



**A sztelláris Mg/Si, C/O, Fe/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si  
elemarányok változékonysága és hatása a kőzetbolygók  
ásványtani felépítésére: Kozmokémiai és asztroásványtani  
modellezések**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Futó Péter

Témavezető: Dr. Gucsik Arnold

DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács

Földtudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2026

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács, Földtudományok Doktori Iskola Lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Debrecen, 20. ....

.....

a jelölt aláírása

Tanúsítom, hogy Futó Péter doktorjelölt 2020-2025 között a fent megnevezett Doktori Iskola Lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai programjának keretében irányítással végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 20.. ....

.....

a témavezető aláírása

**A sztelláris Mg/Si, C/O, Fe/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányok  
változékonysága és hatása a kőzetbolygók ásványtani felépítésére:  
Kozmokémiai és asztroásványtani modellezések**

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében  
a földtudományok tudományágban

Írta: Futó Péter okleveles geográfus

Készült a Debreceni Egyetem Földtudományok doktori iskolája  
(Lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai programja) keretében

Témavezető: Dr. Gucsik Arnold

Az értekezés bírálói:

Dr. ....

Dr. ....

A bírálóbizottság:

elnök: Dr. ....

tagok: Dr. ....

Dr. ....

Dr. ....

Dr. ....

Az értekezés védésének időpontja: 20... . . . . .

## **Tartalomjegyzék**

<b>1. BEVEZETÉS .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. A témaválasztás indoklása és a disszertáció célkitűzései .....</b>	<b>7</b>
<b>2. SZAKIRODALMI ÉS TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 A modern kozmokémia és a bolygótudomány .....</b>	<b>10</b>
2.1.1. A modern bolygótudomány és a más csillagok körül keringő bolygók .....	12
<b>2.2 A planetáris kozmokémia és a bolygóásványtan .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 A hazai kozmo-geokémia és asztroásványtan fejlődésének történeti áttekintése .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 A kutatás előzményeinek feltárása .....</b>	<b>18</b>
2.4.1. A Tejútrendszer kémiai összetétele a kőzetbolygókat felépítő főbb kémiai elemek tükrében .....	18
2.4.2. A Föld-típusú bolygók kialakulásának alapmodellje és a kondenzációs sorozat .....	21
2.4.3. A szoláris elemgyakoriság és a kondritos összetétel .....	25
(	
2.4.4. A Föld kémiai modellje és általános ásványtani összetétele .....	26
2.4.5. A kőzetbolygók általános ásványtani felépítése a meghatározó elemarányok függvényében .....	29
<b>2.5. A sztelláris elemgyakoriságok és a kőzetbolygók ásványtani felépítése: a kutatási előzmények áttekintése .....</b>	<b>31</b>
<b>3. MÓDSZEREK .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 A kutatási módszerek kialakításában meghatározó szerepet játszó alapvetések és szemléletek .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Az adatok forrásai .....</b>	<b>34</b>
3.2.1. A magnézium-szilikátok gyakoriságának becslése .....	34
3.2.2. A Hypatia-katalógus .....	34

3.2.3. A NASA Exobolygó Archívum .....	35
<b>3.3 A sztelláris elemgyakoriságok statisztikai elemzése .....</b>	<b>35</b>
3.3.1. A Nap 30 pc sugarú környezetében található G-és F-spektráltípusú fősorozati csillagok elemgyakoriságainak mintaválogatása-az S/Fe, C/Si, Ca/Mg, Al/Mg és O/Si elemarányok meghatározása .....	35
3.3.2. A Nap 50 pc sugarú környezetében található G-és F-spektráltípusú fősorozati csillagok elemgyakoriságainak mintaválogatása-C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok meghatározása .....	36
3.3.3. Alkalmazott statisztikai módszerek .....	37
3.3.4. A kutatási eredmények értékelési rendszerének definiálása .....	38
<b>4. EREDMÉNYEK .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1. A magnézium-szilikátok gyakoriságának becslése az Mg/Fe arány alapján .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2 Az Mg/Si, a C/O, a Ca/Si, az Al/Si elemarányok változásának hatása a kőzetbolygók plauzibilis ásványtani összetételére .....</b>	<b>42</b>
4.2.1. A teresztrikus bolygótetek ásványtani összetétele a szoláris értéknél magasabb Mg/Si arány mellett .....	42
4.2.2. A teresztrikus bolygótetek ásványtani összetétele a szoláris értéknél alacsonyabb Mg/Si arány esetén .....	45
4.2.3. A kén és a vas arányának jelentősége a kőzetbolygók elemösszetételében .....	48
4.2.4. A C/O és a C/Si arány változásának hatása a kőzetbolygók ásványtani felépítésére .....	49
4.2.5. A kalciumban és alumíniumban gazdag kőzetbolygók ásványtani összetételének lehetséges forgatókönyvei .....	53
4.2.6. A szolárisnál magasabb O/Si arány előfordulása alacsony C/O arányú csillagok környezetében .....	56
<b>4.3. A sztelláris Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok variabilitása és a potenciális kőzetbolygók plauzibilis ásványtani összetétele a Nap 50 parszek sugarú galaktikus környezetében.....</b>	<b>57</b>

4.3.1. A sztelláris elemarányok eloszlása a teljes vizsgált C/O aránytartományban .....	58
4.3.2. Az elemarányok eloszlása a C/O <0.65 tartományban .....	65
4.3.3. A C/O elemarányok eloszlása a 0,5 alatti tartományban .....	66
4.3.4. A bolygóval rendelkező csillagok sztelláris elemarányainak eloszlása .....	67
4.3.5. A gyakori és ritka ásványtani kompozíciók potenciális előfordulása galaktikus környezetünk kőzetbolygó-populációjában .....	72
4.3.6. A szoláris C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányokkal közelítőleg azonos kombináció előfordulásának ritkasága a Nap 50 parszek sugarú galaktikus környezetében .....	74
<b>4.4. A potenciális Föld -típusú exobolygók kémiai és ásványtani diverzitása a Nap galaktikus környezetében .....</b>	<b>79</b>
<b>5. Konklúziók .....</b>	<b>82</b>
<b>6. Összefoglalás .....</b>	<b>87</b>
<b>7. Summary .....</b>	<b>94</b>
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>100</b>
<b>Irodalomjegyzék .....</b>	<b>101</b>
<b>Ábrák, táblázatok jegyzéke .....</b>	<b>115</b>
<b>Mellékletek .....</b>	<b>119</b>

## 1. BEVEZETÉS

### *1. A témaválasztás indoklása és a disszertáció célkitűzései*

A más csillagok körül keringő (extraszoláris) Föld-típusú bolygók kutatása a tudományos jelentőségen messze túlterjedő érdeklődésre tart számot, főként az élet általunk ismert formái kialakulásának lehetősége miatt. Az exo-planéták tanulmányozásával foglalkozó exoplanetológia egyik fontos feladata az összehasonlító szemlélet minél szélesebb körű alkalmazása, mely közelebb visz a Naprendszer és benne saját bolygónk kialakulásának és fejlődésének jobb megértéséhez is. A bolygó kutatásban a komparatív szemlélet kialakításában és alkalmazásában pedig többek között az asztroásványtan bolygótestek ásványtani felépítésével foglalkozó kutatási területe is egyre fontosabb szerephez jut.

A mai modern természettudományos gondolkodásban központi szerepet játszik a közelebbi és távolabbi kozmikus környezetünk minél részletesebb, pontosabb felderítése, tanulmányozása. Ebben a törekvésben kiemelt fontosságú a komplex szemlélet egyre szélesebb körű alkalmazása, az űrkutatásban pedig különösen felértékelődnek a tudományközi kapcsolatok, az interdiszciplinaritás.

Az exoplanetológia a földtudományok, a planetológiai ismeretek, adott vizsgálati módszerek egyfajta kiterjesztése más csillagok bolygóinak vizsgálatára. A több, mint két évtizedes megfigyeléseken alapuló ismeretek összessége újabakkal folyamatosan kiegészülve egy olyan új tudományterületté nőtte ki magát, melynek gyorsuló fejlődése a kapcsolódó diszciplínákat is katalizálja. Ennek hatására az exoplanetológia fejlődése nemcsak a csillagászathoz és az asztrofizikához közvetlen módon kapcsolódó tudományterületek, de a földtudományok és ezek határterületeinek fejlődéséhez is jelentős mértékben hozzájárul.

Az értekezés témája részben a planetológia, mint alapkutatás vizsgálati körének extraszoláris kiterjesztéséhez, az exoplanetológiához kapcsolódik, s a Föld-típusú bolygótestek alapvető, plauzibilis kémiai tulajdonságaival és ásványtani felépítésével foglalkozik.

Az értekezésben bemutatott kutatómunka egyik célkitűzése a C/O és Mg/Si sztelláris elemarányok meghatározott szempontok szerinti elemzését követő interpretációk révén annak előrejelzése, hogy ezen elemarányok változásai miként lehetnek hatással a Naptól számított 50 parszek sugarú térrészen belül található G- és F-színképtípusú csillagok körül kialakult potenciális teresztrikus-típusú bolygók ásványtani összetételére. A Ca/Si, az Al/Si, a

Na/Si, a Fe/Si, az S/Fe, a C/Si, a Ca/Mg valamint az Al/Mg is szereplenek a vizsgált elemarányok között.

A dolgozat további céljaként az eredmények értelmezése és a konklúziók felállítása során egyúttal kísérletet teszek egy, a bolygóásványtanban alkalmazható kutatásspecifikus összehasonlító szemlélet kialakítására is. Ennek keretében egyik fő cél az összehasonlító szemlélet alkalmazásával egy új nézőpont kialakítása a Földről, azáltal, hogy a kőzetbolygók összetételének kialakulásában alapvető fontosságú kémiai elemek Naprendszerre jellemző relatív gyakoriságait meghatározott szempontok szerint hasonlítom össze a Nap galaktikus környezetében vizsgált relatív sztelláris elemgyakoriságokkal.

A disszertációban bemutatott kutatómunka előzményeit részben az utóbbi években nemzetközi folyóiratokban publikált szakcikk, valamint szintén az elmúlt időszakban közlésre került tudományos közlemények és egyéb magyar nyelven megjelent írások képezik. A modellalkotáshoz felhasznált adatok, ismeretek forrásainak bázisát online-adatbázisok, műszeres vizsgálat, valamint az a terjedelmes szakirodalom jelenti, amely főként szakfolyóiratokban megjelent cikkekből áll, de ezek mellett éppúgy szerepelnek a témához kapcsolódó magyar nyelven publikált közlemények, mint angol nyelven íródott könyvfejezetek.

## 2. SZAKIRODALMI ÉS TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

Az élet általunk ismert formájának fennmaradásához és kialakulásához elengedhetetlen egy összetett feltételrendszer megléte, amelynek egyik kulcseleme a biogén elemek (C, O, H, N, S, P) megfelelő arányú és mennyiségű jelenléte egy stabil fizikai-kémiai környezetben. Az ilyen környezetben szükséges egy tartós energiaforrás, amely biztosítja az életfolyamatok fennmaradásához szükséges energiát. Az élet magas fokú szervezettségéhez vezető, hosszú időskálán lezajló evolúciós folyamat feltételezi a folyékony víz tartós és elegendő jelenlétét, valamint a bolygófelszíni környezeti feltételek hosszú távú stabilitását. A hosszú távon fennálló stabil fizikai-kémiai környezethez bolygónk geológiai aktivitása szolgáltatja az anyagkörforgást, melynek alapja a lemeztektonika.

A Föld, mint planetáris test kialakulásának és különleges fejlődési útjának jobb megértéséhez olyan elméletekre van szükség, amelyek figyelembe veszik azokat a kémiai feltételeket is, amelyek elősegíthették a bolygó hosszú távú fejlődését. A fenti kémiai feltételek kutatásának egyik fontos iránya annak vizsgálata, hogy a Naprendszer átlagos kémiai összetétele, különösen a Föld-típusú bolygókat felépítő főbb elemek (mint például Mg, Si, Fe) gyakorisági arányai egyáltalán tipikusnak tekinthetők-e a galaktikus környezetünkben található csillagok bolygórendszereihez viszonyítva.

Egészen az elmúlt évekig a Föld fejlődését kutató tanulmányok nagy része nem fordított kellő figyelmet azokra a kőzetbolygók képződése szempontjából kritikus fontosságú elemarányokra, amelyek meghatározó szerepet játszanak a földi ásványtani és geokémiai összetétel kialakulásában. Ennek egyik oka, hogy csupán az elmúlt három évtizedben váltak elérhetővé megbízható pontosságú adatok a galaktikus csillagpopulációk kémiai összetételéről. Továbbá, a Föld-típusú bolygók keletkezésének kémiai feltételeire vonatkozó ismeretek is csak az utóbbi húsz évben fejlődtek olyan szintre, hogy megalapozott összehasonlító elemzések váljanak lehetővé az átlagos szoláris elemösszetétel és a sztelláris környezetek releváns elemgyakoriságai között. Az ilyen összehasonlítások megfelelő értelmezéséhez és megbízható következtetések levonásához elengedhetetlen a kozmikus elemgyakoriságok, valamint a Tejútrendszer kémiai evolúciójának bolygóképződésre gyakorolt hatásának ismerete.

A 20. század második felétől kezdődően, különösen az elmúlt néhány évtized során, ugrásszerűen bővült a Földünkkel, a Naprendszerrel és a galaktikus környezetünkkel kapcsolatos ismeretanyag-messze meghaladva mindazt, amit az emberiség az azt megelőző évezredekben felhalmozott. Az első égi jelenségek megfigyelésétől a modern természettudomány által kínált,

rendszer szintű és magas szintű tudásig vezető út hosszú, de folyamatos előrehaladást mutat.

## ***2.1 A modern kozmokémia és a bolygótudomány***

Már több ókori természetfilozófus sejtette, hogy a Földet, a Napot, a Holdat és a csillagokat magában foglaló tágabb világ, a Kozmosz, jóval nagyobb lehet annál, mint azt a kor legtöbb embere a hétköznapi tapasztalatai alapján gondolta. Az ókor emberének az égitestek valódi természetéről azonban még csupán nagyon hiányos ismeretei voltak.

A Világegyetemről alkotott szemlélet gyökeres átalakulása a 16. században vette kezdetét, amikor a kopernikuszi heliocentrikus világkép térnyerésével általánosan elfogadottá vált, hogy a Föld is csupán egy a Nap körül keringő bolygók közül, és hogy a Hold bolygónk természetes kísérője.

Az első tudományos igényű bolygókeletkezési elmélet René Descartes nevéhez fűződik, míg a Naprendszer kialakulására vonatkozó első nebuláris hipotézist Immanuel Kant fogalmazta meg. Ez utóbbit Pierre-Simon de Laplace továbbfejlesztette, kimondva, hogy a Nap és bolygói egy ősi, kaotikus gáz- és porfelhőből kondenzálódtak ki. A csillagászatnak, azon belül a bolygók keletkezését magyarázó elméleteknek Kant nebuláris hipotézise adott impulzust a XVIII-XIX század során. Azonban a bolygókozmozgónia és a Föld-típusú bolygók összetételére vonatkozó kutatások csak később a XX. század második felében kezdődtek meg. A kozmikus kémia története több, mint kétszáz évvel ezelőttig vezethető vissza, amikor először ismerték fel, hogy a meteoritok nem a földi geológiai folyamatok által keletkeznek, hanem a világűrben származnak. A XVIII. században többen is feltételezték, hogy a meteoritok kozmikus eredetűek, azonban a meteoritok kapcsán az első kémiai elemzést E. Howard angol kémikus 1802-ben publikálta. A népszerű hipotézis, mely szerint a meteoritok egy, a Mars és Jupiter között húzódó aszteroida-övben egykor létezett, széttöredezett bolygóból származnak, azután látott napvilágot, hogy Giuseppe Piazzi itáliai csillagász 1801-ben felfedezte a Ceres-kisbolygót.

Az ezt követő évszázadokban, különösen a 18-19. században, a csillagászati és földtudományi felfedezések egy egységesebb, tudományosan megalapozott világkép kialakulását tették lehetővé. Ugyanakkor a csillagászat és a geológia közötti szorosabb kapcsolat csak a 20. században alakult ki.

A kozmikus anyagok kémiájának modern értelmezésű elnevezése, a kozmokémia Victor Goldschmidt (1888-1947) norvég geokémikustól származik, aki 1937-ben közölt elsőként olyan elemeloszlási táblázatot, amely meteoritok elemzésén alapult, és a Naprendszerbeli anyagok tipikus kémiai összetételét reprezentálja. Goldschmidt felismerte, hogy a földi kőzetek

összetétele jelentős mértékben módosult a földi geológiai folyamatok hatására, ezért azok nem tükrözik a kozmikus anyagok eredeti összetételét. Ezzel megalapozta a modern kozmokémiát, amely szerint a meteoritok képezik a legjobb mintát a Naprendszer felépítő anyag eredeti összetételére vonatkozóan.

A következő jelentős lépést, a kozmikus elemgyakoróságok pontosabb meghatározását Suess és Urey 1956-os munkája jelentette, akik új táblázatot állítottak össze meteoritadatok, szoláris elemgyakoróságok, valamint a nukleoszintézis elméleti következtetései alapján. Ezzel a kozmokémia a múlt század közepére önálló és elfogadott tudományággá vált.

A modern kozmokémia történetében fontos mérföldkővet jelent Burbridge és szerzőtársai szakcikke (Burbridge és mtsai. 1957), mely egységes magyarázatot szolgáltatott a kémiai elemek keletkezéséről a Világegyetemben.

Az 1960-as évektől kezdve az analitikai technikák-különösen a tömegspektrometria-tökéletesedésével lehetővé vált az izotóparányok pontos meghatározása a meteoritmintákban. Reynolds (1960) munkája révén megindult a Naprendszer korai fejlődési szakaszának időrendi rekonstrukciója rövid felezési idejű izotópok meteoritokban történő vizsgálatán keresztül.

Az azóta eltelt évtizedek kutatásai tovább pontosították a kozmikus elemgyakoróságokat, köszönhetően a meteoritminták műszeres vizsgálatának, a Nap kémiai összetételét-a szoláris elemgyakoróságokat-célzó finomabb méréseknek, valamint a nukleáris asztrófizika fejlődésének. Az 1960-as évektől kezdve számos összetett szerves molekulát azonosítottak csillagközi molekulafelhőkben, sőt csillagközi porszemesekben is-ezek közül több bizonyítottan csillagokban jött létre. Egyes elméletek szerint ezek az anyagok eljuthattak a korai Földre is, főként aszteroida- és üstökösbombázások révén (Kwok és Zhang, 2011). A legfrissebb eredmények alapján már az is valószínűsíthető, hogy komplex, prebiotikus molekulák keletkezhetnek a csillagrendszerben a bolygóképződést megelőző fázisokban, és e molekulák eljuthatnak a formálódó bolygók felszínére (Jørgensen és mtsai., 2012). E felfedezések jelentősen hozzájárultak a modern asztrófizika fejlődéséhez, és alátámasztják azt a feltételezést, hogy az élet alapvető építőelemei, a komplex szerves molekulák elterjedtek lehetnek a Világegyetemben. Ezt pedig egyúttal azt sugallja, hogy az élet gyakoribb jelenség lehet, mint korábban gondoltuk.

A csillagászati kutatásban mérföldkőnek számított a spektroszkópiai megfigyelések elterjedése, amelyek lehetővé tették a csillagok és más égitestek kémiai összetételének tanulmányozását. Bár az első ilyen megfigyelések a 19.

század közepén kezdődtek, megbízható elemgyakorisági adatok csak az 1920-as évektől állnak rendelkezésre.

### *2.1.1. A modern bolygótudomány és a más csillagok körül keringő bolygók*

A doktori értekezés témája elsődlegesen az asztroásványtan tudományterületéhez kapcsolódik, azon belül is legnagyobb részt a bolygóásványtan szűkebb részdiszciplínájához. Az asztromineralógia szoros kapcsolatban áll a földtudományokkal, a bolygótudománnyal (planetológia), a kozmokémiával és az asztrokémiával, továbbá több vonatkozásban integrálódik a csillagászat megfigyelési módszereivel is. Fejlődése történetileg párhuzamosan alakult ezen tudományterületek előrehaladásával, különösen az 1960-as évektől kezdődően, amikor jelentős áttörések történtek a földtudományok, az űrkutatás és a bolygó kutatás terén. Az asztroásványtan bolygóásványtanra specializálódott részterületének fejlődése új lendületet kapott az űrszondás bolygóvizsgálatok megkezdésével, és különösen az 1990-es évektől, amikor felfedezték az első, más csillagok körül keringő (extraszoláris, vagy exo-) bolygókat. A kutatási terület fejlődése mindvégig szorosan összefüggött a detektálási módszerek és űrtávcsöves technológiák fejlődésével. Az extraszoláris bolygók létezése évszázadokon keresztül csupán hipotézis volt, amely tudományos igazolást először 1992-ben nyert, amikor Wolszczan és Frail (1992) pulzár körüli bolygószerű égitesteket azonosítottak. Az első fősorozati csillag körül keringő exobolygó felfedezéséről 1995-ben Mayor és Queloz (1995) számoltak be. A 2005-ben bejelentett Gliese 876 b nevű, elsőként felfedezett Föld-típusú exobolygó azonosítása nyomán fokozódott az érdeklődés ezen égitestek belső szerkezetének, kémiai és ásványtani összetételének meghatározása iránt. A Gliese 876 b egyúttal az elsőként azonosított „szuper-Föld” kategóriába (1-10 földtömeg) sorolt exobolygó (Rivera és mtsai., 2005) is.

A legelterjedtebb és legsikeresebb keresési módszer a tranzit-fotometria, amely a csillag fényességében bekövetkező periodikus csökkenések alapján azonosítja a bolygókat, amikor azok elhaladnak a csillaguk előtt. E módszer egyik előnye, hogy lehetővé teszi a bolygóátmérő meghatározását, míg a radiális sebességmérésekkel kombinálva a pályaelemek, a tömeg felső határa és az átlagsűrűség is kiszámítható-ezek pedig a központi csillag elemgyakoriságainak ismeretével együtt alapul szolgálnak a bolygó belső szerkezetére és összetételére vonatkozó következtetések levonásához.

Új korszak kezdetét jelentette az exobolygó-kutatás történetében 2009-ben a NASA Kepler űrtávcsövének felbocsátása. A Kepler program jelentős számú exobolygót, köztük több új, addig ismeretlen típusú planétákat azonosított, és

e megfigyelések alapján megbízható statisztikai becslések váltak lehetségessé a különböző bolygótípusok, így a Földhöz hasonló tömegű kőzetbolygók galaktikus gyakoriságára vonatkozóan is. Több mint 6000 bolygójelölt azonosításával, köztük számos 1-10 földtömeg közötti „szuper-Föld”, valamint 2-3 földátmérőjű „szub-Neptunusz” felfedezésével bebizonyosodott, hogy ez a két bolygótípus a leggyakoribb a Tejútrendszerben-még akkor is, ha a Naprendszerben nincs közvetlen megfelelőjük. A felfedezések lehetővé tették a lakhatósági zónában keringő bolygók arányának becslését Naphoz hasonló csillagok körül, valamint megnyitották az utat az exobolygók légköri bioszignatúráinak vizsgálata előtt. Az exobolygó-kutatás tehát forradalmi fejlődésen ment keresztül, és ezzel párhuzamosan a csillagászat, az űrkutatás és a földtudományok közötti együttműködés is új szintre lépett.

Az extraszoláris bolygótestek vizsgálatával foglalkozó tudományág az exoplanetológia, amelyhez szorosan kapcsolódó szakterületek a kozmokémia, az asztrogeológia, az asztroásványtan, a planetáris geofizika és az asztrofizika bolygóképződéssel és a bolygórendszerek dinamikával foglalkozó ágai.

Az exobolygók belső szerkezetének modellezésére a geodinamikai kutatások is kiterjedtek. O’Neill és Lenardic (2007), Tackley (2013), valamint Valencia és munkatársai (2006, 2007a, b, c) készítettek elsőként köpenydinamikai modelleket, bár ezek közül csak kevés vette figyelembe az ásványi összetétel és a fázisátalakulások köpenydinamikát befolyásoló hatását. Valencia és munkatársai dolgozták ki az első strukturális modelleket a nagy tömegű kőzetbolygókra vonatkozóan. A következő években további modellek születtek az exobolygók lehetséges felépítésének és összetételének leírására (Fortney és mtsai. 2007; Seager és mtsai., 2007; Grasset és mtsai., 2009; Rogers és Seager, 2010; Madhusudhan és mtsai., 2012; Wagner mtsai., 2012). Nagynyomású laboratóriumi kísérletek (Umemoto és mtsai., 2006, Coppari és mtsai., 2013; ) igazolják, hogy a szuper-Földek belső szerkezete jelentős ásványfázis-átalakulásokon mehet keresztül, amelyek meghatározzák azok ásványtani felépítését.

Napjainkban a planetológia-klasszikus Naprendszer-központú megközelítést túllépve-kiterjed az extraszoláris bolygók kutatására is. Az extraszoláris kiterjesztéssel a komparatív bolygótudományi megközelítés jelentősége folyamatosan növekszik, mivel lehetővé teszi a különböző típusú bolygók összehasonlító vizsgálatát. E szemlélet nemcsak kozmikus környezetünk jobb megismeréséhez és megértéséhez járul hozzá, hanem új összefüggések feltárása révén közvetlenül segíti a Föld belső szerkezetének, geodinamikai folyamatai és fejlődéstörténetének mélyebb megértését is.

## **2.2. A planetáris kozmokémia és a bolygóásványtan**

A kozmokémia általánosságban az Univerzumban található anyag eredetével, evolúciójával, átalakulásaival és az égitestek kémiai összetételével foglalkozó interdiszciplináris tudományág. Ennek egyik specifikus ága a planetáris kozmokémia, amely a bolygóttestek-ideértve a nagybolygókat, holdakat, törpebolygókat, kisbolygókat és üstökös-magokat-kémiai összetételének, valamint kialakulásuk kémiai feltételeinek vizsgálatára irányul.

A bolygóásványtan (planetary mineralogy), amely az asztroásványtan (asztromineralógia) részterületeként értelmezhető, szintén interdiszciplináris jellegű. Az asztroásványtan csillagászati spektroszkópiai módszerek alkalmazásával szerzett ismeretekre támaszkodik és főként az intersztelláris por és a cirkumsztelláris környezetek-például aszteroidák, üstökös-magok-ásványtani összetételét vizsgálja. Emellett tárgykörébe tartozik a bolygóttestek ásványi összetevőinek tanulmányozása is.

Az extraszoláris bolygóbelső szerkezetének modellezése a planetológia és a csillagászat határterületén elhelyezkedő kutatási irány. Az elmúlt két évtizedben a csillaglégkörök részletes kémiai analízise révén átfogó kép alakult ki a Nap galaktikus környezetében található csillagok elemgyakoriságairól. E vizsgálatok eredményei lehetővé teszik a körülöttük kialakuló kőzetbolygók várható ásványtani tulajdonságainak megbecslését is. Ennek a kutatási ágának a fejlődésével párhuzamosan új szubdiszciplínák jöttek létre, köztük az exobolygó-ásványtan (exoplanet mineralogy), amely a Föld-típusú (terresztrikus) exobolygók köpenyének és kérgének összetételét, illetve belső szerkezetét tanulmányozza. E tudományterület a 2000-es évek elején jelent meg, és fejlődése a 2010-es években gyorsult fel, részben a csillaglégkörök kémiai összetételére vonatkozó adatbázisok bővülésének, részben pedig az exobolygó-kutatásban bekövetkezett tömeges felfedezéseknek köszönhetően.

A kutatások eredményei alapján egyértelművé vált, hogy a kőzetbolygók geológiai aktivitása-különösen a lemeztectonika működésének feltételei és hatékonysága-szoros kapcsolatban áll a köpeny ásványtani összetételével. A konvektív köpenyáramlások, amelyek a lemeztectonika hajtóerejét jelentik, hatékonysága döntően függ a köpenyanyag mechanikai és termodinamikai tulajdonságaitól. Valószínűsíthető, hogy csak azok a bolygók képesek tartós geológiai aktivitásra, amelyek szilikátos öveinek ásványtani összetétele a Földéhez hasonló (O'Neill és mtsai., 2016). Ebből következően feltételezhető, hogy a Tejútrendszer Föld-típusú bolygóinak jelentős része nem rendelkezik aktív lemeztectonikával-amely amúgy is csak egy adott fejlődési fázist képvisel a bolygófejlődés során.

Az exobolygó-ásványtan tudományterületének jelentősége abban rejlik, hogy lehetőséget nyújt a Földhöz hasonló ásványtani összetételű planéták előfordulásának statisztikai becslésére a Tejútrendszerben. A disszertációban bemutatott kutatás e becslés megalapozásához kíván hozzájárulni, különös tekintettel a csillagok és bolygók kémiai kapcsolatára vonatkozóan levonható következtetésekre.

E szakterület további, különös tudományos jelentősége abban áll, hogy eredményei várhatóan lényeges szerepet játszanak majd annak megértésében, hogy az élet számára kedvező, föld-szerű kémiai-ásványtani környezetek mennyire elterjedtek a galaxisban. Ez a megközelítés új távlatokat nyithat az asztrobiológiai kutatásokban is, különösen az élet kifejlődésének, fennmaradásának és esetleges elterjedtségének vizsgálatában az extraszoláris bolygórendszerekben.

### ***2.3 A hazai kozmo-geokémia és asztroásványtan fejlődésének történeti áttekintése***

A hazai kozmo-geokémiai kutatások kezdete az 1857-ben Kaba határában lehullott Kaba-meteorithoz (CV3 típusú szenes kondrit) kapcsolódik, amelynek első kémiai analízisét Friedrich Wöhler német kémikus végezte el 1858-ban. Ez volt az első olyan dokumentált tudományos eset, amikor földön kívülről származó mintában szerves anyag jelenlétét mutatták ki (Wöhler, 1858).

A 20. század közepétől Szádeczky-Kardoss Elemér (1903-1984) kitűnő szervezőképességével és tudományos eredményekben gazdag munkásságával meghatározó szerepet játszott a magyar geokémia intézményesítésében és fejlődésében. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Ásvány- és Kőzettani Tanszékén 1955-ben megszervezte az MTA Geokémiai Kutatólaboratóriumát, amellyel meghonosította Magyarországon a geokémia tudományát (Pantó, 1986). Ugyanebben az évben jelent meg *Geokémia* című átfogó monográfiája, amely mindamelllett, hogy alapos összefoglaló mű, a saját kutatási eredményeit is tartalmazta (Szádeczky-Kardoss, 1955). Kőzettani és szénkőzettani munkássága, valamint a geokémia terén elért számos eredménye mellett jelentős érdemeket szerzett a globális lemeztectonikai elmélet hazai megismertetésében az 1960-as évektől kezdődően. A geoszféra kölcsönhatásait, valamint a földfejlődés modern dinamikus modelljét *A Föld szerkezete és fejlődése* című munkájában foglalta össze (Szádeczky-Kardoss, 1968). Kutatásai során a földfejlődés geokémiai-földtani folyamatainak elemzése mellett (Szádeczky-Kardoss, 1960, 1975) a földi geokémiai folyamatok kozmikus összefüggéseire is figyelmet fordított (Szádeczky-Kardoss, 1972).

A hazai ásványtan és ércteleptan történetének kiemelkedő alakja volt Sztrókey Kálmán Imre (1907-1992). A Pázmány Péter Tudományegyetemen szerzett természettudományi diplomát, majd az Ásvány- és Kőzettani Intézet oktatójaként dolgozott. Doktori fokozatát 1932-ben szerezte meg, a budai márga ásványtani vizsgálataiból készített disszertációja alapján. Ásványrendszertani munkája úttörő módon tárta fel a kristályszerkezet, geokémia és földtani megfigyelések közötti kapcsolatokat (Buda, 1995).

Oktatói és kutatói pályája során foglalkozott kristálytannal, ércásványtannal, a kozmikus anyagok vizsgálatával, valamint ismeretterjesztő tevékenysége révén is jelentős hatást gyakorolt a földtudományra. Ásványhatározó ismeretanyagát fejlesztette tovább, egyetemi jegyzeteket, könyveket írt, ismeretterjesztő írásaiban a holdközetekkel, valamint a földönkívüli élet lehetőségeivel is foglalkozott. Széleskörű kutatómunkája során a Naprendszer keletkezésének kérdéskörét számos ponton összekapcsolta a meteoritok vizsgálatával.

A meteoritok kutatásában is úttörő szerepet töltött be: munkacsoportjával a Kaba-meteorit első átfogó vizsgálatát végezte el, optikai mikroszkópiát és röntgendiffrakciós módszereket alkalmazva (Sztrókey és mtsai, 1961a). A meteoritika és asztroásványtan hazai fejlődésének egyik meghatározó alakjaként számos nemzetközileg is elismert publikáció fűződik a nevéhez (pl. Sztrókey és Földvári, 1953; Sztrókey és mtsai., 1954; Sztrókey, 1959, 1960; Sztrókey és mtsai. 1961a, 1961b; Sztrókey és mtsai, 1967a, 1967b).

Dr. Szöör Gyula (1940–2007) kutatói és oktatói munkássága jelentős mértékben hozzájárult a hazai kozmokémiai és meteoritikai kutatásokhoz. A Debreceni Egyetem Ásvány- és Földtan Tanszékének vezetőjeként két évtizeden át irányította a tudományos munkát. Szakterülete a geokémia és ásványtan határterületei voltak, a legjelentősebb eredményeket a biogeokémia és a kozmokémia terén érte el (Rózsa 2007). Nevéhez fűződik egy korszerű termoanalitikai laboratórium létrehozása a tanszéken, valamint egy interdiszciplináris kutatócsoport megszervezése, amelynek programjába kozmokémiai vizsgálatok is beépültek. Ezek közé tartozott az arizonai Barringer-kráter becsapódási termékeinek, például impakt breccsák és szferulák vizsgálata is, melyek gyűjtése a kráter környezetében az ő irányítása alatt zajlott (Szöör és mtsai, 2001; Uzonyi és mtsai, 2004, 2009).

Számos magyar vagy magyar származású mérnök és kutató játszott szerepet a nemzetközi űrkutatásban. Kármán Tódor alapítója és első igazgatója volt a NASA Jet Propulsion Laboratory-nak (JPL, Pasadena), amely meghatározó szerepet játszik a Naprendszert vizsgáló űrszondák tervezésében és fejlesztésében. Gera József a holdkomp, Pavlics Ferenc a holdjáró, míg Bejczy Antal a Mars-járók fejlesztésében vett részt. Magyar műszerfejlesztések kapcsolódnak a Szaturnusz és holdrendszerét vizsgáló amerikai-európai kollaborációban készült Cassini-Huygens űrszonda, az 1980-as évek közepén

a Halley-üstököst meglátogató Vega-űrszondák, valamint az ESA (European Space Agency, Európai Űrügynökség) Rozetta nevű üstökös-kutató űrszondájának küldetéséhez. Az ezen eszközök által gyűjtött adatok és minták elemzése során magyar kutatók is közreműködtek, például holdközvet-vékonycsiszolatok vizsgálatával.

Az elmúlt évtizedekben a nemzetközi kutatási együttműködésekben való magyar szerepvállalás erősödött. A NASA Johnson Űrközpontja (Johnson Space Center, Houston) támogatásával és a Hold- és Bolygótudományi Intézet (LPI, Houston) főszervezésében évente márciusban rendezik meg a Hold- és Bolygótudományi Konferenciát (LPSC, Lunar and Planetary Science Conference) Houston-ban, amelynek előadásai és szekciói a földmegfigyelés és a bolygótudomány szakterületeinek széles skáláját lefedik.

Az LPSC története 1970-re nyúlik vissza, amikor az Apollo-11 küldetés nyomán Holdtudományi Konferencia néven megrendezett első találkozón elsősorban holdminták elemzése került fókuszba, majd 1978-ban a konferencia neve Hold- és Bolygótudományi Konferenciára változott. Napjainkra az esemény a világ vezető bolygótudományi kongresszusává vált, ahol a Naprendszer és exobolygók anyagainak vizsgálata, a kozmokémia és az asztroásványtan eredményei is központi szerepet kapnak. Az utóbbi években a más csillagok körül keringő bolygók vizsgálatához kapcsolódó kutatások eredményeinek bemutatásával már külön szekció foglalkozik. A disszertáció szerzője az elmúlt két évtized során több alkalommal is részt vett e konferencián, kutatási eredményeit bemutatva és személyes tapasztalatokat szerezve a nemzetközi bolygókutatásban.

A 1970-es évektől a hazai bolygótudomány fejlődése több ponton kapcsolódott a kozmokémiai és asztroásványtani kutatásokhoz, hatást gyakorolva az egyetemi oktatásra és a tudományos ismeretterjesztésre is. Az Apollo-program során gyűjtött holdmintákból a NASA oktatási célra készített 20 példányban egyenként 12 vékonycsiszolatot tartalmazó holdközvetmintakészletet. Ezekből egy példány Bérczi Szaniszló közreműködésével az ELTE-re is eljutott, ahol aktívan alkalmazták kutatási és oktatási célokra, eredményeiket nemzetközi fórumokon (LPSC, NIPR Symposium) is bemutatták.

A hazai bolygótudományi kutatások egyik aktív alakja Gucsik Arnold, aki három évtizede végez spektroszkópai vizsgálatokat kozmikus anyagmintákon, többek között az Itokawa kisbolygóról származó mintákon. Kutatási pályája során számos nemzetközi űrügynökséggel-NASA, ESA, és JAXA dolgozott együtt.

Hazai kozmokémiai kutatások jelenleg főként az ELTE TTK Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, a DE TTK Ásvány és Földtani Tanszékén működő Kozmokémiai Kutatócsoport, valamint a Csillagászati és Fizikai Kutatóközpont Csillagászati Intézetében zajlanak. Az intézetben Maria

Lugaro a csillagokban kialakult izotópok és elemek arányaival, keletkezésével és elterjedésével foglalkozik; Kereszturi Ákos a meteoritok fejlődéstörténetét, valamint azok sokkhatásos és vizes átalakulási folyamatait kutatja.

Timothy Jull (Arizonai Egyetem) és Ulrich Ott (Max Planck Kémiai Intézet) a Debreceni Atommagkutató Intézet (ATOMKI) vendégprofesszoraiként meteoritok izotópgeokémiai kutatásával foglalkoznak.

A jövőbeli hazai kutatások várhatóan továbbra is a Naprendszer anyagainak és égitestjeinek elemzésére, valamint azok fejlődéstörténetének feltárására összpontosítanak. Űreszközök révén begyűjtött minták hazai vizsgálataiban és a nemzetközi kutatási együttműködésekben a magyar szakemberek részvétele remélhetőleg fokozódik. Új irányként jelent meg az exobolygó-rendszerek tanulmányozása, amelynek során az exoplanetáris ásványtan és kozmokémia jelentősége a hazai bolygótudományon belül is fokozatosan növekszik.

## ***2.4. A kutatás előzményeinek feltárása***

### *2.4.1. A Tejútrendszer kémiai összetétele a kőzetbolygókat felépítő főbb kémiai elemek tükrében*

A Tejútrendszer egy SBb típusú küllős spirálgalaxis, amelynek átmérője meghaladja a 100 ezer fényévet, kora pedig megközelítőleg 12 milliárd év. Három fő szerkezeti komponense a vékony és vastag korong, a galaktikus dudor (bulge), valamint a gömbszimmetrikus halo, amely idős csillagokat és több száz gömbhalmazt tartalmaz. A Naprendszer galaktocentrikus távolságában a vékony korong vastagsága ~300 pc, míg a vastag korongé körülbelül 0,8 kpc (Vieira és mtsai., 2023). A csillagok többsége a vékony korongban helyezkedik el, míg a legkisebb csillagsűrűség a halo-ban tapasztalható.

A galaxis tömege meghaladja a  $2 \times 10^{11}$  naptömeget, amelynek legnagyobb részét csillagok és kompakt csillagmaradványok (fehér törpék, neutroncsillagok, fekete lyukak) alkotják. A csillagpopuláció legalább 200 milliárd tagot számlál, s becslések szerint bolygók még ennél is nagyobb számban fordulhatnak elő-többségük csillaghoz kötötten, kisebb részük szabadon, csillagközi pályákon mozoghat.

A Tejútrendszer kémiai összetételét a csillagok, a csillagkörül (cirkumsztelláris) környezetek, valamint a csillagközi anyag elemi összetétele határozza meg, amely a galaxis kémiai evolúciójának eredményeként folyamatosan változik. A galaktikus tömeg ~10%-át kitevő csillagközi (intersztelláris) anyag főként gáz, és mindössze ~1%-ban porból áll. A főként szénből, karbidokból, szilikátokból álló porszemcséket víz-, szén-monoxid- vagy szén-dioxid jég-kéreg burkolja.

A csillagászatban a hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemeket "fémeknek" nevezzük. A csillagközi anyag fémességtartalma (metallicitása) radiálisan csökken a galaktikus centrumtól kifelé, valamint vertikálisan is a fősíkhöz képest. A csillagközi anyag kémiai összetétele általánosságban hasonló a csillagokéhoz, de lokálisan-pl. szupernóva-robbanások következtében-jelentős eltéréseket mutathat.

A spirálkarokban a nagy tömegű csillagok és a szupernóvák gyakorisága magasabb, ezáltal az intersztelláris anyag fémtartalma is fokozott. A nehéz elemek szintézise (nukleoszintézis) főként kis- és közepes tömegű csillagok (AGB-fázisban), valamint különféle szupernóva-robbanások során történik.

A csillagok egyre több hidrogént alakítanak át magasabb rendszámú elemekké. A sztelláris nukleoszintézis által nem csupán galaktikus viszonylatban, de az egész Univerzumra vetítve is a kozmikus elemgyakoriság fokozatosan a magasabb rendszámú elemek felé tolódik el. Az univerzumban leggyakoribb elemek-H, He, C, O-nagy jelentőségűek a Tejútrendszer kémiai evolúciójában (Cescutti és mtsai, 2009). Közülük a szén és az oxigén, valamint a Si, Mg, Al, Ca és Fe kulcsfontosságúak a kőzetbolygók összetételének és szerkezetének kialakulásában.

A protoplanetáris korongokban zajló kémiai folyamatok befolyásolják a kialakuló bolygók kémiai összetételét. A kondenzáció feltételeinek lokális változásai fontos szerepet játszanak a bolygókeletkezés során, ugyanakkor ezek a hatások nem tükröződnek közvetlenül a csillagok légköri összetételében. Ennek ellenére a kőzetbolygókat felépítő anyag összetételének tanulmányozásához a csillagok elemgyakoriságai jelentik a legmegbízhatóbb kiindulási alapot ebből következően a csillagok fotoszférájában meghatározott elemarányok alkalmasak a körülöttük kialakuló kőzetbolygók ásványtani és kémiai összetételének becslésére. A bolygók ásványtani összetételének vizsgálata a kapcsolódó kutatások szempontjából azért jelentős, mivel az közvetlenül meghatározza az égitestek reológiai tulajdonságait, a hőtranszport mechanizmusait, valamint az inkompatibilis radioaktív elemek koncentrációját.

A galaktikus környezet csillagai nem egy időben és nem azonos kémiai összetételű csillagközi anyagból keletkeztek, mai a relatív elemgyakoriságaik eltéréseit eredményezi. A dolgozatban vizsgált csillagok a Napéhoz hasonló galaktocentrikus távolsággal rendelkeznek és a Tejútrendszer vékony korongjának csillagpopulációjába tartoznak. Mivel a fémesség és a főbb elemarányok (C/O, Mg/Si, Fe/Si) mind radiális, mind vertikális irányban változást mutatnak a korongban, ezért a Naphoz hasonló típusú (G- és F-spektráltípusú) közeli csillagok jelentik a legmegbízhatóbb viszonyítási alapot a szoláris értékekkel történő összehasonlításához.

A bolygók ásványtani felépítését leginkább a C/O és Mg/Si elemarányok határozzák meg, mivel ezek szabják meg, hogy milyen típusú ásványok-például olivin, piroxének vagy szénben gazdagfázisok-építik fel a bolygótestet.

A csillagok és H II régiók C/O aránya együtt növekszik a fémességgel és radiálisan a galaxis középpontja felé haladva (Esteban és mtsai., 2005). A sztelláris nukleoszintézis következtében a csillagközi anyagban a C/O és Mg/Si arány idővel szintén nő, amelynek a bolygótestek felépítése szempontjából kozmikus időskálán nagy a jelentősége.

A bolygórendszerek kialakulására meghatározó hatással van a csillagközi anyag fém tartalma és elemi összetétele. A különböző korú és galaktikus pozíciójú csillagokból születő bolygók eltérő ásványtani és kémiai tulajdonságokat mutathatnak. A csillagok spektroszkópiai vizsgálata ezért kulcsfontosságú a galaktikus bolygópopulációk jellemzésében.

A Tejútrendszerben az idősebb csillagok tipikusan kisebb fémességgel rendelkeznek ([Fe/H] alacsonyabb érték). A csillagokban hasonló a fémek vashoz viszonyított gyakorisága, az eltérés pedig meghatározott fémek átlagos gyakoriságával az alfa-vas indexszel írható fel [ $\alpha$ /Fe]. Az alfa-vas index meghatározható a 22-nél kisebb rendszámú elemek-az alfa elemek- (Pl: O, Ne, Mg, Si, S, Ca, Ti) átlagos gyakoriságából. Az alfa elemek hélium és szén jelenlétében, alfa részecske ( $^4\text{He}$ ) befogással keletkeznek. Az alfa elemek vashoz viszonyított relatív gyakorisága a high-alpha csillagokban magasabb, mint a Napban. A Nap galaktikus környezetében elhelyezkedő fősorozati F, G és K színképtípusú csillagok nagy felbontású spektruma alapján Adibekyan és munkatársai (Adibekyan és mtsai., 2013) az alfa-vas indexben a galaktikus-korongban 3 elkülönülő csoportot mutattak ki: vékony-korong fiatal és magas fém tartalmú csillagai, magas alfájú (high- $\alpha$ ) csillagok és a vastag-korong csillagai.

A fémesség és a bolygók jelenléte között korreláció mutatható ki: magasabb fémesség esetén gyakoribbak a több bolygós rendszerek, különösen a gázóriások (Fischer és Valenti, 2005), míg a kis tömegű bolygók gyakorisága kevésbé függ a fémességtől (Buchhave és mtsai., 2012). Ennek pedig messzemenő következményei vannak a Föld-típusú bolygók elterjedtségére vonatkozóan, ugyanis ez azt jelenti, hogy a kémiai elemgyakoriságok széles tartományán belül keletkeznek kis tömegű bolygók a galaxisban. A relatíve kis tömegű, teresztrikus bolygók kialakulásához nem szükséges a fémek magas gyakorisága, így például a Földhöz hasonló méretű bolygók elég gyakoriak lehetnek a Tejútrendszerben.

A kőzetbolygók építőelemeinek legtöbbször alfa-elem, kiegészítve néhány súlyszázalék vassal, nikkellel, valamint kis mennyiségű kobalttal, krómmal és titánnal. A bolygók ásványtani felépítésében döntő szerepet játszik az adott bolygórendszer galaxison belüli keletkezési helyének kémiai jellemzői, valamint a csillagtól való távolság.

Az exobolygók anyacsillagai kémiai összetétele általában gazdag a teresztrikus bolygókat felépítő legfontosabb elemekben (Bond és mtsai, 2010 b). Egy csillagászati spektroszkópiai vizsgálat eredményei szerint a kis méretű és kis tömegű bolygókat hordozó csillagok legtöbbször még akkor is gazdag  $\alpha$ -elemekben, ha az alacsony fémtartalmú csillagok közé tartoznak (Adibekyan és mtsai, 2012). Ez arra utal, hogy a kőzetbolygók korai kialakulása a galaktikus vastag-korongban kezdődik, ahol keletkezésük kémiai feltételei kedvezőbbek.

A szénben gazdag bolygók kialakulása ritka a Tejútrendszerben. Egy 849 F, G és K típusú csillagból álló mintán Brewer és Fischer (2016) kimutatták, hogy az átlagos C/O arány a mintában 0,47, és nem találtak 0,7 fölötti értéket. A C/O > 1 arányú ún. széncsillagok ritkák ( $<10^{-3}$ ) a Nap-típusú csillagok között (Fortney, 2012). A Mg/Si arány szintén fontos indikátor. A Nap galaktikus környezetében a legtöbb kis tömegű bolygót hordozó csillag Mg/Si aránya az 1-1,5 tartományban van (Suárez-Andrés és mtsai., 2018). A magasabb Mg/Si értékű csillagok körül gyakrabban fordulnak elő kis tömegű bolygók (Adibekyan és mtsai., 2015)

Spaargaren és munkatársai (2020) megállapították, hogy a Föld köpenyére jellemző Mg/Si arány alacsonyabb, mint a környező csillagoké, így a legtöbb exo-kőzetbolygó valószínűleg magnéziumban gazdagabb összetételű, mint a naprendszerbeli társaik. A Nap átlagos C/O és Mg/Si aránya ráadásul alatta marad a kozmikus elemgyakoriságok alapján meghatározott értékeknek-C/O (0,602) és Mg/Si (1,075) (Anders és Ebihara, 1982). Ez meggyőződésem szerint arra utal, hogy a Naprendszer kémiai szempontból nem tipikus bolygórendszer a galaktikus környezetében.

#### *2.4.2. A Föld-típusú bolygók kialakulásának alapmodellje és a kondenzációs sorozat*

A Föld-típusú bolygók keletkezése a csillagképződés korai szakaszához kötődik, és a csillag körül kialakuló, gázból és porból álló protoplanetáris korongban kezdődik. A korong szimmetriásíkjába történő porszemcse-ülepedés, valamint ezek fokozatos szemcseméret-növekedése indítja el a bolygókeletkezés folyamatát. A protoplanetáris korong fejlődése szoros összefüggést mutat a bolygókeletkezés mechanizmusával, amely legkésőbb a csillag születését követő ~10 millió éven belül lezajlik, mielőtt a csillagszél és a sugárnyomás kifújná a maradék gázt a rendszerből. A Föld-típusú bolygók kialakulásának első fizikai modelljét Viktor Szafronov alkotta meg. Az ún. Szoláris Nebula Korong Modell (Safronov, 1972) értelmében a Nap és a körülötte keringő égitestek ugyanazon intersztelláris gáz és porfelhő, gravitációsan korong-struktúrába rendeződött anyagából alakultak ki. A modellt Wetherill (1980) továbbfejlesztette, és kimutatta, hogy a teresztrikus

bolygók kisebb bolygókezdemények (planetezimálok) ütközéses akkréciójából jöttek létre. Később Wetherill és Stewart (1989) rávilágított arra, hogy a planetezimálok egy része gyors növekedési fázison megy keresztül, bolygóembriókká fejlődik, majd ezek további ütközések során Föld-típusú bolygókká alakulnak.

A szilárd szemcsék gáz hatására történő turbulens diffúziója gravitációs egyensúlyt eredményez a korong szerkezetében (Weidenschilling és Cuzzi, 1993). Az ebben a stabilizálódott korongban végbemenő ismételt ütközések és tapadások következtében poraggregátumok, majd kavics-, végül sziklaméretű testek jönnek létre. A jég jelenléte-különösen alacsony ( $\leq 50$  m/s) ütközési sebességek esetén – elősegíti a szemcsék tapadását és a növekedést (Wada és mtsai., 2009, 2013; Okuzumi és mtsai., 2012). A gravo-turbulens akkréció eredményeképpen nagyméretű planetezimálok alakulnak ki, amelyek további növekedéssel akár több száz vagy ezer kilométer átmérőjű bolygóembriókká fejlődhetnek. A külső Naprendszerben ezeknek az embrióknak el kellett érniük a  $\sim 10$  földtömeget ahhoz, hogy elegendő gravitációval rendelkezzenek egy gázburok összegyűjtéséhez, melyből később óriásbolygók (pl. Jupiter, Szaturnusz) alakultak ki (Pollack és mtsai., 1996).

A Jupiter-típusú bolygók kialakulása gyors folyamat lehet, akár néhány százezer év alatt végbemegy, míg a Föld-típusú bolygók akkréciója több millió, sőt tízmillió évig is eltarthat. A porszemcsékből akár kevesebb mint egymillió év alatt is kialakulhatnak kilométeres testek, melyek néhány tízezer év alatt több ezer kilométeres proto-bolygókká fejlődhetnek. A protoplanetáris korong belső zónájában születő bolygók illóanyag-tartalma (volatil készlete) jelentősen eltérhet, míg a refrakter elemek-azaz a magas kondenzációs hőmérsékletű alkotók-mennyisége hasonló (Öberg és Bergin, 2016; Bond és mtsai., 2010a). A nagyobb tömegű teresztrikus bolygók kialakulása jellemzően nagyobb tömegű korongokhoz köthető, és amennyiben eléri a  $\sim 10$  földtömeget (Ida, 2006), képesek jelentős gázmennyiséget is maguk köré gyűjteni, melyből vastag gázburok fejlődhet. Ez a forgatókönyv magyarázza az olyan óriás gázbolygók kialakulását is, mint amilyen a Jupiter és a Szaturnusz, melyeknek vastag hidrogénből és héliumból álló légköre a centrális elhelyezkedésű, valószínűsíthetően fém-szilikát összetételű magot rejt.

Más rendszerekben azonban léteznek olyan nagy tömegű exobolygók is, amelyek meghaladják a 10 földtömeget, de sűrűségük alapján jellemzően teresztrikus összetételűek. Kialakulásukra egyik lehetséges magyarázat, hogy bár a szilárd test elérte a kritikus tömeget, a protoplanetáris korong gázanyaga már disszipálódott, így nem tudott gázburokot gyűjteni. E testek tömegüktől függően a szuper-Föld ( $1-10 M_{\oplus}$ ) vagy mega-Föld ( $>10 M_{\oplus}$ ) kategóriába sorolhatók. A szuper-Földek kialakulhatnak olyan kőzetmagként is, amelyek nem nőttek elég nagyra a gázóriásokká váláshoz, mielőtt a korong anyaga

eloszlott volna (Hasegawa, 2016). A korong szerkezete is befolyásolja a keletkezést: alacsony turbulenciájú zónákban in situ akkréció lehetséges a bolygórendszer belső tartományaiban is., míg erősen turbulens régiókban ez kevésbé valószínű. Martin és Livio (2016) szerint a két folyamat párhuzamosan is működhet, ami magyarázatot adhat a szuper-Földeknél tapasztalt változatos sűrűségértékekre -ezek ugyanis a keletkezés helyétől és a kondenzációs feltételektől is függenek.

A Naprendszer differenciálódása kémiai szempontból úgy ment végbe, hogy a szoláris köd lehülése során először a magas olvadáspontú ásványok (refraktor fázisok) kondenzálódtak ki, majd távolodva a Naptól, fokozatosan az alacsonyabb olvadáspontú fázisok (illó anyagok, jegek) váltak stabil fázissá. A különféle ásványok kondenzációs sorrendje-az ún. kondenzációs sorozat-jól modellezhető a szoláris elemösszetétel alapján (1.táblázat).

*1. táblázat. A főbb elemek kondenzációs sorozata a Naprendszerre jellemző átlagos kémiai összetétel, valamint a Nap fotoszférájának elemi kompozíciója alapján. A Naprendszer általános összetételét magasabb fémességtartalom, így kissé magasabb kondenzációs hőmérsékletek jellemzik (Lodders, 2003).*

Kémiai képlet	Ásvány neve	Naprendszer összetétele (K)	Fotoszférikus kompozíció (K)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Korund	1677	1665
CaAl <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	Hibonit	1659	1647
CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Grosszit	1542	1531
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub>	Gehlenit	1529	1519
CaTiO <sub>3</sub>	Perovszkit	1593	1584
Ca <sub>4</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	Ca-titanát	1578	1567
Ca <sub>3</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Ca-titanát	1539	1529
Ca <sub>4</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	Ca-titanát	1512	1502
CaTiO <sub>3</sub>	Perovszkit	1441	1429
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Spinel	1397	1387
CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Anortit	1387	1378
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Forszterit	1354	1346
MgSiO <sub>3</sub>	Ensztatit	1316	1308
CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Diopszid	1347	1339
Fe	Fe-ötvözet	1357	1351
Fe <sub>3</sub> P	Schreibersit	1248	1245
FeS	Troilite	704	693
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetit	371	365
H <sub>2</sub> O	Vízjég	182	181

A kondenzációs folyamatokkal elsőként Russell (1934) foglalkozott, majd Lord (1965) fejlesztette tovább a termokémiai megközelítést. A későbbi kutatások során az elemek volatilitási trendjeit kondenzációs hőmérsékletük szerint osztályozták.

A refraktor elemek szilárd fázisban kristályosodnak, míg a volatil elemek alacsonyabb hőmérsékleten illó állapotban maradnak. A Goldschmidt-féle geokémiai osztályozás szerint a bolygóképződés szempontjából kiemelt jelentőségűek a sziderofil (vaskedvelő) és litofil (kőzetkedvelő) elemek. A sziderofil elemek affinitást mutatnak a fémek fázisokhoz, főként bolygómagokban koncentrálnak. A litofil elemek ezzel szemben a szilikátfázisokban gazdagok, és döntő szerepük van a bolygókéreg és köpeny ásványtani összetételének kialakításában.

A legtöbb refrakter kondenzátum kalcium-, alumínium- és titán-tartalmú komponensekből áll. E fázisok jellemző alkotóelemei a szenes kondrit meteoritokban előforduló kalcium-alumínium-gazdag inklúzióknak (CAI-k), amelyek a szoláris köd legkorábban kondenzálódott ásványfázisait képviselik. A csökkenő hőmérséklet hatására a Ca-Al-gazdag fázisok fokozatosan gehlenit ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) alakulnak át, amely a melilit (gehlenit-akermanit:  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ - $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ) elegykristály egyik szélső tagja. A gehlenit a kondenzációs sor első Si-tartalmú kondenzátuma, míg az akermanit az első Mg-tartalmú fázis.

A hőmérséklet további csökkenésével anortit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) és spinell ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) kristályosodik, amelyek további alumíniumot, kalciumot, szilíciumot és magnéziumot vonnak ki a nebuláris gázból. A magnézium és szilícium döntő hányadának megkötése azonban a forszterit ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) és ensztatit ( $\text{MgSiO}_3$ ) kondenzációjához köthető. A forszterit az olivin (forszterit-fayalit:  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ - $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) elegykristály egyik szélső tagja, míg az ensztatit a piroxének közé tartozó ensztatit-ferroszillit ( $\text{MgSiO}_3$ - $\text{FeSiO}_3$ ) elegykristály szélső tagja.

A legfontosabb szilárd fázisok közül a troilit (FeS) a kondenzációs sor utolsó lépésében jelenik meg, és döntő szerepet játszik a kén megkötésében. A fémek vas kondenzációs hőmérséklete közel áll a forszteritéhez, így a bolygóépítő elemek közül a magnézium, szilícium és vas kondenzációja egymáshoz közeli, szűk (~1300-1400 K) hőmérséklet-tartományban megy végbe. Ez különösen fontos tényező a terasztrikus bolygók szerkezeti és kémiai evolúciójának megértésében, hiszen e hőmérsékleti tartományban alakulnak ki azok az elsődleges ásványi fázisok, amelyek a Föld és más sziklás bolygók felépítését meghatározzák.

A Tejútrendszerben végzett sztellaris elemgyakorisági vizsgálatokban éppen ezért kiemelten fontos a magnézium, szilícium, vas, oxigén, szén, kalcium, alumínium és nátrium gyakoriságának vizsgálata. E nyolc elem relatív arányai -más paraméterekkel együtt-alapvető szerepet játszottak

legalább egy olyan, komplex életet hordozó bolygó kialakulásában, mint a Föld, amilyenek ma ismerjük.

### *2.4.3. A szoláris elemgyakoriság és a kondritos összetétel*

A Nap fotoszférájának elemi összetétele összevethető a szenes kondritok-különösen a CI-típusú kondritok-elemgyakoriságával. Az erősen illó elemek figyelmen kívül hagyásával a két forrásból származó adatminták között szoros egyezés tapasztalható. A kimutatott konzisztencia alapján a szakirodalomban gyakran használják a „kondritos összetétel” kifejezést a szoláris elemgyakoriságok szinonimájaként. A 2000-es években a számítási kapacitás nagymértékű növekedésével lehetővé vált a naplégkör három-dimenziós modellezése, mely a korábbi lokális termodinamikai egyensúlyon (LTE) alapuló módszerhez képest az elemgyakoriság pontosabb meghatározását jelentette. Emellett a szoláris összetétel vizsgálatának másik fontos eszköze a napszél összetételének mérése.

Fontos megjegyezni, hogy a Nap jelenlegi összetétele már eltér a protocsillag összeállásának idején jellemző állapottól. A fejlődés kezdeti szakaszában- amikor a Nap még teljesen konvektív volt-a deutérium-hélium-3 fúzió dominált, amely módosította a D/H és  $^3\text{He}/\text{He}$  arányokat. A fősorozati nukleoszintézis során a hidrogén héliummá alakulása a Nap magjában és az azt övező burok alapjánál megy végbe, miközben változik a szén és az oxigén gyakorisága és izotópösszetétele is. E változások azonban nem jelennek meg a napfelszíni kémiai összetételben, amíg a Nap a fősorozaton tartózkodik.

A fotoszférikus C, N, O és Ne gyakoriságai ugyanakkor nem teljesen konzisztensek a helioszeizmológiai modellek eredményeivel. Az egyik legvalószínűbb magyarázat szerint a Nap konvektív zónája hidrogénben dús gázból állt össze, miközben a nehezebb elemek egy része a bolygóképződés során eltávozott a protocsillag környezetéből és a bolygókba épült be.

A Naprendszer 4,56 milliárd éves fejlődése alatt számos fizikai és kémiai folyamat- például bolygódifferenciáció, olvadás, frakcionáció és ütközések-következtében jelentős mértékű elemátrendezés történt. Ennek eredményeként mára ritkák azok az anyagok, amelyek az eredeti szoláris gyakoriságot jó egyezéssel megőrizték. Naprendszer keletkezése óta csillagunk is fejlődött, ami hatással van az elemgyakoriságaira nézve is. Azonban eze a változások csekélyek és a Nap jelenlegi elemgyakoriságával a rendszer tömegének több mint 99,8%-át képviseli-jó közelítéssel tükrözi a Naprendszer eredeti elemi összetételét.

A Föld és a többi bolygótest elemösszetétele jelentősen módosult a bolygófejlődés során, de a Naphoz leginkább a primitív, differenciálatlan meteoritok-különösen a CI-típusú szenes kondrito- állnak közel. Lodders és munkatársai (2009) kimutatták, hogy a 39 vizsgált elem-köztük a teresztrikus

bolygók fő alkotói-Si-normalizált fotoszférikus/CI-kondrit gyakorisági aránya 0,9 és 1,1 közé esik, ami alátámasztja e meteoritok kiemelt jelentőségét a Naprendszer eredeti kémiai összetételének rekonstruálásában.

#### *2.4.4. A Föld kémiai modellje és általános ásványtani összetétele*

A Föld teljes kémiai összetételének meghatározása komoly kihívást jelent, mivel a bolygótest a kialakulása óta jelentős kémiai differenciálódáson ment keresztül. Ennek következtében a különböző mélységekben elhelyezkedő övek eltérő összetételűek, és közvetlen mintavételre csak a kéreg és a köpeny anyagából van lehetőség; a földmag anyagához nincs közvetlen hozzáférésünk (Embey-Isztin és Dobosi, 2004). A Föld belsejében a korai, olvadt állapotban végbement differenciálódás során a nagyobb sűrűségű komponensek a bolygó mélyebb rétegeibe süllyedtek, míg a kisebb sűrűségű anyagok a felszín közelében maradtak. A differenciáció egyik jellemző eredménye, hogy a korai Föld anyagában a fém-szilikát főkomponensek (amelyekből a kéreg és a köpeny felépült) mellett a későbbi földmagot alkotó vas és nikkel elemek mennyisége jelentős többletet mutatott, amely nem épült be a köpeny anyagába. Ez a kémiai eloszlás hozzájárult a Föld két fő szerkezeti egységének –a mag és a köpeny–kialakulásához.

A földmag kezdetben teljes egészében olvadt állapotú volt, és csak lassú lehűlés eredményeként kezdődött meg a szilárd fázisú belső mag kialakulása. Ennek megjelenése jelentős szerepet játszott a földi dinámofolyamat felerősödésében, amely a bolygó geomágneses terének fenntartásáért felelős. A kéreg, mint a Föld legkülső szerkezeti egysége, hőszigetelő réteggé alakult, izolálta a köpenyt, lelassítva annak hűlési folyamatait. Ennek következtében a mag hővesztése is mérséklődött, ami hosszú távon, geológiai időskálán is fenntartja a köpeny konvektív hőtranszporton alapuló dinamikáját, összhangban a köpeny termo-kémiai és radiogén hőtermelő folyamataival. A Föld tömegének mintegy kétharmadát kitevő szilikátos köpeny borítja a bolygó 32,59%-át kitevő fémes magot (Stacey, 1992), amely elsősorban vasból, kisebb részben nikkeltől, valamint néhány tömegszázaléknyi könnyebb elemből (pl. O, Si, S, C) áll. A földkéreg, amely a Föld teljes tömegének csupán 0,5%-át alkotja, változatos ásványtani felépítésű, főként földpátokat, kvarcot és piroxéneket tartalmaz. A pirolitos földmodell (McDonough és Sun, 1995) alapján a teljes szilikátos Föld tömegében a vas, szilícium, magnézium és alumínium együttes aránya meghaladja a 39 tömegszázalékot. Mivel a vas túlnyomó része a magban található, a földköpenyben-akárcsak más kőzetbolygók esetében-az oxigén, magnézium és szilícium számítanak a domináns kémiai elemeknek.

Petrológiai vizsgálatok eredményei alapján a földköpeny legfelső része peridotitos (pirolitos) összetételű (McDonough és Sun, 1995). A jelenlegi tudományos konszenzus szerint a Föld teljes kémiai összetétele közel áll a szoláris elemgyakorisági eloszláshoz, valamint a CI típusú kondritok nem illő elemekben mért összetételéhez (Hirose és mtsai., 2015). Ez alapján az Mg/Si arálynak a Föld egészére nézve megközelítőleg 1-nek kellene lennie. Ezzel szemben számos szakirodalmi forrás szerint a földköpeny felső részére jellemző Mg/Si arány ennél jóval magasabb, jellemzően legalább 1,25 (Ringwood, 1989; Allègre és mtsai., 1995; McDonough és Sun, 1995; Lyubetskaya és mtsai., 2007).

A kondritos modell és a peridotitos köpenyösszetétel közötti eltérés feloldására Allègre és munkatársai (1995) azt javasolják, hogy a földmag összetételének egyik könnyű elem komponense körülbelül 5 tömegszázalék szilícium lehet, amely így a vas és a nikkel mellett a mag fő összetevőjévé válhatott. Egy másik lehetséges értelmezés szerint a Föld alsó köpenye a felső köpenynél szilíciumban gazdagabb, és összetételét túlnyomórészt MgSiO<sub>3</sub>-ban gazdag perovszkit fázis alkotja (1.ábra).

2. táblázat A BSE elemösszetételek szakirodalomból származó adatai súlyszázalékban. (A95: Allègre és mtsai, 1995; LK07: Lyubetskaya és Korenaga, 2007; HZ86: Hart és Zindler, 1986; MS95: McDonough és Sun, 1995; J10: Javoy és mtsai, 2010; PO03: Palme és O'Neill, 2003).

	A95	LK07	HZ86	MS95	J10	PO03
Mg	22.8	23.4±0.93	22.8	22.8±2.23	19.1±2.61	22.2±0.27
Si	21.5	21.1±0.58	21.5±0.6	21±2.10	24.1±2.25	21.2±0.14
Al	2.16	1.87±0.32	2.15±0.02	2.35±0.24	1.28±0.39	2.38±0.20
Ca	2.31	2±0.34	2.34±0.02	2.53±0.25	1.28±0.41	2.61±0.22
Fe	5.82	6.22±0.42	5.86	6.26±0.63	8.63±2.70	6.30±0.04
Ni	0.2	0.20±0.02	0.22	0.20±0.02	0.19±0.05	0.19±0.01

3. táblázat. Piroлитos földmodellek alsó-köpenyre vonatkoztatott ásványtani kompozíciója

	MgSiO <sub>3</sub>	(Mg,Fe)O	CaSiO <sub>3</sub>
Kesson és mtsai. (1998)	69%	22	9
Murakami és mtsai (2005)	72	21	7
Irifune és mtsai. (2010)	74	18	8

	1. Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	6. (Mg <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	<b>Felső-köpeny</b>
23.5 GPa	6. (CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ) (NaAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	11. Fe <sup>3+</sup> <sub>3</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	
	5. CaSiO <sub>3</sub> (>26 GPa)	12. Al-CaSiO <sub>3</sub> (>25 GPa)	
	7. MgO <sub>2</sub> (>116 GPa)	8. CaO <sub>2</sub> (>65 GPa)	
	2,4. MgSiO <sub>3</sub> -pv (>21 GPa)	<b>Alsó-köpeny</b>	
	9. SiO <sub>2</sub> (>50 GPa)		
125 GPa	3. MgSiO <sub>3</sub> -ppv (>125 GPa)	10. SiO <sub>2</sub> (>121 GPa)	4. B1-MgO
	13. Fe,Ni,S,Si,O,C	<b>Földmag</b>	

1. ábra. A földköpeny fő ásványtani, és a földmag fő kémiai összetétele meghatározott nyomástartományokban, szakirodalmi források alapján: 1: Zhang és Xia 2021; 2,3: Murakami és mtsai. 2004; 4: Niu és mtsai. 2015; 5: Irifune 1994; 6: Gasparik 1981; 7: Lobanov és mtsai. 2015; 8: Nelson és mtsai. 2015; 9: CaCl<sub>2</sub>-típusú SiO<sub>2</sub>=Kingma és mtsai. 1995; 10: α-PbO<sub>2</sub>-típusú SiO<sub>2</sub> Murakami és Hirose 2003; 11: Ismailiova és mtsai. 2015; 12: Al-CaSiO<sub>3</sub> Takafuji és mtsai 2002; 13: Allegre és mtsai. 1995, McDonough és Sun 1995, Poirier 1994.

2.4.5. A kőzetbolygók általános ásványtani felépítése a meghatározó elemarányok függvényében

A Naprendszer Föld-típusú bolygóira jellemző, hogy vas-nikkel ötvözetből álló fémes magjukat szilikátos köpeny veszi körül, amelyet a kéreg zár le. A kéreg ásványtani összetételét főként földpátok, kvarc, piroxének és egyéb szilikátásványok határozzák meg. A bolygóköpeny felső része a Földhöz hasonlóan elsősorban olivinből, piroxénekből, spinellből és gránátfázisokból áll, míg az alsó köpenyben dominánsan szilikát-perovszkit és magneziowüstit fordul elő. A kémiai differenciáció és az olvadási folyamatok révén a bolygótestek kémiai összetétele jelentős mértékben módosulhatott.

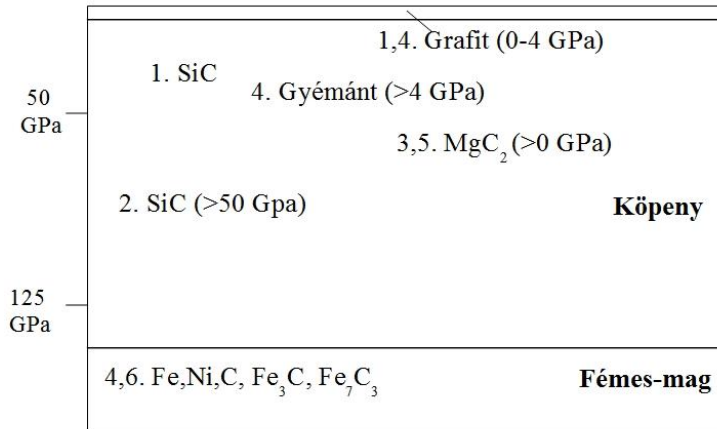
A teresztrikus bolygók ásványtani felépítésének meghatározásában kulcsszerepet játszanak a C/O, Mg/Si, Fe/Si, Al/Si és Ca/Si elemarányok, amelyek elsősorban a köpeny és a kéreg főbb ásványfázisainak kialakulását szabályozzák. Kisebb mértékben, de a Na/Si és a K/Si arányok is befolyásolják a kéreg és a felső köpeny összetételét.

Bond és munkatársai (2010 a) szoláris köd kondenzációs modellezése alapján az 1 csillagászati egységen belül képződő bolygókezdemények anyagát jellemzően Al- és Ca-gazdag fázisok (pl. spinell:  $MgAl_2O_4$ , gehlenit:  $Ca_2Al_2SiO_7$ ) uralják, így az ezen a régióon belül keletkező bolygótestekre magas Al/Si és Ca/Si, valamint alacsony Mg/Si arány jellemző.

A Naprendszer kőzetbolygóinak többsége azonban magasabb Mg/Si arányt mutat a szoláris átlagnál. A bolygótestek egészére számított Mg/Si arány a Merkúr és a Vénusz esetében magasabb, míg a Mars esetében alacsonyabb a Föld szilikátos részére jellemző értéknél, ami arra utal, hogy a protoplanetáris korongban a csillagtól való távolsággal csökken az Mg/Si arány.

A protoplanetáris korong anyagában a C/O és az Mg/Si arány döntően meghatározza a képződő bolygók kémiai és ásványtani összetételét. A C/O arány szabályozza, hogy a szilícium szén-karbid (karbid), oxid, illetve szilikát formájában jelenik-e meg, míg az Mg/Si arány a szilikátásványok típusát és arányát befolyásolja (Delgado Mena és mtsai., 2010). Az Fe/Si arány mindemellett a bolygó teljes vas-tartalmára utal, és kapcsolatban áll a mag méretével is.

Ha a bolygórendszerre jellemző C/O arány kisebb, mint 0,8, akkor a szilícium túlnyomórészt szilikátásványokban fordul elő, így az ilyen bolygók kérgét és köpenyét szilikátok építik fel. Ezzel szemben, ha a C/O arány meghaladja a 0,8-at, akkor szénben gazdag fázisok-például szilícium-karbid (SiC), a magnézium-karbid ( $MgC_2$ ), illetve grafit-válnak dominánssá (2.ábra). Ezekből a bolygókból ún. „szénbolygók” alakulhatnak ki, melyek vas-nikkel ötvözetű magjaiban a szén kénnel együtt jelentős mennyiségben lehet jelen, gyakran fémkarbidok formájában (pl.  $Fe_3C$ , FeS, NiC). Ezen anyagok a protoplanetáris korong belső régióiban, egyensúlyi kondenzációs feltételek mellett keletkezhetnek (Bond és mtsai., 2010b). Noha a szénben gazdag planéták köpenyében is megtalálhatóak a Mg- és Fe-szilikátok (olivin, piroxének), ezek inkább a korong külsőbb régióiban kondenzálódnak.



2. ábra. Magas széntartalmú bolygók ( $C/O > 0,65$ ) leggyakoribb szén-alapú ásványi összetevői, a különböző nyomástartományokban. 1: Kuchner és Seager, 2005; 2: Allen-Sutter és mtsai. 2020; 3: Wu és mtsai. 2023; 4: Hakim és mtsai. 2019; 5: Turkevich és mtsai. 2023. 6: Mookherjee és mtsai. 2011.

A  $C/O > 0,8$  arányú rendszerek tehát szénben gazdag ásványi összetétellel jellemezhetőek. Ezekben a bolygóknál a szilícium, a vas, a magnézium és az oxigén is jelentős szerepet játszik, de ásványtanukat a szénalapú fázisok dominálják. Kérgük szilikátokat, karbidokat és grafitot is tartalmazhat, mely utóbbi a szilícium-karbidhoz hasonlóan szintén jelentős mennyiségben kondenzálódhat a szénben gazdag protoplanetáris-korongokban. A grafit nagy nyomáson – például a kéreg alsó részében – gyémánttá alakulhat. Vízben szegény atmoszférájukban elsősorban szénvegyületek (pl.  $CO$ ,  $CH_4$ ) dominálnak. A  $C/O$  arány növekedésével párhuzamosan a szénalapú fázisok aránya nő a szilikátokkal és oxidokkal szemben.

A szénben gazdag és a szilikátos összetételű bolygók közötti átmeneti típust a szén-szilikát bolygók (carbon-silicate planets) képviselik, amelyek jellemzően  $0,65-1$  közötti  $C/O$  arányú protoplanetáris-korongokban alakulnak ki. Ezek köpenyében és kérgében is megtalálhatóak szilikát- és szénalapú ásványok egyaránt.

Egy adott bolygórendszerre jellemző  $C/O$  arány  $0,8$  alatti értéke a kőzetbolygók köpenyét és kérgét uralkodóan szilikátásványok és oxidok építik fel. A Naprendszerben általános  $0,54$ -es  $C/O$  arány mellett Földünk szilikátokban gazdag, szénben szegény bolygótestnek tekinthető, amely kevesebb mint  $0,01$  tömegszázalék szenet tartalmaz (Javoy és mtsai., 2010). A szilikátos összetétel dominanciáját erősíti az is, hogy a köpeny- és kéregösszetétel kialakításában a  $Mg/Si$  mellett az  $Al/Si$  és  $Ca/Si$  arányok is

fontos szerepet játszanak, különösen a kiegészítő ásványfázisok (pl. plagioklász, spinell, gránát) megjelenésében.

Az Mg/Si arány a köpeny uralkodó szilikátásványainak arányát befolyásolja. Ha az arány < 1, akkor a magnézium főként piroxénekből fordul elő, a szilíciumtöbblet pedig földpátok és más szilikátok képződését eredményezi. 1-2 közötti Mg/Si arány esetén az olivin és a piroxének egyaránt jelentős mennyiségben vannak jelen. Amennyiben az Mg/Si arány > 2, akkor a szilícium főként olivin formájában kötődik meg, míg a magnéziumfelesleg jellemzően magneziowüsztit fázisban jelenik meg (Suárez-Andrés és mtsai., 2018).

### ***2.5 A sztelláris elemgyakoriságok és a kőzetbolygók ásványtani felépítése: a kutatási előzmények áttekintése.***

Annak a lehetősége, hogy a csillagok elemgyakorisági adataiból következtetni lehet a körülöttük kialakuló bolygók kémiai összetételére, jól megalapozott csillagászati és kozmokémiai megfigyeléseken alapul.

A Naprendszerben megfigyelt csillag–bolygó kémiai kapcsolatok extrapolálhatók más csillagok rendszereire is, amit számos csillagászati spektroszkópiai kutatás eredményei is alátámasztanak. A csillagok spektroszkópiai elemzése alapján megállapítható, hogy egyes elemek gyakorisága statisztikailag összefüggésbe hozható az adott csillag körüli bolygó(k) jelenlétével. Az úrbázisú Kepler- és TESS-úrtávcsövek, valamint a földfelszíni spektroszkópiai mérések eredményei alapján számos korrelációt tártak fel a csillagok fizikai és kémiai jellemzői, valamint a körülöttük keringő exobolygók tulajdonságai között (Cabral és mtsai., 2019).

A Kepler-úrtávcső felfedezései elsőként igazolták, hogy a bolygótípusok rendkívül változatosak, továbbá, hogy a Földhöz hasonló méretű, szilárd felszínű kőzetbolygók gyakoriak a Tejútrendszerben. Ez a megfigyelés kulcsfontosságú a jelen disszertáció szempontjából, amelynek egyik célja a Föld-típusú bolygókat felépítő főbb kémiai elemek sztelláris és szoláris arányainak összehasonlító elemzése.

Számos tanulmány kimutatta, hogy a nagy tömegű, gázóriás bolygók előfordulása gyakoribb a magasabb fémességű (azaz nagyobb [Fe/H] értékű) csillagok körül (pl. Gonzalez, 1997; Santos és mtsai., 2004; Fischer és Valenti, 2005; Johnson és mtsai, 2010; Wang és Fischer, 2015). Ezzel szemben a Föld-típusú, kis tömegű bolygók még fémiszegény csillagok környezetében is kialakulhatnak (Ida és Lin, 2004). Haywood (2008) és Adibekyan et al. (2012a, b) kutatásai szerint a fémiszegény, bolygórendszerrel rendelkező csillagok  $\alpha$ -elemekben- például Mg, Si, Ca, Al-gazdagabbak, ami előnyös lehet a szilárd bolygótetek kialakulása szempontjából. Emellett Buchhave és mtsai. (2012)

elemzése szerint a kis tömegű bolygók széles fémességi tartományban keletkezhetnek.

Adibekyan és munkatársai (2015, 2017a, b) kimutatták, hogy a kis tömegű bolygókkal rendelkező csillagok esetében a Mg/Si arány statisztikailag magasabb, mint azoknál, amelyek körül nem detektáltak bolygókat, vagy amelyek gázóriásokkal rendelkeznek. Ez arra utal, hogy a Mg/Si arány alapvető jelentőséggel bír a bolygóképződés szilárd fázisú anyagainak keletkezésében. Az Mg, az Si és az Fe elemek gyakorisága fontos faktora a bolygóképződés kémiai feltételeinek (Adibekyan (2017a). A Ca, Al és Na elemek szintén fontosak a bolygótetek felépítésében, így a bolygóképződés gyakorisága ezen elemek sztelláris gyakoriságaitól is függ.

További vizsgálatok (Bond és mtsai. 2010; Delgado-Mena és mtsai. 2010; Carter-Bond és mtsai., 2012a, b; Fortney, 2012) rámutattak, hogy a Tejútrendszer csillagainak Mg/Si és C/O arányai jelentős változatosságot mutatnak. Ez alapján valószínűsíthető, hogy a galaxisban a Föld-típusú bolygók ásványtani kompozíciói is széles spektrumot fednek le (Bond és mtsai. 2010; Carter-Bond és mtsai., 2012a, b). Az olyan kulcselemek elemarányai, mint az Mg/Si, Fe/Si vagy C/O, alapvetően befolyásolják a kéreg- és köpenyösszetételt, a geológiai működést. A Föld példája alapján tudjuk, hogy a lemeztectonika működéséhez szükséges ásványtani és kémiai feltételek megléte alapvető fontosságú (Stamenković és Seager, 2016; Unterborn és mtsai., 2017). Feltételezések szerint a Tejútrendszer teresztrikus bolygóinak többsége valószínűleg nem rendelkezik lemeztectonikával, részben az ásványtani összetétel eltérései, részben pedig azért mert az aktív lemeztectonika időszaka csupán egy fázis az arra alkalmas kőzetbolygók evolúciójában (O'Neill és mtsai., 2016).

A 2010-es évekre a csillagászati spektroszkópiai mérésekre alapozott kozmokémiai kutatások elérték azt a fejlettségi szintet, amely már lehetővé tette más csillagrendszerek bolygóinak kémiai és ásványtani modellezését. Ennek köszönhetően világossá vált, hogy a bolygók belső szerkezete és ásványi összetétele galaktikus léptékben is jelentős variabilitást mutat.

A kutatások megerősítették, hogy a teresztrikus bolygótetekben is a domináns kőzetalkotó ásványok (pl. olivin, piroxén, plagioklász) a meghatározók (Hazen és mtsai., 2015). Az olyan fő kőzettípusok, mint a bazalt és a gránit, várhatóan más, a Földhöz hasonló felépítésű planétákon is előfordulhatnak. A földi ásványtani diverzitás azonban rendkívüli mértékű: a jelenleg ismert ásványfajták száma meghaladja az 5000-et, melyek nagy része rendkívül ritka, mindössze néhány előfordulási helyük ismert. Hystad és mtsai (2015) az ásványfajták gyakorisági eloszlásából arra a következtetésre jutottak, hogy a Föld ásványtani összetétele nagy valószínűséggel egyedi s nincs két, a kémiai és fizikai tulajdonságaik minden aspektusában megegyező földszerű bolygó a Világegyetemben. Számítási becslésük alapján rendkívül

csekély, kevesebb, mint  $10^{-322}$  annak a valószínűsége, hogy a Föld ásványtani felépítésének duplikációja létezzon.

A földi ásványtani változatosság kialakulásában jelentős szerepet játszhattak a szoláris nebula bolygóképződés szempontjából kritikus kémiai elemeinek Naprendszerre általánosan jellemző relatív gyakoriságai is.

### **3. MÓDSZEREK**

#### ***3.1 A kutatási módszerek kialakításában meghatározó szerepet játszó alapvetések és szemléletek***

A legkisebb mértékben átalakult primitív szenes kondrit-típusú meteoritok kémiai összetétele fontos információkat szolgáltat annak az anyagnak az elementáris összetételéről, melyből a Naprendszer égitestei kialakultak. Ennélfogva a Nap fotoszférájának elemgyakoriságai mellett a szenes kondritok általános elemgyakoriságai, s az ahhoz illeszkedő ásványtani összetétel tanulmányozása szintén része az összehasonlító szemlélet alkalmazásának a kutatási eredmények értelmezésénél.

A kutatást és modellezést elősegítő módszerek kialakításában fontos szerep jut a kozmikus elemgyakoriságok figyelembevétele mellett, a sztelláris elemgyakoriságok meghatározott szempontok szerinti vizsgálatának.

A kozmikus elemgyakoriságok és a Naprendszerre általánosan jellemző vizsgált elemarányok szakirodalmi forrásadatainak összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a Naprendszerre általánosan jellemző Mg/Si aránynak, valamint a C/O aránynak a kutatásom során alapul vett molban kifejezett értékei (1.05 és 0.54), kissé alacsonyabbak a Világegyetemre, a fejlődésének jelenlegi fázisában jellemző becsült magnézium-szilícium, illetve szén-oxigén aránynál. (Mg/Si: 1,075, C/O: 0.60 (Cameron, 1982, Anders és mtsai., 1982 adatai alapján).

A Naprendszerre jellemző releváns elemgyakorisági arányok és a vizsgált sztelláris elemgyakoriságok közötti minél megbízhatóbb összehasonlítás érdekében a kutatómunka során kétirányú megközelítésben végeztem el a statisztikai elemzéseket.

A kétirányú megközelítés azt jelenti, hogy a szoláris releváns értékekkel történő szélesebb körű összehasonlítás érdekében a kőzetbolygók ásványtani felépítését meghatározó legfontosabb elemarányok (C/O, Mg/Si, Fe/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si) mellett a kutatás során megvizsgáltam olyan elemarányok eloszlását is, amelyek fontos szereppel bírnak általában a kőzetbolygók kiegészítő ásványai, illetve adott kőzetbolygó-típusok (szénben gazdag

bolygók, relatíve magas alumínium és kalciumtartalmú bolygók) ásványtani összetételében.

### **3.2 Az adatok forrásai**

#### *3.2.1. A magnézium-szilikátok gyakoriságának becslése*

A szenes kondritokra jellemző magnézium, vas, szilícium, kalcium és alumínium, az Mg/Fe, Ca/Si, Al/Si arányok, illetve a szilikát-típusok relatív kozmikus gyakoriságainak becsléséhez egyrészt már meglévő adatforrások felhasználásával általam létrehozott új adatokra, másrészt korábbi saját mérésből származó adatokra támaszkodtam. A felhasznált adatok a szakirodalomból származnak, amelyeket szisztematikus módon gyűjtöttem a szenes kondritok egyes komponenseire, illetve a teljes anyagmintára jellemző Mg/Fe arány meghatározása érdekében. A szenes kondritok teljes anyagösszetételére, valamint a szénben gazdag mátrix komplex ásványi összetételére jellemző magnézium-szilikát fázisok gyakoriságának becsléséhez egy korábbi mérés alkalmával (Futó 2017a) az Allende-típusú (CV3) szenes kondritot vizsgáltam Raman-spektroszkópiai módszer alkalmazásával.

Az Allende CV3 típusú meteorit mátrixának összetételére vonatkozóan a főbb ásványfázisok azonosítása céljából a szenes kondrit egy vékonycsiszolatát Raman-spektroszkópiai módszerrel vizsgáltam. Az ásványtani elemzéseket Raman-spektroszkóp és optikai mikroszkóp kombinációjával végeztem, X-50-es Olympus objektívvel, 0-3500  $\text{cm}^{-1}$  hullámszám-tartományban. A spektroszkóp 20 mW teljesítménnyel működött, a lézersugár mérete körülbelül 5  $\mu\text{m}$  volt (detektálási határ).

#### *3.2.2. A Hypatia-katalógus*

A dolgozatban a vizsgálatokhoz felhasznált sztelláris elemgyakorisági adatok forrása a Hypatia-katalógus, melyet az első női csillagászok egyikéről, a 4.-5-ik században élt Hypatiáról neveztek el. A Hypatia jelenleg a Nap galaktikus szomszédságában található csillagok spektroszkópiai úton meghatározott adatainak legnagyobb és a legteljesebb adatbázisa. A Hypatia-katalógus (Hinkel és mtsai. 2014) a Naptól számított 500 parszeknél közelebbi, F-, G-, K-, és M-színképtípusú csillagok spektrószkópiai módszerekkel meghatározott elemgyakorisági adatait tartalmazó folyamatosan frissülő online adatbázis. A disszertáció jelen sorainak írása idején a katalógus 13347 csillag 102 kémiai elemre vonatkoztatott gyakorisági adatait tartalmazta, melyek 345 szakirodalmi forrásból származtak.

### *3.2.3 A NASA Exobolygó Archívum*

A bolygókísérővel rendelkező G- és F-típusú csillagok elemarány eloszlási vizsgálata a teljes minta G- és F- típusú csillagaira jellemző elemarányokkal történő összehasonlítás céljából szerepel a dolgozatban. A teljes minta jellegzetességeivel való összehasonlítás segíti a bolygórendszerekre jellemző elemarány-gyakoriságok pontosabb becslését.

A NASA Exobolygó Archívuma (NASA Exoplanet Archive) egy online exobolygó és csillagkatalógus, mely csillagászati adatokat és információkat állít össze exobolygókról és azok köztponti csillagairól. Az Exobolygó Archívum a NASA Exobolygó Tudományos Intézet (NexSci, NASA Exoplanet Science Institute) szolgáltatása, amely szervezet tudományos tevékenységeket és elemzéseket szolgáltat a NASA Exobolygó Felfedezési Programja (NASA Exoplanet Exploration Program, ExEP) projektjei, kutatók és mérnökök számára.

Az archívum adatai tartalmazzák a csillagok jellemző paramétereit (pozíció, fényesség, effektív hőmérséklet), valamint az exobolygók fontos paramétereit (tömeg, sugár, pályaparaméterek, felfedezésük ideje) és egyéb jellemzőiket (radiális-sebességgörbék, fotometriai fénygörbék, spektrumok, képek). Az Exobolygó Archívum direkt hozzáférést biztosít a gyakran felhasznált adatokhoz egy interaktív táblázat segítségével, mely különböző szempontok szerint teszi lehetővé az adatok válogatását és szűrését a kívánt formában történő megjelenítéshez. Jelen sorok írásakor az adatbázis 5832 létezésében megerősített exobolygó adatait tartalmazta.

### *3.3. A sztelláris elemgyakoriságok statisztikai elemzése*

Az elemgyakorisági adatok szűrését, rendszerezését, tárolását, valamint a táblázatok elkészítését és kezelését Microsoft Excel és Microsoft Word programok használatával végeztem. Az átlag és szórás számításokat a Statistics Kingdom kalkulátor-programja segítségével végeztem el. Az ábrák elkészítéséhez a Libre Office 4.1 és a Paint programokat használtam.

#### *3.3.1. A Nap 30 pc sugarú környezetében található G-és F-pektráltípusú fősorozati csillagok elemgyakoriságainak mintaválogatása-az S/Fe, C/Si, Ca/Mg, Al/Mg és O/Si elemarányok meghatározása*

A kutatás első megközelítésének első szakaszában a Naprendszerből 30 parszek sugarú térrészen belül található, a galaktikus vékony-korongba tartozó főági G- és F-színképtípusú csillagok fotoszférikus Fe, S, C, O, Si, Mg, Ca és Al gyakoriságait gyűjtöttem.

### 3.3.2. A Nap 50 pc sugarú környezetében található G-és F-spektráltípusú fősorozati csillagok elemgyakoriságainak mintaválogatása-C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok meghatározása

Az elemarány gyakorisági eloszlás kutatása második megközelítésének második szakaszában a Naprendszer 50 parszek sugarú térrészen belül található, a Tejútrendszer vékony- korong populációjába tartozó főági G-és F-színképtípusú csillagok Fe, O, C, Mg, Si, Ca, Al és Na elemgyakoriságainak szelekcióját végeztem el. Az összes vizsgált kémiai elem gyakoriságaira fókuszáló mintaválogatás eredményeképpen a teljes sztelláris minta 512 G -, és 258 F-csillag releváns adatait tartalmazza. Az analizált G-színképtípusú csillagok effektív hőmérséklete ( $4900 < T_{\text{eff}} < 6400$  K) közötti, és  $-0.9 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.6$  fémességtartományba esnek. Az F-spektráltípusú csillagok effektív hőmérséklete a ( $5700 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 7200 \text{ K}$ ) tartományon belüli, valamint  $-0.8 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.6$  fémességtartományba tartoznak.

A bolygórendszerrel rendelkező, illetve nem rendelkező csillagok kémiai jellemzőinek összehasonlítása szempontjából az elemarány eloszlás vizsgálatának fontos eleme a bolygókkal kísért csillagok adatainak összegyűjtése is. Ennek céljából a NASA Exobolygó Archivumából 2023 október 15 -éig felfedezett exobolygók központi csillagainak elemgyakorisági adatait válogattam. A mintában olyan 79 G-, és 13 F-spektráltípusú csillagot azonosítottam, melyek körül megerősítették bolygók létezését.

A kutatás ezen szakaszának egyik célja annak becslése, hogy a Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si arányok relatív változásai milyen mértékben lehetnek hatással az exo-közetbolygók ásványtani diverzitására a Naphoz közeli galaktikus régiókban. Fontos annak megválaszolása is, hogy a vizsgált elemarányok eloszlása a G-, és F- csillagok esetén mennyire mutat hasonló gyakorisági trendeket a vizsgált C/O tartomány teljes spektrumában, alacsony C/O tartományban ( $< 0.65$ ), valamint olyan csillagoknál, melyeket bolygók kísérnek.

Érdeemes megvizsgálni annak valószínűségét is, hogy a Naphoz hasonló csillagok lakhatósági zónájában milyen gyakorisággal fordulnak elő olyan Föld-típusú bolygók, amelyek a Naprendszerre jellemző C/O és Mg/Si arányokkal megegyező elemarányokat mutató bolygórendszerekben keletkeztek. Az efféle vizsgálatok különösen fontosak lehetnek a földszerű bolygók elterjedtségének pontosabb becsléséhez.

Ehhez elengedhetetlenek azok a megfigyelésalapú statisztikai elemzések, amelyek a lakhatósági zónában keringő, Földhöz hasonló tömegű bolygók előfordulási gyakoriságát tárják fel. E kutatási irány szorosan kapcsolódik a

Naprendszerre jellemző C/O és Mg/Si arányokat mutató bolygórendszerek azonosításához, különösen a G-típusú csillagok populációjában.

A két tényező-azaz a megfelelő kémiai feltételek és a földszerű tömegű bolygók előfordulása-együttes vizsgálata lehetőséget ad annak meghatározására, hogy milyen gyakoriak azok a bolygókeletkezési környezetek, amelyek kedveznek a Föld ásványtani összetételéhez hasonló bolygók kialakulásának.

A következő kutatási lépés a teljes G-típusú csillagpopulációból a Nap-analóg (G2V típusú) csillagok kiválasztása és elemzése, különös tekintettel a C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányokra. Ennek során lehetőség nyílik arra, hogy a vizsgált minták gyakorisági eloszlásait összevegyük a Naprendszer elemarányaival, ami hozzájárulhat a bolygórendszerek összehasonlító planetológiai szempontú értelmezéséhez.

### 3.3.3. Az alkalmazott statisztikai módszerek

A Nap szolgál referenciacsillagként az elemgyakoriságok meghatározásához: (C, O, Mg, Si, Ca, Al, Na, Fe, S=0,00 dex (decimális exponens). Az elemarányok számításának módja:

$$N_1/N_2 = SVN_1/N_2 \{ \log_{10} [X_1/H] / \log_{10} [X_2/H] \} \quad (1)$$

ahol  $SVN_1/N_2$  az adott elemarány szoláris értéke,  $[X_1/H]$  and  $[X_2/H]$  adott elemek gyakoriságának dex-ben kifejezett értéke.

A Hypatia-katalógus adatainak forrás alapját képező tanulmányok és adatbázisok adatai közötti eltérés az összes elemre és csillagra vonatkozóan átlagban 0,14 dex. Az elemarányok molban kifejezett értékeinek számítása során a bizonytalanság:  $\pm 0,005$ . (A számított elemarányokat rendszerező táblázatokat a dolgozat 1-6. számú mellékletei tartalmazzák.

A statisztikai elemzés alapjául a vizsgált elemek arányaira vonatkozó minta adatok és a szoláris referenciaként szolgáló értékek közötti összehasonlítás szolgált. Az egyes elemarányok eloszlásának jellemzéséhez olyan statisztikai módszereket alkalmaztam, amelyek a relatív gyakoriság (százalékos előfordulási arány) és a számtani középérték (átlag) meghatározásán alapulnak. Az egyes elemarány-eloszlások részletesebb vizsgálata érdekében az átlagérték mellett meghatároztam a szórásokat is, az 50 parszek távolságon belül elhelyezkedő G- és F-típusú csillagokra, valamint azok bolygókísérővel rendelkező csillagaira vonatkozóan. A szórás alkalmazása ebben a statisztikai elemzésben azért bír jelentőséggel, mert lehetővé teszi annak megítélését, hogy az egyes elemarányok mennyire koncentrálnak az átlagérték körül, illetve

milyen mértékű szóródást, variabilitást mutatnak a mintán belül. A populációs szórás számításának módja:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

ahol  $\sigma$  a populációs szórás,  $x_i$  egy adatérték,  $\bar{x}$  a populációs átlag,  $n$  az adatok száma,  $\sum (x_i - \bar{x})^2$  az átlagtól való eltérések négyzetösszege. Az átlag számításának módja:

(3)

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

ahol  $\bar{x}$  az átlag,  $\sum x_i$  az adatok összege,  $n$  az adatok száma.

A szolárisnál alacsonyabb, azzal megegyező, illetve azt meghaladó elemarányok relatív gyakoriságának ismerete alapvető fontosságú a sztelláris és a Naprendszerre jellemző (szoláris) elemarányok tipikusságának becslése szempontjából. A mintákból számított számtani átlagok és szórás értékek szintén jelentős információval szolgálnak, mivel eredményeik általában megerősítik a relatív gyakorisági elemzésből levont következtetéseket, ezáltal hozzájárulva az elemarány-eloszlások megbízhatóbb értelmezéséhez.

### 3.3.4. A kutatási eredmények értékelési rendszerének definiálása.

A kozmokémiai, bolygótudományi és geokémiai vizsgálatok során az elemarányok alacsony vagy magas voltát általában a szoláris, illetve meteoritikus (elsősorban CI típusú szenes kondritok alapján meghatározott) referenciaértékekhez viszonyítva értelmezik. A dolgozatban a Naprendszer egészére jellemző, szoláris releváns elemarányokat alkalmazom referenciarendszerként, amelyek a legátfogóbb és legáltalánosabban elfogadott alapértéket képviselik az összehasonlító elemzések során. A Naprendszerre jellemző elemarányok referenciaként betöltött szerepe alapvető jelentőségű, mivel a dolgozat központi célja a szoláris elemarányok és a Nap galaktikus környezetében található G- és F-típusú csillagok elemgyakoriságainak összehasonlítása.

4.táblázat A szoláris elemarányok molban kifejezett értékei Forrás: saját készítésű táblázat Asplund és mtsai. 2005 adatai alapján.)

C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si	Mg/Fe	S/Fe	C/Si	O/Si
0,54	1,05	0,0631	0,0724	0,0457	0,87	1,202	0,49	7,59	14,12

**Jelentős eltérés:** Egy adott elemarány referenciaértékhez viszonyított eltéréseinek mértéke, többféle szempont figyelembevételével is becsülhető. Az egyik meghatározó szempont, hogy az eltérés elegendő mértékű-e ahhoz, hogy a protoplanetáris korongban kialakuló kőzetbolygók ásványi összetételére –különösen az uralkodó ásványfázisok típusára és arányára– számottevő hatást gyakoroljon. Például az Mg/Si arány 1,0 alá csökkenése esetén a bolygóköpenyek ásványos összetételében a piroxének válhatnak dominánssá az olivin helyett (Bond és mtsai. 2010a). Ezért az Mg/Si arány szoláris referenciaértékétől (1,05) való, 5%-ot meghaladó eltérés jelentősnek tekintendő. A C/O arány esetében kimutatható, hogy 0,65 feletti értékek mellett –különösen a csillaghoz közeli zónákban– túlnyomórészt szénalapú ásványokból álló, szénben gazdag kémiai összetételű kőzetbolygók kondenzálódhatnak (Moriarty és mtsai 2014). Ezért a szoláris C/O arány (0,54) 20%-ot meghaladó mértékű túllépése szintén jelentős eltérésként értelmezhető. A Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányok esetében a szoláris referenciaértékek és a CI-kondritok megfelelő arányai közötti eltéréseket, míg a Fe/Si arányra vonatkozóan a primitív földköpenyre jellemző értéket tekintetem a jelentős különbség küszöbértékeinek.

A jelentős eltérés küszöbértékeinek meghatározási elvét az elemarányok esetében a referenciaértéktől számított negatív és pozitív irányban is alkalmaztam. Ennek megfelelően a dolgozatban a főbb elemarányokra vonatkozóan az alábbi eltérési küszöbértékeket tekintek jelentősnek: a C/O arány esetében  $\pm 0,21$  molarány eltérés ( $\pm 20\%$ ) az Mg/Si arány esetében  $\pm 0,05$  molarány eltérés ( $\pm 5\%$ ), míg az Fe/Si arányra vonatkozóan  $\pm 0,13$  molarány eltérés ( $\pm 15\%$ ), a releváns referenciaértéktől számított eltérés jelenti azt a határt, amely felett az adott arány módosulása ásványtani vagy planetológiai szempontból számottevőnek tekinthető. A Ca/Si arány esetében  $\pm 0,003$  molarányú eltérés ( $\pm 5\%$ ), az Al/Si aránynál  $\pm 0,012$  molarányú eltérés ( $\pm 16\%$ ), míg a Na/Si arány tekintetében  $\pm 0,012$  molarányú eltérés ( $\pm 27\%$ ) jelöli a jelentős különbségek küszöbértékét.

**Elemarány-kombinációk:** Az elemarány kombinációk vizsgálata szintén kiemelt jelentőséggel bír, mivel az egyedi elemarányokon túlmutatóan további információval szolgálhat a különböző kőzetbolygó-típusok előfordulási gyakoriságára, valamint hozzájárulhat a Naprendszerre jellemző elemarányok tipikus vagy atipikus voltára vonatkozó megállapítások megerősítéséhez. A

dolgozatban elemzett elemarány-kombinációk a következők: Mg/Si-Fe/Si; C/O-Mg/Si; valamint a C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si rendszerek.

Az elemarány-kombinációk hasonlóságának határérték tartományai: (C/O=0,52-0,56; Mg/Si=1,03-1,07; Ca/Si=0,063±0,003; Al/Si=0,0724±0,012; Na/Si=0,0457±0,012; Fe/Si=0,87±0,13).

Tipikus és atipikus elemarányok és kombinációk: A dolgozatban az egyes elemarányokat abban az eloszlási tartományban tekintem matematikai alapon *tipikusnak*, amelyekben az előfordulási gyakoriságuk a szoláris referenciaértékhez viszonyítva (az annál alacsonyabb, azzal megegyező, illetve annál magasabb értékek között) meghaladja az 50%-ot. Ennek megfelelően egy adott elemarány abban az eloszlási tartományban tartozik az *atipikus* kategóriába, amelyekben nem éri el ezt a küszöbértéket.

Amennyiben például egy adott elemarány előfordulási gyakorisága a szoláris értéknél magasabb (szuperszoláris) eloszlási tartományban meghaladja az 50%-ot, az arra utal, hogy a vizsgált mintában az adott elemarány tekintetében többségben vannak a szuperszoláris értékeket mutató csillagok.

Ha egy adott elemarány esetében a szoláris referenciaértékkel megegyező értékek gyakorisága a teljes mintában 10% alatti, miközben az előfordulási eloszlás valamely tartományában a szoláris referenciaértéktől eltérő értékek aránya meghaladja az 50%-ot, akkor az adott elemarány szoláris referenciaértéke nem tekinthető a vizsgált populációra jellemző, tipikus értéknek.

Az elemarány-kombinációk közül a dolgozat értékelési rendszerében azokat tekintem jelentős eltérést mutatóknak (nagy eltérésűnek), amelyek legalább egyik összetevője a szoláris referenciaértékhez képest a korábban meghatározott mértékben (pl. ±5%, ±20%) tér el.

## 4. EREDMÉNYEK

### *4.1 A magnézium-szilikátok gyakoriságának becslése az Mg/Fe arány alapján*

A Naprendszer ősi anyagának kémiai összetételét kiválóan megőrző szenes kondritok-jelen vizsgálatban a Kaba CV3 típusú szenes kondrit-különböző ásványi komponenseinek fő elemösszetételének az Mg/Fe arány elemzése útján megállapítottam, hogy a teresztrikus bolygótetek keletkezésében alapvető fontosságú anyagban, valamint a naprendszerbeli kozmikus eredetű

anyagokban a magnéziumban gazdag szilikátok a domináns fázisok. A magnéziumban gazdag szilikátfázisok előfordulása 20-50 mólszázalékkal meghaladja a vasban gazdag szilikátfázisokét.

Az adatelemzés alapján a vizsgált minták Mg/Fe tömegaránya 0,348/0,652 és 0,393/0,607 között mozog (5. táblázat), ami 1,2–1,5 közötti mólaránytartománynak felel meg. Mivel a szenes kondritok a legprimitívebb anyagösszetételt képviselik az összesített eredmény arra utal, hogy a Naprendszer eredeti kémiai összetételében a magnéziumtartalmú szilikát- és oxidfázisok gyakorisága a vastartalmú fázisokéhoz képest 20-50 mólszázalékkal nagyobb.

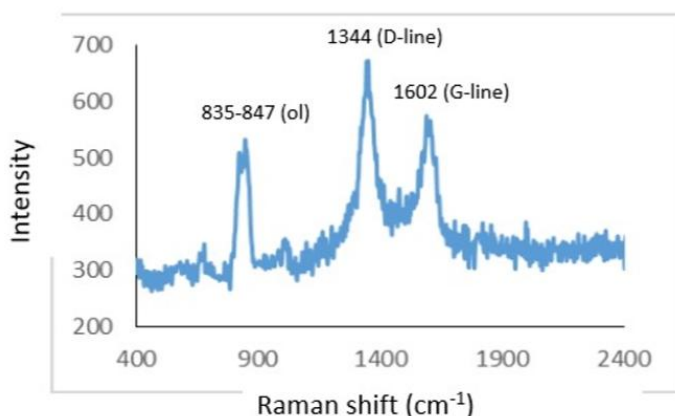
*5.táblázat. Különböző típusú meteoritokra és ásványi komponenseikre, valamint meteorit csoportokra jellemző Mg/Fe elemarányok számított értékei. A számításhoz felhasznált adatok forrásai: Gucsik és mtsai. (2013) (G13); Sztrókay és mtsai. (1961) (Sz61); Wasson és Kallemeyn (1988) (WK88); és Weissberg és mtsai. (1993) (W93). A számított adatok forrásai: Futó és Gucsik (2013); Futó és mtsai. (2021).*

Meteorit-ásványi komponens	Mg/Fe arány számított értékei (súlyszázalék)
Kaba-porfirités kondrum (G13)	Mg0,993/Fe0,007
Kaba-szemcsés olivin-piroxén (G13)	Mg0,98/Fe0,02
Kaba-kondrum (G13)	Mg0,976/Fe0,024
Kaba-izolált olivin szemcse (G13)	Mg0,995/Fe0,005
Kaba-összetett aggregátum (G13)	Mg0,003/Fe0,997
Renazzo-olivin kondrum (W93)	Mg0,972/Fe0,028
<i>Meteorit (csoport)-teljes kémiai összetétel</i>	<i>Mg/Fe arány számított értékei (súlyszázalék-mólarány)</i>
Kaba (Sz61)	Mg0,393/Fe0,607; 1,49
CI (WK88)	Mg0,348/Fe0,652; 1,226
CM (WK88)	Mg0,358/Fe0,642; 1,28
CO (WK88)	Mg0,369/Fe0,631; 1,34
CV (WK88)	Mg0,382/Fe0,618; 1,42

Egyes szenes kondritokban a vastartalmú ásványi komponensek aránya mintegy két nagyságrenddel meghaladja a magnéziumban gazdag ásványokét (fayalit aggregátum: Mg=0,3, Fe=99,7 tömegszázalék; 5. táblázat). A magas vastartalmú ásványfázisok képződése a szakirodalomban korábban leírtakkal

összhangban feltehetően nemegyensúlyi kondenzációs folyamatok eredménye (Bose és mtsai., 2010).

Az Allende-meteorit szenes mátrixának Raman-spektrális tulajdonságai egy domináns tartományt tárnak fel, a széntartalmú anyagban olivin (forszterit) van jelen. Három fő spektrális tartomány különíthető el: 835–847  $\text{cm}^{-1}$  (az olivin tetrahedrális rezgése), 1344  $\text{cm}^{-1}$  (D-sáv) és 1602  $\text{cm}^{-1}$  (G-sáv), melyek szabályos kristályszerkezetű anyagra utalnak a minta vizsgált részletén (3.ábra). A kis mennyiségű szenet tartalmazó finomszemcsés szerkezetű ásványi kompozícióban főként szilikátok találhatók. A forszterit jelenléte a magnézium-szilikátok relatíve magas gyakoriságára utal.



3. ábra. Az Allende szenes kondrit mátrixának Raman-spektrális tulajdonságai olivin jelenlétében (Futó és Gucsik 2017 a).

## 4.2 Az Mg/Si, a C/O, a Ca/Si, az Al/Si elemarányok változásának hatása a kőzetbolygók plauzibilis ásványtani összetételére

### 4.2.1. A terresztrikus bolygótetek ásványtani összetétele a szoláris értéknél magasabb Mg/Si arány mellett

A Föld-típusú bolygók belső dinamikájának hatékonysága, valamint a lemeztektonikai folyamatok működése nagymértékben függ a köpeny és a litoszféra ásványtani összetételétől. Ebben kiemelt szerepet játszik az Mg/Si arány, mivel nemcsak meghatározza és szabályozza a köpeny uralkodó ásványos összetételét, hanem magasabb értéke az alsó köpenyben a

magnéziumban gazdag ásványfázisok-különösen a köpeny anyagának termoelasztikus tulajdonságait nagy mértékben befolyásoló ferroperekliász-arányának növekedését eredményezi.

A dolgozatban bemutatott eredmények alapján a Nap közeli galaktikus környezetében a G-és F -színképtípusú főági csillagok moláris Mg/Si elemarányai legtöbbször 1 és 2 közé esnek; az 1 alatti értékek ritkák, a 2 feletti arányok pedig kifejezetten szórványosak. A kőzetbolygók jelentős része olyan protoplanetáris korongokban alakul ki, amelyek a szolárisnál magasabb Mg/Si aránnyal jellemezhetők. Ugyanakkor azon csillagok aránya, amelyek moláris Mg/Si értéke meghaladja az 1,5-öt, viszonylag alacsony. A Mg/Si arány növekedése a felső-köpenyben a magnéziumban gazdag ásványok, elsősorban az olivin ( $Mg_2SiO_4$ ) és annak magasabb nyomáson stabil polimorfjai, a wadsleyit és a ringwoodit arányának növekedésével jár együtt. A magnéziumban gazdag bolygórendszerekben a szolárisnál magasabb Mg/Si arány esetén a szenes kondritok kondrumainak piroxén-ásványi összetételében magasabb arányban jelenhetnek meg alacsony kalcium- és magas magnéziumtartalmú piroxének: ensztatit ( $Mg_2S_2O_6$ ), hipersztén,  $(Mg,Fe)SiO_3$ . Az alumíniumgyakoróság függvényében a spinell ( $MgAl_2O_4$ ) aránya is számottevő lehet (Futó, 2020).

A földi alsó köpeny fő ásványi összetevői a  $MgSiO_3$ -perovszkit és annak magasabb nyomású módosulata, a szilikát poszt-perovszkit, valamint a magnézium-oxid  $(Mg,Fe)O$ , azaz ferroperekliász. Az emelkedő Mg/Si arány következtében jelentkező magnéziumtöbblet nem a szilíciumot is tartalmazó  $MgSiO_3$  fázis mennyiségét növeli, hanem az MgO-tartalmú ferroperekliász arányának emelkedését eredményezi.

A protoplanetáris korongokban magasabb magnézium/szilícium arány mellett képződő bolygók esetében a felső köpeny és az átmeneti zóna ásványtani felépítését elsősorban az olivin és annak magasabb nyomáson stabil módosulatai határozzák meg, míg az alsó köpenyben a ferroperekliász mennyisége nő. Ha feltételezzük, hogy a bolygóköpeny felső és alsó régióiban az Mg/Si arány meghaladja a 2-t, akkor az ilyen magnéziumban gazdag, teresztrikus bolygók felső köpenyében az olivin-fázisok mellett már megjelenik a magnézium-oxid is, mint jelentős köpenyalkotó ásvány. Ez annak köszönhető, hogy a rendelkezésre álló szilíciumhoz képest a magnézium mennyisége túllépi az olivin-fázisok képződéséhez szükséges értéket, és a fennmaradó Mg-többlet főként MgO képződésére fordítódik. Egy ilyen típusú, a Földhöz hasonló tömegű és felépítésű bolygó alsó köpenyében a ferroperekliász válik domináns ásványfázissá, miközben a  $MgSiO_3$  perovszkit (pv) és poszt-perovszkit (ppv) fázisok aránya csökken.

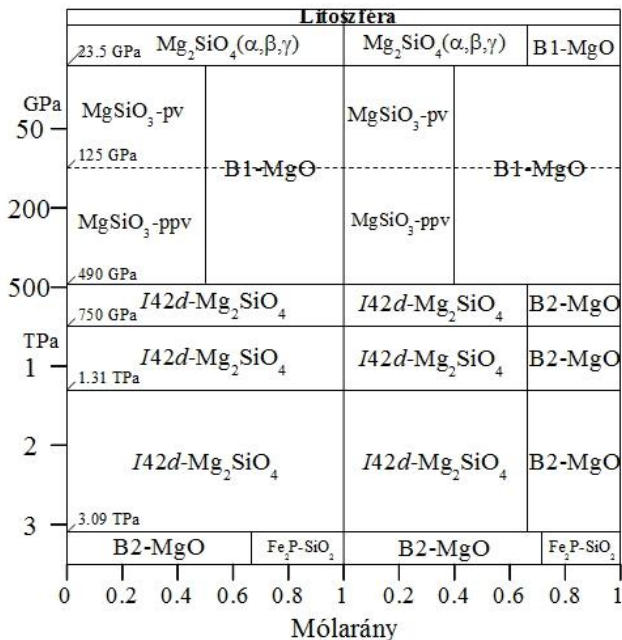
Az ultramagas nyomástartományban (UHP) végzett vizsgálatok eredményei szerint a  $\text{MgSiO}_3$  poszt-perovszkit fázisa, valamint a B1-rácsszerkezetű MgO 500 GPa (0,5 TPa) nyomás felett már nem tekinthetők stabilnak, és a nyomás további növekedésével sorozatos fázisátalakulásokon mennek keresztül (Umemoto, 2006; Umemoto és Wentzcovitch, 2011; Wu és mtsai, 2014; Niu és mtsai, 2015; Umemoto és mtsai, 2017). Ezen eredmények alapján a hivatkozott tanulmányok előrejelzéseket adnak a szuper-Földek, valamint az ezeknél is nagyobb tömegű potenciális kőzetbolygók mély köpenyzónájának ásványtani összetételére vonatkozóan.

A kutatómunka bevezető szakaszában elkészítettem egy lehetséges ásványtani modellt a nagy tömegű, magnéziumban gazdag kőzetbolygók köpenyének valószínű felépítésére vonatkozóan. A modell elsősorban Umemoto és munkatársai (2017) ultramagas nyomású (UHP) fázisátalakulási eredményein alapul, és 3,1 TPa-t meghaladó nyomástartományig nyújt plauzibilis ásványtani leírást. A modellezés célja az volt, hogy eredményeit a kutatás későbbi fázisaiban, a különböző összetételű kőzetbolygók gyakorisági eloszlásának értelmezése és az ebből levonható következtetések kiegészítése során hasznosítani lehessen. Ennek érdekében elegendő egy olyan egyszerűsített modell is, amely nem tartalmaz részletes ásványtani felépítést, és nem veszi figyelembe az Mg/Si arány hatását az esetlegesen jelenlévő kiegészítő ásványfázisokra. A modell kizárólag a fő köpenyalkotó ásványi komponensekre koncentrál, továbbá a modellezett köpenystruktúrán belül konstans Mg/Si mólarányt feltételez. A masszív földtípusú bolygók köpenyének ásványtani modellje a különböző köpenyövekben jelen lévő ásványfázisok molszázalékban kifejezett összetételét írja le, a bolygó szilikátos részére (BSP) vonatkoztatott 2,0 és 2,5 közötti Mg/Si arány esetén. A modell szerint Mg/Si=2 esetében a köpenyt 490 GPa nyomásig  $\text{MgSiO}_3$  perovszkit (pv) és poszt-perovszkit (ppv), valamint B1-típusú MgO alkotja, 50–50 molszázalékos arányban. Ezt követően, a 490 gigapascal-tól 3,09 terapascal-ig terjedő nyomástartományban az I 42d kristályszerkezetű  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  válik a domináns ásványfázissá.

A Mg/Si>2 tartományban, különösen Mg/S=2,5 esetén, a fő köpenyalkotó ásványfázisok az ultramagas nyomástartományban (UHP) a magnézium-szilikátok ( $\text{MgSiO}_3$  perovszkit és poszt-perovszkit), a ferropriklász (B1-szerkezetű MgO), valamint a 490 GPa-t meghaladó nyomástartományban - egészen 3,09 TPa-ig-az I42d kristályszerkezetű  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  és a B2-szerkezetű MgO. 3,09 TPa nyomás felett az UHP-olivin polimorf disszociál  $\text{Fe}_2\text{P}$ -szerkezetű  $\text{SiO}_2$ -re és B2-MgO-ra, amely nyomástartományban a B2-MgO válik domináns fázissá (lásd 4. ábra) (Futó, 2021a).

Magas Mg/Si arányú kőzetbolygók esetén a kéreg vastagsága nagyobb lehet a Földhöz képest, és melilit- és kalciumtartalomban, magasabb értéket mutathat (Bond és mtsai., 2010). A kéreg ásványtani felépítésében

valószínűsíthetően nagyobb arányban fordulnak elő plagioklász-földpátok, míg az alkáli- földpátok aránya alacsonyabb. A kéreg egyik gyakori ásványi összetevője lehet a gehlenit [ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_7$ ], míg a földpátos ásványegyüttesen belül az anortit a leggyakoribb komponens.



4.ábra Nagytömegű kőzetbolygók köpenyének ásványi összetétele 2,0 és 2,5 Mg/Si mólarány esetén (Futó 2021 a).

#### 4.2.2. A teresztrikus bolygótetek ásványtani összetétele a szoláris értéknél alacsonyabb Mg/Si arány esetén

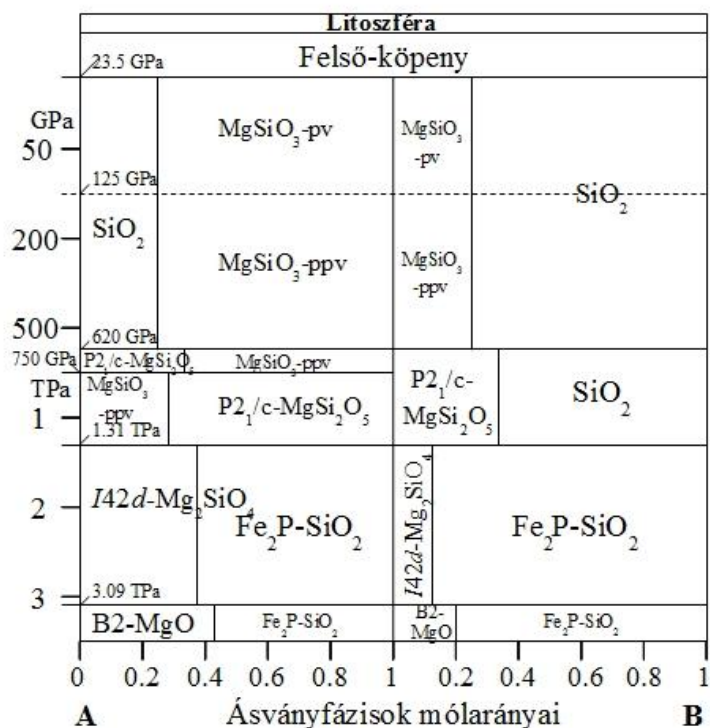
A kőzetbolygók egy kisebb populációja magnéziumban relatíve szegény kémiai környezetben keletkezhet. Ilyen esetekben ezek a bolygók elsősorban olyan kémiai feltételek alakulnak ki, ahol a központi csillagra, illetve az adott protoplanetáris-korong egészére jellemző Mg/Si arány értéke 1 alatti. Az ilyen környezetben formálódó kőzetbolygók ásványtani összetétele döntően magnéziumban szegény fázisokból áll. Mivel a lemeztektonikai folyamatok hajtóerejét jelentő köpeny-konvekció hatékonysága nagymértékben függ a köpeny ásványtani összetételétől, ezért a magnéziumban gazdag szilikátos bolygók vizsgálatán túl a magnéziumban szegény bolygók gyakorisági eloszlásának elemzése is hozzájárulhat a tektonikusan aktív teresztrikus bolygók számának pontosabb becsléséhez.

Magnéziumban szegényebb kémiai feltételek mellett képződő teresztrikus bolygók felső köpenyének és kérgének ásványtani összetételében nagyobb arányban fordulnak elő az olivinhez képest magnéziumban szegény piroxének, amely arány az Mg/Si érték csökkenésével párhuzamosan növekszik. A Föld felső köpenyében jelen lévő piroxénfázisok jellemzően ensztatitból ( $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ), diopszidból ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ) és jadeitből ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ) állnak (Gasparik, 1989). Ezek a piroxének 15,4 GPa nyomáson gránátszerkezetű fázisokká alakulnak át, amelyek a felső köpeny alsó részében domináns szerepet játszhatnak egészen az alsó köpeny  $\text{MgSiO}_3$ -perovszkit fázisának megjelenéséig, különösen magnéziumban gazdag bolygók esetén.

Megjegyzem, hogy alacsony Mg/Si arány esetén a szenes kondritok piroxén-ásványi összetételében magasabb arányú fontos alkotó komponensekként jelenhetnek meg a diopszid, a hedenbergit ( $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ ) és a gehlenit ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) (Futó és Gucsik, 2021 c). Magnéziumban szegény kőzetbolygók esetén a felső köpeny felső zónájában a piroxének összetételét nemcsak az Mg/Si arány, hanem a Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányok is befolyásolják. Ha bolygó szilikátos részére (BSP) vonatkoztatott Mg/Si arány 1 alatti, akkor a felső köpeny legvalószínűbb ásványi összetételét diopszidban gazdag piroxének, szilícium-dioxid és jelentős arányban pirop típusú gránát határozzák meg, a jadeit pedig kisebb, de szintén jelentős mennyiségben lehet jelen. Az ensztatit a diopszid mellett gyakori köpenyalkotó piroxénfázisként jelenhet meg, mennyiségi arányukat az Mg/Si és Ca/Si értékek együttesen szabják meg. Ha az Mg/Si arány a teljes BSP-re vetítve 0,5 alatti, akkor a köpenyben főként diopszid és szilícium-dioxid dominál, kisebb jadeit-tartalommal.

Alacsony Mg/Si arányú, masszív kőzetbolygók köpenye a magnéziumban gazdag bolygókéhoz hasonlóan szilikátos és oxid alapú UHP ásványfázis-szekvenciákból épülhet fel, amelyeket 23,5 GPa és 3,5 TPa közötti nyomástartományban modelleztem (5. ábra) (Futó, 2022). A 0,75 és 0,5 közötti Mg/Si értékekhez tartozó ásványfázis-határok az Umemoto és mtsai. (2017) által javasolt  $\text{MgSiO}_3$  hármas disszociációs modelljére, valamint a szilícium-dioxid nagy nyomású fázisátmeneteit tárgyaló szakirodalmi adatokra épülnek. A 0,75-0,25 közötti Mg/Si értéktartományokban a coesit és a mélyebb zónákban megjelenő stishovit a felső köpeny ásványkompozíciójának jelentős frakcióját alkotják. A stisovit 50 GPa nyomáson  $\text{CaCl}_2$ -típusú kristályszerkezetű fázissá alakul át (Kingma és mtsai., 1995), amit további három fázisátmenet követ:  $\text{CaCl}_2 \rightarrow \alpha\text{-PbO}_2$ -típus (121 GPa; Murakami és Hirose, 2003),  $\alpha\text{-PbO}_2 \rightarrow$  pirit-típusú szerkezet (268 GPa; Kuwayama és mtsai., 2005), pirit-típusú  $\rightarrow$   $\text{Fe}_2\text{P}$ -típusú  $\text{SiO}_2$  (690 GPa; Tsuchiya és Tsuchiya, 2011). A felső köpeny felső zónájának ásványtani összetétele az Mg/Si arány

csökkenésével az olivin–diopszid–jadeit-gránát rendszer mentén változik, eltérő olivin/gránát arányokkal és diopszid-jadeit elegyarányokkal.



5. ábra. A ~1 földtömegű kőzetbolygók felső köpenyének ásványi összetétele 0,75 (A) és 0,25 (B) Mg/Si arányok esetében (Futó 2022).

Az  $\alpha$ -fázisú diopszid és a jadeit gyakori ásványkomponensek lehetnek a magnéziumban szegény kőzetbolygók legfelső köpenyrétegében. A jadeit ezen kívül a felső kéreg felzikus kőzeteinek is fontos ásványa lehet, különösen 0,5-1 közötti Mg/Si arány mellett, amikor a kéreg kőzetösszetétele hasonlóságot mutathat a földi kontinentális kéreg felső szintjével.

Amennyiben a BSP-re jellemző Mg/Si arány 1 és 2 közé esik, úgy a felső köpeny alsó zónájában kialakuló gránátövezet jellemző ásványtani összetétele a [Mg<sub>3</sub>(Mg,Si)Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>-Mg<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>] összetételű majorit-pirop elegy lehet. 1 alatti Mg/Si arány esetén a gránátzóna dominánsan a pirop–almandin–grosszulár (Mg<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>-Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) komponensek változó arányú elegyéből épül fel, amelyet elsősorban a Mg, Si, Fe, Al és Ca elemek relatív mennyisége határoz meg.

Az 1-nél alacsonyabb tartományban az Mg/Si arány változása jelentős hatással van mind a köpeny, mind a kéreg ásványtani összetételére.

#### *4.2.3. A kén és a vas arányának jelentősége a kőzetbolygók elemösszetételében*

A teresztrikus bolygók kémiai összetételét nemcsak a csillagokra és bolygórendszerükre jellemző elemgyakoriságok határozzák meg, hanem meghatározó szerepet játszik a protoplanetáris korongon belüli keletkezési zónájuk kondenzációs kémiája, valamint az összeállást követő planetáris evolúció is. A kén különösen érzékenyen reagál ezekre a környezeti feltételekre: mennyisége erősen függ a kialakulási hely hőmérsékleti és kémiai viszonyaitól, illetve a bolygóttest poszt-akkréciós fejlődése során zajló, összetételt módosító folyamatoktól. A vas, az oxigén, a szén, a szilícium, a magnézium, a kalcium, az alumínium és a nátrium mellett a kén valószínűleg szintén fontos szerepet játszik a kőzetbolygók összetételének kialakításában. A Naprendszer kutatása során megállapítást nyert, hogy a vasmeteoritok kémiai jellemzői információt hordoznak differenciált szülőégitesteik fémes magjának összetételéről. A Föld magja a várható sűrűséghez képest kisebb sűrűségű, ami arra utal, hogy könnyebb elemeket is tartalmaznia kell (például S, Si, O, C) (Poirier, 1994). A Naprendszerben a bolygóképződés alapjául szolgáló anyag eredeti kémiai összetételét, őrző szenes kondritok közé tartozó Kaba-meteorit kondrumaiban található fémes fázisok között nagy gyakorisággal fordulnak elő vas- és vas-nikkel-szulfidok (Futó és Gucsik 2021 d), amely alátámasztja a kén relatíve magas gyakoriságát a bolygóttestek vastartalmú anyagában.

A kén-viszonylag magas kozmikus gyakoriságának és a vasmeteoritokban való előfordulásának köszönhetően-valószínűsíthetően az egyik legjelentősebb könnyűelem a döntően vasból és nikkelből felépülő földmagban. A fémes bolygómagok kéntartalma azért fontos tényező, mivel a fémekkel ötvözetet képző könnyűelemek-köztük a kén-jelentős mértékben befolyásolják a vas fizikai tulajdonságait, így az olvadási hőmérsékletét is. A vasötvözetek olvadási hőmérséklete kulcsfontosságú adat a planetáris magok termális struktúrájának meghatározásához. Meghatározza a szilárd belső és a folyékony külső mag közötti határt, amelynek ismerete kulcsfontosságú lehet a planetáris mágneses terek kialakulásának és fejlődésének jobb megértése és modellezése terén. A könnyűelemek-köztük a kén-mennyisége és relatív gyakorisága közvetlen hatással van a szilárd belső mag növekedésének ütemére, így alapvetően befolyásolja a kőzetbolygók fizikai és hőtörténeti fejlődését. Minél nagyobb a könnyűelemek aránya egy bolygó fémes magjában, annál hosszabb ideig tart a belső szilárd mag növekedése, ez pedig befolyásolja a mágneses tér fenntartását biztosító dinamófolyamat hatékonyságát.

Mivel a kén elsősorban a fémek magban koncentrálódik, a S/Fe arány a bolygóbelső kéngazdagságának fontos indikátora lehet. A G-típusú csillagok S/Fe arányainak ismerete alapján becslések készíthetők adott rendszerek kőzetbolygójának várható kéntartalmára vonatkozóan. Ezen felül lehetőség nyílik összehasonlító elemzésekre is az egyes exobolygó-rendszerek és a Naprendszer kőzetbolygójának kénkészlete között. Mindez jelentős lehet abból a szempontból, hogy a kapott eredmények alapján megbecsülhető, mennyire lehetnek gyakoriak a Földhöz hasonló, hosszú távon stabil mágneses térrel rendelkező kőzetbolygók az exobolygórendszerekben. Ehhez azonban elengedhetetlen a sztelláris Fe/Si és S/Fe arányokon alapuló statisztikai vizsgálatok elvégzése és értelmezése.

A vizsgált minta 165 30 parszeknél közelebbi G-spektráltípusú csillag adatait tartalmazza, s e csillagok domináns hányadánál a kén és vas gyakoriságai a szoláris értékeknél magasabbnak adódtak. 89 csillag a szoláris értéknél alacsonyabb S/Fe arányt mutat, az S/Fe 71 csillagnál magasabb és 5 csillag esetén pedig a szoláris értékkel közelítőleg identikus (Futó és Gucsik, 2023 a). A minta részletes elemzése alapján a 165 G-típusú csillag közül 91 esetében az S/Fe arány a 0,4 és 0,6 közötti tartományba esik, amely az összminta 55%-át jelenti. A vizsgálat során meghatározott S/Fe értékek teljes intervalluma 0,048 és 2,692 között változik, amely a kén és a vas relatív sztelláris gyakoriságának jelentős diverzitására utal.

Ez arra utal, hogy a Naprendszerre jellemző S/Fe arányhoz hasonló sztelláris elemarányok viszonylag gyakoriak a közeli galaktikus környezetben. Ennek következtében feltételezhető, hogy az ilyen csillagok körül keletkező potenciális kőzetbolygók kéngyakorisága, keletkezési kémiai feltételei és evolúciós útjai -amennyiben a bolygórendszer egyéb jellemzői is kedvező-hasonlóságot mutathatnak a Naprendszer belső bolygóival, köztük a Földdel. A kén- és széntartalom változásának fontos szerepe van a bolygómag összetételének szabályozásában. A kén- vagy széntartalom növekedése csökkenti a bolygómag oxigén- és szilíciumtartalmát, különösen az oxigén koncentrációjára gyakorol jelentős hatást (Badro és mtsai., 2014). Ez a hatás különösen erőteljes lehet olyan bolygók esetében, amelyek fémek magja viszonylag magas kéntartalommal rendelkezik, és amelyek olyan protoplanetáris környezetben alakultak ki, amelyet a szoláris értéknél magasabb C/O arány, nagyobb széngyakoriság és a kisebb mértékű oxidáció jellemeztek.

#### *4.2.4. A C/O és a C/Si arány változásának hatása a kőzetbolygók ásványtani felépítésére*

Ha a protoplanetáris-korongban az átlagos C/O arány nem haladja meg a 0,8-as értéket, a keletkező teresztrikus bolygók köpenyét és kérgét

túlnyomórészt szilikátok és oxidok alkotják. Ezzel szemben a  $C/O > 1$  arányú protoplanetáris környezetben már szénben gazdag, magas hőmérsékleten kondenzálódó ásványok- például szilícium-karbid (SiC) és grafit-válnak dominánssá, így a bolygók ásványos összetétele is szénalapúvá alakul. Kuchner és Seager (2005) modellje szerint a magas  $C/O$  arányú bolygók (ún. „szénbolygók”) köpenye főként karbidásványokból, elsősorban szilícium-karbidból épülhet fel. Hakim és mtsai. (2019) egy olyan szénben gazdag bolygótípust vázoltak fel, amelynek belsejét vasban gazdag fémes mag, szilikátos köpeny és grafitból álló kéreg alkotja-utóbbi a domináns szénalapú ásványfázis. Allen-Sutter és mtsai. (2020) számításai alapján víz jelenlétében a szilícium-karbid 50 GPa nyomásig és 2500 K hőmérsékletig disszociálhat szilícium-dioxiddá (stishovit) és elemi szénre (gyémánt). E folyamat elsősorban a köpeny felsőbb régióiban jellemző; ugyanakkor a mélyebb rétegekben a SiC ismét nagy stabilitású lehet.

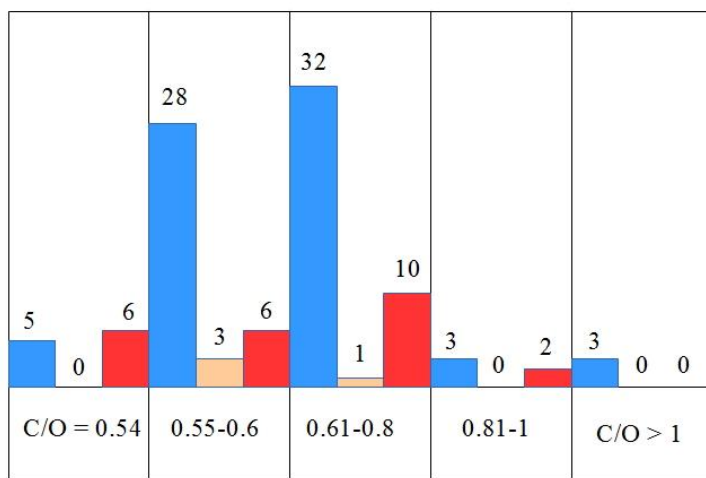
A jelen kutatás célja a 30 parszekes körzetben elhelyezkedő G-típusú csillagok C, O és Si elemgyakorisági adatainak vizsgálata volt, különös tekintettel a  $C/O$  és  $C/Si$  arányokra. A csillagokra jellemző elemgyakoriságok alapján következtetéseket lehet levonni az ilyen kémiai környezetben keletkező potenciális exobolygók ásványtani összetételére. A  $C/O$  arány növekedésével csökken az oxigén szerepe a szilikátképződésben, valamint egyre nagyobb széntöbblet keletkezik a szilíciumhoz képest. A karbonátfázisok is háttérbe szorulnak, így a karbidásványok-különösen a szilícium-karbid-és az elemi szénformák, például grafit és gyémánt, válnak domináns köpeny-és kéregásványokká.

G-csillagok Hypatia-katalógusból származó C, O és Si elemgyakorisági adataiból számított  $C/O$  és  $C/Si$  arányok felhasználásával a  $C/O$  arányok változásának függvényében elvégeztem a  $C/Si$  arányok változása mértékének leírására vonatkozó statisztikai elemzést.

Az összehasonlítás alapját a Napra jellemző  $C/O=0,54$  és  $C/Si=7,58578$  értékek képezték (Asplund és mtsai., 2005). A 175 csillag számított  $C/O$  arányai 0,18 és 1,31 közé esnek, s a mintában a C és Si elemgyakoriságok a legtöbb csillag esetében magasabbak a releváns szoláris gyakoriságoknál. A mintában 61 csillag mutatott a szolárisnál alacsonyabb, 104 pedig annál magasabb  $C/Si$  arányt (Futó és Gucsik, 2023b). A legalacsonyabb kimutatott  $C/Si$  arány 2,138, míg a legmagasabb 17,279 volt. A Nap 30 parszekes környezetében található G-típusú fősorozati csillagok domináns hányadára (75%) a szoláris értéket (7,58578) 127,78%-kal meghaladó  $C/Si$  arány jellemző.

A  $C/O>0,54$  tartományban-különösen a 0,55-0,6 és a 0,61-0,8 intervallumokban -a  $C/Si$  arány a legtöbb esetben magasabb a szoláris

aránynál, vagy az annál alacsonyabb sztelláris C/O arányokhoz képest. (6.ábra).



6. ábra. 99 G-típusú csillagra jellemző C/Si arány eloszlása a szoláris referenciaértékkel megegyező és annál magasabb C/O elemarány-tartományokban. Kék szín jelzi a szoláris C/Si aránynál magasabb, narancsszín az azzal megegyező és piros szín az annál alacsonyabb C/Si arányértékek számát (Futó és Gucsik 2023b).

Ez statisztikailag is alátámasztja, hogy a magasabb C/O arányú csillagokhoz gyakran magasabb C/Si arány társul. A 0,55-nél magasabb C/O tartományban a szuperszoláris C/Si arányok dominanciája másrészt arra utal, hogy az ilyen kémiai feltételek mellett keletkező kőzetbolygók köpenye szénben gazdagabb lehet a korábban gondoltnál. Ez azzal a következtetéssel jár, hogy az ilyen rendszerekben keletkező bolygók köpenyében a szilícium-karbid, grafit és gyémánt jelenléte valószínűbb és dominánsabb lehet, mint a szolárishoz hasonló C/Si arány esetén formálódó bolygók esetében. A C/O arány növekedése együtt jár azzal, hogy az oxidáció mértékének csökkenésével párhuzamosan a kőzetbolygók belsejében a szilikátokhoz képest fokozatosan nő a szilícium-karbid és fázisai, valamint a grafit és a gyémánt mennyisége. A C/Si arány növekedése ugyanakkor együtt jár a grafit és a gyémánt SiC-hez képesti aránynövekedésével is, mivel egyre nagyobb széntöbbslet keletkezik. A C/O és C/Si arányok emelkedésével nemcsak a széntartalmú ásványfázisok előfordulási valószínűsége nő, hanem a szénben gazdag bolygómagok relatív széntartalma is-ez elősegítheti fém-karbidok (pl. vas-karbidok) kialakulását a magban.

A kapcsolódó szakirodalom és a saját eredmények alapján arra következtetésre jutottam, hogy a Földhöz hasonló tömegű kőzetbolygók köpenyét a C/O arány függvényében változó arányban szilícium-karbid, szilikátok és oxidok építhetik fel. Megfelelően magas C/O arány esetében a szénbolygók kérgé is karbidokból és grafitból, vagy magas grafittartalmú kőzetekből épülhet fel, mely alatt gyémántréteg is kialakulhat. A szénben gazdag fémess bolygómagok nagy valószínűséggel számottevő mennyiségben tartalmaznak vas-karbidokat is.

Mivel a Nap galaktikus környezetében a magas C/O arányt ( $>1$ ) mutató csillagok száma alacsony, és az  $0,65 < C/O < 0,8$  tartományban lévő értékek is viszonylag ritkák, a legtöbb szénben gazdag bolygó valószínűleg továbbra is szilikát-domináns köpenyösszetétellel rendelkezik, és csupán kisebb mennyiségben tartalmaz szénalapú ásványokat.

A változó sztelláris C/O arányok a kőzetbolygók kéreg- és köpenyösszetételében jelentős ásványtani diverzitást eredményezhetnek. Egyes esetekben Allen-Sutter és mtsai. (2020) modellje alapján a szénben gazdag bolygók köpenyének alsó része főként szilícium-karbidból, míg felső tartománya szilícium-dioxidból és gyémántból épülhet fel. Az ilyen égitestekre a „karbidbolygó” elnevezés alkalmazható, mivel tömegük jelentős részét karbidásványok alkotják.

A szénbolygók egy kisebb populációja oxigénszegény belső összetétellel rendelkezhet, amely magas széntartalmú fémess mag, gyémántból álló köpeny és grafitból álló kéreg kialakulásához vezethet. Ezen extrém esetekben még a szilícium-karbid is csak kisebb mennyiségben fordul elő, a belső szférák döntően elemi szénből állnak.

A vizsgált mintában a legmagasabb számított C/O arány 1,31 volt. A 175 G-színképtípusú csillagból csupán három esetében haladta meg az arány az 1-et, míg öt csillag esetében a C/O értéke 0,8 és 1 közé esett. A szénben gazdag rendszerek így a teljes minta mindössze 4,57%-át tették ki. Az 1-nél jelentősen magasabb C/O arányú környezetek, amelyek szükségesek lehetnek elemi szénből álló-például főként grafit- és gyémántfázisú-bolygók kialakulásához, feltehetően a csillagok populációjának csupán töredékét érintik, valószínűleg 0,1% alatt maradva. Következésképpen az ilyen, elemi szén dominanciájával jellemezhető bolygók nemcsak a Nap galaktocentrikus távolságánál, hanem a Tejútrendszer más vidékein is ritkaságnak számítanak és valószínűleg még a legmagasabb C/O aránnyal leírható galaktikus tartományokban sem gyakori égitestek.

A C/O arány, a protoplanetáris korong kémiai viszonyai, a bolygó tömege és klimatikus jellemzői, valamint a központi csillagtól való távolság együttesen meghatározzák a szénben gazdag bolygótestek felépítését. A szilikátok,

karbidok és karbonátok mellett akár szénhidrogének és nem biológiai eredetű szerves molekulák is jelen lehetnek az ilyen bolygófelszíneken.

#### *4.2.5. A kalciumban és alumíniumban gazdag kőzetbolygók ásványtani összetételének lehetséges forgatókönyvei*

A szilárd felszínű bolygótesteket felépítő legfontosabb elemek közül az oxigén, a vas, a magnézium és a szilícium kozmikus gyakorisága jelentős mértékben meghaladja a kalcium és az alumínium mennyiségét. Így például a magnézium-szilikátok jóval gyakoribbak a csillagközi anyagban és a protoplanetáris környezetekben, mint a kalcium és az alumínium-szilikátok (Futó és mtsai. 2021a). Ennek ellenére a Ca- és Al-tartalmú ásványfázisok különösen fontos szerepet töltenek be a planetáris testek kéreg- és köpenyösszetételének alakításában.

A teresztrikus-típusú bolygók összetételében fontos szerepet betöltő kémiai elemek relatív gyakoriságainak változásai a protoplanetáris-korongokban a szolárisnál magasabb Ca/Si és Al/Si elemarányok mellett, olyan kémiai környezetek kialakulásához vezethetnek, amelyekben a keletkező kőzetbolygókban a Ca- és Al-tartalmú ásványok relatív aránya magasabb lehet.

A csillaghoz közeli, ún. magas hőmérsékletű kondenzációs zónában (High-Temperature Condensation Zone, HTC), amely a teresztrikus bolygók kialakulási zónájának (TPFZ) belső részén található, elsősorban magas kondenzációs hőmérsékletű ásványok- mint például Ca- és Al-gazdag fázisok -alakulnak ki. Ennek következtében az ilyen régiókban formálódó bolygók köpenyösszetétele eltérhet a csillagtól távolabb keletkezett bolygókétól, nagyobb részarányban tartalmaznak Ca-és Al-tartalmú ásványokat, mint a TPFZ csillagtól távolabbi régiók. A TPFZ távolabbi zónájában is lehet a kalcium és az alumínium relatív gyakorisága viszonylag magas a protoplanetáris-korong anyagában, ha az arra általánosan jellemző Ca/Si és Al/Si elemarányok a szoláris értéknél magasabbak. A HTC-zónában keletkezett bolygók szilikátos öve Ca-és Al-tartalmú ásványokban relatíve gazdagabb, mint a Naprendszer belső bolygóié, azonban vasban szegények, ami kis méretű, vagy akár teljesen hiányzó fémes mag kialakulását eredményezheti (Dorn és mtsai., 2019).

Elkins-Tanton és Seager (2008) két fő forgatókönyvet vázolt fel a fémes mag nélküli kőzetbolygók kialakulására: (1) a bolygó akkrécióját megelőzően teljes oxidáció ment végbe, így a fémes komponensek nem süllyedtek a középpontba a planetáris differenciáció során, vagy (2) a bolygó vasban gazdag, redukált anyagból, illetve vízben gazdag, oxidált anyagból állt össze. Ez utóbbi esetben a víz reakcióba lépett a fémes vassal, oxidációt és

hidrogénfelszabadulást okozva, ami gátolta a magképződést. Ha ez a reakció gyorsabban megy végbe, mint amennyi idő a fémes mag képződéséhez szükséges, akkor a fémtartalmú anyag nem fémes mag kialakulására fordítódik, hanem az oxidálódott vas a köpeny ásványtani összetételét fogja gyarapítani.

A HTC-zónában formálódott bolygók felső köpenyében olivin (ol), wadsleyit (wld), ringwoodit (rwd), valamint piroxének, gránátok és spinell fordulhatnak elő. A köpeny felső részében megnövekedhet a Ca- és Al-tartalmú piroxének és gránátok aránya, míg az olivin-fázisok aránya csökkenhet. A felső köpeny alsó régiójában a gránátos zóna ringwoodit-komponense fokozatosan  $MgSiO_3$ -perovszkit+magneziowüsztit (pv+mw) fázisba alakul, köztes átmenettel gránát + mw formációkon keresztül. A domináns gránátkomponensek között a pirop és a grosszulár ( $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ ) szerepelnek, míg a majorit és almandin csak kisebb mértékben fordulnak elő.

Összefoglalva, a csillaghoz közeli térségekben kialakuló, Ca- és Al-gazdag kőzetbolygók köpenyére spinellben gazdag, gránátos felső köpeny, valamint Al- és Ca-tartalmú  $MgSiO_3$ -perovszkitban és poszt-perovszkitban (ppv) gazdag alsó köpeny lehet jellemző a kalcium- és alumíniumtartalmú ásványfázisok ( $Al-CaSiO_3$ ,  $Mg(Ca)SiO_3$ ) relatíve magasabb arányával (Futó és Gucsik, 2024a) (7 A és 7 B ábra). A HTC-zónában formálódott bolygók esetében akár fémes mag nélküli, akár kis méretű fémes maggal rendelkező bolygóbelső is elképzelhető. Ez utóbbi esetben a köpeny vasban szegényebb lehet, mivel a vas nagyobb aránya a fémes magban koncentrálódik.

A bolygók kéregösszetételét a magmás tevékenységek mellett a kérget alkotó ásványok is befolyásolják. Kalciumban és alumíniumban gazdag bolygók kérgében valószínűleg gyakoriak az anortitot ( $CaAl_2Si_2O_8$ ) és albitot ( $NaAlSi_3O_8$ ) tartalmazó plagioklász-elegysor tagjai, valamint vasban szegény kémiai környezetben, magas nátriumtartalmú magmás melilitok is megjelenhetnek.

A sztelláris Mg/Si arány függvényében vizsgálva a Ca/Si és Al/Si arányokat, megállapítható, hogy a szolárisnál magasabb Mg/Si arányt mutató, igazolt bolygókkal rendelkező G- és F-típusú csillagok jellemzően magasabb Ca/Si és Al/Si arányt is mutatnak. Ez arra utal, hogy a Mg-gazdag kőzetbolygók köpenyében a Ca- és Al-tartalmú ásványfázisok-például a Földhöz képest-gyakoribbak lehetnek (Futó és Gucsik, 2024a).

A vizsgált mintában szereplő G-típusú csillagok esetében a szolárisnál (1,05) magasabb (1,06-1,48) Mg/Si elemarányal rendelkező G-típusú csillagok domináns hányadára (82,22 és 95,56 %-ára), a szolárisnál magasabb Ca/Si (és Al/Si) elemarányok jellemzőek. Hasonló tendencia figyelhető meg az F-típusú csillagoknál is, ahol a vizsgált populáció 65,9 és 47,73%-ára jellemző a szoláris értéket meghaladó Ca/Si és Al/Si arány. A szolárisnál magasabb Ca/Si arány a G-típusú csillagok esetében 0,065–0,098, míg az F-típusúaknál

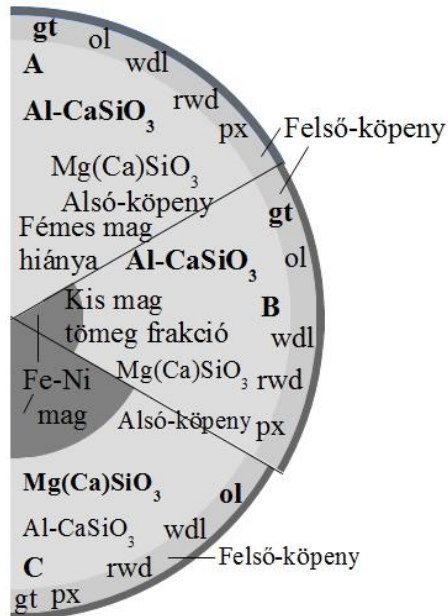
0,064–0,096 közötti értékeket mutat. Az Al/Si arány tekintetében a G-csillagok 0,074-0,11, míg az F-csillagok 0,074-0,166 közötti intervallumban helyezkednek el. Az eredményeink arra utalnak, hogy mindkét csillagtípus esetében a szolárisnál magasabb Mg/Si értékek esetén szuperszoláris Ca/Si és Al/Si arányok jellemzőek a populáció jelentős részére.

A Ca/Mg és Al/Mg elemarányok ugyancsak fontos paraméterek a köpeny és kéreg ásványi diverzitásának értelmezésében. A szoláris viszonyokra Asplund és mtsai. (2005) alapján számított Ca/Mg = 0,0603 és Al/Mg = 0,0692 értékekhez képest a vizsgált, 30 parszekes távolságon belüli F-típusú csillagok középértékei kissé magasabbak (Ca/M=0,0624; Al/Mg=0,8529), míg a G-típusú csillagoknál a Ca/Mg arány kissé alacsonyabb (0,0598), de az Al/Mg érték szintén magasabb (0,7565), mint a szoláris átlag.

A protoplanetáris korong csillagtól távolabbi zónáiban (0,5-1,5 Csillagászati Egység) kialakuló bolygók anyagába már több vas épülhet be, mint a nagyon kis periódusú bolygópályák esetén. A magas magnéziumgyakoriságú exo-kőzetbolygók szignifikáns hányada bazaltos kéreggel rendelkezhet. TPFZ középső régióiban keletkező, a szolárisnál magasabb Mg/Si arányú környezetekben a kéregalkotó ásványok-különösen a melilitvas-és nátriumtartalma is jelentősebb lehet. Az ilyen bolygótestek kéregösszetételében a melilit elegysor komponensei közé tartozhat például a ferri-gehlenit ( $\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{AlSiO}_7$ ) és az alumo-akermanit  $(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Si}_2\text{O}_7)$ .

Laboratóriumi kísérletek (Takafuji és mtsai., 2002) kimutatták, hogy 25 GPa nyomáson és 1600 K hőmérsékleten a grosszulár-gránát Al-tartalmú kalcium-perovszkittá ( $\text{Al-CaSiO}_3$ ) és  $\text{Al}_2\text{SiO}_3$ -á alakulhat, amely nemcsak a földköpenyben (Kurashina és mtsai., 2004), hanem a Ca- és Al-gazdag kőzetbolygók alsó köpenyében is fontos ásványi komponens lehet (7. ábra).

A HTC-régióban formálódott Ca-Al-gazdag exo-kőzetbolygók köpenyének ásványtani összetétele sok tekintetben hasonló lehet a TPFZ távolabbi zónáiban szolárisnál magasabb Ca-és Al-tartalmú kémiai környezetben kialakult bolygókhoz. A kutatómunka során végzett statisztikai elemzések alapján ezen bolygók többsége magas Mg/Si arány mellett keletkezhetett. A magas magnéziumgyakoriságú rendszerekben keletkezett Ca- és Al-gazdag kőzetbolygók alsó köpenyének fontos ásványi komponense lehet nemcsak az  $\text{Al-CaSiO}_3$ , hanem a  $\text{Mg}(\text{Ca})\text{SiO}_3$  is.



7. ábra. Vasmag nélküli (A) és vasmaggal (B) rendelkező, relatíve magas Al- és Ca-tartalmú bolygók plauzibilis ásványi összetételének sematikus ábrázolása. A C jelzésű kalciumban és alumíniumban gazdag egy földtömegű bolygó magas Mg/Si arányú protoplanetáris-korongban keletkezett. (px=piroxén; rwd=ringwoodit; wld=wadsleyit; ol=olivin) (Futó és Gucsik 2024 a).

#### 4.2.6. A szolárisnál magasabb O/Si arány előfordulása alacsony C/O arányú csillagok környezetében.

A C/O, Mg/Si és Fe/Si arányok kulcsszerepet játszanak a kőzetbolygók keletkezéséhez szükséges anyagok ásványtani összetételének meghatározásában. A Naphoz és más, alacsony C/O arányú csillagokhoz tartozó bolygórendszerekben a teresztrikus típusú bolygók kérgét és köpenyét szilikát- és oxidfázisok dominanciája jellemzi, ami oxigénben gazdag ásványi felépítésre utal.

A C/O arány mellett az O/Si arány is jelentős befolyással bír a bolygókeletkezési anyag ásványi összetételére, valamint a planetáris akkréció és későbbi evolúció során kialakuló ásványfázisokra. Asplund és mtsai. (2005) alapján a Napra jellemző szoláris O/Si arány értéke 14,125. A csillagok és a körülöttük kialakuló bolygók O/Si aránya azonban a kondenzációs környezet

kémiai feltételeitől és az akkréció utáni fejlődési folyamatoktól függően jelentősen eltérhet a szoláris értéktől.

Míg az Mg/Si arány többnyire a bolygóösszetevők elsődleges kondenzációs viszonyait tükrözi, addig az O/Si arányra a bolygótetek evolúciója, valamint az impaktorokkal szállított víz mennyisége is hatással lehet. A víztartalom, valamint az ezzel összefüggő oxidációs folyamatok jelentősen módosíthatják az O/Si arányt, különösen a BSP (Bulk Silicate Planet) fejlődésének korai szakaszában. Ez közvetlenül befolyásolja a szilikát- és oxidásványok relatív gyakoriságát a köpenyben és a kéregben.

A 30 parszek távolságon belüli G- és F-típusú csillagokra vonatkozó számításaim szerint az O/Si arány a legtöbb esetben G-csillagok:79,66%; F-csillagok:97,1%) meghaladja a szoláris értéket, különösen azoknál a csillagoknál, amelyek Mg/Si aránya is szoláris feletti.

A G-típusú csillagokra számított átlagos O/Si arány 16,26, amely kismértékben haladja meg a Napra jellemző értéket. Az F-típusú csillagok esetében az O/Si arány átlaga 22,586, ami jóval nagyobb, mint a szoláris referenciaérték (Futó és Gucsik, 2024b). Az adatok arra utalnak, hogy az alacsony C/O arányú csillagok többségéhez tartozó bolygók ásványi összetételében nagyobb mennyiségben lehetnek jelen a szilíciumhoz képest gazdag oxigéntartalmú fázisok.

A 30 parszekes galaktikus környezet potenciális kőzetbolygó-populációjának jelentős része olyan csillagok körül található, amelyek C/O aránya 0,5 alatti. E bolygók többsége gazdagabb lehet magas Mg- és O- és a kalciumgyakoriság függvényében Ca-tartalmú ásványokban—például: MgO<sub>2</sub> (Lobanov és mtsai. 2015) és CaO<sub>2</sub> (Nelson és mtsai. 2015), s különösen olivinben gazdag felső-köpennyel rendelkezhet. A köpeny ásványos összetételét ezekben az esetekben az adott bolygórendszerre, valamint a teljes szilikát bolygótestre (Bulk Silicate Planet, BSP) jellemző Mg/Si és Ca/Si arányok szabják meg.

A kőzetbolygók geodinamikai folyamatait, különösen a köpeny-konvekció hatékonyságát nagymértékben befolyásolja a köpenyanyag viszkozitása. A szilikátos köpeny reológiai tulajdonságai-és ezzel a köpeny viszkozitása-jelentős mértékben függenek az azt alkotó ásványfázisoktól. A köpeny felső és alsó övének viszkozitása közötti különbség, az ún. viszkozitás-kontraszt, például a Földhöz hasonló összetételű bolygók esetében a (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub> bridgmanit és a (Mg,Fe)O ferroperiklász arányától is függ.

#### ***4.3 A sztelláris Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok változékonysága és a potenciális kőzetbolygók feltételezhető ásványtani összetétele a Nap 50 parszek sugarú galaktikus környezetében***

A C/O, Mg/Si és Fe/Si elemarányok mellett a Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányok is kiemelkedően fontos szerepet játszanak a kőzetbolygók köpenyének és kérgének ásványi összetétele szempontjából. E három utóbbi arány különösen jelentős az ásványtani felépítés változatosságának meghatározásában, mivel alapvetően befolyásolják a fő felépítő fázisok mellett a kisebb mennyiségben kialakuló ásványfázisok típusát és mennyiségi arányait is.

Az exo-kőzetbolygókban a szén, oxigén, vas, magnézium és szilícium elemek relatív gyakoriságai különböző mértékben eltérhetnek a Naprendszer Föld-típusú bolygóira jellemző értékektől. Ennek ellenére az ilyen típusú bolygók – amennyiben nem tartalmaznak jelentős mennyiségű vizet, illetve nem rendelkeznek vastag légkörrel – teljes tömegük több mint 95%-át általában ez az öt elem alkotja. A sztelláris fémesség (metallicitás) széles spektrumán keletkező csillagok esetében a teresztrikus bolygókat felépítő főbb elemek gyakorisági eloszlásának változatossága arra utal, hogy a Nap galaktikus környezetében található kőzetbolygó-populációt magas fokú ásványtani diverzitás jellemzi. Ez a kémiai sokféleség jelentős hatással lehet az adott bolygók geológiai fejlődésére, belső szerkezetére és potenciálisan lakhatósági tulajdonságaikra is.

#### *4.3.1. A sztelláris elemarányok eloszlása a teljes vizsgált C/O aránytartományban*

Az elemgyakoriságok alapján számított sztelláris elemarányok vizsgált tartománya a G színképtípusú csillagok esetében a  $0 < C/O < 1,31$ , míg az F típusú csillagok esetében a  $0 < C/O < 1,18$  intervallumot fedi le. A kutatás adatbázisa ezen C/O aránytartományokon belül 512 G- és 258 F színképtípusú csillag C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányait tartalmazza. Az Fe/Si arányok számított értékei 501 G-, illetve 258 F típusú csillag esetében állnak rendelkezésre.

Az elemarányok eloszlásának vizsgálata azt mutatja, hogy a G színképtípusú csillagok többségére a szoláris értéknél alacsonyabb C/O arány, valamint jellemzően magasabb Mg/Si arány a meghatározó. Emellett a G típusú csillagok Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányai szintén a legtöbb esetben meghaladják a Napra jellemző értékeket. Az F színképtípusú csillagok esetében a minta többségére ugyancsak a szoláris átlagnál alacsonyabb C/O arány jellemző, és ezek között is túlsúlyban vannak azok az objektumok, amelyek Mg/Si aránya magasabb a Napénál (8.a és 8.b ábra).

	C/O	Mg/Si	Ca/Si	2.04	Na/Si	Fe/Si
-1.5	1.31	1.89	0.15	0.2	0.15	1.48
-1		1.124	0.1	0.15	0.12	1
		1.05	0.098	0.1	0.1	0.87
	0.54	0.73	0.064	0.081678	0.05363	0.84074
-0.5	0.531		0.05	0.0724	0.05	0.5
			0.043	0.05	0.0457	0.48
				0.049		
	0.12				0.032	

8. a ábra. C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, és Fe/Si (szürke vonal) elemarányok átlagai a teljes G-színképtípusú csillagmintában. A fekete vonal a szoláris referenciaértéket, a szürke vonal az elemarány átlagát jelöli. A sztelláris átlagokhoz kapcsolódó szóródás a forrásadatokban rejlő bizonytalanságból adódik (Futó és Gucsik 2025b).

	C/O	Mg/Si	Ca/Si	2.04	Na/Si	Fe/Si
-1.5	1.18	1.66	0.15	0.2	0.15	1.33
-1		1.093	0.116	0.15	0.1	1
		1.05	0.1	0.1	0.093	0.87
	0.54		0.0668	0.0724	0.052875	0.84
-0.5	0.458		0.0631	0.071255	0.05	0.51
			0.05	0.05	0.0457	0.5
			0.038	0.05		
	0.11	0.33		0.037	0.029	

8. b ábra. C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, és Fe/Si (szürke vonal) elemarányok átlagai a teljes F-színképtípusú csillagmintában. A fekete vonal a szoláris referenciaértéket, a szürke vonal az elemarány átlagát jelöli. A sztelláris átlagokhoz kapcsolódó szóródás szintén jelölve van (Futó és Gucsik 2025a).

6. táblázat Az egyes elemarányok eloszlásához (8.a és b ábra) tartozó szórásértékek relatíve alacsony értékei: a teljes C/O spektrum G- és F-színképtípusú csillagainak mintáiban. Forrás: saját készítésű táblázat.

Szórás	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
G-csillagok	0,146	0,143	0,027	0,012	0,01	0,119
F-csillagok	0,1429	0,18	0,0102	0,0218	0,0106	0,12

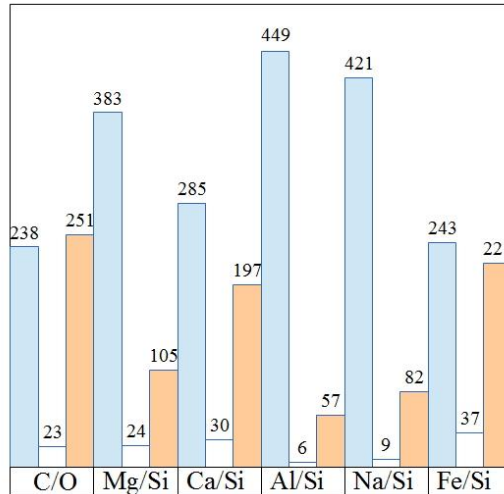
Az elemarány átlagok többségében a szórásértékek 1 alatti, a nullához közelítő nagysága (6.táblázat) jól tükrözi az elemarányoknak az átlagérték közelébe történő csoportosulását. E koncentrált eloszlás hozzájárul ahhoz, hogy az átlagértékek statisztikailag megbízhatóbb alapot nyújtsanak a szoláris referenciaértékek előfordulási gyakoriságának becsléséhez.

A G típusú csillagok esetében a Ca, Al és Na elemek sztelláris gyakorisága többnyire magasabb, mint a szoláris referenciaérték. Az F típusú csillagok esetében e három elem közül csak az alumínium gyakorisága mutat alacsonyabb értékeket a csillagok többségénél, míg a kalcium- és nátriumgyakoriság már magasabb a Naphoz viszonyítva.

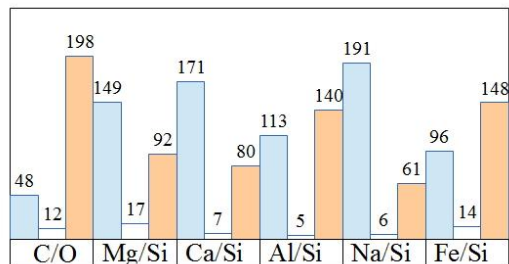
A potenciálisan magnéziumban szegény (bulk silicate planet, BSP,  $Mg/Si < 1$ ) Föld-típusú kőzetbolygók alsó köpenyének ásványi összetétele elsősorban  $MgSiO_3$  (perovszkit/poszt-perovszkit),  $MgO$ , valamint  $CaSiO_3$  (perovszkit/poszt-perovszkit) és  $SiO_2$  fázisokból állhat. Rendkívül alacsony  $Mg/Si$  arány esetén (BSP  $Mg/Si < 0,5$ ) az alsó köpeny domináns összetevői nagy valószínűséggel  $MgSiO_3$  (pv/ppv),  $SiO_2$  és  $CaSiO_3$  (pv/ppv) lehetnek.

Az eredmények alapján a legtöbb vizsgált G- és F-típusú csillag esetében a szoláris értékhez képest magasabb Ca/Si arány jellemző. Ennek következtében a szuperszoláris  $Mg/Si$  arányú csillagok körül kialakuló potenciális bolygók alsó köpenyében várhatóan kissé magasabb mennyiségben fordul elő  $CaSiO_3$  perovszkit (pv) és poszt-perovszkit (ppv) fázis, mint a szubszoláris  $Mg/Si$  arányú rendszerekben. A magnéziumban szegény G-típusú csillagok domináns frakciójához köthető kőzetbolygók felső köpenyének ásványi összetételét nagy valószínűséggel gránátfázisok, diopszid és  $SiO_2$  alkotják, az egyes ásványi komponensek alumíniumtartalma pedig feltehetően enyhén alacsonyabb a szoláris viszonyokhoz képest.

A G- és F-típusú csillagok esetében a szolárisnál magasabb, azzal megegyező, illetve annál alacsonyabb elemarány-értékek eloszlásának vizsgálata alapján megállapítható, hogy a szolárisnál alacsonyabb C/O, valamint a szolárisnál magasabb  $Mg/Si$  arányú csillagok domináns hányadára jellemzően a Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányok átlagai is meghaladják a szoláris referenciaértéket.



9. a ábra. A G-típusú csillagok száma a teljes vizsgált mintában a hat elemarány szuperszoláris (kék oszlop), a Napéval azonos (üres oszlop), valamint a szubszoláris (narancssárga oszlop) tartományaiban. Forrás: Futó és Gucsik 2025 a.



9. b ábra. Az F-típusú csillagok száma a teljes vizsgált mintában a hat elemarány szuperszoláris (kék oszlop), a Napéval azonos (üres oszlop), valamint a szubszoláris (narancssárga oszlop) tartományaiban. Forrás: Futó és Gucsik 2025 a.

A 9a és 9b ábra a G- és F-típusú csillagmintákban vizsgált hat elemarány szuperszoláris, a Napéval azonos, valamint szubszoláris értékeinek számosságát szemlélteti. Az így kapott eloszlások az esetek döntő többségében szintén arra utalnak, hogy a szubszoláris C/O és szuperszoláris Mg/Si arányokkal rendelkező G- és F-típusú csillagok többsége a Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemhányadosok tekintetében a megfelelő szoláris értékeket meghaladó értékeket mutat. A vizsgált hat elemhányados Napra jellemző együttese nem

illeszkedik az elemzett csillagoknál megfigyelt gyakori mintázatokhoz; ennek megfelelően a Nap hat elemarányból álló mintázata atipikusnak tekinthető a Nap környezetének 50 pc-es sugarú térfogatában található G- és F-típusú csillagpopulációra nézve.

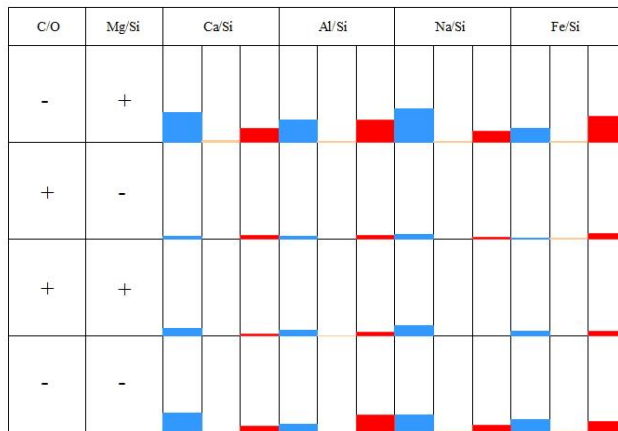
A teljes minták vizsgálata alapján megállapítható, hogy a G- és F-színképtípusú fősorozati csillagok döntő többségére az elemzett elemarányoktól függően 55,66-87,98%-os gyakorisággal a szoláris értékeket meghaladó C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, valamint Fe/Si arányok jellemzőek (7. táblázat). Ettől a tendenciától kivételt képeznek a G-típusú csillagok esetében a szuperszoláris C/O és Fe/Si arányok, illetve az F-típusú csillagok esetében a szuperszoláris Al/Si és Fe/Si arányok, amelyek előfordulási gyakorisága alacsonyabb, 37,21-48,5% közötti értékeket mutat.

*7. táblázat. A Naptól számított 50 parszekes távolságon belül található G- és F-színképtípusú csillagokra jellemző, a szoláris értéknél alacsonyabb, azzal megegyező, illetve azt meghaladó releváns elemarányok (pl. C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, Fe/Si) relatív gyakorisági eloszlása. Forrás: saját készítésű táblázat.*

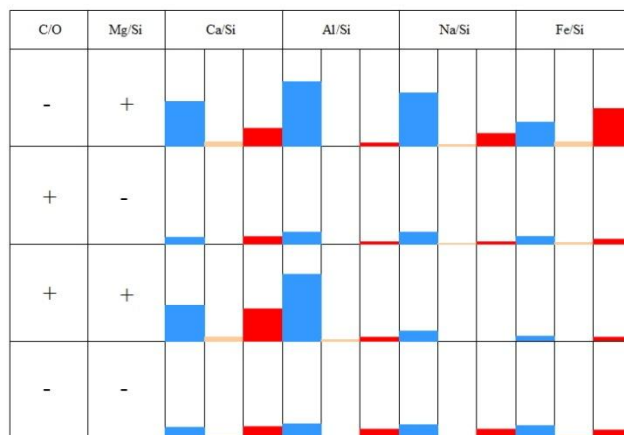
<b>G-csillagok</b>	<b>C/O</b>	<b>Mg/Si</b>	<b>Ca/Si</b>	<b>Al/Si</b>	<b>Na/Si</b>	<b>Fe/Si</b>
Szubszoláris	49%	20,5	38,48	11,3	16,02	44,1
Szolárisal azonos	4,5	4,7	5,86	1,17	1,76	7,4
Szuperszoláris	46,5	74,8	55,66	87,7	82,22	48,5
<b>F-csillagok</b>	<b>C/O</b>	<b>Mg/Si</b>	<b>Ca/Si</b>	<b>Al/Si</b>	<b>Na/Si</b>	<b>Fe/Si</b>
Szubszoláris	7,36	35,66	31,01	54,26	23,64	57,36
Szolárisal azonos	4,66	6,59	2,71	1,94	2,33	5,43
Szuperszoláris	87,98	57,75	66,28	43,8	74,03	37,21

Az eredmények alapján a viszonylag nagy számban előforduló, magas Mg/Si arányt mutató G színképtípusú csillagok körül kialakuló kőzetbolygók felső köpenyének ásványtani összetétele várhatóan magnéziumban és alumíniumban gazdag fázisokból -például olivinből, ferroperekilászból és spinellből- áll. E bolygók alsó köpenyében a ferroperekilász és a CaSiO<sub>3</sub> (perovszkit/poszt-perovszkit) aránya magasabb lehet az MgSiO<sub>3</sub> (pv/ppv) fázishoz viszonyítva. A szolárisnál magasabb Al/Si arány különösen azoknál a G típusú csillagoknál figyelhető meg, amelyek alacsonyabb C/O és magasabb Mg/Si aránnyal (-C/O; +Mg/Si), illetve egyaránt magasabb C/O és Mg/Si aránnyal (+C/O; +Mg/Si) rendelkeznek. Ez arra utal, hogy a Nap galaktikus szomszédságában a potenciális kőzetbolygók többsége esetében az alumíniumtartalmú ásványok aránynövekedése a legnagyobb lehet, a kalcium, illetve nátriumtartalmú ásványokhoz viszonyítva. Ezzel szemben az F típusú csillagok esetében ugyanezen elemarány-tartományokban (-C/O; +Mg/Si) és

(+C/O; +Mg/Si)) elsősorban a Ca/Si és Na/Si arányok emelkedése figyelhető meg (lásd 8. ábra). Ez alapján valószínűsíthető, hogy az F típusú csillagok körül keletkezett kőzetbolygók jelentős hányadánál a kéreg és a felső köpeny ásványi összetételében a kalcium- és nátriumtartalmú fázisok, valamint az alsó köpeny  $\text{CaSiO}_3$  (pv/ppv) komponenseinek gyakoribb előfordulása a meghatározó. Mindkét csillagtípus esetében a Fe/Si arány eloszlása változatos képet mutat a különböző (C/O; Mg/Si) kombinációkban. A Fe/Si arány átlagértéke a (-C/O; +Mg/Si) tartományban általában kissé a szoláris érték alatt marad, mind a G-, mind az F-típusú csillagminták esetében. A G- és F-típusú csillagok túlnyomó része a (-C/O; +Mg/Si) elemarány-tartományba esik, amelyben a szolárisnál magasabb elemarányok (Ca/Si, Al/Si, Na/Si, Fe/Si) előfordulási gyakorisága mindkét spektráltípus esetében meghaladja a szolárisnál alacsonyabb értékek számát. E jelenség a 10. és 11. ábrákon szemléletesen követhető.



10. ábra. G-színképtípusú csillagok. Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemarányok a -C/O, +Mg/Si; +C/O; -Mg/Si; +C/O; +Mg/Si and -C/O; -Mg/Si tartományokban. A - és + jelek a szub- illetve szuperszoláris tartományt jelentik. A kék oszlopok jelölik a szuperszoláris, rózsaszín a szolárisal egyenértékű, míg piros a szolárisnál alacsonyabb elemarány átlagértékeket. (Futó és Gucsik 2025a).



11. ábra. F-színképtípusú csillagok. Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemarányok a -C/O, +Mg/Si; +C/O; -Mg/Si; +C/O; +Mg/Si and -C/O; -Mg/Si tartományokban. A – és + jelek a szub- illetve szuperszoláris tartományt jelentik. A kék oszlopok jelölik a szuperszoláris, rózsaszín a szolárisal egyenértékű, míg piros a szolárisnál alacsonyabb elemarány átlagértékeket. (Futó és Gucsik 2025a).

A kapott sztelláris elemarány-eloszlások alapján arra lehet következtetni, hogy a Nap galaktikus szomszédságában található potenciális bolygórendszerekben a leggyakrabban olyan Föld-típusú kőzetbolygók fordulhatnak elő-a Földénél kissé kisebb vagy nagyobb tömegűek között-, amelyek bazaltos kéreggel, valamint olivin- és piroxéntartalmú felső köpennyel rendelkeznek. Ezek alsó köpenyét várhatóan nagy mennyiségű ferroperekliász mellett elsősorban MgSiO<sub>3</sub> perovszkit és posztperovszkit (pv/ppv) fázisok építik fel, hasonlóan a Föld belső felépítéséhez.

A teresztrikus bolygók fémes magjának kialakulása több, egymással összefüggő tényező együttes hatásának eredménye. Fontos tényező a bolygó keletkezésének helye a protoplanetáris korongon belül, mivel a kondenzációs feltételek-így a fémes és szilikátos komponensek szétválása-erősen függenek a csillagtól való távolságtól. Mivel a bolygómagok méretét meghatározó folyamatok több paraméter együttes függvényeként alakulnak ki, a sztelláris vasgyakoriság önmagában nem elegendő a fémes magok relatív méretének megbízható előrejelzésére. Ugyanakkor a sztelláris Fe/Si arány fontos szabályozó szerepet tölt be abban, hogy a szilíciumhoz képest mennyi vas épülhet be a bolygótetekbe, mivel ez az arány alapvetően meghatározza a protoplanetáris korong kémiai összetételét, és ezáltal a fémes bolygómagok kialakulásának kémiai feltételeit is.

A G- és F-színképtípusú csillagok esetében megfigyelt, a szolárisnál alacsonyabb Fe/Si aránygyakoriság arra utal, hogy a Nap közvetlen, 50 parszek sugarú galaktikus környezetében a Föld- vagy Vénusz-típusú, közepes vagy kisebb mag-tömegfrakcióval rendelkező kőzetbolygók lehetnek a leggyakoribbak.

#### *4.3.2. Az elemarányok eloszlása a C/O <0.65 tartományban*

A C/O elemarányok 0.65-nél kisebb tartományába a teljes vizsgált C/O spektrum adatait tartalmazó mintából 403 G-, illetve 244 F-spektrál típusú csillag Mg/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarány értékei tartoznak. Emellett még a kutatás ezen szakaszában vizsgált 0,65 C/O értéknél kisebb tartomány 391 G-, és 244 F-csillag Fe/Si arány adatait foglalja magában.

A C/O elemarány 0,65 alatti tartományához a teljes, vizsgált C/O spektrumot lefedő mintából 403 G-, illetve 244 F-színképtípusú csillag Mg/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarány-adatai tartoznak. Emellett még a kutatás jelen szakaszában elemzett, C/O <0,65 tartományhoz 391 G- és 244 F-típusú csillag Fe/Si arányadatai is hozzátartoznak.

A Naprendszerre jellemző, átlagosan 0,54-es C/O arány a 0,65 alatti C/O tartományba esik, amely a teljes C/O spektrumon belül a G színképtípusú csillagok 78,7%-át, valamint az F típusú csillagok 94,57%-át foglalja magában. 91 G-, illetve 55 F típusú csillag tartozik az 1,00-1,10 közötti Mg/Si arányt mutató kategóriába. A legnagyobb elemszámot azonban az 1,11-1,30 tartomány képviseli: 187 G- és 83 F-típusú csillag sorolható ide. Az 1,31-1,50 közötti Mg/Si arány esetében 42 G- és 22 F-típusú csillag adatát tartalmazza a minta. Az 1,5 feletti Mg/Si arány viszont már csupán 13 G- és 4 F-típusú csillag esetében figyelhető meg. Az eloszlás alapján megállapítható, hogy az Mg/Si arányok eloszlása hasonló mintázatot mutat a G- és F típusú csillagok között. A magnéziumban enyhén gazdag (Mg/Si>1,1) csillagok jelentősen nagyobb arányban fordulnak elő, mint a magnéziumban szegény (Mg/Si <1,1), vagy a kimondottan magnéziumban gazdag (Mg/Si>1,5) csillagok. Mind a teljes C/O spektrumon, mind a C/O<0,65 alatti tartományban, a G- és F típusú csillagok Mg/Si arányainak középértéke meghaladja a szoláris értéket.

Az eredmények azt mutatják, hogy a Naprendszerre jellemző, átlagosan 1,05-ös Mg/Si arány nemcsak a teljes C/O spektrum esetében számít nem tipikusnak, hanem a 0,65 alatti C/O értékű csillagokat vizsgálva sem tekinthető gyakori előfordulásának.

#### 4.3.3. A C/O elemarányok eloszlása a 0,5 alatti tartományban

A bolygók belső felépítése szempontjából meghatározó sztelláris elemarányok eloszlásának vizsgálatát a következő szakaszban a C/O arány 0,5 alatti tartományára terjesztettem ki. 0,5 alatti C/O arány esetén egy bolygórendszerben a szénatomok relatív gyakorisága már az oxigénatomok relatív gyakoriságának a felét sem éri el, így az ilyen rendszert a vízmolekulák szén-dioxid és szén-monoxid molekulákkal szembeni dominanciája jellemzi.

A szoláris C/O elemarány moláris értéke 0,54 (Asplund és mtsai., 2005), amely így a vizsgált 0,5 alatti tartományon kívül esik, de a szén–oxigén arány vizsgálata szempontjából fontos referenciaértékként szolgál. Korábbi kutatások alapján a 0,65-nél magasabb C/O arányú csillagok környezetében a csillaghoz közelebb eső régiókban már szénben gazdag összetételű bolygók kialakulása is lehetséges (Moriarty és mtsai. 2014).

A G színképtípusú csillagok közül 203 esetben tapasztaltam 0,5-nél alacsonyabb C/O arányt, ami a teljes C/O spektrumra számított G-típusú értékeknek (512) mintegy 39,6 %át teszi ki. Az F színképtípusú csillagok esetében 180 csillag mutatott C/O <0,5 értéket, ami a teljes spektrumban vizsgált F-típusú csillagok számának (258) 69,7%-át jelenti.

Az eredmények arra utalnak, hogy az oxigénben és vízben gazdag protoplanetáris korongokban keletkezett kőzetbolygók száma valószínűsíthetően nagyobb, mint a viszonylag magas C/O arányú bolygóképződési környezetekben. Alacsony C/O arány esetén az oxigén nagyobb hányada épül be vízmolekulák formájában, míg magas C/O arány mellett az oxigén jelentősebb részben szén-monoxid (CO) molekulákba integrálódik, ezáltal csökkentve a víz formájában megkötött oxigén mennyiségét. A C/O arány eloszlásának vizsgálata alapján megállapítható, hogy az oxigénben és vízben gazdag ásványfázisokat tartalmazó kőzetbolygók nagyobb gyakorisággal alakulhatnak ki G- és F-típusú csillagok környezetében, különösen a teresztrikus bolygók keletkezési zónájában, mint a szénben gazdag kőzetbolygók.

Alacsony C/O arány mellett a kialakuló bolygók felső köpenyében jellemzően domináns ásványfázisként jelenhet meg az olivin, valamint annak magasabb nyomáson stabil fázisai. Az alsó köpenyben a ferroperekliász mennyisége szintén összefüggésbe hozható a kiindulási protoplanetáris korong C/O arányával. Magasabb ferroperekliász-tartalom esetén, megfelelő fizikai körülmények mellett, további oxigénben gazdag ásványfázisok is kialakulhatnak. Ezen fázisok mennyisége függ a bolygórendszerekre általánosan, valamint a BSP-re (Bulk Silicate Planet) specifikusan jellemző C/O, Mg/Si és Ca/Si elemarányoktól.

Az oxigénben gazdag ásványfázisok közül a magnézium- és kalcium-peroxidok ( $MgO_2$ ,  $CaO_2$ ) előfordulhatnak Föld-méretű kőzetbolygók és

szuper-Földek köpenyének mélyebb régióiban, amennyiben az ásványi környezet megfelelően magas az oxigéntartalma (Lobanov és mtsai., 2015; Nelson és mtsai., 2015). A statisztikai elemzések alapján a magas Mg/Si arányú teresztrikus bolygók köpenyében ezen peroxidfázisok jelenléte gyakori lehet, mivel az ilyen bolygórendszerekben gyakran alacsony C/O arány is megfigyelhető (Futó, 2021b).

A gyakorisági eloszlás alapján a Nap közvetlen, mintegy 50 parseces galaktikus környezetében található vékony korongbeli G- és F-típusú csillagok szignifikáns frakciója körül olyan kőzetbolygók is kialakulhattak, amelyek ásványtani összetétele a bolygórendszer relatíve magas Mg/Si és alacsony C/O arányai által meghatározott kémiai feltételek következtében tér el a Naprendszer kőzetbolygóinak jellemzőitől. E csillagok környezetében kialakult potenciális teresztrikus bolygók kéreg- és köpenyösszetételét jelentős mértékben meghatározhatják a magnéziumban gazdag ásványfázisok, és ezek mellett a Naprendszerbeli megfelelőikhez képest – nagyobb mennyiségben lehetnek jelen oxigénben gazdag ásványfázisok is, mint például a magnézium- és kalcium-peroxid ( $MgO_2$ ;  $CaO_2$ ).

Továbbá, figyelembe véve az alacsony C/O arány következtében kialakuló kémiai körülményeket, a magnéziumban gazdag kőzetbolygók jelentős hányadának a vízkészlete potenciálisan nagyobb lehet, mint azoké a bolygóké, amelyek alacsonyabb Mg/Si és magasabb C/O arányú rendszerekben jöttek létre.

A relatíve magas sztelláris Mg/Si arány mellett nagyobb valószínűséggel alakulnak ki a csillagok körül bolygók, mint alacsony Mg/Si arány esetén. Következésképpen az elemgyakoriságon alapuló analízis eredményei alapján nagy valószínűséggel kijelenthető, hogy mind a teljes C/O arányt lefedő mintában, mind pedig a kifejezetten alacsony ( $C/O < 0,5$ ) arányú G- és F-spektráltípusú csillagok jelentős hányada körül keletkezettek teresztrikus típusú bolygók. Ez az eredmény összhangban áll a már megerősített exobolygók felfedezésére irányuló statisztikai vizsgálatokkal.

#### *4.3.4. A bolygóval rendelkező csillagok sztelláris elemarányainak eloszlása*

A kutatás eddigi szakaszaiban a hat vizsgált elemarány gyakorisági eloszlásának elemzése a teljes C/O spektrumon belül olyan G- és F-spektráltípusú csillagokra terjedt ki, amelyek kis hányadához a NASA Exobolygó Archívumában (NASA Exoplanet Archive) 2023. október 15-ig elérhető adatok alapján – megerősített bolygókísérő tartozik.

A G-színképtípusú csillagokat tartalmazó, összesen 512 objektumot magában foglaló mintából 79 esetben igazolt bolygó létezése. E bolygós G-

csillagok sztelláris C/O arányai 0,17 és 0,80 között változnak; közülük 60 csillag esetében a C/O arány 0,65 alatti értéket mutat.

Az F-spektráltípusú csillagokat reprezentáló, 258 csillagból álló mintában 13 olyan csillag található, amelyekhez megerősített exobolygó felfedezése kapcsolódik. E csillagok C/O aránya 0,35 és 0,58 közötti tartományban helyezkedik el. Az exobolygó-adatbázis alapján ezekben az esetekben valamennyi bolygókísérő a Jupiterhez hasonló gázóriás típusú planéta.

A bolygóval rendelkező G-spektráltípusú csillagok túlnyomó többsége szintén Jupiter-típusú gázbolygót hordoz, ugyanakkor kisebb arányban előfordulnak a Neptunusz tömegkategóriájába ( $10 M_{\oplus} < M_p < 30 M_{\oplus}$ ) eső bolygók, valamint a szuper-Föld típusú ( $< 10 M_{\oplus}$ ) planéták is. A 79 bolygós G-csillag közül 58 esetben Jupiter-tömegű vagy annál nagyobb bolygót ( $M_p \geq 30 M_{\oplus}$ ), 12 esetben Neptunusz-tömegű bolygót, míg 9 csillag körül szuper-Föld tömegkategóriába sorolható bolygót azonosítottak. Az F-színképtípusú, bolygóval rendelkező 13 csillag mindegyikénél gázóriás bolygó jelenléte igazolt.

Fontos megjegyezni, hogy e rendszerekben a jelenlegi detektálási korlátok miatt akár több, még felfedezésre váró, köztük teresztrikus típusú bolygó is létezhet. Ebből adódóan a kutatás jelenlegi szakaszában, az elérhető exobolygó-adatok korlátozott volta miatt, az elemarány-eloszlások vizsgálata nem végezhető el kizárólag olyan csillagokra vonatkozóan, amelyek körül teresztrikus bolygót azonosítottak. Ennek megfelelően a kapott eredmények a G- és F-spektráltípusú csillagok mintájában valamennyi bolygótípusra általánosan vonatkoznak.

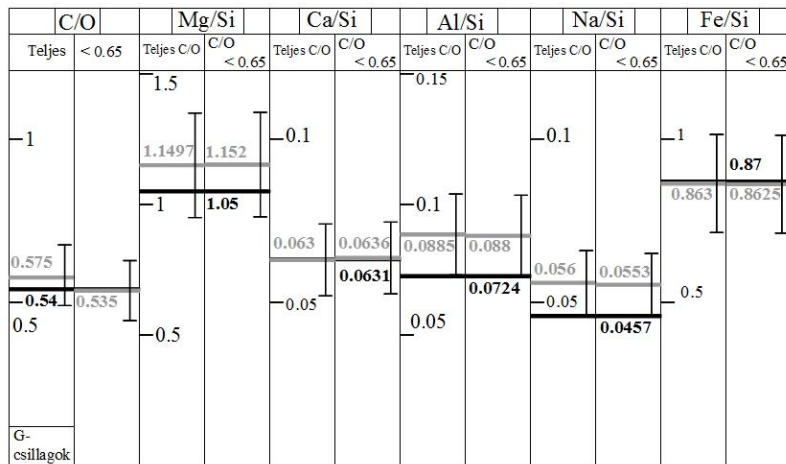
A bolygókísérővel rendelkező G-típusú csillagok esetében a C/O arány átlaga a teljes C/O spektrumon belül 0,575, amely érték meghaladja a szoláris referenciaértéket (9 és 10 ábra). Ugyanezen csillagoknál az Fe/Si arány átlaga -mind a teljes C/O tartományban (0,863), mind a C/O  $< 0,65$  alatti részhalmazban (0,8625) csak minimálisan marad el a szoláris Fe/Si értéktől.

Érdekességként megemlítendő, hogy azon G-spektráltípusú csillagok esetében, amelyek C/O aránya 0,65 alatti, és amelyekhez a jelenlegi adatok alapján nem kapcsolódik bolygókísérő, az Fe/Si arány átlaga 0,883, ami kissé meghaladja a szoláris értéket.

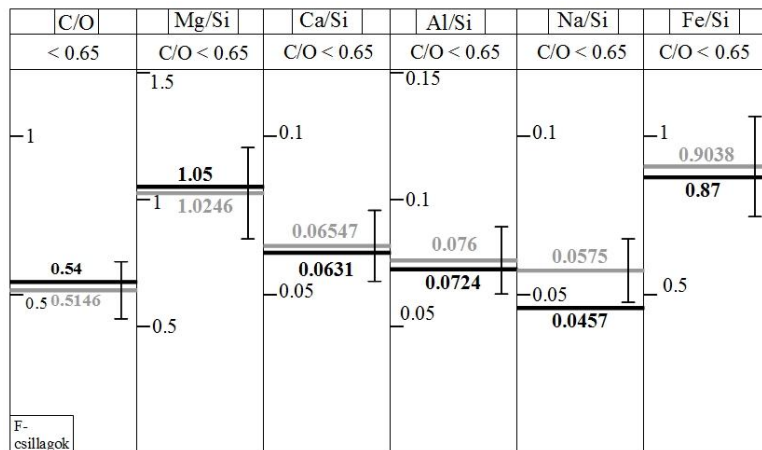
Az elemarány-eloszlási vizsgálatok értelmezése alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a bolygóval rendelkező G-spektráltípusú csillagok elemarányainak átlagértékei-néhány kivételtől eltekintve- hasonló eloszlást mutatnak, mint azoké a csillagoké, amelyek nem rendelkeznek ismert bolygókísérővel, sem a teljes C/O spektrumot tekintve, sem a C/O  $< 0,65$  tartományban. Kivételt képez a C/O és az Fe/Si elemarány, amelyek esetében az átlagokban eltérés figyelhető meg (12. ábra).

Az exobolygóval rendelkező F-típusú csillagok esetében az Mg/Si arány átlaga kissé alacsonyabb, míg az Fe/Si arány átlaga enyhén magasabb a

szoláris értékhez viszonyítva (13.ábra). E kisebb eltérések az elemgyakorisági minták átlagértékeihez képest nagy valószínűséggel a minta korlátozott elemszámából adódnak, mivel a vizsgálat mindössze 13, exobolygóval rendelkező F-típusú csillagra terjedt ki. Ez a kis elemszám inkább tájékoztató jellegű információkkal szolgál, valójában nem elegendő statisztikai megbízhatóságú gyakorisági eloszlásanalízis elvégzéséhez.



12. ábra Bolygóval rendelkező G-típusú csillagok elemarányátlagai a teljes illetve a C/O < 0,65 tartományokban. (Futó és Gucsik 2025 a)



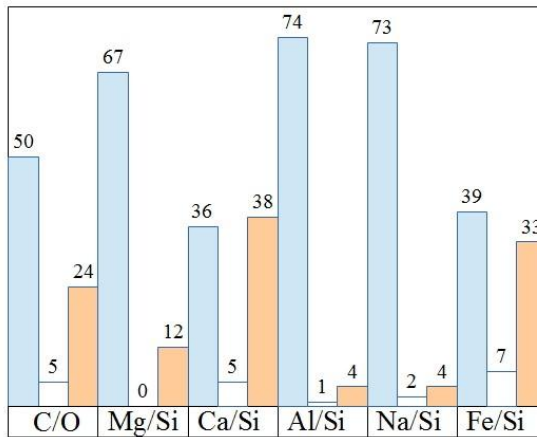
13. ábra. Bolygóval rendelkező F-típusú csillagok elemarányátlagai a teljes illetve a C/O < 0,65 tartományokban. (Futó és mtsai. 2025 a)

8. táblázat. Az egyes elemarányok eloszlásához tartozó szórásértékek relatíve alacsony értékei a bolygókísérővel rendelkező G- és F-típusú csillagok populációjában Forrás: saját készítésű táblázat.

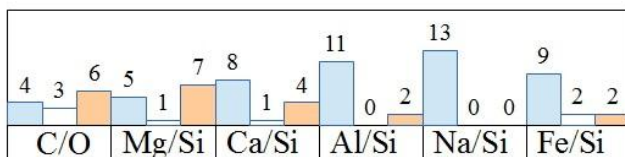
Szórás	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
G-csillagok	0,104	0,157	0,006	0,0107	0,0082	0,0092
F-csillagok	0,064	0,118	0,0048	0,0055	0,005	0,054

Nagy valószínűséggel feltételezhető, hogy a bolygóval rendelkező F-típusú csillagokra jellemző Mg/Si és Fe/Si elemarányok természetes eloszlása közel áll az ismert exobolygóval nem rendelkező, viszonylag nagy elemszámú (n = 258) F-spektráltípusú mintában mért Mg/Si és Fe/Si átlagértékekhez (8.b ábra).

Az F-spektráltípusú csillagok esetében a C/O, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányok gyakorisági eloszlásában megfigyelhető trend mind az ismert exobolygóval rendelkező (13.ábra), mind pedig a bolygókísérő nélküli, teljes C/O spektrumot lefedő G- és F-spektráltípusú csillagokra vonatkozóan (8.a, 8.b ábra) hasonló mintázatot mutat.



14. a ábra. Az ismert, bolygót hordozó G-típusú csillagok száma a hat vizsgált elemarány szuperszoláris, a Napéval azonos, valamint a szubszoláris tartományában. Forrás: Futó és Gucsik 2025a.



14. b ábra. Az ismert, bolygót hordozó F-típusú csillagok száma a hat vizsgált elemarány szuperszoláris, a Napéval azonos, valamint a szubszoláris tartományokban. Forrás: Futó és Gucsik 2025a.

A 14. a és 14. b ábra a G- és F-típusú, ismert bolygóval rendelkező csillagok mintáiban vizsgált hat elemhányados szuperszoláris, a Napéval azonos, valamint szubszoláris értékeinek számosságát mutatja be. A G-típusú bolygóhordozó csillagok eloszlási tendenciája hasonlóságot mutat a teljes C/O-tartományban vizsgált G-típusú csillagok eloszlásával (9.a ábra). Ezzel szemben az F-típusú bolygóhordozó csillagok eloszlási mintázata az Mg/Si, az Al/Si és a Ca/Si elemarányok esetében eltér az F-típusú csillagok teljes C/O-tartományára jellemző eloszlási trendtől (9.b ábra).

A bolygóval rendelkező G- és F-színképtípusú csillagok többségére hasonlóan a teljes vizsgált mintákhoz a szoláris értékeket meghaladó C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok jellemzőek, amelyek előfordulási gyakorisága 53,85-100% között változik. Ettől eltérő tendenciát mutatnak a G-típusú exobolygós csillagok esetében a szuperszoláris Ca/Si és Fe/Si arányok, valamint az F-típusú csillagoknál a szuperszoláris C/O arány, amelyek előfordulási gyakorisága alacsonyabb, 43,04-49,37% közötti értékeket mutat.

9. táblázat. A Naptól számított 50 parszekes távolságon belül található G- és F-színképtípusú bolygókísérővel rendelkező csillagokra jellemző, a szoláris értéknél alacsonyabb, azzal megegyező, illetve azt meghaladó releváns elemarányok (pl. Mg/Si, Fe/Si) relatív gyakorisági eloszlása. Forrás: saját készítésű táblázat.

G-csillagok	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Szubszoláris	30,38 %	16,46	48,1	5,06	5,06	41,77
Szolárisal azonos	6,33	0	8,86	1,27	1,27	8,86
Szuperszoláris	63,29	83,54	43,04	93,67	93,67	49,37
F-csillagok	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Szubszoláris	30,77	38,46	30,77	15,38	0	15,38
Szolárisal azonos	23,08	7,69	7,69	0	0	15,38
Szuperszoláris	46,15	53,85	61,54	84,62	100	69,24

A szolárisal megegyező értékek tartománya a G-csillagok esetében megerősíti a szoláris referenciaértékek atipikus jellegét, azonban az F-csillagok hasonló tartománya már nagy variabilitást jelez. Az F-típusú csillagok rendszereiben a 100%-os Na/Si szuperszoláris gyakoriság erős jelzése az alkáli elemek dúsulásának.

Az ismert bolygóval rendelkező G- és F-típusú csillagok a szolárisnál magasabb, a szolárisal megegyező és a szolárisnál alacsonyabb elemarány értékek relatív gyakorisági eloszlása terén legtöbb esetben hasonló trendet mutat a teljes C/O spektrumban vizsgált G-csillagokéhoz (9.táblázat).

Összességében elmondható, hogy a bolygóval rendelkező G-spektráltípusú csillagok elemarány-átlagai jó egyezést mutatnak a teljes C/O spektrumon belül vizsgált G-típusú csillagok elemgyakorisági eloszlásaival. Ez az összhang alátámasztja azt a következtetést, hogy a teljes C/O spektrumra vonatkozóan számított elemarány-átlagok felhasználhatók a Nap galaktikus környezetében kialakuló potenciális teresztrikus bolygópopuláció várható kémiai és ásványtani összetételének becslésére.

#### *4.3.5. A gyakori és ritka ásványtani kompozíciók potenciális előfordulása galaktikus környezetünk kőzetbolygó-populációjában*

Azokban a mintákban, amelyek elegendően nagyszámú sztelláris elemarány-adatot tartalmaznak- beleértve a teljes C/O spektrumot, valamint annak a 0,65 alatti tartományát, a G- és F-típusú csillagok szignifikáns hányada a szoláris értéknél magasabb Mg/Si, illetve alacsonyabb C/O aránnyal jellemezhető.

Amint azt a dolgozat korábbi fejezetében is kifejtettem, az eredmények arra utalnak, hogy ezek a kémiai paraméterek valószínűleg a leggyakrabban előforduló bolygórendszer típusokra jellemzők az elemzett G- és F-spektráltípusú csillagok esetében.

A bolygóval rendelkező csillagokra vonatkozó C/O és Mg/Si átlagértékek ugyan némi eltérést mutatnak a megfigyelt gyakorisági eloszlási trendtől, ám ezek az eltérések elsősorban a rendelkezésre álló adatok korlátozott mennyiségéből fakadó statisztikai bizonytalanságoknak tulajdoníthatók, és nem általánosíthatók a teljes vizsgált csillagpopulációra.

A sztelláris elemarány-eloszlások alapján megállapítható, hogy a Naphoz 50 parszeknél közelebbi protoplanetáris környezetekben a kőzetbolygók kialakulásához szükséges anyag jellemzően a szilíciumhoz viszonyítva magnéziumban gazdagabb, míg az oxigénhez képest szénben szegényebb, mint a Naprendszerben. A bolygókeletkezés és a bolygótetek későbbi fejlődését befolyásoló kémiai és fizikai tényezőktől függően valószínűsíthető, hogy a vizsgált galaktikus tartományban keletkező legtöbb teresztrikus

bolygó a Naprendszer kőzetbolygóihoz képest magnéziumban gazdagabb kéreg- és köpeny-ásványtani felépítéssel rendelkezik. A G- és F-típusú csillagok Fe/Si arányainak elemzése arra utal, hogy-ismételten a bolygótestek fejlődési feltételeinek függvényében-a Földhöz és Vénushoz hasonló csillagtávolságban keletkezett kőzetbolygók többsége a földihez hasonló, vagy annál valamivel kisebb tömegfrakciójú fémes maggal rendelkezhet.

A Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányok általánosságban véve kismértékben meghaladják a Naprendszerbeli átlagos értékeket. Ennek alapján valószínűsíthető, hogy galaktikus szomszédságunk exo-kőzetbolygóinak többsége a Naprendszer teresztrikus bolygóihoz képest valamivel magasabb kalcium-, alumínium- és nátriumtartalmú ásványfázisokat tartalmaz. Az alsó köpenyben ez elsősorban a kalciumtartalmú perovszkit (Ca-pv) és poszt-perovszkit (ppv) ásványfázisok megnövekedett jelenlétében nyilvánulhat meg, míg a felső köpeny összetétele várhatóan gyakrabban tartalmaz nagyobb mennyiségben kalcium-, alumínium- és nátriumtartalmú piroxéneket és gránátokat, mint a szoláris kőzetbolygók esetében.

A sztelláris Mg/Si és C/O arányok változásai ritkább típusú BSP (Bulk Silicate Planet) ásványtani összetételek kialakulását eredményezhetik. A szolárisnál alacsonyabb Mg/Si arányú csillagok jelentős hányada a magasabb Mg/Si arányú csillagokhoz viszonyítva változó mértékű széntöbblettel rendelkezhet.

A vizsgált mintában 14 G-spektráltípusú csillag (a teljes G-csillagmintának 2,73%-a) C/O aránya meghaladja a 0,8-at, közülük 4 esetében az arány 1-nél is magasabb. Az F-típusú csillagok körében 7 objektum (2,71%) C/O aránya nagyobb 0,8-nál, és szintén 4 csillag esetében haladja meg az érték az 1-et. Az eredmények alátámasztják, hogy szénben gazdag bolygórendszerek nem kizárólag gömbhalmazokban fordulhatnak elő, hanem jelen lehetnek a galaktikus vékony korongban a Nap galaktocentrikus távolságánál is.

A vizsgált mintában 60 G- és 65 F-színképtípusú csillag Mg/Si aránya kisebb, mint 1. E csillagok potenciális bolygórendszereiben, a kondenzációs körülményeket meghatározó kémiai feltételek függvényében olyan kőzetbolygók is kialakulhattak, amelyek köpeny- és kéregösszetétele jelentősen eltérhet a Naprendszerben ismert kőzetbolygókétól. A G- és F-típusú csillagok között egyaránt 59 esetben figyelhető meg 0,80 és 0,99 közötti Mg/Si arány. Ilyen kémiai környezetben a keletkező, relatíve magas szilíciumtartalmú kőzetbolygók felső köpenyének ásványos összetétele elsősorban olivinből, a diopszid különböző fázisaiból, piropból, valamint szilícium-dioxidból (SiO<sub>2</sub>) állhat. Az alsó köpenyben domináns ásványfázisokként a magnézium-szilikát perovszkit (MgSiO<sub>3</sub>, pv/ppv) típusai jelenhetnek meg, míg a ferroperekáz [(Mg,Fe)O] kisebb mennyiségben lehet jelen.

A megfigyelt sztelláris Mg/Si arányok, valamint a galaxisok kémiai fejlődését leíró (GCE- Galactic Chemical Evolution) modellek alapján megállapítható, hogy az alacsony Mg/Si arányú protoplanetáris korongokban kialakuló bolygók előfordulása viszonylag ritka a spirálgalaxisokban. A G-spektráltípusú csillagok között nem található 0,5 alatti Mg/Si arányú objektum, míg az F-típusú csillagok esetében csupán egyetlen csillag esetében figyelhető meg 0,5-nél alacsonyabb érték.

A viszonylag magnéziumszegény kőzetbolygók felső köpenyének ásványos összetétele elsősorban diopszid-fázisokból, vastartalmú gránátokból és szilícium-dioxidból ( $\text{SiO}_2$ ) állhat. Az alsó köpeny a szilikát-perovszkit fázisai ( $\text{MgSiO}_3$ , pv/ppv) mellett szintén jelentős mennyiségű szilícium-dioxidot tartalmazhat. Az ilyen típusú, alacsony Mg/Si arányú bolygók felszínén magas  $\text{SiO}_2$ -tartalmú magmákból andezites vagy riolitos összetételű vulkáni kőzetek keletkezhetnek. A gránitos kéreg főként felzikus magmás kőzetekből épül fel, és nagy arányban tartalmazhat földpátásványokat.

Amennyiben a BSP-re (Bulk Silicate Planet) jellemző Mg/Si arány 0,5 alatti, a magnézium elsősorban az alsó köpeny szilikát-perovszkit fázisaiban ( $\text{MgSiO}_3$ , pv/ppv) fordul elő, míg a szilíciumtöbblet a nagy nyomáson stabil szilícium-dioxid fázisokban jelenik meg, amelyek a köpeny ásványos összetételében a legnagyobb tömegfrakciót képviselhetik. Ritka esetekben előfordulhat, hogy a bolygóttest egészére vonatkozó Mg/Si arány extrém alacsony értéket vesz fel. Ilyen esetben a planetáris test köpenyét és kérgét döntően szilícium-dioxid ( $\text{SiO}_2$ ) alkothatja.

*4.4.6 A szoláris C/O-Mg/Si; a Mg/Si-Fe/S, valamint a C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si elemarány-kombinációkkal közelítőleg azonos kombinációk előfordulásának gyakorisága a Nap 50 parszek sugarú galaktikus környezetében.*

A vizsgált G- és F-színképtípusú csillagok többsége szubszoláris C/O, valamint szuperszoláris Mg/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányokkal jellemezhető. A mintában azon G-spektráltípusú csillagok száma, amelyek C/O aránya a 0,52-0,56, Mg/Si aránya pedig az 1,03-1,07 közötti tartományba esik, 12; míg ugyanezen kritériumoknak megfelelő F-típusú csillagok száma 4. E szoláris C/O-Mg/Si kombinációhoz hasonló intervallumba eső csillagok aránya az 512 G-típusú csillagot tartalmazó mintában megközelítőleg 2,34 %, a 258 F-típusú csillagból álló mintában pedig 1,55%.

A C/O és Mg/Si arány tekintetében a fent említett tartományba eső G- és F-színképtípusú csillagok Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányai szintén a Naprendszerre jellemző értékekhez hasonló eloszlást mutatnak.

10. táblázat A szoláris referenciaértéktől való eltérést mutató csillagok relatív gyakorisági arányai a G- és F-típusú, teljes C/O spektrumhoz tartozó illetve az exo-bolygós csillagmintákban a C/O-Mg/Si elemaránykombináció egyik, illetve mindkét komponensére vonatkozóan.  
Forrás: saját készítésű táblázat.

Jelentős eltérés a szolárisreferenciaértéktől (teljes minta)	G-típusú csillagok	F-típusú csillagok
Kombináció egyik tagja	89,15 %	89,15 %
Kombináció mindkét tagja	33,98 %	41,09 %
Jelentős eltérés a szoláris referenciaértéktől (exobolygós csillagok)	G-típusú csillagok	F-típusú csillagok
Kombináció egyik tagja	62 %	76,92 %
Kombináció mindkét tagja	16,46 %	7,69 %

Az C/O-Mg/Si elemaránykombináció egyik komponensének a szoláris referenciaértéktől való szignifikáns eltéréseihez kapcsolódó relatív gyakorisági értékek azt mutatják, hogy mind a teljes mintára, mind a bolygóval rendelkező G- és F-színképtípusú csillagok alcsoportjára nézve egyaránt jellemző a Napra specifikus aránykombináció statisztikai értelemben vett atipikus jellege (10.táblázat).

#### *Mg/Si-Fe/Si elemaránykombináció*

Nap galaktikus környezetében -50 parszek sugarú térrészen belül-a Napnál magasabb Mg/Si aránnyal rendelkező csillagok jóval gyakoribbak, mint a magnéziumban szegények. A statisztikai elemzés szerint az 1-nél magasabb Mg/Si arányú G-típusú csillagok száma hozzávetőlegesen egy nagyságrenddel nagyobb, mint az 1-nél alacsonyabb arányt mutatóké. Ennek következtében a legtöbb ilyen rendszerben keletkező teresztrikus típusú bolygó ásványtani összetételére a magnéziumban gazdag szilikátok és oxidok dominanciája jellemző. Az Fe/Si eloszlások alapján feltételezhető, hogy a G-típusú csillagokhoz tartozó potenciális kőzetbolygók-a Naprendszer Föld-típusú bolygóihoz hasonló fejlődési utak bejárása esetén-a szoláris kőzetbolygókéhoz méretű fémes maggal rendelkeznek. A vizsgált minták többségében az Mg/Si arány a szoláris értéknél magasabb, ami evolúciós szempontból arra utalhat,

hogy a Nap eredetileg egy magnéziumban szegényebb galaktikus régióban formálódott, és dinamikai pályaváltozásai révén került jelenlegi pozíciójába.

A teresztriális bolygók ásványtani felépítését meghatározó legfontosabb elemarányok közül az Mg/Si és az Fe/Si arányok külön-külön is kiemelkedő szerepet töltenek be. Az Mg/Si arány elsősorban a bolygók köpenyének és kérgének ásványtani összetételére gyakorol szabályozó hatást, míg az Fe/Si arány a fémes mag relatív tömegének, ezáltal a bolygóbelsők szerkezeti felépítésének alakulásában bír meghatározó jelentőséggel. A protoplanetáris korongokban formálódó kőzetbolygók ásványtani összetétele szempontjából nemcsak az Mg/Si és Fe/Si elemarányok egyedi értékei bírnak jelentőséggel, hanem e két arány kombinációja is meghatározó szerepet játszik. Amennyiben egy kőzetbolygó egészére jellemző Mg/Si arány meghaladja a Földre becsült átlagos értéket, úgy annak alsó köpenyében a ferroprikász aránya megnövekszik az MgSiO<sub>3</sub>-perovszkithoz és poszt-perovszkithoz viszonyítva.

*11.táblázat. A szoláris referenciaértéktől való jelentős eltérést mutató csillagok relatív gyakorisági arányai a G- és F-csillagmintákban az Mg/Si-Fe/Si elemaránykombináció egyik, illetve mindkét komponensére vonatkozóan. Forrás: saját készítésű táblázat.*

Jelentős eltérés a szoláris referenciaértéktől	G-típusú csillagok	F-típusú csillagok
Kombináció egyik tagja	59,28%	56,98%
Kombináció mindkét tagja	17,7%	19,38%

A G- és F-színképtípusú csillagok túlnyomó többségére olyan szisztéma jellemző, amelyben a vizsgált aránykombináció két tagja közül csupán az egyik mutat jelentős eltérést a szoláris referenciaértéktől (11.táblázat). Ez a megfigyelés alátámasztja a korábbi eredményeket, melyek szerint a Naprendszerre jellemző Mg/Si-Fe/Si aránykombináció előfordulása statisztikailag ritkának, atipikusnak tekinthető.

A vizsgált csillagminták alapján a Naprendszerre jellemző Mg/Si és Fe/Si elemarány-kombinációhoz (Mg/Si=1,05; Fe/Si=0,87) nagyon hasonló értékekkel (Mg/Si:1,03-1,07; Fe/Si: 0,85-0,89) rendelkező Mg/Si-Fe/Si kombinációk előfordulási gyakorisága alacsony: a G-típusú csillagok esetében mindössze 3,59 %, míg az F-típusúaknál 4,26 %. Ez arra utal, hogy a Nap szoláris Mg/Si-Fe/Si arányainak kombinációjához hasonló értékek nem jellemzőek a közeli csillagpopulációra, és ebből következően a Naprendszer általános kémiai összetétele ebből a szempontból atipikusnak tekinthető. Mindössze 18 G- és 11 F-típusú csillag esetében észlelhető az Mg/Si és Fe/Si arányoknak a szoláris értékekhez való közeli megfelelése, ami arra utal, hogy

a Földdel ásványtani szempontból nagyon hasonló köpenyösszetételű exoközetbolygók előfordulása valószínűleg rendkívül ritka a Nap 50 parszekes galaktikus környezetében.

A skiaigit ( $\text{Fe}^{2+}_2\text{Fe}^{3+}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) fontos komponense lehet a földi felső köpeny és az átmeneti zóna gránátos ásványi összetételének (Ismailova és mtsai., 2015). A skiaigit részaránya a köpenygránátokban nemcsak az Mg/Si és Fe/Si arányoktól, hanem az Al/Si és Ca/Si arányoktól is függ. E paraméterek változása befolyásolja az almandin-skiaigit ( $\text{Fe}^3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3\text{-Fe}^3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ ), illetve andradit-skiaigit ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3\text{-Fe}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) elegy sorokban megfigyelhető ásványi összetételt.

A G- és F-típusú csillagok többségére jellemző szuperszoláris Mg/Si arány, valamint a változó Fe/Si arányok arra utalnak, hogy a körülöttük kialakuló bolygók felső köpenyében a skiaigit-majorit típusú gránátfázisok előfordulása gyakori lehet, ami sok esetben a földi felső köpenytől eltérő ásványtani összetételt eredményezhet. Ha az Fe/Si elemarány magasabb a szoláris értéknél, az egyrészt nagyobb tömegű fémes mag kialakulásához vezethet, másrészt a köpenyben az ásványfázisok vastartalma is megnőhet a földköpenyhez képest. Ebben az esetben a ferropriklász vastartalma is jelentősen magasabb lehet, amely-tekintettel arra, hogy az adott ásványfázis a magasabb Mg/Si arány miatt már eleve nagyobb tömegarányban van jelen az alsó köpenyben- különösen fontos szerepet játszhat.

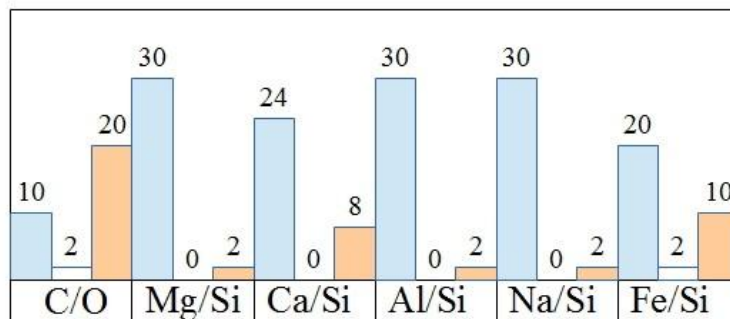
Megfelelő fizikai feltételek mellett a ferropriklász mennyisége és összetétele érdemben befolyásolhatja a köpeny viszkozitását egy Földhöz hasonló tömegű bolygó esetében (Ammann és mtsai., 2011). Az Mg/Si és Fe/Si arány variabilitása következtében az ásványi fázisok összetételének és relatív arányainak változása tehát közvetlen hatást gyakorol a köpeny reológiai tulajdonságaira, ezáltal módosítva a köpenykonvekció hatékonyságát is.

A piroxének ásványtani összetétele a sztelláris eredetű Mg/Si és Fe/Si arányok függvényében jelentős változatosságot mutathat. Ennek megfelelően a Fe/Si arány változékonysága kulcsfontosságú tényező az olivin-, piroxén- és gránátfázisok geokémiai jellegzetességeinek alakulásában a közetbolygók köpenyanyagában.

#### *A C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si elemaránykombináció*

Mindössze egy G-típusú csillag esetében figyelhető meg a Napéhoz hasonló C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si elemaránykombináció előfordulása, ami megerősíti a Naprendszer Föld-típusú bolygók keletkezése szempontjából releváns kémiai összetételének atipikus jellegét a vizsgált populációhoz képest.

Petigura és munkatársai (2013) becslései szerint a Naphoz hasonló csillagok körül a lakhatósági zónában (HZ) keringő, Földhöz hasonló tömegű bolygók előfordulási aránya körülbelül 22%. Ez a gyakoriság olyan bolygókra vonatkozik, amelyek a csillaguktól olyan távolságban keringhetnek, ahol a kondenzációs körülmények a Föld kialakulásához hasonló kémiai feltételeket biztosíthatnak. A HD 35145 katalógusjelű csillag C/O és Mg/Si arányai a szoláris értékekkel közel megegyezők; az ilyen elemösszetétellel rendelkező csillagok aránya a vizsgált G-színképtípusú csillagmintán belül mindössze 0,2%. Ezt az arányt kombinálva a HZ-ben található földtömegű bolygók fent említett gyakoriságával, arra következtethetünk, hogy a Naphoz hasonló csillagok körül a Földhöz hasonló elemarányokkal rendelkező kőzetbolygók galaktikus előfordulása alig több, mint 0,04%. A hat vizsgált elemarány (C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, Fe/Si) átlaga a mintában szereplő 32 G2V-színképtípusú csillag esetében hasonló eloszlást mutat, mint a teljes G-típusú csillagmintára (512 csillag) számított gyakorisági trend (lásd 15. ábra). Az eredmények továbbá azt is jelzik, hogy a Naphoz hasonló színképtípusú 32 csillag elemösszetételének átlaga alapján a szoláris elemarányok nem tekinthetők statisztikailag tipikusnak ezen csillagpopuláción belül.



15. ábra. A 6 vizsgált elemarány szuperszoláris, a szolárisához hasonló, valamint a szoláris értékeinek relatív gyakorisága a 32 Nappal megegyező színképtípusú csillag esetében (Futó és Gucsik 2025 a).

Megjegyzendő, hogy a kőzetbolygók felépítésében meghatározó szerepet játszó elemek-különösen a Mg, Si és Ca-szoláris elemarányokkal analóg gyakorisági mintázatai feltehetően nemcsak a Nap közvetlen galaktikus környezetében számítanak ritkának, hanem a galaktikus fősíktól vertikális értelemben távolabb elhelyezkedő korongpopulációk csillagai esetében is, amelyek jellemzően magnéziumban, szilíciumban és kalciumban

gazdagabbak. Mindez arra utal, hogy a galaktikus fősíktól távolabb eső térségekben található csillagpopulációk Mg/Si és Ca/Si elemarányainak eloszlása hasonló tendenciát mutathat a Naphoz közelebbi csillagokéhoz, vagyis átlagosan kissé magasabb értékeket képviselhetnek, mint a szoláris Mg/Si és Ca/Si arány.

#### 4.4. A potenciális Föld-típusú exobolygók becsült kémiai és ásványtani diverzitása a Nap 50 parszekes galaktikus környezetében

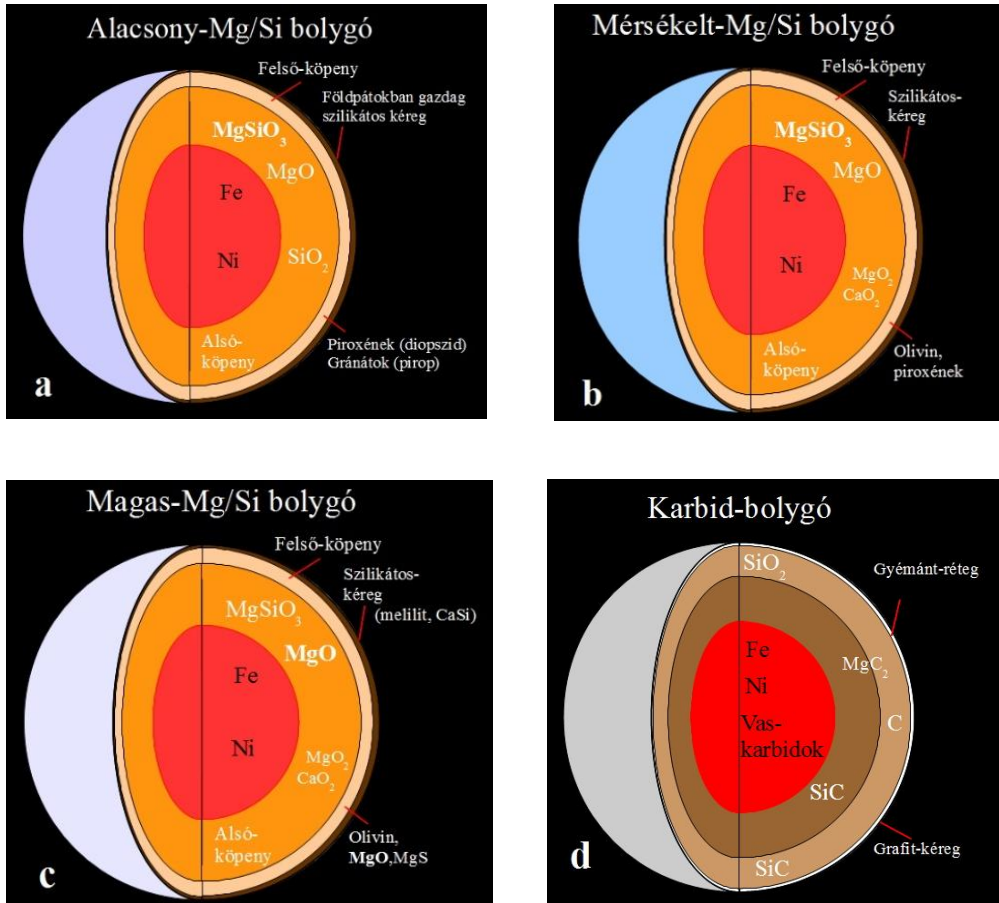
	Grafit, gyémánt, SiC	Grafit, gyémánt, SiC	Grafit, gyémánt, (SiC, MgC <sub>2</sub> )
1	Karbidok (SiC)	Karbidok (SiC)	Karbidok (SiC, MgC <sub>2</sub> )
	Szilikátok és oxidok csökkenő aránya a növekvő C/O függvényében	Szilikátok és oxidok csökkenő aránya a növekvő C/O függvényében	Szilikátok és oxidok csökkenő aránya a növekvő C/O függvényében
0.65	Felső-köpeny Piroxének (diopszid) + gránátok	Felső-köpeny Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> + gránátok + piroxének	Felső-köpeny Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> + MgO + MgS
C/O	Felső-köpeny MgSiO <sub>3</sub> + MgO + SiO <sub>2</sub>	Felső-köpeny MgSiO <sub>3</sub> + MgO + MgO <sub>2</sub> + CaO <sub>2</sub> növekvő aránya a csökkenő C/O függvényében	Felső-köpeny MgO + MgSiO <sub>3</sub> + MgO <sub>2</sub> + CaO <sub>2</sub> növekvő aránya a csökkenő C/O függvényében
	1	Mg/Si	2

16. ábra. A kőzetbolygók köpenyének potenciális fő ásványtani összetétele a C/O és Mg/Si arány függvényében, kilenc ásványtani szempontból elkülönülő tartományban (Futó és Gucsik 2025 a).

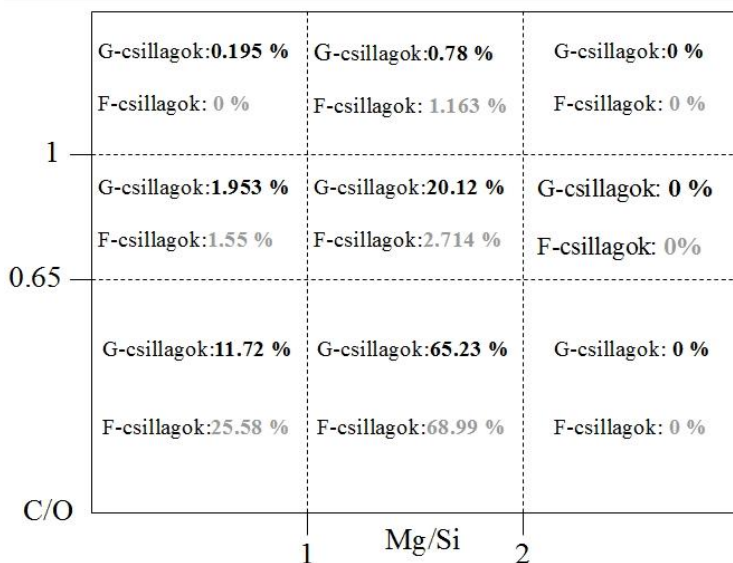
A Földhöz hasonló méretű bolygók köpenyének legvalószínűbb fő ásványi összetevőit a főbb C/O és Mg/Si tartományok függvényében a 16. ábra foglalja össze, valamint a 17 a, b, c és d ábra sematikus bolygómodelljei szemléltetik.

A dolgozat több, a szakirodalmi forrásból származó előrejelzést alkalmaz a lehetséges köpeny-összetételek modellezésére. Seager és mtsai. (2007), Futó P és mtsai. (2025 a), Lobanov és mtsai. (2015); Nelson és mtsai. (2015), valamint Zeng és Sasselov (2013) eredményei a köpeny ásványtani modelljeihez szolgálnak alapul az Mg/Si arány 1 és 2 közötti, illetve 2 feletti értékei esetén,

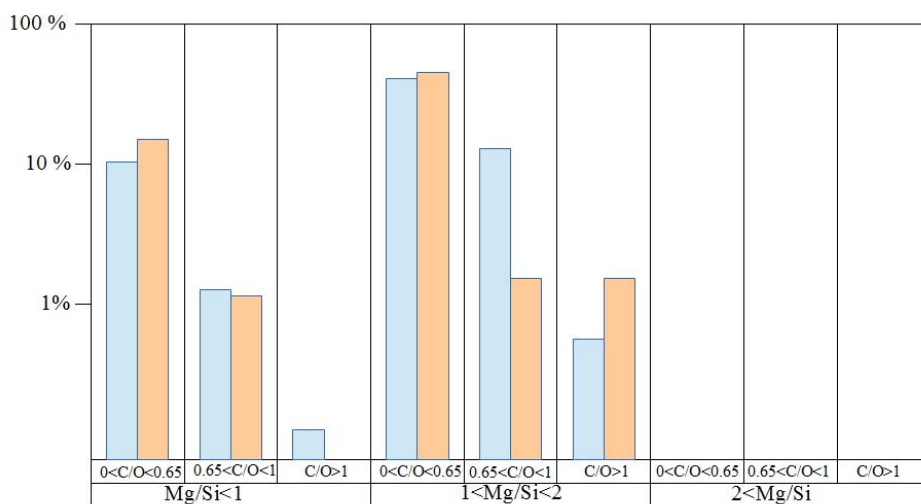
míg Carter-Bond és mtsai. (2012b), Futó (2022), valamint Suárez-Andrés és mtsai. (2018) tanulmányai releváns adatokat nyújtanak a relatíve alacsony magnézium tartalmú szilikátos bolygók köpenyásványtanához alacsony C/O arány ( $<0,65$ ) esetén.



17. ábra. Föld-méretű kőzetbolygók belső ásványtani felépítésének sematikus modelljei különböző elemarányok mellett: alacsony Mg/Si arány ( $Mg/Si < 1$ ) (a), mérsékelt Mg/Si arány ( $1 \leq Mg/Si \leq 2$ ) (b), magas Mg/Si arány ( $Mg/Si > 2$ ) (c), valamint szénben gazdag összetétel ( $C/O \geq 0,65-1$ ) (d) esetén (Futó és Gucsik 2025 a alapján kiegészítéssel).



18. a ábra. A teljes vizsgált C/O spektrum G- és F-típusú csillagainak relatív gyakorisági eloszlása a C/O és Mg/Si arányok függvényében meghatározott (a 16. ábrához kapcsolódó) tartományokban (Futó és Gucsik 2025a).



18. b ábra. A G- és F-típusú csillagok gyakorisági eloszlása a kilenc meghatározott ásványtani tartomány szerint; az ábra az adatok mellett a tartományok megnevezéseit is tartalmazza (Futó és Gucsik 2025a).

A G-típusú csillagok körülbelül egyötöde (20,12%) esik a 0,65-1 közötti C/O és az 1-2 közötti Mg/Si aránytartományba (18 a és b ábra). Az ezen csillagok körül potenciálisan kialakuló kőzetbolygók szénben gazdag ásványtani összetételt mutathatnak, szilikátalapú, és főként széntartalmú ásványokból álló összetétellel. Az Mg/Si arányban 1 alatti G- és F-típusú csillagok esetében az alacsony (0,65 alatti) C/O arány mellett a gyakoriság továbbra is jelentős (11,72%, illetve 25,58%), míg ezen küszöbérték felett egyik ásványtani kategóriában sem haladja meg a csillagok aránya a 2%-ot. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy az alacsony C/O arány mellett kialakuló, magnéziumban szegény ásványtani összetételű kőzetbolygók nem számíthatnak ritkának, míg a szénben gazdag. Az elemzett G- és F-típusú csillagok között nem található olyan, amelynek Mg/Si aránya meghaladja a 2-t, ami arra utal, hogy az ilyen típusú csillagok a Nap közvetlen galaktikus környezetében nagyon ritka előfordulásúak lehetnek.

A leggyakoribb kőzetbolygók azokba az ásványtani kategóriákba esnek, amelyeket a 0,65 alatti C/O és az 1-2 közötti Mg/Si arány jellemez. Ugyanakkor már az 1-2 közötti Mg/Si tartományon belüli variabilitás is jelentős hatással lehet egy bolygó geológiájára és geodinamikai folyamataira. Például jelentős eltérések lehetnek a geológiai aktivitásban két, hasonló tömegű és belső felépítésű bolygó között, ha az egyik egy Mg/Si  $\approx 1$  arányú, míg a másik egy Mg/Si  $\approx 2$  arányú protoplanetáris korongban alakult ki.

A Föld a Naprendszerre általánosan jellemző 1,05 Mg/Si arány mellett alakult ki, amely érték - mint azt a dolgozatban bemutatott kutatásom eredményei mutatják - a vizsgált galaktikus környezetünk sztelláris Mg/Si arányai között atipikusnak számít.

Egy kőzetbolygó földszerű jellegének egyik alapfeltétele a Földéhez hasonló, vagy legalábbis hasonlóan változatos ásványtani felépítés. A jelen kutatás eredményei hozzájárulhatnak annak pontosabb becsléséhez, hogy a Tejútrendszerben milyen mértékben elterjedt a Földhöz hasonló ásványtani összetétel a bolygók potenciálisan sokféle ásványi kompozíciói között. A disszertációban ismertetett vizsgálatához hasonló elemzések további jelentősége abban áll, hogy az ilyen típusú eredmények felhasználhatók az általunk ismert, földi típusú élet fennmaradásához szükséges környezeti feltételek előfordulási valószínűségének becsléséhez is.

## 5. KONKLÚZIÓK

Mély kapcsolatrendszer áll fenn a földi élet megszületése és evolúciója, valamint a fejlődése helyszínét jelentő szerves kémiai környezet között. E környezet és a teljes Föld kémiai összetételére-a korábbi eseményekhez képest

még ha csupán kisebb mértékben is- de bolygónk korai fejlődése után is végig hatással volt a Naprendszer evolúciója.

A 21.század elején végzett spektroszkópai mérések adatainak felhasználása alapozta meg azokat a kutatásokat, melyek eredményeinek értelmezésével egyre részletesebben fel lehet tární galaktikus környezetünkben a bolygók keletkezésének, jellemzőik kialakulásának feltételeit. A más csillagok körül kialakult bolygók kozmokémiai kutatása révén nem csak új szemszögből tekinthetünk saját Naprendszerünk fejlődéstörténetére, de az ilyen irányú vizsgálatok nagyban segíthetik bolygórendszerünk sajátosságainak, köztük különösen a földi élet kifejlődése összetett feltételrendszerének mélyebb megértését is.

Az értekezésben bemutatott vizsgálatok eredményei rávilágítanak, hogy Galaktikus környezetünkben a szilikátos bolygók ásványi összetételét általánosan a magnéziumszilikátok dominanciája jellemzi az alumínium- és kalciumszilikátokkal szemben. A Nap közvetlen galaktikus szomszédságában található G- és F-típusú csillagok többségére jellemző, hogy Mg/Si arányuk meghaladja a szoláris értéket. Az Mg, Si és Fe elemek gyakorisági eloszlása alapján feltételezhető, hogy a Nap galaktocentrikus távolságában, a galaktikus vékony korong potenciális kőzetbolygóinak köpenyásványtani összetétele számos esetben jelentősen eltérhet a Földétől. Ugyanakkor a Fe/Si arány alapján a planéták a többsége várhatóan közepes méretű, fémes maggal rendelkezhet.

A kőzetbolygók ásványtani felépítésében a C/O arány mellett az Mg/Si és Fe/Si arányok változékonysága idézi elő a legjelentősebb eltéréseket. Még két, tömegében és szerkezeti felépítésében hasonló kőzetbolygó esetében is az Mg/Si arány viszonylag kis különbsége számottevő hatást gyakorolhat a köpeny reológiai tulajdonságaira, ezáltal befolyásolva a bolygótetek belső dinamikai folyamatait. Az Mg/Si arány növekedése a teresztrikus bolygók felső köpenyében az olivin-, míg az alsó köpenyben a ferroperekklász-tartalom növekedéséhez vezet, amelyek megfelelő fizikai feltételek mellett a köpenyanyag viszkozitásának csökkenését eredményezhetik az adott mélységtartományban. Ezzel szemben az Mg/Si arány csökkenése a felső köpenyben a piroxének olivinnel szembeni mennyiségi növekedését, az alsó köpenyben pedig a ferroperekklász részarányának csökkenését vonja maga után, amely a köpeny viszkozitásának növekedésével jár együtt.

Mivel a vizsgált G- és F-típusú csillagok többsége a szolárisnál magasabb Mg/Si arányt mutat, galaktikus környezetünkben potenciálisan gyakoriak lehetnek azok a kőzetbolygók, amelyek köpenyviszkozítása alacsonyabb a Földére jellemző értéknél. Ugyanakkor az 1 alatti Mg/Si arányú és piroxén-

domináns ásványi összetételű köpenyű exobolygók előfordulása feltehetően jóval ritkább.

A kén a legnagyobb kozmikus előfordulási gyakoriságú elemek közé tartozik, így a megfigyelések tanúsága szerint meghatározó szerepet játszik a kőzetbolygók kémiai összetételének kialakításában. A kén, amely feltehetően elsősorban a fémek bolygómagokban koncentrálódik, mennyiségét az S/Fe arány jellemzi. A bolygótestekbe történő beépülése erősen függ a keletkezési helyükre jellemző kondenzációs kémiai feltételektől. A kén jelentősége elsősorban abban áll, hogy módosítja a vas fizikai tulajdonságait, ezáltal befolyásolja a bolygómagok hőfejlődését és a mágneses tér kialakulását, fejlődését. A közeli G-típusú csillagok megfigyelései alapján az S/Fe arány gyakran alacsonyabb, mint a Nap esetében mért érték, de a Naprendszerre jellemző S/Fe arány átlagosnak tekinthető.

Kutatásom során megállapítottam, hogy a Nap galaktikus környezetében megfigyelt G színképtípusú csillagok esetében ritkák a magas szén/oxigén arányú csillagok. A Napénál alacsonyabb C/O arányú csillagok előfordulása valamivel gyakoribb, mint azoké, amelyeknél ez az arány meghaladja a szoláris értéket. Azoknál a csillagoknál, amelyek C/O aránya magasabb a Napénál, jellemzően a szén/szilícium (C/Si) arány is meghaladja a szoláris értéket. A C/O arány növekedése a szilikátásványokhoz viszonyítva a szilícium-karbid (SiC), a grafit és a gyémánt relatív mennyiségének emelkedésével jár együtt. A C/Si arány növekedése pedig a grafit és gyémánt SiC-hez viszonyított arányának emelkedését is eredményezi, amely a széntöbblet fokozódásával magyarázható.

A szilikátos kőzetbolygók köpenyének és kérgének ásványtani összetételét elsődlegesen a magnézium, szilícium és vas elemek relatív mennyisége határozza meg, azonban az alumínium, kalcium és nátrium arányai szintén számottevő befolyást gyakorolnak az ásványfázisok eloszlására. Ez különösen akkor jelentős, ha a bolygótest teljes szilikátövére jellemző Mg/Si arány 1 alatti, mivel a magnéziumban szegényebb bolygók felső köpenye az olivin-fázisokhoz képest nagyobb mennyiségű piroxént és gránátot tartalmaz és ezek elegyösszetétele érzékenyen reagál a Ca, Al és Na elemek gyakoriságának változására.

A csillaghoz közelebb eső, magas hőmérsékletű kondenzációs zónában a nagyobb kondenzációs hőmérsékletű ásványfázisok, így a Ca- és Al-gazdag komponensek kiválása jelentős. A sztelláris Ca/Si és Al/Si arányok megfigyelt változékonysága – különösen a magas Mg/Si arányú csillagrendszerek esetében – azt eredményezheti, hogy a bolygóképződés csillagtól távolabbi régióiban is kialakulhatnak a szoláris értékeknél nagyobb mennyiségben kalcium- és alumíniumtartalmú szilikátásványok. Ez olyan köpeny- és kérgösszetételt eredményezhet, amely gazdagabb kalcium- és

alumíniumtartalmú ásványfázisokban (pl. plagioklász, spinell vagy a szenes kondritokban a CAI-komponensek).

A statisztikai elemzés során arra a következtetésre jutottam, hogy a Nap galaktikus környezetében található, bolygórendszerrel rendelkező G- és F-típusú csillagok – különösen azok, amelyek Mg/Si aránya meghaladja a szoláris értéket – gyakran mutatnak a Naprendszerre jellemző Ca/Si és Al/Si aránynál magasabb sztelláris értékeket. E csillagok potenciális kőzetbolygói ennek következtében nagyobb mennyiségben tartalmazhatnak kalcium- és alumíniumtartalmú ásványokat. Ezt a trendet megerősítik a közeli exobolygós csillagok Ca/Mg és Al/Mg arányai is, amelyek szintén alapvető fontosságú paraméterek a bolygók köpenyének és kérgének ásványtani változatosságát meghatározó vizsgálatokban.

Bolygórendszerünket kozmokémiai szempontból elsősorban azt teszi atipikus jellegűvé, hogy a kutatásom eredményei alapján a kőzetbolygókat felépítő legfontosabb elemek relatív gyakoriságainak a Naprendszerre átlagolt értékei közül nem csupán az Mg/Si arány különbözik a legtöbb, galaktikus környezetünkben található G- színeképtípusú csillagétól, hanem a szoláris Al/Si, Ca/Si, Na/Si arányok sem számítanak tipikusnak. Mivel ezek az elemarányok döntően befolyásolják a kőzetbolygók összetételét, fejlődését és geológiai aktivitását, a szoláris elemarány mintázat a legnagyobb valószínűség szerint jelentős mértékben hozzájárult a szoláris kőzetbolygók, így például a Föld napjainkban már meglehetősen jól ismert ásványtani összetételének kialakulásához.

A kutatás legfontosabb konklúzióinak egyike, hogy a Nap galaktikus környezetében a vizsgált G -és F-spektráltípusú csillagok domináns frakciója esetében a kőzetbolygók ásványtani összetételének alakulásában alapvető szerepet betöltő kémiai elemek relatív gyakoriságai közül összességében a C/O arány alacsonyabb, míg Mg/Si, a Ca/Si, az Al/Si és a Na/Si elemarányok magasabbak a szoláris átlagértéknél.

Az értekezésben bemutatott sztelláris elemgyakorisági vizsgálatok eredményei rámutatnak arra is, hogy nem csupán a Tejútrendszer centrális régiójában, vagy a gömbhalmazokban, hanem a Nap galaktikus környezetében is relatíve magas lehet a szoláris értéknél magasabb C/O arányú csillagok aránya. Ez pontosabban azt jelenti, hogy a Nap 50 parszek sugarú környezetében a galaktikus vékony korong G- és F-színeképtípusú fősorozati csillagai körül kialakult kőzetbolygók teljes populációjának viszonylag nagy frakcióját teszik ki olyan bolygók, melyek még ha nem is domináns hányadban, de összetételük jelentős hányadában tartalmaznak szénben gazdag ásványokat. A magasabb széntartalmú potenciális kőzetbolygók relatíve nagy arányának ismerete mindamelllett, hogy a Napéhoz hasonló galaktocentrikus

távolságban hozzájárul egy magasabb ásványtani diverzitás meghatározásában, a jövőbeni kutatások során a Naprendszer vizsgált elemarányok terén tapasztalt atipikus jellegét is figyelembe véve szintén segíthet az élet fenntartására alkalmas bolygók gyakoriságának pontosabb becslésében.

Amennyiben a vizsgált elemarányok közül az Mg/Si arány a szoláris értékhez képest jelentősen-például mintegy 50%-kal-magasabb volna, annak mélyreható következményei lennének a Föld ásványtani szerkezetére és geológiai aktivitására egyaránt. Ilyen esetben a földköpeny viszkozitása nagy valószínűséggel alacsonyabb lenne, míg a litoszféra vastagsága átlagosan megnövekedne. E két tényező kombinációja már önmagában is jelentős eltéréseket eredményezhetne a bolygó geodinamikai folyamataiban.

Másrészt, ha az Mg/Si arány megegyezik a szoláris értékkel, azonban a C/O arány például 0,3-mal magasabb lenne a Napra jellemző aránynál, akkor az ilyen körülmények között keletkező kőzetbolygók-így a Föld is-a szénalapú ásványok nagyobb mennyiségű jelenléte miatt megnövekedett széntartalommal rendelkeznének a köpenyben. Ez a módosult ásványi összetétel további hatással lenne a bolygó fizikai és kémiai fejlődési folyamataira.

Ezek többsége, így a gyémánt, a karbonátok, vagy a karbidok növelnék a köpeny viszkozitását. A Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányok közül leginkább a Ca/Si és a Na/Si arány értékének relatíve jelentős növekedése gyakorolna drasztikus hatást a földi geodinamikára. A magas Ca/Si arány például a földköpenyben a kalcium-szilikátok és oxidok mennyiségi arányát növelné, amely hozzájárulna a köpeny viszkozitásának növekedéséhez. A szolárisnál lényegesen magasabb nátriumgyakoriság esetében a Földön a kontinentális-típusú kéreghez hasonló összetételű kéregkompozíció aránya kerülne túlsúlyba a bazaltos kéreggel szemben, ez pedig a szubdukció hatékonyságát befolyásolná kedvezőtlenül. Megjegyzendő az is, hogy a fontos elemarányok mindegyikének már a viszonylag kisebb mértékű változása is elegendő volna ahhoz, hogy a Föld ásványi összetétele egy, a jelenlegitől eltérő geológiai aktivitást eredményezzen.

Összegzésként megállapítható, hogy a Naprendszerben mért relatív elemgyakoriságok közül az Mg/Si, Ca/Si és Al/Si arányok nem tekinthetők tipikusnak, ha a közvetlen galaktikus környezetünkben található G- és F-típusú csillagokkal vetjük össze. Bár a szoláris Fe/Si arány csupán kis mértékben haladja meg a legtöbb vizsgált csillagra jellemző értéket, az Mg/Si aránnyal való kombinációja alapján a Naprendszer atipikusnak tekinthető.

Ezek a különbségek a szoláris nebula olyan sajátos kémiai viszonyait tükrözik, amelyek más tényezőkkel együtt meghatározó szerepet játszottak a Naprendszer kőzetbolygóinak-köztük a Föld-egyedi ásványtani összetételének kialakulásában. A Föld különleges ásványi felépítése a teljes planetáris

fejlődéstörténet során befolyásolta a geodinamikai és geológiai folyamatokat és nagy valószínűséggel hozzájárult ahhoz, hogy bolygónk olyan magas fokú planetáris fejlettségi szintet érhessen el, amilyenek jelenleg ismerjük.

Mindebből természetesen nem következik egyértelműen, hogy kizárólag a Naprendszerre jellemző, ahhoz nagyfokú hasonlóságot mutató elemarány-mintázattal rendelkező bolygórendszerekben alakulhatnak ki és maradhatnak fenn hosszú távon olyan bolygók, amelyek képesek a földi típusú élet hordozására. Az elvégzett vizsgálatok mindössze arra utalnak, hogy mivel a Naprendszer bolygóképződése szempontjából kulcsfontosságú elemarányainak kombinációja statisztikailag atipikusnak tekinthető, az ilyen típusú kémiai környezetekben kialakult aktív geodinamikával rendelkező kőzetbolygók kedvező tulajdonságai potenciálisan hozzájárulhattak a Föld magas szintű planetáris komplexitásának és evolúciós fejlettségének kialakulásához.

A disszertációban bemutatott kutatási irány e szempontból különösen releváns, mivel új megközelítést kínál a Föld ásványtani összetételének eredetéhez. Az összehasonlító planetológiai szemlélet alkalmazásával, amely más csillagok körüli bolygórendszerek kémiai sajátosságait is figyelembe veszi, e vizsgálatok hozzájárulhatnak saját bolygórendszerünk, valamint a Föld kialakulásának és fejlődésének mélyebb megértéséhez.

Az ilyen típusú kutatások a jövőben új távlatokat nyithatnak a Naprendszer és más csillagrendszerek részletes, összehasonlító kozmokémiai és asztroásványtani tanulmányozása számára.

A jövőbeni kutatások egyik kiemelt feladata annak eldöntése lesz, hogy a jelen vizsgálat szempontjából releváns szoláris elemarány-mintázatok feltárt atipikus jellege általánosan érvényes-e a Tejútrendszer egészére, illetve kiterjeszhető-e más, a Tejútrendszerhez hasonló morfológiájú spirálgalaxisokra.

További kutatások szükségesek annak tisztázására is, hogy az élet fenntartására alkalmas bolygók elsősorban a Naphoz hasonló kémiai összetételű környezetekben fordulnak-e elő nagyobb valószínűséggel, vagy létezhetnek más, a földitől eltérő, de szintén biológiailag potenciálisan aktív planetáris környezetek is.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A disszertáció alapjául szolgáló kutatásom célja a Földhöz hasonló, szilárd felszínű, túlnyomórészt kőzetekből felépülő bolygótestek ásványtani felépítésében kulcsszerepet játszó elemek (Mg, Si, Fe, O, C, Ca, Al, Na, S) sztelláris arányainak vizsgálata, a Nap galaktikus környezetében található, főági G- és F-színképtípusú csillagok elemgyakorisági eloszlásai alapján. A kutatás egyik központi célkitűzése, hogy a sztelláris elemarányok eloszlásából

következtetéseket vonjunk le a galaktikus környezetünkben potenciálisan létező kőzetbolygók várható alapvető ásványtani összetételére vonatkozóan.

Egy további cél annak becslése, hogy a kőzetbolygók ásványi összetételét meghatározó legfontosabb elemek – és ezek kombinációinak – relatív gyakorisága, illetve a Naprendszerre jellemző referenciaértékek mennyire tekinthetők tipikusnak a Nap közvetlen galaktikus környezetében. E becslések különös jelentőséggel bírnak, mivel hozzájárulhatnak a Föld és a Naprendszer keletkezési és fejlődési folyamataiban rejlő általános mintázatok mélyebb megértéséhez, továbbá megalapozhatják a jövőbeni hasonló tárgyú komparatív planetológiai vizsgálatok irányát is.

A Naprendszer és a vizsgált csillagok elemarányainak minél megbízhatóbb összehasonlítása érdekében az elemzések kétirányú megközelítésben történtek. A kutatómunka elsődleges fókuszja a kőzetbolygók ásványtani felépítését alapvetően meghatározó kulcsfontosságú elemarányok – a C/O, Mg/Si és Fe/Si – vizsgálata volt. Emellett a vizsgálat kiterjedt további, szintén releváns elemarányokra is (Fe/Si, C/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, Ca/Mg, Al/Mg), amelyek a különböző kőzetbolygó-típusokban előforduló domináns és másodlagos ásványfázisok, illetve azok elegyösszetételének kialakulásában játszanak meghatározó szerepet.

A kutatásom során felhasznált adatok legjelentősebb forrása a Hypatia-katalógus, amely a Nap közvetlen galaktikus környezetében található F-, G-, K- és M-színképtípusú csillagokra vonatkozó, spektroszkópiai módszerekkel meghatározott elemarányokat tartalmazó jelenleg legnagyobb és legteljesebb adatbázis.

Az exobolygóval rendelkező csillagokra vonatkozó adatok elsődleges forrása a NASA Exobolygó Archívum (NASA Exoplanet Archive), amely a NASA Exobolygó Tudományos Intézetének (NExSci, NASA Exoplanet Science Institute) szolgáltatásaként működő, az exobolygókról és azok csillagairól származó mérési adatokat és jellemzőket összegyűjtő online adatbázis. Kiegészítő adatforrásként a The Extrasolar Planets Encyclopaedia (exoplanet.eu) adatbázis exobolygó-rendszerekre vonatkozó információi is felhasználásra kerültek. Az elemarányok eloszlásának vizsgálata során a relatív gyakoriság (százalékos előfordulási arány) és a számtani középérték (átlag) és a kapcsolódó szórás meghatározásán alapuló statisztikai módszereket alkalmaztam. A G- és F-csillagok elemgyakoriságainak összehasonlításánál a vizsgált elemarányok szoláris referenciaértékeit használtam. A kőzetbolygók szoláris referenciaértéktől számított jelentős eltérés küszöbértékeit, valamint azt, hogy milyen esetben számít egy adott elemarány tipikusnak a vizsgált csillagminták és a szoláris referenciaértékek közötti összehasonlításban.

**Az értekezésben bemutatott vizsgálatok legfontosabb eredményeit az alábbiakban összegzem:**

A kutatás első megközelítésének kezdeti szakaszában szenes kondritok kémiai összetételének adatelemzése alapján az Mg/Fe arány súlyszázalékos eloszlását vizsgáltam. Azt találtam, hogy a magnézium gyakorisága a vashoz képest 20-50 mólszázalékkal nagyobb, ami arra utal, hogy a magnéziumtartalmú szilikátok és oxidok a vastartalmú szilikátokhoz és oxidokhoz viszonyítva magasabb arányban vesznek részt a Naprendszer teresztrikus-típusú bolygótestjeinek felépítésében.

A dolgozat következő részében bemutatom, hogy a Naprendszertől 30 parszek sugarú térrészen belül elhelyezkedő, főági G-színképtípusú csillagokra jellemző S/Fe és C/Si arányok eloszlása alapján milyen következtetéseket vontam le a potenciálisan kialakuló kőzetbolygók lehetséges kémiai összetételére, a Naprendszer releváns elemarányaival történő összevetésben.

A kén feltehetően az egyik legfontosabb könnyűelem a teresztrikus bolygótestek fémes magjában, mivel a vasmeteoritok gyakori komponense, melyek a szülőégitestek fémes magjának kémiai összetételéről szolgáltatnak információt. A bolygótestek anyagában a kén a vasban gazdag fémes magban dúsul, így a csillagok S/Fe aránya értékes indikátorként szolgálhat a körülöttük potenciálisan kialakuló bolygótestek kéntartalmának becslésére. A 165, a Naphoz 30 parszeknél közelebbi G spektráltípusú csillag elemzése azt mutatja, hogy a vizsgált minta több mint felénél az S/Fe arány alacsonyabb, mint a Napra jellemző szoláris érték (0.49). A mintában az S/Fe arányok jelentős hányada 0,4 és 0,6 közé esik, így azok potenciálisan létező kőzetbolygóinak kéngyakorisága- ha a bolygókeletkezés egyéb feltételei is lehetővé teszik- hasonlóságot mutathat a szoláris kőzetbolygókéval. Következésképpen, galaktikus környezetünkben a potenciális kőzetbolygók kéntartalma hasonló szerepet tölthet be a fémes bolygómagok összetételének kialakulásában, mint a Föld esetében.

A protoplanetáris-korongokban a C/O arány növekedésével csökken az oxigén részvétele a szilikátfázisok kialakulásában, miközben relatív széntöbblet alakul ki a szilíciumhoz viszonyítva. Ennek következtében nemcsak a C/O, hanem a C/Si arány is meghatározó paraméterként értelmezhető a magas széntartalmú kőzetbolygók potenciális ásványi összetételének vizsgálatában. A vizsgálatom alapján a  $C/O > 0,54$  tartományban a 30 parszeken belül található G spektráltípusú csillagok C/Si arányai az esetek 75 % -ban meghaladják a szoláris referenciaértéket (7,58578). Ez arra utal, hogy ilyen kémiai környezetben keletkező bolygók köpenyében a szilícium-karbid, a grafit és a gyémánt előfordulása dominánsabb lehet, mint azokban az esetekben, ahol a csillag C/Si aránya közelebb áll a Napéhoz.

A C/O arány növekedésével párhuzamosan a C/Si arány emelkedése azt eredményezi, hogy a kőzetbolygók belső szerkezetében a szilikátfázisokhoz

viszonyítva fokozatosan nő a szilícium-karbid (SiC) és annak különböző fázisainak, valamint a grafit és a gyémánt mennyisége. A C/Si arány további növekedése a rendelkezésre álló szénmennyiség növekedése révén a grafit és a gyémánt szilícium-karbidhoz viszonyított arányának emelkedésével is együtt jár, vagyis a széntöbblet elősegíti a szénalapú ásványfázisok dominanciáját a szilícium-karbiddal szemben.

A csillaghoz közeli, úgynevezett magas hőmérsékletű kondenzációs zónában (High-Temperature Condensation Zone, HTC) elsősorban magas kondenzációs hőmérsékletű ásványi fázisok, például kalcium- és alumíniumgazdag komponensek (pl. CAI-k) képződnek (Dorn és mtsai. 2015). Az e régióban kialakuló bolygókezdemények kőzetei adott esetben nagyobb arányban tartalmazhatnak Ca- és Al-tartalmú ásványfázisokat, mint azok, amelyek a kőzetbolygók keletkezési zónájának (terrestrial planet formation zone, TPFZ) csillagtól távolabbi régióiban formálódtak. A relatíve magas kalcium- és alumíniumtartalom azonban nemcsak a HTC-zónában keletkező testek sajátossága lehet, hanem például a TPFZ távolabbi régióiban keletkező bolygótestek köpenyösszetétele tartalmazhat a szoláris kőzetbolygókénál magasabb Ca- és Al-gyakoriságot, amennyiben az adott bolygórendszerre jellemző Ca/Si és Al/Si elemarányok meghaladják a Naprendszerre jellemző referenciaértékeket (Ca/Si= 0.0631; Al/Si=0.0724).

A Ca/Mg és Al/Mg elemarányok szintén fontos szerepet játszanak a kőzetbolygók kérgének és köpenyének ásványi diverzitásában. A Naphoz 30 parszekon belüli galaktikus környezetben található G- és F-típusú csillagok vizsgálata alapján azt találtam, hogy a Ca/Mg és Al/Mg arányok átlagértékei az F-csillagok Ca/Mg és Al/Mg arányai (0,0624 és 0,08529), valamint a G-csillagok Al/Mg aránya (0,07565) esetében kissé meghaladják a szoláris referenciaértékeket (Ca/Mg=0,061256; Al/Mg=0,06918) míg a G-típusú csillagok esetében a Ca/Mg arány átlaga (0.0598) kissé elmarad a Napra jellemző értékhez képest.

A dolgozatban a vizsgált G- és F-típusú csillagok Ca/Mg és Al/Mg elemarányainak a szolárisnál kissé magasabb értékei alapján arra is következtettem, hogy a kalcium- és alumíniumtartalmú szilikátfázisok valamivel nagyobb arányban lehetnek jelen azoknak a Nap galaktikus környezetében előforduló potenciális kőzetbolygóknak a köpenyében, amelyek magnézium/szilícium aránya meghaladja a szoláris értéket (1,05).

Az O/Si arány szintén fontos paraméter a bolygókeletkezési anyag ásványi összetételének alakulásában. A bolygótestek O/Si arányát nemcsak a kialakulásukat megelőző kondenzációs kémiai folyamatok határozzák meg, hanem jelentős befolyással bír a korai bolygófejlődés során becsapódó égitestek által szállított víz- és illóanyag-mennyiség is. E folyamat által a víztartalom növekedése és az azzal összefüggő oxidációs folyamatok az O/Si arány módosulását eredményezhetik, ami közvetlenül hat a szilikát- és

oxidásványok relatív gyakoriságára. Mivel a protoplanetáris korongra jellemző O/Si arány a planetáris akkréció és evolúció O/Si arányt befolyásoló folyamataihoz hasonlóan éppúgy meghatározó jelentőségű faktor az ásványi összetétel alakulásában, a sztelláris O/Si elemarányok vizsgálata fontos információkat szolgáltathat a galaktikus környezetünk G- és F-típusú csillagai körül kialakult potenciális kőzetbolygók köpenyalkotó ásványainak arányáról.

A 30 parszekes távolságon belül található G- és F-színképtípusú csillagok mintájában az O/Si arány értéke a legtöbb esetben meghaladja a szoláris referenciaértéket. A 30 parszekes távolságon belül található G- és F-színképtípusú csillagok mintájában az O/Si arány értéke a legtöbb esetben meghaladja a szoláris referenciaértéket. Ezen csillagok többsége a szoláris kőzetbolygókhoz képest magasabb arányban tartalmazhat oxigénben és -magasabb Mg/Si arány esetén - magnéziumban gazdag ásványfázisokat – elsősorban olivint – felső köpenyben.

A C/O, Mg/Si és Fe/Si elemarányok mellett a Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányok is fontos szerepet töltenek be a kőzetbolygók köpenyének és kérgének ásványi összetétele szempontjából mivel befolyásolják a fő ásványi fázisok mellett a kisebb mennyiségben jelen lévő kéreg- és köpenyalkotó ásványfázisok típusát és mennyiségi arányait is. A C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si arányok eloszlásának vizsgálata lehetőséget nyújt annak becslésére, hogy a Nap galaktocentrikus távolságában, mintegy 50 parszek távolságon belül milyen gyakorisággal fordulhatnak elő egyes, ásványtani jellemzőik alapján osztályozott kőzetbolygó-típusok.

A dolgozatban részletezett kutatás adatbázisa a  $0 < C/O < 1,31$  (G-csillagok), valamint a  $0 < C/O < 1,18$  (F-csillagok) C/O aránytartományokon belül 512 G- és 258 F színképtípusú csillag C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si elemarányaira vonatkozó adatokat tartalmaz. Az Fe/Si arány számított értékei 501 G-, illetve 258 F típusú csillag esetében állnak rendelkezésre.

Az eloszlások vizsgálata alapján a G- és F-színképtípusú fősorozati csillagok döntő többségére-az elemzett elemarányok függvényében 55,66–87,98%-os arányban-a szoláris referenciaértékeket meghaladó C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, valamint Fe/Si arányok jellemzőek. Kivételt képeznek a G típusú csillagok esetében a szuperszoláris C/O és Fe/Si, illetve az F típusú csillagok esetében a szuperszoláris Al/Si és Fe/Si arányok, amelyeknél ezen elemarányok előfordulási gyakorisága a 37,21-48,5% közötti intervallumba esik.

A teljes vizsgált mintákban a bolygóval rendelkező G- és F-típusú csillagok többségére szintén a szoláris referenciaértékeket meghaladó C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok jellemzőek, amelyek előfordulási aránya 53,85-100% között mozog. Kivételt ez alól G típusú exobolygós

csillagok szuperszoláris Ca/Si és Fe/Si arányai, illetve az F típusú csillagok szuperszoláris C/O arányai jelentenek, amelyek előfordulási gyakorisága 43,04-49,37% közötti értékeket mutat. A teljes, valamint azon belül a bolygóval rendelkező csillagok elemarány-eloszlásai hasonlóságot mutatnak abban a tekintetben, hogy a vizsgált elemarányok legalább kétharmadánál a G- és F-színképtípusú csillagok esetében a szoláris referenciaértékeknél magasabb elemarány értékek előfordulási aránya meghaladja az 50%-ot. A szoláris referenciaértékekkel való hasonlóságok és különbségek megfigyelése kitűnő lehetőséget nyújt a szoláris értékek és a más bolygórendszerekre jellemző elemarányok közötti összehasonlításra, mely szemlélet a további kutatások irányának egyik alapját képezheti. A szolárisnál magasabb Mg/Si, Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányok a csillagok többsége esetében azt valószínűsítik, hogy a potenciálisan kialakuló kőzetbolygók felső köpenyének ásványtani összetételét az olivin-fázisok dominanciája mellett, a kalciumban, alumíniumban és nátriumban gazdag piroxének nagyobb mennyiségi aránya jellemzi.

Az elemzésem eredményei azt is megerősítik, hogy Naprendszerre jellemző, szoláris értékekhez közeli (C/O=0,52-0,56; Mg/Si=1,03-1,07) elemaránykombinációk a G- és F-típusú csillagok esetében ritkán fordulnak elő Naptól számított 50 parszekes térségen belül. Előfordulási gyakorisága a G-csillagok esetében: 2,34%, az F-csillagok esetében: 1,55 %. A szoláris C/O-Mg/Si elemarány kombináció gyakorisági vizsgálata a kombináció egyik tagjának szoláris értéktől való jelentős eltéréseihez kapcsolódóan is kiterjed, amelynek eredményei szintén megerősítik, hogy a Napra jellemző elemaránykombináció mind a teljes G- és F-csillagmintában, mind a bolygóval rendelkező csillagok populációjában atipikusnak tekinthető. A kombináció legalább egyik tagjának szoláris értéktől való szignifikáns eltérése a G-csillagoknál 87,89%, az F-csillagoknál pedig 89,15%. Az exobolygóval rendelkező almintában ez az arány a G-típusúaknál 62,5%, az F-típusúaknál 76,92%. Ha mind a hat vizsgált elemarány kombinációját is figyelembe vesszük, akkor csupán a G-színképtípusú csillagmintában fordult elő egy olyan csillag (HIP 116937), amely a Napéhoz hasonló hatos elemaránykombinációval rendelkezik.

A bolygótetek szilikátos öveiben megjelenő ásványfázisok típusát és arányát alapvetően az Mg/Si arány határozza meg, míg a köpenyásványok vastartalmát, valamint a bolygóttest fémek magjának relatív méretét főként az Fe/Si arány szabja meg. A disszertációm egyik fontos eleme annak vizsgálata,

hogy a Naprendszerre jellemző Mg/Si és Fe/Si elemarányok és azok kombinációja mennyiben tekinthető tipikusnak a Naptól számított 50 parszek sugarú galaktikus környezetünkben található G- és F-színképtípusú csillagok Mg/Si-Fe/Si elemarányai között. Az elemarány eloszlások elemzése alapján a G-csillagok 74,8 %-ra és az F-csillagok: 57,75 %-ra a szoláris referenciaértéknél magasabb Mg/Si arány jellemző. Az G-típusú csillagok 48,5 %-ra a szoláris értéknél magasabb míg az F-csillagok 37,21%-ra annál alacsonyabb Fe/Si arány jellemző. Ez arra utal, hogy e csillagok körül potenciálisan kialakult kőzetbolygók többsége a szoláris kőzetbolygókénál magnéziumban gazdagabb ásványi összetételű köpennyel, továbbá a Földéhez relatív értelemben hasonló méretű fémekkel rendelkezhetnek. Mindkét csillagtípus esetében a 10 % alatti szolárisal megegyező Mg/Si és Fe/Si értékek az elemarányátlagok mellett szintén rávilágítanak a szoláris referenciaértékek atipikus jellegére.

Az Mg/Si-Fe/Si elemaránykombináció egyik komponensének a szoláris referenciaértéktől való jelentős eltéréseihez kapcsolódó relatív gyakorisági értékek (75 és 62,5 %) azt mutatják, hogy a G- és F-színképtípusú csillagok mintájára nézve egyaránt jellemző a Napra jellemző aránykombináció statisztikai értelemben vett atipikus jellege.

A Naprendszerre jellemzőhöz (Mg/Si=1,05; Fe/Si=0.87) nagyon hasonló (Mg/Si:1,03-1,07; Fe/Si:0.85-0.89) Mg/Si-Fe/Si elemarány-kombinációk vizsgált mintákban előforduló alacsony gyakorisága (G-csillagok: 3,59 %; F-csillagok: 4,26 %), a szoláris Mg/Si-Fe/Si elemarány kombináció atipikus jellegére utal. Ebből arra következtetnek, hogy a Naprendszer kőzetbolygói ásványtani összetételük szempontjából, nagy valószínűséggel csupán egy kis hányadot képviselnek az parszeknél közelebbi galaktikus környezetünk kőzetbolygó-populációjában.

A kutatásom eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy Naprendszerre jellemző hat elemarány (C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si), valamint ezek kombinációja nem tekinthető tipikusnak a Tejútrendszernek a Naptól számított 50 parszekes környezetén belül elhelyezkedő vizsgált G- és F-színképtípusú csillagpopulációja esetében. Mivel a kőzetbolygók keletkezéséhez szükséges szilárd fázisú anyag kémiai összetétele a C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si arányoktól függ, feltételezhető, hogy Naprendszer teresztrikus bolygóinak ásványi összetétele sem tekinthető tipikusnak az elemzett csillagpopulációkban a potenciális kőzetbolygók várható ásványtani jellemzőihez viszonyítva.

## 7. SUMMARY

The aim of the research underlying this dissertation is to investigate the stellar abundances of elements that play a key role in the mineralogical composition of Earth-like, solid-surface planetary bodies predominantly composed of rocks (Mg, Si, Fe, O, C, Ca, Al, Na, S). This analysis is based on the elemental abundance distributions of main-sequence G- and F-type stars located in the Sun's Galactic environment. A central objective of the study is to derive conclusions regarding the expected fundamental mineralogical makeup of potentially existing rocky planets in our Galactic neighbourhood, inferred from the distribution of stellar elemental ratios.

An additional objective is to estimate how typical the relative frequencies of the key elements—and their combinations—that determine the mineralogical composition of rocky planets are, with respect to the reference values characteristic of the Solar System, within the Sun's immediate Galactic environment. These estimates are of particular importance, as they may contribute to a deeper understanding of the general patterns underlying the formation and evolutionary processes of the Earth and the Solar System, and they may also help to shape the direction of future comparative planetology studies on similar topics.

To enable the most reliable possible comparison between the elemental ratios of the Solar System and those of the stars under study, the analyses were conducted using a twofold approach. The primary focus of the research was the investigation of the key elemental ratios—C/O, Mg/Si, and Fe/Si—that fundamentally determine the mineralogical structure of rocky planets. In addition, the study was extended to other relevant elemental ratios (Fe/Si, C/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, Ca/Mg, Al/Mg), which play a crucial role in the formation of dominant and secondary mineral phases, as well as the compositional diversity of these assemblages, across different types of rocky planets.

The principal data source employed in this research is the Hypatia Catalog, which currently represents the largest and most comprehensive database of spectroscopically determined elemental abundances for F-, G-, K-, and M-type stars located in the Sun's immediate Galactic environment.

The primary source of data for stars hosting exoplanets is the NASA Exoplanet Archive, an online database operated as a service of the NASA Exoplanet Science Institute (NExSci), which compiles measured parameters and characteristics of exoplanets and their host stars. As a supplementary data source, information from The Extrasolar Planets Encyclopaedia ([exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)) on exoplanetary systems was also utilized.

In examining the distributions of elemental ratios, I employed statistical methods based on determining relative frequencies (percent occurrence), arithmetic means, and the associated standard deviations. For the comparison of elemental abundances in G- and F-type stars, the solar reference values of the investigated elemental ratios were used. To evaluate the distributions of those elemental ratios and ratio combinations that play the most important roles in the composition of rocky planets, I established threshold values for significant deviations from the solar reference and defined the criteria under which a given elemental ratio can be considered typical in the comparison between the stellar samples and the solar reference values.

**The key findings of the investigations presented in this dissertation are summarized below:**

In the initial phase of the first analytical approach, I examined the weight-percentage distribution of the Mg/Fe ratio based on data analysis of the chemical compositions of carbonaceous chondrites. I found that the abundance of magnesium exceeds that of iron by approximately 20-50 mol%, indicating that magnesium-bearing silicates and oxides participate in the formation of Solar System terrestrial-type planetary bodies in proportionally higher amounts than iron-bearing silicates and oxides.

In the subsequent section of the dissertation, I present the conclusions drawn regarding the potential chemical composition of rocky planets that may form around main-sequence G-type stars located within a 30-parsec radius of the Solar System, based on the distributions of the S/Fe and C/Si ratios. These conclusions are derived in comparison with the corresponding elemental ratios characteristic of the Solar System.

Sulfur is presumed to be one of the most important light elements in the metallic cores of terrestrial planetary bodies, as it is a common component of iron meteorites, which provide information on the chemical composition of the metallic cores of their parent bodies. In planetary materials, sulfur tends to be concentrated in the iron-rich metallic core; therefore, the S/Fe ratio of stars may serve as a valuable indicator for estimating the sulfur content of planetary bodies that may potentially form around them. Analysis of 165 G-type stars located within 30 parsecs of the Sun shows that for more than half of the sample, the S/Fe ratio is lower than the solar reference value (0.49). A significant fraction of the S/Fe ratios in the sample fall between 0.4 and 0.6, suggesting that—provided other conditions for planet formation are also met—the sulfur abundances of their potential rocky planets may resemble those of

the Solar System's terrestrial planets. Consequently, in our Galactic environment, the sulfur content of potential rocky planets may play a role in shaping the composition of metallic planetary cores similar to that observed for Earth.

In protoplanetary disks, an increase in the C/O ratio reduces the availability of oxygen for the formation of silicate phases, while simultaneously producing a relative excess of carbon with respect to silicon. Consequently, not only the C/O ratio but also the C/Si ratio can be considered a key parameter in assessing the potential mineralogical composition of high-carbon rocky planets. According to my analysis, within the  $C/O > 0.54$  regime, the C/Si ratios of G-type stars located within 30 parsecs exceed the solar reference value (7.58578) in 75% of the cases. This indicates that, in such chemical environments, phases such as silicon carbide, graphite, and diamond may become more prevalent in the mantles of planets forming around these stars than in systems where the stellar C/Si ratio is closer to the solar value.

As the C/O ratio increases, the accompanying rise in the C/Si ratio leads to a progressive enrichment of silicon carbide (SiC) and its various phases, as well as graphite and diamond, relative to silicate phases in the interior structures of rocky planets. Further elevation of the C/Si ratio, driven by the increasing availability of carbon, also results in higher proportions of graphite and diamond relative to silicon carbide. In other words, carbon excess promotes the dominance of carbon-based mineral phases over silicon carbide.

In the innermost, so-called high-temperature condensation zone (High-Temperature Condensation Zone, HTC), mineral phases with high condensation temperatures—such as calcium- and aluminum-rich components (e.g., CAIs)—are preferentially formed (Dorn et al. 2015). Planetary embryos originating in this region may therefore incorporate a higher proportion of Ca- and Al-bearing mineral phases than those that form in the more distant parts of the terrestrial planet formation zone (TPFZ). However, relatively high calcium and aluminum abundances are not exclusively characteristic of bodies formed in the HTC region; the mantle compositions of planets forming farther out in the TPFZ may also exhibit higher Ca and Al abundances than those of solar-system rocky planets, provided that the Ca/Si and Al/Si elemental ratios characteristic of the given planetary system exceed the reference values typical of the Solar System ( $Ca/Si = 0.0631$ ;  $Al/Si = 0.0724$ ).

The Ca/Mg and Al/Mg elemental ratios also play an important role in controlling the mineralogical diversity of the crusts and mantles of rocky planets. Based on an analysis of G- and F-type stars located within 30 parsecs of the Sun, I found that the average Ca/Mg and Al/Mg ratios of F-type stars (0.0624 and 0.08529, respectively), as well as the average Al/Mg ratio of G-type stars (0.07565), slightly exceed the corresponding solar reference values ( $Ca/Mg = 0.061256$ ;  $Al/Mg = 0.06918$ ). In contrast, the average Ca/Mg ratio

of G-type stars (0.0598) is marginally lower than the value characteristic of the Sun. Based on the slightly elevated Ca/Mg and Al/Mg elemental ratios observed in the G- and F-type stars analyzed in this study, I also infer that calcium- and aluminum-bearing silicate phases may occur in somewhat higher proportions in the mantles of potential rocky planets residing in the Sun's galactic neighborhood, provided that their magnesium-to-silicon ratios exceed the solar value (1.05).

The O/Si ratio is also an important parameter in shaping the mineralogical composition of planetary building materials. The O/Si ratio of planetary bodies is determined not only by the condensation chemistry that precedes their formation, but is also strongly influenced by the amounts of water and volatiles delivered by impacting bodies during early planetary evolution. Through this process, increasing water content and the associated oxidation reactions may modify the O/Si ratio, directly affecting the relative abundances of silicate and oxide minerals. Because the O/Si ratio characteristic of the protoplanetary disk—similarly to the O/Si-altering processes associated with planetary accretion and evolution—plays a fundamentally important role in determining mineralogical outcomes, the investigation of stellar O/Si elemental ratios can provide valuable insights into the proportions of mantle-forming minerals in potential rocky planets around G- and F-type stars in our galactic environment.

Within the sample of G- and F-type stars located within 30 parsecs, the O/Si ratio exceeds the solar reference value in most cases. Consequently, the majority of these stars are likely to host rocky planets whose upper mantles contain higher proportions of oxygen-rich – and, when the Mg/Si ratio is elevated, magnesium-rich – mineral phases, primarily olivine, compared to the rocky planets of the Solar System.

In addition to the C/O, Mg/Si, and Fe/Si elemental ratios, the Ca/Si, Al/Si, and Na/Si ratios also play an important role in determining the mineralogical composition of rocky planets' mantles and crusts, as they influence not only the major mineral phases but also the types and relative abundances of minor crust- and mantle-forming minerals.

Examining the distributions of the C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si ratios enables an assessment of how frequently various mineralogically defined categories of rocky planets may occur within approximately 50 parsecs of the Sun, at its current Galactocentric distance. The database underlying the research presented in this thesis contains data on the C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, and Na/Si elemental ratios for 512 G-type and 258 F-type stars within the ranges  $0 < C/O < 1.31$  (G stars) and  $0 < C/O < 1.18$  (F stars). Calculated Fe/Si ratios are available for 501 G-type and 258 F-type stars.

Based on the analysis of the distributions, the overwhelming majority of G- and F-type main-sequence stars—ranging from 55.66% to 87.98% depending on the elemental ratio examined—exhibit C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and

Fe/Si ratios exceeding the corresponding solar reference values. Exceptions include the supersolar C/O and Fe/Si ratios among G-type stars, as well as the supersolar Al/Si and Fe/Si ratios among F-type stars, for which the occurrence frequencies fall within the interval of 37.21-48.5%.

Within the full samples examined, the majority of G- and F-type stars hosting planets likewise exhibit C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemental ratios exceeding the solar reference values, with occurrence frequencies ranging from 53.85% to 100%. Exceptions to this trend are the supersolar Ca/Si and Fe/Si ratios among G-type exoplanet-host stars, as well as the supersolar C/O ratios among F-type stars, for which the frequencies fall between 43.04% and 49.37%. The elemental-ratio distributions of the full stellar samples, as well as those of the subsamples containing planet-hosting stars, exhibit a similar pattern in that for at least two-thirds of the investigated elemental ratios, the occurrence of values exceeding the solar reference level is greater than 50% for both G- and F-type stars. Observing the similarities and differences relative to the solar reference abundances provides an excellent opportunity for comparing solar values with the elemental ratios characteristic of other planetary systems—an approach that may form one of the conceptual foundations for future research directions. The prevalence of supersolar Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, and Na/Si ratios among the majority of the stars suggests that the upper-mantle mineralogy of any potentially forming rocky planets would likely be characterized, in addition to the dominance of olivine phases, by a higher proportion of calcium-, aluminum-, and sodium-rich pyroxenes.

My results also confirm that combinations of elemental ratios characteristic of the Solar System—i.e., values close to the solar reference (C/O = 0.52-0.56; Mg/Si = 1.03-1.07)—occur only rarely among G- and F-type stars within 50 parsecs of the Sun. Their occurrence frequency is 2.34% for G-type stars and 1.55% for F-type stars. The frequency analysis of the solar C/O–Mg/Si ratio combination was also extended to cases in which one member of the pair significantly deviates from the solar value; these results likewise confirm that the solar-like elemental ratio combination is atypical in both the full G- and F-star samples and among stars hosting planets. Significant deviation in one component of the combination is found in 87.89% of G stars and 89.15% of F stars in the full sample, and in 62.5% of G-type and 76.92% of F-type planet-host stars. When all six examined elemental-ratio combinations are taken into account, only a single star in the G-type sample (HIP 116937) exhibits a sextuple ratio combination similar to that of the Sun.

The types and proportions of mineral phases that emerge within the silicate mantles of planetary bodies are fundamentally controlled by the Mg/Si ratio, whereas the iron content of mantle minerals and the relative size of a planetary body's metallic core are primarily governed by the Fe/Si ratio. An important component of my dissertation is to assess the extent to which the Mg/Si and

Fe/Si elemental ratios characteristic of the Solar System—and their combination—can be considered typical when compared to the Mg/Si–Fe/Si ratios observed in G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun.

Based on an analysis of the elemental abundance distributions, 74.8 % of G-type stars and 57.75 % of F-type stars exhibit Mg/Si ratios higher than the solar reference value. Regarding Fe/Si, 48.5 % of G-type stars show ratios higher than solar, whereas 37.21 % of F-type stars display values lower than the solar reference. These trends suggest that most rocky planets potentially formed around these stars may possess mantles with mineralogies more enriched in magnesium than those of Solar System rocky planets, along with metallic cores comparable in size to Earth's. For both stellar types, the fraction of stars exhibiting solar-like Mg/Si and Fe/Si ratios—below 10%—further underscores the atypical nature of the solar reference values relative to the local stellar population.

The low occurrence frequency of Mg/Si–Fe/Si elemental ratio combinations closely resembling those of the Solar System (3.59% for G-type stars; 4.26% for F-type stars) indicates the atypical nature of the solar Mg/Si–Fe/Si combination. I infer that, in terms of mineralogical composition, the rocky planets of the Solar System likely represent only a small fraction of the rocky-planet population within our Galactic neighborhood out to 50 parsecs.

Based on the results of my research, I conclude that the six elemental ratios characteristic of the Solar System (C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si), as well as their combined patterns, cannot be regarded as typical for the examined population of G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun in the Milky Way. Since the chemical composition of the solid-phase material required for the formation of rocky planets depends on the C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si ratios, it is reasonable to assume that the mineralogical composition of the Solar System's terrestrial planets is likewise atypical when compared with the expected mineralogical characteristics of potential rocky planets around the analyzed stellar populations.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Gucsik Arnoldnak, aki ismeretségünk kezdete óta folyamatosan támogat szakmai tanácsaival, és bátorít a nehézségek leküzdésében.

Köszönet illeti a disszertációm bírálóit. Dr. Benkó Zsoltot és Dr. Kereszturi Ákost, akik észrevételeikkel, megjegyzéseikkel és konstruktív kritikájukkal jelentős mértékben hozzájárultak a disszertációm minőségének javításához. Köszönettel tartozom oktatóimnak, az intézmény munkatársainak és minden olyan közreműködő személynek akik előrehaladásomat bármely módon segítették.

Hálás vagyok Irakli Simonia úrnak a georgia-i Ilia Állami Egyetem professzorának, aki a csillagászati, asztrofizikai vonatkozások, valamint a kozmokémia terén hasznos tanácsaival nagyban segítette a kutatómunkámat. Hasonlóképpen köszönettel tartozom a debreceni Atommagkutató Intézet vendégprofesszoraiként is tevékenykedő Ulrich Ott (Max Planck Kémiai Intézet) és Timothy Jull (Arizonai Egyetem) professzoruraknak az értékes szakmai konzultációkért.

Hálával és szeretettel emlékezem elhunyt feleségemre Hajnalkára, aki szeretetével, támogatásával és töretlen hitével végigkísérte munkámat.

Köszönetet szeretnék mondani a szüleimnek akik mindig ösztönöztek, és érdeklődéssel figyelték a munkámat.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Adibekyan, V. Zh., Delgado Mena, E., Sousa S. G., Santos, N. C., Israelian, G., Gonzalez Hernandez, J. I., Mayor M., and Hakobyan, A. A. (2012 a) Exploring the  $\alpha$ -enhancement of metal-poor planet-hosting stars. The Kepler and HARPS samples. *Astronomy & Astrophysics*, 547, A36. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220167>
- Adibekyan, V. Zh., Santos, N. C., Sousa, S. G., Israelian, G., Delgado Mena, E., Gonzalez Hernandez, J. I., Mayor M., Lovis C., and Udry S. (2012 b) Overabundance of  $\alpha$ -elements in exoplanet-hosting stars. *Astronomy & Astrophysics*, 543, A89. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219564>
- Adibekyan, V. Zh., Figueira, P., Santos, N.C., Hakobyan, A. A., Sousa, S. G., Paç, e G., Delgado-Mena, E., Robin, A. C., Isrealian G., González Hernández, J. I. (2013): Kinematics and chemical properties of the Galactic stellar populations. The HARPS FGK dwarfs sample. *Astronomy and Astrophysics*. 554. A44. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321520>
- Adibekyan, V. Z., Santos, N. C., Figueira, P., Dorn, C., Sousa, S. G., Delgado Mena, E., Israelian, G., Hakobyan, A. A., and Mordasini, C. (2015) From stellar to planetary composition: Galactic chemical evolution of Mg/Si mineralogical ratio. *Astronomy & Astrophysics*, 581, L2. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527059>
- Adibekyan, V. (2017a) Formation and evolution of exoplanets in different environments. *Non-Stable Universe: Energetic Resources, Activity Phenomena, and Evolutionary Processes*. ASP Conference Series, 511, p.70. Astronomical Society of the Pacific, San Francisc. ArXiv.1701.01661.
- Adibekyan, V., Gonçalves da Silva, H. M, Sousa, S. G., Santos, N. C., Delgado Mena, E., and Hakobyan A. A. (2017b): Mg/Si mineralogical ratio of low-mass planet hosts. Correction for the NLTE Effects. *Astrophysics*, 60, 325 – 332. <https://doi.org/10.1007/s10511-017-9486-5>
- Allègre, C.J.; Poirier, J.P.; Humler, E.; Hofmann, A. W. (1995): The chemical composition of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 134, 515–526. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00123-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00123-T)
- Allen-Sutter, H., Garhart, E., Prakapenka, V., Greenberg, E., Shim, S.-H. (2020): Oxidation of the Interiors of Carbide Exoplanets. *The Planetary Science Journal*, 1, 39. DOI:10.3847/PSJ/abaa3e

- Ammann, M. W., Bradholt, J. P., Dobson, D. P. Ferrous iron diffusion in ferro-periclase across the spin transition. *Earth and Planetary Science Letters*. 302. 393-402. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.031>
- Anders, E., Ebihara, M. (1982): Solar - system abundances of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 2363-2380. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90208-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90208-3)
- Asplund, M.; Grevesse, N.; Sauval, J. (2005): The solar chemical composition. *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, ASP Conference Series, 336, 25.
- Badro, J., Côté, A. S., Brodholt J.T. (2014): A seismologically consistent compositional model of Earth's core. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 7542 – 7545. <https://doi.org/10.1073/pnas.1316708111>
- Bond, J.C., O'Brien, D. P., and Laretta D. S. (2010b) The compositional diversity of extrasolar terrestrial planets. I. In situ simulations. *The Astrophysical Journal*, 715, 1050 – 1070. DOI 10.1088/0004-637X/715/2/1050
- Bond, J. C., Laretta, D.S., O'Brien, D. P. (2010a): Making the Earth: Combining dynamics and chemistry in the Solar System. *Icarus*, 205, 321-337. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.07.037>
- Bose, M, Floss, C, Stadermann F.J. 2010. An investigation into the origin of Fe-rich presolar silicates in Acfer 094. *The Astrophysical Journal*, 714, 1624.
- Brewer, M. J., Fischer, D. A. (2016): C/O and Mg/Si ratios of stars in the solar neighborhood. *The Astrophysical Journal*, 831:20. DOI 10.3847/0004-637X/831/1/20
- Buchhave, L. A, Latham, D. W., Johansen, A., Bizzarro, M., Torres, G., Rowe, J. F., Batalha, N. M., Borucki, W. J., Brugarner, E., Caldwell, C., Bryson, S. T., Ciardi, D. R., Cochran, W. D., Endl, M., Esquerdo, G. A., Ford, E. B., Geary, J. C., Gilliland, R. L., Hansen, T., and Isaacson, H., (2012): An abundance of small exoplanets around stars with a wide range of metallicities. *Nature*, 486, 375 – 377. <https://doi.org/10.1038/nature11121>
- Burbridge E.M., Burbridge G.R., Fowler W.A., Hoyle F. 1957. *Synthesis of the Elements in Stars*. *Reviews of Modern Physics*, 29, 547-650.
- Buda György (1995): Dr. Sztrókay Kálmán Imre emlékezete. *Földtani Közlöny*. 125, 1-2, 19-25. ISSN 0015-542X
- Cabral, N., Lagarde, N., Reylé, C., Guilbert – Lepoutre, A., and Robin, A. C. (2019) Chemical composition of planet building blocks as predicted by stellar population synthesis. *Astronomy & Astrophysics*, 622, A49. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833750>

- Cameron, A.G.W. (1982): Elemental and nuclidic abundances in the solar system. In: *Essays in Nuclear Astrophysics*. Barnes, C.A., Clayton, D.D. and Schamm D.N. (Editors), Cambridge University Press, Cambridge. 23-43.
- Carter-Bond, J. C., O'Brien, D. P., Mena, E., Israelian, G., Santos, N. C., and González-Hernández, J. I., (2012a) Low-Mg/Si planetary host stars and their Mg-depleted terrestrial planets. *The Astrophysical Journal*, 747, L2. DOI 10.1088/2041-8205/747/1/L2
- Carter-Bond, J. C., O'Brien, D. P., and Raymond, S. (2012b) The compositional diversity of extrasolar terrestrial planets. II. Migration Simulations. *The Astrophysical Journal*, 760, 44. DOI 10.1088/0004-637X/760/1/44
- Cescutti, G., Matteucci, F., McWilliam, A., Chiappini, C. (2009): The evolution of carbon and oxygen in the bulge and disk of the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics*, 505, pp. 605-612. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912759>
- Coppari, F., Smith, R.F., Eggert, J. H., Wang, J., Rygg, J.R., Lazicki, A., Hawreliak, J.A., Collins, G.W., Duffy, T.S. (2013): Experimental evidence for a phase transition in magnesium oxide at exoplanet pressures. *Nature Geoscience*, 6, 926-929. <https://doi.org/10.1038/ngeo1948>
- Delgado-Mena, E., Israelian, G., González-Hernández, J. I., Bond J. C., Santos N. C., Udry S., and Mayor M. (2010) Chemical clues on the formation of planetary systems: C/O versus Mg/Si for HARPS GTO sample. *The Astrophysical Journal*, 725, 2349 -2358. DOI 10.1088/0004-637X/725/2/2349
- Dorn, C., Harrison, J. H. D., Bonsor, A., Hands, T.O. (2019): A new class of Super-Earths formed from high-temperature condensates: HD219134 b, 55 Cnc e, WASP-47 e. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 712 -727. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3435>
- Elkins-Tanton, L. T., Seager S. (2008): Coreless terrestrial exoplanets. *The Astrophysical Journal*, 688, 628-635. DOI 10.1086/592316
- Embey-Isztin, A., Dobosi, G. (2004): A Föld kémiai összetétele és differenciációja. *Magyar Kémiai Folyóirat*, 109-110, 166-172.
- Esteban C., García-Rojas J., Peimbert M., Peimbert A., Ruiz M. T., Rodríguez M., Carigi L. (2005): Carbon and oxygen galactic gradients: observational values from H II region recombination lines. *The Astrophysical Journal*, 618, L95-L98. DOI 10.1086/426889
- Fischer, D. A., Valenti, J. (2005) The planet-metallicity correlation. *The Astrophysical Journal*, 622, 1102-1117. DOI 10.1086/428383

- Fortney, J. J., Marley, M.S., Barnes, J.W. (2007): Planetary radii across five orders of magnitude in mass and stellar insolation: application to transits. *The Astrophysical Journal*, 659, 1661-1672. DOI 10.1086/512120
- Fortney, J. J. (2012): On the carbon-to-oxygen ratio measurement in nearby Sun – like stars. Implications for planet formation and the determination of stellar abundances. *The Astrophysical Journal Letters*, 747, L27. DOI 10.1088/2041-8205/747/2/L27
- Futó, P. (2017a). Silicate and carbonaceous minerals in meteoritic mineral environments I. The Allende c-chondrite. The eighth symposium of polar science. Tokyo. Japan. OAp4.
- Futó P, Gucsik, A. (2017b). On the bulk silicate composition of carbonaceous chondrites. In: Hayabusa Symposium 2017. Abstract: OA-P19
- Futó P. (2020): On the bulk mineralogical composition of carbonaceous chondrites in high-Mg/Si planetary systems. The eleventh symposium of polar science. Tokyo. Japan. OAp05.
- Futó, P., Vanyó, J., Simonia, I., Sztakovics, J., Nagy, M., Gucsik, A., Dönczö, B., Kertész, Zs., Novák, R., Csámer, Á. (2021a): The Mg/Fe ratio of silicate minerals in the meteoritic materials and in the circumstellar environment: A case study for the chondritic-like composition. *Open Astronomy*, 30, 45-55.
- Futó, P. (2021b): The rocky planets with magnesium-rich mantle composition. LII. Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract: 1017.
- Futó, P., Gucsik, A. (2021c): On the bulk mineralogical composition of carbonaceous chondrites in low-Mg/Si planetary systems. The twelfth symposium of polar science. Tokyo. Japan. OAp5.
- Futó, P., Gucsik, A. (2021d): Chemical analyses of Fe - rich chondrule phases in Kaba (CV3) carbonaceous - chondrite. Implications on the bulk elemental composition of terrestrial planetary cores. The twelfth symposium of polar science. Tokyo. Japan. OAp4.
- Futó P. (2022): The rocky planets with magnesium-depleted mantle composition. LIII. Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract: 1036.
- Futó P., Gucsik A. (2023a): Implications for the bulk elemental composition of terrestrial planets I. The stellar and planetary S/Fe molar ratio. LIV. Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract: 1070.
- Futó P., Gucsik A. (2023b): Implications for the bulk elemental composition of terrestrial planets II. The effect of the variations of C/Si ratio on the bulk mineralogy of rocky planets. LIV. Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract: 1072.

- Futó P., Gucsik A. (2024a): Rocky exoplanets with Ca-and Al- rich crustal and accessory mantle minerals. LV. Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract: 1091.
- Futó P., Gucsik A. (2024b): Supersolar O/Si ratio in the most of low - C/O G – and F-type stars. Implications for the oxidized conditions in rocky planetary mantles. LV. Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract: 1093.
- Futó, P., Gucsik, A. (2025a): The stellar Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si ratios and the mineral diversity of rocky exoplanets. *Open Astronomy*, 34, 20250017.
- Futó, P., Gucsik, A. (2025b): Carbon-rich mineral composition of silicate-dominated rocky planets in a large fraction of low-Mg/Si planetary systems. LVI. Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract: 1074.
- Gasparik, T. (1989): Transformation of enstatite-diopside-jadeite pyroxenes to garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 102, 389-405. <https://doi.org/10.1007/BF00371083>
- Gonzalez, G. (1997): The stellar metallicity-giant planet connection. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 285, 403-412. <https://doi.org/10.1093/mnras/285.2.403>
- Grasset O., Schneider J., Sotin C. (2009): A study of the accuracy of Mass-Radius relationships for silicate-rich and ice-rich planets up to 100 Earth masses. *The Astrophysical Journal*, 693, 722-733. DOI 10.1088/0004-637X/693/1/722
- Gucsik A, Endo, T., Nishido, H., Ninagawa, K., Kayama, M., Bérczi, Sz. et al. (2013): Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy of forsterite from Kaba meteorite: An application to the study of hydrothermal alteration of parent body. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, 2577-2596.
- Hakim, K., Spaargaren, R., Grewal, D. S., Rohrbach, A., Berndt, J., Dominik, C., van Westrenen, W. (2019): Mineralogy, Structure, and Habitability of Carbon-Enriched Rocky Exoplanets: A Laboratory Approach. *Astrobiology*, 19, 867- 884. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1930>
- Hart, S.R., Zindler, A. (1986): In search of a bulk-Earth composition. *Chemical Geology*, 57, 247-267. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90053-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90053-7)
- Hasegawa, Y. (2016): Super-Earths as Failed Cores in Orbital Migration Traps. *The Astrophysical Journal*, 832, 18 pp. DOI 10.3847/0004-637X/832/1/83
- Haywood, M. (2008): A peculiarity of metal-poor stars with planets? *Astronomy & Astrophysics*, 482, 673-676. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079141>

- Hazen, R. M., Grew, E. S., Downs, R. T., Golden, J., Hystad, G. (2015): Mineral ecology: chance and necessity of in the mineral diversity of terrestrial planets. *The Canadian Mineralogist*, 53, 295-324. <http://dx.doi.org/10.3749/canmin.1400086>
- Hinkel N., Timmes F. X., Young P. A., Turnbull M. C. (2014): Stellar abundances in the Solar neighborhood: The Hypatia Catalog, 148:54. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/148/3/54>
- Hirose, K., Wentzcovitch, R., Yuen, D.A., Lay T. (2015): Mineralogy of the Deep Mantle-The Post-Perovskite Phase and its Geophysical Significance. In: Gerard Schubert (Szerk.) *Treatise on Geophysics*. Second Edition. Elsevier. Oxford. 85-115. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00054-3>
- Hystad, G., Downs, R. T., Grew, E. S., Hazen, R. M. (2015): Statistical analysis of mineral diversity and distribution: Earth's mineralogy is unique. *Earth and Planetary Science Letters*, 426, 154-157. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.028>
- Ida, S., and Lin, D. N. C. (2004): Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. II. The Formation and Retention of Gas Giant Planets around Stars with a Range of Metallicities. *The Astrophysical Journal*, 616, 567-572. DOI 10.1086/424830
- Ida, S. (2006): Formation of Cores of Giant Planets and an Implication for "Planet Desert". In: *Planetary Systems and Planets in Systems / Stephane Udry, Willy Benz and Rudolf von Steiger (eds.). ISSI Scientific Reports Series, ESA/ISSI. ISBN 978-92-9221-935-2, 2006, p. 115-122.*
- Irifune, T. (1994): Absence of an aluminous phase in the upper part of the Earth's lower mantle. *Nature* 370, 131-133. <https://doi.org/10.1038/370131a0>
- Irifune T. et al. (2010): Iron partitioning and density changes of pyrolite in Earth's lower mantle. *Science*. 327. 193-195.
- Ismailova, L., Bobrov, A., Bykov, M., Bykova, E., Cerantola, V., Kantor, I., Kuppenko, I., McCammon, C., Dyadkin, V., Chernysho, D., Pascarelli, S., Chumakov, A., Dubrovinskaia N. and Dubrovinsky L. (2015): High-pressure synthesis of skiaigite-majorite garnet and investigation of its crystal structure. *The American Mineralogist*, 100, 2650-2654. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5856>.
- Javoy M., Kaminski, E., Guyot, F., Andraut, D., Sanloup, C., Moreira, M., Labrosse, S., Jambon, A., Agrinier, P., Davaille, A., Jaupart, C. (2010): The chemical composition of the Earth: Enstatite chondrite models, *Earth and Planetary Science Letters*, 293, 259-268.

<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.033>

- Johnson, J. A., Aller, K. M., Howard, A. W., and Crepp, J. R. (2010) Giant Planet Occurrence in the Stellar Mass-Metallicity Plane. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 122, 905-915. DOI 10.1086/655775.
- Jørgensen, J. K., Favre, C., Bisschop, S.E., Bourke, T.L., van Dishoeck, E.F., Schmalzl, M. (2012): Detection of the simplest sugar, glycoaldehyde, in a Solar-type protostar with ALMA. *The Astrophysical Journal Letters*, 757, L4. DOI 10.1088/2041-8205/757/1/L4.
- Kesson S. E. et al. (1998): Mineralogy and dynamics of a pyrolite lower mantle. *Nature*. 393. 252-255.
- Kingma, K. J., Cohen, R. E., Hemley, R. J., Mao, H. - k. (1995): Transformation of stishovite to a denser phase at lower-mantle pressures. *Nature*, 374, 243-245. <https://doi.org/10.1038/374243a0>
- Kuchner, M., és Seager, S. (2006): Extrasolar carbon planets. arXiv: astro-ph/0504214.
- Kurashina, T., Hirose, K., Ono, S., Sata, N., Ohishi, J. (2004): Phase transition in Al-bearing CaSiO<sub>3</sub> perovskite: implications for seismic discontinuities in the lower mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 145, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.02.005>
- Kuwayama, Y, Hirose, K., Sata, N., Dhishi, Y. (2005): The Pyrite-Type High-Pressure Form of Silica. *Science*, 309, 923–925. <https://doi.org/10.1126/science.1114879>
- Kwok, S., Zhang, Y. (2011): Mixed aromatic–aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features. *Nature*, 479, 80-83. <https://doi.org/10.1038/nature10542>
- Le Bourdais. É, Dufour P., Melis C, Klein B. L., Rogers L. K.; Bédárs A., Debes J., Messier A., Weinberger A.J., Xu S. (2025): Tracing Planetary Accretion in a 3 Gyr old Hydrogen-rich White Dwarf: The Extremely Polluted Atmosphere of LSPM J0207+3331. *The Astrophysical Journal*. 993.8. DOI: 10.3847/1538-4357/ae0ace
- Lobanov, S. S., Zhu, O., Holtgrewe N., Prescher C., Prakapenka V. B., Oganov A.R., and Goncharov A. F. (2015): Stable magnesium peroxide at high pressure. *Scientific Reports*, 5, 13582. <https://doi.org/10.1038/srep13582>
- Lodders. K. (2003) Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements. *The Astrophysical Journal*, 591, 1220 – 1247. DOI 10.1086/375492

- Lodders, K., Palme, H., és Gail, H. P. (2009): Abundances of the elements in the solar system. In Landolt Börnstein. New Series. VI/4B. 4.4 fejezet. J.E.
- Trümper (szerk. Berlin. Heidelberg. New York: Springer-Verlag. p. 560-630. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0901.1149>
- Lord, H. C. (1965): Molecular equilibria and condensation in a solar nebula and cool stellar atmospheres. *Icarus*, 4, 279-288. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(65\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0019-1035(65)90005-9)
- Lyubetskaya, T.; Korenaga, J. (2007): Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: 1. Method and results. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 112, B03211. <https://doi.org/10.1029/2005JB004223>
- Madhusudhan, N., Lee, K. K. M., Mousis, O. (2012): A possible carbon-rich interior in super-Earth 55 Cancri e. *The Astrophysical Journal Letters*, 759, L 40. <http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/759/2/L40>
- Maggiolo R., Dhooghe F., Gronoff G., de Keyser G., Cessateur G. (2025) Interstellar Comet 3I/ATLAS: Evidence for Galactic Cosmic Ray Processing. [arxiv2510.26308v1](https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.26308)  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.26308>
- Martin, R. G., Livio, M. (2016): On the Formation of Super-Earths with Implications for the Solar System. *The Astrophysical Journal*, 822, 9 pp. DOI 10.3847/0004-637X/822/2/90
- Mayor, M., Queloz, D. (1995): A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378, 355 -359. <https://doi.org/10.1038/378355a0>
- McDonough, W. F., Sun, S. S. (1995): The composition of the Earth. *Chemical Geology*. 120. 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Mookherjee, M., Nakajima, Y., Steinle-Neumann, G., Glazyrin, K., Wu, X., Dubrovinsky, L., McCammon, C., Chumakov, A. (2011): High-pressure behavior of iron carbide (Fe<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) at inner core conditions. *Journal of Geophysical Research*, 116, B04201. <https://doi.org/10.1029/2010JB007819>
- Moriarty, J, Madhusudhan, N, Fischer D. 2014. Chemistry in an evolving protoplanetary disk: effects on terrestrial planet composition. *The Astrophysical Journal*, 787:81. DOI 10.1088/0004-637X/787/1/81
- Murakami, M., Hirose, K. (2003): Stability of CaCl<sub>2</sub>-type and a-PbO<sub>2</sub>-type SiO<sub>2</sub> at high pressure and temperature determined by in-situ X-ray measurements. *Geophysical Research Letters*, 30, 1207. doi:10.1029/2002GL016722
- Murakami M., Hirose K., Kawamura K., Sata N., Ohishi Y. (2004): Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO<sub>3</sub>. *Science*. 304. 855-858.

- Murakami M. et al. (2005): Post-perovskite phase transition and crystal chemistry in the pyrolitic lowermost mantle. *Geophysical Research Letters*, 32, L03304.
- Nelson, J. R., Needs, R. J., and Pickard C. J. (2015): Calcium peroxide from ambient to high pressures. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17, 6889 – 6895. <https://doi.org/10.1039/C4CP05644B>
- Niu, H., Oganov, A. R., Chen, X. Q., Li, D., (2015): Prediction of novel stable compounds in the Mg-Si-O system under exoplanet pressures. *Scientific Reports*, 5, 18347. <https://doi.org/10.1038/srep18347>
- Okuzumi, S., H. Tanaka, H. Kobayashi, and K. Wada (2012): Rapid Coagulation of Porous Dust Aggregates outside the Snow Line: A Pathway to Successful Icy Planetesimal Formation, *The Astrophysical Journal*, 752, 106. DOI 10.1088/0004-637X/752/2/106
- O'Neill, C., Lenardic, A. (2007): Geological consequences of super-sized Earths. *Geophysical Research Letters*, 34, L19204. <https://doi.org/10.1029/2007GL030598>
- O'Neill, C., Lenardic, A., Weller, M., Moresi, L., Quenette S., Zhang S. (2016): A window for plate tectonics in terrestrial planet evolution? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 255, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.04.002>
- Öberg, K. I., Bergin, E. A. (2016): Excess C/O and C/H in Outer Protoplanetary Disk Gas. *The Astrophysical Journal Letters*, 831, L19. <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8205/831/2/L19>
- Palme, H., O'Neill, H. S. C. (2003): Cosmochemical estimates of mantle composition. *Treatise on Geochemistry*, 2, Elsevier. New York. 1-38. ISBN 0-08-043751-6.
- Pantó György (1986): Szádeczky – Kardoss Elemér. *Földtani Közlöny*, 116, 213-221.
- Petigura, E. A., Howard, A. V., Marcy, G. W. (2013): Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 19273-19278. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319909110>
- Poirier, J.-P. (1994): Light elements in the Earth's outer core: A critical review. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 85, 319 – 337. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90120-1)
- Pollack, J. B., O. Hubickyj, P. Bodenheimer, J. J. Lissauer, M. Podolak, and Y. Greenzweig (1996): Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas, *Icarus*, 124, 62–85. <https://doi.org/10.1006/icar.1996.0190>
- Putirka, K. D., Xu, S. (2021): Polluted white dwarfs reveal exotic mantle rock types on exoplanets in our solar neighborhood. *Nature*

- Communications, 12, 6168. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26403-8>
- Reynolds, J. H. (1960): Isotopic composition of primordial xenon. *Physical Review Letters*, 4, 351-354. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.351>
- Ringwood, A. E. (1989): Significance of the terrestrial Mg/Si ratio. *Earth and Planetary Science Letters*, 95, 1-7. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90162-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90162-3)
- Rivera, E. J., Lissauer, J. J., Butler, R. P., Marcy, G. W., Vogt, S. S., Fischer, D. A., Brown, T. M., Laughlin, G., Henry, G. W. (2005): A  $\sim 7.5 M_{\oplus}$  planet orbiting the nearby star, GJ 876. *The Astrophysical Journal*, 634, 625 – 640. DOI 10.1086/491669
- Rogers, L. A., Seager, S. (2010): Three possible origins for the gas layer on GJ 1214b. *The Astrophysical Journal*, 716, 1208-1216. DOI 10.1088/0004-637X/716/2/1208
- Rózsa Péter (2007): Nekrológ. Dr. Szöör Gyula. *Földtani Közlöny*. 137. 3. 435-445.
- Russel H. N. (1934): Molecules in the Sun and Stars. *Astrophysical Journal*, 79, 317 p.
- Santos, N. C., Israelian, G., and Mayor, M. (2004) Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars. Exploring the probability of planet formation. *Astronomy & Astrophysics*, 415, 1153-1166. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034469>
- Safronov, V. S. (1972): Evolution of the preplanetary cloud and the formation of the Earth and planets. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, NASA Technical Translation; F-677.
- Seager, S., Kuchner, M., Hier-Majumder C.A., Militzer B. (2007): Mass-radius relationships for solid exoplanets. *The Astrophysical Journal*, 669, 1279-1297. DOI 10.1086/521346
- Spaargaren, R.; Wang, H.; Mojzsis, S.; Ballmer, M.; Tackley, P. 2020. Exoplanet bulk silicate composition as a function of host stellar elemental abundances, and its effects on long-term planetary evolution. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2020, EGU2020-20378, Virtual conference, 4-8 May 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-20378>, 2020
- Stacey, F. D. (1992): *Physics of the Earth.*, by Stacey, F. D. Brookfield Press, Kenmore, Brisbane (Australia) 525 p. ISBN 0-646-09091-7

- Stamenković, W., and Seager, S. (2016) Emerging possibilities and insuperable limitations of exogeophysics: The example of plate tectonics. *The Astrophysical Journal*, 825:78. DOI 10.3847/0004-637X/825/1/78
- Suárez-Andrés, L., Israelian G.; González-Hernandez, J. I.; Adibekyan, V. Zh., Delgado Mena E., Santos N.C., Sousa S.G., (2018): C/O vs. Mg/Si ratios in solar type stars: The HARPS sample. *Astronomy and Astrophysics*, 614, A84. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730743>
- Suess, H. E., Urey H. C. (1956): Abundances of the elements. *Reviews of Modern Physics*, 28, 53-74. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.28.53>
- Szádeczky-Kardoss Elemér: *Geokémia*. Budapest. 1955.
- Szádeczky-Kardoss Elemér (1960): A geokémiai tudományok fejlődésének néhány új iránya. *Magyar Tudomány*, 10, 609-621.
- Szádeczky-Kardoss Elemér: *A Föld szerkezete és fejlődése*. Budapest. 1968. ISBN 2310009245363
- Szádeczky-Kardoss Elemér (1972): A Föld kozmikusán különleges sajátosságai és a geonómiai szemlélet alapvonásai. *Geonómia és Bányászat*, 5, 1-2, 99-111. Szádeczky-Kardoss Elemér (1975): A Föld geokémiai evolúciója. *Fizikai Szemle*, 12, 454-460.
- Szőör, G., Elekes, Z., Rózsa, P., Uzonyi, I., Simulák, J. Kiss, Á. Z. 2001: Magnetic spherules: Cosmic dust or markers of a meteoritic impact? *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. Interactions with Materials and Atoms*, 181, pp. 557-562. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00380-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00380-9)
- Sztrókey, K., Földvári Aladárné (1953): A somogy megyei Mike községben hullott meteorit vizsgálata. (L'examen de la météorite de Mike) - *Földtani. Közlöny*, 83, 7-9. 243-254. ISSN 0015-542X
- Sztrókey K., Földvári Vogl M. (1954): A new stone meteorit! from Hungary - *Acta Geologica Hungarica*, 2, 3-4, pp. 313-326.
- Sztrókey K. (1959): The application of X-ray analysis to the study of meteorites - *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis. Sectio Geologica*, 2 pp. 117-127.
- Sztrókey K. (1960): Über einige Meteoritenminerale des kohlenwasserstoffhaltigen Chondrites von Kaba. Ungarn - *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 94, pp. 1284-1294.
- Sztrókey K., Tolnay V., Földváriné Vogl M. (1961a): A kabai meteorit. (Über den Meteorit von Kaba) *Földtani Közlöny*, 91, 2. pp. 186-205.

- Sztrókay K., Tolnay V., Földváriné Vogl M. (1961b): Mineralogical and chemical properties of the carbonaceous meteorite from Kaba. Hungary - *Acta Geologica Hungarica*, 7, pp. 57-103.
- Sztrókay K. (1967a): A szilikátmeteoritok ásványos és vegyi alkotásának fejlődéses változásai. (Evolutionary changes of the mineral and chemical composition of a stony meteorites) – *Földtani Közlöny*, 97, 1, pp. 3-14.
- Sztrókay K. (1967b): On the mineralogical and chemical evolution of stony meteorites - *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis. Sectio Geologica*, 10, pp. 85-98.
- Tackley P. J., Ammann M., Brodholt J.P., Dobson D. P., Valencia D. (2013): Mantle dynamics in super-Earths: Post-perovskite rheology and self-regulation of viscosity, *Icarus*, 225, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.03.013>
- Takafuji N., Yagi T., Miyajima N., Sumita T. (2002): Study on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content and phase stability of aluminous - CaSiO<sub>3</sub> perovskite at high pressure and temperature. *Physics and Chemistry of Minerals*, 29, 532 – 537. <https://doi.org/10.1007/s00269-002-0271-5>
- Tsuchiya T., Tsuchiya J. (2011): Prediction of a hexagonal SiO<sub>2</sub> phase affecting stabilities of MgSiO<sub>3</sub> and CaSiO<sub>3</sub> at multimegabar pressures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 1252 – 1255. <https://doi.org/10.1073/pnas.1013594108>
- Turkevich, W.Z., Renero-Lecuna, C., Zhao, Le Godec, Y. Y., Strobel, T.A., Crichton, W. A., Guignot, N., Moutaabbid, H., Touloupas, I., és Courac, A. 2023. Mg–C System up to 20 GPa: Its phase diagram and stable magnesium carbides. *The Journal of Physical Chemistry C*, 127, 1965-1972. DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c07176
- Umemoto K., Wentzcovitch R.M. (2006): Dissociation of MgSiO<sub>3</sub> in the Cores of Gas Giants and Terrestrial Exoplanets, *Science*, 311, 983-986. <https://doi.org/10.1126/science.1120865>
- Umemoto K., Wentzcovitch, R. M. (2011): Two-stage dissociation in MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite. *Earth and Planetary Science Letters*, 31, 225-229. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.09.032>
- Umemoto K., Wentzcovitch, R. M., Wu S., Ji M., Wang C.-Zh. Ho K.- M. (2017): Phase transitions in MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite in super - Earth mantles. *Earth and Planetary Science Letters*, 478, 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.08.032>
- Unterborn C. T., Hull S. D., Stixrude L, Teske J. K., Johnson J. A., and Panero W. L. (2017): Stellar chemical clues as to the rarity of exoplanetary

- tectonics. Habitable Worlds 2017: A System Science Workshop, 2017. Wyoming. LPI Contribution No. 2042, id.4034 <https://arxiv.org/abs/1706.10282>
- Uzonyi I., Szöör Gy, Rózsa P, Vekemans B., Vincze L., Adams F., Drakopoulos M., Somogyi A., Kiss Á. Z. (2004): Characterization of impact materials around Barringer Meteor Crater by micro-PIXE and micro-SRXRF techniques. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Interactions with Materials and Atoms, 219-220, 555-560. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.119>
- Uzonyi I., Szoor Gy., Rozsa P., Pelicon P., Simcic J., Cserhati C., Daroczi L, Kiss A. Z. (2009): Investigation of impact materials around Barringer Meteor Crater by SEM-EDX and micro-PIXE techniques. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Interactions with Materials and Atoms, 267, 12-13, 2225-2228. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.03.014>
- Valencia D., O'Connell R. J., Sasselov D. D. (2006): Internal structure of massive terrestrial planets, *Icarus*, 181, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.11.021>
- Valencia D., Sasselov D. D., O'Connell R. J. (2007): Radius and structure models of the first super-Earth planet. *The Astrophysical Journal*, 656, 545-551. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2007ApJ...656..545V/doi:10.1086/509800](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2007ApJ...656..545V/doi:10.1086/509800)
- Valencia D., Sasselov D. D., O'Connell R. J. (2007): Detailed models of super-Earths: how well can we infer bulk properties? *The Astrophysical Journal*, 665:1413-1420. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2007ApJ...665.1413V/doi:10.1086/519554](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2007ApJ...665.1413V/doi:10.1086/519554)
- Valencia D., O'Connell R. J., Sasselov D. D. (2007): Inevitability of plate tectonics on super-earths. *The Astrophysical Journal*, 670: L45-L48. DOI: 10.1086/524012
- Vieira K., Korchagin V., Carraro G., Lutsenko A. (2023): Vertical Structure of the Milky Way disk with Gaia DR3. *Galaxies*, 11, 77. <https://doi.org/10.3390/galaxies11030077>
- Wada, K., H. Tanaka, T. Suyama, H. Kimura, and T. Yamamoto (2009): Collisional Growth Conditions for Dust Aggregates, *The Astrophysical Journal*, 702(2), 1490–1501. DOI:10.1088/0004-637X/702/2/1490
- Wada, K., H. Tanaka, S. Okuzumi, H. Kobayashi, T. Suyama, H. Kimura, and T. Yamamoto (2013): Growth efficiency of dust aggregates through

- collisions with high mass ratios, *Astronomy and Astrophysics*, 559, A62. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322259>
- Wang J., Fischer D. A. (2015): Revealing a universal planet-metallicity correlation for planets of different sizes around Solar-type stars. *The Astronomical Journal*, 149, 14. DOI:10.1088/0004-6256/149/1/14
- Wang H. S., Lineweaver C.H., and Ireland T. R. (2019) The volatility trend of protosolar and terrestrial elemental abundances. *Icarus*, 328, 287 – 305. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.03.018>
- Wagner F. W., Tosi N., Sohl F., Rauer H., Spohn T. (2012): Rocky super-Earth interiors. Structure and internal dynamics of CoRoT-7b and Kepler-10b. *Astronomy & Astrophysics*, 541, A103. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118441>
- Wasson, J.T, Kallemeyn, G.W. (1988). Compositions of chondrites. *Philos. Trans.R. Soc. A, Mathematical and Physical Sciences*,325, 535–544.
- Weidenschilling, S. J., and J. N. Cuzzi (1993): Formation of planetesimals in the solar nebula, *Protostars and planets III*, pp. 1031–1060.
- Weisberg, M.K, Prinz, M, Clayton R.N, Mayeda, T.K. (1993). The CR (Renazzo-type) carbonaceous chondrite group and its implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 1567-1586.
- Wetherill G.W. (1980): Formation of the terrestrial planets. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 18, 77-113. <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.18.090180.000453>
- Wetherill, G.W., Stewart, G.R. (1989): Accumulation of a swarm of small planetesimals. *Icarus*, 77, 330-357. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(89\)90093-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(89)90093-6)
- Wolszczan A., és Frail D. A. (1992): A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355, 145 – 147. <https://doi.org/10.1038/355145a0>
- Wöhler F. (1858): Über die bestandteile des Meteorsteines von Kaba in Ungarn. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch – Naturwissenschaftliche Classe*. 33, 205 – 209.
- Wu, S. Q., Ji, M., Wang, C. Z., Nguyen, M. C., Zhao, X., Umemoto, K., Wentzcovitch, R. M., Ho, K. M., (2014): An adaptive genetic algorithm for crystal structure prediction. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 26, 035402. [doi:10.1088/0953-4089/26/35/035402](https://doi.org/10.1088/0953-4089/26/35/035402)
- Wu, H., Chen, Y., Liu, Z. J., Han, X., és Yin, P. (2023): Pressure dependent structural, dynamical, mechanical and electronic properties of

- magnesium dicarbide. *Philosophical Magazine*, 103, 369-390.  
<https://doi.org/10.1080/14786435.2022.2152121>
- Zeng L, Sasselov, D. 2013. A detailed model grid for solid planets from 0.1 to 100 Earth masses. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 125:227.
- Zhang B. H. Xia Q.-K. (2021): Influence of water on the physical properties of olivine, wadsleyite, and ringwoodite. *European Journal of Mineralogy*. 33, 39-75.

Linkek:

Hypatia-katalógus: <https://www.hypatiacatalog.com/>

NASA Exobolygó Archívum: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

NASA Exobolygó Tudományos Intézet: <https://nexsci.caltech.edu/>

NASA Exoplanet Exploration Program: <https://exoplanets.nasa.gov/exep/>

## ÁBRÁK, TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. ábra. A földköpeny fő ásványtani, és a földmag fő kémiai összetétele meghatározott nyomástartományokban, szakirodalmi források alapján: 1: Zhang és Xia 2021; 2,3: Murakami és mtsai. 2004; 4: Niu és mtsai. 2015; 5: Irifune 1994; 6: Gasparik 1981; 7: Lobanov és mtsai. 2015; 8: Nelson és mtsai. 2015; 9: CaCl<sub>2</sub>-típusú SiO<sub>2</sub>=Kingma és mtsai. 1995; 10: α-PbO<sub>2</sub>-típusú SiO<sub>2</sub> Murakami és Hirose 2003; 11: Ismaliova és mtsai. 2015; 12: Al-CaSiO<sub>3</sub> Takafuji és mtsai 2002; 13: Allegre és mtsai. 1995, McDonough és Sun 1995, Poirier 1994.

2. ábra. Magas széntartalmú bolygók (C/O>0,65) leggyakoribb szén-alapú ásványi összetevői, a különböző nyomástartományokban. 1: Kuchner és Seager, 2005; 2: Allen-Sutter és mtsai. 2020; 3: Wu és mtsai. 2023; 4: Hakim és mtsai. 2019; 5: Turkevich és mtsai. 2023. 6: Mookherjee és mtsai. 2011.

3. ábra. Az Allende szenes kondrit mátrixának Raman-spektrális tulajdonságai olivin jelenlétében (Futó és Gucsik 2017 a).

4. ábra Nagytömegű kőzetbolygók köpenyének ásványi összetétele 2,0 és 2,5 Mg/Si molarány esetén (Futó 2021 a).

5. ábra. A  $\sim 1$  földtömegű kőzetbolygók felső köpenyének ásványi összetétele 0,75 (A) és 0,25 (B) Mg/Si arányok esetében (Futó 2022).

6. ábra. 99 G-típusú csillagra jellemző C/Si arány eloszlása a szoláris referenciaértékkel megegyező és annál magasabb C/O elemarány-tartományokban. Kék szín jelzi a szoláris C/Si aránynál magasabb, narancsszín az azzal megegyező és piros szín az annál alacsonyabb C/Si arányértékek számát.

7. ábra. Vasmag nélküli (A) és vasmaggal (B) rendelkező, relatíve magas Al- és Ca-tartalmú bolygók plauzibilis ásványi összetételének sematikus ábrázolása. A C jelzésű kalciumban és alumíniumban gazdag egy földtömegű bolygó magas Mg/Si arányú protoplanetáris-korongban keletkezett. (Futó és Gucsik 2024 a). (px=piroxén; rwd=ringwoodit; wdl=wadsleyit; ol=olivin)

8. a ábra. C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, és Fe/Si (szürke vonal) elemarányok átlagai a teljes G-színképtípusú csillagmintában. A fekete vonal a szoláris referenciaértéket, a szürke vonal az elemarány átlagát jelöli. A sztelláris átlagokhoz kapcsolódó szóródás a forrásadatokban rejlő bizonytalanságból adódik (Futó és Gucsik 2025a).

8. b ábra. C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, és Fe/Si (szürke vonal) elemarányok átlagai a teljes F-színképtípusú csillagmintában. A fekete vonal a szoláris referenciaértéket, a szürke vonal az elemarány átlagát jelöli. A sztelláris átlagokhoz kapcsolódó szóródás szintén jelölve van (Futó és Gucsik 2025a).

9. a ábra. A G-típusú csillagok száma a teljes vizsgált mintában a hat elemarány szuperszoláris (kék oszlop), a Napéval azonos (üres oszlop), valamint a szubszoláris (narancssárga oszlop) tartományaiban.

9. b ábra. Az F-típusú csillagok száma a teljes vizsgált mintában a hat elemarány szuperszoláris (kék oszlop), a Napéval azonos (üres oszlop), valamint a szubszoláris (narancssárga oszlop) tartományaiban.

10. ábra. G-színképtípusú csillagok. Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemarányok a -C/O,+Mg/Si; +C/O; -Mg/Si; +C/O; +Mg/Si and -C/O; -Mg/Si tartományokban. A – és + jelek a szub- illetve szuperszoláris tartományt jelentik. A kék oszlopok jelölik a szuperszoláris, rózsaszín a szolárisal egyenértékű, míg piros a szolárisnál alacsonyabb elemarány átlagértékeket. (Futó és Gucsik 2025a).

11. ábra. F-színképtípusú csillagok. Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemarányok a  $-C/O, +Mg/Si; +C/O; -Mg/Si; +C/O; +Mg/Si$  and  $-C/O; -Mg/Si$  tartományokban. A – és + jelek a szub- illetve szuperszoláris tartományt jelentik. A kék oszlopok jelölik a szuperszoláris, rózsaszín a szolárisal egyenértékű, míg piros a szolárisnál alacsonyabb elemarány átlagértékeket. (Futó és Gucsik 2025a).

12. ábra Bolygóval rendelkező G-típusú csillagok elemarányátlagai a teljes illetve a  $C/O < 0,65$  tartományokban. (Futó és Gucsik 2025 a)

13. ábra. Bolygóval rendelkező F-típusú csillagok elemarányátlagai a teljes illetve a  $C/O < 0,65$  tartományokban. (Futó és mtsai 2025 a)

14. a ábra. Az ismert, bolygót hordozó G-típusú csillagok száma a hat vizsgált elemarány szuperszoláris, a Napéval azonos, valamint a szubszoláris tartományaiban.

14. b ábra. Az ismert, bolygót hordozó F-típusú csillagok száma a hat vizsgált elemarány szuperszoláris, a Napéval azonos, valamint a szubszoláris tartományaiban.

15. ábra. A 6 vizsgált elemarány szuperszoláris, a szolárishoz hasonló, valamint a szoláris értékeinek relatív gyakorisága a 32 Nappal megegyező színképtípusú csillag esetében.

16. ábra. A kőzetbolygók köpenyének potenciális fő ásványtani összetétele a C/O és Mg/Si arány függvényében, kilenc ásványtani szempontból elkülönülő tartományban.

17. ábra. Föld-méretű kőzetbolygók belső ásványtani felépítésének sematikus modelljei különböző elemarányok mellett: alacsony Mg/Si arány ( $Mg/Si < 1$ ) (a), mérsékelt Mg/Si arány ( $1 \leq Mg/Si \leq 2$ ) (b), magas Mg/Si arány ( $Mg/Si > 2$ ) (c), valamint szénben gazdag összetétel ( $C/O \geq 0,65-1$ ) (d) esetén (Futó és Gucsik 2025 a alapján kiegészítéssel).

18. a ábra. A teljes vizsgált C/O spektrum G- és F-típusú csillagainak relatív gyakorisági eloszlása a C/O és Mg/Si arányok függvényében meghatározott (a 16. ábrához kapcsolódó) tartományokban.

18. b ábra. A G- és F-típusú csillagok gyakorisági eloszlása a kilenc meghatározott ásványtani tartomány szerint; az ábra az adatok mellett a tartományok megnevezéseit is tartalmazza.

### **Számítási formulák**

- (1) Az elemarányok kiszámításának módja.
- (2) A populációs szórás számításának módja.
- (3) Az átlag számításának módja.

### **Táblázatok jegyzéke**

1. táblázat. A főbb elemek kondenzációs sorozata a Naprendszerre jellemző átlagos kémiai összetétel, valamint a Nap fotoszférájának elemi kompozíciója alapján. A Naprendszer általános összetételét magasabb fémességtartalom, így kissé magasabb kondenzációs hőmérsékletek jellemzik (Lodders, 2003).

2. táblázat A BSE elemösszetételek szakirodalomból származó adatai súlyszázalékban. (A95: Allégre és mtsai. 1995; LK07: Lyubetskaya és Korenaga, 2007; HZ86: Hart és Zindler, 1986; MS95: McDonough és Sun, 1995; J10: Javoy és mtsai, 2010; PO03: Palme és O'Neill, 2003).

3. táblázat. Pirolitos földmodellek alsó-köpenyre vonatkoztatott ásványtani kompozíciója.

4. táblázat A szoláris elemarányok molban kifejezett értékei (saját készítésű táblázat. A referenciaértékek Asplund és mtsai. 2005 adatai alapján.)

5. táblázat. Különböző típusú meteoritokra és ásványi komponenseikre, valamint meteorit csoportokra jellemző Mg/Fe elemarányok számított értékei. A számításhoz felhasznált adatok forrásai: Gucsik és mtsai. (2013) (G13); Sztrókay és mtsai. (1961) (Sz61); Wasson és Kallemeyn (1988) (WK88); és Weissberg és mtsai. (1993) (W93). A számított adatok forrásai: Futó és Gucsik (2013); Futó és mtsai. (2021).

6. táblázat Az egyes elemarányok eloszlásához tartozó szórásértékek relatíve alacsony értékei: a teljes C/O spektrum G- és F-színképtípusú csillagainak mintáiban.

7. táblázat. A Naptól számított 50 parszekes távolságon belül található G- és F-színképtípusú csillagokra jellemző, a szoláris értéknél alacsonyabb, azzal megegyező, illetve azt meghaladó releváns elemarányok (pl. C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si Na/Si, Fe/Si) relatív gyakorisági eloszlása.

8. táblázat. Az egyes elemarányok eloszlásához tartozó szórásértékek relatíve alacsony értékei a bolygókísérővel rendelkező G- és F-típusú csillagok populációjában.

9. táblázat. A Naptól számított 50 parszekes távolságon belül található G- és F-színképtípusú bolygókísérővel rendelkező csillagokra jellemző, a szoláris értéknél alacsonyabb, azzal megegyező, illetve azt meghaladó releváns elemarányok (pl. Mg/Si, Fe/Si) relatív gyakorisági eloszlása.

10. táblázat A szoláris referenciaértéktől való eltérést mutató csillagok relatív gyakorisági arányai a G- és F-típusú, teljes C/O spektrumhoz tartozó, illetve az exo-bolygós csillagmintákban a C/O-Mg/Si elemaránykombináció egyik, illetve mindkét komponensére vonatkozóan.

11. táblázat. A szoláris referenciaértéktől való jelentős eltérést mutató csillagok relatív gyakorisági arányai a G- és F-csillagmintákban az Mg/Si-Fe/Si elemaránykombináció egyik, illetve mindkét komponensére vonatkozóan.

## MELLÉKLETEK

A csillagok HIP katalógusszámmal és parszekben kifejezett Naptól számított távolságadatokkal szerepelnek az adattáblázatokban.

1. Melléklet. A Naptól 30 parszek távolságon belül elhelyezkedő G-típusú csillagok S/Fe és C/O-C/Si elemarányainak molban kifejezett értékei. Szoláris referenciaértékek: S/Fe =0.4897788; C/O=0.54; C/Si=7.58578

G-csillagok	S/Fe	G-csillagok	C/O	C/Si
HIP 71683/1.35	0.513	71683/1.35	0.56	8.318
HIP 114699/29.19	0.513	114699/29.19	0.49	7.063
HIP 24608/13.12	2.692	71735/25.67	0.61	413
HIP 116819/26.26	0.275	116819/26.26	0.33	6.31
HIP 57443/9.29	0.0480	57443/9.29	0.49	10.001
HIP 88194/28.25	0.394	88194/28.25	0.49	7.568
HIP 94346/20.21	0.660	94346/20.21	1.31	8.414
HIP 24813/12.48	0.398	14501/32.00	0.48	9.11
HIP 88348/22.00	0.214	171/12.64	1.14	10.619
HIP 75829/21.82	0.537	65721/17.90	0.51	8.894
HIP 80218/26.90	0.48	24813/12.48	0.59	8.035
HIP 62523/17.09	0.495	88348/22.00	0.62	8.71
HIP 71743/23.74	0.272	14623/29.44	0.54	7.764

HIP 18844/25.95	0.486	8486/23.65	0.50	8.51
HIP 115126/22.26	0.776	75829/21.82	0.57	7.414
HIP 53721/13.80	0.389	80218/26.90	0.50	7.772
HIP 10723/22.99	0.442	62523/17.09	0.55	6.026
HIP 113137/26.69	0.385	104809/29.93	0.60	9.66
HIP 41484/21.97	0.501	71743/23.74	0.31	10.000
HIP 544/13.77	0.543	18844/25.95	0.54	8.347
HIP 55846/18.20	0.537	106913/26.28	0.58	7.412
HIP 10798/12.83	0.759	80337/12.90	0.61	10.352
HIP 1803/21.30	0.384	53721/13.80	0.66	9.773
HIP 29271/10.21	0.447	10723/22.99	0.50	7.764
HIP 98921/19.05	0.617	41484/21.97	0.53	8.318
HIP 83389/18.28	0.543	544/13.77	0.71	10.233
HIP 96895/21.14	0.422	55846/18.20	0.61	6.761
HIP 19076/16.89	0.432	10798/12.83	0.55	10.465
HIP 96901/21.14	0.425	1803/21.30	0.61	7.039
HIP 98959/17.91	0.468	39506/29.80	0.63	15.668
HIP 669/27.32	0.391	29271/10.21	0.65	9.408
HIP 70319/17.43	0.602	100963/28.14	0.53	7.621
HIP 80331/28.23	1.318	98921/19.01	0.47	6.457
HIP 113357/15.46	0.472	83389/18.28	0.66	10.968
HIP 43726/16.84	0.447	96895/21.14	0.56	7.781
HIP 105184/23.82	0.457	19076/16.89	0.46	7.162
HIP 37606/22.46	0.537	96901/21.14	0.59	7.942
HIP 86974/8.39	0.562	98959/17.91	0.54	8.590
HIP 84720/8.80	1.202	669/27.32	0.52	7.58578
HIP 88945/24.40	0.479	70319/17.43	0.45	8.412
HIP 29432/24.34	0.472	80331/28.23	0.25	2.138
HIP 33537/24.89	0.339	113357/15.46	0.59	7.7
HIP 74500/26.18	0.447	43726/16.84	0.57	7.58578
HIP 94981/25.20	0.427	105184/23.82	0.50	7.104
HIP 86796/15.60	0.394	37606/22.46	0.46	7.595
HIP 113421/20.06	0.421	86974/8.39	0.60	7.58578
HIP 15131/24.54	0.539	84720/8.80	0.75	13.646
HIP 24735/15.25	0.4897788	88945/24.40	0.49	8.71
HIP 92984/26.60	0.519	29432/24.34	0.53	7.58578
HIP 11072/22.67	0.519	33537/24.89	0.45	10.116
HIP 109378/21.30	0.602	74500/26.18	0.66	8.913
HIP 89912/29.01	0.420	94981/25.20	0.65	8.223
HIP 29525/18.64	0.525	86796/15.60	0.60	8.319
HIP 105312/18.24	0.822	113421/20.06	0.70	7.58578
HIP 39780/23.59	0.484	15131/24.54	0.36	8.492
HIP 78709/22.04	0.537	19233/23.53	0.73	11.35
HIP 29568/16.73	0.457	45859/29.18	0.53	6.918
HIP 54155/26.22	0.389	27435/15.25	0.49	8.318
HIP 78738/27.82	0.398	11072/22.67	0.48	9.12
HIP 64408/20.28	0.468	109378/21.30	0.59	8.512
HIP 72659/6.71	0.466	29525/18.64	0.48	7.852
HIP 99240/6.09	0.423	105312/18.24	0.70	13.182
HIP 95149/19.88	0.452	39780/23.59	0.70	10.122
HIP 60370/26.02	0.330	78709/22.04	0.39	6.92
HIP 57507/17.73	0.661	29568/16.73	0.58	7.763
HIP 101345/24.75	0.460	54155/26.22	0.52	7.945
HIP 15330/12.04	0.422	64408/20.28	0.58	7.405
HIP 64550/25.03	0.418	72659/6.71	0.45	8.512
HIP 85042/19.65	0.436	99240/6.09	0.61	7.675
HIP 86540/29.99	0.347	95149/19.88	0.43	7.58578
HIP 68682/16.43	0.871	60370/26.02	0.60	7.621
HIP 87116/26.83	1.624	57507/17.73	0.46	7.58578
HIP 15442/23.98	0.46	31711/20.91	0.66	11.752

HIP 15457/9.14	0.225	101345/24.75	0.63	9.016
HIP 78955/27.52	0.337	15330/12.04	0.52	9.57
HIP107649/15.55	0.427	93185/23.95	0.42	7.415
HIP 3203/26.50	0.497	64550/25.03	0.71	17.279
HIP 4290/29.89	0.283	7235/19.26	0.49	7.5
HIP 113989/29.64	2.138	86540/29.99	0.54	8.61
HIP 52369/23.89	0.359	68682/16.43	0.75	10.233
HIP 113829/24.30	0.417	87116/26.83	0.54	7.078
HIP 7339/21.04	0.380	15442/23.98	0.50	7.871
HIP 42173/25.85	0.442	15457/9.14	0.47	7.078
HIP 70857/19.69	0.562	78955/27.52	0.57	6.383
HIP 58576/12.69	0.804	7276/29.71	0.57	7.58578
HIP 70873/23.36	0.457	107649/15.55	0.47	6.605
HIP 38784/17.14	0.589	38018/29.11	0.58	8.61
HIP 103682/27.11	0.405	3203/26.50	0.50	7.465
HIP 95447/14.95	0.716	113989/29.64	0.24	5.333
HIP 1292/17.56	0.422	52369/23.89	0.47	7.00
HIP 54541/29.43	0.813	7339/21.04	0.59	7.675
HIP 23835/15.88	0.567	40118/21.57	0.54	13.338
HIP 116613/22.83	0.389	42173/25.85	0.50	6.025
HIP 23852/27.57	0.484	70857/19.69	0.77	9.66
HIP 60729/26.82	0.468	58576/12.69	0.57	7.67
HIP 50505/20.24	0.457	70873/23.36	0.68	8.035
HIP 38228/22.40	0.708	38784/17.14	0.57	8.61
HIP 64150/26.36	0.431	103682/27.11	0.71	7.414
HIP 36210/22.47	0.525	95447/14.95	0.66	7.675
HIP 89474/23.30	0.407	1292/17.56	0.57	7.718
HIP 74653/26.79	0.473	54541/29.43	0.76	8.128
HIP 19855/22.09	0.519	23835/15.88	0.39	9.00
HIP 118162/23.97	0.646	23852/27.57	0.57	10.593
HIP 36249/29.24	0.933	91438/13.04	0.49	7.852
HIP 64924/8.50	0.51	60729/26.82	0.57	8.514
HIP 12186/25.39	0.347	38228/22.40	0.79	6.324
HIP 7585/25.45	0.533	64150/26.36	0.55	8.64
HIP 28066/27.49	0.558	36210/22.47	0.57	7.834
HIP 54704/22.08	0.601	107070/27.23	0.43	7.5
HIP 79607/21.69	1.122	89474/23.30	0.45	7.08
HIP 36285/29.10	0.371	74653/26.79	0.58	7.21
HIP 42430/19.40	0.767	19855/22.09	0.36	5.129
HIP 112491/27.39	0.708	5521/27.08	0.42	7.328
HIP 77052/14.76	0.449	118162/23.97	0.62	7.078
HIP 3583/14.99	0.4897788	30104/26.02	0.58	7.944
HIP 118278/26.20	0.816	36249/29.24	0.61	7.674
HIP 73241/23.75	0.506	64924/8.50	0.45	7.5
HIP 77358/15.25	0.379	12186/25.39	0.64	8.242
HIP 1598/24.70	0.123	7585/25.45	0.52	7.482
HIP 75363/26.90	0.668	28066/27.49	0.44	8.712
HIP 9829/23.79	0.661	54704/22.08	0.46	8.128
HIP 30314/23.87	1.82	42430/19.40	0.70	7.675
HIP101997/14.67	0.575	79777/28.89	0.47	4.266
HIP 51819/21.13	0.741	54745/22.64	0.84	6.761
HIP 16012/28.98	0.491	112491/27.39	0.54	7.244
HIP 56997/9.58	0.562	77052/14.76	0.47	6.427
HIP 18097/29.87	0.347	3583/14.99	0.62	10.00
HIP 79578/22.20	0.471	118278/16.20	0.49	7.476
HIP 55013/27.14	0.619	73241/23.75	0.59	8.803
HIP 50921/21.95	0.481	77358/15.25	0.54	7.5
HIP 7918/13.06	0.389	1598/24.70	0.49	9.12
HIP 40693/12.56	0.496	75363/26.90	0.45	7.58578
HIP 22263/13.24	0.398	9829/23.79	0.45	7.162

HIP 34567/25.18	1.259	30314/23.87	0.38	5.889
HIP 30476/27.85	0.472	101997/14.67	0.55	8.413
HIP 93966/21.34	0.562	16012/28.98	0.54	7.5
HIP 114456/23.54	0.851	102040/20.89	0.45	7.58578
HIP 81693/10.72	0.543	36515/21.76	0.58	8.846
HIP 69414/21.82	0.61	112245/25.12	0.47	6.926
HIP 85810/24.21	0.442	79578/22.20	0.56	8.3
HIP 79672/14.12	0.060	55013/27.14	0.66	8.194
HIP 22336/26.16	0.339	50921/21.95	0.45	6.919
HIP 94020/29.61	0.295	7918/13.06	0.52	7.6
HIP 14150/21.19	0.531	40693/12.56	0.63	8.71
HIP 73547/26.27	0.457	22263/13.24	0.44	7.08
HIP 81746/27.77	0.474	30476/27.85	0.53	8.71
HIP 18267/20.48	1.023	93966/21.34	0.93	8.414
HIP 116584/24.16	1.778	98066/23.40	0.67	7.482
HIP104733/27.20	0.468	114456/23.54	0.92	5.559
HIP 3979/22.47	0.470	81693/10.72	0.38	6.434
HIP 59280/25.09	0.653	69414/21.82	0.49	7.328
HIP 78217/29.59	0.4897788	30503/21.95	0.54	6.722
HIP 1954/28.33	0.429	85810/24.21	0.63	8.813
HIP 8102/3.60	0.629	79672/14.12	0.52	7.482
HIP 55210/22.14	0.403	22336/26.16	0.54	6.368
HIP 49081/14.92	0.316	94020/29.61	0.18	4.677
HIP 61379/28.47	0.372	14150/21.19	0.93	9.12
HIP 93858/16.92	0.459	73547/26.27	0.66	8.8
HIP 85667/16.34	0.832	81746/27.77	0.53	7.945
HIP 47080/11.20	0.609	8267/20.48	0.90	8.13
HIP 18413/22.71	1.035	116584/24.16	0.46	12.445
HIP 40952/29.28	0.446	3979/22.47	0.41	7.079
HIP 65530/20.90	0.531	59280/25.09	0.53	6.841
HIP 60074/27.45	0.331	1954/28.33	0.60	7.943
		8102/3.60	0.50	11.015
		55210/22.14	0.52	8.251
		49081/14.92	0.69	7.00
		61379/28.47	0.68	7.763
		93858/16.92	0.57	8.317
		1499/23.45	0.62	7.763
		47080/11.20	0.71	7.08
		40952/29.28	0.55	8.035
		65530/20.90	1.05	10.235
		60074/27.45	0.41	7.853

2. Melléklet. A Naptól 30 parszek távolságon belül a teljes vizsgált spektrumban található G-típusú csillagok elemarányainak molban kifejezett értékei. A Pb a 0,65 alatti, míg a B jelzés a 0,65 feletti C/O arányú bolygós csillagokat jelöli. Szoláris referenciaértékek: Ca/Si=0.0631; Al/Si=0.0724; Ca/Mg=0.060256; Al/Mg=0.069183; O/Si=14.125

G-típusú csillagok	Ca/Si	Al/Si	Ca/Mg	Al/Mg	O/Si
pb 114699/29.35	0.068	0.092	0.054	0.079	16.6
116819/27.08	0.076	0.093	0.067	0.082	19.05
pb 57443/9.22	0.059	0.093	0.054	0.085	9.55
pb 88194/28.35	0.068	0.089	0.06	0.078	15.45
8486/22.44	0.079	0.069	0.07	0.062	17.18
80218/27.56	0.062	0.095	0.057	0.085	15.15

71743/23.74	0.0631	0.076	0.064	0.077	18.4
10723/24.35	0.068	0.086	0.064	0.081	15.67
98921/19.01	0.069	0.083	0.071	0.085	12.88
19076/16.89	0.079	0.085	0.076	0.081	15.48
70319/17.19	0.074	0.081	0.048	0.066	18.62
80331/28.23	0.0631	0.078	0.060256	0.074	10.96
105184/24.42	0.069	0.081	0.059	0.069183	14.125
37606/24.67	0.05	0.062	0.055	0.091	16.62
88945/24.82	0.089	0.066	0.066	0.076	17.78
33537/24.63	0.071	0.100	0.051	0.072	22.65
15131/24.54	0.059	0.075	0.047	0.06	25.12
27435/15.18	0.072	0.079	0.060256	0.068	15.85
11072/21.95	0.062	0.081	0.054	0.071	19.05
29525/17.95	0.079	0.091	0.062	0.079	16.6
78709/22.21	0.065	0.085	0.059	0.078	17.38
72659/6.71	0.076	0.080	0.072	0.078	18.2
95149/18.82	0.068	0.071	0.047	0.049	17.78
57507/17.47	0.068	0.095	0.056	0.079	17.78
93185/23.84	0.065	0.074	0.058	0.066	16.22
7235/19.05	0.066	0.059	0.071	0.063	15.31
15442/25.21	0.069	0.078	0.060256	0.068	14.45
15457/9.14	0.078	0.081	0.072	0.076	14.79
107649/15.99	0.069	0.079	0.062	0.071	14.125
3203/26.49	0.072	0.079	0.065	0.071	15.85
113989/29.54	0.060	0.107	0.047	0.083	17.78
52369/23.82	0.069	0.078	0.059	0.066	14.125
42173/25.85	0.076	<b>0.110</b>	0.062	0.089	12.02
23835/15.43	0.066	0.102	0.052	0.081	23.45
91438/13.04	0.066	0.085	0.058	0.074	16.6
107070/26.93	0.072	0.077	0.062	0.066	17.38
Pb 89474/22.82	0.0631	0.087	0.058	0.079	13.49
19855/21.05	0.066	0.074	0.062	0.079	14.125
5521/27.06	0.066	0.063	0.071	0.068	20.42
pb 64924/8.56	0.068	0.095	0.055	0.078	15.49
28066/26.59	0.065	0.105	0.046	0.074	19.05
54704/22.14	0.065	0.105	0.05	0.081	16.6
79777/28.64	0.059	0.078	0.059	0.078	9.18
77052/14.66	0.069	0.083	0.058	0.069183	13.81
118278/25.08	0.0631	0.098	0.054	0.083	15.85
1598/24.79	<b>0.098</b>	0.105	0.066	0.074	18.62
75363/28.54	0.068	0.093	0.059	0.081	16.98
9829/22.77	0.069	0.091	0.051	0.066	15.86
102040/20.94	0.055	0.087	0.060256	0.072	16.59
112245/25.14	0.060	0.0724	0.059	0.071	14.79
pb 50921/22.35	0.068	0.089	0.055	0.072	15.49
22263/13.28	0.072	0.078	0.065	0.069183	16.22
81693/10.72	0.066	0.098	0.049	0.069	17.12
69414/22.05	0.0631	0.095	0.055	0.083	12.88
94020/28.73	0.087	0.078	0.065	0.071	25.71
116584/26.41	0.066	0.083	0.05	0.158	27.54
3979/21.51	0.068	0.074	0.059	0.065	16.6
8102/3.65 pb	0.060	0.102	0.081	0.076	24.5
60074/27.45	0.079	0.068	0.079	0.068	18.62
<b>Átlag:</b>	<b>0.0686</b>	<b>0.0845</b>	<b>0.0598</b>	<b>0.0765</b>	<b>16.26</b>

3. Melléklet. A Naptól 30 parszek távolságon belül a teljes vizsgált spektrumban található F-típusú csillagok elemarányainak molban kifejezett

értékei. Szoláris referenciaértékek: Ca/Si=0.0631; Al/Si=0.0724;  
Ca/Mg=0.060256; Al/Mg=0.069183; O/Si=14.125

F-típusú csillagok	Ca/Si	Al/Si	Ca/Mg	Al/Mg	O/Si
HIP116771/13.71	0.071	0.0724	0.058	0.059	17.38
HIP10306/28.87	0.066	0.078	0.065	0.076	16.98
HIP69701/22.24	0.066	0.076	0.058	0.072	22.91
HIP32851/29.68	0.060	0.079	0.048	0.063	20.89
HIP88175/23.55	0.066	0.095	0.065	0.093	56.23
HIP77952/12.38	0.078	0.105	0.085	1.05	35.48
HIP12444/21.76	0.072	0.071	0.072	0.068	15.49
HIP96441/18.43	0.072	0.048	0.076	0.05	38.9
HIP73941/29.83	0.074	0.078	0.076	0.079	15.85
HIP114924/20.50	0.069	0.083	0.066	0.079	15.49
HIP8433/27.85	0.074	0.076	0.056	0.062	19.95
HIP78072/11.25	0.065	0.076	0.054	0.063	18.63
HIP114948/20.54	0.068	0.047	0.063	0.044	17.38
HIP73996/19.55	0.071	0.081	0.072	0.083	37.15
HIP71957/18.27	0.081	0.079	0.066	0.065	26.3
HIP112935/27.28	0.058	0.065	0.051	0.058	21.88
HIP114996/23.05	0.058	0.058	0.052	0.052	53.7
HIP43410/28.35	0.074	0.062	0.072	0.06	15.85
HIP18859/18.76	0.071	0.107	0.060256	0.091	15.85
HIP68030/24.45	0.060	0.052	0.051	0.045	21.38
HIP27072/8.93	0.068	0.079	0.068	0.079	17.78
HIP47592/15.01	0.064	0.059	0.052	0.049	18.22
HIP12777/11.13	0.071	0.069	0.066	0.065	17.38
HIP14879/14.24	0.061	0.078	0.049	0.062	22.91
HIP12843/14.21	0.079	0.105	0.096	0.126	23.44
HIP109176/11.73	0.087	0.059	0.069	0.047	26.92
HIP2711/25.48	0.071	0.076	0.065	0.06	16.79
HIP25278/14.58	0.065	0.074	0.063	0.072	14.46
HIP86736/17.65	0.062	<b>0.166</b>	0.047	0.126	16.22
HIP51933/25.07	0.071	0.087	0.062	0.076	17.78
HIP43797/24.15	0.065	0.120	0.049	0.091	13.8
HIP109422/18.28	0.072	0.049	0.081	0.055	21.38
HIP112447/16.30	0.062	0.081	0.051	0.068	14.79
HIP9085/26.86	0.068	0.089	0.065	0.085	16.98
HIP19335/20.99	0.066	0.120	0.051	0.093	9.55
HIP910/18.74	0.068	0.071	0.059	0.062	16.22
HIP82860/15.25	0.069	0.066	0.069	0.066	17.78
HIP29650/20.81	0.078	0.069	<b>0.1</b>	0.089	18.2
HIP15323/26.67	0.069	0.069	0.063	0.063	15.85
HIP39903/19.91	0.052	0.076	0.063	0.091	17.38
HIP64583/18.20	0.066	0.079	0.049	0.072	21.88
HIP113860/29.40	0.074	0.100	0.066	0.089	35.48
HIP50384/22.80	0.071	0.069	0.056	0.055	16.22
HIP74975/25.38	0.078	0.071	0.071	0.065	16.6
HIP99572/27.70	0.0631	0.054	0.059	0.05	15.85
HIP103673/28.01	0.074	0.076	0.078	0.079	24.55
HIP89348/22.92	0.072	0.062	0.068	0.058	18.2
HIP40843/18.27	0.062	0.066	0.059	0.062	17.78
HIP97650/27.87	0.071	0.148	0.062	0.141	50.11
HIP23941/25.46	0.0631	0.078	0.051	0.063	18.62
HIP116106/26.11	0.076	0.0724	0.063	0.060	17.78
HIP73100/25.11	0.076	0.074	0.072	0.071	13.49
HIP107975/27.45	0.06	0.068	0.054	0.06	24.57

HIP56802/26.73	0.060	0.069	0.051	0.058	26.91
HIP108036/26.61	0.081	0.148	0.078	0.141	40.74
HIP67153/19.40	<b>0.096</b>	0.110	0.068	0.078	45.71
HIP32366/24.38	0.060	0.056	0.043	0.04	20.89
HIP5799/23.38	0.065	0.074	0.058	0.066	18.2
HIP32439/17.87	0.059	0.068	0.063	0.065	18.2
HIP84893/17.35	0.068	0.0724	0.059	0.063	33.11
HIP46853/13.48	0.078	0.063	0.076	0.049	23.99
HIP24332/26.11	0.065	0.071	0.052	0.058	21.38
HIP36640/27.91	0.066	0.060	0.054	0.049	23.44
HIP89937/8.06	0.06	0.048	0.044	0.035	19.95
HIP71530/27.89	0.062	0.076	0.048	0.059	20.9
HIP81800/29.31	0.066	0.061	0.066	0.061	15.74
HIP22449/8.07	0.062	0.0724	0.054	0.063	20.42
HIP28634/28.61	0.068	0.078	0.062	0.071	19.05
HIP32765/25.26	0.078	0.079	0.068	0.069183	22.91
<b>Átlag:</b>	<b>0.0695</b>	<b>0.0777</b>	<b>0.0624</b>	<b>0.08529</b>	<b>22.586</b>

4. Melléklet. A Naptól 50 parszek távolságon belül a teljes vizsgált spektrumban található G-típusú csillagok elemarányainak molban kifejezett értékei. A Pb a 0,65 alatti, míg a B jelzés a 0,65 feletti C/O arányú bolygós csillagokat jelöli. Szoláris referenciaértékek: Mg/Si=1.05; C/O=0.54; Ca/Si=0.0631; Al/Si=0.0724; Na/Si=0.0457; Fe/Si=0.87

G-típusú csillagok	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Pb 71683/1.35	0.55	1.23	0.059	0.089	0.068	0.87
96265/49.78	0.55	0.97	0.049	0.072	0.047	-
Pb114699/29.19	0.49	1.23	0.068	0.092	0.046	0.78
10276/34.16	0.40	1.06	0.067	0.066	0.033	0.87
Pb 10278/43.47	0.58	1.1	0.062	0.085	0.058	0.84
B 60081/49.42	0.65	1.1	0.061	0.092	0.069	0.86
22576/30.10	0.49	0.95	0.059	0.071	0.053	0.89
5389/48.34	0.12	1.02	0.052	0.078	0.047	0.88
6197/48.90	0.55	1.00	0.059	0.077	0.053	0.92
71735/25.67	0.61	1.29	0.065	0.090	0.050	0.77
51257/34.07	0.68	1.05	0.044	0.082	0.075	0.73
6206/39.15	0.39	0.92	0.048	0.067	0.039	0.88
34879/36.44	0.71	1.16	0.060	0.084	0.066	0.81
61505/48.02	0.52	1.23	0.053	0.091	0.047	0.71
55363/34.51	0.5	1.08	0.058	0.073	0.054	0.83
22596/32.36	0.39	1.22	0.050	0.090	0.038	0.56
67655/34.22	0.35	1.23	0.052	0.092	0.038	0.54
16460/48.89	0.35	1.05	0.054	0.086	0.054	0.78
B 96334/38.14	0.65	1.25	0.060	0.069	0.047	0.79
10322/41.18	0.32	1.43	0.065	0.110	0.040	-
116819/26.26	0.33	1.11	0.074	0.089	0.048	0.87
36948/36.45	0.61	1.11	0.072	0.069	0.040	0.92
Pb 57443/9.29	0.49	0.94	0.059	0.093	0.050	0.72
1382/36.16	0.51	1.1	0.067	0.078	0.053	0.88
114790/30.59	0.58	1.15	0.065	0.084	0.056	0.77
24679/48.72	0.33	1.18	0.060	0.097	0.037	0.55
26737/34.95	0.69	1.09	0.067	0.079	0.050	0.82
116852/44.24	0.69	1.19	0.064	0.087	0.056	0.83
63608/32.70	0.23	0.98	0.054	0.083	0.075	0.73
102521/36.85	0.36	1.18	0.059	0.082	0.047	0.82

12411/40.44	0.43	1.19	0.065	0.092	0.051	0.80
Pb 88194/28.25	0.49	1.11	0.066	0.087	0.050	0.90
72043/41.95	0.54	1.26	0.065	0.084	0.055	0.89
94346/20.21	1.30	0.93	0.066	0.082	0.052	0.91
56343/34.93	0.43	1.21	0.064	0.088	0.101	0.87
59532/34.47	0.55	1.12	0.064	0.090	0.061	0.88
Pb 73869/45.86	0.55	0.88	0.064	0.057	0.043	1.07
100500/48.83	0.74	1.25	0.065	0.087	0.055	1.18
88217/45.38	0.77	1.12	0.066	0.094	0.059	1.07
20638/43.85	0.39	1.40	0.059	0.091	0.042	0.55
84636/42.73	0.90	1.15	0.057	0.088	0.079	0.88
55459/41.20	0.39	1.24	0.068	0.089	0.055	1.01
Pb 14501/32.00	0.48	1.36	0.065	0.101	0.056	0.84
Pb116906/42.16	0.54	1.22	0.066	0.09	0.054	0.88
171/12.64	1.05	1.37	0.057	0.087	0.037	0.52
59572/32.26	0.69	0.81	0.079	0.091	0.077	1.11
Pb 65721/17.90	0.51	1.58	0.070	0.097	0.048	0.89
39102/49.05	0.49	1.01	0.055	0.074	0.048	0.88
55487/47.71	0.39	0.88	0.055	0.065	0.039	0.82
B 14530/41.83	0.74	1.10	0.065	0.092	0.063	0.87
20677/44.23	0.35	1.30	0.060	0.089	0.047	0.58
49350/31.27	0.49	0.85	0.074	0.068	0.047	1.00
116937/37.85	0.56	1.06	0.065	0.080	0.050	0.87
8398/44.38	0.75	1.12	0.050	0.074	0.061	0.88
26834/30.06	0.66	1.00	0.051	0.079	0.064	0.77
105066/40.01	0.66	1.07	0.066	0.082	0.059	0.85
41184/36.85	0.41	1.06	0.083	0.076	0.048	1.01
28902/31.36	0.41	0.89	0.066	0.058	0.034	0.87
Pb 70695/37.65	0.57	1.11	0.063	0.090	0.056	0.80
24813/12.48	0.57	1.11	0.067	0.088	0.055	0.90
Pb20723/39.38	0.64	1.12	0.058	0.091	0.065	0.85
116984/45.82	0.77	1.15	0.067	0.065	0.040	0.97
110843/37.12	0.66	1.06	0.052	0.087	0.061	0.88
20741/45.88	0.57	1.10	0.072	0.074	0.047	0.93
B 65808/32.35	0.66	1.11	0.059	0.091	0.060	0.91
14614/39.91	0.54	1.22	0.070	0.090	0.055	0.97
113231/36.02	0.65	1.12	0.066	0.089	0.049	0.77
Pb 88348/22.00	0.62	1.07	0.065	0.098	0.046	0.81
95962/33.35	0.63	1.11	0.065	0.080	0.056	0.88
14623/29.44	0.54	1.12	0.058	0.049	0.058	1.02
43297/30.33	0.50	1.24	0.067	0.083	0.054	1.01
8486/23.65	0.50	1.10	0.077	0.066	0.040	0.95
43304/32.20	0.43	1.37	0.075	0.122	0.052	0.89
4393/41.27	0.69	1.58	0.066	0.101	0.072	0.75
8498/47.91	0.35	1.06	0.058	0.082	0.048	0.80
37171/50.00	0.73	0.95	0.052	0.088	0.077	0.87
6455/37.68	0.54	1.12	0.048	0.054	0.034	0.88
98621/41.00	0.40	1.17	0.065	0.088	0.054	0.81
87710/43.66	0.66	0.79	0.060	0.074	0.080	1.48
75829/21.82	0.57	1.10	0.070	0.064	0.042	0.83
20800/30.25	0.70	1.12	0.050	0.072	0.058	0.72
35145/48.58	0.52	1.03	0.063	0.074	0.042	0.82
117066/39.85	0.58	1.11	0.067	0.075	0.054	0.89
8525/42.46	0.54	0.97	0.066	0.082	0.061	0.87
76114/30.01	0.55	1.21	0.065	0.083	0.054	0.89
16727/45.80	0.58	1.14	0.059	0.124	0.060	0.88
Pb 78169/35.53	0.55	1.15	0.068	0.072	0.051	0.94
80218/26.90	0.50	1.08	0.060	0.092	0.056	0.79
14684/38.66	0.62	1.06	0.070	0.072	0.041	0.90
Pb 45406/48.95	0.63	1.01	0.060	0.076	0.056	0.87

62523/17.09	0.55	1.16	0.067	0.082	0.046	0.89
41317/39.23	0.57	1.22	0.067	0.090	0.050	0.88
10599/36.91	0.75	1.26	0.057	0.107	0.103	0.87
104809/29.93	0.58	0.92	0.066	0.065	0.049	0.99
98964/41.97	0.68	1.20	0.043	0.088	0.039	0.70
Pb80250/40.43	0.15	0.93	0.054	0.085	0.063	0.93
71743/23.74	0.29	0.98	0.061	0.076	0.050	1.10
39298/44.72	0.66	1.20	0.056	0.095	0.060	0.88
74417/49.72	0.45	0.96	0.067	0.075	0.049	0.82
102791/35.27	0.35	1.22	0.072	0.052	0.039	1.17
35209/41.74	0.57	1.05	0.072	0.075	0.048	0.91
407/44.18	0.32	1.06	0.057	0.074	0.050	0.88
20890/48.41	0.62	1.05	0.066	0.075	0.052	0.88
18844/25.95	0.54	1.26	0.066	0.086	0.056	0.89
106913/26.28	0.58	1.06	0.067	0.068	0.045	0.90
39330/36.40	0.47	1.24	0.060	0.086	0.054	0.88
20899/46.60	0.50	1.11	0.066	0.087	0.062	0.88
76200/36.13	0.66	1.07	0.065	0.082	0.059	0.89
6575/33.04	0.43	1.00	0.063	0.063	0.036	0.77
108774/33.99	0.30	0.93	0.069	0.063	0.045	0.89
27058/37.83	0.44	1.24	0.069	0.082	0.047	0.91
23627/43.36	0.43	1.16	0.065	0.084	0.04	0.74
Pb104903/45.97	0.50	0.92	0.059	0.083	0.064	0.92
38647/35.86	0.32	1.11	0.076	0.066	0.035	1.12
Pb 80337/12.90	0.61	1.12	0.083	0.084	0.050	1.00
109012/49.22	0.33	1.1	0.055	0.088	0.061	0.83
B 53721/13.80	0.65	1.17	0.063	0.084	0.056	0.91
10723/22.99	0.50	1.06	0.066	0.083	0.060	0.89
B113137/26.69	0.66	1.15	0.064	0.094	0.065	0.89
53747/37.29	0.33	0.86	0.065	0.075	0.042	1.04
105214/30.46	0.39	1.17	0.054	0.085	0.045	0.76
6653/39.90	0.88	1.20	0.059	0.081	0.062	0.88
18944/49.17	0.77	1.05	0.066	0.078	0.047	0.89
41479/40.85	0.56	1.05	0.056	0.083	0.068	0.79
41484/21.97	0.52	1.22	0.064	0.068	0.047	0.89
49680/47.14	0.54	0.88	0.065	0.088	0.064	1.03
74271/31.34	0.37	1.06	0.064	0.084	0.055	0.88
544/13.77	0.70	0.94	0.072	0.074	0.047	0.87
55846/18.20	0.61	1.20	0.064	0.087	0.060	0.95
111148/41.00	0.5	1.06	0.058	0.078	0.057	0.88
10798/12.83	0.55	1.13	0.058	0.087	0.045	0.81
106931/38.49	0.44	1.27	0.056	0.092	0.048	0.76
6712/48.82	0.46	0.84	0.069	0.074	0.064	0.95
102970/30.88	0.28	1.05	0.050	0.075	0.032	0.64
98878/33.77	0.50	0.95	0.060	0.077	0.047	0.71
49728/35.79	0.85	1.22	0.066	0.089	0.058	0.88
10818/39.30	0.62	1.11	0.066	0.084	0.049	-
1803/21.30	0.61	1.11	0.066	0.078	0.056	0.87
88644/47.52	0.55	1.42	0.070	0.076	0.041	0.88
117320/41.35	0.60	1.18	0.066	0.077	0.062	0.90
53837/33.32	0.45	1.07	0.054	0.078	0.050	0.82
25166/45.10	0.78	0.88	0.057	0.077	0.060	0.89
39506/29.80	0.63	1.58	0.068	0.110	0.048	0.58
96854/44.82	0.48	1.15	0.055	0.097	0.053	0.75
29271/10.21	0.65	1.24	0.058	0.097	0.058	0.88
23128/46.28	0.47	1.06	0.070	0.073	0.048	0.82
37732/49.33	0.43	1.00	0.049	0.074	0.042	0.79
10842/38.94	0.25	1.24	0.060	0.096	0.045	0.61
49756/35.91	0.54	1.12	0.064	0.078	0.050	0.92
8798/38.97	0.36	1.26	0.064	0.099	0.049	0.67

43109/39.63	0.20	0.95	0.079	0.117	0.067	0.87
Pb 12048/37.79	0.59	1.20	0.068	0.093	0.048	0.95
100963/28.14	0.53	1.05	0.070	0.074	0.048	1.03
33382/31.49	0.60	0.85	0.042	0.060	0.047	0.75
98921/19.01	0.45	1.00	0.067	0.083	0.049	0.88
6762/31.05	0.50	1.12	0.064	0.087	0.085	0.82
21099/46.20	0.67	1.01	0.066	0.074	0.048	0.94
64109/36.28	0.61	1.12	0.066	0.089	0.054	0.87
B 83389/18.28	0.66	1.16	0.066	0.079	0.048	0.99
Pb 27253/42.35	0.57	1.06	0.055	0.089	0.069	0.81
117367/44.76	0.50	1.15	0.064	0.085	0.057	0.88
88511/34.61	0.44	1.25	0.066	0.090	0.047	-
107020/45.11	0.44	1.06	0.070	0.081	0.059	0.83
96895/21.14	0.55	1.18	0.062	0.086	0.054	0.78
19076/16.89	0.45	1.05	0.077	0.084	0.045	0.96
Pb 96901/21.14	0.59	1.22	0.063	0.093	0.054	0.90
Pb 98959/17.91	0.54	1.21	0.065	0.089	0.050	0.75
107152/40.09	0.50	1.08	0.069	0.074	0.047	0.85
74389/40.79	0.50	0.88	0.068	0.078	0.048	0.94
669/27.32	0.52	1.08	0.067	0.068	0.047	0.88
103077/44.14	0.45	1.11	0.061	0.075	0.059	1.02
Pb 55409/42.17	0.62	1.07	0.065	0.078	0.052	0.74
33449/45.33	0.30	1.26	0.066	0.089	0.087	0.49
682/38.48	0.43	0.87	0.085	0.058	0.047	1.05
70319/17.43	0.44	1.33	0.060	0.077	0.038	0.72
21172/36.19	0.52	1.18	0.066	0.092	0.046	0.82
74432/32.33	0.52	1.58	0.065	0.102	0.047	0.79
80331/28.23	0.22	1.06	0.058	0.089	0.079	0.64
Pb113357/15.46	0.59	1.07	0.062	0.092	0.064	0.90
43726/16.84	0.57	1.12	0.066	0.078	0.054	0.87
58073/39.56	0.66	1.01	0.072	0.092	0.051	0.88
62175/45.36	0.50	1.45	0.071	0.089	0.051	0.88
105184/23.82	0.50	1.18	0.067	0.083	0.049	0.96
37606/22.46	0.44	0.95	0.048	0.083	0.054	0.75
86974/8.39	0.60	1.10	0.056	0.091	0.057	0.81
25321/37.95	0.28	1.05	0.069	0.075	0.054	0.94
84720/8.80	0.73	1.23	0.050	0.091	0.047	0.71
88945/24.40	0.49	1.11	0.084	0.089	0.052	1.09
111349/33.52	0.68	1.07	0.059	0.086	0.061	0.87
23286/37.65	0.45	1.00	0.065	0.074	0.048	0.98
Pb 29432/24.34	0.53	1.15	0.063	0.077	0.048	0.91
33537/24.89	0.44	1.35	0.069	0.092	0.034	0.76
B 74500/26.18	0.66	1.11	0.056	0.091	0.069	0.85
94981/25.20	0.65	1.26	0.067	0.078	0.047	0.95
Pb 86796/15.60	0.59	1.15	0.058	0.092	0.068	0.90
P 113421/20.06	0.70	1.16	0.054	0.093	0.066	0.92
11028/38.97	0.48	1.07	0.064	0.081	0.047	0.88
117526/46.83	0.63	0.94	0.052	0.065	0.047	0.91
27417/44.57	0.55	1.05	0.071	0.086	0.039	-
101916/30.25	0.40	1.06	0.065	0.075	0.045	0.84
15131/24.54	0.34	1.19	0.057	0.074	0.056	0.71
19233/23.53	0.72	1.12	0.064	0.078	0.054	0.88
45859/29.18	0.53	1.03	0.066	0.062	0.035	0.83
43813/48.23	0.31	1.20	0.050	0.091	0.061	0.54
27435/15.25	0.48	1.17	0.070	0.075	0.048	0.88
54061/37.68	0.26	1.43	0.052	0.079	0.062	0.54
111407/46.47	0.12	1.12	0.066	0.086	0.062	0.92
P 31540/37.46	0.65	1.16	0.057	0.091	0.076	0.88
72507/48.45	0.54	1.34	0.077	0.082	0.048	0.89
11072/22.67	0.47	1.26	0.066	0.094	0.061	0.75

Pb109378/21.30	0.60	1.22	0.057	0.103	0.059	0.85
21317/46.28	0.68	1.11	0.066	0.083	0.054	0.91
29525/18.64	0.47	1.12	0.072	0.081	0.048	1.00
105312/18.24	0.68	1.16	0.067	0.094	0.049	0.70
39780/23.59	0.68	1.06	0.062	0.088	0.069	0.80
45940/37.21	0.55	1.25	0.065	0.097	0.054	0.81
78709/22.04	0.37	1.10	0.065	0.077	0.040	0.74
Pb 84856/47.73	0.52	1.11	0.071	0.084	0.057	0.90
115577/43.28	0.48	1.27	0.061	0.099	0.054	0.76
29568/16.73	0.58	1.05	0.066	0.077	0.045	0.89
62345/31.21	0.66	1.10	0.057	0.085	0.070	0.83
P 106006/47.80	0.67	1.07	0.057	0.085	0.059	0.83
54155/26.22	0.52	1.13	0.065	0.080	0.056	0.92
39822/47.24	0.40	1.16	0.065	0.077	0.048	0.77
Pb 64408/20.28	0.57	1.11	0.056	0.083	0.069	0.83
72659/6.71	0.44	1.05	0.073	0.075	0.041	0.93
Pb109381/42.20	0.45	1.01	0.056	0.075	0.055	0.94
5031/39.19	0.57	1.31	0.054	0.093	0.047	0.67
99240/6.09	0.61	1.06	0.050	0.081	0.061	0.79
74666/37.32	0.21	1.01	0.054	0.090	0.053	0.66
7083/42.78	0.40	1.11	0.053	0.090	0.052	0.55
95149/19.88	0.43	1.43	0.066	0.065	0.040	0.88
Pb 5054/42.36	0.40	1.60	0.064	0.097	0.049	0.65
Pb 91085/44.81	0.64	0.91	0.068	0.071	0.049	0.98
15310/47.20	0.52	1.11	0.067	0.074	0.048	0.93
60370/26.02	0.58	1.10	0.064	0.059	0.049	0.93
57507/17.73	0.45	1.22	0.065	0.089	0.054	0.76
27980/39.95	0.54	1.15	0.065	0.084	0.048	1.02
4041/42.61	0.47	1.00	0.075	0.076	0.042	-
50139/34.69	0.20	1.23	0.059	0.081	0.042	0.56
101345/24.75	0.61	1.20	0.066	0.088	0.048	0.87
15330/12.04	0.50	1.12	0.064	0.084	0.049	0.81
41967/45.38	0.43	0.91	0.06	0.075	0.037	0.95
93185/23.95	0.40	1.12	0.065	0.075	0.042	0.88
105483/40.85	0.57	1.05	0.052	0.089	0.070	0.82
48141/44.56	0.60	1.01	0.068	0.079	0.049	0.87
54287/32.27	0.56	0.94	0.060	0.086	0.056	0.88
99344/40.81	0.34	1.28	0.059	0.109	0.045	0.58
23575/48.46	0.30	1.18	0.065	0.093	0.050	0.90
85017/33.00	0.52	1.08	0.055	0.087	0.059	0.82
42011/32.41	0.66	1.10	0.050	0.082	0.067	0.83
64550/25.03	0.69	1.16	0.067	0.084	0.047	0.88
21543/48.31	0.66	1.19	0.061	0.074	0.054	0.77
37930/49.61	0.76	1.16	0.056	0.101	0.059	0.71
91187/34.92	0.32	1.19	0.067	0.088	0.055	0.70
Pb 97336/45.95	0.61	1.19	0.066	0.082	0.055	0.98
7235/19.26	0.48	0.88	0.065	0.054	0.045	1.00
25670/49.34	0.54	1.14	0.068	0.082	0.055	0.97
68682/16.43	0.73	1.12	0.066	0.066	0.056	0.87
17483/41.79	0.41	1.11	0.065	0.065	0.041	1.00
87116/26.83	0.54	1.13	0.059	0.089	0.053	0.82
97358/30.46	0.33	1.40	0.077	0.080	0.044	1.00
15442/23.98	0.50	1.12	0.067	0.075	0.052	0.88
111274/37.38	0.44	1.30	0.064	0.097	0.054	0.61
1113/45.79	0.46	1.11	0.068	0.079	0.046	0.81
15457/9.14	0.45	1.07	0.076	0.077	0.049	1.02
70755/37.16	0.30	1.24	0.074	0.075	0.038	0.80
101905/33.67	0.51	1.14	0.067	0.088	0.049	1.01
1128/42.79	0.28	1.33	0.065	0.093	0.042	0.55
44137/47.63	0.66	0.89	0.053	0.082	0.071	0.90

78955/27.52	0.57	1.18	0.066	0.091	0.066	0.88
7276/29.71	0.57	1.20	0.066	0.088	0.065	0.94
Pb 93373/40.33	0.30	1.34	0.068	0.112	0.047	0.57
107649/15.55	0.45	1.27	0.066	0.077	0.050	0.83
38018/29.11	0.57	1.07	0.072	0.063	0.052	-
3203/26.50	0.50	1.11	0.067	0.080	0.049	0.97
9349/40.84	0.45	1.18	0.073	0.081	0.053	1.03
105606/35.03	0.66	1.01	0.054	0.079	0.062	0.84
50316/33.27	0.52	1.13	0.060	0.088	0.052	0.888
113989/29.64	0.24	1.26	0.058	0.103	0.047	0.62
52369/23.89	0.45	1.17	0.068	0.073	0.047	0.90
21654/45.16	0.58	0.89	0.066	0.061	0.042	1.01
91287/30.18	0.61	1.10	0.066	0.082	0.053	0.86
97433/45.37	0.31	1.19	0.054	0.088	0.05	0.70
117404/36.87	0.67	1.11	0.067	0.085	0.050	0.75
81065/45.94	0.31	1.11	0.063	0.086	0.116	0.72
7339/21.04	0.57	1.12	0.066	0.086	0.056	0.88
40118/21.57	0.54	0.95	0.043	0.080	0.036	0.56
B 52409/34.65	0.69	1.11	0.060	0.090	0.061	0.90
42173/25.85	0.50	1.23	0.074	0.107	0.053	1.02
58558/42.00	0.55	1.19	0.058	0.091	0.056	0.73
93377/36.47	0.45	1.16	0.057	0.078	0.045	0.87
95428/32.72	0.44	1.07	0.057	0.075	0.038	0.76
40133/34.15	0.53	1.33	0.067	0.091	0.058	0.93
70857/19.69	0.75	1.12	0.060	0.076	0.048	0.77
58576/12.69	0.57	0.95	0.049	0.096	0.070	0.82
20686/44.29	0.66	1.35	0.057	0.087	0.062	0.77
5335/32.51	0.41	1.10	0.062	0.080	0.035	0.76
70873/23.36	0.66	1.20	0.060	0.088	0.068	0.79
101597/41.07	0.38	0.92	0.059	0.063	0.047	0.90
48351/42.62	0.58	1.20	0.066	0.076	0.055	0.82
94075/40.97	0.66	1.05	0.054	0.077	0.060	0.95
Pb 42214/36.71	0.58	0.94	0.058	0.088	0.062	0.81
83181/43.29	0.52	0.96	0.068	0.073	0.049	1.07
3311/48.90	0.67	1.15	0.067	0.084	0.058	0.91
Pb 56572/49.53	0.63	1.01	0.052	0.087	0.074	0.78
38784/17.14	0.57	1.12	0.056	0.077	0.039	0.79
103682/27.11	0.69	1.02	0.056	0.079	0.060	0.81
95447/14.95	0.66	1.17	0.054	0.095	0.069	0.90
Pb 1292/17.56	0.57	0.93	0.069	0.079	0.053	0.92
54541/29.43	0.73	1.17	0.057	0.087	0.053	0.81
64783/47.70	0.68	1.01	0.073	0.074	0.064	0.88
25873/35.75	0.44	0.84	0.068	0.058	0.048	1.21
7446/40.36	0.61	0.91	0.046	0.074	0.061	0.75
15642/44.04	0.24	0.93	0.065	0.076	0.045	1.02
23835/15.88	0.39	1.24	0.067	0.095	0.046	0.77
107805/38.08	1.01	1.05	0.071	0.076	0.053	0.92
36129/42.05	0.56	1.03	0.060	0.077	0.052	0.93
23852/27.57	0.57	1.41	0.075	0.082	0.038	0.68
91438/13.04	0.47	1.15	0.066	0.081	0.045	0.87
Pb 9519/48.34	0.41	1.04	0.088	0.064	0.039	1.13
54582/32.41	0.45	1.10	0.063	0.077	0.048	0.78
60729/26.82	0.57	1.12	0.061	0.090	0.062	0.82
B 3391/41.87	0.74	1.06	0.054	0.081	0.055	0.78
116033/40.23	0.48	1.07	0.063	0.079	0.050	0.92
19780/48.64	0.36	1.01	0.055	0.077	0.092	0.71
19786/47.26	0.43	1.05	0.059	0.078	0.052	0.89
Pb 23884/38.08	0.46	0.95	0.057	0.073	0.056	0.93
19793/45.75	0.54	1.00	0.068	0.063	0.045	1.04

P 38228/22.40	0.79	1.12	0.081	0.085	0.056	0.99
103654/38.34	0.75	1.14	0.063	0.083	0.057	0.87
50534/41.21	0.60	1.08	0.066	0.079	0.053	0.88
118123/41.10	0.43	1.18	0.073	0.078	0.052	0.79
64150/26.36	0.55	1.26	0.068	0.084	0.056	0.93
36210/22.47	0.57	1.18	0.059	0.085	0.053	0.82
42356/44.35	0.44	1.05	0.072	0.096	0.049	0.92
107070/27.23	0.43	1.15	0.070	0.075	0.050	-
46454/34.42	0.68	1.37	0.068	0.082	0.058	0.84
Pb 89474/23.30	0.45	1.07	0.064	0.087	0.052	0.87
95164/47.63	0.71	1.29	0.068	0.076	0.056	0.87
74653/26.79	0.58	1.09	0.050	0.088	0.065	0.80
Pb 68162/41.66	0.55	1.03	0.063	0.078	0.052	0.93
19855/22.09	0.36	1.16	0.067	0.093	0.048	0.88
5521/27.08	0.40	0.90	0.66	0.061	0.038	1.00
118162/23.97	0.61	1.07	0.066	0.090	0.047	0.88
B 3479/34.19	0.79	1.28	0.061	0.092	0.049	0.83
30104/26.02	0.58	1.12	0.063	0.082	0.058	0.82
36249/29.24	0.58	1.23	0.060	0.082	0.065	0.87
115951/36.19	0.66	1.08	0.063	0.077	0.058	0.79
Pb 64924/8.50	0.45	1.18	0.065	0.094	0.050	0.87
Pb 12186/25.39	0.64	1.20	0.068	0.094	0.051	0.93
15776/37.08	0.4	1.21	0.067	0.082	0.053	0.66
7585/25.45	0.52	1.21	0.067	0.081	0.054	0.95
28066/27.49	0.44	1.42	0.060	0.094	0.053	0.68
21923/42.49	0.65	1.27	0.073	0.100	0.056	0.88
Pb 7599/38.96	0.61	1.08	0.061	0.084	0.062	0.81
54704/22.08	0.46	1.21	0.063	0.097	0.050	0.76
85425/31.08	0.36	1.11	0.066	0.083	0.052	0.81
73139/40.20	0.24	0.96	0.053	0.083	0.076	0.81
42430/19.40	0.68	1.18	0.049	0.089	0.078	0.65
118209/33.09	0.25	0.93	0.053	0.074	0.068	0.61
64962/41.88	0.34	0.94	0.060	0.071	0.085	0.48
52676/43.35	0.57	1.07	0.066	0.078	0.054	0.82
79777/28.89	0.45	1.00	0.057	0.076	0.041	0.92
Pb 62039/45.09	0.49	1.21	0.057	0.084	0.055	0.92
79308/39.54	0.49	1.01	0.058	0.067	0.040	0.79
3533/38.18	0.50	1.06	0.062	0.077	0.058	0.81
110508/32.94	0.45	0.98	0.059	0.059	0.041	0.87
19925/43.08	0.55	1.14	0.068	0.077	0.052	0.92
69881/32.77	0.68	1.10	0.059	0.084	0.058	0.88
54745/22.64	0.82	1.08	0.076	0.066	0.057	0.91
34271/43.14	0.58	1.00	0.074	0.061	0.037	1.09
112491/27.39	0.54	1.21	0.066	0.083	0.049	0.88
110161/47.29	0.66	1.09	0.059	0.082	0.069	0.81
77052/14.76	0.45	1.19	0.067	0.078	0.047	0.92
31655/40.33	0.46	1.30	0.070	0.089	0.083	0.87
97779/32.26	0.61	1.11	0.066	0.077	0.047	0.88
3578/37.33	0.23	0.92	0.049	0.076	0.061	0.88
3583/14.99	0.61	1.27	0.063	0.080	0.046	0.95
113579/31.75	0.57	1.34	0.074	0.124	0.057	0.92
118278/16.20	0.49	1.15	0.059	0.089	0.053	0.77
105388/46.79	0.55	0.76	0.066	0.058	0.048	1.20
65036/44.98	0.65	1.14	0.053	0.091	0.073	0.82
6744/42.45	0.65	1.10	0.065	0.092	0.059	0.88
104732/49.23	0.46	1.33	0.063	0.092	0.076	0.76
73241/23.75	0.59	1.31	0.055	0.082	0.053	0.88
B116250/31.14	0.68	1.12	0.058	0.097	0.070	0.76
108065/38.25	0.61	1.16	0.058	0.094	0.052	0.77
30243/42.99	0.73	1.15	0.053	0.092	0.071	0.82

Pb 17960/46.62	0.51	1.25	0.070	0.095	0.055	1.00
Pb 77358/15.25	0.54	1.11	0.065	0.092	0.060	0.90
20019/46.67	0.50	0.80	0.041	0.050	0.054	0.56
91700/33.25	0.47	1.08	0.069	0.084	0.049	-
1598/24.70	0.49	1.47	0.096	0.101	0.056	0.81
7744/46.48	0.49	1.03	0.060	0.076	0.042	0.87
58950/36.25	0.53	1.19	0.065	0.087	0.048	0.82
63048/43.10	0.48	1.82	0.076	0.115	0.054	0.78
75363/26.90	0.44	1.13	0.068	0.089	0.048	0.82
11866/49.53	0.57	0.95	0.063	0.071	0.056	0.77
112219/44.28	0.53	0.92	0.066	0.066	0.051	0.87
9829/23.79	0.44	1.32	0.068	0.087	0.049	0.83
84924/38.70	0.67	1.03	0.052	0.074	0.049	0.76
101997/14.67	0.53	1.26	0.063	0.087	0.054	0.78
61044/48.62	0.47	0.94	0.065	0.085	0.048	0.99
50805/40.20	0.57	1.42	0.079	0.058	0.060	1.00
95849/35.80	0.48	0.95	0.070	0.066	0.047	1.02
102018/41.65	0.55	1.07	0.063	0.080	0.063	0.87
Pb 16012/28.98	0.54	1.15	0.070	0.086	0.054	0.88
83906/35.70	0.72	1.15	0.056	0.086	0.079	0.83
102040/20.89	0.45	1.16	0.070	0.127	0.046	0.90
38558/35.12	0.52	1.23	0.071	0.086	0.056	0.89
36512/36.20	0.59	1.11	0.064	0.078	0.049	0.88
93007/43.22	0.69	1.09	0.050	0.077	0.056	0.79
36515/21.76	0.58	1.11	0.073	0.073	0.048	1.01
79524/38.46	0.37	1.19	0.071	0.081	0.049	0.78
44713/38.21	0.55	1.13	0.060	0.082	0.051	0.88
98589/34.10	0.66	1.12	0.066	0.080	0.061	0.91
20146/46.90	0.66	1.05	0.063	0.077	0.049	0.90
9911/37.11	0.57	1.36	0.060	0.088	0.060	0.89
116410/36.73	0.32	1.27	0.058	0.078	0.035	0.77
22203/49.05	0.65	1.10	0.064	0.081	0.050	0.94
112245/25.12	0.45	1.06	0.058	0.074	0.039	0.76
B 77517/ 45.30	0.80	1.27	0.058	0.135	0.066	0.81
Pb115662/46.88	0.49	1.26	0.063	0.085	0.059	0.89
79578/22.20	0.56	1.18	0.063	0.081	0.052	0.94
55013/27.14	0.66	1.15	0.066	0.084	0.057	0.74
Pb 50921/21.95	0.45	1.18	0.067	0.095	0.050	0.83
34087/39.25	0.73	1.18	0.067	0.082	0.063	0.82
7918/13.06	0.52	1.21	0.065	0.077	0.053	0.89
Pb 89844/39.62	0.58	1.33	0.060	0.106	0.048	0.83
Pb 40693/12.56	0.63	1.24	0.064	0.085	0.056	0.88
22263/13.24	0.44	1.12	0.071	0.078	0.047	0.97
20218/37.03	0.50	1.07	0.074	0.068	0.036	0.92
44811/41.13	0.26	1.40	0.067	0.080	0.048	0.50
30476/27.85	0.53	1.27	0.066	0.097	0.053	0.83
Pb 26381/31.66	0.44	1.53	0.054	0.096	0.039	0.64
93966/21.34	0.91	1.14	0.060	0.103	0.049	0.88
81681/30.44	0.37	1.44	0.063	0.102	0.045	0.60
98066/23.40	0.66	1.13	0.067	0.082	0.050	-
93827/37.95	0.25	1.23	0.063	0.076	0.043	0.54
79636/41.90	0.46	1.05	0.068	0.072	0.048	0.88
65302/34.67	0.60	1.11	0.066	0.077	0.054	0.88
114456/23.54	0.91	0.92	0.056	0.094	0.049	0.83
81693/10.72	0.38	1.34	0.066	0.092	0.057	0.76
104225/32.23	0.39	1.00	0.054	0.074	0.034	0.71
69414/21.82	0.49	1.17	0.063	0.09	0.055	0.79
Pb 30503/21.95	0.54	1.12	0.068	0.082	0.075	0.89
85810/24.21	0.61	1.01	0.067	0.074	0.055	0.88
7990/45.12	0.17	0.94	0.059	0.112	0.048	0.82

79672/14.12	0.52	1.22	0.067	0.078	0.053	0.95
83770/33.90	0.40	0.94	0.057	0.076	0.050	0.88
22336/26.16	0.54	1.15	0.066	0.091	0.057	0.83
94020/29.61	0.18	1.10	0.085	0.075	0.042	1.02
14150/21.19	0.91	1.12	0.063	0.088	0.069	0.94
96072/48.34	0.73	1.36	0.056	0.110	0.085	0.90
77641/42.81	0.34	0.87	0.051	0.074	0.050	0.83
73547/26.27	0.66	1.11	0.066	0.081	0.054	0.77
81746/27.77	0.53	1.16	0.057	0.075	0.049	0.79
18261/44.32	0.44	1.57	0.083	0.089	0.053	1.01
44890/43.49	0.53	1.10	0.074	0.077	0.048	0.90
18267/20.48	0.88	1.25	0.066	0.078	0.057	0.77
53087/35.94	0.59	1.11	0.063	0.082	0.059	0.87
114530/47.95	1.10	1.12	0.067	0.085	0.058	0.92
116584/24.16	0.44	1.25	0.065	0.204	0.049	0.56
73577/49.62	0.40	1.05	0.058	0.072	0.042	0.77
Pb30579/34.35	0.58	1.12	0.061	0.096	0.057	0.78
B 94076/49.39	0.73	1.89	0.054	0.084	0.068	0.78
87933/39.56	0.29	1.05	0.057	0.075	0.065	0.73
104318/37.85	0.55	0.93	0.060	0.055	0.048	1.00
67904/31.53	0.49	0.94	0.057	0.054	0.041	0.88
42885/48.71	0.53	1.25	0.066	0.086	0.056	0.87
90355/33.38	0.31	1.11	0.063	0.089	0.050	0.82
100233/39.92	0.50	1.11	0.066	0.079	0.060	0.80
3979/22.47	0.41	1.14	0.067	0.077	0.050	0.83
59280/25.09	0.53	1.21	0.072	0.093	0.053	1.01
Pb 90004/41.57	0.49	1.24	0.066	0.112	0.046	0.71
46404/33.76	0.45	1.07	0.049	0.089	0.041	0.58
81819/48.13	0.41	1.18	0.058	0.093	0.055	0.87
75676/32.10	0.77	1.1	0.066	0.065	0.052	0.71
30480/31.92	0.69	1.18	0.063	0.085	0.068	0.90
14241/37.59	0.41	1.35	0.058	0.101	0.046	0.55
Pb 108375/45.15	0.51	1.16	0.069	0.077	0.053	0.87
Pb 8102/3.60	0.50	1.37	0.061	0.100	0.041	0.62
81833/33.45	0.33	1.05	0.053	0.078	0.085	0.71
55210/22.14	0.52	1.15	0.059	0.095	0.053	0.79
B 77740/33.36	0.68	1.06	0.068	0.083	0.052	0.89
77749/40.63	0.52	1.41	0.069	0.082	0.053	1.01
87369/44.61	0.52	1.02	0.065	0.081	0.052	0.83
1976/41.55	0.61	1.13	0.056	0.077	0.048	0.92
49081/14.92	0.67	1.23	0.066	0.088	0.062	0.88
10175/42.88	0.58	1.12	0.066	0.079	0.048	0.95
69570/37.80	0.46	1.11	0.066	0.078	0.050	0.78
61379/28.47	0.68	0.95	0.054	0.081	0.070	0.83
44997/48.40	0.54	1.18	0.066	0.084	0.055	0.95
41844/41.87	0.54	1.15	0.064	0.077	0.054	-
16329/37.45	0.57	1.19	0.067	0.087	0.056	0.95
94154/36.62	0.52	1.10	0.067	0.075	0.049	0.84
57291/39.58	0.58	1.11	0.056	0.087	0.056	0.83
Pb 93858/16.92	0.57	1.11	0.062	0.087	0.060	0.87
71631/34.42	0.33	0.71	0.091	0.045	0.048	1.21
85969/41.23	0.84	1.12	0.060	0.080	0.052	0.94
20441/43.57	0.71	1.30	0.067	0.085	0.055	1.08
14300/36.07	0.45	1.1	0.066	0.067	0.038	0.81
Pb 1499/23.45	0.62	1.17	0.063	0.095	0.068	0.91
8159/33.12	0.61	1.12	0.058	0.088	0.052	0.88
47080/11.20	0.70	0.91	0.060	0.078	0.058	0.88
10218/31.47	0.53	0.91	0.070	0.066	0.042	0.91
77810/46.20	0.58	1.05	0.074	0.055	0.045	1.02
57001/43.02	0.94	1.50	0.066	0.095	0.059	0.83

Pb 40952/29.28	0.55	1.10	0.060	0.090	0.068	0.84
65530/20.90	1.05	1.12	0.050	0.078	0.055	0.88
60074/27.45	0.41	1.01	0.077	0.06	0.046	0.95
<b>Átlag:</b>	<b>0.53</b>	<b>1.124</b>	<b>0.064</b>	<b>0.082</b>	<b>0.053</b>	<b>0.84</b>
<b>Szórás:</b>	<b>0.146</b>	<b>0.143</b>	<b>0.027</b>	<b>0.012</b>	<b>0.01</b>	<b>0.119</b>

5. Melléklet A Naptól 50 parszek távolságon belül a teljes vizsgált spektrumban található F-típusú csillagok elemarányainak molban kifejezett értékei. A Pb a 0,65 alatti, míg a B jelzés a 0,65 feletti C/O arányú bolygós csillagokat jelöli. Szoláris referenciaértékek: Mg/Si=1.05; C/O=0.54; Ca/Si=0.0631; Al/Si=0.0724; Na/Si=0.0457; Fe/Si=0.87

F-típusú csillagok	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
HIP116771/13.43	0.40	1.23	0.065	0.0724	0.055	0.78
HIP10306/29.97	0.47	1.03	0.071	0.078	0.055	0.76
HIP69701/21.97	0.30	1.06	0.061	0.077	0.052	0.72
HIP92233/43.39	0.62	1.14	0.066	0.075	0.060	0.82
HIP20557/43.22	0.49	0.87	0.069	0.097	0.058	1.00
HIP32851/29.68	0.34	1.22	0.058	0.077	0.057	0.76
HIP28767/34.09 pb	0.51	0.97	0.062	0.080	0.056	0.92
HIP88175/22.86	0.35	0.87	0.058	0.086	0.058	0.64-
HIP84082/43.09	0.33	0.87	0.076	0.068	0.067	0.97
HIP77952/12.59	0.57	0.91	0.077	0.103	0.085	0.69
HIP57488/38.95	0.28	1.04	0.082	0.042	0.031	0.95
HIP114834/33.13	0.40	1.28	0.082	0.062	0.055	0.91
HIP12444/21.91	0.47	1.07	0.072	0.069	0.049	0.90
HIP55455/48.87	0.32	0.95	0.071	0.061	0.053	0.94
HIP30067/27.32	0.52	1.18	0.062	0.065	0.045	0.82
HIP96441/18.43	0.20	0.97	0.071	0.047	0.054	0.88
HIP2235/38.00	1.04	1.23	0.068	0.070	0.066	0.74
HIP102610/40.32	0.42	1.09	0.060	0.071	0.042	0.73
HIP73941/29.97	0.44	0.97	0.074	0.077	0.054	0.89
HIP114924/20.54	0.48	1.05	0.068	0.082	0.054	0.86
HIP8433/27.66	0.39	1.23	0.070	0.076	0.042	0.85
HIP12530/22.59	0.45	0.33	0.055	0.065	0.034	0.52
HIP78072/11.18	0.42	1.22	0.065	0.076	0.037	0.85
HIP114948/20.45	0.34	1.06	0.065	0.045	0.040	0.82
HIP108809/31.39	0.43	0.93	0.075	0.037	0.032	0.82
HIP41226/47.78	0.52	1.14	0.062	0.068	0.058	0.88
HIP73996/19.34	0.23	0.93	0.071	0.079	0.077	1.00
HIP71957/18.24	0.38	1.23	0.078	0.076	0.047	1.14
HIP96536/31.57	0.48	1.27	0.072	0.090	0.060	1.00
HIP57629/33.68	0.44	0.88	0.066	0.079	0.068	0.91
HIP24864/37.27	0.46	1.07	0.070	0.065	0.043	0.85
HIP102693/37.13	0.20	1.15	0.078	0.077	0.078	0.89
HIP112935/26.91	0.33	1.14	0.058	0.063	0.052	0.74
HIP10540/41.28	0.20	0.87	0.072	0.052	0.043	0.98
HIP55598/42.96	0.46	0.87	0.062	0.076	0.072	0.86
HIP114996/23.61	0.28	1.10	0.058	0.056	0.089	0.80
HIP29001/36.85	0.50	1.11	0.055	0.050	0.045	0.79
HIP20815/47.73	0.40	1.17	0.061	0.069	0.050	0.86
HIP33109/38.90	0.50	1.04	0.067	0.061	0.050	0.88
HIP20826/45.35	0.42	1.05	0.070	0.068	0.045	0.98
HIP8548/43.55	0.66	1.25	0.069	0.077	0.065	0.89
HIP12653/17.32 pb	0.57	1.06	0.070	0.076	0.056	0.91

HIP90485/37.60 pb	0.52	1.15	0.072	0.074	0.061	0.98
HIP2453/40.83	0.33	0.89	0.049	0.045	0.0457	0.72
HIP45448/48.49	0.17	1.22	0.089	0.087	0.091	1.00
HIP43410/27.49	0.43	1.02	0.074	0.060	0.050	1.00
HIP102805/30.35	0.31	1.42	0.059	0.042	0.0457	0.72
HIP57757/11.12	0.53	1.15	0.057	0.077	0.059	0.87
HIP37279/3.50	0.60	1.13	0.059	0.066	0.062	0.83
HIP18859/18.76	0.44	1.21	0.072	0.103	0.058	0.90
HIP113076/44.17	0.57	0.81	0.054	0.054	0.049	0.74
HIP94645/27.46 pb	0.55	0.98	0.070	0.076	0.057	0.96
HIP33212/31.17 pb	0.54	1.11	0.070	0.078	0.050	0.95
HIP68030/24.45	0.41	1.17	0.060	0.052	0.049	0.78
HIP27072/8.88	0.40	1.05	0.068	0.081	0.051	0.81
HIP82369/34.98	0.33	1.00	0.054	0.076	0.068	0.78
HIP27075/26.26	0.63	1.11	0.070	0.074	0.051	0.85
HIP55761/40.95	0.55	0.87	0.047	0.052	0.036	0.71
HIP20948/46.94	0.55	0.62	0.042	0.039	0.036	0.65
HIP12764/41.98	0.51	1.20	0.073	0.065	0.052	0.92
HIP47592/14.81	0.44	1.21	0.064	0.058	0.052	0.86
HIP12777/11.14	0.43	1.04	0.069	0.067	0.052	0.87
HIP493/37.39	0.73	0.76	0.046	0.04	0.041	0.83
HIP6643/44.83 pb	0.58	1.13	0.068	0.085	0.052	0.94
HIP97023/43.21	0.45	1.06	0.055	0.062	0.043	0.72
HIP14857/42.72	0.71	1.33	0.073	0.078	0.053	0.90
HIP522/26.18 pb	0.54	0.84	0.058	0.077	0.060	0.78
HIP115220/46.67	0.54	0.81	0.055	0.049	0.044	0.71
HIP14879/14.24	0.39	1.29	0.062	0.082	0.052	0.83
HIP100896/49.40	0.33	0.95	0.064	0.039	0.038	0.81
HIP94755/42.08	0.54	1.33	0.080	0.075	0.056	0.84
HIP12843/14.13	0.36	0.83	0.079	0.103	0.081	0.87
HIP96813/48.53	0.30	0.82	0.068	0.058	0.058	0.89
HIP6711/42.61	0.38	0.91	0.054	0.050	0.048	0.76
HIP53818/30.89	0.49	1.05	0.071	0.076	0.060	0.88
HIP111170/25.51	0.59	0.94	0.065	0.087	0.047	0.87
HIP84551/48.25	0.46	1.21	0.072	0.090	0.063	0.89
HIP51784/35.99	0.41	1.15	0.064	0.056	0.052	0.82
HIP115280/42.10	0.38	1.14	0.069	0.074	0.061	0.80
HIP86623/35.00	0.31	1.07	0.076	0.065	0.065	0.95
HIP2663/33.11	0.44	1.08	0.068	0.066	0.048	0.90
HIP14954/22.52 pb	0.56	1.03	0.064	0.078	0.068	0.87
HIP113086/42.01	0.48	1.15	0.071	0.067	0.049	0.91
HIP109176/11.79	0.38	1.29	0.087	0.058	0.049	0.98
HIP45699/40.66	0.44	1.43	0.055	0.052	0.041	0.65
HIP82568/47.31	0.34	0.95	0.096	0.050	0.045	0.87
HIP94858/45.60	0.37	0.87	0.061	0.049	0.066	0.60
HIP2711/25.68	0.50	1.10	0.071	0.076	0.049	0.92
HIP2712/47.71	0.50	1.00	0.055	0.055	0.044	0.79
HIP8859/40.82	0.37	1.15	0.0631	0.061	0.050	0.81
HIP70310/38.33	0.43	1.66	0.074	0.107	0.056	1.07
HIP23214/44.59	0.59	0.70	0.047	0.045	0.034	0.58
HIP94905/36.15	0.24	1.12	0.081	0.052	0.047	1.00
HIP699/32.57	0.42	1.21	0.069	0.076	0.051	0.81
HIP25278/14.58	0.44	1.04	0.062	0.074	0.050	0.87
HIP60098/47.67	0.45	1.20	0.068	0.076	0.066	0.85
HIP101059/37.66	0.38	1.42	0.057	0.063	0.041	0.78
HIP51914/46.26	0.51	0.46	0.058	0.068	0.042	0.89
HIP86736/17.12	0.46	1.32	0.062	0.166	0.044	0.79
HIP66257/46.09	0.30	1.40	0.074	0.050	0.081	0.84
HIP92882/31.31	0.29	0.95	0.075	0.077	0.062	1.33
HIP84696/39.43	0.80	0.71	0.048	0.042	0.048	0.64

HIP51933/24.74	0.39	0.88	0.073	0.089	0.049	0.83
HIP6878/33.19	0.31	1.01	0.078	0.038	0.037	0.88
HIP56035/33.73	0.52	0.98	0.062	0.058	0.054	1.02
HIP105202/43.16	0.58	0.87	0.048	0.047	0.042	0.69
HIP76543/47.96	0.43	1.12	0.068	0.065	0.0457	0.70
HIP82688/45.26	0.34	1.06	0.062	0.081	0.043	1.01
HIP43797/24.25	0.49	1.32	0.061	0.120	0.051	0.89
HIP33595/45.77	0.58	1.23	0.042	0.076	0.050	0.65
HIP6975/47.16	0.54	0.98	0.052	0.056	0.040	0.78
HIP50013/41.68	0.39	0.87	0.067	0.082	0.063	0.85
HIP76603/35.31	0.46	1.24	0.074	0.078	0.050	0.95
HIP74605/25.28	0.60	1.10	0.072	0.074	0.059	0.87
HIP109422/18.34	0.36	0.90	0.071	0.046	0.057	0.86
HIP56186/43.70	0.40	0.89	0.047	0.048	0.0457	0.60
HIP112447/16.02	0.48	1.19	0.060	0.079	0.049	0.71
HIP9085/26.66	0.44	1.06	0.071	0.090	0.052	0.78
HIP19335/21.30	0.44	1.31	0.066	0.120	0.077	0.63
HIP62349/43.64	0.35	0.99	0.068	0.065	0.053	0.92
HIP910/17.98	0.46	1.15	0.071	0.075	0.058	0.81
HIP2981/45.37	0.50	1.25	0.068	0.055	0.049	0.72
HIP82860/15.08	0.47	0.99	0.068	0.064	0.046	0.86
HIP91058/49.26	0.58	0.98	0.053	0.058	0.048	0.66
HIP950/21.64	0.60	0.91	0.078	0.075	0.059	0.87
HIP60353/29.98	0.64	1.14	0.072	0.064	0.048	0.92
HIP29650/20.87	0.39	0.78	0.078	0.069	0.058	0.91
HIP15323/26.10	0.46	1.10	0.069	0.068	0.046	1.07
HIP46046/49.97	0.47	0.84	0.061	0.092	0.057	0.85
HIP39903/18.06	0.36	0.83	0.052	0.075	0.048	0.62
HIP72673/48.42	0.49	1.37	0.070	0.091	0.067	0.81
HIP19428/40.91 pb	0.40	1.05	0.0631	0.062	0.051	0.87
HIP25580/34.25	0.28	1.00	0.072	0.061	0.045	0.95
HIP67069/33.82	0.47	1.02	0.068	0.071	0.057	0.77
HIP68593/39.49	0.47	1.05	0.075	0.064	0.050	0.90
HIP109572/37.99	0.55	1.33	0.058	0.078	0.070	0.80
HIP85007/29.84	0.51	1.19	0.060	0.065	0.048	0.85
HIP29716/36.45	0.36	1.34	0.079	0.075	0.036	0.86
HIP95270/48.15	0.35	1.07	0.068	0.040	0.054	0.61
HIP84489/31.48	0.54	0.81	0.077	0.041	0.051	0.75
HIP64583/18.17	0.45	1.34	0.061	0.075	0.056	0.77
HIP115803/49.76	0.48	1.26	0.073	0.071	0.049	0.93
HIP40035/22.63	0.55	0.96	0.058	0.077	0.059	0.76
HIP91237/33.45	0.84	0.85	0.065	0.204	0.072	0.87
HIP56423/42.42	0.53	1.21	0.065	0.065	0.049	0.80
HIP111723/49.38	0.54	0.85	0.047	0.045	0.044	0.81
HIP54383/49.83	0.48	1.25	0.080	0.077	0.044	0.97
HIP59926/42.37	0.49	1.05	0.053	0.076	0.054	0.82
HIP89282/34.69	0.61	1.05	0.067	0.069	0.045	0.93
HIP66704/25.47	0.62	0.94	0.068	0.042	0.068	0.78
HIP29843/40.42	0.40	1.04	0.068	0.074	0.066	0.95
HIP3236/33.56	0.47	1.16	0.072	0.063	0.047	0.93
HIP44212/46.18	0.54	0.89	0.048	0.043	0.038	0.72
HIP100895/46.02	0.41	1.03	0.071	0.058	0.049	0.85
HIP42172/26.26	0.61	1.26	0.070	0.082	0.054	0.95
HIP113860/28.25	0.41	1.18	0.074	0.100	0.093	1.00
HIP50384/22.80	0.44	1.26	0.071	0.068	0.054	0.74
HIP74975/25.38	0.46	1.1	0.078	0.071	0.063	0.85
HIP60644/38.92 pb	0.50	0.97	0.065	0.068	0.054	0.95
HIP17651/17.63	0.59	1.09	0.072	0.063	0.061	0.90
HIP99572/28.23	0.42	1.07	0.0631	0.052	0.05	0.76
HIP48376/44.46	0.6	1.23	0.080	0.074	0.046	0.94

HIP103673/27.28	0.29	0.96	0.074	0.076	0.056	0.85
HIP9473/46.48	0.32	1.13	0.077	0.053	0.044	0.82
HIP89348/22.83	0.35	1.07	0.070	0.058	0.051	0.87
HIP95501/15.37	0.53	1.38	0.11	0.151	0.083	0.72
HIP38172/40.99	0.48	0.93	0.061	0.053	0.047	0.75
HIP75039/40.60	0.32	0.98	0.075	0.060	0.052	0.88
HIP34085/39.11	0.84	1.15	0.058	0.0724	0.048	0.69
HIP15669/43.98	0.36	0.88	0.062	0.062	0.063	0.93
HIP52535/32.12	0.36	1.52	0.059	0.076	0.052	0.81
HIP36152/30.88	0.45	1.05	0.058	0.056	0.045	0.59
HIP113980/44.70	0.40	0.91	0.064	0.054	0.041	0.68
HIP50493/35.95	0.44	1.66	0.0631	0.120	0.059	0.81
HIP89408/42.76	0.46	1.29	0.064	0.077	0.045	0.70
HIP40843/18.22	0.42	1.1	0.060	0.064	0.050	0.76
HIP30023/32.78	0.43	1.07	0.069	0.068	0.047	0.94
HIP19796/44.80	0.45	1.00	0.058	0.112	0.072	0.91
HIP87382/33.33	0.37	1.03	0.068	0.071	0.054	0.93
HIP75104/45.83	0.28	0.92	0.074	0.045	0.043	0.93
HIP42343/48.92	0.44	0.96	0.056	0.054	0.041	0.66
HIP13679/42.65	0.27	0.90	0.071	0.047	0.047	0.76
HIP97650/27.41	0.32	1.15	0.071	0.148	0.069	1.00
HIP91507/45.92	0.35	1.00	0.074	0.056	0.042	0.87
HIP25973/43.39	0.49	1.15	0.058	0.067	0.048	0.72
HIP23941/25.10	0.41	1.23	0.064	0.078	0.054	0.72
HIP116106/25.95	0.43	1.18	0.053	0.072	0.043	0.82
HIP97675/19.52	0.52	1.14	0.066	0.080	0.058	0.83
HIP73100/25.20	0.46	1.07	0.075	0.074	0.045	0.87
HIP44441/47.32	0.45	1.25	0.067	0.069	0.048	0.66
HIP42403/35.26	0.43	1.07	0.065	0.062	0.056	0.82
HIP85423/33.48	0.23	1.35	0.101	0.056	0.069	1.16
HIP114096/19.37	0.76	1.27	0.066	0.075	0.063	0.84
HIP38325/30.10	0.52	0.94	0.050	0.050	0.033	0.72
HIP105918/33.09	0.52	1.09	0.075	0.062	0.040	0.90
HIP75206/34.88	0.46	1.21	0.066	0.085	0.058	0.79
HIP107975/27.11	0.41	1.19	0.06	0.0724	0.058	0.75
HIP3540/40.93	0.65	1.25	0.074	0.069	0.057	0.90
HIP24021/44.37	0.28	1.32	0.058	0.051	0.041	0.71
HIP56802/26.74	0.33	1.1	0.059	0.065	0.054 /	0.76
HIP24046/40.42	0.43	1.32	0.0631	0.055	0.0457	0.83
HIP58876/45.14	0.46	0.94	0.077	0.050	0.029	1.00
HIP108036/27.04	0.37	1.05	0.079	0.148	0.056	0.98
HIP11783/35.26	0.42	1.00	0.071	0.050	0.059	0.85
HIP76716/30.57	0.37	1.32	0.064	0.089	0.051	0.56
HIP71192/30.23	0.54	1.17	0.067	0.072	0.051	0.85
HIP83204/42.17	0.53	1.11	0.058	0.065	0.045	0.76
HIP114210/34.50	0.33	1.06	0.061	0.071	0.053	0.78
HIP103987/45.80	0.47	1.23	0.076	0.107	0.063	0.74
HIP32329/49.56	1.33	1.23	0.059	0.050	0.042	0.68
HIP50786/38.64 pb	0.54	1.25	0.058	0.078	0.061	0.89
HIP101966/34.17 pb	0.35	0.98	0.071	0.079	0.058	0.90
HIP67153/18.79	0.40	1.42	0.096	0.110	0.078	1.29
HIP73309/34.25	0.30	1.13	0.078	0.074	0.053	0.92
HIP112229/43.48	0.33	1.23	0.076	0.076	0.055	0.83
HIP32366/23.99	0.33	1.42	0.060	0.054	0.047	0.59
HIP75379/31.09	0.54	1.05	0.050	0.057	0.0457	0.79
HIP34426/47.86	0.21	1.31	0.065	0.072	0.044	0.80
HIP56960/43.46	0.43	0.94	0.059	0.049	0.041	0.85
HIP56257/35.08	0.56	0.88	0.064	0.071	0.045	0.93
HIP1686/49.47	0.24	1.10	0.076	0.068	0.064	1.07

HIP104101/38.06	1.18	1.04	0.058	0.079	0.057	0.80
HIP5799/23.89	0.42	0.98	0.064	0.074	0.037	0.76
HIP81580/43.20	0.39	1.29	0.056	0.066	0.054	0.74
HIP32439/18.20	0.45	1.05	0.066	0.068	0.049	0.82
HIP84893/17.06	0.44	1.15	0.068	0.0724	0.060	1.12
HIP5833/43.16	0.43	1.37	0.062	0.075	0.070	0.89
HIP67275/15.62 pb	0.53	0.80	0.060	0.076	0.064	0.83
HIP69340/43.65	0.11	1.63	0.116	0.084	0.069	1.00
HIP100072/39.91	0.56	1.26	0.076	0.071	0.051	0.95
HIP42734/47.91	0.38	1.35	0.073	0.090	0.047	0.51
HIP20215/46.53	0.83	0.83	0.038	0.076	0.047	0.68
HIP81662/47.20	0.56	1.05	0.064	0.058	0.045	0.88
HIP46853/13.90	0.28	1.03	0.077	0.0634	0.050	0.82
HIP24332/26.54	0.38	1.22	0.062	0.07	0.037	0.80
HIP1823/46.72	0.33	1.15	0.052	0.063	0.040	0.68
HIP36640/28.72	0.34	1.29	0.07	0.068	0.043	0.66
HIP59175/47.51	0.38	1.06	0.072	0.055	0.043	0.85
HIP3909/15.87	0.55	1.13	0.072	0.073	0.050	0.94
HIP67408/30.07	0.72	1.47	0.069	0.077	0.056	0.86
HIP89937/8.06	0.40	1.37	0.06	0.048	0.052	0.85
HIP14181/47.40	0.58	1.16	0.057	0.071	0.051	0.60
HIP71530/27.82	0.35	1.29	0.062	0.076	0.049	0.83
HIP83827/36.58	0.50	1.05	0.060	0.059	0.049	0.80
HIP94068/43.52	0.45	1.05	0.093	0.174	0.052	0.91
HIP81800/29.31	0.45	1.02	0.062	0.059	0.049	0.83
HIP114570/24.39	0.86	1.07	0.089	0.142	0.063	1.17
HIP69518/39.27	0.30	0.94	0.079	0.046	0.037	0.97
HIP69536/33.58	0.64	1.05	0.061	0.089	0.066	0.88
HIP22439/36.40	0.61	1.14	0.063	0.110	0.058	0.66
HIP22449/8.04	0.36	1.15	0.062	0.0724	0.056	0.82
HIP18366/39.74	0.45	1.05	0.0631	0.050	0.044	0.78
HIP28634/27.72	0.43	1.09	0.068	0.077	0.050	0.87
HIP55262/47.41	0.28	1.30	0.079	0.087	0.042	0.90
HIP21158/39.02	0.54	1.06	0.067	0.080	0.055	0.90
HIP114670/46.05	0.52	1.11	0.072	0.070	0.053	0.93
HIP30711/29.26	0.62	1.35	0.075	0.080	0.049	0.97
HIP32765/25.17	0.46	1.14	0.077	0.079	0.071	1.02
<b>Átlag:</b>	<b>0.458</b>	<b>1.093</b>	<b>0.0668</b>	<b>0.071255</b>	<b>0.052875</b>	<b>0.84</b>
<b>Szórás:</b>	<b>0.1429</b>	<b>0.18</b>	<b>0.0102</b>	<b>0.0218</b>	<b>0.0106</b>	<b>0.120</b>

6. Melléklet. A Naptól 50 parszek távolságon belül elhelyezkedő bolygókísérővel rendelkező G-típusú csillagok elemarányainak molban kifejezett értékei. A Pb a 0,65 alatti, míg a B jelzés a 0,65 feletti C/O arányú bolygós csillagokat jelöli. Szoláris referenciaértékek: Mg/Si=1.05; C/O=0.54; Ca/Si=0.0631; Al/Si=0.0724; Na/Si=0.0457; Fe/Si=0.87

G-csillagok	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Pb 71683/1.35	0.55	1.23	0.059	0.089	0.068	0.87
Pb114699/29.19	0.49	1.23	0.068	0.092	0.046	0.79
Pb 10278/43.47	0.58	1.1	0.062	0.085	0.057	0.86
B 60081/49.42	0.65	1.1	0.061	0.092	0.069	0.85
B 96334/38.14	0.65	1.25	0.060	0.069	0.047	0.79
Pb 57443/9.29	0.49	0.94	0.059	0.093	0.050	0.72
Pb 88194/28.25	0.49	1.11	0.068	0.089	0.050	0.90
Pb 73869/45.86	0.55	0.88	0.064	0.060	0.043	1.07

Pb 14501/32.00	0.48	1.36	0.065	0.105	0.056	0.84
Pb116906/42.16	0.54	1.22	0.066	0.09	0.054	0.88
Pb 65721/17.90	0.51	1.58	0.070	0.097	0.048	0.89
B 14530/41.83	0.74	1.10	0.065	0.092	0.061	0.87
Pb 70695/37.65	0.57	1.12	0.063	0.090	0.056	0.81
Pb20723/39.38	0.64	1.12	0.058	0.091	0.065	0.85
B 65808/32.35	0.66	1.11	0.059	0.091	0.058	0.91
Pb 88348/22.00	0.62	1.07	0.065	0.098	0.047	0.81
Pb 78169/35.53	0.55	1.15	0.068	0.072	0.051	0.94
Pb 45406/48.95	0.63	1.01	0.060	0.076	0.056	0.87
Pb80250/40.43	0.17	0.93	0.054	0.085	0.063	0.93
Pb104903/45.97	0.51	0.92	0.059	0.083	0.062	0.92
Pb 80337/12.90	0.59	1.12	0.083	0.084	0.050	1.00
B 53721/13.80	0.66	1.17	0.063	0.084	0.054	0.91
B113137/26.69	0.68	1.15	0.064	0.094	0.064	0.89
Pb 12048/37.79	0.60	1.20	0.068	0.093	0.048	0.95
B 83389/18.28	0.66	1.16	0.066	0.079	0.048	0.99
Pb 27253/42.35	0.57	1.06	0.055	0.089	0.069	0.81
Pb 96901/21.14	0.59	1.22	0.063	0.093	0.054	0.90
Pb 98959/17.91	0.54	1.21	0.065	0.089	0.049	0.75
Pb 55409/42.17	0.62	1.07	0.065	0.078	0.052	0.74
Pb113357/15.46	0.59	1.07	0.062	0.092	0.061	0.90
Pb 29432/24.34	0.53	1.15	0.063	0.077	0.048	0.91
B 74500/26.18	0.66	1.11	0.056	0.091	0.069	0.85
Pb 86796/15.60	0.60	1.15	0.058	0.092	0.068	0.90
P 113421/20.06	0.70	1.16	0.054	0.093	0.066	0.92
P 31540/37.46	0.67	1.16	0.057	0.091	0.074	0.88
Pb109378/21.30	0.59	1.22	0.057	0.103	0.059	0.85
Pb 84856/47.73	0.52	1.11	0.071	0.084	0.057	0.90
P 106006/47.80	0.67	1.07	0.057	0.085	0.058	0.83
Pb 64408/20.28	0.58	1.11	0.056	0.083	0.069	0.83
Pb109381/42.20	0.45	1.01	0.056	0.075	0.056	0.94
Pb 5054/42.36	0.41	1.60	0.064	0.097	0.049	0.65
Pb 91085/44.81	0.64	0.91	0.068	0.071	0.049	0.98
Pb 97336/45.95	0.63	1.19	0.066	0.082	0.055	0.98
Pb 93373/40.33	0.30	1.34	0.068	0.112	0.047	0.57
B 52409/34.65	0.69	1.11	0.060	0.090	0.061	0.90
Pb 42214/36.71	0.58	0.94	0.058	0.088	0.062	0.81
Pb 56572/49.53	0.63	1.01	0.052	0.087	0.074	0.78
Pb 1292/17.56	0.57	0.93	0.069	0.079	0.053	0.92
Pb 9519/48.34	0.41	1.04	0.088	0.064	0.039	1.13
B 3391/41.87	0.74	1.06	0.054	0.081	0.055	0.78
Pb 23884/38.08	0.46	0.95	0.057	0.073	0.056	0.93
P 38228/22.40	0.79	1.12	0.081	0.085	0.056	0.99
Pb 89474/23.30	0.45	1.07	0.064	0.087	0.050	0.87
Pb 68162/41.66	0.55	1.03	0.063	0.078	0.052	0.93
B 3479/34.19	0.79	1.28	0.061	0.092	0.049	0.83
Pb 64924/8.50	0.45	1.18	0.065	0.094	0.050	0.87
Pb 12186/25.39	0.64	1.20	0.068	0.094	0.051	0.93
Pb 7599/38.96	0.61	1.08	0.061	0.084	0.060	0.81
Pb 62039/45.09	0.49	1.21	0.057	0.084	0.055	0.92
B116250/31.14	0.68	1.12	0.058	0.097	0.070	0.76
Pb 17960/46.62	0.51	1.25	0.070	0.095	0.055	1.00
Pb 77358/15.25	0.54	1.11	0.065	0.092	0.060	0.90
Pb 16012/28.98	0.54	1.12	0.070	0.086	0.054	0.88
B 77517/ 45.30	0.80	1.27	0.058	0.135	0.064	0.81
Pb115662/46.88	0.49	1.26	0.065	0.085	0.059	0.89
Pb 50921/21.95	0.45	1.18	0.067	0.095	0.050	0.83
Pb 89844/39.62	0.58	1.33	0.060	0.106	0.048	0.83
Pb 40693/12.56	0.63	1.24	0.064	0.085	0.054	0.88

Pb 26381/31.66	0.44	1.53	0.054	0.096	0.039	0.64
Pb 30503/21.95	0.54	1.12	0.068	0.082	0.073	0.89
Pb30579/34.35	0.58	1.12	0.061	0.096	0.057	0.78
B 94076/49.39	0.73	1.89	0.054	0.084	0.066	0.78
Pb 90004/41.57	0.49	1.24	0.066	0.112	0.046	0.71
Pb 108375/45.15	0.51	1.16	0.069	0.077	0.053	0.87
Pb 8102/3.60	0.50	1.37	0.061	0.100	0.041	0.62
B 77740/33.36	0.68	1.06	0.068	0.083	0.052	0.89
Pb 93858/16.92	0.57	1.11	0.062	0.087	0.058	0.87
Pb 1499/23.45	0.62	1.17	0.066	0.095	0.068	0.91
Pb 40952/29.28	0.55	1.10	0.060	0.090	0.068	0.86
<b>Átlag:</b>	<b>0.0575</b>	<b>1.15</b>	<b>0.063</b>	<b>0.0885</b>	<b>0.056</b>	<b>0.863</b>
<b>Szórás:</b>	<b>0.104</b>	<b>0.157</b>	<b>0.006</b>	<b>0.0107</b>	<b>0.0082</b>	<b>0.092</b>

7. Melléklet. A Naptól 50 parszek távolságon belül elhelyezkedő bolygókísérővel rendelkező F-típusú csillagok elemarányainak molban kifejezett értékei. A Pb a 0,65 alatti, míg a B jelzés a 0,65 feletti C/O arányú bolygós csillagokat jelöli. Szoláris referenciaértékek: Mg/Si =1.05; C/O=0.54; Ca/Si=0.0631; Al/Si=0.0724; Na/Si=0.0457; Fe/Si=0.87

<b>F-csillagok</b>	<b>C/O</b>	<b>Mg/Si</b>	<b>Ca/Si</b>	<b>Al/Si</b>	<b>Na/Si</b>	<b>Fe/Si</b>
HIP28767/34.09 pb	0.51	0.97	0.062	0.080	0.056	0.92
HIP12653/17.32pb	0.57	1.06	0.070	0.076	0.056	0.91
HIP90485/37.60pb	0.52	1.15	0.072	0.074	0.061	0.98
HIP94645/27.46pb	0.55	0.98	0.070	0.076	0.057	0.96
HIP33212/31.17pb	0.54	1.11	0.070	0.079	0.050	0.95
HIP6643/44.83pb	0.58	1.13	0.068	0.085	0.052	0.94
HIP522/26.18 pb	0.54	0.84	0.058	0.077	0.060	0.78
HIP14954/22.52pb	0.56	1.03	0.064	0.078	0.068	0.87
HIP19428/40.91pb	0.40	1.05	0.0631	0.062	0.051	0.87
HIP60644/38.92pb	0.50	0.97	0.065	0.068	0.054	0.95
HIP50786/38.64pb	0.54	1.25	0.058	0.078	0.061	0.89
HIP101966/34.17pb	0.35	0.98	0.071	0.079	0.058	0.90
HIP67275/15.62pb	0.53	0.80	0.060	0.076	0.064	0.83
<b>Átlag:</b>	<b>0.5146</b>	<b>1.0246</b>	<b>0.06547</b>	<b>0.076</b>	<b>0.0575</b>	<b>0.9038</b>
<b>Szórás:</b>	<b>0.064</b>	<b>0.118</b>	<b>0.0048</b>	<b>0.0055</b>	<b>0.005</b>	<b>0.054</b>