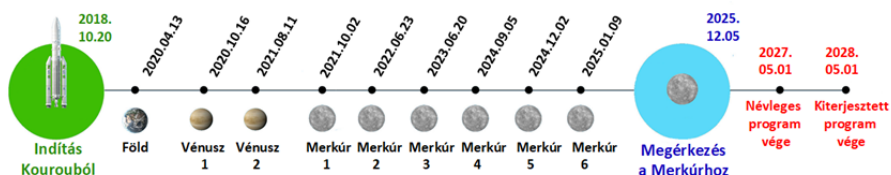


A BepiColombo űrprogram

Szalai Sándor¹, Kecskeméty Károly¹, Steinbach Péter^{2,3}

¹MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, ²ELTE Űrkutató Csoport,
³MTA–ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport

2018. október 20-án hajnalban sikeresen indították a BepiColombo összetett űrszondát az ESA legnagyobb, Ariane–5 rakétájával Kourou-ból a Napunkhoz legközelebbi bolygóhoz, a Merkúrhez. A program tervezése 2005-ben kezdődött és több jelentős áttervezés után készült el a szonda, melynek a Merkúrhez érkezése 2025. december 5-ére várható. A BepiColombo két keringő egységet (orbitert) foglal magába, melyek a terv szerint egy évig fogják kutatni a Merkúr szilárd és olvadt vas-szulfid magját, felszínét, mágneses terét és a bolygót körülvevő igen ritka légkört. A hosszú idejű utazás oka az indítási energia korlátja, aminek ellensúlyozására a Giuseppe (becenevén Bepi) Colombo olasz matematikus és mérnök közel fél évszázada kidolgozott ötlete alapján az útba eső bolygók gravitációs terének felhasználásával gyorsítják a szondát. Az ő tiszteletére lett a program neve BepiColombo. A hét évig tartó Merkúr-megközelítés 9 gravitációs gyorsítással, valamint ion- és kémiai hajtóművek segítségével valósul meg (1. ábra).



1. ábra: Az útutazás gravitációs gyorsításainak időrendje. (Forrás: ESA)

Az összetett űrszonda átrepülése a Merkúrhez az ESA irányításával történik. Ennek során 18-szor kerüli meg a Napot az ESA fejlesztésű MTM-mel (*Mercury Transfer Module*) egymáshoz rögzített MPO (*Mercury Planetary Orbiter*, ESA) és a japán készítésű MMO (*Mercury Magnetospheric Orbiter*, JAXA), kiegészülve egy Nap sugárzását árnyékoló egységgel (védőpajzs). Az átrepülés a két hatalmas (42 m²) napelemtáblával (2. ábra) rendelkező MTM egység irányításával történik. A két napelemtábla 15 kW teljesítménye nemcsak a szonda elektronikájának működését szolgálja, de a gyorsítást szolgáló 4 ionhajtóművet is működteti.

Az MTM egységen még 24 kémiai – pályakorrekciót és a fékezést szolgáló – segédrakéta van. A Nap közelsége azt a veszélyt rejti magában, hogy egy esetleges irányítási hiba miatt a Nap hatalmas gravitációja nem kívánt, korrigálhatatlan irányba téríti el.

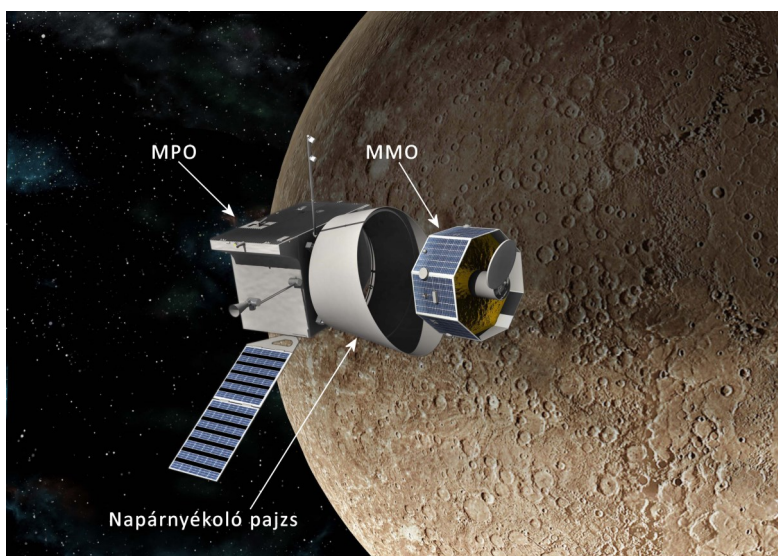


2. ábra: Az MTM egyik napelemtáblájának a szerelése. (Forrás: ESA)

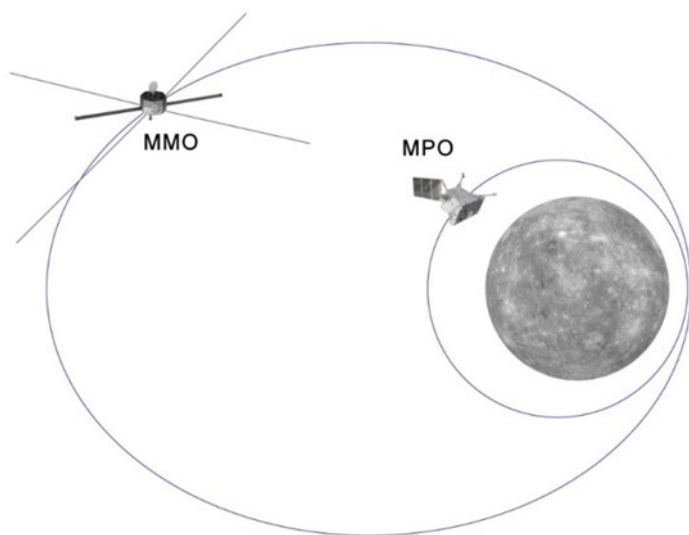
Az MTM egység az indítás után mintegy fél órával rádiókapcsolatot létesített, majd 12 óra múltán képeket küldött a Földre. A tudományos műszerek tesztelése is megkezdődött néhány nap elteltével, a SERENA rendszer december 15-én került sorra. A magyar tervek szerint készült PICAM műszert a nagyfeszültség kivételével bekapcsolták és az elvárásoknak megfelelően működött. A nagyfeszültség tesztelésére 2019 júliusában kerül sor.

Az összeszerelt négy egység (MTM, MPO, védőpajzs és MMO) az átrepülés alatt 9 milliárd km-t tesz meg és legnagyobb sebessége 60 km/s lesz, a Földtől való legnagyobb távolsága 240 millió km. Az indításkor a négy egység tömege összességében 4100 kg volt, ami az 1400 kg pályakorrekciós üzemanyagot is tartalmazta. Az MTM 1100 kg, az MPO 1200 kg, a védőpajzs 145 kg tömegű (a 20 kg-os, MMO-t felpörgető és kilövő egységgel) valamint a 255 kg-os MMO. A Merkúrhoz érve az egységek szétválnak (3. ábra).

A Merkúrnál a két tudományos űrszonda már egymástól független irányítással (ESA és JAXA), azonos sarki pályasíkokban áll különböző ellipszispályákra (4. ábra). Az MPO-n a 11 tudományos berendezés tömege 85 kg, a MMO-on pedig az öt tudományos kísérlet eszközei együtt 45 kg tömegűek. Az önálló telemetriai kapcsolatuk a Földdel az MPO esetében 50 kbit/s, az MMO-nál pedig 5 kbit/s átviteli sebességű.



3. ábra: A Merkúr közelében szétváló egységek; az MTM már korábban leválik.
(Forrás: ESA)



4. ábra: Az MMO és MPO szondák pályái. (Forrás: ESA)

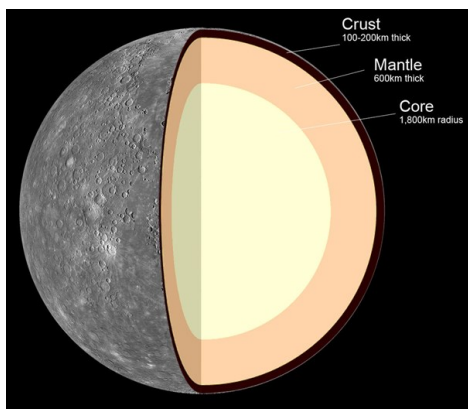
Az MMO elnyúlt sarki pályán kering majd (590 km x 11640 km), keringési ideje 9,3 óra, a Nap irányára merőleges tengely körüli forgással stabilizált (4 s). A 3 tengelyre stabilizált MPO pályája közepesen elnyúlt (480 km x 1500 km), keringési ideje 2,3 óra.

Merkúr: az egyik legnehezebben elérhető célpont a Naprendszerben

A Naphoz legközelebbi bolygót eddig csak két NASA űrszondának, a Mariner-10-nek és a MESSENGER-nek sikerült megközelítenie. A bolygót azért nehéz elérni, mert ugyan a Merkúr pálya menti sebessége nagyobb, mint a Földé, paradox módon mégis fékezni kell az űrszondát. Erre szolgálnak a hintamánőverek, az ionhajtómű ehhez nem elég, csak a bolygó körüli pályára álláshoz szükséges. Ilyen közel a Naphoz a napsugárzás erős, a Merkúr Naphoz közeli oldalán a Földön mérhető besugárzási energiának több mint tízszeresét kitevő a terhelés (napközben 14 kW/m^2). Emiatt a szonda rendkívüli hőterhelésnek is van kitéve: a bolygó napsütötte oldalán a hőmérséklet a kb. 430 Celsius-fokot (700 K) is eléri, míg az árnyékos oldalán mintegy $-180 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra (90 K) hűl le.

A római mitológiában az istenek hírvivőjéről, Mercuriusról (a görögöknél Hermész) elnevezett bolygó több szempontból is különleges. Létezése ősidők óta ismert, hiszen ha nehezen is, de szabad szemmel a Merkúr is látható a Földről. A Nap erős árnyékolása miatt a bolygó 88 napos keringési ideje 3:2 arányú rezonanciában áll 59 napos tengelyforgási idejével. Még érdekesebb, és bolygórendszerünk keletkezésének megértése szempontjából is fontos, hogy akárcsak a Vénusznak, sem holdja, sem gyűrűje nincs.

Mit tudunk a Merkúrról?

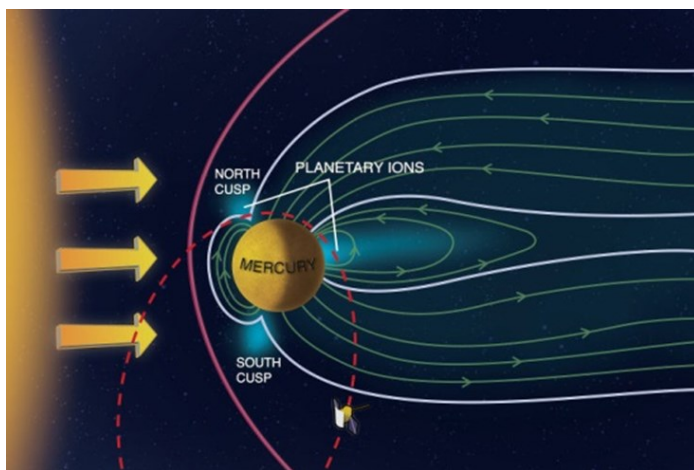


5. ábra: A Merkúr bolygó belső szerkezete. Crust = kéreg, Mantle = köpeny, Core = mag. (Forrás: Wikipedia)

A NASA MESSENGER űrszondája a 2011 és 2015 között lezajlott látogatása során már sok titkát feltárta a bolygónak: például hogy a felszínén észlelt, a Holdéhoz hasonló meteoritkráterek és esetleges vulkanikus síkságok mellett a sarkok közelében vízjég található, amely a feltételezett koránál fiatalabbnak tűnik. A bolygó pontos tömegét és ezzel belső szerkezetét pedig a Mariner-10 pályamérései alapján derítették fel: a mérések felfedték, hogy a 4800 km át-

mérőjű bolygó térfogatának 70%-át a fémes mag teszi ki (5. ábra), amely arányaiban a legnagyobb fémmag egy bolygó esetében a Naprendszerünkben. A vékony köpeny és kéreg nagy részét a bolygó feltehetően az elszenvedett ütközések során veszítette el.

A mag többségben vasból és kénből áll, a belső régiókban szilárd, a mag külső részében folyékony állapotban, ezeket szilikátokból álló köpeny veszi körül. A mag a dinamóeffektus révén mágneses teret hoz létre, amelynek nagysága a földinek csupán 1%-a, viszont elegendően erős ahhoz, hogy a napszélben akadályt képezve azt eltérítse, és kis méretű magnetoszférát hozzon létre (6. ábra). Az így létrejött, döntően dipólus jellegű mágneses tér erősen aszimmetrikus, az északi oldalon megközelítőleg háromszor erősebb, mint a délin. A bolygó körül igen ritka és nagyon változékony atmoszféra alakult ki, amelynek annyira kicsi a sűrűsége (a felszíni nyomás 14 nagyságrenddel kisebb a Merkúr felszínén, mint a Földön), hogy a ritka ütközések miatt nem viselkedik gázként, emiatt inkább exoszférának nevezzük. Az exoszférát többségében a molekuláris oxigén mellett hidrogén, hélium, illetve a felszínből a mikrometeorok és a napszél által kiszakított fém (elsősorban nátrium) atomok alkotják.



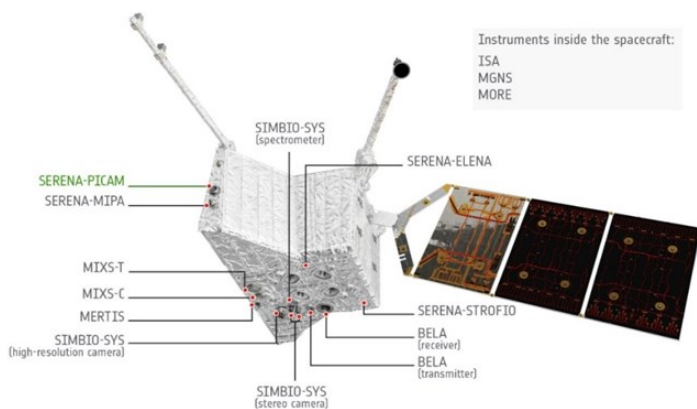
6. ábra: A Merkúr magnetoszférája. Feliratok: North Cusp = északi kürtő, South Cusp = déli kürtő, planetary ions = bolygó eredetű ionok. (Forrás: NASA)

A napszél a mágneses tér miatt csak a sarki kürtőkben éri el a felszínt. Az erős fénynyomás hatására a Nappal ellentétes oldalon igen hosszú, több mint 20 millió km-es, Na, Mg, K és Ca atomokból álló csóva alakul ki. A semleges atomok ionizációjával, pickup folyamattal, ill. a felszín bombázásával ionok is létrejönnek: elsősorban Na^+ és vízcsoport ionok. A Merkúr magneto-

szférájában észlelhetők a földihez hasonló mágneses viharok és mágneses erővonal összecsatolódási események is, amelyek a földinél tízszer gyorsabban mennek végbe. Az is gyakran előfordul, hogy a Napból érkező koronakitörések eltorzítják a mágnesoszférát.

Megválaszolandó kérdések

A Mariner-10 és a MESSENGER korábbi mérései révén több lényeges kérdés merült fel, amelyeket csak újabb helyszíni mérések válaszolhatnak meg. Alapvető kérdés a Naprendszer kialakulása előtti szoláris felhő összetétele, és az, hogy milyen folyamat során alakult ki a bolygórendszerünk. A Naprendszerünk kialakulásának megértésében segíthet annak a tisztázása, hogy miért magasabb a Merkúr sűrűsége (a Földet leszámítva), mint a többi kőzetbolygóé? Milyen arányban szilárd, illetve folyékony a Merkúr magja? Tektonikusan aktív-e a bolygó? Mi a belső mágneses tér eredete? Miért nem észlelhető vas a bolygó exoszférájában? A sarki kráterek állandó árnyékban lévő mélyén valóban vízjég, vagy kén található? Hogyan alakul ki a bolygó exoszférája, ott milyen fizikai és kémiai folyamatok zajlanak? Pontosan hogyan hat kölcsön a napszél a bolygó mágneses terével? Lehet-e pontosítani a Merkúr perihélium-vándorlásának értékét a relativitáselmélet tesztelése céljából?



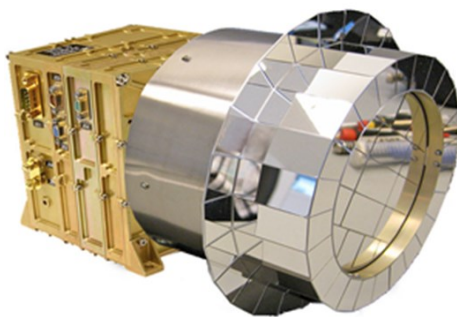
7. ábra: Az MPO egységen lévő műszerek elhelyezkedése. (Forrás: ESA)

A Mercury Planetary Orbiter műszerei

1. Magasságmérő, BELA (*BepiColombo Laser Altimeter*)
2. Rugós gyorsulásmérő, ISA (*Italian Spring Accelerometer*)
3. Magnetométer, MPO-MAG (*MPO Magnetometer*)
4. Infravörös spektrométer, MERTIS (*Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer*)
5. Gamma- és neutron-spektrométer, MGNS (*Mercury Gamma-ray and Neutron Spectrometer*)
6. Képalkotó röntgen-spektrométer, MIXS (*Mercury Imaging X-ray Spectrometer*)
7. Rádiófrekvenciás műszer, MORE (*Mercury Orbiter Radio-science Experiment*)
8. Ultraibolya spektrométer, PHEBUS (*Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy*)
9. Semleges és ionizált részecske analizátor, SERENA (*Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances*)
10. Sztereókamera látható tartományra, ill. spektrométer látható és infravörös tartományra, SIMBIO-SYS (*Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System*)
11. Röntgen- és részecske-spektrométer, SIXS (*Solar Intensity X-ray and Particle Spectrometer*)

Az olasz vezetésű SERENA műszeregyüttes négy érzékelőből áll:

1. ELENA (*Emitted Low-Energy Neutral Atoms*): a Merkúr felszínéről távozó semleges gázokat méri a 20 eV ÷ 5 keV tartományban.
2. STROFIO (*STart from a ROTating Field mass spectrOmeter*): a semleges részecskék analizátora, az exoszféra gáz összetevőit méri.
3. MIPA (*Miniature Ion Precipitation Analyser*): ion monitor, amely a felszíni plazmafolyamatok láncolatát vizsgálja.
4. PICAM (*Planetary Ion CAMEra*): iontömeg-spektrométer, amely fényképezőgépként működik a töltött részecskék számára, hogy tanulmányozza a felszíni ionizációs folyamatok láncolatát. A PICAM műszer fejlesztését a grazi intézet (Institut für Weltraumforschung – IWF) fogta össze.

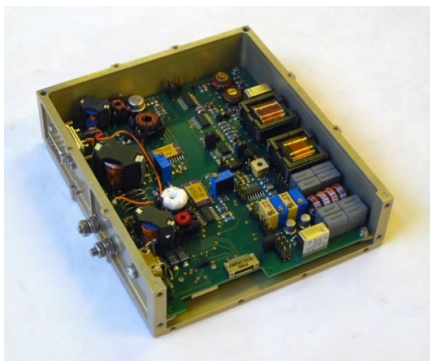


8. ábra: A PICAM műszer fényképe.
(Forrás: IWF)

A magyar kutatók a PICAM iontömeg-spektrométer fejlesztésében vettek részt. Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont mérnökei fejlesztették ki a Planetáris Ion Kamerát működtető alacsony feszültségű tápegységet, valamint a MPO űrszonda szimulátorát, az SGF Kft. bevonásával.

A PICAM tulajdonképpen iontömeg-spektrométer, amely ionokat detektálva teljeség-kameraként működik töltött részecskék számára, az űrszonda által ki nem takart térszögben. Az ionkamera kísérlet célja, hogy tanulmányozzuk azoknak a folyamatoknak a láncolatát, amelyek révén a felszínről semleges kirepülő atomok végül ionizálódnak és kölcsönhatásba lépnek a napszéllel. A PICAM ionkamera mérni fogja az alacsony, 100 eV és 3 keV közötti energiájú ionok beesési irányát, az energia/töltés és tömeg/töltés arányokat, igen jó felbontással a Merkúr ritka atmoszférájában. Ezzel a PICAM meg fogja tudni határozni az ionok tömegösszetételét, energia- és szögeloszlását a Merkúr plazmakörnyezetében. Ezen keresztül megérthetjük a magnetoszférában lezajló folyamatok részleteit.

A fedélzeti elektronika megalkotása a BepiColombo fejlesztői számára komoly kihívást jelentett, hiszen a szondán időnként több mint 300 °C hőmérséklet is felléphet. A mérnökök a műszerek e magas hőmérsékletre való felmelegedését kívülről különleges, többrétegű borítással próbálják megakadályozni. A műszereken belül keletkező hőt pedig megfelelő hőelvezetésekkel az űrszonda árnyékban lévő oldalára vezetik el.



9. ábra: A kifejlesztett tápegység minősítő példánya.
(Forrás: Wigner FK)

A PICAM alacsonyfeszültségű tápegysége

Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont által fejlesztett tápegység minősítő példányának fényképe a 9. ábrán látható. A tápegység állítja elő a PICAM elektronikájához szükséges fix +1,5 V, +3,3 V, +5 V, ± 12 V és +24 V, illetve az ionok energia szerinti szétválasztását szolgáló két tartományban is folyamatosan változtatható feszültségeket: ± 2 V $\div$ ± 25 V, ± 15 V $\div$ ± 100 V.

A fenti feszültségeket galvanikusan leválasztva kellett létrehozni, hogy esetleges hibája a fedélzet többi egységének működését ne korlátozza. A PICAM öt különbö-

ző példányához (laboratóriumi, mérnöki, minősítő, repülő és tartalék) kellett a tápegységből a PICAM bemérései során egyre pontosabb követelmények szerinti példányt szállítani.

A földi ellenőrző berendezés

A földi ellenőrző berendezés (*Electrical Ground Support Equipment* – EGSE) az űrszonda elektromos jeleit szimulálja, hogy a szondára szerelés előtt mind a fejlesztés, mind a kalibrálás fázisában tesztelni lehessen a PICAM berendezést. Biztosítani kell a fedélzeti 28 V-os tápfeszültséget, valamint szimulálni a vezérlő és adatgyűjtő buszt. A szondán a SpaceWire buszrendszert alkalmazzák, amely az ESA által kifejlesztett fedélzeti kommunikációs szabvány. Ez a szabvány viszonylag kis energiafogyasztás mellett nagy adatátviteli sebességet biztosít. A szabvány a fizikai és az adatkapcsolati rétegeket rögzíti. A PC-104-es szabványú beágyazott processzor buszához fejlesztettünk SpaceWire illesztőegységet.

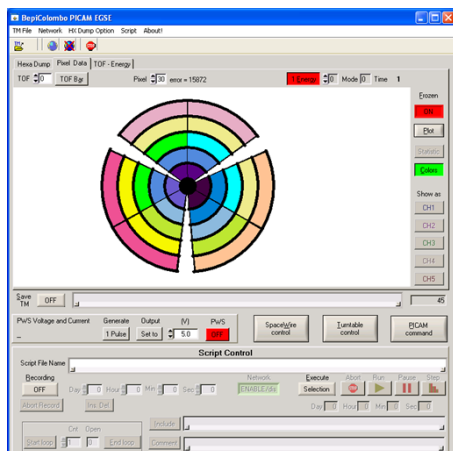


10. ábra: A PICAM bemérését szolgáló jelszintű szimulátor. (Forrás: SGF Kft.)

A kifejlesztett EGSE két egységben valósult meg: a jelszintű szimulátor (10. ábra) egy beágyazott processzor alapú egység, amelyen valós idejű LINUX operációs rendszer fut. Ez Ethernet kapcsolaton keresztül kommunikál a kereskedelmi forgalomban beszerezhető PC-vel, amely a grafikus kezelői felületet (11. ábra) biztosítja. A grafikus kezelői felület útján vezérlik a mérnökök és a kutatók különböző üzemmódokba a PICAM szenzort, a szolgálati információt, és ezen keresztül jelenítik meg a tudományos mérési adatokat különböző formákban. A gyakran használt parancsok nyomógombok segítségével, továbbá összetett parancsszekvenciák is előre elkészített fájlból kiadhatók.

A szolgálati telemetria csomagok külső leíró fájl dekódolása révén „olvasható” formában jelennek meg. A PICAM szenzor

beméréséhez a BepiColombo szonda adatgyűjtő és vezérlő rendszerét szimuláló földi ellenőrző berendezést az SGF Kft. fejlesztette, két példányt kellett szállítani. A PICAM műszer SpaceWire adatforgalmának monitorozására alkalmas jelszintű szimulátor módosított változata is elkészült.



11. ábra: A 6 érzékelő beütésszámával arányos színes megjelenítés.
(Forrás: SGF Kft.)

A Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)

A Merkúr környezetének feltárásában két körülmény meghatározó. Az űrszondás (Mariner-10, MESSENGER) méréseket megelőző planetológiai modellekkel ellentétben a bolygónak van – jó közelítéssel dipól – mágneses tere. A Merkúrt a napszélből származó, illetve a felszínéről kilökött, és fotoionizálódott, majd a mágneses térben becsapdázódott ún. pick-up ionok és plazma közeg veszi körül. Bár a mágneses tér momentuma a földinél négy

nagyságrenddel kisebb és a plazmakörnyezet ritkább annál, hogy ionizált, állandó légkörről beszélhetnénk, a Merkúr anizotrop plazmája a Földével rokon jellegűt mutat, a környezetünkben ismert fizikai folyamatok, jelenségek nagy csoportja várható és vizsgálандó a Merkúrnál. Ezek eredményei a bolygó kutatási célon túl a földi környezet működésének, a napszél-magnetoszféra kölcsönhatás dinamikájának jobb megértését is segíti.

A BepiColombo kisebbik, japán irányítással megvalósult MMO szondája műszerezettségében, tudományos programjában a Merkúr környezetében kulcsszerepet játszó magnetoszféra vizsgálatára fókuszál. Ezt tükrözi az elnyújtott ellipszis pálya, ami a bolygótalan napszélben és a magnetoszféra több régiójában, meridiánsíkban lehetővé teszi a bolygó környezet vizsgálatát (ld. a 4. és 6. ábrákat).

Az MMO szonda öt tudományos kísérlete:

1. Háttér mágneses tér mérések (MGF, *Magnetic Field Investigation*): osztrák kísérlet, az MPO-MAG-gal azonos, tartórúdra szerelt fluxgate és platformra szerelt magnetométerekkel, 64 Hz maximális sávszélesség.

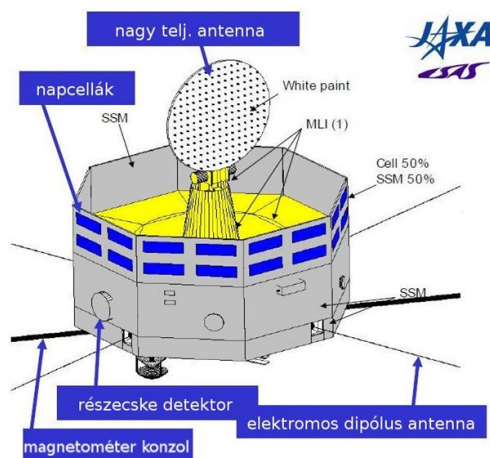
2. Energikus összetevők mérése (MPPE, *Mercury Plasma Particle Experiment*): hat szenzor a plazma energikus komponenseinek detektálására és egy az energikus semleges atomok észlelésére.
3. Spektrális képalkotás légköri Na-összetevőkről (MSASI, *Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager*): a bolygó felszíne felé irányított, a Na D2 emissziós vonalára kalibrált spektrométer.
4. Por monitorozása (MDM, *Mercury Dust Monitor*): üstökös- és kisbolygóeredetű porok sűrűség-, momentum- és iránymérése.
5. Plazma hullámmérések (PWI, *Plasma Wave Investigation*): széles frekvenciasávban előforduló (várható) hullámjelenségek vizsgálata több független, elektromos és mágneses komponenst mérő szenzor adatából – magyar tudományos részvétellel (ld. lentebb).

A közegvizsgálatokban bevett *in situ* részecskemérések és a nélkülözhetetlen magnetométeres adatok rögzítése mellett az MMO-n van a Merkúr kutatásának történetében először hullámmérés, a mágneses térrel átjárt plazmában terjedő villamos jelek regisztrálása (PWI). Az űrszonda tengely körüli forgása (15 fordulat/perc) a szondát stabilizálja, és biztosítja, hogy pl. a hullámmérés csúcstól csúcsig 32 méteres dipól elektromos antennakábele rögzített pozícióban, kifeszítve legyen.

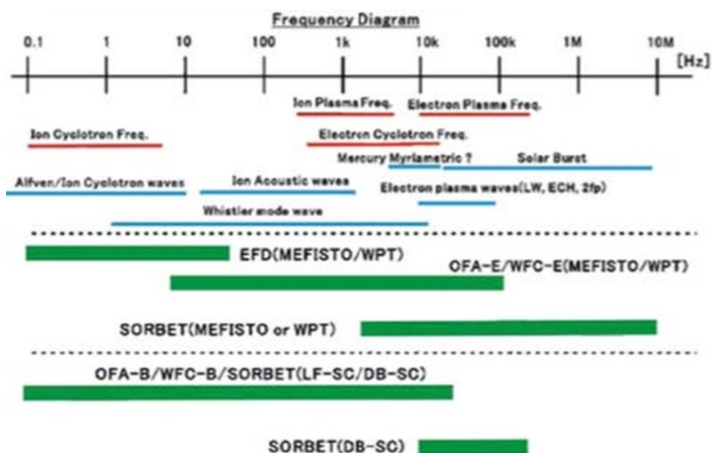
A részecskemérések jellemzően nagyenergiájú (hipotermális, szupratermális, relativisztikus) összetevőket detektálnak. A Merkúrnál is számbeli többséget alkotó hideg plazmáról jobbára mesterségesen gerjesztett, vagy a közegben terjedő természetes keltésű elektromágneses jelekből nyerünk ismeretet. Emellett a hullámkísérletek döntően nem *in situ*, hanem nagyobb régiók folyamatait leképező mérések. A Merkúrról már rendelkezésre álló fizikai képek és modellek alapján megalapozottan gondolhatjuk, hogy a dinamikusan viselkedő napszél-magnetoszféra kölcsönhatás révén, széles spektrumon találkozunk hullámjelenségekkel, így pl. lökéshullámnál fejhullámmal, erővonal rezonanciával, pulzációval, erővonal átkötődést kísérő gyorsítások emissziójával, hullám-részecske kölcsönhatások indukált emisszióival. Az MMO PWI kísérlet több, párhuzamos hullámmérést fog egybe, a szenzorok a bolygó körül várható hullámjelenségek minél teljesebb regisztrálását célozzák. E hullámjelenségek tulajdonságai (pl. frekvenciasáv, jelszerkezet, időbeni hossz), vagy előfordulásuk helye, ideje (a magnetoszféra melyik régiójában, milyen napszél- és más környezeti paraméterek mellett) ma még csak modellezhetők földi párhuzam alapján. A PWI szenzorok frekvenciaátfogása ennek megfelelően kellően tág.

A Merkúrnál a Nap extrém besugárzása miatt a fedélzeti elektronika, benne a tároló, feldolgozó és telemetria egységek teljesítménye, a disszipálható hő erősen korlátozott. Bár a közegről értékes információt hordozó hullámjelenségek nagy számban vannak jelen a bolygó környezetében, azok teljes körű fedélzeti jelfeldolgozásához, vagy az off-line kiértékelést lehetővé tevő tömeges földi lesugárzáshoz szükséges kapacitás nem áll rendelkezésre az MMO-n. Ennek az ellentmondásnak a tompítására, a korlátozott lehetőségek ellenére a tudományosan értékes, kinyerhető információ maximálására tett javaslatot a japán félnél az ELTE Űrkutató Csoport és a BL-Electronics Kft. közösen a BepiColombo előkészítés kezdeti fázisában, amit az akkor még ISAS, később JAXA befogadott.

A PWI szoftverrendszerében szereplő ISDM (*intelligent signal detection module*) a szenzorok jelét, nyers adatformáit elemzi és értékeli. Az időtartományú jelalakokból központi FFT egység számít spektrum vektor sorozatot, amit átad az ISDM-nek, az algoritmus ezeken azonosít és paraméterez előre definiált jeltípusokat. A szoftvert a fejlesztés fázisában a priori ismeretek (pl. földi ismert jelenségek, jeltípusok) és modellszámítások (gerjesztés, jelterjedés merkúri viszonyok között) alapján kellett hangolni (működési paraméterek beállítása), tesztelni és végül a PWI környezetbe implementálni. Az ISDM elsődleges kimenetként az előre meghatározott jeltípusok, osztályok adatfolyamon megjelenését detektálja, főbb paramétereit szolgáltatja (intenzitás, kiterjedés időben és frekvenciában). Több spektrum vektort időben átfedő jelenségnél az anizotróp plazmában terjedéskor jellemző,



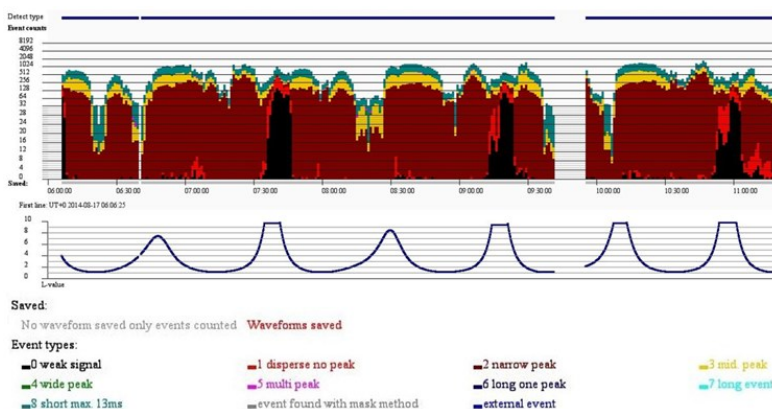
12. ábra: A forgásstabilizált, nyolcszögletű BepiColombo MMO szonda külső szerkezeti rajza. (Forrás: JAXA)



13. ábra: A BepiColombo MMO PWI kísérletben szereplő egységek (Mefisto/ WPANT, Sorbet) szenzorjai frekvenciaátfogása és néhány várható hullámjelenség frekvenciasávja (Forrás: JAXA)

karakterisztikus frekvencia változását is leköveti, ami a közegről és a terjedésről fontos ismeretet jelent. Ez a kimenet a teljes hullámformánál lényegesen kisebb, kezelhető adatmennyiség, kisebb információtartam árán.

A Föld környezetében végzett mérések tapasztalata alapján a vizsgálandó plazmafizikai jelenségek általában párhuzamosan jelennek meg részecske- és hullámmérés regisztrátumokban. A korlátos fedélzeti erőforrások miatt a műszerek, kísérletek optimális idejű ki- és bekapcsolása kiemelt jelentőségű – mérjen, amikor indokolt, és ne kössön le erőforrást, ha nem.



14. ábra: Az ISDM fedélzeti alkalmazása az előre definiált hullámjelenségek (osztályok) gyakoriságának változását mutatja alacsony Föld körüli műholdpálya mentén. (Relek/Vernon, forrás: BL-Electronics Kft.)

Az ISDM az elsődleges funkcióján túlmenően a fenti eseménydetektálással a teljes MPO-MMO kettős kísérleteinek indításához, megfelelő időben triggereléshez ad bemenő adatot, a két szondán koordinált méréseket tesz lehetővé.

Az ISDM algoritmus tesztelése nem csak szintetikus adatokon történt, hanem sikerrel működött már az orosz irányítással megvalósult Csibisz-M és Relek/Vernon földi mikroműholdakon, éles fedélzeti alkalmazásban, ahol az önálló hullámkísérletet a magyar (BL-Electronics Kft. és ELTE fejlesztésű) SAS3 fedélzeti eszköz biztosította.

Irodalomjegyzék

- [1] <http://sci.esa.int/bepicolombo/>
- [2] <https://www.cosmos.esa.int/web/bepicolombo/serena>
- [3] <http://sci.esa.int/bepicolombo/59287-bepicolombo-mpo-science-instruments/>
- [4] <http://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/current/mmo.html>
- [5] Orsini S., Livi S., Torkar K., Barabash S., Milillo A., Wurz P., Di Lellis A.M., Kallio E., and the SERENA team (2010): SERENA: A suite of four instruments (ELENA, STROFIO, PICAM and MI-PA) on board BepiColombo-MPO for particle detection in the Hermean environment. *Planetary and Space Science*, 58, 166
- [6] Kasaba Y., Bougeret J.-L., Blomberg L.G., Kojima H., Yagitani S., Moncuquet M., Trotignon J.-G., Chanteur G., Kumamoto A., Kasahara Y., Lichtenberger J., Omura Y., Ishisaka K., Matsumoto H. (2010). The Plasma Wave Investigation (PWI) onboard the BepiColombo/MMO: First measurement of electric fields, electromagnetic waves, and radio waves around Mercury. *Planetary and Space Science*, 58, 238
- [7] Szalai S., Sulyán J., Szalai L. (2007): Űrszondák új fedélzeti adatátviteli szabványa, *Elektronet*, 2007/5, 32
- [8] Sulyán J., Szalai L., Lipusz Cs., Szalai S. (2008): BepiColombo űrszonda adatgyűjtő és vezérlő rendszere, *Híradástechnika*, 2008/4, 24