

tumállapotban legfeljebb egy részecske foglalhat helyet. Az $\frac{1}{2}$ spinű részecskének összesen 2 különböző spinállapota van. N darab fermion esetén tehát fennáll az

$$N \leq 2 V V_p / (\hbar/2)^3$$

egyenlőtlenség, ahol a térbeli térfogatot V -vel, az impulzustérbeli térfogatot V_p -vel jelöltük. Ez az egyenlőtlenség azt fejezi ki, hogy a részecskék száma nem haladhatja meg a lehetséges kvantumállapotok számát. Tegyük fel, hogy a részecske-rendszer (kinetikus) energiája korlátos. Ekkor az impulzustérfogata is korlátos. Ha növeljük a részecskék N számát, akkor szükség szerű, hogy növekedjen a rendszer V térfogata. Ezt minden kőműves tudja: „Ha több téglát építek be, akkor nagyobb falai lesznek a háznak.”

Ez a gondolatmenet végigkövethető kötött sokrészecske-rendszerek (molekulák, atomok, atommagok stb.) esetén is, amelyeknél az egyes részecskék diszkrét kvantumállapotokat foglalnak el. Az eredmény természetesen ugyanaz.

Ezek után feltehetjük a kérdést: mi történik, ha \hbar helyébe zérust helyettesítünk? A választ az utolsó képletből olvashatjuk le. Tetszőlegesen kicsiny V térfogatban tet-

szőlegesen nagy N számú részecske „fér el”. Ez azt jelenti, hogy a fermionok elveszítik az építőköz szerepet. Nem lehet belőlük sem molekulát, sem atomot, sem atommagot építeni, következésképpen Déva várát sem. A részecskékből nem lehet térbeli struktúrát létrehozni.

Nézzük most az elektrodinamikát! Amint az közismert, a *Maxwell* által megfogalmazott „klasszikus” elektrodinamika azonos a relativisztikus elektrodinamikával. Elég tehát a Maxwell-egyenletekre hivatkozni. Ha c helyébe végtelent helyettesítünk, akkor az elektrodinamika egyenletei szétesnek az elektrosztatika és a magnetosztatika független egyenleteire. Ezeknek az egyenleteknek nincsenek időfüggő megoldásai. Ezek szerint az eseményeket, ha eseményekről egyáltalán lehetne beszélni, nem lehet idő szerint rendezni. Közérthetően fogalmazva: nincs történelem.

Összefoglalva megállapíthatjuk tehát, hogy, ha \hbar zérus lenne c pedig végtelen, akkor struktúra nem jöhetne létre sem térben, sem időben. Az ilyen világ tehát nem lenne az az emberszabású Világ, amelyben azért vagyunk, „hogy valahol otthon legyünk”, ahogy azt *Tamási Áron* mondta.

Kelt Debrecenben, a *Fizika Nemzetközi Évének* végén.

A CASSINI–HUYGENS ŪRMISSZIÓ LEGÚJABB EREDMÉNYEI A SZATURNUSZNÁL

Bebesi Zsófia
MTA KFKI RMKI

Az amerikai (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*), az európai (ESA, *European Space Agency*), valamint az olasz (ASI, *Agenzia Spaziale Italiana*) űrügynökség által létrehozott Cassini–Huygens szondapár 2004. július elsején pályára állt a Naprendszer második legnagyobb bolygója, a Szaturnusz körül. A Cassini keringő egység a tervek szerint 4 évig kering a Szaturnusz körül, hogy ott minden korábrinál részletesebb tudományos vizsgálatokat végezzen. A Huygens leszállóegység 2005. január 14-én sikerrel landolt a bolygó legnagyobb holdja, a Titán felszínén.

A szondapár 1997. október 15-én indult útjára a Szaturnuszhoz. Az űrmisszió megtervezésében és megépítésében összesen 17 ország¹ vett részt, köztük hazánk is. Magyarország képviseletében az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetének munkatársai a Cassini fedélzeti műszerei közül a plazmaspektrométerhez (CAPS), valamint a magnetométerhez (MAG) készítették földi ellenőrző berendezéseket, szoftvereket és kalibráló berendezéseket, így ezen műszerek tudományos adataival kutatócsoportunk is dolgozhat.

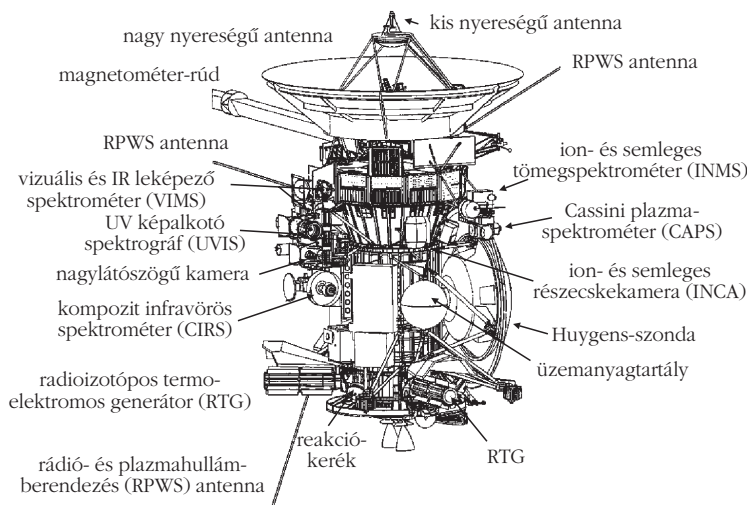
¹ A Cassini–Huygens űrmisszió létrehozásában közreműködő országok: Amerikai Egyesült Államok, Franciaország, Németország, Olaszország, Anglia, Hollandia, Ausztria, Finnország, Norvégia, Svédország, Magyarország, Írország, Spanyolország, Csehország, Svájc, Dánia és Belgium.

A Cassini–Huygens szondapár fedélzeti műszerei

A Cassini–Huygens minden idők legjobban felszerelt űreszköze, melyet összesen 27 különféle tudományos vizsgálat elvégzésére terveztek [1]. A Cassini keringő egység fedélzetén 12, a Huygens leszállóegységen pedig 6 tudományos műszert helyeztek el.

A Cassini fedélzeti műszerei (1. ábra) két nagyobb csoportba sorolhatók: ezek a távérzékelők, valamint a helyben mérő (*in situ*) tér- és részecske-detektorok. A távérzékelők közé tartoznak az optikai (képalkotó alrendszer; 380–1100 nm), az ultraibolya (UVIS; 55–190 nm), valamint az infravörös (CIRS; 7–1000 μm) kamerák és spektrométerek. A napszél, valamint a Szaturnusz mágneses terében áramló töltött részecskék irány- és energiaeloszlását leképező magnetosferikus képalkotó berendezés (MIMI; 15 keV – 130 MeV) és tömegspektrométerek (CAPS; 1 eV – 50 keV, INMS; 0,01–100 eV) mérik. A fedélzeten egy kozmikus poranalizátor is található, mely a Szaturnusz környezetében (elsősorban a gyűrűrendszerben és a holdak közelében) fellelhető porszemcsék mennyiségét és összetételét elemzi.

A Huygens leszállóegységen helyet kapott egy atmosféra-elemző berendezés, egy aeroszolgyűjtő és -párologtató, egy gázkromatográf és tömegspektrométer műszer, egy szélességmérő, egy képalkotó és spektrális sugár-



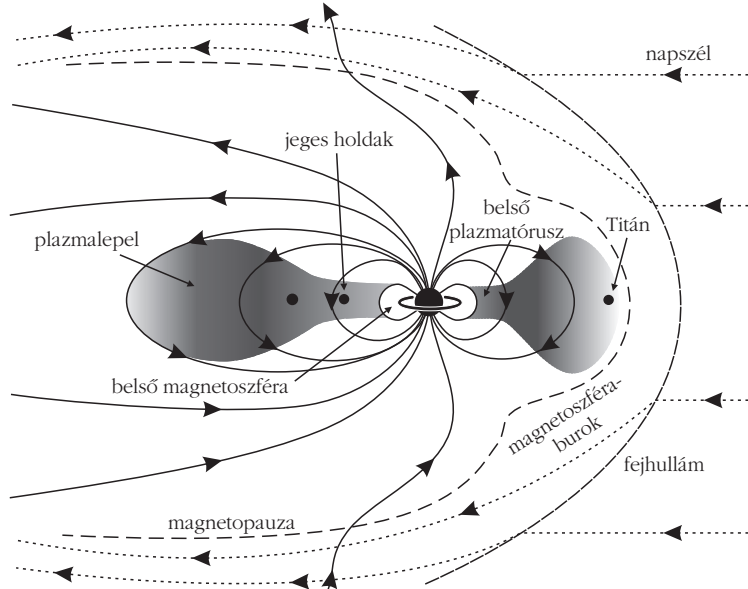
1. ábra. A Cassini űrszonda fedélzeti műszerei.

zasmérő, valamint egy felszínelemző tudományos csomag. Átfogó vizsgálatra van tehát lehetőség a Titán atmoszférájában, felhőrendszerében, valamint talaján.

A Cassini–Huygens űrszondapár alapvetően négyféle tudományos céllal érkezett a Szaturnuszhoz. 1) a bolygó és gyűrűrendszerének, 2) a magnetoszféra folyamatainak, 3) a jeges holdaknak, valamint 4) a Titán hold környezetének, atmoszférájának és felszínének vizsgálatára. A Cassini keringő egység 2004 és 2008 között 74-szer kerüli meg a Szaturnuszt, melynek során 45 alkalommal közelíti meg a Titánt, valamint nyolc alkalommal repül el 6 másik jeges hold közvetlen közelében. A keringés során az űrszonda pályájának inklinációja változatos szögértékeket vesz fel, végül poláris pályák is sorra kerülnek majd.

Korábban a Szaturnusznál három alkalommal járt űrszonda (1979 – *Pioneer 11*, 1980 – *Voyager 1*, 1981 – *Voyager 2*), azonban ezek nem végeztek hosszú távú méréseket a Szaturnusznál, mindössze elrepültek a bolygó mellett a külső Naprendszer felé tartó útjuk során. A Cassini

2. ábra. A Szaturnusz magnetoszférájának sematikus ábrázolása.



űrszonda fedélzeti műszerei ezen szondák detektorainak érzékenységét és felbontóképességét többszörösen túlszárnyalják, így minden korábbinál jobb minőségű adatokhoz jutunk a Szaturnusz és holdjainak rendszeréről.

Az alábbiakban az eddig született legfontosabb, új eredmények közül ismertetünk néhányat.

A magnetosferikus plazma összetétele és dinamikája

A Naphól érkező töltött részecskék – azaz a napszél – szuperszonikus áramlásával szemben a bolygó saját mágneses tere hatására kialakult magnetoszféra akadályt képez. Magnetoszférának azt a tartományt nevezzük, ahol a bolygó mágneses tere jelentősebb, mint „külső”, inter-

planetáris tér. Azt a nyomásegyensúlyi felületet, mely elválasztja a napszelet a bolygó mágneses terétől, magnetopauzának nevezzük (2. ábra). A magnetopauza Nap felé eső oldalán egy lökéshullám (fejhullám) alakul ki, mely elhajlítja a napszél áramlását, hogy az megkerülhesse a magnetopauzát. A lökéshullám és a magnetopauza helyzetét és állapotát a napszél dinamikus nyomása és a magnetoszféra mágneses nyomása határozza meg, ezért ezek a felületek állandó mozgásban vannak.

A Szaturnusz magnetoszférája (2. ábra) 20–25 R_S (ahol $R_S = 60\,268$ km a Szaturnusz sugara) távolságra terjed ki a Nap felé, mely magában foglalja a bolygó gyűrűit és számos holdját. A bolygó fő gyűrűinek (A, B, C, D) szélei (~3–9 R_S) között kering néhány jeges hold (Mimas, Enceladus, Tethys, Rhea), a Titán pedig éppen a magnetoszféra határán, 20,5 R_S sugarú pályán mozog. A magnetoszféra belsejében jelentős plazmaforrások találhatók (a gyűrűk, a jeges holdak és a Titán), melyek nagy mennyiségű nehéz iont juttatnak a magnetoszférába. A Szaturnusz gyorsabban forog a Földnél ($P_S = 10,65$ h), így a mágneses térrel együtt forgó (korotáló) plazma is gyorsan áramlik a magnetoszférában.

A Cassini plazmaműszerei [2] és a magnetométer [3] a Szaturnusz megközelítése során összesen 7 lökéshullám-áthaladást detektáltak (2004. június 27–28; 49,15–40,5 R_S), ami igen dinamikus magnetoszférára utal. A magnetopauzán ezt követően összesen 11 alkalommal (34,6–30,6 R_S) haladt át az űrszonda [4, 2]. Mindezek azt is mutatják, hogy a bolygó magnetoszférája a Cassini méréseinek idején sokkal kiterjedtebb volt, mint ahogy azt 25 évvel ezelőtt a Voyager szondák észlelték.

A plazmaspektrométer mérései alapján a magnetoszférabeli plazma általánosan tekintve főleg hidrogénből (H^+ , H_2^+), valamint a vízcsoport elemeinek (OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+ , O^+ , O_2^+) összetett keverékéből (általános jelölés: W^+) áll [2]. A plazma áramlási sajátosságai és ionösszetétele szerint azonban a magnetoszféra négy további tartományra osztható. 1) A Szaturnusz-

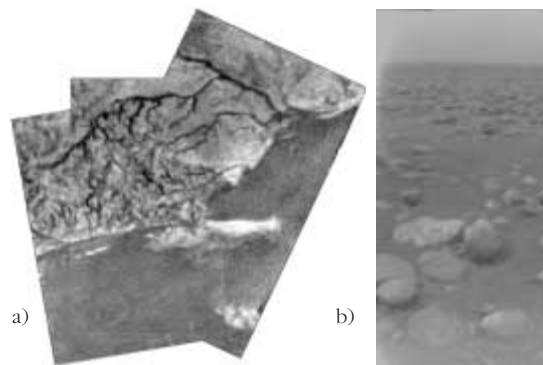
tól 9 R_S -nál távolabb a plazma főleg protonokból áll, mely forró, híg közeget alkot. 2) A Szaturnuszhoz közeledve (a külső plazmaszférában) változékony és részben korotáló plazmát észleltek a műszerek, melyet protonok, O^+ ionok, valamint a vízcsoport elemei alkotnak. 3) A belső plazmaszféra kevésbé változó, és a külsőnél merevebben korotál a mágneses térrel; fő alkotóelemei az O^+ és W^+ ionok. Ez a tartomány azonosítható az E gyűrűvel ($\sim 3\text{--}8 R_S$) is, melynek környezete vízgőzben gazdag. 4) A belső plazmaréteg (főként O^+ és O_2^+ ionokból áll) az A és a B gyűrűk fölötti tartomány, mely egyfajta *gyűrű-atmoszférának* is tekinthető. Az O_2^+ (mely valószínűleg a vízgőz sugárzás által indukált dekompozíciójából származik) dominanciája itt arra utal, hogy a gyűrűk fölötti réteg molekuláris oxigénből áll.

A magnetoszféra domináns ionösszetevője tehát – a várakozásokkal ellentétben – az O^+ ion. Korábban a N^+ iont vélték a Szaturnusz magnetoszférája leggyakoribb elemének, például a fontos ionforrásként számoltartott Titán hold atmoszférája is főleg N_2 -ből áll. A Voyager űrszondák plazmadetektorai még nem tudták elkülöníteni a nitrogént a vízcsoport elemeitől. Az azonban továbbra is kérdéses tehát, hogy a nitrogén csekély mennyisége a Titán-atmoszféra alacsony hatásfokú szökési folyamatainak köszönhető-e, vagy létezik egy olyan mechanizmus a magnetoszféra eddig vizsgált tartományaiban, mely viszonylag gyorsan elszállítja a kilépő nitrogénionokat.

A Szaturnusz holdjai – leszállás a Titánra

A Szaturnusz legnagyobb holdját, a Titánt már régóta nagyfokú érdeklődés és misztérium övezte bolygónyi mérete és vastag, a felszín teljesen eltakaró felhőrétege miatt. A Voyager 1 űrszonda méréseiből ráadásul kiderült, hogy a hold atmoszféráját (Földünkéhez hasonlóan) főként nitrogén alkotja. A Cassini–Huygens űrmisszió egyik legsarkalatosabb pontját a Huygens leszállóegység küldetése jelentette. A Huygens 2005. január 14-én sikerrel landolt a Titán felszínén, végrehajtva ezzel az eddigi legtávolabbi, ember által irányított landolást. A szonda 9:45-kor (UTC) lépett be az atmoszférába, ereszkedését ezt követően ejtőernyők fékeztek és koordinálták, majd 11:38-kor (UTC) a Huygens elérte a hold felszínét [5]. Ezalatt műszerei folyamatosan monitorozták az atmoszféra összetételét, a szélsőségeket, illetve több száz felvétel készült a felszínről is (3.a–b ábra) [6, 7].

A Titánnak nincs saját mágneses tere, és mivel a Szaturnusz magnetoszférájának határán kering, atmoszféráját közvetlenül bombázzák a magnetoszféra töltött részecskéi, valamint a Napból érkező UV-fotonok. A bejövő plazmaáram tulajdonságai az ionizációs folyamatok szempontjából döntő fontosságúak, mivel megszabják a szerves molekulák kialakulását és kémiáját a Titán atmoszférájában. Ezek a szénhidrogének végül esők formájában lecsapódhatnak a felszínen – innen eredt az az elképzelés, mely szerint a Titán vastag felhői alatt esetleg metánt és egyéb vegyületeket folyékony állapotában tartalmazó tengerek hullámozhatnak. A Huygens szonda adatai ezt nem

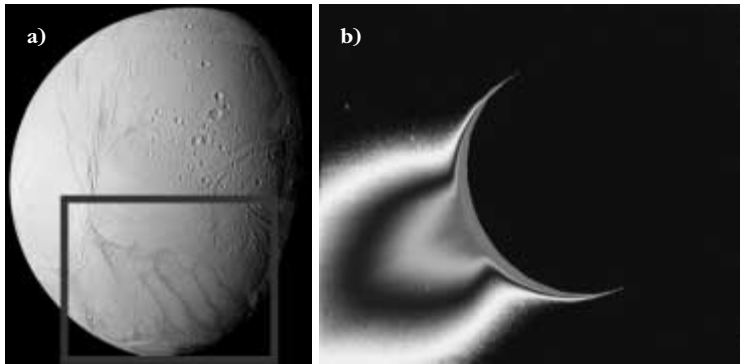


3. ábra. (a) A Huygens szonda képalkotó és spektrális sugázmérő (DISR) berendezése által, néhány km-es magasságban készített mozaikfelvétel a Titán felszínéről. (b) A Huygens leszállóhelyén kavics méretű jégdarabok borítják a felszín, melyek lekerekített alakja eróziós folyamatokra utal.

támasztják alá, azonban vannak arra utaló jelek, hogy időről időre csapadék áztatja a Titán felszínét, mely a földi folyókhoz hasonlóan módon medreket váj a talajba, és az alacsonyabban fekvő területek felé áramlik (3.a ábra). A Titán kémiai folyamatainak körforgásában (például a felhőképződésben és a csapadék kialakulásában) feltehetőleg a metán játssza a földi vízgőzhez hasonló szerepet. A Földön a metán gyűlékony gáznak számít, a Titánon azonban a nagy nyomás és a 170 °C alatti hideg miatt folyékony állapotba kerülhet. A kutatók lenyűgözőnek találták, hogy a távoli hold atmoszférájában és felszínén lejátszódó folyamatok (eltekintve attól, hogy a részt vevő anyagok valamelyest eltérőek) mennyire hasonlatosak a földiekhez. Az atmoszféra és a felszín további elemzéséből az is kiderült, hogy a Titán felszínén vulkanikus aktivitás is zajlik, amelynek során azonban nem láva, hanem vízgőz és ammónia tör fel.

A Titán atmoszférájának magas nitrogéntartalma és általánosságban a szerves vegyületek nagy koncentrációja [8, 9] miatt a kutatók feltételezik, hogy a Titán kémiai szempontból leginkább a korai, még az élet kialakulása előtti Földhöz hasonlít. Vannak azonban olyan tényezők, melyek alapvetően kizárják az általunk ismert létformák számára az élet lehetőségét a Titán felszínén. Ezek közé tartozik a Titán jelenlegi rendkívül alacsony, átlagosan mintegy -180 °C-os felszíni hőmérséklete, a folyékony víz, valamint a szabad oxigén hiánya. A felszín közelében a nyomás igen nagy, a Földön mért nyomás mintegy másfélszerese [10]. A Titán felszínére a földfelszín elérése napfénynek csak az ezredrésze jut részben a Naptól mért nagy távolság, részben pedig a vastag atmoszféra miatt. A földi légkört jelentősen megváltoztatta az élet megjelenése, ezért a Titán atmoszféráját tanulmányozva azt reméljük, hogy megérthetjük, milyen lehetett Földünk légköre még a biológiai aktivitás megjelenése előtt.

Az apró Enceladus – sugara 505 km – (4.a ábra) még a Voyager 2 űrszonda 1981-es látogatása alkalmával hívta fel magára a kutatók figyelmét, mivel felszínén – kis mérete ellenére – komolyabb aktivitásra utaló, fiatal képződményeket és anyaglerakódást fedeztek fel [7]. Az Enceladus mindezek mellett a Szaturnusz ritka E gyűrűjének legsűrűbb tartományában kering, feltételezhető

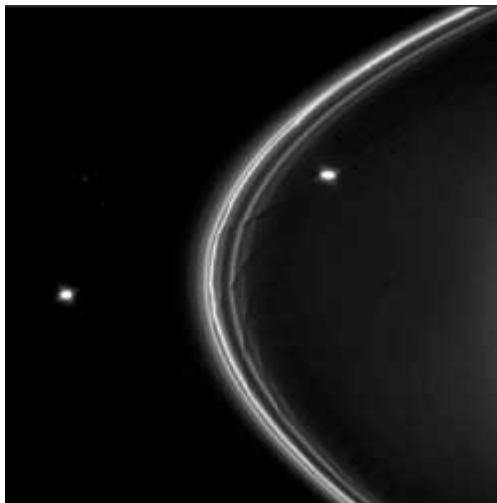


4. ábra. (a) Az Enceladus a Cassini felvételén – a bekeretezett tartományban láthatók az úgynevezett „tigriscsíkok”. (b) Anyagkiáramlás az Enceladusról (a felvétel ellenfényben készült). Forrás: NASA.

tehát, hogy az E gyűrű anyaga is nagyrészt erről a holdról származik. A hold észlelt aktivitása arra utal, hogy az Enceladus felszíne alatt létezik egy belső hőforrás, melynek működése leginkább az árapály-folyamatokra vezethető vissza.

A Voyager felvételein látott fiatal területek korát akkor nagyságrendileg 100 millió évre becsülték, a Cassini észlelései szerint azonban a déli pólus környékén napjainkban is tart az anyagkiáramlás (4.b ábra). Ebben a régióban a környezetüknél mintegy 20 fokkal melegebb (~-182 °C) törésvonalak (ún. „tigriscsíkok”) húzódnak, melyek mentén vízmolekulák, jég szemcsék, valamint nyomokban nitrogén, szén-dioxid és egyéb vegyületek (metán, etán és etilén) jutnak a felszínre. Az ott lerakódott jég kristályszerkezetét a sugárzás az idők során fokozatosan szétroncsolja, így a kristályosodottsági állapotból a hasadékok kora is meghatározható. Ennek vizsgálatából kiderült, hogy a törésvonalak nem egészen 1000 évesek lehetnek. A déli pólus környékén kiáramló, akár lokális atmoszférának is tekinthető anyag eloszlását és összetételét a Cassini ultraibolya képalkotó spektrográfiával (UVIS) a Bellatrix csillag fedése alkalmával (2005. július 11.) is vizsgálták, és a csillagfény spektrumának abszorpciójából kimutatták a víz jelenlétét. Mivel a ki-

5. ábra. A Prometheus terelőholdnak az F gyűrű szerkezetére gyakorolt gravitációs perturbáló hatása a Cassini felvételén. A gyűrű külső oldalán a másik terelőhold, a Pandora látható (2004. április 13.). Forrás: NASA.



áramló anyagot főleg víz alkotja, elképzelhető, hogy az Enceladus felszíne alatt bizonyos mennyiségű folyékony víz is lehet – mint ahogy azt a Jupiter Europa nevű holdjának esetében is feltételezik. Az Enceladus esetében azonban ez a felszín alatti vízkészlet valószínűleg csak kis területekre koncentrálódik.

Új eredmények a gyűrűrendszerrel

A Cassini képalkotó alrendszere minden korábbinál jobb felbontású felvételeket készített a gyűrűrendszerrel [11], melyek némelyikén új holdak is feltűntek, valamint nagy részletességgel tárult fel a holdak és a gyűrűrészcskék közötti kölcsönhatások széles skálája. A Cassini mérései révén a már ismert holdak pályaelemeit is pontosítani lehet, valamint kölcsönhatásaikból és látszó fényességükből a tömegük és a méretük is pontosabban meghatározható. Mindezeket túl a Cassini négyéves keringése során a gyűrűrendszer időbeli fejlődését is figyelemmel kísérhetjük.

A képalkotó rendszer vizsgálatai nyomán 2004 júniusában a Mimas (pályasugár: $r = 3,08 R_S$) és az Enceladus ($r = 3,95 R_S$) holdak közötti tartományban két (S/2004 S1, S/2004 S2; ideiglenesen Methone, illetve Pallene elnevezésű), októberben pedig – a Dione hold követő pályáján – egy harmadik (S/2004 S5; ideiglenesen a Polydeuces névvel) új objektumot fedeztek fel. A Szaturnusz F gyűrűjének közelében is találtak új holdakat (S/2004 S3, S/2004 S4 és S/2004 S6), ezekkel kapcsolatosan azonban még nem teljesen tisztázott, hogy valódi holdakról, vagy csak anyagcsomókról van-e szó.

Az F gyűrűvel kapcsolatosan – melynek különleges, szálas szerkezete már a Voyager szondák felvételein is kitűnt – további érdekes eredmények is születtek. Az 5. ábrán – mely a gyűrű–hold kölcsönhatások egyik érdekes megnyilvánulása – az F gyűrű és két terelőholdja, a Prometheus ($145 \times 85 \times 62$ km; $r = 2,28 R_S$; $P = 0,61$ nap), és a Pandora ($114 \times 84 \times 62$ km; $r = 2,35 R_S$; $P = 0,63$ nap) látható a Cassini felvételén.

Nemrégiben derült fény arra, hogy az F-gyűrű peremén megfigyelhető sötét fodrozódást a Prometheus gravitációs perturbáló hatása okozza [7]. A Prometheus az F gyűrű belső (azaz a Szaturnuszhoz közelebb eső) oldalán kering, ezért a gyűrűrészcskéknél gyorsabban mozog. A hold az apoapszis idején (ekkor éri el pályájának a Szaturnusztól mért legtávolabbi pontját) kerül legközelebb a gyűrűhöz, ekkor gyakorolja a legnagyobb gravitációs hatást a gyűrűszemcsékre. Azok a részecskék, melyek közvetlenül az apoapszis előtt kerülnek a Prometheus közelébe, visszafelé húzó hatást érzékelnek, míg az apoapszis után ez a hatás előrefelé mozdítja a részecskéket, ezáltal hasadék keletkezik a gyűrűben. Mivel holdhoz a tömegvonzás miatt közelebb került részecskék az F gyűrű környezetében lévő szemcséknél immár gyorsabban keringenek, a gyűrűben átlós fodrok jönnek létre kialakítva ezzel a már korábban is észlelt különleges szerkezetet.

A Cassini űrszonda a tervek szerint 2008-ig kering majd a Szaturnusz körül, addig is folyamatosan értékes ismeretekkel gazdagítja tudástárunkat Naprendszerünk második legnagyobb bolygójáról és annak egyedülálló, dinamikus környezetéről.

Irodalom

1. *Passage to a Ringed World, The Cassini-Huygens Mission to Saturn and Titan* – szerkesztette L.J. Spilker, NASA SP-533 (1997)
2. D.T. YOUNG ET AL.: *Composition and Dynamics of Plasma in Saturn's Magnetosphere* – Science 307(2005) 1262
3. M.K. DOUGHERTY ET AL.: *Cassini Magnetometer Observations During Saturn Orbit Insertion* – Science 307(2005) 1266
4. T.I. GOMBOSI, K.C. HANSEN: *Saturn's Variable Magnetosphere* – Science 307(2005) 1224
5. J.-P. LEBRETON ET AL.: *An overview of the descent and landing of the Huygens probe on Titan* – Nature 438(2005) 758
6. A Cassini-Huygens hivatalos weboldala az ESA-nál: www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens
7. A Cassini-Huygens hivatalos weboldala a NASA-nál: saturn.jpl.nasa.gov
8. G. ISRAËL ET AL.: *Complex organic matter in Titan's atmospheric aerosols from in situ pyrolysis and analysis* – Nature 438(2005) 796
9. H.B. NIEMANN ET AL.: *The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe* – Nature 438(2005) 779
10. M. FULCHIGNONI ET AL.: *In situ measurements of the physical characteristics of Titan's environment* – Nature 438(2005) 785
11. C.C. PORCO ET AL.: *Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Rings and Small Satellites* – Science 307(2005) 1226

GEOMÁGNESES PULZÁCIÓK: HULLÁMOK A BOLYGÓKÖZI TÉRBŐL ÉS A MAGNETOSZFÉRÁBÓL

Verő József

MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron

A *geomágneses pulzációkat*¹ Lamont francia-skót-bajor csillagász fedezte fel az 1840-es években. Azt vette észre, hogy kis mágnesei néha nem saját periódusukkal lengenek, hanem 20 s körüli periódussal. Később ugyanő a *földi áramokban*² is talált hasonló periódusú változásokat. A felfedezésnek nem volt visszhangja, csak akkor nőtt a jelenség iránti érdeklődés, amikor a 20. század elején a holland *van Bemmelen* Batáviában (ma Dzsakarta) és a Peking melletti Zi-ka-weiben, *Angenheister* pedig az akkor német Nyugat-Szamoá szigetén, Apiában és a német Fürstenfeldbruck állomáson egyszerre észlelte őket. Ezzel bebizonyosodott, hogy a pulzációk nem elektromosan töltött levegő mozgásából, hanem egészen más, nagyméretű forrásból származnak.

Amikor jórészt a Franciaországban élő magyar származású *Kunetz Géza* kezdeményezésére a pulzációkat alkalmazni kezdték a negyvenes években, nagy mennyiségű mérési anyag gyűlt össze. Ezek nyomán kiderült, hogy a nappali, a mai nomenklatúra szerint Pc3-nak nevezett pulzációk periódusa változik a földrajzi szélességgel, pontosabban az *L*-értékkel, ami a mérési helyen áthaladó geomágneses erővonal és az Egyenlítő síkjának metszéspontjáig terjedő távolság a Föld középpontjától számítva, földugárban mérve. Nálunk az *L* értéke 2 körül van. Itt a periódus 20–25 s, Stockholm környékén, *L* = 3,3-nál 50–65 s, L'Aquilában, Rómától keletre 14 s körüli (*L* itt 1,5). A változás tehát jelentős.

Még alig volt ismert ez a szélességgel való periódusváltozás, amikor az angol *Dungey*, aki egyebek között a bolygóközi mágnes tér és a geomágneses tér erővonalainak összekapcsolódása, átkötődése elméletével megadta a napszél energiájának a magnetoszférába való bejutására vonatkozó, ma is érvényes modelljét, elméletet alkotott e szélességfüggés magyarázatára. Eszerint az erővonalak mentén *magnetohidrodinamikai* (*Alfvén*-) hullámok³ terjednek az erővonal két, az ionoszférában lévő végpontja között. A két végpont közötti futási idő kétszerese az erővonal menti rezonancia (FLR, field line resonance) periódusa. (Az erővonalak a nagyobb részecskesűrűség miatt elvesztik a hozzájuk kötött részecskéket az ionoszférában, a hullámok és részecskék pedig az erővonalak összetartása miatt visszafordulnak, tükröződnek az erővonalak „vége” felé haladva.) Ez a futási idő függ az erővonal hosszától – innen az *L*-értéktől való függés –, valamint a részecskesűrűségtől, elsősorban az egyenlítői sík környezetében. Mivel az Alfvén-sebesség fordítva arányos a részecskesűrűség négyzetgyökével, az FLR-periódus nagyobb részecskesűrűség esetén hosszabb, kisebb részecskesűrűség esetében rövidebb. Emiatt egy mérőhelyen is változhat az FLR-periódus. A sebesség képletében szintén szereplő mágneses térerősség időben állandónak tekinthető.

Az aktív űrkutatás megindulásával egyre változatosabb és részletesebb adatok váltak ismertté a bolygóközi térről. Ezek felhasználásával kezdték keresni az FLR gerjesztésének energiaforrását, hiszen erről *Dungey* modellje semmit sem mondott. Hamarosan kiderült,

¹ *geomágneses pulzációk*: A geomágneses térben fellépő, 1–600 s periódusú sokféle jel gyűjtőneve. A tanulmányban a 15–45 s periódusú szabályosan szinuszos nappali Pc3 nevű pulzációkról esik szó.

² *földi áramok*: A geomágneses tér változásai által földkéregben indukált áramok.

³ *magnetohidrodinamikai* (*Alfvén*-) *hullámok*: Plazmában terjedő hullámok, amelyek sebessége a mágnes tér erősségétől és részecskesűrűségtől függ. Több típusuk létezik.