

A BELSŐ HELIOSZFÉRA KUTATÁSA

Opitz Andrea – Wigner FK

Madár Ákos – Wigner FK és ELTE Fizika Doktori Iskola

A Nap közvetlen környezetének tanulmányozása, a napszél kialakulásának kutatása és a belső bolygók űridőjárásának vizsgálata rendkívül aktuális témák az utóbbi évtizedek űrszondás adatbőségének köszönhetően. A belső helioszféra plazmafolyamatainak tanulmányozása a napszél által kitöltött tér azon részének kutatása, amely a Naptól egészen a Mars pályájáig terjed. A Naprendszer ezen tartományának vizsgálata rendkívül változatos jelenségek tanulmányozását teszi lehetővé: a fiatal napszél mellett annak különböző bolygókkal való kölcsönhatását kutathatjuk. A számos űrszondával végzett megfigyelések és a rájuk épülő modellek segítik a plazmafolyamatok megértését.

Csillagunk titkai

A belső helioszféra működésének megértéséhez néhány szót kell ejtenünk a Nap szerkezetéről. Központi csillagunk belsejét jó közelítéssel koncentrikus gömbhéjakból állónak feltételezhetjük. A Nap sugárának 20%-áig ($0,2 R_{\odot}$) terjedő legbelső régió a *mag*, amely a teljes égitest tömegének körülbelül 34%-át, míg térfogatának csupán 1%-át teszi ki. A mag 15 millió K hőmérsékletű, ami a nagy nyomással együtt lehetővé teszi a hidrogénatommagok héliummá történő fúzióját. Ezt a magot a *radiatív* vagy *sugárzási zóna* veszi körül ($0,2-0,7 R_{\odot}$). Itt a magban keletkezett nagy energiájú fotonok a töltött részecskékkel való rugalmatlan ütközéseken keresztül veszítenek energiájukból, az energiaszállítás domináns módja a radiatív diffúzió. A sugárzás számára a radiatív zóna rendkívül átlátszatlan, egy foton karakterisztikus tartózkodási ideje nagyságrendileg 100 000 év! A radiatív zónán kívül helyezkedik el a *konvektív zóna*. Ez a

A szerzők hálásak az űrszondákat és műszereiket üzemeltető csoportoknak a kutatásaikhoz használt mérési adatok szolgáltatásáért: Parker Solar Probe, Solar Orbiter, STEREO, ACE, BepiColombo, VEX és MEX. Kutatásainkat az NKFIH/OTKA FK128548 számú, *Belső helioszféra* című projekt támogatta.



Opitz Andrea űrkutató és csillagász, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. Svájcban doktorált, Franciaországban volt posztdoktori ösztöndíjas, majd utána az ESTEC-ben, az Európai Űrügynökség (ESA) hollandiai központjában dolgozott. A napszélstruktúrákat kutatja, valamint azok hatását vizsgálja a Naprendszer különböző égitestjeire.

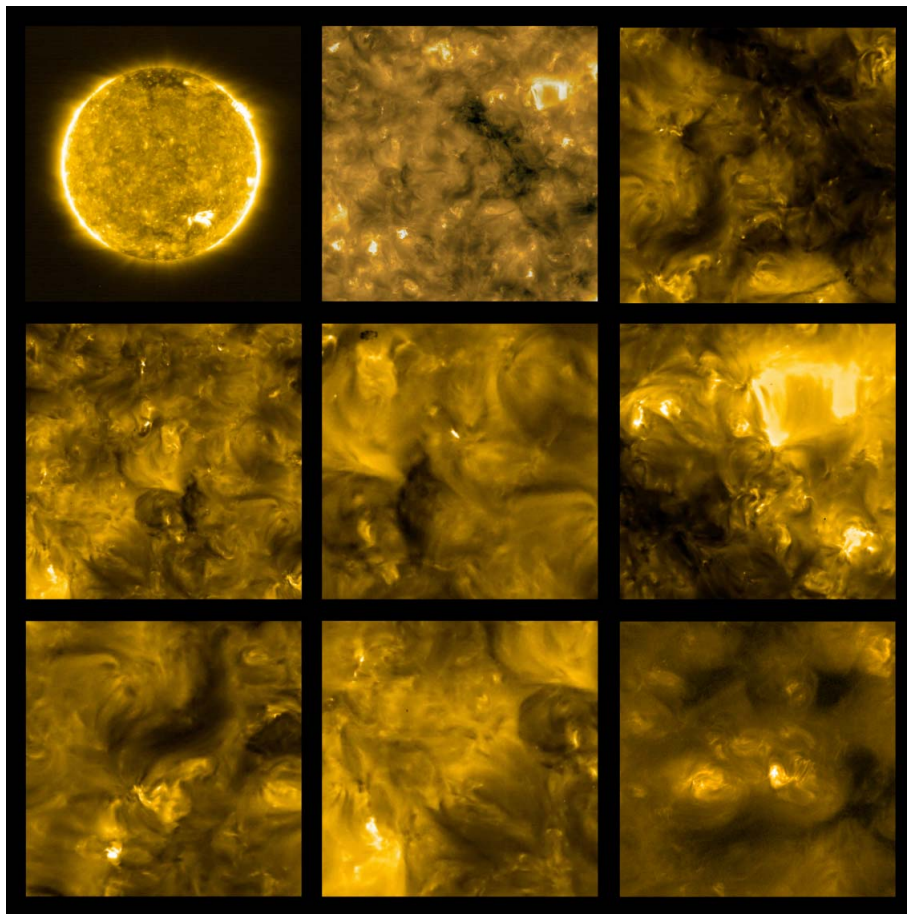
réteg a konvekcióra nézve instabil, a radiatív energia-transzfer helyett az anyagáramlás lesz az energia szállításának domináns módja. A radiatív és a konvekciós zóna közötti tartomány a vékony *tachoklína*. A konvekciós zóna felett helyezkedik el a *fotoszféra*, amely a definíció szerint a Nap azon rétege, ahonnan a látható fény érkezik. Ennek vastagsága néhány száz kilométer, felső határán található a Nap hőmérsékleti minimuma (4200 K). A fotoszféra felett található a *kromoszféra*, körülbelül 500–3000 km magasságig. A hőmérséklet 25 000 K-ig nő a fotoszférától távolodva, tehát itt hőmérsékleti inverzió lép fel. A hőmérséklet növekedése kifelé folytatódik, így a Nap külső „légköre”, a *korona* hőmérséklete már meghaladhatja az 1 millió K-t is.

A Nap számos megfejtésre váró talánya közül is kiemelkedik az a kérdés, hogy miért olyan magas a napkorona hőmérséklete. A napszél folyamatos „szökésének” oka éppen ez, hiszen a magas hőmérséklet-hez tartozó nagy részecskesebbségek elegendők ahhoz, hogy legyőzzék a Nap gravitációs hatását. Ez a hőmérsékleti anomália már csaknem egy évszázada foglalkoztatja a kutatókat, ám megválaszolása továbbra is várat magára. Bár az igen valószínű, hogy a korona fűtéséhez az energiát a Nap mágneses tere biztosítja, viszont a pontos mechanizmus (esetleg mechanizmusok), amelynek során ez az energia a részecskék kinetikus energiájává alakul, egyelőre tisztázatlan.

Hasonlóan fontos lenne megérteni, hogyan is működik a Nap „dinamója”, amely központi csillagunk mágneses teréért, így közvetetten a napszél keletkezéséért és az űridőjárást befolyásoló jelenségek kialakulásáért is felelős. Az eddig is tudvalevő volt, hogy a nagyskálás mágneses mező létrejöttét a konvektív zónában, illetve annak alsó határán, a tachoklínában létrejövő igen bonyolult plazmaáramlások okozzák. Az viszont jelenleg is nyitott kérdés, hogy emellett milyen arányban lehetnek jelen kisebb, lokális dinamóeffektusok. Szintén kérdéses még,



Madár Ákos űrkutató-geofizikus, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos segédmunkatársa, illetve az ELTE Fizikai Doktori iskola végzős doktorandusza. A napközeli térséget kutatja űrszondás mérések alapján, a fiatal napszélbeli struktúrák és a plazmaturbulencia érdekli.



1. ábra. Az első perihélium alatt az Extreme-Ultraviolet Imager műszer által 174 Å hullámhosszon készített felvételek a Nap felszínéről és a tábornüzekekről (Forrás: ESA) [22].

hogy a sarkok felé miként történik a mágneses fluxus transzportja.

Ezekre a kérdésekre is keresi a választ a napfizika jelenlegi két „szupersztárja”: a NASA Parker Solar Probe [1] és az ESA Solar Orbiter [2] missziói. Az előbbi űrszonda minden eddiginél közelebb merészkedik a Naphoz, csupán 9 napsugárnyi távolságra megközelítve azt (összehasonlításképp a Föld Naptól való távolsága hozzávetőlegesen $215 R_{\odot}$). Az utóbbi napszondának pedig bár távolabbi lesz a napközelsége (körülbelül $70 R_{\odot}$), a pályája a küldetés végére több mint 34° -ot zár majd be a Nap egyenlítői síkjával. Ez lehetővé fogja tenni, hogy a belső helioszféra eddig felfedezetlen vidékein, magasabb szélességeken is végezzünk *in situ* napszélplazma- és mágnesestér-méréseket, valamint optikai megfigyeléseket.

Mind a Parker Solar Probe, mind a Solar Orbiter végez *in situ* megfigyeléseket a napszél tulajdonságainak feltérképezésére, ezek a mérések jellemzően a plazma különböző paramétereinek (sebesség, sűrűség és hőmérséklet), illetve a mágneses tér meghatározására irányulnak. A Solar Orbiter küldetésben a Wigner Fizikai Kutatóközpont Űrfizikai és Űrtechnikai Osztálya is aktívan részt vesz, a flux-gate magnetométere építéséből mérnökeink is kivették a részüket [3].

Fontos különbség a Parker-napszondától, hogy a Solar Orbiter az *in situ* méréseken felül a Nap felszínét 6 távérzékelési műszerrel is megfigyeli az elektromágneses spektrum széles skáláján (láttható, ultraibolya- és röntgen-tartományban). Így a két küldetés remekül kiegészíti egymást, tudományos céljaik igen hasonlóak. A kutatók a fent vázolt nap- és helioszférafizikai kérdésekre keresnek válaszokat.

A Solar Orbiter misszió első izgalmas eredményét az első napközelsége idején szállította a tudományos közösségnek. Jelentős mennyiségű tábornüzeke elnevezett felfényesedést fedezett fel a Nap kromoszférájának felső részében, illetve a kromoszféra és a korona közt elhelyezkedő átmeneti zónában. Ezek a felfényesedések a nyugodt napfelszínen az extrém ultraibolya (EUV) tartományban láthatók (1. ábra). Létezésük nem teljesen új

fejlemény, de olyan mérettartományban vannak, hogy a korábbi kisebb felbontású mérési adatokban könnyen el lehetett siklani felettük, ami a Solar Orbiter szonda Extreme-Ultraviolet Imager (EUI) műszerénél már nem jelent problémát. A jelenlegi hipotézis az, hogy ezek úgynevezett pikoflerek, amelyek a klasszikus flerekhez képest mintegy 12 nagyságrenddel kisebb energiatartalommal járnak, viszont jóval több van belőlük, mint a nagyobb energiás társaikból. Nagyobb rokonaikhoz hasonlóan bennük is mágneses energia szabadul fel, amelynek egy része elektromágneses hullámokká, másik része pedig a plazma részecskéinek energiájává alakul. A Solar Orbiter szonda által szolgáltatott adatokban a meglepetést az okozta, hogy sokkal több ilyen eseményt találtak az EUV-felvételeken, mint ahogy a kutatók várták. A másik érdekesség annak kimutatása, hogy ezek az események a kromoszféra mágneses hálózatának mentén lejelölhetők fel [4].

A fiatal napszél

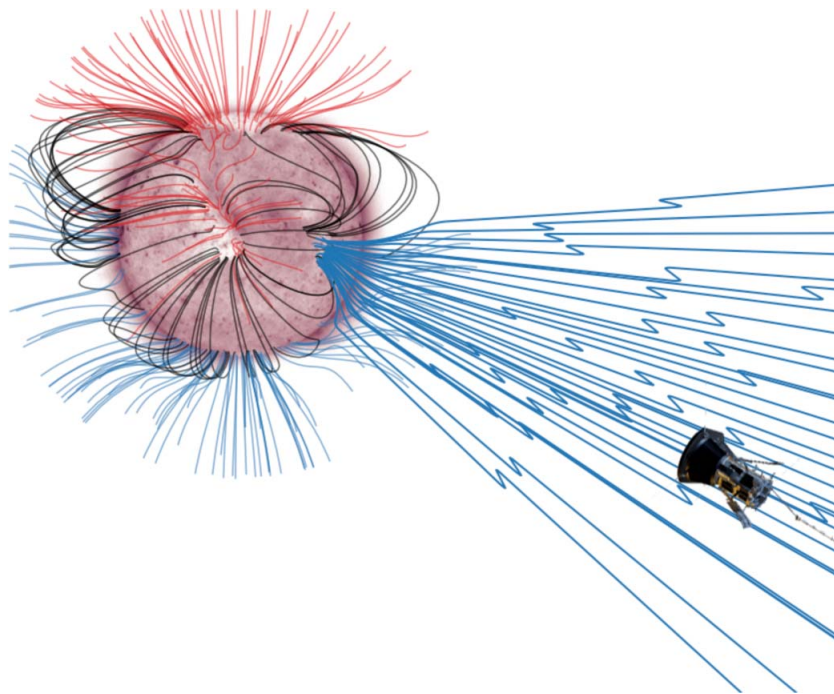
A Parker-szonda új eredményei közül a legjelentősebb, hogy belépett a Nap koronájába és ott *in situ* méréseket végzett. A korona határát a kritikus Alfvén-

ponttal szokták jellemezni: ez az a pont (illetve a napkorona esetében bonyolult felület), amelyen belül a plazma a mágneses mező által dominált. Úgy is fogalmazhatunk, hogy ezen a felületen belül a mágneses mező erővonalai határozzák meg a plazma mozgását, míg ezen kívül a plazma „sodorja” magával a mágneses erővonalakat. Az első ilyen regisztrált áthaladásokra 2021 tavaszán került sor, ekkor a Parker-űrszonda három alkalommal is a korona határán belül tartózkodott. Figyelemre méltó, hogy az adatok tanúsága szerint a korona és az interplanetáris napszél közötti átmenet éles, a koronába lépve a plazmasűrűség hirtelen és erősen lecsökken. A kutatók meghatározták az Alfvén-felületen való áthaladások során mért napszél forrását, egy potenciáltér-közelítést alkalmazó modell szerint ez a struktúra (úgynevezett pszeudo-streamer) két mágneses hurokból áll, és azonos polaritású koronalyukakat köt össze. Jelenleg a napaktivitási maximum felé tartunk és a Parker-űrszonda egyre közelebb kerül a Naphoz, így azt várjuk, hogy a szonda még többször és hosszabban fog megfigyeléseket végezni a napkoronában, ami számos fontos tudományos eredmény lehetőségével kecsegtet [5].

Szintén nagy visszhangot váltott ki az angol szaknyelvben *magnetic switchback* néven ismert cikcakkalakú mágneses struktúrák gyakori észlelése a Parker-űrszonda napközeli napszéladataiban [6]. Ezek jellemzője, hogy a rajtuk történő áthaladások az űrszonda a domináns mágneses irány gyors megfordulását, illetve a napszél sebességének megnövekedését észleli (2. ábra). Jelentőségük abban áll, hogy befolyásolhatják a napszél turbulens folyamatait, valamint hozzájárulhatnak annak fűtéséhez. Keletkezésük nem teljesen tisztázott, erre esélyes jelölt lehet a mágneses erővonalak átkötődése (rekonnekció), de szóba jöhet a plazmahullám, illetve különböző sebességű napszéláramlások kölcsönhatása is mint kiváltó ok.

A napszél hatása a belső bolygók plazmakörnyezetére

A belső bolygók (Merkúr, Vénusz, Föld és Mars) plazmakörnyezete igen változatos a különböző paramétereik (pálya, a forgástengely dőlése, összetétel, mágnesség stb.) miatt, így a napszéllel való kölcsönhatásuk vizsgálata rendkívül izgalmas. Számos űrszondás



2. ábra. Illusztráció a Parker-űrszonda által mért *magnetic switchback* eseményekhez. A kék vonalak a napszél által kisodort mágneses mező erővonalait jelzik. Látható, hogy ennek iránya időnként hirtelen megváltozik, a cikcakkszerű struktúrák neve switchback [6].

küldetés segíti ezen kutatásokat, a napszondák mellett fontos bolygókutató szondák is ontják az adatokat. A tudományos közösség minden olyan alkalmat igyekszik kihasználni, amikor több űrszonda végez szimultán méréseket. A többpontos mérések rendkívül fontosak az űrkutatásban, hiszen csak általuk lehetséges a jelenségek idő- és térbeli tulajdonságainak elkülönítése.

Jelenleg az ESA/JAXA BepiColombo [7] misszió (2018–) plazmaméréseket végez a belső helioszférában, mielőtt pályára áll a Merkúr körül [8]. Számos együttműködési lehetőség van [9] a már említett Parker Solar Probe, Solar Orbiter, BepiColombo-missziók, valamint több, hosszabb ideje szolgálatban lévő napszonda között, mint például a STEREO-A [10], WIND [11], illetve az ACE [12]. A 2025-ben esedékes Merkúr körüli pályára állása után a BepiColombo két keringőegysége (az európai vezetésű Mercury Planetary Orbiter és a japánok által koordinált Mercury Magnetospheric Orbiter) a bolygó plazmakörnyezetét, valamint felszínét fogja tanulmányozni [13]. A korábbi űrszondás megfigyelések (az amerikai Mariner-10 és MESSENGER-missziók) alapján a kutatók megállapították, hogy a bolygó felszíne becsapódási kráterekkel erősen tarkított, illetve egykori vulkáni aktivitás jelei is látszanak a felvételken. Kis tömegének és környezete magas hőmérsékletének köszönhetően a Merkúrnak nincs stabil légköre, csupán exoszférája van. A Vénusszal ellentétben a Merkúr saját globális mágneses mezővel rendelkezik, így – akárcsak a Föld esetében – kialakul egy magnetoszféra, valamint a Nap felőli oldalon

egy fejhullám, ahol a napszél hirtelen lelassul. A Földhöz képest kisebb mágneses térerősség miatt a napszél nagyobb energiájú részecskéi feltehetően elérhetik a felszínt is, erodálva azt. A bolygó felszínéről elszökő részecskék csóvát alkotnak a Nappal áttellenes oldalon, ez a csóva akár 2000 Merkúr-sugárig is kiterjedhet.

Az ESA Venus Express (VEX) küldetése 2006 és 2014 között vizsgálta a Vénusz plazmakörnyezetét és légkörét. Az elnyúlt elliptikus pályán történő keringés folyamán az űrszonda naponta egyszer eltávolodott a Vénusztól, és kilépett a háborítatlan napszélbe, majd visszatért a bolygóhoz, és a mélyebb plazmakörnyezetét figyelte meg.

A Vénusz érdekessége, hogy a belső mágneses tér hiánya miatt az ionok relatíve szabadon reagálhatnak a plazmanyomás gradiensére, így a napos oldalon lévő fotoionizációs forrásból származó ionok az éjszakai

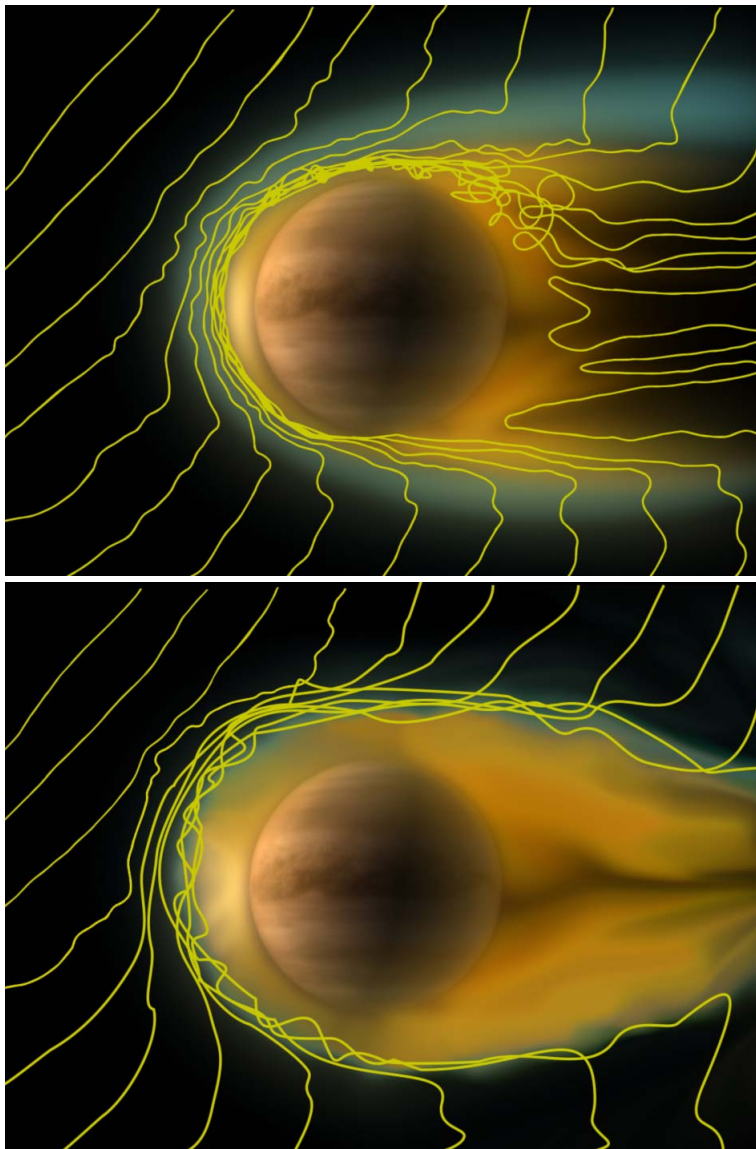
kai oldal felé áramolhatnak [14, illetve a benne található hivatkozások]. A VEX-misszió egyik érdekes eredménye volt a rendkívül alacsony napszélnyomás miatt kialakult cseppszerű ionoszféra kimutatása [15]. A nyomásesés miatt az ionoszféra nagyobb magasságokra is kiterjedt, mint a szokásos 150-300 km, és a terminátor (a nappal és az éjszaka határvonala) feletti indukált mágnesség a megszokottnál még gyengébb volt. Ezért az éjszakai oldal felé történő ionáramlás – bár lassabb – mégis sokkal szabadabb volt, ami a Vénusz Nappal ellentétes oldalán rendkívül kiterjedt éjszakai ionoszférát eredményezett, az üstökösökre hasonlító ioncsóva (3. ábra) az éjszakai oldalon 15 000 km-re elnyúlt [16].

A Vénusra ható másik extrémum, amikor a napkitörésekből származó koronaanyag-kidobódások (Interplanetary Coronal Mass Ejections) érik el és átrendezik plazmakörnyezetét. Hatásukat *Vech* és munkatársai [17] szisztematikusan vizsgálták a VEX-űrszonda plazma- és mágneses méréseinek segítségével. Azt találták, hogy ICME-k idején az indukált mágneses tér megnő, a bolygó előtti lökéshullám nagyon eltávolodik, és az éjszakai magnetoszféra magassága csökken.

A Mars környezetét egyszerre több szonda is vizsgálja. Az ESA MEX (2004–) küldetés már 20 éve végez megfigyeléseket a vörös bolygónál. Napi négyszer kerül meg a bolygót és minden keringés során kimegy a napszélbe, majd vissza a Mars indukált magnetoszférájába. A NASA MAVEN (2013–) szondája többnyire közelebb van a bolygóhoz, de remekül kombinálhatók az indukált magnetoszférában végzett mérései a MEX napszél-megfigyeléseivel.

A marsi magnetoszféra érdekessége, hogy bár eredendő mágneses tere (már) nincs, foltokban kéregmágnességet figyeltek meg rajta. Ennek hatása jól látható a bolygó ionoszféráján, de például az auróra megjelenési helyét is részben befolyásolja. A földi sarki fényvel ellentétben a Marson bármely szélességen megjelenhet a légkörbe érkező nagy energiájú részecskék hatására létrejövő fényjelenség. A Mars napszél által indukált magnetoszférája természetesen rendkívüli mértékben függ a napszél jellemzőitől, a bolygóközi mágneses tér iránya határozza meg a bolygó magnetoszférájának dőlését és irányát, így egy egyszerű helioszférikus áramlepel-átmenet (amely a bolygóközi mágneses tér irányváltásával jár) is teljesen átrendezi a Mars plazmakörnyezetét (ez igaz a Vénusznál is). További érde-

3. ábra. A Vénusz ionoszférája átlagos (fölül) és rendkívül alacsony (alul) sűrűségű napszél idején [16].



kesség, hogy *Lilensten* és munkatársai [18] a Földön domináns zöld és piros mellett – a szén-dioxid alapú légkörnek köszönhetően – kék színű aurórákat is jósltak.

A belső bolygók összehasonlítása igen érdekes eredményeket ad. A nem mágneses Vénusz és a gyengén (csupán foltokban) mágnesezett Mars plazmakörnyezete meglepően sok hasonlóságot mutat [19]. Mindkettő indukált magnetoszférával rendelkezik, és térerősségük összevethető, a plazmafolyamatok hasonlóak. Természetesen vannak különbségek is, hiszen a két bolygó különböző távolságra van a Naptól, méretük és légkörük kiterjedése is más. A két bolygó helioszférikus (radiális vagy Parker-spirál menti) együttállásaira külön megfigyelési és adatelemzési kampányokat indítanak. Mivel mindkettejük plazmakörnyezete erősen függ az őket elérő napszél tulajdonságaitól, ezért, ha ugyanaz a napszélcsomag vagy -struktúra találkozik először a Vénusszal, majd néhány nap múlva a Marssal, az remekül látszik a két bolygónál történt mérésekben.

Mivel mind a VEX-, mind a MEX-szonda rendszeresen volt a háborítatlan napszélben is, ezért ezen időszakok méréseit napszélkutatásra is tudjuk használni. A két különböző naptávolságban (Vénusz és Mars pályája) végzett megfigyelések összevetésével a napszélstruktúrák radiális fejlődését vizsgálhatjuk. Ezen kutatás eredményei a bolygó űridőjárásának vizsgálatához nyújtanak remek segítséget, javítják a napszél-előrejelzéseket. Az egyszerű ballisztikus napszél-propagációtól [20] a komplex MHD-szimulációig sok próbálkozás van egy adott pontban történt mérés alapján egy másik pontba való extrapolációra. Léteznek komoly web-szolgáltatások is ezen kutatások támogatására, például az Europlanet Planetary Space Weather Services kiterjesztése, az Europlanet SPIDER szolgáltatás is már elérhető [21].

Összefoglalás

Rendkívül érdekes időszakban élünk, a napközeli szondák és a számos bolygókutató küldetés igen gazdag adatbázist adnak elemzéseinkhez. Kutathatjuk a fiatal napszelet, a napszél és koronaanyag-kidobódások bolygóközi térben való terjedését, valamint ezek hatását a különböző égitestekre. Az itt nyert adatok segítségével kiválóan vizsgálhatók a bolygók plazmakörnyezetét meghatározó alapvető fizikai folyamatok.

Mivel az űridőjárási jelenségek elsődleges forrása a Nap, minden napszéleredetű hatás a belső helioszférán keresztül érkezik a Földre és a többi égitestre. Így a földi infrastruktúrát – közvetve életünket és a társadalmat is – befolyásolni képes űridőjárási események megértése és előrejelzése lehetetlen lenne a belső helioszféra alapos tanulmányozása nélkül.

Irodalom

1. Fox N. J., Velli M. C., Bale S. D., Decker R., Driesman A., Howard R. A., ..., Szabo A.: The solar probe plus mission: humanity's first visit to our star. *Space Science Reviews* 204 (2016) 7–48.
2. Müller D., Cyr O. S., Zouganelis I., Gilbert H. R., Marsden R., Nieves-Chinchilla T., ..., Williams D.: The solar orbiter mission-science overview. *Astronomy & Astrophysics* 642 (2020) A1.
3. Madár Á., Opitz A., Szalai S., Kecskeméty K., Dósa M., Erdős G., Tróznai G.: A Solar Orbiter napszonda Frey Sándor (szerk.) Űrtan Évkönyv 2020: Az Asztronautikai Tájékoztató 72. száma, Budapest, Magyarország: Magyar Asztronautikai Társaság (2021), 87–104.
4. Berghmans D. et al.: Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI. *Astronomy & Astrophysics* 656 (2021) L4.
5. Kasper J. C. et al.: Parker solar probe enters the magnetically dominated solar corona. *Physical Review Letters* 127/25 (2021) 255101.
6. Bale S. D., Badman S. T., Bonnell J. W., Bowen T. A., Burgess D., Case A. W., ..., Wygant J. R.: Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole. *Nature* 576/7786 (2019) 237–242.
7. Milillo A. et al.: Investigating Mercury's environment with the two-spacecraft BepiColombo mission. *Space Science Reviews* 216 (2020) 1–78.
8. Mangano V., Dósa M., Fränz M., Milillo A., Oliveira J. S., Lee Y. J., ..., Baumjohann W.: BepiColombo science investigations during cruise and flybys at the Earth, Venus and Mercury. *Space Science Reviews* 217 (2021) 1–81.
9. Hadid L. Z., Génot V., Aizawa S., Milillo A., Zender J., Murakami G., ..., Walsh A.: BepiColombo's cruise phase: Unique opportunity for synergistic observations. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 8 (2021) 718024.
10. Kaiser M. L., Kucera T. A., Davila J. M., St. Cyr O. C.: The STEREO mission: an introduction. *Space Sci. Rev.* 136 (2008) 5–16.
11. Acuña M. H. et al.: The global geospace science program and its investigations. *Space Science Reviews* 71 (1995) 5–21.
12. Chiu M. C. et al.: ACE spacecraft. *Space Science Reviews* 86 (1998) 257–284.
13. Bebesi Zs. et al.: A BepiColombo űrmisszió mérföldkövei és tudományos célkitűzései a Merkúr bolygónál. *Fizikai Szemle* 70/7–8 (2020) 236–244.
14. Opitz A., Forczek B.: A rejtélyes Vénusz. *Fizikai Szemle* 68/4 (2018) 115–118.
15. Wei et al.: A teardrop-shaped ionosphere at Venus in tenuous solar wind. *Planetary and Space Science* 73 (2012) 254–261.
16. <https://sci.esa.int/web/venus-express/-/51323-the-ionosphere-of-venus-under-different-solar-wind-conditions>
17. Vech D. et al.: Space weather effects on the bow shock, the magnetic barrier, and the ion composition boundary at Venus. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120 (2015) 4613–4627.
18. Lilensten J., Bernard D., Barthelemy M., Gronoff G., Wedlund C. S., Opitz A.: Prediction of blue, red and green aurorae at Mars. *Planetary and Space Science* 115 (2015) 48–56.
19. ISSI / Europlanet könyv (Springer): The plasma environment of Venus, Mars, and Titan. Szerk. Szegő Károly, Space Sciences Series of ISSI (2011).
20. Opitz A., Fedorov A., Wurz P., Szego K., Sauvaud J.-A., Karrer R., Galvin A. B., Barabash S., Ipavich F.: Solar-wind bulk velocity throughout the inner heliosphere from multi-spacecraft measurements. *Solar Physics* 264 (2010) 377.
21. <http://spider-europlanet.irap.omp.eu/>
22. <https://sci.esa.int/web/solarorbiter/-/solar-orbiter-s-first-images-reveal-campfires-on-the-sun>