

kék nagyobb valószínűséggel hagyják el az intenzív ütközésekkel jellemezhető tartományt, azaz a nyírási ráta gradiensének ellenében mozognak. Tehát a folyamat során a sima részecskék a nyírási zónán kívül, míg az érdes részecskék a nyírási zónában halmozódnak fel, ami azt jelenti, hogy a nyírt tartományban megnövekszik a rendszer belső súrlódása, azaz a nyírással szembeni ellenállása.

Összefoglalva, kísérleti és numerikus vizsgálataink is azt mutatták, hogy egy kétkomponensű szemcsés keverékben, amelyben csak a szemcsék felületi érdesége a különböző (szemcseméret, alak és tömeg azonos), nyírás hatására a simább felületű részecskék a minta alján halmozódnak fel, mivel ezek könnyebben tudnak belecsúszni a deformáció során itt-ott megjelenő szemcsék közötti résekbe. Ha a numerikus szimulációban a gravitációt kikapcsoljuk, a szegregáció, ha

lassabban is, de továbbra is megfigyelhető. Ebben az esetben a simább felületű részecskék nagyobb valószínűséggel hagyják el az intenzív ütközésekkel jellemezhető nyírási zónát, így amellet halmozódnak fel.

Irodalom

1. Jánosi I.: Zajongó homokdombok és egyéb furcsaságok: új fejlemények a granuláris anyagok fizikájában. *Fizikai Szemle* 45 (1995) 78.
2. Jánosi I.: A homok titkai. *Természet Világa* 129 (1998) 19.
3. Vankó P.: Izgalmas mérések a mérnök-fizikus hallgatói laboratóriumban. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 307.
4. Börzsönyi T.: Lejtőn lefolyó szemcsés anyag dinamikája: instabilitások, lavinák. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 217.
5. S. Wegner, R. Stannarius, A. Böse, G. Rose, B. Szabó, E. Somfai, T. Börzsönyi: Effects of grain shape on packing and dilatancy of sheared granular materials. *Soft Matter* 10 (2014) 5157.
6. K. A. Gillemot, E. Somfai, T. Börzsönyi: Shear-driven segregation of dry granular materials with different friction coefficients. *Soft Matter* 13 (2017) 415.

ÚRIDŐJÁRÁS A SZATURNUSZNÁL

Bebesi Zsófia
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

A Szaturnusz magnetoszférájának belsejében egyaránt érvényesülnek belső és külső környezeti tényezők, amelyek együttesen formálják a magnetopauzán belüli kémiát és a részecskék, valamint a mágneses tér dinamikáját. A kölcsönhatás szempontjából mind a Jupiterrel, mind Földünkkel megfigyelhető hasonlóságok, azonban nem egyszerű közties esetről van szó. A Szaturnuszról az aurórajelenség esetében például kevésbé érvényesül az interplanetáris mágneses tér irányának hatása, mint a Földnél, azonban a Jupiter–Io párosban hasonlóan szintén megfigyelhető egy aktív hold – az Enceladus – és a poláris régió kölcsönhatása. A belső sugárzási övek nagy energiájú részecskepopulációinak fenntarthatósága ugyancsak érdekes probléma, amelynek vizsgálata során kiderült, hogy a Tethys hold pályáján belül már nem érvényesülnek a szoláris hatások, itt más mechanizmust kell feltételeznünk. A Titan holdat 2013-ban, a Cassini pályára állítása óta először figyelhettük meg a Szaturnusz magnetoszféráján kívül, a napszélben. Ezt az azóta is egyedülálló esetet szintén bemutatja az írás.

Bevezetés

Az úridőjárás fogalma minden olyan hatást magában foglal, amely a bolygóközi vagy a csillagközi térből érkezik, és módosítja egy adott égitest atmoszferikus és/vagy magnetoszférikus folyamatait. A Szaturnusz magnetoszférája rendkívül komplex, belső plazmaforrásokban gazdag, és ez a kölcsönhatást még sokrétűbbé teszi. A cikk a Cassini–Huygens űrmisszió Szaturnusz körüli pályára állítása óta elért, úridőjárás aspektusú, érdekes eredményekből szemezget, és jelenlegi ismereteink alapján megpróbál átfogó képet adni.

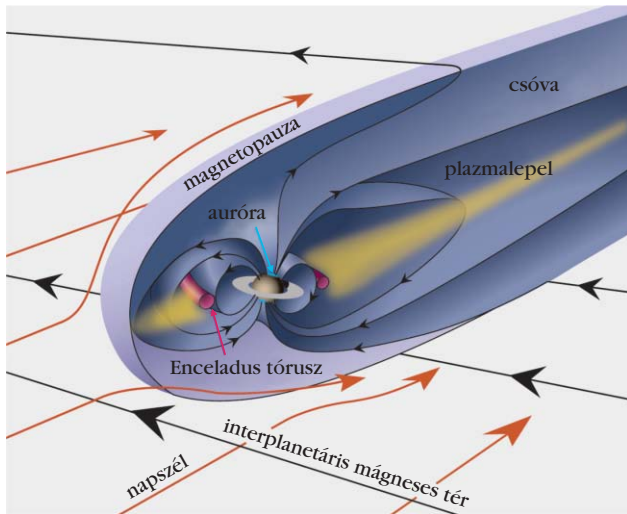


Bebesi Zsófia a Szegedi Tudományegyetemen szerzett csillagász (2003), majd fizikus diplomát (2005). Doktori értekezését az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetében írta és PhD fokozatát 2008-ban az ELTE-n szerezte meg. 2008–2011 között a Max Planck Institute für Sonnensystemforschung posztdoktori kutatója, jelenleg az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézetének Úrfizikai és Űrtechnikai Osztálya tudományos főmunkatársa.

A Szaturnusz magnetoszférikus folyamatai és a kozmikus hatások

A Szaturnusz mágneses tere a Jupiter után a második legkiterjedtebb planetáris magnetoszféra Naprendszerünkben. A bolygó gyors (10 óra 42 perc periódusú) forgása következtében a magnetoszférán belüli tartományban lévő, különböző forrásokból származó ionizált anyag (plazma) együtt forog (korotál) a Szaturnusz mágneseserővonal-rendszerével. A korotáló plazma áramlási sebessége szubszonikus, azonban a belőle származó, becsapódó ionok és elektronok jelentősen erodálják a holdak és a gyűrűk felszínét, valamint a Titan hold atmoszféráját.

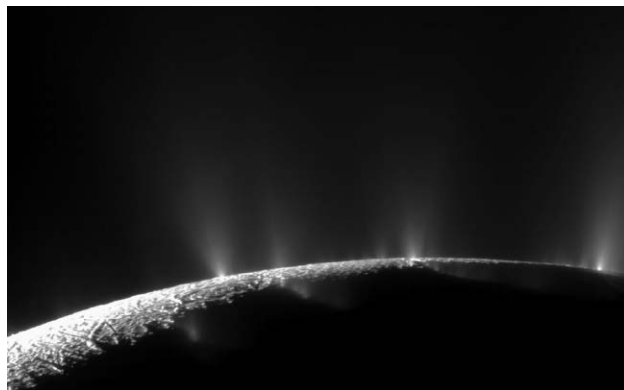
A magnetopauza (az a felület, amelynek mentén a magnetoszféra mágneses nyomása és a napszél dinamikus nyomása kiegyenlítődik) alakja és kiterjedése alapvetően – például a Föld esetében – a bolygó dipólterének, valamint az interplanetáris mágneses tér irányától és erősségétől függ. Azonban az óriásbolygóknál (például a Jupiternél és a Szaturnuszról) ennél összetettebb a folyamat, mivel forgási periódusuk Földünkénél lényegesen rövidebb, illetve magneto-



1. ábra. A Szaturnusz magnetoszférája (forrás: F. Bagenal és S. Bartlett).

szférájuk belsejében jelentős plazmaforrások találhatók. A Szaturnusz magnetoszférájában kiterjedt gyűrűrendszer, valamint több aktív hold található, amelyek közül az apró (504 km átmérőjű) Enceladus a korábban már említett korotáló plazma egyik elsődleges forrása. Az ekvatoriális síkban koncentrállódó plazma a magnetosféra alakjára is hatással van, ez tehát egy további meghatározó faktor, amelyet a határfelület alakjának és elhelyezkedésének vizsgálatánál figyelembe kell venni (1. ábra).

Az Enceladus déli pólusa közeléből – a hold krio-vulkanikus tevékenysége folytán – másodpercenként 300-600 kg-nyi anyag távozik (2. ábra), ez összetétel tekintve leginkább a vízcsoport elemeit tartalmazza [1]. Emiatt az Enceladus mostanában a Földön kívüli élet kutatása szempontjából is az érdeklődés középpontjába került, mivel feltételezik, hogy jeges gejzíreit egy kiterjedt, felszín alatti óceán táplálja. A kilökődő víz döntő hányada végül ionizálódik, és hozzáadódik az együttforgó magnetoszférikus plazmához, eloszlása tekintetében pedig alapvetően sűrű (~10 000 molekula/cm³) tóruszt képez (1. ábra) a hold pályája (pályasugara $R_{Enc} = 4 R_S$, ahol $R_S = 58\,232$ km a Szatur-



2. ábra. Az Enceladus gejzírei a hold déli pólusának közelében (forrás: NASA/JPL/SSI).

nusz sugara) mentén. Voltaképpen a Szaturnusz E-gyűrűjének – ami a Mimas és a Titan holdak között terül el – forrása is [2].

A magnetosféra a napszélparaméterek változására nagyon dinamikusán reagál, tágul és összehúzódik, ahogy ezt a Cassini–Huygens pályára állítását megelőzően, már a bolygó megközelítése során is megfigyeltük. Ekkor a szonda a magnetosféra előterében található lökeshullámot (annak mozgása miatt) hét alkalommal is keresztezte [3].

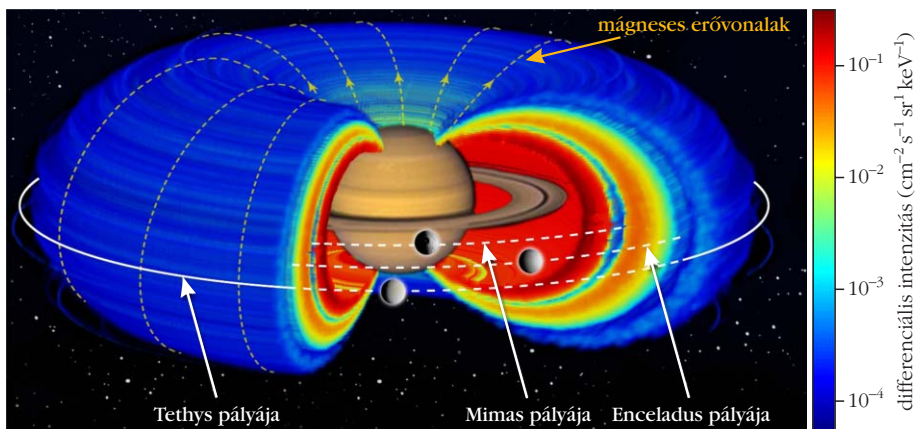
A Szaturnusznál az űridőjárást elsősorban a napszél, az interplanetáris mágneses tér, valamint a szoláris extrém UV-sugárzás változásai befolyásolják, de jelentős hatást gyakorolhat a kozmikus sugárzás is. A napszél során változik a napszél dinamikus nyomása, illetve az interplanetáris mágneses tér erőssége és iránya, a helioszférikus áramlepel elhelyezkedése, de ezek rövidebb időskálán is jelentősen ingadozhatnak. A Szaturnusz magnetoszféráját elérő kozmikus sugárzás naptevékenységi minimum idején erősebb.

Sugárzási övek, a Dione-öv

Az egyik tartomány, amellyel egyértelműen kapcsolatba lehetett hozni a Szaturnuszt elérő szoláris hatásokat, a sugárzási övek rendszere. Az ott található nagy

energiájú részecskék jelentős részét a gyűrűk és a jeges holdak abszorbeálják. Az öv (3. ábra) legsűrűbb tartománya (2,3–3,5 R_S) főleg protonokat és relativisztikus elektronokat tartalmaz (több száz keV – néhányszor tíz MeV energiák között). A fő öv elektronjai valószínűleg a külső magnetoszférából származnak (de lehetnek napszél eredetűek is), amelyek a magnetosféra belső tartományaiiba diffundálnak, és adiabatikusan fel-fűtődnek. A nagy energiájú protonoknak (az elektronok-

3. ábra. A Szaturnusz sugárzási övei (forrás: NASA, E. Roussos).



hoz hasonlóan) két populációja van, amelyek közül az alacsonyabb energiájút 10 MeV alatti, a magasabbat pedig 20 MeV körüli energiájú részecskék alkotják. Ezek valószínűleg a kozmikus sugárzás és a Szaturnusz környezetében található anyag kölcsönhatásából születnek a CRAND (cosmic ray albedo neutron decay) folyamat révén, de más magyarázat is elképzelhető. A CRAND során a galaktikus kozmikus sugárzás felhasítja a vele kölcsönhatásba lépő magnetoszférikus atom magját, és egy nagy energiájú neutron szabadít fel. A neutronokra nem hat a mágneses tér, így bármilyen irányban szabadon mozoghatnak, azonban élettartamuk korlátozott: alacsonyabb energiájú protonra, elektronra és egy antineutrínóra bomlanak. Az így keletkezett protonok és elektronok azután a sugárzási övek részévé válnak, így pótolva a holdak és a gyűrűrendszer által elnyelt részecskéket.

A Cassini méréseinek elemzése során a sugárzási övek tartományában újabb űridőjárás-aspektusú hatásra derült fény. Felfedezték ugyanis, hogy amikor nagyobb intenzitású szoláris esemény érte el a magnetoszférát, egy korábban ismeretlen sugárzási öv jött létre – a Dione-öv (a bolygótól mintegy $6,3 R_S$ távolságban) [4]. A Dione-öv azonban instabil, csak addig marad fenn, amíg a napszéleredetű behatás érvényesül. A Szaturnuszhoz a Dionenál közelebb keringő Tethys hold pályáján belül azonban a részecskék fluxusa már változatlan maradt, a fenti effektus nem befolyásolja. Ennek valószínű magyarázata, hogy a belső sugárzási öveket a Tethys hatékony abszorpciója izolálja a külső hatásoktól, megakadályozza a MeV-os ionok befelé irányuló radiális transzportját. Itt léphet színre például a már említett CRAND kölcsönhatás a belső MeV-os ionpopuláció fenntartásában.

Aurórajelenség, évszakok, atmoszférikus hatások

A kozmikus hatásokra adott reakcióit összességében tekintve a Szaturnusz magnetoszférája mind a Földdel, mind a Jupiterrel mutat bizonyos hasonlóságokat. Földünk esetében a napszél nagymértékben befolyásolja az auróra dinamikáját, és ez a hatás a Szaturnusznál is megfigyelhető. Ez utóbbinál azonban a jelenség kevésbé érzékeny az interplanetáris mágneses tér irányára. A Szaturnusz aurórájára – a Jupiteréhez hasonlóan – szintén hatással vannak a magnetoszféra belsejében zajló folyamatok. Az Enceladus kriovulkanikus aktivitása idején a holdról kilöködő ionok a mágneses erővonalak mentén beáramlanak a bolygó poláris tartományába, ahol kölcsönhatásba lépnek az atmoszféra

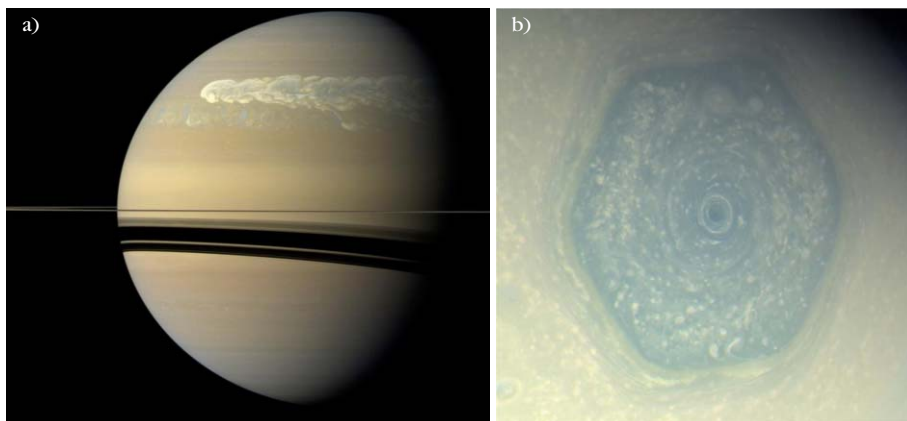


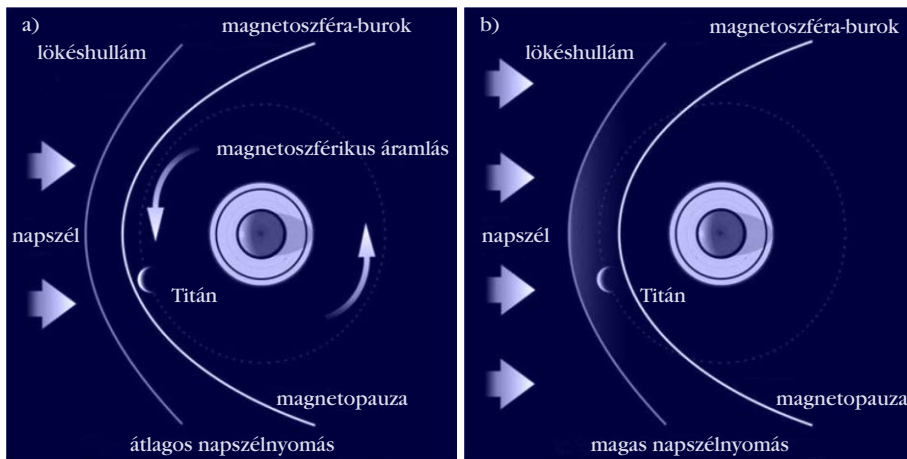
4. ábra. Az Enceladus „lábnyma” UV fényben a Szaturnusz északi pólusának közelében (forrás: Ken Moscati és Abi Rymner).

részecskéivel (4. ábra). A Jupiter sarki fényének létrehozásához – ugyanilyen elven – a vulkanikus természetű Io hold járul hozzá.

Az évszakos hatások tekintetében fontos megemlíteni, hogy a Szaturnuszon 2009 augusztusában volt a tavaszi nap-éj egyenlőség, azóta tehát az északi félteke egyre fokozottabb megvilágításban részesül. A nagyobb mértékű szoláris besugárzás következtében több légköri aeroszol keletkezik, ami kedvezően hat a felhőképződésre. Ennek következménye lehetett az a 2010 decemberében keletkezett viharrendszer is (5.a ábra), amely egyre kiterjedtebbé vált, és végül egy éven át fenn is maradt [5]. A viharrendszer kör-

5. ábra. a) Kiterjedt viharrendszer a Szaturnusz északi féltekéjén a nap-éj egyenlőséget követően. b) Hatszögletű alakzat a bolygó északi pólusán.





6. ábra. A Titan hold magas napszélnyomás esetén a magnetoszféra-burokba került a T32 idején (balra) (forrás: [10]). A Cassini T96-os közelrepülése során azonban a lökéshullám előtti tartományba lépett (jobbra).

nyezetében a fő aeroszol-összetevők az ammóniajég és a vízjég voltak [6].

Ugyancsak a fotokémiai folyamatok intenzitásának növekedése okozhatta az északi poláris hexagon (5.b ábra) színváltozását is [7], amelyet 2012 és 2016 között figyeltek meg. E légköri képződmény kialakulása, fenntartási folyamatai jelenleg még nem tisztázottak, csak elméleteink vannak.

A Titan a napszélben

A Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titan a magnetoszféra határán, a magnetopauza közelében, $20 R_S$ sugarú pályán kering. A magnetopauza tipikus kiterjedése a szubszoláris pontnál $22-27 R_S$ [8], amelynek következtében a Titan szélsőséges esetben kikerülhet a magnetopauza és a lökéshullám között elhelyezkedő magnetoszféra-burokba (6. ábra), vagy akár a napszélbe is. Ez utóbbit a hold vizsgálatának kezdete óta mindössze egy alkalommal, 2013. december elsején figyelhették meg (a T96-os Titan-megközelítés során) [9].

A napszél sűrűsége $0,6 \text{ cm}^{-3}$, sebessége pedig 360 km/s volt a Cassini közelrepülése idején, az interplanetáris mágneses tér erősségét 1 nT körüli értékűnek mérték. A Titan napszél felőli oldalán a többi, nem mágneses bolygóhoz hasonlóan kialakult a lökéshullám. A hold indukált magnetoszféra-burkának vastagsága a proton girosugarának nagyságrendjébe esett, de a mágneses tér a tartományban mintegy tízszeresé-

re növekedett, így az hatékony akadályt képezett a napszél részecskéi számára [9]. A lökéshullám előtti térnek egy korábbi alkalom során (amikor a Titan csak a Szaturnusz magnetoszféra-burkának tartományába került ki), a T32 idején (2007. június 13-án) megfigyelhető volt [10] hasonló fosszilizálódása itt is észlelhető volt, legalábbis erre utalt az elektronsűrűség megnövekedése a Titanhoz legközelebbi régióban. Ennek egyik magyarázata a Titan indukált magnetoszférájának hirtelen szétterjedése, ahogy a hold az alacsony nyomású napszélbe lépett.

A Cassini űrszonda Szaturnusznál töltött 13 éve alatt rengeteg új információt szerezhattünk a bolygóról, holdjairól, a Szaturnusz atmoszferikus és magnetoszférikus folyamatairól és azok egymásra gyakorolt hatásairól, azonban az elkövetkező évek, évtizedek során még minden bizonnyal számos új elmélet és észrevétel születik majd a mögöttük meghúzódó fizikáról, kémiáról.

Irodalom

1. E. C. Sittler Jr., N. Andre, M. Blanc, et al.: Ion and neutral sources and sinks within Saturn's inner magnetosphere: Cassini results. *Planetary and Space Science* 56 (2008) 3–18.
2. C. C. Porco, P. Helfenstein, P. C. Thomas, et al.: Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus. *Science* 311 (2006) 1393–1401.
3. M. K. Dougherty, N. Achilleos, N. Andre, et al.: Cassini Magnetometer Observations during Saturn Orbit Insertion. *Science* 307 (2005) 1266–1270.
4. E. Roussos, N. Krupp, T. P. Armstrong, et al.: Discovery of a transient radiation belt at Saturn. *Geophysical Research Letters* 35 (2008) 22106.
5. G. Fischer, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, et al.: A giant thunderstorm on Saturn. *Nature* 475 (2011) 75–77.
6. L. A. Sromovsky, H. Baines, P. M. Fry: Saturn's Great Storm of 2010–2011: Evidence for ammonia and water ices from analysis of VIMS spectra. *Icarus* 226 (2013) 402–418.
7. www.jpl.nasa.gov/
8. N. Achilleos, C. S. Arridge, C. Bertucci, et al.: Large-scale dynamics of Saturn's magnetopause: Observations by Cassini. *Journal of Geophysical Research* 113 (2008) A11209.
9. C. Bertucci, D. C. Hamilton, W. S. Kurth, et al.: Titan's interaction with the supersonic solar wind. *Geophysical Research Letters* 42 (2015) 193–200.
10. C. Bertucci, N. Achilleos, M. K. Dougherty, et al.: The Magnetic Memory of Titan's Ionized Atmosphere. *Science* 321 (2008) 1475–1478.

TALÁLD FEL MAGAD!

27. Ifjúsági tudományos és innovációs tehetségkutató verseny – 2017–2018-as tanév

Jelentkezni a kidolgozandó vagy megoldandó feladat maximum két oldalas word dokumentum vázlatával 2017. november 28. 15 óráig e-mailen lehet. A pontos feltételeket és nyereményeket a részletes kiírás tartalmazza.



A részletes felhívást keresd a http://innovacio.hu/ifj_verseny_pdf/27_ifj_verseny_felhivas.pdf helyen!