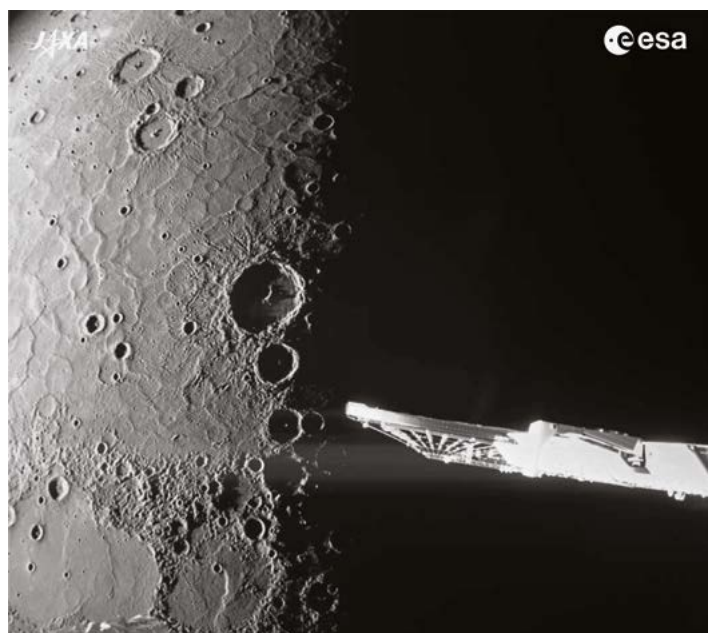




SZALAI SÁNDOR* – NAGY JÁNOS**

A BEPICOLOMBO ŰRPROGRAM MAGYAR RÉSZVÉTELLEL

Összefoglalás: A BepiColombo-misszió a Merkúr körüli pályára állított második űrszonda küldetése lesz. A Merkúr a belső Naprendszer legkevésbé feltárt bolygója. Az európai és japán kutatók, illetve mérnökök által készített két szonda műszerei által bővülnek majd a Naprendszer fejlődésével és a bolygók keletkezésével kapcsolatos ismereteink. A PICAM-kísérlethez nagy megbízhatóságú, az űrbeli körülményekre minősített tápegységet fejlesztettünk. A magyar kutatók mindkét űrszonda műszereinek fejlesztésében részt vettek, így a tudományos mérési adatokhoz elsőik között juthatnak hozzá.

Kulcsszavak: Merkúr, BepiColombo, DC-DC átalakító, földi ellenőrző berendezés, SERENA, PICAM, SpaceWire

Abstract: The BepiColombo mission will be flown by the second spacecraft to orbit Mercury. It is the least explored planet in the inner Solar System. The two probes, built by European and Japanese scientists and engineers, will add to our current knowledge about the evolution of the Solar System and the formation of planets. Hungarian researchers have been involved in the development of instruments on both probes, and will be among the first to have access to scientific measurements. For the PICAM experiment, we have developed a highly reliable power supply qualified for space conditions.

Keywords: Mercury, BepiColombo, DC-DC converter, electrical ground support equipment, SERENA, PICAM, SpaceWire

A Merkúr kutatására indított űrszonda 2025. január 8-án hatodik alkalommal haladt el a bolygó mellett, ezúttal 295 km távolságban a bolygó északi pólusa fölött, végrehajtva az utolsó „gravitációs lendítőmanő-

vert”, hogy 2026 végén pályára álljon a bolygó körül. A BepiColombo [1] űrprogram az Európai Űrgynökség (European Space Agency – ESA) és a Japán Űrgynökség (Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA) kö-

zös projektje. Ez a program 2005-ben indult és a Merkúr kutatására irányult. Többszöri halasztás után a BepiColombo egy Ariane-5 hordozórakétával 2018. október 20-án, magyar idő szerint 3:45-kor startolt a Kourou űrközpontból. A programot dr. Giuseppe „Bepi” Colombo (1920–1984) olasz matematikusról és mérnökről nevezték el, akinek a javaslata alapján korábban a Mariner-10 pályáját a NASA úgy módosította, hogy a Merkúr és a Vénusz bolygók gravitációs terének felhasználásával az űrszonda nemcsak elrepült a Merkúr mellett, hanem még két alkalommal visszatért a Merkúrhoz. A BepiColombo program keretében két tudományos célú űrszondát juttatnak Merkúr körüli pályára. A Merkúrhoz közelebb keringő szondát az ESA fejlesztette, amely elsődlegesen a bolygó felszínét és légkörét kutatja műszereivel (Mercury Planetary Orbiter – MPO). A másik szonda ellipszispályán kering majd a Merkúr körül, és a JAXA készítette (Mercury Magnetospheric Orbiter – MMO).

1. ÁBRA. A képek a BepiColombo rendszer szétválása előtt, 2025. január 8-án készültek az MTM egység 1-es számú megfigyelő kamerájával (M-CAM-1). Ez volt a Merkúr hatodik és egyben utolsó gravitációs pályamódosító megközelítése (787 km) (Forrás: ESA/ BepiColombo/MTM)

* Az MTA doktora, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, kutatóprofesszor emeritus. ORCID: 0000-0003-3979-084X

** PhD, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, témavezető. ORCID: 0009-0004-9491-0888





2. ÁBRA. BepiColombo űrszonda összeszerelés közben. Alul látható az MTM, felette az MPO, legfelül az MMO és jobbra lent a hővédő MOSIF (Fotó: ESA)

A két szonda együtt repül a Merkúrhoz két további egységgel összerakva, amelyeket szintén az ESA készített. (2. és 3. ábra) Az ún. szállítóegységre (Mercury Transfer Module – MTM) van rögzítve az MPO, majd ezután következik a hővédő egység (Magnetospheric Orbiter's Sunshield and Interface Structure – MOSIF). Ebben helyezték el a szétváláshoz szükséges MMO-egység felpörgetését és kilökését végrehajtó elektromechanikai rendszert.

A Merkúr a Naphoz legközelebbi és legkisebb bolygó, a Földhöz hasonló felépítésű. A BepiColombo a tervek szerint egy évig fogja kutatni a Merkúr magját, felszínét, mágneses terét és a bolygót körülvevő igen ritka légkört. A bolygó átlagos sűrűsége $5,427 \text{ g/cm}^3$, Nap körüli keringési ideje 88 nap, átlagos pálya menti sebessége $47,36 \text{ km/s}$, Naptól való közepes távolsága $57,9$ millió km, forgástengelyének ferdesége $2,1^\circ$, tengely körüli forgási ideje $58,65$ nap, felszíni hőmérséklete $-180^\circ\text{C} \div +430^\circ\text{C}$ között változik. A bolygó felszínét számos kráter borítja, vastartalmú magja miatt rendelkezik mágneses mezővel, melynek erőssége a földinek csupán 1% -a.

A BepiColombo küldetése különösen nagy kihívást jelent, mivel a Merkúr pályája nagyon közel van a Naphoz. Emiatt, vagyis a Nap erős fénye

okán is nehéz a bolygót a Földről megfigyelni. Az űrszondának a Merkúr körüli pályára álláshoz sok energiát kell veszítenie.

A Merkúrt korábban már két űrszonda is meglátogatta. Először a NASA Mariner-10 űrszondája három alkalommal repült el a bolygó mellett; a harmadik visszatérés volt a legközelebbi a felszínhez (327 km). Majd három évtizeddel később a Messenger volt a következő szonda, amely a légkört vizsgálta, és a bolygó felszínét térképezte. Több mint 200 ezer részletes képet készített a felszínről. Ez a szonda a Merkúrhoz jutásig 15 -ször kerülte meg a Napot. A Messenger hatszor hajtott végre úgynevezett gravitációs hintamanővert – egyszer a Föld, kétszer a Vénusz, háromszor a Merkúr mellett –, míg 2011 . március 18 -án a bolygó körüli, ellipszis alakú pályára állt. Az űrszonda küldetése 2015 -ben ért véget; rengeteg hasznos adatot gyűjtött a bolygó geológiájáról és mágneses mezőjéről.

A Mariner-10 és a Messenger korábbi mérései ellenére több nyitott kérdés maradt, amelyeket csak újabb helyszíni mérésekkel tudnak a kutatók megválaszolni. 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 tisztázása, hogy miért nagyobb a Merkúr sűrűsége (a Földet leszámítva), mint a többi kőzetbolygó. 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 alakult ki a bolygó exoszférája, ott milyen fizikai és kémiai folyamatok zajlanak? Pontosan hogyan van kölcsönhatásban a napszél a bolygó mágneses terével? Lehetséges-e pontosítani a Merkúr perihélium vándorlásának értékét a relativitáselmélet tesztelése céljából?

Az együtt utazó űrszondarendszer (MTM, MMO, MOSIF és MPO) az indítás után több pályakorrekció révén jut a végleges pályájára, összesen 9 hintamanőverrel (1 Föld, 2 Vénusz és 6 Merkúr), valamint ion- és kémiai hajtóművek segítségével. Az együtt repülő egységek Merkúrhoz irányítása (3. ábra) az ESA által történik. A Merkúrhoz jutásig 18 -ször kerüli meg a Napot. A nyolc évig tartó átrepülés a két hatalmas (42 m^2) napelemtáblával rendelkező MTM-egység vezérlésével történik. A két napelemtábla 15 kW energiája nemcsak az MTM-szonda elektronikus eszközeinek működését szolgálja, hanem az együtt repülő rendszer átrepülése során a gyorsítást szolgáló négy ionhajtóművet is működteti. Az MTM-egységen még 24 kémiai – pályakorrekciót és a fékezést szolgáló – segédrakéta található. A BepiColombo lesz a Merkúr körüli pályára állított harmadik és legösszetettebb küldetés.

Az összeszerelt négy egység (MTM, MPO, MOSIF és MMO) a Merkúr megközelítése során 9 milliárd km-t tesz meg; legnagyobb sebessége 60 km/s és a Földtől mért legnagyobb távolsága 240 millió km lesz. Az indításkor a négy egység tömege összességében 4100 kg volt, amely az 1400 kg pályakorrekciós üzemanyagot is tartalmazta. Az MTM 1100 kg , az MPO 1200 kg , a hővédő pajzs (MOSIF) 145 kg tömegű (a 20 kg -os MMO-t felpörgető és kilökő egységgel), az MMO pedig 255 kg -os, amelyből 45 kg a tudományos műszerek tömege. A Mer-


 MTM
szállítóegység

 MPO
felszín- és légkörkutató szonda

 MOSIF
hővédő és kilökőegység

 MMO
magnetoszférakutató-szonda

kűrhez érve az egységek szétválnak. (3. ábra) Az MMO elnyúlt poláris (a sarkok fölött elhaladó) pályán kering ($590 \times 11\,640$ km), melynek keringési ideje 9,3 óra, a Nap irányára merőleges tengely körüli forgással stabilizált (4 s). A három tengelyre stabilizált MPO pályája kissé elnyúlt (480×1500 km), keringési ideje 2,3 óra lesz.

A BepiColombo kisebbik, japán irányítással megvalósult MMO szondája műszerezettségében, tudományos programjában a Merkúr környezetében kulcsszerepet játszó magnetoszféra vizsgálatára fókuszál. Ezt szolgálja az elnyújtott ellipszis pálya, ami a bolygatatlan napszélben és a magnetoszféra több régiójában meridián síkban lehetővé teszi a bolygókönyezet vizsgálatát. Az MMO-szonda öt tudományos kísérletének műszerei:

- háttér mágnesestér-mérések (Magnetic Field Investigation – MGF): osztrák kísérlet, az MPO–MAG-gal azonos árbócra szerelt fluxgate és azzal azonos platformra szerelt magnetométerekkel, 64 Hz max. sávszélesség;
- nagy energiájú összetevők mérése (Mercury Plasma Particle Experiment – MPPE), hat szenzor a plazma nagy energiájú komponenseinek detektálására és a nagy energiájú semleges atomok észlelésére;
- spektrális képalkotás légkörben előforduló Na-mérése (Mercury So-

dium Atmosphere Spectral Imager – MSASI), a bolygó felszíne felé irányított, a nátrium emissziós vonalára kalibrált spektrométer;

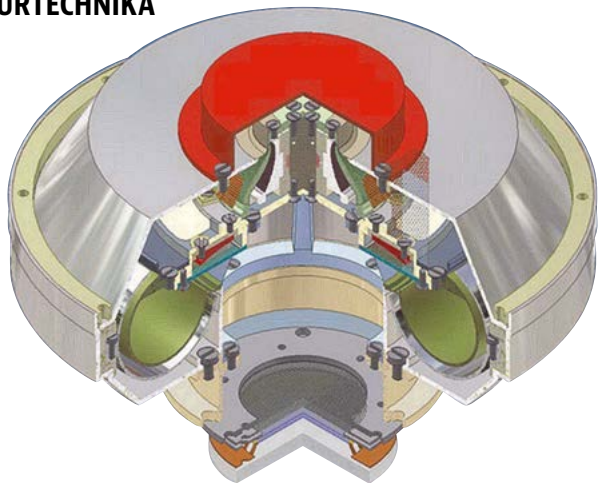
- por monitorozása (Mercury Dust Monitor – MDM): üstökös- és aszteroidaeredetű porok sűrűség-, impulzus- és iránymérése;
- plazmahullámok vizsgálatára (Plasma Wave Investigation – PWI), széles frekvenciasávban előforduló hullámjelenségek vizsgálatára több független, elektromos és mágneses komponens mérő szenzor adatából. A PWI-műszer fejlesztésében magyarok is részt vettek. A HUN-REN-ELTE (HUN-REN, az angol elnevezésből Hungarian Research Network, Eötvös Loránd Tudományegyetem) és a BL-Electronics Kft. a mérés indítójel- és eseményérzékelő részének (triggering and event detection system) szoftverét dolgozta ki. [2]

A közvetlen (in-situ) részecske-mérések és a nélkülözhetetlen magnetométeres adatok rögzítése mellett az MMO-n valósul meg a Merkúr kutatásának történetében először hullámmérés, a mágneses térrel átjárt plazmában terjedő elektromos jelek regisztrálása (PWI). Az űrszonda tengely körüli forgása a szondát stabilizálja, és biztosítja, hogy pl. a hullámmérés csúcstól csúcsig 32 méteres dipól elektromos antennakábele rögzített pozícióban, kifesztve legyen.

Az MPO-szonda $8,2 \text{ m}^2$ nagyságú napelemtáblája 600 W elektromos teljesítményt biztosít. A szonda 3 tengelyre stabilizált, és a pályáját ionmeghajtással tudják vezérelni. A szonda az alábbi 11 tudományos műszert tartalmazza:

- magasságmérő, BELA (BepiColombo Laser Altimeter);
- rugós gyorsulásmérő, ISA (Italian Spring Accelerometer);
- magnetométer, MPO–MAG (MPO Magnetometer);
- infravörös spektrométer, MERTIS (Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer);
- gamma- és neutronspektrométer, MGNS (Mercury Gamma-ray and Neutron Spectrometer);
- képalakító röntgenspektrométer, MIXS (Mercury Imaging X-ray Spectrometer);
- rádiófrekvenciás műszer, MORE (Mercury Orbiter Radio-science Experiment);
- UV-spektrométer, PHEBUS (Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy); [4]

3. ÁBRA. A BepiColombo a bolygóközi repülése közben (balra fent), illetve a Merkúrnál szétváló egységei (Forrás: ESA)



4. ÁBRA. A környűrű-szerkezetű PICAM-detektor metszeti képe (Forrás: IWF)

- exoszféra kutató SERENA (Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances) a semleges és ionizált részecskéket négy, egymást kiegészítő tartományban elemző rendszer;
- sztereókamera látható tartományra, illetve spektrométer látható és infravörös tartományra, SIMBIO-SYS (Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System);
- röntgen- és részecskespektrométer, SIXS (Solar Intensity X-ray and Particle Spectrometer). [3]

A Merkúrhoz érkezés 2026. november 21-ére tervezett, amikor a két szonda (MPO és MMO) a tervezett kutatási pályáira fog állni, hogy 2027 tavaszán megkezdjék tudományos kutatási

programjaikat. A BepiColombo Merkúr körüli végleges pályáján a hőmérséklet meghaladhatja majd a 350 °C-ot. A tudományos méréseket végző két szondán a műszerek elektronikáját a hővédő burkolat alatt, a szondák belsejében helyezték el, csak az érzékelők nyitottak a világűr felé. A műszereket gondosan védeni kellett a Nap sugárzása és a bolygóról érkező infravörös sugárzás ellen.

Az MPO-szondán található, olasz vezetésű SERENA fejlesztésében 15 ország kutatói és mérnökei vettek részt: Ausztria, Finnország, Franciaország, Görögország, Hollandia, Írország, Japán, Magyarország, Olaszország, Oroszország, Svájc, Svédország, Szlovákia, az Egyesült Királyság és az Amerikai Egyesült Államok. A SERENA műszeregyüttest alkotó detektorok:

- 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 analízátora (<1 eV); az exoszféra gázösszetevőit méri;
- 3. MIPA** (Miniature Ion Precipitation Analyser): ionmonitor (15 eV – 15 keV), amely a felszíni plazma folyamatok láncolatát vizsgálja;

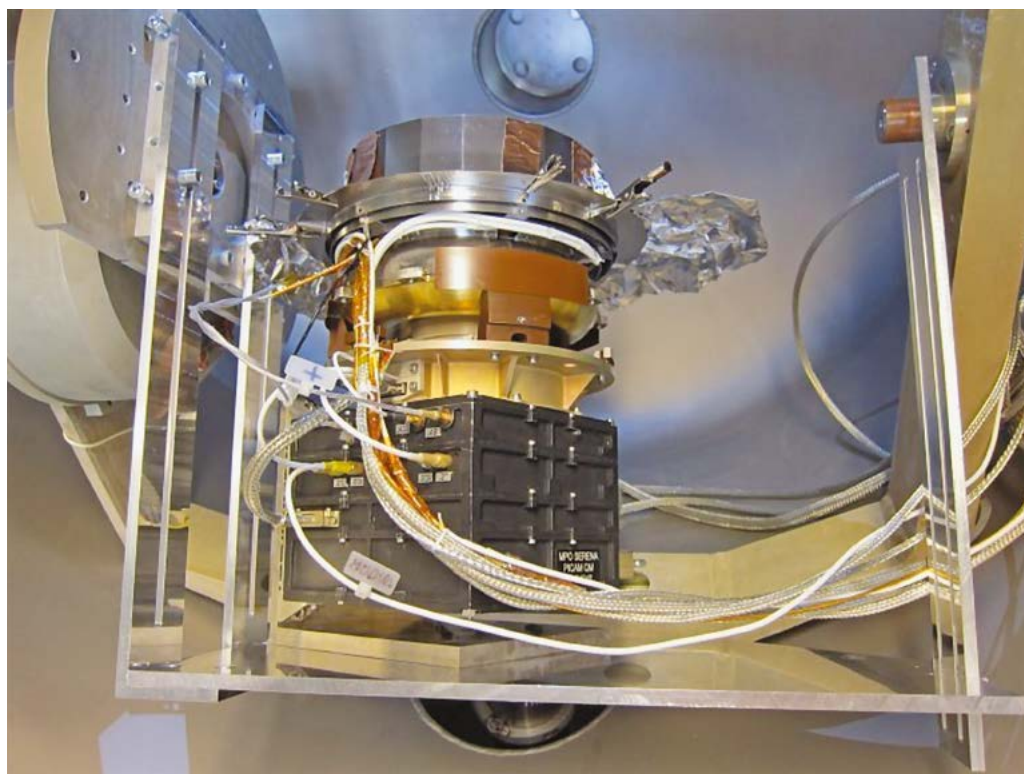
4. PICAM (Planetary Ion Camera): iontömeg-spektrométer (<3 keV), amely „fényképezőgépként” működik a töltött részecskék számára, a felszíni ionizációs folyamatok láncolatának tanulmányozására.

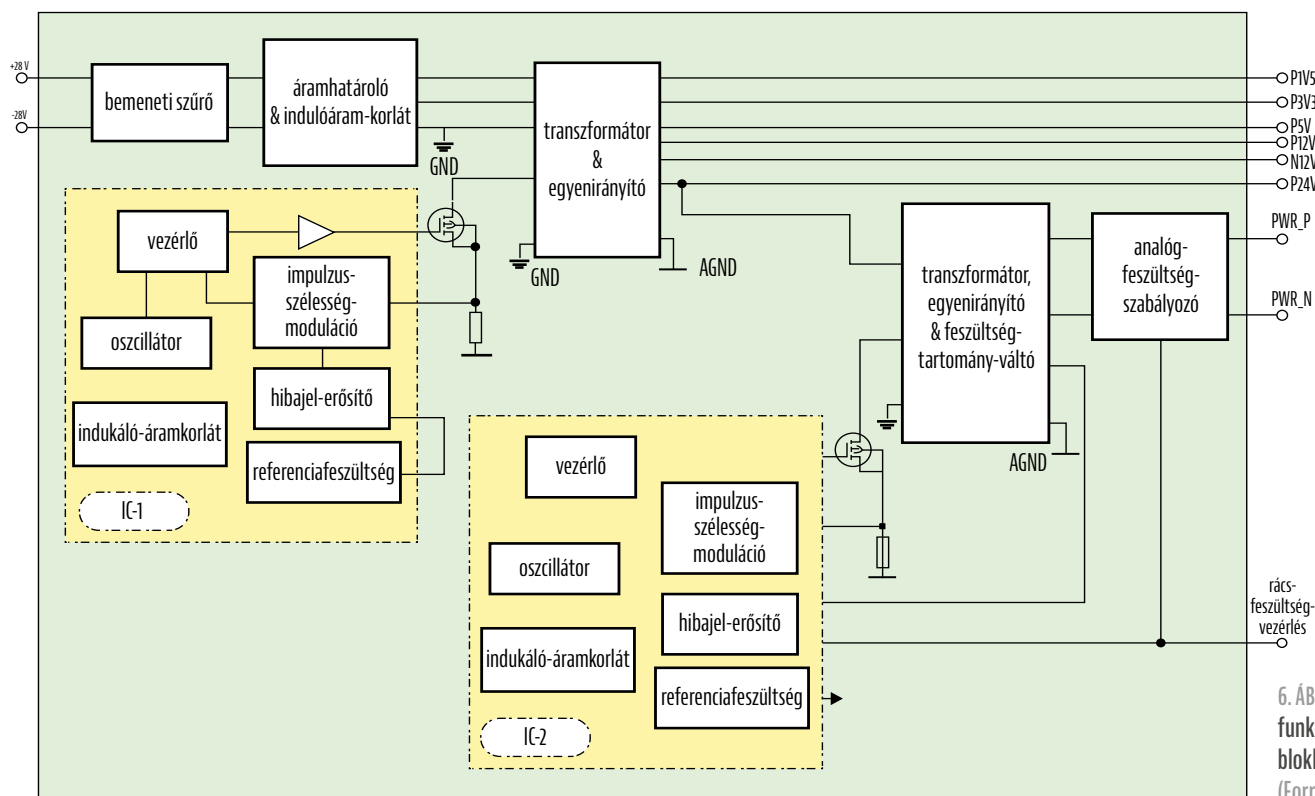
A PICAM ionkamera a grazi osztrák Űrkutatási Intézet (Institut für Weltraumforschung – IWF) vezetésével készült. Magyarországról a HUNREN Wigner Fizikai Kutatóközpont (WFK) a detektor és az elektronika működéséhez szükséges feszültségeket szolgáltató ún. egyenáramú feszültségátalakító egységet (Direct Current-Direct Current – DC-DC converter), míg az SGF Kft. a földi teszteléseket biztosító űrszonda-szimulátort (Electronic Ground Support Equipment – EGSE) fejlesztette. A SERENA-rendszer nem rendelkezik redundanciával az egységein belül. A kísérleti konfiguráció azonban két ionrészecske-elemzőből és két semlegesrészecske-analízátorból áll annak biztosítására, hogy ha az egyik ilyen egység meghibásodik, a másik egység részben még mindig teljesíteni tudja a küldetést. A PICAM egy olyan iontömeg-spektrométer, amely a töltött részecskék kamerájaként működik, hogy tanulmányozza a részecskék folyamatainak láncolatát, amelynek során a neutrális részecskék kilökődnek a talajból, ionizálódnak és a Merkúr légkörébe jutnak. A PICAM újszerű kialakításban egyesíti a 2π látómezővel rendelkező ionképkalkotót és az iontömeg-analízátort (4. ábra).

Az ionoptika egy módosított pin-hole (lyuk-kamera) elvén alapul. Ez lehetővé teszi az ionok 3D sebesség-eloszlásának és tömegspektrumának meghatározását 2π látómezőben, néhány eV-től ~3 keV energiáig, részecsketömegeket pedig a xenon tömegéig (azaz 1 ÷ 132 atomi tömegegység). A PICAM a körszimmetrikus ionoptikának és tömegérzékelőnek köszönhetően nagyon hatékony, mivel nincs szükség lépésenként szögpásztázásra. Ezáltal az exoionoszféra kiterjedése, összetétele, valamint a bolygóközeli környezete és a magnetosféra dinamikája egyidejűleg vizsgálható.

A PICAM látómezője az alsó részecske érzékelőfelületére merőleges tengely mentén tengelyszimmetrikus félgömb. Az ionok egy kúpos felületen

5. ÁBRA. PICAM repülőpéldánya a hő-vákuum teszt előtt (Fotó: IWF)





6. ÁBRA. A DC-DC egység funkcionális blokkvázlata (Forrás: WFK)

lövő, gyűrű alakú résen keresztül lépnek be, majd egy ellipszis alakú tükörről visszaverődnek. Ezután áthaladnak egy kapun, majd 90°-os poláris szögeloszlásuk 15°-os tartományba szűkül egy körgyűrű konvergens elektrosztatikus lencse révén. Majd egy síktükörről való visszaverődés után az ionok egy körgyűrűrésen át belépnek a repülési idő (Time of Fly – TOF) és képkalkító szakaszba. A tömeganalizátor szakaszban van egy második síktükör is, amelynek geometriája és potenciálja úgy van beállítva, hogy optimalizálja a TOF-mérések felbontását. A TOF egy potenciálemzőből és egy detektorból (Multi Chanel Plate – MCP) áll, amely meghatározza az ionbecsapódás helyét. A műszer teljes tömege az elektronikájával együtt 1343 g. (5. ábra)

A Wigner Fizikai Kutatóközpont által a PICAM részére fejlesztett 28 V egyenfeszültségből a PICAM-detektorhoz szükséges egyenfeszültségeket előállító DC-DC tápegység egyszerűsített funkcionális blokkvázlata az 5. ábrán látható. A PICAM elektronikájához szükséges állandó feszültségek +1,5 V; +3,3 V; +5 V; ±12 V, +24 V, továbbá két változtatható feszültségtartomány, amelyek értéke $\pm 2\text{ V} \div \pm 25\text{ V}$ között, illetve $\pm 15\text{ V} \div$

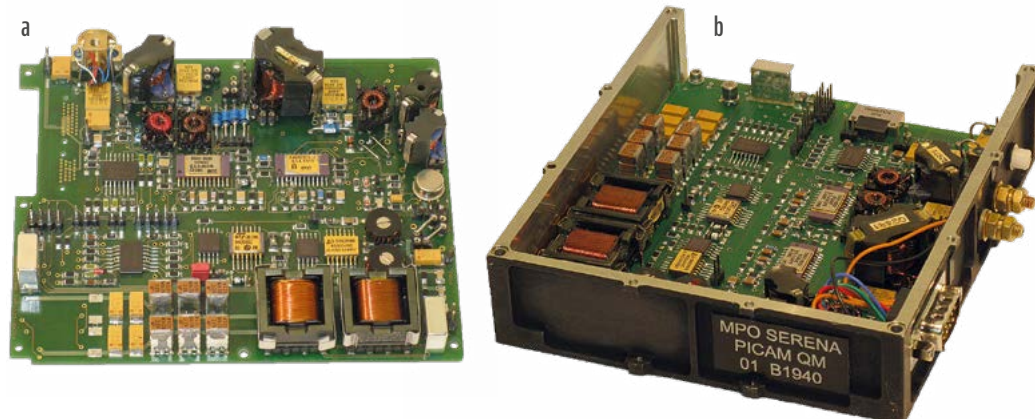
és $\pm 100\text{ V}$ között folyamatosan változtatható, és ezáltal az ionok energia szerinti szétválasztását teszi lehetővé. A PICAM-műszer teljesítményfelvétele üzemmódjától függően $3,1 \div 7,0\text{ W}$ között változik.

Az űrszondán elhelyezett tudományos műszerek egymás működését nem zavarhatják, ezért az elektromos zavarójeleket adott szint alatt kell tartani. Erre is szigorú előírások vannak, amelyeket szintén ellenőrizni kell az űrszondába való integrálás előtt. Mivel a DC-DC tápegység a kis tömeg és jó hatásfok érdekében kapcsoló üzemi konvertereket tartalmaz, a keletkező zajok adott szint alá történő elnyomása megfelelően méretezett áramköri szűrőkkel és az áramköri elemek elhelyezésével történt. A DC-DC átalakítónak ugyanakkor a szenzoro-

kat védeni kellett az esetleges túlfeszültségtől, túláramfelvételnél le kell kapcsolni és a bekapcsolási tranzienseket adott határon belül kell tartani.

Az új tudományos műszerek fejlesztése többlépcsős iterációs folyamat, mivel nemcsak az esetleges mérési elvek megvalósítását kell biztosítani – különösen a bolygóközi programok esetében –, hanem a térfogat, tömeg és fogyasztás minimalizálására vonatkozó szigorú követelményeket is be kell tartani, ami korlátozhatja a megbízhatóságot és a műszer paramétereit. A műszerek fejlesztése több lépcsőből áll. Először egy ún. külméret-makett készül, elektronika nélkül, csak a tömegre és a méretre fókuszálva, ami a szondára történő integrálást szolgálja. A következő a laboratóriumi példány, ami nem feltétlenül mérthe-

7. ÁBRA. A PICAM DC-DC átalakító végleges méretű kártyája (a) és az a QM PICAM elektronikai mechanikájába szerelve (b) (Fotó: WFK)





8. ÁBRA. A PICAM
bemérését szolgáló
jelszintű szimulátor
(Fotó: SGF Kft.)

lyes, többnyire a szoftverfejlesztéshez szükséges. Ezután a mérethelyes és funkcionálisan működő mérnöki példány készül el; ez még nem feltétlenül a végleges működésű változat, és nem az ürminősített, drága alkatrészekből készül. Ezt követően készül el a minősítépeldány (Qualification Model – QM), majd a repülőpeldány és ez utóbival teljesen azonos tartalék peldány, amely nemcsak egy referenciapeldány, hanem az indítás előtti váratlan meghibásodás esetén a szondára szerelt peldány cseréjére is felhasználhatják. A repülő- és a tartalék peldányt 100 krad sugárdózist elviselő alkatrészekből kellett megépíteni.

A megbízhatóság biztosítása űreszközöknél fontos szempont, csak ürminősített alkatrészekből szabad a repülőpeldányt gyártani. A nyomtatott áramköri kártyák topológiájával kapcsolatban is szigorú előírásokat kell betartani, a kártyákba az alkatrész beültetését csakis ESA által vizsgáztatott szerelők végezhetik, a vizsgákat kétfévente kell ismételni. Ez megnehezítette a repülőpeldány határidőre történő elkészítését.

A szükséges feszültségeket galvanikusan leválasztva kellett létrehozni, hogy egy esetleges meghibásodás a fedélzet többi műszerének működését ne korlátozza. (6. ábra) A PICAM különböző peldányaihoz a tápegységből öt peldányt kellett szállítani különböző utólagos módosításokkal (így összesen hat működő peldány készült).

Az elkészült elektronikák megbízhatóságát környezeti tesztek (vibrációs és hő-vákuum) során kellett

ellenőrizni: kártyaszinten (DC–DC), műszeregység-szinten, valamint a teljesen integrált űrszonda (MPO) szintjén is megtörtént a vizsgálat. A WFK által fejlesztett DC–DC átalakító az igényelt feszültségek biztosítására a PICAM elektronikai egység dobozában egy darab kétoldalasan szerelt kártyán elfért. (7. ábra)

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 kell a vezérlő és adatgyűjtő buszt. Az ESA űrszondáin a SpaceWire-szabványt használják. Ez a busz viszonylag kis energiafogyasztás mellett nagy adatátviteli sebességet biztosít. A SpaceWire egy olyan számítógépes hálózat, amely összekapcsolja a nagy adatátviteli sebességű érzékelőket, feldolgozóegységeket, memóriaeszközöket és telemetria/távvezérlő alrendszereket az űrszondák fedélzetén. Ez a szabvány nagy sebességű (2 ÷ 400 Mbit/s), kétirányú, teljes duplex adatátviteli kapcsolatokat biztosít. Az információkat a SpaceWire-kapcsolaton keresztül csomagokban küldik. Az adatcsomagok a „Consultative Committee for Space Data System” által kidolgozott szabvány szerinti struktúrával rendelkeznek. A csomag egy fejrészből és adatrészből áll, az adatrész maximum 4112 bájtot tartalmazhat. Ilyen csomagban érkeznek a tudományos és a műszer állapotát leíró ada-

tok. A telemetria-csomagok adatmezőjének fejléce tartalmaz időkódot is, ami elengedhetetlen a különböző érzékelők által gyűjtött adatok együttes elemzéséhez. A kis elektromágneses sugárzás érdekében kisfeszültségű differenciális jelkódolással 4 árnyékolt érpáron történik az adatátvitel.

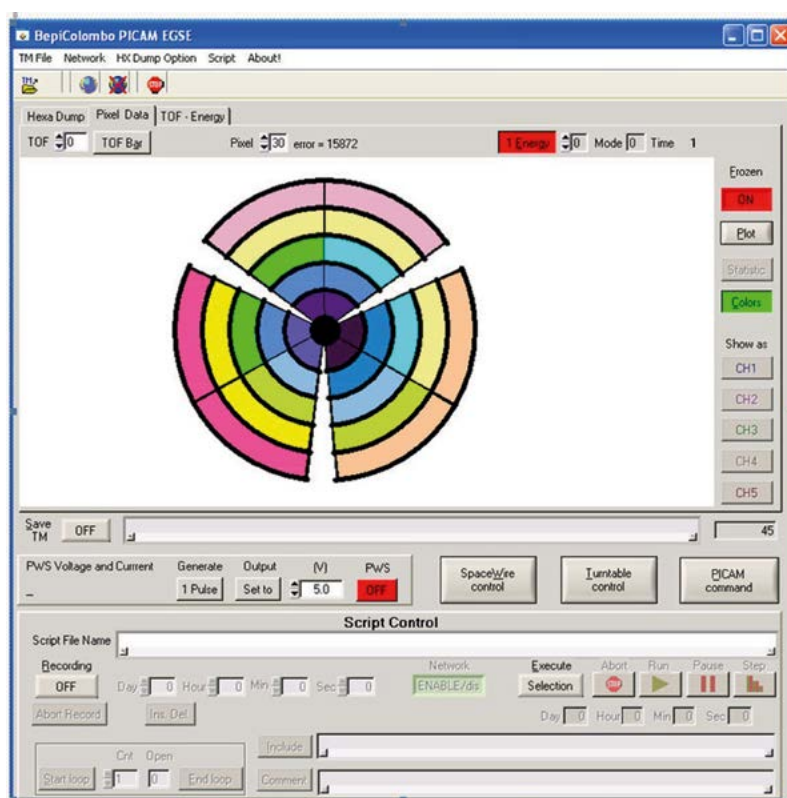
Az EGSE két, fizikailag elkülönült egységben valósult meg. A jelszintű szimulátor egy beágyazott processzoralapú egység (8. ábra), amelyen valós idejű (Real Time – RT) Linux operációs rendszer fut, és a tesztelt műszer közelében kellett elhelyezni. TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) alapú kommunikáció van a jelszintű szimulátor és számítógép (Personal Computer – PC) közt, az utóbbi a felhasználói interfész (User Interface – UIF). A jelszintű szimulátor szerverként, a PC pedig kliensként működik. A jelszintű szimulátor három PC104 szabványú kártyát és a PICAM működéséhez szükséges 28 V tápfeszültséget tartalmaz. A PC104 ipari számítógépszabvány, rögzített kártyamérettel és szabványos buszokon keresztül csatlakoznak egymáshoz. A beágyazott processzor Advantek-gyártmányú kártya, amelyen alacsony fogyasztású, 500 MHz-en működő, integrált áramkör van, és szabványos interfészeket is tartalmaz. A SpaceWire interfész saját fejlesztésű PC104 szabvány szerinti kártya. Az egységben az ESA előírásainak megfelelően galvanikusan leválasztott tápellátás található, amely a processzor és a SpaceWire interfész kártya számára biztosítja a szükséges feszültségeket.

A kereskedelmi forgalomban beszerezhető PC-n MS Windows operációs rendszer fut, és grafikus kezelői felület biztosítja a UIF-t. A két egység közti Ethernet-kapcsolat lehetővé teszi a hő-vákuum kamra hosszú idejű tesztelése során a távoli ellenőrzést. A UIF feladatai:

- csatlakozás a beágyazott rendszerhez;
- vezérlő távutasítás (Telecommand – TC) küldése a PICAM-nak;
- a PICAM telemetria (Telemetry – TM) megjelenítése és tárolása;
- SpaceWire interfész vezérlése;
- a 28 V-os fedélzeti feszültség-szimulátor vezérlése.

A grafikus kezelői felületen lehet meg-
felelő parancsok (TC) kiadásával vezé-
relni a PICAM-műszert, valamint ezen
a felületen jeleníti meg a számítógép
EGSE szoftvere a PICAM által kiadott
információs csomagokat (TM). Két in-
formációs csomagtypust kell kiemelni
a TM üzenetekben: a tudományos mé-
rési adatok és a szolgálati információk
típusát. A szolgálati információk cso-
magok (House Keeping – HK) többek
közt tartalmazzák a DC-DC átalakító
működési paramétereit (kimenő fe-
szültségek, áramok, hőmérséklet és
fontosabb állapotok). A HK csomagok
külső leíró fájl dekódolása révén fizi-
kai mértékegységekben „olvasható”
formában jelennek meg digitálisan
vagy grafikusan, idődiagram formá-
ban. A mérési adatok szükség szerin-
ti szélsőérték-figyelése is biztosítva
van. A gyakran használt TC-eket nyo-
mógombok segítségével, az összetett
parancsszekvenciák időzítéssel is előre
elkészített fájlból kiadhatók, amelyek
a hosszan tartó tesztek automatikus
vezérlését megkönnyítik.

Az UIF szoftver a National Instru-
ments LabWindows/CVI fejlesztőkör-
nyezetében készült, amely integrált
környezet kódgeneráló eszközöket
és prototípus-fejlesztő segédprogra-
mokat tartalmaz, gyors és egyszerű
C kódfejlesztéshez. Ez a mérési alkal-
mazások fejlesztésére szolgáló pro-
gramozási környezet számos grafikus
elemet tartalmazó könyvtárral ren-
delkezik műszerek vezérléséhez, adat-
gyűjtéshez, elemzéshez és a mérési
adatok különböző formátumú grafi-
kus megjelenítésére. Ezáltal jelentősen
meggyorsította az UIF fejlesztését.
A felhasználói felületi program több-
szálas üzemmódban fut három prio-
ritásszinten. A tudományos TM-cso-
magok fogadása magas prioritással
adat- és idővesztesség nélkül törté-
nik. A TM-adatcsomag a PC procesz-
szorának közreműködése nélkül, köz-
vetlenül a memóriába íródik (Direct
Memory Access – DMA). A kezelői be-
avatkozás (TC-parancs) kiadása, amely
időnként gyors továbbítást igényel;
a PC programfutás megszakításával
(Interrupt – IT) minimális késlelte-
téssel továbbítja a jelszintű szimulá-
torhoz a parancsot. A harmadik szint
a PC képernyőjén a TM-csomagok fel-
dolgozásának megjelenítése. (9. ábra)



9. ÁBRA. A gyors
áttekintést lehetővé
tévő, 360°-os
pixeltérkép
megjelenítése
(Forrás: SGF Kft.)

Az SGF Kft. kifejlesztette az EGSE jel-
szintű szimulátor-változatát is, amely
közvetlenül a PICAM SpaceWire busz
adatforgalmának monitorozására al-
kalmas. [6]

A 9. ábrán az UIF pixeltérkép gyors
áttekintést nyújtó megjelenítési mód-
ja látható, amelyen a repülési idő MCP
(Multy Channel Plate) átlagát színskálá-
lával jeleníti meg (a kék szín a legki-
sebb, míg a piros a legnagyobb). A kö-
zépponthoz viszonyítva a sugárirányú
távolság az energiát mutatja. Lehető-
ség van azonban a mérési adatok más
formában történő megjelenítésére is.
Például a szolgálati HK-csomagok tar-
talmát (mennyiségüket) nemcsak digi-
tális formában lehet folyamatosan
listáztatni, hanem idő-hőmérséklet
vagy idő-feszültség diagram formában
is meg lehet jeleníteni. A mérés köz-
ben a folyamatos (futó) megjelenítést
fel lehet függeszteni, az adatarchivá-
lás megszakítása nélkül, amelyet utó-
lag „offline” módon lehet ellenőrizni.

ÖSSZEGZÉS

A PICAM fejlesztésén dolgozó mérnö-
kök az indítás óta figyelemmel kísérik
a szenzor működését. A bolygóközi re-
pülés eddigi közel hét éve alatt a PI-
CAM hibátlan működése tényleges űr-
körülmények között bizonyítja, hogy

mérnökeink kiváló munkát végeztek
a DC-DC átalakító kifejlesztésével.
A repülés során a SERENA-rendszert
működési tesztek és kalibráló mérések
céljából többször bekapcsolták.

A mérnökcsoport projektvezetője dr.
Nagy János; a projekt megvalósításá-
ban részt vett a korábbi projektvezető
dr. Szalai Sándor, valamint Szalai Lajos,
Hevesi László, Horváth István, Tróz-
nai Gábor és Dinnyés Lajos. A HUN-
REN Wigner FK fizikusai az MPO Mer-
kúr körüli végleges pályára állása után
a PICAM tudományos adatkiértékelé-
sében fognak részt venni. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] BepiColombo – Exploring Mercury. <https://www.cosmos.esa.int/web/bepicolombo/home> (Letöltve: 2025.03.10.)
- [2] The European Space Agency: BepiColombo Investigating Mercury's mysteries. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo (Letöltve: 2025.03.10.)
- [3] Orsini S., et al.: SERENA: Particle Instrument Suite for Determining the Sun-Mercury Interaction from BepiColombo. Space Science Review, 2021.01.12. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00787-3>
- [4] Orsini, S. et al.: SERENA: A suite of four instruments (ELENA, STROFIO, PICAM and MIPA) on board BepiColombo-MPO for particle detection in the Hermean environment. Elsevier: Planetary and Space Science, 2010/1–2, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.09.012>
- [5] Institute of Space and Astronautical Science: Mercury Magnetospheric Orbiter MIO / BepiColombo. <http://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/current/mmo.html> (Letöltve: 2025.03.03.)
- [6] Sulyán J. et al.: BepiColombo űrszonda adatgyűjtő és vezérlő rendszere. Híradástechnika, 2008/4., 24–29.