

**A Szaturnusz-magnetoszféra összetételének és a Titán
globális plazmakörnyezetének vizsgálata a Cassini Plazma
Spektrométer mérései alapján**

című doktori értekezés tézisei

Szerző: Bebesi Zsófia

Fizika Doktori Iskola

Vezetője: Dr. Horváth Zalán

Részecskefizika és Csillagászat Program

Vezetője: Dr. Csikor Ferenc

Témavezető: Dr. Szegő Károly

Budapest

2007

1. Bevezetés, a munka célkitűzései

A Szaturnusz, és legnagyobb holdja a Titán vizsgálata az űrkutatás egyik, napjainkban nagy érdeklődéssel kísért területe. A Cassini keringő egység az első olyan űreszköz, mely pályára állt a Szaturnusz körül, hogy hosszabb időn keresztül vizsgálja annak plazmakörnyezetét, valamint gyűrű- és holdrendszerét. A KFKI RMKI-ban a Cassini két fedélzeti műszerének - a Cassini Plazma Spektrométernek (CAPS) és a Magnetométernek - adataival dolgozunk. Munkám egy része során az adatokat a nemzetközi kutatócsoport (CAPS Team) tagjaként dolgozom fel, és részt veszek a tudományos problémák megoldásában is.

A Cassini Plazma Spektrométer három plazmaszenzorból (Elektron Spektrométer, ELS; Iontömeg Spektrométer, IMS; Ionnyaláb Spektrométer, IBS) áll (Young et al., 2004), melyek közül az IMS adatait dolgoztam fel. A CAPS berendezés egy motoros forgó platformra (aktuátor) van rögzítve, mely által a műszer a szonda z-tengelye körül pásztázó mozgást végezhet a környező plazmában. Az IMS egy repülési idő (Time Of Flight, TOF) tömegspektrométer, mely a 8 (az aktuátor síkjára merőleges) elevációs irányból, egyenként 20°-os látómezejű apertúrán keresztül belépő részecskék tömeg/töltés (M/Q) arányait méri (McComas et al., 1998; Nordholt et al., 1998).

A Cassini űrszonda fedélzeti berendezései a Szaturnusz és környezetének igen változatos vizsgálatát teszi lehetővé. A mérési adatok feldolgozása során olyan kérdésekre keressük a választ, mint:

- Milyen a plazma összetétele a magnetoszféra különböző tartományaiban?
- Milyen kölcsönhatás áll fenn az égitestek atmoszférája/felszíne és a környező plazma között?
- Hogyan irányítják a Titán atmoszférájának és környezetének kémiáját az összetett ionizációs folyamatok?

A Szaturnusz magnetoszférikus plazmájának az összetételét korábban nem ismertük pontosan, mivel a 80-as évek elején odalátogató Voyager 1 és 2 szondáknak, valamint a Pioneer 11-nek nem volt tömegspektrométere. A Voyager-ek plazma műszerével meg lehetett ugyan állapítani, hogy a plazma egy könnyű és egy nehéz ion komponensből áll, melyek közül a nehéz ionokat - feltételezve, hogy azok a Titán atmoszférájából származnak - nitrogénionokként azonosították (Bridge et al., 1981). A Cassini nagy felbontású

tömegspektrométerével lehetővé vált a magnetoszférikus plazma pontos összetételének meghatározása. A CAPS adatokat a szonda pályára állításának időszakában vizsgáltuk (Young et al., 2005) - ennek során kiderült, hogy a belső magnetoszféra legfontosabb plazma-összetevője a Szaturnusz gyűrűiből, valamint a jeges holdakról származó oxigén.

A disszertációmban három publikációnk eredményeit, illetve a nemzetközi CAPS Team tagjaként végzett saját munkámat ismertetem. Elsőként az Iontömeg Spektrométer adatait felhasználva a Team közös munkájában a magnetoszférikus plazma összetételének vizsgálatában vettem részt, melynek során a Cassini pályára állításának idején mért adatokat elemeztük (Young et al., 2005). Az analízist IDL programnyelven írt, saját fejlesztésű programcsomaggal végeztem. Második cikkünkben (Szegő et al., 2005) a Cassini első két Titán-megközelítésének adatait elemeztem, ekkor a Titán környezetében négy plazmatartományt különítettünk el. A Titán plazmakörnyezete a Naprendszer két nem mágneses bolygójáéhoz (Vénusz és Mars) képest összetett, mivel atmoszféráját a Nap fotonjai mellett a korotáló magnetoszférikus plazma részecskéi is ionizálják. A Titánhoz $15 R_T$ -nél (ahol $R_T = 2575$ km a Titán sugara) közelebb könnyű pickup részecskéket észleltünk, harmadik publikációnkban (Szegő et al., beküldve) ezt a tartományt vizsgáltam. Ennek során kiderült, hogy a korábban észlelt pickup csúcsok a H^+ és H_2^+ ionoktól ($m/q = 1$ és $m/q = 2$) származnak. A pickup részecskék minden bizonnyal a Titán H és H_2 koronáiból erednek, illetve ott keletkezhetnek. A fenti témákban született publikációk mellett számos nemzetközi konferencián is megjelentünk, ahol eredményeinket előadás, vagy poszter formájában mutattuk be.

2. A kutatás módszerei

Munkám során a megoldandó feladatokhoz - azon belül is elsősorban a CAPS-IMS adatok feldolgozásához - IDL programnyelven fejlesztettem a meglévő (adatbeolvasásra alkalmas) programjainkat. Mivel szükségességé vált a Time Of Flight adatok elemzése is, egy 1 hetes tanulmányút során a franciaországi CETP (Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires) kutatóintézetében J.-J. Berthelier segítségével 2005-ben elkezdtem megírni a TOF elemző programunkat IDL programnyelven. A program alkalmas az adatok beolvasására, ábrázolására, valamint az egyes energiatartományokba eső részecskék összetételének vizsgálatára. A CAPS adatok feldolgozását általában IDL rutinokkal végeztem, de egyes részfeladatok megoldásához használtam a Wolfram Research Inc. Mathematica programját is.

Tézispontok

1. A Cassini Plazma Spektrométer (CAPS) adatainak feldolgozásához az Iontömeg Spektrométer (Ion Mass Spectrometer; IMS) energiaspektrumaihoz, valamint a repülési idő spektrumok megjelenítéséhez IDL programnyelven ábrázoló kódokat fejlesztettem ki. Ezek a programok beépültek a CAPS adatfeldolgozás során használt szoftvercsomagunkba, és kutatócsoportunk többi tagja számára is rendelkezésre állnak.
2. A nemzetközi CAPS Team tagjaként részt vettem a Cassini pályára állításának időszakában mért CAPS adatok elemzésében. Ennek során a CAPS-IMS mérések felhasználásával elemeztem a belső magnetoszféra plazmájának összetételét. A külső plazmaszférában (a bolygóhoz $\sim 14 R_S$ -nél közelebb, ahol $R_S = 60268$ km a Szaturnusz sugara) a plazmában megjelentek a vízcsoport elemei (OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+ , összefoglaló jelöléssel W^+ ionok), azonban ebben a tartományban még a protonok voltak túlsúlyban (Young et al., 2005). A belső plazmaszférában (határa $\sim 9 R_S$ -nél található) a plazma a külső tartománynál merevebben korotál a bolygóval, összetételét tekintve pedig a külső plazmaszférához képest nagyobb koncentrációban tartalmaz O^+ és W^+ ionokat. Az A és B gyűrűk fölött főként O^+ és O_2^+ ionokat észleltem, melyek valószínűleg a vízjég sugárzás általi lebomlásakor szabadultak fel. A Cassini-t megelőzően, a Voyager űrszondák mérései alapján úgy vélték, hogy a belső magnetoszféra nehéz ionjai a Titánról származó nitrogénionok (Bridge et al., 1981). A CAPS mérései révén azonban kiderült, hogy az észlelt részecskék elsősorban oxigénionok, melyek elsődleges forrásai a Szaturnusz gyűrűi, valamint jeges holdjai. Erre a Hubble űrteleszkóp mérései is utaltak már a 90-es években (Shemansky et al., 1993; Hall et al., 1996; Richardson et al., 1998).
3. A Titán globális plazmakörnyezetét a Cassini három megközelítése alkalmával vizsgáltam. A Titán eredetű plazmát a holdtól már mintegy $1-1,5 R_S$ távolságban lehet észlelni (Szegő et al., 2005), ~ 15 Titán-sugárnyi ($R_T = 2575$ km) távolságban pedig egyértelműen Titán-eredetű pickup ionokat figyeltem meg. A holdhoz $4 R_T$ -nél közelebb a részecskék a Titán atmoszférájának tömegfeltöltési folyamatai miatt lelassultak, majd közvetlenül az ionosféra fölötti tartományban igen hideg sűrű plazma helyezkedett el. Ez utóbbi ionpopulációk hasonlóak a Vénusz, és a Mars közelében megfigyeltekhez.
4. A Titán környezetében (4 és $15 R_T$ között) észlelt pickup ionokat vizsgálva megállapítottam, hogy a részecskék nem közvetlenül a hold exobázisánál keletkezettek, hanem az atmoszférát körülvevő semleges koronában. A semleges koronát a Cassini más plazmaberendezéseivel is kimutatták már (Smith et al., 2004).

5. A CAPS-IMS repülési idő (Time of Flight, TOF) spektrumait felhasználva a CAPS mérési tartományába eső könnyű pickup ionok detektálása révén meghatároztam a Titán körüli, (könnyű részecskék alkotta) semleges anyagfelhő összetételét (Szegő et al., beküldve). A nagyobb tömegű (például nitrogén) pickup ionok mozgási energiái meghaladják a berendezés észlelési kapacitását, ezért a nitrogén korona kimutatása ezzel a módszerrel nem lehetséges. Az ionspektrumokat összevettem a TOF mérésekkel, melyek alapján megállapítottam, hogy az észlelt pickup ionok elsősorban 1 és 2 amu tömegű részecskék. Ebből arra következtettem, hogy az ionok a Titán H, és H₂ koronáiból érkeztek a detektorba. Ez megfelel a Voyager 1 észleléseinek (Ip, 1990), valamint a modellszámításoknak (Keller et al. 1998; Toublanc et al. 1995).

Irodalomjegyzék

1. Bridge, H.S., J.W. Belcher, A.J. Lazarus, S. Olbert, J.D. Sullivan, F. Bagenal, 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*, 212, 217 - 224, 1981
2. Hall, D.T., P.D. Feldman, J.B. Holberg, M.A. McGrath, Fluorescent hydroxyl emissions from Saturn's ring atmosphere, *Science*, **272**, 516–518, 1996
3. Keller, C.N., V.G. Anicich, T.E. Cravens, Model of Titan's ionosphere with detailed hydrocarbon ion chemistry, *Planet. Space Sci.*, **46**, 1157-1174, 1998
4. McComas, D.J., J.E. Nordholt, D.T. Young, J.-J. Berthelier, in R.F. Pfaff, J.E. Borovsky, and D.T. Young (eds.), Measurement techniques in space plasmas: Particles, *AGU Geophysics Monograph Series*, 102, 187-193, 1998
5. Nordholt, J.E., J.-J. Berthelier, D.M. Burr, H.O. Funsten, R. Goldstein, J.M. Illiano, K.P. McCabe, D.J. McComas, D.M. Potter, D.T. Young, in R.F. Pfaff, J.E. Borovsky, and D.T. Young (eds.), Measurement techniques in space plasmas: Particles, *AGU Geophysics Monograph Series*, 102, 209-214, 1998
6. Richardson, J.D., A. Eviatar, M.A. McGrath, V.M. Vasyliunas, OH in Saturn's magnetosphere: Observations and implications, *J. Geophys. Res.*, **103**, 20245-20256, 1998
7. Shemansky, D.E., P. Matherson, D.T. Hall, T.M. Tripp, Detection of the hydroxyl radical in the Saturn's magnetosphere, *Nature*, **363**, 329–332, 1993

8. Smith, H.T., R.E. Johnson, V.I. Shematovich, Titan's atomic and molecular nitrogen tori, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L16804, 2004
9. Toubanc, D., J. P. Parisot, D. Gautier, F. Raulin C. P. McKay, Photochemical modeling of Titan's atmosphere, *Icarus*, **113**, 2, 1995
10. Young, D.T., J.-J. Berthelier, M. Blanc, J.L. Burch, A.J. Coates, R. Goldstein, M. Grande, T.W. Hill, R.E. Johnson, V. Kelha, D.J. McComas, E.C. Sittler, K.R. Svenes, K. Szegő, P. Tanskanen, K. Ahola, D. Anderson, S. Bakshi, R.A. Baragiola, B.L. Barraclough, R.K. Black, S. Bolton, T. Booker, R. Bowman, P. Casey, F.J. Crary, D. Delapp, G. Dirks, N. Eaker, H. Funsten, J.D. Furman, J.T. Gosling, H. Hannula, C. Holmlund, H. Huomo, J.M. Illiano, P. Jensen, M.A. Johnson, D.R. Linder, T. Luntama, S. Maurice, K.P. McCabe, K. Mursula, B.T. Narheim, J.E. Nordholt, A. Preece, J. Rudzki, A. Ruitberg, K. Smith, S. Szalai, M.F. Thomsen, K. Viherkanto, J. Vilppola, T. Vollmer, T.E. Wahl, M. Wüest, T. Ylikorpi, C. Zinsmeyer, Cassini Plasma Spectrometer Investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 1-112, 2004

A tézispontok alapjául szolgáló referált publikációk

1. Szegő, K., **Z. Bebesi**, G. Erdos, L. Foldy, F. Crary, D.J. McComas, D.T. Young, S. Bolton, A.J. Coates, A.M. Rymer, R.E. Hartle, E.C. Sittler, D. Reisenfeld, J.-J. Bethelier, R.E. Johnson, H.T. Smith, T.W. Hill, J. Vilppola, J. Steinberg, N. Andre, The global plasma environment of Titan as observed by Cassini Plasma Spectrometer during the first two close encounters with Titan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, L20S05, doi: 10.1029/2005GL022646, 2005
2. Szegő, K., **Z. Bebesi**, G. Erdos, L. Foldy, R.E. Hartle, E.C. Sittler, F. Crary, D.T. Young, A.J. Coates, J.-J. Berthelier, M.F. Thomsen, Indirect evidence for a neutral hydrogen cloud near Titan, submitted to *Geophys. Res. Lett.*
3. 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, R.E. Johnson, R.A. Baragiola, V. Kelha, D.J. McComas, K. Mursula, E.C. Sittler, K.R. Svenes, K. Szegő, P. Tanskanen, M.F. Thomsen, S. Bakshi, B.L. Barraclough, **Z. Bebesi**, D. Delapp, M.W. Dunlop, J.T. Gosling, J.D. Furman, L.K. Gilbert, D. Glenn, C. Holmlund, J.-M. Illiano, G.R. Lewis, D.R. Linder, S. Maurice, H.J. McAndrews, B.T. Narheim, E. Pallier, D. Reisenfeld, A.M. Rymer, H.T. Smith, R.L. Tokar, J. Vilppola, C. Zinsmeyer, Composition and Dynamics of Plasma in Saturn's Magnetosphere, *Science*, 307, 1262-1266, 2005

További referált publikációk

1. K. Szego, **Z. Bebesi**, C. Bertucci, A.J. Coates, F.J. Crary, G. Erdos, R. Hartle, E.C. Sittler Jr., D.T. Young, Charged particle environment of Titan during the T9 flyby, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 34, L24S03, doi:10.1029/2007GL030677, 2007
2. Coates, A.J., F.J. Crary, D.T. Young, K. Szego, C.S. Arridge, **Z. Bebesi**, E.C. Sittler Jr., Ionospheric electrons in Titan's tail: plasma structure during the Cassini T9 encounter, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 34, L24S05, doi:10.1029/2007GL030919, 2007
3. Masters, A., C.S. Arridge, M.K. Dougherty, C. Bertucci, L. Billingham, S.J. Schwartz, C.M. Jackman, **Z. Bebesi**, A.J. Coates, D.T. Young, Cassini encounters with hot flow anomaly-like phenomena at Saturn's bow shock, *Geophys. Res. Lett.*, elfogadva, 2007GL032371, 2007