

A KORDYLEWSKI-PORHOLDAK ASZTROPOLARIMETRIÁJA*

Slíz-Balogh Judit^{1,2}, Mádai Attila^{1,2}, Sári Pál^{1,2}, Horváth Gábor^{1,2}, Barta András³

¹ HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport,

² ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium,

³ Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Egy közös tömegközéppont körül keringő égitestpár gravitációs terében Leonhard Euler 1767-ben fedezte föl a keringési síkbeli L1, L2 és L3, továbbá Louis Lagrange 1772-ben az L4 és L5 egyensúlyi pontokat. Az L1, L2 és L3 pontok a két égitestet összekötő egyenes mentén helyezkednek el: az L1 a kisebb tömegű égitestnek a nagyobb tömegűvel ellentétes oldalán, L2 a két égitest között, L3 a nagyobb tömegű égitestnek a kisebb tömegűvel ellentétes oldalán – bár az L1 és L2 pontok helyét, elnevezését gyakran fölcserélik –, míg az L4 és L5 pontok olyan egyenlő oldalú háromszögek harmadik csúcspontjai, amelyek másik két csúcspontjába esik a két égitest. Ha ezen öt Lagrange-pontba egy harmadik testet helyezünk megfelelő kezdősebességgel, akkor e test az égitestpárral azonos szögsebességgel együtt kering, miközben nem módosul a relatív pozíciója. Megfelelő tömegarányok mellett az L4 és L5 pontok stabilak, vagyis ha egy harmadik testet nem túl nagy mértékben kimozdítunk belőlük, az e pontok közelében maradványúgynevezett librációs (lengő, billegő, rezgő) mozgást végez. Ezáltal mindkét Lagrange-pont „égi porszívóként” csapdába ejti a hozzá nem túl nagy sebességgel közeledő bolygóközi port vagy aszteroidákat [1].

* Az ELTE Biológiai Fizika Tanszék 1998. évi alapításának 25. évfordulójára.

A Naprendszerben a Lagrange-féle librációs mozgásra több példa is ismert: i) a Nap–Vénusz-rendszer L4 pontja körül 1 libráló aszteroida, ii) a Nap–Föld L4 pontja körül 2, iii) a Nap–Mars L4 pontja körül 1 és L5 pontja körül 13, iv) a Nap–Jupiter L4 és L5 pontja körül több ezer trójai és görög kisbolygó, v) a Nap–Uránusz L4 pontja körül 2, vi) a Nap–Neptunusz L4 pontja körül 24, L5 pontja körül pedig 4 libráló aszteroida ismert.

Ugyanakkor, az L1, L2 és L3 pontok mindig instabilak, azaz ha kimozdítjuk belőlük a harmadik testet, az kezdetben lassan, majd egyre gyorsabban eltávolodik tőlük. Ha a harmadik test tömege a másik két nagy test m_{nagyobb} és m_{kisebb} tömegéhez képest elhanyagolható, akkor az L4 és L5 pontok stabilitása csak a két nagy tömeg arányától függ [2]: e két Lagrange-pont csak akkor stabil,



Sári Pál okleveles gépészmérnök, aki évtizedek óta hazai és külföldi csillagászati távcsövek tartószerkezetének és csillagkövető órágépének mechanikai és elektronikai tervezését, építését, karbantartását és továbbfejlesztését végzi. A HATNetSouth (Hungarian Automated Telescope Network South) exobolygókutató hálózat és a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport tagja.



Horváth Gábor az ELTE-n végzett fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék egyetemi tanára, az ELTE Környezetoptika Laboratórium és a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport vezetője. A vizuális környezet optikai saját-ságaival, az állatok polarizációérzékelésével foglalkozik, valamint fotobiofizikai, biomechanikai, égi mechanikai és asztropolarimetriai kutatásokat végez. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa.



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Jelenleg ipari műszerek, elsősorban minőség-ellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutatási és Fejlesztési Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt. A HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport is az ő polarizáció-kiértékelő programját használja.



Slíz-Balogh Judit a BME-n végzett matematikus-mérnöként, majd menedzserként dolgozott a Graphisoft SE szoftverfejlesztő cégnél. Azután az ELTE-n szerzett csillagász diplomát, majd ott doktorált a Fizika Doktori Iskola Rézecskefizika és Csillagászat programjában. Fő kutatási területe az égi mechanika, azon belül a Naprendszer Lagrange-pontjainak kaotikus dinamikája és képalkotó polarimetriája. Jelenleg a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport tagja.



Mádai Attila okleveles gépészmérnök, aki sok éve csillagászati obszervatóriumok távcsöveinek optikai és elektronikai tervezésében, építésében, szoftverellátásában, tesztelésében, karbantartásában, továbbfejlesztésében és szoftverfrissítésében vesz részt. Jelenleg a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport tagja.

ha $m_{\text{kisebb}}/(m_{\text{nagyobb}} + m_{\text{kisebb}}) < 0,03852$, máskülönben az L4 és L5 instabil. A Föld és Hold $m_{\text{Hold}}/(m_{\text{Föld}} + m_{\text{Hold}}) = 0,012195 < 0,03852$ tömegarányából következik, hogy L4 és L5 pontjaik stabilak, miáltal azok körül összegyűlhetnek a bolygóközi részecskék.

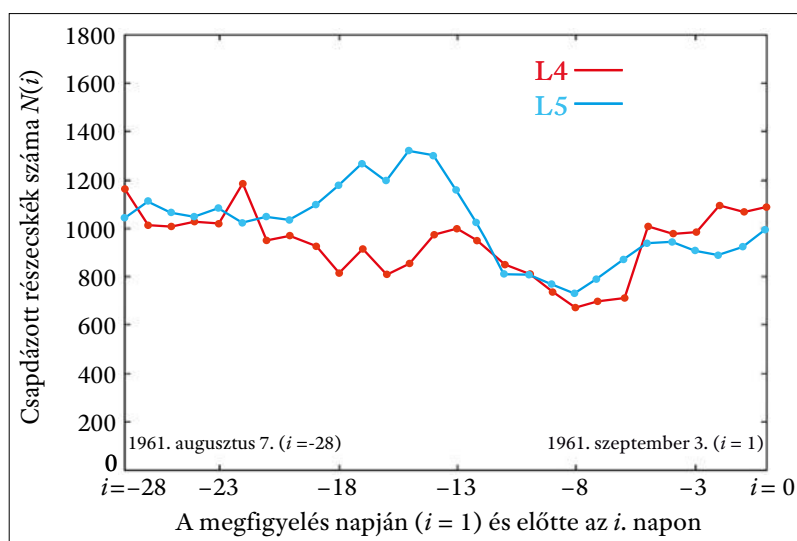
Az 1950-es évek vége felé ezért kezdte el keresni Kazimierz Kordylewski lengyel csillagász a Föld–Hold-rendszer L4 és L5 pontjainál esetleg fölgülemlett porhalmazt [3]. Kordylewski a lengyel Tátra-hegységbeli Kasprowy Wierchben lévő csillagászati obszervatóriumban 1961-ben szabad szemmel megfigyelt, majd fotometriával is kimutatót az L5 pont körül két, igen gyenge fényű, 6° maximális szögkiterjedésű, elnyúlt porfelhőt. 1963/64-ben több hónapot töltött a magyarországi Piszkestető csillagászati obszervatóriumban, főleg azzal a céllal, hogy ezen általa fölfedezett porfelhőket az ottani fényszennyezésmentes éjjeli égbolton is vizuálisan megfigyelje.

1961-től mások is elkezdtek vadászni az éjszakai égbolton a Kordylewskiről elnevezett porholdra az L5 és L4 pontok környékén. E több évtizedes vadászat során néhányan észlelték, mások viszont nem tudták kimutatni a Kordylewskiporholdat. Így alakult ki a csillagász-közösség egy részében az a szkeptikus vélemény, hogy habár a Kordylewskiporholdak létezhetnek, vizuális és fotometriai észlelésük nem eléggé meggyőzően bizonyított, továbbá fennmaradásuk (stabilitásuk) is bizonytalan, mert az L4 és L5 pontok elméleti stabilitását (vagyis a Föld és Hold mindkét pont környéki együttes gravitációs csapdázóképességét) a Nap gravitációs perturbációja leronthatja.

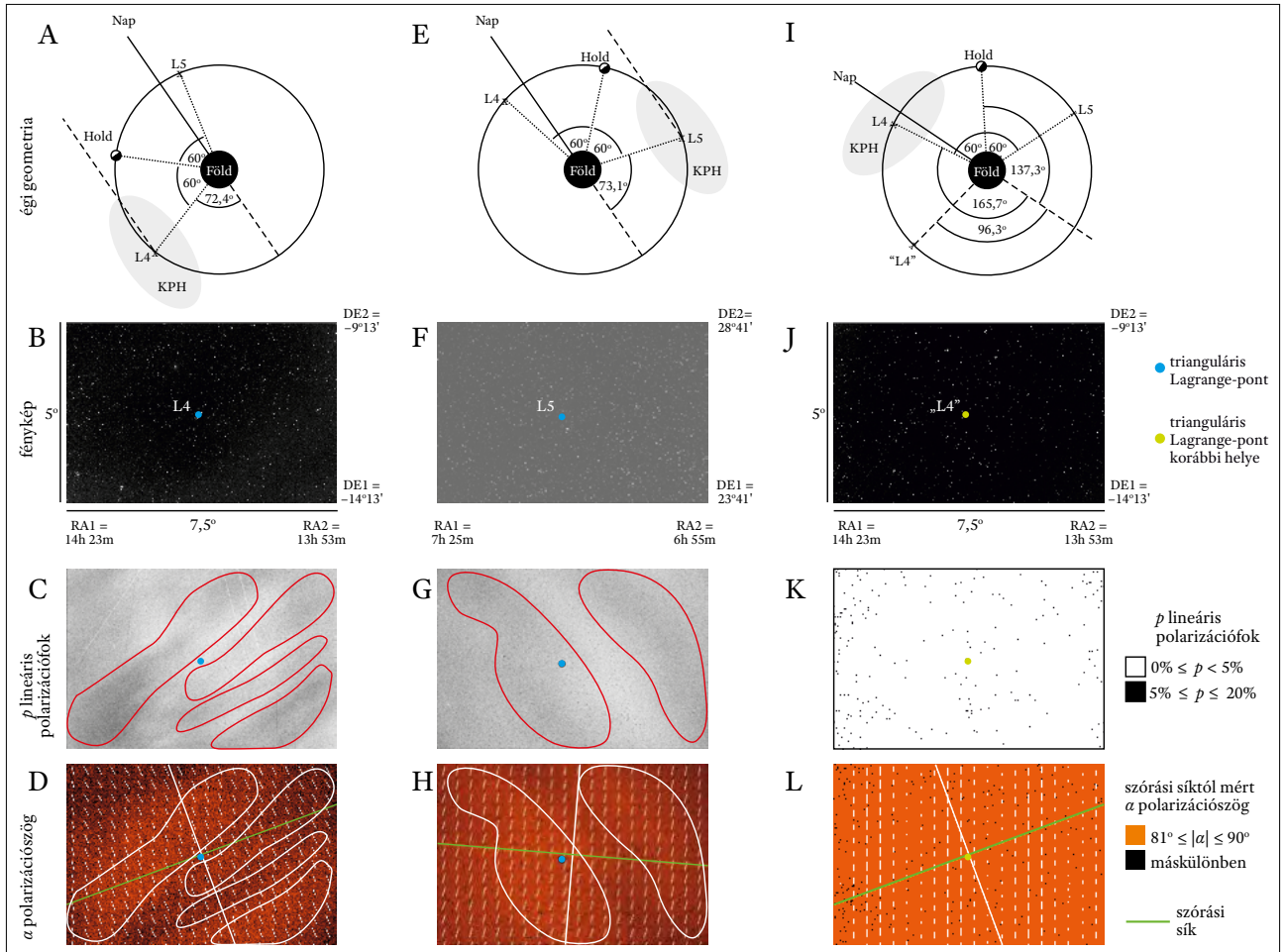
E patthelyzetben akkor történt fordulópon, amikor 2017. augusztus 17. és 18. éjjelén egy képalkotó polariméterrel ellátott nagy látószögű csillagászati távcsővel Slíz-Balogh Juditnak két egymást követő alkalommal sikerült mérnie az L5 pont körüli Kordylewskiporhold lineáris polarizációs mintázatait [4, 5].

Ennek az volt a szerencsés előzménye, hogy miközben Judit az ELTE Csillagászati Tanszék doktoranduszaként évek óta vizsgálta a Föld–Hold-rendszer L5 pontja körüli részecskék kaotikus dinamikáját [6], meghallgatta Horváth Gábor állati és emberi polarizáció-érzékelésről tartott előadás-sorozatát az ELTE Biológiai Fizika Tanszékének Környezetoptika Laboratóriumban. Több előadás is arról szólt, hogy képalkotó polarimetriával miként mérhető az égbolt polarizációs mintázatai, és azok milyen fontos szerepet játszanak számos állat térbeli tájékozódásában. Amikor kiderült, hogy Judit csillagász (is), az előadó megemlítette, hogy sok év óta arra buzdítja a csillagászokat – de addig mindhiába –, hogy távcsövéket lássák el egy képalkotó polariméterrel, és próbálják meg kimérni a Kordylewskiporholdak polarizációs jeleit. Mivel Juditnak szerencsére akkor már Sári Pál gépészmérnök közreműködésével megépült a badacsonytördemeci magánobszervatóriuma, és éppen a Kordylewskiporholdak számítógépes modellezése volt a doktori témája, úgy döntött, hogy Barta Andrással, az Estrato Kft. vezetőjével, Horváth Gábor exdoktoranduszával és Máday Attila gépészmérnökkel felszerelteti a badacsonytördemeci magántávcsövet egy forgó analizátoros lineáris képalkotó polariméterrel. A távcső látómezeje – néhány jól megválasztott módosítás után – a porholdak szögkiterjedésének nagyságrendjébe esett. Judit e polariméteres távcsővel rendszeresen próbálkozott a Kordylewskiporholdak polarizációjának mérésével. A magyarországi éjszakai égbolt kedvezőtlen asztroklímája miatt e kitaró vadászata csak egy év után, 2017 augusztusában hozta meg az első eredményt [5].

A 2017. augusztus 17-ei és 18-ai két polarimetriai észleléssel együtt az L5 pont körüli Kordylewskiporholdat összesen 16 alkalommal figyelték meg csillagászok, míg az L4 pont körülit csak ötször. E $16/5 \approx 3$ -szoros aszimmetriának több oka is lehet. Például a megfigyelési pró-



1. ábra. A Föld–Hold-rendszer L4 (piros) és L5 (kék) Lagrange-pontjai által 1961. szeptember 3. ($i = 0$) előtti i -edik napon csapdába esett részecskék $N(i)$ száma $i (= -28, \dots, -1, 0)$ függvényében, számítógéppel modellezve [7]



2. ábra. A Föld–Hold-rendszer L4 és L5 Lagrange-pontja körül Badacsonytördemecen képkalkotó asztropolimetriával észlelt Kordylewski-féle porholdak (KPH) égi geometriája, valamint p lineáris polarizációfokának és α polarizációs szögének mintázatai a Hold keringési síkjában. (A–D) 22:00:34 GMT (greenwichi középidejű); 2022. július 3.; a porhold fázisa: 65%; fázisszög: $72,4^\circ$; epocha: 2000,0; képközép: RA (rektaszenczió) = 14 óra 11 perc 3,89 másodperc; DE (deklináció) = $-11^\circ 39' 10,65''$. (E–H) 23:02:52 GMT; 2021. október 31.; a porhold fázisa: 65%; fázisszög: $73,1^\circ$; epocha: 2000,0; képközép: RA = 7 óra 9 perc 26,57 másodperc; DE = $26^\circ 9' 40,3''$. Az L4 és L5 pontok helyét kék pontok jelölik. Az α -mintázatokon a fehér pálcikák a helyi polarizációirányt mutatják. A zöld szórási síkra merőleges irányt a fehér egyenes szemlélteti. A porholdak főbb foltjainak körvonalát piros, illetve fehér zárt görbék jelzik a p - és α -mintázatokon. A p - és α -mintázatokon az egymásra merőleges fehér és zöld egyeneseken túli vonalak műholdak nyomai. (I–L) 20:14:51 GMT; 2022. július 24.; fázisszög: $96,3^\circ$; epocha: 2000,0; képközép: RA = 14 óra 11 perc 3,89 másodperc; DE = $-11^\circ 39' 10,65''$), amikor az L4 pont nem volt ebben az égi ablakban, ezért „L4” az L4 pont 2022. július 3-i 22:00:34 GMT időpontbeli helyét jelöli [8]

bákolások alatti változó, gyakran kedvezőtlen égi vagy csillagászati feltételek – ugyanis a Napnak és a Holdnak megfelelően mélyen kell járnia a horizont alatt, hogy fényük ne szennyezze az éjszakai eget, továbbá a légkörnek minél aeroszolmentesebbnek kell lennie, hogy megfelelően nagy legyen az optikai átlátszósága.

Az L4 és L5 porholdak aszimmetrikus megfigyelési gyakorisága egy további lehetséges okának kiderítése érdekében számítógépes modellezéseket végeztünk [7], amelyek során meghatároztuk az L4 és L5 pontok részecskecsapdázási képességét a porholdak 16 (L5) + 5 (L4) = 21 publikált megfigyelési dátuma előtti 28 napos időszakokban – figyelembe véve a Nap gravitációs hatását, valamint a földpálya excentricitását és a Hold pályasíkjának dőlésszögét az ekliptikához képest. Azt találtuk, hogy a megfigyelési dátumtól függően az L5 pont legfőljebb 9%-kal nagyobb befogási képességű, mint az L4 (aminek pontos fizikai oka egyelőre nem világos).

A csapdázási hatékonyság ezen eltérése lehet az egyik oka annak, hogy a Kordylewski-porholdat miért figyelték meg sokkal gyakrabban az L5 pont körül, mint az L4 környékén.

Az 1. ábra egy példát mutat a Föld–Hold-rendszer L4 és L5 pontjai körül 1961. szeptember 3. (a porhold legelső, Kordylewski általi megfigyelésének napja) előtti i -edik napon csapdába esett, libráló részecskék $N_{L_4}(i)$ és $N_{L_5}(i)$ számaira i ($= -28, \dots, -1, 0$) függvényében [7]. A porhold többi ismert 20 észlelési dátuma előtti 28 napos időszakokra néha az $N_{L_4}(i) > N_{L_5}(i)$, olykor az $N_{L_4}(i) < N_{L_5}(i)$ viszony volt jellemző, míg máskor az $N_{L_4}(i) \approx N_{L_5}(i)$ közelítő egyenlőség. Az $N_{L_4}(i)$ és az $N_{L_5}(i)$ görbe sokszor egyaránt nőtt vagy csökkent az idővel, de számos alkalommal időben ellentétesen változott (1. ábra). Mindazonáltal a vizsgált négyhetes időtartományok végéig mindig az L5 pont csapdázott valamennyivel több ($\leq 9\%$) részecskét [7].

A bolygóközi por által szórt napfény polarizációjának éjszakai észlelésében hatékonyan bizonyult csillagászati polarimetria magyarországi alkalmazását az országunkra jellemző igen kedvezőtlen asztróklíma gátolja. Egyrészt korlátozottak a fényszennyezésmentes helyek, másrészt pedig évente csak tíz körüli éjszakán igaz egyszerűen az, hogy kedvezően aeroszolszegény a felhőtlen égbolt, és egyidejűleg a Föld–Hold-rendszer L4 vagy L5 Lagrange-pontja holdmentes égbolton tartózkodik. E probléma kiküszöbölése végett kedvező asztróklímájú helyszíneken (például száraz sivatagokban) érdemes folytatni a bolygóközi por poláros szórt fényének vizsgálatát egy hordozható nagy látószögű, polariméterrel felszerelt teleszkóppal.

E célból alakult meg 2022. július 1-én az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén Horváth Gábor vezetésével a Magyar Kutatási Hálózat (korábban Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, ELKH) és az ELTE közös Asztropolarimetria Kutatócsoportja, ami a (ELKH-) HUN-REN-ELTE-0116607 számú, 66 hónap futamidejű pályázat keretében elkezdett építeni egy hordozható széles látómezőjű polarizációs távcsövet. Ezzel a következő öt évben a namíbiai Khomas régióbeli középső fennsík egyik ideális asztróklímájú asztrófarmján, az ISABIS Astro Lodge-ban tervezzük mérni a bolygóközi porok, köztük a Kordylewski-porholdak és az állatövi fény polarizációs sajátságainak változását és dinamikáját. 2023. július–augusztusában sikeresen lezajlott az első négyhetes namíbiai mérőkampányunk, aminek eredményei publikálás alatt állnak.

Amíg ezen új távcső fölépült, és elkezdődhetek vele a namíbiai megfigyelések, addig a badacsonytörдемici magánobszervatóriumban működő polarizációs teleszkóppal folytatódtak a polarimetriai mérések. Az utóbbi távcsővel elért legújabb eredményként Badacsonytörдемicen 2021. október 31-én éjjel harmadszorra észleltük az L5 pontnál a Kordylewski-porholdat, és 2022. július 3. éjszakáján első alkalommal az L4 pont körüli porholdat (2. ábra) [8]. A 2017. évi kettővel együtt e két új polarimetriai észlelés alkalmasint elosztatja a Föld és a Hold L4 és L5 Lagrange-pontjainál kialakult Kordylewski-porholdak létezése körüli bizonytalanságot.

Köszönetnyilvánítás

A HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport kutatásait a Magyar Kutatási Hálózat (korábban Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, ELKH) „Hordozható képalakító polariméteres csillagászati távcső építése és a Föld kedvező asztróklímájú területein történő alkalmazásai, különös tekintettel a Kordylewski-porholdakra” című, (ELKH-) HUN-REN-ELTE-0116607 számú, 2022–2027 (66 hónap) futamidejű pályázata támogatja.

Hivatkozások

- Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G.: Kordylewski porholdjának polarimetriai észlelése: Lagrange égi porszivója. *Természet Világa* 150 (2019) 169–175.
- Horváth Á., Horváth G.: A Kordylewski-féle porholdak kialakulásának számítógépes modellezése. *Fizikai Szemle* 40 (1990) 338–344.
- Horváth G., Slíz-Balogh J.: Interjú Kazimierz Kordylewski lengyel csillagász fiával: porholdmérés polarimetriával. *Élet és Tudomány* 74 (2019) 425–427.
- Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G.: Celestial mechanics and polarization optics of the Kordylewski dust cloud in the Earth-Moon Lagrange point L5 – Part I. Three-dimensional celestial mechanical modelling of dust cloud formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 480 (2018) 5550–5559. DOI: 10.1093/mnras/sty2049
- Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G.: Celestial mechanics and polarization optics of the Kordylewski dust cloud in the Earth-Moon Lagrange point L5 – Part II. Imaging polarimetric observation: new evidence for the existence of Kordylewski dust cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 482 (2019) 762–770. DOI: 10.1093/mnras/sty2630
- Slíz J.: A Föld–Hold rendszer L5 Lagrange-pontja körüli Kordylewski-porhold kaotikus dinamikája és képalakító polarimetriája. Doktori (PhD) értekezés (2020), ELTE TTK, Fizikai Intézet, Budapest, 99 o. (témavezető: Süli Áron, konzulens: Horváth Gábor)
- Slíz-Balogh J., Érdi B., Horváth D., Horváth G.: Why was the Kordylewski dust cloud observed more frequently at the L5 Lagrange point than at L4? Asymmetry of the particle capture at the triangular Lagrange points of the Earth–Moon system. *Icarus* 374 (2022) 114814. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114814
- Slíz-Balogh J., Mádai A., Sári P., Barta A., Horváth G.: First polarimetric evidence of the existence of the Kordylewski dust cloud at the L4 Lagrange point of the Earth-Moon system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 518 (2023) 5236–5241. DOI: 10.1093/mnras/stac3429

Mi az a Lagrange-pont?

A közös tömegközéppontjuk körül keringő két égitest gravitációs terében egy harmadik, kisebb test számára létrejön öt egyensúlyi pont, ezek a *Lagrange-pontok*. A csillagászatban ez a térnek az az öt pontja (L1, L2, L3, L4, L5), ahol két nagyobb égitest (például a Nap és a Föld, vagy mint ebben a dolgozatban kifejtik a szerzők: a Föld és a Hold) kombinált gravitációs ereje megegyezik egy sokkal kisebb, harmadik test centrifugális erejével. Mivel pedig a klasszikus fizikában az erő és a vele megegyező ellenerő kioltja egymást, a kisebb test ebben az esetben relatíve nyugalomban maradhat. A Lagrange-pont tehát ebből a szempontból hasonló a *geostacionárius pályához*. A pontok a nevüket Joseph-Louis Lagrange-ról, a 18. században élt matematikusról kapták, aki 1772-ben írt a jelenségről a háromtest-problémát boncolgató tanulmányában.