240, 520-532.
- Montmessin, F., Bertaux, J.-L., Quémerais, E., Korablev, O., Rannou, P., Forget, F., Perrier, S., Fussen, D., Lebonnois, S., Réberac, A., Dimarellis, E., 2006: Subvisible CO₂ ice clouds detected in the mesosphere of Mars, *Icarus*, Volume 183, 403-410.
- O'Leary, B.T. 1966: The Presence of Ice in the Venus Atmosphere as Inferred from a Halo Effect, *Astrophysical Journal*, 146, 754
- Rages, K., Pollack, J.B. 1992: Voyager imaging of Triton's clouds and hazes, *Icarus* 99, 289-301.
- Schofield, J. T.; Taylor, F. W.; McCleese, D. J. 1982: The global distribution of water vapor in the middle atmosphere of Venus, *Icarus*, 52, 263-278.
- Szalai T. 2008: Hogyan alakulnak ki az Enceladus gejzírjei? http://hirek.csillagaszat.hu/egyeb_holdak/20080301_ence-ladus_gejzir.html
- Tomasko et al. 2008: A model of Titan's aerosols based on measurements made inside the atmosphere, *Planetary and Space Science* 56, 669-707.

KÉRELEM

A Magyar Meteorológiai Társaság

az idén is köszönettel fogadja a személyi jövedelemadó 1%-ának felajánlását olvasóinktól.

Emlékeztetőül az MMT adószáma:

19815826-2-41

Az MMT Elnöksége