

Az ESA a jeges holdak nyomába ered: Voyage 2050

Kisvárdai Imre

Eötvös Loránd
Tudományegyetem
Természet-
tudományi Kar,
Budapest

BEVEZETÉS

Az Európai Űrügynökség (ESA) 2019. március 4-ei kezdettel kiírt egy pályázatot, amelynek keretein belül minden kutató vagy tudományos csoport előterjeszthetett egy javaslatot az ügynökség *Voyage 2050* felhívására [1,2]. A felhívás a *Cosmic Vision* tervezési szakasz lejárta utáni időszakra, azaz a 2030-as évek közepétől számított két évtizedre vonatkozott. „Most, hogy a *Cosmic Vision* határozott alakot öltött és a 2030-as évek közepéig tartó küldetéseink számára biztos tervnek tekinthető, meg kell határoznunk azt a technológiát és tudást, amelyekre szükségünk lesz az évtizedek múlva induló küldetéseinknél, és ezért kell minél hamarabb kijelölnünk tudományos témákat a *Voyage 2050* tervhez” – nyilatkozta Günther Hasinger, az ESA tudományos igazgatója. 2021. június 11-én meg is született a döntés. Ennek értelmében a majdnem 100 előterjesztett javaslatból kiválasztották a három fő témát, amelyek köré a *Voyage 2050* épülni fog.

Az első nagyszabású küldetés (*large-class mission*) témája az óriásbolygók holdjai lesznek. A nemzetközi együttműködéssel lezajlott Cassini-Huygens küldetés és az ESA hamarosan induló JUICE (*Jupiter Icy Moons Explorer*) űrszonda örökségét gyarapítva a küldetés új, fejlett eszközökkel kutatná a kapcsolatot a holdak felszín közeli környezete és belső szerkezete között, valamint az élet lehetséges előfordulását jelző biomarkereket. A küldetés részei lehetnek felszíni leszállóegységek és drónok is.

A második téma a mérsékelt exobolygóktól a Tejútrendszerig nevet viseli. Galaxisunk a sötét anyag és csillagközi anyag mellett több százmillió csillagot és bolygót tartalmaz, de az ismereteink róluk egyelőre meglehetősen hiányosak. Habár az exobolygók további kutatása kiemelt fontosságú annak érdekében, hogy Európa megőrizze vezető szerepét ezen területen a Cheops, Plato és Ariel küldetések vége után is, nehéz döntést kell hoznia az érintett tudományos közösségnek, hogy a Tejútrendszer középső, a csillagközi por miatt nehezen vizsgálható régióit vagy a mérsékelt klímával rendelkező Naprendszeren kívüli bolygókat kutassuk, mivel ezzel kapcsolatban az ESA még nem jutott elhatározásra.

A harmadik téma a korai Univerzum új vizsgálati módszereivel kapcsolatos. A témában indítani kívánt küldetések olyan alapvető fizikai és asztrofizikai kérdésekre keresik majd a választ, mint például hogy hogyan kezdődött a Világegyetem, illetve hogyan alakultak ki és fejlődtek az első kozmikus szerkezetek és fekete lyukak. Ezen kérdések megválaszolására új mérési módszereket alkalmaznak majd,

például a gravitációs hullámok nagy pontosságú észlelése vagy a kozmikus háttérsugárzás magas érzékenységgű spektroszkópai vizsgálata. A fő témák mellett számos közepes kategóriájú küldetést (*medium-class mission*) tervez az ESA a Voyage 2050 keretein belül a csillagászat, asztrometria, fizika és asztrofizika tudományterületein.

KÜLDETÉS AZ ÓRIÁSBOLYGÓK HOLDJAIHOZ

A Jupiter Galilei-holdjainak felfedezését követő három és fél évszázad során az óriásbolygó-rendszerek iránti tudományos érdeklődés mérsékelt maradt. Azonban az első, a Pioneer és Voyager űrszondák által az 1970-es és 80-as években végzett közeli megfigyelések után az irántuk mutatott érdeklődés elég nagy lett ahhoz, hogy küldetések motivációjául szolgáljanak. Kérdések merültek fel az óriásbolygók és holdjaik belső szerkezetével és a légkörük kialakulásával, fejlődésével kapcsolatban. A szakértők felismerték, hogy önmagukban is nagyon összetett rendszerekről van szó, főleg a gravitációs és elektromágneses kölcsönhatásokhoz köthető folyamataikat és a dinamikus plazma-, gáz- és porkörnyezetüket tekintve.

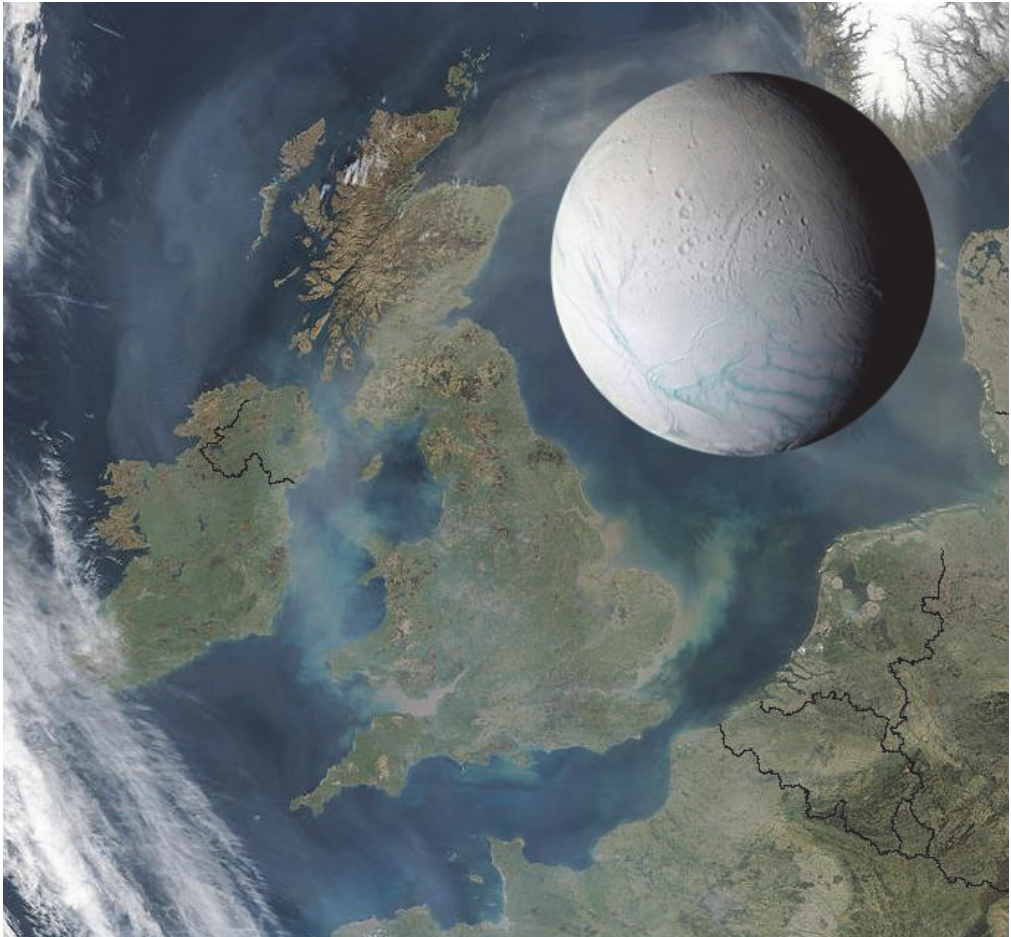
A részletes vizsgálatokhoz azonban keringőegységekre volt szükség. Az első ilyen az 1995-től 2003-ig a Jupiter körül keringő Galileo-űrszonda volt, amelyet a 2004-től 2017-ig a Szaturnusz körül keringő Cassini követett. Utóbbinak része volt a Huygens leszállóegység, a 2005-ben a Szaturnusz Titan holdjára juttatott szonda is. Ezen felfedezési hullám legmegdöbbentőbb eredményei közé tartozik a Jupiter Europa holdjának és a Szaturnusz Enceladus holdjának külső jégburka alatt elhelyezkedő vízréteg felfedezése. Ebben a két évtizedben fedezték fel az első exobolygókat is, közülük néhány óceánbolygó a naprendszerbeli jeges holdak nagy testvéreinek is tekinthető.

A Galileo és Cassini küldetések kimagasló tudományos sikereik ellenére számos megválaszolatlan kérdést hagytak maguk után. Természetesen emberi szemmel az egyik legérdekesebb kérdés a külső naprendszeri holdakon (legfőképpen az Európán és Enceladuson) az élet jelenléte. A legesélyesebb élőhelyjelöltek a Földön csak az 1970-es években felfedezett, óceánközépi hátságokban található „fekete füstölögők” lehetnek. A Cassini által kimutatott hidrogénmolekulák jelenléte, ami az Enceladus óceánjának fenekén lévő hidrotermális képződményekre utal, egy remek példa, hogy miért kell további vizsgálatokat folytatnunk a holdak élhetőségével kapcsolatban.

Minden hold egyedi és rengeteg érdekes, megmagyarázatlan jelenség figyelhető meg rajtuk. Ezek a mai technológiának köszönhetően már vizsgálható módokon kötik össze a belső összetételt, struktúrát a felszínükkel és a külső környezetükkel. A Naprendszer első és harmadik legnagyobb holdja, a Ganymedes és a Callisto rendkívül összetett belső szerkezettel rendelkeznek, amelynek része egy dinamikáját tekintve még mindig ismeretlen, mély, vízben gazdag réteg. A JUICE küldetés mindkét hold rejtélyeinek nyomába ered. A Titan különösen izgalmas égitest, mivel két folyadékréteggel is rendelkezik (egy felszín alatti óceánnal és egy felszíni szénhidrogéntengerrel), amelyek valószínűleg kriovulkanizmussal kötődnek egymáshoz. Hasonló jelenséget figyelhetünk meg az Európán és az Enceladuson, viszont a két hold esetében a rétegek közötti összeköttetést a későbbiekben – a mainál fejlettebb technológiával – közvetlenül a helyszínen, *in situ* műszerekkel is vizsgálhatjuk.

ENCELADUS

A szaturnuszi holdrendszer titkainak feltárása során számos igazán lenyűgöző dolgot fedeztek fel. Az olyanokon túlmenően, mint a metántavak a Titánon és a Halálcsillaghoz kísértetiesen hasonló hold, a Mimas, az is világossá vált, hogy a külső naprendszerbeli holdak belső óceánokat és esetlegesen földönkívüli életet is rejthetnek. Az Enceladus, a Szaturnusz hatodik legnagyobb holdja is közéjük tartozik. Rendkívül érdekes jellemzőkkel rendelkezik, például hosszú, csíkszerű kék jégpatakok, valamint csodálatos vízjéggejzírek figyelhetők meg rajta, melyeket rendszeresen észleltek a Hold déli sarkából kirobbanni. Ezek felvetik a folyékony víz lehetőségét a felszín alatt, sőt, akár az életét is. A hold átmérője 504 km, ami kisebb, mint a Budapest–Prága távolság légvonalban. A felszínén a nehézségi gyorsulás mértéke csupán százada a földiének, ennek köszönhetően juthatnak a vízjéggejzírek által kilövellt részecskék több száz kilométer magasba, illetve léphetnek ki a Szaturnusz E-gyűrűjébe.



1. kép: Az Enceladus és az Egyesült Királyság méretének összevetése. (Forrás: NASA / JPL / Space Science Institute)

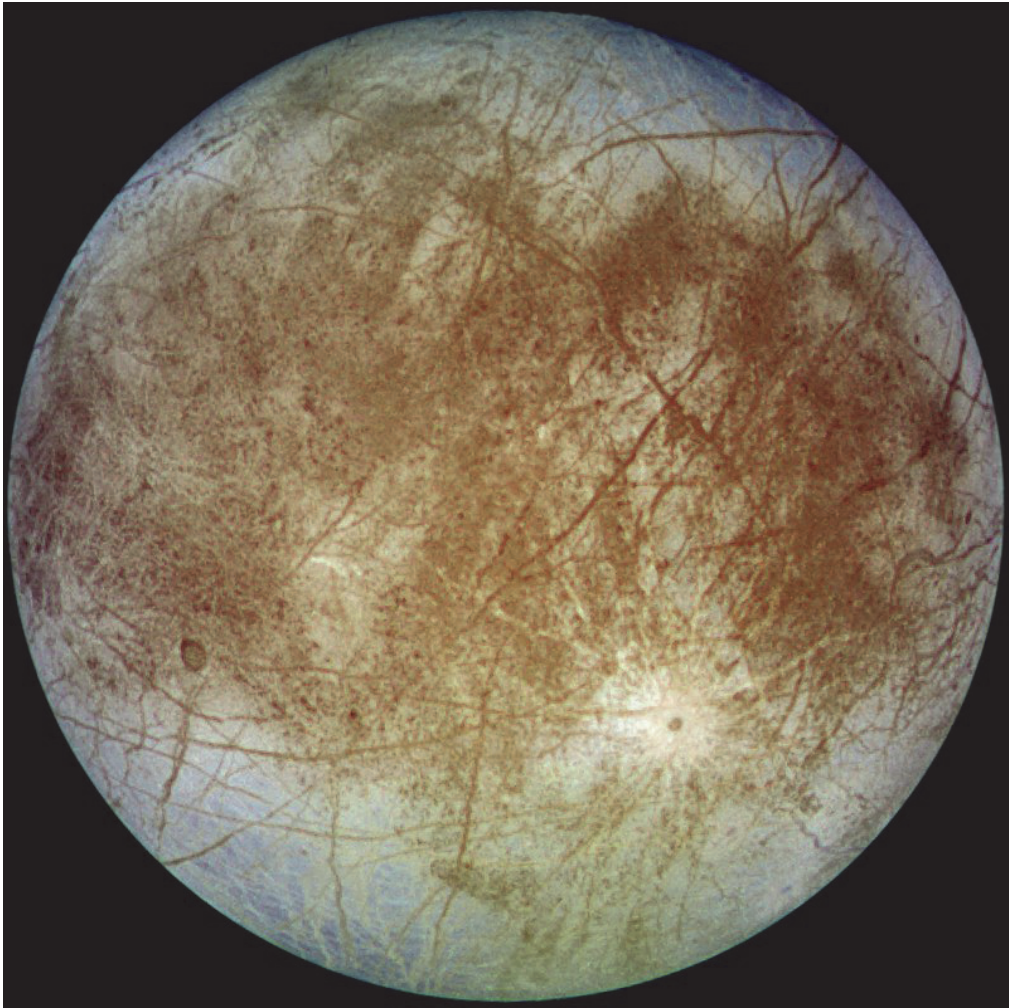
Felszíne: Az Enceladus sűrűsége $1,61 \text{ g/cm}^3$, ami nagyobb, mint a Szaturnusz többi közepes méretű, jeges holdjának. Ez arra utal, hogy nagyobb százalékban tartalmazhat szilikátokat és vasat. A síkságokat friss, tiszta jég uralja, amely az Enceladusnak a Naprendszer talán legjobban tükröződő felületét adja. Ezeken a területeken kevés kráter található, ami arra utal, hogy valószínűleg néhány százmillió évesnél fiatalabbak. A régiók viszonylagos fiatalsága azt is jelzi, hogy kriovulkanizmus és más folyamatok aktívan megújítják a felszínt. A régebbi felszín nem csak kráterekkel borított, hanem számos törést is megfigyeltek rajta – eszerint a felszín deformációnak volt kitéve a kráterek kialakulása óta. A Cassini legutóbbi megfigyelései közelebről is bepillantást engedtek a kráterek eloszlására és méretére. Ezeket a formakincseket a Nemzetközi Csillagászati Unió (IAU) az *Ezer-egyéjszaka meséi* könyvének Burton fordításában lévő szereplők és helyek után nevezte el – például Seherezáde-kráter, Diyar-síkság, vagy Anbar-mélyedés. Egyes területeken krátermentes régiók láthatók, jelezve a geológiailag közelmúltbeli jelentős felszínképződés eseményeit. A repedések, síkságok, hullámos domborzat és egyéb kéregdeformációk is jelzik, hogy az Enceladus geológiailag aktív.

Belső szerkezete: A jégtakaró alatti óceán [3] létezése tudományos vita tárgya 2005 óta, amikor a kutatók először figyeltek meg az Enceladus déli-sarki felszínéről feltörő, vízgőzt tartalmazó csóvákat. Ezek a gejzírek másodpercenként 250 kg vízgőzt képesek kilövellni akár több mint 2000 km/h sebességgel, és elérhetik a felszín feletti 500 km-es magasságot is. Nem sokkal később, 2006-ban megállapították, hogy az Enceladus kitörései a Szaturnusz E-gyűrűjének forrásai, és aktívan után pótolják azt. A Cassini-Huygens-szonda mérései szerint ezek a kilövellések nagyrészt vízgőzből, valamint olyan ritkább komponensekből állnak, mint a molekuláris nitrogén, metán és szén-dioxid. További megfigyelések egyszerű szénhidrogének, például metán, propán, acetilén és formaldehid jelenlétét igazolták. A képkötés, tömegspektrometria és magnetoszférikus adatok kombinált elemzései szerint a megfigyelt déli sarki csóva túlnyomósan felszín alatti kamrákból származhat.

A kitörések intenzitása jelentősen változik az Enceladus saját pályáján való elhelyezkedésének függvényében. Alapvetően a csóvák körülbelül négyszer fényesebbek, amikor az Enceladus apoapszisban van (a Szaturnustól legtávolabb). Ez összhangban van azokkal a geofizikai számításokkal, amelyek azt jósolják, hogy a déli sarki repedések kevésbé lesznek összenyomva apoapszisban. A Cassini-küldetés 2014-es adatai igazolták a déli sarki felszín alatti, folyékony vízből álló óceán létezését, amelynek vastagsága 40 km körüli. Emellett a 2005. július 14-i átrepülés során a Cassini-szonda a déli sarkvidéken nagy mennyiségben kiszivárgó belső hő jelenlétét is észlelte. Az itteni hőmérséklet túl magas volt ahhoz, hogy a napsugárzásnak legyen tulajdonítható, és a gejzírekkel együtt azt jelezte, hogy a bolygó belseje még mindig geológiailag aktív. A Szaturnusz körül keringő Enceladus librációjának méréseit értelmező további tanulmányok határozottan arra utalnak, hogy az egész jeges kéreg leválik a kőzetmagról, ami azt jelentené, hogy a felszín alatti óceán az egész bolygóra kiterjed.

Légkör: Az Enceladus jelentősebb légkörrel jelentkezik, mint az átlagos naprendszerbeli holdak, de az még így is nagyságrendekkel ritkább, mint a kőzetbolygók atmoszférái. A légkör forrását a periodikus kriovulkanizmusnak tulajdonítják, ami gázok és gőzök kiszökéséhez vezet a hold belsejéből. A gyenge

légkört bizonyítják a Cassini-űrszonda 2005-ben végzett magnetométeres méréseinek eredményei. Ez az ion-ciklotronhullámok fokozott teljesítményének észleléséből állt, amit ionizált részecskék és a mágneses mező kölcsönhatása okoz. A következő két találkozás során a magnetométer kutatócsoportja megállapította, hogy az Enceladus légkörében lévő gázok a déli sarkvidéken koncentrálnak, és a légkör sűrűsége a pólustól távolabb sokkal kisebb. A gejzirkilövellések tartalmához hasonlóan az atmoszféra is elsősorban vízgőzből áll (91%), de kisebb koncentrációban más komponensek, például molekuláris nitrogén (4%) és szén-dioxid (3,2%) jeleit is detektálták. Bizonyítékot találtak egyszerű, kis szénatomszámú szénhidrogénekre is, amelyek metán (1,7%), valamint nyomokban propán, acetilén és formaldehid formájában vannak jelen.



2. kép: A Galileo által készített kép az Europa Jupiter felőli oldaláról. (Forrás: NASA / JPL / Space Science Institute)

EUROPA

A 3100 km-es egyenlítői átmérőjével az Europa kb. 10%-kal kisebb, mint a Föld holdja. Tehát ha a mi Holdunkat kicserélnénk az Európára, nagyjából ugyanakkora méretűnek tűnne az égen, de fényesebben ragyogna, mivel az Europa felszíne vízjégből áll, ezért majdnem hatszor több fényt ver vissza. Az Europa a Jupiter körül a bolygótól átlagosan körülbelül 671 ezer kilométerre kering, amely maga nagyjából 780 millió kilométerre, vagyis 5,2 csillagászati egységre kering a Nap körül. A holdat először Galileo Galilei észlelte 1610-ben. Emiatt az Európát és a Jupiter másik három nagy holdját – az Iót, a Ganymedest és a Callistót – Galilei-holdaknak is nevezzük.

Az első vízre utaló jeleket a hold felszíne alatt csak 369 évvel később vették észre, amikor a két Voyager szonda átrepült a Jupiter rendszerén, elkészítve az első részletes képeket. A rövid átrepülés után az Europa magára maradt 1995-ig, amikor is a Galileo-űrszonda lett az első, amely a Jupiter körül keringett. Nyolc éven keresztül volt pályán, és a rendelkezésünkre álló legrészletesebb Europa-adatokat szolgáltatta. A Galileo-szondát 2016-ban a Juno követte, amely jelenleg is a Jupiter körül kering. Eddig még nem került olyan közel az Európához, mint a Galileo, de a tervek szerint 2022 végén mindössze 320 kilométerrel repül el a hold felszíne felett.

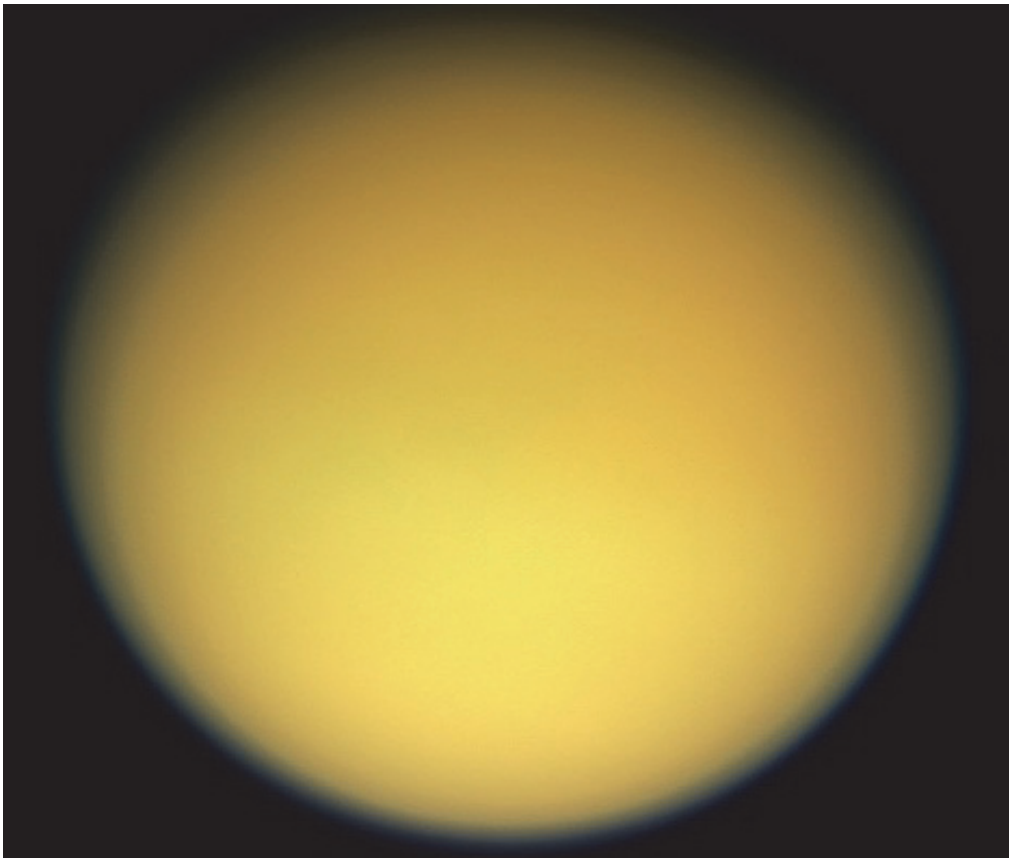
Felszíne: Az Enceladushoz hasonlóan az Europa jeges felszínét is hosszú, lineáris törések keresztezik. A megfigyelhető kráterek kis száma alapján a kutatók arra következtetnek, hogy a hold felszíne nem haladja meg a 40–90 millió éves kort, ami geológiai értelemben fiatalnak számít (a becslések szerint a Callisto, a Jupiter másik holdjának felszíne több milliárd éves lehet). A hold számos repedésénél és a felületén foltokban vörösesbarna anyag figyelhető meg, amelynek összetétele pontosan nem ismert, de valószínűleg sókat és kénvegyületeket tartalmaz, amelyek a jéggel keveredtek és sugárzás hatására módosultak. A Galileo érdekes mélyedéseket és dombokat fedezett fel, amelyek arra utalnak, hogy az Europa jégrétege lassan kavarog vagy áramlik (a hűvösebb, sűrűbb jég lesüllyed, míg a melegebb, kevésbé sűrű jég felemelkedik) az alulról érkező hő hatására [4]. A hosszú, lineáris törések gyakran csak 1–2 kilométer szélesek, de több ezer kilométer hosszúak is lehetnek az Europa felszínén. Némelyik több száz méter magas gerincként emelkedik ki. A Galileo „káoszrégióknak” nevezett felszínformákat is felfedezett, ahol a töredezett, táblás tájakat titokzatos vöröses anyag borítja. A szonda mérési adatait tanulmányozó kutatók 2011-ben arra jutottak, hogy a káoszrégiók olyan helyek lehetnek, ahol a felszín összeomlik a jégbe ágyazott, lencse alakú tavak felett.

Belső szerkezet: A bolygónkhoz hasonlóan az Európának is vasmagja, szilikátköpenye és sós vizű óceánja van. A Földtől eltérően azonban az Europa óceánja egy valószínűleg 15–25 km vastag jéghéj alatt fekszik, és becsült mélysége 60–150 km. Míg a belső óceán létezésére utaló bizonyítékok erősek, a biztos megerősítéshez egy jövőbeli küldetés szükséges. A Galileo-űrszonda egyik legfontosabb mérési eredménye megmutatta, hogy a Jupiter mágneses tere miként változik meg az Europa körül. Az eredmények szerint egy speciális mágneses mezőt indukál az Európában a felszín alatti elektromosan vezető folyadék mély rétege. Az Europa jeges összetétele alapján a kutatók úgy vélik, hogy ennek a mágneses térnek a legvalószínűbb forrása egy globális sós vizű óceán. Ez a mérés a mai napig a legmeggyőzőbb bizonyítékunk a felszín alatti óceán létezésére.

Légkör: Sokáig azt hittük, hogy az Európán csak gyenge oxigén atmoszféra van, de 2013-ban a NASA bejelentette, hogy a Hubble-űrtéleszkópot használó kutatók bizonyítékot találtak arra, hogy az Europa aktívan vizet lövell ki az űrbe. Ez azt jelenti, hogy a hold most is geológiailag aktív. Ha az utólagos megfigyelések megerősítik, a vízcsóvákat a jövő küldetése is tanulmányozhatják, hasonlóan ahhoz, ahogy a Cassini mintát vett a Szaturnusz Enceladus holdjának csóvájából

TITAN

A Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titan egy jeges világ, amelynek felszínét teljesen eltakarja az aranyló ködös légkör. A Titan Naprendszerünk második legnagyobb holdja, nála csak a Jupiter Ganymedes holdja nagyobb, mindössze 2%-kal. A 2575 km sugarú Titan a Föld holdjánál, de még a Merkúr bolygónál is nagyobb. A Titan körülbelül 1,2 millió kilométerre van a Szaturnustól, amely maga kb. 1,4 milliárd kilométerre kering a Naptól, vagyis 9,5 csillagászati egységre. A Titannak 15 napra és 22 órára van szüksége a Szaturnusz körüli teljes pályájának megtételéhez. A Titan is kötötten kering a Szaturnusz körül, ami azt jelenti, hogy a Holdhoz hasonlóan a Titan is mindig ugyanazt az „arcát” mutatja a bolygónak.



3. kép: A Titanról a Cassini által 2005. február 15-én készített kép. (Forrás: NASA / JPL)

Felszíne: A Titan felszíne a Föld felszínéhez egyik leginkább hasonlító hely a Naprendszerben, bár sokkal alacsonyabb hőmérsékleten és eltérő kémiai összetétellel. Itt olyan hideg van (–179 Celsius-fok), hogy a vízjég a kőzet szerepét tölti be. A Titan holdon lehet vulkáni tevékenység is, de olvadt kőzet helyett folyékony víz tölti be a láva szerepét. A Titan felszínét az áramló metán és etán formálja, ezek vájtak folyóvölgyeket, és töltenek meg nagy tavakat folyékony szénhidrogénnel. A Földön kívül a Naprendszerben egyetlen bolygónak sincs ilyen komplex folyadékrendszer a felszínén. Sötét dűnék hatalmas régiói húzódnak a Titanon, elsősorban az egyenlítői régiók körül. Ezekben a dűnékben a „homok” sötét szénhidrogén-szemcsékből áll, amelyekről azt feltételezik, hogy úgy nézhetnek ki, mint a kávézacc. Külsőleg a magas, vonalas dűnék nem különböznek az afrikai Namib-sivatagban láthatóktól. A Titanon kevés megfigyelhető becsapódási kráter van, ami azt jelenti, hogy felszínének viszonylag fiatalnak kell lennie, és a folyamatok bizonyos kombinációi eltüntetik a becsapódások bizonyítékait. Ebből a szempontból is hasonló a Földhöz; bolygónk krátereit az áramló folyadék, a szél, valamint a kéreg lemeztektonikával történő pusztulásának ereje törli el. Ezek az erők a Titanon is jelen vannak, csak más formában.

Belső szerkezet: A Titan belső szerkezete nem teljesen ismert, de a Cassini-Huygens-küldetés adatain alapuló modell szerint a Titannak öt rétege lehet. A legbelső réteg egy kb. 4000 km átmérőjű kőzetmag, felette egy vízjéghéj található. A nagynyomású jeget sós, folyékony vízzréteg veszi körül, melynek tetején vízjég külső kérgé fekszik. Ezt a felületet olyan szerves molekulák vonják be, amelyek eső vagy más módon homok és folyadék formájában leülepedtek a légkörből. A felszínt sűrű légkör övezi.

Légkör: Naprendszerünk több mint 150 holdnak ad otthont, és ezek közül a Titan az egyetlen hold vastag légkörrel. A Titan felszínén a légnyomás kb. 60%-kal nagyobb, mint a Földön – nagyjából ugyanakkora nyomást érezne az ember, mintha 15 méter mélyen úszna. Mivel a Titan kisebb tömegű, mint a Föld, gravitációja nem vonzza olyan erősen a légkörét, így az a földről képest 10-szer magasabbra tud emelkedni. A Titan atmoszférája nagyrészt nitrogénből (kb. 95%) és metánból (5%) áll, kis mennyiségű egyéb szén alapú vegyületekkel keverve [5]. Magasan a hold légkörében a metán és a nitrogén molekulákat a Nap ultraibolya fénye és a Szaturnusz mágneses mezeje által felgyorsított, nagy energiájú részecskék hasítják szét. Ezeknek a molekuláknak a darabkái újraegyesülnek és különféle szerves anyagokat hoznak létre. Ezek a molekulák egyfajta szmogot keltenek – sűrű, narancssárga színű ködöt, amely megnehezíti a hold felszínének vizsgálatát. A nehéz, szénben gazdag vegyületek egy része leülepedik a hold felszínén, és a „homok” szerepét tölti be a Titan hatalmas dűnemezeiben. A metán pedig felhőkké kondenzálódik, amelyek időnként metánesőkkel áztatják a felszínt. A Titan légkörében lévő metán az, ami lehetővé teszi a bonyolult légköri kémiai folyamatokat, de eredete továbbra is rejtély marad. Mivel a napfény folyamatosan lebontja a hold légkörében, valamilyen forrásnak pótolnia kell azt, különben idővel kimerül. A kutatók azt gyanítják, hogy a metánt kriovulkanizmus juttathatja a Titan légkörébe, de az elmélet még nem bizonyított.

A VOYAGE 2050 CÉLJAI – AZ ÉLET NYOMÁBAN

A Szaturnusz és a Jupiter összes holdja egy összetett bolygórendszer része, amelyek megismeréséhez át kell lépnünk a múltbeli és a folyamatban lévő küldetések határain. A holdak egymással kölcsönhatásban álló rétegekből állnak, a magtól az exoszféra át a magnetoszféráig. Például a Ganymedes a

mágneses mezőjével saját magnetoszférát alkot a Jupiterén belül. A Titan felszíne és légköre is a környező plazma és mágneses mező nagy amplitúdójú ingadozásainak van kitéve. Az Enceladus csóvája is kölcsönhatásba lép a plazmával és ez egy áramlási rendszer kialakulásához vezet, amely a Szaturnusz „sarki fényeit” okozza. E folyamatok kutatása nem csak azért fontos, hogy megértsük a mai állapotokat, hanem azért is, hogy megismerjük a potenciálisan lakható égitestek eredetét és fejlődését. A külső Naprendszer sok holdja, köztük a legkisebbek is, szerves anyagokat tartalmaznak. Azonban a legnagyobb jeges holdak és az Enceladus sokkal nagyobb jelentőséggel bírnak az asztrobiológiai vizsgálatokat tekintve, mivel kielégítik a lakhatóság minden előfeltételét: folyékony víz, hőenergia, összetett kémiai folyamatok és szerkezeti stabilitás [6]. Az összetett kémiai reakciók megindulása szempontjából kulcsfontosságú a folyékony víz érintkezése az égitestben lévő szilikát kőzetekkel. A belső szerkezet ismerete tehát alapvető szerepet játszik annak megítélésében, hogy mennyire kedvezőek a feltételek az összetett kémiai folyamatokhoz. A Voyage 2050 küldetése a jeges holdak alábbi kérdéseinek megoldásaira fognak irányulni:

- Az óceánbolygók lakhatósága, a belső szerkezet jellemzése, a felszín alatti óceánok, és a holdak teljes topográfiájának feltérképezése, erre alkalmas műszerekkel.
- Biomarkerek keresése és a prebiotikus kémiai folyamatok azonosítása a felszínen, a légkörben és az óceánbolygók belsejében távérzékeléssel, illetve *in situ* módszerekkel.
- A belső és a felszíni környezet kapcsolatának vizsgálata, különös tekintettel ennek mechanizmusára.
- A Ganymedesnél a JUICE, az Europa esetében az Europa Clipper foglalkozik e kérdésekkel. A Voyage 2050 küldetés ezért főleg más jeges holdakat célozna meg, különösen a Titant és az Enceladust, de akár egy kisebb küldetés az Európát is érintheti.

A technológia várhatóan nem jelent majd nagy kihívást a keringőegységek elkészítésével és pályára állításával kapcsolatban. A napelemes technológia fejlesztése kulcsfontosságú volt az ESA programjában az elmúlt években, és ennek köszönhetően nagyobb energiaigényű, fejlettebb műszerek is felszerelhetők a szondákra. Habár a felszín közvetlen vizsgálata örvend a legnagyobb tudományos érdeklődésnek, ez nagy technológiai kihívást jelent. Az ESA terveiben emiatt fontos szerepet tölt be az ezt lehetővé tevő eszközök kifejlesztése, a minél nagyobb tudományos siker érdekében.

Irodalomjegyzék

- [1] *Call for White Papers for the Voyage 2050*, <https://www.cosmos.esa.int/documents/1866264/1866292>
- [2] *Cosmic Vision Overview*, <https://sci.esa.int/web/cosmic-vision/-/46510-cosmic-vision>
- [3] Choblet G. et al. (2017): *Powering prolonged hydrothermal activity inside Enceladus*. *Nature Astronomy*, 12, 84
- [4] Lowell R.P. et al. (2005): *Hydrothermal systems on Europa*. *Geophysical Research Letters*, 32, L05202
- [5] Niemann H.B. et al. (2005): *The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe*. *Nature*, 438, 779
- [6] Pál B. (2019): *Lakhatóak lehetnek a jégbolygók is*. <https://www.csillagaszat.hu/hirek/lakhatóak-lehetnek-a-jégbolygók-is/>

Fiatal csillagok vizsgálata a Gaia űrtávcső adatai alapján

FIATAL CSILLAGOK FÉNYESSÉGVÁLTOZÁSAI

A Naphoz hasonló csillagok molekulafelhőkben születnek gravitációs összeomlás során [1,2]. A felhő összeomlása következtében kialakuló protocsillagra folyamatosan áramlik az anyag a környezetéből, és egy, a protocsillagot körülvevő akkréciós (tömegbefogási) korongból hullik a csillagkezdemény felszínére. Az anyaggyűjtés folyamata közben a behulló anyag egy része a protocsillag pólusaitól kifelé áramlik kifúvások formájában, aminek hatására a protocsillag a környezetében lévő anyagot eltakarítja. Ennek a folyamatnak az időskálája körülbelül 100 000 év. A protocsillagban beindul a deutérium fúziója. Az így kialakult T Tauri típusú fiatal csillag (2 naptömeg alatt) már optikai tartományban is látható.

A fiatal csillagok nagy része fényességváltozásokat produkál napos, hetes vagy hónapos időskálán [3]. A fényességváltozások többféle fizikai okra vezethetők vissza. A periodikus változások egy része abból ered, hogy a csillagot a korongban lévő anyag egy része időnként elfedi, és ez a fényesség periodikus csökkenéséhez vezet. Ennek egyik prototípusa az AA Tauri. A fényességváltozások más része abból ered, hogy a korongból az anyag nem egyenletesen áramlik a csillagra. Ez a jelenség napos-hetes változásokat okoz a fiatal csillagok fényességében kis, néhány tized magnitúdós amplitúdóval. A fiatal csillagok egy része hosszabb távú fényességváltozást is mutat, éves-évtizedes időskálán, 2-5 magnitúdós amplitúdóval. Ezek az eruptív fiatal csillagok, ahol a kifényesedést az okozza, hogy egy instabilitás hatására az akkréciós korongból a csillagra hulló anyag mennyisége ideiglenesen megnő [4].

Az eruptív fiatal csillagoknak két főbb típusát különböztetjük meg. Az EXor típusú eruptív fiatal csillagok éves időskálájú, 2-4 magnitúdós amplitúdójú kifényesedést produkálnak, amelyek néhány évenként megismétlődnek [5]. A FUor típusú eruptív fiatal csillagok akár 5 magnitúdót is fényesednek, és évtizedekig a kitörés állapotában maradnak [4]. A FUor és EXor típusokon kívül más, köztes állapotú eruptív fiatal csillagok is léteznek. A fénygörbe azonban önmagában még nem elegendő a fiatal csillagok klasszifikálására. Különösen a kifényesedés kezdeti fázisában optikai és közeli infravörös spektroszkópia szükséges. Az egyik alapvető különbség a FUor és EXor típusú csillagok között, hogy míg az előbbiek spektrumában jellemzően abszorpciós vonalak vannak, az utóbbiakéban emissziós vonalak. Mindkét típus az epizodikus akkréció (tömegbefogás) példája, ami a csillagkeletkezés egyik alapvető problémájára, az úgynevezett luminozitás-problémára adhat megoldást. Eszerint a fiatal csillagok átlagosan egy magnitúdóval halvá-

Nagy Zsófia,
Ábrahám Péter,
Kóspál Ágnes,
Szabados László,
Fernando Cruz-
Sáenz de Miera,
Eleonora Fiorellino,
Kiss Csaba,
Kun Mária,
Marton Gábor,
Sunkyoung Park,
Michał Siwak,
Szabó Zsófia,
Szegedi-Elek Elza

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

nyabbak, mint amilyenek az elméleti modellek alapján várnánk [6]. Ha minden fiatal csillag átmegy egy eruptív fázison, az epizodikus akkréció megoldást jelent a luminozitás-problémára.

A fiatal csillagok fényességváltozásának tanulmányozásához a fényességük rendszeres mérése szükséges. Ehhez segítséget nyújtanak az égboltfelmérő programok, amelyekből jelenleg több is működik. A Zwicky Transient Facility (ZTF) kétnapos gyakorisággal készít felvételt optikai tartományban az északi égboltról. Az All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) a Föld több pontjáról méri az eget 24 távcsővel, és 9 és 18 magnitúdó közötti objektumok fényességéről szolgáltat adatokat. Az Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) felmérés a chilei Las Campanas Observatórium 1,3 méter átmérőjű távcsőjével történik. Ezek a felmérések vagy csak az égbolt egy meghatározott részére koncentrálnak (ZTF, OGLE), vagy inkább a fényesebb objektumok detektálására alkalmasak (ASAS-SN). A következőkben bemutatandó Gaia űrtávcső égboltfelmérése az előbb felsoroltakkal szemben az egész égboltot lefedi és halványabb objektumok detektálására is alkalmas.

A GAIA ŰRTÁVCSŐ ÉS A GAIA SCIENCE ALERTS RENDSZER

Az Európai Űrügynökség (ESA) által üzemeltetett Gaia asztrometriai űrtávcső 2014 óta szolgáltatja több mint egymilliárd csillag pontos pozíció- és fényességadatait. A 68 cm átmérőjű tükörrel ekvivalens fénygyűjtő képességű űrtávcső 3 és 20,7 magnitúdó közötti fényességű csillagok mérésére alkalmas.

A Gaia adatait nagyjából kétevenként publikálják, kivéve azokról a forrásokról, amelyek hirtelen fényességváltozáson mennek keresztül. A rövid idő alatt kifényesedő vagy elhalványodó csillagok fénygörbéjét a Gaia Science Alerts (tudományos riasztás) rendszerben (<http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/home>) publikálják [7], amivel lehetővé teszik, hogy ezeket az objektumokat más műszerekkel is megfigyelhessük, fotometriai és spektroszkópiai módszerekkel. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (CSFK) Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetében működő egyik csoportban azt vizsgáljuk, hogy a Gaia Science Alerts rendszerben nyilvánosságra hozott objektumok közül melyek a fiatal csillagok, illetve hogy mi a fényességváltozások fizikai eredete.

A Gaia Science Alerts adatbázisához használt algoritmus azonban kezdetben nem volt elég hatékony a fiatal csillagok fényességváltozásainak azonosításában, mivel más típusú objektumok alapján fejlesztették ki. Kutatócsoportunk egy része így egy ESA szerződés keretében továbbfejlesztette a Gaia Science Alerts rendszerhez használt algoritmusokat, hogy a fiatal csillagok jellegzetes fényváltozásait jobban felismerjék. Ennek eredményeképpen néhány év alatt jelentősen nőtt a fiatal csillagok aránya a riasztásokon belül.

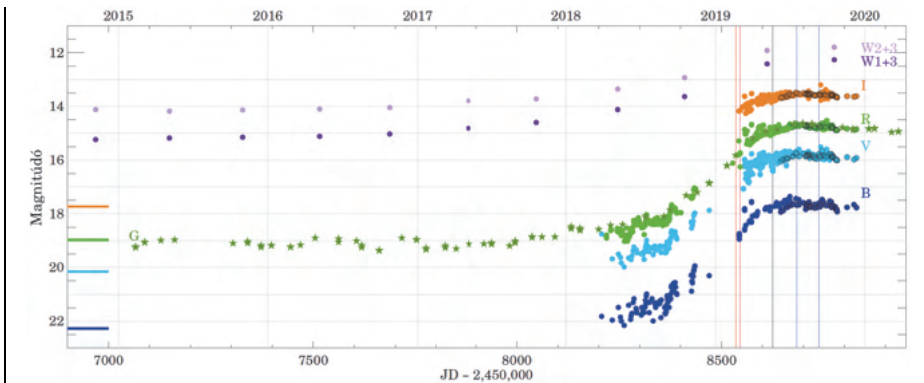
A GAIA SCIENCE ALERTS RENDSZERBEN KÖZZÉTETT FIATAL CSILLAGOK FOTOMETRIÁJA ÉS SPEKTROSKÓPIÁJA

Ha a Gaia Science Alerts rendszer egy potenciális fiatal csillagra riasztást ad, a meglévő, nyilvános archívumokban található adatok adnak arra vonatkozó információt, hogy a riasztott objektum valóban fiatal csillag-e. Amennyiben igen, további méréseket gyűjtünk, hogy a fényességváltozások fizikai okát felderítsük. A csillag fényességét mérjük optikai tartományban 1 méter körüli átmérőjű távcsövekkel, többek

között a Piskésetetői Observatóriumból, illetve a lengyelországi Mount Suhora Observatóriumból. Erre azért van szükség, mert a Gaia Science Alerts rendszer átlagosan havonta egy adatpontot szolgáltat csillagonként, valamint a mérés csak egyetlen széles sávú színszűrővel történik, míg az asztrofizikai vizsgálatok általában többszín-fotometriát igényelnek. Az optikai fotometria mellett fontos, hogy a csillagok fényességét közeli infravörösben is mérjük, erre a célra elsősorban a Kanári-szigeteken és Chilében található távcsöveket használunk. A csillag fényességének mérése mellett fontos, hogy a csillag spektrumát is mérjük, mind optikai, mind közeli infravörös tartományban. Az általunk használt műszerek között van a Nordic Optical Telescope (NOT, La Palma, 2,56 m átmérő), a Telescopio Nazionale Galileo (TNG, La Palma, 3,58 m), a Gran Telescopio Canarias (GTC, La Palma, 10,4 m), a Liverpool Telescope (Tenerife, 2,0 m), a New Technology Telescope (NTT, La Silla, 3,58 m), a Large Binocular Telescope (LBT, Arizona, 8,4 m), a Very Large Telescope (VLT, Cerro Paranal, 8,2 m) és az Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, San Pedro de Atacama) távcsőrendszer. Ezeket a kutatásokat – a távcsőidőre benyújtott pályázatok írásától kezdve az adatok elemzéséig – több nemzetközi együttműködés részeként végezzük. A legfontosabb együttműködéseink a következő intézetek munkatársaival vannak: INAF-Osservatorio Astronomico di Roma (Olaszország), Varsói Egyetem (Lengyelország) és California Institute of Technology (USA).

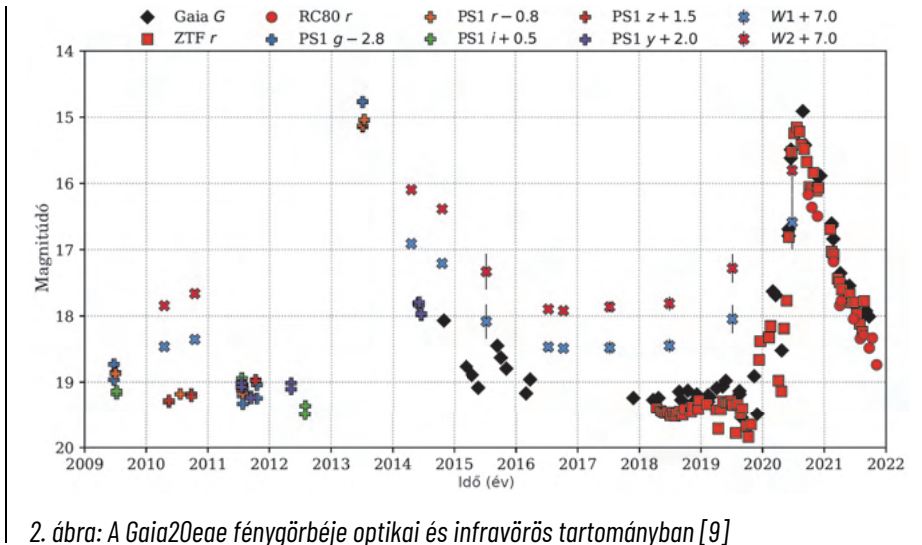
Csoportunk több Gaia riasztáshoz kapcsolódó fiatal csillag adatait elemezte, a következőkben ezek egy részét ismertetjük.

A Gaia18dvy több mint 4 magnitúdót fényesedett 2018 és 2019 során optikai tartományban (1. ábra). A fényesedés amplitúdója és időskálája egy FUor típusú eruptív fiatal csillagra utalt [8]. A csillag FUor eredetének igazolása optikai és közeli infravörös spektroszkópiával történt.

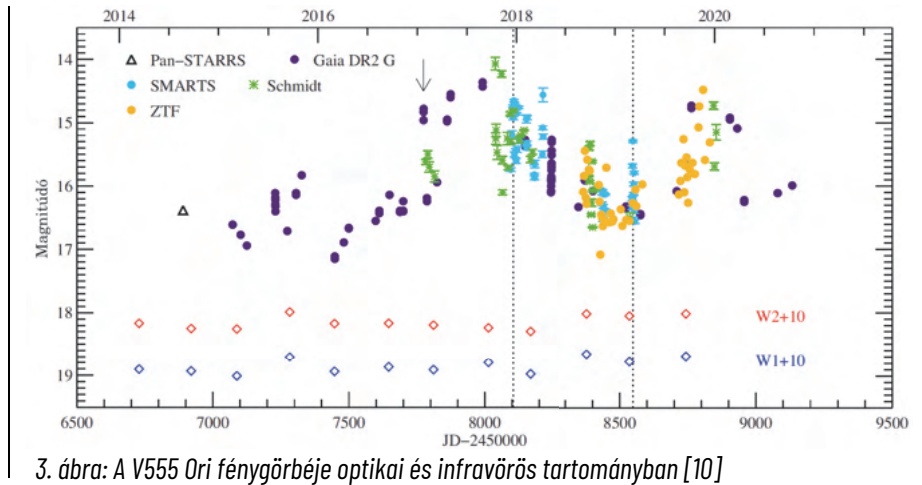


1. ábra: A Gaia18dvy fénygörbéje optikai (B,V,G,R,I) és infravörös (W1,W2) tartományban [8]

Egy másik Gaia riasztásban szereplő forrás, a Gaia20eae az eruptív fiatal csillagok másik típusába sorolható: egy EXor [9]. Ez a forrás 2020-ban 3 magnitúdót fényesedett, és archív adatok alapján egy korábbi hasonló kifényesedése is azonosítható volt (2. ábra). A fényesedés amplitúdója és a kitörés ismétlődése EXorra utalt. Az optikai és közeli infravörös spektrumok is megerősítették ezt a következtetést: a Gaia20eae spektruma nagyon hasonló az EXor típusú eruptív fiatal csillagok prototípusa, az EX Lupi spektrumához.

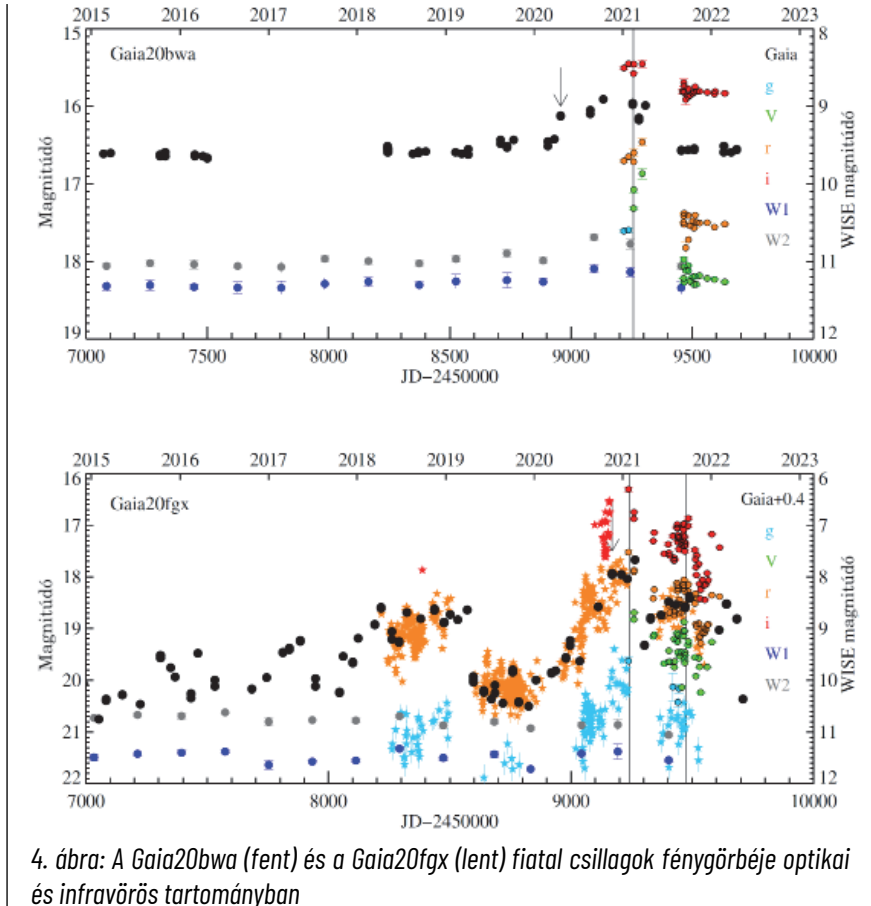


A V555 Ori nevű T Tauri típusú csillag 1,5 magnitúdós fényesedése miatt került be a Gaia riasztások közé (Gaia17afn) 2017-ben. A fényesedés időskálája körülbelül egy év volt, és a kifényesedés 2019–2020 fordulója körül megismétlődött (3. ábra). Bár a fényesedés időskálája és amplitúdója alapján egy EXor típusú fiatal csillag is lehetett volna, a mérések alapján sikerült igazolni, hogy másról van szó [10]. A fénygörbék egy része ugyanis néhány napos kvázi-periodikus fényességingadozást is mutatott. Ez a jelenség tipikus tulajdonsága az AA Tauri típusú csillagoknak, amelyeknél az akkréciós korong egy része a csillagot periodikusan elfedi. Az összes fotometriai és spektroszkópiai mérés erre a következtetésre vezetett.



A Gaia20fgx és Gaia20bwa fiatal csillagok hasonló időskálájú, nagyjából egyéves kifényesedést mutattak. A Gaia20bwa kifényesedésének amplitúdója 0,5 magnitúdó volt, a Gaia20fgx esetében pedig 2,5 magnitúdó. Az időskála alapján mindkét csillag kifényesedése utalhatna EXor típusú eruptív fiatal

csillagra, míg a fényesedés amplitúdója alapján a Gaia20fgx esetén valószínűbb, hogy eruptív fiatal csillag (4. ábra). Ezeknél a forrásoknál is a spektroszkópia adta meg a hiányzó információt. Az optikai és közeli infravörös spektrumok alapján becslést végeztünk az akkréciós ráta értékére, vagyis arra, hogy egységnyi idő alatt mennyi anyag hullik a csillag körüli korongból a csillagra. Azt találtuk, hogy az akkréciós ráta nem volt olyan magas, mint az eruptív fiatal csillagoknál, hanem ahhoz hasonló, mint amit más, nagyjából ekkora tömegű T Tauri típusú fiatal csillagoknál mértek. Így a Gaia20bwa és Gaia20fgx a hasonlóságuk ellenére nem eruptív fiatal csillagok.



ÖSSZEFOGLALÁS

A Gaia Science Alerts rendszer már az eddigi eredmények alapján is sikeresnek bizonyult fiatal csillagok fényességváltozásának azonosításában. A rendszer által riasztott források között több érdekes fiatal csillagot azonosítottunk: egy FUor típusú eruptív fiatal csillagot (Gaia18dvy), egy EXor típusú eruptív fiatal csillagot (Gaia20eae), két olyan fiatal csillagot, amelyek éves időskálájú kifényesedést

mutatnak, de nem sorolhatók az eruptív fiatal csillagok közé (Gaia20bwa és Gaia20fgx), illetve egy AA Tauri típusú fiatal csillagot (V555 Ori).

A Gaia Science Alerts keretében meghirdetett csillagok ugyanakkor csak egy kis részét képezik a Gaia mérései alapján eddig közzétett adatállománynak. A Gaia Archívumban (<https://gea.esac.esa.int/archive/>) elérhető asztrometriai és fotometriai adatokat elemezve csoportunk más fontos eredményeket is elért a fiatal csillagokkal kapcsolatban [11,12].

A Gaia űrtávcső még évekig szolgáltatja majd az adatokat Tejútrendszerünk csillagainak fényességéről és távolságáról, sok érdekes eredmény várható még, többek között fiatal csillagokról is.

Köszönetnyilvánítás

A csoport kutatómunkáját az ESA PRODEX 4000132054-es számú projekt (PI: Marton Gábor), illetve a European Research Council (ERC) Horizon 2020 kutatási és innovációs programja (716155 projekt, SACC-RED, PI: Kóspál Ágnes) támogatja.

Irodalomjegyzék

- [1] Shu F.H., Adams F.C., Lizano S. (1987): *Star formation in molecular clouds: observation and theory*. *Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics*, 25, 23
- [2] André P., Ward-Thompson D., Barsony M. (1993): *Submillimeter Continuum Observations of rho Ophiuchi A: The Candidate Protostar VLA 1623 and Prestellar Clumps*. *The Astrophysical Journal*, 406, 122
- [3] Hillenbrand L.A., Findeisen K.P. (2015): *A Simple Calculation in Service of Constraining the Rate of FU Orionis Outburst Events from Photometric Monitoring Surveys*. *The Astrophysical Journal*, 808, 68
- [4] Audard M. et al. (2014): *Episodic Accretion in Young Stars*. In: *Protostars and Planets VI*, ed. H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, T. Henning, University of Arizona Press, Tucson, 387
- [5] Herbig G.H. (2008): *History and Spectroscopy of EXor Candidates*. *The Astronomical Journal*, 135, 637
- [6] Dunham M.M. et al. (2013): *The Luminosities of Protostars in the Spitzer c2d and Gould Belt Legacy Clouds*. *The Astronomical Journal*, 145, 94
- [7] Hodgkin S.T. et al. (2021): *Gaia Early Data Release 3. Gaia photometric science alerts*. *Astronomy & Astrophysics*, 652, A76
- [8] Szegedi-Elek E. et al. (2020): *Gaia 18dvy: A New FUor in the Cygnus OB3 Association*. *The Astrophysical Journal*, 899, 130
- [9] Cruz-Sáenz de Miera F. et al. (2022): *Recurrent Strong Outbursts of an EXor-like Young Eruptive Star Gaia20eae*. *The Astrophysical Journal*, 927, 125
- [10] Nagy Z. et al. (2021): *Dipper-like variability of the Gaia alerted young star V555 Ori*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504, 185
- [11] Marton G. et al. (2019): *Identification of Young Stellar Object candidates in the Gaia DR2 x AllWISE catalogue with machine learning methods*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487, 2522
- [12] Szilágyi M., Kun M., Ábrahám P. (2021): *The Gaia view of the Cepheus flare*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 5164

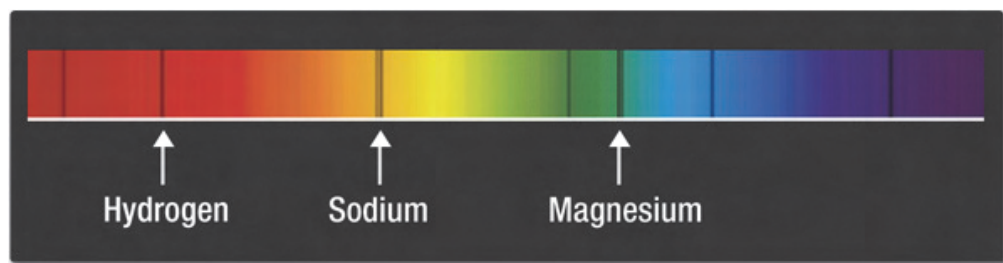
A csillagászati spektroszkópia alkalmazásáról az exoplanetáris kémiában

Futó Péter

Debreceni Egyetem,
Ásvány- és Földtani
Tanszék

A CSILLAGSZÍNKÉPEK ANALÍZISÉNEK RÖVID TÖRTÉNETE

A színeképelemzés (spektrálanalízis) és az ezzel foglalkozó tudományág, a spektroszkópia története több évszázados múltra tekint vissza. Maga a spektrum szó Newtontól származik, aki sok más egyéb jelentős felfedezése mellett elsőként bontotta színekre a fehér fényt egy prizma segítségével. Később a 18. század első felében több természettudós is kísérletezett a napfény felbontásával. A 19. század első felében a csillagászati spektroszkópia születését Joseph von Fraunhofer felfedezésének idejére teszik, amikor a német fizikus elsőként készített spektroszkópot, s amelynek segítségével a Nap színeképében 600 vonalat mutatott ki.



1. ábra: A hidrogén, a nátrium és a magnézium színeképvonalai a Nap spektrumában. (Forrás: NASA)

Ezzel egy időben W.H. Fox Talbot és John Herschel kémiai elemekkel festett lángok rögzített színeképének vizsgálata során felfedezték, hogy a módszerrel kémiai elemzés végezhető. A színeképelemzések alapján új kémiai elemeket is fedeztek fel, a csillagokat színeképeik alapján pedig első ízben Pietro Angelo Secchi (1818–1878) jezsuita csillagász sorolta osztályokba 1863-ban. Secchi az általa meghatározott 3 klasszifikációs csoportba a csillagokat felszíni hőmérsékletük csökkenő sorrendjében sorolta be. Ezt tovább fejlesztve, a csillagászatban napjainkban is használatos Harvard-féle osztályozási rendszert a 20. század elején alkották meg. A rendszerben minden színeképosztályhoz a felületi hőmérsékletek és az abszorpciós spektrum egy-egy tartománya tartozik, s az osztályozás a csillagok csökkenő felületi hőmérsékletének sorrendjében történik (O, B, A, F, G, K, M fő osztályok).

A csillagok összetételének meghatározásában az első eredményeket a legközelebbi csillag, Napunk megfigyelése szolgáltatta. A Naprendszer általános kémiai összetételének közelítő modellezését pedig az ősi, kevésbé átalakult meteoritok elemzésének segítségével végezték el. A szenes kondritok kémiai összetétele jó egyezést mutat a napszínkép analízise útján meghatározott kémiai elemgyakoriságokkal. Ez utóbbinak az előbbivel történő összevetése a szoláris köd elemösszetételéről szolgáltat fontos információkat, melyből központi csillagunk és bolygórendszerének tagjai keletkeztek. A jó konzisztencia okán a szoláris összetételt a szakirodalomban gyakran azonosítják a kondritos összetétellel.

A kozmikus anyag alkotóelemeit illetően napjainkban is csupán azon égitestekről vannak közvetlen úton szerzett információink, melyek esetében módunk nyílt a közvetlen anyagvizsgálatokra (meteoritok elemzése, planetáris felszínekről származó anyag vizsgálata). Minden más esetben spektroszkópiai úton jutottunk adatok, információk birtokába. A csillagászati spektroszkópia alkalmazásával nyilvánvalóvá vált, hogy még ha változó gyakoriságban is, de a galaxisunkat felépítő anyag ugyanazokból a kémiai elemekből áll a Tejútrendszer más vidékein is, mint amelyek a Naprendszert felépítik.

A napszínkép analízisére a 20. század második felében alkalmazott módszer nem vette figyelembe a színképvonalak erősségének adott fizikai feltételektől való függését. M. Asplund és munkatársai 2004-ben [1] egy konferencián új eredményeken alapuló összeállítást javasoltak, melyben a korábbi, 1989-ben közzétett és elfogadott szoláris elemgyakoriságokhoz képest eltérések mutatkoztak. Az új összeállításban a korábbival (2,75%) ellentétben a Nap fotoszférájában a fémek hidrogénhez viszonyított össztelege kisebb értékkel szerepelt (1,65%). *(Fémeknek a csillagászatban a hidrogénnél és héliumnál nehezebb kémiai elemeket nevezzük. – A szerk.)* Az eltérés a háromdimenziós napléggörmodellekből adódik, melyek jobban közelítik a valóságot, amiatt, hogy a granulációs áramlások hatását is figyelembe veszik. A spektrális vonalak erősségét a kémiai összetétel mellett a napléggör fizikai paraméterei közül legfőképpen a hőmérséklet befolyásolja. Sőt magának a csillagspektrumnak a megjelenését a hőmérséklet határozza meg [2]. A fotoszféra granulációs szerkezetét forróbb (granulák) és hűvösebb régiók régiók alkotják. Azon színképvonalak esetében, melyek hőmérsékletfüggése nagy, a hőmérsékleti eloszlás átlagértékének számítása hibákhoz vezethet. A 3D módszer eredményeinek figyelembe vételével számított modellek a helioszeizmológiai modellektől eltérő napszerkezetet eredményeznek ugyan, azonban az új módszerrel kapott adatok alapján a Nap fémtartalma jó egyezést mutat a galaktikus szomszédságunkban található csillagközi anyagával.

A 20. század közepén a csillagokban zajló elemszintézis első jeleit is azonosították, ami kétségtelen bizonyítéka volt annak, hogy a kémiai elemek többsége nem a Világegyetem születésekor keletkezett, hanem kialakulásuk a csillagok működéséhez és különböző fejlődési fázisaihoz köthető. Az 1950-es években szintén a spektroszkópia alkalmazásával kiderült az is, hogy a Napra jellemző izotóparányok és elemgyakoriság nem általánosíthatók más csillagokra.

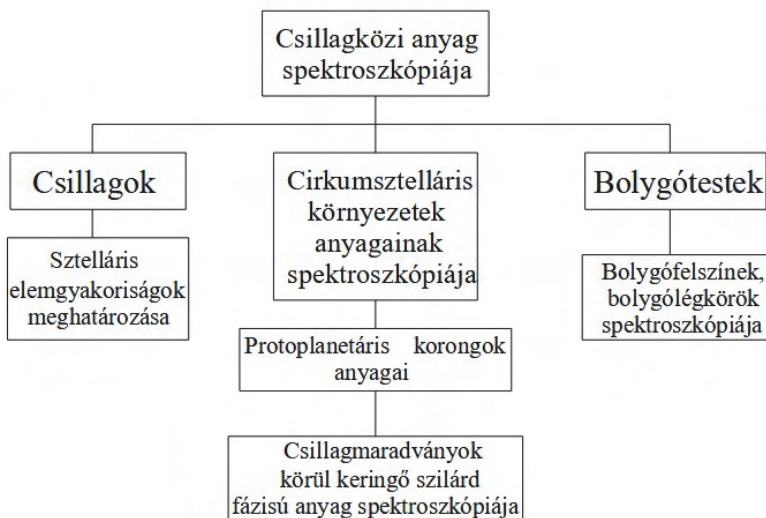
A CSILLAGÁSZATI SPEKTROSKÓPIA ALKALMAZÁSA A MODERN KOZMO- ÉS ASZTROKÉMIAI KUTATÁSOKBAN

A 20. század utolsó évtizedeiben már számos üstököszt figyeltek meg az elektromágneses spektrum széles tartományában. Kémiai elemeket, molekulákat, izotóp-összetevőket azonosítottak bennük. Ezzel párhuzamosan lehetőség nyílt a csillagközi és a cirkumsztelláris anyag kémiai összetételének a naprendszerbeli üstökösök összetételével való összehasonlítására [3].

A csillagászati spektroszkópia alkalmazásával számos jelenség természete feltárható. Így például az infravörös hullámhosszakon vizsgálható a csillagközi porszemcsék szerkezete, következtetni lehet a pornövekedési folyamatokra fiatal csillagok körüli korongokban [4], valamint a mérési eredményekből meghatározhatók a porszemcsék adott fizikai-kémiai jellemzői.

Megjegyzendő, hogy a csillagászati spektroszkópia az alapja a Naprendszeren kívüli bolygók (az exobolygók) kimutatása egyik legsikeresebb módszerének, a csillagok radiális sebessége mérésének is. A csillag-bolygó fizikai rendszerben a csillagnak és a bolygónak a közös tömegközéppont körüli keringése hatására változik a csillag radiális sebessége. A Doppler-effektus értelmében eltolódik a csillagszínkép hullámhossza, ezt spektrográffal mérni lehet, a kapott adatokból pedig meghatározható a bolygó tömege.

A csillagászati spektroszkópia az exobolygók kutatásának egy másik részterületén, az exoplanetáris asztrokémiában is fontos szereppel bír. Egyrészt mivel a színképelemzés révén lehetőség nyílik a csillaglégkörök kémiai összetételének meghatározására, következtetéseket lehet levonni a körülöttük esetlegesen létező bolygórendszer alapvető kémiai jellemzőire is. Másrészt spektroszkópiai módszerekkel vizsgálható a csillaguk előtt átvonuló, úgynevezett tranzit exo-



2. ábra. A csillagászati spektroszkópia alkalmazott vizsgálati területei az exoplanetáris asztrokémiában

bolygók légkörének kémiai összetétele is. Ennek során több alkalommal megfigyelik az adott csillag abszorpciós színekét akkor, amikor a bolygó átvonul előtte, s azokban az esetekben is, amikor a bolygó a csillagkorong takarásában tartózkodik keringése közben.

A távoli exobolygók spektroszkópai vizsgálata minden bizonnyal sok érdekes felfedezéssel szolgál majd a jövőben. Az exobolygó-kutatás egyik különösen érdekes esete a TESS űrtávcsővel felfedezett, LHS 3844 b jelű, 1,3 földtömegű kőzetbolygó. A Spitzer-űrtávcsővel végzett infravörös mérések szerint az alacsony Bond-albedójú (0,2) planéta valószínűleg egy olyan légkör nélküli világ, melynek csupasz felszínén a kőzetösszetétel bazaltos, vagy még inkább ultramafikus jellegű (magnéziumban és vasban igen gazdag) lehet. Az ehhez hasonló világok behatóbb tanulmányozása segít jobban megérteni a forró földszerű bolygók légköri evolúcióját. A chilei Las Campanas obszervatórium Magellán II teleszkópja spektrográfiájának segítségével egy kutatócsoport rögzítette a nagy energiájú sugárzásnak kitett LHS 3844 b optikai transzmissziós spektrumát. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a kőzetbolygók valószínűleg nem tudják hosszú időn keresztül megtartani még a viszonylag vastag atmoszférát sem az M típusú törpecsillagokhoz nagyon közeli pályán keringve [5].



3. ábra: A sötét felszínről LHS 3844 b jelű exo-kőzetbolygó fantáziaképe. (Forrás: NASA)

SZTELLÁRIS SPEKTROSZKÓPIA A NAP GALAKTIKUS SZOMSZÉDSÁGÁBAN

A sztelláris spektroszkópia a csillagok kémiai összetételének vizsgálatával foglalkozik. A Nap galaktikus szomszédságában található csillagok légköri (fotoszférikus) összetételének spektroszkópai felmérése nem csupán a vizsgált csillagok fejlődéséről, az elemek keletkezéséről (nukleoszintézis), valamint a csillagok kémiai evolúciójáról szolgáltat információkat, hanem

általá betekintést nyerhetünk a Tejútrendszer kémiai fejlődésének évmilliárdos időskálán zajló történetébe is.

Az utóbbi évtizedekben végzett felmérések eredményeinek interpretációja azt mutatja, hogy a csillagok kémiai összetétele, adott elemek sztelláris gyakorisága a csillag kora mellett függ a galaktocentrikus (a Tejútrendszer középpontjától mért), valamint a galaktikus fősíktól számított távolságtól is. Egy 1111 közeli, F, G és K színképtípusú csillagon végzett kémiai elemgyakorisági vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy az $[X/Fe]$ arány például a Mg, Al, Si, Ti elemek tekintetében a nagy és a kis tömegű bolygókkal rendelkező csillagok esetében is egyaránt magasabb, mint az alacsony fémességű csillagoknál [6]. A galaxis vastag korongját túlnyomórészt idős, alacsony fémességű csillagok alkotják. Itt megjegyzendő ugyanakkor, hogy az előbbieken említett felmérés eredményei szerint a bolygókat hordozó vastag korongbeli csillagok lehetnek alacsony fémességűek, de viszonylag magas magnézium és szilícium gyakoriságokat mutatnak, így elmondható, hogy a bolygókeletkezés szempontjából nem számítanak fémszegénynek. A kutatás megerősíti, hogy az $[Fe/H] < -0,3$ dex fémességtartományban a bolygók elterjedtsége nagyobb a magas- α /vastagkorong-populációban, mint a vékony korong csillagainál. Ennek fő oka pedig az, hogy a kis tömegű bolygók kialakulásához alapvető feltétel az olyan elemek magasabb gyakorisága, mint például a magnézium, amely a kőzetbolygók egyik fő építőeleme. Mivel a kis méretű kőzetbolygók jóval gyakoribbak, mint a nagy tömegű testvéreik, következésképpen legtöbbjük α -elemekben gazdag. Ez arra utal, hogy a földszerű bolygók korai keletkezése a galaktikus vastag korongban kezdődhetett, ahol ennek a kémiai feltételei kedvezőbbek [7].

A SZTELLÁRIS ELEMGYAKORISÁGOK ÉS AZ EXOPLANETÁRIS KÉMIA

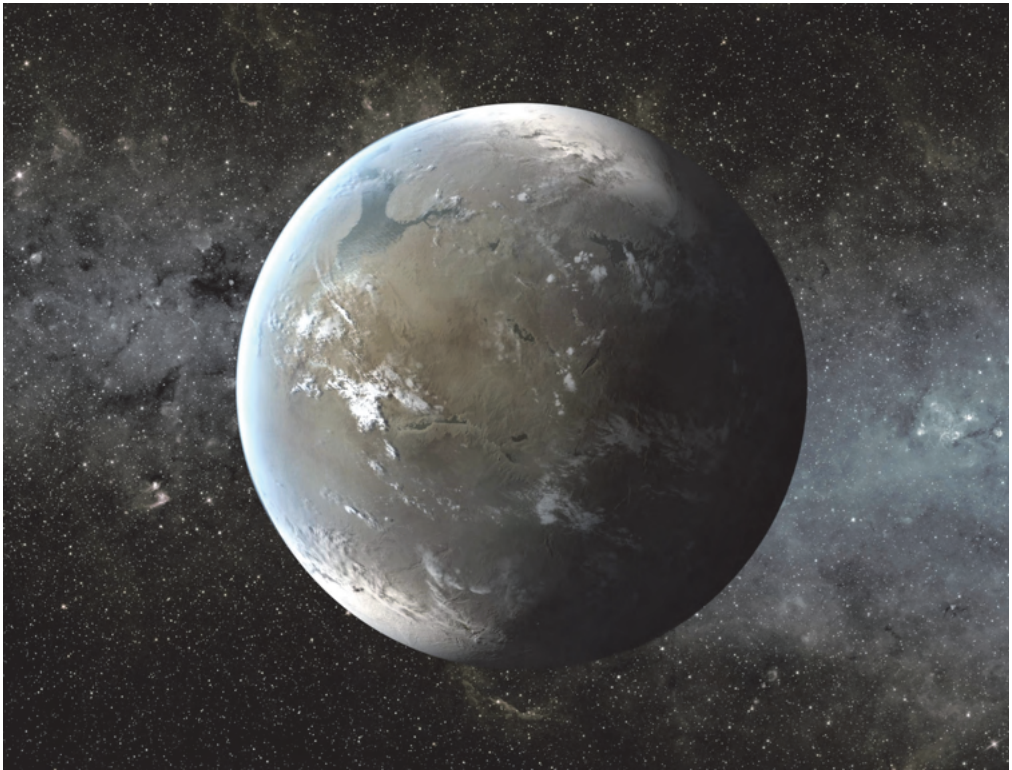
Az exobolygók kémiai összetételével és folyamataival az asztrokémia extraszoláris kiterjesztése, az exobolygó-geokémia, más elnevezéssel az exoplanetáris kémia foglalkozik. A bolygótesetek belső szerkezetét, kémiai-ásványtani összetételét, fejlődését fizikai jellemzőik mellett az őket felépítő kémiai elemek kozmikus gyakorisága, valamint bennük ezen elemek relatív gyakorisága határozza meg. A bolygókat felépítő kémiai elemek relatív gyakoriságaiban eltérések mutatkoznak az egyes bolygórendszerek között.

A protoplanetáris korongokban az anyagukra jellemző C/O, Mg/Si, valamint Fe/Si elemarányok határozzák meg alapvetően a bennük keletkező kőzetbolygók ásványtani összetételét. A C/O az egyik kulcsfontosságú elemarány, mely megszabja, hogy a sziklás planéták köpenye és kérge döntően szén alapú ásványokból, vagy pedig szilikátokból épül-e fel. Ha a C/O nagyobb, mint 0,8, akkor a keletkező bolygótesteket domináns módon szén alapú ásványok, köztük főként karbidok alkotják majd. A C/O arány 0,8-nél kisebb értéke esetén szilikátok és oxidok lesznek a fő köpeny- és kéregalkotó ásványok. A Mg/Si elemarány kontrollálja a különféle szilikátásványok eloszlását. A sztelláris spektroszkópia tehát az exobolygók tanulmányozását, az egyes kémiai szempontból meghatározott típusok galaktikus gyakoriságának becslését is segíti.

A csillagok összetételének változatossága kijelöli az exoplanetáris mineralógia lehetséges tartományát. A kőzetbolygók jelentős hányadának köpenye olivinben gazdag, míg egy kisebb exo-kőzetbolygó-populáció tagjainak köpenye főként magnéziumban szegényebb ásványokból épül fel. A Nap galaktikus szomszédságában található F, G, és K színképtípusú csillagok fotoszférikus elemgyakorisági vizsgálatai azt mutatják, hogy a Naprendszerre általánosan jellemző, szoláris magnézium-szilícium elemarány moláris értéke kissé alulmarad a legtöbb vizsgált csillag esetében megfigyelt Mg/Si arányokhoz képest [8]. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a Tejútrendszerben – pontosabban annak azon szegmensében, ahol a Nap jelenleg tartózkodik – a már kialakult, illetve a kialakulás fázisában lévő kőzetbolygók köpenyének ásványtani összetétele általában magnéziumban kissé gazdagabb a Naprendszer Föld-típusú bolygóihoz képest.

ÁSVÁNYTANI SOKFÉLESEG

Főként a szilárd felszínű bolygótesteket felépítő ásványok kémiai összetétele szempontjából fontos elemarányok bolygórendszerek közötti eltéréseiből adódó ásványtani sokféleség a kő-



4. ábra: Föld-típusú exobolygó fantáziarajza. Egyes kőzetbolygók magnéziumban gazdagok, míg mások magnéziumban szegények. A szilikátos bolygók mellett pedig léteznek szénben gazdag planéták is a galaxisban. (Forrás: NASA)

zetbolygók típusainak sokféleségét eredményezi. Ugyanis az ásványtani sokféleség a bolygók felépítésében mutatkozó változatosságot is eredményez. A Fe/Si elemarány eltérő értéke például két Föld-típusú planéta felépítésében mutatkozó különbséget eredményezhet azáltal, hogy adott körülmények között a magasabb Fe/Si aránnyal jellemezhető bolygótest a vasban szegényebb társainál nagyobb tömegfrakciójú fémes maggal rendelkezhet.

A sztelláris spektroszkópia eredményei alapján arra következtethetünk, hogy a Tejútrendszernek a Nap szomszédságában elhelyezkedő szegmensében a kőzetbolygók jelentős hányadának köpenye olivinben gazdag lehet, míg egy kisebb exo-kőzetbolygó-populáció tagjainak köpenye főként magnéziumban szegényebb ásványokból épülhet fel. A szolárisnál kissé magasabb Mg/Si elemaránnal jellemezhető csillagok relatíve gyakoriak, míg az 1-nél kisebb értékkel rendelkezők már lényegesen ritkábbnak számítanak.

A legtöbb kőzetbolygó köpenyének domináns ásványi komponensei az olivin (felső köpeny), a szilikát-perovszkit (MgSiO_3) és a ferroperiklász $[(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O}]$ (alsó köpeny). A Tejútrendszerbeli terresztrikus planéták egy jóval kisebb frakciójának felső köpenyében a Mg/Si aránytól függően az olivinhez képest már relatíve magas a piroxének és a különböző gránátok aránya. A magnéziumban szegény kőzetbolygó alsó köpenyében a szilikát-perovszkit súlyszázalékos aránya relatíve magas a magneziowürsttíthez $[(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O}]$ viszonyítva, sőt ez utóbbi fázist az extrém Mg-szegény protoplanetáris korongokban születő bolygók alsó köpenyében a SiO_2 helyettesítheti.

A C/O mellett a Mg/Si elemarány változása van a legnagyobb hatással egy kőzetbolygó ásványtani összetételének alakulására. Sőt, a magnéziumban gazdag szilikátásványokban és oxidokban bővelkedő terresztrikus bolygók köpenyanyagának termoelasztikus tulajdonságai jelentős mértékben eltérhetnek a magnéziumban szegény, szilíciumban gazdag bolygókétól, aminek eredményeképpen különbség mutatkozik a bolygóbelső geodinamikai folyamatainak hatékonyságában is. A Tejútrendszer kőzetbolygó-populációja egyes tagjai között tehát ásványtani felépítésük különbözősége okán szignifikáns különbségek adódhatnak a geológiai aktivitás mértékében, s a lemeztektonika működési feltételei terén.

Döntő fontosságú tehát, hogy galaxisunk, a Tejútrendszer, valamint saját Naprendszerünk, s benne Földünk fejlődéstörténetének jobb megismerése céljából következtetni lehessen az exobolygók összetételére. Erre nem csupán csillaguk kémiai összetételének meghatározása alapján nyíltat lehetőség. Az exobolygó-légkörök kémiája, s az ütköző vagy széteső bolygótestek anyagából származó por és törmelék spektroszkópiai vizsgálata révén is lehet következtetni egy adott planetáris rendszer legfontosabb kémiai jellemzőire.

A JÖVŐ ŰRTÁVCSÖVEI ÉS AZ EXOBOLYGÓ-SPEKTROSKÓPIA

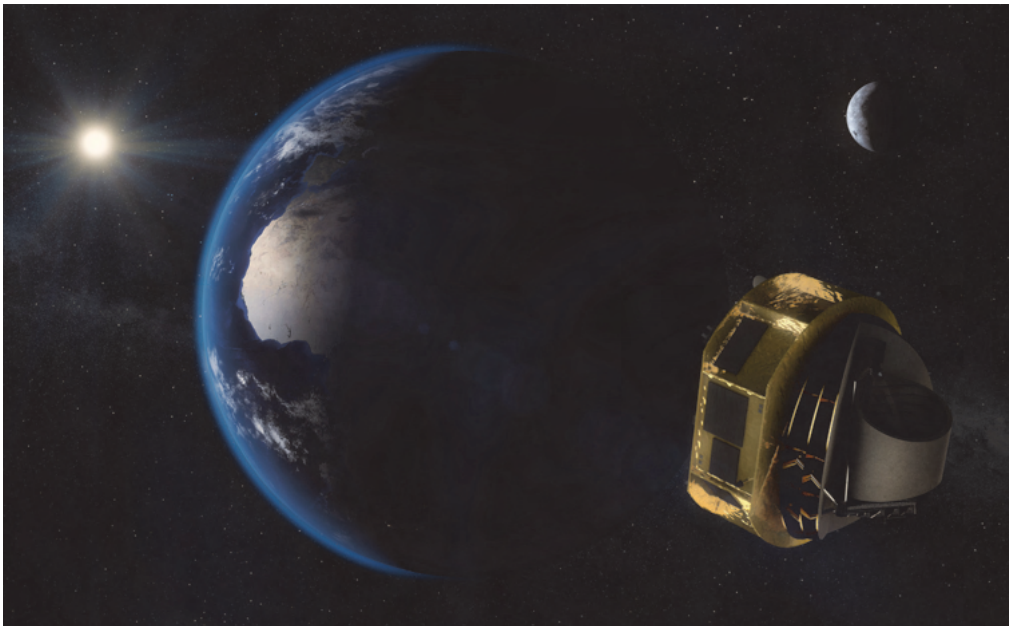
Az exobolygók és légköri spektrumuk rögzítésének három egyszerű módszere alkalmazható a világűrben működő űrcsillagászati eszközök segítségével. Az egyik, a transzmissziós spektroszkópia lényege: a bolygótranszit ideje alatt a csillagfény egy része áthalad az átvonuló boly-

gó légkörén. A spektrum rögzítését követően olyan szinképet kapunk, melyben a bolygólégkör spektrális vonalai ráakódnak a csillagspektrumra. A bolygótranszit alatt, illetve az azon kívüli időben felvett csillagszinkép között mutatkozó különbségekből következtetni lehet a bolygólégkör kémiai összetételére. A reflektáció során a keringési pálya egyes pontjain, s különösen a másodlagos fedéshez közeli pozíciókban a csillagfény visszaverődhet a bolygó atmoszférájáról, s a légköri összetétel nyomozható lesz. A harmadik lehetőség akkor adódik, amikor egy exobolygó felszíne vagy légköre nagyon forró, s feketetest-sugárzást bocsáthat ki.

A 2021. december 25-én felbocsátott James Webb-űrteleszkóp 25 négyzetméter felületű tükrével különösen alkalmas űreszköz néhány száz fényév távolságig az exobolygólégkörök tranzit spektroszkópiai megfigyelésére [9]. A Nap-Föld rendszer L_2 Lagrange-pontja körül pályára állított Webb- űrtávcső tíz évre tervezett megfigyelési programjának egyik legfontosabb célja az Univerzum első galaxisainak megtalálása, ami az első galaxisok és csillagok kialakulásának jobb megértése érdekében végzett kutatás egyik legfontosabb fázisa.

Az űrtávcső mérési érzékenysége alkalmas olyan spektrumok felvételére is a Naprendszer kis égitestjeiről, aszteroidákról, melyek nélkül azok részletesebb földtudományi vizsgálata távolról nem lehetséges, mivel a földi telepítésű műszerek érzékenysége azt nem teszi lehetővé. Ezáltal a remények szerint a következő években sok új információval bővíülhetnek ismereteink a kisbolygók ásványtanát illetően is.

A bolygóatmoszférák infravörös hullámhossztartományban végzett megfigyelése várhatóan nagy segítséget nyújt majd az exobolygólégkörök kategorizálása terén. A légkör-spektroszkópiái



5. ábra: Az ESA Ariel űrtávcsővének fantáziaképe. (Forrás: arielmission.space)

mérések talán legizgalmasabb célja egy olyan bolygó azonosítása, melynek légköri összetétele sok tekintetben hasonló a földi légköréhez.

Az Európai Űrügynökség (ESA) által fejlesztett Ariel (*Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey*) űrtávcső felbocsátását 2029- ben tervezik. Az Ariel programjának fő célja az exobolygók összetételének, kialakulásának és fejlődésének tanulmányozása ezer exobolygó megfigyelése révén. A mérések mind a látható, mind pedig az infravörös hullámhossztartományban történnek [10]. A sok érdekes célpont között szerepelhetnek forró szuperföldek is, melyek közül több bolygó atmoszféráját a felszínüket borító magmaóceánból elgőzölgött kőzetek anyaga alkothatja. Egy tanulmány szerint a SiO spektrális jelei a 3000 K sugárzási hőmérsékletű forró szuperföldek esetében 20 parszek távolságon belül, míg a 3500 K sugárzási hőmérsékletű forró kőzetbolygók esetében 50 parszek távolságig detektálhatók fedési spektrumban az Ariel űrtávcsővel [11]. A légköri összetevők azonosítása révén következtetni lehet a forró szuperföldek felszínét borító magmaóceán összetételére, ami kulcsfontosságú tényező e bolygók kémiai, ásványtani összetételének, valamint kialakulásának jobb megismerése szempontjából [12].

Irodalomjegyzék

- [1] Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J. (2005): *The solar chemical composition*. *Nuclear Physics A*, 777, 1
- [2] Sódor Á. (2015): *Csillagászati spektroszkópia*. *Fizikai Szemle*, 65(1), 2
- [3] Tóth I. (2015): *Az üstökösök megismerésének mérföldkövei 2. Üstökös kutatás az űrkorszakban*. *Meteor Csillagászati Évkönyv 2016, Magyar Csillagászati Egyesület*, 243
- [4] Ábrahám P., Kiss Cs. (2009): *A hideg Világegyetem varázslatos világa – csillagászat a rádióin innen, a vörösön túl*. *Magyar Tudomány*, 170(10), 1156
- [5] Diamond-Lowe H. et al. (2020): *Optical Transmission Spectroscopy of the Terrestrial Exoplanet LHS 3844b from 13 Ground-based Transit Observations*. *The Astronomical Journal*, 160, 188
- [6] Adibekyan V.Zh. et al. (2012): *Overabundance of α -elements in exoplanet-hosting stars*. *Astronomy and Astrophysics*, 543, A89
- [7] Adibekyan V.Zh. et al. (2012): *Exploring the α -enhancement of metal-poor planet-hosting stars. The Kepler and HARPS samples*. *Astronomy and Astrophysics*, 547, A36
- [8] Spaargaren R. et al. (2020): *Exoplanet bulk silicate composition as a function of host stellar elemental abundances, and its effects on long-term planetary evolution*. *European Geosciences Union General Assembly, EGU2020-20378*
- [9] Barstow J.K. et al. (2015): *Transit spectroscopy with James Webb Space Telescope: systematics, starspots and stitching*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448, 2546
- [10] www.arielmission.space
- [11] Ito Y. et al. (2022): *Detectability of Rocky-Vapour atmospheres on super-Earths with Ariel*. *Experimental Astronomy*, 53, 357
- [12] Morbidelli A., Raymond S.N. (2016): *Challenges in planet formation*. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121, 1962

Bemutatkozik a Bajai TIE Rakétamodellező Szakosztálya

Mészáros András

Tudományos
Ismeretterjesztő
Egyesület,
Magaslégköri
Ballon- és
Rakétamodellező
Szakosztály, Baja

BEVEZETÉS

A rakétamodellezés az űrkorszak kezdete óta jelen volt hazánkban, bár az 1980-as évek végétől, a Magyar Honvédelmi Szövetség (MHSZ) megszűnésével hivatalos módon már nem volt folytatható. A következő évtizedekben szinte eltűnt Magyarországon és csak elszigetelt próbálkozások történtek. 2018-ban vetődött fel az ötlet néhány modellezőben, hogy a tevékenységüket egyesületi formában, a jogszabályoknak megfelelően fogják végezni. Az ötlet mögé állt Hegedűs Tibor, aki a Szegedi Tudományegyetem Bajai Obszervatóriumának igazgatójaként, Jáger Zoltán tudományos munkatárssal közösen koordinált, már évek óta létező DAMBALL fantázianevű magaslégköri ballonos csapatot vezette, továbbá Pausch Róbert, a Bajai Tudományos Ismeretterjesztő Egyesület (TIE) elnöke is. A ballonos és rakétás csoport egyesült, így jött létre a Bajai TIE legújabb szakosztálya 2019 végén. A 2020-as év az építkezés időszaka volt, ekkor szerveztük az első bemutatókat, rakétamodellező hétvégéket. Az ismeretterjesztő tevékenységünk igazán csak 2021-ben indult el.



A SZAKOSZTÁLY RENDEZVÉNYEI

Augusztusban tartottuk egyik legjelentősebb rendezvényünket, a Rakétamodellező és Természettudományos Ismeretterjesztő Táborunkat a 14-18 éves korosztálynak. Ez a hagyományteremtő tábor hat napig tartott, a fő tematika a modellrakéták építése és reptetése, elméleti előadások a rakéták felépítéséről, fajtáiról. A programot színesítette több űrkutatási jellegű előadás, melyeket MANT tagok tartottak (Schuminszky Nándor és Zombok Gábor), illetve a Bajai Csillagvizsgáló nyílt napja, távcsöves észlelés. Ezen kívül éjjellátó bemutató, sárkányhajózás és kirándulás is szerepelt a programok között. A rakétafelbocsátások helyszíne a bajai Bokodi úti repülőtér volt. A reptérrel és a helyi repülőmodellező klubbal kiváló a viszonyunk, illetve Baja környékén már nincsenek olyan forgalmas légterek, ami pl. az



ország közepén rendkívül behatárolja a tevékenységünket. Az ifjú űrmérnököknek – bár a rakétákat gyári készletekből építették – bőven volt feladatuk, például ragasztani, festeni vagy akár ejtőernyőzsírnórt csomózni. A felbocsátásokon az előzőleg elkészített rakétákat lehetett kipróbálni. A távvezérelt indításokat kórusban számolták vissza a fiatalok. Sokszor akár egy kilométerről is vissza kellett hozni a szél által elsodródott rakétákat, de a lelkesedés sötétedésig kitartott! A rendezvény sikerét jelzi, hogy az összes résztvevő jelezte, hogy jönne a jövő évi táborunkra is! Az egyik diák továbbá űrmérnöki képzésen folytatja tovább egyetemi tanulmányait.

A Szegedi repülőnapon is képviseltettük magunkat, itt több százan tekintették meg tagtársaink felbocsátásait, illetve a kiállított rakétákat. Ősszel a zsámbéki HM Fesztén kaptunk lehetőséget a bemutatkozásra. Standunkon kiállítottuk a különböző kategóriájú modellrakétáinkat, elmagyaráztuk a résztvevőknek a működésüket, vagy akár azt, hogy hogyan tudnak a szakosztályunkhoz csatlakozni. Ez volt az első ilyen jellegű bemutatónk, amit nagyon élveztünk.

A nyári junior tábor meghirdetésekor több felnőtt is jelentkezett, akiket sajnos nem állt módunkban fogadni a korhatár miatt. Így nekik ősszel egy rakétaépítő hétvégét tartottunk hasonló tematikával. A délelőtti folyamán előadásokat hallgathattak a modellrakéták felépítéséről, illetve fedélzeti elektronika, biztonságtechnika és jogi környezet témákban, továbbá gyakorlati foglalkozást kompozit anyagok gyártástechnológiája címmel. Itt a bajai modellezők vezetője, Bors Attila mutatta be a modellezésben jelenleg csúcstechnológiának számító szén- és üvegszál erősítésű alkatrészek előállítását. A délután

folyamán kitelepültünk a reptérre, és sötétedésig bocsátottuk fel a kisebb-nagyobb rakétákat. Többen ezen a hétvégén építették meg és próbálták ki az első saját rakétájukat. A legnagyobb magasságot – 1600 métert – egy másfél méter magas, 830 Ns-os rakétamotorral meghajtott „high power” rakéta érte el, amelyet Almási Csaba tagtársunk készített. Határainkon túlról, Kassáról is érkeztek vendégeink, akik bemutatták a saját modellező klubjuk elismerésre méltó teljesítményét. A környező országok mindegyike részt vesz a nemzetközi modellversenyeken. Célunk, hogy hamarosan Magyarország is belépjen ebbe a körbe. A modellező hétvégén a Spacejunkie csapata és az RTL Klub is készített riportokat a szervezőkkel és a résztvevőkkel. Az esemény része volt a Bajai TIE Magyar Tudomány Ünnepe rendezvénysorozatnak.

Novemberben a felvidéki modellező klub hívott meg bennünket Kassára, ahol már a 2022-es magyar „Big Rocket” nemzetközi verseny előkészítését beszéltük meg. Ezen kívül bemutatták a hibridrakéta-fejlesztési projektjeiket és a versenyrakétaik elkészítésének fogásait is. Este kötetlen beszélgetés és bowlingozás zárta a programot, a szíves fogadtatást ezúton is köszönjük!

Szakosztályunk az oktatáson kívül részt vesz egyetemi rakétaprojektekben is. Legelső együttműködésünk a gödöllői egyetemmel indult, itt az első prototípus már készen áll a tesztekre. A cél egy 10 km-es magasságba juttatható szilárd hajtóanyagú kutatórakéta, amellyel különböző méréseket lehet végezni és az adatokat továbbítani a földi vevőegységnek. Később ezt a rakétát fejlesztenénk tovább hibrid rakétamotorral, amellyel nagyobb magasságba is eljuthat. Szakosztályunk a rakéta kompozit alkatrészeit, a gödöllői egyetem diákjai a fedélzeti elektronikát és a vezérlő szoftvert fejlesztik. További egyetemi kapcsolatokat tervezünk kiépíteni más intézményekkel is.

Sajnos a 2020–2021 évek COVID karanténokkal terhelt ideje nem kedvezett a ballonozásnak. 2020 folyamán még sikerült három bérindítást és két saját kísérletet elvégezni, de 2021 során teljesen leálltak a repülések. A szakosztály ballonozó tagjai két középiskolai diákcsapat (Sopron és Kaposvár) és egy csillagászati egyesület (Bakonyi CSE) ballonos kísérleteit támogatták folyamatosan. A járvány enyhülésével 2022. februártól tervezzük újraindítani, és egyre érdekesebb kísérletekkel továbbfejleszteni a magaslégköri ballonos repülési programot. További ígéretes lehetőség az ELTE–SZTE együttműködésben a 2022. őszi szemeszterben elindítandó űrkutatási alapozó űrmérnöki tantárgyakhoz kapcsolandó gyakorlatok közé történő beemelése. Általános gyakorlat külföldön is, és a korábbi magyar műholdak építése során is így volt, hogy a világűrbeli működésre szánt műszereket, elektronikus egységeket 35 km fölé emelkedő ballonok fedélzetén tesztelik. Csapatunk ilyen igényeket, és az egyetemi oktatás szükségleteit is ki tudja szolgálni majd.

Reméljük, a 2022-es év során sikerül folytatni az oktatási és kutatási programjainkat és még több érdeklődőhöz eljutnunk hazánkban. Amennyiben az Űrtan Évkönyv olvasói között is lennének új érdeklődők, akik kíváncsiságát felkeltette a rakétamodellezés, örömmel várjuk őket a sorainkba az alábbi elérhetőségeinken:

Facebook csoportunk: <https://www.facebook.com/bajaitit/>

Tábori jelentkezés: <http://bajaitit.hu/tabor>