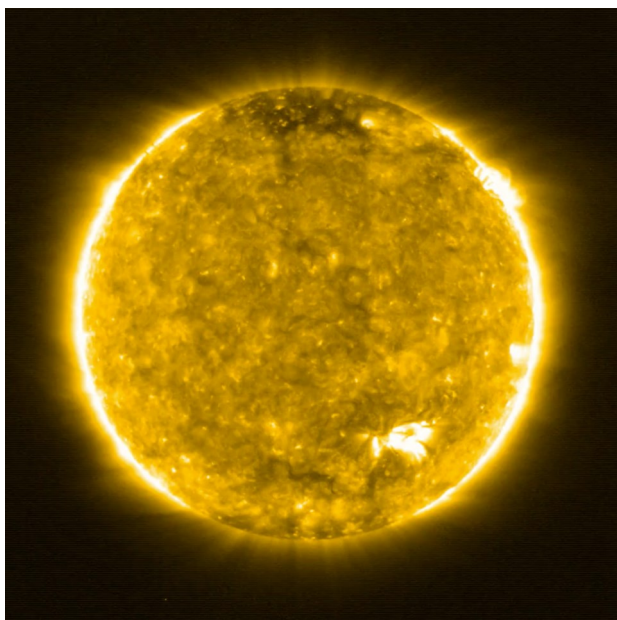


ŰRTAN ÉVKÖNYV 2020



MANT



Az Asztronautikai Tájékoztató 72. száma

Kiadja a Magyar Asztronautikai Társaság



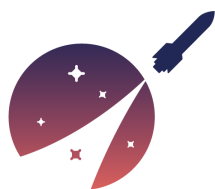
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Villamosmérnöki és Informatikai Karával (VIK) közösen szervezett kétnapos H-SPACE 2020 nemzetközi űrkonferencia megnyitója 2020. február 26-án. Balról jobbra: Bacsárdi László, a MANT alelnöke, a konferencia egyik társelnöke, Ferencz Orsolya, az űrkutatásért felelős miniszteri biztos, Charaf Hassan, a BME VIK dékánja, Kovács Kálmán, a BME Egyesült Innovációs és Tudásközpont igazgatója, a konferencia másik társelnöke, valamint Both Előd, a MANT elnöke. (Fotó: Trupka Zoltán)

A címlapon az Európai Űrügynökség (ESA) 2020. február 10-én indított Solar Orbiter űrszondájának egyik képe a Napról. A 17 nm-es hullámhosszon készített felvétel a napkoronát mutatja, az Extreme Ultraviolet Imager (EUI) műszerrel 2020. május 30-án végzett megfigyelések alapján. Ekkor a szonda nagyjából a Nap és a Föld közötti távolság felénél járt. A Solar Orbiterről és a küldetés magyar vonatkozásairól részletesen olvashatnak Évkönyvünk egyik cikkében. (Kép: Solar Orbiter / EUI Team / ESA & NASA; CSL, IAS, MPS, PMOD/WRC, ROB, UCL/MSSL)

Űrtan Évkönyv 2020

Az Asztronautikai Tájékoztató 72. száma

Kiadja a Magyar Asztronautikai Társaság



MANT

Űrtan Évkönyv 2020

Az Asztronautikai Tájékoztató 72. száma

Szerkesztette: dr. Frey Sándor

Készült
a Külgazdasági és Külügyminisztérium
támogatásával

Kiadja:
a Magyar Asztronautikai Társaság
1044 Budapest, Ipari park u. 10.
www.mant.hu
Budapest, 2021

Felelős kiadó: dr. Hirn Attila főtítkár

Kézirat gyanánt

HU ISSN 1788-7771

Előszó

Koronavírus. Ha majd évek múlva visszatekintünk a 2020-as évre, valószínűleg ez a szó határozza meg a legjobban, hogy mi történt a Földön ebben az esztendőben. Sem egyesületünk, a Magyar Asztronautikai Társaság (MANT), sem a világ űrtevékenysége nem tudta teljesen kivonni magát a járvány, az ahhoz kapcsolódó korlátozások alól. Űrindítások késtek hosszú hónapokat, de két évvel el kellett halasztani a Marshoz indítandó európai–orosz Exo-Mars küldetést is. A MANT a megszokott rendezvényeit csak az év legelején tudta hagyományos formában megtartani, utána óvatosságból és a lezárások miatt a virtuális térbe költöztünk. Szerencsére 2020-ban megújult internetes honlapunk, megerősítettük jelenlétünket a közösségi médiában, és videómegosztó csatornát is indítottuk. Virtuálissá vált az Űrtábortól kezdve az Űrakadémia Klubokon át az Űrkutatás Napjáig minden. Nem tudtuk megtartani a beszámoló közgyűlést sem – helyette tagjaink elektronikus formában olvashatták és észrevételezhették a dokumentumokat.

Az Űrtan Évkönyv mostani, a 2020. évre vonatkozó kötetében (az Asztronautikai Tájékoztató sorozatának immár 72. számában) is óhatatlanul fel-felbukkan a koronavírus szó, különféle összefüggésekben – mind a kötetet indító megszokott éves esemény-összefoglalóban, mind az évkönyv végén olvasható, a MANT életének történéseit felidéző válogatásban. Mindettől függetlenül 2020 is bővelkedett fontos és izgalmas, meghatározó jelentőségű üreseményekben. Az Egyesült Államokban például új űrhajótípust (Crew Dragon) vettek használatba, a nyáron három űreszko is elindult a Mars felé – sőt most, 2021 elején már azt is tudjuk, hogy az arab, kínai és amerikai szondák rendben oda is értek. Anyagminták érkeztek a Földre más égitestekről, a Ryugu kisbolygóról és a Holdról. A magyar űrtevékenységről egyre többet hallani a napi sajtóban is, a 2020-as év eseményei közül talán a második és harmadik magyar műhold, a SMOG-P és az ATL–1 sikeresen befejeződött pályafutását lehetne kiemelni.

Az idei Úrtan Évkönyv különösen gazdag a szakmai-ismeretterjesztő cikkekben. A hét írás kínálta témaválaszték igen széles: a világűrjog egyik legaktuálisabb kérdésétől kezdve szinte az egész Naprendszeren át a távoli csillagok és exobolygók világáig találhatnak itt írásokat az érdeklődő olvasók. Köszönet illeti szerzőiket, hogy megosztották velünk munkájuk eredményeit.

Ugyancsak köszönettel tartozunk a Külgazdasági és Külügyminisztériumnak, hiszen az idei évkönyvet is az ő támogatásuk révén sikerült elkészítenünk és eljuttatnunk tagtársainkhoz, olvasóinkhoz. A magam és az Úrtan Évkönyvet készítő munkatársaim nevében is kellemes, hasznos időtöltést kívánok a kötet olvasásához.

Budapest, 2021. február

A szerkesztő

Válogatás az űrkutatás 2020-as eseményeiből

Összeállította: Frey Sándor

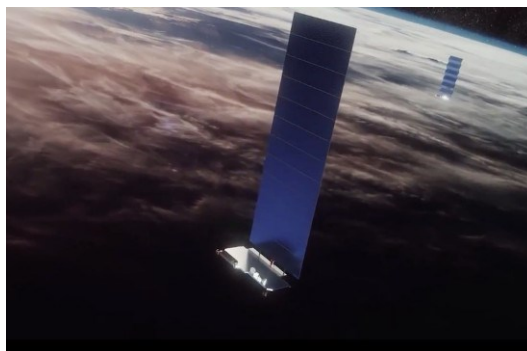
Összeállításunkban az Űrvilág internetes hírportál (www.urvilag.hu) anyagaiból válogattunk. Az eredeti cikkek szerzői Both Előd, Frey Sándor, Szentpéteri László, Tamási Kinga. Az év további érdekes üreseeményeiről, eredményeiről az Űrvilág 2020-as archívumában található több mint 500 cikkben olvashatnak az érdeklődők.

2020. január

Évindítás 60 Starlink műholddal. A műholdas internet-szolgáltatásra készülő SpaceX a január 7-én elvégzett harmadik 60-as start után már a legnagyobb kereskedelmi műholdflotta üzemeltetőjévé vált – és hol volt ekkor még az év vége. Elon Musk cégének végső célja az alacsony pályákon a Földet körbehálózó Starlink műholdrendszerrel egy globálisan hozzáférhető szélessávú, rövid késleltetési idejű internetszolgáltatás bevezetése, a földi szolgáltatók áraival versenyképes módon. Az indítások sorozata 2019 májusában kezdődött, és a 2020-as év végére már pályára állt a tizenhatodik 60-as (vagy esetenként, amikor más kisebb műholdak is helyet kaptak a Falcon-9 rakétán, közel 60-as) műholdcsoport is.

Az első 1584 darab Starlink műhold kb. 550 km magas, 53 fokos hajlásszögű pályákon üzemel majd. De a cég már engedélyt kapott összesen 12 ezer műhold felbocsátására, és a hírek szerint kéri majd az illetékes hatóság hozzájárulását ahhoz, hogy a teljes konstelláció végül 42 ezer darabos legyen. Összehasonlításképpen: jelenleg nagyjából 2000 aktív műhold kering a Föld körül. A Starlink műholdseregnek jelentős mellékhatásai lesznek mind az alacsony pályákon megnövekvő ütközési kockázat, mind a csillagos eget elcsúfító és a csillagászati észleléseket megnehezítő fényszennyezés tekintetében. Ami a napnyugta

után és napkelte előtt, a napsugarakat visszaverve fényes „csíkokat húzó” Starlink holdakat illeti, a januári 60 műhold közül egy darab kísérletképpen már kevésbé fényviszszaverő burkolattal készült. A módszer azonban nem vált be, így 2020 közepétől kezdve egy napárnyékolós megoldással (VisorSat) és műholdak helyzetének megváltoztatásával igyekeznek csökkenteni a fényességet. Ennek ellenére a Starlink műholdak még mindig fényesebbek az ajánlott 7 magnitúdós határnál, amelynek elérése esetén legalább szabad szemmel láthatatlanná válnának. Ez azonban nem vigasz a csillagászok számára: az ezerszám pályára kerülő műholdak például még így is 40 milliószor fényesebbek, mint amilyen egy átlagos galaxis a jelenségtől leginkább kárt szenvedő nagy látómezejű távcsövének felvételein.



2020. február

OneWeb: az első adag Bajkonurból. Február 6-án 34 műhoddal bővült a OneWeb tervezett globális szélessávú műholdas internetszolgáltatásának alapját jelentő műholdrendszer. A hordozórakéta egy Fregat-M végfokozattal felszerelt orosz Szojuz-2.1b volt, amely a kazahsztáni starthelyről indult. Akkor még úgy volt, hogy 2020-ban számos hasonló indítást várhatunk Bajkonurból, az orosz távolkeleti Vosztocsnijból, sőt Francia Guyanából, Kourouból is. A rendszer kiépítésének első fázisában pályára állítandó űreszközök teljes száma megközelítette a 650-et. A startok

szervezésére az Arianespace vállalat kapott megbízást. Egy-egy alkalommal egyszerre 32–36 OneWeb műhold kerülhet alacsony Föld körüli pályára. A londoni székhelyű OneWebnél úgy számoltak, hogy 2020 végére már elindíthatják kezdeti szolgáltatásukat, 2021-ben pedig globális lefedettséget érhetnek el.



Március 21-én ugyancsak Bajkonurból újabb 34 műhold került pályára, de a cég nem sokkal ezután csődvédelembe menekült, mivel nem tudott elég befektetőt és előfizetőt bevonni a tervezett rendszer kiépítésébe és üzemeltetésébe. A startok leálltak, de a brit kormány július elején bejelentette, hogy felvásárolja a márciusban csődbe jutott brit–amerikai OneWeb céget. A megkötött felvásárlási szerződés 1 milliárd USA dollár értékű, amely összeget fele-fele arányban fizeti a brit kormány és az indiai székhelyű, de brit érdekeltségekkel is rendelkező Bharti Enterprises Ltd. (A cég eddig nem számított űripari szereplőnek, honlapjuk tanúsága szerint fő profiljuk a távközlés, a biztosítás, az ingatlankereskedelem, valamint a mezőgazdaság és élelmiszeripar. Ugyanakkor fontos célkitűzésük a minőségi oktatás nyújtása India elmaradott térségei számára.)

A csődhelyzet miatt hosszú kihagyással, de december 18-án ismét pályára állt 36 műhold a OneWeb rendszerébe – most először Vosztocsnijból. A korábban már pályára állított holdakkal együtt ezzel 110 darabosra nőtt a műholdsereg létszáma. A OneWeb a kilenc hónapos kihagyás ellenére is másodikként követi a SpaceX-et az alacsony pályáról végzett kereskedelmi műholdas internetszolgáltatás be-

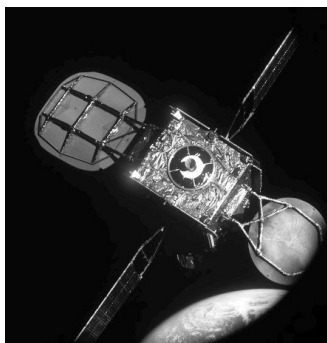
vezetéséhez vezető úton. A OneWeb floridai leányvállalata, a OneWeb Satellites által sorozatban gyártott, közel 150 kg tömegű műholdak xenonnal működő ionhajtóműveket használnak a pályamagasságuk megemelésére. A konstelláció tagjai 1200 km-rel a felszín fölött működnek majd.

Elindult a Solar Orbiter. Ez az Európai Űrügynökség (ESA) legújabb tudományos űrszondája, az amerikai NASA jelentős hozzájárulásával, a Nap és a helioszféra kutatására épült. Az űreszközt a floridai Cape Canaveral bázisról, egy 411-es konfigurációjú Atlas-5 rakétával és Centaur végfokozattal küldték a világűrbe, február 10-én. A Solar Orbiter működése során minden más korábbi európai űreszköznél jobban megközelíti, a Merkúr pályáján belülről figyeli majd a Napot és környezetét. Nagy felbontással vizsgálja külső légkörét, annak dinamikus jelenségeit, a kiáramló részecskesugárzást (vagyis a napszelet). Részletes képet alkot arról, hogyan befolyásolja a Nap a kozmikus környezetét, milyen hatással van a Föld térségére, a Nap-Föld kapcsolatok, az űridőjárás alakulására. A Solar Orbiter különleges, az Ekliptika síkjából kiemelkedő pályája révén először szolgáltat majd nagy felbontású méréseket a Nap poláris vidékeiről, adatokat gyűjt az ottani, ma még nem kellőképpen ismert mágneses térről. Hozzájárulhat a kb. 11 éves napaktivitási ciklus, valamint a napkitörések keletkezésének jobb megértéséhez. Fedélzetén összesen 10 tudományos műszeregyüttes kapott helyet, amelyek mérései jól kiegészítik majd egymást. Közöttük lesz, amely képeket alkot a Napról, mások az elektromágneses és plazmakörnyezet jellemzőit határozzák meg. (A Solar Orbiter-ről, műszereiről, első eredményeiről és a programban való magyar részvételről részletesebben Évkönyvünk egyik cikkében olvashatnak.)

Két műhold nagy találkozása. Szerviz felsőfokon: most először dokkolt két kereskedelmi műhold, még hozzá a geostacionárius pálya magasságában. A MEV-1 (Mission Extension Vehicle-1), a világ első üzemidő-hosszabbító céllal készült műholdja tavaly 2019 októberében állt pályára.

Az amerikai Northrop Grumman vállalat űreszközének kifejezett célja az Intelsat-901 jelű távközlési hold megkérésése, megközelítése, a hozzá való csatlakozás volt. Ezt most végre is hajtotta. Február 5-én érkezett a kiszemelt célpontja közelébe. A február 25-én sikeresen végrehajtott művelet nem csak két kereskedelmi műhold űrtörténelmi elsőséget jelentő dokkolása volt, és nem csak az első dokkolás ilyen magas pályán, de egyben az első eset, hogy olyan űreszközhöz csatlakozott egy másik, amelyet eredetileg egyáltalán nem terveztek arra, hogy egyszer majd megközelítik és kapcsolódnak hozzá a Föld körül.

A MEV-1 szerepe, hogy átvegye az Intelsat-901 manőverezésének a feladatát, hiszen a távközlési műhold hajtóanyagkészlete mostanra szinte teljesen kifogyott. Korábban már kb. 290 km-rel meg is emelték pályamagasságát, hogy ne legyen útban a zsúfolt és értékes geostacionárius pályáívméntén. Kommunikációs berendezései azonban még működőképesek, adattovábbítással és televíziós műsorok sugárzásával a jövőben is ki tudja majd szolgálni felhasználóit. Így a most érkező segítséggel ténylegesen meghosszabbítható hasznos élettartama. Ha a módszer beválik, új piacok nyílnak meg a kereskedelmi műhold-üzemeltetésben.



Most, hogy a csatlakoztatás sikerrel járt, a MEV-1 következő teendője visszavontatni a távközlési holdat a „helyére”, a geostacionárius pályán a $27,5^\circ$ nyugati hosszúságnál levő kijelölt pozícióba. Itt a keringési ideje újra meg fog egyezni a Föld 1 napos forgási periódusával. Beállítják a pálya hajlásszögét is, $1,5^\circ$ -ra. Mindezt a munkát a MEV-1 ionhajtóműveire bízák. A manőverekkel március végére vagy április elejére végeznek, és utána az Intelsat beindíthatja a távközlési szolgáltatásokat az újjászületett műholdjával.

Az Intelsat-901 egyébként 2001 júniusában állt pályára, akkor tervezett élettartama 13 év volt. A MEV-1 most a remények szerint 5 évvel toldhatja meg az Intelsat-901 aktív élettartamát, utána pedig visszavontatja „temetői” pályára. Az üzemidő-hosszabbító MEV-1 viszont akkor még készen állhat egy újabb geostacionárius műhold felélesztésére is, ha akad rá megrendelő.

2020. március

ExoMars 2020-ból 2022. Az európai és orosz illetékesek úgy döntöttek, hogy elhalasztják a Marsra induló közös űrexpedíció nyárra tervezett startját. A halasztás azt jelenti, hogy meg kell várni a Mars energiatakarékos megközelítésére kedvező következő indítási ablakot, ami 2022-ben, valamikor augusztus és október között jön el. Egy közös európai-orosz csoport értékelése szerint a 2020 nyarára tervezett indítási időpont kockázatos, várhatóan nem volna tartható. További, feszített tempójú tesztek lennének szükségesek annak érdekében, hogy az ExoMars 2020 szonda megbízható működéséről meggyőződhesse. A sietséget ugyanakkor hátráltatják a koronavírus-járvánnyal kapcsolatos óvintézkedések, utazási korlátozások is. A programban az orosz vezetéssel készülő Kazacsok felszíni egység és az európai Rosalind Franklin marsjáró szerepel. A küldetés elsődleges feladata, hogy kiderítse, volt-e valamiféle élet a Mars történetének régmúltjában, illetve hogyan alakult az idők során a bolygó felszínén a folyékony víz megjelenése, majd eltűnése. A Rosalind Franklin rover akár 2 m-es mélységet elérő fúrót és miniatűr laboratóriumot is visz majd magával – de a jelek szerint csak 2022-ben.

Műholdképek járvány idején. A koronavírus-járvány miatt érezhetően megnőtt az érdeklődés a nagyfelbontású műholdfelvételek és a belőlük származtatott adatok iránt. A műholdas távérzékelésben aktív észak-amerikai cégek egybehangzó állításai szerint egyre több megrendelést kapnak olyan vállalatoktól, amelyek távoli telephelyeik, infra-

strukturális létesítményeik monitorozásához kívánják a korábbiaknál nagyobb mértékben alkalmazni a műhold-felvételeket. Az ok a koronavírus-járvánnyal kapcsolatban elrendelt utazási korlátozásokban keresendő. Az egy egész földmegfigyelő műholdflottát üzemeltető Planet cég (San Francisco) szerint a biztonságos és megfizethető alternatívát jelentő műholdas megfigyelések fontos szerepet játszanak az ilyen vállalatok folyamatos működésének fenntartásában.

A kanadai SkyWatch (Waterloo, Ontario) is kínál szolgáltatásokat energiaipari, infrastruktúra-üzemeltető, építőipari és közművállalatoknak. Ezek igénylik, hogy az adott esetben akár nehezen megközelíthető létesítményeik állapotáról rendszeres időközönként jelentést kapjanak. Meglehet, hogy a járvány nélkül is növekedne az érdeklődés az efféle – a hagyományos módszereknél alkalmasint gazdaságosabb – szolgáltatások iránt, de a kényszerhelyzet miatt a folyamat bizonyára felgyorsul. Mások műholdas távérzékelési információk felhasználásával szeretnék minél naprakészebben és pontosabban felmérni a járvány közvetett gazdasági hatásait. A New York állambeli Ithacában székelő Ursa Space Systems vállalat például az olajipari létesítményekkel kapcsolatban megélénkülő érdeklődésről számolt be. A cég globálisan mintegy 11 ezer olajtárolóról ad heti jelentéseket apertúraszintézises műholdradaros (SAR) mérési adatok elemzésével. Ezek az adatok különösen olyan területeken értékesek, ahonnan más nyilvános információ egyáltalán nem, vagy csak lassan érhető el. A Kínára vonatkozó szolgáltatásuknak nagy lett a keletje.

Egy műholdas adatok elemzésével foglalkozó másik vállalkozás, a New York-i SpaceKnow ugyancsak növekvő érdeklődést tapasztal, különösen ami a Kínára vonatkozó információit illeti. A cég több mint 6000 kínai ipari létesítmény monitorozását végzi, immár 5 évnél is régebbre visszamenően. Most számszerűsíteni tudják a gazdasági visszaesés mértékét. De a szolgáltatásokra várhatóan később is nagy lesz a kereslet, amikor majd – remélhetőleg mielőbb – a gazdaság helyreállításának, növekedésének a jeleit kell majd megfigyelni az űrből.

2020. április

Továbbra is alacsony a légszennyezés. Európa fölött tisztul a levegő, megtette a hatását a koronavírus-járvány. A legújabb műholdas adatok is megerősítik a korábbi megfigyeléseket, miszerint a levegő nitrogén-dioxiddal (NO_2) való szennyezettségének fokára jótékony hatással vannak a közlekedési korlátozások és az ipari termelés visszaesése. Nem véletlen, hiszen az emberi tevékenység nyomán a levegőbe kerülő NO_2 elsődleges forrása a fosszilis tüzelőanyagok égetése, fő kibocsátói a gépjárművek, az erőművek és az ipari létesítmények. A Copernicus program Sentinel-5P műholdjának legfrissebb adatait a Holland Királyi Meteorológiai Intézet (KNMI) szakértői elemezték. Holland vezetéssel készült egyébként a 2017 októbere óta repülő Sentinel-5P fedélzeti műszere, a Tropomi multispektrális képalkotó spektrométer. Ez más légköri összetevők mellett a nitrogén-dioxid koncentrációjának mérésére is alkalmas. Az eredmények azt mutatják, hogy Európa-szerte igen jelentősen, helyenként akár 45–50%-kal is visszaesett a légköri szennyezőnek a mennyisége. A nitrogén-dioxid káros az egészségre, növeli a légúti megbetegedések előfordulásának valószínűségét. Maga a légköri koncentráció időben erősen változó lehet, hiszen a kibocsátás sem egyenletes, és az időjárás hatása is más és más. Ezért érdemes hosszabb időszakra vett átlagértékeket összehasonlítani, ahogy most is tették.

A NASA embereivel a Holdra. Három cégcsoport közel 1 milliárd dollárért készíthet terveket, hogyan landolhatnak amerikai űrhajósok a Holdon 2024-ben. A kiválasztott vállalatok nevét április utolsó napján tették közzé. A munkát a Blue Origin, a Dynetics és a SpaceX szakemberei kezdhetik meg. Tíz hónapon át készítik majd tanulmányaikat a Human Landing System (HLS) program keretében, amelynek célja, hogy az embereknek a Holdra való leszállását megoldja. A NASA továbbra is tartja magát a kitűzött – bár feszítettnek tűnő – célhoz, hogy 2024 végéig újból űrhajósokat juttat égi kísérőnk felszínére. Az amerikai űrhi-

vatal e három versengő koncepció közül választja majd ki a számára legkedvezőbbnek tűnő megoldás(oka)t.

A mostani megbízásból a legnagyobb szeletet (579 milliót) a Blue Origin vezette konzorcium (megnevezésük szerint a national team, azaz nemzeti csapat) hasította ki. Maga a Blue Origin a leszállóegységet dolgozza ki, a Blue Moon néven ismert elképzeléséből kiindulva. A Holdról való felszállás megoldása a Lockheed Martin feladata. A konzorcium tagja még a Northrop Grumman és a Draper, akik a szállítómodult, illetve az avionikát és más fedélzeti rendszereket készítik.



A Dynetics vezette csoportban több mint 25 alvállalkozó van, ők 253 millió dollárért kezdik meg a tervezési munkálatokat. Az elképzeléseik szerint egyetlen modullal oldanák meg a Holdra való leszállást, majd az onnan való távozást.

A HLS szerződések közül a legkisebb, 135 milliós értékű a SpaceX vállalaté. Ők a készülő Starship segítségével oldanák meg a feladatot, amely egy Super Heavy rakétával indulna. A pályán az üzemanyaggal való utántöltést további Starship járművekre bíznák.

Az előzetes tanulmányok elkészítése után a NASA hamar el szeretne volna dönteni, hogy melyik változatnak lenne a legjobb esélye elkészülni 2024-ig, hogy azt válassza majd ki megvalósításra és további támogatásra. Bár van olyan elképzelés is, hogy egy vagy akár mindkét másik csapat fejlesztéseit is támogatni kéne, gondolva a holdi utazások hosszabb távon is fenntartható megoldására. (Az év vége felé, az Artemis holdprogram elégtelen költségvetési

támogatása hatására azonban a folyamat lelassult, a döntést elhalasztották.) A 2024-es leszálláskor a jelek szerint még nem fogják használni a Hold körüli pályára tervezett űrállomást (Gateway). Annak meglétét a NASA-nál most nem tekintik kritikusnak – és nyilván már most világosan látható, hogy nem is készülne el 2024-ig. A Hold emberes kutatásának folytatásához, a későbbi fázisokban (2028-tól) azonban alapvetőnek tűnik az égitest körül keringő állandó bázis működése.

A most kiválasztott három cég, illetve konzorcium egyike sem tervezi az indításhoz a NASA megrendelésére a Boeing fővállalkozásában (elég lassú ütemben) fejlesztett SLS (Space Launch System) nehézrakéta felhasználását. A SpaceX elképzeléséről már volt szó, a Blue Origin is saját rakétával (New Glenn) vagy a United Launch Alliance új Vulcan hordozórakétájával oldaná meg a feladatot, a Dynetics pedig a Vulcan rakétával vagy a SpaceX Super Heavy rakétájával számol.

2020. május

Bemutatkozott a kínai „űrállomás-szállító” rakéta.

Május 5-én Vencsangból (Wenchang) indult a Hosszú Menetelés-5B (CZ-5B) első példánya. Még 2016 novemberében mutatkozott be az új rakétatípus alapváltozata, mely akkor egy műszaki-kísérleti holdat juttatott alacsony Föld körüli pályára. A Hosszú Menetelés-5 rakéta második repülésére 2017 júliusában került sor egy geostacionárius pályára szánt műholddal. Az akkori start azonban kudarccal végződött, s emiatt a program kétéves csúszásba került. A 2019. decemberi harmadik repülés viszont sikerült, az eddigi legnagyobb tömegű és legmodernebb kínai geostacionárius távközlési műholdat bocsátották fel. A most kipróbált CZ-5B jelű módosított változatot az elkövetkező három év alatt fokozatosan összeálló, új, moduláris űrállomás fő darabjainak pályára állítására szánják. A CZ-5B jóval rövidebb, ugyanis hiányzik a harmadik fokozata. Ugyanakkor az eddig Kínában gyártott legnagyobb (20 m

hosszú) orrkúpot építették meg hozzá, amely alá már befér az űrállomásmodul. A CZ-5B májusi feladata egyébként egy új fejlesztésű kísérleti űrhajó felbocsátása volt, amelynek kabinja a pályán végrehajtott tesztek után 8-án rendben landolt. Nem járt viszont sikerrel 6-án a másodlagos hasznos teher, egy technológiai kísérlet, egy felfújható hővédő pajzzsal felszerelt egység visszatérése.

HTV kilencedszer és utoljára. A japán HTV teherűrhajó május 20-án egy H-2B hordozórakétával indult a Nemzetközi Űrállomáshoz (ISS). Az automata HTV (H-2 Transfer Vehicle) teherűrhajók sorában ez a kilencedik. Most használták utoljára a legnagyobb teljesítményű japán hordozórakétát, amely korábban nyolcszor – mint ahogy ez alkalommal is – HTV teherűrhajókat juttatott Föld körüli pályára. Először 2009-ben, a HTV-1-gyel indult. A teherűrhajók jelentik Japán legfontosabb hozzájárulását az ISS nemzetközi programjához.

A jövőben a H-2B és a valamivel kisebb tolóerejű H-2A rakétákat is felváltja a H3 jelzésű új hordozóeszköz, a Japán Űrügynökség (JAXA) és a Mitsubishi Heavy Industries (MHI) vállalat közös fejlesztése. A mostani repülésével ugyancsak búcsúzik a szolgálatból Japán megszokott, jellegzetes henger alakú teherűrhajója, a HTV első generációja. A jövőben a továbbfejlesztett HTV-X veszi át a szerepét, először 2022-ben küldhetik majd az űrállomáshoz.

A HTV-9 teljes rakományának tömege 6,2 tonna. A belső, hermetikus tárolórészben az ISS-re szánt különféle ellátmány, kísérleti eszközök utaznak. A külső raketeret megint – és szintén utoljára – egy Li-ion akkumulátorokból álló csomag foglalja el. Ezzel a 6 egységgel befejeződik az űrállomás energiaellátó rendszerében az akkumulátorok cseréje.

Az első magyar űrrepülés 40. évfordulója. 1980. május 26-án Bajkonurból startolt a Szojuz-36 űrhajó, amely Valerij Kubaszovot és Farkas Bertalant vitte a Szaljut-6 űrállomásra. A repülésre az Interkozmosz program keretében került sor. Ezzel Magyarország lett a hetedik „űrnemzet” a

világon, amelynek állampolgára eljutott a Föld körüli pályára. Az ünnepi alkalomból a Magyar Posta június 3-án egy négy bélyegből álló kisívet jelentetett meg. Ennek egyes címelein a Jurij Gagarin Űrhajóskiképző Központ, a Szojuz-36 űrhajó startja, a Szaljut-6 űrállomás és a Szojuz-35 visszatérő kabinjának képe jelenik meg.



Úton a Crew Dragon. Két űrhajóssal a fedélzetén bemutatkozott az amerikai emberes űrhajók ötödik típusa. Közel egy évtized elteltével újból amerikai földről indultak űrhajósok – Douglas Hurley és Robert Behnken – az ISS-re. A SpaceX vállalat által fejlesztett Dragon-2 űrhajó emberek szállítására alkalmas változata (a Crew Dragon) a floridai Kennedy Űrközpontból május 30-án startolt Demo-2 jelű küldetésére. A hordozóeszköz a SpaceX Falcon-9 rakétája volt. A Crew Dragon – automata üzemmódban végzett tavalyi próbaútja után – most első alkalommal szállított embereket. Az ISS-hez másnap csatlakoztak és onnan augusztus 2-án tértek vissza, Florida partjaitól nyugatra, a Mexikói-öböl vizére.

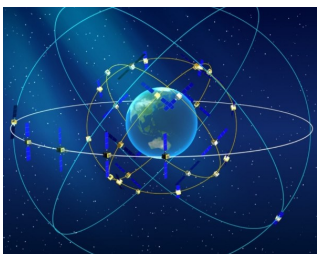
A sikeres start után Endeavour nevet kapott Crew Dragon útja jelentős mérföldkő az Egyesült Államok űrprogramjában. Habár az amerikaiak az ISS programjának meghatározó partnerei, űrhajósaik pedig folyamatosan jelen vannak a bázison, 2011 óta szállításukra kénytelenek voltak az orosz Szojuz űrhajókat igénybe venni. Az űrrepülőgépek használatból történő kivonása után ugyanis egészen mostanáig nem rendelkeztek saját űrhajóval, melyet saját területükről, amerikai hordozórakétával pályára tudtak volna állítani. Hála a NASA 2010-ben indított – és az

eredeti elképzelésekhez képest sok évet csúszott – kereskedelmi űrhajófejlesztési programjának (Commercial Crew Development), most ez megváltozik. A SpaceX mellett az amerikai űrhivatal másik partnere a Boeing, de ők a Starliner (CST-100) fejlesztésével még nem tartanak az emberes próbarepülésnél. Talán szimbolikus jelentősége is van annak, hogy az elsőként használatba vett, valóban 21. századi emberes űrhajót az a SpaceX fejlesztette, amely az elmúlt közel két évtizedben a magán-űrtevékenység legsikeresebb úttörőjévé vált.



2020. június

A Föld első elektroszmog-térképe. Az űrben 6 hónapja keringő SMOG-P a 350 km magasságú pályáról 4000 km átmérőjű kör területén tesz megfigyeléseket, mérései alapján elkészült az első elektroszmog-térkép. Az antennájába érkező jelek révén mostanáig már csaknem 2000 mérést rögzített. A világ eddigi legkisebb működő, 5×5×5 cm-es műholdja (PocketQube, PQ) a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) készült. Az űreszköz kettős célt teljesít: egyrészt a fedélzetén berendezéseinek működéséhez megfelelő környezetet teremt, másrészt elektroszmog-mérési feladatait a Földről kapott instrukcióknak megfelelően folyamatosan végzi, és küldi vissza az adatokat. A SMOG-P pályája magasságából hetente 4–5 km-t veszített, így a várakozásoknak megfelelően szeptember 28-án belépett a sűrű légkörbe és megsemmisült. Az űreszköz működő műholdként fejezte be küldetését, melynek során a földfelszíni digitális műsorszóró adók űrbe – feleslegesen – kijutó jeleit mérte.



Befejeződött a Beidou kiépítése.

Június 23-án Hszicsangból fel-emelkedett az a Hosszú Menetelés-3B rakéta, amely sikeresen Föld körüli pályára állította a Beidou-3 GEO3 jelű navigációs űreszközt. Ezzel megtörtént az utolsó start, amely ahhoz szükséges, hogy a kí-

naiak saját navigációs műholdrendszere globális lefedettséget nyújtson a felhasználóinak. Beidou indítások persze később is lesznek, de mostantól csak az elhasználandó régi műholdakat kell újakkal pótolni, hogy fenntarthassák az elért kiépítési szintet. A Beidou hasonló szerepet tölt be, mint a szintén katonai fenntartású, de jelentős részben polgári célokra is használt amerikai GPS és orosz GLONASSZ rendszerek, illetve a civil üzemeltetésű, még kiépítés alatt álló európai Galileo. A műholdakról lesugárzott navigációs rádiójelek vételével és feldolgozásával pontos hely-, sebesség- és időmeghatározás végezhető. A Beidou műholdak keresési és mentési funkciót is ellátnak. Míg a többi említett rendszer közepes (20 ezer km körüli) magasságban, a Földet körbevevő pályákon keringő űreszközöket használ, a kínaiak esetében 36 ezer km magasan pozicionált geoszinkron és geostacionárius műholdakat is alkalmaznak. Ez utóbbi kategória képviselője indult most. Ha eléri kijelölt állomáshelyét és néhány hónapon belül beüzemelik, akkor éri el a globális lefedettséget a Beidou rendszer.

A Beidou harmadik műhold-generációjába tartozó űreszközök között a mostani volt a 35., amelyet 2015 óta különböző pályákra állítottak. A korábbi generációk képviselőivel és a kezdeti tesztműholdakkal együtt 2000-től kezdve összesen az 59. Beidou startról van szó. Az ázsiai ország a becslések szerint 10 milliárd amerikai dollárnak megfelelő összeget költött a stratégiailag fontos saját navigációs műholdrendszere kifejlesztésére és kiépítésére. A programról 1994-ben hoztak döntést. A Beidou (magyaros átírással Pejtu) név a Nagy Medve (Göncölszekér) csillagkép kínai elnevezéséből származik. Kezdetben a Beidou

holdak csak Kína fölött, majd 2012-től Ázsia és a Csendes-óceán tágabb térségében (BDS-2) nyújtottak teljes szolgáltatást, néhány hónapon belül viszont meglesz az egész Földre kiterjedő lefedettség. Jelenleg a hálózatban egyébként 44 üzemképes műhold szolgál, a 2. és 3. generációból vegyesen.

A katonai felhasználás mellett a Beidou rendszert széles körben alkalmazzák a közlekedés, a mezőgazdaság, a halászat, a katasztrófa-elhárítás területén, hogy csak néhányat említsünk a műholdas hely- és időmeghatározás hagyományosan széles körű felhasználásának területei közül. A Kínában forgalmazott okostelefonok több mint 70%-a már fel van szerelve a Beidou jeleket feldolgozni képes vevőberendezéssel. A kínai állami hírügynökség jelentése szerint a világ országainak több mint felében ugyancsak működnek Beidou vevők. Alapesetben a helymeghatározás pontossága 5 m körüli. A fejlődés pedig nem áll meg, 2035-re a mostanin alapuló, de még fejlettebb műholdas hely- és időmeghatározó rendszert álmodtak meg Kínában.

2020. július

Több műhold a Copernicusnak. Hat új műholdas küldetéssel gyarapodhat az európai földmegfigyelési program. A reménybeli küldetések között lesz hiperspektrális távérzékelő, mikrohullámú sugárzásmérő, infravörös színeképelemző, radaros magasságmérő, a szárazföldi felszín hőmérsékletét infravörösben mérő, és L-sávú apertúraszintézises radarberendezést magával vivő műhold. Július 1-jén döntött az űreszközök elkészíttetéséért felelős ESA, hogy a pályázók közül milyen fővállalkozók kapnak megbízást a részletes tervezéshez. A feladat oroszánrészét az egyik nagy európai űripari vállalatcsoport, a Thales Alenia Space franciaországi és olaszországi cégei kapták. A hat műholdból három (CHIME, CIMR, ROSE-L) esetében ők vezetik a konzorciumokat, a szerződések összértéke 1,4 milliárd euró. Az Airbus Defence and Space németországi és spanyolországi divíziói egy 675 millió eurós megbízást vittek el

a CRISTAL és LSTM műholdak építésének előkészítésére. Végül a CO2M fővállalkozója a német OHB Space Systems, 445 millióért. Az összesen 2,55 milliárd eurós megbízások nyomán megkezdődhet ezeknek a jövőbeli Copernicus műholdaknak a részletes tervezése (B2 fázis). A döntés a tényleges megvalósításukról 2021 közepe-vége felé várható, amikor az Európai Uniótól és az ESA tagállamoktól össze kell jöjjön a finanszírozásukhoz szükséges pénz is.

Kémműholdat indítottak Izraelből. Az 1988-ban kezdett Ofek (Ofeq) sorozat legújabb tagja (Ofek-16) július 6-án startolt szilárd hajtóanyagú Savit-2 (Shavit-2) hordozórakétával a Palmachim (Palmachim) légibázisról. 2016 óta ez volt az első izraeli űrindítás. A műholdról katonai jellege miatt nem lehet tudni semmi pontosat, állítólag fejlett képességekkel rendelkező optikai kémműholdról van szó. Az Ofek sorozat korábbi tagjairól azt tartják, hogy fél méteres vagy annál is jobb felszíni felbontásra képesek.

Úton az első arab Mars-szonda. Az Egyesült Arab Emírségek űreszkeze, az Al-Amal (angolul Hope, jelentése remény) Japánból, a Tanegashima űrközpontból állt pályára egy H-2A rakétával, július 19-én. Az arab űreszkezt a Mars körüli pályára szánták, ahová később, az állam alapítása 50. évfordulójának évében, 2021. február 9-án rendben meg is érkezett és a bolygó körüli pályára állt. Ez az arab világ első Mars-szondája. A program mintegy 200 millió dollárba került. Ebben benne van a fejlesztés, az építés és az indítás költsége.

A szonda az emírátsági űrközpont (Mohammed Bin Rashid Space Centre, MBRSC) fővállalkozásában, és az Arizonai Állami Egyetem, valamint a Kaliforniai Egyetem közreműködésével született meg. A Hope egy alumínium méhsejt vázon alapuló, helyenként kompozit anyagokkal borított, 2,37 m széles és 2,90 m hosszú (magas) űreszke. A szonda induló tömege 1350 kg, energiaellátását két nap-elemszárny biztosítja. A Föld-Mars-Föld nagysebességű (1,6 Mbps) kommunikációra egy 1,5 m átmérőjű antenna szolgál. Arra az esetre, ha a szonda elvesztené térbeli ori-

entációját, és az antenna nem látná a Földet, kisebb teljesítményű, gyengén irányított antennákat is elhelyeztek a szondán. A Hope-on hat darab 120 newton és nyolc darab 5 newton tolóerejű rakétahajtóművet alkalmaznak a kisebb pályamódosításokhoz, illetve a térbeli orientáció változtatásához.

Az arab Mars-orbiter a vörös bolygó időjárását, klímáját, légkörét, hidrogén- és oxigénvesztését fogja tanulmányozni. Az űrszonda többek között vizsgálni fogja a Mars évszakos és napi időjárás-változásait, az alsó atmoszférát és annak porviharait. A Hope olyan kérdésekre keresi a választ, mint hogy miért és hogyan veszíti el a bolygó a légköri hidrogén- és oxigénkészletét (melyek a világűrbe szöknek). A szonda megvalósításában a két ország közel 350 szakembere vett részt. Fedélzetén három tudományos berendezést helyeztek el.

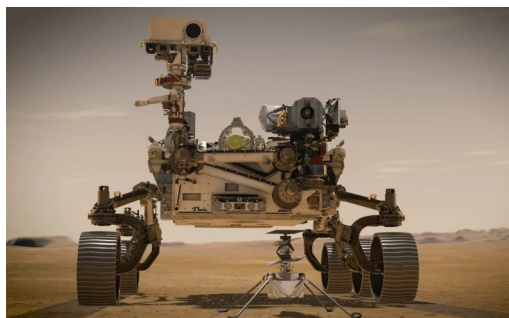
Kína is a Marsra tart. Július 23-án Vencsangból egy Hosszú Menetelés-5 rakétával elindult Kína első olyan Mars-küldetése, amely teljes egészében önerőből állt össze. A Tienven-1 (Tianwen-1) űrszonda az induláskor több mint 3,1 tonnás keringőegységének legfontosabb berendezése a nagyfelbontású kamera, amely a tervezett 400 km magas pályáról 2 m-es felszíni felbontásra képes. A közepes felbontású kamera legjobb felbontása 100 m lesz. A bolygó mágneses terét egy magnetométerrel, az ionokat és semleges részecskéket pedig egy részecskeanalizátorral fogják vizsgálni. A Mars talajának összetételét egy spektrométer, míg a felszín alatti réteg szerkezetét a keringőegység radarja fogja vizsgálni. A Mars körül keringő űrszonda egyúttal kommunikációs átjátszóállomásként is szolgál a felszínre küldendő marsjáró számára. Ha minden a tervek szerint alakul, akkor az anyaszonda legalább egy földi évig lesz működőképes.

A leszállóegység a sűrű légkörben nagy sebességgel súrlódva aerodinamikai, majd később ejtőernyős, végül rakétás fékezéssel fog landolni. A várható leszállóhely az Utopia-síkság (Utopia Planitia) területén egy 100 × 40 km-es ellipszis alakú terület belseje. Magát a landert egy, a

hővédelmet biztosító kapszulában (kagylóban) helyezték el. A leszállóegység négy – rugózott – lábbal felszerelt szerkezet, melynek tetején „ül” a hatkerekű rover, becsukott napelemekkel. A kb. 240 kg-os kínai marsjáró a Jütu (Yutu) holdjárókhöz képest dupla méretű, ugyanakkor a pár nappal később indítandó amerikai Perseverance rovernek csak negyede-ötöde. A kínai marsjáró energiaellátását napelemek biztosítják, élettartamát 90 napra tervezik.

A Tienven-1 űrszonda is sikeresen lefékezett és pályára állt a Mars körül, 2021. február 10-én. A leszállóegységet és rovert később, várhatóan 2021 májusában küldik a felszínre, miután részletesen feltérképezték a leszállóhelyének környékét.

Mars 2020 – Perseverance. Július 30-án Floridából, egy Atlas-5 rakétával elindult a Mars felé a NASA legújabb nehéz marsjárója. A 2020-as indítási ablakban ez volt az emberiségnek a vörös bolygó irányába küldött harmadik űrszondája. Az előző kettő is izgalmas küldetés, ám méretükben, bonyolultságukban – és persze költségükben – egy lapon sem említhetők a NASA programjával.



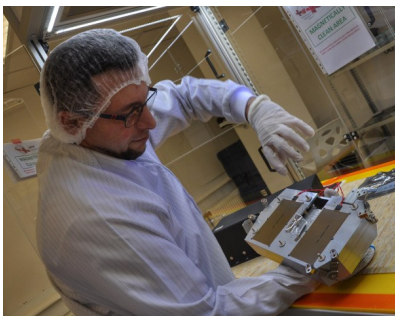
A Perseverance (jelentése: kitartás, állhatatosság) nevű amerikai nehéz marsjárót akár Curiosity-2 néven is emlegethetnénk, hisz az eddigi legsikeresebb amerikai rover egyenesági leszármazottja. Az új marsjáró legtöbb rendszerét és alrendszerét (pl. az ejtőernyőrendszert is tartalmazó, kagylószerű alsó és felső hővédő burkolatot, a leszállás során használt rakétás „égi darut”, vagy épp alvázat) a Curiositytól örökölte. Ez azt is jelenti, hogy a kisebb

autóéval vetekedő méretű Perseverance méretei sem nagyon változtak, bár a manipulátorkar hosszabb és sokoldalúbb. A jármű 3,0 m hosszú, 2,7 m széles, a magassága pedig 2,2 m. A marsi „kis autó” tömege 1025 kg, ami 14%-kal több, mint a Curiosityé volt. Annak ellenére, hogy a legtöbb eljárást és elemet nem kellett újra tervezni (vagy épp tesztelni), a költségek mégis elérték a 2 milliárd dollárt, ami azonos az elődéével. Ennek oka, hogy a tudományos műszerek jelentős része új, ugyanis a kutatási célok mások, mint az elődnél voltak. Ezen túl bizonyos „üzemi” rendszereket is újra kellett tervezni, pl. újak bizonyos landolási szenzorok és a szoftver, de új megoldásúak a kerekek, és igény volt egy drónhelikopterre (Ingenuity) is. Így a Perseverance nem egyszerű másolata a ma is a Marson „robotoló” Curiositynak. Egy sor olyan fejlesztést, illetve eszközt próbálnak ki, valósítanak meg rajta, melyek a jövő automatikus és személyzetes Mars-repülései szempontjából lesznek kritikusak.

Mire évkönyvünk megjelenik, már arról is beszámolhatunk, hogy a Perseverance is sikeresen elért a Marsra, 2021. február 18-án szállt le a Jezero-kráterben. A helyszín különlegessége, hogy egy ősi tó medréről van szó, s mint ilyen, az üledékes kőzetek talán a Mars történetének korai szakaszában esetleg meglevő mikrobiális életformákra utaló nyomokat rejthetnek. A küldetés legfontosabb része kőzetminták gyűjtése és helyszíni vizsgálata lesz. A Mars kutatásában először olyan mintákat is vesznek, amelyeket egy későbbi űrszondával a Földre juttatnának, igazán részletes laboratóriumi elemzések céljából. A mintavisszahozó küldetés legkorábban 2026-ban startolhat, a 2030-as évek elején érkezhethet vissza a Földre.

2020. augusztus

Miskolc az űrkutatás térképén. Sajtótájékoztatót tartott augusztus 13-án Miskolcon az űreszközök fejlesztésével foglalkozó Admatis Kft. A téma az ESA JUICE (JUperiter ICy moons Explorer) űrszondájához szállítandó alkatrészek elkészülése és kiszállítása volt. Az ESA 2012-ben döntött a



Jupiter és jeges holdjainak kutatására induló JUICE megvalósításáról. A 2022-ben induló űreszköz először a Jupiter körüli pályáról fogja vizsgálni a bolygó légkörét, magnetoszféráját, vékony gyűrűit és holdjait. Ezt követően – illetve az Europa és a Callisto holdak vizsgálata után – a

Naprendszer legnagyobb holdja (a Ganymedes) körüli pályára áll, ahol több hónapot eltöltve egyre alacsonyabb pályáról fogja vizsgálni a jeges óriásholdat. A Ganymedes és az Europa holdak felszíni jégrétege alatt vízóceánok találhatóak, amelyekben feltételezhetően az élet kialakulásának feltételei is adottak lehetnek. A küldetés során először kerülhet sor ezek vizsgálatára a Jupiter rendszerében. 2013-ban, európai űrkutató intézetek és egyetemek nagy megmérettetése után került sor a küldetés tizenegy kísérletének kiválasztására. A fedélzeti műszerek között kamerák, spektrométerek, radarberendezés, lézeres magasságmérő, illetve a plazmakörnyezetet vizsgáló magnetométer található meg.

A JUICE építésének fővállalkozója az Airbus, amely Európa vezető űripari vállalata, a kapcsolódó részegységeket pedig több különböző alvállalkozó szállítja be. Kihívást jelentett ezen elemek integrálása, hőtani tervezése és összeépítése, amit az interface felületek kölcsönhatásainak vizsgálata követett. A folyamat rendkívül összetett, a több ezer alkatrész összeépítése, illetve a már összeépített szerkezet együttes vizsgálata igényli a nagyfokú tervezői és kivitelezői precizitást. Az ESA hollandiai ESTEC központjában működő termikus tervező-tesztelő laboratóriumával kialakult kitűnő munkakapcsolat eredményeként az Admatis Kft. a 2019–2020-as években sikeresen bekapcsolódhatott a JUICE bonyolult termikus tesztfolyamataiba is.

Az Admatis Kft. részvételét a magas technikai felkészültséget igénylő projektben az ESA, valamint a Külügyminisztérium finanszírozta.

Augusztusban egyébként Bernben megkezdődött a JUICE PEP (Particle Environment Package) plazmafizikai műszeregyütteséhez a budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpontban fejlesztett és elkészített két tápegység repülőpéldányainak integrálása is.

CarpathiaSat. Az augusztus 17-én alapított vállalat célja, hogy 2024-ben geostacionárius pályára állítsa és üzemeltesse Magyarország első kereskedelmi, valamint kormányzati és tudományos kutatási feladatokra is alkalmas távközlési műholdját. A cég rendelkezik majd a Magyarország számára kijelölt – 4 fokos nyugati hosszúság fölötti (4°W) – geostacionárius pályaszakasz üzemeltetési jogával 2024-től húsz éven keresztül.

2020. szeptember

Vega start: 53 műhold a pályán. A koronavírus miatti, aztán technikai késések után szeptember 3-án, a VV16 jelű repüléssel újították fel a 2019. júliusi indítási kudarc után az ESA Vega rakétáinak startjait Kourouból (Francia Guyanából). A repülés célja az SSMS (Small Spacecraft Mission Service, kisműholdas küldetések szolgáltatása) rendszer és koncepció kipróbálása volt. Ezt a rögzítő és kilökő platformot kifejezetten a nano- és mikroműholdas fejlesztők növekvő igényeinek kielégítésére fejlesztették. Az SSMS segítségével 1 és 500 kg közötti űreszközök indíthatók. Az eszköz fejlesztését az Avio végezte, a gyártás Csehországban, az SAB Aerospace-nél történik. Többek között pályára került az első szlovén, az első monacói, valamint a harmadik észt műhold.

A Vega rakéta következő, november 17-ei indítása (VV17) viszont ismét sikertelenül végződött, egy spanyol és egy francia földmegfigyelő műhold veszett oda. Az utólagos vizsgálatok szerint emberi hiba okozta a 4. fokozat rendellenes működését, egy fontos kábel csatlakozóját fordítva dugták a helyére.

2020. október

Mintavétel a Bennuból. Csúcspontjához ért a NASA OSIRIS-REx űrszondájának programja, amikor október 20-án rövid ideig érintette a kisbolygó felszínét és abból mintát vett. A szonda megközelítette a Bennu kisbolygó Nightingale nevű, a mintavételre a megelőző gondos vizsgálatok nyomán kijelölt területét. A kinyújtott, 3,35 m hosszú mintavevő kar elérte a Naprendszer ősi anyagát reprezentáló kis égitest felszínét, majd néhány másodperc elteltével a szonda újból eltávolodott a Bennutól. A kényes művelet a terveknek megfelelően zajlott. A mintavevő szerkezet hasonló elven működött, mint egy autó levegőszűrője. A kilövellt nitrogéngáz felkavarta a felszín finom porát és az apróbb kőzetszemcséket, majd azokat begyűjtötték. A gyűjtött minta tömege elérheti a maximumként megcélzott 2 kg-ot is, ami fantasztikus eredmény. Az OSIRIS-REx 2021 márciusában hagyja el a Bennu környezetét, hogy visszainduljon a Föld felé. A mintát tartalmazó tartály 2023 szeptemberében landol majd Utah állam sivatagos területén. A begyűjtött mintákat aztán jól felszerelt földi laboratóriumokban tanulmányozhatják majd a szakértők. Az OSIRIS-REx még 2016 szeptemberében startolt, a NASA New Frontiers sorozatának harmadik tagjaként (a Plútóhoz indított New Horizons és a Jupitert kutató Juno után).

2020. november

Felgyorsuló GPS frissítés. Június 30. után november 6-án ismét egy Block 3 sorozatú amerikai navigációs műhold állt pályára, megint egy Falcon-9 rakétával. A SpaceX vállalat hordozórakétája az Amerikai Űrhaderő megbízásából emelte a magasba a GPS 3A-04 jelzésű műholdat. Ez a jól ismert hely- és időmeghatározó műholdrendszer legmodernebb, Block 3A sorozatának negyedik darabja. Míg a sorozatot 2018 decembere után 2019 augusztusában folytatták, 2020-ban ez már a második új GPS hold volt. A GPS rendszer közepes (valamivel 20 ezer km fölötti) magasságú

pályákon keringő, navigációs rádiójeleket sugárzó műholdakból áll. Ezek a Föld körül többé-kevésbé egyenletesen vannak elosztva, hat darab 55°-os hajlásszögű pályasíkba rendezve. Pályasíkonként négy műhold aktív, valamint üzemképes tartalékok is vannak. A megfelelő vevőberendezéssel rendelkező földi felhasználók így gyakorlatilag minden helyen és minden időben képesek kiszámítani helyzetüket és meghatározni a pontos időt. A GPS, bár katonai fejlesztésű és katonai irányítás alatt álló amerikai rendszer, világszerte rengeteg polgári alkalmazása is van, az autós navigációtól kezdve az okostelefonok helyfüggő szolgáltatásainak támogatásán át a banki és tőzsdei tranzakciók pontos időbélyegének meghatározásáig.

A 2020. augusztusi állapot szerint eddig a GPS különféle műhold-generációi képviselőjében összesen 75 űreszköz startolt. Közülük 31 sugárzott aktívan navigációs jeleket, 9 tartalékban volt. Három műhold tesztelése folyt a közepes magasságú Föld körüli pályán. A régebbiek közül 30-at már „nyugdíjaztak”, kivonták a használatból, vagyis magasabb pályákra emelték, hogy ne legyenek útban, és kikapcsolták őket. Hogy a 75-ös szám teljes legyen, 2 műhold startbalesetben elveszett. A most felbocsátott Block 3A-04-es tehát összességében a 76. GPS műhold, a rendszer kiépítésének 1978-as kezdete óta. Új startokra azért szükség van, hogy a rendszer folyamatos üzeméről, az elhasználódó űreszközök pótlásáról gondoskodjanak. Eközben természetesen az új műhold-generációk jelentős műszaki fejlesztéseket is tartalmaznak. A Block 3-as műholdak például pontosabb helymeghatározást, a jelek zavarása ellen jobb védelmet nyújtanak, tervezett élettartamuk legalább 15 év.

Tizenegy hónap után az első indiai rakéta. A koronavírus úgy hozta, hogy 2020. november 7-e előtt utoljára 2019. december 11-én indult Indiából rakéta. Akkor is egy PSLV (Polar Satellite Launch Vehicle), és akkor is egy indiai radarholddal (RISAT-2B1), valamint összesen 9 kis-méretű műholddal. A mostani repülésen az elsődleges hasznos teher ismét egy radaros távérzékelő műhold

(RISAT-2B2), és a másodlagos teher is 9 kis űreszköz – 4–4 amerikai és luxemburgi, illetve egy litván készítésű nanoműhold – volt.

Crew-1. A május végétől augusztus elejéig tartó és sikeresen lezajlott Demo-2 emberes próbarepülés után november 16-án megkezdődött a SpaceX Crew Dragon űrhajójának első szolgálatos útja. Három amerikai és egy japán űrhajós tartott a Nemzetközi Űrállomásra, fél évig tartó küldetésre. A japán Szoicsi Nogucsi lett a harmadik olyan személy a világon, aki három különböző űrhajótípussal is repült.



Úton az első Sentinel-6. Az európai Copernicus földmegfigyelési program Sentinel-6 Michael Freilich műholdját november 21-én egy Falcon-9 rakétával állították pályára Kaliforniából. Az amerikaiakkal együttműködésben épült földmegfigyelő űreszköz

66° hajlásszögű, kb. 1300 km magasságú pályára került. A korábban még Sentinel-6A néven ismert műholdat 2020 elején Michael Freilichről, a NASA földtudományi igazgatóságának egykori vezetőjéről nevezték el. A műhold tervezett működési élettartama a 6 hónapos beüzemelési időszakot követően legalább 5 év. A legfontosabb feladata a tengerek vízszintjének mérése, a változások folyamatos követése lesz. Ezzel folytatja a TOPEX/Poseidon, valamint a Jason sorozat műholdjai által megkezdett munkát. Így a tengerek vízszintjének emelkedő tendenciáját már 1992 óta egységes módszerrel követő műholdas adatsorok folytonossága biztosított lesz. A Sentinel-6 Michael Freilich mérései fontos információt nyújtanak majd az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatához, de segítik az időjárás-előrejelzést is. Az űreszköz az EU, az ESA, az európai műholdas meteorológiai szervezet (EUMETSAT) és amerikai partnerintézményeik (NASA, NOAA) együttműködésében valósul meg.

Kína mintát hozott a Holdról. A Csang'e-5 (Chang'e-5) űrszonda november 23-án startolt a Hajnan szigetén levő Vencsang űrközpontból, egy Hosszú Menetelés-5 rakétával. December 1-jén landolt a Hold felszínén, a begyűjtött anyagot 3-án indították el. A mintaszállító modul a Hold körüli pályán 5-én csatlakozott az orbitális egységhez, majd átadta a – mint később, a földet érés után kiderült – több mint 1,7 kg-nyi mintát. Az automata dokkolási manőver a maga nemében eddig egyedülálló volt a Hold térségében. Ezután levált a mintaszállító egység és dolga végeztével 7-én a Hold felszínébe csapódva fejezte be pályafutását.

Az orbitális egység, benne a mintákat is tartalmazó kabinnal december 13-án indult vissza a Föld irányába. A Csang'e-5 szonda tartálya a Holdról származó anyaggal 16-án landolt Belső-Mongóliában. Ez volt 44 év óta az első űreszköz, amely anyagmintát szállított a Holdról a Földre, laboratóriumi vizsgálatok céljára. Legutóbb 1976-ban a szovjet Luna-24 szonda tette ezt meg, 170 grammnyi rakománnyal. Az űrkutatás történetében eddig összesen 9 küldetés hozott kőzetmintákat a Holdról. Köztük volt a NASA hat emberes Apollo űrhajója együttesen 382 kg holdközzel, valamint három szovjet automata Luna űrszonda.

2020. december

Japán mintát hozott egy kisbolygóról. Hat évvel elindulása után visszaérkezett a Hajabusza-2 (Hayabusa-2) nevű űrszonda, amelynek feladata a 162173 Ryugu kisbolygó közeli tanulmányozása, robotszondák felszínre bocsátása, majd a felszín anyagából való mintavétel és annak hazahozatala volt. A kisbolygóanyagot tartalmazó, hővédő borítással ellátott, 40 cm átmérőjű tartály a légkörbe lépést és ejtőernyős fékeezést követően Ausztrália gyéren lakott déli részén, a Woomera katonai gyakorlótér területén landolt, magyar idő szerint december 5-én. Még közvetlenül a tartály kibocsátását követően maga a Hajabusza-2 űrszonda pályamódosító manővert hajtott végre, hogy biztonságos



távolságban elrepüljön a Föld mellett. A szonda kitűnő műszaki állapotban maradt, ionhajtóműveinek üzemanyagkészletei sem fogytak ki. Tovább kering a Naprendszerben, és a tervek szerint akár két további kisbolygót is közelről meglátogathat, 2026-ban és 2031-ben.

A Hayabusza-2 2014 decemberében indult útnak a 900 m átmérőjű Ryugu kisbolygóhoz és 2018 júniusában érkezett meg. Még abban az évben kis robotokat bocsátott le az égitestre. 2019-ben két alkalommal érintette meg a felszínt, így két különböző helyről hozott mintákat. A második mintavételt megelőzően egy lövedékkal krátert is ütött a kisbolygón, a minták egy része tehát a felszín alatti rétegekből származik. A Hayabusza-2 bő egy éve, 2019 novemberében indult vissza.

A szénben gazdag ásványokkal borított Ryugu kisbolygóról származó szemcséket tüzetes laboratóriumi vizsgálatoknak vetik alá. A kutatásokból többet tudhatunk majd meg a Naprendszer keletkezésének 4 és félmilliárd évvel ezelőtti időszakáról, és talán arról is, hogyan érkezett a Földre víz, valamint az élet építőköveinek tartott molekulák. A tervek szerint legalább 0,1 gramm anyagot szerettek volna begyűjteni a kisbolygóról, a valóságban 5 grammnál is több érkezett.

A kereskedelmi célú kitermelés tulajdonjogi kérdése a világűrjogban

Punczman Ádám Tamás

Nemzeti Közzolgálati Egyetem,
Világűr Társadalomtudományi Kutatóműhely, Budapest

A tanulmány áttekinti az égitestek erőforrásainak mintagyűjtő küldetéseit, azok jogi relevanciáját, világűrjogi szabályozását és más területek erőforrásainak kitermelési gyakorlatát. A célja, hogy átfogó helyzetképet adjon e terület hatályos rendelkezéseiről.

1. Bevezetés

A kereskedelmi célú kitermelés tulajdonjogi kérdésének világűrjogi vizsgálatát és a téma aktualitását támasztja alá az Amerikai Egyesült Államok, Luxemburg Nagyhercegség és az Egyesült Arab Emírségek nemzeti szabályozása. Az államok nemzeti törvényeken keresztül magán-személyek számára tulajdonjogot formálnak a világűrben található űrerőforrásokra és ezzel több évtizedes vitát kívánnak lezárni a világűr-kisajátítás tilalma értelmezésében. 2020-tól az Artemis-megállapodással akarják implementálni a nemzeti szintű értelmezést a kisajátítás tilalmáról a nemzetközi jogban az Amerikai Egyesült Államok vezetésével.

A tanulmány áttekinti röviden az indokokat, ezt követően a mintagyűjtő küldetések gyakorlatát, valamint a Világűrszerződésbe és a Hold-megállapodásba foglalt kisajátítás tilalmat. Továbbá, a nemzeti törvények és az Artemis-megállapodás rendelkezéseit és releváns jogi analógiákat a kisajátítás tilalma szem előtt tartásával.

2. Indokok

A történelem különböző korszakait tekintve, az államok, hogy nagyobb befolyással bírijanak a nemzetközi politikában, a *globális presztízsüket* kívánták magasabb szintre emelni vagy legalább megtartani, ezáltal nemcsak tech-

nológiai és gazdasági szinten jutottak előnyökhöz, hanem megkerülhetetlen szereplőivé váltak a nemzetközi politikának. (Például az ókorban a Római Birodalom, a középkorban Spanyolország és Portugália saját területként kezelte a világ tengereit és az áthaladásért díjat szedett.¹)

A *globális presztízs növelésének* alapja lehet, hogy az adott állam más államokhoz képest mennyit fejlődött és nem az, hogy önmagához mérten mennyit.² A társadalmi jelenségek hatékony szabályozása akkor valósulhat meg, ha nem utólag, hanem *preventív* jelleggel teszi azt. (Például a zászlótűzés a területfoglalás egyik szimbóluma. Az amerikai zászló kitűzése a Holdra már nem volt annak tekinthető 1969-ben, mert az 1967. évi Világűrszerződés tiltotta az égitestek kisajátítását.) A *magánszektor* megjelenésével és annak egyre nagyobb befolyásával olyan célok és lehetőségek kerülhetnek előtérbe, amelyek állami szinten nem feltétlenül biztosíthatók. Amerikai cégek különböző aszteroidákból akarnak vizet kitermelni az élet támogatására, azonban a víz alkotóelemei rakéta-hajtóanyagként is felhasználhatók.³ A holdi minták vizsgálata során megállapítást nyert, hogy ilmenitből oxigén és vas nyerhető vagy földpátból alumínium és oxigén, valamint nagy mennyiségben hélium-3 is megtalálható, mint a legértékesebb bányászható anyag a Holdon.⁴ Ez utóbbi anyag alternatív energiaforrás lehet a nukleáris energia kiváltására, mert nem keletkezik felhasználása után radioaktív hulladék.⁵ Az óriásbolygókon (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és a Neptunusz) a hélium-3 mellett deutériumot is azonosítottak,

¹ Kende, Nagy, Sonnevend, Valki: Nemzetközi jog, I. kiadás, Wolters Kluwer, 2014, 354. o.

² Paul Kennedy: A nagyhatalmak tündöklése és bukása, Akadémiai Kiadó, 1992. XIX. o.

³ Jakhu, Pelton, Nyampong: Space Mining and Its Regulation, Springer, 2017, 64. és 66. o.

⁴ Ricky J. Lee: Law and Regulation of Commercial Mining of Minerals in Outer Space. Springer, 2012, 53. o.

⁵ Sipos Attila: A nemzetközi polgári repülés joga, Eötvös Kiadó, 2018, 66. o.

ami a fúziós energiatermelés egyik ígéretes nyersanyaga.⁶ Beszélhetünk-e általános gyakorlatról az eddigi mintagyűjtő küldetések esetében, vagy csak a kezdeti lépéseket tették meg az államok?

3. A gyakorlat

Az Amerikai Egyesült Államok és a Szovjetunió/Oroszország mellett már Kína is sikeresen tudott holdi mintákat hozni a Földre. Japán szintén megkerülhetetlen, a kisbolygókról gyűjtött saját mintái okán. Az alábbi táblázat szemlélteti az államok eddigi befejezett mintagyűjtő küldetéseit.

Állam	Mennyiség	Küldetések száma		Évszám
		Sikeres	Sikertelen	
Amerikai Egyesült Államok	382 kg 1 g	7	1	1969–1972 1999–2006
Szovjetunió/ Oroszország	321 g	3	9	1959–1976 2011
Kína	1731 g	1	0	2020
Japán	1 g 5,4 g	2	0	2003–2010 2014–2020

Az Amerikai Egyesült Államok az Apollo-program (1969–1972) keretén belül hozott holdi kőzetmintákat a Földre. Az Apollo-13 küldetés sikertelenségén kívül valamennyi tényleges elindított Apollo-küldetés sikerrel zárult és folyamatosan növekedett a minták száma és tömege.⁷ A Stardust küldetés által (1999–2006) üstökösről tudtak mintát gyűjteni, amely kb. 1 gramm volt.⁸

⁶ Ricky J. Lee: im. 57. o.

⁷ <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/> Letöltés ideje: 2021.01.13.

⁸ <https://www.nap.edu/read/25312/chapter/4#9> Letöltés ideje: 2021.01.13.

Ezzel szemben a Szovjetunió a Luna-programban a holdi mintagyűjtés tekintetében 11 küldetést indított, amelyekből csak három volt sikeres (Luna-16, Luna-20, Luna-23) és összesen 321 gramm holdport szállított a Földre.⁹ A Szovjetunió felbomlását követően Oroszország a Fobosz-Grunt űrszondával tervezett anyagmintát hozni a Mars Phobos holdjáról, de a Föld körüli pályára állást követően műszaki hiba akadályozta meg a küldetés teljesítésében, növelve ezzel is a sikertelen küldetéseinek számát.¹⁰

Kína a Csang'e program keretében hajtotta végre az első holdközvet-mintagyűjtéses küldetését a Csang'e-5 űrszondával, amely idáig az első, egyben sikeres próbálkozása volt, és 1731 gramm holdi mintát jutatott a Földre.¹¹

Japán a Hajabusza küldetéssorozaton belül eddig az Itokawa kisbolygóról kevesebb mint 1 gramm mintát (Hajabusza-1),¹² a Ryugu kisbolygóról 5,4 gramm mintát gyűjtött (Hajabusza-2). Az űrszonda folytatja útját az 1998 KY26 aszteroidához.¹³

A táblázat alapján megállapítható, hogy az ENSZ 193 tagállama közül csak 4 ország volt képes mintákat gyűjteni és szállítani a Földre¹⁴. Mivel az eddig gyűjtött minták mennyisége nem éri el az ipari kitermelés szintjét és a küldetések sem gyakoriak, nem beszélhetünk általános gyakorlatról. Ezt támasztja alá a sikeres és sikertelen küldetések százalékos aránya is az alábbi ábrával szemléltetve, a fenti táblázat alapján.

⁹ https://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/multimedia/lroimages/lroc-20100316-luna.html Letöltés ideje: 2021.01.12.

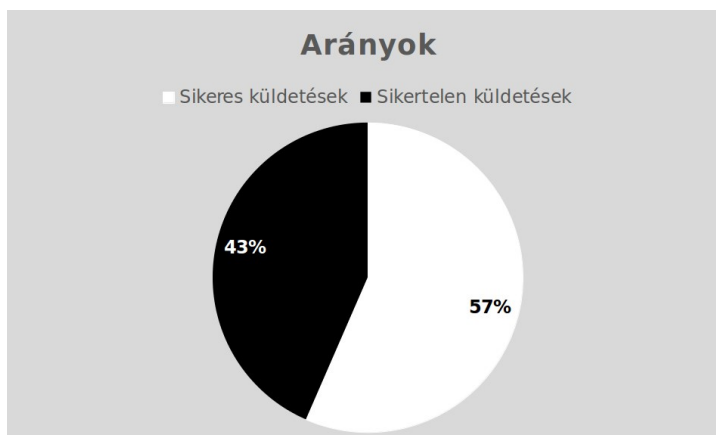
¹⁰ <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2011-065A> Letöltés ideje: 2021.01.12.

¹¹ <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6810963/content.html> Letöltés ideje: 2021.01.12.

¹² <https://www.nap.edu/read/25312/chapter/4> Letöltés ideje: 2021.01.12.

¹³ http://www.urvilag.hu/japan_a_hayabusa_urszonda/20200829_a_hayabusa2_uj_celpontja Letöltés ideje: 2021.01.12.

¹⁴ <https://www.un.org/en/sections/member-states/growth-united-nations-membership-1945-present/index.html> Letöltés ideje: 2021.01.12.



A fenti ábra azt is megmutatja, hogy a küldetések valamivel több mint fele mondható csak sikeresnek. Látjuk, hogy az Amerikai Egyesült Államok áll az élen, így nem meglepő, hogy elsőként kezdte el nemzeti szinten szabályozni a világűr erőforrásainak kitermelését.

Feltehetjük a kérdést: milyen nemzetközi világűrjogi szabályozási háttérrel alkotta meg az Egyesült Államok a nemzeti szintű törvényét?

4. Az 1967. évi Világűrszerződés keretrendszere

A kétpólusú világrendszer a nemzetközi jogalkotásban is éreztette hatását. Az ENSZ jogalkotásában, ha a két szuperhatalom, az Amerikai Egyesült Államok és a Szovjetunió egyezsége jutott, az a többi állam egyetértését is jelentette.¹⁵ A következő tény is ezt támasztja alá: a szovjet Luna-2 űrszonda (1959) az első olyan ember készíttette tárgy volt, amely elérte a Hold felszínét és ezáltal a területfoglalás lehetősége is felmerült, azonban mind az amerikai, mind a szovjet oldal egyaránt megcáfolta azt.¹⁶

¹⁵ Bin Cheng: Studies in International Space Law, Clarendon Press Oxford, 1997, 149. o.

¹⁶ Gál Gyula: Világűrjog, Akadémiai Kiadó, 1964, 222-223. o.

Az 1967. évi Világűrszerződésnek¹⁷ a kisajátítás tilalmára vonatkozó rendelkezése tükrözi a két szuperhatalom álláspontját. Az űrtevékenység gyakoriságára reagálva az ENSZ a Világűrszerződés különböző rendelkezéseiből új egyezményeket alkotott. A Világűrszerződés a „res communis omnium usus”, azaz mindenki által szabadon használható státuszt alkalmazza a világűr-tevékenységekre. A keretrendszer a Világűrszerződés részes államai számára a kisajátítás tilalmát, a szabad használat és a szabad kutatás jogát a világűrre, míg a szabad hozzáférés jogát az égitestekre alapítja, ezáltal nem állami joghatóság alá vonható területnek nyilvánította a világűrt.

A Világűrszerződés aláíró felei között megtalálható az Amerikai Egyesült Államok, Oroszország, Kína és Japán. Ebből következik, hogy a négy állam úgy végezte és végzi a tudományos vizsgálatait, hogy azok megfelelnek Világűrszerződés rendelkezéseinek, többek között a világűr békés célú használatának.¹⁸

Az égitestek erőforrásainak kereskedelmi célú kitermelése vonatkozásában a Világűrszerződés rendelkezései közül a II. cikk (kisajátítás tilalma) bír kiemelt jelentőséggel, amely szerint: „A világűrt, beleértve a Holdat és más égitesteket, sem a szuverenitás igényével, sem használat vagy foglалás útján, sem bármilyen más módon egyetlen nemzet sem sajátíthatja ki.”¹⁹ A rendelkezés értelmezése során bizonyítást nyert, hogy az államok nem vonhatják szuverenitásuk alá a világűrt, mint területet. Mindazonáltal az égitestek erőforrásai kereskedelmi célú kisajátításának jogi megítélése kétséges. A kisajátítás tilalmának nemzetközi gyakorlata szerint két típusú erőforrást különböztethetünk meg. Az egyik gazdasági értékét a természeti

¹⁷ 1967. évi 41. törvényerejű rendelet a „Szerződés az államok tevékenységét szabályozó elvekről a világűr kutatása és felhasználása terén, beleértve a Holdat és más égitesteket” című, Moszkvában, Londonban és Washingtonban 1967. január 27-én aláírt szerződés kihirdetéséről (Továbbiakban: Világűrszerződés)

¹⁸ Világűrszerződés IV. cikk.

¹⁹ Világűrszerződés II. cikk.

erőforrás határozza meg (pl. ásványi anyagok), a másik esetében a fekvés helye (pl. Föld körüli pályák).²⁰ A geostacionárius pálya, mint erőforrás kereskedelmi célú állami kisajátítását a nemzetközi közösség elutasította.²¹

A természeti erőforrások esetében nem is beszélhetünk állami kisajátítás kereskedelmi célú gyakorlatáról, de annak nemzeti szintű szabályozásáról igen. Ebből következően adódik a kérdés: felismerte-e korábban a nemzetközi közösség a II. cikk egyértelműsítésének szükségességét?

5. Az 1979. évi Hold-megállapodás keretrendszere

Az 1979. évi Hold-megállapodás, azaz Megállapodás az államok által a Holdon és más égitesteken folytatott tevékenység szabályozásáról²² az, amely multilaterális módon szabályozza a kereskedelmi célú kitermelést a Naprendszerünkben.

Az Apollo-program és a Luna-program gyakorisága és sikeressége a nemzetközi közösség többi államait arra ösztönözte, hogy a Világűrszerződés II. cikkét egyértelműsítsék a használat, a hozzáférés és a hasznok megosztása vonatkozásában, amit az 1979. évi Hold-megállapodás konkretizált. Az új világűr-egyezmény megalkotta a még a római jog számára is ismeretlen keretrendszert, az emberiség közös örökségét. A Világűrszerződésben foglalt kisajátítás tilalmának továbbgondolásával a Hold és erőforrásainak kiaknázásánál felmerülő jogi kérdések keretét határozza meg a részes államok számára. Az állami szuverenitást megtiltja, az erőforrásokat az egész emberiségnek címezi, a békés célokat deklarálja, a kiaknázásból származó hasznok megosztását előírja és a részes államokat egy közös igazgatás létrehozására kötelezi.²³

²⁰ Susan J. Buck: *The Global Commons: An Introduction*, Island Press, 1998, 3. o.

²¹ Abigail D. Pershing: *Interpreting the Outer Space Treaty's Non-Appropriation Principle: Customary International Law from 1967 to Today*, *The Yale Journal of International Law*, 44 (2019), 164. o.

²² *Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies* (a továbbiakban: Hold-megállapodás)

²³ Hold-megállapodás XI. cikk (3), XI. cikk (1), III. cikk (1), XI. cikk (7)

Az 1979. évi Hold-megállapodás a használat, a hozzáférés és a hasznok megosztása terén – szemben az 1967. évi Világűrszerződéssel, amely az önállóságot és az „aki kapja, marja” elvet érvényesíti – a kollektivitást és a „méltányos részesítést”²⁴ írja elő kötelezettségként. A Hold-megállapodás céljaival megfelelően konkretizálja a Világűrszerződés kisajátítás tilalma rendelkezését: „A Hold nem tárgya nemzeti kisajátításnak sem a szuverenitás igényével, sem használat vagy foglalkozás útján, sem bármilyen más módon.”²⁵

A Hold kifejezés magában foglalja a Hold körüli pályákat, a hozzá vezető vagy körülötte levő pályákat is.²⁶ Részletezi a kisajátítás tilalma tárgyköreit alanyi hatállyal, azaz sem a Hold felszíne, sem az altalaja, sem annak része vagy az ott található természeti erőforrás nem válhatnak állam, nemzetközi kormányközi vagy nem kormányközi szervezet, állami szervezet és természetes személy tulajdonává.²⁷ A Naprendszer többi égitestjére is hatályos, amennyiben azokra nincs külön megállapodás.²⁸

Az Amerikai Egyesült Államok, Oroszország, Kína és Japán közül egyik sem részese az 1979. évi Hold-megállapodásnak, sőt a legkevesebb részes állammal bír a nemzetközi világűrjogi egyezmények közül.²⁹

²⁴ Hold-megállapodás XI. cikk (7)

²⁵ Nagy, Jeney (szerk.): Nemzetközi jogi olvasókönyv: Dokumentumok és szemelvények, Osiris Kiadó, Budapest, 2002, 366–373. o. Fordította: Posta Ilona

²⁶ Hold-megállapodás I. cikk (2)

²⁷ Hold-megállapodás XI. cikk (3)

²⁸ Hold-megállapodás I. cikk

²⁹ [https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXIV-2&chapter=24&clang=_en)

[src=IND&mtdsg_no=XXIV-2&chapter=24&clang=_en](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXIV-2&chapter=24&clang=_en) Letöltés ideje: 2021.01.12.

A Hold-megállapodás elutasításának alapvető indoka az, hogy „*a fejlett iparral rendelkező nemzetek nem voltak hajlandóak előre lemondani arról, hogy az égitestek erőforrásait ne sajátíthassák ki.*”³⁰ Továbbá olyan körülmények is indokolhatták, mint például hogy a holdi minták gyűjtésének küldetései lezárultak 1976-ra és nem volt olyan világűrtevékenység, ami indokolta volna az emberiség közös örökség koncepciójának használatát.³¹

6. A nemzeti szabályozások

Az Amerikai Egyesült Államok 2015-ben,³² Luxemburg Nagyhercegség 2017-ben³³ és az Egyesült Arab Emírségek 2019-ben³⁴ kezdték el nemzeti szinten szabályozni, hogy a magánszektorban ki és milyen tulajdonjogi jogosultsággal rendelkezik az égitestek erőforrásainak kereskedelmi célú kitermelése során. Mindhárom állam szabályozásáról elmondható, hogy az államok részesei az 1967. évi Világűrszerződésnek,³⁵ míg az 1979. évi Hold-megállapodásnak nem.³⁶ A törvényeket figyelembe véve megállapítható, hogy nem teljes körűek a kitermelés szabályozása és az állami beavatkozás lehetőségei. Az ösztönző jelleget erősíti, hogy a törvények alanyi és tárgyi hatályuk tekintetében egymással nem koherensek. A nemzeti szabályozások a magánszemélyek számára a kereskedelmi célú kitermelés során az „aki kapja, marja” elvet érvényesítik, ami veszélyeztetheti a nemzetközi béke és biztonság fenntartását a világűrben, így megsérthetik az 1967. évi Világűrszerződés békés célját deklaráló rendelkezését.

³⁰ Bartóki-Gönczy Balázs: Az űrtevékenységek nemzeti szintű szabályozása, Iustum Auquum Salutare, XVI. 2020, 4.

³¹ Frans von der Dunk, Fabio Tronchetti: Handbook of Space Law, Edward Elgar Publishing, 2015, 782. o.

³² U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act (2015)

³³ On the exploration and use of space resources (2017)

³⁴ Federal Law on the regulation of the space sector (2019)

³⁵ <https://treaties.un.org/Pages/showDetails.aspx?objid=0800000280128cbd> Letöltés ideje: 2021.01.12.

³⁶ https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXIV-2&chapter=24&clang=_en Letöltés ideje: 2021.01.12.

Mindhárom nemzeti törvény tulajdonjogi jogosultságot ad magánszemélyeknek az űrerőforrásokra, amely Luxemburg törvényén kívül az Amerikai Egyesült Államok és az Egyesült Arab Emírségek törvénye szerint abiotikus erőforrás, beleértve a vizet és az ásványokat, amelyek a világűrben megtalálhatók.³⁷ A két meghatározás közötti különbség az űrerőforrások helye. Míg az amerikai szabályozás szerint a „világűr eredeti helyén” található az űrerőforrás, addig az arab szabályozás nem konkretizálja a helyszínt. Az amerikai törvény az űrerőforrások alcsoportját is meghatározza az aszteroida erőforrással, mely szerint: *„Űrerőforrás, ami aszteroidán vagy aszteroidában található.”*³⁸

Sem a Világűrszerződés, sem a Hold-megállapodás nem határozza meg az égitestek fogalmát. A nemzeti törvények – nemzetközi jogi kiindulópontjuk a Világűrszerződés – szerint az égitesteket, mint területet jogi értelemben elhatárolták az ott található erőforrásoktól, így arra nem terjed ki a Világűrszerződés kisajátítás tilalma. Az amerikai törvény ezt a nézetet alá is támasztja azáltal, hogy nevesíti az aszteroida erőforrást.

7. Az Artemis-megállapodás

Az Amerikai Egyesült Államok Artemis-programja támogatása érdekében bilaterális egyezményeket kötött az Egyesült Arab Emírségek és Japán mellett Ausztráliával, Kanadával, Luxemburggal, Olaszországgal, az Egyesült Királysággal és Ukrajnával,³⁹ valamint Braziliával közös

³⁷ U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act (2015). 51 USC. 51301 (2); Federal Law on the regulation of the space sector (2019) I. Art.

³⁸ U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act (2015). 51 USC. 51301 (1)

³⁹ <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-international-partners-advance-cooperation-with-first-signings-of-artemis-accords> Letöltés ideje: 2021.01.13.

szándéknyilatkozatot írt alá.⁴⁰ Az Artemis-megállapodás⁴¹ keretrendszere három elemből tevődik össze:⁴² megerősíti a nemzetközi világűrjog sarkalatos elveit, mint például a békés célokat és a nemzetközi joggal való összhang biztosítását.⁴³

A második csoportban a műveletekre vonatkozó kérdéskörökről rendelkeznek, mint az átláthatóság, együttműködés és a tudományos adatok megosztása, valamint kötelezi az aláíró államokat az űrhulladékok redukálására.⁴⁴

A harmadik csoport a nemzetközi világűrjog értelmezését segíti elő, különösen a Hold örökségvédelme, a világűr erőforrásainak kitermelése és a különböző űrtevékenységek ütközésének vagy zavarásának elkerülése vonatkozásában.⁴⁵

Az Artemis-megállapodás kifejezetten nem állapítja meg, hogy a világűr erőforrásainak kereskedelmi célú kitermelése legális lenne, de negatív formában megállapítja, hogy az ilyen tevékenység önmagában nem jelentené az állami kisajátítást.⁴⁶ Ez utalhat arra, hogy egy olyan államok közötti konszenzus van kialakulóban, amely szerint a Világűrszerződésbe foglalt kisajátítás tilalma nem terjedne ki a Hold, a Mars, az üstökösök vagy aszteroidák felszíne és altalaja hasznosítására és kinyerésére.

8. Jogi párhuzam

A nemzetközi tengerjogban a nyílt tenger szabad halászatának szabályozása a „res communis omnium usus” státuszként ismert.⁴⁷

⁴⁰ <https://www.nasa.gov/feature/nasa-administrator-signs-statement-of-intent-with-brazil-on-artemis-cooperation> Letöltés ideje: 2021.01.13.

⁴¹ The Artemis Accords (Továbbiakban: Artemis-megállapodás)

⁴² Jack Wright Nelson: The Artemis Accords and the Future of International Space Law, ASIL Insights, 24:31, 3. o. (2020)

⁴³ Artemis-megállapodás 4. §, 5. § 8. § és 12. §

⁴⁴ Artemis-megállapodás 12. §

⁴⁵ Artemis-megállapodás 11. §

⁴⁶ Jack Wright Nelson, im. 3. o.

⁴⁷ United Nations Convention on the Law of the Sea, (Továbbiakban: Montego Bay-i egyezmény) 86–89. cikk

A Nemzetközi Tengerjogi Törvényszék ítélkezési gyakorlatából kitűnik a terület *túlszabályozottsága*,⁴⁸ amely megnehezíti az átláthatóságot és a jogharmonizációt, a véges erőforrások korlátozásmentesen történő kitermelése,⁴⁹ amely veszélyeztetné a nemzetközi békét és biztonságot a világűrben, továbbá, ha a hatáskört és az illetékességet vitatják vagy a joghatóság hiányát megállapítják, amely csökkenti a jogi probléma megoldásának hatékonyságát.⁵⁰

A Nemzetközi Tengerfenék Hatóság a tengerfenéken található erőforrások kereskedelmi célú kitermelése során az emberiség közös öröksége keretrendszerét alkalmazza.⁵¹ A legnagyobb kritika ezzel a rendszerrel szemben, hogy nem mindegyik állam vesz részt a tengerfenéken fekvő értékes anyagok (pl. fémtartalmú rögök) kitermelésében, például az Amerikai Egyesült Államok, amely nemzeti szinten szabályozza.⁵² Továbbá, a Nemzetközi Tengerfenék Hatóságnak 26 éves fennállása ellenére nincs olyan szervezeti egysége, amely ellátná a jövő generáció képviselőit, a technológia-átadás ellenőrzését és a környezet biodiverzitásának védelme sem biztosított.⁵³

⁴⁸ A nemzetközi halászati igazgatást 15 regionális szintű egyezmény és 32 szervezet alkotja. A szervezetek nemcsak egy-egy tengeri területért felelősek, hanem egy-egy halfaj megőrzésért is, mint például APPFIC, az Ázsiai-Csendes-óceáni Halászat Bizottsága vagy a CCSBT, a déli kékúszójú tonhal megőrzésért felelős bizottság

⁴⁹ Southern Bluefin Tuna Case between Australia and Japan and between New Zealand and Japan, Award on Jurisdiction and Admissibility Decision of 4 August 2000

⁵⁰ Fisheries Jurisdiction (Spain v. Canada), Jurisdiction of the Court, Judgment, I. C.J. Reports 1998, p. 432

⁵¹ Montego Bay-i egyezmény 136. cikk

⁵² The Deep Seabed Hard Mineral Resources Act (94 Stat. 553) consists of the Act of June 28, 1980 (Public Law 96-283; 30 U.S.C. 1401 and following) and amendments thereto

⁵³ Marie Bourrel, Torsten Thiele, Duncan Currie: The common heritage of mankind as a means to assess and advance equity in deep sea mining. Marine Policy, 95, 311 (2018) 3. o.

Az emberiség közös öröksége koncepció alkalmazása során sem a Nemzetközi Tengerfenék Hatóság, sem a kitermelést végző államok részéről nem merült fel jogvita a tevékenység végzése során.⁵⁴

Említést érdemel az Antarktisz nemzetközi szabályozása. A Déli-sarkvidéken 2041-ig tiltott a kereskedelmi célú kitermelés a területre igény tartó államok⁵⁵ számára, és folytatva az Antarktisz szerződés rendelkezéseit,⁵⁶ további területi moratóriumot rendelt el az 1991. évi madridi jegyzőkönyv.⁵⁷ Az 1980-as években a területre igényt tartó államok már nemzetközi egyezményt⁵⁸ is alkottak a Déli-sarkvidék kereskedelmi kiaknázására. Ezt a hatályba lépés feltételeként valamennyi területre igényt tartó államnak alá kellett volna írnia, de Ausztrália és Franciaország nem írta alá.⁵⁹ Bár az egyezmény nem lépett hatályba, rendelkezéseiből egyértelműen kitűnik, hogy a területre igényt tartó államok döntései határozták volna meg a kitermelés szabályozását.⁶⁰ A döntéshozó szervbe csak az az állam léphetett be, amely ténylegesen kitermelést végzett volna,⁶¹ és nem lett volna kötelező a hasznok megosztása.⁶²

9. Összegzés

Míg a multilaterális jellegű 1979. évi Hold-megállapodás a nemzetközi közösség egy korábbi értelmezését, addig a bilaterális jellegű Artemis-megállapodás az

⁵⁴ <https://www.itlos.org/en/cases/list-of-cases/> Letöltés ideje: 2021.01.12.

⁵⁵ 1959. Antarctic Treaty (Továbbiakban: Antarktisz szerződés) preambulum: Argentína, Ausztrália, Belgium, Chile, Franciaország, Japán, Új-Zéland, Norvégia, Dél-Afrika, a Szovjetunió, az Egyesült Királyság és az USA

⁵⁶ Antarktisz szerződés IV. cikk

⁵⁷ The Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty

⁵⁸ Convention on the regulation of Antarctic mineral resource activities (Továbbiakban: wellingtoni egyezmény)

⁵⁹ Haturverdi: *Antarctica*, Elsevier Ltd., 2009, 136. o.

⁶⁰ Douglas M. Zang: *Frozen in Time: The Antarctic Mineral Resource Convention*. In: 76 Cornell L. Rev. 722, 1991, 734. o.

⁶¹ Wellingtoni egyezmény 18. cikk

⁶² Douglas M. Zhang: *im.* 735. o.

Amerikai Egyesült Államok jelenlegi és egyoldalú értelmezését juttatja kifejezésre a Világűrszerződés kisajátítás tilalmáról.

Az Artemis-megállapodásnak nem részese Franciaország és Németország, amelyek az Európai Űrügynökség legnagyobb befizetői,⁶³ valamint Oroszország⁶⁴ és Kína,⁶⁵ amelyek rendelkeznek holdi közetmintákkal és egyben kritikát fogalmaztak meg az Artemis-megállapodással szemben. Utóbbi két állam együttműködését jelzi, hogy egy közös Hold körüli kutatóállomás létrehozásában állapodtak meg.⁶⁶

Franciaország, Oroszország és Kína állandó tagok az Amerikai Egyesült Államok és az Egyesült Királyság mellett az ENSZ Biztonsági Tanácsában, így nem zárható ki, hogy egy új multilaterális egyezményt alkotnak, vagy az 1979. évi Hold-megállapodást módosítják, hogy ezzel a kevésbé tökeerős államok támogatását elnyerjék.

A világűr erőforrásainak tulajdonjogi kérdését jelenleg két nemzetközi egyezmény határozza meg, amelyek egymástól eltérő módon értelmezik a Világűrszerződés kisajátítás tilalma rendelkezését. Elsősorban az döntheti majd el, melyik szabályozást alkalmazzák, hogy az első tevékenységet végző állam hogyan értelmezi a Világűrszerződés kisajátítás tilalmát.

⁶³ https://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/Funding Letöltés ideje: 2021.01.13.

⁶⁴ <https://science.sciencemag.org/content/370/6513/174> Letöltés ideje: 2021.01.13.

⁶⁵ <https://thediplomat.com/2020/09/what-does-china-think-about-nasas-artemis-accords/> Letöltés ideje: 2021.01.15.

⁶⁶ <https://www.theverge.com/2021/3/9/22321114/lunar-moon-space-station-russia-china-agreement-nasa> Letöltés ideje: 2021.03.09.

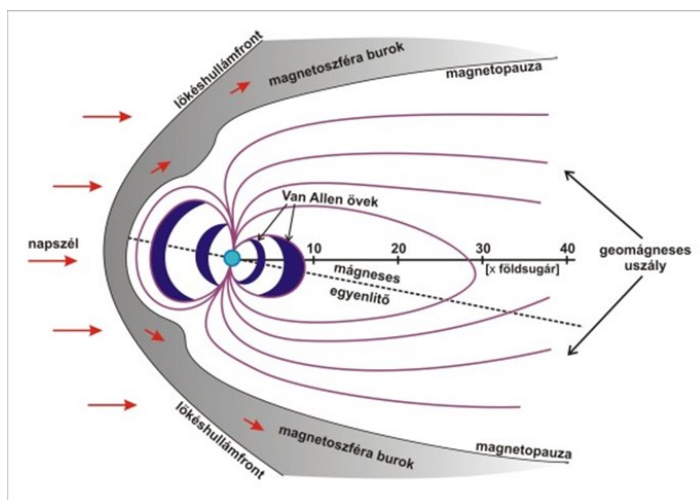
A Cluster kvartett húsz éve vizsgálja a földi magnetoszférát

Tátrallyay Mariella

ELKH Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

A földi magnetoszféra

A Naptól különböző energiájú töltött részecskék és különböző frekvenciájú elektromágneses hullámok áramlanak ki minden irányba. A nagyrészt protonokból és elektronból álló, napszélnek nevezett plazmaáramlás sebessége Földünk környezetében átlagosan 400 km/s. A napkitörésekből eredő koronaanyagban ennél jóval nagyobb sebességű és energiájú töltött részecskék jutnak ki Naprendszerünkbe. A Föld belső mágneses tere „védőpajzsként” tereli el ezeket a részecskéket, így nem károsítják a földi élővilágot. A dipólussal közelíthető geomágneses tér erővonalai a napszél állandóan változó nyomásának hatására a Nap felőli oldalon összenyomódnak, az éjszakai oldalon pedig hosszú csóva (*geomágneses uszály*) képződik, nyílt erővonalakkal (1. ábra).



1. ábra: A földi magnetoszféra határfelületei és tartományai a geomágneses tér zárt és nyílt erővonalaival

A magnetoszféra külső határa a *magnetopauza*, amelynek a Nap felé eső ún. orrpontja átlagosan kb. 70 ezer km távolságban van a Föld középpontjától. Itt a Föld belső terének mágneses nyomása egyensúlyban van a Napból eredő, mágneses teret is hordozó napszél időben változó dinamikus nyomásával, ezért helyzete állandóan változik. Az előtte kialakuló fejhullámnál (*lökéshullámfront*) a napszél szuperszonikus sebessége hirtelen szubszonikusra csökken és a *magnetoszféra* *buroknak* nevezett tartományban tovább lassulva áramlik a magnetopauzáig. A mágneses tér zárt erővonalainak tartományában van a Földdel együtt forgó, gyűrű alakú plazmaszféra, amely 20–40 ezer km távolságig terjed a helyi időtől és a geomágneses aktivitástól függően. A plazmaszféra alacsony energiájú pozitív ionokat és elektronokat tartalmaz, amelyek nagyrészt a felső ionoszférából származnak. Részben ugyanebben a tartományban találhatóak a *Van Allen befogási övek* (1. ábra), ahol nagy energiájú töltött részecskék mozognak a mágneses erővonalak mentén. A kúp alakú északi és déli sarki kürtő választja el a nappali oldalon levő zárt mágneses erővonalakat a csóva nyitott erővonalainak tartományától.

Üridőjárási jelenségek

Fokozott naptevékenység esetén a koronából kilöködő, a napszélnél sokkal nagyobb sebességű (ezáltal nagyobb dinamikus nyomású) részecskék árama összenyomja a magnetoszférát a Nap felőli oldalon. Ha a napszél mágneses terének déli irányú komponense is van, akkor a nappali oldalon a magnetopauzánál az interplanetáris erővonalak összekapcsolódnak a földi tér északi irányú zárt erővonaláival, amelyek szétnyílva az éjszakai oldalra sodródnak. Ennek következtében a csóva is összenyomódik és a közepén az egymáshoz közeli északi és déli irányú geomágneses erővonalak is összekapcsolódhatnak. A torzult mágneses és elektromos terek hatására a koronaanyagkilöködésekben származó protonok és elektronok bejutnak a magnetoszférába és energiájuk tovább növekszik. A felgyorsult részecskék a Van Allen-féle befogási övezetbe ke-

rülnek a zárt erővonalak körüli viszonylag stabil pályákra, az ott korábban „csapdába esett” részecskék pedig a sarki kürtőkön keresztül az ionoszférába, atmoszférába jutnak.

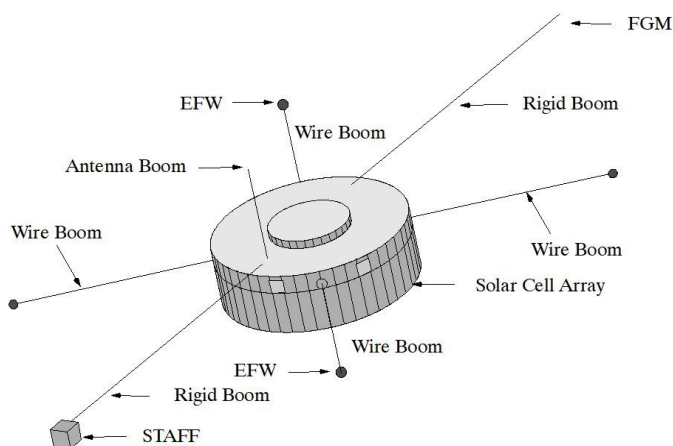
Nem szükséges jelentős naptevékenység ahhoz, hogy északi irányú interplanetáris mágneses tér esetén is fellépjen erővonal-összekapcsolódás a sarki kürtőknél, ahol a geomágneses erővonalak a déli irányba fordulnak. Az ilyen ún. sarki mágneses viharok a sarki fény jelenségét okozák, ez általában a sarki kürtő körüli ovális sávban, a 65–70. szélességi fok környékén látható (8. ábra). A nagy sebességű részecskéket tartalmazó jelentős napkorona-anyagkilöködések által keltett nagy geomágneses viharok esetén a sarki fény színesebbé válik és alacsonyabb geomágneses szélességeken is látható. Ilyenkor a mágneses sarkvidék felett közlekedő repülőgépek falán is átjuthatnak nagy energiájú elektronok. Magasabb geomágneses szélességeken a földfelszínen is felléphetnek komolyabb mágneses és elektromos zavarok, például károsodhatnak hosszú elektromos vezetékek. A nagy mágneses viharok veszélyeztethetik a stabil pályán keringő mesterséges holdakat is, amelyek a kis energiájú részecskékkel teli plazmaszférikus környezetből hirtelen a Van Allen sugárzási övek nagy energiájú elektronjai közé kerülhetnek, mivel ezen tartományok helyzete is jelentősen megváltozik. Földünkre a Napból érkező, a magnetoszférában, ionoszférában és a földfelszínen a mágneses térben jelentős zavarokat okozó változások összességét nevezzük *üridőjárásnak*, amely befolyásolja a modern technológián alapuló életünket. Ezért fontos, hogy vizsgáljuk ezen jelenségek eredetét, természetét, hatásait, és az így nyert ismereteink alapján előre tudjuk jelezni őket.

A Cluster küldetés célja és megvalósítása

1986-ban fogadta el az Európai Űrügynökség (ESA) a Cluster küldetés tervét az első olyan űrkutatási programra, amelyben négy egyformán felszerelt tudományos műhold egy képzeletbeli tetraéder négy csúcsán egy időben végzett mérésekkel a Föld mágneses környezetét három dimenzióban térképezi fel, és a térbeli változásokat el tudja

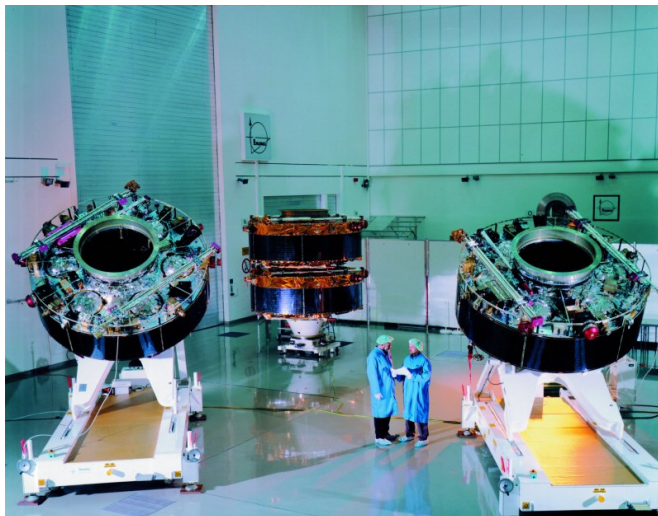
választani az időbeliektől. Az elektromos és mágneses téren, valamint a töltött részecske-áramokat jellemző, közvetlenül mérhető paramétereken kívül a négy Cluster műhold egyidejű mérései alapján meghatározható a magnetoszféra különböző tartományai közötti határfelületek mozgásának sebessége, az ott folyó áramok erőssége, az erővonalak deformációja három dimenzióban és más dinamikus folyamatok is, amelyeknek különös jelentőségük van nagy mágneses zavarok idején. A kutatók elsősorban a sarki kürtöket és a Nappal ellentétes irányban elnyúló geomágneses uszály azon részeit akarták vizsgálni, ahol a Napból érkező nagy energiájú ionok és elektronok a mágneses erővonalak összekapcsolódása folytán tovább gyorsulhatnak és az űridőjárási jelenségeket alakítják [1].

1988-ban választották ki azt a tizenegy tudományos berendezést, amelyek mind a négy Cluster műhold fedélzeti műszeregyüttesét alkotják [1]. Komplex részecske-spektrométerek mérik a 0–4000 keV energiájú pozitív



2. ábra: A Cluster műholdak. Rigid boom: rúd, amely az FGM fluxgate magnetométereket, ill. a STAFF berendezés search coil magnetométerét tartja. Wire boom: kábel antenna az elektromos tér fluktuációinak mérésére (az EFW érzékelői 50 m távolságban vannak). Antenna boom: antenna adatátvitelre. Solar cell array: a műhold palástját fedő napelemek. (Forrás: ESA)

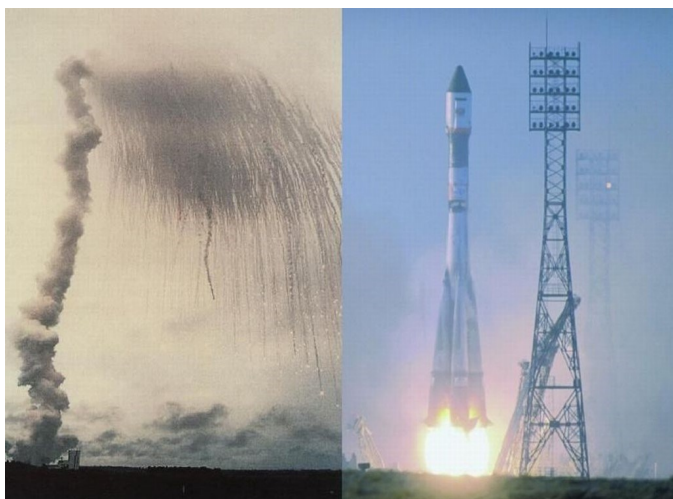
ionok (protonok 1500 keV-ig) és a 0–400 keV energiájú elektronok sűrűségét, sebességét és hőmérsékletét. A CIS és a PEACE a napszél ionjait, ill. elektronjait észleli elektrosztatikus analizátorokkal, a RAPID magasabb energiájú ionokat és elektronokat észlel szilárdtest érzékelők segítségével. A DWP, EFW, STAFF, WHISPER és WBD berendezések a plazmahullámok (elektromos és mágneses fluktuációk) intenzitását mérik különböző módszerekkel, különböző frekvenciasávokban 570 kHz-ig. Az elektromos fluktuációk vizsgálatához a műholdtestből négy irányba (a szomszédosakra merőlegesen) egyenként 50 m hosszú kábelantennát feszítettek ki (2. ábra). A mágneses tér három komponensét és lassú változásait két fluxgate magnetométer (FGM) méri a műholdból 5 m hosszan kinyúló rúd végén és a műholdtól 1 m távolságban. Az EDI műszer a műholdról kibocsátott és oda drift pályán visszatérő elektronnyaláb észlelésével ad információt a környező elektromos és mágneses térről. Az ASPOC műszer a műhold felületi töltésének semlegesítése céljából pozitív indium ionokat bocsát ki.



3. ábra: A négy Cluster műhold szerelés közben: a két hátsó felbocsátásra készen, a két előtérben levő fedélzete nyitva van [1]

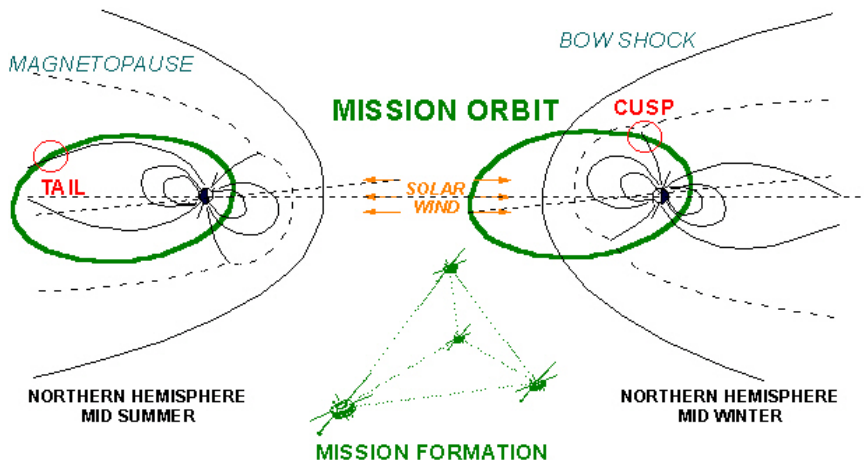
A hengeres alakú, szimmetriatengelyük körül 4 másodperc forgásidővel stabilizált műholdak átmérője 2,9 m, magasságuk 1,3 m, tömegük induláskor 1200 kg volt: ebből 650 kg üzemanyag, 71 kg tudományos berendezés (3. ábra).

Az 1996. június 4-i sikertelen start során a négy űreszközt hordozó Ariane-501 rakéta felrobbant a Francia Guyana-i Kourouban. Ezután az ESA a megmaradt tartalék műhold Phoenix néven való felbocsátása helyett a Cluster küldetés folytatása mellett döntött [1]. Három műholdat újra megépítettek, és 2000. július 16-án, majd augusztus 9-én egy-egy módosított orosz Szojuz-Fregat rakéta párosával vitte a négy műholdat Föld körüli pályára a kazahsztáni Bajkonurból (4. ábra). Az űreszközök elliptikus poláris pályára történt navigálása és a tudományos berendezések próbaüzeme után 2001. február 1-től megkezdődött a Föld körüli térség vizsgálata az időközben Rumba, Salsa, Samba és Tango névre „keresztelt” műholdak fedélzetén végzett egyidejű mérésekkel. A pálya perigeuma 25 ezer km, apogeuma 125 ezer km volt a Föld közép-pontjától.



4. ábra: A bal oldalon: a négy Cluster műhold pusztulása 1996-ban [1], a jobb oldalon: két Cluster műhold sikeres startja 2000-ben. (Forrás: ESA)

A program első 6 évében igyekeztek a négy műholdat szabályos tetraéder konfigurációba navigálni, miközben félévenként változtatták egymástól való távolságukat 100 km és 10 ezer km között, a különböző méretű plazmafizikai jelenségek vizsgálata céljából (5. ábra). 2006 után már nem tartották a műholdakat az eredeti pályán, egyrészt az üzemanyag tartalékolása céljából, másrészt így lehetőség nyílt a magnetoszféra azon tartományainak vizsgálatára, ahová a műholdak korábban nem jutottak el. A szabályos tetraéderhez közelítő konfiguráció helyett három műhold egymástól 7–10 ezer km távol volt és az általuk meghatározott síktól 10 km és 10 ezer km közötti távolságban tartották a negyediket. Időnként két műholdat egymáshoz 10 km-nél is közelebb navigáltak, kis léptékű jelenségek speciális vizsgálata céljából. Ilyen „vendégkutatói” programokra nyílt pályázatok alapján került sor. Húsz évvel a start után mind a négy űreszköz folyamatosan méri a



5. ábra: A Cluster műholdak poláris pályája (mission orbit) meridionális metszetben: bal oldalon az északi félteke nyarán, jobb oldalon télen. Solar wind: napszél, mission formation: tetraéder konfiguráció. Magnetopauza: szaggatott vonal, fejhullám (bow shock): folytonos vonal. A legfontosabb kutatási tartományok jelölve: csóva (tail), sarki kürtő (cusp). (Forrás: ESA)

mágneses teret és több más plazmafizikai paramétert is, és a műszerek nagy része működik legalább két műholdon. Jelenleg 2022. december 31-e a küldetés tervezett utolsó napja, de további hosszabbítás is lehetséges.

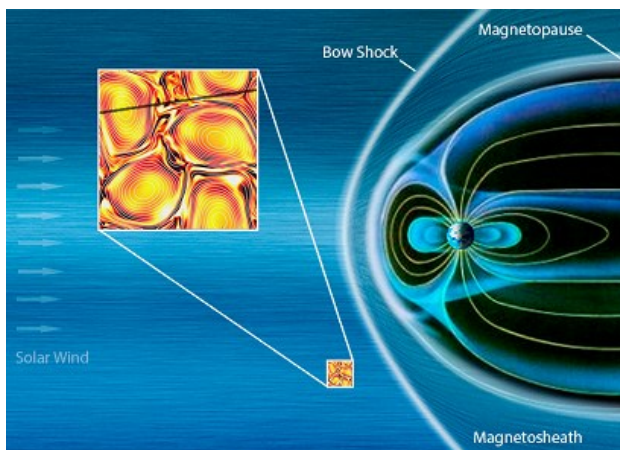
A Cluster projekt berendezéseit építő és működtető kutatócsoportok kezdettől fogva széleskörű és a korabeli internetkapcsolatok fejlettségéhez képest gyors adatcserét terveztek az akkor kb. 200 társkutató között, ezért közös, de több szerveren tárolt adatbázist akartak létrehozni. 1991-ben az ESA nyílt pályázatot hirdetett az adatközpontok működtetésére, amelynek eredményeként a KFKI Rézszecke- és Magfizikai Kutatóintézete (jelenleg Wigner Fizikai Kutatóközpont) is a küldetés résztvevőjévé vált. Feladata a négy műhold pályadatainak és egyéb kiegészítő segédparamétereinek kiszámítása és beadása a közös tudományos adatrendszerbe (*Cluster Science Data System*), valamint az összes műszer 4 másodperces és 1 perces átlagolású adatsorainak tárolása és szolgáltatása a Magyar Adatközpontból (*Hungarian Data Centre*, <http://hdc.rmki.kfki.hu/cdms/>) a regisztrált felhasználók, köztük a RAPID rézszeckespektrométer és az FGM magnetométer csoporthoz csatlakozó magyar kutatók számára.

A Cluster küldetés résztvevői kezdettől fogva fontosnak tartották, hogy a különböző kutatóhelyeken mindenki a közös adatrendszerből származó paramétereket használja és ezáltal az egyes műholdakon mért adatok széles körben összehasonlíthatók legyenek. 2014 óta egyre több adat érhető el nyilvánosan a Cluster Tudományos Archivumban (*Cluster Science Archive*, <https://csa.esac.esa.int/>), amelynek jelenleg kb. 2300 regisztrált felhasználója van. Így ez a régi küldetés saját méréseivel újabb programokat is támogat, amelyek más pályákon vizsgálják a földi magnetoszféra különböző tartományait: THEMIS (NASA, 2007), Van Allen Probes (NASA, 2012), Swarm (ESA, 2013), MMS (NASA, 2015).

Tudományos eredmények

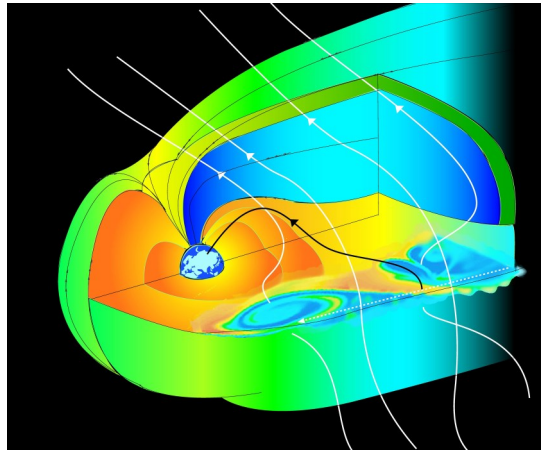
A Cluster már eddig is sok új, meglepő eredménnyel gazdagította ismereteinket a Föld körüli térségről és az űridőjárásról, amelyeket közel 2900 referált tudományos publikációban közöltek. A teljesség igénye nélkül ezek közül idézünk néhány érdekes felfedezést, amelyekről az ESA honlapján is beszámoltak [2] és a szűk szakmai körön kívül a tudomány iránt érdeklődő tágabb közönség számára is érthetők.

A Cluster küldetés indulása előtt már tudták a kutatók, hogy a magnetoszféra óriási energiarezervoárként működik, amely a napszéllel érkező energiát tárolja, majd mágneses viharok idején hirtelen a Földre zúditja. Ezen események egyre pontosabb előrejelzését teszi lehetővé egy évek óta fejlesztett empirikus hibrid magnetoszféra modell [3], amely sok műhold mérésein alapszik, de a magasabb geomágneses szélességekről származó, nagyon fontos, a sarki kürtókhöz közeli adatokat a Cluster műholdak mérték. Korábban csak a Polar műhold (NASA, 1996) volt poláris pályán, de sokkal közelebb a Földhöz.



6. ábra: Kisméretű turbulenciák a napszélben (solar wind). A kinagyításban az egyenes vonal a Cluster műholdak pályáját mutatja. Fejhullám (bow shock), magnetoszfera burok (magnetosheath) jelölve. (Forrás: ESA)

Két Cluster műhold egyidejű mérései azt mutatták, hogy a mágneses tér fluktuációi nem homogének a fejhulámon kívül a napszélben. Kisméretű (50 km-nél kisebb) szabálytalan kétdimenziós áramlemezeket találtak a plazmaáramban, amelyekben örvények keletkeznek és a mágneses erővonalak összekapcsolódása energia felszabaduláshoz vezet (6. ábra). A kutatók véleménye szerint a Napból kiáramló napszél vártnál magasabb hőmérsékletét a belső Naprendszerben ez a „fűtési” jelenség okozhatja [4].



7. ábra: A magnetoszféra háromdimenziós metszetén a fekete nyíl a belső, a fehér nyílak a külső mágneses tér erővonalait mutatják, amint azok áthatolnak a magnetopauzán. Szaggatott fehér vonal jelzi a Cluster műholdak pályáját a magnetopauza mentén a Kelvin–Helmholtz-örvényeken keresztül. (Forrás: ESA)

Már a Cluster előtt is ismert volt, hogy ha a bolygóközi mágneses tér ellenkező irányú a földi térhez képest, akkor erővonal-összekapcsolódás történhet a magnetopauzáznál, amely ennek következtében „kilyukad” és a töltött részecskék kívülről bejuthatnak a magnetoszférába. A Cluster adatai alapján sikerült bizonyítani, hogy a magnetopauza más esetekben is inkább „lyukacsos szitaként” viselkedik „védőpajzs” helyett. A négy műhold az éjszakai oldalról haladt a nappali felé a magnetoszféra külső ré-

szében, közel a magnetopauzához, amikor közel 40 ezer km átmérőjű örvénylő áramlást észleltek (7. ábra). Ezeket az óriási örvényeket a Kelvin–Helmholz-hullámok okozták, amelyeket két egymás mellett haladó, különböző sebességű áramlás keltett. A napszélparaméterek hirtelen változása miatt gyorsan befelé-kifelé mozgó magnetopauzájánál találkozhatnak különböző sebességű napszéláramok, amelyek bejuthatnak a magnetoszférába [5].

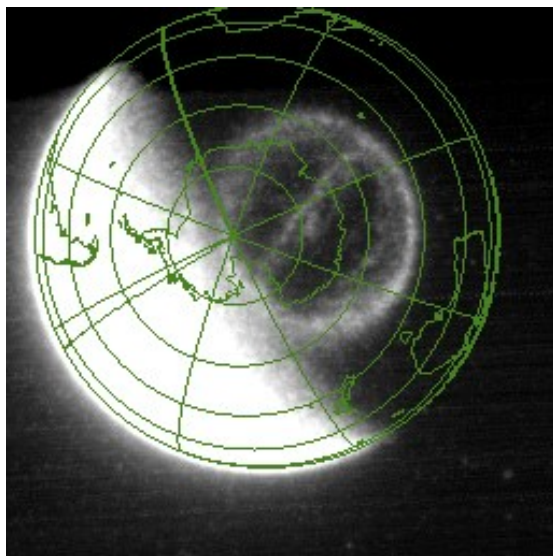
Mágneses nulla teret az erővonalak összekapcsolódásánál három dimenzióban először a négy Cluster műhold egyidejű méréseivel lehetett észlelni a magnetoszféra csóvájában [6]. A korábbi feltételezésekkel ellentétben megállapították, hogy a mágneses tér részecskéket gyorsító hatása sokkal nagyobb a spirális alakú, örvény jellegű nullpontok (O alakban összekapcsolódó térerővonalak) környezetében, mint a radiális nullpontoknál (X alakban összekapcsolódó erővonalak), mert az utóbbi esetben sokkal kisebb a turbulencia és az energiaátadás [7].

A Nap aktivitásától függően időnként a napszélnél 3-4-szer nagyobb sebességű részecskék lökődnek ki a napkoronából a bolygóközi térbe, amelyek a lassabb napszelet utolérve lökéshullámot keltenek. A Cluster és más űreszközök egyidejű mérései alapján bizonyították, hogy a Van Allen-övezetben az elektronok akár 15 perc alatt nagyon felgyorsulhatnak, amikor a gyors lökéshullámok hatására a magnetoszféra összenyomódik [8]. A magnetoszféra deformációja miatt a gyors „gyilkos” elektronokat tartalmazó befogási övezet helyzete is gyorsan változik és elérhet olyan műholdpályákat, amelyek általában biztonságosak. Az ilyen esetek előre jelzése nagyon fontos, hogy időben ki tudják kapcsolni azokat a berendezéseket, amelyek károsodhatnak a sugárzástól.

Poláris pályájukon a Cluster műholdak segítettek megérteni a sarki fény jelenségének korábban ismeretlen „titkait”. Leggyakrabban a sarki kürtő körüli ovális sávban, a 65–70. szélességi fok környékén látható sarki fény. A Cluster műholdak mérései és a NASA IMAGE műholdja egyidejű képei alapján megállapították, hogy a bolygóközi mágneses tér megfelelő iránya esetén az éjszakai oldalon

erővonal-összekapcsolódás történik. Ezáltal a magnetoszféra mágneses lebenye (magnetopauzán belüli tartomány) forró, nagy energiájú plazmával töltődik fel és ez okozza a magasabb szélességeken látható ún. „theta aurorát” [9] (8. ábra).

Az élénk sarki fény sugarai közötti sötét foltokat, a „fekete sarki fénynek” nevezett jelenséget is a Cluster műholdak mérései alapján fedezték fel és magyarázták meg [10]. Míg a fényes, színes sugarakat a mágneses erővonalak mentén az atmoszférába belépő elektronok keltik az ottani atomok gerjesztésével, a sötét foltok az ellenkező irányba, az ionoszférából a magnetoszférába távozó elektronok útját jelzik (9. ábra).



8. ábra: Az IMAGE műhold „theta aurora” észlelése a Déli-sarkvidék felett 2005. szeptember 15-én. Alacsonyabb szélességeken az aurora ovális is látható. (Forrás: NASA)

A Cluster mérései alapján a kutatók három dimenzióban feltérképezték Földünk környezetében a hideg plazma eloszlását [11]. A korábbi észleléseknél alacsonyabb energiájú ionokat és elektronokat is tudtak mérni a részecske-detektorok, mivel a szondák felületi potenciálját semlegesí-



9. ábra: Sarki fény Izland felett 2015-ben. (Forrás: ESA)

teni tudta az ASPOC berendezés. Megállapították, hogy az atmoszférából származó lassú ionok vannak többségben a magnetoszférában a vizsgált időszakok 50–70%-ában a sarki övezetben és az éjszakai oldalon nagy távolságban is. Űridőjárási eseményeket előrejelző modellekben ezt a lassú ionpopulációt is figyelembe kell venni.

A Föld egyenlítője körüli gyűrű alakú, átlagosan 30 ezer km távolságig terjedő plazmaszféra a magnetoszféra külső tartományainál több nagyságrenddel nagyobb sűrűségben tartalmaz alacsony energiájú „hideg” pozitív ionokat és elektronokat, amelyek nagyrészt a felső ionoszférából származnak. A Cluster mérései bizonyították, hogy innen nemcsak a korábban ismert módon, alkalmankénti kilökődések formájában, hanem folyamatosan áramlanak kifelé részecskék, naponta mintegy 90 tonna [12]. Ez soknak tűnhet, de ilyen kiáramlás mellett a földi atmoszféra még több mint 10 milliárd évig nem fogyna el. Ugyanakkor a geomágneses uszályból befelé is áramlanak protonok és elektronok. A Cluster mérései alapján modellszámításokkal bizonyították, hogy sarki geomágneses viharok idején a csóvában erővonal-összekapcsolódások által csapdába ejtett részecskék a Föld felé is távozhatnak, ha ott az ionoszférából kifelé mozgó oxigénionok is vannak [13]. Ha nincsenek jelen oxigénionok, akkor az ilyen plazmafelhők mindig kifelé lökődnek.

A Cluster és a Mars Express méréseinek összehasonlításával megvizsgálták, hogy a Föld magnetoszférája hogyan védi az atmoszférát [14]. Megállapították, hogy ugyanazon gyors napszélnyaláb hatására a Mars atmoszférájából kiáramló oxigénionok fluxusa egy nagyságrenddel nagyobb volt, mint a Földnél.

A Cluster műholdak méréseinek statisztikai vizsgálata alapján megállapították, hogy a csóva közepén levő mágneses lepelben a viszonylag gyenge mágneses tér nagy amplitúdójú változásai nem külső eredetűek, mint korábban feltételezték [15]. A sarki geomágneses viharok hurokszerű deformációkat keltenek a lepel belső részében, amelyek azután kifelé terjedve az egész lepel oszcillációját, „lebegését” okozzák. A keltő mechanizmust különböző numerikus modellek segítségével próbálják magyarázni.

Ötven éves rejtélyt oldottak meg a kutatók az egyenlítő környéki zajnak vélt plazmahullámok magyarázatával [16]. A Cluster műholdak speciális térbeli konfigurációjának köszönhetően bizonyították, hogy a hullámokat az állandó mágneses térben körpályán keringő protonok keltik.

Köszönetnyilvánítás

Az ábrák nagy része az ESA honlapjáról származik, ahol több tájékoztató összefoglalás található a Cluster küldetés műszaki hátteréről, tudományos céljairól és eredményeiről. Ezen publikáció rövidebb változata megjelent az Aeromagazin folyóirat 2020. decemberi számában [17].

Irodalomjegyzék

- [1] Escoubet C.P., Russell C.T., Schmidt R. (eds., 1997): The Cluster and Phoenix missions. Reprinted from Space Science Reviews, 79/1-2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. A kötetben megjelent cikkek bemutatják a tervezett programot, műszereket.
- [2] <https://sci.esa.int/web/cluster/-/59954-understanding-earth-what-the-cluster-mission-has-taught-us-so-far>
- [3] Tsyganenko N.A., Andreeva V.A. (2017): A hybrid approach to empirical magnetosphere modeling. Journal of Geophysical Research, 122, 8198
- [4] Perri S., Goldstein M.L., Dorelli J.C., Sahraoui F. (2012): Detection of Small-Scale Structures in the Dissipation Regime of Solar-Wind Turbulence. Physical Review Letters, 109, 191101
- [5] Hasegawa H. et al. (2004): Transport of solar wind into Earth's magnetosphere through rolled-up Kelvin–Helmholtz vortices. Nature, 430, 755
- [6] Xiao C. J. et al. (2006): In situ evidence for the structure of the magnetic null in a 3D reconnection event in the Earth's magnetotail. Nature Physics, 2, 478
- [7] Fu H. S. et al. (2017): Intermittent energy dissipation by turbulent reconnection. Geophysical Research Letters, 44, 37
- [8] Zong Q.G. et al. (2009): Energetic electron response to ULF waves induced by interplanetary shocks in the outer radiation belt. Journal of Geophysical Research, 114, A10204
- [9] Fear R. C. et al. (2014): Direct observation of closed magnetic flux trapped in the high-latitude magnetosphere. Science, 346, 1506
- [10] Russell A.J.B., Karlsson T., Wright A.N. (2015): Magnetospheric signatures of ionospheric density cavities observed by Cluster. Journal of Geophysical Research, 120, 1876
- [11] Andre M., Cully C.M. (2012): Low energy ions: A previously hidden solar system particle population. Geophysical Research Letters, 39, L03101

- [12] Dandouras I. (2013): Detection of a plasmaspheric wind in the Earth's magnetosphere by the Cluster spacecraft. *Annales Geophysicae*, 31, 1143
- [13] Zhang B., Brambles O.J., Lotko W., Ouellette J.E., Lyon J.G. (2016): The role of ionospheric O⁺ outflow in the generation of earthward propagating plasmoids. *Journal of Geophysical Research*, 121, 1425
- [14] Wei Y. et al. (2012): Enhanced atmospheric oxygen outflow on Earth and Mars driven by a corotating interaction region. *Journal of Geophysical Research*, 117, A03208
- [15] Sergeev V. et al. (2004): Orientation and propagation of current sheet oscillations. *Geophysical Research Letters*, 31, L05807
- [16] Balikhin M.A. et al. (2015): Observations of discrete harmonics emerging from equatorial noise. *Nature Communications*, 6, 7703
- [17] Tátrallyay M. (2020): Földi életünk része az űridőjárás. *Aeromagazin*, 2020 december, 62. oldal

A holdi meteoritok szerepe Földünk égi kísérőjének kutatásában

Rezes Dániel

Kőzettan-Geokémiai Tanszék,
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Bevezetés

A holdi meteoritok az extraterresztrikus kőzetek azon csoportját alkotják, melyek becsapódásos események során szakadtak ki bolygónk kísérőjéből, a Holdból, majd a Földre hullottak. Ezek a kőzetek az akondrit meteoritok közé sorolhatóak, amelyek olyan égitestekről származnak, melyek anyagában végbementek bizonyos fokú olvadási és differenciációs folyamatok, ezáltal belső szerkezetük öves felépítésűvé vált, anyaguk elkülönült magra, köpenyre és kéregre.

Atmoszféra hiányában a Holdat napi szinten érik meteoritbecsapódások, melyek mind újabb, változatos méretű krátereket formálnak felszínén, amit a friss kráterek [1,2] és a becsapódások felvillanásai [3] is jeleznek. Ha a kidobott kőzetanyag elegendő sebességre gyorsulva eléri a holdi szökési sebességet (2,38 km/s), akkor elhagyja az égitest gravitációs erőterét és pályára állva bizonyos idő elteltével egy égitest felszínére hullhat, mely jelen esetben a Föld. A Holdból való kiszakadás idejére a meteoritok kozmikus sugárzásnak való kitettségi korából (CRE, *cosmic-ray exposure age*) következtethetünk, amely megadja számunkra, hogy a kőzetek mennyi időt töltöttek a világűrben, feltételezve, hogy nem a Hold közvetlen felszínéről, hanem több cm-dm mélységből származnak. A legfiatalabb ~230 éves kitettségi korról a Kalahari 008/009 rendelkezik [4], míg a legidősebb kitettségi korok elérhetik a több millió évet is [5].

Az elsőként felismert holdi meteorit a 31,4 gramm tömegű Allan Hills A81005 (rövidítve ALHA81005 vagy ALH 81005) volt (1. ábra), melyet 1982. január 18-án találtak meg az ANSMET (*Antarctic Search for Meteorites*, Antarktisz Kutatás Meteoritokért) meteoritkereső program

1981/82 első félévi expedíciójának kutatói a terepen töltött utolsó nap utolsó darabjaként. Napjainkra 417 nevet kapott holdi meteoritot ismerünk [6]. Az elnevezett meteoritok közül számos darab egyazon meteoroid több, a légköri áthaladás vagy a földi folyamatok során széttöredezett fragmentuma. Ezeket a mintákat szokás angolul *paired* (összekapcsolható, párosítható) névvel illetni. Ennek tényét figyelembe véve az eddig talált, holdi eredetű meteoroidok valós száma nagyjából 150. Az egyazon hullásból származó meteoritok mellett létezik olyan párosítás is, mely a Föld különböző pontjain hullott holdi meteoritok ugyanazon kráterformáló eseményben történt kilökődését hivatott összekapcsolni. Ezek a kőzetek ugyanabban a becsapódásos eseményben kerültek a világűrbe, azonban útjukat eltérő módon tették meg és a Föld felszínére is különböző időben és helyen érkeztek. Ennek angol nyelvű elnevezése *source-crater paired* (forráskráter párosított) vagy *launch paired* (kilökődés párosított) [7].



1. ábra: Az ALHA 81005 meteorit képe a tört felület irányából. Jól látható a zöldesbarna kéreg és a meteorit belsejét alkotó fekete alapanyag, benne a fehér és szürke klaszttal (a méretjelölő kocka éle 1 cm) [8]

A holdi meteoritok mindegyike „talált”, vagyis hullásuk idejéről és körülményeiről nem rendelkezünk adatokkal. Ez azt jelenti, hogy „hullott” holdi meteoritot jelen tudásunk szerint még nem ismerünk, nem rendelkezünk szemtanúk által megfigyelt és dokumentált meteorithullásból származó ilyen típusú kőzettel. A legtöbb holdi meteorit az Antarktiszról, a Szaharából és Ománból származik. A holdi meteoritok rendkívül ritka extraterresztrikus kőzetek, átlagosan csupán minden 1100 meteoritból 1 bizonyul holdi eredetűnek. Az összes ismert ilyen típusú meteorit össztömege (~409 kg) jelenleg nagyjából 154%-a az Apollo-program által a Holdról gyűjtött, 1 cm-nél nagyobb méretű kőzetek össztömegének [7]. A szovjet űrszondás Luna küldetések 301 g holdi regolitot, míg az Apollo-program küldetései 382 kg holdi kőzetet és regolitot szállítottak a Földre.

A Holdról érkező meteoritok fontosak a tudomány számára, mivel olyan területek kőzeteit is megmintázzák és hozzák a Föld felszínére a Hold felénk eső (*near side*) és ellentétes (*far side*) oldaláról, melyeket sem az Apollo, sem pedig a Luna küldetések nem értek el, ugyanakkor pontos forrásterületüket nem ismerjük. Ezen felül a Hold felszínét ért meteoritbecsapódások által kevert kőzetanyagúvá vált holdi breccsák klasztjai (kőzettörmelék darabjai) egy régió összes kőzetét reprezentálhatják.

A holdi meteoritok a többi meteoritcsoporttal kiegészülve segítenek megérteni az égitestek fejlődéstörténetét [9–14], a becsapódási események folyamatát, nyomait és hatásait [15]. Ezek mellett fontos információt szolgáltatnak a jövőbeli űrszondás küldetések tervezett célpontjainak kijelölésében, a mintagyűjtési pontok helyzetének meghatározásában [16].

Nem elhanyagolható a jelentőségük az oktatásban sem, mivel a meteoritika folyamatosan fejlődő tudomány, egyre bővülő ismeretanyag elsajátítása szükséges az extraterresztrikus anyagokat kutató szakemberek új generációjának [17]. Ezt a célt segíti a hosszú idő óta Magyarországon is elérhető, oktatási célokat szolgáló NIPR-gyűjtemény (*National Institute of Polar Research*, Japán Nemzeti Sark-

kutató Intézet) és NASA-gyűjtemény (*National Aeronautics and Space Administration*, Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal) az ELTE TTK kezelésében.

A Hold felszínének gyakorlatilag teljes egészét regolit fedi. Ez a képződmény a Holdat érő mikro- és makroméretű meteoritok folyamatos becsapódásától, valamint a Napból és más csillagokból érkező töltött részecskék bombázásától keletkező, felaprózódott közettörmelékből álló konszolidálatlan lepel. A közettörmelék szemcsék döntő többsége 1 cm-nél kisebb méretű, habár a becsapódások során feltépett, méteres nagyságrendű közettömbök is megjelennek a felszínen. A regolit a sötét bazaltsíkságokon, vagyis mare (tenger) területeken 4–5 méter, míg az idősebb felföldi területeken 10–15 méter vastagságú. A tényleges holdi regolit alatt található, becsapódások által érintett, nagyobb törések által harántolt kőzetek teljes szelvényét megaregolitnak nevezzük [18]. A holdi regolitban két különleges, az égitest más régióiban nem előforduló kőzetelem is megjelenik: (1) robbanásos kitörések során vagy becsapódások hatására létrejött olvadékcseppekből kristályosodott mikroszkopikus méretű üvegszferulák és (2) a regolitot ért mikrometeorit-becsapódások által létrehozott, ásvány- és kőzetklasztokat tartalmazó, maximálisan milliméteres méretű üveges, gyakran folyásos szövetű, üreges agglutinátok [19]. A regolit alatt található kéreg átlagos vastagsága a Földről látható oldalon 34 és 43 km közötti a különböző modellek alapján [20], míg a Hold túloldalán lényegesen vastagabb. A holdi felföldi (terra vagy highland; világosabb, idősebb és egyenetlenebb területeket alkotó) kőzeteket három nagy csoportba sorolhatjuk: magmás kőzetek (mélységi, vulkáni és szubvulkáni), metamorf (átkristályosodott) kőzetek, valamint breccsák. Ezeken belül több alcsoportot, osztályt és alosztályt különíthetünk el (pl. bazalt, troktolit, granulitos kőzetek, regolit breccsa, granulitos breccsa) [21].

Vizsgálati módszerek

A holdi meteoritok műszerrel végzett vizsgálati módszerei közül két fontosabb, általam is használtat mutatnék be. Ez a két eljárás az optikai polarizációs mikroszkópia, valamint a pásztázó elektronmikroszkópia és elektron mikroszondás vizsgálatok (SEM+EPMA). A polarizációs mikroszkópiai és SEM+EPMA vizsgálatok alapja a kőzetekből készített vékonycsiszolat, amely egy tárgylemezből és az üvegre ragasztott vékony kőzetszeletből áll. A kőzetlemez felülete lehet fényesre polírozott, de fedőlemezzel is lefedhető, azonban ez ellehetetleníti a további kvantitatív kémiai elemzések lehetőségét. A tárgylemez sztenderd mérete a kőzettanban $\sim 48 \times 28 \times 1$ mm, a rá felragasztott és síkra csiszolt, majd polírozott kőzetlemez vastagsága mindössze ~ 30 μm . Ez a csekély vastagság már lehetővé teszi számunkra, hogy a meteoritok legtöbb ásványát és a kőzet-szövetet áteső fényben vizsgálhassuk.

A kőzettani polarizációs mikroszkópban a vékonycsiszolatot két polárszűrő (nikol) használatával vizsgálhatjuk. A rögzítetten állandóan beiktatottat polarizátornak, míg a kiiktathatót analizátornak nevezzük. Az ásványok különböző tulajdonságai így egy és keresztezett nikolos módszerekkel vizsgálhatóak. A polarizációs mikroszkópia segítségével vizsgálhatjuk a meteoritok szövetét és a bennük található ásványok tulajdonságait. Emellett a becsapódásos események által létrehozott sokkjelenségek és a földi körülmények között létrejött másodlagos átalakulások is meghatározhatóak ezzel a módszerrel.

A vizsgálatok során alapvető fontosságú a meteoritokat alkotó ásványfázisok kémiai összetételének ismerete, melyhez a SEM+EPMA módszert használjuk. A vizsgálatoknál a vékonycsiszolat elektromosan vezető szén- vagy aranyréteget kap. Ezt követően a műszerben a mérésre kijelölt területek, illetve ásványok már elektronokkal gerjeszthetővé válnak és elemi összetételüknek megfelelően különböző spektrumú sugárzást bocsátanak ki. Ez nyújtja számunkra a kémiai összetételükre vonatkozó információt és a nagy felbontású szövetelemzés lehetőségét. A vizsgálat lehetőséget biztosít a különböző elemekre vonatkozó pont-

mérések és vonal menti mérések elvégzésére, valamint térképezhetővé válik a különböző elemek eloszlása a minta meghatározott felületrészében is.

Kutatási eredmények

A vizsgálataim során elemzett meteorit az Északnyugat-Afrikában, Algériában talált Northwest Africa (NWA) 13637 nevű holdi földpátos regolit breccsa volt. Az eredetileg 11,1 gramm tömegű kőzetből a vágás, vékonycsiszolat-készítés és mintaelőkészítési folyamatok után megmaradt egy 2,36 g és egy 6,32 g tömegű darab, valamint 300 mg tömegű porminta későbbi neutronaktivációs analízises vizsgálatokra. A kőzet eredeti mérete hozzávetőleg $2 \times 2 \times 1,5$ cm volt. A minta eredetileg nagyjából téglatest alakú, a lehullási helyén zajló sivatagi homokkoptatás miatt olvadási kéreg nélküli, foltokban narancsbarna sivatagi porral borított volt. A meteorit külseje szürke alapszínű, benne különböző anyagú, alakú és színű kőzettörmelék és egyedi ásványszemcsék figyelhetők meg, már szabadszemmel is könnyen felismerhető a breccsás szerkezet.



2. ábra: Az NWA 13637 holdi meteorit polírozott felületének visszavert fénnnyel készült szkennelt képe. Könnyen felismerhető a becsapódásos töredezés nyomán keletkezett breccsás szerkezet

A külső felszínen kipreparálva igen vékony (<0,2 mm) fekete erek jelennek meg, emellett a kőzetet áthálózó repedéseket is találunk.

A meteorit vágott felülete fekete alapszínű. A belső felszínen maximum 2 mm hosszúságú, különböző anyagú, nyúlt vagy ellipszis alakú, sarkos kőzetklasztok és ásványszemcsék jelennek meg egyenletes eloszlásban, irányítatlanul (2. ábra). A klasztokon belül a fehér, szürke és zöld színek dominálnak. A különböző színű törmeléket fekete, homogén mátrix (a klasztok szemcseméreténél finomabb beágyazó anyag) foglalja magába. A vágott felületen emellett több, maximum 1 mm átmérőjű, ezüstösen csillogó szulfid- és fémfázisú szemcsék láthatóak elszórva. A klasztokat és a mátrixot átszelve számos repedés figyelhető meg, némelyekben sivatagi por is található, melyek földi szennyezésnek tekintendők. A kőzetben sem elsődlegesen képződött, sem másodlagosan, a földi mállás során keletkezett üregek nem figyelhetők meg makroszkóposan.

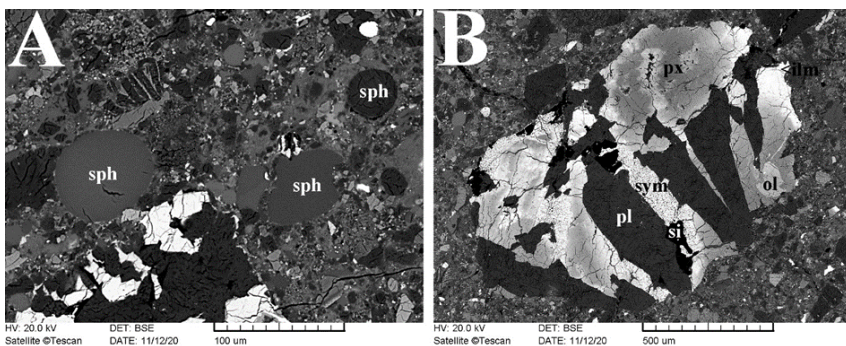
Ásvány neve	Képlet	Kristályrendszer	Keletkezési mód
olivin (forsterit-fayalit)	(Mg, Fe ²⁺) ₂ [SiO ₄]	rombos	lényeges elegyrészként jelenik meg elsősorban ultra-bázisos, bázisos magmás és metamorf kőzetekben; a kőzetolvadék hűlése során a Bowen-féle kiválási sor első színes elegyrészeként magas hőmérsékleten kristályosodik
Piroxének	R ²⁺ ₂ [Si ₂ O ₆]	rombos/ monoklin	lényeges elegyrészként jelenik meg elsősorban ultrabázisos, bázisos magmás és metamorf kőzetekben; a kőzetolvadék hűlése során a Bowen-féle kiválási sorban az olivint követően magas-közepes hőmérsékleten kristályosodik

Ásvány neve	Képlet	Kristályrendszer	Keletkezési mód
Plagioklász (albit-anortit)	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	triklin	lényeges elegyrészként jelenik meg elsősorban ultrabázisos, bázisos magmás és metamorf kőzetekben; magas és alacsony hőmérsékleti tartományok között keletkezik a kőzetolvadék hűlése során a Bowen-féle kiválási sort követve anortit-bytownit-labradorit-andezin-oligoklász-albit sorrendben
kromit	FeCr_2O_4	köbös	akcesszórikus elegyrészként jelenik meg elsősorban ultrabázisos, bázisos magmás kőzetekben; általában a kristályosodás korai fázisában keletkezik
kamacit	$\alpha\text{-(Fe,Ni)}$	köbös	akcesszórikus elegyrészként jelenik meg elsősorban magmás kőzetekben és breccsákban; magmás folyamatok során vagy a regolitban Fe^{2+} -redukcióval és impaktorok fémtartalmának hozzáadódásával keletkezik

Ásvány neve	Képlet	Kristályrendszer	Keletkezési mód
szilika	SiO ₂	polimorf módosulatok	akcesszórikus elegyrészként jelenik meg magmás és metamorf kőzetekben; magmás folyamatok és sokk-metamorfózis hatására keletkezik
ilmenit	FeTiO ₃	rombos	akcesszórikus elegyrészként jelenik meg általában bazaltokban; a kristályosodás középső fázisában keletkezik; minél nagyobb a magma TiO ₂ -tartalma, annál több ilmenit kristályosodik
troilit	FeS	hexagonális	akcesszórikus elegyrészként jelenik meg általában FeNi, ilmenit és spinell környezetben bazaltokban; a kristályosodás késői fázisában keletkezik
apatit	Ca ₅ [PO ₄] ₃ (OH,F,Cl)	hexagonális	akcesszórikus elegyrészként jelenik meg gyakran fémfázishoz társulva; a kristályosodás késői fázisában keletkezik
baddeleyit	ZrO ₂	monoklin	akcesszórikus elegyrészként jelenik meg bazaltokban; a kristályosodás késői fázisában keletkezik
barit	Ba[SO ₄]	rombos	sivatagi klímán másodlagosan képződik
kalcit	Ca[CO ₃]	trigonális	sivatagi klímán másodlagosan képződik

1. táblázat (lásd az előző két és fél oldalon) :

Az NWA 13637 holdi meteoritban megtalálható ásványok képletükkel, kristályrendszerükkel és keletkezési módjukkal megadva (Magyarázat: lényeges elegyrészek – azok a szilikátásványok, amelyek mennyisége jelentős egy adott kőzetben, kőzetmeghatározó jelentőségűek; akcesszórius elegyrészek – azok az ásványok, amelyek általában kis mennyiségben jelennek meg egy kőzetben, nem kőzetmeghatározó jelentőségűek; ultrabázisos kőzet – olyan magmás kőzet, amelynek SiO_2 -tartalma 44% alatti; bázisos kőzet – olyan magmás kőzet, amelynek SiO_2 -tartalma 44% és 53% közötti)



3. ábra: A meteorit alapanyagában található, 100 µm méretnél kisebb üvegszferulák (A kép), valamint egy bazaltos klaszt (B kép) SEM BSE felvételen (sph=üvegszferula, ilm=ilmenit, ol=olivin, pl=plagioklász, px=piroxén, si=szilika, sym=szimplektit)

Az NWA 13637 nevű meteorit egy komplex polimikt (többféle kőzet klasztjait is tartalmazó) földpátos regolit breccsa, vagyis egy olyan holdi képződmény, melyben az elsődlegesen földpátot tartalmazó töredékek mellett számos egyéb kőzet darabjai is megtalálhatóak és a meteorit forrásmélysége a Hold felszínéhez közel helyezkedett el. Ennek bizonyítékait a benne található üvegszferulák adják, melyek csak a regolitban megtalálható kőzetelemek

(3. ábra, A kép). A meteoritban található vulkanikus és becsapódásos eredetű üvegcsseppek maximális mérete 100 μm . A szferulák nagy része érintetlen a holdi regolitot ért mérsékelt erejű sokkhatásoktól. Legtöbbjük homogén anyagú (2. táblázat), de találhatunk közöttük léces szételegyedést mutató vagy vázkristályos-dendritesen megdermedt anyagúakat is.

A kőzetklasztokat és üvegszferulákat befoglaló mátrix finomszemcsés (<100 μm) anyagú. Fő ásványfázisaiként az olivin, a piroxén és a földpát említhető, melyet becsapódással keletkezett üveges anyag tart össze, azonban folyásos szövet nem észlelhető a mintán. A klasztok a holdi kőzettípusok széles palettáját fedik le. A megfigyelt típusok a nagy számban előforduló impakt olvadék és impakt olvadék breccsa klasztok, valamint a kisebb mennyiségű VLT (*very-low-Ti*, <1.0 t% TiO_2) bazalt (3. ábra, B kép), mikrogabbro, anortozit, granulit és granulitos breccsa klasztok. A csiszolatban azonosított legnagyobb klaszt mérete 2 mm, mely egy becsapódásos eredetű impakt olvadék breccsa. Ez azért is lényeges, mert a holdi breccsák fontos jellemvonása a breccsa-a-breccsában szövet (idősebb breccsa klasztok fiatalabb breccsában). Általánosan elmondható, hogy a klasztok töredezetek, bennük szintén a legnagyobb mennyiségben olivint ($\text{Fa}_{24,9\pm6,8}$, $\text{Fe/Mn}=86\pm21$, $N=22$), piroxént ($\text{Fs}_{33,7\pm17,9}\text{Wo}_{14,2\pm11,1}$, $\text{Fe/Mn}=58\pm13$, $N=76$) és földpátokat találunk, de akcesszórius mennyiségben előfordul még kromit, FeNi fémfázis, szilika (SiO_2 polimorf módosulatai), ilmenit, troilit, apatit és baddeleyit is (elsődleges, holdi eredetű ásványok). Másodlagos ásványként (földi szennyezőként) a sivatagi klímán képződött vas-oxidok, barit és kalcit említhető (lásd az 1. táblázatban).

2. táblázat (lásd a következő oldalon):

Az NWA 13637 impakt szferuláinak (12 saját mérés alapján átlagolva), valamint az Apollo-11, -12, -14, -15, -16, -17 és Luna-16, -20, -24 küldetések [18] holdi talajmintáinak átlagos összetétele (oxid tömegszázalékban megadva)

	NWA 13637	Apollo -11	Apollo -12	Apollo -14	Apollo -15	Apollo -16	Apollo -17	Luna -16	Luna -20	Luna -24
SiO₂	43,3	42,2	46,3	48,1	46,8	45,0	43,2	41,7	45,1	43,9
TiO₂	0,3	7,8	3,0	1,7	1,4	0,54	4,2	3,4	0,55	1,3
Al₂O₃	26,1	13,6	12,9	17,4	14,6	27,3	17,1	15,3	22,3	12,5
Cr₂O₃	0,2	0,30	0,34	0,23	0,36	0,33	0,33	0,28	–	0,32
FeO	5,7	15,3	15,1	10,4	14,3	5,1	12,2	16,7	7,0	19,8
MnO	–	0,20	0,22	0,14	0,19	0,30	0,17	0,23	0,13	0,25
MgO	9,5	7,8	9,3	9,4	11,5	5,7	10,4	8,8	9,8	9,4
CaO	15,1	11,9	10,7	10,7	10,8	15,7	11,8	12,5	15,1	12,3
Na₂O	0,2	0,47	0,54	0,70	0,39	0,46	0,40	0,34	0,50	0,31
K₂O	–	0,16	0,31	0,55	0,21	0,17	0,13	0,10	0,10	0,04
P₂O₃	–	0,05	0,4	0,51	0,18	0,11	0,12	0,12	0,16	0,11
S	–	0,12	–	–	0,06	0,07	0,09	0,21	0,08	0,14
Ösz- szes	100,4	99,9	99,6	99,8	100,8	100,8	100,5	99,7	100,8	100,4

Összefoglaló értékelés

A Northwest Africa (NWA) 13637 meteorit a vizsgálatok alapján egy holdi földpátos regolit breccsa, melyben a különböző típusú kőzetklasztok mellett nagy mennyiségben találhatóak csak a holdi regolitra jellemző üvegszferulák és mindezeket finomszemcsés és üveges anyagú mátrix tartja össze és foglalja magába.

A kőzetben található olivin és piroxén ásványok atomi Fe/Mn aránya egybevág a korábbi publikációkban közölt adatokkal, így a holdi eredet bizonyított. Mivel a meteoritot az elsődleges marokkói forrás szerint az NWA 11228 holdi földpátos breccsa szórásmezőjének közelében gyűjtötték, ezért összetételének összehasonlítása leginkább az NWA 8673 holdi meteorit klánnal ajánlott, melybe az NWA 11228 is tartozik. A klánba tartozó meteoritok holdi földpátos regolit és törmelékes breccsák, valamint egy bazaltos/anortozitos breccsa. Az NWA 13637 meteoritot összevetve az NWA 8673 klán tagjaival az tapasztalható, hogy a bennük található olivin, piroxén és földpát ásványok összetétele nem tér el lényegesen egymástól, azonban a klánhoz való tartozást egyértelműen a jövőben elvégzett neutronaktivációs analízises vizsgálatok fogják eldönteni.

A meteorit forrásmélysége csekély, a Hold kérgének felső pár tíz méteréből löködhetett ki, amit a breccsában található nagyszámú, csak a holdi regolitban megtalálható szferula erősít meg. A forrásterületet – vagyis azt a meghatározott kőzettani és geokémiai tulajdonságokkal jellemezhető régiót, ahonnan a meteorit kilöködhetett – az eddigi vizsgálatok alapján a bazaltos klasztok és az üvegszferulák összetételéből lehet megbecsülni, azonban pontosabb forrásterület-becslés szintén a neutronaktivációs vizsgálatok után adható. Az NWA 13637 üvegcséppjeinek összetételét összevetve az eddigi holdi mintagyűjtések (Apollo és Luna küldetések) által szolgáltatott holdtalajok átlagos összetételével (2. táblázat) az mondható ki, hogy a meteorit forrásköze leginkább az Apollo-16 mintagyűjtési területének anyagával rokonítható, amit a TiO_2 , Al_2O_3 , FeO és CaO összetétel jelez, bár a MgO -tartalom a vizsgált meteoritnál nagyobb, mint a referencia mintákban. Ez az összevetés

azon alapul, hogy az impakt szferulák összetétele tükrözi a megolvadt forrásregolit összetételét [22]. Így a meteorit forrásköze a Külső Földpátos Felföldi Terrén (FHT-O, *outer-Feldspathic Highlands Terrane*) és Procellarum KREEP Terrén (PKT, *Procellarum KREEP Terrane*) határával hasonló területről érkezhetett, azon belül pedig egy VLT bazaltot is tartalmazó régióból. A holdi terrénok olyan formációcsoportokat jelölnek, amelyek más terrénoktól fejlődéstörténetükben, valamint térbeli kiterjedésükben és tulajdonságaikban is elkülönülnek.

A holdi meteoritokon végzett ilyen irányú vizsgálatok elősegíthetik a jövőbeli űrszondás mérések és mintagyűjtés céljából végzett leszállások helyének pontosítását az által, hogy segítenek behatárolni az eddig meg nem mintázott holdi területek képződményeinek összetételét és elterjedését. A jövőbeli tervek között kiemelten szerepel a holdi sarkvidéki kráterekben mutatkozó vízjég elemzése. Utóbbi előfordulásának, eredetének és fennmaradásának megismerésében pedig szükség van a holdi regolit ásványos összetételének megértésére, ebben pedig a holdi meteoritok elemzése kulcsszerepet játszhat. Az ESA (Európai Űrügynökség) következő tervei között szerepel az, hogy az orosz együttműködésben készülő Luna-27 űrszonda fogja a jeges regolitot vizsgálni, ennek földi teszteléséhez a holdi minták alapján készült szimuláns port használnak. Ezekben a témakörökben az űrszondás műszereket tervező mérnökök és a laboratóriumi elemzésben dolgozó geológusok kooperációja hozza az ideális megoldást.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni dr. Kereszturi Ákosnak, dr. Józsa Sándornak, Szabó Máténak, Fehér Kristófnak és Kovács Zoltánnak a munkám során nyújtott segítséget, valamint köszönettel tartozom Szabó Istvánnak a vizsgált mintáért. A műszeres méréseket az ELKH CSFK Földtani és Geokémiai Intézetben a GINOP 2.3.2-15-2016-00009 pályázat támogatásával, valamint az ELTE TTK Közöttan-Geokémiai Tanszéken végeztem el.

Irodalomjegyzék

- [1] Kereszturi, A., Steinmann, V. (2017): Characteristics of small young lunar impact craters focusing on current production and degradation on the Moon. *Planetary and Space Science*, 148, 12
- [2] Kereszturi, A., Steinmann, V. (2019): Terra-mare comparison of small young craters on the Moon. *Icarus*, 322, 54
- [3] Avdellidou, C.; Vaubaillon, J. (2019): Temperatures of lunar impact flashes: mass and size distribution of small impactors hitting the Moon. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 5212
- [4] Sokol, A. K. et al. (2008): Geochemistry, petrology and ages of the lunar meteorites Kalahari 008 and 009: New constraints on early lunar evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 4845
- [5] Eugster, O. (2003): Cosmic-ray exposure ages of meteorites and lunar rocks and their significance. *Geochemistry*, 63, 3
- [6] http://meteorites.wustl.edu/lunar/moon_meteorites_list_alpha.htm (2020.12.14.)
- [7] <https://sites.wustl.edu/meteoritesite/items/lunar-meteorites/> (2020.12.14.)
- [8] <https://www.rocketstem.org/2020/03/14/ice-and-stone-this-week-in-history-12/> (2020.12.14.)
- [9] Gucsik, A. et al. (2017): Luminescence Spectroscopical Properties of Plagioclase Particles from the Hayabusa Sample Return Mission: An Implication for Study of Space Weathering Processes in the Asteroid Itokawa. *Microscopy and Microanalysis*, 23, 179
- [10] Bérczi, S. et al. (2008): Studies of Solar System cumulate rocks from NASA Lunar set and NIPR Martian meteorites. *European Planetary Science Congress*, Vol. 3, EPSC2008-A-00272
- [11] Nagy, S. et al. (2012): Shock and thermal annealing history of the ALH 77005 Martian meteorite: a micro-Raman spectroscopical investigation. *Central European Geology*, 55, 33

- [12] Gyollai, I., Kereszturi, Á., Chatzitheodoridis, E. (2019): Analysis of shock metamorphic processes in the Zagami meteorite. *Central European Geology*, 62, 56
- [13] Gyollai, I., Kereszturi, Á., Kereszty, Z., Szabó, M., Chatzitheodoridis, E. (2017): Shock-induced alterations in the recently found H chondrite Csátalja meteorite and its implications. *Central European Geology*, 60, 173
- [14] Kereszturi, A. et al. (2017): Analyzing Raman–Infrared spectral correlation in the recently found meteorite Csátalja. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 173, 637
- [15] Hargitai, H. et al. (2005): A Naprendszer kisenciklopédiája: a Naprendszer formakincse (1) – Becsapódások folyamata, nyomai és hatásai. *ELTE TTK–MTA Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport (KAVÜCS)*, 72 p.
- [16] Skultéti, A. et al. (2020): Role of spectral resolution for infrared asteroid compositional analysis using meteorite spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496, 689
- [17] Bérczi, S., Józsa, S., Kovács, Z., Lukács, B., Szakmány, Gy. (2004): Studies of thermal evolution of chondritic asteroidal body: Synthesis from Antarctic meteorite thin section set of the National Institute of Polar Research, Tokyo. *Acta Mineralogica-Petrographica*, 45, 55
- [18] McKay, D. S. et al. (1991): The Lunar Regolith. In: *Lunar Sourcebook*, New York, Cambridge Univ. Press, Vol. 7, 285
- [19] <https://sites.wustl.edu/meteoritesite/items/lunar-regolith-breccias-and-fragmental-breccias/> (2020.12.14.)
- [20] Wieczorek, M. A. et al. (2013): The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science*, 339, 671
- [21] Stöffler, D., Knöll, H. D., Marvin, U. B., Simonds, C. H., Warren, P. H. (1980): Recommended classification and nomenclature of lunar highland rocks – a committee report. In: Papike, J. J., Merrill, R. B. (eds.), *Proc. Conf. on the Lunar Highlands Crust*, Pergamon Press, 51
- [22] Zellner, N. E. B. (2019): Lunar Impact Glasses: Probing the Moon's Surface and Constraining its Impact History. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 2686

Napfoltcsoportok visszafejlődési sajátságai nagy felbontású idősorok vizsgálata alapján

Muraközy Judit

ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont,
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

A foltcsoportok visszafejlődési folyamata részleteiben nem kellőképpen ismert folyamat, hiszen az eddigi vizsgálatok vagy csak kis számú mintán kapott eredményekre támaszkodnak, vagy csak napfoltokat vizsgáltak, vagy pedig hosszabb távon is megfigyelték azt, de nem tettek különbséget a vezető és követő részek között. Vizsgálataim a volt Debreceni Napfizikai Obszervatórium napfoltkatalógusainak adataira épülnek, összesen több mint 750 visszafejlődő foltcsoportot vizsgáltam. A foltcsoportok bomlási rátái az összterületre, a penumbrákra és az umbrákra is meg lettek határozva. Arra is választ kapunk, hogy kimutatható-e ciklus- vagy ciklusfázisfüggése a bomlásnak.

Bevezetés

A szoláris dinamó által vezérelt naptevékenység változásának fontos nyomjelzői a napfoltok, melyek általában foltcsoportokba rendeződnek, azaz a legtöbbször egynél több napfoltot tartalmaznak. Ilyenkor a foltcsoporton belül ellentétes mágneses polaritású vezető és követő részekbe csoportosulnak az egyes foltok.

Habár a foltcsoportok felbukkanása, fejlődése, majd bomlása viszonylag ismert területe a napfizikának, ezek az ismeretek többnyire megfigyeléseken, vagy kis számú statisztikai mintán végzett vizsgálatok által kapott eredményeken alapulnak, néha pedig csak a magányos napfoltok fejlődését vizsgálják. Ennek oka legtöbbször a megfelelő minta hiánya.

Jelen cikkben a foltcsoportok, illetve azok vezető és követő részeinek visszafejlődését vizsgálom a foltcsoportok teljes, penumbra és umbra területei segítségével, a mostanában megjelent [1] és [2] cikkeim alapján.

Adatok

A volt Debreceni Napfizikai Obszervatóriumban több olyan napfoltkatalógus készült, mely igen részletes adatokat szolgáltatott a megfigyelt napfoltcsoportokról, illetve az azokat alkotó foltokról egyaránt [3, 4]. Ezek az adatok kitértek a foltok naprajzi helyére, illetve területeire is, de az űreszközök által végzett megfigyeléseken alapuló katalógusok a foltok mágneses teréről is tartalmazzanak adatokat. Ezen adatbázisok lehetővé teszik a foltcsoportok bomlásának és lehetséges hosszabb távú változásainak részletes, nagy számú mintán alapuló vizsgálatát.

Ezek egyike a SOHO/MDI-Debrecen Sunspot Data (továbbiakban: SDD), mely a SOHO űreszköz szolgáltatása észlelések alapján készült és amely mágneses méréseinek köszönhetően lehetőséget teremt a foltcsoportok vezető és követő részeinek megkülönböztetésére. Ez az adatbázis 1996-tól 2010-ig tartalmaz adatokat, ezért a visszafejlődési rátákban esetlegesen megmutatkozó ciklusfüggések vizsgálatára sajnos nem alkalmas, hiszen kicsivel több mint egyetlen 11 éves napfoltciklust fed le. Az ilyen hosszabb távú vizsgálatok elvégzésére a Debrecen Photoheliographic Data (ezután: DPD) és a greenwichi napfoltkatalógus revideált változata – mely szintén a korábbi Debreceni Napfizikai Obszervatóriumban készült –, a Greenwich Revised Sunspot Data (továbbiakban: GPR) megfelelő. A GPR 105 év adataival (1872–1976), míg a DPD 45 év adataival (1974–2018) számol el, így együtt nem egészen 13 napfoltciklust fednek le. Ezen adatbázisok viszont földi észleléseken alapulnak, mágneses adatokat nem tartalmazzanak, ezért a vezető és követő részek pontos meghatározására alkalmatlanok. A visszafejlődési ráták ciklusfüggései csak a teljes napfoltcsoportra vizsgálhatók, annak ellentétes mágneses polaritású részeinek esetleges ciklusfüggései nem követhetők velük.

A napfoltcsoportok bomlását az irodalomban található kis számú mintán végzett vizsgálatokkal ellentétben összesen több mint 750 különböző foltcsoporton vizsgáltam, a következők szerint. Az SDD alapján végzett vizsgálatban csak olyan foltcsoportok vettek részt, amelyek legnagyobb

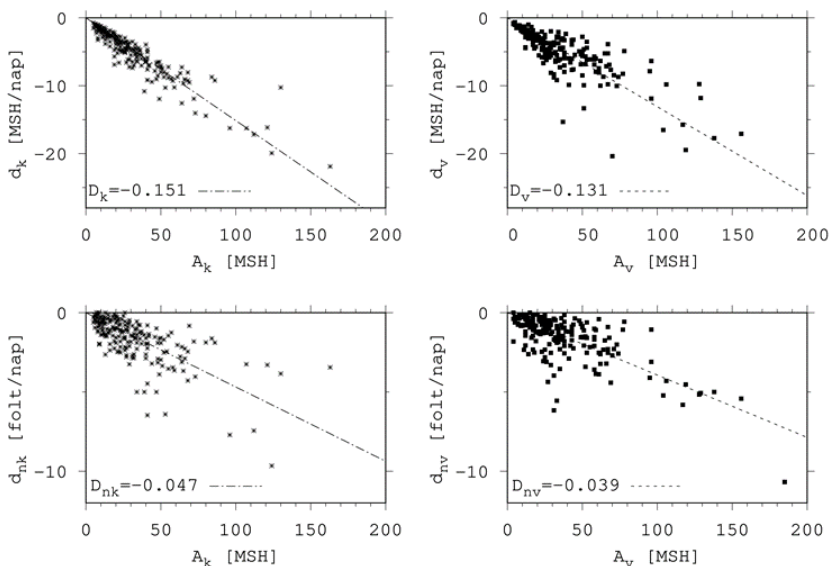
területű állapotukban bipolárisak voltak, azaz vezető és követő rész egyaránt megfigyelhető volt. További követelmény volt, hogy minimum nyolc napig, de a maximális terület után még legalább 4 napon keresztül megfigyelhetőnek kellett lennie, mialatt a területének legalább 60 százalékos csökkenést kellett mutatnia. A maximális terület elérése előtt legalább két napos területnövekedés is megkövetelt volt a napfoltcsoporttal szemben azért, hogy a maximális terület kiválasztása biztos legyen, s így csak a valóban csökkenő területű foltcsoportok kerülhessenek be a vizsgálatba. E kritériumok alkalmazásával több mint 200 különböző foltcsoporton követhetjük azok bomlását eddig egyedülálló részletességgel.

A GPR és DPD alapján végzett, hosszú távú változásokat vizsgáló eljárásokba a fentebbi feltételekkel megegyező kritériumok alapján válogattam a foltcsoportokat, eltekintve a vezető és követő részekre megfogalmazottaktól. A vizsgálatokból a visszaforduló foltcsoportokat kizártam.

Foltcsoportok bomlási rátái és azok ciklusfüggései

A bomlási rátákat különböző módszerekkel is meghatároztam. Az egyszerűbb módszer szerint a bomlási rátát a maximális terület, és a centrálmeridiántól mért 65 fokos távolságon belül legutoljára észlelt terület különbsége, és ezen állapotok között eltelt idő hányadosaként definiáltam. Ezen eljárást követve a foltcsoportok százalékos bomlási rátáit is kiszámítottam. Ekkor az elért maximális területet egységnyinek tekintettem és az utolsó területet annak százalékaként vettem figyelembe.

Nem csak a területcsökkenési rátát, de az egyes foltcsoportok által tartalmazott foltok számának változási rátáját is meghatároztam. A területcsökkenést pedig a foltcsoportok három különböző (teljes, azaz umbra+penumbra [U+P], penumbra [P] és umbra [U]) területére is kiszámítottam.

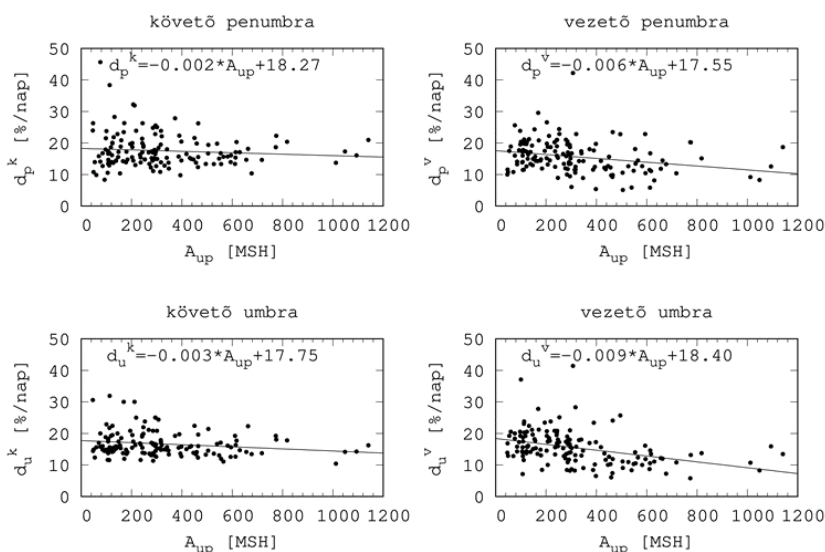


1. ábra: Foltcsoportok bomlási rátájának függése a foltcsoportok maximális területétől. Felső sor: területi bomlási ráták, alsó sor: számbeli bomlási ráták. A bal oszlop a követő részekre, míg a jobb oszlop adatai a vezető részekre számolva

Elsőként azt vizsgáltam, hogy a foltcsoportok által elért maximális terület szerint kimutatható-e bármilyen különbség a bomlási rátákban. Erre a kérdésre mind a terület (1. ábra felső panelek), mind pedig a foltszám (1. ábra alsó panelek) alapján lineáris függés mutatható ki, mely szerint a nagyobb foltcsoportok területcsökkenése jóval gyorsabb ütemű, illetve a bennük található foltok száma is rohamosabb tempóban csökken, mint kisebb területű társaiké. Ez a bomlási sebesség a követő részek esetén nagyobb, mint a vezető részek esetében.

A foltcsoportok teljes, penumbra, illetve umbra területeit is vizsgálva kimutatható, hogy ezen területek százalékos visszafejlődési sebessége minden esetben egyenes arányosságot mutat a foltcsoport teljes területének maximumával (2. ábra), és a nagyobb területek felé csökken a szá-

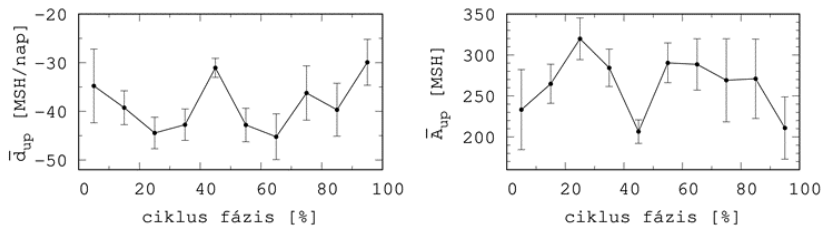
zálékos visszafejlődési sebesség. Ez azt jelentheti, hogy a nagyobb területű foltcsoportok esetén valamiféle stabilizáló hatás gátolhatja azok bomlását. A foltcsoportok visszafejlődése a következő menetrend szerint megy végbe: leggyorsabban a követő penumbrák, majd a követő umbrák tűnnek el, végül a vezető penumbra eltűnése után a vezető umbra bomlik el (2. ábra egyenletei alapján). Ez a vizsgálat megerősíti azt a megfigyelést, mely szerint magányos foltként legtöbbször a vezető polaritású umbrák maradnak vissza.



2. ábra: Foltcsoportok százalékos visszafejlődési rátáinak függése a foltcsoportok teljes maximális területétől. Felső sor: követő (bal) és vezető (jobb) penumbrákra, alsó sor: követő (bal) és vezető (jobb) umbrákra. Az adatokra illesztett egyenesek egyenletei megtalálhatók az egyes paneleken

Mivel a foltcsoportok területeinek nagysága és a nap-foltciklus fázisa között kimutatható kapcsolat, felmerül a kérdés, hogy a bomlás gyorsasága mutat-e függést a ciklus fázisától. A 3. ábra bal paneljének tanúsága szerint a bom-

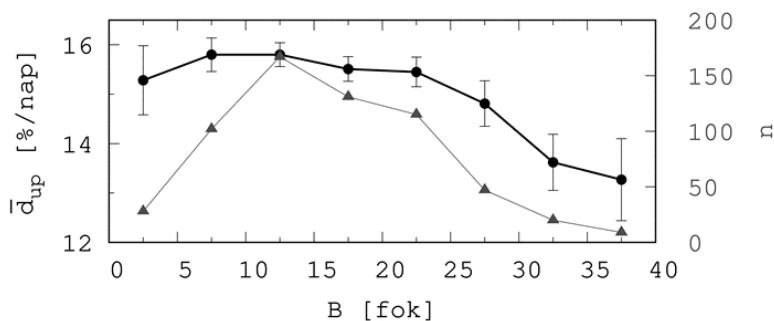
lási sebesség (abszolút értéke) a ciklus közepe felé nő, majd a ciklus maximuma környékén egy látványos visszaesés látható, aztán a ciklus vége felé közeledve egyre csökken. A jobb panel pedig az átlagos teljes (U+P) foltcsoport területeket mutatja a ciklus fázisának függvényében. A napfoltciklus közepén egy markáns visszaesés mutatkozik az átlagos foltterületekben, mely az ún. Gnyevisevmélyedés. Az ábra jól mutatja a foltcsoport területek és a bomlási sebességek között kapott erős lineáris kapcsolatot.



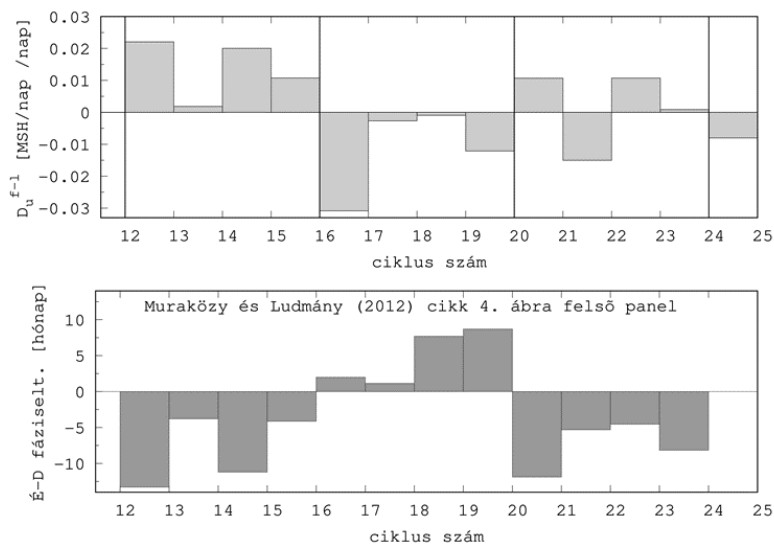
3. ábra: Bal panel: átlagos visszafejlődési ráták a ciklus fázis függvényében. Jobb panel: átlagos teljes foltcsoport területek a ciklus fázis függvényében. Az adatok 10%-os sávokra átlagolt értékek 13 ciklus alapján

A foltcsoportok százalékos bomlási rátája és a naprajzi szélesség között szintén összefüggés mutatható ki. Ezt a kapcsolatot mutatja a 4. ábra, melyen 13 napciklus foltcsoportjainak adatai vannak átlagolva 5 fokos szélességi sávokban, mellettük szürke háromszögekkel az adott szélességi sávban található foltcsoportok száma látható. Az ábra tanúsága szerint a százalékos bomlási ráták a nagyobb naprajzi szélességek felé csökkenek.

A bomlási ráták és a ciklusfázis között kimutatható kapcsolat felveti azt a kérdést, hogy a kimutatott kapcsolat vajon minden ciklus alatt változatlan, vagy hosszabb távon változhat? Ennek ellenőrzésére a bomlási rátákat az egyes ciklusok felszálló, majd leszálló ágára is meghatároztam.

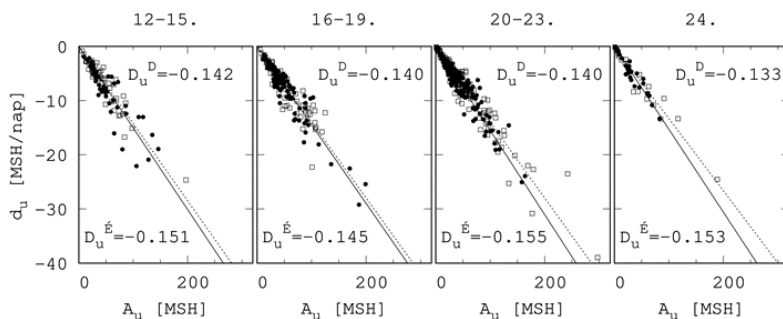


4. ábra: Foltcsoportok teljes területére számított százalékos bomlási ráta szélességfüggése. A bomlási ráták 5 fokos szélességi sávokra vannak átlagolva (fekete pont és vonal). A szürke háromszögekkel jelölt, az adott szélességi sávban található foltcsoportok száma a jobb függőleges tengelyen skálázva



5. ábra: A ciklusok felszálló és leszálló ágán vett bomlási ráták különbsége (felső panel). Az alsó panel a szoláris észak-déli aszimmetria nagyságát ábrázolja az egyes ciklusokra [5]

A könnyebb érthetőség kedvéért az 5. ábra felső panelje ezek különbségét ábrázolja, melyen a 21. ciklustól eltekintve látható, hogy a ciklusok felszálló és leszálló ágaira számolt bomlási ráták négy ciklusonként váltakoznak. Ez a négy ciklusos változás felveti az ún. 2x4-es napfoltciklussal való kapcsolatot [5], melyet az ábra alsó panelje mutat. E szerint az északi és déli félgömb aktivitásai időben eltolódnak egymáshoz képest. Az eltolódás négy 11 éves ciklusonként előjelet vált, azaz míg a 12–15. ciklusok alatt az északi félgömb, addig a 16–19. ciklusok alatt a déli félgömb aktivitása alakul ki korábban, majd a folyamat újraindul. E két ábrából következik a bomlási ráta félgömbi aszimmetriája, mely szerint a foltcsoportok bomlási rátája az északi félgömbön mindig nagyobb (lásd a 6. ábrát). Habár a 21. ciklus látszólag nem követi a fentebb vázolt 2x4-es változást, mégis az északi félgömbre számolt bomlási rátája nagyobb, mint a déli félgömb esetében.



6. ábra: Foltcsoportok visszafejlődési rátái négy ciklusonként az északi (pontokkal és folytonos vonallal) és a déli (üres négyzettel és szaggatott vonallal) félgömbön

Összefoglalás

1. Nagy számú mintán történt vizsgálataim alapján kimutatható, hogy a foltcsoportok bomlási rátája egyenes arányban nő azok maximális területével, azaz a nagyobb területű foltcsoportok gyorsabb ütemben bomlanak, mint a kisebb területűek, ugyanakkor a nagyobb területű foltcsoportokon valamiféle stabilizáló hatás érvényesül a százalékos bomlási rátát figyelembe véve.
2. A foltcsoportok vezető részei az esetek többségében lassabban bomlanak, mint a követő részek, ezért is figyelhető meg sok esetben egy-egy magányos, vezető polaritású folt akkor is, mikor már a foltcsoport követő része teljesen eltűnt.
3. A foltok különböző részeiben a bomlás különböző sebességekkel zajlik. Elsőként a követő részek penumbrai, majd a vezető penumbrák, azt követően a követő umbrák bomlanak el, legtovább pedig a vezető umbrák élnek.
4. A bomlási ráták nem csak a maximális területtől függenek, hanem a napfoltciklus során is változik a nagyságuk. A ciklus maximuma felé haladva egyre nő a bomlási ráta, majd a maximum környékén található, ún. Gnyevisev-mélyedés (a foltok területének a ciklus maximumában megfigyelhető visszaesése) alatt a bomlási ráta is csökken, végül a ciklus maximuma után folyamatosan csökken a ciklus vége felé haladva. Ez a jelenség a bomlási ráták és a foltcsoportok területei között kimutatható egyenes arányosságnak köszönhető.
5. A napfoltciklus mellett a naprajzi szélesség változásával is változik a foltcsoportok közepes bomlási rátája: magasabb naprajzi szélességek felé a bomlási ráta csökken.
6. Hosszú távú változás mutatható ki a felszálló ág és a leszálló ág közepes bomlási rátái között, mely a korábban talált 2x4-es napciklus változását követi. Ennek folyományaként azt kaptam, hogy a bomlási ráták az északi félgömbön mindig nagyobbak, mint a délin. E jelenség oka még ismeretlen.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott eredmények a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) 129137 számú projektjének támogatásával jöhettek létre.

Irodalomjegyzék

- [1] Muraközy J. (2020): Study of the Decay Rates of the Umbral Area of Sunspot Groups Using a High-resolution Database. *The Astrophysical Journal*, 892, 107
- [2] Muraközy J. (2021): On the Decay of Sunspot Groups and Their Internal Parts in Detail. *The Astrophysical Journal* 908, 133
- [3] Baranyi T. (2015): Comparison of Debrecen and Mount Wilson/Kodaikanal sunspot group tilt angles and the Joy's law. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447, 1857
- [4] Baranyi T., Győri L., Ludmány A. (2016): On-line Tools for Solar Data Compiled at the Debrecen Observatory and Their Extensions with the Greenwich Sunspot Data. *Solar Physics*, 291, 3081
- [5] Muraközy J., Ludmány A. (2012): Phase lags of solar hemispheric cycles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 3624

A Solar Orbiter napszonda

**Madár Ákos¹, Opitz Andrea¹, Szalai Sándor^{1,2},
Kecskeméty Károly¹, Dósa Melinda¹, Erdős Géza¹,
Tróznai Gábor^{1,2}**

¹ELKH Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

²SGF Kft., Budapest

A 2020-as éveket joggal nevezhetjük a belső helioszféra kutatása aranykorának. 2018-ban a NASA Parker Solar Probe napszonda és a Merkúrt megcélzó európai-japán BepiColombo űrszonda kezdte meg útját, 2020-ban pedig az Európai Űrügynökség Solar Orbiter nevű nap- és helioszférakutató űrszondáját bocsátották fel. Ebben az évtizedben ezek az űrküldetések várhatóan páratlan eredményekkel fogják gazdagítani a tudományos közösséget.

A Solar Orbiter küldetés története és főbb jellemzői

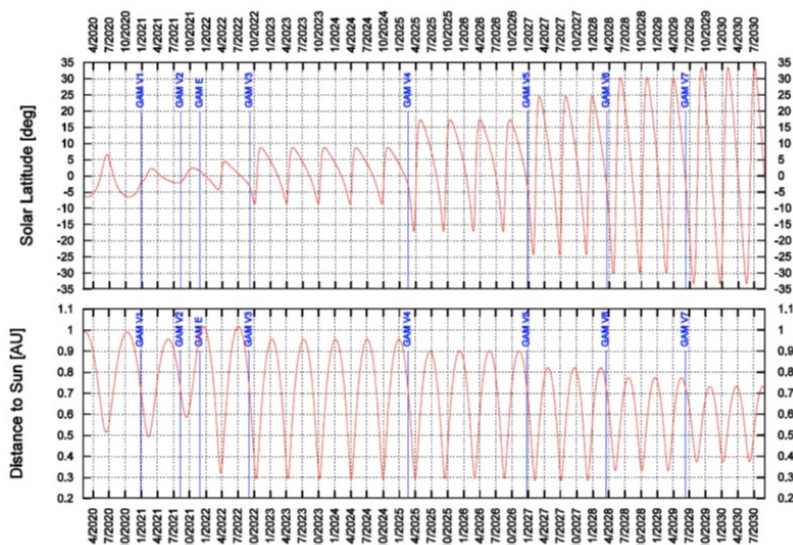
Az Európai Űrügynökség (ESA, European Space Agency) 2011-ben jelölte ki megvalósítandó küldetesként a Solar Orbitert (1. ábra) [1]. A küldetés a Cosmic Vision kampány része, annak közepes költségvetésű (M-kategóriájú) programja. 2012-ben nyerte el az Astrium UK (jogutódja az Airbus Defence and Space) a szonda építésének megbízatását [2]. Az űreszköz startjának eredeti időpontja 2017-ben lett volna, azonban a hosszúra nyúlt tesztfolyamatok miatt csak 2020. február 10-én került sor a felbocsátásra Cape Canaveralból, egy Atlas-V hordozórakétával [3].

A küldetés három szakaszból áll. Az első fázis a felbocsátástól 2021 novemberéig tart. Ez alatt az idő alatt a szonda három gravitációs hintamanővert hajt végre, kettőt a Vénusz, egyet pedig a Föld közelében. Az első Vénusz-megközelítésre 2020 decemberében került sor. Ebben a fázisban zajlik a távérzékelési műszerek kalibrálása. Ezek után a működési fázis következik, egészen 2026 decemberéig. Az űrszonda működési pályája elnyúlt ellipszis, 0,28–0,92 csillagászati egységre (CSE) csillagunktól, így

a 2018-ban indított Parker Solar Probe után a Naphoz a második legkisebb távolságra merészkedő szonda lesz, a pályájának perihéliuma a Merkúr pályáján belül lesz. A Solar Orbiter keringési ideje 168 nap lesz a küldetés ezen fázisában. Fontos adat, hogy a pálya síkja a működési fázis végére 24° -ot zár majd be az ekliptikával, így jobb rálátása lesz a Nap poláris régióira. E fázisban a szonda két gravitációs hintamanővert hajt végre a Vénusznál [1, 4]. A küldetés ezután opcionálisan három évvel meghosszabbítható, ebben az esetben az űreszköz egy Vénusznál elvégzett pályamódosítással már 33° -os inklinációjú trajektóriára állna. A pálya megválasztásakor több szempontot is figyelembe kellett venni: a napközelséget korlátozta a felhasznált napelemtáblák fizikai tűrőképessége, emellett fontos volt, hogy a szonda tudjon kommunikálni a földi irányítással. Ehhez szükséges, hogy a Földtől a pálya egyik pontja se legyen túlságosan messze. A gravitációs hintamanőverek idején pedig elkerülendő volt a Föld és a szonda felső együttállása, azaz hogy a Nap közéjük kerüljön, így akadályozva a kommunikációt [1, 4, 5].



1. ábra: Fantáziarajz a Solar Orbiterről. (Forrás: ESA)



2. ábra: A Solar Orbiter pályájának inklinációja (fent) és Naptól való távolsága (lent) a küldetés során. (Forrás: Marirrodriga et al., 2020)

A Solar Orbiter a napelemtáblák és a kinyúló műszerek nélkül 2,5 m × 3,1 m × 2,7 m kiterjedésű, össztömege pedig 1750 kg (3. ábra). Az energiaellátásról 6 db 2,1 m × 1,2 m-es napelem gondoskodik, melyeket kinyitva a teljes szonda 18 m hosszú. Amikor az űreszköz 1 CSE-re van a földi állomástól, akkor 150 kbps sebességgel történik az adatok letöltése az X frekvenciasávon. Az ESA Argentínában található Malargüe állomásának feladata az űreszközzel való kommunikáció, az itt található 35 m-es antennával [5].

A Solar Orbiter működési pályájának perihéliuma idején nem lesz ritka, hogy akár 17,5 kW/m² sugárzási fluxus érje (ez a földi napállandó mintegy 13-szorosa), ezért egy többrétegű hőpajzzsal látták el. Ez a hőpajzs egy javarészt titánfóliákból és szénszálak kompozitból készült többrétegű szerkezet, s figyelemre méltó, hogy ezt a nagy hőfluxust mindössze maximum 15 W-ra korlátozza a szonda felé [5].



3. ábra: A Solar Orbiter a müncheni IABG tisztaszobájában 2019 őszén. Jól látszanak a távérzékelési műszerek apertúráinak nyílásai a hőpajzson, zárt állapotban. (Forrás: Airbus)

A napszél eredetének nyomában: a Solar Orbiter tudományos céljai

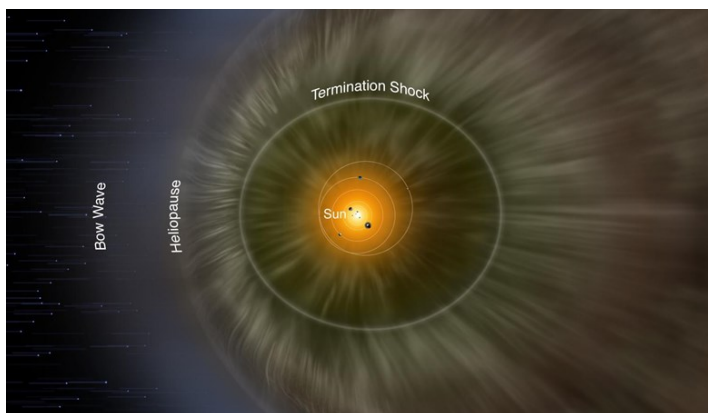
Az 1930-as években a csillagászok kimutatták, hogy a Nap koronájának hőmérséklete az 1 millió kelvint is meghaladja. Ez meglepő eredmény volt, hiszen a várakozások szerint a Nap felszíneként értelmezhető fotoszférától kifelé távolodva csökkennie kellene a hőmérsékletnek, azonban utóbbi „mindössze” kb. 5800 K. Bár a megfigyeléseket elméleti úton nem tudták kielégítően megmagyarázni, egy fontos következménye volt a mérési eredményeknek, amelyre Eugene Parker hívta fel a figyelmet. Gondolatmenete szerint a Nap gravitációja és a csillagközi gáz nyomása nem képes megtartani egy ilyen nagy hőmérsékletű légkört, így abból állandóan anyag távozik, szuperszonikus plazmaáramlás formájában [6, 7]. Ezt az áramlást nevezzük napszélnek, létezését a 1960-as évek elején sikerült igazolni űrszondás mérésekkel.

E mérések szerint kétféle napszelet lehet megkülönböztetni a tranziens jelenségeken kívül. Az egyik az úgynevezett lassú napszél, melynek sebessége 300–500 km/s, plazmasűrűsége nagyobb (1 CSE-nél $\sim 7 \text{ cm}^{-3}$) és a korona melegebb részéből származik (1,5 millió K). A másik típus

a gyors napszél, amely nagyobb plazmasebességgel (~600–800 km/s) és kisebb sűrűséggel, illetve hőmérséklettel jellemezhető. A tranziens jelenségek közé tartoznak az ún. koronaanyag-kidobódások (CME, Coronal Mass Ejection). Ezek során a Nap felszínén a kötött, zárt mágneses erővonalak erővonal-átkötődéssel felszakadnak, aminek nyomán energia szabadul fel és az addig csapdázott plazma egy része kilökődik. Gyakran a kidobott anyag sebessége jóval nagyobb, mint a napszélé (elérheti a 2000–3000 km/s-ot) [7].

A napszél plazmája – mint jól vezető közeg – radiálisan távolodva a csillagtól „magával viszi” a Nap mágneses mezejét, ezt mágneses befagyásnak nevezzük. A Nap azonban a napszélterjedés ideje alatt forog, így kialakítja a helioszférában a jellegzetes spirális mágneses struktúrát.

A gyors és lassú napszél közötti kölcsönhatás során, amikor a gyors utoléri a lassút, a befagyás miatt egyszerű „előzés” nem jöhet szóba, hanem egy bonyolult kölcsönhatás jön létre, amelynek során a gyors napszél lassul, a lassú pedig kissé gyorsul. Ezeket együtt forgó kölcsönhatási tartományoknak (CIR, Corotating Interaction Region) nevezzük [7].



4. ábra: A napszél és a Nap mágneses tere által dominált helioszféra a csillagközi térben. (Forrás: NASA)

A napszél által kitöltött helioszféra addig tart, amíg a csillagközi gáz nyomása nem válik elég nagyvá ahhoz, hogy a napszél nyomásával összemérhető legyen. Ekkor a napszél egy úgynevezett terminációs lökéshullámnál ugrásszerűen lelassul. A lökéshullám létének oka, hogy a szuperszonikus napszél nem tud folytonosan átmenni szubszonikusba (4. ábra) [7].

Habár mindez évtizedek óta ismert az űrszondás mérésekből, továbbra is sok a megválaszolatlan kérdés, ezeknek egy részére keresi a választ a Solar Orbiter. A tudományos célok több nagy csoportra oszthatók. Ilyen az eredeti, lassan 80 éves talány, azaz annak meghatározása, hogy pontosan milyen mechanizmus fűti a Nap légkörét és mi gyorsítja a napszél plazmáját. Abban a kutatók egyetértenek, hogy a fotoszférában jelen lévő konvektív mozgásokban tárolt energia alakul át valamilyen mágneses és/vagy hullámjelenség keretei közt a korona plazmájának belső energiájává. Azonban ezen belül a különböző modellek tesztelésére eddig csak kevésbé álltak rendelkezésre mérési eredmények, így ezekben a Solar Orbiter úttörő lehet szimultán in-situ és távérzékelési műszeres mérésekkel [1, 4].

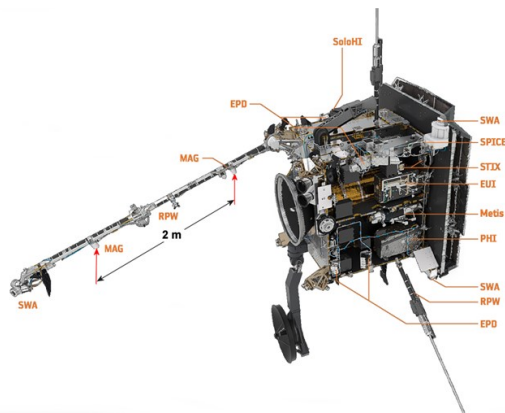
A Nap mágneses mezejének felfedezése óta kérdés, hogyan működik a dinamó, mely létrehozza magát a mágneses teret és amely felelős a 11 éves napciklusért, valamint amely összeköti a csillag belsejét a helioszférával. Természetesen az évtizedek során jelentős fejlődés volt tapasztalható a modellek terén, ám máig sok a nyitott kérdés. Ilyen például annak eldöntése, hogy a globális dinamómechanizmus mellett kisebb, lokális dinamók is működnek-e mágneses mezőt hozva létre, illetve érdekes lehet még felderíteni, hogyan kerül át a mágneses fluxus nagyobb heliografikus szélességekre. A Solar Orbiter az ezekkel kapcsolatos kérdések eldöntésére elsősorban a Nap fotoszférájában lévő plazmaáramlások és mágneses mezők meghatározására alkalmas távérzékelési műszereit veti be [1, 4].

A célok másik nagyobb csoportját alkotja a tranziens jelenségekkel, elsősorban CME-kkel kapcsolatos kérdések megválaszolása. Jelenleg nem teljesen világos, hogy e jelenségek hogyan fejlődnek a koronában és a belső helioszférában, valamint miként járulnak hozzá a mágneses fluxus és a helicitás egyensúlyához. A napszélben jelenlévő turbulencia forrását, idő- és térbeli fejlődését szintén aktívan fogja vizsgálni a szonda, elsősorban az in-situ eszközeivel [1].

A tudományos célok között van a Napból származó nagy energiájú részecskék (SEP, Solar Energetic Particle) keletkezési helyének, gyorsítási mechanizmusainak, illetve az ezeknek a részecskéknek a forrásául szolgáló részecskepopulációinak a meghatározása. Ugyanígy érdekes kérdés, hogy ezen részecskék hogyan szóródnak ki a helioszférába időben és térben [1, 4].

Műszerezettség

A Solar Orbiter fedélzetén összesen tíz tudományos kísérlet kapott helyet, ebből hat távérzékelési, négy pedig in-situ megfigyeléseket végez. A műszerek össztömege 209 kg, a működésükhöz 180 W teljesítmény áll rendelkezésre. A távérzékelő eszközök az űrszonda testében, míg az in-situ műszerek egy része a szonda Nappal ellentétes oldala felé kinyúló 4,4 m hosszú árbócon (boom) kaptak helyet [1, 4]. A műszerek egy része a hőpajzsban számukra speciálisan kialakított nyílásokon át végzi a méréseket. A műszerek elhelyezkedése az 5. ábrán látható.



5. ábra: A tudományos műszerek elhelyezkedése a Solar Orbiter űrszondán. A két MAG detektor egymástól 2 méter távolságra helyezkedik el az árbócon. (Forrás: ESA)

In situ műszerek

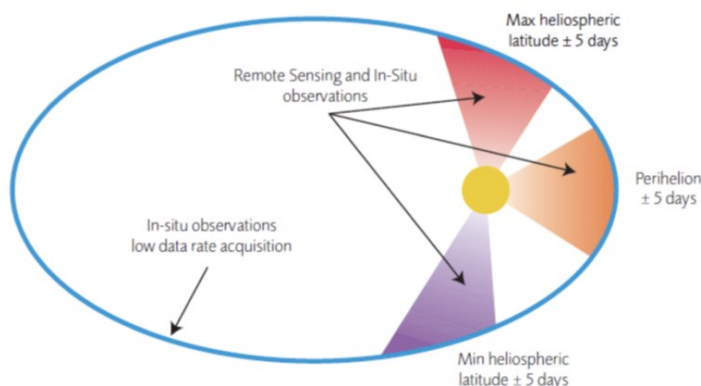
- SWA (Solar Wind Plasma Analyser): egy három részecskedetektorból álló műszeregyüttes, mely a napszelet alkotó elektronok és ionok tulajdonságait (sűrűség, hőmérséklet, sebesség) vizsgálja. Emellett a legfontosabb kémiai elemek gyakoriságát is méri.
- EPD (Energetic Particle Detector): szupratermális és nagy energiájú részecskék összetételét és eloszlásfüggvényeit mérő spektrométer.
- MAG (Magnetometer): a helioszférikus mágneses mező in-situ mérésére alkalmas fluxgate magnetométer.
- RPW (Radio and Plasma Wave): elektrosztatikus és elektromágneses hullámokat érzékelő antennarendszer.

Távérzékelő műszerek:

- PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager): két teleszkópból álló rendszer, amely nagy felbontással képes meghatározni a fotoszféra mágneses mezejét és látóirányú sebességét az egész napkorongon.
- EUI (Extreme Ultraviolet Imager): extrém ultraibolya tartományban (EUV, Extreme Ultraviolet) végez megfigyeléseket.

- STIX (Spectrometer / Telescope for Imaging X-rays): a Napból származó röntgensugárzás ~ 4 keV és 150 keV közötti energiájú tartományát észlelő műszer.
- METIS (Multi Element Telescope for Imaging and Spectroscopy): a Nap koronáját látható, valamint ultraibolya tartományban vizsgáló teleszkóprendszer.
- SoloHI (Solar Orbiter Heliospheric Imager): a napszél elektronjain szóródó napfény észleléséből határozza meg a napszél áramlását.
- SPICE (Spectral Imaging of the Coronal Environment): EUV tartományban működő spektrográf.

Az egyes tudományos kérdések megválaszolása sokszor a távérzékelési és in-situ műszerek eredményeinek kombinált felhasználását igényli. A két megfigyelési típus stratégiája között alapvető különbség, hogy míg az in-situ mérések a teljes keringés során üzemelnek, addig a távérzékelési műszerek számára három mérési ablak van fenntartva ugyanezen idő alatt. Ezen ablakok a perihélium, valamint a minimális és a maximális heliografikus szélességek időpontja körüli ± 5 napot jelentik (6. ábra). Emellett a műszerek a fedélzeten kommunikálhatnak egymással és a detektorok bizonyos mérési eredmények hatására más műszereket automatikusan beindíthatnak (triggerelhetnek). Erre példa a STIX teleszkóp, mely bizonyos feltételeknek eleget tevő fler megjelenése esetén a többi távérzékelési eszközt, valamint az RPW és EPD in-situ műszereket riasztja. Így előbbiek a fler részleteit, míg utóbbiak az esemény során esetlegesen gyorsított részecskéket vagy az általuk kibocsátott sugárzást érzékelhetik nagy időfelbontásban [1, 4].



6. ábra: A távérzékelő műszerek mérési ablakai a pálya során. (Forrás: Marirrodriga et al., 2020)

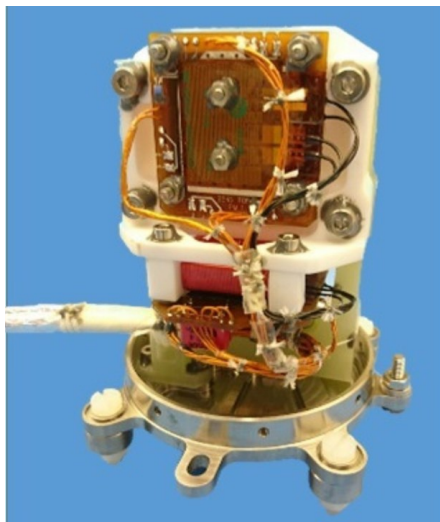
A MAG magnetométer

Az Imperial College vezetésével 12 ország kutatóintézei és egyetemei részvételével készült a Solar Orbiter magnetométere. Magyarországról a Wigner Fizikai Kutatóközpont és az SGF Kft. vett részt a műszer megvalósításában. Az SGF Kft. a földi ellenőrző berendezést készítette (EGSE, Electrical Ground Support Equipment), amely az űrszonda elektromos kapcsolódó felületeit szimulálta a magnetométer tesztelése során. Az EGSE tartalmazza a szonda fedélzeti adatgyűjtő és vezérlő buszrendszerét szimuláló egységet, valamint egy gyári, sok kimenő feszültségű laboratóriumi tápegység vezérlő és megjelenítő részét.

A Solar Orbiter három tengelyre stabilizált szonda, amelynek a hőpajza a Nap felé néz, míg az ellenkező irányban, az árnyékban található egy műszeres árbóc. Ezen az árbócon helyezkedik el egymástól 2 m-es távolságban a magnetométer kísérlet két dual fluxgate érzékelője. A feldolgozóegység (ELB, Electronics Box) pedig az űrszonda belsejében található. A két fluxgate érzékelő jelét egymástól független áramkörök dolgozzák fel (szenzorok vezérlő jele, automatikus méréshatárváltás és az analóg jelek digitalizálása). A fluxgate érzékelő kiváló stabilitású: nem változik a mérés pontossága sem az öregedés során, sem a

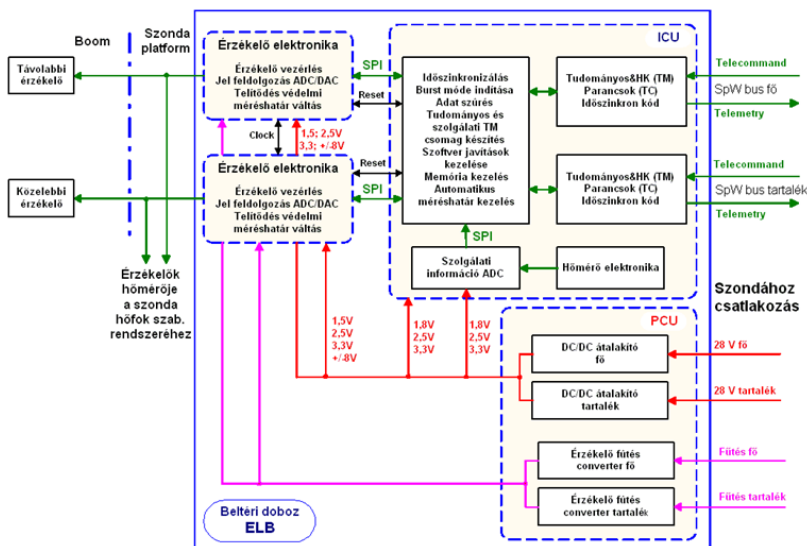
hőmérséklet-változás hatására. A Cassini és a Double Star űrprogramokban ilyen érzékelők bizonyították a stabil pontosságot. A kettős magnetométeres technika lehetővé teszi az űrszonda által keltett háttérmezők levonását a mérésekből, így megismerhetjük a valódi helioszférikus mágneses mezőt [8].

A fluxgate magnetométer két, kis mágneses térerősség mellett már mágnesesen telítődő gyűrűmág tekercset tartalmaz, amelyek egy merev kerámiatestre, egymásra merőlegesen vannak szerelve. Mindegyik ferritgyűrűn gerjesztő, érzékelő és visszacsatoló tekercs van. A kültéri egységben az érzékelők mellett még két kis nyomtatott áramkör van. Az egyikben hangoló kapacitás és tartalékolt hőmérsékletmérő van, a másik pedig a beltéri egységgel tarja a kapcsolatot. Az érzékelő belső felépítése



7. ábra: A dual fluxgate magnetométer belső képe.
(Forrás: Imperial College)

a fényképen látható (7. ábra). A kettős érzékelő konfiguráció redundanciát is biztosít. Az egyes érzékelőkben három redundáns termisztor van és azok feszültségei kondicionálás után az ICU (Instrument Controller Unit) egységbe jutnak, onnan a szonda szolgálati (HK, Housekeeping) csatornáján át kerülnek kiolvasásra, mind a működési szakaszban, mind a magnetométer kikapcsolt állapotában. A fluxgate érzékelő egység működési hőmérsékleti tartománya $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti. Az egységek $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletig nem igényelnek fűtést, saját elektronikájuk hődisszipációja elegendő. Egy darab fluxgate érzékelő fogyasztása $0,36\text{ W}$ és tömege 500 g . A 8. ábrán a magnetométer funkcionális blokkvázlata látható.



8. ábra: A Solar Orbiter magnetométer funkcionális blokk-vázlata. (Forrás: Imperial College)

A beltéri doboz (ELB) három funkcionális egységet tartalmaz:

1. A fluxgate magnetométernél a gyűrűmag két „félgyűrűnek” tekinthető, amelyek ellentétes irányban működnek, mint két rúd. Külső mágneses mező hiányában a gyűrű egyik felében a gerjesztő áram által kiváltott mező kioltja a másikat. Ha azonban van egy külső mező, akkor a két félgyűrű különböző időpontokban telítődik, ami változó mágneses teret eredményez, és kétszeres frekvenciájú feszültséget hoz létre az érzékelő tekercsben. A feszültség és a fázis nagysága a gerjesztés frekvenciájához kalibrálható és így a külső mágneses tér értékét adja. A két érzékelő egymástól független front-end elektronikai egysége (FEE, Front End Electronics) biztosítja az érzékelők gerjesztő tekercseinek működtető frekvenciáját (15,35 kHz). Ennek a jelnek a kétszeres frekvenciájú jelét negatív visszacsatolásra használva pontosabb mérést kapunk a DC-től 500 Hz-ig terjedő tartományban. A kétszeres frekvenciájú jelből jelprocesszállással (ADC/DAC, Analog Digital

Converter / Digital Analog Converter) képződik a szabályzó jel az érzékelő felé. A mért mágnes tér analóg jelét digitalizálva adja át az ICU egységnek. Itt képződik az autonóm méréshatárváltás az érzékelő telítődésének megakadályozására.

2. A műszer vezérlő egysége (ICU) tartalmazza a processzort (CPU, Central Processing Unit), a két érzékelő vezérlését és az űrszondával a kapcsolatot kezelő áramköröket. A processzor Leon 3FT-RTAX PC1 architektúrájú, amely FPGA-ban van megvalósítva, az Imperial College követelménye alapján lett konfigurálva. A hibatoleráns processzoron kívül tartalmaz két dedikált illesztőt az FEE egységhez, két SpaceWire-t a szolgálati adatgyűjtő rendszerhez, valamint egy szinkron soros (SPI, Serial Peripheral Interface) illesztőt. A SpaceWire illesztő a CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) szabvány a műholdak és űrszondák fedélzeti adatforgalmi rendszer (vagy más néven busz) előírásai szerint fogadja a telemetria adatokat (TM, Telemetry), valamint a szabvány szerinti időkezelőt és a memóriavezérlőt. Az ICU négy darab 32 k x 8 b csak olvasható memóriával (PROM) rendelkezik, amelyek tartalmazzák az indítószoftvert, továbbá 256 k x 32 b méretű, elektronikusan törölhető programozható (EEPROM) memóriát, amely az alkalmazásszoftver három példányát tárolja, és egy 1 M x 39 b statikus véletlen hozzáférési memória (SRAM) egységet, átmeneti mérésiadat-tárolót. A tudományos műveletek során az SRAM nagy részét burst-mode pufferek átmeneti tárolására használják. A MAG műszer érzékenységét négy lépésben lehet változtatni (± 4 , ± 16 , ± 64 , ± 1800 pT), ennek megfelelően a méréshatár is változik (± 128 , ± 512 , ± 2048 , ± 58000 nT).
3. Az áramátalakító egység (PCU, Power Control Unit) felelős a másodlagos feszültségek biztosításáért az érzékelők elektronikája, ICU-ja és azok fűtőberendezései számára. A fedélzeti 28 V-ból állítja elő az elektronika számára szükséges egyenfeszültségeket (± 8 ; 3,3; 2,5; 1,8 és 1,5 V).

A MAG működése nagyrészt önálló, csak minimális parancsot igényel a tudományos működési módok és a megfelelő telemetria bitsebességek kiválasztásához. Az EEPROM memória lehetővé teszi szoftverjavítások felküldését, valamint paraméterértékek módosítását (például a távolabbi érzékelő fűtése bekapcsolásának értékét). A MAG műszer még a burst üzemmódban is méri és tárolja a normál üzemmódú mérési adatokat, amit kétféle adatstruktúrájú telemetria csomag támogat. A szonda letöltési kapacitásának függvényében az adatok akár több hónapig is a fedélzeten maradhatnak. A magnetométer adatait valós időben használják az SWA és RPW műszerek a működésükhöz. Ezek az adatcsomagok a SpaceWire-en át jutnak a műszerekhez.

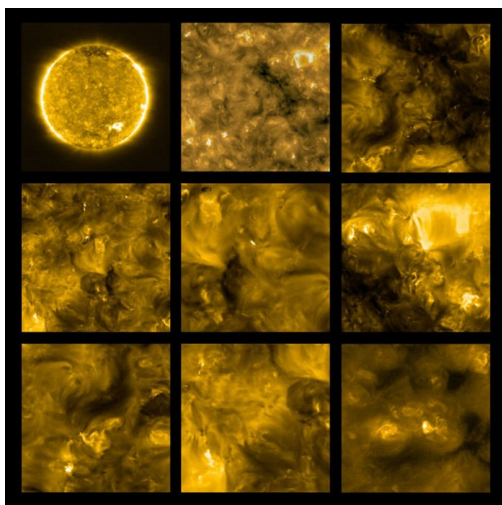
A MAG műszer fogyasztása 7,2 W, míg kikapcsolt állapotban az érzékelők fűtésére 5,3 W szükséges. A MAG teljes tömege összekötő kábeleivel együtt 3,53 kg. A 9. ábrán a magnetométer három egységének fényképe látható.



9. ábra: A Solar Orbiter magnetométer egységeinek fényképe. (Forrás: Imperial College)

Az első eredmények

Az űrszonda első perihéliumát 2020 júniusában érte el, 77 millió km-re, tehát több mint 0,5 CSE-re volt ekkor a Naptól. Az ESA egy hónappal később, július 16-án hozta nyilvánosságra a Solar Orbiter által az időközben a Földre leküldött első felvételeket. Bár ekkor még csak a beüzemelési fázisban voltak a tudományos mérőműszerek, így is több, rendkívül biztató és újszerű eredmény született.



10. ábra: Az első perihélium alatt az EUV műszer által 174 Å hullámhosszon készített felvétel a Nap felszínéről és az említett „tábortüzekről”. (Forrás: ESA)

Az EUV műszer 174 Å (EUV) hullámhosszon történt mérése már elsőre érdekességgel szolgált, mégpedig apró fényes foltok formájában, melyeket a kutatók tábortüzeknek (campfires) neveztek el (10. ábra).

Ezek feltételezhetően nanoflerek, melyek lehetséges létezését az elméleti szakemberek már megjósolták. Ezt az elképzelést megerősíti a SPICE műszer adatainak elemzése is, amiből kiderült, hogy ezeken a területeken jelentős plazmasebességek voltak jellemzők a mérési időpontban. Könnyen előfordulhat, hogy a flereknek e kis skálás típusa komoly szerepet játszik a korona fűtésében. A felfedezés-

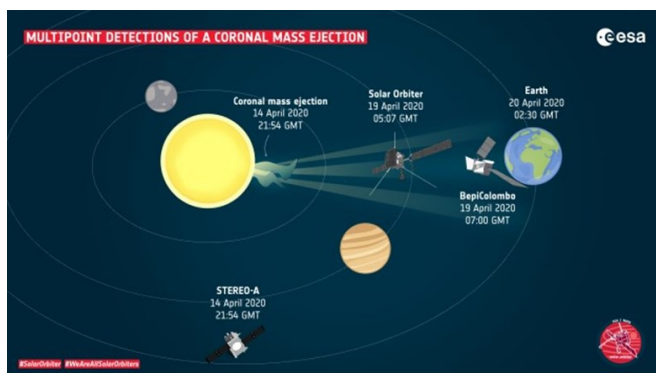
ben a kulcsszerepet az játssza, hogy a Solar Orbiter a földi teleszkópok számára a légkör miatt elérhetetlen (EUV és röntgen) hullámhosszakon végzi méréseit soha nem látott felbontással, így ezekkel a teleszkópokkal joggal várhatóak még érdekes eredmények [9].

Az űrszonda rendkívüli teljesítőképességét támasztja alá az is, hogy teleszkópjaival minden korábbinál pontosabban sikerült az általa in-situ mért napszél forrását visszavezetni a Nap légköréig. Egy esetben például egy koronalyuk szélét határozták meg forrásként, ehhez az EUI műszer mérési eredményét (EUV-ben a koronalyukak sötét foltként jelennek meg) és egy a Nap légkörét leíró fizikai modellt használták [10].

További figyelemre méltó eredmény egy 2020. áprilisi CME detektálása. Ez a több űrszondával végzett koordinált mérések egy szép példája. A mérés idején a Solar Orbiter a Föld és a Nap között tartózkodott, a CME-t a BepiColombo űrszonda is érzékelte [11], azonban a Föld–Nap rendszer L_1 pontjában elhelyezkedő SOHO távérzékelő műszerei alig jeleztek valamit (11. ábra). Ezzel az említett CME az úgynevezett stealth, azaz lopakodó CME kategóriába esik, azaz csekély megfigyelhető napfelszíni aktivitás előzte meg. Ez rendkívül ritka és vizsgálata jobb betekintést nyújthat az úridőjárás folyamataiba [10].

A tervezett mérési célokon kívül sor került egy véletlen felfedezésre is. Az ESA szakemberei közvetlenül a felbocsátást követően jöttek rá, hogy a szonda pályája keresztezni fogja az ATLAS üstökös csóváját. Az üstökös azonban darabjaira esett, mielőtt az űreszköz odaért volna, így volt rá esély, hogy használható adatok nélküli legyen a különleges randevű. Végül szerencsére nem így lett, a mágneses adatokban látszott a csóva, azonban egy egyszeri csóvaát-haladás helyett epizodikus váltakozást lehetett nyomon követni [10].

A Wigner Fizikai Kutatóközpont Űrfizikai Kutatócsoportja aktívan részt vesz a Solar Orbiter mérési eredményeivel kapcsolatos kutatásokban. Jelenleg a szonda in-situ műszereinek adatait felhasználva tanulmányozzuk a napszélben előforduló struktúrákat, illetve turbulenciát.



11. ábra: A 2020. áprilisi CME koordinált detektálása.
(Forrás: ESA)

Előzőleg a STEREO napszondapárossal vizsgáltuk a napszél forrásának időbeli változékonyságát [12], mely eredményeinket nemsokára összevethetjük a Solar Orbiter azon napszélméréseivel, amelyek a pálya azon szakaszán készülnek majd, ahol a szonda megközelítőleg együtt halad a Nap forgásával, így a napszélforrást hosszabb ideig követhetjük. A Solar Orbiter felbocsátása előtt a magnetométer és az adatfeldolgozó szoftver teszteléséhez elméleti úton mesterséges mágneses tér adatsorokat hoztunk létre. Ezen szintetikus adatsorokat a valós mérésekkel összehasonlítva az elméleti feltevések helyességére lehet majd következtetni. A következő években számtalan lehetőség lesz koordinált méréseket végezni a belső helioszférában, hiszen a Solar Orbiter mellett itt működik még a BepiColombo, a Parker Solar Probe és a STEREO-A szonda is. Ezen lehetőségek kiválasztásában nyújt segítséget az általunk kifejlesztett Soltra nevű program, mellyel a több űrszondás megfigyelések lehetséges időablakai egyszerűen meghatározhatók.

Irodalomjegyzék

- [1] European Space Agency, "Solar Orbiter: Exploring the Sun-heliosphere connection", Solar Orbiter definition study report (Red Book), ESA/SRE(2011)14, 2011
- [2] ESA contracts Astrium UK to build Solar Orbiter, ESA Space Science Portal, 2012 (<https://sci.esa.int/web/solar-orbiter/-/50295-esa-contracts-astrium-uk-to-build-solar-orbiter>)
- [3] Solar Orbiter launch replay, ESA Multimedia, 2020/02/10 (http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/02/Solar_Orbiter_launch_replay)
- [4] Müller D. et al. (2020): The Solar Orbiter mission: Science Overview, *Astronomy & Astrophysics*, 642, A1
- [5] Marirrodriga C.G. et al. (2021): Solar Orbiter: Mission and spacecraft design, *Astronomy & Astrophysics*, 646, A121
- [6] Parker E.N. (1958): Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields, *The Astrophysical Journal*, 128, 664
- [7] Erdős G. (2010): Mágneses tér mérések a helioszférában. MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest
- [8] Horbury T.S. et al. (2020): The Solar Orbiter magnetometer, *Astronomy & Astrophysics*, 642, A9
- [9] Solar Orbiter's first images reveal 'campfires' on the Sun, ESA, 2020/06/16 (<https://sci.esa.int/web/solar-orbiter/-/solar-orbiter-s-first-images-reveal-campfires-on-the-sun>).
- [10] Solar Orbiter: Turning pictures into physics, ESA, 2020/12/10 (<https://sci.esa.int/web/solar-orbiter/-/solar-orbiter-turning-pictures-into-physics>)
- [11] Davies E.E. et al. (2021): In-Situ Multi-Spacecraft and Remote Imaging Observations of the First CME Detected by Solar Orbiter and BepiColombo, arXiv:2012.07456
- [12] Opitz A. et al. (2009): Temporal evolution of the solar wind bulk velocity at solar minimum by correlating the STEREO A and B PLASTIC measurements, *Solar Physics*, 256, 365

Űrfotometria – a kialakulástól a kiteljesedésig

Szabados László

ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont,
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

Bevezetés

A Föld légkörén kívül működő űrtávcsövekkel végzett csillagászati megfigyeléseknek számos előnye van a földfelszíni távcsövek nyújtotta lehetőségekkel összehasonlítva. Mivel a kozmoszból érkező elektromágneses sugárzás jelentős része – a hullámhosszától függően – elnyelődik bolygónk atmoszférájában, az égitestek által kibocsátott, illetve a kozmoszban lezajló jelenségek során felszabaduló röntgen- és gamma-sugárzás kizárólag űrszondák fedélzeti műszereivel észlelhető (ha eltekintünk más, atmoszféra nélküli égitestek, például a Hold felszínére telepített csillagászati műszerektől), de még az ibolyántúli sugárzás rövidebb hullámhosszú tartományát is elnyeli a Föld légköre. A röntgen- és gamma-csillagászat műveléséhez szükséges megfigyelési adatok gyűjtése emiatt kizárólag a Földön kívül működő, ezért igen költséges berendezésekkel lehetséges.

Az űrcsillagászatnak ugyanakkor van olyan szegmense is, amelyik az égitestek optikai hullámhossztartományba eső sugárzását vizsgálja űrtávcsövekre szerelt detektorokkal. Látszólag luxus a földfelszínről is végrehajtható kutatási programokat űrtávcsövekkel végezni, valójában azonban a légkör kedvezőtlen hatásaitól megszabadulva az optikai csillagászat számára is páratlan lehetőségek nyílnak. Ha csupán az égitestek fényességének mérésével foglalkozó fotometriát tekintjük, akkor a légkörön kívülről történő méréseknek a következő előnyei vannak a földfelszíni mérésekkel szemben:

- Folyamatos adatsor kapható, akár több hónapon át is, megszakítás nélkül, hiszen az űrben nincs nappal, azt a napfény szóródása okozza a légkör molekuláin, és a felhős égbolt miatt sem kell aggódni.
- Légkör hiányában a kozmikus forrásból érkező, állandó erősségű jel intenzitása nem ingadozik. Míg földi távcsőre szerelt fotométerrel történő észleléskor a légköri szcintilláció miatt legfeljebb ezred (kivételes esetben tízezred) magnitúdós pontosság érhető el, a légkörön túlról végzett fotometriai mérések akár néhány milliomod magnitúdó – azaz millimagnitúdó helyett mikromagnitúdó – pontosságúak is lehetnek.
- Az elérhető határfényesség is javul a légkör nélküli esetben, hiszen a légkör valamennyi hullámhosszon elnyel a sugárzásból, legfeljebb nem teljesen, miként az optikai tartományban.

Az elektromágneses színek optikai hullámhosszait vizsgáló űrtávcsövek közül a legismertebb a NASA és az ESA által közösen létrehozott és működtetett Hubble-űrtávcső, ám annak eredményességében és népszerűségében annak is döntő szerepe van, hogy detektorai az optikai sugárzás mellett a közeli infravörös és ultraibolya fotonok észlelésére is képesek 110–25 000 nm közötti hullámhossztartományban. Ebből a 24 000 nm széles tartományból a látható fényt képviselő fotonokra csupán a 400–700 nm közötti keskeny sáv jut. A Hubble-űrtávcső ismertségét az is lényegesen fokozza, hogy képalkotásra alkalmas műszerek is vannak rajta, és az űrből készített képek sokkal élesebbek, mint amilyenek létrehozására a nyugtalan földi légkörön áthatoló optikai fényt leképező földi távcsövek képesek.

A továbbiakban csakis a pontforrások – főként csillagok – fotometriájára szorítkozunk, és az optikai színek tartományon kívül eső űrfotometriára sem terjesztjük ki az áttekintést. Az optikai fotometria mint megfigyelési módszer a kozmosz kutatásában azért fontos, mert nem igényel bonyolult műszereket, sem nagy átmérőjű távcsöveket, így szerény költségfordítással is eredményesen mű-

velhető területe a csillagászatnak. Ez az állítás még az űrfotometriára is igaz, hiszen a fotometriai célú űrtávcsövek jellemzően kis átmérőjűek, idelent rengeteg amatőr csillagász azoknál nagyobb teleszkópokkal fürkészi az eget. A fotometriának nem az az elsődleges feladata, hogy a kozmikus objektumok látványát közvetítve gyönyörködtesse az észlelőt, hanem az, hogy a vizsgált objektum fényességét minél pontosabban meg lehessen határozni. Maga a fényesség, illetve annak időbeli változása ugyanis rengeteg információval szolgál a vizsgált objektum fizikai természetéről, a rajta vagy benne zajló folyamatokról. A fotometria ezért a változó fényű égitestek kutatásának alapvető vizsgálati módszere, amelyet a jelentős csillagászati obszervatóriumok mindegyikében művelnek. A változócsillagok pedig az asztrofizika legfontosabb tesztobjektumai, mivel a csillagok belső szerkezetére és a csillagfejlődésre vonatkozó elméleti számításokat – a csillagmodelleket – különböző korú és fizikai tulajdonságú változócsillagok időbeli viselkedését tanulmányozva lehet ellenőrizni. Ennek sikere érdekében pedig minél hosszabb időszakot átfogó és lehetőleg nagyon pontos fénygörbére van szükség a vizsgálat alá vont változócsillagokról.

Az űrfotometria kezdetei

Mivel az elektromágneses színek optikai tartományát jól lehet vizsgálni a Földről is, a fotometriára alkalmas űrtávcsövek iránti igény viszonylag új keletű. A csillagászok akkor kezdték hangoztatni az ilyen berendezések szükségességét, amikor már minden más hullámhosszú sugárzást tudtak vizsgálni űreszközök fedélzetéről.

Optikai detektorok azonban már az űrszondák legelső generációjának műszerei között is voltak. Akkoriban azokat arra használták, hogy a kis távcsövet valamelyik fényes csillag felé fordítva annak követésével végezzék az űreszköz irányzását és stabilan tartsák a beállított irányt. Ne feledjük, hogy a Föld körül keringő műhold hatalmas sebességgel mozog a térben. Az iránytartáshoz az optikai fotometriát hívták segítségül. A vezetőtávcsőben az olykor egészen halvány célponthoz közeli látóirányban levő fénye-

sebb csillagot használva irányzékul, a fedélzeti számítógéppel gondoskodtak arról, hogy a távcsövet a vezetőcsillagon tartsák, ha a teleszkóp esetleg kizökkent a megfelelő irányból. Tulajdonképpen fotometriai idősort észleltek, de az optikai detektor tervezésekor még nem gondoltak arra, hogy a megfigyelési adatok akár tudományos célokra is használhatók legyenek. Emiatt a detektor nem volt stabil, érzékenysége időben változott, és a kalibrálásával sem törődtek, csak arra törekedtek, hogy a fényes csillagtól származó jel mérhető legyen. Ha viszont vezetőcsillagként változócsillagot választottak, akkor a hosszú ideig vagy több alkalommal végzett megfigyelésből kirajzolódott a változócsillag fénygörbéje.

Az 1978 és 1996 között működött IUE (*International Ultraviolet Explorer*) mesterséges hold műszereivel égitestek spektrumát vették fel az ibolyántúli színek tartományban. A hosszú – sokszor órákig tartó – expozíció miatt ennél a műholdnál is alapvető követelmény volt, hogy a Föld körül geoszinkron pályán mozgó űreszközön levő teleszkóp mindvégig stabilan a vizsgált égitest felé forduljon. Így első alkalommal az IUE helyzetérzékelőjével kapott adatokból sikerült egy napnál hosszabb időszakon át folyamatos fénygörbét kapni egy változócsillagról. Egyebek között ez is hozzájárult a változócsillagokkal foglalkozó kutatók űrfotometria iránti érdeklődésének felkeltéséhez.

Elsőként francia asztrofizikusok kezdeményezték a Földön kívül működő, kifejezetten fotometriai méréseket végző műszer megépítését. Az 1982-es első javaslatuk után az EVRIS nevű műszer végül az orosz Marsz '96 fedélzetére került, de ez a Mars-szonda 1996-os indítása után még a Föld légkörében megsemmisült.

Napjaink legismertebb keringő csillagászati obszervatóriumát, a Hubble-űrtávcsövet már eleve úgy tervezték, hogy a három helyzetérzékelőjének (*Fine Guidance Sensor*, FGS) látómezőjébe kerülő csillagokról gyűjtött fotometriai adatokat tudományos célra is lehessen használni. Az 1990 óta működő Hubble-űrtávcső archívumában ezért elképesztő mennyiségű fotometriai idősor vár feldolgozásra.

Az Európai Űrügynökség (ESA) 1989–1993 között működött asztrometriai célú műholdja, a Hipparcos minden pozíciómérés alkalmával rögzítette a vizsgált csillag fényességének értékét is. A mérési programján szereplő 118 000 csillag nagyjából 10%-a változó fényességűnek bizonyult. Ezen a nagy arányon csak azok nem lepődnek meg, akik kevésbé járatosak a változócsillagok szinte kimeríthetetlenül gazdag világában. Ez a nagy előfordulási gyakoriság újabb érv volt a fotometriai űrtávcsövek szükségességét hangoztatók számára.

Az ezredfordulót megelőzően már kifejezetten fotometriai célú űrtávcsövek előkészítésével is foglalkoztak a csillagászok és a műszaki szakemberek. Ugyanakkor az űrfotometria szükségességének hivatalos elfogadtatása különösen nehéznek bizonyult, mivel az égitestek fényességét a látható fény tartományában a földfelszínről is egyszerűen meg lehet mérni. Az űrfotometria viszonylag alacsony költsége miatt fotometriai célú űrprojekt kidolgozását egy-egy ország önállóan is megengedheti magának. A már említett francia példa mellett a dánok is tervezték fotometriai űrtávcső üzembe helyezését. A dán asztrofizika egyik erőssége az elméleti és obszervációs asztroszeizmológia, vagyis a csillagrezgések vizsgálata. A rövid periódusú és kis amplitúdójú pulzációs módusok kimutatásához és az elméleti modellekkel történő összevetésükhöz nélkülözhetetlen a hosszú időszakot lefedő, folyamatos és pontos fénygörbe. Az északi ország csillagászaiban azonban mégsem tudták elérni, hogy asztroszeizmológiai kutatásaikhoz fotometriai űrtávcsövet működtethessenek az általuk javasolt MONS (*Measuring Oscillation in Nearby Stars*) projekt keretében. Ennél is nagyobb csalódást okozott a változócsillagokkal foglalkozó kutatók számára, hogy még az ESA első űrfotometriai projektje, az Eddington is elbukott, az űrtávcső ígéretesen induló terve végül nem kapott támogatást.

A kudarcok közepette azonban kedvező körülmény is körvonalazódott: a Naphoz hasonló 51 Pegasi csillag körül keringő, első exobolygó kimutatása után (1995) egyre többen váltottak kutatási témát, és más csillagokhoz tartozó bolygók keresésébe kezdtek. Igaz, hogy az első években fő-

ként a csillag látóirányú sebességének periodikus ingadozásából következtettek arra, hogy bolygó kering a csillag körül, de a spektroszkópiai úton kimutatott bolygókön kívül egyre több olyan eset is előfordult, hogy valamely csillag fényességének periodikus elhalványodásából gyanították, hogy a fénycsökkenést egy bolygó rendszeres átvonulása okozza a csillag korongja előtt. Az ilyen, fedési exobolygók kimutatásához viszont igazán pontos fényességmérésre és lehetőleg hosszú mérési idősorra van szükség. A Nap-típusú csillagok körül eleinte felfedezett exobolygók mind gázóriások voltak, márpedig a közvélemény – közte a döntéshozók is – inkább a Föld-típusú, lakható bolygók iránt érdeklődik. Az ilyen bolygók azonban olyan kis méretűek a csillagukhoz viszonyítva, hogy amikor átvonulnak a csillag korongja előtt, alig gyengítik a távcsőbe érkező fényt, emiatt a bolygó áthaladását a csillag előtt földfelszíni fotometriával lehetetlen kimutatni. Lám, akadt végre egy szempont, amely felértékeli az űrfotometriát! Ennek hatására az űrfotometria érdekében lobbizók a Földhöz hasonló bolygók keresésének lehetőségével kezdtek érvelni. Ez pedig meggyőzőbbnek bizonyult, mint a csillagrezgések kutatásának területén várható fejlődés ígérete.

Miközben idelent, a földön folyt a küzdelem, hogy legyen végre kifejezetten fotometriai célú űrtávcső is, az infravörös tartományban végzendő észlelésekre kifejlesztett WIRE (*Wide-field InfraRed Explorer*) felbocsátás utáni műszaki hibája az űrfotometria érdekében lobbizók „malmára hajtotta a vizet”. Az történt ugyanis, hogy az eredeti programja szerint csillagontó galaxisokat infravörös hullámhosszakon vizsgáló amerikai műhold hűtőanyagául szolgáló cseppfolyós hidrogén az 1999. márciusi felbocsátás után egy tömitési hiba folytán napok alatt elillant, megghiúsítva az infravörösben végzendő teljes észlelési programot (hűtés nélkül ugyanis a távcsőnek és tartozékainak – beleértve a detektorokat is – hőmérsékleti sugárzása elnyomja a kozmikus forrásokból érkező gyenge jelet). A WIRE műszerei azonban tökéletesen működtek, ezért kár lett volna veszni hagyni a drága műszert. Ez volt Derek Buzasi – már a neve alapján is nyilvánvaló, hogy apai ágon magyar származású

– amerikai csillagász véleménye is, akinek sikerült elérnie, hogy az űrtávcső 5,2 cm átmérőjű csillagkövető távcsövére szerelt CCD-kamerával fényes csillagok fotometriai követésébe kezdjenek. Ezzel nemcsak sikerült tudományos célú alkalmazással megmenteni az űrtávcsövet, de a WIRE-fotometriát az is különlegessé teszi, hogy földi távcsövekkel nemigen szoktak ilyen fényes (1-2 magnitúdó látszó fényességű) csillagokat észlelni. Ennek oka az, hogy a földfelszínen differenciális fotometriára van szükség a légkör állapotának folytonos változásai miatt, és a legfényesebb csillagokhoz közeli látóirányban nincs alkalmas, hasonlóan fényes összehasonlító csillag. Nagyobb szögtávolság esetén pedig az ugyancsak változó légköri extinkcióra is korrigálni kellene az észlelt magnitúdókülönbséget. A WIRE úttörő méréseiből így számos új változócsillagot találtak az amúgy jól ismertnek gondolt és spektroszkópiai úton már valóban alaposan vizsgált fényes csillagok között. A WIRE mérései alapján fedezték fel többek között, hogy a nyári égbolt egyik legfényesebb csillaga, az Altair fényessége sem állandó, hanem egyszerre több módusban pulzáló, egészen kis amplitúdójú, δ Scuti típusú változócsillag.

Az egyre nagyobb számú érv és bizonyíték hatására végre a különféle űrügynökségek illetékesei is beadták a derekukat, és támogatni kezdték a kifejezetten fotometriai célú űrtávcsövek készítését, indítását és működtetését. Elsőként a kanadai MOST került pályára, és ez az aktatáska méretű űrtávcső 2004-től egy évtizeden át szolgáltatott a korábban elérhetőeknél jóval pontosabb és folyamatos adatsort.

A franciák CoRoT űrtávcsöve lett a második a sorban, 2006 végi indítással, de ennek a projektnek a megvalósításához az is kellett, hogy az ESA beszálljon a támogatók közé, amit meg is lépett az Európai Űrügynökség, amikor a saját tervezésű fotometriai űrprojektje, az Eddington törlésére kényszerült. Az űrfotometriai műszerek koronázatlan királya, a Kepler 2009-től kezdve forradalmasította az exobolygók keresését-kimutatását. Korábban is pályára kerülhetett volna, de a projekt vezetőinek több mint egy évtize-

den át kellett küzdeniük, mire sikerült jóváhagyniuk az addig példa nélküli pontosságú fényességmérést végző eszköz megvalósítási tervét. Több mint 2600 exobolygót találtak a Kepler-űrtávcső fényességméréseit elemezve, és már 3000-nél tart a Kepler mérései alapján kapott eredményeket közlő tudományos publikációk száma. A Keplert csak a 2018 óta működő TESS taszíthatja le a képzeletbeli trónról, az eddigi eredményei fel is jogosíthatják erre.

Optikai fotometriai észleléseket végző űrtávcsövek a felbocsátás időrendjében

Az alábbiakban azok az űrtávcsövek szerepelnek, amelyekkel végzett észlelések alapján fontos fotometriai eredmények születtek. A listában szereplő űrtávcsövek közül a MOST, a CoRoT, a Kepler/K2, a TESS és a Cheops kizárólag fotometriai méréseket végzett, az összes többinél a fedélzeti fotométernek kiegészítő szerep jutott. Néhány űrtávcső így is kimaradt: azok, amelyekkel végeztek ugyan optikai fotometriai megfigyeléseket, de az azok alapján publikált eredmények inkább kuriózumnak számítanak. Közülük említést érdemel az 1968–1973 között működött OAO-2 és az 1989–1993 között működött COBE.

International Ultraviolet Explorer, IUE (1978–1996):

A NASA, az ESA és a brit kutatási tanács (SERC) 45 cm tükörátmérőjű űrtávcsövével ultraibolya színeképeket készítettek. A teleszkóp csillagkövetőjével széles sávú fotometriai méréseket végeztek, de a detektort nem kalibrálták, és a stabilitásáról sem gondoskodtak. A mérések alapján néhány ezer csillagról született különböző időtartamú, néhány század magnitúdó pontosságú fénygörbe.

Hipparcos (1989–1993): Az ESA asztrometriai célú, 29 cm átmérőjű űrtávcsövével 118 000 előre kiválasztott csillag helyzetét határozták meg nagyon pontos szögmérésekkel. A pozíciómérések alapján a programcsillagok trigonometrikus parallaxisát is megállapították, amiből kiszámítható az adott objektum távolsága is. A pozíciómérések során a csillagok fényességét is rögzítették a 400–800 nm

hullámhossztartományban. Az ezer napot kissé meghaladó mérési időszak során átlagosan száz fényességadatot kaptak az egyes csillagokról, amelyek pontossága kb. ezredmagnitúdó. Az adatok időbeli eloszlását azonban az asztrometria követelményeihez igazították, ami nem kedvező a változócsillagok kutatása szempontjából. A fő program során kapott széles sávú Hp magnitúdón kívül a Hipparcos csillagtérképezőjével 2,5 millió csillag fényességét is megmérték, mégpedig két keskenyebb sávban: 350–500 nm, illetve 460–600 nm között, az így kapott magnitúdók jele rendre B_T és V_T . A kétféle magnitúdó különbségeként kapott $B_T - V_T$ színindexből a csillag effektív hőmérsékletére is következtetni lehet (a csillagközi anyag vörösítő hatásának ismerete nélkül azonban ez csak alsó becslést ad a hőmérsékletre). Mindenesetre a Tycho-katalógus néhány század magnitúdó pontosságú adatai jelentik az űrtávcsővel végzett legelső tömeges kétszín-fotometriát.

Hubble-űrtávcső, HST (1990–): A NASA és az ESA 240 cm főtükörátmérőjű űrtávcsőve univerzális műszer, az optikai fotometria a HST-vel végzett méréseknek csak egészen csekély hányadát teszi ki. A fotometria csillagászatban belüli alacsony elismertségét jól jellemzi, hogy a helytelen alakúra csiszolt főtükör leképezési hibáját korrigáló COSTAR optikai rendszert a gyorsfotométer helyére szerelték be az első szervizküldetés során, hogy a többi műszerrel (spektrográfokkal, képalkotó kamerákkal) jobb minőségű megfigyeléseket végezzenek. A kamerákkal kapott képek fotometriai kiértékelésével viszont sok csillaghalmaz tagjairól, illetve galaxisok fényesebb csillagairól kapható fénygörbe. A HST archívumából ráadásul a helyzetérzékelő detektorok látómezejében megjelent csillagok fotometriai adatai is kinyerhetők, páratlan lehetőséget biztosítva azok számára, akik kitartó munkával újabb halvány változócsillagok felfedezésére vállalkoznak.

Wide-field InfraRed Explorer, WIRE (1999–2011): Az infravörös tartomány vizsgálatára indított amerikai űrtávcső műszaki hiba miatt alkalmatlanná vált eredetileg

kitűzött programjának végrehajtására, de az űreszközt optikai fotometriára használva a rajta levő 5,2 cm átmérőjű csillagkövető távcsővel kb. 200 nagyon fényes csillagról kaptak 21 napot folyamatosan lefedő fotometriai idősort. Ezzel a WIRE lett az első űrtávcső, amivel kizárólag optikai fotometriai adatokat gyűjtöttek. Az ezernél több észlelési pontból kirajzolódó fénygörbék ezredmagnitúdó pontosságúak.

INTEGRAL (2002–): Az ESA jelenleg is működő műholdjának fő feladata a gamma-sugárzás tartományába eső kozmikus jelek vizsgálata (*INTErnational Gamma-RAY Laboratory*). Fedélzeti műszerei között azonban van egy 5 cm apertúrájú kamera is (Optical Monitoring Camera, OMC), amellyel az éppen vizsgált nagy energiájú forrás környékéről alkotnak képet a látható fény tartományában. Ezeket a képeket archiválják, és a rajtuk található ismert változócsillagok fotometriai idősorát szabadon hozzáférhetővé tették (<https://sdc.cab.inta-csic.es/omc/>). Az OMC-vel végzett mérések nagy előnye, hogy az észlelések a Johnson-féle fotometriai rendszer standard V szűrőjén keresztül történtek. Bár az OMC archívumában ezernél több változócsillag adatai találhatóak, csak néhányról van használható lefedettségű fénygörbe, a legtöbb csillagról csak sporadikus észlelési pontok vannak, amelyek jellemző pontossága néhány század magnitúdó.

Coriolis (2003–2011): A Nap környezetét, elsősorban a Naptól kidobott anyagot vizsgálta az amerikai légierő műholdjának SMEI (*Solar Mass Ejection Imager*) műszere. A SMEI – egy mindössze 1,3 cm átmérőjű távcsőre szerelt detektor – széles sávú fotometriai megfigyeléseket végzett. Ezzel a berendezéssel többéves fotometriai adatsor gyűlt össze az égbolt legfényesebb néhány száz csillagáról. A csillagonként akár ezer mérési pontot tartalmazó fénygörbék pontossága azonban nem jobb 0,02 magnitúdónál.

MOST, Microvariability and Oscillation of STars (2003–

2014): A mindössze 53 kg tömegű kanadai műhold volt a legelső, kifejezetten fotometriai célú űrtávcső, és 2013-ig a legkisebb is a csillagászati műholdak közül. Széles sávú fotometriai adatokat gyűjtött a 380–800 nm közötti hullámhossztartományt észlelve. A MOST fedélzetén levő 15 cm átmérőjű távcsövet nem lehetett tetszőleges irányba fordítani, de így is az égbolt jelentős részét tudták vele vizsgálni. Mintegy 5000 csillagról gyűlt össze legfeljebb 60 napot lefedő fotometriai adatsor, amelyben a fényességértékek pontossága eléri a tízezred magnitúdót. A több hetes időszakot lefedő folyamatos fénygörbék ezernél több adatpontból rajzolódnak ki. A MOST konzorciumán kívüli észlelők számára pályázati úton biztosítottak távcsőidőt.

UVOT, Ultra Violet and Optical Telescope (2004–):

A NASA gamma-kitörések vizsgálatára szolgáló Swift (újabb nevén Neil Gehrels Swift) űrobszervatóriumának fedélzetén egy 30 cm átmérőjű, Ritchey–Chrétien-távcsővel a gamma-kitörések optikai utófényének észlelése mellett más objektumok fotometriáját is lehet végezni a 7–22 magnitúdó közötti fényességtartományban. A detektor elé a fényútba 7 különféle szűrő is betolható, ezáltal a fényesség mellett a vizsgált objektum színéről is értékes információk kaphatók. Az UVOT-tal végzett észlelések a <https://archive.stsci.edu/swiftuvot/search.php> webhelyre kattintva kereshetők vissza.

CoRoT, Convection and RoTation of Stars (2006–2012):

Francia kezdeményezésű projekt, amelynek megvalósítását az ESA – az általa korábban tervezett Eddington-űrtávcső projektjének megghiúsulása után – anyagilag is támogatta. A 27 cm átmérőjű űrtávcső detektorával a 350–1000 nm hullámhossztartományban végeztek széles sávú fotometriát az égbolt korlátozott területeiről. Az észlelt látómezők a Tejútrendszer centrumához közeli irányokba, illetve azokkal 180 fokkal ellentétes irányokba estek, félévenkénti irányváltással. A detektor felülete ketté volt osztva, az egyik felével az asztroszeizmológiai vizsgálatok szempontjá-

ból fontos, előre kiválasztott csillagokat észleltek, a másik felével pedig exobolygók kereséséhez gyűjtöttek fotometriai adatokat. A CoRoT online lekérdezhető archívuma (<https://corot.cnes.fr/en/data-archives>) hozzávetőleg 120 000 csillag fotometriai adatsorát tartalmazza, egy-egy csillagról százezernél is több észlelést, amelyek pontossága eléri a tízezred magnitúdót. A rendkívül nagy adattömeg és a pontosság ellenére mindössze 32 exobolygót sikerült felfedezni a CoRoT méréseiből, viszont a pulzáló és más fizikai változócsillagok észlelései alapján kapott eredmények igazán jelentősek.

STEREO, Solar-TERrestrial RElations Observatory (2006–): a NASA űrszondapárosa, amelyeket úgy indítottak, hogy a Nap–Föld rendszer L_4 , illetve L_5 librációs pontja felé haladjanak Nap körüli pályájukon (azóta már túljutottak e pontokon). A két szonda fő feladata a naptevékenység helioszférára, illetve a Földre gyakorolt hatásának vizsgálata. A STEREO-A jelenleg is működik, a STEREO-B-vel 2014-ben megszakadt a kapcsolat. Mindkét szonda fedélzetén van két kis kamera, amelyekkel a helioszféra vizsgálatát lehetővé tevő képek készíthetők. E képek fotometriai feldolgozásával 12 magnitúdónál fényesebb csillagok 20, illetve 70 napot folyamatosan lefedő fénygörbéjét lehet előállítani. Az adatok szórása a fénygörbékben hozzávetőleg olyan, mint a Coriolis műhold SMEI műszerével kapott adatokból előállított fénygörbéké.

Kepler (2009–2013, 2014–2018): A már befejeződött űrfotometriai projektek közül a fotometriai pontosság, illetve a mérések alapján felfedezett exobolygók számát tekintve vitathatatlanul a Kepler a legsikeresebb. A NASA 95 cm főtükör-átmérőjű űrtávcsöve működésének első szakaszában négy éven át egy 105 négyzetfok területű állandó látómezőt észlelt a 400–900 nm hullámhossztartományban érzékeny hatalmas CCD-kamerájával. A vizsgált területet úgy választották meg, hogy arrafelé átlagos legyen a csillagok eloszlása, és lehetőleg sok Nap-típusú törpecsillag legyen benne, mert az ilyen csillagokhoz tartozó bolygók ki-

mutatása fontos feladat, és a Kepler kifejezetten alkalmas volt erre. A négy évig tartó, lényegében megszakítás nélküli megfigyelés során egy-egy észlelt csillagról több százezer adat gyűlt össze, amelyek fotometriai pontossága eléri a néhány század millimagnitúdót, és a Kepler adatbázisából (<https://archive.stsci.edu/missions-and-data/kepler>) legalább százezer csillagról készíthető ilyen hosszú időszakot lefedő folyamatos fénygörbe.

Amikor 2013-ban a Kepler-űrtávcső stabil iránytartásának biztosításához nélkülözhetetlen lendkerekek közül már csupán kettő maradt működőképes, az eredeti észlelési programot fel kellett függeszteni. 2014-től azonban K2 néven új megfigyelési projektbe kezdtek az űrtávcsővel, amelynek során az ekliptika mentén található kis látómezők felé fordították a Keplert, és azokról a 105 négyzetfokos területekről 80-80 nap időtartamú észlelési sorozat készült. Az iránytartás nehézségei miatt a K2-fotometria jellemző pontossága 0,0005 magnitúdó, de mivel összesen 18 látómezőt észleltek a K2 projekt során a Kepler működtetéséhez szükséges üzemanyag teljes kiapadásáig, a teljes észlelési programban összesen kb. 350 000 csillag szerepelt. Minden egyes csillagról nagyságrendileg százezer adatpontot tartalmazó fénygörbe készíthető a Kepler/K2 archívumában elérhető adatokból.

Gaia (2013-): Az ESA asztrometriai célú űrszondája a Hipparcos utóda, az elődjénél sokkal monumentálisabb észlelési programmal: a 68 cm effektív átmérőjű tükröt tartalmazó űrtávcsővel az égen látszó minden fénypont helyét és fényességét is megállapítják egészen 20,7 magnitúdós határfényességig (a 3 magnitúdónál is fényesebb kb. 200 csillag kivételével). A Gaia archívumában (<https://gea.esac.esa.int/archive/>) jelenleg 1,8 milliárd csillag adatai érhetők el. A 2018-ban nyilvánosságra hozott második adatközlés 550 737 változócsillagról tartalmaz adatokat. Az eredetileg öt évre tervezett észlelési program támogatását már két ízben meghosszabbította az ESA. A várhatóan 2024 végén befejeződő egy évtizedes mérési időszak során minden mért égi forrásról 140-160 mérési pont születik.

A széles sávban történő, ezredmagnitúdó pontosságú fényességmérés mellett a Gaia spektrofotometriai méréseiből a vizsgált objektum színe is meghatározható a 330–680 és 640–1050 nm közötti színeképsávokban mért magnitúdók különbségéből. Az adatok fotometriai feldolgozása után sok millió új változócsillag felfedezése várható a Gaia mérései alapján.

BRITE, BRiGht Target Explorer (2013/2014–): a Kanadai, Lengyel és Osztrák Űrügynökség közös vállalkozása keretében összesen hat kis műholdat indítottak, mindegyikük fedélzetén egy három cm átmérőjű távcsővel. Mindhárom felbocsátó ország két űrtávcsőért felel, amelyek közül az egyik a látható fény vörös tartományában (550–700 nm között) végez fotometriai megfigyeléseket, míg a másik a kék tartományban beeső (390–460 nm közötti hullámhosszú) fotonokat észleli. A hat űrtávcső közül az osztrák TUGSAT–1 és UniBRITE, illetve a lengyel B-Lem 2013-ban került pályára, az ugyancsak lengyel B-Heweliusz műholdat és a két kanadai párját, amelyek neve B-Toronto és B-Montréal, 2014-ben indították. Ez utóbbi azonban nem vált le a hordozórakéta utolsó fokozatáról, így a hat BRITE műhold közül csak öt működik: 3 az optikai színek kék, 2 a vörös sávjában észlel. A mérési programban a 3,5 magnitúdónál fényesebb összes csillag (szám szerint 286) szerepel. Eddig már sok száz fényes csillagról gyűlt össze 30–180 nap közötti időtartamú fotometriai idősor, az egyes csillagokról sok tízezer adattal, amelyek jellemzően ezredmagnitúdó pontosságúak.

TESS, Transiting Exoplanet Survey Satellite (2018–): a NASA újabb, jelenleg is működő fotometriai űrtávcsőve, amellyel a projekt elnevezése ellenére nemcsak fedési exobolygók kimutatása a cél, mert a 4, egyenként 10,5 cm átmérőjű távcsővel kapott idősorok a változócsillagok minden típusának vizsgálatára alkalmasak. A kis távcsőátmérő miatt a TESS detektorai is széles sávban (600–1000 nm között) gyűjtik a fényt. A mérési programot úgy állították össze, hogy a TESS kamerái az első évben az égbolt déli

félgömbjét pásztázták végig, egy-egy égterületet folyamatosan 27 napig észlelve, de vannak olyan területek is, amelyek ennél sokkal tovább maradtak a TESS látómezőjében. A mérési program második évében az északi égbolt észlelése került sorra hasonló módon. A megfigyelési program támogatását annak sikere hatására a NASA meghosszabbította, így 2020 nyara óta ismét a déli csillagok észlelése van folyamatban. A mérési programban hozzávetőleg 200 000 csillag szerepel, egy-egy csillagról legalább tízezer fényességadat gyűlik össze a 27 napos mérési időszak alatt, a fotometriai pontosság pedig jellemzően fél millimagnitúdó.

Cheops, Characterising Exoplanetary Systems (2019–): a Berni Egyetem (Svájc) által kezdeményezett és az ESA által is támogatott projekt keretében egy 32 cm objektívát-mérőjű űrtávcsővel mintegy ötszáz korábbról ismert exobolygó gazdacsillagát követik. A fotometriai észlelések célja a vizsgált bolygórendszer és központi csillagának minél alaposabb megismerése, különös tekintettel az exobolygók méretének megállapítására. A fényességmeghatározás pontossága vetekszik a Kepler észlelési adataival, azaz jellemzően 20 milliomod magnitúdó, de a Cheops csakis fényes csillagokat észlel.

Az űrfotometria helye a csillagászatban – a magyarok helye az űrfotometriában

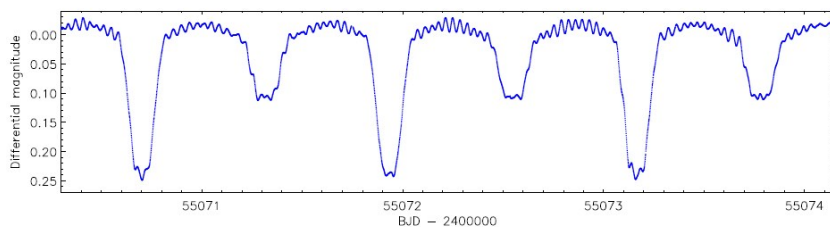
Már a legelső fotometriai űrtávcsövek is beváltották a hozzájuk fűzött reményeket: a beigért exobolygókat sikerült felfedezni a gazdacsillaguk fényességére gyakorolt hatásuk alapján. Az exobolygók láthatóvá tétele nem az űrfotometria feladata. Bár a nagyközönség számára a legizgalmasabbak az exobolygókkal kapcsolatban kapott eredmények, a csillagászatban ez csak egy azon kutatási területek közül, amelyeknél kiválóan alkalmazható az űrfotometria mint mérési módszer. A legkiemelkedőbb a változócsillagok kutatására gyakorolt hatása.

Elképesztő még belegondolni is abba, hogy amikor a Gaia mérési programja véget ér, az általa vizsgált kb.

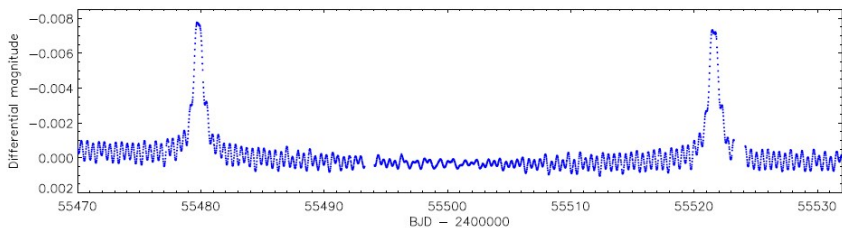
2 milliárd csillag 10%-áról derül ki, hogy nem állandó a fényességük, azaz 200 millió új változócsillaggal szembesülnek az asztrofizikusok. Már eddig is találtak egészen új típusú fényességváltozást űrfotometriai mérésekből, egyebek között az ún. szívdobbanás-csillagok felfedezéséhez is az űrfotometria kellett, hogy csak egyetlen példát említsek.

Az űrfotometriához köthető eredmények áttekintését ebben a cikkben meg sem kísérem. Általános jellegű összefoglalót a Szegedi Tudományegyetem csillagász szakos hallgatóinak tartott űrcsillagászati kurzusom űrfotometriával kapcsolatos prezentációjában talál az érdeklődő olvasó a <http://astro.u-szeged.hu/index2.html> weblapon az [urcsill-szeged2-fotometr-2020.pdf](http://astro.u-szeged.hu/index2.html) linkre kattintva. Az eddigi legsikeresebb fotometriai űrszonda, a Kepler/K2 részletes bemutatása és eredményeinek összefoglalása pedig Plachy Emese és Molnár László: *Ég veled, Kepler!* című cikkében található (Meteor Csillagászati Évkönyv 2020, 197–229. o.; <http://real-eod.mtak.hu/8418/1/mcse-evkonyv-2020-latvany.pdf>).

Az űrfotometria nyújtotta lehetőséget jól szemlélteti két csillagnak a Kepler mérései alapján készített fénygörbéje, azaz a négy évet folyamatosan lefedő fénygörbéknek csupán egy részlete (1. és 2. ábra).



1. ábra: A KIC 10661783 fedési kettőscsillag egyik komponense δ Scuti típusú pulzáló változócsillag.
(John Southworth, EPJ Web of Conferences, 101, 04001, 2015)



2. ábra: A KOI-54 jelű szívdobbanás-csillag Kepler-fénygörbéjének részlete. (John Southworth, *EPJ Web of Conferences*, 101, 04001, 2015)

Minthogy a magyar csillagászatban hagyományosan fontos kutatási téma a változócsillagok vizsgálata, szinte természetes, hogy magyar kutatók (elsősorban a CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet és az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium munkatársai) jelentős szerepet töltenek be a fotometriai űrtávcsövek adatait feldolgozó szakmai konzorciumokban is. Így volt ez korábban a Kepler/K2, most pedig a TESS és a Cheops esetében. És ugyanez a helyzet a már előkészületben levő, később felbocsátandó fotometriai űrtávcsövek, pl. a PLATO esetében is. De ez már a jövő zenéje űrtávcsöve.

Az űrtávcsövek szerepe a planetáris asztrokémiában

Futó Péter

Debreceni Egyetem, Ásvány- és Földtani Tanszék

Három évtizeddel ezelőtt, 1990. április 24-én startolt a floridai Kennedy Űrközpontból a 31. Space Shuttle küldetés, melynek keretében a Discovery űrrepülőgép segítségével pályára állították a Hubble-űrtávcsövet. A több nagyjavításon is átesett űrteleszkóp széles, az ultrabolyától az infravörös hullámhossztartományig terjedő skálán végzett megfigyelései révén korábban még sosem látott részletességgel tárult fel előttünk a Világegyetem. A Hubble-űrtávcsővel a különböző tejútrendszerbeli és extragalaktikus vizsgálatokon kívül számos megfigyelést végeztek a kutatók a naprendszerbeli bolygókon, továbbá mérései által rengeteg izgalmas felfedezés született az exobolygók világában is. A Lyman Spitzer amerikai elméleti fizikusról és csillagászról elnevezett, 2003–2020 között az infravörös tartományban működő Spitzer-űrtávcsővel a kutatók szintén úttörő jelentőségű méréseket végeztek. Jelen cikkben bemutatok néhány olyan különösen izgalmas felfedezést, melyek vagy új utakat nyitottak meg az exobolygó-kutatásban, vagy pedig jelentős mértékben hozzájárultak az asztrokémia bolygótesteket vizsgáló rész-tudományterületének, a planetáris asztrokémiának a fejlődéséhez, illetve az exoplanétákról szerzett ismereteink bővítéséhez.

Az Univerzum kémiája

A kozmokémia elsősorban a fúziós energiatermelést végző égitestek (csillagok) keletkezéséhez, fejlődéséhez és végállapataihoz kapcsolható kémiai jelenségekkel, de általánosságban véve az egész kozmosz kémiájával foglalkozik. Vizsgálati körébe tartozik a csillagok és a csillagközi anyag összetételének és ezeknek a kompozícióknak a kialakulásához vezető folyamatoknak az elemzése.

Az asztrokémia szintén interdiszciplináris tudományág, főként a nem fúziós égítetekhez (nagybolygók, holdak, törpebolygók, kisbolygók, üstökösmagok) és az intersztelláris anyaghoz kapcsolódó kémiai folyamatokkal foglalkozik. Az asztrokémia története igazán az 1930-as években kezdődött, amikor Karl Jansky amerikai fizikus és rádiómérnök a Tejútrendszerből érkező rádiósugárzás megfigyelése során azt tapasztalta, hogy a jel a galaxis központi régiójának irányából a legerősebb. A későbbi évtizedekben számos molekulát azonosítottak a csillagközi anyagban rádiócsillagászati mérések segítségével. A szilárd fázisú anyagok, ásványi komponensek azonosításában pedig – különösen az utóbbi évtizedekben – jelentős áttörést hozott a világűrből végzett infravörös csillagászati mérések alkalmazása.



A Hubble-űrtávcső. (Forrás: spacetelescope.org)

Az asztrokémia egyik fontos részterülete a planetáris asztrokémia, mely konkrétan a bolygótestek kémiája. Az utóbbi években pedig már nem csupán a naprendszerbeli objektumok képezik az asztrokémiai kutatások tárgyát, hanem intenzívvé vált az exobolygók, exobolygórendszerek kialakulásának és fejlődésének kémiai célú tanulmányozása is.

Bolygótranzitok nyomában

A Hubble a csillagok spektrumának rögzítése mellett tudománytörténeti szempontból is jelentős szerepet vállalt távoli exobolygók légkörének vizsgálatában. Elsőként észlelte egy exobolygó légkörét, melyben nátriumgáz jelenlétére utaló nyomokat talált. Szintén úttörő szerepe van abban, hogy elsőként detektáltak az űrtávcső mérései révén szerves molekulákat egy exobolygó légkörében.

A HD 209458 b volt a Hubble-űrteleszkóppal (HST), tranzitmódszerrel elsőként felfedezett exobolygó. A Pegazus csillagkép irányában megfigyelhető, tőlünk 153 fényévre lévő, Napunknál kissé nagyobb tömegű csillag körül keringő gázóriás forró jupiter típusú bolygó. A mintegy kétharmad Jupiter-tömegű planéta mindössze három és fél nap alatt kerüli meg egyszer csillagát. A nagy csillagközelség módosítja a planéták légköri jellemzőit, szerkezetét. Ez utóbbit exobolygóknál első ízben Gilda Ballester kutatócsoportjának sikerült megfigyelnie a HST-vel végzett mérések alapján [1]. A mérési eredmények kiértékelését követően a kutatók arra jutottak, hogy a HD 209458 b légköre oxigént, szén- és nátriumot is tartalmaz, magát a légkört pedig egy nagy kiterjedésű, forró hidrogén alkotta csóva övezi, melyet az elszökő légkör alakított ki. A légköri összetétel spektroszkópiai úton történő meghatározása új korszakot nyitott meg az exobolygó-kutatás történetében.

2016-ban csillagászok a Hubble-űrtávcsővel végzett mérések felhasználásával arra kerestek választ, hogy a közeli ultrahideg vörös törpecsillag, a TRAPPIST-1 rendszerében keringő, a Földéhez közelítő méretű planétáknak vajon kiterjedt légköre van-e. Azt találták, hogy a TRAPPIST-1 b és c jelű exobolygóknak hidrogénben gazdag, de valószínűleg vékony és sűrű atmoszférája lehet, csakúgy, mint a Földnek [2]. A kutatás során a csillagászcsoport tagjai elsőként vizsgálták meg a Földéhez közelítő méretű exobolygók légkörét. A felfedezés azért is nagy jelentőségű, mert ha ezeknek a bolygóknak jelentős hidrogén-hélium légkörük volna, akkor nem alakulhatna ki rajtuk az élet általunk ismert formája, mivel a túl vastag légkör erős üvegházhatást eredményezne.

Extrém forró planéták

A WASP-121 b jelű exobolygó az eddig ismert forró jupiter típusú, csillagukhoz közel keringő óriás gázbolygók között is különlegességnek számít. A főként hidrogénből álló légkörét folyamatosan elvesztő bolygó olyannyira közel kering a Napnál forróbb csillagához, hogy tojás alakúvá deformálták az árapályerők. A Hubble PanCet exobolygó-kutató programjának keretében végzett megfigyelések során fémek jelentését is kimutatták az exobolygó 2500 Celsius-fokra hevült felső légkörében [3]. Ez azért is volt érdekes, mert korábban csupán a forró jupiterek alsó légkörében találtak fémeket. Ráadásul kimutatták, hogy fémek, magnézium és vas folyamatosan el is szöknek a légkörből. Ennek magyarázatául szolgál a WASP-121 b felfúvódott atmoszférája, s az ebből kifolyólag kisebb felszíni nehézségi gyorsulása.

Az ultraforró jupiterek (ultra-hot jupiters, UHJ) olyan óriás gázbolygók, melyek egyensúlyi hőmérséklete meghaladja a 2000 K-t. Asztrokémiai jelentőségük igazából abban rejlik, hogy kitűnő célpontjai lehetnek a bolygóatmoszférák fémösszetétele tanulmányozásának. Az ilyen típusú bolygók extrém magas hőmérsékletű légkörében a molekulák alkotórészeikre, atomokra és ionokra bomlanak. A nagy csillagközelség miatti kötött keringés pedig jelentős hőmérsékleti különbségekkel jár együtt, aminek egyik következménye a planéta nappali és éjszakai féltekéje közötti kémiai eltérés. A detektált fémek – néhány kivételtől eltekintve (Na I, Fe I, Mg I), melyekre általában a szoláris gyakoriság volt jellemző (> ppm) – túlnyomórészt ionok voltak az ultraforró jupiterek légkörében [4].

Kutatás a víz után

Az atmoszférikus vízgőz kimutatása exobolygókon a bolygólégkörök spektroszkópiai vizsgálatának egyik legfavorizáltabb iránya. Mindamellett, hogy következtetni lehet a bolygótest evolúciójának adott eseményeire, a meghatározott mennyiségű víz jelenléte egy adott planétán asztrobiológiai szempontból is különleges jelentőséggel bír, hiszen a víz az általunk ismert élet egyik alapvető feltétele.

A víz és a forró jupiterek

A víz utáni kutatás terén a kutatók kezdetben ideális jelölteknek gondolták a csillagukhoz közel keringő óriás gázbolygókat, ún. forró jupitereket, mivel azok légköri hőmérséklete az extrém csillagközelség miatt nagyon magas, 800–2200 °C közötti. Ennek alapján úgy következtettek, hogy atmoszférájuknak gőz fázisban jelentős mennyiségű vizet kell tartalmaznia. Három kiválasztott forró jupiter típusú exobolygónak (HD 189733 b, HD 209458 b, WASP-12 b) a Hubble-lel a közeli infravörös tartományban rögzített spektruma elemzését követően kutatók azt találták, hogy azok meglepően szárazak [5].

Ígéretes Galilei-hold: Europa

Az óriásbolygók holdrendszerében vízpárát elsőként a Szaturnusz Enceladus nevű holdja esetében figyeltek meg, a NASA Cassini-űrszondája segítségével (2005). Később megállapították, hogy a kriovulkáni kitörések alkalmával nem csupán vízjég szemcséi és vízpára távozik a hold belsőjéből, hanem kimutattak szerves anyagot, sőt szerves makromolekulákat is [6]. 2015-ben a Cassini át is repült az Enceladus vízkilövellésén.

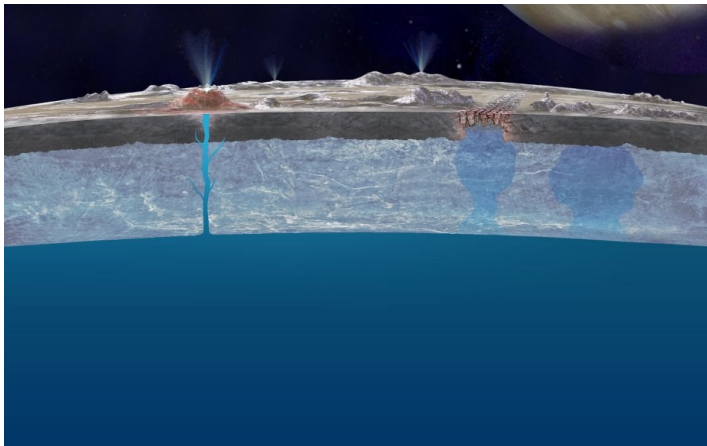


Illusztráció, amint a Cassini áthalad az Enceladus vízkilövellésén 2015-ben. (Forrás: NASA)

2012-ben Lorentz Roth, a San Antonio-i Southwest Research Institute munkatársa által vezetett kutatócsoport azonosított a Jupiter Europa holdjának déli pólusvidékén

több helyen kitörő vízpárát, közülük kettő erupciója elérte a 200 km-es magasságot. A kutatók a Hubble képalkotó spektrográfja (STIS) által készített képeket elemezték, s ennek eredményeként fedezték fel a vízpára-kilövellésre utaló bizonyítékokat [7].

2016-ban a baltimore-i Space Telescope Science Institute kutatói számoltak be újszerű vízpára-kilövellésekről az Europa korongjának peremén, akkor megfigyelve azokat, amint a hold áthaladt a Jupiter előtt [8]. A kutatócsoport eredeti célja a hold ritka, de kiterjedt légkörének megfigyelése volt. A holdnak nagy valószínűséggel viszonylag mély felszín alatti óceánja és fiatal jeges felszíne van. A Hubble-lel dolgozó kutatócsoport megállapította, hogy az Enceladushoz hasonlóan az Europa kilövelléseinek intenzitása is változik a hold keringési pozíciója függvényében.



A Jupiter Europa holdjának jégkérgé, óceánja és a vízkilövellések. (Illusztráció, forrás: NASA)

A Jupiter Europa és a Szaturnusz Enceladus holdjára emlékeztető, jégkéreggel borított óceánvilágok akár meglehetősen nagy számban létezhetnek a Tejútrendszerben. A távoli bolygórendszerekben keringő jeges világok jóval nagyobbak is lehetnek naprendszerbeli megfelelőiknél, ezek pedig sokkal több belső energiával is rendelkezhetnek [9].

A nagyobb geológiai aktivitás alkalmassá teheti őket a kér-güket áttörő vízgőzkilövellések produkálására, melyeket a jövőben távcsövekkel is lehet majd észlelni.

Vízpára a K2-18 b légkörében

A Kepler-űrtávcső K2 küldetése során 2015-ben de-tekált K2-18 b jelű exobolygó egy 110 fényévre található törpecsillag lakhatósági zónájában kering. Az Oroszlán csillagkép irányában megfigyelhető 0,359 naptömegű és 0,411 napátmérőjű [10] anyacsillag egy meglehetősen aktív vörös törpe. Bolygója 8,92 földtömegű és 2,37 földátmérőjű [11], a csillagot pedig 0,1429 csillagászati egység (CSE) tá-volságban, 32,9 nap alatt kerüli meg. Átlagsűrűségéből kö-vetkezik, hogy nem teljesen kőzetekből állhat, hanem vagy vastag légkörű planéta nagy méretű kőzetmaggal, vagy pe-dig felépítésében fémes mag, jégréteg és gázburok egyaránt részt vesz. A Hubble WFC3 kamerájával 2016–2017-ben végzett méréssorozat révén a detektált vízpára mellett meg-állapították, hogy a K2-18 b atmoszférája hidrogénben és héliumban is gazdag [12]. Ez volt az első alkalom, hogy egy lakhatósági zónában keringő exobolygó légkörében kimu-tatták a víz jelenlétét. Ez pedig fontos mérföldkőnek számít a más bolygórendszerekben a Földön kívüli élet jelei utáni kutatásban.

A K2-18 b felépítése egy lehetséges forgatókönyv sze-rint akár a Neptunuszéhoz is hasonlíthat, vastag hidrogén légkörrel, mely alatt nagy nyomású víz/ammónia óceán következik, legfelül fém-szilikát maggal. További érdekes-ség, hogy a K2-18 b hidrogénben gazdag légköre alatt a kutatók szerint kizárólag víz alkotta óceán is létezhet [13]. Ezzel szemben a bolygó éppúgy kőzetekből is állhat, vastag hidrogén/hélium légkörrel burkolva. A mérési adatok ér-telmezése során azt találták, hogy a hidrogénben gazdag légkörben a víz térfogati aránya 0,02% és 14,8% közötti. A metán és az ammónia relatív hiánya pedig arra utal, hogy a planéta légköre nincs kémiai egyensúlyban. Mindezek mellett érvelésük szerint nem szükségszerű, hogy egy boly-gó lakhatóságának feltételrendszeréhez mindenképpen hozzá tartozzon a Földéhez hasonló összetétel.

Gyakoriak lehetnek a légkörükben jelentős mennyiségű vizet tartalmazó bolygók

A kis tömegű bolygók nagyon gyakorinak számítanak a vörös törpecsillagok körül. Ezek a kis tömegű, M színképtípusú halvány csillagok pedig a Tejútrendszer leggyakoribb csillagai, több mint 150 milliárd is létezhet belőlük galaxisunkban. Az utóbbi években vizet szuperföld légkörében is sikerült kimutatni, de éppígy ismerünk már halvány M törpe körül keringő, víztartalmú légkörrel rendelkező planétákat is. A víz a leggyakoribb vegyület a Világegyetemben, így logikusan következtethetünk arra, hogy gyakori lehet a bolygólégkörökben is.



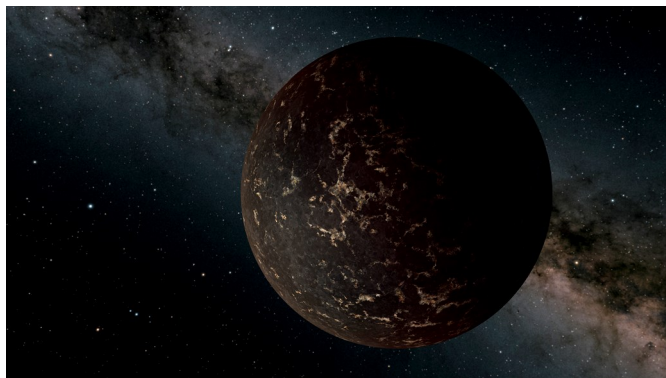
A K2-18 b egy csillaga lakhatósági zónájában keringő szuperföld kategóriájú exobolygó, melynek hidrogénben és héliumban gazdag légköre jelentős mennyiségű vizet is tartalmazhat. (Forrás: spacetelescope.org)

Az MEarth projekt keretében felfedezett LHS 1140 b jelű exobolygó anyacsillaga egy 41 fényévre lévő, 0,2139 napátmérőjű és 0,179 naptömegű vörös törpe. A csillaga lakhatósági zónájában keringő LHS 1140 b 6,98 földtömegű és 1,727 földátmérőjű planéta [14], melynek a Hubble WFC3 kamerájával felvett transzmissziós spektruma egy vizet tartalmazó légkör jellemzőivel konzisztens [15].

Planetáris felszínek

Az exobolygófelszínek jellemzőinek kutatása a jövő hiperfelbontású optikai interferométereivel sem lesz egyszerű feladat, még akkor sem, ha viszonylag közeli (kb. 10 parszek sugarú tértartományon belüli) exoplanéták esetében végzünk majd megfigyeléseket. Nehézségek persze nemcsak a technika korlátai miatt adódhatnak, hanem természetes okok, így főként a légköri jellemzők (sűrű átlátszatlan légkör, borultság mértéke, stb.) miatt is. A természet azonban rendkívüli változatosságot tár elénk az exobolygók világában is. Az eddigi megfigyelések során egy sor olyan kis tömegű exobolygót felfedeztünk már, melyeknek minden bizonnyal vastag atmoszférája van (mini-neptunuszok, vízben gazdag szuperföldek). Az utóbbi években sikerült azonosítani olyan szuperföldet is, mely a relatíve nagy tömege ellenére valószínűleg nem rendelkezik számottevő légkörrel. Az asztrokémiai célú vizsgálatok számára az ilyen jellegű planéták azért is érdekesek, mert esetükben megfelelő mérésekkel lehetőség nyílhat következtetni a felszínüket alkotó kőzetek típusára is.

Az LHS 3844 b (TOI-136.01) egy közeli vörös törpecsillag körül 11 órás periódusú pályán keringő, 1,303 föld-átmérőjű exoplanéta, melyet a TESS űrtávcső (Transiting Exoplanet Survey Satellite) mérései révén detektáltak a csillagászok 2018-ban [16]. A legtöbb ismert terresztrikus



*Az LHS 3844 b jelű exobolygóról készített fantáziakép.
(Forrás: NASA)*

exobolygó a Napnál kisebb sugarú csillag körül kering. Az elméleti modellek rávilágítanak, hogy az ilyen planéták esetében gyakrabban előfordul az atmoszférikus tömegvesztés, mint a Naphoz hasonló csillagok körül keringő társaik esetében.



A Spitzer-űrtávcső. (Forrás: NASA)

Amerikai kutatók a Spitzer-űrtávcsővel végzett mérések eredményeinek elemzését követően érdekes következtetésre jutottak. Az adatok egy csupasz sziklafelszín modelljéhez illeszthetők leginkább, melynek Bond-albedója 0,2 alatti. A kutatók azt találták, hogy az LHS 3844 b esetében egy vastag légkör léte kizárható, egy vékony atmoszféra pedig instabil volna a bolygó létezésének hosszú időtartama alatt. Így valószínű, hogy a bolygó egy légkör nélküli, csupasz sziklafelszínnel rendelkező világ [17]. A jelek szerint az LHS 3844 b felszínét vastagon bazaltláva borítja.

Irodalomjegyzék

- [1] Ballester G.E., Sing D.K., Herbert F. (2007): The signature of hot hydrogen in the atmosphere of the extrasolar planet HD 209458b. *Nature*, 445, 511
- [2] de Wit J. et al. (2016): A combined transmission spectrum of the Earth-sized exoplanets TRAPPIST-1 b and c. *Nature*, 537, 69
- [3] King D. K. et al. (2019): The Hubble Space Telescope PanCET Program: Exospheric Mg II and Fe II in the Near-ultraviolet Transmission Spectrum of WASP-121 b Using Jitter Decorrelation. *The Astronomical Journal*, 158, 91
- [4] Ben-Yami M. et al. (2020): Neutral Cr and V in the Atmosphere of Ultra-hot Jupiter WASP-121 b. *The Astrophysical Journal Letters*, 897, L5
- [5] Madhusudhan N. et al. (2014): H₂O abundances in the atmospheres of three hot Jupiters. *The Astrophysical Journal Letters*, 791, L9
- [6] Postberg F. et al. (2018): Macromolecular organic compounds from the depths of Enceladus. *Nature*, 558, 564
- [7] Lorenz R. et al. (2014): Transient Water Vapor at Europa's South Pole. *Science*, 343, 171
- [8] Sparks W. B. et al. (2016): Probing for evidence of plumes on Europa with HST/STIS. *The Astrophysical Journal*, 829, 121
- [9] Quick C. L. et al. (2020): Forecasting Rates of Volcanic Activity on Terrestrial Exoplanets and Implications for Cryovolcanic Activity on Extrasolar Ocean Worlds. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 132, 084402
- [10] NASA Exoplanet Archive ([http:// exoplanetarchive.ipac.caltech.edu](http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu))
- [11] Sarkis P. et al. (2018): The CARMENES Search for Exoplanets around M Dwarfs: A Low-mass Planet in the Temperate Zone of the Nearby K2-18. *The Astronomical Journal*, 155, 257
- [12] Tsiaras A. et al. (2019): Water vapour in the atmosphere of the habitable-zone eight-Earth-mass planet K2-18 b. *Nature Astronomy*, 3, 1086

- [13] Madhusudhan N. et al. (2020): The Interior and Atmosphere of the Habitable-zone Exoplanet K2-18b. *The Astrophysical Journal Letters*, 891, L7
- [14] Ment K. et al. (2019): A Second Terrestrial Planet Orbiting the Nearby M Dwarf LHS 1140. *The Astronomical Journal*, 157, 32
- [15] Edwards B. et al. (2021): Hubble WFC3 Spectroscopy of the Habitable-zone Super-Earth LHS 1140 b. *The Astronomical Journal*, 161, 44
- [16] Vanderspek R. et al. (2018): TESS Discovery of an Ultra-short-period Planet around the Nearby M Dwarf LHS 3844. *The Astrophysical Journal Letters*, 871, L24
- [17] Kreidberg L. et al. (2019): Absence of a thick atmosphere on the terrestrial exoplanet LHS 3844b. *Nature*, 573, 87

A Magyar Asztronautikai Társaság 2020. évi tevékenysége – beszámoló

H-SPACE 2020 nemzetközi űrkonferencia

2020. február 26-án és 27-én a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Villamosmérnöki és Informatikai Kar (VIK) Egyesült Innovációs és Tudásközpontja (EIT) – a MANT-tal együttműködve – immár hatodik alkalommal szervezett nemzetközi űrkutatási konferenciát a Műegyetemen. A rendezvényen a legújabb hazai űrkutatási eredmények bemutatása mellett nemzetközi kitekintést is kaphattak a résztvevők. Az idei kiemelt téma a következő nemzedék oktatása és képzése volt.

A H-SPACE 2020 konferencia hivatalos megnyitójára február 26-án 14 órakor került sor a BME I épületében. Bár a konferencia nyelve az angol volt, közvetlenül a megnyitó előtt, 13 órai kezdettel a MANT szervezésében egy magyar nyelvű pódiumbeszélgetést hallgathattak meg az érdeklődők a magánűrhajózás témájában. Ezen *Horváth András Ferenc* űrkutató-csillagász és *Zsombok Gábor*, a Galileo Webcast szakkomentátora osztotta meg elképzeléseit az űrhajózás terén játszódó paradigmaváltásról. A beszélgetést *Both Előd*, a MANT elnöke vezette. (A Galileo Webcast rögzítette is az eseményt, a beszélgetés felvétele elérhető.)

Az H-SPACE 2020 megnyitóján a konferencia résztvevőit elsőként *Ferencz Orsolya*, a KKM űrkutatásért felelős miniszteri biztosa üdvözölte. Rövid beszédében kiemelte



a hazai űrtevékenység elmúlt időszakának főbb eseményeit, eredményeit, és szólt a tervekről is. Utána *Charaf Hassan*, a házigazda BME VIK dékánja, majd a szervezők nevében az elnökségi asztalnál állók is köszöntötték az egybegyűl-

teket. Az udvarias mondatok közt számos érdekes információ is elhangzott. Ekkor került először nyilvánosságra például, hogy a MANT – a KKM és a Kormány támogatását maga mögött tudva – szándéknyilatkozatot adott be a világ legnagyobb űrkutatási konferenciájának, a Nemzetközi Asztronautikai Kongresszusnak a 2023. évi budapesti rendezésére. (Nem sokkal később a koronavírus-világjárvány sok minden más mellett a kongresszusok szervezését is felborította: a 2020-as esemény a virtuális térbe költözött, minden csúszott egy évvel, így a 2023-as rendezési pályázatból is 2024-es lesz majd.)

Az első plenáris előadó *Mehtap Dufour* volt, aki a Nemzetközi Távközlési Unió (ITU) képviselőjeként beszélt a szervezet tavaly rendezett rádiókommunikációs világkonferenciájának (WRC-19) eredményeiről, az űrtevékenység szemszögéből. Utána a poszttereket bemutató résztvevők kaptak 1-1 percet, hogy „villámelőadások” formájában felhívják a figyelmet munkájukra. A konferencia teljes ideje alatt 20-nál is több posztet tekinthetnek meg a résztvevők, változatos témáik az optikai kommunikációtól kezdve az asztrófotográfián át Mars kutatásáig terjedtek.

A szóbeli előadások nagy száma miatt az első napi programot két párhuzamos szekcióba szervezték. Az egyik előadóteremben a tudományos és műszaki témáké volt a főszerep. Itt a résztvevők



hallhatnak például a műholdas földmegfigyelés magyarországi lehetőségeiről, a Hold kutatásának perspektíváiról, egy antarktiszi bázis bezártságban élő személyzetének pszichológiai vizsgálatairól. Lehetetlen felsorolni az összes érdekes témát, de az előadások kivonatai olvashatók a H-SPACE 2020 konferencia kiadványában.

Nem volt kevésbé érdekes az űroktatással és ismeretterjesztéssel foglalkozó szekció sem. Másnap reggel folytatódott a szóbeli előadások programja, először a tudományos, majd az oktatási témákkal. Egyebek mellett volt szó a műholdas helymeghatározás alkalmazásáról a légi irányításban és a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén folyó magyar vonatkozású kémiai kísérletről. Előadást hallhattak a résztvevők többek között az előző év vége felé felbocsátott második és harmadik magyar műegytemi „zseb-műholdról” (SMOG-P és ATL-1) és az alakuló magyar űrmérnökképzésről.

A konferenciához kapcsolódóan az első estén játékos kvízeszt volt (*AstroQuizNight*), a csütörtöki nap délutánján pedig a Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület (HTE) Távközlési klubjának rendezvényén a WRC-19 hazai szempontú eredményeit járták körül.

A H-SPACE 2020 konferencia regisztrált hallgatósága meghaladta a 200 főt. A sorozatnak lesz folytatása is, de az eddigi szokásoktól eltérve nem évente, hanem minden második évben. A tervek szerint a páratlan években – így 2021-ben is – a MANT Magyar Űrkutatási Fórumára, a hazai űrszakma hagyományosan legnagyobb seregszemléjére kerül sor.

(Űrvilág; fotó: Trupka Zoltán)

Éltető csillagunk, a Nap – diákpályázatunk eredményhirdetése

Átadtuk a 2019/2020-as tanévre meghirdetett „Éltető csillagunk, a Nap” című diákpályázatunk díjait. A korábbi években megszokottnál korábban, március 7-én, egy szombati napon tartottuk az ünnepséget. Az időpont szerencsés választásnak bizonyult, hiszen a koronavírus-járvány miatt nem sokkal később elrendelt korlátozó intézkedések miatt már nem keríthettünk volna sort ilyen rendezvényre.

A helyszín 2019 után immár másodszor az Asia Center bevásárlóközpont egyik különterme volt. Az ünnepélyes eredményhirdetésen megjelent diákok és felkészítőik Both Elődtől, a MANT elnökétől és Milánkovich Dorottya

főtitkárhelyettestől vehették át jutalmaikat. Akik nem tudtak személyesen eljönni, azokhoz természetesen eljuttattuk a nyereményeiket. A március elejére tervezett díjátadással az volt a célunk, hogy a legjobb pályázóink – kihasználva nyereményként kapott kedvezményeiket – időben tudjanak jelentkezni a nyári Ürtáborba, amelyet az akkori elképzelések szerint júliusban Székesfehérváron rendeztünk volna – de sajnos közbeszólt a járványhelyzet...

2020 májusában volt 40 éve, hogy Farkas Bertalan, az első magyar űrhajós a Szojuz–36 fedélzetén elindult a Szaljut–6 űrállomásra, ahol egy hétig végzett tudományos kísérleteket. A pályázati díjátadóval egybekötve erről a jeles alkalomról is megemlékeztünk. Both Előd tartott előadást a témában, és az egybegyűlteket vezetéssel megtekintették Schuminszky Nándor, a MANT elnökségi tagja a témához kapcsolódó exkluzív minikiállítását, amit gyűjteménye különleges darabjaiból állított össze. A díjátadást megelőzően Milánkovich Dorottya mutatta be az Ürtábort.

A nyertesek listáját az alábbiakban közöljük. Nekik, és minden lelkes pályázónknak is gratulálunk az elvégzett munkájukhoz!

11–14 éves egyéni kategória

- I. díj: Bogár-Szabó Márta (Kodály Zoltán Ének-zenei Általános Iskola, Kecskemét, felkészítő: Bogár-Szabó Ádám)
- II. díj: Sipos Áron (Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, Budapest, felkészítő: Komáromi Annamária)
- III. díj: Sipos Márton (Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, Budapest)
- III. díj: Pátyerkó Milán (II. Rákóczi Ferenc Általános Iskola, Gyömrő, felkészítő: Szabóné Szócs Erika)
- Különdíj: Boros Bodza (Gyulai Implom József Általános Iskola, Gyula, felkészítő: Ökrös Márta)
- Különdíj: Merényi Márton (Gyulai Implom József Általános Iskola, Gyula, felkészítő: Ökrös Márta)

11–14 éves csapat kategória

I. díj: Posta Panna, Tóth Janka, Varga Luca (Gyömrői

Fekete István Általános Iskola, felkészítő:

Szabóné Szócs Erika)

II. díj: Marozsán Lili, László Márk, Lakatos Dávid, Bódi

Brendon (Igazgyöngy Alapfokú Művészeti Iskola, Berettyó-
újfalú, felkészítő: L. Ritók Nóra)

III. díj: Biró Zsófi, Dobó Alexandra, Kertész Dóra,

Balogh Krisztina (Hajdúböszörményi Bocskai István

Gimnázium, felkészítő: Németi Edit)

15–18 éves egyéni kategória

I. díj: Böhm Kristóf (Apor Vilmos Római Katolikus Iskola-
központ, Győr, felkészítő: Ábrahám Csaba)

II. díj: Simon-Zsók Anett (Székely Mikó Kollégium, Sepsis-
zentgyörgy, felkészítő: dr. Pető Mária)

III. díj: Szabó Bence (Selye János Gimnázium, Révkomá-
rom, felkészítő: Hevesi Anikó)

15–18 éves csapat kategória

I. díj: Sztojka Áron, Takács István, Marton Izabella,

Hargitai Benke (Soprobotics, Sopron, felkészítő:

Molnár Barnabás)

II. díj: Árok Péter, Szabó Gergő (Szinyei Merse Pál Gimnázium, Budapest)

Virtuális Űrtábor 2020

Egyesületünk 1994 óta szervezi meg a nyári Űrtáborát a 13–18 éves korosztálynak. Az „Egy hét űrélmény” mottójú, vasárnap délutántól szombat reggelig tartó táborban számos, az űrkutatás és űrtevékenység témakörébe tartozó szakmai előadást hallgathatnak meg a résztvevők, részt vehetnek egy egész héten átívelő csapatfeladat megoldásában és megismerhetik a környezet nevezetességeit is. Az űrtáborban az elmúlt több mint 25 évben ezernél is több diák vett részt.

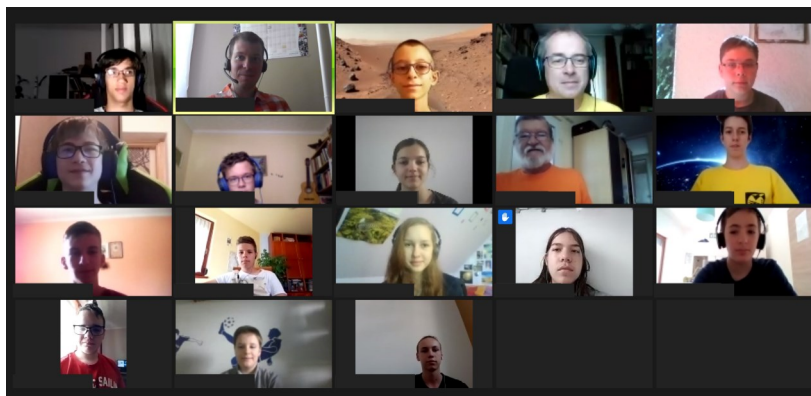
A koronavírus-járvány miatt a MANT 2020-as űrtáborába megszokott módon nem tarthattuk meg. Helyette a virtuális űrtábort az online térben, a Zoom platformon ren-

deztük a 13–18 éves diákok, illetve a MANT Űrtábor Alumni számára. A tábor július 7–10. (kedd és péntek) között volt, a délelőtti és délutáni blokkok között több mint 4 óra szünettel.

Egyesületünk első virtuális űrtáborát, ahová végül 19 diák regisztrált, Both Előd, a MANT elnöke nyitotta meg. A hazai űrkutatás egyik megteremtője, Almár Iván űrkutató-csillagász is köszöntötte a táborozókat, majd Bacsárdi László táborvezető ismertette az idei tábor fő ívét. Ezt követően Dudás Levente, a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék adjunktusa tartott előadást a hazai fejlesztésű kisműholdakról, „Kisműholdak testközelből” címmel. Délután

Bodó Zsófia, a MANT elnökségi tagja vezette az űrmérnök és űrkutató tevékenységével foglalkozó beszélgetést („Mit csinál egy űrmérnök? S egy űrkutató?”), amelyen meghívott vendégeink Erdős Boglárka (Energiatudományi Kutatóközpont, Űrkutató Laboratórium) és Bagó László (C3S Kft.) voltak.

A szerdai nap délelőttjén Frey Sándor (Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont) tartott előadást a rádiócsillagászatról. „Ahhoz, hogy űrtevékenységgel foglalkozhassunk, minden nap tanulni kell” – tudtuk meg a délutáni beszélgetésen, amelyen az ENSZ által alapított űrkutatói szervezet, a Space Generation Advisory Council (SGAC) egykori és jelenlegi hazai képviselői vettek részt: Milánkovich Dorottya (C3S Kft.), Arnócz István (Space



Apps Kft.), Illyés András (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Ordasi András (Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont). A beszélgetést Bacsárdi László vezette, aki 2012–2016 között volt az SGAC magyar képviselője. Szerda este egy online kvízestre került sor. Az AstroQuizNight rendezvényt Ordasi „Chillagász” András, a MANT elnökségi tagja vezette. Az első három helyezett Taródi Péter, Simon-Zsók Anett és Halasi Áron volt.

Csütörtök délelőtt Hirn Attila (Energiatudományi Kutatóközpont, Űrkutatási Laboratórium) osztott meg velünk érdekes ismereteket az űreszközök energiaellátásról, „Mivel tápláld az űreszközüdet?” című előadásában. Örömmel láttuk, milyen aktívak voltak a résztvevők a különböző kérdéseikkel. Délután pedig a MANT diákpályázataról tudtunk meg nagyon sok mindent a diákpályázat zsűritagjainak részvételével: Székely Anna Krisztina, Both Előd és Frey Sándor vett részt a panelbeszélgetésen. Itt is aktívan záporoztak a különböző ötletek a résztvevőktől. A délutáni programblokkban benézett hozzánk Almár Iván és Illés Erzsébet űrkutató-csillagász is.

Pénteken Földváry Lóránt (Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar) hívott meg minket házigazdaként a jövő évi űrtáborba, amelyet 2021. július 4–10. között tartunk Székesfehérváron.

Ezt követően közösen megnéztük a tábori feladatokra beérkezett képeket és a csoportképalbumunkat is. Végül 11 óra után pár perccel hivatalosan bezártuk a MANT első – és reményeink szerint hosszú ideig utolsó – virtuális űrtáborát.

(Bacsárdi László táborvezető)

CanSat Hungary – először

Augusztus 15-én tartották meg első alkalommal a BME Kozmosz Kör által, a MANT közreműködésével szervezett CanSat Hungary versenyt, amelynek főtámogatója a Külügyminisztérium volt.

Az ESA (Európai Űrügynökség) is szervez kisműhold-építő versenyt középiskolások számára. A verseny célja az, hogy középiskolások csoportjai egy fém üdítő doboz mére-

tű műholdat (CanSat) építsenek, melyet a verseny során kisebb rakétával indítanak, majd kibocsátásuk és leszállásuk folyamán különböző adatokat mérjenek. A kisműholdaknak különböző fizikai kritériumoknak kell megfelelniük, illetve egy elsődleges és másodlagos küldetést kell végrehajtaniuk. Az elsődleges küldetés egy kötelező adatmérés: a műholdnak légnyomást, illetve hőmérsékletet kell tudnia mérni. A másodlagos küldetés során egy szabadon választott mérést vagy kísérletet kell elvégezni.



Az idei CanSat Hungary versenyre 3 csapat nevezett, a budapesti CSapat (Berzsenyi Dániel Gimnázium) és a Satellite Quartet (Budapesti Piarista Gimnázium), illetve a gödöllői GLRsát (Gödöllői Református Liceum). A verseny délelőtti helyszíne a Magyar Honvédség Bakony Harckiképző Központja volt a Tatárszentgyörgyi Gyakorlótéren, innen bocsátották fel a versenyzők műholdjait kb. 1 km-es magasságba. Miután a szilárd hajtóanyagú rakéta elérte pályája tetőpontját, az orrkúpáról leváló műholdak saját ejtőernyővel szálltak le. A leszállás után a versenyzők a műholdjaikba épített GPS segítségével megkeresték CanSat-eiket, és megkezdték az adatok elemzését.

Az idei CanSat Hungary versenyre 3 csapat nevezett, a budapesti CSapat (Berzsenyi Dániel Gimnázium) és a Satellite Quartet (Budapesti Piarista Gimnázium), illetve a gödöllői GLRsát (Gödöllői Református Liceum). A verseny délelőtti helyszíne a Magyar Honvédség Bakony Harckiképző Központja volt a Tatárszentgyörgyi Gyakorlótéren, innen bocsátották fel a versenyzők műholdjait kb. 1 km-es magasságba. Miután a szilárd hajtóanyagú rakéta elérte pályája tetőpontját, az orrkúpáról leváló műholdak saját ejtőernyővel szálltak le. A leszállás után a versenyzők a műholdjaikba épített GPS segítségével megkeresték CanSat-eiket, és megkezdték az adatok elemzését.

A délelőtti indításokat egy ebéd követte, melyet a Dabas Hotelben szerveztek meg, ahol a délutáni előadások, majd az eredményhirdetés is volt. Az ebéd utáni kb. másfél órás szünet alatt készültek el az előadások, melyekben a CanSatek felépítését, továbbá a műholdak által begyűjtött adatokat prezentálták a csapatok. Az előadásokat az eredményhirdetés követte. Az első helyen a GLRsát, másodikként a CSapat, a harmadik helyen pedig a Satellite Quartet végzett. Az eseményt egy Dudás Levente által tartott előadás zárta a Masat-1-ről, illetve a SMOG-P és SMOG-1 műholdokról.

Ilyés András, volt CanSat versenyző, az idei verseny fő szervezője reméli, hogy a CanSat versenyek minél több diák érdeklődését nyerik el a közeljövőben. Szerinte a verseny erősen meghatározhatja a fiatalok érdeklődését, pályaválasztásukat, akár a mérnöki világban. Bízunk benne, hogy a versenyben való részvétel után a résztvevők műszaki-természettudományos területeken helyezkednek majd el (pl. űrmérnökség), folytatják munkáikat, és tudásukat bárhol tudják majd alkalmazni.



Nagyon jól éreztük magunkat, mindenki nagyon kedves és segítőkész volt. Sok új élménnyel és tapasztalattal gazdagodtunk. Mindenkinek nagyon szívesen ajánljuk, akár nézőként, akár versenyzőként, mert számunkra emlékezetes és inspiráló rendezvény volt.

*(Űrvilág; Somogyi Boglárka, Árok Péter,
fotó: Trupka Zoltán)*

Gábor Dénes Középiskolai Ösztöndíj

A NOVOFER Alapítvány a Műszaki Szellemi Alkotásért 2020-ban „Űr-Technológia-Föld” címmel hirdette meg középiskolásoknak szóló ösztöndíjpályázatát. Az alapítvány június 5-én, Gábor Dénes születésének 120. évfordulóján tette közzé az eredményeket, a díjakat pedig szeptember 18-án adták át a Magyar Tudományos Akadémia székházában.

A pályázat kiírás az űrtechnológiai kutatási eredmények földi hasznosításának, valamint a bolygónkon kívüli, a Föld légkörén túli világhoz kapcsolódó, már létező, vagy



még a fantázia kategóriájába sorolható jövőképekre irányult – a mérnöki teljesítményeknek és innovációknak a kutatási, a fejlesztési és hasznosítási lehetőségei tükrében. Leleményes, bátor és jól alátámasztott látomásokat és ajánlásokat vártak a diákoktól, hiszen Gábor Dénes elhíresült mondása szerint: „A jövőt nem lehet megjósolni, de a jövőnket fel lehet találni”. A vállalkozó kedvű diákok az alábbi témakörökben fogalmazhatták meg víziójukat:

- Az űrtechnológiai eredmények földi hasznosítása
- Emberek helyett robotok az űrrepülésben
- A műholdas földmegfigyelés kora
- Újra magyar személyzet az űrben

A Gábor Dénes Középiskolai Ösztöndíj 2020. évi pályázatát a Magyar Asztronautikai Társaság közreműködésével hirdették meg, a MANT szakértői részt vettek a pályamunkák elbírálásában.

(Fotó: NOVOFER alapítvány)

Űrkutatás Napja 2020, virtuális kiadásban

A Nemzetközi Világűrhet legnagyobb hazai eseményeként a MANT 2020. október 15-én tartotta az Űrkutatás Napja elnevezésű ismeretterjesztő rendezvényt. Az eredetileg a Magyar Tudományos Akadémia székházába szervezett eseményt a COVID-19 járvány miatt online közvetítés formájában szerveztük, amelyre a szakma képviselői mellett minden érdeklődőt vártunk a kibertérben. Az előadások követhetőek voltak a Galileo Webcast weboldalon, a MANT Facebook-oldalon és a Zoom platformon, azóta pedig a felvételek megtekinthetők Youtube-csatornánkon.

A téma a Nemzetközi Világűrhet (World Space Week) idei jelmondatához (Satellites Improve Life) kapcsolódóan a műholdas szolgáltatások szerepe volt mindennapi életünkben. A program levezető elnöke Both Előd, a MANT elnöke volt. Az elhangzott előadások:

Ferencz Orsolya (KKM miniszteri biztos): Áttekintés a magyar űrtevékenység jelenlegi helyzetéről

Frey Sándor (ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont): Műholdak (majdnem) mindenhol

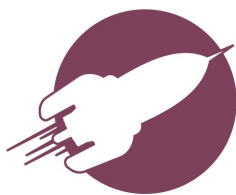
Kocsis Zsófia (Országos Meteorológiai Szolgálat Távérzékelési Osztály): A meteorológiai műholdak elsődleges felhasználási területei

Birinyi Edina (Lechner Tudásközpont Űrtávérzékelési Osztály): Űrfelvételekkel a hírek nyomában

Rózsa Szabolcs (BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék): Egy napunk GNSS nélkül

A szokásoknak megfelelően az Űrkutatás Napja alkalmával hirdettük meg a MANT 2020/2021-es tanévre szóló diákpályázatát.

Irány az űr! – többfordulós űrkutatási csapatverseny középiskolásoknak



**IRÁNY
AZ ŰR!**
Kárpát-medencei
Űrkutatási Csapatverseny

A Külgazdasági és Külügyminisztérium felkérésére és támogatásával a MANT három forduló, űrkutatási csapatversenyt szervez

magyarországi és határon túli magyar középiskolásoknak. Célja, hogy a középiskolás korosztály érdeklődését általában a természet- és műszaki tudományok, közelebbről elsősorban az űrkutatás, űrtevékenység felé fordítsa.

A tanulmányi versenyen háromfős középiskolás (9–13. osztályos) csapatok vehetnek részt. Az első (online) fordulóra 2020. november 9. és december 8. között került sor. Erre – a járványhelyzet és az online oktatás okozta nehézségek ellenére, várakozásainkat felülmúlóan – 99 csapat regisztrált, közülük 91 csapat küldött be megoldást.

A versenyt sikerült az egész Kárpát-medencére kiterjeszteni, hiszen a 91 csapat közül 11 a határon túlról (hét Erdélyből, három a Vajdaságból és egy a Felvidékről) küldött be megoldást. Budapestről 15 iskola 27 csapata vett részt a versengésben, míg vidékről 23 város 29 középiskolájából 53 csapat szállt versenybe.

Az első fordulóban a maximálisan elérhető pontszám 26 volt, a két legjobb csapat 25–25 pontot kapott. Alapos mérlegelés után a továbbjutást jelentő határt 22 pontban állapították meg, így 37 csapat jutott a második fordulóba, amelyek 3 ország 19 városának 30 iskoláját képviselik. Az első fordulóból továbbjutó csapatok 2021. január-februárban újabb online fordulóban mérik össze tudásukat, majd a legjobbak az áprilisi döntőben találkozhatnak – a járványhelyzet miatt – az első két fordulóhoz hasonlóan a virtuális térben. Az első fordulóban kieső csapatoknak a vigaszágon még lehetőségük volt egy összetettebb feladat megoldására, itt a legjobb megoldást beküldő csapat tárgynyereményben részesült.

A verseny fődíja a csapat tagjai és felkészítő tanáruk részére egy látogatás az Európai Űrügynökség (ESA) legjelentősebb létesítményében, az Európai Űrtechnológiai Központban (ESTEC), Hollandiában. A második helyezett csapat két hazai szakmai látogatáson vehet részt, egy tudományos és egy űripari műhely munkáját ismerhetik meg közelről. A harmadik helyezett csapat iskolájukat gazdagítja értékes laborfelszerelésekkel. Végül, de nem utolsósorban, minden díjazott csapat tagjai térítésmentesen vehetnek részt a MANT nyári Űrtáborában.

Dr. Abonyi Ivánnéra emlékezünk



Fotó: Almár Iván

2020. december 18-án, életének 90. évében, hosszú súlyos betegség után elhunyt Abonyi Ivánné (született Keleti Magdolna, sokunknak Magdi néni), a MANT tiszteletbeli tagja, egykori ügyvezető főtítkárhelyettese. Az 1960-as évektől kezdve egészen 2001-ig, nyugalomba vonulásáig nagy odaadással és hozzáértéssel fenntartotta egyesületünk (eleinte a KASZ, majd a MANT) működőképességét. Különleges lelkesedéssel végezte a MANT úrtáborok szervezését és vezetését. Sokáig töltött be meghatározó szerepet egyesületünk életében.

Almár Iván hosszú ideig dolgozott együtt vele, Vincze Miklós pedig úrtáborosként kapott meghatározó élményeket. Kettejük személyes visszaemlékezésével mutatjuk be Abonyi Ivánnét.

Abonyi Magdira emlékezve...

Amikor elhunyt, csaknem 90 éves volt már. Bevezetésül csak azt szeretném hangsúlyozni, hogy egyáltalán nem könnyű egy ilyen hosszú életről hiteles összefoglalást írni, kiemelni a fontosat és érzékeltetni a változó évtizedek változó körülményeit is. Különösen akkor, ha – akárcsak Magdi esetében – hiányoznak a forrásmunkák. Szerénységét mutatja, hogy talán életében egyszer sem adott interjút, de még azt sem szerette, ha fényképezik. Tehát akaratlanul is szubjektív emlékezetünkre vagyunk utalva, ha reá gondolunk. Én több mint hat évtizedig voltam barátja, legalább 25 évig dolgoztunk együtt az egyesületben és jogelődjében a MTESZ Központi Asztronautikai Szakosztályában, együtt utaztunk külföldi és belföldi konferenciákra, stb. De gyakran előfordult, hogy amikor szóba került köztünk közös múltunk valamely eseménye, akkor ő is más-ként emlékezett, én is. Ilyenkor jókat vitatkoztunk, de tudomásul vettük, hogy ilyen az élet...

Abonyi Magdit valószínűleg 1951 körül, az ELTE TTK-n ismertem meg, ahol 1950-től 1954-ig évfolyamtársak voltunk: ő a fizika–matematika tanárszakra járt, én a hasonló képzést adó matematika–fizika szakra. Sokan voltunk akkoriban az egyetemen, nem is ismertünk mindenkit az évfolyamról, de Magdi akkor már egykori gimnáziumi osztálytársamhoz, Abonyi Ivánhoz (később elméleti fizikus, egyetemi docens) tartozott, aki hamarosan feleségül is vette. Így persze megismerkedtünk, de a barátság kicsit később alakult ki.

Végzés után Magdi a TIT-hez került, ahol a matematika–fizika szakosztályban dolgozott. Ez viszonylag rövid, de fontos időszak volt életében, mert létrehozta a Kis Matematikus Köröket. Mindig büszkén emlékezett erre, mint élete legfontosabb művére. Közvetlen tapasztalataim erről az időszakról nincsenek.

1959 végén, mint ismeretes, döntő átalakuláson ment át az 1956-ban a TIT-ben alapított Magyar Asztronautikai Bizottság. Az első szputnyikok 1957. évi felbocsátása után világszerte, így nálunk is, az óriási érdeklődés miatt hivatalos szinten is kezdték komolyan venni a korábban csak álmodozásnak tekintett asztronautikát, ezért a Bizottság átkerült a Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetségéhez, mint annak első központi szakosztálya. Felügyeletünket a MTESZ egy korábbi egyetemi oktatónkra, Turi Istvánnéra bízta.

Már nem tudom, hogy melyik évtől kezdve, de Magdi hamarosan az ő beosztott munkatársa lett, és több más MTESZ bizottság mellett hozzá tartozott a KASZ is. Ekkor kezdtünk együtt dolgozni először a Szabadság téri tévészékházban, majd a MTESZ új (azóta lebontott) épületében, a Kossuth téren. Magdi irodájában sűrűn megfordultunk, ha a MTESZ felső vezetésére, vagy más tagegyesületeire tartozó problémáink, kérdéseink, javaslataink voltak. Segítségére nagy szükség volt, hiszen a 60-as, 70-es években a korábbi 20–25 fős bizottság már több száz érdeklődőt vonzó szakosztállyá (gyakorlatilag egyesületté) fejlődött. A Kossuth téri székház nagyterme fontos szerepet kapott, itt vetítettük például az űrhajózási filmeket – a szov-

jeteken kívül az Apollo-program idején (magyar „szinkrontolmácsolással”) az amerikai filmeket is.

Nem egyik napról a másikra, hanem hosszabb idő alatt a KASZ fontos szerepet játszott már a MTESZ-ben, Magdi pedig a KASZ-ban. 1972-ben, amikor elhunyt Fonó Albert elnök és Érdi Krausz György akkori ügyvezető titkárunk is, engem választott ki a MTESZ a KASZ elnökének, Magdi pedig gyakorlatilag ügyvezető titkárunk lett. Létrejötték a KASZ szakosztályai és vidéki csoportjai, és ebben neki is nagy szerepe volt. De az igazi próbatétel egy évtizeddel később a Nemzetközi Asztronautikai Kongresszus budapesti megrendezése lett, amelyben ugyancsak jeleskedett. 1981-ben együtt vettünk részt a római, 1982-ben a párizsi kongresszuson, hogy tanuljunk, kapcsolatokat építsünk és propagáljuk az 1983-as budapesti kongresszust. Ez rengeteg új feladatot jelentett, és ebből most csak egyet emelnék ki. A szokásoknak megfelelően nagyszabású fogadást kellett rendeznünk, mintegy ezer delegált részére, valami vonzó, látványos helyen. (Rómában ez a fogadás este a Capitoliumon volt.) Magdi ötlete volt, hogy vegyük rá a Nemzeti Galériát a várban arra, hogy adjon helyet a budapesti fogadásnak. Nehéz volt, de sikerült! A későbbi kongresszusok résztvevői évekig elragadtatással emlegették a pompás fogadást.

Az asztronautikai kongresszust követő évek a KASZ önálló egyesületté alakításának előkészítésével teltek, ami végül 1986 végén sikerült. Megalakult a MANT, Magdi pedig a MANT titkárságának vezetője lett. Talán ezek voltak legnyugodtabb éveink, hiszen még élveztük a MTESZ anyagi támogatását, de már önálló egyesületként működtünk – hosszabb ideig a Fő utcai MTESZ épület földszintjén. Magdit a közgyűlésünk rendszeresen megválasztotta főtitkárhelyettesnek is, és még segítője is dolgozott a titkárságon. De ez a nyugodt korszak sajnos nem tartott sokáig. A 90-es években csökkent, majd megszűnt az anyagi támogatás, a helyiségek bére és az adminisztráció kezdett elviselhetetlen terheket róni a fiatal egyesületre, amely mögött immár nem állt védő és támogató „ernyőszervezet”. Sorra kellett leépíteni az egyesületi háttérrel: a titkárnőt, a

rendelkezésre álló szobákat, a kiadványokat, stb. Szó szerint kell érteni, hogy Magdi ügyessége nélkül ezekben az években megszűnt volna egyesületünk. Kapcsolatait felhasználva valahogy mindig sikerült mentőövet találnia, és a legfontosabb programjaink (ifjúsági pályázat, úrtábor, Űrkaleidoszkóp) folytatódtak, sőt fejlődtek is.

Magdi 2001-ben, 70 éves korában nyugdíjba vonult. Úgy adta át a MANT-ot, mint életképes egyesületet. Barátságunk folytatódott, de sajnos az ő élete egy súlyos betegség következtében egyre nehezebbé vált. Fiai és unokái gondoskodásának köszönhetően nem kellett utolsó éveit kórházban töltenie, de mozgáskorlátozottsága miatt gyakorlatilag a lakásába kellett zárkóznia. Nem panaszkodott ugyan, de óriási önuralom kellett ahhoz, hogy ezeket a hosszú éveket kibírja. Utolsó találkozásunkkor még sikerült átadnom a MANT neki ajánlott új kiadványát, az „Űrtáborosaink” című könyvet. Remélem, ezzel még örömet okoztunk neki.

Almár Iván

Űrnagyikó

Dr. Abonyi Ivánné, Magdi néni valódi „egyszemélyes intézmény” volt, aki – legalábbis tizenéves korunkban nekünk, úrtáborosoknak biztosan így tűnt – hegyeket tudott megmozgatni értünk és a táborért, amelynek sikerébe szívét-lelkét beleadta. Pedig egy ilyen sajátos, korábban példátlan tehetséggondozási program elindításakor természet-szerűen akadtak gondok, szervezési nehézségek, előre nem látható helyzetek szép számmal. Ám ő valamiféle veleszületett lényeglátással küzdötte le az akadályokat lépésről lépésre, mintha csak egy trükkös fizika feladat megoldásának állt volna neki. Kedvesen, de határozottan, ha kellett rámenősen, mégis mindig elegáns módon intézte az úrtábor ügyeit. Ízig-vérig pedagógusi és mélyen emberszerető hozzáállásával sokunknak nyújtott odafordulást, megértést, jó tanácsokat, életre szóló ösztönzést.

A MANT úrtáborai és a tőlük elválaszthatatlan diák-pályázatok a sikeres tehetséggondozás és ismeretterjesztés iskolapéldáját jelentik. Könyveket lehetne sikerük titkáról

írni. Ami azt illeti, immár született is ilyen: a 2019-ben (Trupka Zoltán szerkesztésében) megjelent interjúkötet, mely fiatal kutatók profiljait mutatja be a világ minden tájáról, akikben az a közös, hogy mindannyian MANT-úrtáborozók voltak. Természetesen mindaz, ami ott olvasható, csupán egy kicsiny minta; merem állítani, hogy ezek a fantasztikus „nyári iskolák” valójában egy nagyságrenddel több egykori résztvevő életpályáját befolyásolták jelentős mértékben. S újralapozgatva most ezeket a beszélgetéseket, természetesen lépten-nyomon felbukkan Magdi néni neve.

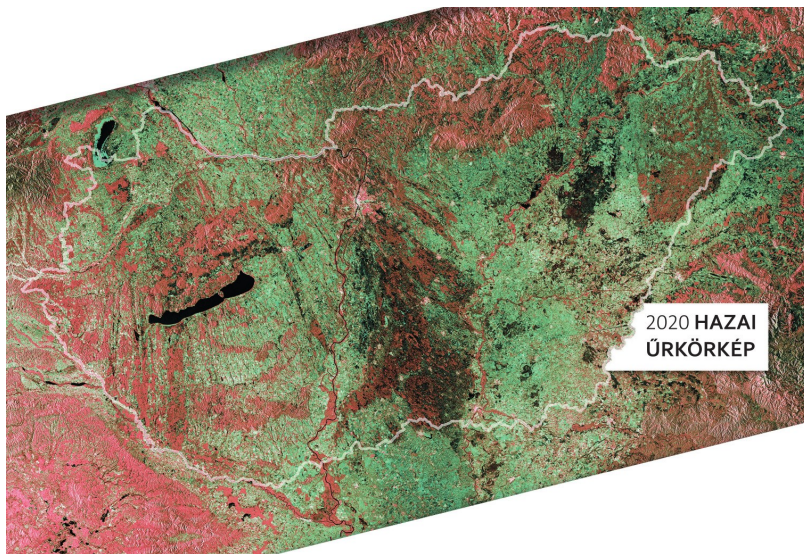
Emlékszem, 2000 májusában, a BME V2 épületében az az évi diákpályázat eredményhirdetésén valódi „sztárparádé” fogadott minket. A zsűri tagjain és az elnökségen kívül, elképesztő módon három igazi űrhajós is tiszteletét tette a díjátadón. Magdi néni és a MANT megszervezte nekünk ezt is. Persze megrohamoztuk őket, hogy írják alá az okleveleinket. Én – akkor már több úrtábor „veteránjaként” ismerve őt – Magdi nénit is megkönyékeztem, hogy ő is adjon egy autogramot. Szabadkozott, nevetett, nehezen állt kötélnek. Mert ilyen volt, mindig szeretett inkább a háttérbe húzódni. Aztán egyszer csak megjelent az arcán az az utánozhatatlan huncut mosoly, s odakanyarította az oklevél legaljára: Űrnagyikó.

Valóban, sokunknak jelentett valami ilyesmit, egy megértő, segítőkész, inspiráló „űrnagymamát”, akire mindig számíthattunk, és akinek emlékét szeretettel és hálával őrizzük. Nyugodjék békében!

Vincze Miklós

Tartalomjegyzék

Előszó	3
Válogatás az űrkutatás 2020-as eredményeiből.....	5
A kereskedelmi célú kitermelés tulajdonjogi kérdése a világűrjogban – <i>Punczman Ádám Tamás</i>	31
A Cluster kvartett hűsz éve vizsgálja a földi magnetoszférát – <i>Tátrallyay Mariella</i>	45
A holdi meteoritok szerepe Földünk égi kísérőjének kutatásában – <i>Rezes Dániel</i>	61
Napfoltcsoportok visszafejlődési sajátosságai nagy felbontású idősorok vizsgálata alapján – <i>Muraközy Judit</i>	77
A Solar Orbiter napszonda – <i>Madár Ákos, Opitz Andrea, Szalai Sándor, Kecskeméty Károly, Dósa Melinda, Erdős Géza, Tróznai Gábor</i>	87
Űrfotometria – a kialakulástól a kiteljesedésig – <i>Szabados László</i>	105
Az űrtávcsövek szerepe a planetáris asztrokémiában – <i>Futó Péter</i>	122
A Magyar Asztronautikai Társaság 2020. évi tevékenysége – beszámolók	134
Éltető csillagunk, a Nap – diákpályázatunk eredményhirdetése	136
Virtuális Űrtábor 2020	138
CanSat Hungary – előszőr	140
Gábor Dénes Középiskolai Ösztöndíj	142
Űrkutatás Napja 2020, virtuális kiadásban	143
Irány az űr! – többfordulós űrkutatási csapatverseny középiskolásoknak	144
Dr. Abonyi Ivánnéra emlékezünk	146



A MANT gondozásában, a Külgazdasági és Külügyminisztérium (KKM) Űrkutatásért és Űrtevékenységért Felelős Főosztályának támogatásával 2020 decemberében megjelent a Hazai űrkörkép 2020 című kiadvány. Célja, hogy betekintést nyújtson a hazai űrszektor sokszínű tevékenységébe, bemutatva azokat a kis- és középvállalkozásokat, kutatóhelyeket és egyetemi műhelyeket, amelyek űrkutatással és űrtevékenységgel foglalkoznak Magyarországon. Az Űrkörkép a tavaly megjelent kötet bővített, tartalmában frissített kiadása. Magyar és angol nyelvű változata elektronikus formában is elérhető a MANT honlapján.

A hátsó borítón: *rakétaindítás és a résztvevők csoportképe az első magyarországi CanSat versenyen, 2020. augusztus 15-én, a tatárszentgyörgyi gyakorlótéren. A versenyt a BME Kozmosz Kör szervezte a KKM támogatásával, a MANT segítségével.*
(Fotó: Trupka Zoltán)

