

Utazás a Merkúrhoz – a BepiColombo küldetés

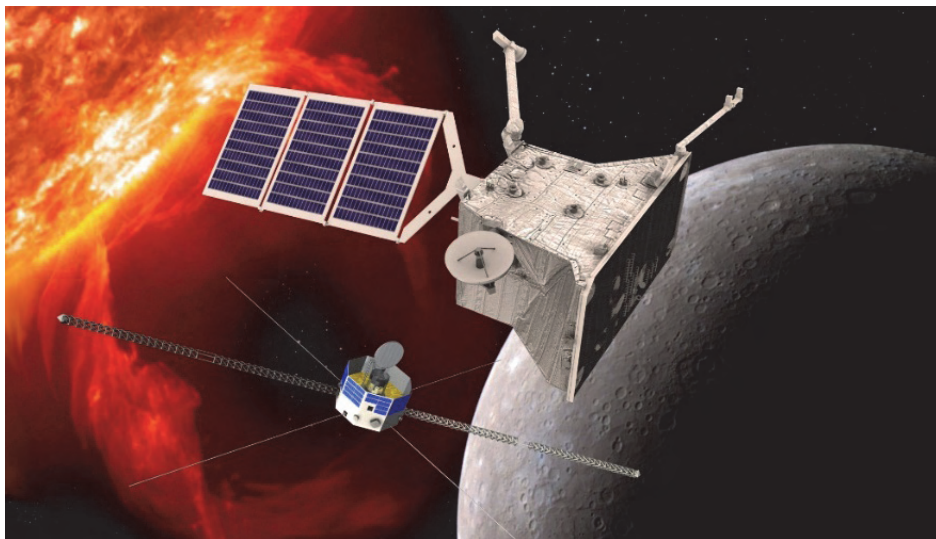
Bebesi Zsófia,
Juhász Antal,
Timár Anikó,
Dósa Melinda

ELKH Wigner Fizikai
Kutatóközpont,
Budapest

BEVEZETÉS

A BepiColombo küldetést az Európai Űrügynökség (*European Space Agency, ESA*) és a Japán Űrügynökség (*Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA*) együttműködésének keretében hozták létre. A küldetés két tudományos szondából áll, melyek jelenleg egy hőpajzzsal védett hordozó platformra rögzítve (*Mercury Transfer Module, MTM*) utaznak a bolygóközi térben. A két keringő egység egyike, a *Mercury Planetary Orbiter* (MPO) elsősorban a Merkúr felszínét vizsgálja majd, a *Mercury Magnetospheric Orbiter* (Mio, korábbi nevén MMO) pedig a mágneses terét térképezi fel. A két űrszonda összehangolt mérései új távlatokat nyitnak a bolygó plazmakörnyezetének kutatásában. A Merkúrt mostanáig csak két NASA űrszonda, a Mariner-10 (1974. szeptember) és a MESSENGER (2011. március – 2015. április) közelítette meg.

A BepiColombo indítására 2018. október 20-án került sor, és a tervek szerint 2025. december 5-én fog pályára állni a Merkúr körül. Addig is a bolygóközi térben számos lassító manőverre lesz szükség (a majdani optimális befogási sebesség eléréséhez a Merkúrnál). Ezek során több alkalommal megközelelti a Naprendszer belső bolygóit (miközben tudományos méréseket is végez), illetve az interplanetáris térben a napszelet észlelő űrszondákkal együtt is számos lehetőség adódik szoláris események koordinált vizsgálatára.

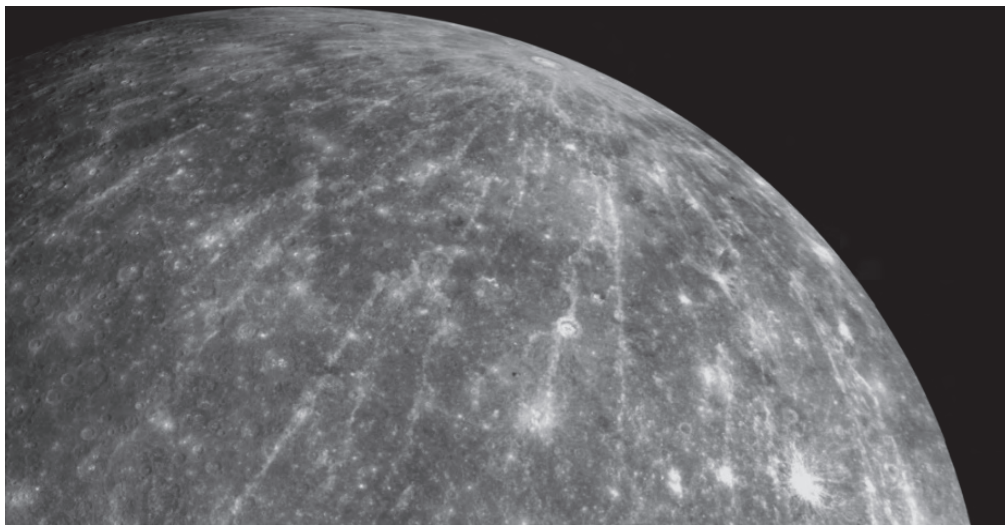


1. ábra: Fantáziaképen az MPO és Mio vizsgálódásai a Merkúrnál. (Forrás: ESA)

Az MPO űrszonda egyes műszereinek megépítésében magyar mérnökök is részt vettek, aminek révén az érintett berendezések által mért tudományos adatokhoz a közreműködő magyar kutatóintézetek is hozzáférnek. Ezek egyike a *Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances* (SERENA) műszer-csomag részét képező iontömeg-spektrométer, a *Planetary Ion Camera* (PICAM) [1], melynek alacsony feszültségű tápegységét, valamint egy, a BepiColombo környezetét szimuláló szoftvert a Wigner Fizikai Kutatóközpont Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának mérnökei az SGF Kft. közreműködésével fejlesztették ki. Ugyancsak magyar hozzájárulással készült a plazmahullámok vizsgálatára tervezett *Plasma Wave Instrument* (PWI), amelyhez az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Űrkutató Csoportja a BL Electronics Kft.-vel közösen dolgozta ki az intelligens jelfelismerő modul (ISDM) fedélzeti szoftverét.

TUDOMÁNYOS ISMERETEINK A MERKÚRRÓL

A Merkúr (2. ábra) a Naphoz legközelebb keringő bolygó, mely csillagunkat mintegy 88 nap alatt kerüli meg. A bolygó átlagos átmérője 4880 km, azaz kisebb, mint a Jupiter körül keringő Ganymedes, valamint a Szaturnusz Titan holdja. Pályájának excentricitása elég nagy (kb. 0,2), ami belső bolygó esetében a bolygókeletkezési elméletek szerint rendhagyónak számít, így az is felmerült, hogy a Merkúr nem a Naprendszer belsejében jött létre, hanem csak később vándorolt át a jelenlegi pályájára. A pálya elnyúltságának következtében a Naptól mért távolság 46 millió (perihélium) és 70 millió km (aphélium) között változik. A Merkúr Nap körüli keringési és tengely körüli forgási periódusa között pontosan 3:2 arány áll fenn, mely ugyan nem a kötött keringés esetére vonatkozó 1:1-es rezonancia, de ez is stabil állapot. A Merkúr pályainklínációja 7° -os, valamint további érdekes tény, hogy a bolygó tengelyhajlása mindössze 2° , emiatt évszakos változások nem alakulnak ki rajta. Azonban a rendkívül lassú forgás miatt a felszínen mégis létrejöttek adott helyszínekre jellemző klimatikus viszonyok, forróbb és hűvösebb területek.



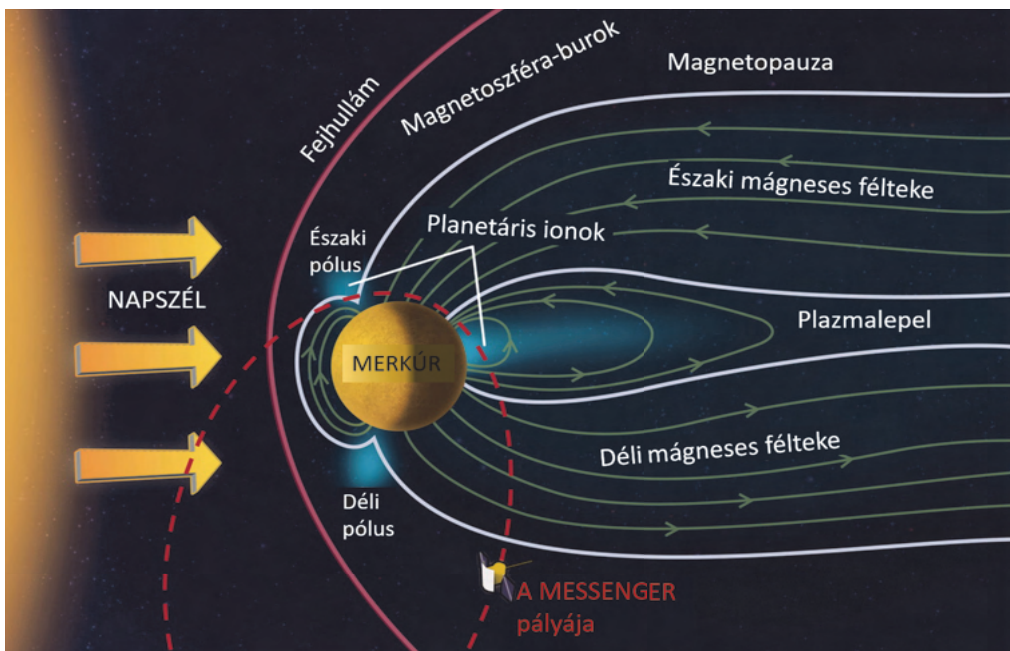
2. ábra: A Merkúr felszíne. (Forrás: NASA)

A Merkúr felszíne erősen kráterezett, mivel folyamatosan bombázzák a Naprendszer belsejébe bejutó, vagy ott keringő üstökösök, aszteroidák, meteorok, valamint a napszél. A felszíni morfológiára vonatkozóan egészen az első űrszondás megfigyelésekig egyáltalán nem voltak ismereteink. Elsőként az amerikai Mariner-10 összesen három alkalommal közelítette meg a Merkúrt. Ezek során a felszín 45%-át fotózta le. A MESSENGER már a teljes felszínt lefényképezte, illetve az északi féltekét még lézeresen is letapogatta, aminek révén részletes topográfiai térképekhez jutottunk.

A Merkúr egykor vulkanikusan aktív volt, ennek jelei napjainkban is jól láthatók. Felszínén nincsenek jelentősebb magasságbeli eltérések, ellenben számtalan becsapódási kráter borítja. Megfigyeltek olyan hosszanti irányú repedéseket is, amelyek feltehetőleg az égitest kihűlése, globális összehúzódása következtében jöhettek létre.

A Merkúr a Föld után a második legsűrűbb bolygó a Naprendszerben, átlagsűrűsége $5,427 \text{ g/cm}^3$. A jelenlegi bolygókeletkezési elméleteink szerint ez meglepő, de egy óriási, a bolygó térfogatának több mint felét kitevő vasmag jelenléte esetleg magyarázatot nyújthat rá – a Föld esetében a mag a bolygó térfogatának csupán 17%-át teszi ki. Többek között ennek a kérdésnek a megválaszolása is egyike a BepiColombo tudományos célkitűzéseinek.

A Merkúr kiterjedt, globális mágneses terét a Mariner-10 űrszonda észlelte először. A bolygó magnetoszférája akadályt képez a szuperszonikus sebességgel áramló napszél plazma számára, és meggátolja, hogy a napszélbe befagyott interplanetáris mágneses tér lehatoljon a felszínre. A Merkúr esetében a földihez képest gyenge és kevésbé kiterjedt magnetoszféráról (3. ábra) van szó, tehát a

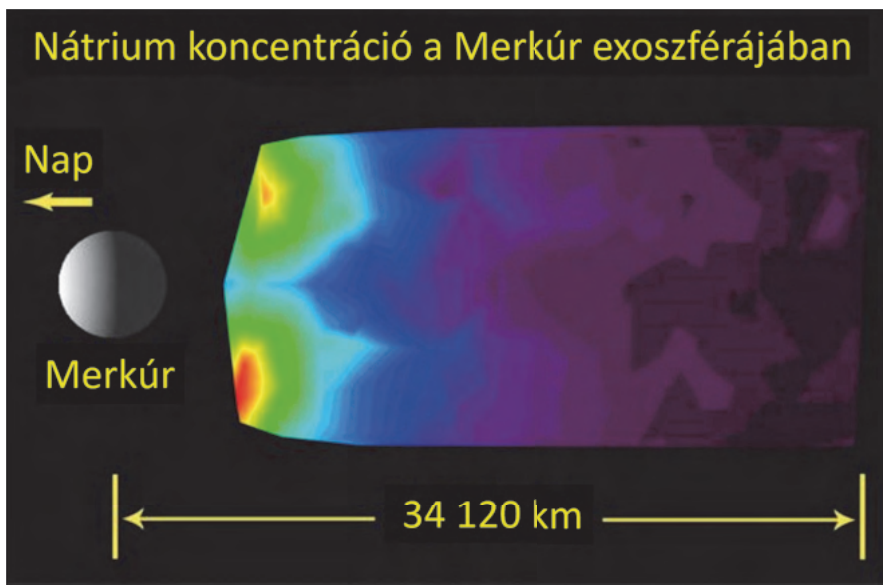


3. ábra. A Merkúr magnetoszférájának szerkezete, valamint a 2011 és 2015 között körülötte keringő MESSENGER űrszonda poláris pályája. (Forrás: Zurbuchen et al., 2011)

napszél nagyobb energiájú részecskéinek egy része eljuthat a felszínre [2], ahol hozzájárul az eróziós folyamatokhoz. A szuperszonikus sebességű napszél hatására a Földhöz hasonlóan a Merkúr Nap felőli oldalán lökéshullám (fejhullám) jön létre. A napszél dinamikus nyomása, valamint a magnetoszféra mágneses nyomása a magnetopauza mentén kerül egyensúlyba.

A Merkúr kis mérete, valamint lassú forgása mellett meglepő a kiterjedt globális magnetoszféra jelenléte, mivel a dinamóhatás létrejöttéhez szükség van a mag körül egy folyékony fémes rétegre, melyet a többi mágneses bolygónk esetében a gyors tengely körüli forgás tart mozgásban. A Merkúr belsejében működő mágneses dinamót azonban feltehetőleg az excentrikus pálya miatt fennálló erőteljes árapályhatások tartják fenn. További érdekesség, hogy bár a Merkúr mágneses tengelye és forgástengelye közel egybeesik, a mágneses dipóltér mégsem szimmetrikus, hanem az északi féltekén nagyjából háromszor akkora térerősség mérhető, mint a délin. Valamint a déli pólus környezetében az északihoz képest nagyobb területen észlelhetők nyitott mágneses erővonalak, ezért itt nagyobb arányban szökhetnek el a Merkúr eredetű töltött részecskék is. Az egyenlítői mágneses térerősség ~ 300 nT, ami a földi értéknek mindössze az 1%-a. Nagyon erős napszélnyomás esetében a magnetoszféra olyan mértékben összenyomódhat, hogy a magnetopauza eléri a felszínt.

A Merkúr felszínén, az egyenlítő Nap felé eső tartományában mért napállandó a földi $1,370 \text{ W/m}^2$ értéknek a 4,59–10,61-szerese, a felszíni hőmérséklet pedig 100 K (árnyékban) és 700 K (a nappali oldalon) között mozog. A pólusok közelében, az árnyékos oldal krátereinek mélyén akár (regolittal borított) vízjeget is találhatunk, amit a MESSENGER űrszonda radarészlelései is igazoltak. A Merkúron jelen lévő víz becsült mennyisége 10^{14} – 10^{15} kg. Eredete egyelőre nem ismert, a belső tartományok esetleges kigázosodása mellett származhat a Naprendszer belsejébe látogató üstökösöktől is.



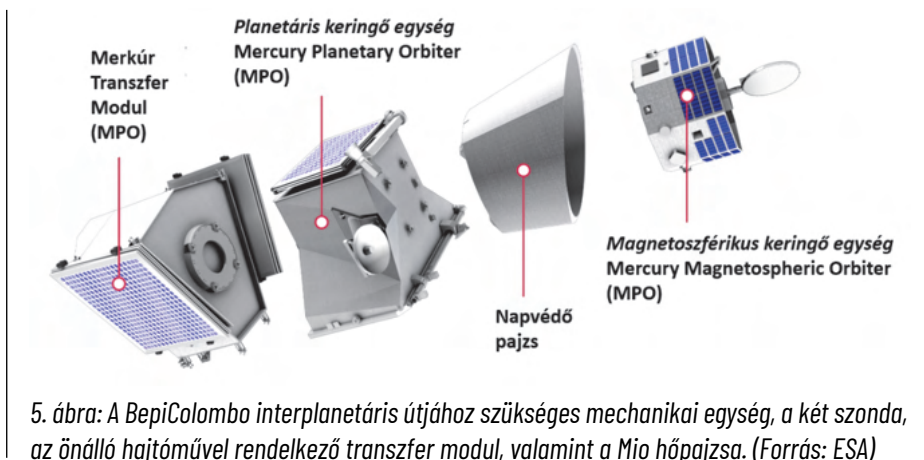
4. ábra: A Merkúr atmoszférájában található nátrium mennyiségi eloszlása (a vörös és zöld tartományokban található a legnagyobb mennyiség). (Forrás: NASA/JHUAPL)

A bolygó felszíne fémek (Na, K, Mg) mellett illóanyagokban (víz, S, SO_2 , HS) gazdag, ami meglepő, hiszen feltételezhetjük, hogy egy égitest minél közelebb kering a csillagához, annál hamarabb elveszíti az illékony összetevőket. A Mariner-10 műszerei kimutatták egy nagyon ritka légkör jelenlétét, amelynek akkor feltételezett összetevői a hidrogén, a hélium és az oxigén voltak [3]. A MESSENGER méréseinek köszönhetően ma már tudjuk, hogy kis mennyiségben nátrium, kálium, kalcium, magnézium, argon és vízgőz is kimutatható benne. A Merkúrnak nincs stabil atmoszférája, csak exoszférája (nyomása kevesebb, mint 1 nPa), ahol a részecskék közepes szabad úthossza összemérhető a réteg vastagságával [4]. Az exoszférát alkotó (kezdetben) semleges részecskék a napszél töltött részecskéivel való töltéscsere révén ionizálódhatnak, és elsökhethetnek az interplanetáris térbe. Ugyanis az újonnan keletkezett ionok az interplanetáris mágneses tér erővonalai körül giromozgásba kezdenek, és a napszellel együtt eltávoznak a bolygó környezetéből. A Merkúr esetében az exoszférába folyamatosan érkeznek részecskék, a felszínről (a napszél és a sugárzás hatására), és a magnetoszféra más tartományaiából egyaránt [5]. A részecskék kiáramlása elsősorban a nátrium D-vonalában figyelhető meg, kiterjedt, akár 2000 Merkúr-sugárnyi hosszúságú csóva formájában.

A felszínt folyamatosan bombázzák az interplanetáris térből érkező mikrometeoroidok is, melyek fluxusa az Ekliptika síkjában a legnagyobb. A becsapódás során felszabaduló hő elpárologtathatja a felszínen található anyagokat, melyek aztán szintén bekerülnek az atmoszférába. Többek között ez a folyamat hozható kapcsolatba az atmoszférikus nátrium (4. ábra) észlelésével is, mely jelentősebb mennyiségben el is szökhethet a Merkúr környezetéből.

A BEPICOLOMBO TECHNIKAI JELLEMZŐI

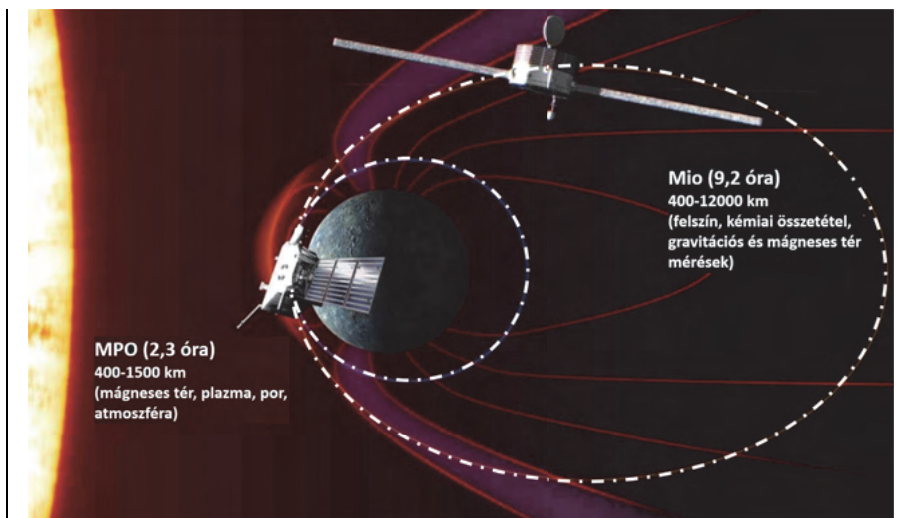
Az űrszondák jelenleg még egyetlen összekapcsolt űreszközként (5. ábra) utaznak az interplanetáris térben. Közülük a transzfer modul (MTM) felelős a meghajtásért, hogy a két keringő egység – az MPO és a Mio – eljusson a Merkúrhoz [6]. A Mio név nem természetes rövidítése az űreszköz hivatalos nevének, hanem a japán lakosság által javasolt több ezer név közül választották ki (jelentése „vízi út”, mely a vízen sülő hajók, és a napszélben száguldó űrszondák analógiáját szimbolizálja). A három egység a Mio napvédő pajzsával együtt alkotja a *Mercury Cruise System* (MCS) űrobjektumot.



A transzfer modul meghajtása szoláris elektromos hajtóműrendszerrel valósul meg, ami napelemek és manőverező ionrakéták kombinációját jelenti. Az ionhajtómű négy komponense egyenként 145 mN tolóerő kifejtésére képes, ezáltal jelenleg ez a világűrben valaha alkalmazott legnagyobb teljesítményű ilyen meghajtórendszer. Ugyancsak az MTM látja el energiával az odaút időtartamára részlegesen hibernált két keringő szondát is (az MPO tartja a rádiókapcsolatot a Földdel, a Mio pedig alvó üzemmódban van). A 2025. december 5-ére tervezett befogást követően a transzfer modul poláris pályára kerül, majd kis pályamódosítást követően eléri a végső pályát, 178 ezer km-es apohermiummal. Itt a két keringő egység leválik a transzfer modulról, majd kémiai üzemelésű meghajtó rakéták segítségével érik el a tervezett pályáikat. Ekkor fogják felébreszteni a Mio szondát is. A keringő egységek végső pályáit és pályaparamétereiket a 6. ábra mutatja.

Az MPO-nak 11 fedélzeti berendezése van, melyek többségét a túlhevülés elkerülése érdekében a szonda nadirpontjának közelében helyezték el, ez a keringés során mindig a bolygó felszíne felé néz majd. Az 1 méteres átmérőjű rádióantennája a szonda zenit felőli oldalára, egy rövid rúd végére került, a sáv szélesség éves szinten 1550 Gbit adat lehozatalát teszi lehetővé. A fedélzeten a következő műszerek találhatók: lézeres magasságmérő (BELA), gyorsulásmérő (ISA), magnetométer (MPO-MAG, MERMAG), sugárzásmérő és infravörös spektrométer (MERTIS), gamma-sugárzás- és neutron-spektrométer (MGNS), képkalkáló röntgenspektrométer (MIXS), ultraibolya spektrométer (PHEBUS), rádióhullám-detektor (MORE), az exoszféra újratermelő és az onnan kilépő semleges részecskék kutatására létrehozott, több detektorból álló műszer-csomag (SERENA – ELENA, STROFIO, MIPA, PICAM), spektrométerek és képkalkáló berendezések rendszere (SIMBIO-SYS), valamint egy szoláris röntgenintenzitás-mérő és részecskespektrométer (SIXS).

A Merkúr mágneses terének átfogó vizsgálatára kifejlesztett Mio alakja szabályos nyolcszög alapú hasáb, tömege 285 kg. Fedélzetén 5 műszer-csoport kapott helyet: egy hat detektorból álló plazma-részecske-detektor-csomag (MPPE – MEA1 és MEA2, MIA, MSA, HEP-ele, HEP-ion, ENA), magnetométer



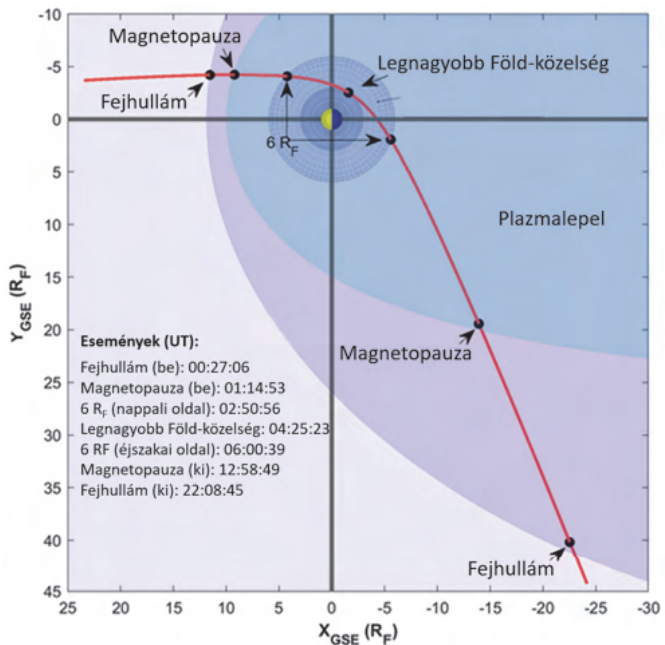
6. ábra: Az MPO és az MMO keringési pályái a küldetés időtartama alatt. (Forrás: JAXA, ESA)

(MMO-MGF), plazmahullám-detektor (PWI), egy, a nátrium atmoszféra vizsgálatára kifejlesztett spektrális képalkotó berendezés (MSASI), valamint egy pordetektor (MDM). A Mio szonda forgásstabilizált, forgástengelye a Merkúr egyenlítőjére merőleges. A tervek szerint évente 160 Gb-nyi adatot fog vizsaszugározni a Földre. A BepiColombo Merkúrra vonatkozó tudományos célkitűzéseiről [7] a Fizikai Szemlében 2020-ban megjelent cikkünkben [8] írtunk részletesebben.

A GRAVITÁCIÓS MANŐVEREK SORÁN VÉGZETT MÉRÉSEK

A transzfer modul a Merkúr körüli 2025-ös pályára állítást megelőzően összesen hét évig utazik az interplanetáris térben. Ezalatt az űreszköz a Földet egyszer (2020. ápr. 10.), a Vénuszt kétszer (2020. okt. 15. és 2021. aug. 10.), a Merkúrt pedig a megérkezését megelőzően összesen hat alkalommal közelíti meg (2021. okt. 2., 2022. jún. 23., 2023. jún. 20., 2024. szept. 5., 2024. dec. 2. és 2025. jan. 9.), hogy végül elérje a befogáshoz szükséges optimális sebességet. A negyedik Merkúr-megközelítést követően a BepiColombo már a bolygóéhoz hasonló pályán fog keringeni a Nap körül, és a Merkúr közelében marad. A gravitációs manőverek jó alkalmat kínálnak a BepiColombo fedélzeti műszereinek tesztelésére, tehát tudományos mérések mellett kalibrációs műveleteket is lehet végezni.

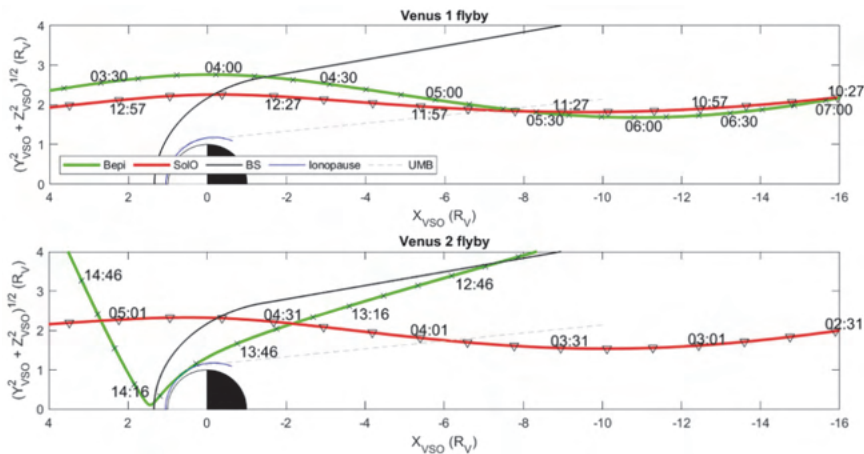
Az első ilyen célpont, a Föld megközelítésekor [9] a BepiColombo áthaladt a bolygó magnetoszféráján, melynek határfelületeit (fejhullám és magnetopauza) a magnetométer és a plazmaműszerek mérései révén pontosan beazonosíthattuk (7. ábra). Az ábra az űrszonda pályáját geocentrikus szoláris ekliptikai (GSE; az x tengely a Nap felé mutat, a z tengely pedig a Föld pályájára merőleges) koordináta-rendszerben mutatja. A földi gravitációs manőver során a magnetosféra és a földi plazmakörnyezet különféle tartományaiban lehetőség nyílt a BepiColombóval és a Föld körül keringő műholdakkal együttesen koordinált észlelések elvégzésére is. A fejhullám előterében (a napszél áramlása felőli, ún. *upstream* tartomány) például a Geotail és az MMS (*Magnetospheric Multiscale Mission*) műholdakkal egyidejűleg vizsgálták az *upstream* régióban zajló mágneses hullámaktivitást, meg egészen $60 R_F$ (ahol $R_F = 6371$ km, a Föld sugara) távolságig észlelhető volt.



7. ábra: A BepiColombo pályája a 2020. április 10-ei Föld-megközelítés alkalmával. (Forrás: Mangano et al., 2021)

A BepiColombo a magnetoszféra terminátor közeli tartományában egyidejű méréseket végzett az Artemis műholddal, a csóva dinamikájának alaposabb megismeréséhez pedig a GOES-16 és -17, valamint a Cluster holdakkal szinkronizált tudományos adataival járult hozzá. A legnagyobb Föld-közelséget 12677 km-es távolságban érte el. A Hold megfigyelésére ekkor nem volt lehetőség, mert elég távol tartózkodott űreszköz trajektóriájától.

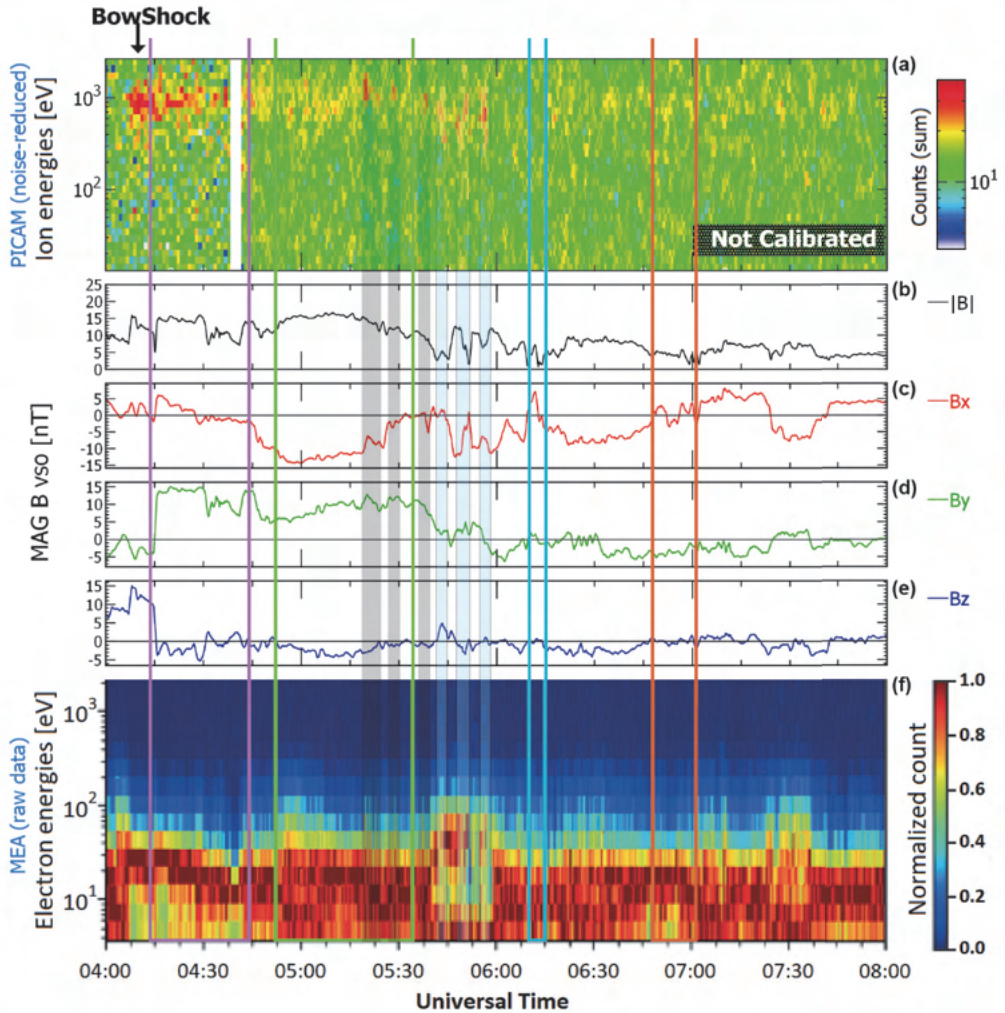
A következő két irányított gravitációs lassító manőverre a Vénusznál került sor [9,10]. A Vénusz körül az elmúlt két évtizedben hosszabb ideig csak két űreszköz tartózkodott, az ESA Venus Express űrszondája (2006–2014) és japán Akatsuki (2015–).



8. ábra: A BepiColombo (zöld) és a Solar Orbiter (piros) űrszondák pályái a Vénusz környezetében, hengerkoordináta-rendszerben ábrázolva. (Volwerk et al., 2021)

Az utóbbi néhány évben a BepiColombo mellett két másik, nemrégiben útjára indított űrszonda is igénybe vette a Vénusz gravitációs terének pályamódosító hatását. Ezek egyike a Parker Solar Probe [11], mely összesen hét Vénusz-megközelítést fog végrehajtani – ezek közül az első három (2018. okt. 3., 2019. dec. 26., 2020. júl. 11.) időben közel esett a BepiColombo megközelítési dátumaihoz (2020. okt. 15. és 2021. aug. 10.). A másik ilyen küldés a Solar Orbiter [12], melynek első Vénusz-manőverére 2020. dec. 27-én (két hónappal a BepiColombo után), a másodikra pedig mindössze egy nappal (2021. aug. 9-én) a BepiColombo érkezése előtt került sor. Mivel méréseik térben és időben közel zajlottak, a tudományos adatokat összehasonlító vizsgálatokhoz használták fel. A BepiColombo és a Solar Orbiter Vénusz körüli pályáit a 8. ábra mutatja.

A BepiColombo fedélzeti műszereinek többsége a Vénusznál végrehajtott gravitációs manőverek során aktív volt, és méréseikkel elsősorban a bolygó atmoszférájára (hőmérséklet- és sűrűségprofil, kémiai összetétel és globális cirkuláció), belső felépítésére, és a Nap–Vénusz kölcsönhatásra (szoláris sugárzás, nagyenergiájú részecskék, plazmakölcsönhatások, lokális interplanetáris mágneses tér, elektromos tér, plazma- és rádióhullámok) vonatkozó ismereteinket gazdagították. Az adatok feldolgozása és az eredmények publikálása folyamatosan zajlik.



9. ábra: Az első Vénusz-megközelítés során mért plazma adatok. (a) PICAM, (b)–(e) a mágneses térerősségvektor abszolút értéke és komponensei, (f) lineárisan normált MEA irányfüggetlen elektron beütésszám idő-energia spektrogram. A függőleges vonalak az egyes plazmatartományokat jelölik [10]

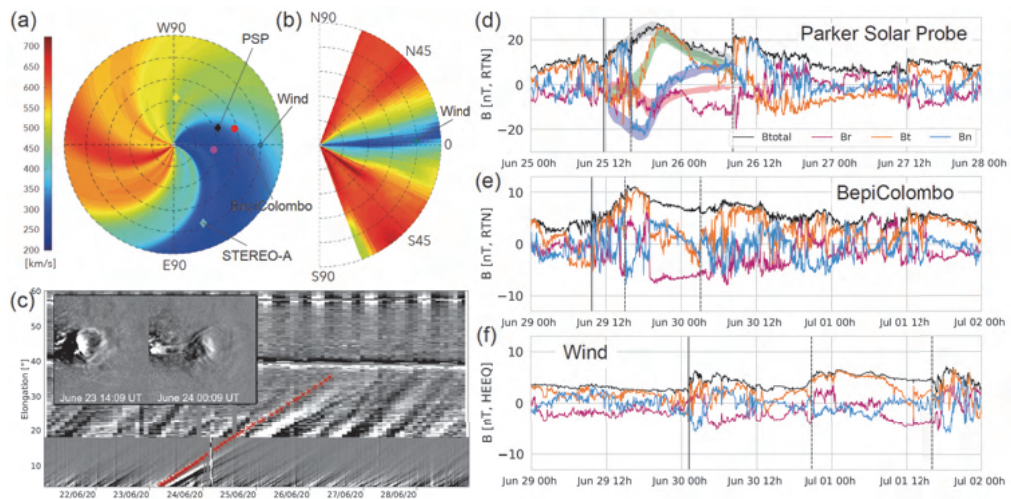
A 9. ábrán [10] az első Vénusz-megközelítés idején mért plazma adatok láthatók, melyek közül a felső panelen (a) ábrázolt PICAM adatok még kalibrálatlanok, de már háttérzajtól mentesek. A színek az ionok beütésszámait jelzi. A beazonosított magnetoszférikus tartományokat és határfelületeket a 9. ábrán különböző színű vonalak és sávok jelölik. A fejhullám átmenet 04:14-kor (UT) történt (lila vonal), majd a szonda átkerült a magnetoszféra-burokba. A csóva tartományát 04:48-kor érte el (zöld vonal), ahonnan átlépett a semleges lepel régiójába (kék vonalak). Ezt követően (06:46 és 07:01 között) a mágneses csóva hullámzását észlelték (szürke sávok), majd a BepiColombo kb. 14:00-ig a csóvában repült tovább. A STEREO és a SOHO napszondák megfigyelései szerint a BepiColombo ott tartózkodása

idején egy CME (*Coronal Mass Ejection*, koronakidobódás) érte el a Vénuszt, ami megmagyarázza a csóva hullámzó mozgását. Ettől eltekintve a Vénusz indukált magnetoszférájának konfigurációja általánosságban véve megfelelt a korábbi ismereteinknek.

Megemlítendő még, hogy a jelenleg is a Vénusz környezetében tartózkodó japán Akatsuki űrszonda UVI (*Ultraviolet Imager*, ultraibolya felvételeket készít 283 és 365 nm-en) és LIR (*Longwave IR Camera*, termális infravörös felvételeket készít a 8–12 μm -es tartományban) fedélzeti kamerái a gravitációs manőverek idején összehangolt méréseket végeztek a BepiColombo PHEBUS and MERTIS detektorai-val, valamint egyidejűleg földi észlelések is történtek.

KOORDINÁLT ÉSZLELÉSEK AZ INTERPLANETÁRIS TÉRBEN

Jelenleg több űrszonda tartózkodik a belső Naprendszerben, melyek közül némelyik már hosszabb ideje végez méréseket, mások azonban még küldetésük elején járnak (Parker Solar Probe, Solar Orbiter, BepiColombo). A közelmúltban már több alkalommal lehetőség nyílt szoláris eseményekre vonatkozóan a Naprendszer különböző pontjaiban tartózkodó űrszondák által mért adatok összevetésére, illetve a jövőben is terveznek ilyen mérési kampányokat [13]. Ezáltal jobban megérthetjük a napszélben terjedő struktúrák térbeli és időbeli fejlődését.



10. ábra: A 2020. június 23-án észlelt CME esemény. (a) WSA/THUX háttér napszél a szoláris egyenlítő síkjában, illetve (b) egy meridionális síkban a Föld hosszúságán (2020. június 27-én, 01:00 UT-kor) (c) STEREO-A H11/2 Jmap, a CME-ről készült H11 felvételekkel. A (d) panelen a Parker Solar Probe (felső), a BepiColombo (középső), valamint a Wind (alsó) űrszondák in situ mágnesesestér-mérései láthatók [14]

Egy öt űrszondát (Solar Orbiter, BepiColombo, Parker Solar Probe, Wind, STEREO-A) magában foglaló észlelési sorozat 2020 áprilisától kezdődően egy 1 éves intervallumot ölelt fel [14]. A tanulmány szerzői a STEREO-A helioszférikus képalkotó berendezéseit felhasználva olyan ICME (interplanetáris

koronkidobódás) eseteket kerestek, amelyeknél a belső Naprendszer különböző pontjaiban tartózkodó űreszközök nagyobb szeparáció esetén is in situ észlelhetnék a kifelé terjedő lökeshullámfrontot. Ennek során összesen 17 olyan szoláris eseményt vizsgáltak, amelyek térbeli kiterjedését és evolúcióját minden korábbinál részletesebben lehetett tanulmányozni. Az eredmények felhasználhatók az ICME-k mágneses struktúrájának modellezéséhez, a fluxuscsövek és lökeshullámok interplanetáris térben történő evolúciójának és globális alakzatának megismeréséhez, valamint a szoláris eredetű nagyenergiájú részecskék terjedésének tanulmányozásához. A 25. napciklus csak most kezd erősödni, és az ilyen és ehhez hasonló tanulmányok nagymértékben hozzájárulnak az űridőjárás működésének és hatásmechanizmusainak megértéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Orsini S. et al. (2010): SERENA: A suite of four instruments (ELENA, STROFIO, PICAM and MIPA) on board BepiColombo-MPO for particle detection in the Hermean environment. *Planetary and Space Science*, 58, 166
- [2] Steigerwald B. (2009): Magnetic Tornadoes Could Liberate Mercury's Tenuous Atmosphere, NASA Goddard Space Flight Center. https://www.nasa.gov/mission_pages/messenger/multimedia/magnetic_tornadoes.html
- [3] Broadfoot A.L. et al. (1974): Mercury's Atmosphere from Mariner 10: Preliminary Results. *Science*, 185, 166
- [4] Domingue D.L. et al. (2007): Mercury's Atmosphere: a Surface-Bounded Exosphere. *Space Science Reviews*, 131, 161
- [5] Thomas H. et al. (2011): MESSENGER Observations of the Spatial Distribution of Planetary Ions Near Mercury. *Science*, 333, 1862
- [6] Benkhoff J. et al. (2021): BepiColombo – Mission Overview and Science Goals. *Space Science Reviews*, 217, 90
- [7] Milillo A. et al. (2020): Investigating Mercury's Environment with the Two-Spacecraft BepiColombo Mission. *Space Science Reviews*, 216, 93
- [8] Bebesi Zs. et al. (2020): A BepiColombo űrmisszió mérföldkövei és tudományos célkitűzései a Merkúr bolygónál. *Fizikai Szemle*, 70, 236
- [9] Mangano V. (2021): BepiColombo Science Investigations During Cruise and Flybys at the Earth, Venus and Mercury. *Space Science Reviews*, 217, 23
- [10] Volwerk M. et al. (2021): Venus's induced magnetosphere during active solar wind conditions at BepiColombo's Venus 1 flyby. *Annales Geophysicae*, 39, 811
- [11] Fox N.J. et al. (2016): The Solar Probe Plus Mission: Humanity's First Visit to Our Star. *Space Science Reviews*, 204, 7
- [12] Müller D. et al. (2020): The Solar Orbiter mission. *Astronomy & Astrophysics*, 642, A1
- [13] Hadid L.Z. et al. (2021): BepiColombo's Cruise Phase: Unique Opportunity for Synergistic Observations. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, DOI: 10.3389/fspas.2021.718024
- [14] Möstl C. et al. (2022): Multipoint Interplanetary Coronal Mass Ejections Observed with Solar Orbiter, BepiColombo, Parker Solar Probe, Wind, and STEREO-A. *The Astrophysical Journal Letters*, 924, L6