

## A kutatás témája, technikai és személyi feltételei

Hosszú élettartamú űrszondák építése és rádióizotópos áramgenerátorok alkalmazása lehetővé tette a külső naprendszer helyszíni megfigyelését. A kutatás célja a külső naprendszerben lejátszódó plazmafizikai folyamatok tanulmányozása volt a Cassini, az Ulysses, és a Voyager 1-2 űrszondákkal végzett mérések tudományos kiértékelésével.

A Cassini szonda 2004-ben állt Szaturnusz körüli pályára, ezen a szondán repülő magnetométer és plazma-detektor mérési adatait használtuk, amelyekhez társkutatói jogon jutottunk hozzá a szonda 1996-os fellövése előtti műszerépítésben való aktív részvételünk elismeréseként. Az űrszonda műszerei jó állapotban vannak és jelenleg is folyamatosan végeznek méréseket. Az 1990-ben felbocsátott Ulysses a Jupiter gravitációs lendítése révén egyedülálló módon az ekliptikára közel merőleges Nap-körüli pályán végezte megfigyeléseit 2009-ig. Ez az időszak rendkívül szerencsésnek mondható, mert a megfigyelések utolsó időszaka egybeesett a napfoltciklus különleges, 150 éve nem tapasztalt elhúzódó, inaktív korszakával. A mérési adatokhoz vendégkutatói státusszal jutottunk hozzá. A Voyager 1 és 2 szonda 2004-ben, illetve 2007-ben egyedülálló módon átlépte a szuperszonikus napszél határát. A Voyager szondák részecske-fluxus és irányeloszlás, valamint a Voyager-2 szonda napszél-plazma mérési adatai szintén rendelkezésünkre álltak.

A kutatás időzítése tehát a szerencsés körülményeknek is köszönhetően aktuális volt. A munkát jelentősebb technikai akadályok nem nehezítették. A mérési adatok megszerzése, feldolgozása, archiválása a terv szerint történt. Számítástechnikai kapacitásunkat az igényeknek megfelelően bővítettük, klímatizált géptermet működtettünk folyamatosan. Mérési eredményeket megjelenítő és analizáló programokat fejlesztettünk.

A kutatási terv végrehajtását személyi változás hátráltatta, egy kutató 2008-ban hosszabb időre külföldre távozott, emiatt a kutatás kissé lelassult. Ezzel párhuzamosan a költségvetési terv is változott, a pénzköltés lelassult. Ezért kértük a projekt meghosszabbítását fél évvel, amit a maradvány pénzből finanszíroztunk. Az OTKA Iroda hozzájárult a hosszabbításhoz.

### A kutatás konkrét céljai a következők voltak:

1. A Szaturnusz plazmakörnyezetének kutatása, különös tekintettel a fejhullámra, és a köpenyben lejátszódó hullámjelenségek tanulmányozására.
2. A Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titán plazmakörnyezetének vizsgálata a megközelítések során.
3. Elektromosan töltött porok mozgásának elméleti vizsgálata, az eredmények összevetése a Cassini pordetektorának méréseivel.
4. A helioszféra mágneses terének vizsgálata.
5. Töltött részecskék terjedésének vizsgálata a helioszférában.

### A kutatás motivációja

A szuperszonikus kiáramló napszél számára az égitestek akadályt képeznek, kölcsönhatásuk során nem-lineáris folyamatok játszódnak le. A folyamatok megértését megnehezíti, hogy a laboratóriumi kísérletekkel szemben a paramétereket nem lehet

változtatni. Ugyanakkor, a különböző égitestek egymáshoz képest változatos tulajdonságokkal rendelkeznek, a körülöttük kialakuló plazmakörnyezet összehasonlító vizsgálata segíthet megérteni a napszéllel való kölcsönhatásukat. A Szaturnusz erős mágneses térrel rendelkezik, amely azonban - egyedülálló módon a Naprendszerben - közel szimmetrikus a bolygó forgástengelye körül. Ugyanakkor meglepő módon a Szaturnusz magnetoszférájának számos tulajdonsága mutatja a bolygó 10 órás forgási periódusát. A Szaturnusz magnetoszférájának másik különlegessége, hogy a rendszerben sok plazma-forrás és elnyelő található.

A Titán sok tekintetben hasonló a Vénushoz, mert mindkét égitest mágneses tér nélküli, de jelentős ionoszférával rendelkezik. A Titán azonban abból a szempontból különleges, hogy a Szaturnusz magnetoszférájában kering, ezért a Titán olyan, egyébként szubszonikusán áramló plazmávan lép kölcsönhatásba, amely állapota időben változó. A Cassini űrszonda eddig 71 alkalommal közelítette meg a Titánt, ezeknél a megközelítésekénél a szonda mindig más viszonyokat talált.

Az apró porszemcsék mozgásának modellezése segít a keletkezésük helyének azonosításában. A Cassini szonda egyik fontos eredménye volt az Enceládus holdból kiszabaduló víz és por felfedezése. Kiderült, hogy a vékony, áttetsző E-gyűrű anyagát az Enceladus táplálja. A pordinamika vizsgálata a Szaturnusz környezetében ezért különösen aktuális téma.

A helioszféra egy buborék a csillagközi térben, amelyet a napszél fúj ki. A helioszféra anyagát és elektromágneses terét tehát elsősorban a belső határa, vagyis a Nap határozza meg. A külső határ viszont a csillagközi térből eredő hatások szempontjából fontos. Az Ulysses szonda, mint eddig az egyetlen nagy heliografikus szélességre eljutott mérőeszköz segítségével a helioszféra három dimenziós szerkezete tárható fel, amely a napfoltciklus szerint változékonyságot mutat. A Voyager szondák átlépték a szuperszonikus napszelet a helioszféra köpenyétől elválasztó lökéshullámot. Ennek a határfelületnek a közelében kialakuló folyamatok tanulmányozása alapvető fontosságú a galaktikus kozmikus sugárzás modulációjának és az ún. anomális kozmikus sugárzás eredetének megértése szempontjából.

## **Eredmények:**

A széles nemzetközi együttműködésben végzett kutatások eredményeiről számos konferencián elhangzott előadás és poszter tanúskodik. A közlemények jegyzékében csak azoknak az elhangzott előadásoknak és posztereknek absztraktját tüntettük fel, amelyekben az első szerző, egyben az előadó a kutatási projekt résztvevője volt. Az alábbiakban az írásban, elsősorban már referált folyóiratokban is megjelent eredményeket mutatjuk be röviden.

### Távoli óriásbolygók plazmakörnyezetének kutatása

A Cassini űrszonda Jupiter mellett 2001-ben történt elrepülésekor mért adatain vizsgáltuk a bolygó plazmakörnyezetében kialakuló szakadási felületeket. A Plazma Spektrométer (CAPS) és a Magnetométer (MAG) méréseinek elemzése során úgy találtuk, hogy az észlelt adatok egy alkalommal konzisztensek voltak egy lassú módusú MHD lökéshullám paramétereivel. A Jupiternél korábban csak egy alkalommal figyeltek meg lassú módusú lökéshullám-szerű átmenetet, a nappali magnetoszféra burokbán. Az általunk detektált esemény szintén a magnetoszféra burokbán helyezkedett el, helyi időben 19:10 körül [38, lásd. a közlemények jegyzékét].

A Szaturnusz fejhulláma előtti tartományban a mágneses és plazma adatokat elemezve két különös esemény nyomára bukkantunk. Ezeket az eseményeket nagy valószínűséggel a fejhullám és a napszélben utazó áramleplek kölcsönhatása hozza létre, hasonlóan a Föld fejhullámának közelében megfigyelt Hot Flow Anomália jelenségéhez. Kiszámítva az elektron hőmérsékletet, azt találtuk, hogy változása kisebb mint ami a Föld közelében jellemző; a növekedés kétszeres, szemben a földközeli HFA-k nagyságrendi eltéréssel. Az üregben föllépő nyomás értéke arra utal, hogy a megfigyelt jelenségek központi régiója terjeszkedett a megfigyelés idején [43].

### A Titán plazmakörnyezetének vizsgálata

A Titánnal szerzett tapasztalatok indokolták, hogy párhuzamos vizsgálatokat kezdjünk meg a Titán csóvája és a Venus Express ASPERA-4 ion analizátora által a Vénusz csóvájában mért oxigén ionok között, hiszen mindkét objektum a nem-mágneses objektumok közé tartozik, és a beáramló plazma mindkettőnél közvetlen kölcsönhatásba kerül az ionoszférával. A vizsgálat során kimutattuk, hogy a Titán esetében az éjszakai ionoszféra kialakításában nem játszanak szerepet a nappali oldalról hátraáramló ionok, az éjszakai ionoszférát kizárólag a magnetoszférikus elektronok okozzák. Bemutattunk egy modellt, amely leírja a kölcsönhatási zónában bekövetkező hullám-gerjesztéseket és rámutattunk arra, hogyan befolyásolhatják a mikrofizikai skála eseményei a makroszkopikus mérések eredményeit [11]. A Titán ionoszférája direkt kölcsönhatásba lép a körülötte áramló nagy sebességű plazmával. Ennek eredményeként kialakul egy turbulens kölcsönhatási tartomány, amelyet „áramlás-oldali plazmaköpeny”-nek hívunk. Itt mind az ionoszféra hideg ionjai, mind a forró áramló plazma összehasonlítható sűrűségben van jelen. Reális elektron-tömeget használó egydimenziós hibrid-szimuláció keretében bemutattuk, hogy jelentős hullám-aktivitás keletkezhet az ún. módosított két-nyaláb instabilitás (MTSI) miatt. Az MTSI szintén nagyon effektívnek bizonyult anomális viszkozitás típusú kölcsönhatásik gerjesztésében, ami a beáramló plazma sebességének jelentős csökkenését, és az ionoszférikus ionok fűtését eredményezi. A jelenség hozzájárulhat a Titán anyagvesztési folyamataihoz is. Szimulációnk képes jósolni a keletkező hullámaktivitás és szupratermális részecskék tulajdonságait [12].

A 2005. december 26-i T9 jelű Titán megközelítés során a megfigyelt plazma-áramlás és a mágneses tér iránya is jelentősen eltért a korábbi Titán megközelítések megfelelő értékeitől. Jól elkülöníthetően megjelent egy korábban nem tapasztalt plazmatartomány. Kimutattuk, hogy a T9 megközelítés több speciális tulajdonságát feltehetően az okozta, hogy a megközelítés előtt a szonda belépett a Szaturnusz mágneses korongjába, ahol elsősorban protonok által dominált környezetbe került, és módosult a Titánt elérő nyaláb iránya. Noha a mágneses korongtól való távolság mindig befolyásolta a kölcsönhatás jellegét, ez volt az első alkalom, amikor a korongba való belépés valószínűsíthető volt [18].

A T32-es megközelítés rendkívüli lehetőséget biztosított: ekkor ugyanis a Titán a Szaturnusz magnetoszférájából kikerült a magnetoszférát körbeáramló, napszél eredetű magnetoszféra burokbá. A legfontosabb megfigyelés az volt, hogy a Titán közelében lelassuló plazmaáramban a Szaturnusz magnetopauzájának átlépése után is egy ideig még megőrizte a magnetoszféra plazma-struktúráját, ami elsősorban a mágneses tér szerkezetében volt megfigyelhető. A két tartomány közti határ átlépése során a részecskeadatok véges vastagságú határretegére utaltak. A fosszilis, Szaturnusz eredetű tér legalább 20 percig megmaradt a magnetoszféra burokbán levő Titán plazmakörnyezetében [21].

Új eredmények származtak a T18 és T9 jelű Titán megközelítések összehasonlító vizsgálatából. Mindkét megközelítés során könnyű ( $H^+$ ,  $H_2^+$ ) ionok dominálták a bejövő

plazmaáramlást, ezért ezek a megközelítések az alacsony magnetoszférikus energiabetáplálás tipikus példáját jelentik az áramló plazma és az ionoszféra kölcsönhatását tekintve. A mérések arra utalnak, hogy a Titán hidrogén koronája kiterjedt. A T9 során a szonda kétszeres csóva áthaladást észlelt, a másodikat egyértelműen fölgűrődött magnetoszférikus erővonalak okozták, az elsőben ionoszféra eredetű ionok jelentős áramát figyelhettük meg. A kettő között nagy energiájú protonokat találtunk, amelyeket valószínűleg a konvektív elektromos tér gyorsított fel. A T18 során a megfigyelések a holdhoz sokkal közelebb történtek, lehetővé téve, hogy a kölcsönhatásokat alacsonyabb, 950 km-es magasságokban is megfigyeljük. A megfigyeléseket összevetettük korábbi hibrid szimulációk eredményeivel [44].

### Elektromosan töltött porok terjedése

Továbbfejlesztettük a Szaturnusz E gyűrű modellünket oly módon, hogy az Enceladus eredetű porszemcséknek a holdakba történő visszaütközési valószínűségeit súlyozó tényezőként használjuk fel a térbeni sűrűségeloszlás kiszámításakor [15,25]. Ez a módszer a korábbi modelleknél alkalmazott - visszaütközési élettartammal történő - számolásnál realisabb leírását eredményezi az E gyűrűnek. A legfontosabb következmény az, hogy az E gyűrű térbeni kiterjedése jelentősen nagyobb, mint azt a korábbi modellek jósolták. Radiális irányban  $r=20 R_S$  ( $1 R_S=60330$  km) és vertikális irányban  $\pm 2 R_S$  adódik az E gyűrű maximális méretére. Megmutattuk továbbá azt, hogy az Enceladusról elszökő jégzemcsék kezdeti 50-100 m/s sebessége következtében az E gyűrű radiális optikai mélységprofilja az Enceladus pályasugarától kisse kifelé tolódik. Ezen eredmények jó egyezést mutatnak a földi Keck távcsöves és a Cassini mérések (CDA, RPWS) eredményeivel.

Modelleztük a Jupiter belső magnetoszférájában található kis optikai mélységű (halvány) porgyűrűt/porhalat [24,42]. Feltételeztük, hogy a gyűrűt alkotó porszemcsék a bolygóközi mikrometeoroidok bombázása következtében lökődnek ki a Jupiter két belső holdjának (Metis és Adrastea) felszínéről. A porszemcsék töltésre tesznek szert a Jupiter plazmakörnyezetében, és a szemcspotenciál szisztematikusan változik a Jupitertől való távolság függvényében, ami meglepően rövid szemcseélettartamokra vezet. Kiszámítottuk a létrejövő porgyűrű/porhalo térbeni sűrűségeloszlását és optikai mélység-eloszlásait. A modellünk jól reprodukálja a Jupiter gyűrű/halo régiójának távcsöves és űrszondás megfigyeléseivel (Voyager, Galileo, Cassini) kapott eredményeket. A modellel egy jóslatot tettünk a lehetséges por beütésszámra a Juno űrmisszió esetére, amely 2016-ban többször is át fog repülni a vizsgált tartományon.

### A helioszféra mágneses terének vizsgálata

A napszél-plazmában gyakran figyelhetők meg magnetohidrodinamikai szakadási felületek, amelyekben a plazma paraméterei rövid skálán változnak. Az Ulysses mágnesestér-mérések legjobb időfelbontású adatain vizsgáltuk a szakadási felületek gyakoriságát [13]. Megmutattuk, hogy a szakadási felületek száma csökken a heliografikus távolsággal, ezt a struktúráknak a turbulencia miatti elbomlásával magyaráztuk. Kritizáltuk azt a gyakorlatot, amely a szakadási felületek kiválasztását a mágneses térerősség-vektorok időbeli változásának sebessége szerint végzi, és helyette a struktúrák térbeli méretének alapján történő kiválasztást javasoltuk. Megállapítottuk, hogy az események kiválasztásának hibás gyakorlata miatt a radiális normálisú szakadási felületek a korábbi megfigyelésekben túltreprezentáltak voltak, a valóságban a normálisok irányeloszlása összeegyeztethető az izotrópiával.

Az Ulysses Naphoz közeli pályaszakaszát, amikor a déli pólustól az északiig terjedő utat gyorsan, egy év alatt teszi meg, gyors szélességi pásztázásnak hívjuk. Az első ilyen alkalommal az energikus részecskék fluxusában észak-déli aszimmetriát találtak. A

megfigyelést a helioszférikus áramlepelnek (HCS-nek) a Nap egyenlítőjéhez viszonyított  $10^\circ$ -os déli irányú eltolódásával magyarázták. A HCS a helioszféra kétféle mágneses polaritású féltekéjét elválasztó hullámos alakú felület. Az Ulysses szondával megfigyelt mágneses polaritás-átmenetek helyének elemzésével meghatároztuk a HCS eltolódását az első és a harmadik szélességi pásztázások során [41]. Megállapítottuk, hogy mindkét esetben az áramlepel néhány fokos szöggel déli irányban tolódott el. Az azonos irányban történő eltolódás azért meglepő, mert a két megfigyelés a Nap ellentétes mágneses polaritásánál történt. Rámutattunk arra, hogy az eltolódás kis mértéke összeegyeztethetetlen a részecskefluxus mérések magyarázatánál hivatkozott  $10^\circ$ -os eltolódással. A HCS eltolódásának kis mértékét a mágneses térerősség pólusoknál mért értékei is alátámasztják.

### Szoláris eredetű töltött részecskék terjedése

A Nap aktivitásának egyik megjelenési formáját a nagyenergiájú (GeV fölötti energiáig) töltött részecskék fluxusának hirtelen megnövekedései, a szoláris energikus részecskeesemények jelentik. A jellegzetes időbeli lefolyású események lecsengő fázisa fontos információt hordoz a részecskék terjedésére vonatkozóan és ennek folytán a napszélplazma ill. a bolygóközi mágneses tér szerkezetére, fluktuációira nézve is. Az események döntő többségében ( $\sim 90\%$ ) a lecsengő fázis jól közelíthető exponenciális időfüggéssel, ami a konvekció és az adiabatikus lassulás domináns szerepét mutatja. Ekkor a karakterisztikus időállandó a részecskék energiaspektrumának meredekségétől, a napszél sebességétől és a Naptól való távolságtól függ. Az IMP-8, Föld körül keringő űrszonda észlelései alapján első alkalommal végeztük el ilyen események kiterjedt statisztikus elemzését [34]. A több, mint 600 esemény során az időállandó jó közelítéssel megegyezett az elméleti jóslattal az olyan esetek több, mint felében, ahol a napszélsebesség állandó volt. Egyidejű, a Naptól távolabbi Ulysses mérésekkel összehasonlítva ellenőriztük a távolságfüggést is, a fluxuscsökkenés lassul a távolság növekedésével. A Voyager és az Ulysses alacsony energián (1-30 MeV) nyugodt naptevékenység idején mért fluxusai alapján becslést adtunk a protonok radiális és heliografikus szélességi gradiensére [27] és jó egyezést kaptunk a kétdimenziós driftmodellel.

### Részecskefluxusok a helioszféra határvidékén

A pályázati időszak a helioszféra határvidékének kutatásában döntő fontosságú volt, mert a Voyager-1 és Voyager-2 (V1, V2) űrszondák, mint az emberiség legtávolabbi küldöttei átlépték a gyors és lassú napszelet elválasztó lökéshullámot. Megmutatuk, hogy a kisenergiájú ionok fluxusának napi változékonysága egyértelműen mutatja a lökéshullámon való áthaladás idejét, amely a V1 esetében 2004. december 16-án történt [28]. A 70 MeV körüli "anomális" kozmikus sugárzás fluxusában nem volt látható a várt növekedés, és az 1 MeV körüli ionok irányeloszlása is más volt, mint vártuk. A V2 átlépése a terminál lökéshullámon 2007. augusztusában még nagyobb meglepetéseket tartogatott számunkra. A napszél kisebb mértékben lassult le, és a plazma hidegebb maradt, mint vártuk, és az áramlás formálisan szuperszonikus maradt. Az az álláspont vált uralkodóvá, hogy a lökéshullámnál a napszél kinetikus energiája nagyrészt a néhány keV és 30 keV közötti tartományba gyorsítja a napszél-ionok és a csillagközi gázból származó ionok egy részét. Ez az eredmény a kozmikus sugárzás keletkezésének megértését is segítheti, hiszen azt mutatja, hogy léteznek hatékony mechanizmusok a csillagszelek energiájának gyorsított ionokba való átvitelére. A kérdés tisztázása további vizsgálatokat igényel.