

Sarki fények a Naprendszerben

A Földön a sarki fény (északi fény, auróra) néven ismert jelenség látványa az emberek legnagyobb élményei közé tartozik. Aki a magasabb szélességek környékén lakik, azoknak mindennapos lehet a látvány, másoknak ritkább, vagy talán még sohasem találkoztak vele. Magyarország földrajzi szélességére és hosszúságára jellemző, hogy nekem életem 77 éve alatt csak egyszer sikerült egy zöld és piros elszíneződést látnom az északi ég alján 2003-ban. Édesanyámnak, aki 79 évet élt, egyszer adódott ilyen feledhetetlen élménye még 4–5 éves korában, amikor a nagyszülem testvéreivel együtt felkeltették 1918–19 környékén, hogy „Gyertek gyerekek! Sarki fény van, nézzétek meg!”, és amelyet még 70 évesen is nagy átéléssel mesélt nekünk. Mielőtt rátérnék a Naprendszer sarki fényeit ismertető leírásra, még a bevezető mondatot demonstrálandó csillagász kollégáim sarki fényekkel kapcsolatos élményeit is szeretném röviden elmondani.

Paparó Margit kolléganóm 2003. november 20-án este a mátrai obszervatóriumunkban észleléshez készülődött, amikor az általam is már említett sarki fény az északi égbolton vibrált. Észlelni nem lehetett tőle, így a földi megvilágításoktól zavartalan helyen 8 óra keresztül látta, élvezte, csodálta az erősségében, színeiben, mintázatában állandóan változó fénypásmákat. Az ő megfigyelései és elbeszélése alapján sikerült megbecsülönöm annak a Föld légkörében létrejövő, időben és térben állandóan változó fénylő foltnak és a bolygóközi térben haladó „mágneses zsáknak” a méretét, amely egy CME (Coronal Mass Ejection = koronakidobódás) hatására jött létre. A sarki fény addig tartott, amíg a Föld ennek a mágneses zsáknak a belsejében tartózkodott, vagyis amíg az át nem haladt rajta. A fényerősség azért változott, mert a zsákon belül a töltött részecskék sűrűsége és/vagy a mágneses tér erőssége,

valamint iránya időben változott. (Sarki fény Magyarország felett 1. és 2., Élet és Tudomány LIX. évf., 3. és 4. szám).



A sarki fény pásmái Éder Iván 2003. november 20-ai felvételén

Kelemen János kollégám 2013 nyarán egy éjszakai géppel Amerikából repült haza. Szerencséjére a gép bal oldalán az ablak mellé kapott helyet, amelyből észak felé látott ki. Izland környékén járhattak, amikor csodálatos sarki fény lángolt fel, és látni lehetett a sarkifényfüggöny minden rezdülését, átszíneződését. A látvány mintegy 2 óra hosszat tartott. Közben a gépen a sok száz utas a fedélzeti képernyőkön futó tucatfilmet bámulta bambán, vagy legjobb esetben aludt – ahelyett, hogy élvezte volna ezt a rendkívül ritkán megtapasztalható és csodálatos élményt. A történet meghall-

gatása után néhány nappal Szabó Róbert kollégám facebookján jelent meg egy szintén lelkes írás egy csodálatos sarki fényről. Kiderült, hogy ugyanazon a napon ugyan-csak Amerikából, de egy fél órával későbbi gépen repült haza, és ő is látta a sarki fényt. Hát így változik a világ! A korábbi korokban meg kellett várni, amíg a 40–50 évente bekövetkező csoda házhoz jött, ma pedig oda utazhatnak a csodához az emberek. De mindkét esetben ki kell nézni az ablakon, anélkül nem megy...

És most nézzük meg, hogy ma mit mesélhetek én a gyermekeimnek és unokáimnak a sarki fényről. Mit tudunk ma a sarki fényről a Földön, mit tudunk a többi bolygó sarki fényeiről, és mit tudhatunk meg a sarki fény révén a bolygókról és holdjaikról.

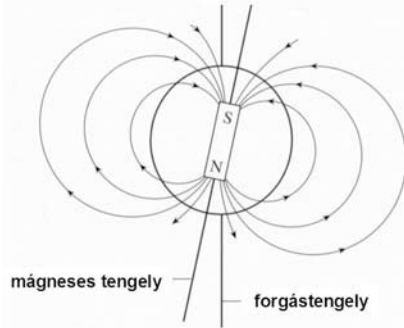
Sarki fény mágneses térrel és légkörral rendelkező bolygótesteken keletkezik, és egyszerre lángol fel mindkét mágneses pólus körül. Az északi félgömbön lévőket nevezik aurora borealisnak (északi fénynek), a déli félgömbön lévőket aurora australisnak. A Földön kívül az óriásbolygókon sikerült eddig megfigyelni sarki fényt, és meglepő módon a Marson és a Tritonon is, bár ez utóbbiaknak nincs dinamó hajtotta mágneses terük.

Hogyan jön létre sarki fény a Földön?

Miután a Föld mágneses terét ismerjük legrégebb óta, és arról gyűlt össze a legtöbb felszíni és űrszondás mérés, a földi magnetoszféra működését értettük meg eddig a legjobban. Tekintsük most át ennek alapján először azt, hogy hogyan és miért jön létre, és hogyan működik egy magnetoszféra, vagyis mi is az a Nap–Föld (vagy helyesebben Nap–bolygó) fizikai kapcsolat.

A Napból állandóan kifelé áramló napszél töltött részecskéi magukkal vonszolják a Nap mágneses erővonalait: ezek tulajdonképpen a bolygóközi mágneses tér erővonalai. Ha egy bolygónak van mágneses tere, és azt legjobban egy rúd-mágnes terével (dipól térrel) közelíthetjük, annak erővonalait a bolygóközi mágneses tér benyomja a Nap

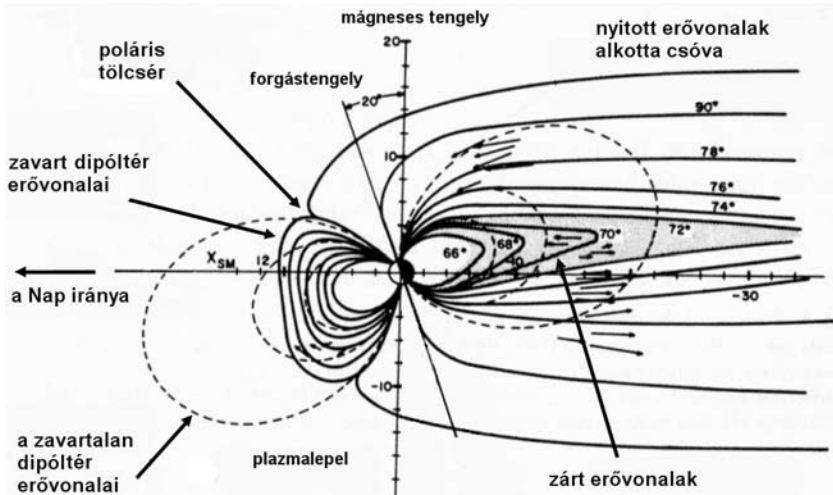
felőli oldalán, és megnyújtja az éjszakai oldalán. Azt a térrészt nevezzük a bolygó magnetoszférájának, ahol nem a bolygóközi mágneses tér, hanem a bolygó mágneses tere dominál. A bolygóközi mágneses tér erővonalai a nappali oldalán nemcsak benyomják a bolygó mágneses erővonalait, hanem össze is kapcsolódnak velük.



Egy bolygó mágneses dipólterének erővonalai

Amikor a bolygó mágneses erővonalai a bolygó forgása következtében az éjszakai oldalra fordulnak át, a bolygó magnetoszférája a bolygóközi tér hozzá kapcsolódott erővonalával a bolygóközi tér felé nyitottá válik. Ez lehetővé teszi, hogy a bolygóközi térből itt is bejussanak töltött részecskék a bolygó magnetoszférájába (nemcsak a poláris tölcseren keresztül), és azt, hogy ezen nyitott erővonalakon keresztül egy-egy plazmacsomag elhagyja a bolygó magnetoszféráját. A hajnali oldalra fordulva aztán a bolygóközi mágneses tér erővonala leválik a bolygó erővonaláról, és ezzel a bolygó mágneses erővonala újra vissza tud záródni zárt erővonallá. Ez így folytatódik nap mint nap a bolygó minden körfordulásánál.

Ha a Napon robbanás történik, és elszabadul egy CME, vagy valami más miatt jön létre egy lökésfront, akkor a bolygóközi térben egy nagyobb részecskesűrűségű plazmacsomag érkezik a bolygó magnetoszférájához – még jobban összenyomva azt. Ilyenkor kétféle légköri fénylés, vagyis kétféle sarki fény jöhet létre. Az egyik a nappali vagy protonauróra, a másik az éjszakai vagy auroraóvál fénylés.



Földünk magnetoszféréjának a mágneses tengelyen átmenő nappal-éjszaka metszete

A protonaurórákat a bolygó nappali oldalán létrejövő erővonal-összekapcsolódások sorozata hozza létre. Ilyenkor ugyanis a nagysebességű napszél-részecskék a bolygóközi erővonalokról észrevétlenül áttérnek a bolygó-erővonalakra, amelyek szinte „bevezetik” őket a poláris tölcseren keresztül a bolygó légköréig. Itt a becsapódó részecskék fénylésre gerjesztik a légkört. Ez a fénylés a bolygó mágneses pólusai körüli gömbszeleten belül olyan erős is lehet, hogy a szórt napfény ellenére a Nap által megvilágított oldalon is látható. Innen van a nappali auróra elnevezés. És miután a napszél főként protonokat tartalmaz, tehát a fénylést főként protonok ütközése váltja ki, ezért nevezik protonauróráknak is.

Az éjszakai aurórákat már régebben megismerte az emberiség, mert éjszaka feltűnőbb, könnyebb észrevenni. Ezt a fénylést a magnetoszféra csóvájában tárolt töltött részecskéknek (protonoknak, elektronoknak és nehezebb részecskék ionjainak) a beinjektálása váltja ki. Napszélzavarok idején ugyanis a bolygó magnetoszféréja jobban összenyomódik, és ilyenkor a távoli csóvarészben olyan közel kerülhet két nyitott erővonal egymáshoz, hogy

összekapcsolódhatnak. Ezzel egyrészt ez a két bolygóerővonal zárt erővonallá válna magával húzza a rajta mozgó töltött részecskéket a magnetoszféra belső része felé. Ezek az elektronok, ionok a bolygó légkörébe csapódva fénylésre gerjesztik a légkör felső rétegének atomjait, molekuláit ott, ahol ez az erővonal lehet a légkör magasságáig: ez okozza az auróraoválon fellángoló sarki fényt. A beinjektálási folyamat a „substorm”, amire a geofizikusok még nem találtak magyar kifejezést. Másrészt pedig a bolygóközi tér erővonala önmagával visszazáródva kisodorja a bolygóközi térbe a többi töltött részecskét a bolygó-magnetoszférából: ezt a kidobott plazma-csomagot nevezzük „plazmoid”-nak. Ezzel szabadul meg a bolygó-magnetoszféra a felszaporodott sok plazmától, amit már nem tud tárolni.

A Földnél sem értünk még minden részletet a magnetoszféra működésével kapcsolatban, de amikor a bolygóközi szondák és később a Hubble-űrteleszkóp képei és mérései alapján más bolygók sarkifénytevékenységéről is érkeztek információk, akkor bizony érték meglepetések a kutatásokat.

Meglepetések a Marsnál, a Jupiternél és a Szaturnusznál

Sarki fény a Marson

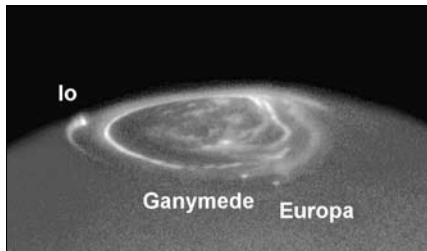
A Mars belsejében ma már nem működik dinamó, így nincs belső eredetű mágneses tere. Viszont a Fobosz és később a Mars Global Surveyor szonda mérései erős mágneses anomáliákat jeleztek, amelyeket a Mars kérgében lévő befagyott mágneses terek létével magyaráztak. Meglepetés volt, hogy ezek felett a mágneses anomáliák felett a légkörben sarki fényt láttak. Ez azt jelentheti, hogy a mágneses anomáliák kis mágneses burkakként, „mini magnetoszféraként” működnek a Marson, és védhetik az alattuk lévő légkört a napszél-erőzítől.

Áramcsövek óriásbolygók magnetoszféráiban

A Jupiternél az első nagy meglepetést a magnetoszféra zárt erővonalai mentén talált fluxuscső léte jelentette. Ezt a fluxuscövet az Io holdon átmenő zárt mágneses erővonalak alkotják, amelyek mentén mintegy 1000 amper erősségű áram folyik az Io és a jupiterlégkör között. Az Io ugyanis – mint minden reguláris hold az óriásbolygók holdrendszereiben – a zárt mágneses erővonalak felségterületén belül mozog bolygója körül. Az áramot az Io vulkánjai által kidobott, és a Nap ultraibolya sugárzása által ionizált atomok, molekulák mozgása képviseli, amelyek ionizálódva már a mágneses erőnek engedelmeskednek, ezért csak az erővonalak mentén mozoghatnak. Ezek az ionok az erővonalak körüli giromozgás közben a Jupiter légkörébe ütközve egy foltban fénylésre gerjesztik a légkört, amelyet a hold „lábnyomának” neveztek el.

Később az Europa, sőt a Ganymedes lábnyomát is megtalálták a HST-felvételeken. Ebből én annak idején arra következtettem, hogy kell, hogy az Európát is és a Ganymedest is elhagyja valahogyan valami anyag, ha nem is olyan erőteljes formában, mint ahogy azt az Io vulkánjai produkálják. Ezen feltételezés helyességének a fényes bizonyítékát látom abban a 2013. december

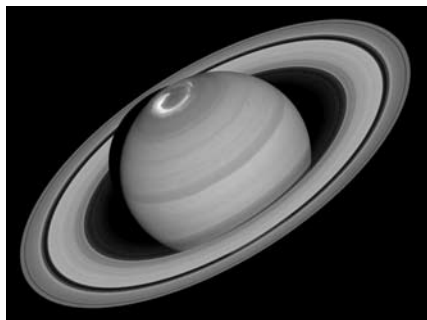
12-én bejelentett hírben, hogy a HST-vel egy évvel korábban készített felvételeken gejzír-működésre utaló nyomot találtak az Europa déli pólusa környékén. Ez azt igazolná, hogy sarkifény-képekből valóban következtetni lehet holdak vulkáni aktivitására.



Az Io, az Europa és a Ganymedes lábnyoma a Jupiter sarkifény-gyűrűjében. (NASA/ESA/STScI)

Az óriásbolygóknál folyamatos a sarkifény-tevékenység

A másik nagy meglepetést a Jupiternél a Galileo- és a Cassini-szonda mérései szolgáltatták. Kiderült, hogy a sarkifény-tevékenység folyamatos, és nemcsak epizodikusan játszódnak le alviharok, mint ahogy azt a földi magnetoszférában tapasztalták.



Sarki fény a Szaturnuszon a Hubble-űrtávcső felvételén (NASA/ESA/STScI)

Sötét aurorák az óriásbolygóknál

A Szaturnuszánál találtak először „sötét aurorát”. Ilyet később a Jupiternél is megfigyeltek a Galileo felvételein (egy sötét ovális alakzat járt körbe-körbe a mágneses pólus körül). A sötét aurorák keletkezését azzal magyarázták, hogy a légkörbe csapó-

dó részecskék nem fénylést, hanem kémiai reakciót váltanak ki, amelynek során a légkörben lévő metánból acetilén keletkezik, a szmogréteget alkotó acetilén-cseppecskék albedója pedig kisebb, mint a környező légköré.

Az óriásbolygók nulla-meridiánjai

Mint ismeretes, az óriásbolygók forgási idejét nehéz pontosan meghatározni, ezért a Jupiter esetében nagy örömmel konstatálták a kutatók, hogy természetes rádiósugárzásának erőssége változik. Rádiósugárzás akkor keletkezik, ha a mágneses tér a dipólkomponens mellett magasabb rendű tagokat is tartalmaz. Ekkor lehetnek helyek egy magnetoszférában, ahol a töltött részecskék relativisztikus sebességre tudnak gyorsulni, ami rádiósugárzást kelt. Ez a magnetoszférák teljesítményének kb. 2%-át viszi el.

Úgy gondolták, hogy mivel a mágneses dinamó a bolygóbelsőben működik, ennek a dinamónak a forgása meg kell hogy egyezzen magának a bolygónak a forgásával. A Jupiternél ezzel a rádiósugárzással meghatározott forgási periódust III-mal jelölték megkülönböztetésként az I-gyel, illetve II-vel jelölt forgási periódusoktól. Ezen utóbbiak a bolygó egyenlítőjéhez, illetve közepes szélességeihez tartozó forgási periódusok, amelyeket a felhőzet mozgása alapján határoztak meg (a gázbolygók differenciális rotációja miatt ez a kettő nem azonos).

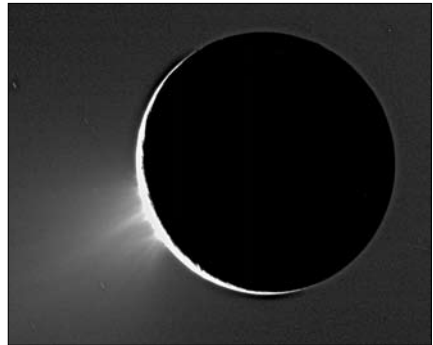
Víz-gejzirek működnek az Enceladuson

A Szaturnusznál még egy meglepetést szolgáltatott a Cassini-szonda mágneses mérései. Kiderült, hogy a Szaturnusz Enceladus holdján gejzirek működnek, amelyek csaknem folyamatosan finom vízjég-permetet juttatnak a Szaturnusz környezetébe. Azok a szemcsék, amelyek a Nap ultraibolya fényétől ionizálódnak, a zárt erővonalak mentén eljuthatnak a Szaturnusz légköréig is – fénylésre gerjesztve a felső légrétegek atomjait, molekuláit.

Miben különbözik más bolygók sarkifény-tevékenysége a földitől?

A Merkúrnak nincs légkör, de van mágneses tere. Kíváncsian várták a kutatók, hogy a Messenger-szonda mérései milyen jelenségekről hoznak híreket. Kiderült, hogy sarki fényt tényleg nem láttak, de napszél-zavarok esetén a csóvából a Merkúrnál is történik substorm, vagyis részecskegyorsítás ugyanúgy, mint ahogy a Földnél.

Az óriásbolygók auróratevékenysége a Földétől – egy mondatban kifejezve – abban különbözik, hogy a földi magnetoszférát jóformán csak a napszél zavarai hajtják, míg a vulkáni holdakkal rendelkező óriásbolygókét a holdakkal való kölcsönhatás is. Ez utóbbi az Io és az Enceladus csaknem folyamatos vulkáni tevékenysége következtében majdnem folyamatos fénylést hoz létre a Jupiter, illetve a Szaturnusz mágneses pólusai körül – ellentétben a napszél-zavarok hatására létrejövő substorm-tevékenységgel, amely szabálytalan időközönként és rövid ideig tartó légköri fénylésként jelentkezik ezen folyamatos fénylésen belül.



Gejzirek az Enceladuson (NASA/ESA/Cassini)

E két hold vulkánjai, gejzírjei ugyanis nagyon sok anyagot spriccelnek fel 200–800 km magasságba is. A bolygójukhoz képest viszonylag kis tömegű holdaktól hamar elsökik ez a „légkör”, a számítások szerint az Io csak körülbelül 20 óráig képes megtartani azt. Így e bolygók környezetébe nagyon sok por és gázanyag kerül, amely por-, illet-

ve gázgyűrűként kering körülöttük. Az Io által kibocsátott nátrium- és kén-gőz-por alkotja a Jupiter nátrium- és kén-gyűrűit, az Enceladus által kibocsátott vízjég-por pedig a Szaturnusz E gyűrűjét.

A bolygó forgása során a Nap felé forduló oldalon a napfény ionizálja az atomokat, molekulákat. Azok ezután már a mágneses erőknek is engedelmessé válnak a zárt mágneses erővonalak körüli giromozgásra kényszerülnek. A zárt erővonalakon az egész napi napsütés hatására egyre nagyobb mennyiségű plazma gyűlik össze, így az esti oldalon lesz a legtöbb töltött részecske. A magnetoszféra azonban nem tud akármennyi anyagot tárolni, ugyanakkor a magnetoszférák zárt erővonalairól a plazma nem tud eltávozni, kifolyni a bolygóközi térbe, mint ahogy a csóva nyitott erővonalairól ki tud. Az óriásbolygók gyors forgása a plazmát is gyors áramlásra készíti, az erővonalak ezért az esti oldalon egyre jobban kidudorodnak és megnyúlnak. Amikor már túl nagy a plazmanyomás a zárt erővonalakon, egy hirtelen erővonal-összekapcsolódással kiszakad egy plazmoid, és eltávozik a bolygóközi térbe. De vele együtt leszakad az egész csóva is. Eközben az ott maradt erővonal-végek összekapcsolódnak egymással egy zárt erővonalárrá, és a rajtuk maradt részecskéket belövik a zárt erővonalak talppontjai felé – fénylésre gerjesztvén ott a légkört. Ez az a finom, vékony auróraóvávszál, ami a Szaturnusz esetében ráadásul még nagyon változékony is.

A fenti modellt Zieger Bertalan, a soproni Geodéziai és Geofizikai Intézet munkatársa dolgozta ki, és „csöpögő csap modell”-nek nevezte el. Ha sok gőzt és gázt pöfögnek ki a vulkánok, akkor folyamatos lesz a plazmoidok kibocsátása. A Szaturnusznál, amelyre a modellt kidolgozta, kb. 20 percenként szakad ki egy-egy plazmoid. Ha csökken a vulkánok anyagkibocsátása, akkor ritkábban történik egy-egy kibocsátás, illetve még gyengébb vulkáni tevékenység esetén kaotikus lesz a plazmoidok kiszakadása. Mint ahogy a csapból csöpögő vízé is, ha a csapot nyitva felejtettük.

Hogy mi történik, ha a bolygóközi térben megérkezik egy lökésfront az óriásbolygókhoz, azt viszont a Jupiter esetében mutatták meg azok a képek, amelyek a Galileo, a Jupiter mellett elrepülő Cassini-szonda, valamint a Hubble-űrteleszkóp készített. Ilyenkor az óriásbolygókban is a csóvában jön létre erővonal-összekapcsolódás, és ugyanúgy lövődnek be a részecskék a nyitott erővonalak mentén a légkör felé, ahogy ezt már a Földnél láttuk. Ez a légköri fénylés a holdak vulkanizmusa által keltett vékony, a zárt auróraóvlon belül elhelyezkedő fénypamacs, ami csak addig a néhány óráig tart, amíg a bolygóközi tér zavara át nem halad a Jupiteren.

Az áthaladás közben azonban más zavar is keletkezik a magnetoszférában. A napszéllel való kölcsönhatás befolyásolja a rádiósugárzást is. Erre az a megfigyelési tény hívta fel a figyelmet, hogy a Szaturnusznál a Voyager- és Cassini-szondák mérései alapján a rádiósugárzással meghatározott forgási periódusok 8 perccel különböztek! Az természetesen teljesen irreális, hogy a bolygó forgási periódusa változott volna meg ilyen rövid idő alatt. Ezt a zavart azért csak a Szaturnusznál lehetett felismerni, mert a Szaturnusz mágneses és forgástengelye pontosan egybeesik – nagyobb tengelyhajlás esetén ugyanis az egyéb változások elfedik ezt a finom hatást.

A Szaturnusz rádiósugárzásával meghatározott forgási periódus-érték változása tehát még egy jelenségre ráirányította a kutatók figyelmét. Arra, hogy miközben a napszélzavarok még jobban összenyomják az óriásbolygók mágneses erővonalait (amelyeket a vulkanikus holdak amúgy is eltorzítottak), megváltozhat a relativisztikus részecskék gyorsítási helye a zárt mágneses erővonalak mentén, vagyis a III-as koordináta-rendszer sem ad egy stabil nulla hosszúsági fokot. Így továbbra sincs egy jó „Greenwich” az óriásbolygók esetében.

*Illés Erzsébet
(MTA Csillagászati és Földtudományi
Kutatóközpont Csillagászati Intézete)*