

A SZATURNUSZ ÉS PLAZMAKÖRNYEZETÉNEK VIZSGÁLATA – RÉSZVÉTEL A CASSINI–HUYGENS-ŰRMISSZIÓBAN

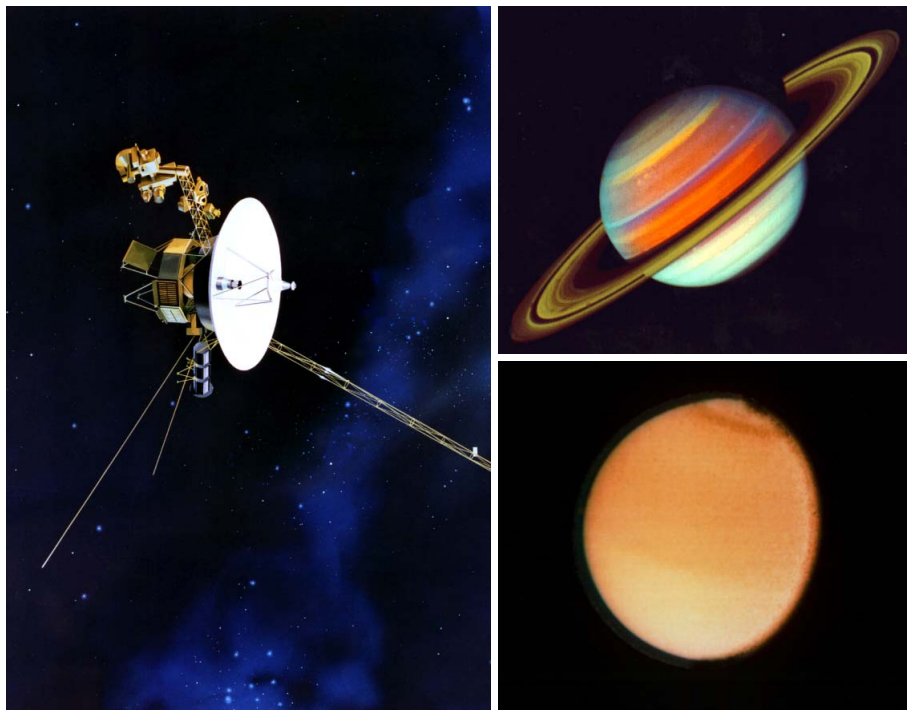
Bebesi Zsófia

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály

A külső Naprendszer felfedezése a NASA által létrehozott, 1972 márciusában útjára indított Pioneer-10 és az 1973 áprilisában felbocsátott Pioneer-11 űrmissziókkal vette kezdetét. A Szaturnuszt és holdjait elsőként (1979-ben) a Pioneer-11 közelítette meg. Az azt követő években – a Naprendszerből szintén kifelé tartó Voyager-1 és -2 űrszondák is elhaladtak a bolygó közelében (1980 novemberében, illetve 1981 júniusában), és számos érdekes felfedezésük a kutatókat egy önálló, célirányos, komplett új űrmisszió létrehozására ösztönözték. Ekkor született meg a Szaturnusz és elsősorban a Titan hold felkutatására tervezett Cassini–Huygens-szondapár gondolata, amelyet a kutatók és mérnökök nemzetközi csoportjának több mint egy évtizedes összefogása eredményeként valósítottak meg. Szegő Károly és az – akkor még – Központi Fizikai Kutatóintézet Részecske- és Magfizikai Kutatóintézete Kozmikus Fizikai Főosztályán dolgozó kutatók, valamint az intézet mérnökei a kezdetektől fogva aktívan részt vett a Cassini–Huygens nemzetközi csapatának munkájában.

A Cassini–Huygens-űrmisszió

A Voyager-1 és -2 űrszondák széleskörű plazmafizikai és spektroszkópiai vizsgálatokat végeztek a Szaturnusz és holdjainak környezetében, valamint számos rendha-



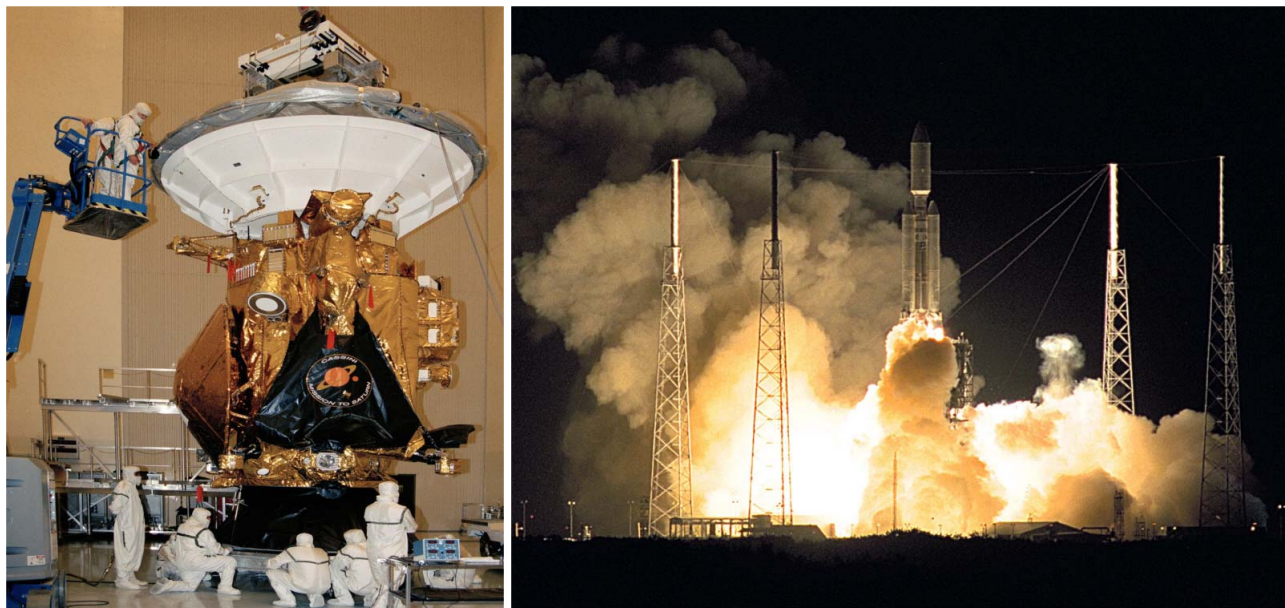
1. ábra. A Voyager-2 felvétele a Szaturnuszról és a Titan holdról 1981-ben. Forrás: NASA.

gyó felvétel is készült (1. ábra). A Szaturnusznál töltött rövid idő alatt is olyan izgalmas új célpontokat vizsgálhattak, mint például a bolygó mágneses tere, bonyolult gyűrűrendszere vagy a Titan hold. A Titan az egyetlen olyan hold Naprendszerünkben, amelynek a Földhöz hasonlóan kiterjedt, főként nitrogénből álló atmoszférája van. A Titan atmoszférájában található nitrogén a metánnal elegyítve a napsugárzás hatására komplex szerves vegyületeket alkothat, amelyek vizsgálata a földi élet kialakulásának tanulmányozásához döntő bizonyítékokkal szolgálhat. Többek között ezek a fontos felfedezések arra ösztönözték a kutatókat, hogy további vizsgálatokat végezzenek, megszületett tehát egy Szaturnusz–Titan-űrmisszió ötlete.

A Cassini–Huygens-űrmisszió tervezése és kivitelezése több mint egy évtizeddel az indítást megelőzően, a 80-as évek első felében vette kezdetét, a magyar részvétel elsősorban Szegő Károly szervezőmunkájának köszönhetően vált lehetségessé. A mérnökcsoport Szalai Sándor vezetésével a Cassini keringő egy-egy két fedélzeti műszeréhez, a plazmaspektrométerhez (CAPS), valamint a magnetométerhez (MAG) készített földi ellenőrző és kalibráló berendezéseket, valamint egy adattömörítő algoritmussal is hozzájárultak az űrmisszióhoz. A földi ellenőrző berendezések-



Bebesi Zsófia okleveles csillagász (2003) és fizikus (2005) – Szegedi Tudományegyetem, Ph.D. (2008, ELTE). 2003 óta az MTA KFKI RMKI munkatársa, 2012-től a Wigner FK Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának tudományos főmunkatársa. Elemezte a Cassini és a Venus Express űrszondák adatait. Kutatói érdeklődése a bolygók mágneses tere és a napszél, illetve az interplanetáris mágneses tér közötti kölcsönhatás, a Titan plazmakörnyezetének és felső atmoszférája ionizációs folyamatainak vizsgálata.



2. ábra. A Cassini–Huygens-szondapár a szerelőcsarnokban (balra) és jobbra az indítás pillanataiban (forrás: NASA, ESA).

kel tesztelni lehetett a CAPS- és a MAG-műszerek információküldő és -fogadó képességét. A CAPS-műszer társkutatója Szegő Károly, a magnetométeré pedig Erdős Géza lett, a két berendezés műszaki paramétereiről és működési elvükről Szalai Sándor és Nagy János cikkében olvashatnak részletesebben.

A Cassini–Huygens-szondapár létrehozásában a NASA (National Aeronautics and Space Administration), az ESA (European Space Agency), valamint az ASI (Agenzia Spaziale Italiana) űrügynökségek irányítása alatt, Magyarországgal együtt összesen 17 ország vett részt. A Cassini–Huygens-szondát valójában két űreszköz, a Cassini keringőegység (NASA) és a Huygens leszállóegység (ESA) alkotta. Ez utóbbit arra tervezték, hogy történelmünk során elsőként landoljon a Szaturnusz több szempontból is különleges óriásholdján, a Titanon, amit végül 2005. január 14-én sikeresen végre is hajtott.

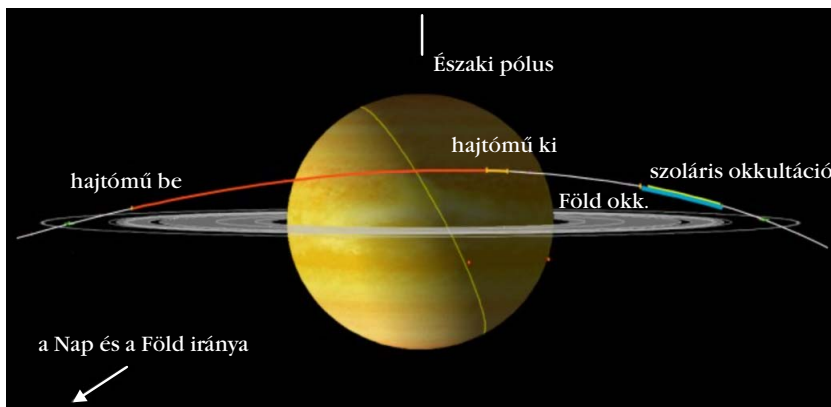
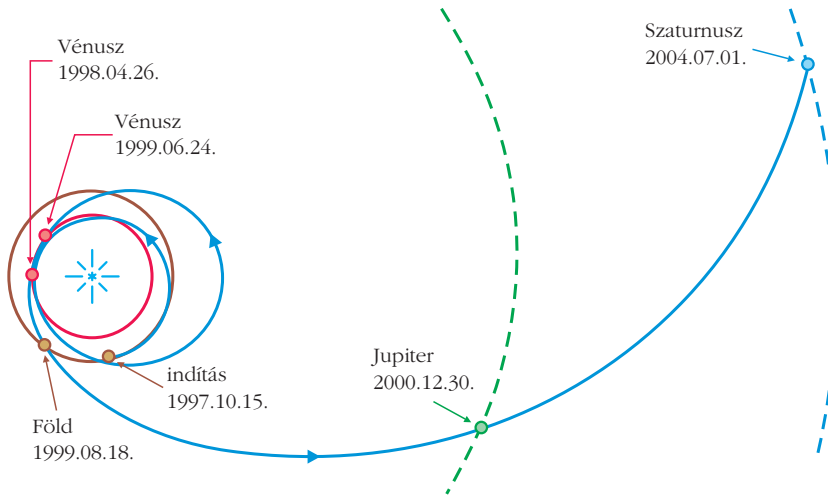
A Cassini–Huygens-szondapárt (2. ábrán balra) összesen 27 különféle tudományos vizsgálat kivitelezésére tervezték. A célok megvalósításához 18 fedélzeti műszert hoztak létre, közülük tizenkettőt a Cassini keringőegységen, hatot pedig a Titanra leszálló Huygensen helyeztek el. A 6,8 méter magas Cassini-egység tömege (a mintegy három tonna üzemanyag nélkül) 2150 kg, az 1,3 méter magas Huygens-szonda tömege pedig 320 kg volt. A három tonnányi folyékony üzemanyagot pályakorrekciókra, a Szaturnusz körüli pályára állításra, valamint a bolygó körüli manőverekre használták el, a szonda működéséhez, stabilizálásához szükséges energiát pedig három radioizotópos termoelektromos generátor (RTG) szolgáltatta. A Cassini fedélzeti műszerei két nagyobb csoportba sorolhatók: távérzékelők, valamint a tér- és részecske-detektorok. A távérzékelők közé tartoznak az optikai (képalkotó alrendszer; 380–1100 nm), az ultra-

ibolya (UVIS; 55–190 nm), az infravörös (CIRS; 7–1000 μm) kamerák és spektrométerek, illetve a radarberendezés. A tereket, valamint a részecskék sebesség- és energiaeloszlását, töltését és sűrűségét pedig a szonda közvetlen környezetében *in situ* mérték az érzékelők. A napszél és a Szaturnusz mágneses terében áramló, nagy energiájú semleges és töltött részecskék irány- és energiaeloszlását a magnetoszférikus képalkotó berendezés (MIMI; 15 keV – 130 MeV) és a tömegspektrométerek (CAPS; 1 eV – 50 keV, INMS; 0,01–100 eV) detektálták. A plazmakörnyezetre a telemetria vivőhullámjainak módosulásából (Radio Science) is következtetni lehetett.

A Cassini–Huygens-szondapárt 1997. október 15-én indították útjára (2. ábrán jobbra) az amerikai Kennedy Űrközpontból (Cape Canaveral). Ezután a majdnem hét évig tartó bolygóközi utazását követően, több bolygónál végrehajtott gravitációs hintamanőver segítségével (3. ábrán fölül), 2004. július elsején állt pályára a Szaturnusz körül (3. ábrán alul). A pályára állítás során áthaladt a magnetoszférikus határfelületeken, a magnetoszféra belső tartományain, sőt a gyűrűrendszeren is. A manőver a sebesség drasztikus lecsökkentésére is irányult, hogy a pályára állítást sikeresen lehessen megvalósítani.

A Cassini–Huygens pályára állítása és a magnetoszférikus plazma vizsgálata

Amikor a Cassini–Huygens 2004-ben megérkezett a Szaturnuszhoz, a Galileo-űrszonda már majdnem egy évtizeden át (1995–2003) végzett átfogó méréseket a legnagyobb gázóriásunk, a Jupiter magnetoszférájában. 2000 végén a Cassini–Huygens is megközelítette a Jupitert, és több alkalommal áthaladt az óriásbolygó



3. ábra. Fölül a Cassini–Huygens utazása a bolygóközi térben a Szaturnusz rendszeréhez. Alul a Cassini–Huygens Szaturnusz körüli trajektóriája a pályára állítás során (forrás: NASA, ESA).

fejhullámán [1], amely az áramló napszél változó dinamikus nyomása miatt állandó mozgásban van.

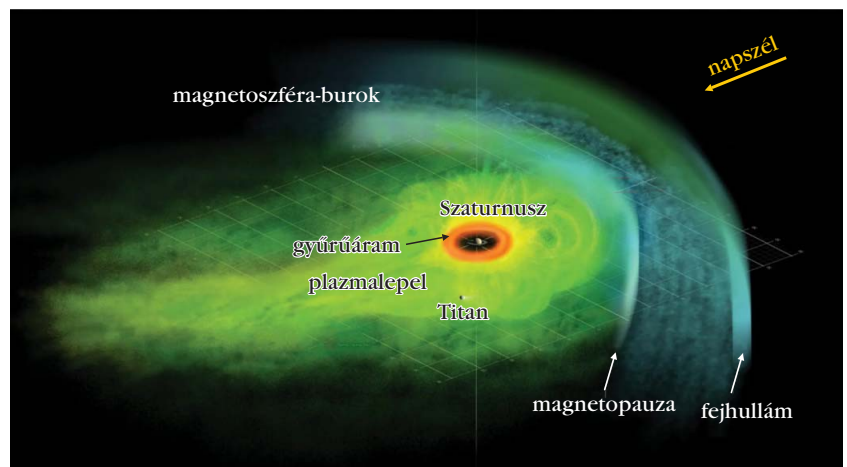
Annak ellenére, hogy a Szaturnusz mágneses momentuma a Jupiterénél kisebb és az ekliptikához képest (a Jupiterrel ellentétben) jelentős tengelyhajlása ($26,7^\circ$) van (ezek a tényezők lényeges hatást gyakorolnak a magnetoszféra dinamikájára), mégis számos analógiát találunk a két magnetoszféra „működése” között. Az óriásbolygók magnetoszféri arányaikban jóval kiterjedtebbek a földi mágneses térnél. Ennek oka nemcsak az égitestek nagyobb méretében keresendő, hanem a gázóriások gyorsabb forgása (a Jupiter tengelyforgási periódusa 9 óra 55 perc, a Szaturnuszé 10 óra 45 perc), illetve a dinamoeffektust fenntartó, a Jupiter és a Szaturnusz magja fölött áramló fémes hidrogénréteg szintén hozzájárul az erős mágneses tér létrejöttéhez. A gyors forgás mellett lényeges eltérést, és jelentős magnetoszférikus plazmaforrást jelentenek a gázóriá-

sok mágneses terének belsejében keringő holdak – amelyek között számos jelenleg is aktív (az árapály hatására vulkanikus aktivitást vagy gejzírtevékenységet mutató) égitest található –, valamint a Szaturnusz esetében a bolygó egyedülálló gyűrűrendszere. A holdaknál ugyancsak anyagkidobódással jár a felszínt érő részecske-, por- vagy mikrometeoroid-bezacapódás is. A Szaturnusz magnetoszférájának szerkezetét, fontosabb belső folyamatait a 4. ábra mutatja. A magnetoszférikus határfelületekről részletesebben a jelen szám *A Naprendszer űrszondás kutatása – szakmai bevezető* című cikkében olvashatnak.

Ahogy a 3. ábrán látható, a Cassini pályára állítása során rendkívül közel került a Szaturnuszhoz, áthaladt a belső magnetoszféra tartományain, majd a bolygó közvetlen közelébe érve kétszer is átmetszette a gyűrűk síkját. A CAPS-adatok feldolgozásában kutatócsoportunk fizikusai Szegő Károly vezetésével vettek részt, a legelső eredményeket a nemzetközi CAPS-team egy közös publikációban [2] tette közzé.

A Cassini 2004. június 29-én, 02:43-kor (UT) ért be a Szaturnusz magnetoszférájába (áthaladt a magnetopauzán). Mivel az űrszonda a Titan pályasíkja (pályasugara $20,5 R_s$, ahol $R_s = 60\,268$ km a Szaturnusz egyenlítői sugara) alatt $5 R_s$ távolságban haladt el, a pályára állítás időszakában nem volt lehetőség a hold régóta feltételezett nitrogéntórusának detektálására. Ezt a későbbiekben

4. ábra. A Szaturnusz magnetoszférikus határfelületei, valamint a belső magnetoszféra dinamikája és felépítése a Cassini MIMI fedélzeti berendezésének mérései alapján (forrás: NASA/JPL/JHUAPL).

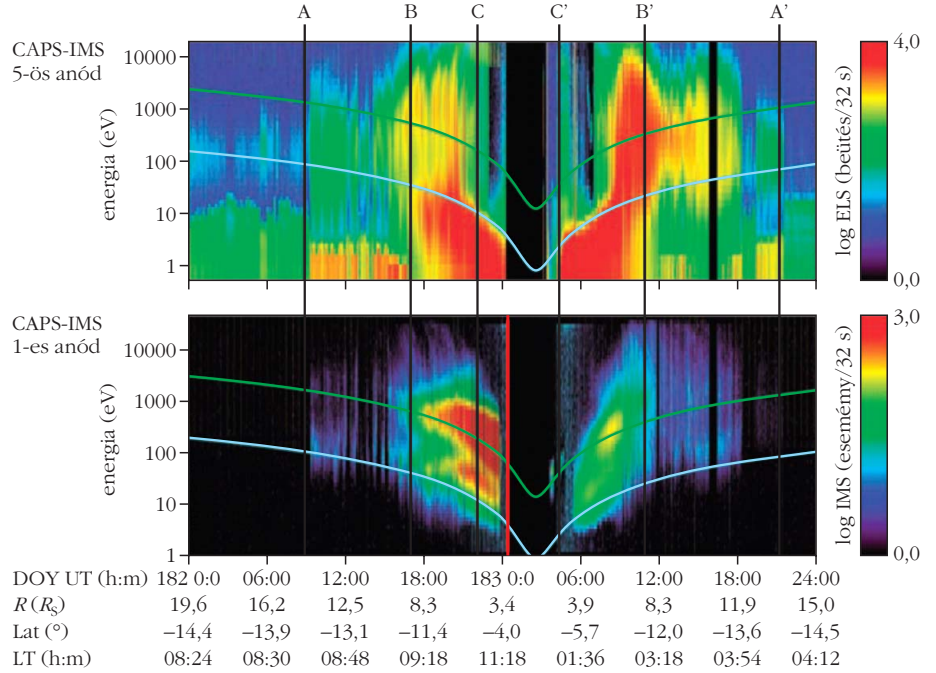


sem észleltük, mivel az a Titan pályája mentén áramló magnetoszférikus plazma korotációja (azaz a befagyási tétel miatt a gyorsan forgó Szaturnusz mágneses erővonalaival együttmozgása) mellett fellépő gyors radiális elmozdulásai miatt nem maradna stabil.

A legelső Szaturnusz-megközelítés során leginkább arra koncentráltunk, hogy a magnetoszféra belsejében milyen plazmafizikai szempontból megkülönböztethető tartományokon halad keresztül a szonda, és hogy ezek milyen szerepet játszanak a magnetoszféra működésében, dinamikájában. A CAPS elektronokra és ionokra vonatkozó méréseit az 5. ábra mutatja. A felső panelen az CAPS-ELS (elektron-spektrométer) 5-ös, az alsón pedig a CAPS-IMS (iontömeg-spektrométer) 1-es apertúrája (anódja) által mért beütésszámok láthatók az idő függvényében – az adatok 32 másodperces átlagok. A jobb oldali színskála a ráta intenzitását jelzi logaritmikus skálán. A spektrumokra szuperponált görbék az O^+ -ion (zöld) és a H^+ (kék) elméleti korotációs sebességeire vonatkozó energiákat mutatják.

A Szaturnuszhoz közeledve, a bolygótól $\sim 14 R_S$ távolságban (távolodáskor pedig $13,6 R_S$ -nél) megfigyeltük, hogy a plazmasűrűség hirtelen egy nagyságrenddel ($\sim 3 \cdot 10^{-4}$ -ről $\sim 3 \cdot 10^5 m^{-3}$ -re) megemelkedett. Az átmeneti réteg vastagsága $\sim 0,2 R_S$ volt, ez a határfeület egyfajta plazmapauzának tekinthető. A plazmapauzán belül észlelt töltött részecskék elsősorban protonok, He-ionok, de a bolygóhoz közeledve O^+ -ionok is megjelentek. Ebben a tartományban a plazma csak részleges korotációt végez, a tartományt *külső plazmaszférának* nevezzük, melynek határait az 5. ábrán az A és A' vonalak jelzik. A plazmapauzán kívüli tartományban, az egyenlítő síkjától távolabb már főleg protonokból álló, a mágneses féltekékre – plazmalebeny – jellemző, ritka plazmát észleltünk.

A Szaturnuszhoz közeledve, $\sim 9 R_S$ távolságban (a bolygótól távolodva pedig $\sim 7,6 R_S$ -nél) észleltük először a vízcsoport ionjait (OH^+ , H_2O^+ és H_3O^+), amelyek változékonny, részlegesen korotáló keveréket alkottak. Ezt a tartományt az 5. ábrán a B és B' tartományhatárok jelölik, amelyeken belül már a *belső plazmaszféra* található. Itt a magnetoszférikus ionpopulációk mozgását egyre inkább a korotáció határozza meg. A domináns plazmaösszetevők egymáshoz viszonyított koncentrációi a belső plazmaszférában a külsőhöz képest megfordulnak, azaz ebben a tarto-



5. ábra. A CAPS-ELS (föül) és az IMS (alul) energia-idő spektrogramjai 2004. június 30-a és július elseje között (DOY 182 és 183). A függőleges tengely az energiát, a vízszintes tengely pedig az időt (UT), a Szaturnusz középpontjától mért radiális távolságot (R_S), a szélességet (Lat) és a helyi időt (LT) mutatja [2].

mányban a protonokhoz képest a nehezebb részecskék kerülnek túlsúlyba (6. ábra, alsó panel). Ez a régió egyben az E-gyűrűvel (sugara $\sim 3-8 R_S$) is azonosítható, amely jég szemcsékben és vízmolekulákban igen gazdag, és forrása az apró (505 km sugarú), de napjainkban is rendkívüli aktivitást mutató Enceladus hold. Korábban a Voyager-1 és -2 plazmaspektrométerének mérései alapján (6. ábra, felső panel) nem lehetett pontosan megállapítani a plazma összetételét, ezért csak feltételezhetők, hogy a detektált nehezebb részecskék a Titan vastag és döntően nitrogénből álló atmoszférájából származó N^+ -ionok lehetnek. A CAPS mérései alapján azonban egyértelművé vált tehát, hogy a belső magnetoszférában detektált nehéz ionok populációja főleg oxigénből, valamint víz eredetű ionok összetett keverékéből áll (6. ábra, föül), amelyek legfőbb forrása az Enceladus, illetve annak feltételezett, felszín alatti óceánja lehet. Az Enceladusról és a Naprendszerünk más, az árapályhatás által fenntartott jégkéreg alatti óceánt tartalmazó holdjairól a *Fizikai Szemle* 2021. július–augusztusi számában olvashatnak részletesebben [3].

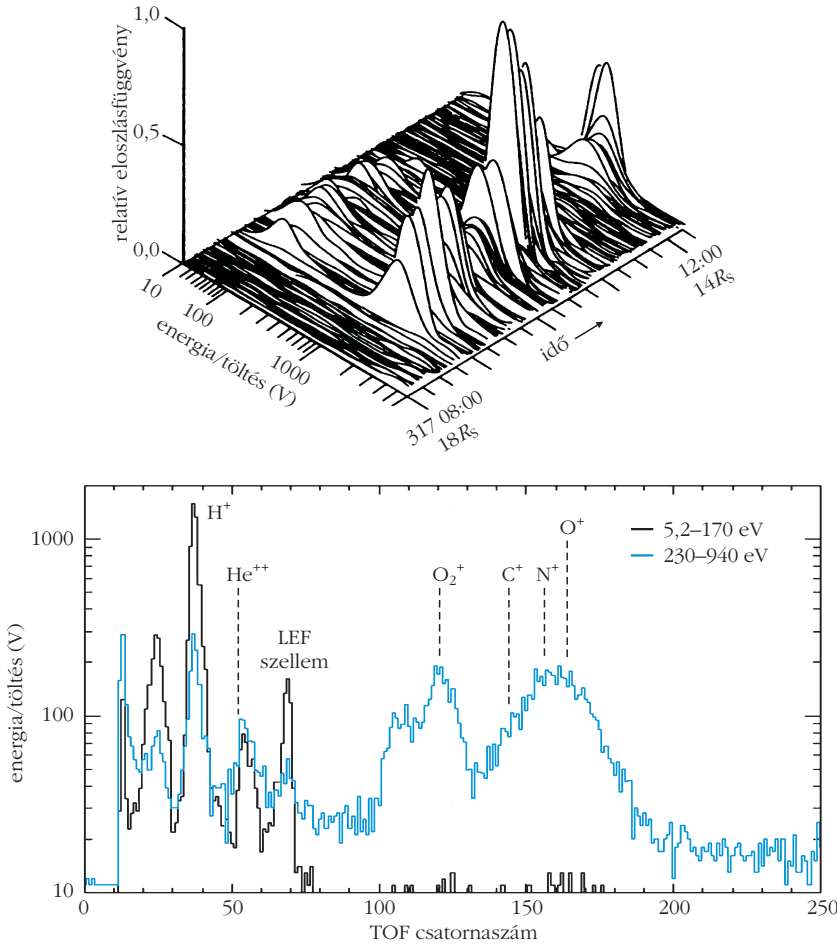
Ahogy a szonda tovább haladt a magnetoszféra legbelső szektorai felé, a C és C' tartományi határon belül az O^+ - és W^+ -ionok koncentrációja (a protonokéhoz képest) még jobban megemelkedett. Ez egybeesik az A és B gyűrűk fölötti, O^+ - és O_2^+ -ionokban gazdag plazmaréteggel, amelyet egyfajta gyűrű-atmoszférának tekinthetünk (*belső plazmaréteg*).

Említettük, hogy a Cassini–Huygens-űrmisszió egyik elsődleges tudományos célpontja a Titan hold volt, amiről ugyan bebizonyosodott, hogy kiterjedt atmoszférája

A Titan hold és plazmakörnyezete

A Titan a Szaturnusz magnetoszférájának határán, a folyamatosan mozgásban lévő magnetopauza átlagos helyzetének (az orrpontonál $\sim 20\text{--}25 R_S$) közelében kering. Mivel a Titant sűrű atmoszféra burkolja, a magnetoszférikus plazmával való kölcsönhatása elsősorban a felsőlégrégió folyamataiban nyilvánul meg. A Titan esetében alapvetően két fontos ionizációs mechanizmust ismerünk. Ezek egyike a hold semleges koronájából és atmoszférájából származó részecskének (főként H_2 , CH_4 és N_2) a szoláris EUV-fotonok, valamint a magnetoszférikus töltött részecskék becsapódásai által okozott ionizációja. A másik folyamat pedig a magnetoszféra korotáló ionjainak és az atmoszféra semleges részecskéinek töltéscseréje. A két folyamat eredményeként létrejövő atmoszférikus eredetű, de frissen ionizált részecskék ezt követően giromozgásba kezdenek a Szaturnusz mágneses terének erővonalai körül, és korotációs sebességre gyorsulnak fel.

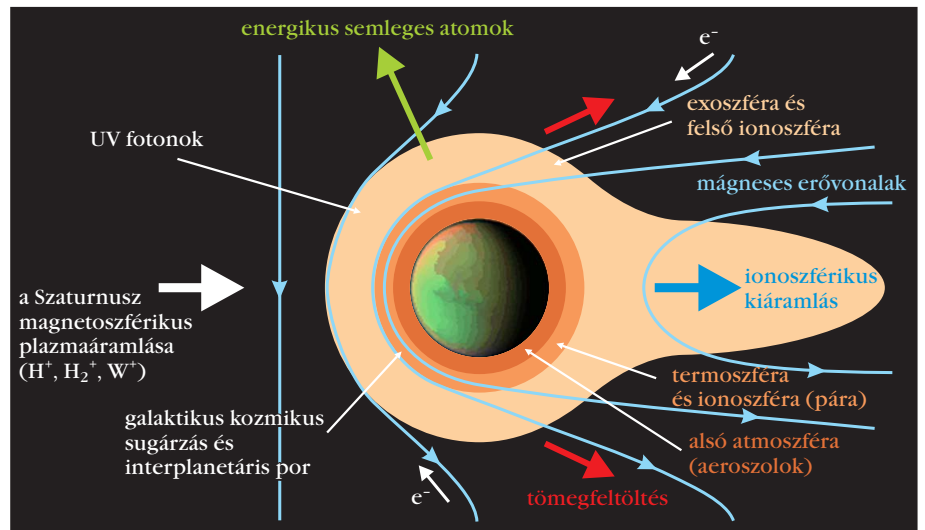
A Titan kiterjedt atmoszférájának felső rétege tehát ionizált állapotban van, és mivel ez az elektromosan vezető ionoszféra effektív mágneses akadályt képez a Szaturnusz magnetoszférájában áramló plazma számára, a hold körül indukált magnetoszféra jön létre (7. ábra). A Titan-



6. ábra. Fölül a Voyager Plasma Science Experiment berendezése által, 1980. november 12-én, 08:12:16 között mért ionspektrum-sorozat [4], és alul a Time-Of-Flight spektrum a belső plazmaszférából, 2004. július elsején, $\sim 19:46$ UT-kor [5].

a várakozásokkal ellentétben nem számít elsődleges magnetoszférikus plazmaforrásnak, azonban más tekintetben rendkívül különleges égitest. Többek között méretével, szerves atmoszférájával és az atmoszférában, illetve a felszínen zajló, a Földön kívül más égitesten még sohasem észlelt folyadékkör-forgással és bonyolult kémiával mindenképpen egyedülálló a Naprendszer holdjai között. A Cassini-Huygens érkezése előtt a Voyager-szondák megközelítették ugyan a Titant, azonban fedélzeti kameráikkal a hold vastag narancssárga atmoszféráján keresztül nem lehetett megpillantani a felszínt. Spektroszkópiai vizsgálatokkal megállapították ugyan az atmoszféra elsődleges összetevőit, de hosszabb időn át tartó megfigyelésekre, a plazmakörnyezet részletes vizsgálatára nem volt lehetőség.

7. ábra. A Titan indukált magnetoszférája, az atmoszféra szerkezete és a hold plazmakörnyezetében zajló fizikai folyamatok.

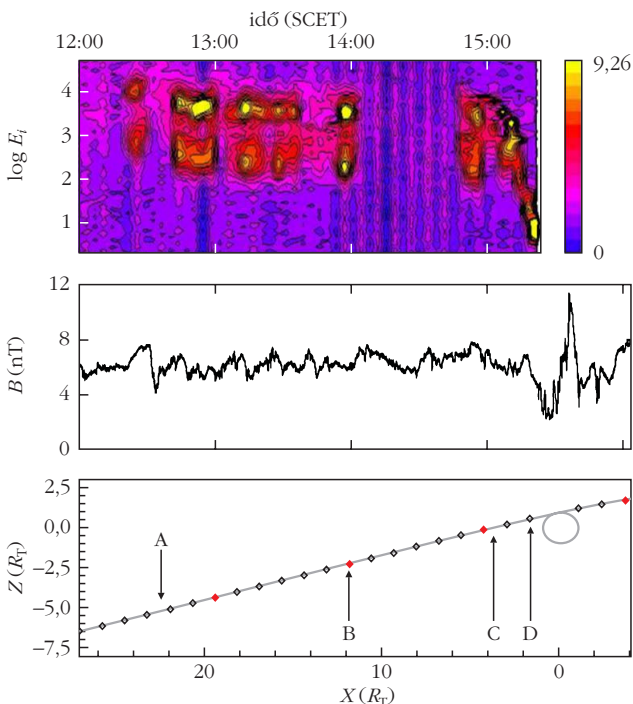


nak nincs saját belső mágneses tere, de a Szaturnusz mágneses erővonalai az ionoszféra körül elhajlanak, így a mágneses bolygók magnetoszféráira emlékeztető erővonal-konfiguráció jön létre. A Titan ionoszférája, valamint a Szaturnusz korotáló plazmája és mágneses tere közötti kölcsönhatás nagyon hasonló a Vénusz és a Mars napszéllel való kölcsönhatásához. Azonban alapvető különbség, hogy a Szaturnusz korotáló, töltött részecskéi a napszéllel ellentétben nem szuperszonikus sebességgel mozognak, ezért a Titan plazmaáramlás felőli oldalán nem jön létre fejhullám. Az viszont a Titan esetében is megtörténhet (bár aránylag ritkán), hogy magas napszélynyomás idején kikerül a magnetoszférából [6], ez esetben az interplanetáris térben a hold környezetében is kialakul a fejhullám.

A Cassini keringő egység első két alkalommal 2004. október 26-án (T_A) és december 13-án (T_B) közelítette meg a Titant [7]. A Titannak a Szaturnuszhoz és a Naphoz viszonyított pálya menti helyzete mindkét esetben közel azonos volt, így a domináns ionizációs források hasonló irányokból (korotáció és szoláris EUV) érték a hold atmoszféráját.

A T_A és a T_B megközelítések során a Titan környezetében négy plazmatartományt (A–D) különítettünk el, melyekben eltérő plazmapopulációkat azonosítottunk. A T_A esetre vonatkozóan a CAPS-ionspektromot, a mágneses tér abszolút értékét és az x - z síkban ábrázolt pályaadatokat a 8. ábra mutatja. A Titan és a Szaturnusz magnetoszférikus plazmájának kölcsönhatása a holdtól már $\sim 1 R_S$ távolságban detektálható.

8. ábra. A CAPS-IMS dinamikus spektruma (felső panel), a mágneses térerősség abszolút értéke (középső panel) és a szonda pályája (alsó panel) a Titannál a T_A megközelítés idején [7].



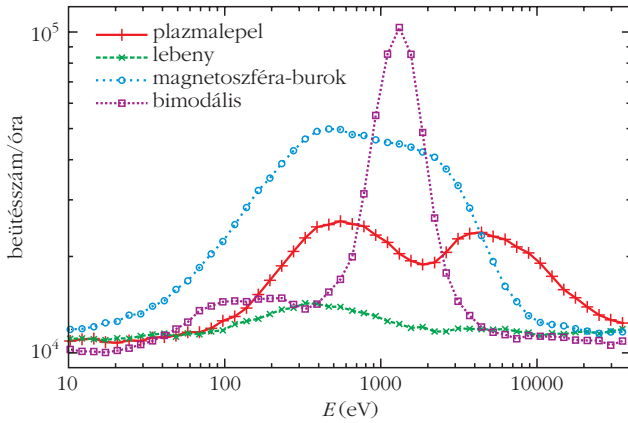
A holdtól legtávolabbi régióban („A”) a plazmát két-komponensű ioneloszlások (protonoké és oxigén-ionoké) jellemezték, és a részecskék a korotációs irányból érkeztek. A „B” tartomány ionpopulációi már többkomponensűek voltak, az ionok feltehetően nem közvetlenül a Titan atmoszférájából, hanem az azt körülvevő semleges koronából érkeztek. Az is lehetséges, hogy egy vagy két keringéssel korábban távoztak az atmoszférából, és attól tovább ionizálódtak. A „C” tartományban a Szaturnusz mágneses erővonalai feltorlódtak és elhajlottak a hold ionoszférája körül, továbbá az ebben a tartományban ionizáló, valamint töltéscserén átesett atmoszférikus eredetű ionok találhatóak. A „D” régió domináns összetevője a hideg, Titan eredetű plazma.

A Cassini Titanhoz viszonyított pályája a későbbi megközelítések során folyamatosan változott, így alkalom nyílt az indukált magnetoszféra különböző tartományainak feltérképezésére. Amikor az űrszonda több alkalommal áthaladt a Titan csóváján, kedvező esetben a mágneses erővonalak mentén összeköttetés jött létre a Cassini és a Titan felső atmoszférája között [8–10]. Ekkor meg lehetett határozni a csóva mentén kiáramló részecskék szökési és tömegvesztési rátáját, ezek nagyságrendileg a $\sim 9,6 \cdot 10^{23} - 4 \cdot 10^{24}$ ion/s, illetve az $\sim 1,6 \cdot 10^{25} - 9 \cdot 10^{25}$ amu/s tartományba estek (amu: atomic mass unit, más néven dalton). Ezen paraméterek ismerete a Titan atmoszférája és a Szaturnusz magnetoszférája közötti kölcsönhatás modellezése szempontjából meghatározó fontosságú.

A Szaturnusz magnetodiszkjének hatása a Titan plazmakörnyezetére

A Cassini keringő egység 13 év alatt összesen 127 alkalommal közelítette meg a Titant. A hold környezetében a magnetoszférikus plazma áramlási sajátosságai elég széles tartományban változnak, ezért a Titan atmoszférája és a korotáló töltött részecskék közötti kölcsönhatás alaposabb megértéséhez érdemes volt megvizsgálni, hogy a plazmapopulációk változékonyságának hátterében milyen folyamatok állnak.

Elsőként Rymer és szerzőtársai [12] végeztek átfogó elemzést a hold környezetében észlelt elektronpopulációkra vonatkozóan, összesen 54 Titan-megközelítés CAPS elektronspektrométer-adatait felhasználva. Ennek során négy típust különböztettek meg: plazmalepel, lebeny, magnetoszféra-burok (mivel nagy napszélynyomás esetén a Titan kikerülhet a magnetoszféra-burokba vagy akár a napszélbe is) és bimodális jellegű plazmakörnyezetet. A plazmalepel-típusú környezetre általában magasabb részecskefluxus és nagyobb energia jellemző, a lebeny-típusra alacsonyabb fluxus és nagy energia. A magnetoszféra-burokra általában nagy részecskefluxus és alacsony energia jellemző, míg a bimodális esetben egy-



9. ábra. A Titan közelében észlelt négy eltérő plazmapopulációra jellemző energiaspektrumok [11].

szerre figyelhetők meg kisebb és nagyobb energiájú részecskepopulációk. A későbbiekben a CAPS ionadatainak elemzése hasonló eredményt (9. ábra) hozott [11]. Az egyes plazmapopuláció-típusokat csak rövidebb időintervallumokra vonatkozóan lehetett beazonosítani, de egy 12 órás intervallumra (~1 szaturnuszi nap) vonatkoztatva mindegyik típus előfordul. Ez azt jelezte, hogy egy nagyobb léptékű plazmastruktúra hatásai figyelhetők meg. Az eredményeket ezért a Szaturnusz magnetoszférájának két mágneses féltékéjét elválasztó áramlepelrel (plazmalepel) és a hozzá társuló mágneses struktúrával, a magnetodiszkkal hozták kapcsolatba [13]. A magnetodiszk középvonalaán való áthaladást egy rövid, jól behatárolható esemény jelzi, amelynek során nehéz ionok jelennek meg a plazmában.

Az óriásbolygók gyors forgása következtében a centrifugális erő a korotáló plazmát korong formájában szétteríti, és a plazma a mágneses erőterbe befagyva az egyenlítői síkban deformálja a mágneses erővonalakat – ezt a mágneses struktúrát nevezzük magnetodiszknak. A magnetodiszket a centrifugális erő, a mágneses tér ellenhatása és a plazma nyomása együttesen alakítja ki. Ha a Szaturnusznak nem lenne az ekliptikához viszonyított jelentős tengelyhajlása, akkor a magnetodiszk a bolygó egyenlítői síkjával esne egybe. Azonban – mivel a Szaturnusz forgástengelye az ekliptikával 26,7°-os szöget zár be – a magnetodiszk-struktúra a napszél nyomásának hatására

tál alakúra deformálódik (10. ábra, bal panel). A magnetoszférikus plazma összetétele és sűrűsége, valamint a bolygó mágneses terének fizikai tulajdonságai nagyban függenek a diszktól való távolságtól, illetve annak elhelyezkedésétől.

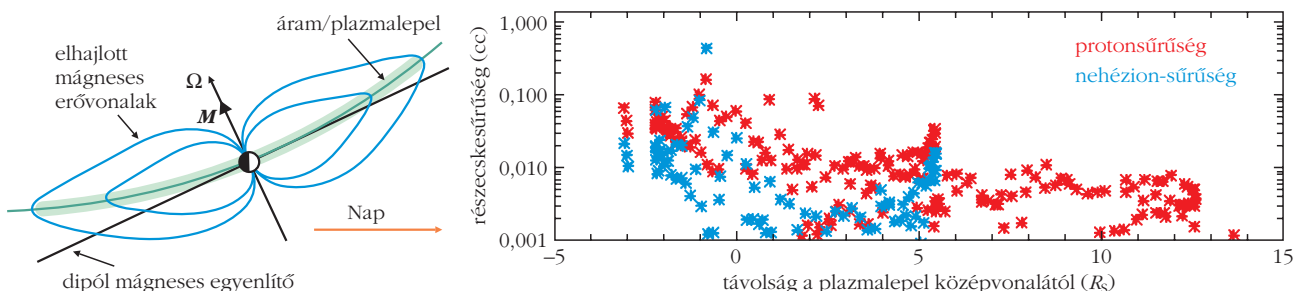
Több magnetodiszk-átmenetet megvizsgálva fény derült a struktúra és a hozzá társuló plazmalepel finomszerkezetére is [14]. A mérések azt mutatják, hogy a magnetodiszk középvonalaát egy strukturált plazmareteg veszi körül, amelyet egy könnyű ionokból álló szélesebb, valamint egy keskenyebb struktúrák formájában megjelenő, nehéz ionok alkotta tartomány épít fel (10. ábra, jobb panel). Szintén megfigyelhető, hogy a diszken belül a plazmasűrűség megnövekedése egybeesik mágneses tér radiális komponensének irányváltásával. A nehéz ionok koncentrációja általában ezen rétegekben a legnagyobb, hőmérsékletük azonban alacsony. Általánosan elmondható, hogy a plazmalepel a magnetoszféra nappali oldalán a legkiterjedtebb és a legsűrűbb. A plazmalepel/magnetodiszktól északra és délre található magnetoszférikus lebenyekben (lobes) főként protonok figyelhetők meg, amelyek sűrűsége ezen tartományokban közel állandó. A plazmalepelre a fentiekben kívül jellemző még egy periodikus hullámzó mozgás is [15, 16], amelynek következtében időről időre kimozdul a Szaturnusz egyenlítői síkjából – természetesen a Titan pályája mentén is. Ez a periodicitás korrelál a Szaturnusz gyorsan forgó magnetoszférájában észlelt, kilométeres hullámhosszú rádióugárzással (Saturn Kilometric Radiation, SKR), amelynek hatása megjelenik a mágnesestér- és töltött részecske-adatokban is.

A hold plazmakörnyezetére tehát folyamatosan hatást gyakorol a magnetodiszk helyzete, mozgása, valamint a magnetoszférikus határfelületeknek a napszél dinamikus nyomásától függő elhelyezkedése.

A Szaturnusz fejhulláma előtti tartomány vizsgálata

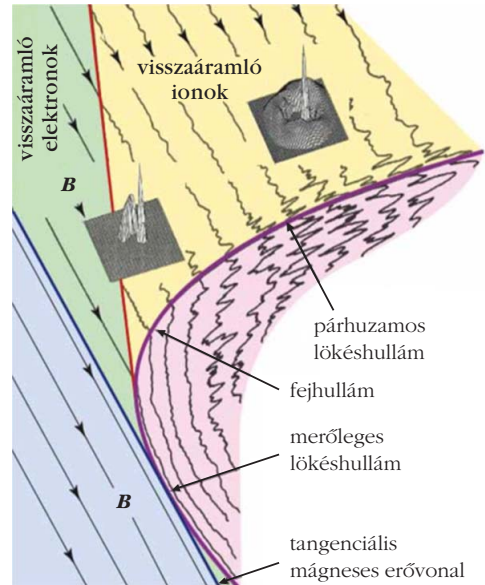
Az interplanetáris mágneses tér és a bolygók ívelt fejhullámára egy adott pontban állított merőleges által bezárt szög (θ_{Bn}) értékétől függően lehet szó kvázi-párhuzamos ($0^\circ < \theta_{Bn} < 45^\circ$) vagy kvázi-merőleges

10. ábra. Balra a Szaturnusz magnetodiszkjének sematikus ábrázolása. A jobb oldali panelen a plazmasűrűség függése a plazmalepel középvonala és a szonda között mért távolságtól, a T_{58} Titan-megközelítésre vonatkozóan [14].



($45^\circ < \theta_{Bn} < 90^\circ$) lökeshullám-tartományokról (11. ábra). A kvázi-párhuzamos fejhullám közvetlen összeköttetésben van az interplanetáris mágneses tér erővonalával, amelyek mentén a fejhullámról visszavert ionok giromozgást végezve a beérkező napszél irányába áramlanak vissza. A visszavert ionok és a napszél kölcsönhatása plazmainstabilitásokat gerjeszt, amelyek hullámkeltéshez vezetnek. A létrejövő alacsony frekvenciájú (Ultra Low Frequency, ULF) hullámok kezdetben a beérkező napszél irányában terjednek, majd a plazmaáramlás hatására visszatérnek a fejhullámhoz, ahol meredekké válnak, végül lökeshullámszerű SLAMS (Short Large Amplitude Magnetic Structures) struktúrák jönnek létre. Ezek végül beépülnek a kvázi-párhuzamos fejhullámba, így hozzájárulnak annak folyamatos fenntartásához (lökeshullám-reformáció).

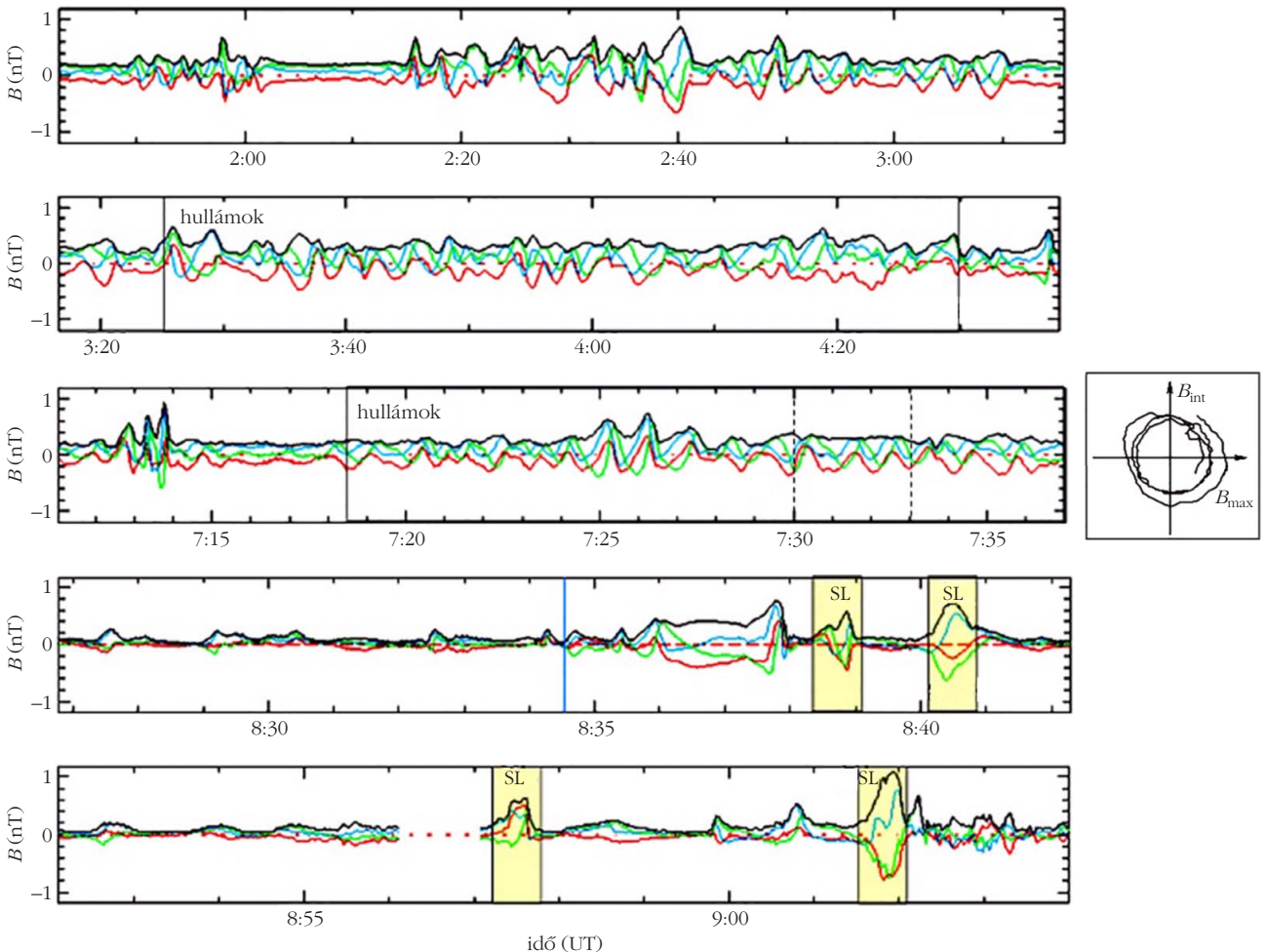
A földi kvázi-párhuzamos lökeshullám környezetében már több alkalommal figyeltek meg SLAMS-eseményeket, a Szaturnusznál viszont most volt először alkalmunk tanulmányozni ezt a kölcsönhatást és általános plazmafizikai jellemzőit [18]. Tanulmányozásukhoz a CAPS- és MAG-műszerek méréseit használtuk fel.



11. ábra. A fejhullám előtti tartomány szerkezete, és a benne zajló részecske-hullám kölcsönhatások (forrás: [17]).

2004. december 10-én a Cassini-űrszonda az interplanetáris térben a fejhullám irányában haladt (a Sza-

12. ábra. A Szaturnuszánál 2004. december 10-én észlelt ULF-hullámok és a meredekké válás stádiumában lévő SLAMS-struktúrák [18]. A jobb oldalon látható hodogram a 07:30–07:33 UTC közötti intervallumra vonatkozik.



turnusztól $\sim 37 R_S$ távolságban). A bolygó felé közeledve ($\sim 03:00$ UTC-től) ULF-hullámokat észleltünk (12. ábra), majd a fejhullámhoz közeledve megjelentek a meredekké válás különböző stádiumában lévő SLAMS-események is (sárgával jelölve) [18]. Az ULF-hullámok frekvenciája $\sim 10^{-2}$ Hz körül ingadozott. A beillesztett hodogramot a 07:30 és 07:33 UTC között mért adatokból határoztuk meg, amelyen látszik, hogy a mágneses tér folyamatos forgásban volt. Több alkalommal megfigyeltük a SLAMS-eseményekhez társuló whistler prekursorhullámokat is, amelyeket a Föld közelében észlelt SLAMS-eknél is kimutattak. A töltött részecske-adatokban kimutatható volt, hogy az ionnyalábok a SLAMS közelében eltértek, valamint a plazma felfűtődött, és áramlási sebessége hirtelen lecsökkent – ez megfelel a gyors módusú lökéshullámok viselkedésének. Általánosságban kijelenthető, hogy a Szaturnusznál észlelt SLAMS-struktúrák alapvető fizikai jellemzői megfeleltek a Föld közelében megfigyeltékének, azonban térbeli kiterjedésük lényegesen nagyobb (30 000–50 000 km) volt, mivel az ULF-hullámok frekvenciája elsősorban az interplanetáris mágneses tér erősségétől (ami a Szaturnusznál sokkal kisebb, mint a Földnél) függ. A frekvenciát az észlelések időtartamából lehetett becsülni, mivel a szonda az áramló plazmához képes stacionáriusnak tekinthető.

A Nagy Finálé és a közeljövő tervezett űrmissziói a Szaturnuszhoz és holdjaihoz

A Cassini-űrszondát a Szaturnusznál töltött utolsó hat hónapja során olyan speciális pályára állították, amelyen a gázóriáshoz minden korábbinál közelebb, a gyűrűrendszer és a felhőzet felső rétege felett repült



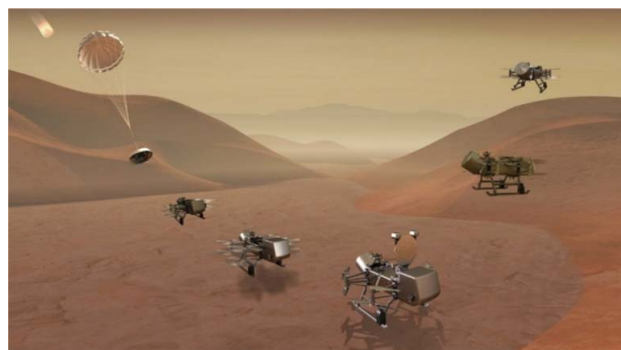
13. ábra. Fantáziarajz a Cassini keringő egység utolsó pillanatairól, ahogy 2017. szeptember 15-én megsemmisül a Szaturnusz atmoszférájában.

el. Ez volt a befejezés, a „Nagy Finálé”, azonban az ezen időszakban végrehajtott 22 keringés alatt is érdekes tudományos felfedezések születtek. Minden korábbinál részletesebben lehetett tanulmányozni a gyűrűk és a felhőzet szerkezetét, dinamikáját, valamint a gyűrűrendszer környezetében lévő plazma összetételét. A mágneses térben végzett mérések során kiderült, hogy a bolygó forgástengelye és mágneses tengelye gyakorlatilag egybeesik, az általuk bezárt szög 0,06 foknál is kevesebb. A közeli pályák a gravitációs tér finomszerkezetének vizsgálatát is lehetővé tették.

A Cassini–Huygens-űrmisszió 2017. szeptember 15-én ért véget a keringő egység kontrollált megsemmisítésével, a Szaturnusz atmoszférájában (13. ábra). Erre azért volt szükség, hogy az irányítás nélkül keringő űrszonda véletlenül se csapódhasson be olyan holdak felszínére, amelyek a későbbiekben a lehetséges élet nyomainak kutatása szempontjából érdekeseek lehetnek (elsősorban a Titan és az Enceladus). Az űrmisszió a Szaturnuszánál töltött 13 év alatt 294-szer kerülte meg a gázóriást, és az űrben töltött közel 20 év alatt 453 048 felvételt készített, illetve összesen 139 gigabájtnyi tudományos adatot sugárzott vissza a Földre. Az űrmisszió tehát hivatalosan véget ért, de az adatok feldolgozása még hosszú ideig folytatódni fog.

Szegő Károly fáradhatatlan szervezőmunkájának köszönhető, hogy a későbbi kutatásokat megalapozó

14. ábra. Balra a NASA Dragonfly Titan robothelikoptere (a tervek szerint 2027-ben indul), valamint jobbra a még tervezés fázisában lévő Enceladus Orbilander űrmissziója.



Cassini–Huygens-űrmisszió sikeres, nemzeteken átívelő közös munkájában kutatócsoportunk is részt vehetett.

A Nagy Finálét követően, a megszerzett új ismeretek tükrében az űrkutatással foglalkozó szervezetek és immár magánvállalatok egyaránt új űrmissziókat terveznek a Szaturnuszhoz. A Titan hold felszínének és a folyékony metán atmoszférikus körforgásának tanulmányozásában rejlő további potenciális úttörő eredmények reményében a NASA a tervek szerint 2027-ben egy új űrmissziót indít útjára. A Dragonfly-misszió előreláthatólag 2034-ben landolhat a Titanon. A Dragonfly (jelentése szitakötő) a marsi Ingenuity robothelikopterhez hasonlóan, az atmoszférában repkedve végez majd méréseket a holdon (14. ábrán balra). A távolabbi jövőre vonatkozóan a NASA egy további űrmisszió, az Orbilander (14. ábra, jobb panel) tervét terjesztette elő, amelynek elsődleges célja az Enceladus hold vízben gazdag gejzíreinek, valamint a hold felszínén található, életre utaló jelek vizsgálata lenne. A tervezett leszállásra a 2050-es években kerülhet sor.

Irodalom

1. Szegő K., D. T. Young, B. Barraclough, J. J. Berthelier, A. J. Coates, D. J. McComas, F. J. Crary, M. K. Dougherty, G. Erdős, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, M. F. Thomsen: Cassini plasma spectrometer measurements of Jovian bow shock structure. *JGR: Space Physics* 108 A7 (2003) Paper: L287, 14.
2. Young et Young, D. T., J. J. Berthelier, M. Blanc, J. L. Burch, S. Bolton, A. J. Coates, F. J. Crary, R. Goldstein, M. Grande, T. W. Hill et al.: Composition and dynamics of plasma in Saturn's magnetosphere. *Science* 307/5713 (2005) 1262–1266.
3. Bebesi Zs., Juhász A.: A folyékony víz nyomában a Naprendszerben. *Fizikai Szemle* 71/7–8 (2021) 217–226.
4. Bridge, H. S., F. Bagenal, J. W. Belcher, A. J. Lazarus, R. L. McNutt, J. D. Sullivan, P. R. Gazis, R. E. Hartle, K. W. Ogilvie, J. D. Scudder, E. C. Sittler, A. Eviatar, G. L. Siscoe, C. K. Goertz, V. M. Vasyliunas: Plasma observations near Saturn: Initial results from Voyager 1. *Science* 215 (1982) 563.
5. Bebesi Zs.: *A Szaturnusz-magnetoszfera összetételének és a Titán globális plazmakörnyezetének vizsgálata a Cassini Plazma Spektrométer mérései alapján*. Doktori értekezés, Témavezető: Dr. Szegő Károly, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Fizika Doktori Iskola, Részecskefizika és Csillagászat Szakirány, 2007.
6. Bertucci, C., N. Achilleos, M. K. Dougherty, R. Modolo, A. J. Coates, K. Szegő, A. Masters, Y. Ma, F. M. Neubauer, P. Garnier, J. E. Wahlund, D. T. Young: The magnetic memory of Titan's ionized atmosphere. *Science* 321/5895 (2008) 1475–1478.
7. Szegő, K., Z. Bebesi, G. Erdos, L. Foldy, F. Crary, D. J. McComas, D. T. Young, S. Bolton, A. J. Coates, A. M. Rymer et al.: The global plasma environment of Titan as observed by Cassini Plasma Spectrometer during the first two close encounters with Titan. *GRL* 32:20 (2005) 1–5. Paper: L20S05.
8. Szegő, K., Z. Bebesi, C. Bertucci, A. J. Coates, F. Crary, G. Erdos, R. Hartle, E. C. Sittler, D. T. Young: Charged particle environment of Titan during the T9 flyby. *GRL* 34:24 (2007) Paper: L24S03.
9. Bertucci, C., F. M. Neubauer, K. Szegő, J. E. Wahlund, A. J. Coates, M. K. Dougherty, D. T. Young, W. S. Kurth, Structure of Titan's mid-range magnetic tail: Cassini magnetometer observations during the T9 flyby. *GRL* 34:24 (2007) 4. Paper: L24S02.
10. Coates, A. J., F. J. Crary, D. T. Young, K. Szegő, C. S. Arridge, Z. Bebesi, E. C. Sittler, R. E. Hartle, T. W. Hill: Ionospheric electrons in Titan's tail: Plasma structure during the Cassini T9 encounter. *Geophys. Res. Lett.* 34 (2007) L24S05.
11. Nemeth, Z., K. Szegő, G. Erdos, L. Foldy, A. Rymer, M. F. Thomsen, E. C. Sittler, A. J. Coates, A. Wellbrock: Ion distributions of different Kronian plasma regions. *J. Geophys. Res.* 116 (2011) A09212.
12. Rymer, A. M., H. T. Smith, A. Wellbrock, A. J. Coates, D. T. Young: Discrete classification and electron energy spectra of Titan's varied magnetospheric environment. *GRL* 36 (2009) L15109.
13. Szegő, K., Z. Nemeth, G. Erdos, L. Foldy, M. Thomsen, D. Delapp: The plasma environment of Titan: The magnetodisk of Saturn near the encounters as derived from ion densities measured by the Cassini/CAPS plasma spectrometer. *JGR* 116:10 (2011) 17. Paper: A10219.
14. Szegő, K., Z. Nemeth, G. Erdos, L. Foldy, Z. Bebesi, M. Thomsen, D. Delapp, Location of the magnetodisk in the nightside outer magnetosphere of Saturn near equinox based on ion densities. *JGR* 117:9 (2012) 11. Paper: A09225.
15. Szegő, K., Nemeth, Z. Foldy, L. Cowley, S. W. H., Provan, G.: Dual periodicities in the flapping of Saturn's magnetodisk. *JGR* 118:6 (2013) pp. 2883–2887, 5 p.
16. Nemeth, Z., K. Szegő, L. Foldy, S. W. H. Cowley, G. Provan, M. Thomsen: Periodic motion of the magnetodisk as a cause of quasi-periodic variations in the Kronian magnetosphere. *Planetary and Space Science* 130:1 (2016) 54–59.
17. Treumann, R. A., C. H. Jaroschek: Fundamentals of Non-relativistic Collisionless Shock Physics: IV. Quasi-Parallel Supercritical Shocks, arXiv: 0805. 2579 (astro-ph), 2008
18. Bebesi, Z., G. Erdos, K. Szegő: Observations of short large amplitude magnetic structures at the kronian bow shock. *Icarus* 333 (2019) 306–317.

