

repedésekre jellemző feszültséglokalizációval írható le (7.b ábra). A sávok által kialakuló feszültségtér modellezésére alkotott szimuláció eredményeiből arra a következtetésre jutottunk, hogy a fémüvegekben kialakuló sávok diszkrét viselkedésének egyik fő oka az üvegszerkezetben végbemenő diffúzió.

#### Irodalom

1. R. Zallen: *The Physics of Amorphous Solids*. Wiley, New York (1983).
2. Baranyi A., Pusztai L.: Rendezetlenség kondenzált fázisokban. In *A kémia legújabb eredményei* sorozat. Akadémiai Kiadó, Budapest (1995).
3. S. Napolitano, E. Glynos, N. B. Tito, *Reports on Progress in Physics* 80 (2007) 036602.

4. N. Van Steenberge, S. Hóbor, S. Surinach, A. P. Zhilyaev, F. Houdellier, F. Mompiu, M. D. Baró, Á. Révész, J. Sort, *J. Alloys and Compounds* 500 (2010) 61–67.
5. A. Inoue, *Acta Mater.* 48 (2000) 279–306.
6. Á. Révész, Á. Kis-Tóth, L. K. Varga, J. L. Lábár, T. Spassov, *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (2014) 9230–9240.
7. J. J. Lewandowski, A. L. Greer, *Nature Mater.* 5 (2006) 15–18.
8. J. Schroers, W. L. Johnson, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 255506.
9. Zs. Kovács, M. Ezzeldien, K. Máthi, P. Ispánovity, F. Chmelík, J. Lendvai, *Acta Mater.* 70 (2014) 113–122.
10. Zs. Kovács, E. Schafner, P. Szommer, Á. Révész, *J. Alloys and Compounds* 593 (2014) 207–212.
11. Á. Révész, Zs. Kovács: Severe Plastic Deformation of Amorphous Alloys (Review). *Materials Transactions* 66 (2019) 1283–1293.
12. Zs. Kovács, Á. Révész, M. Ezzeldien, J. Lendvai, *J. Alloys and Compounds* 817 (2020) 153327

## A BEPICOLOMBO ŪRMISZIÓ MÉRFÖLDKÖVEI ÉS TUDOMÁNYOS CÉLKITŪZÉSEI A MERKŪR BOLYGÓNÁL

Bebesi Zsófia, Dósa Melinda, Juhász Antal,  
Kecskeméty Károly, Németh Zoltán  
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

A BepiColombo ūrmisszió az Európai Ūrügynökség (European Space Agency; ESA) és a Japán Ūrügynökség (Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA) közötti együttműködés keretében jött létre. A kivitelezésben az ESA első számú szerződött partnere az Airbus vállalat védelmi és világűr (Defence and Space) szegmense volt. A küldetés célja a Merkúr bolygó minden korábbinál részletesebb megismerése, mágneses terének, valamint a környezetében zajló fizikai folyamatok monitorozása, de a kutatómunka ki fog

terjedni az égitest belső szerkezetének felderítésére is (1. ábra). A szonda a hordozó platformon és a napárnyékoló pajzsán kívül két tudományos keringő egységből áll: a bolygó felszínét vizsgáló Mercury Planetary Orbiterből (MPO) és a mágneses teret feltérképező Mercury Magnetospheric Orbiterből (Mio, korábbi nevén MMO). A két keringő egység összehangolt mérései új távlatokat nyitnak a bolygó környezetének kutatásában. A BepiColombo missziót az ESA Horizon 2000+ programjának részeként 2009 novemberében



**Bebesi Zsófia** okleveles csillagász (2003) és fizikus (2005) – Szegei Tudományegyetem, Ph.D. (2008, ELTE). 2003 óta az MTA KFKI RMKI munkatársa, 2012-től a Wigner FK Ūrfizikai és Ūrtechnikai Osztályának tudományos főmunkatársa. Elemezte a Cassini és a Venus Express ūrszondák adatait. Kutatói érdeklődése a bolygók mágneses tere és a napszél, illetve az interplanetáris mágneses tér közötti kölcsönhatás, a Titán plazmakörnyezetének és felső atmoszférája ionizációs folyamatainak vizsgálata.



**Dósa Melinda** 2014-ben végzett az ELTE geofizika mesterszakán, ūrkutatás szakirányon. 2014 óta a Wigner Fizikai Kutatóközpont doktorandusza, majd 2019-től poszt-doktor kutatója. Kutatási területe a belső helioszféra ūridőjárása, különös tekintettel a napszél folyamataira és a napszél-Merkúr kölcsönhatásokra. A Merkúr exoszférájának dinamikus változásait az olasz INAF intézet munkatársaival együttműködve kutatja. A BepiColombo ūrszonda PICAM műszerének társkutatója.



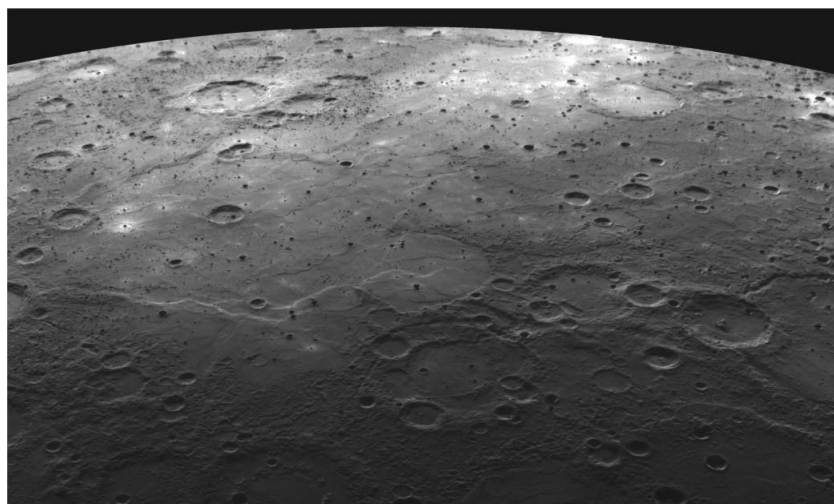
**Juhász Antal** 1988-ban végzett az ELTE fizikus szakán, 1989 óta dolgozik a KFKI Ūrfizikai osztályán. Doktori fokozatát 1993-ban szerezte meg. Jelenleg a Wigner FK Részecske és Magfizikai Intézetének tudományos főmunkatársa. Szakterülete a Naprendszerben található kozmikus por (bolygóközi, bolygók, holdak, üstökösök körüli por-plazma-elektromágneses tér kölcsönhatása) dinamikájának, térbeli eloszlásának modellezése a különböző ūrszondák poméréseinek értelmezéséhez, előrejelzéséhez.



**Kecskeméty Károly** 1974-ben fizikusként végzett az ELTE-n, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója. Kutatási területe az ūridőjárás, szoláris kozmikus sugárzás, az üstökösök plazmakörnyezete. Társkutató többek között a SOHO, STEREO, Cluster és a BepiColombo ūrmissziókban.



1. ábra. A BepiColombo megérkezik a Merkúr bolygóhoz, fantáziarajz (forrás: airbus.com).



2. ábra. A Merkúr felszíne a Messenger fényképén (forrás: NASA).

hagyták jóvá. Az indításra 2018. október 20-án került sor a Guyana Űrközpontból, és a szondapár a tervek szerint 2025. december 5-én fog pályára állni a Merkúr körül. A Merkúrt mostanáig csak két NASA űrszonda, a Mariner-10 (1974. szeptember 21.) és a MESSENGER (2011. március 18. – 2015. április 30.) tudta megközelíteni.

Az űrmissziót a Padovai Egyetemen dolgozó *Giuseppe „Bepi” Colombo* (1920–1984) mérnök-matematikusról nevezték el. Ő volt az, aki elsőként javasolta a hintamanőver alkalmazását az űrszondáknál, amelyet legelőször 1974-ben, a Mariner-10 esetében használtak ki – a módszer mára széles körben elterjedt. A



*Németh Zoltán* 1995-ben végzett az ELTE fizikus szakán, doktori fokozatát 2000-ben szerezte meg. 1998-tól az MTA KFKI RMKI munkatársa, jelenleg a Wigner FK Űrfizikai és Űrtechnikai Osztályának vezetője. Kutatói érdeklődése a helioszférikus mágneses tér szerkezetének, valamint a kozmikus sugárzásnak a bolygóközi térben történő terjedési folyamataira, annak elméleti hátterére és numerikus modellezésére terjed ki. Részt vett a Cassini és a Rosetta űrmissziók tudományos adatainak elemzésében is.

mágneses teret vizsgáló keringő egység, az MMO másik nevét, a Mio-t pedig a japán lakosság által javasolt több ezer név közül választották ki. Jelentése vízi út, amely a JAXA szerint többek között azt szimbolizálja, hogy az űrszonda úgy siklik a napszél közegeiben, mint a hajók a vízen.

Az űrmisszió létrehozásában, egyes műszerek megépítésében magyar mérnökök is részt vettek, ennek kapcsán az érintett berendezések által mért tudományos adatokhoz a közreműködő magyar kutatóintézetek is hozzáférnek. Ezek egyike egy iontömeg-spektrométer, a Planetary Ion Camera (PICAM) [1], amelynek 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.

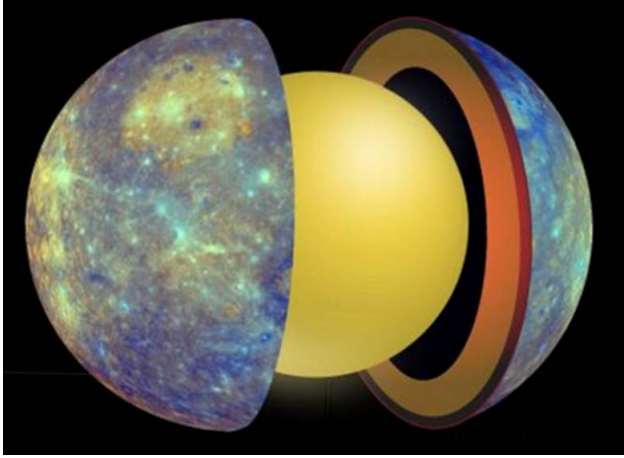
Ugyancsak magyar hozzájárulással készült a plazmahullámok vizsgálatára tervezett Plasma Wave Instrument (PWD), amihez az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Űrkutató Csoportja a BL Electronics Kft.-vel közösen dolgozta ki az intelligens jelfelismerő modul (ISDM) fedélzeti szoftverét.

## Mit tudunk ma a Merkúrról?

A Merkúr (2. ábra) Naprendszerünk legbelső, a Naphoz legközelebb keringő bolygója, pályájának fél nagytengelye körülbelül 58 millió km, keringési periódusa mintegy 88 nap. A bolygó átlagos átmérője 4880 km, kisebb, mint például a Jupiter Ganymedes nevű holdja, vagy a Szaturnusz Titanja.

A Merkúr felszíne erősen kráterezett, mivel nem sokkal kialakulása után, ~4,6 milliárd éve már intenzíven bombázták a Naprendszer belsejében keringő üstökösök, kisbolygók, törmelékdarabok és a napszél. A felszíni morfológiáról az űrszondás megfigyeléseket megelőzően egyáltalán nem volt információnk, a bolygó forgásának ütemét sem ismertük. Elsőként a Mariner-10 közelítette meg a Merkúrt, és összesen három alkalommal (mindig a pálya naptávpontjában [*aphéliumban*]), ezek során a felszín 45%-át fotózta le. A MESSENGER már a teljes felszínt feltérképezte, valamint az északi féltekét lézeresen letapogatta, ezáltal részletes topográfiai térképekhez jutottunk. A Merkúr felszínén nincsenek jelentős magasságbeli eltérések (mint például a Hold vagy a Mars esetében), de számtalan becsapódási kráter borítja





3. ábra. A Merkúr átlagsűrűsége méretéhez képest kiugróan magas, feltételezhetően nagy, a térfogat mintegy 2/3-át kitöltő fém (vas-nikkel) magja van (forrás: space.com).

(amelyek közül hatot magyar származású művészekről neveztek el). Korábban a Merkúr vulkanikusan aktív volt, ennek jelei napjainkban is láthatók. Egyes térségekben hosszanti irányú repedéseket fedeztek fel, amelyek feltehetően idősebb felszíni alakzatok, és az égitest kihűlése, globális összehúzódása következtében jöhettek létre. Nemrégiben pedig olyan bemélyedésszerű felszíni alakzatokat fedeztek fel, amelyeknek – a becsapódási kráterekkel ellentétben – nincs peremük, a keletkezésükre vonatkozó elméletek jelenleg forró tudományos témának számítanak.

A bolygó felszíne fémek (Na, K, Mg) mellett illóanyagokban (víz, S, SO<sub>2</sub>, HS) gazdag, ami meglepő, hiszen feltételezhetjük, hogy egy égitest minél közelebb kering a csillagához, annál hamarabb elveszíti az illékony összetevőket. Jelenleg nem ismeretes, hogy csak a felszínen található-e ilyen anyagok, vagy a bolygótest belső részei is tartalmazzák. Ez a megfigyelés is azt sejteti, hogy a bolygókeletkezési modellek, amelyek a kialakulás idejére magas hőmérsékletekkel számolnak, talán nem helytállóak. Az illóanyagok jelenléte a vulkanizmus folyamatait is befolyásolja. A Merkúr átlagsűrűsége 5,427 g/cm<sup>3</sup>, ezáltal a Föld után a második legsűrűbb objektum a Naprendszerben (3. ábra). 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. Számos kérdésre keressük tehát a választ a Merkúr keletkezésével kapcsolatban is.

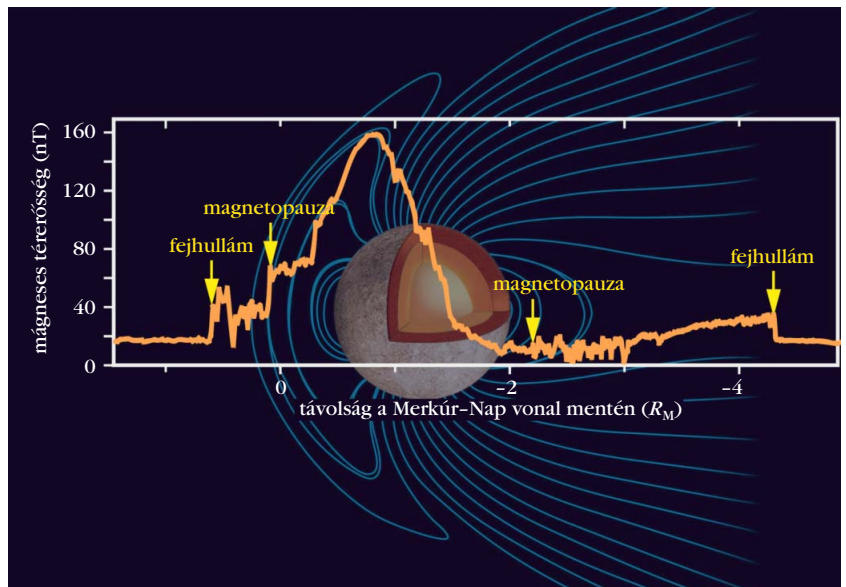
A Merkúr Nap körüli pályája igen különleges, mivel az égitest keringési és forgási periódusa pontosan 3:2 arányú, tehát két Nap körüli kerin-

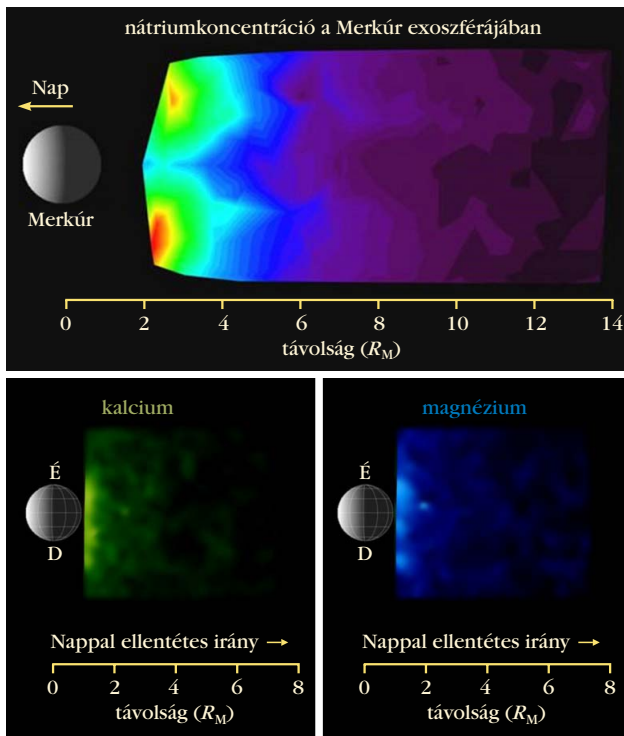
gés során a Merkúr háromszor fordul meg a tengelye körül. Ez ugyan nem a kötött keringés esetében megszokott 1:1-es rezonancia, de ez is stabil állapot, amely a Merkúr pályájának nagy excentricitása miatt alakulhatott ki. A pálya elnyúltsága folytán a Naptól mért távolság 46 millió és 70 millió km között váltakozik. A bolygókeletkezési elméletek szerint azonban a csillagukhoz közel keletkezett égitestek pályaeccentricitásának alacsonynak kellene lennie. Ebből adódóan azt is felvetették, hogy a Merkúr nem a Naprendszer belsejében, hanem távolabb, esetleg a Vénusz holdjaként jött létre, és később került át a belső, Nap körüli pályára. A Merkúr pályája az ekliptika síkjával 7°-os szöget zár be, valamint további érdekes tény, hogy a Merkúr tengelyhajlása mindössze 2°-os, emiatt évszakok nem alakulhatnak ki. A lassú forgás miatt azonban a felszínen mégis kialakultak adott helyszínekre jellemző klimatikus viszonyok, forróbb és hűvösebb területek.

A Merkúr felszínén, az egyenlítő Nap felé eső tartományában mért napállandó a Földön mért 1,370 W/m<sup>2</sup>-nek 4,59–10,61-szerese, a felszíni hőmérséklet pedig 100 K (árnyékban) és 700 K (a nappali oldalon) között mozog. A pólusok közelében és az árnyékos oldal krátereinek mélyén általában rendkívüli hideg jellemző, és ezekben a tartományokban akár vízjeget is találhatunk, ezt a MESSENGER űrszonda radarészlelései igazolták is. A jeget általában regolitréteg borítja, ami meggátolja a víz elpárolgását. A Merkúron jelen lévő víz becsült mennyisége 10<sup>14</sup>–10<sup>15</sup> kg. A víz eredete egyelőre nem ismert, de a víz egyaránt származhat a belső tartományok kigázosodásából, vagy akár a Naprendszer belsejébe látogató üstökösöktől is.

A Mariner-10 annak idején már felfedezte a Merkúr kiterjedt, globális mágneses terét, ennek szerkezetét illusztrálja a 4. ábra. A planetáris magnetoszférák akadályt képeznek a napszél számára, és nem enge-

4. ábra. A Merkúr mágneses tere erősségének változása a távolság függvényében és a különböző plazmatartományok (forrás: NASA).





5. ábra. A nátrium, a kalcium és a magnézium elemek MESSENGER által megfigyelt szökési folyamatai a bolygó éjszakai oldalán – a csóvában (forrás: NASA).

dik a bolygófelszín közelébe hatolni a napszélbe befagyott interplanetáris mágneses teret. A Merkúr esetében például a földihez képest gyenge és kevésbé kiterjedt magnetoszféráról lehet szó, ami azt jelenti, hogy a napszél nagyobb energiájú részecskéi bizonyos mértékben eljutnak a felszínhez, és hozzájárulnak az erózióhoz. A Földhöz hasonlóan a Nap felőli oldalon kialakul egy lökéshullám (fejhullám), mivel a Naptól folyamatosan érkező napszélplazma áramlási sebessége szuperszonikus. A magnetopauza az a határfelület, ahol a mágneses nyomás és a napszél dinamikus nyomása egyensúlyba kerül.

Mivel a Merkúr aránylag kis méretű, és nagyon lassan forog a tengelye körül, a stabil, saját magnetoszféra jelenlétét meglepőnek találták, mivel a dinamóhatás létrejöttéhez, azaz a mag körüli fémes folyékony réteg mozgásban tartásához gyors forgás szükséges. A felszíni mágneses térerősség a Merkúr egyenlítője mentén  $\sim 300$  nT, a földi mágneses térnek mindössze  $\sim 1\%$ -a. A földtől eltérően a Merkúr mágneses tengelye és forgástengelye nagyon kis eltéréssel egybeesik, a dipólmomentum azonban nem a központban, hanem attól északra ( $\sim 480$  km-re, ami  $0,2$  Merkúr-sugárnak felel meg) helyezkedik el. Ennek következtében a mágneses tér az északi sarkon nagyjából háromszor erősebb, mint a délin, valamint a déli sarkon nagyobb területen figyelhetünk meg nyitott erővonalakat. A Merkúr belsejében működő mágneses dinamót feltehetően az excentrikus pálya miatt fennálló erőteljes árapályhatások tartják fenn.

A MESSENGER korábbi mérései arra utalnak, hogy a Merkúr magnetoszférája és az interplanetáris tér

között gyakran jönnek létre fluxustransfer-események, amikor a napszél részecskéi elérhetik a felszínt [2]. Az ezt megvalósító mágneses „örvények” átmérője akár  $800$  km-es is lehet, ami jelentős egy ilyen kis méretű bolygó esetében. A jelenség a Földnél már ismeretes rekonnekció (a mágneses erővonalak átkötődése) révén zajlik, amikor a planetáris és az interplanetáris erővonalak összekapcsolódnak. A mérések arra utalnak, hogy a rekonnekció a Merkúr esetében sokkal gyakrabban következik be, mint Földünkénél. Erős napszélnyomás esetén előfordul az is, hogy a Nap felőli oldalon a magnetoszféra annyira összenyomódik, hogy a magnetopauza eléri a felszínt. További érdekesség, hogy mivel a dipóltér nem szimmetrikus, ezért a déli féltekén nagyobb arányban szökhetnek el részecskék a Merkúr exoszférájából.

Viszonylag sűrű, kiterjedt atmoszféra fenntartásához a Merkúr környezete túlságosan forró, és folyamatosan intenzív hatásoknak van kitéve a napszél által. Annak idején 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 a Merkúrnek nincs stabil atmoszférája, csak exoszférája, ahol a részecskék közepes szabadúthossza összemérhető a réteg vastagságával [4]. A MESSENGER űrszonda adatainak segítségével lehetőség nyílt az exoszféra és a napszél közötti dinamikus kölcsönhatás vizsgálatára is. Az exoszférában tartózkodó részecskék könnyen elszökhetnek az interplanetáris térbe, elsősorban töltéscsere révén, amikor például egy beérkező, nagy energiájú napszél eredetű proton ionizál egy semleges, exoszférikus részecskét. Ekkor az újonnan keletkezett ion az interplanetáris mágneses tér hatására együtt kezd mozogni a napszéllel, és eltávozik a bolygó környezetéből. A Merkúr esetében az exoszférába folyamatosan érkeznek részecskék, mind a felszínről (a napszél és a sugárzás hatására), mind a magnetoszféra más tartományjaiból. Az atmoszféra/exoszféra nyomása rendkívül alacsony, kevesebb, mint  $1$  nPa. A részecskék szökése elsősorban a nátrium D-vonalában figyelhető meg, kiterjedt, akár  $2000$  Merkúr-sugárnyi hosszúságú csóva formájában (5. ábra).

A bolygóközi mikrometeoroidok (IDP) folyamatosan bombázzák ( $20$  km/s) a Merkúr felszínét, és ezek becsapódásakor a kráterképződés során jelentős mennyiségű porszemcse lökődik ki a Merkúr felszínéről (az egy részecske által kiváltott porfelhő teljes tömege a beérkező porszemcse tömegének akár több ezerszerese is lehet). Az ütközés során hő is keletkezik, ami megolvaszthatja, vagy elpárologtathatja a felszíni anyag egy részét (ilyenkor lehetséges a Na-képződés). A kilökött/elpárologtatott anyag ezután az atmoszférába kerül [5], ahonnan ballisztikus pályán visszahullik a felszínre, ezáltal folyamatosan alakítva a Merkúr felszíni tulajdonságait. A Na-atomok a felszínen pattogva, bolyongva vándorolnak, hat rájuk a fénynyomás, ennek következtében az atomok nagyobb sebességre tehetnek szert, és csóvát alakíthatnak ki a Merkúr mögött, illetve akár el is szökhetnek

a bolygóról. Ezen atomok alkotják a Merkúr exoszférajának egy részét. Kis mennyiségben por is elszökhet a Merkúr gravitációs teréből, ha a kilökődési sebesség nagyobb a Merkúr szökési sebességénél. A Merkúr pályájának  $7^\circ$ -os inklinációja miatt az IDP-fluxus időfüggő [6]: akkor a legnagyobb, amikor a Merkúr az ekliptika síkjának (egyben az IDP szimmetriasíkja) közelében van, és lecsökken, amikor a Merkúr az ekliptika síkjától távolabb (fölötte/alatta) kering. Ezáltal a bolygó felszínén a mikrometeoroidok hatására keletkező Na mennyisége időben változó lesz.

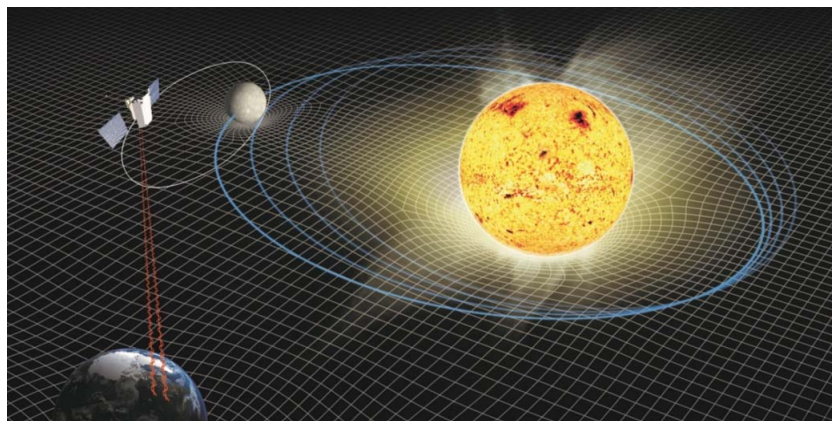
*Urbain Le Verrier*, 19. századi francia csillagász és matematikus észrevette, hogy a Merkúr pályájának lassú precesszióját a newtoni mechanikával nem lehet megmagyarázni. Ekkor a probléma feloldására többek között egy, a Naphoz még közelebb keringő égitest jelenléte is felmerült, azonban a megoldást *Einstein* általános relativitáselmélete hozta meg. A precesszió értéke nagyon kicsi ugyan, azonban a mért eltérést a relativitáselméletből adódó hatással jól lehet magyarázni. Az elmélet ezen konkrét alkalmazása nagymértékben hozzájárult az elv szélesebb körű elfogadásához. A MESSENGER szonda által szolgáltatott adatok alapján már végeztek ilyen jellegű vizsgálatokat (6. ábra), de a BepiColombo méréseiből a Merkúrnál érvényesülő relativisztikus hatásokról is minden korábbiánál pontosabb képet kaphatunk majd.

Mivel még számos nyitott kérdés maradt, ezek megválaszolására az egyre jobb felbontású és nagyobb adatmennyiség továbbítására alkalmas, korszerű űreszközök használatával a jövőben számos lehetőségünk nyílik majd. A következőkben a jelenleg a Merkúr bolygóhoz tartó BepiColombo űrmisszió részletesebb ismertetésére kerül sor.

## A BepiColombo fontosabb technikai paraméterei

Az űrmisszióknak<sup>1</sup> három komponense van, amelyek a Merkúrhoz való megérkezést követően különválnak, és önálló űrszondákként keringenek tovább a bolygó körül. Ezek egyike az ESA által létrehozott, és a szondák meghajtását végző Merkúr Transzfer Modul (Mercury Transfer Module; MTM). A másik kettő pedig a korábban már említett, Merkúr körül kerin-

<sup>1</sup>A BepiColombo űrmisszió hivatalos honlapja az ESA-nál: [www.sci.esa.int/web/bepicolombo](http://www.sci.esa.int/web/bepicolombo) és a JAXA-nál: [www.global.jaxa.jp/projects/sas/bepi](http://www.global.jaxa.jp/projects/sas/bepi)

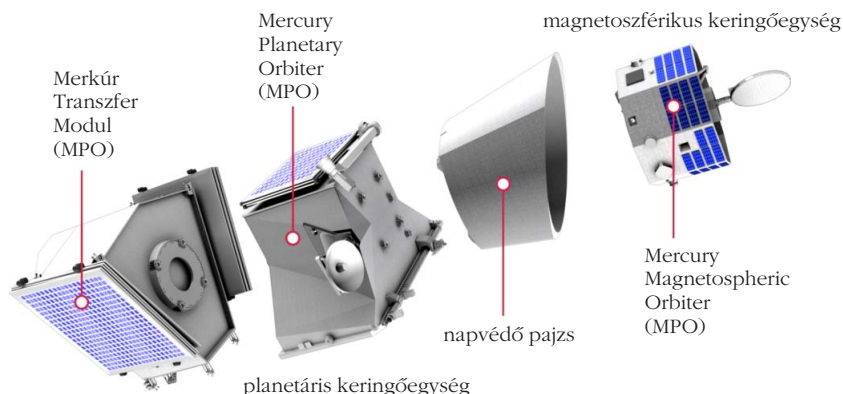


6. ábra. A MESSENGER űrmisszió keretében a NASA és az MIT kutatói közösen tanulmányozták a Nap Merkúr pályájára gyakorolt közvetlen hatását (forrás: NASA/GSFC).

gő egység (Mercury Planetary Orbiter; MPO – ESA), valamint a magnetoszférikus keringő egység (Mercury Magnetospheric Orbiter; MMO, azaz Mio – JAXA). A három egység, valamint a Mio napvédő pajzsa az indítás és a Merkúrhoz vezető út során össze van csatlakoztatva, ezáltal jelenleg még egyetlen űrobjektumot (Mercury Cruise System; MCS) alkotnak (7. ábra).

A transzfermodul (MTM) feladata a hozzá rögzített két tudományos űrszonda eljuttatása a Merkúrhoz. 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 meghajtórendszer. Az utazóegység két 14 méter hosszú napelemtáblával is fel van szerelve. Ugyancsak az MTM látja el energiával az odaút időtartamára részlegesen hibernált két keringő szondát is (az MPO tartja a rádiókapcsolatot a Földdel, az MMO alvó üzemmódban van). A Naptól való távolság függvényében a napelemtáblák 7 és 14 kW közötti teljesítményt termelnek, a rakéták pedig egyenként 2,5–4,5 kW-ot vesznek fel, az igénybevétel függvényében. A Naprendszerből kifelé tartó űrmissziókkal ellentétben a BepiColombo fokozatos fékezésére van szükség már jóval a Merkúr körüli pályára állítást megelőzően. Közvetlenül a pályára állítást megelőzően az MTM leválik, majd a két keringő egy-

7. ábra. A BepiColombo űrmisszió technikai egységei (forrás: ESA).





1. táblázat

## Az MPO űrszonda tudományos műszerei

| az MPO tudományos berendezései  | funkcióik   |
|---|---|
| BepiColombo Laser Altimeter (BELA)  | lézeres magasságmérő  |
| Italian Spring Accelerometer (ISA)  | gyorsulásmérő   |
| Mercury Magnetometer (MPO-MAG, MERMAG)  | mágneses tér (nagyság, irány) mérése  |
| Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer (MERTIS)   | sugárzásmérő és IR spektrométer   |
| Mercury Gamma-ray and Neutron Spectrometer (MGNS)   | gamma-sugárzás és neutron-spektrométer  |
| Mercury Imaging X-ray Spectrometer (MIXS)   | képalkotó röntgenspektrométer   |
| Mercury Orbiter Radio-science Experiment (MORE)   | rádióhullámok vizsgálata  |
| Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy (PHEBUS)   | UV spektrométer az exoszféra vizsgálatára   |
| Search for Exosphere Refilling and Emitted Neutral Abundances (SERENA) <ul style="list-style-type: none"> <li>• ELENA (Emitted Low-Energy Neutral Atoms)</li> <li>• STROFIO (STart from a ROTating Field mass spectrometer)</li> <li>• MIPA (Miniature Ion Precipitation Analyser)</li> <li>• PICAM (Planetary Ion CAMera)</li> </ul> | az exoszférát újratermelő és az onnan kilépő semleges részecskék kutatása (kis energiájú semleges atomok, tömegspektrométer, csapódó ionok vizsgálata, ionkamera) |
| Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System (SIMBIO-SYS)  | spektrométerek és képalkotó berendezések rendszere  |
| Solar Intensity X-ray and Particle Spectrometer (SIXS)  | szoláris röntgenintenzitás-mérő és részecskespektrométer  |

ség együtt halad tovább, míg az MPO közreműködésével a Mio is a tervezett pályájára kerül majd.

Az MPO tömege 1150 kg, és az energiaellátását nap-elemrendszerrel valósítja majd meg, valamint a nap-elemtáblák egyben arról is gondoskodnak, hogy a szonda hőmérséklete 200 °C alatt maradjon. A nap-elemrendszert folyamatosan forgatni kell ahhoz, hogy

merőleges. Poláris pályán fog keringeni, ellipszispályájának közelpontja (perihermium) 590 km, legtávolabbi pontja (apohermium) pedig a tervek szerint 11 640 km-re lesz a bolygó felszínétől. A Mio oldalai 90 W-os nap-elemtáblákkal vannak beborítva, a szonda alsó és felső felületei pedig a hőmérséklet szabályozásában vesznek részt, emellett a Merkúrig vezető úton egy napárnyékoló pajzs veszi körül a szonda-

még képes legyen a megfelelő energia előállítására, de hűtő funkcióját is el tudja látni. Az MPO-nak 11 fedélzeti berendezése van, ezeket az 1. táblázatban foglaltuk össze. A műszerek többségét – a túlhevülés elkerülése végett – a szonda nadírpontjának közelében helyezték el, amely a szondához rögzített koordináta-rendszerben a –z irányt jelenti, és a keringés során mindig a bolygó felszíne felé néz majd. 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 Merkúr mágneses terének átfogó vizsgálatára tervezett Mio (MMO) szondát Japánban fejlesztették és építették, a hasáb alapja szabályos nyolcszög (oldallapjainak mérete: 180 cm × 90 cm), tömege 285 kg. Fedélzetén 5 műszercsoport kapott helyet, közülük négy plazma- és pordetektor, valamint egy magnetométer. Az űrszonda forgásstabilizált, forgástengelye a Merkúr egyenlítőjére

testet. A szondáról évente 160 Gbnyi adat hozható le a Földre. A Mio tudományos berendezéseit a 2. táblázat tartalmazza. A misszió részeként tervbe volt véve egy kisméretű (44 kg) leszállógység (Mercury Surface Element) is, ezt azonban még 2003-ban levették a tervezett berendezések listájáról. Az 1 méteresnél kisebb átmérőjű, korong alakú berendezés körülbelül egy héten keresztül működött volna a Merkúr felszínén, tervezett leszállóhelyén, 85°-os szélességen, a terminátor közelében. Műszercsomagja kamerákból, spektrométerekből, egy környezeti paramétereket mérő berendezésrendszerből, egy szeizmométerből, talajvizsgáló egységből és egy apró roverből állt volna.

2. táblázat

## A Mio űrszonda tudományos műszerei

| a Mio tudományos berendezései   | funkcióik  |
|---|--|
| Mercury Plasma Particle Experiment (MPPE) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mercury Electron Analyzers (MEA1, MEA2)</li> <li>• Mercury Ion Analyzer (MIA)</li> <li>• Mass Spectrum Analyzer (MSA)</li> <li>• High-Energy Particle instrument for electrons (HEP-ele)</li> <li>• High-Energy Particle instrument for Ions (HEP-ion)</li> <li>• Energetic Neutrals Analyzer (ENA)</li> </ul> | a Merkúr környezetében lévő plazma vizsgálata (elektronok, ionok), tömegspektrométer, nagy energiájú ionok, nagy energiájú semleges részecskék detektálása |
| Mercury Magnetometer (MMO-MGF)  | a Merkúr-magnetoszféra és a napszél vizsgálata   |
| Plasma Wave Investigation (PWI)   | plazmahullámok észlelése, elektromos tér, elektromágneses hullámok a magnetoszférában és a napszélben  |
| Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager (MSASI)   | a bolygó nátriumatmoszférájának spektrális vizsgálata  |
| Mercury Dust Monitor (MDM)  | a Merkúrról és az interplanetáris térből érkező por vizsgálata   |

3. táblázat

**A BepiColombo interplanetáris útjának fontosabb mérföldkövei**

| dátum               | esemény                        |
|---------------------|--------------------------------|
| 2018. október 20.   | indítás                        |
| 2020. április 6.    | a Föld megközelítése           |
| 2020. október 12.   | 1. Vénusz-megközelítés         |
| 2021. augusztus 11. | 2. Vénusz-megközelítés         |
| 2021. október 2.    | 1. Merkúr-megközelítés         |
| 2022. június 23.    | 2. Merkúr-megközelítés         |
| 2023. június 20.    | 3. Merkúr-megközelítés         |
| 2024. szeptember 5. | 4. Merkúr-megközelítés         |
| 2024. december 2.   | 5. Merkúr-megközelítés         |
| 2025. január 9.     | 6. Merkúr-megközelítés         |
| 2025. december 5.   | pályára állás                  |
| 2026. március 14.   | az MPO eléri végleges pályáját |

## A BepiColombo hosszú útja a Merkúrhez, és a bolygó körül tervezett manőverei

A szondacsomag hét évig utazik az interplanetáris térben, míg a szétváló, individuális űreszközök 2025 decemberében várhatóan pályára állnak a Merkúr körül. Az út során több alkalommal hajt végre gravitációs hintamanővert a Föld, a Vénusz, illetve még a Merkúr mellett is. Az ESA 35 méteres átmérőjű Cebreros teleszkópja lesz az adatok elsődleges földi átvevője a szondáktól, valamint a parancsokat is ezen az állomáson keresztül adják majd le. A tervezett manővereket a pályára állításra és az azt megelőző időszakra vonatkozóan a 3. táblázat tartalmazza. Az űrmisziónévleges szakasza 2027. május elsejéig tart, ezután egyéves hosszabbítás várható.

A hat Merkúr-megközelítésnek az a célja, hogy a szonda bolygóhoz viszonyított sebességét fokozatosan (1,76-ról 1,09 km/s-ra) csökkentse. A negyedik Merkúr-megközelítést követően a BepiColombo már a Merkúréhoz hasonló pályán fog keringeni a Nap körül, és ekkor már a bolygó közelében marad. Egy következő manőverrel végül olyannyira lecsökkentik a relatív sebességet, hogy a Merkúr 2025. december 5-én képes lesz befogni az űrszondát, ami ezáltal poláris pályára kerül majd. Ekkor már csak egy kis beavatkozásra lesz szükség, és a szonda átkerül a végső pályájára, 178 ezer km-es apohermiummal. Itt a két keringő

egység leválik a transzfermodulról, majd kémiai üzemelésű meghajtó rakétákkal módosítják pályáikat, és felpörgetik a Mio szondát (8. ábra).

A Merkúr körüli keringésük során az MPO és az MMO is poláris pályán fognak mozogni. Az MPO a Nap felőli oldalon 400 km-re közelíti meg, a csóvában pedig maximálisan 1500 km-re fog eltávolodni a bolygó felszínétől, 2,3 órás keringési periódussal. Az MMO pályájának Merkúr-közeli pontja szintén a nap-pali oldalon lesz, 400 km-es magasságban, legtávolabbi pontja pedig a csóvában, a felszíntől 12 000 km-re. Az MMO keringési periódusát 9,3 órára tervezik.

## Milyen tudományos eredmények várhatók a BepiColombo űrmissziótól?

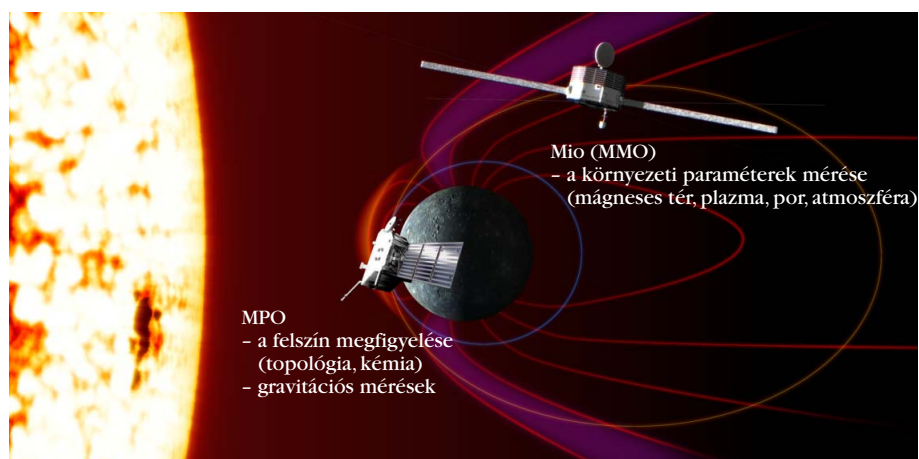
A BepiColombo elsődleges céljai között szerepel annak alaposabb megismerése, hogy miként alakulhattott ki, és hogyan fejlődött az idők során egy, a központi csillagához közel keringő bolygó. Ugyancsak fontos annak megértése is, hogy milyen alkotóelemekből, milyen struktúrával, geológiával, külső hatásokkal jött létre a napjainkban megfigyelhető égitest (9. ábra).

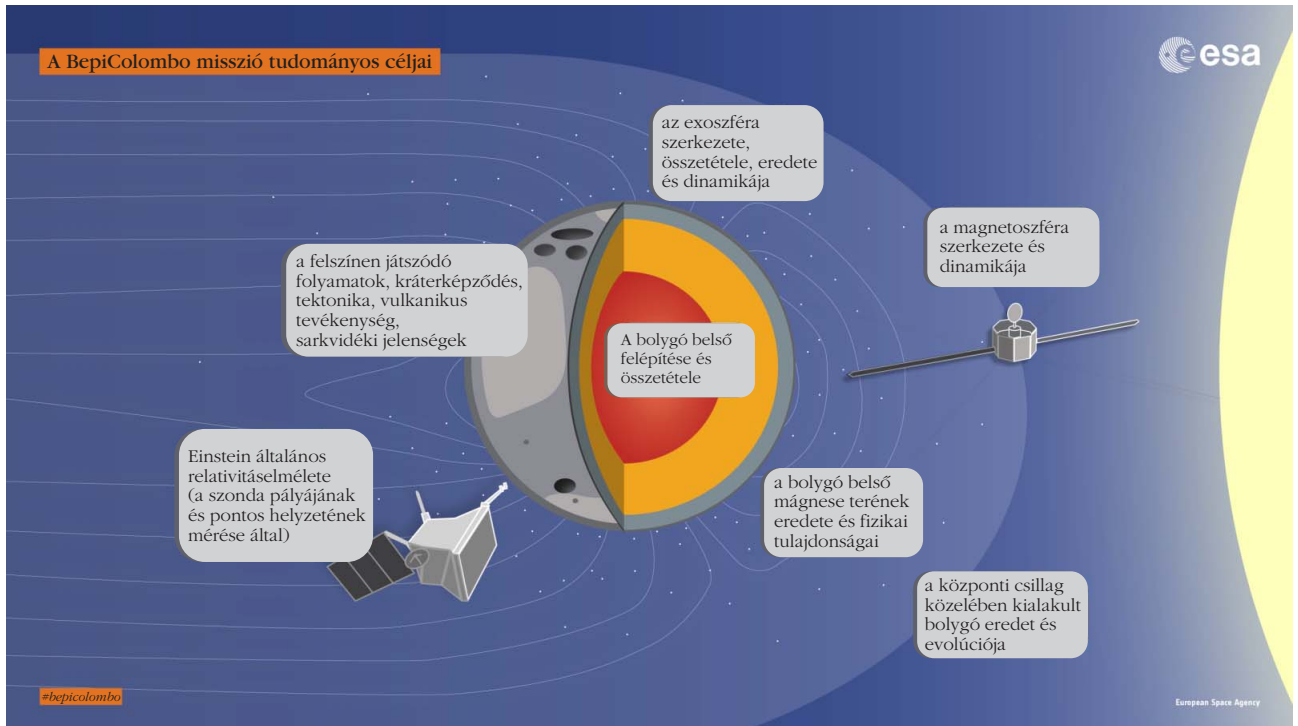
A plazmavizsgáló berendezések méréseinek feldolgozásából meghatározható az atmoszféra felső rétegeinek összetétele, dinamikája, valamint a Merkúr eredetű részecskék szökési folyamatai és azok sebessége. Tanulmányozhatjuk a magnetoszféra szerkezetét, dinamikáját, a benne zajló folyamatokat, a mágneses tér eredetét.

Az űrmisszió időtartama alatt vizsgálatokat végeznek majd annak megállapítására is, hogy milyen lehet a bolygómag szilárd és cseppfolyós tartománya, valamint meghatározzák méretüket. Feltérképezik a gravitációs és a mágneses teret. Az orosz hozzájárulásnak köszönhetően gamma-sugárzás- és neutronspektrométerekkel lehetőség nyílik a poláris tartományok víz(jég) tartalmának vizsgálatára is azon kráterek mélyén, ahová sohasem jut el a napfény.

A BepiColombo űrmisszió MPO és MMO űrszondái a MESSENGER-nél közelebbi pályákon fognak kerin-

8. ábra. Az MPO és az MMO keringési pályái az űrmisszió időtartama alatt (forrás: JAXA, ESA).





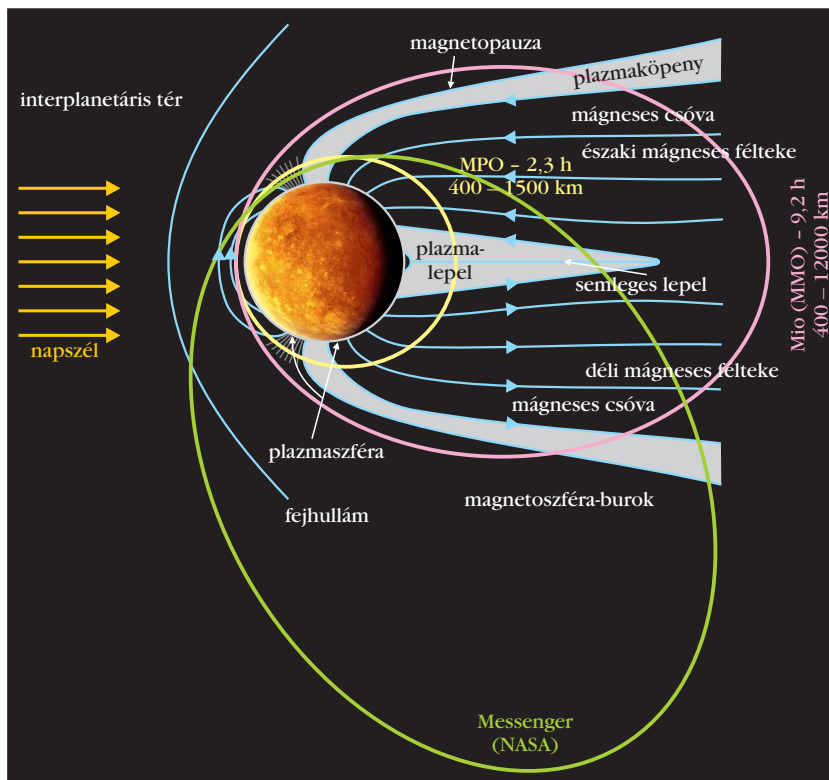
9. ábra. A BepiColombo űrmisszió tudományos célkitűzései (forrás: ESA).

geni a Merkúrhoz. A két űrmisszió szondáinak trajektóriáit a 10. ábra mutatja. A BepiColombo szondák minden korábbinál közelebbi, folyamatos megfigyélést tesznek majd lehetővé a Merkúr plazmakörnyezetében. A két szonda egyidejű keringése, ezáltal a mé-

resí adatok korreláltatása révén a fizikai folyamatok szélesebb spektrumú, nagyobb térbeli felbontású vizsgálatát teszi lehetővé.

Az MPO szonda fedélzetén található két alacsony energiájú töltőtérzszecke-detektor egyike, a Planetary

10. ábra. A Merkúr mágneses terének tartományai és a korábban odalátogató MESSENGER, valamint a BepiColombo MPO és MMO szondáinak pályái (forrás: MPS).



Ion Camera (PICAM) kifejlesztésében a Wigner Fizikai Kutatóközpont mérnökei és fizikusai is részt vettek. A PICAM iontömeg-spektrométer, amelynek elsődleges feladata azon folyamat vizsgálata, amely során a Merkúr talajából kilökődő semleges részecskék ionizálódnak, majd a külső és belső eredetű elektromágneses terek hatására áthaladnak a Merkúr plazmakörnyezetén, és végül a napszél hatására végleg eltávoznak a bolygó közeléből. A PICAM mérései által információhoz jutunk az ionok összetételéről, energiájáról, valamint térbeli és irányeloszlásáról. A vizsgált energiatartomány felső határa 3 keV lesz, valamint egészen a Xe-ig képes lesz azonosítani az általa érzékelt ionokat.

Ezek a megfigyelések egyedülálló lehetőséget nyújtanak majd a felszíneredetű, alacsony energiájú részecskék tanulmányozására, származási régióik beazonosítására, összetételükre, a kilökődés mechanizmusára vonatkozóan, valamint egyidejűleg a felszíni erózióért, a részecskék felszínről való eltávolításáért fe-



lelős napszél monitorozására is. Mindezek nagyban hozzásegítenek majd bennünket annak megértéséhez, hogy milyen folyamatok révén jött létre a Merkúr napjainkban is megfigyelhető ritka exoszféra.

A BepiColombo űrmisszió MMO űrszondáján található por-detektorral (Mercury Dust Monitor – MDM) kisméretű porszemcséket ( $m > 10^{-13}$  g) lehet detektálni a Merkúr körüli térségben [7]. Az MMO elliptikus pályájának pericentruma 400 km, ahol elsődlegesen a Merkúr felszínéről – a nagy sebességű bolygóközi mikrometeoroidok folyamatos bombázása következtében – kilökődött porfelhő részecskéit észlelheti, míg az apocentrum távolságban (12 000 km) főként bolygóközi porszemcsék (IDP-k) becsapódását lehet mérni. Az MMO lesz az első olyan űrszonda, ami in-situ porméréseket végez majd a Merkúr körül. Az MDM négy piezoelektromos elven működő érzékelő lappal (teljes  $64 \text{ cm}^2$  érzékelő felülettel) ellátott detektor, ami a beeső porszemcsék impulzusát méri.

A porszemcsék impulzusát a piezoelektromos feszültséggel hullámformájából lehet meghatározni, a porszemcsék eredetét pedig azok pályáinak tulajdonságaiból – a detektálási pozícióból és az érzézési irányból – lehet kikövetkeztetni. Az MDM adatok értékes információval szolgálhatnak a bolygóra érkező por fluxusáról, ami nagy részben befolyásolja a Merkúr-felszíni regolit tulajdonságait, és kapcsolatban van a bolygó híg atmoszférájában (exoszférájában) elsődlegesen megtalálható Na mennyiségével. Becslések szerint az MDM 1 év alatt nagyságrendileg 200 IDP szemcsé ( $m > 10^{-13}$  g,  $v = 30 \text{ km/s}$  feltételezéssel) beütökését detektálhatja. Ahogy korábban már említettük, az IDP-fluxus és a Merkúr atmoszférájában mért Na fluxusának időfüggése között gyenge korreláció áll fenn, amely a bolygó pályájának  $7^\circ$ -os inklinációjával hozható kapcsolatba. Egy ilyen gyenge korrelációt már sikerült kimutatni földi megfigyelésekkel, azonban az MDM mérései egyedülálló adatokat szolgáltathatnak azokról a tényleges fizikai folyamatokról, amelyek a bolygó ritka exoszféráját alakítják. Az MDM mérései pontosabb képet adhatnak Nap-

rendszerünk Merkúr környéki tartományában az IDP-k eloszlásáról és térbeli sűrűségéről, ami jelenleg csak az 1 CSE-nél mért értékek extrapolációjából, illetve elméleti modellezésekből ismert.

A 3 vevőből álló és 2 sor elektromos és kétféle mágneses érzékelőhöz kapcsolódó PWI (Plasma Wave Investigation) elnevezésű plazma- és rádióhullám-megfigyelő rendszer első alkalommal végez in-situ és távérzékelési méréseket a bolygó magneto- és exoszférájában. A megfigyelésekből az unikális, nem MHD dominált és ionoszféra nélküli magnetoszféra szerkezetére, dinamikájára és energiacsere-folyamataira, illetve a nagy dinamikus nyomású napszél és a bolygó gyenge mágneses tere kölcsönhatására kapunk információt. A berendezés emellett alapvető plazmadiagnosztikát is végez az elektronsűrűség és -hőmérséklet mérésével.

Számos érdekes és fontos tudományos vizsgálatra lesz majd tehát lehetőség, korábbi ismereteink kibővítésére, a modellek pontosítására, valamint az űrmisszió megvalósítása során felmerült technológiai problémák megoldásai is utat nyitnak a gyorsabb, hatékonyabb űreszközök kifejlesztése felé.

#### Irodalom

1. 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. *Planetary and Space Science* 58/1–2 (2010) 166–181.
2. Steigerwald, B.: Magnetic Tornadoes Could Liberate Mercury's Tenuous Atmosphere. *NASA Goddard Space Flight Center* (2009).
3. Broadfoot, A. L. et al.: Mercury's Atmosphere from Mariner 10: Preliminary Results. *Science* 185 (1974) No. 4146, 166–169.
4. Domingue, D. L. et al.: Mercury's Atmosphere: a Surface-Bounded Exosphere. *Space Science Reviews* 131 (2007) 161–186.
5. Kameda, S., et al.: Interplanetary dust distribution and temporal variability of Mercury's atmospheric Na. *GRL* 36 (2009) L15201, doi:10.1029/2009GL039036
6. Müller, M. et al.: Estimation of the dust flux near Mercury. *Planetary and Space Science* 50 (2002) 1101–1115.
7. Nogami, K., et al.: Development of the Mercury dust monitor (MDM) onboard the BepiColombo mission. *Planetary and Space Science* 58 (2010) 108–115.



**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Küldöttgyűlése**  
**2020. szeptember 12-én, szombaton 10:00 órai kezdettel**  
**az Eötvös Egyetem Északi Tömb -1.75 Konferenciateremben lesz.**

**A hagyományos napirend előtti szakmai előadás:**  
**Pernecky László: Eötvös Loránd, a fotográfus nyomában**  
**a Dolomitokban (2003, 2008)**