

# A földi magnetoszféra egy év hosszú magnetohidrodinamikai szimulációjának összehasonlítása Cluster mérésekkel

FACSKÓ Gábor<sup>\*,1,2</sup>, SIBECK David<sup>3</sup>, HONKONEN Ilja<sup>4</sup>, BÓR József<sup>5</sup>,  
FARINAS PEREZ German<sup>6</sup>, TIMÁR Anikó<sup>1</sup>, SHPRITS Yuri<sup>7,8</sup>,  
DEGENER Laura<sup>4</sup>, TANSKANEN Eija<sup>9,10</sup>, PEITSO Pyry<sup>10</sup>,  
ANEKALLU Chandrasekhar Reddy<sup>11</sup>, SZALAI Sándor<sup>5,12</sup>, KIS Árpád<sup>5</sup>,  
WESZTERGOM Viktor<sup>5</sup>, MADÁR Ákos<sup>1,13</sup>, BIRÓ Nikolett<sup>1,13</sup>,  
KOBÁN Gergely<sup>1,13</sup>, ILLYÉS András<sup>1</sup>, LKHAGVADORJ Munkhjargal<sup>1,14</sup>

<sup>1</sup>Wigner Fizikai Kutatóközpont, Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály, Budapest

<sup>2</sup>Milton Friedman Egyetem, Informatika Tanszék, Budapest

<sup>3</sup>NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA

<sup>4</sup>Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland

<sup>5</sup>Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

<sup>6</sup>University of Miami, Electrical and Computer Engineering Department, Miami, Florida, USA

<sup>7</sup>Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

<sup>8</sup>Institute for Physics and Astronomy, University of Potsdam, Potsdam, Germany

<sup>9</sup>Sodankylä Geophysical Observatory, University of Oulu, Sodankylä, Finland

<sup>10</sup>Department of Electronics and Nanoengineering, Aalto University, Espoo, Finland

<sup>11</sup>UCL Department of Space & Climate Physics, Mullard Space Science Laboratory, Dorking, UK

<sup>12</sup>Miskolci Egyetem, Geofizika Tanszék, Miskolc

<sup>13</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizika Doktori Iskola, Budapest

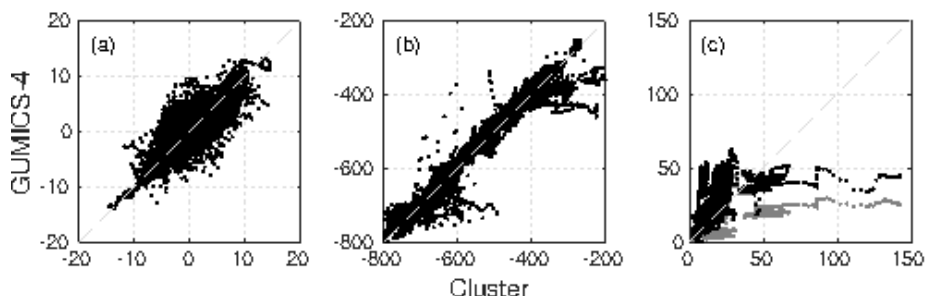
<sup>14</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Budapest

## Kivonat

Korábban a 2002. január 29. és 2003. február 2. közötti időszak napszéladatait felhasználva egy év hosszúságú időszakra globális magnetohidrodinamikai szimulációt készítettünk a GUMICS-4 kóddal. Ebben a tanulmányban összehasonlítjuk a modellt a földi magnetoszféra és a napszél kölcsönhatásának a tekintetében a Cluster SC3 méréseivel. A szimulációból kapott megfelelő adatokat hasonlítjuk össze a magnetométer által észlelt bolygóközi mágneses tér észak-déli komponensével, az ion plazma műszerrel mért Nap-Föld egyenessel párhuzamos napszélsebességgel és az ion plazma sűrűséggel, továbbá az elektromos teret mérő műszer által szolgáltatott szonda potenciálból számolt elektron sűrűséggel. Meghatározzuk a lökéshullám, a magnetopauza és a semleges lepel koordinátáit az űrszonda méréseiből és a szimulációkból, majd összehasonlítjuk a helyzetüket. Olyan időszakaszokat választunk a napszélben, a mágneses burokból és a magnetoszférában, ahol a fenti műszerek jó minőségű adatokat biztosítanak és ahol modell szerint is abban a régióban tartózkodott a szonda, ahol a valóságban. A GUMICS-4 kód eredményei jól egyeznek a mérésekkel a napszélben, de a pontosság csökken a mágneses burokból. A magnetoszférában a szimuláció eredményei nem valósághűek. A lökéshullám helyzetét jól adja vissza a modell, azonban a magnetopauza helyzete kevésbé pontos. A semleges lepel helyzete annak köszönhetően valósághű, hogy a bolygóközi mágneses tér  $B_y$  komponense kicsi volt ebben az időszokban.

---

\*Levelező szerző: Facskó Gábor (facsko.gabor@wigner.hu, gabor.i.facsko@gmail.com)



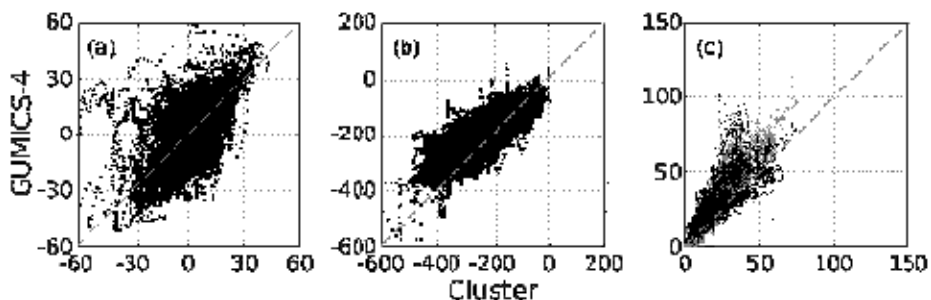
1. ábra. A Cluster SC3 mérések és a GUMICS–4 szimulációk összehasonlító ábrái az összes vizsgált intervallumra a napszélben. A szaggatott vonal az  $y=x$  függvény. (a) A mágneses tér Z komponense GSE koordináta-rendszerben. (b) A napszél sebesség X komponense GSE koordináta-rendszerben. (c) A CIS HIA műszer által mért ion plazma (szürke) és az űrhajó potenciálból számolt elektron sűrűség (fekete).

## Bevezetés

Az egyik legköltséghatékonyabb módszer a napszél és a bolygók magnetoszférájának a tanulmányozásához és a Föld-közelí űr tulajdonságainak előjelzéséhez a komplex rendszer magnetohidrodinamikai (MHD) modellezése. Korábban több ilyen kódot fejlesztettek, amelyeket a Föld-közelí űr viszonyainak előrejelzésére használtak [5]. A szimulációk eredményeinek az összehasonlítása űrszondás, vagy földi mérésekkel létfontosságú a fejlesztett kódok tulajdonságainak megértése szempontjából. Korábban egy év hosszú MHD szimulációt futtattunk le a GUMICS–4 kóddal 2002. január 29. és 2003. február 2. közötti OMNI napszél adatokat használva bemenetként [4]. Ezt hasonlítjuk össze az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) Cluster-II missziójának méréseivel, amelyet 2000-ben bocsátottak fel a Föld közeli űr tanulmányozására [3]. A mágneses mezőt a FluxGate Magnetometer (FGM) [1], a plazma ion adatokat a Cluster Ion Spectrometry (CIS) műszer Hot Ion Analyser (HIA) alműszere méri [10]. A CIS HIA műszert a Cluster fedélzetén található Waves of High frequency Sounder for Probing the Electron density by Relaxation (WHISPER) elektrosztatikus hullámműszerrel kalibrálják [11, 2]. Az Electric Field and Wave Experiment (EFW) műszer [7] által szolgáltatott űrhajó potenciál segítségével határozzuk meg a elektronok sűrűségét az  $n_{EFW} = 200(V_{sc})^{-1.85}$  empirikus sűrűségformula segítségével, ahol  $n_{EFW}$  a számolt sűrűség és  $V_{sc}$  a Cluster EFW űrhajó potenciál [11, 12]. Ez a cikk a Cluster SC3 méréseit közvetlenül veti össze az egy év hosszú GUMICS–4 szimulációkkal a napszélben, a mágneses burookban és a magnetoszférában a referencia szonda pályája mentén [4]. A vizsgált paraméterek a mágneses tér északi/déli komponense GSE koordinátákban ( $B_z$ ), a napszél sebesség GSE Nap-Föld egyenessel párhuzamos komponense ( $V_x$ ) és a napszél ion plazma ( $n_{CIS}$ ) és számolt elektron sűrűsége ( $n_{EFW}$ ). Összehasonlítottuk továbbá a jósolt és megfigyelt helyzetét a lökeshullámnak, a magnetopauzának és a semleges lepelnek. Ezeket a paramétereket azért választottuk, mert  $B_z$  kontrollálja a napszél-magnetoszféra kölcsönhatást, a  $V_x$  a napszél fő sebesség komponense és az  $n_{CIS}$  ion plazma momentumot a legegyszerűbb kiszámolni, továbbá több műszer is képes mérni ezt a mennyiséget.

## Mérések és szimulációk összehasonlítása

A GUMICS–4 szimulációból a Cluster SC3 pályája mentén elmentett paramétereket és a szonda mágneses, napszél sebesség és sűrűség méréseit hasonlítjuk össze a napszélben,

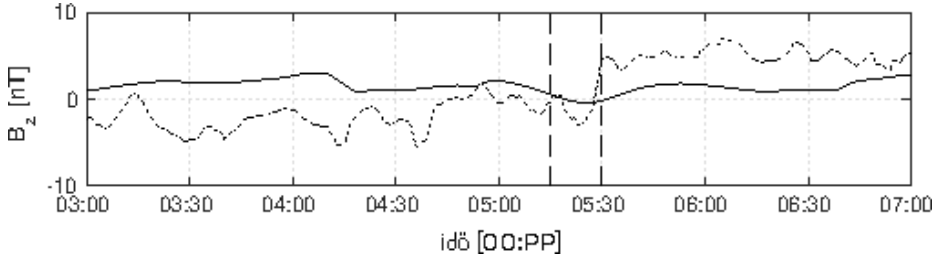


2. ábra. A Cluster SC3 mérések és a GUMICS–4 szimulációk összehasonlító ábrái az összes vizsgált intervallumra a mágneses burokból. A szaggatott vonal az  $y=x$  függvény. (a) A mágneses tér Z komponense GSE koordináta-rendszerben. (b) A napszél sebesség X komponense GSE koordináta-rendszerben. (c) A CIS HIA műszer által mért (szürke) és az űrhajó potenciálból számolt sűrűség (fekete).

a mágneses burokból és magnetoszférában keresztkorrelációs számításokkal. A szimulált adatok időfelbontása öt perc [4]. Az analízishez a különböző időfelbontású adatsorok összehasonlíthatósága érdekében egy perces felbontásra interpoláljuk az eredményeket. Az adathiányokat lineáris interpolációval töltöttük fel, illetve extrapolációval, ha az adathiány a kiválasztott intervallum elején, vagy végén található. A négy másodperces felbontású mágneses tér méréseket öt perces felbontásúra átlagoltuk, majd egy perces felbontásúra interpoláltuk, hogy el tudjuk végezni a korrelációs számításokat. A kiválasztott intervallumokban a paraméterek nem változnak sokat, továbbá semmilyen határfelületet nem keresztesz sem a Cluster SC3, sem a virtuális szonda a szimulációban.

Az OMNI adatbázis bolygóközi mágneses mező, sebesség, sűrűség és hőmérséklet adatait adtuk meg a szimuláció bementi adatainak [4]. Összesen csak 17 megfelelő intervallumot használunk fel a tanulmányban [5]. A  $B_z$ ,  $V_x$  és  $n_{EFW}$  nagyon jól egyezik a napszélben a szimulációkkal (1a, 1b, 1c ábra, fekete). Az  $n_{CIS}$  nem egyezik olyan jól (1c. ábra, szürke), ami várható volt, mivel a CIS műszernek sok üzemmódja van a plazma paramétereinek a mérésére és folyamatos kalibrációra van szüksége, ezért a mindenki által hozzáférhető adatai sokszor pontatlanok. A napszélben  $V_x$ ,  $n_{CIS}$  és  $n_{EFW}$  paraméterek korrelációja a megegyező GUMICS szimulációs paraméterekkel nagyobb 0.9-nél, azaz kitűnő [5]. A  $B_z$  korrelációja nagyobb 0.8-nál, vagyis nagyon jó [5]. Az időeltolódás kb. öt perc a mágneses térre és a CIS adatokra [5]. A GUMICS–4 szimulációs terének upstream határa  $32 R_{Föld}$ -nál van [8], a Föld lökéshullámának az orra pedig kb.  $20 R_{Föld}$ -nél. Ha napszél sebessége 400 km/s, akkor ez a távolság kevesebb, mint öt perc késést okoz, amelynek nem lenne szabad látszódnia a keresztkorreláció eredményében. Az EFW származtatott adataira az időeltolódás kevésbé kifejezett [5].

A Cluster SC3 minden keringés során elmerül a mágneses burokból 2002. decembere és a 2003. májusa között, ennél fogva 74 intervallumot sikerült kiválasztani [5]. A mágneses mező, a napszélsebesség és sűrűségek összehasonlító ábráin a paraméterek jól egyeznek, de nagyobb variációval, mint a napszélben (2a, 2b, 2c ábra). A szimuláció és az észlelések jól egyeznek a mágneses mező esetén [5] és nagyon jól egyeznek a ion plazma momentumok és a származtatott sűrűség esetén [5]. Míg a paraméterek korreláltak, a szórás nagyobb. Ennek oka az lehet, hogy a mágneses burok erősen turbulens, amely megmagyarázza, hogy a  $B_z$  mágneses mező nagyobb változékonyságát a 2a ábrán. A napszélbeli  $V_x$ ,  $n_{CIS}$  és  $n_{EFW}$  jobban egyezik a mágneses mező komponensénél (2b, 2c ábra), azonban a korreláció még mindig jó [5]. A többi paraméter korrelációja nagyobb (0.9), de az időeltolódás rosszabbnak tűnik [5]. Ennek oka az, hogy az idősorok igen simák a mág-



3. ábra. A mágneses tér  $B_z$  komponense a GUMICS–4 szimulációk eredményeiben (folytonos vonal) és a Cluster SC3 méréseiben (szaggatott vonal) 2002. szeptember 28. 03:00-tól 07:00-ig (UT) GSE koordinátákban a geomágneses csóvában. 05:15-től 05:30-ig a két függőleges szaggatott vonal között a Cluster SC3 és a virtuális szonda többször keresztezi a semleges leplet.

neses burokbán, így nincs elég pont, hogy egy éles csúcsot alkosson a korrelációs függvény. A maximum és a minimum közötti különbség kicsi, a számítás hibájával összehasonlítva. A maximum, az időeltolódás bárhol lehet és a korreláció vs. időeltolódás függvény gyakran nem szimmetrikus, továbbá nem csak egy lokális maximuma van. Ennélfogva a korreláció számítás nagyobb időeltolódásokat eredményez az ionplazma paraméterekben, mint a  $n_{EFW}$ -ben [5]. A GUMICS–4 kevésbé pontos a mágneses burokbán, mint a napszélben, továbbá a modellezett mágneses mező jobban egyezik a mérésekkel, mint a modellezett plazma paraméterek. A számított EFW sűrűség ( $n_{EFW}$ ) jobban egyezik a szimulációkkal a CIS HIA sűrűségénél ( $n_{CIS}$ ) [5].

132 intervallumot sikerült találni, amikor a Cluster SC3 és a virtuális szonda is magnetoszférában tartózkodik [5]. A magnetoszférában egyetlen kiválasztott paraméter sem egyezik a mérésekben és a szimulációkban. Pl. a napszél sebessége nem csökken zérusra a magnetoszférában, ehelyett a napszél behatol a geomágneses csóvába. A napszélben a CIS HIA által mért és a EFW űrszonda potenciálból származtatott sűrűségek növekednek, ahogy a Földhöz közelítünk (plazmaszféra), míg a GUMICS–4 sűrűség egyszerűen csak alacsony. A GUMICS–4 egy dipólus modellt használ a Föld mágneses mezejének a leírására [8]. A modell mágneses tér levonása után a Cluster SC3 mágneses tér mérései és a szimulációk továbbra is igen kicsi korrelációt mutatnak az időeltolódás is irreális. Ennélfogva a dipólus modell elégtelen leírása a belső magnetoszféra mágneses mezejének. Ezen felül sem a plazma momentumok, sem a  $n_{EFW}$  nem illeszkedik. Az egy folyadékos ideális MHD nem írja le jól a belső magnetoszférát, ennélfogva a szimulációbeli  $V_x$  és az  $n$  nem egyezik jól a Cluster SC3 által mért adatokkal [5].

77 intervallumot sikerült kiválasztani, amikor a Cluster SC3 a földi lökéshullámon egyszer, vagy többször áthalad [5]. A virtuális szonda lökéshullám átmenetei lassabbak és simábbak, ezen felül a GUMICS–4 nem mutatja a többszörös keresztezéseket. A kód lassan reagál a hirtelen változásokra a napszélben. A mágneses mező jobban illeszkedik a mérésekhez, mint a plazma momentumok. A CIS HIA és az EFW sűrűség ugrások eltolódtak a szimulációkhoz képest. A sűrűség és sebesség a szimulációkban kevésbé pontos, mint a mágneses mező [5]. 54 intervallumot sikerült kiválasztani magnetopauza áthaladások körül [5]. A magnetopauza helyzete jól meghatározott a Cluster SC3 mérésekben, de nagyon nehéz azonosítani a szimulációkban. Az esetek többségében (92 %) nem látható a magnetopauza a szimulációkban, továbbá egyáltalán nem látható  $V_x$ -ben és  $n$ -ben. Ez a megfigyelés független a bolygóközi mágneses mező irányától. Sokszor, amikor az átmenet a mérésekben és a szimulációkban is látható, az esemény térben és időben eltolódva látható a szimulációkban és a mérésekben. A magnetopauza helyzetét a modell kevésbé pontosan határozza meg, mint a lökéshullámét. Ez az eltérés a pozíciókban jól egyezik

a korábbi eredményekkel [6, 4], amikor szintetikus GUMICS futtatásokat hasonlítottak össze empirikus magnetopauza formulákkal [6] és egy év hosszú OMNI adatokat használó GUMICS szimuláció [4] megerősítette ezt a következtetést [5]. Kilenc semleges lepel keresztezést sikerült találni a Cluster SC3 adataiban [5]. Őt esetben a GUMICS–4 szintén  $B_z$  előjelváltozást mutat a simított görbékben, azaz a semleges lepel látható mind a szimulációban, mind a mérésekben (3. ábra; folytonos vonal). Ez kiemelkedő eredmény, mert a GUMICS–4 szimulációban a geomágneses csóva jelentősen rövidebb, mint a valóságban [6, 4]; továbbá a napszél általában az MHD szimulációkban behatol a csóvába [9]. Azonban ebben az esetben a bolygóközi térnek nincsen nagy  $B_y$  komponense és korábbi munkákból tudjuk, hogy ebben az esetben a GUMICS geomágneses csóvája (vagy éjszakai magnetoszférája) normális hosszúságú [4, 5]. A GUMICS kód képes visszaadni a lökeshullám átmeneteket. A magnetopauza és a semleges lepel esetén a helyzet sokkal komplexebb.

## Összegzés

Korábban készített egy év hosszú GUMICS–4 szimulációk eredményét hasonlítottuk össze a Cluster SC3 szonda mágneses mező, napszél sebesség és sűrűség méréseivel a műhold pályája mentén. Olyan intervallumokat választunk ki, amikor a műhold és a virtuális szonda egyszerre tartózkodik a napszélben, a mágneses burookban és a magnetoszférában, majd keresztkorrelációt számolunk ezek között az idősorok között. Lökeshullám, magnetopauza és a semleges lepel áthaladásokat vizsgálunk és összehasonlítjuk az észlelhetőségüket, továbbá az egymáshoz viszonyított helyzetüket. A vizsgálat a következő eredménnyel zárult:

1. A napszélben a  $B_z$  korrelációja nagyobb, mint 0.8. A  $V_x$ , az  $n_{EFW}$  és az  $n_{CIS}$  korrelációja pedig nagyobb 0.9-nál. A  $B_z$ , a  $V_x$ , és a  $n_{EFW}$  nagyon jól egyezik, továbbá a  $n_{CIS}$  egyezése is jó.
2. A mágneses burookban a  $B_z$  korrelációs együtthatója nagyobb, mint 0.6. A  $V_x$ , az  $n_{EFW}$  és az  $n_{CIS}$  korrelációja pedig nagyobb 0.9-nál. A mágneses mező komponens, az ion plazma momentumok és a számított empirikus sűrűség egyezése egy kicsit gyengébb, mint a napszélben. A mágneses burookban a  $V_x$ , az  $n_{EFW}$  és az  $n_{CIS}$  jobban illeszkedik, mint a  $B_z$  komponens. Ez az egyezés még mindig nagyon jó. A nagyobb eltérés oka a lelassult, felhevült és turbulens napszél a lökeshullám után, amely látszik a Cluster SC3 méréseiben, de a szimulációkban nem.
3. Sem a nappali, sem az éjszakai oldali magnetoszférában nem képes a GUMICS–4 realisztikus eredményeket produkálni, azaz a szimulációk kimenete és az űrszondás mérések még csak nem is hasonlítanak egymásra ebben a régióban. Ennek az az oka, hogy a GUMICS–4-ben nincsen belső magnetoszféra modell.
4. Ebben a tanulmányban a lökeshullám és a semleges lepel pozíciója jól egyezik a szimulációkban és a Cluster SC3 mágneses mező, ion plazma momentum és származtatott elektron sűrűség méréseiben. A magnetopauza helyzete nem illeszkedik ennyire jól.

A GUMICS–4-nek tudományos és stratégiai jelentősége van az európai űridőjárás előrejelző és tudományos közössége számára. Ez a Finn Meteorológiai Intézetben fejlesztett kód a legfejlettebb, legjobban tesztelt és a legszélesebb körben használt eszköz a Föld kozmikus környezetének modellezésére Európában. A szimulációk pontosságának növelésére a jelenlegi kódhoz az ionoszférához és a magnetohidrodinamikai tartományhoz egyaránt csatolt belső magnetoszféra modellt kellene hozzáadni.

**Köszönetnyilvánítás** Az OMNI adatok a GSFC/SPDF OMNIWeb NASA adatbázisból (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) származnak. A szerzők köszönik az FGM (PI: C. Carr), a CIS (PI: I. Dandouras), a WHISPER (PI: J.-L. Rauch) és az EFW (PI: M. Andre) műszercsapatoknak, továbbá a Cluster Science Archive adatbázisnak az FGM mágneses mező, a CIS HIA ion plazma és a WHISPER elektron sűrűség méréseket. Az adatok elemzését részben a QSAS tudományos elemző rendszerrel végeztük, amelyet a United Kingdom Cluster Science Centre (Imperial College London and Queen Mary, University of London) fejlesztett a Science and Technology Facilities Council (STFC) támogatásával. TANSKANEN Eija nagyon köszöni a Finn Akadémia anyagi támogatását a ReSoLVE Centre of Excellence (No. 272157) projekthez. A szerzők rendkívül hálásak JANHUNEN Pekának a GUMICS-4 kód kifejlesztésért; továbbá, PALMROTH Minnának, OPITZ Andreának, KALMÁR Jánosnak és VÖRÖS Zoltánnak a hasznos tanácsokért. FACS-KÓ Gábor munkáját a Van Allen Probes misszió, az Amerikai Geofizikai Unió, és az ELKH Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron támogatta. LKHAGVADORJ Munkhjargal munkáját a Stipendium Hungaricum ösztöndíj támogatta. Ezt a tanulmányt részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) FK128548 támogatása finanszírozta.

## Hivatkozások

- [1] Balogh, A., Carr, C. M., Acuña, M. H., et al. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1207
- [2] Blagau, A., Dandouras, I., Barthe, A., et al. 2014, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 3, 49
- [3] Escoubet, C. P., Fehringer, M., & Goldstein, M. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1197
- [4] Facskó, G., Honkonen, I., Živković, T., et al. 2016, *Space Weather*, 14, 351
- [5] Facskó, G., Sibeck, D. G., Honkonen, I., et al. 2021, *Space Weather*
- [6] Gordeev, E., Facskó, G., Sergeev, V., et al. 2013, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 118, 3138
- [7] Gustafsson, G., André, M., Carozzi, T., et al. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1219
- [8] Janhunen, P., Palmroth, M., Laitinen, T., et al. 2012, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 80, 48
- [9] Kallio, E. & Facskó, G. 2015, *Planetary and Space Science*, 115, 69
- [10] Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J. M., et al. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1303
- [11] Trotignon, J. G., Décréau, P. M. E., Rauch, J. L., et al. 2010, *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 11, 185
- [12] Trotignon, J.-G., Vallières, & the WHISPER team. 2011, Calibration Report of the WHISPER Measurements in the Cluster Active Archive (CAA), Tech. rep., LPC2E CNRS, caa-est-cr-who