

A Naphoz hasonló csillagok elemgyakoriságai és a planetáris kémia

Tömege, luminozitása és több más fontos fizikai jellemzője alapján a Napot átlagos csillagnak gondoljuk a Tejútrendszerben. De vajon tipikusnak számít-e nehézelem-tartalma alapján galaxisunk többi, Naphoz hasonló tömegű fősorozati csillaga között? A csillagok kémiai összetétele információkat szolgáltat annak az anyagnak az eredeti kémiai összetételéről, amelyből a csillag és bolygórendszere kialakult. Ezért a csillagok elemgyakoriságainak vizsgálata fontos szerepet kaphat a bolygókeletkezés jobb megértésére irányuló kutatásokban is. Mivel életet hordozó Földünk épp egy olyan típusú csillag körül alakult ki, mint a Nap, a hozzá hasonló csillagok kémiai elemzése különösen érdekes lehet számunkra.

Futó Péter

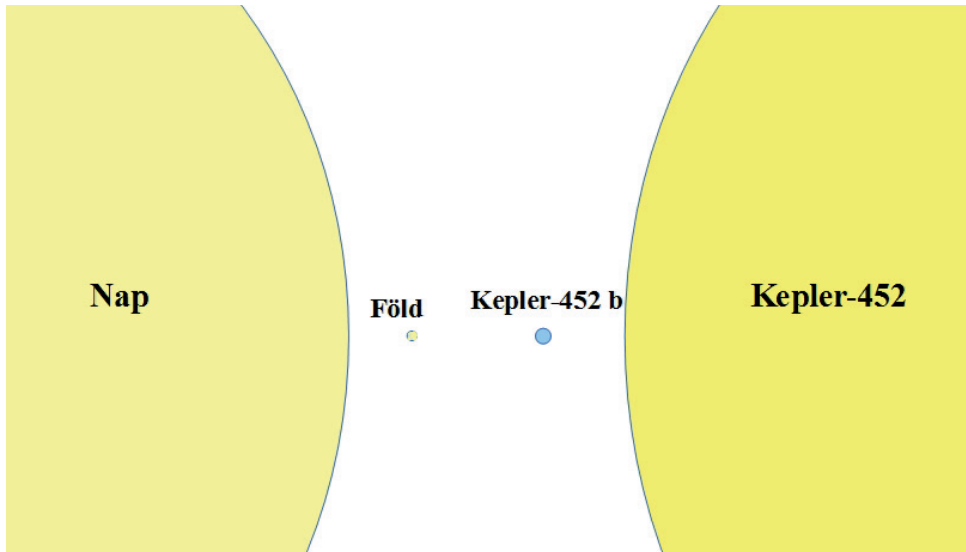
Debreceni Egyetem,
Ásvány- és Földtani
Tanszék, Debrecen

A NAP ÉS MÁS NAP-TÍPUSÚ CSILLAGOK

A csillagászati szakirodalom gyakran az F, G, K színképtípusú főági csillagokat sorolja a Nap-típusúak közé, a szakcikkek egy tekintélyes hányada azonban leginkább csak a G színképtípusú csillagok kategóriájába tartozó, a Naphoz hasonló fizikai tulajdonságokkal rendelkező fősorozati csillagokat jelöli így. Az egyik legjobb értelmezés szerint a Nap-szerű (*Solar twin*) csillagok effektív hőmérséklete a szoláris érték ± 50 K-es hőmérsékleti tartományában, fémessége pedig a szoláris érték ± 0.05 dex-es tartományában jelölhető ki [1]. A Nap középkorú, G2V spektráltípusú fősorozati csillag, amely körül a keringő objektumok típusait, azok kémiai összetételét tekintve változatos bolygórendszer fejlődött.

A Nap-típusú csillagok óriás molekulafelhőkben keletkeznek, a felhőmagok gravitációs összeomlása útján. A Tejútrendszer csillagainak mintegy 4–7%-a G színképtípusú fősorozati csillag. Ebből mindössze 1–2% körül van a Naphoz nagyon hasonlóak (Nap-szerű csillagok) száma, azonban galaxisunkat legalább 200 milliárd csillag alkotja, ennek megfelelően pedig több milliárd Nap-szerű csillag is létezhet a Tejútrendszerben. Ennek azért is nagy a jelentősége, mert a Földhöz sok tekintetben hasonló (Föld-szerű) bolygók leginkább a Naphoz hasonló csillagok körül alakulhatnak ki.

A Nap mágneses aktivitása flerek, koronakitörések, valamint más üridőjárási jelenségek kialakulását eredményezi, mindezek pedig hatással vannak a Földre is. A csillagaktivitás ezen formái jelentős mértékben meghatározzák a körülöttük keringő bolygók lakhatóságának feltételeit. A Nap és a Nap-típusú csillagok mágneses aktivitásának mértéke idővel változik, ami szoros korrelációban áll a fényességük változásával. Az aktívabb csillagok nagyobb fotometriai változatosságot mutatnak [2]. A legtöbb Nap-típusú csillag a Napnál jóval aktívabb [3]. Az azonban tisztázatlan kérdés maradt, hogy a Nap más csillagokéhoz képesti kisebb aktivitása tartós állapot, vagy pedig a napaktivitás jelenlegi szintje



1. ábra: A Föld, valamint a lakhatósági zónában keringő Kepler-452 b és csillagaik méretének összehasonlítása

évezredek vagy évmilliók alatt változni fog-e. Ennek kapcsán további nyitott kérdés, hogy vajon a Nap mágneses aktivitása a jövőben elér-e majd egy nagyon magas aktivitási szintet, vagy pedig jelenleg átmeneti periódusban van egy csökkent aktivitású állapot felé. Mindezek kapcsán felmerül a kérdés, hogy Napunk vajon tipikusan számít-e a többi Nap-szerű csillag között, vagy pedig mind fizikai, mind pedig kémiai jellemzőit tekintve valamilyen mértékben különleges lehet, ami természetesen szintén hozzájárulhatott a körülötte fejlődött bolygórendszer harmadik bolygóján az élet evolúciójához.

A kérdés megválaszolásához közelebb vihet bennünket a Nap galaktikus szomszédságában, illetve a Tejútrendszer távolabbi vidékein található, a Naphoz hasonló csillagok kémiai összetételének vizsgálata is. A csillaglégkörök elemgyakoriságaiból ugyanis következtetni lehet a körülöttük keringő bolygótestek általános kémiai összetételére. A Föld-típusú bolygókat felépítő legfontosabb elemek naplégkörben mért gyakoriságai közelítenek a legősibb meteoritokban, a szenes kondritokban meghatározott releváns elemgyakoriságokkal. Ha ezt a tényt extrapoláljuk a távoli bolygórendszerekre, akkor a bolygókkal rendelkező csillagok elemgyakoriságaiból jó közelítéseket lehet adni a körülöttük keringő bolygók általános kémiai összetételére.

Megfigyelések szerint a Nap-szerű csillagok mintegy 5%-a rendelkezik olyan Földhöz hasonló méretű bolygóval, melynek keringési periódusa 200 és 400 nap közötti [4]. Kutatók már az 1990-es években rámutattak arra, hogy galaxisunk vékony korongjának csillagai nem szükségszerűen maradnak a születési helyük galaktocentrikus távolságában. A Nap fémessége ugyanis $+0.17 \pm 0.04$ dex értékkel magasabb, mint a galaktikus szomszédságunkban található hasonló korú csillagok átlagos fémessége [5]. Ez pedig azt sugallja, hogy csillagunk nem abban a távolságban született a Tejútrendszer közép-pontjától, mint amelyben jelenleg tartózkodik. Legalábbis más galaktikus környezetben, mint azok a csillagok, melyek fémességéhez a szoláris értéket viszonyították.

A SZOLÁRIS ÉS A SZTELLÁRIS ELEMGYAKORISÁG

A Nap nehézelem-tartalma a naptömeg mintegy két százalékát teszi ki. Ha a kőzetbolygókat felépítő legfontosabb elemek (O, Mg, Si, Fe) szoláris gyakoriságát figyelembe vesszük, a Nap anyaga ezekből az elemekből akkora mennyiséget tartalmaz, mely elegendő volna több ezer Földhöz hasonló méretű kőzetbolygó felépítéséhez.

A Nap fotoszférájában mért elemgyakoriságok jó egyezést mutatnak a Föld-típusú bolygókat felépítő legfontosabb elemek gyakoriságaival, s a Naprendszerre jellemző általános elemgyakoriságokkal. A Naprendszer anyagai közül a szenes kondrit típusú meteoritok alakultak át a legkisebb mértékben. Ezért elemösszetételük hűen őrzi az ősi Naprendszerre jellemző általános elemösszetételt. A Föld-típusú bolygótettek a napjainkban elfogadott nézet szerint a bolygórendszerünk ősi kondritos összetételű anyagából épültek fel. Ez a kondritos anyag nem csupán a szenes kondritokra jellemző elemösszetételt jelenti, hanem általánosan a kondritos meteoritokét. A Föld általános kémiai összetétele például az enstatit kondritokra jellemző elemösszetétel jegyeit is magában hordozza. Földünk testébe az akkréciója során valószínűleg többféle is beépült az ősi belső Naprendszerben található, kissé eltérő elemgyakoriságokat mutató anyagok közül.

A szoláris elemgyakoriság azt tükrözi, hogy a naprendszerbeli Föld-típusú bolygótettek uralkodóan nem szén alapú ásványokból, hanem szilikátokból és oxidokból épülnek fel. A nagy felbontású spektroszkópiai égbolt felmérő programok (RAVE, APOGEE, GALAH, LAMOST, Gaia-ESO) jelentős mértékben hozzájárultak a Tejútrendszer csillagai elemgyakoriságának megismeréséhez. A csillagok elemgyakoriságainak meghatározására irányuló vizsgálatok egyik fő motivációja a Tejútrendszer kémiai evolúciójának pontosabb megértése. További fontos cél a Naphoz hasonló csillagok kémiai összetételének összehasonlítása a Napéval. Az ilyen irányú komparatív vizsgálatok egyrészt segíthetnek jobban megérteni a bolygókeletkezés folyamatát, másrészt pedig segíthetnek annak feltárásában, hogy Naprendszerünk vajon milyen mértékben lehet atipikus más Nap-típusú csillagok bolygórendszerei között.

Meléndez és munkatársai tanulmányukban bemutatják, hogy a Napban refraktor elemekben jelentősebb hiány mutatkozik az alacsony kondenzációs hőmérsékletű elemek gyakoriságaihoz viszonyítva, mint a legtöbb Naphoz nagyon hasonló csillag esetében [6]. Svéd kutatók azt javasolják, hogy a Nap a legtöbb Naphoz hasonló csillagtól eltérően csillagokat sűrűn tartalmazó térrészben, már refraktor elemekben szegény protoszteLLáris korongban született. Ennek legfőbb oka a fényes csillagok porszemcsékre gyakorolt sugárnyomása lehetett a Nap kialakulását megelőzően [7].

NAP-SZERŰ CSILLAGOK BOLYGÓKKAL

A Kepler-űrtávcső adatai és a radiális sebesség módszerén alapuló statisztikai vizsgálatok szerint az exobolygó-rendszerek szerkezete drámai módon különbözik a Naprendszerétől. A Nap-szerű csillagok mintegy felének vannak olyan gázban gazdag, szuperföld méretű bolygói, melyek a Mer-

kürénál kisebb keringési távolságban járnak körül központi csillagukat [8]. Ugyanakkor a Kepler és a TESS tranzitmódszert alkalmazó űrtávcsövek mérései által a kutatók több olyan bolygórendszert is azonosítottak már, amelyekben közetbolygók keringenek a csillaguk lakhatósági zónájában. E bolygók egy része a Naphoz sok tekintetben hasonló csillag körül kering, megerősítve e bolygókereső küldetések megvalósításának motivációjához kapcsolódó korábbi elképzeléseket, melyek szerint a Földhöz hasonló méretű bolygók gyakoriak lehetnek a Naphoz hasonló csillagok körül.

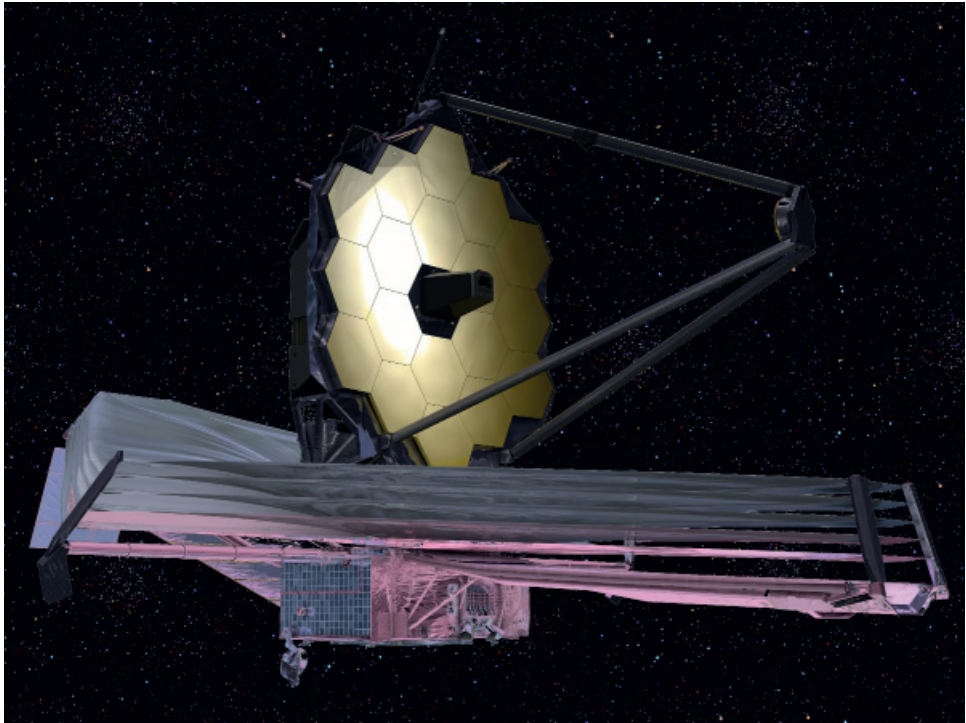
A kettőscsillagok tagjai ugyanazon összetételű csillagközi anyagból keletkeznek, ezért alapesetben kémiaiilag azonos kompozíciójú objektumoknak kellene lenniük. Egy Naphoz hasonló csillagokon elvégzett elemzés azonban kémiai különbségeket tárt fel a két tag között a csillagpárok egy jelentős részénél. A kémiai inhomogenitások pontos oka még nem tisztázott. Az egyik lehetőség szerint az elemgyakoriság-változások a protosztelláris gázfelhő kémiai inhomogenitásaiból erednek. A másik forgatókönyv alapján a tagok kémiai összetétele közötti eltérések annak köszönhetőek, hogy a csillagpár egyik tagja a csillagkeletkezést követően bolygókat nyelt el. Egy 107, a Naphoz hasonló csillagot tartalmazó csillagpár esetében végzett elemzés eredményei szerint a bolygórendszerek jelentős hányada rendkívül dinamikus fejlődési utat jár be, s bolygók elnyelésével együtt járó folyamatok a bolygórendszerek mintegy 20–35%-ánál fordulnak elő [9].

AZ ŰRTÁVCSÖVEK ÉS AZ EXOKÖZETBOLYGÓK KÉMIAJA

Korunkban a csillagászat és az asztrofizika egyik legfontosabb célja a Tejútrendszer kialakulásának, fejlődésének és szerkezetének jobb megértése. Átfogó spektroszkópiai és fotometriai égboltfelémérő programok során gyűjtött hatalmas adatmennyiség értelmezésével vizsgálják galaxisunk csillagainak térbeli eloszlását, fizikai tulajdonságait, korát és kémiai összetételét. A csillagok és a csillagközi anyag kémiai összetételének részletesebb vizsgálata útján következtethetünk a Tejútrendszer kémiai evolúciójának jellemzőire, az elemgyakoriságok lassú, de folyamatos változásaira, melyek hatással vannak az új csillag- és bolygópopulációk kémiai összetételének alakulására.

Az érzékeny szinképelemző műszerekkel felszerelt űrtávcsövek méréseinek rendkívül fontos szerepe lehet az extraszoláris bolygórendszerek kémiai jellemzőinek felderítésében. A transzmissziós spektroszkópia módszerének alkalmazásával a csillaguk előtt áthaladó bolygók légköri atomjainak és molekuláinak azonosítására nyílik lehetőség. A világűrben működő űrtávcsövek kitűnő pontosságú spektrográfjaival végzett megfigyelések új fejezetet nyitottak az exobolygó-kutatásban. A Spitzer- és a Hubble-űrtéleszkópok segítségével például nagy mennyiségű vízre utaló nyomokat találtak a WASP-39 b, a Szaturnuszhoz hasonló tömegű, azonban annál nagyobb méretű forró gázbolygó atmoszférájában. A James Webb-űrtávcső (JWST) segítségével pedig első ízben mutatták ki pontosan szén-dioxid jelenlétét egy exobolygón, épp a WASP-39 b légkörében [10]. Megjegyzendő, hogy ez volt a Webb-űrtávcsőnek az első, egy exobolygón végzett hivatalos tudományos megfigyelése. Az olyan kulcsfontosságú molekulák, mint például a szén-dioxid azonosítása révén megbízható információkat szerezhetünk a bolygók kémiai összetéte-

lére vonatkozóan, valamint betekintést nyerhetünk kialakulásuk folyamatába és a bolygótestek evolúciójába is. A JWST közeli infravörös tartományban (0,5–6 μm) működő spektrográfja (NIR-Spec) többek között a bolygók és a protoplanetáris korongok vizsgálatára is kiválóan alkalmas. A NIRSpec a Földhöz hasonló méretű exoközbolygók légköri összetevőinek nagy pontosságú elemzésére is képes.



2. ábra: A James Webb-űrtávcső. (Forrás: NASA)

A bolygók légkörét alkotó gázokban az egyik legérdekesebb komponens a szén. A spektroszkópiai elemzést követően például megbecsülhető egy bolygón található összes szén mennyisége, ami azért is lényeges információ, mert az eredményből következtetni lehet annak a bolygórendszernek a legfőbb kémiai tulajdonságaira, melyben a vizsgált planéta kialakult. A bolygókon becsült szén mennyiség-ből közelítő modelleket lehet készíteni a bolygórendszerre általánosan jellemző C/O arányra, amely eredményt azután össze lehet vetni a központi csillag szintén spektroszkópiai úton meghatározott releváns elemgyakoriságaival.

Érdekességgéppen megjegyzendő, hogy az űrtávcső alkalmas lehet kis és nagy tömegű exobolygók felfedezésére fehér törpecsillagok rendszereiben is. Egy érdekes tanulmány rávilágít, hogy a Webb-űrtávcső közepes felbontású spektroszkópia alkalmazásával képes detektálni gázóriásokat, valamint a Földhöz hasonló méretű és nála kisebb tömegű exobolygókat is közeli fehér törpék körül [11]. Sőt a szerzők szerint a megfelelő spektrumok felvételével még esetleges

biomarkerek nyomai is kereshetők a fehér törpék közetbolygóinak atmoszférájában. A fehér törpék körüli exobolygók vagy azokból származó anyag kutatása többek között azért is érdekes, mert e csillagmaradványok elődcillagainak egy része a Naphoz hasonló csillag lehetett, ezáltal még szélesebb ismeretekkel rendelkezhetünk a Naphoz hasonló csillagok bolygórendszereinek jellemzőiről.

HIP / távolság (pc)	T_{eff} (K)	Fe/H	Tömeg (M_{Nap})	Sugár (R_{Nap})	C/O	Mg/Si	Színkép- típus
A Naphoz effektív hőmérsékletben és fémességben nagyon hasonló csillagok ($T_{\text{eff}} = 5771 \pm 100$ K; Fe/H = $0,00 \pm 0,05$)							
49728 / 35,79	5751,25	-0,05	1,03	1,04	0,61	1,25	G2V
106438 / 45,42	5768,50	-0,03	1,03	1,25	0,38	-	G2/3V
14339 / 51,18	5808,50	-0,03	1,04	1,24	0,40	1,26	G2V
16544 / 52,26	5728,50	-0,01	1,02	0,90	-	1,12	G2V
52472 / 43,53	5797,33	0,04	1,04	1,59	-	0,90	G2/3V
A Naphoz tömegben és méretben hasonló csillagok							
58950 / 36,25	5731,4	-0,14	1,01	0,97	0,53	1,20	G2V
76911 / 55,21	5725,7	-0,16	1,01	1,03	-	1,38	G2V
23259 / 40,47	5680	0,00	1,01	0,97	-	0,73	G2V
78217 / 29,59	5660	-0,25	0,99	1,03	-	1,21	G2V
98959 / 17,91	1791	-0,21	1,02	1,03	0,53	1,23	G2V

1. táblázat: Az effektív hőmérséklet és a fémesség, illetve a tömeg és a méret tekintetében a Naphoz nagyon hasonló csillagok a bolygótestek keletkezése szempontjából fontos elemarányokkal. Az adatok forrása a *Hypatia* katalógus [12]

ÖSSZEGZÉS

Az olyan űrtávcsövek, mint a JWST, az Ariel és a HabEx (*Habitable Exoplanet Observatory*) jelentős mérföldkövek lehetnek a lakható exobolygók azonosításában. A közetbolygókból származó anyagok, s a bolygóléggörök kémiájának elemzése közelebb vihet az egyes kis tömegű bolygótípusok gyakoriságának, valamint az élet elterjedtségének pontosabb becsléséhez.



3. ábra: A tervezett HabEx űrtávcső. (Forrás: NASA)

Irodalomjegyzék

- [1] Soderblom D.R., King J.R. (1998): *Solar-Type Stars: Basic Information on Their Classification and Characterization*. In Hall J.C. (szerk.), *Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates. The Second Annual Lowell Observatory Fall Workshop, October 5–7, 1997*. Lowell Observatory, 41
- [2] Shapiro A.I. et al. (2013): The place of the Sun among the Sun-like stars. *Astronomy & Astrophysics*, 552, A114
- [3] Reinhold T. et al. (2020): The Sun is less active than other solar-like stars. *Science*, 368, 518
- [4] Petigura E.A. et al. (2013): Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 19273
- [5] Vielen R. et al. (1996): On the birth-place of the Sun and the places of formation of other nearby stars. *Astronomy & Astrophysics*, 314, 438
- [6] Meléndez J. et al. (2009): The Peculiar Solar Composition and its Possible Relation to Planet Formation. *Astrophysical Journal Letters*, 704, L66
- [7] Önehag A. et al. (2014): Abundances and possible diffusion of elements in M67 stars. *Astronomy & Astrophysics*, 562, A102
- [8] Bedell M. et al. (2018): The Chemical Homogeneity of Sun-like Stars in the Solar Neighborhood. *Astrophysical Journal*, 865, 68
- [9] Spina L. et al. (2021): Chemical evidence for planetary ingestion in a quarter of Sun-like stars. *Nature Astronomy*, 5, 1163
- [10] JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team (2023): Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere. *Nature*, 614, 649
- [11] Limbach M.A. et al. (2022): A new method for finding nearby white dwarfs exoplanets and detecting biosignatures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517, 2622
- [12] Hinkel N.R. (2014): Stellar Abundances in the Solar Neighborhood: The Hypatia Catalog. *Astronomical Journal*, 148, 54