

**Timár Anikó** (t.aniko@outlook.com)

Fizika Doktori Iskola, Csillagászat és Részecskefizika Program

Témavezető: Németh Zoltán, Lichtenberger János

A dolgozat címe: Napszél eredetű hatások egy üstökös körül – vizsgálatok a Rosetta űrszonda mérései alapján

### *Bevezetés*

Az előző félévben már megbecsültem a 67P/Csurjumov-Geraszimenko üstökös körüli napszélnyomást a Rosetta által mért mágneses tér mérésekből maximumkeresési eljárással, ebben a félévben pedig a korábban már használt Cravens-modell alapján is kiszámítottam. Ehhez fontos volt megvizsgálni, hogy alkalmazhatóak-e a Giotto űrszonda Halley üstökös kómájában történt végighaladása után felállított elméletek, mint az ion-semleges súrlódás, egy sokkal kisebb aktivitású üstökös esetében is, mint amilyen a 67P. Az alkalmazhatóságot részben már bizonyítja, hogy az előző félévek során bemutatott, ion-semleges súrlódáson alapuló modell segítségével kiszámolt diamágneses üreghatár távolság jól illeszkedik a Rosetta által kimért üreghaladásokhoz (2015 júniusától 2016 februárjáig); azonban ennek miéртje nem volt teljesen tisztázott.

### *Előző három félévben elért kutatási eredmények összegzése*

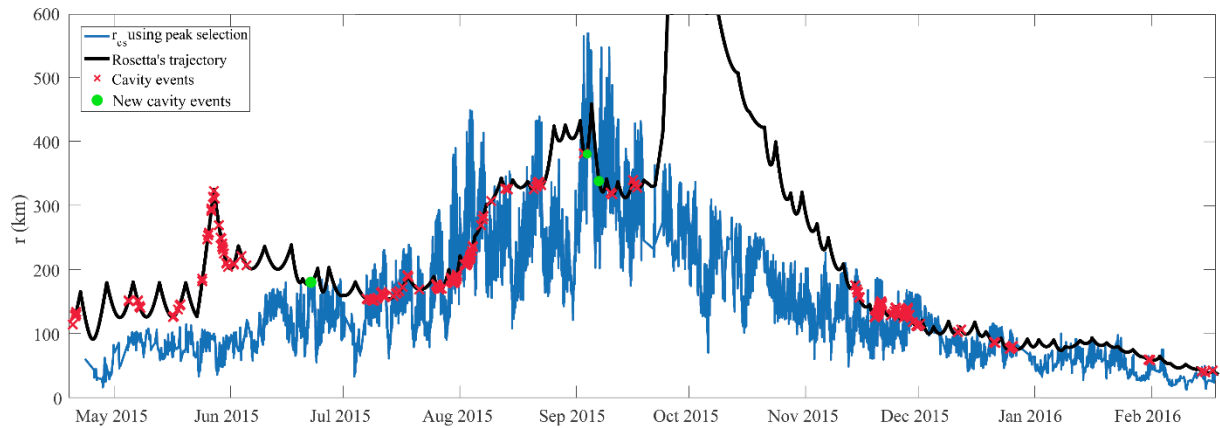
A diamágneses üreg az üstökös kómájának legbelső régiója, ahonnan az üstökösből kiáramló plazma „kifűjja” az interplanetáris mágneses teret, létrehozva egy mágneses tér nélküli területet az üstökös körül. A munkám során többek között azzal foglalkoztam, hogy hogyan lehetne meghatározni a diamágneses üreg kiterjedését a 67P üstökös környezetében, amihez különböző adatsorok és módszerek segítségét vettem igénybe. Végül a különböző módokon kiszámolt határtávolságokat összevettem a Rosetta űreszköz által mért többszáz, néhány perces diamágneses üreghaladás helyzetével.

Cravens (1986) modellje szerint a diamágneses üreg külső határán a mágneses nyomás egyensúlyt tart az üstökös felől érkező ionoknak a semleges atomokon történő „súrlódásából” fakadó erővel. A határtávolság ( $r_{cs}$ ) ekkor az  $r_{cs} = c \frac{Q^{3/4}}{B_0}$  összefüggés alapján számítható, ahol  $c$  konstans ( $c = 7.08 \times 10^{-18} \text{ km} \cdot \text{nT} \cdot \text{s}^{3/4}$ ),  $Q$  [1/s] az üstökös gáztermelési rátája,  $B_0$  [nT] az üreghatár előtt feltorlódott mágneses tér maximális értéke. A határtávolság kiszámításához így szükség van gáztermelési ráta mérésekre és a  $B_0$  maximum meghatározására. Utóbbi meghatározható a Rosetta mágneses tér méréseiből, valamint az üstökös helyzetéhez extrapolált napszélnyomásadatok segítségével is.

Gáztermelési ráta esetében a Rosetta űrszonda Rosina műszerének lokális méréseit, valamint a lokális mérésekből származtatott globális gáztermelési rátát használtam fel. Lokális gáztermelési rátával számolva az üreghatár távolságát arra az eredményre jutottam, hogy a modellezett határtávolság alig kerül átfedésbe a megtalált üreghaladásokkal. Globális gáztermelési rátát használva azonban az eredmény már jól illeszkedik a korábban talált üreghaladásokhoz. Ennek alapján azt feltételezzük, hogy a változásokat a lokális gáztermelési rátában elnyomja a mágneses erővonalak görbületes feszítő ereje az üreghatáron, ezért az üreghatár kis, lokális nyomás-fluktuációk hatására nem képes kifelé mozogni. Így a továbbiakban a határtávolság kiszámításához a globális gáztermelési rátát használom.

A mágneses tér maximális értékét ( $B_0$ ) egyrészt lokális maximumkereséssel becsültem meg a Rosetta mágneses tér méréseiből. A módszer csupán egy közelítő becslést ad  $B_0$  pillanatnyi értékére, azonban a kiszámolt határtávolság ebben az esetben szinte tökéletesen illeszkedik a korábban talált üregáthaladások helyzetéhez (2015 júniusa után), sőt, segítségével további, eddig ismeretlen üregáthaladásokat is fel tudtam fedezni (1. ábra).

A  $B_0$  maximumot a  $B_0 = \sqrt{p_{sw}\mu_0}$  összefüggés segítségével is megbecsültem, ahol  $p_{sw}$  a napszél dinamikus nyomása. A napszél dinamikus nyomását az üstökös pozíciójához extrapolált WIND, ACE és OMNI napszélnyomás adatsorokkal közelítettem. A három adatsor alkalmazásával kiszámolt határtávolságok egymáshoz hasonló eredményt adnak, azonban összességében pontatlanabban illeszkednek a talált üregáthaladásokra, mint a Rosetta mágneses tér adatokkal számolt határtávolság. Ebben az esetben a Nap felszíni aktivitása befolyásolta előnytelenül az adatsorokat, mely hiba a mérőszondák és az üstökös interplanetáris térbeli helyzetkülönbségéből adódik.



1. ábra: A diamágneses üreghatár távolsága az üstököstől lokális maximumkereséssel, a globális gáztermelési rátával számolva. A fekete vonal a Rosetta útvonala, a piros keresztek az üregáthaladások helyzetét jelölik. A zöld körök olyan új üregáthaladási eseményeket jelölnek, amelyeket a maximumkeresési eljárás segítségével találtam meg.

A határtávolságot egy harmadik eljárással is meghatároztam, az úgynevezett Cravens-moddal, amely azon alapul, hogy a Rosetta által mért mágneses tér értéke ( $B(r)$ ) függ a szonda és az üstökös távolságától ( $r$ ). A Cravens-modell a következőképpen írja fel a kapcsolatot  $B(r)$ ,  $r$  és  $B_0$  között:

$$B(r) = B_0 \sqrt{1 - \frac{r_{cs}^2}{r^2}}$$

Az egyenletből  $B_0$ -t kifejezve és visszahelyettesítve a korábban már ismertetett összefüggésbe, amely szerint  $r_{cs} = c \frac{Q^{3/4}}{B_0}$ , a határtávolság kiszámolható:

$$r_{cs} = \left( \frac{B(r)^2}{c^2 Q^{3/2}} + \frac{1}{r^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Ez a módszer csak az üregeken kívül használható, azaz  $B(r) > 0$  esetén, azonban eredményként az egzakt határtávolságot adja vissza. A Cravens-modellből és a maximumkeresési eljárásból származó megoldást ábrázoltam és összehasonlítottam egymással. Ez alapján elmondható, hogy a két módszer egyrészt jól illeszkedik a talált üregáthaladásokhoz, másrészt

egymáshoz is pontosan illeszkednek azokon a területeken, ahol a szonda a diamágneses üregeken kívül tartózkodott, ami validálja a maximumkeresési módszert.

Az eredmények arra mutatnak, hogy a felgyülemlett napszél mágneses terének hirtelen, gyors változásai alakítják ki a szonda által észlelt rövid, szakadozó üregáthaladásokat, egy valószínűleg globális üreg határán. Ezzel szemben 2015 júniusa előtt a kiszámolt határtávolság egyik módszer esetében sem illeszkedik a talált üregáthaladásokhoz, ami arra utalhat, hogy ebben a korai időszakban valamilyen más, eddig ismeretlen folyamat alakította ki az eseményeket.

A fenti eredményekből *Modelling the size of the very dynamic diamagnetic cavity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko* címen jelent meg a cikkem a *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* folyóiratban.

Az üstökös felől érkező, diamágneses üregben haladó ionizált részecskék az üreghatáron a mágneses térbe érkezve csapdázódnak a tér mentén, pillanatnyilag lelassulnak, ezzel sűrűségük is megemelkedik. Ez jól látszik a Rosetta által mért elektronsűrűség adatokon; általában az üregeken belüli értékekhez képest 2-3-szoros megugrás látszik az elektronsűrűségben az üreghatáron. Az elmúlt félévekben az elektronok sűrűségugrásával korreláló növekedést találtam a mért semleges sűrűség adatsorában is, ahol a semleges sűrűség az üregeken belüli értékekhez képest 10-20%-kal növekedett meg az üreghatáron. A magyarázatunk szerint az üreghatáron felsűrűsödött plazma visszahat a mágneses téren különben akadálytalanul átjutó semleges részecskékre, az ionok és a semleges atomok ütköznek egymással, miáltal a semleges részecskék momentumot veszíthetnek, s feltorlódhatnak. Tehát az ion-semleges súrlódásban a plazma visszahat a semleges összetevőre, a hatás pedig ott lesz a legjelentősebb, ahol az ionizált és a semleges részecskék közti sebességkülönbség a legnagyobb; az üreghatáron. A jelenség további vizsgálatát pontos sebességadatok tennék lehetővé.

Az előző félévben elkezdtem azon dolgozni, hogy hogyan lehet a Rosetta által mélyen az üstökös indukált magnetoszférájában végzett mágneses tér mérésekből következtetni az üstökösöt körülvevő dinamikus napszélnyomásra. A korábban ismertetett  $B_0 = \sqrt{p_{sw}\mu_0}$  összefüggés alapján a  $B_0$  maximum meghatározásával az üstökös körüli napszélnyomás kiszámítható. Ezt a korábbi félévekben a maximumkeresési eljárás segítségével tettem meg, majd az eredményeket földközlelől extrapolált napszélnyomásadatokkal összehasonlítva jó egyezést kaptam.

### *Aktuális félévben elvégzett kutatás*

Az ion-semleges súrlódás mértékét az ionsűrűségek, valamint az ionizált és semleges részecskék egymáshoz viszonyított sebessége befolyásolja. Az utóbbi paraméter tulajdonságait már ismertettem; a semleges áramlás és az ionizált részecskék sebességének különbsége a diamágneses üreghatáron a legnagyobb, ezért az ion-semleges súrlódásnak itt lehet a legerősebb hatása.

Az ionsűrűségeket fotokémiai és transzportfolyamatok határozzák meg. A kémiai élettartamot a Nap UV sugárzása és ütközések miatt a semleges részecskeáramláson bekövetkező ionizációs, valamint rekombinációs folyamatok gyakorisága határozza meg, a transzportfolyamatok jelentőségét pedig a részecskék sebessége, valamint az üstökös magtó való távolság. Az ionok fotokémiaiilag kontrolláltak, ha a kémiai élettartamuk rövidebb, mint a kómabeli transzportfolyamatok időskálája; a transzport dominál, ha az időskálák között fordított összefüggés áll fenn. A Halley üstökös esetében az üstökösötől kb. 1000 km-es távolságban (a Halley üstökös diamágneses üregén belül),  $10^7 \text{ cm}^{-3}$ -es semleges sűrűség mellett az ionok kémiai élettartama  $\sim 10$  s, míg 1 km/s-os semleges sebességekkel számolva a transzport időtartama nagyjából 1000 s. Így nyilvánvaló, hogy ekkora távolságokban fotokémiai egyensúly feltételezhető, az ionok

mennyiségét az ionizációs és rekombinációs folyamatok fogják meghatározni, a transzportfolyamatok pedig a háttérbe szorulnak. Cravens (1987) mind tisztán fotokémiai megfontolások esetében, mind kizárólag transzportot feltételezve azt az eredményt kapta, hogy az ionsűrűségek az üstököstávolsággal éppen fordítottan arányosan ( $n_{\text{ion}} \sim 1/r$ ) csengenek le.

A Csurjumov-Geraszimenkónál a fentiekhez hasonló semleges sűrűségek és hozzájuk kapcsolódó kémiai élettartamok az üstökös kisebb aktivitása miatt a maghoz közelebb található meg, kb. 200-300 km-es távolságban (körülbelül a 67P diamágneses üregének határán). Itt a transzportfolyamatok időskálája kisebb, továbbra is átlagosan 1 km/s-os semleges sebességgel számolva 200-300 s. Ez alapján a 67P környezetében még mindig fotokémiai folyamatok dominálnak, bár a transzport jelentősebbé válik, mint a Halley esetében. Ezzel összhangban, a Rosetta mérései azt mutatják, hogy az ionsűrűségek körülbelül  $1/r$ -es függése ugyanúgy fennáll a 67P-nél (Edberg et al., 2016), mint a Halley üstökös esetében.

Tehát az ionsűrűség mind a két üstökös esetében  $1/r$ -es függést mutat, a sűrűségeket leíró függvények egymástól legfeljebb egy konstans erejéig térnek el. Érdeemes megjegyezni, hogy a diamágneses üreg határán a semleges sűrűségek is hasonló értékeket vesznek fel a két üstökös esetében ( $n_n \approx 5 \cdot 10^6 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ). Ezek alapján mindkét üstökös esetében az ion-semleges súrlódás a domináns kölcsönhatás. Pontos számszerű értéke egy egységnyi nagyságrendű konstanssal eltérhet a különböző üstökösaktivitás miatt; így a Cravens-modell a Rosetta által mért ionsűrűségekkel számolva alkalmazható a 67P üstökös esetében is.

Mint a korábbi félévemben ismertettem, a Rosetta űrszonda mélyen a Csurjumov-Geraszimenko üstökös indukált magnetoszférájában helyezkedett el a misszió idejének jelentős részében, emiatt a Rosetta pozíciójában nincs lehetőség a napszél dinamikus nyomásának mérésére. Így a kutatók nem tudják a napszélnyomásfüggő méréseket és eredményeket korrelálni a pontos napszélnyomás adatokkal, csupán a földközeli szondák extrapolált méréseivel, amik, figyelembe véve a Föld és a 67P nagy távolságát, valamint a Nap heves aktivitását 2014-2016 között, jelentős hibával terheltek.

A fentiek fényében most a maximumkeresési eljáráson kívül a Cravens-modell alapján is megbecsültem a napszél dinamikus nyomását az üstökös körül, 2015 májusától 2016 februárjáig. A két eredményt először is egymással, valamint földközeltől különböző eljárásokkal az üstökös helyzetéhez extrapolált dinamikus napszélnyomás adatokkal vettem össze. A Rosetta mágneses tér mérésekből származtatott napszélnyomás koronakidobódások esetében jelentősen eltér a földközeltől extrapolált adatoktól; itt vagy egyedül a földközeli mérésekben, vagy kizárólag a Rosetta méréseiben jelentkeznek koronakidobódásokra jellemző, hirtelen, erős dinamikus nyomásnövekedések.

Az eltéréseket okozó koronakidobódások időpontjait a SOHO űrszonda adatai alapján, valamint az Enlil 3D MHD modellek alapján kerestem meg, és egyeztettem össze a földközeli szondák és az üstökös körüli napszélnyomásadatok eltéréseivel. Az eltérések oka többnyire jól beazonosítható, egy vagy csupán a Földet, vagy csak az üstököst elérő koronakidobódásban. Ezen események időszakain kívül a két napszélnyomás adatsor jellemzően jó korrelációt mutat egymással.

A mágneses térből származtatott dinamikus nyomás eredményit összevettem a Rosetta által mért elektron- és ionspektrumokkal is, a korreláció jól megfigyelhető. Nagyobb napszélnyomás értékek mellett, mint az várható, az elektronspektrumban mért beütésszámok jelentősen megemelkednek 10 és 1000 eV között, csendesebb időszakokban pedig, főleg 100 eV környékén kiürül a spektrum.

A napszélnyomás kiszámításával kapcsolatos eredményekről cikk készül, melyet a *Journal of Space Weather and Space Climate* újság *Planetary Space Weather* című különszámában tervezek megjelentetni.

## Publikációk

Z. Nemeth, J. Burch, C. Goetz, R. Goldstein, P. Henri, C. Koenders, H. Madanian, K. Mandt, P. Mokashi, I. Richter, A. Timar, and K. Szego 2016, *Charged particle signatures of the diamagnetic cavity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko*, MNRAS, Vol. 462 S415-S421 doi:10.1093/mnras/stw3028

Aniko Timar, Z. Nemeth, K. Szego, M. Dosa, A. Opitz, H. Madanian, C. Goetz, I. Richter 2017, *Modelling the size of the very dynamic diamagnetic cavity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko*, MNRAS, Volume 469, Issue Suppl\_2, Pages S723–S730, <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2628>

Aniko Timar, Z. Nemeth, K. Szego, M. Dosa, A. Opitz, H. Madanian, C. Goetz, *Estimating the solar wind pressure at comet 67P from Rosetta magnetic field measurements*, Journal of Space Weather and Space Climate, in prep (a különszamba történő leadás határideje 2018 július 15)

## Tanulmányi tevékenység az aktuális féléveben

- Rádiócsillagászat II (FIZ/2/065E)

## Konferenciák a képzés alatt

- Magyar-orsz űrkutatási szeminárium, 2016 december 1-2, Budapest
- Magyar Űrkutatási Fórum, 2017 április 5-7, Sopron
- EGU General Assembly, 2017 április 23-28, Bécs
  - Poszter bemutatása „*Modelling the size of the very dynamic diamagnetic cavity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*” címen
- European Planetary Science Congress, 2017 szeptember 17-22, Riga
  - Poszter bemutatása “*Estimating the solar wind pressure at comet 67P from Rosetta magnetic field measurements*” címen
- Planetary Space Weather Workshop, IRAP, 2017 október 9-11, Toulouse
  - Előadás “*Diamagnetic cavities at Comet 67P and a proxy for the solar wind dynamic pressure*” címen
- 14<sup>th</sup> European Space Weather Week, 2017 november 27-december 1, Oostende
  - Poszter bemutatása “*Planetary and cometary space weather predictions from observations near and far*” címen

## Hivatkozások:

Cravens T. E. Physics of the cometary contact surface, In ESA Proceedings of the 20th ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet. V. 1, Plasma and Gas, 241-246, 1986

Cravens T. E. Theory and observations of cometary ionospheres, Adv. Space Res., 7, 12, 147-158, 1987

Edberg N. J. T et al., Spatial distribution of low-energy plasma around comet 67P/CG from Rosetta measurements, Geophys. Res. Lett., 42, 4263–4269, 2015