

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**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 asztroászványtani modellezések.**

Futó Péter

Témavezető: Dr. Gucsik Arnold



DEBRECENI EGYETEM

Földtudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2026

1. BEVEZETÉS

A hazai kozmokémiai és asztroásványtani kutatások 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) vendégprofesszorai, s meteoritok izotópgeokémiai kutatásával foglalkoznak.

A Naprendszer keletkezésének kémiai körülményeiről, a bolygórendszerünket felépítő anyag általános elemösszetételéről tanúskodó meteoritok – köztük a szenes kondritok – leginkább a Kabai-meteorit hazai vizsgálata több évtizedes múlttra tekint vissza.

Az utóbbi néhány évtizedben a kozmikus anyagok direkt laboratóriumi műszeres analízise mellett megkezdődött a Nap galaktikus környezetében található cirkumsztelláris környezetek alaposabb tanulmányozása is, amely lehetővé teszi más bolygórendszerekre jellemző általános kémiai és ennek alapján a várható ásványtani

összetétel összehasonlítását a Naprendszerre jellemző általános szoláris elemösszetétellel.

A galaktikus környezet csillagai nem egy időben és nem azonos kémiai összetételű csillagközi anyagból keletkeztek, ami az elemarányok eltéréseit eredményezi. Az általam vizsgált csillagok a Tejútrendszer vékony korongjának populációjába tartoznak, galaktocentrikus távolságuk a Napéhoz hasonló. Mivel a fémesség és a főbb elemarányok (C/O, Mg/Si, Fe/Si) mind radiális, mind vertikális irányban szisztematikus változást mutatnak a korongban, ezért a Naphoz hasonló típusú (G- és F-spektráltípusú) közeli csillagok jelentik a legmegbízhatóbb viszonyítási alapot a szoláris értékekkel történő összehasonlításhoz.

A protoplanetáris korongokban zajló kémiai folyamatok alapvetően befolyásolják a kialakuló bolygók kémiai összetételét. A kondenzáció feltételeinek lokális változásai meghatározó szerepet játszanak a bolygókeletkezés során, ugyanakkor ezek a hatások nem tükröződnek közvetlenül a csillagok légköri összetételében. Ennek ellenére a kőzetbolygókat felépítő anyag összetételének becsléséhez a csillagok elemgyakoriságai jelentik a legmegbízhatóbb kiindulási alapot ebből következően a csillagok fotoszférájában meghatározott elemarányok alkalmasak lehetnek a körülöttük kialakuló kőzetbolygók ásványtani és kémiai összetételének becslésére.

A feltételezett ásványtani összetétel vizsgálata

különösen jelentős, mivel az közvetlenül meghatározza az égitestek reológiai tulajdonságait, a hőtranszport mechanizmusait, valamint az inkompatibilis radioaktív elemek koncentrációját.

A teresztrikus bolygótesteket felépítő legfontosabb kémiai elemek gyakorisági eloszlásának, és ennek az ásványtani összetételre gyakorolt hatásának behatóbb vizsgálata nem csupán a kozmikus környezetünk részletesebb megismerése terén lehet meghatározó jelentőségű, de nagymértékben hozzájárul a Naprendszer és Föld-típusú bolygótestjeinek fejlődéstörténete jobb megértéséhez is.

2. KUTATÁSI KÉRDÉSEK, CÉLKITŰZÉSEK, HIPOTÉZISEK

A kutatás célkitűzései közé tartozik a Nap közvetlen galaktikus környezetében 30, illetve 50 parszek sugarú tértartományban–található G- és F-színképtípusú csillagok esetében jellemző C/O, Mg/Si, Fe/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, S/Fe, O/Si, Al/Mg, valamint Ca/Mg elemarányok gyakorisági eloszlásának vizsgálata. A munka további célja ezen elemarányok változásainak elemzése abból a szempontból, hogy azok milyen mértékben befolyásolhatják az adott csillagok környezetében kialakuló potenciális, földtípusú bolygók ásványtani összetételét. Emellett a kutatás során célul tűzöm ki a fenti eredmények felhasználásával a kőzetbolygók kémiai és ásványtani felépítését meghatározó főbb elemek

Naprendszerre jellemző relatív gyakoriságainak összevetését a Nap galaktikus környezetében megfigyelhető sztelláris elemgyakoriságokkal.

Mivel a témakörben az új eredmények alapján napjainkban kezdődik a behatóbb kutatómunka, kérdések és megalapozott lehetőségek felvetése is a célok között szerepelt. A kutatás során online csillagászati adatbázisokból származó adatokra, valamint releváns szakirodalmi forrásokra támaszkodtam.

Az értekezésben az alábbi kutatási kérdésekre kerestem válaszokat:

1. Kérdéskör. A dolgozat középpontjában a Föld-típusú, elsősorban szilikátokból és oxidokból álló, szilárd kérgű bolygótestek állnak. Ezen égitestek belső felépítésében meghatározó szerepet játszanak a különböző típusú szilikátásványok. A dolgozat első részének célja annak vizsgálata, hogy a szilikátok – mint a bolygótestek kialakulásában és szerkezetében kulcsszerepet betöltő ásványfázisok – milyen relatív gyakorisággal fordulnak elő a Naprendszer különféle kozmikus anyagaiban, valamint az interszelláris térben.

1. *Hipotézis* (Kapcsolódó tézis: 1.tézis): A meteoritikus anyagok alapján a magnézium-szilikátok tekinthetők a leggyakoribb szilikátfázisoknak, ami elsősorban a magnézium kozmikus bőségének köszönhető, amely meghaladja az alumínium és a kalcium gyakoriságát.

A szenes kondritok elemgyakoriságai alapján a vas-

szilikátok gyakorisága meghaladja a magnézium-szilikátokét is, amely feltehetően a vasban gazdag porszemcsék keletkezése a kondenzációnem egyensúlyi jellegéből adódik a cirkumsztelláris környezetekben (Bose és mtsai., 2010).

2. Kérdéskör. Milyen jellemző tendenciák figyelhetők meg a Naptól számított 30 parszek távolságon belül elhelyezkedő G-színképtípusú csillagok esetében az S/Fe arány, valamint a C/O és az ezzel összefüggésben vizsgált C/Si elemarányok gyakorisági eloszlását illetően, különös tekintettel a Naprendszerben mért referenciaértékekkel való összevetésre? A kapott elemarány-eloszlások alapján milyen következtetések vonhatók le a vizsgált csillagok környezetében kialakuló potenciális kőzetbolygók ásványtani összetételére vonatkozóan?

2. Hipotézis (Kapcsolódó tézis:2.tézis): Hipotézisem szerint a Naprendszerre jellemző S/Fe arány (0,49) tipikusnak tekinthető a Nap galaktikus környezetében elhelyezkedő G-típusú fősorozati csillagok releváns elemarányaival összevetve. A vizsgálat célja annak meghatározása, hogy a sztelláris S/Fe arányok túlnyomó része a szoláris értékhez közeli, 0,4-0,6 közötti tartományba esik-e.

3. Hipotézis (Kapcsolódó tézis: 3.tézis): A csillagok körül egykor létező protoplanetáris korongok eredeti kémiai összetétele és elemarányai—még ha nem is

egyeznek meg a csillaglégkörökben megfigyelhető elemgyakoriságokkal megfelelő pontossággal közelíthetők.

Minél magasabb a C/O arány annál kevesebb csillagot találunk a vizsgált mintában az egyes C/O aránytartományokban. A magasabb C/O aránnyal jellemezhető csillagok száma kisebb, mint az alacsonyabb C/O arányt mutató csillagoké. Feltételezésem szerint a C/O arány növekedésével párhuzamosan a magasabb C/O arányú G-színképtípusú fősorozati csillagokra egyúttal magasabb C/Si arány is jellemző.

3. Kérdéskör. A Naptól 30 parszeknél közelebbi galaktikus környezetben található G- és F-színképtípusú csillagokra jellemző Ca/Si, Al/Si, valamint Ca/Mg és Al/Mg, valamint az O/Si elemarányok vizsgálata alapján milyen következtetések vonhatók le a potenciálisan kialakuló kőzetbolygók ásványtani jellemzőiről, különös tekintettel a Naprendszerben megfigyelhető referenciaértékekkel történő összehasonlításra?

4. Hipotézis (Kapcsolódó tézis: 4.tézis): A szolárisnál értékeknél magasabb Ca/Si és Al/Si elemarányokkal rendelkező G- és F-spektráltípusú csillagok többségére a Ca/Mg és Al/Mg elemarányok is a szoláris értékekhez hasonló, vagy azt meghaladó értékeket mutatnak.

5. Hipotézis (Kapcsolódó tézis: 5.tézis): Azoknál a G- és F-színképtípusú csillagoknál, amelyek C/O elemaránya alacsonyabb a Naprendszerre jellemző értéknél, az O/Si

arány a legtöbb esetben meghaladja a szoláris értéket (14,125).

4. Kérdéskör. A Naptól 50 parszeknél közelebbi galaktikus környezetben található G- és F-színképtípusú csillagok vizsgálata alapján milyen tendenciák figyelhetők meg a teresztrikus típusú bolygótestek ásványtani összetételét meghatározó Mg/Si és Fe/Si elemarányok tekintetében, különös figyelemmel a Naprendszerre jellemző referenciaértékekkel való összehasonlításra?

A sztelláris Mg/Si és Fe/Si arányoknak a szoláris értékekkel történő külön-külön összevetése önmagában is jelentős információval szolgál, ugyanakkor e két elemarány együttes, kombinált vizsgálata kiemelt fontosságú a kutatás szempontjából. Ennek oka, hogy A bolygótestek szilikátos öveiben megjelenő ásványfázisok típusát és arányát alapvetően az Mg/Si arány határozza meg, míg a köpenyásványok vastartalma, valamint a bolygótest fémes magjának mérete döntően az Fe/Si arány függvénye.

Ennek megfelelően az Mg/Si és Fe/Si arányok együttesen határozzák meg a kialakuló szilikátos-oxidos összetételű bolygótestek szerkezeti felépítését és fő ásványtani összetételét. A disszertáció egyik fontos eleme ezért annak vizsgálata, hogy a Naprendszerre jellemző Mg/Si és Fe/Si elemarányok kombinációja mennyiben tekinthető tipikusnak a Nap közvetlen galaktikus környezetében található G- és F-színképtípusú csillagok elemgyakoriságaihoz viszonyítva.

6. Hipotézis (Kapcsolódó tézis: 6. tézis): A szoláris értékekhez hasonló Mg/Si-Fe/Si elemarány-kombináció ($Mg/Si = 1,03-1,05$; $Fe/Si = 0,85-0,89$) ritkán fordul elő a Naptól számított 50 parszekes környezetben található G- és F-típusú csillagokra jellemző Mg/Si-Fe/Si aránykombinációk között, amelyek többségének legalább egyik komponense jelentős eltérést mutat a szoláris referenciaértéktől ($Mg/Si = 1,05$; $Fe/Si = 0,87$).

5. Kérdéskör. Milyen mértékű a sztelláris Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok változékonysága a Nap 50 parszek sugarú galaktikus környezetében található G- és F-színképtípusú csillagok populációiban, s ez milyen hatással lehet a potenciális kőzetbolygók feltételezhető ásványi összetételére.

7. Hipotézis (Kapcsolódó tézis: 7. tézis): Az Mg, a Ca vagy az Al elemek sztelláris gyakorisága összefüggést mutat a csillagok fémességével $[Fe/H]$, amelynek átlagértéke a Nap galaktikus környezetében $-0,2$ dex (McWilliam, 1997). Ennek megfelelően e galaktikus régióban a legtöbb csillag fémessége alacsonyabb a Napénál ($[Fe/H]=0$). Mivel az alacsony fémességű csillagok esetében többek között az Mg, a Ca és az Al elemek relatív gyakorisága magasabb (McWilliam 1997), ezért valószínűsíthető, hogy ezen csillagok Mg/Si, Ca/Si és Al/Si arányai is eltérnek a szoláris értékektől.

A sztelláris elemarányok jelentős változatosságát figyelembe véve megfogalmazott hipotézisem szerint a

Naprendszerre jellemző hat kulcsfontosságú elemarány (Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, Fe/Si) kombinációja nem tekinthető tipikusnak a Nap galaktikus környezetében található G- és F-színképtípusú csillagok populációjában. A Naptól számított 50 parszekes térrészen belül található, G- és F-típusú csillagok teljes mintájára, valamint a közülük a bolygókísérővel rendelkező csillagok Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarány-eloszlása hasonló egymáshoz és többségében különbözik a szoláris referenciaértékektől. A szoláris C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarány-kombináció, valamint a hozzá közel eső értékeket mutató aránykombinációk nem tekinthetők tipikusnak a vizsgált G- és F-típusú csillagok mintáiban.

8. Hipotézis (Kapcsolódó tézis: 8. tézis) A vizsgálat tárgya: A szolárishoz hasonló C/O-Mg/Si elemarány-kombináció ($0,52 < C/O < 0,56$; $1,03 < Mg/Si < 1,07$) előfordulási gyakoriságának felmérése a Nap 50 parszekes környezetében található G- és F-típusú csillagokra jellemző C/O és Mg/Si arányeloszlások alapján.

Feltételezésem szerint a megadott tartományba eső csillagok száma mindkét spektráltípus esetében alacsony, a teljes csillagmintához viszonyítva.

3. FELHASZNÁLT MÓDSZEREK

Doktori értekezésemben a hét vizsgált kérdéskör megválaszolása érdekében a Nap galaktikus környezetére

jellemző relatív elemgyakoriságok és a Naprendszer releváns elemgyakoriságainak összehasonlítását végeztem el, amelyhez meghatározott tényekre, hiteles adatforrásokra és alkalmazott módszertani eljárásokra támaszkodtam.

A kutatás egyik alapvető kiindulási ténytényezője, hogy a csillagok és a körülöttük kialakuló bolygók közös eredetű csillagközi anyagból keletkeznek, így kémiai összetételük szoros összefüggésben áll egymással. Ez a kapcsolat különösen érvényes a teresztrikus típusú bolygók felépítésében kulcsszerepet játszó kémiai elemek-így például a magnézium, a szilícium, a vas, az oxigén, az alumínium és a kalcium -esetében.

A magnézium-szilikát fázisok gyakoriságának becsléséhez már meglévő adatforrások felhasználásával általam létrehozott új adatokra, valamint korábbi (Futó 2017 a) Raman-spektroszkópiai módszerrel végzett mérés adataira támaszkodtam.

A létezésében megerősített bolygókísérővel rendelkező G- és F-típusú csillagok elemarány-vizsgálata a teljes minta G- és F- típusú csillagaira jellemző elemarányokkal történő összehasonlítás céljából szerepel a dolgozatban. A teljes mintára jellemző csillagokéval való összehasonlítás segíti a bolygórendszerekre jellemző elemaránygyakoriságok pontosabb becslését. A csillaglégkörök – így a Nap – elemgyakoriságai, különösen a Föld-típusú bolygótetek felépítésében meghatározó elemek esetében, jó egyezést mutatnak a szenes kondrit típusú

meteoritokban megfigyelhető értékekkel. A szoláris és meteoritikus elemgyakoriságok összevetése azért bír kiemelt jelentőséggel, mert a szenes kondritok a Naprendszer legkevésbé átalakult kozmikus anyagai, így megbízhatóan őrzik annak az ősi anyagnak a kémiai összetételét, amelyből a Nap és bolygói kialakultak.

Az elemgyakorisági adatok elsődleges forrása a Hypatia-katalógus (Hinkel és mtsai, 2014) online adatbázisa, amely a Nap környezetében, mintegy 500 parszek sugarú galaktikus térségben elhelyezkedő F-, G-, K- és M-színképtípusú csillagokra vonatkozóan tartalmaz spektroszkópiai módszerekkel meghatározott elemgyakoriság-értékeket.

Az exobolygókkal kapcsolatos adatok forrásául a NASA Exobolygó Archívuma (NASA Exoplanet Archive) szolgál, amely a NASA Exobolygó Tudományos Intézete (NExSci-NASA Exoplanet Science Institute) által működtetett, online hozzáférhető exobolygó- és csillagkatalógus.

Az elemgyakorisági adatok szűrését, rendszerezését, valamint a táblázatok szerkesztését és kezelését a Microsoft Excel és Microsoft Word szoftverek segítségével végeztem. Az átlag és szórás számításokat a Statistics Kingdom kalkulátor-programja segítségével végeztem el. Az ábrák elkészítéséhez a LibreOffice 4.1 grafikus modulját, valamint a Paint alkalmazást használtam.

3.1 Statisztikai módszerek

A Nap a referencia csillag az elemgyakoriságok meghatározásához: (C, O, Mg, Si, Ca, Al, Na, Fe, S = 0,00 dex-decimal exponent). Az elemarányok számításának módja $N_1/N_2 = SV_{N_1/N_2} \{ \log_{10} [X_1/H] / \log_{10} [X_2/H] \}$ ahol SV_{N_1/N_2} az adott elemarány szoláris értéke, $[X_1/H]$ and $[X_2/H]$ adott elemek gyakoriságának dex-ben kifejezett értéke.

A kutatás szempontjából kiemelt jelentőséggel bíró C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok mellett az S/Fe, C/Si, Ca/Mg, valamint Al/Mg arányok is bevonásra kerültek az elemzésbe. Ezen utóbbi arányok nemcsak bolygótudományi szempontból relevánsak, hanem fontos kiegészítő információval szolgálnak a Naprendszerre, illetve a vizsgált sztelláris mintákra jellemző elemarányok közötti összehasonlítások szempontjából is.

A statisztikai elemzés alapját a vizsgált elemarányokra vonatkozó mintaadatok és a szoláris referenciaként szolgáló értékek összehasonlítása képezte. Az egyes 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 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 szórások szintén jelentős információval szolgálnak, mivel eredményeik általában megerősítik a relatív gyakorisági elemzésből levont következtetéseket, ezáltal hozzájárulva az elemarány-eloszlások megbízhatóbb értelmezéséhez.

3.2 Definíciók

A geokémiában és a bolygótudományban általában egy bolygótest kémiai összetételében az egyes elemek részarányát és relatív gyakoriságait a teljes bolygótest tömegéhez viszonyítva súlyszázalékos arányban fejezik ki (McDonough és Sun 1995). Ha például egy csillag Ca/Si és Al/Si aránya a szoláris értékeknél magasabb akkor nagy valószínűséggel a körülötte kialakuló kőzetbolygók elemösszetételében a kalcium és az alumínium nagyobb súlyszázalékos aránya lesz a szilíciumhoz képest.

Referenciaértékek: A kozmokémiai, bolygótudományi és geokémiai elemzésekben az elemarányokat rendszerint a Naprendszerre jellemző, szoláris (CI kondritokon alapuló) referenciaértékekhez viszonyítva értelmezik. A szoláris elemarányok referenciaként való alkalmazása azért kiemelten fontos, mert a vizsgálat középpontjában ezek és a közeli G- és F-típusú csillagok elemgyakoriságainak összehasonlítása áll. Így a dolgozatban a szoláris releváns elemarányok szolgálnak viszonyítási referencia rendszerként (1.táblázat).

1. táblázat A szoláris elemarányok molban kifejezett értékei (saját készítésű táblázat. A referenciaértékek Asplund és mtsai. 2005, 2009. adatai alapján számított adatok.)

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

Eltérések: Egy elemarány referenciaértéktől való eltéréseinek jelentősége több tényezőtől függ, gyakran attól, hogy az befolyásolja-e a protoplanetáris korongból kialakuló kőzetbolygók ásványi összetételét, különösen az uralkodó ásványfázisokat. Például az Mg/Si arány 1,0 alá csökkenése esetén a piroxének dominánssá válhatnak az olivinnel szemben (Bond és mtsai. 2010), ezért az Mg/Si arány szoláris értékétől (1,05) való, 5%-ot meghaladó eltérés már geológiai értelemben relevánsnak tekinthető. A C/O arány 0,65 feletti értékei-különösen a csillaghoz közeli tartományokban-szénben gazdag, elsősorban szénalapú ásványokból álló kőzetbolygók kialakulását eredményezhetik (Moriarty és mtsai. 2014), ezért a szoláris érték (0,54) több mint 20%-os túllépése (C/O=0,65) jelentős eltérésnek minősül. A Ca/Si, Al/Si és Na/Si arányok esetében a szoláris referenciaértékek és a CI-kondritok megfelelő arányai közötti különbségeket, míg a Fe/Si aránynál a primitív földköpenyre jellemző értéket tekintetem a lényeges eltérés küszöbértékének.

A jelentős eltérés küszöbértékeinek meghatározási

elvét az egyes elemarányoknál a referenciaértéktől számított negatív és pozitív irányban is alkalmaztam. A dolgozatban a következő eltérési küszöbértékek tekintendők jelentősnek: C/O arány esetén $\pm 0,21$ molarány eltérés ($\pm 20\%$), Mg/Si arány esetén $\pm 0,05$ molarány eltérés ($\pm 5\%$), Fe/Si arány esetében pedig $\pm 0,13$ molarány eltérés ($\pm 15\%$) a referenciaértékhez viszonyítva. 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 ($\pm 27\%$) jelenti a jelentős különbségek küszöbértékét.

A dolgozat értékelési rendszerében egy elemarány abban a szoláris referenciaértékhez viszonyított eloszlási tartományban (az annál alacsonyabb, azzal megegyező, illetve annál magasabb értékek között) minősül tipikusnak, amelyekben az előfordulási gyakorisága meghaladja az 50%-ot; ellenkező esetben az adott tartományban atipikusnak tekinthető. Amennyiben egy elemarány szoláris referenciaértéke a minta kevesebb mint 10%-ában fordul elő, miközben a szoláris referenciaértéktől eltérő értékek több mint 50%-a egy másik eloszlási tartományba esik, a szoláris referenciaérték nem tekinthető a populációra jellemző tipikus értéknek.

Az elemarány-kombinációk vizsgálata azért fontos, mert az egyedi arányokon túl pontosabb képet adhat a kőzetbolygó-típusok eloszlásáról, valamint segíthet a Naprendszerre jellemző elemarányok tipikusságának megítélésében. A dolgozatban elemzett rendszerek:

Mg/Si-Fe/Si; C/O-Mg/Si; és C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si.

Az elemarány-kombinációk közül azok számítanak jelentős eltérést mutatónak, amelyek legalább egyik komponense a jelentős eltérés küszöbértéknél nagyobb mértékben tér el a szoláris értéktől. Az elemarány-kombinációk hasonlóságának határérték tartományai: (Mg/Si=1,03-1,07, Fe/Si=0,85-0,89); (C/O=0,52-0,56, Mg/Si=1,03-1,07); valamint (C/O=0,54±0,02, Mg/Si=1,05±0,02, Ca/Si=0,063±0,003, Al/Si=0,0724±0,012, Na/Si=0,0457±0,012, Fe/Si=0,87±0,02).

A kutatás alapjául szolgáló elemzéseket két irányú megközelítésben végeztem el. Az első megközelítés során olyan elemarányok (S/Fe, C/Si, O/Si, Ca/Si, Ca/Mg, Al/Si, Al/Mg) eloszlását vizsgáltam, amelyek bár nem tartoznak a kőzetbolygók ásványtani felépítését legnagyobb mértékben meghatározó arányok közé, ugyanakkor fontos szerepet töltenek be a bolygók kiegészítő ásványfázisainak kialakulásában, illetve egyes kőzetbolygó-típusokra jellemző specifikus ásványi összetételek meghatározásában.

A második megközelítésben a kőzetbolygók ásványtani felépítésében legfontosabb szerepet betöltő C/O, Mg/Si és Fe/Si elemarányok relatív sztelláris gyakoriságait és ezek egymással, valamint az alárendeltebb jelentőségű elemarányokkal való kombinációjának gyakorisági eloszlásait illetve a fő planetáris ásványtani összetételre gyakorolt lehetséges hatását vizsgáltam.

A második megközelítés során a kőzetbolygók ásványtani felépítését meghatározó legfontosabb elemarányok-elsősorban a C/O, Mg/Si és Fe/Si-relatív sztelláris gyakoriságát vizsgáltam. Elemeztem továbbá a fő elemarányok egymáshoz viszonyított eloszlását, valamint kombinációjuk előfordulási gyakoriságát más, kisebb jelentőségű elemarányokkal (Ca/Si, Al/Si, Na/Si) együtt. A vizsgálat célja az volt, hogy feltárja a gyakorisági eloszlások lehetséges hatását a bolygók elsődleges ásványtani összetételére.

Mivel a primitív, szenes kondrit típusú meteoritok kémiai összetétele értékes információt nyújt arról az ősi anyagról, amelyből a Naprendszer égitestei kialakultak, a meteoritok elemarányai kiemelt jelentőségűek a Naprendszer kezdeti kémiai viszonyainak rekonstruálásában. A szenes kondritok általános elemarányai-a Nap fotoszférájában mért elemgyakoriságokkal mellett-szintén referenciaértéket képviselnek a Naprendszer releváns elemarányainak összehasonlító vizsgálatára.

A kutatómunka során a Naprendszerre jellemző, molarányban kifejezett elemarányokat (C/O, C/Si, O/Si, Mg/Si, Ca/Si, Ca/Mg, Al/Si, Al/Mg, Na/Si és S/Fe) az Asplund és munkatársai (2005) által közölt elemgyakorisági adatok alapján határoztam meg.

4. EREDMÉNYEK

1. Tézis

Szenes kondritok különböző komponensei elemösszetételének adatelemzése útján megállapítottam, hogy a Naprendszer ősi anyagában a magnéziumban gazdag szilikátok a domináns fázisok. A magnéziumban gazdag szilikátok előfordulása 20-50 mólszázalékkal meghaladja a vastartalmú szilikátokét.

A vizsgálati eredmények publikálása: Futó P., Vanyó J., Simonia I., Sztakovics J., Nagy M., Gucsik A., Döncző B., Kertész Zs., Novák R., Csámer Á. (2021): 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. pp 45-55.

A vizsgált szenes kondritok kémiai összetételére vonatkozó adatelemzés alapján az Mg/Fe arány súlyszázalékos megoszlása 0,348/0,652 és 0,393/0,607 között változik (2. táblázat), ami 1,2-1,5 közötti Mg/Fe mólarányoknak felel meg. Ennek értelmében a Naprendszer eredeti kémiai összetételében a szilikát- és oxidfázisok magnéziumgyakorisága a vaséhoz 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 bolygótestek felépítésének

alapját képező anyagban.

A szenes kondritok egyes ásványi fázisaiban – például a fayalitos összetételű aggregátumokban – a vastartalmú ásványi komponensek aránya mintegy két nagyságrenddel meghaladja a magnéziumban gazdag ásványokét (fayalit aggregátum: Mg= 0,3, Fe=99,7 tömegszázalék; lásd 2. táblázat). A magas vastartalmú ásványfázisok képződése a szakirodalomban korábban leírtakkal összhangban feltehetően nemegyensúlyi kondenzációs folyamatok eredménye (Bose és mtsai., 2010).

2.táblázat. Különböző 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 Weisberg és mtsai. (1993) (W93). A számított adatok forrásai: Futó és Gucsik (2017 b); Futó és mtsai. (2021)

Meteorit-ásványi komponens	Mg/Fe arány számított értékei (súlyszázalék)
Kaba-porfirites 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

2. Tézis

Kimutattam, hogy a Naprendszerre jellemző S/Fe arány (0,4897788) átlagosnak tekinthető a Nap 30 parszek sugarú galaktikus környezetében található G-színképtípusú fősorozati csillagok vonatkozó elemarányaihoz kapcsolódó összehasonlító elemzésem alapján. A 165 G-típusú csillagot tartalmazó mintában 91 csillag (55%) esik a szoláris referenciaértéket is magában foglaló, 0,4-0,6 közötti értéktartományba. A vizsgálat során meghatározott S/Fe értékek a 0,048 és 2,692 közötti intervallumba esnek, amely a sztelláris kén-vas arányok jelentős diverzitását mutatja.

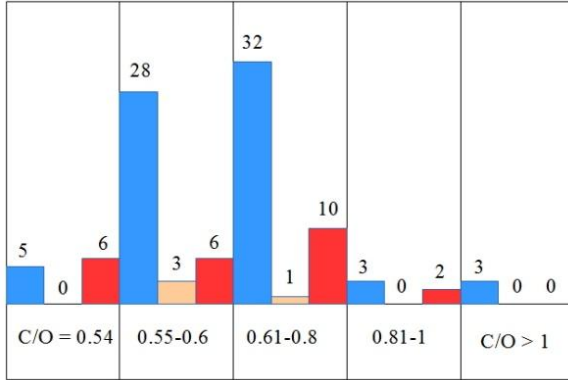
A vizsgálati eredmények publikálása: Futó P., Gucsik A. (2023a): Implications for the bulk elemental composition of terrestrial planets I. The stellar and planetary S/Fe molar ratio. LIV. Lunar and Planetary Science Conference. Houston. Abstract: 1070.

A 0,4-0,6 közötti S/Fe értékeket mutató csillagok körül keletkező potenciális kőzetbolygók kéngyakorisága-amennyiben a bolygókeletkezés egyéb feltételei is lehetővé teszik-hasonlóságot mutathat a Naprendszer belső bolygóival, köztük a Földdel.

3. Tézis

Pozitív korrelációt állapítottam meg a növekvő C/O és C/Si arány között. Következésképpen a C/O arány növekedésével a szilícium-karbid aránya fokozatosan nő a szénben gazdag kőzetbolygók köpenyalkotó ásványai között. A 175 csillagot tartalmazó mintában 88 objektum C/Si aránya a $C/O \geq 0,55$ tartományba esik. Ebben a szénben gazdag tartományban a G színképtípusú, a Nap 30 parszekes környezetében található fősorozati csillagok domináns részhalmazára (75%) a szoláris értéket (7,58578) a minta legmagasabb értékében 127,78%-kal meghaladó, 17,279-ig terjedő C/Si arány jellemző, amelynek átlaga 8,512.

A vizsgálati eredmények publikálása: Futó P., Gucsik A. (2023 b): 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.



1.ábra. 30 parszeknél közelebbi G-típusú csillagokra jellemző C/Si arányok 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 2023 b).

Következésképpen, a vizsgált csillagok esetében a C/Si és a C/O elemarányok növekedése pozitív korrelációban áll egymással. Az is megállapítható, hogy a C/O arány növekedésével a szilícium-karbid aránya fokozatosan nő a szénben gazdag közetbolygók köpenyalkotó ásványai között, mivel a bolygóbelsőben csökken az oxidáció mértéke. Ennek hatására a C/O arány növekedésével párhuzamosan egyre több szilícium vegyül a szénnel és alkot szilícium-karbidot a köpenyben, melynek aránya ezáltal nő a szilikátokhoz és az oxidokhoz képest.

4. Tézis

A kutatásom alapján a Nap 30 parszekes környezetében elhelyezkedő, a szoláris értéknél alacsonyabb C/O és magasabb Mg/Si arányú, bolygókísérővel rendelkező G- és F-típusú csillagok potenciális kőzetbolygóinak köpenyében és kérgében a Ca- és Al-tartalmú ásványfázisok aránya várhatóan magasabb, mint a Naprendszer kőzetbolygóiban.

A vizsgált magas Mg/Si arányú G-csillagok 82,22, az F-csillagok 65,9 %-a rendelkezik a szolárisnál (0,0631) magasabb Ca/Si aránnyal, míg a G-csillagok 95,56, az F-csillagok 47,73 %-a mutat a szoláris értéknél (0,0724) magasabb Al/Si arányt.

A vizsgálati eredmények publikálása: 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.

A vizsgált csillagok mintájában a szolárisnál (1,05) magasabb (1,06-1,48) Mg/Si elemarányal rendelkező G-típusú csillagok domináns hányadára (82,22 és 95,56 %-ára), valamint az F-csillagok (65,9 és 47,73 %-ára) a szolárisnál magasabb Ca/Si (és Al/Si elemarányok jellemzőek. A szolárisnál magasabb Ca/Si értékek esetén a G-csillagok mintájában 0,065-0,098, az F-csillagok között 0,064-0,096 közötti értékek figyelhetők meg. A G-

csillagok Al/Si aránya 0,074-0,11, míg az F-csillagoké 0,074-0,166 között változik.

A kutatási eredmények alapján a F-csillagokra Ca/Mg és Al/Mg elemarányok átlagértékei (0,0624) illetve (0,08529), mely értékek a magasabbak a szoláris Ca/Mg és Al/Mg aránynál. A G-spektráltípusú csillagok esetében a Ca/Mg (0.0598) kisebb, míg az Al/Mg arány átlagértéke (0.07565) nagyobb a szoláris releváns elemarány értékeknél (Ca/Mg-0,060256; Al/Mg-0,06918).

Következésképpen, a Naphoz közeli exo-közetbolygók többségének köpenyében és kérgében a kalcium- és alumíniumtartalmú ásványfázisok aránya nagy valószínűséggel kissé nagyobb, mint a Naprendszer külsőbb régióiban (pl. a Föld és a Mars esetében) kialakult közetbolygók esetében.

5. Tézis:

Megállapítottam, hogy a Naptól számított 30 parszekes térségen belül a szolárisnál (1,05) magasabb Mg/Si arányú G- és F-típusú csillagok többségénél (G=79,66%) (F=97,1%) az O/Si arány meghaladja a szoláris értéket (14,125). Ez oxidáltabb köpenyfeltételeket eredményez és oxigénben gazdag ásványfázisok kialakulásához vezet. A G-típusú csillagokra meghatározott átlagos O/Si arány 16,26, amely kissé meghaladja a szoláris O/Si arányt. Az F-típusú csillagok átlagos O/Si aránya 22,586.

A vizsgálati eredmények publikálása: 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

A magas O/Si arány mellett képződő bolygók többsége gazdag lehet Mg- és O-tartalmú ásványokban—például: MgO₂ (Lobanov és mtsai. 2015), valamint a kalciumgyakoriság függvényében: CaO₂ (Nelson és mtsai. 2015), felső köpenyük magas arányban tartalmazhat olivint és magasabb nyomású polimorfjait.

6. Tézis.

A kutatásom minták alapján 50 parszekes térségben 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-kombináció ritka (G-csillagok: 3,59 %; F-csillagok: 4,26 %). A legtöbb vizsgált csillagnál legalább az egyik komponens jelentősen eltér a szolárishoz hasonló értékektől, ami arra utal, hogy a szoláris releváns elemarányok (Mg/Si-Fe/Si) kombinációja nem tipikus a vizsgált csillagpopulációban.

A vizsgálati eredmények publikálása: Futó P., Gucsik A. (2025): 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. 2025.0017.

3. táblázat. Az elemarány-eloszlásokhoz tartozó szórások alacsony értékei a 50 parszeken belüli G- és F-színképtípusú csillagmintákban (saját készítésű táblázat).

Elemarány-átlag	Mg/Si	Fe/Si
G-csillagok-szórás	0,143	0,119
F-csillagok-szórás	0,18	0,12

A legtöbb vizsgált elemarány átlag esetében a 0-hoz közeli szórásértékek az átlag közelébe történő koncentrációt jelzik, ami hozzájárul a számított átlag értékek pontosságához a szoláris referenciaarányok gyakoriságának becslése szempontjából.

4. táblázat. A Naptól számított 50 parszek távolságon belül található G- és F-színképtípusú csillagokra jellemző szolárisnál alacsonyabb, azzal azonos, valamint annál magasabb releváns elemarányok relatív gyakorisági eloszlása (saját készítésű táblázat).

G-csillagok	Mg/Si	Fe/Si
Szubszoláris	20,5 %	44,1 %
Szolárisal azonos	4,7	7,4
Szuperszoláris	74,8	48,5
F-csillagok	Mg/Si	Fe/Si
Szubszoláris	35,66 %	57,36 %
Szolárisal azonos	6,59	5,43
Szuperszoláris	57,75	37,21

Mindkét csillagminta szolárisnál magasabb Mg/Si aránygyakoriságai, a G-csillagok szuperszoláris Fe/Si gyakoriságai, valamint a 10 % alatti szolárisal megegyező értékek az elemarányátlagok mellett szintén rávilágítanak a szoláris referenciaértékek atipikus

jellegére.

5. táblázat. A szoláris referenciaértéktől való eltérés mutató csillagok relatív gyakorisági arányai a G- és F-csillagmintákban az Mg/Si–Fe/Si elemaránykombináció egyik, illetve mindkét komponensére vonatkozóan (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%

Ha a G- és F-típusú csillagok esetében jellemzően csak az Mg/Si-Fe/Si aránykombináció egyik komponense tér el jelentősen a szoláris értéktől, akkor ez a tendencia tovább erősíti azt a korábbi következtetést, miszerint a szoláris Mg/Si-Fe/Si kombináció nem számít tipikusnak a vizsgált mintákban.

7. tézis

A kutatási eredményekből megállapítottam, hogy a Nap 50 parszekes környezetében a vizsgált G- és F-színképtípusú csillagok releváns elemgyakoriságai alapján a szoláris C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si elemarányok értékei a teljes mintákban és a bolygóval rendelkező csillagok mintáiban atipikusak.

A vizsgálati eredmények publikálása: Futó P., Gucsik A. (2025): 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.

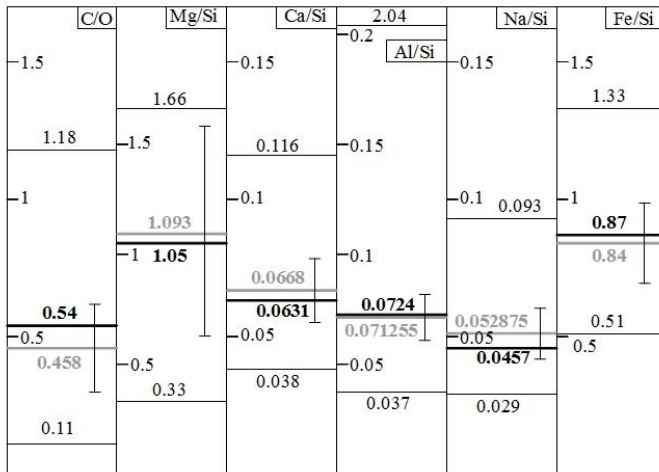
A teljes mintákban a G- és F-színképtípusú fősorozati csillagok döntő többségére-az elemzett elemarányok függvényében 55,66–87,98%-os arányban-a szoláris értékeket meghaladó C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, valamint Fe/Si arányok jellemzőek. Kivételt ez alól csupán a G típusú csillagok esetében a szuperszoláris C/O és Fe/Si, illetve az F típusú csillagok esetében a szuperszoláris Al/Si és Fe/Si arányok képeznek, amelyeknél az adott elemarányok előfordulási gyakorisága 37,21-48,5% közötti értékeket mutat.

A bolygóval rendelkező G- és F-típusú 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 aránya 53,85-100% között mozog. Kivételt

képeznek a G típusú exobolygós csillagok esetében a szuperszoláris Ca/Si és Fe/Si arányok, illetve az F típusú csillagoknál a szuperszoláris C/O arány, amelyek előfordulási gyakorisága 43,04-49,37% közötti értékeket mutat.

	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
1.5	1.31	1.89	0.15	0.2	0.15	1.48
1	0.54	1.124	0.098	0.15	0.12	0.87
	0.531	1.05	0.064	0.081678	0.1	0.84074
	0.5	0.73	0.0631	0.0724	0.05363	0.5
	0.5	0.5	0.05	0.05	0.05	0.48
	0.12	0.043	0.049	0.0457	0.032	

2.a ábra. A C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si arányok átlagai a G-típusú csillagmintában; a fekete vonal a szoláris referenciaértéket, a szürke az elemarány átlagot, a szóródás a forrásadatokban meglévő mérési bizonytalanságokat jelzi (Futó és Gucsik 2025).



2.b ábra. A C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si arányok átlagai a F-típusú csillagmintában; a fekete vonal a szoláris referenciaértéket, a szürke az elemarány átlagot, a szóródás a forrásadatokban meglévő mérési bizonytalanságokat jelöli (Futó és Gucsik 2025).

6. táblázat. Az elemarány-eloszlásokhoz tartozó szórások alacsony értékei a teljes, 50 parszeken belüli G- és F-színképtípusú csillagok mintáiban (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

7. táblázat. A Naptól számított 50 parszek távolságon belül található G- és F-színképtípusú csillagokra jellemző szolárisnál alacsonyabb, azzal azonos, valamint annál magasabb releváns elemarányok relatív gyakorisági eloszlása (saját készítésű táblázat).

G-csillagok	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
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
F-csillagok	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
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

	C/O		Mg/Si		Ca/Si		Al/Si		Na/Si		Fe/Si	
	Full	<0.65	Full C/O	C/O <0.65	Full C/O	C/O <0.65	Full C/O	C/O <0.65	Full C/O	C/O <0.65	Full C/O	C/O <0.65
			1.5				0.15					
-1					-0.1				-0.1		-1	
			1.1497	1.152								0.87
			-1	1.05			-0.1				0.863	0.8625
					0.063	0.0636	0.0885	0.088				
0.575					0.0631				0.056	0.0553		
-0.54	0.535				-0.05		0.0724		-0.05		-0.5	
0.5										0.0457		
			-0.5									
G-stars												

3.a. ábra A bolygóval rendelkező G-színképtípusú csillagok elemarányainak átlagértékei a teljes mintára, valamint a C/O <0,65 tartományra vonatkozóan (Futó és Gucsik 2025).

	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
	< 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65
		1.5		0.15		
-1			-0.1		-0.1	-1
		1.05				0.9038
		-1 1.0246		-0.1		0.87
			0.06547	0.076	0.0575	
			0.0631	0.0724		
0.54			-0.05		-0.05	-0.5
0.5 0.5146				0.05	0.0457	
		-0.5				
F-stars						

3.b. ábra A bolygóval rendelkező F-színképtípusú csillagok elemarányainak átlagértékei a teljes mintára. (Futó és Gucsik 2025).

8.táblázat. Az elemarány-eloszlásokhoz tartozó szórások alacsony értékei a bolygóval rendelkező, 50 parszeken belüli G- és F-színképtípusú csillagok mintáiban (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

9. táblázat. A Naptól számított 50 parszek távolságon belül található bolygókisérővel rendelkező G- és F-színképtípusú csillagokra jellemző szolárisnál alacsonyabb, azzal azonos, valamint annál magasabb releváns elemarányok relatív gyakorisági eloszlása (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 teljes csillagmintára, valamint azon belül a bolygóval rendelkező csillagokra vonatkozó elemarány-eloszlások hasonlóságot mutatnak abban a tekintetben, hogy a vizsgált elemarányok legalább kétharmadánál a G- és F-színképtípusú csillagok esetében a szuperszoláris értékek előfordulási aránya meghaladja az 50%-ot. A szoláris referenciaértékekkel való hasonlóság megfigyelése lehetőséget nyújt a vizsgált elemarányok pontosabb becslésére, különös tekintettel a szoláris értékek és a más bolygórendszerekre jellemző elemarányok közötti összehasonlításra.

A szolárisnál magasabb Mg/Si arány a csillagok többsége esetében azt valószínűsíti, hogy az esetlegesen kialakuló kőzetbolygók felső köpenyének ásványtani összetételét az olivin-fázisok dominanciája, valamint a kalciumban, alumíniumban és nátriumban gazdag piroxének nagyobb mennyiségi aránya jellemezheti.

8. Tézis

A vizsgálatom eredményei megerősítik, hogy a Naprendszerre jellemző szoláris C/O és Mg/Si elemarány-kombináció atipikusnak tekinthető a Nap 50 parszekes környezetében található G- és F-típusú csillagpopulációkban. A vizsgált minták mindössze 2,34 és 1,55 %-a mutat a szolárishoz hasonló értékeket (C/O=0,52-0,56; Mg/Si=1,03-1,07) ami arra utal, hogy a belső Naprendszer kőzetbolygóinak ásványtani felépítése nem tekinthető általános modellnek a galaktikus környezetünkben.

Az adatok alapján megállapítottam, hogy a teljes mintákban és a bolygóval rendelkező csillagok mintájában a csillagok túlnyomó többségénél az elemarány-kombinációkban az Mg/Si arányt a szolárishoz képest magasabb (szuperszoláris) értékek (teljes minta G- és F-csillagai: 74,8; 57,75 %; bolygóval rendelkező G- és F-csillagok 83,54 és 53,85%) jellemzik.

A hat elemarány kombinációja szempontjából vizsgált G- és F-színképtípusú csillagminták egyikében fordul elő a szolárishoz hasonló C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si elemaránykombináció: C/O=0,54±0,02
Mg/Si=1,05±0,02 Ca/Si=0,063±0,003
Al/Si=0.0724±0,012 Na/Si=0.0457±0,012
Fe/Si=0,87±0,02

A vizsgálati eredmények publikálása: Futó P., Guccik A. (2025): 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.

A kőzetbolygók keletkezése szempontjából kulcsfontosságú Mg/Si és C/O arányok így a legtöbb esetben jelentős eltérést mutatnak a Naprendszerre jellemző szoláris átlagértékektől.

A vizsgált G-spektráltípusú csillagok közül ($n = 512$) mindössze 12 objektum esetében fordul elő egyidejűleg a C/O arány 0,52–0,56 közötti, valamint az Mg/Si arány 1,03–1,07 közötti értéktartományban. Az F-spektráltípusú csillagok mintájában ($n = 258$) ugyanezen kritériumoknak csupán 4 csillag felel meg.

Mivel a bolygókeletkezéshez szükséges szilárd fázisú anyag kémiai összetételét a protoplanetáris korongokban meghatározó C/O és Mg/Si arányoktól függ a kialakuló bolygók ásványtani felépítése, feltételezhető, hogy a belső Naprendszer teresztrikus bolygóinak ásványi összetétele nem tekinthető általánosnak az elemzett csillagpopulációkban a potenciális kőzetbolygók várható ásványtani jellemzőihez viszonyítva.

10. táblázat. A C/O-Mg/Si elemaránykombináció szoláris értékétől jelentősen eltérő csillagok relatív gyakorisága a teljes, valamint a bolygóval rendelkező G- és F-típusú csillagmintákban, a kombináció csak egyik, illetve mindkét tagjának jelentős eltérése esetére (saját készítésű táblázat).

Jelentős eltérés a szolárisreferenciaértéktől (teljes minta)	G-típusú csillagok	F-típusú csillagok
Kombináció egyik tagja	87,89%	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 kombináció egyik tagjának szoláris értékétől való jelentős eltéréseihez kapcsolódó relatív gyakoriságok megerősítik, hogy a Napra jellemző elemarány-kombináció mind a teljes G- és F-csillagmintában, mind a bolygóval rendelkező csillagok populációjában atipikusnak tekinthető. A G-színképtípusú csillagmintában csupán egy olyan csillag (HIP 116937) fordult elő, amely a Napéhoz hasonló hatos elemaránykombinációval rendelkezik.

A kutatás eredményei arra utalnak, hogy a Naprendszerre jellemző hat fontos elemarány (C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si és Fe/Si), valamint ezek kombinációja

nem tekinthető tipikusnak a Tejútrendszer azon G- és F-színképtípusú csillagpopulációi körében, amelyek a Nap 50 parszekes környezetében helyezkednek el.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A disszertáció témaválasztása nem csak a hazai kozmo- és geokémia területén újszerű, de nemzetközi szinten a Naprendszer kozmokémiai kutatása és a kapcsolódó összehasonlító exoplanetológia terén is új irányvonalat képvisel.

A kutatásom alapján a Nap galaktikus környezetében található G- és F-típusú csillagok többségére jellemző, hogy Mg/Si arányuk meghaladja a szoláris értéket, amely megerősíti a sztelláris Mg/Si arányok dominanciájára vonatkozó korábbi kutatási eredményeket. A Napénál alacsonyabb C/O arányú csillagok előfordulása jóval gyakoribb, mint a szolárisnál magasabb szén/oxigén arányú csillagoké. A naprendszerbeli átlagos C/O és C/Si arányok sem tartoznak a vizsgált G-és F- csillagok többségére jellemző tartományba, azonban a szoláris S/Fe arány átlagosnak tekinthető.

A kőzetbolygók ásványtani felépítésében a C/O arány mellett az Mg/Si és Fe/Si arányok változékonysága idézi elő a legjelentősebb eltéréseket. E két utóbbi elemarány és ezek kombinációjának vizsgált sztelláris, valamint szoláris értékei közötti eltérések arra engednek következtetni, hogy a Naprendszer kémiai összetétele ebben a

vonatkozásban egyáltalán nem számít átlagosnak galaktikus környezetünkben. Ennek pedig messze ható következményei lehetnek a csillagpopuláció tagjai körül kialakult kőzetbolygók ásványtani felépítésére.

A kutatási eredményeim értelmezése arra is utal, hogy a Ca/Si, Al/Si, Ca/Mg és Al/Mg arányok általánosságban nem mutatnak jelentős eltérést a szoláris releváns elemarányokhoz képest. Azonban már ezek a relatíve kis különbségek is számottevő változásokat idézhetnek elő a bolygóköpenyek ásványi összetételében. Főként akkor igaz ez, ha a C/O, az Mg/Si, az Fe/Si, a Ca/Si, az Al/Si, valamint a Na/Si arányok szoláris értékeinek kombinációját hasonlítjuk össze a vizsgált G- és F-típusú csillagokéval. Azt találtam, hogy a G- és F-típusú csillagok esetében C/O arány alacsonyabb, míg az Mg/Si, a Ca/Si, az Al/Si és a Na/Si elemarányok összességében magasabbak a szoláris értékeknél. E hat elemarány szoláris értékeinek kombinációja az elemzett csillagpopulációkban ritka előfordulású, amely galaktikus környezetünkben a Naprendszer a kőzetbolygók kialakulásának kémiai feltételei szempontjából atipikus jellegűvé teszi. A relatív elemgyakoriságok közül az Mg/Si és Fe/Si arányok, valamint az előzőekben említett hat elemarány szoláris kombinációinak atipikus jellege nagy valószínűséggel hozzájárult például a Föld egyedi ásványtani felépítésének kialakulásához.

A disszertációban bemutatott kutatás eredményei és konklúziói új megvilágításba helyezhetik a Naprendszer

és benne a Föld kialakulására vonatkozó modern elméleteket, valamint az új nézőpont kialakítása útján hatással lehetnek a jövőbeni kutatások irányára is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Asplund, M, Grevesse, N, Sauval, J. (2005). The solar chemical composition. *Cosmic Abundances Rec Stellar Evolution Nucleosynthesis*. 336:25.

Asplund M, Grevesse N, Sauval A. J, Scott P. (2009). The chemical composition of the Sun. *Annual Rev. Astron Astrophys*. 47:481522.

Bond J. C, O'Brien D. P, Lauretta D. S. (2010): The compositional diversity of extrasolar terrestrial planets. I. In situ simulations. *Astrophys J*. 715:1050-1070.

Bose M, Floss C, Stadermann F. J. (2010): An investigation into the origin of Fe-rich presolar silicates in Acfer 094. *ApJ*. 714:1624.

Futó P. (2017 a): 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. (2017 b): On the bulk silicate composition of carbonaceous chondrites. In: Hayabusa Symposium 2017. Abstract: OA-P19

Futó, P., Vanyó J., Simonia I., Sztakovics J., Nagy M., Gucsik A., Dönczö B., Kertész Zs., Novák R., Csámer Á. (2021): 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., Gucsik A. (2025): 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.

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.

Hinkel, N. R., Timmes, F. X., Young, P. A., Pagano, M. D., Turnbull MC. (2014): Stellar abundances in the solar neighborhood: the Hypatia Catalog. *Astronomical Journal*. 148:54.

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.

McDonough, W. F., Sun, S. (1995): The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223-253.

McWilliam A. (1997): Abundance ratios and galactic chemical evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 35. 503-556.

Moriarty, J, Madhusudhan, N, Fischer D. (2014): Chemistry in an evolving protoplanetary disk: effects on terrestrial planet composition. *Astrophysical Journal*.787:81.

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.

Sztrókay K. I, Tolnay V, Földváriné-Vogel M. 1961. Mineralogical and chemical properties of the carbonaceous chondrite from Kaba, Hungary. *Acta Geologica Hungarica*.7:57-103.

Wasson J. T, Kallemeyn GW. (1988): Compositions of chondrites. *Philos. Trans.R. Soc.A, Mathematical and Physical Sciences*.325, 535—544.

Weisberg M. K, Prinz M, Clayton R. N, Mayeda T. K. 1993. The CR (Renazzo-type) carbonaceous chondrite group and its implications. *Geochim. Cosmochim. Acta*.57:1567-1586



Nyilvántartási szám: DEENK/35/2026.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Futó Péter
Doktori Iskola: Földtudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10070282

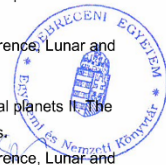
A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

1. **Futó, P.**, Gucsik, A.: The stellar Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si and Fe/Si ratios and the mineral diversity of rocky exoplanets.
Open Astron. 34 (1), 1-20, 2025. EISSN: 2543-6376.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/astro-2025-0017>
IF: 0.5 (2024)
2. **Futó, P.**, Vanyó, J., Simonia, I., Sztakovics, J., Nagy, M., Gucsik, A., Dönczö, B., Kertész, Z., Novák, R., Csámer, Á.: 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 Astron. 30 (1), 45-55, 2021. EISSN: 2543-6376.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/astro-2021-0006>
IF: 0.935

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (4)

3. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Rocky exoplanets with Ca- and Al-rich crustal and accessory mantle minerals.
In: 55th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 55 Virtual Conference. (2024)
4. **Futó, P.**, Gucsik, A.: 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.
In: 55th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 55 Virtual Conference. (2024)
5. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Implications for the bulk elemental composition of terrestrial planets I. The stellar and planetary S/Fe molar ratio.
In: 54th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 54 Virtual Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1-2, 2023.
6. **Futó, P.**, Gucsik, A.: 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.
In: 54th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 54 Virtual Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1-2, 2023.





További közlemények

Idegen nyelvű konferencia közlemények (1)

7. **Futó, P.**, Gucsik, A.: A köpeny eredetű, a kozmikus anyagmintákra és a cirkumszteláris környezetekre jellemző Mg/Si arányok komparatív vizsgálata.
In: XXVI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság - EMT, Kolozsvár, 58-61, 2025, (ISSN 2784-093X)

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (15)

8. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Carbon-rich mineral composition of silicate-dominated rocky planets in a large fraction of Low-Mg/Si planetary systems.
In: 56th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 56 Virtual Conference. (2025)
9. Fűrj, J., **Futó, P.**: Limitations of the zircon dating in shock metamorphic rocks on Earth.
In: 56th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 56 Virtual Conference. (2025)
10. **Futó, P.**, Gucsik, A.: The variations of the original planetary abundance ratios in solar-like stars polluted by terrestrial planetary materials.
In: 56th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 56 Virtual Conference. (2025)
11. **Futó, P.**, Gucsik, A.: A plausible bulk mineral composition for the martian mantle.
1-2, 2022.
12. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Compositional information for the bulk S-contents of metallic cores of iron meteorite parent bodies. Implications for the sulphur abundance of the metallic core of the Earth.
In: The 13 th Symposium on Polar Science : National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems : Session OS Space and upper atmospheric sciences : Program and Abstracts
13. **Futó, P.**: The rocky planets with magnesium-depleted mantle composition.
In: 53nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 53 Virtual Conference. (2022)
14. Csámer, Á., Skita, D., Rigó, I., Veres, M., **Futó, P.**, Vanyó, J., Gucsik, A.: Barberton impact spherules, South Africa: pursuing of shock metamorphism by using Raman spectroscopy.
In: The 12th Symposium on Polar Science: National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems, Session OG, Polar Geosciences: Program and Abstracts, [s.n.], Tokyo, 19-20, 2021.
15. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Chemical analyses of Fe - rich chondrule phases in Kaba (CV3) carbonaceous - chondrite. Implications on the bulk elemental composition of terrestrial planetary cores.
In: The 12th Symposium on Polar Science : National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems : Session OA Antarctic meteorites : Program and Abstracts





16. Gucsik, A., **Futó, P.**, Szarvas, R., Nagy, A., Nagy, D., Simonia, I., Vanyó, J., Csámer, Á., Rázsai, A., Kristály, F., Veres, M.: Micro-Raman Spectroscopy of the Barberton Impact Spherules from South Africa: An Application to the Identification of Shock Metamorphism.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
17. **Futó, P.**, Gucsik, A.: On the bulk mineralogical composition of carbonaceous chondrites in low-Mg/Si planetary systems.
In: The 12th Symposium on Polar Science : National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems : Session OA Antarctic meteorites : Program and Abstracts
18. **Futó, P.**: Optimal core sizes for Earth-Like habitability.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
19. Gucsik, A., **Futó, P.**, Vitéz, L., Viczián, D. R., Nyíri, Z., Szarvas, R., Nagy, A., Nagy, D., Simonia, I., Vanyó, J., Csámer, Á., Rázsai, A., Kristály, F., Veres, M.: Shock Stage Clarification of Plagioclase Samples from Asteroid Itokawa Using Raman and Cathodoluminescence Microscopy and Spectroscopy.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
20. **Futó, P.**: The rocky planets with magnesium-rich mantle composition.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
21. **Futó, P.**: On the bulk mineralogical composition of carbonaceous chondrites in high-Mg/Si planetary systems.
In: The 11th Symposium on Polar Science - Antarctic Meteorites, [s.n.], Tokyo, 1, 2020.
22. Gucsik, A., **Futó, P.**, Simonia, I., Vanyó, J., Csámer, Á.: Space Weathering-related Evolution of Finegrained Asteroidal and Cometary Materials: An Implication for the Sample Return Planetary Missions.
In: Proceedings of the 5th International Conference on Research, Technology and Education of Space / editors László Bacsárdi and Kálmán Kovács, Faculty of Electrical Engineering and Informatics Budapest University of Technology, Economics and Hungarian Astronautical Society, Budapest, 1-4, 2020.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 1,435

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapján szolgált közleményekre): 1,435



A DEENK a Jelölt által a Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2026.01.27.

**Short thesis for the degree of doctor of
philosophy (PhD)**

**The variability and effect of stellar Mg/Si, C/O, Fe/Si,
Ca/Si, Al/Si és Na/Si element ratios on the
mineralogical composition of terrestrial planets:
Cosmochemical and astromineralogical modelings**

by Péter Futó

Supervisor: Dr. Arnold Gucsik



UNIVERSITY OF DEBRECEN

Doctoral School of Earth Sciences

Debrecen, 2026

1. INTRODUCTION

Scientific research in cosmochemistry and astro-mineralogy in Hungary is primarily carried out by the Space Research Group for the Study of Cosmic Materials at the Faculty of Science, Eötvös Loránd University (ELTE), and the Cosmochemistry Research Group operating within the Department of Mineralogy and Geology at the Faculty of Science, University of Debrecen (DE). These studies are also being conducted at the Institute of Astronomy of the Research Centre for Astronomy and Earth Sciences. Within the institute Maria Lugaro focuses on the production, distribution, and abundance ratios of isotopes and elements formed in stars; and Ákos Kereszturi studies the evolutionary history of meteorites, as well as their shock-related and aqueous alteration processes. Timothy Jull (University of Arizona) and Ulrich Ott (Max Planck Institute for Chemistry) are visiting professors at the Institute for Nuclear Research, Debrecen (ATOMKI), and conduct research in the field of isotope geochemistry of meteorites.

Studies of meteorites-which provide critical insights into the chemical environment of the early Solar System and the elemental composition of planetary building materials-have a long tradition in Hungary, particularly the multi-decade investigation of the Kabei meteorite, a carbonaceous chondrite.

In recent decades, alongside direct laboratory-based instrumental analyses of cosmic materials, research has also expanded to include the study of circumstellar environments in the galactic vicinity of the Sun. This work enables comparative analyses of the general chemical

compositions-and inferred mineralogical makeups-characteristic of other planetary systems, contrasted with the solar elemental abundances typical of the Solar System. It should be noted that the stars in our Galactic neighborhood did not form simultaneously with the Sun, nor from interstellar material of identical chemical composition. This leads to observable differences in elemental abundances. All the stars I examine belong to the thin disk population of the Milky Way, and their Galactocentric distances are comparable to that of the Sun. These characteristics are important because metallicity, as well as the major elemental ratios under investigation (C/O, Mg/Si, Fe/Si), vary both horizontally within the plane of the Galactic disk and vertically as a function of distance from it. Accordingly, nearby solar-type (G- and F-type) stars with similar properties provide the most reliable reference basis for comparison with solar values. It is important to emphasize that chemical processes occurring within protoplanetary disks also play a fundamental role in determining the chemical characteristics of emerging planets.

For instance, the local variations in the conditions for condensation-also play a crucial role in planet formation. However, these local conditions are not directly reflected in the chemical composition observed in stellar atmospheres. Nevertheless, stellar elemental abundances provide the most reliable baseline for estimating the composition of the material available for the formation of rocky planets. Consequently, the elemental ratios

determined in stellar photospheres can serve as suitable proxies for estimating the mineralogical and chemical composition of the rocky planets forming around them.

The study of the inferred mineralogical composition of planetary bodies is of particular significance, as mineralogy directly influences their rheological properties (such as mantle viscosity), the mechanisms of heat transport (whether conductive or convective), and the accumulation of incompatible radioactive elements.

A deeper understanding of the abundance distribution of key chemical elements forming terrestrial planetary bodies, and the implications of these distributions for mineralogical composition, is not only crucial for advancing our knowledge of the cosmic environment but also significantly contributes to the reconstruction of the formation and evolutionary history of the Solar System and Earth-like planets.

2. RESEARCH QUESTIONS AND OBJECTIVES, HYPOTHESES

Among the main objectives of the research is the investigation of the statistical distribution of elemental abundance ratios—specifically C/O, Mg/Si, Fe/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, S/Fe, O/Si, Al/Mg, and Ca/Mg—among G- and F-type stars located in the Sun’s immediate galactic neighborhood, within spherical regions of 30, and 50 parsec radii. Another key goal of the study is to analyze how variations in these elemental ratios may influence the expected mineralogical composition of potential Earth-like rocky planets forming in the circumstellar environments of these stars.

Furthermore, the research aims to compare the relative abundances of the major rock-forming elements characteristic of terrestrial planets in the Solar System with stellar abundance patterns observed in the Sun's galactic neighborhood, using the aforementioned results.

The research is based on data retrieved from online astronomical databases and supplemented by relevant literature sources.

In this dissertation, I sought to address the following research questions:

1. This dissertation focuses on Earth-like planetary bodies characterized by solid crusts primarily composed of silicates and oxides. Silicate minerals of various types play a crucial role in determining the internal structure of these planetary objects. The first part of the dissertation aims to investigate the relative abundances of silicates-as key mineral phases in planetary formation and structure-across different types of cosmic materials within the Solar System, as well as in the interstellar medium.

1. Hypothesis (Related Thesis: Thesis 1): Based on meteoritic materials, magnesium silicates are considered the most common silicate phases, primarily due to the cosmic abundance of magnesium, which exceeds that of aluminum and calcium.

According to elemental abundances in carbonaceous chondrites, iron silicates occur more frequently than magnesium silicates. This predominance is most likely as a consequence of the formation of iron-rich dust grains, arising from the non-equilibrium condensation processes

in circumstellar environments (Bose et al., 2010).

2. What characteristic trends can be observed in the frequency distributions of the S/Fe, C/O, and related C/Si elemental ratios among G-type stars located within 30 parsecs of the Sun, particularly in comparison to the reference values measured in the Solar System? Based on the obtained elemental ratio distributions, what implications can be drawn regarding the potential mineralogical composition of rocky planets forming in the circumstellar environments of these stars?

2. Hypothesis (Related Thesis: Thesis 2): My hypothesis is that the characteristic S/Fe ratio of the Solar System (0.49) can be regarded as typical when compared with the relevant elemental ratios of G-type main-sequence stars located in the Galactic neighborhood of the Sun. The aim of the study is to determine whether the majority of stellar S/Fe ratios fall within the range of 0.4–0.6, close to the solar value.

The subject of the examination: Investigation of the sulfur (S) and iron (Fe) abundances, as well as the S/Fe abundance ratios, in G-type stars located within 30 parsecs of the Sun, and comparison of these abundances and elemental ratios with the characteristic S/Fe abundance ratio of the Solar System.

3. Hypothesis (Related Thesis: Thesis 3): The original chemical composition and elemental ratios of protoplanetary disks that once surrounded stars—although

not in perfect agreement—can be reliably approximated by the elemental abundances observed in stellar atmospheres. The higher the C/O ratio, the fewer stars can be found in the studied sample within the corresponding C/O ratio ranges. Stars characterized by higher C/O ratios are smaller than those exhibiting lower C/O ratios.

According to my hypothesis, as the C/O ratio increases, G-type main-sequence stars with higher C/O ratios are also characterized by higher C/Si ratios.

3. Furthermore, based on the analysis of Ca/Si, Al/Si, as well as Ca/Mg and Al/Mg elemental ratios characteristic of G- and F-type stars within 30 parsecs of the Sun, what conclusions can be made about the mineralogical characteristics of potentially forming rocky planets—especially in relation to the reference values observed in the Solar System?

4. Hypothesis (Related Thesis: Thesis 4): Most G- and F-type stars exhibiting higher-than-solar Mg/Si, Ca/Si and Al/Si elemental abundance ratios also show Ca/Mg and Al/Mg ratios that are comparable to or higher-than-solar values.

5. Hypothesis: (Related Thesis: Thesis 5): Among G- and F-type stars with C/O ratios lower than the solar value, the O/Si ratios are, in most cases, higher than the solar value. The O/Si ratio of low-C/O G- and F-type stars are assumed to be higher in the most cases than the solar value (14.125).

4. Based on the analysis of G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun, what trends can be observed in the Mg/Si and Fe/Si elemental ratios—key parameters influencing the mineralogical composition of terrestrial-type planetary bodies—particularly in comparison with the reference values characteristic of the Solar System?

The individual comparison of stellar Mg/Si and Fe/Si ratios with solar values already provides important insights. However, the combined evaluation of these two elemental ratios is of particular relevance to this research, as the types and proportions of mineral phases that appear in the silicate mantles of planetary bodies are primarily controlled by the Mg/Si ratio, whereas the iron content of mantle minerals and the size of the planetary body's metallic core are largely functions of the Fe/Si ratio. Accordingly, the Mg/Si and Fe/Si ratios jointly determine the structural and mineralogical characteristics of emerging silicate- and oxide-dominated planetary bodies. One of the key aims of this dissertation is therefore to assess the extent to which the Solar System's characteristic combination of Mg/Si and Fe/Si ratios can be considered typical when compared to the elemental abundances observed in G- and F-type stars in the Sun's immediate galactic neighborhood.

6. Hypothesis (Related Thesis: Thesis 6): Mg/Si-Fe/Si elemental ratio combinations similar to solar values (Mg/Si = 1.03-1.05; Fe/Si = 0.85-0.89) are rare among the Mg/Si-Fe/Si ratio combinations characteristic of G- and F-

type stars within a 50-parsec environment from the Sun, most of which have at least one component exhibits a significant deviation from the solar reference value ($\text{Mg/Si} = 1.05$; $\text{Fe/Si} = 0.87$).

5. To what extent do the stellar Mg/Si , C/O , Ca/Si , Al/Si , Na/Si , and Fe/Si elemental ratios vary among populations of G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun, and how might this variability influence the expected mineralogical composition of potential rocky planets forming in these environments?

7. Hypothesis (Related Thesis: Thesis 7): The stellar abundances of Mg, Ca and Al exhibit a correlation with stellar metallicity $[\text{Fe/H}]$, the mean value of which in the Galactic neighborhood of the Sun is -0.2 dex (McWilliam, 1997). Consequently, in this Galactic region the majority of stars possess metallicities lower than that of the Sun ($[\text{Fe/H}] = 0$). Since stars of lower metallicity generally display enhanced relative abundances of elements such as Mg, Ca and Al (McWilliam, 1997), it is therefore likely that their Mg/Si , Ca/Si and Al/Si ratios also deviate from solar values.

Considering the significant diversity in stellar elemental abundances, my working hypothesis is that the combination of six key elemental ratios (Mg/Si , C/O , Ca/Si , Al/Si , Na/Si , and Fe/Si) observed in the Solar System is not typical among G- and F-type stars in the Sun's Galactic neighborhood.

The distributions of Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemental ratios are broadly similar for the full sample of G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun, as well as for the subset of these stars known to host planetary companions and most of which are different from the solar reference values. The solar C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemental ratio combination, as well as ratio combinations with values approximating these, cannot be considered typical among the sample of G- and F-type stars analyzed.

8. Hypothesis: (Related Thesis: Thesis 8): Assessment of the occurrence frequency of C/O–Mg/Si elemental ratio combinations similar to solar values ($0.52 < \text{C/O} < 0.56$; $1.03 < \text{Mg/Si} < 1.07$) based on the C/O and Mg/Si ratio distributions characteristic of G- and F-type stars within 50 parsecs of the Sun. I hypothesize that the number of stars falling within the specified range is low for both spectral types relative to the total stellar sample.

The analysis was conducted based on the distribution of C/O and Mg/Si ratios in G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun. Stars falling within this elemental abundance range represent a relatively small fraction of both spectral types.

3. APPLIED METHODS

In my doctoral dissertation, I addressed seven key research questions by comparing the relative elemental

abundances characteristic of the Sun's galactic neighborhood with the relevant elemental abundances of the Solar System. This comparative analysis was based on verified facts, reliable data sources, and well-defined methodological approaches.

A fundamental premise of this research is that stars and their surrounding planetary systems form from a common reservoir of interstellar material. As a result, their chemical compositions are closely linked. This connection is particularly strong in the case of major rock-forming elements—such as magnesium, silicon, iron, oxygen, aluminum, and calcium—that play a critical role in the internal structure and mineralogical composition of terrestrial-type planets. Consequently, the elemental ratios determined in stellar photospheres may serve as useful proxies for estimating the potential chemical and mineralogical composition of rocky planets forming around those stars.

To estimate the frequency of magnesium silicate phases, I relied on newly generated data based on existing data sources, as well as on results from previous measurements conducted using Raman spectroscopy (Futó 2017a).

The study includes an elemental abundance analysis of G- and F-type stars with confirmed planetary companions, in order to compare them with the elemental abundances characteristic of all G- and F-type stars in the full sample. This comparison with the stars representative of the complete sample facilitates a more accurate estimation of the elemental abundance distributions typical of planetary systems.

Elemental abundances in stellar atmospheres—

including the Sun—particularly for elements critical to the composition of Earth-like planetary bodies, show good agreement with the values observed in carbonaceous chondrite meteorites. Comparing solar and meteoritic abundances is of particular significance because carbonaceous chondrites represent the least altered materials of the Solar System and thus reliably preserve the chemical composition of the primordial material from which the Sun and its planets formed.

The main source of elemental abundance data was the online Hypatia Catalog (Hinkel et al., 2014), which compiles spectroscopically determined abundance values for F-, G-, K-, and M-type stars located within a ~500 parsec radius of the Sun. For exoplanet-related data, I used the NASA Exoplanet Archive, an online catalog of stars and exoplanets maintained by the NASA Exoplanet Science Institute (NExSci).

Filtering and organizing the elemental abundance data, as well as compiling and formatting the tables, were carried out using Microsoft Excel and Microsoft Word. Mean values and standard deviation values were created using the Statistics Kingdom calculator program. Graphs and visual representations were created using the LibreOffice 4.1 Draw module and the Paint application.

3.1. Statistical methods

The Sun serves as the reference star for determining elemental abundances (C, O, Mg, Si, Ca, Al, Na, Fe, S = 0.00 dex-decimal exponent). Elemental ratios are calculated according to the formula: $N_1/N_2 = \text{SVN}_1/N_2 \{ \log_{10} [X_1/H] / \log_{10} [X_2/H] \}$ where SVN_1/N_2 is

the solar value of the given elemental ratio, and $[X_1/H]$ and $[X_2/H]$ are the abundances of the respective elements expressed in dex. The average discrepancy between the studies and databases that constitute the foundational data sources of the Hypatia Catalog and the catalog values themselves is 0.14 dex across all elements and stars. When calculating the elemental ratios expressed in moles, the uncertainty is ± 0.005 .

The statistical analysis was based on the comparison of the sample data for the investigated elemental ratios with the corresponding solar reference values. In examining the distribution of each elemental ratio, I applied statistical methods based on the determination of relative frequency (percentage occurrence), arithmetic mean (average), and the associated standard deviation.

Knowledge of the relative frequencies of elemental ratios that are lower than, equal to, or higher than the solar values is essential for estimating the typicality of stellar versus Solar System (solar) elemental abundances. The arithmetic means and standard deviations calculated from the samples also provide significant information, as their results generally support the conclusions drawn from the relative frequency analysis, thereby contributing to a more reliable interpretation of the elemental abundance distributions.

3.2. Definitions

Reference values: In cosmochemical, planetary, and

geochemical studies, elemental ratios are typically interpreted relative to solar reference values, based on CI chondrites, which are representative of the Solar System's composition. The use of solar elemental ratios as a reference is particularly important in this study, as it focuses on comparing these values with the elemental abundances of nearby G- and F-type stars. Accordingly, the solar elemental ratios serve as the reference system throughout this work.

Table 1. Mole-based values of the solar elemental abundances (table compiled by the author; reference values calculated based on data from Asplund et al. 2005 and Asplund et al. 2009).

C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si	Mg/Fe	S/Fe	C/Si
0.54	1.05	0.0631	0.0724	0.0457	0.87	1.202	0.49	7.59

Deviations: The significance of a deviation from a reference elemental ratio depends on several factors, primarily whether it affects the mineralogical composition of terrestrial planets forming from the protoplanetary disk, especially the dominant mineral phases. For instance, a decrease in the Mg/Si ratio below 1.0 may lead to pyroxenes becoming dominant over olivine; therefore (Bond et al.2010), a deviation of more than 5% from the solar Mg/Si ratio (1.05) can be considered geologically significant. C/O ratios exceeding 0.65-particularly in inner disk regions-can result in carbon-rich terrestrial planets dominated by carbon-bearing minerals (Moriarty et al.

2014), making a more than 20% increase over the solar value (0.54) a significant divergence. For the Ca/Si, Al/Si, and Na/Si ratios, the thresholds of significant difference are based on the discrepancies between solar reference values and corresponding CI chondrite ratios, while for the Fe/Si ratio, the characteristic value of the primitive terrestrial mantle is used as the threshold.

The threshold values for significant deviations were applied symmetrically in both positive and negative directions relative to the reference values for each elemental ratio. In this study, the following deviation thresholds are considered significant: for the C/O ratio, a ± 0.21 molar deviation ($\pm 20\%$); for the Mg/Si ratio, ± 0.05 ($\pm 5\%$); and for the Fe/Si ratio, ± 0.13 ($\pm 15\%$). In the case of minor elements, the thresholds are ± 0.003 ($\pm 5\%$) for Ca/Si, ± 0.012 ($\pm 16\%$) for Al/Si, and ± 0.012 ($\pm 27\%$) for Na/Si.

Typical and atypical element abundances and combinations: In the evaluation system used in this study, an elemental ratio is considered *typical* within that distributional category relative to the solar reference value (i.e., lower than, equal to, or higher than the solar value) in which its frequency of occurrence exceeds 50%. Conversely, it is classified as *atypical* in categories where this threshold is not met. If the solar reference value for a given elemental ratio occurs in less than 10% of the sample, while more than 50% of the values fall within a different distributional category, the solar reference value

cannot be regarded as a representative or typical value for the studied population.

The analysis of elemental ratio combinations is particularly important, as it provides a more comprehensive understanding of the distribution of terrestrial planet types beyond individual ratios, and contributes to assessing the typicality of Solar System elemental abundances. The systems examined in this study are: Mg/Si-Fe/Si; C/O-Mg/Si; and C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si.

Among the elemental ratio combinations, those are regarded as exhibiting significant deviation if at least one of their components departs from the solar value by more than the defined threshold.

In the first approach, I focused on the distribution of elemental ratios such as S/Fe, C/Si, O/Si, Ca/Si, Ca/Mg, Al/Si, and Al/Mg. While these are not the most fundamental ratios determining the bulk mineralogy of rocky planets, they play important roles in the formation of secondary mineral phases and may help identify planet types with specific mineralogical characteristics.

In the second approach, I examined the relative stellar frequency distributions of the elemental ratios that have the most significant influence on the mineralogical composition of rocky planets-namely C/O, Mg/Si, and Fe/Si. I also analyzed the relationships between these major ratios, as well as their combined frequency distributions with secondary ratios such as Ca/Si, Al/Si, and Na/Si, in order to assess their potential effects on

primary planetary mineralogy.

Given that the chemical composition of primitive, carbonaceous chondrite-type meteorites provides valuable insight into the primordial material from which Solar System bodies formed, the elemental abundances of these meteorites are particularly important in reconstructing the early chemical conditions of the Solar System. Alongside solar photospheric abundance values, the average elemental ratios of carbonaceous chondrites serve as reference values in the comparative analysis of Solar System elemental abundances.

In the course of this research, I determined the Solar System's characteristic molar elemental ratios-including C/O, C/Si, O/Si, Mg/Si, Ca/Si, Ca/Mg, Al/Si, Al/Mg, Na/Si, and S/Fe-based on the abundance data published by Asplund et al. (2005).

4. RESULTS

1. Thesis

Through the analysis of major elemental compositions of various components of carbonaceous chondrites, I have established that magnesium-rich silicates represent the dominant phases in the primordial material of the Solar System. The occurrence of magnesium-rich silicates exceeds that of iron-rich silicates by 20-50 mol%.

The publication of the results: Futó P., Vanyó J., Simonia I., Sztakovics J., Nagy M., Gucsik A., Dönczö B., Kertész Zs., Novák R., Csámer Á. (2021): 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. pp 45-55.

Table 2. Calculated Mg/Fe elemental ratios characteristic of various meteorites, their mineral components, and meteorite groups.

Data sources used for the calculations: Gucsik et al. (2013) (G13); Sztrókay et al. (1961) (Sz61); Wasson and Kallemeyn (1988) (WK88); and Weissberg et al. (1993) (W93). Sources of the calculated data: Futó and Gucsik (2013); Futó et al. (2021).

Meteorite mineral component	Calculated Mg/Fe Ratios (weight percent)
Kaba-Porphyritic chondrule (G13)	Mg0.993/Fe0.007
Kaba-Granular olivine-pyroxene (G13)	Mg0.98/Fe0.02
Kaba-Chondrule (G13)	Mg0.976/Fe0.024
Kaba-Isolated olivine grain (G13)	Mg0.995/Fe.,005
Kaba-Composite aggregate (G13)	Mg0.003/Fe0.997
Renazzo-Olivine chondrule (W93)	Mg0.972/Fe0.028
Meteorite (Group)-Bulk Chemical Composition	Calculated Mg/Fe Ratios (wt%-molar ratio)
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

Based on the data analysis of the chemical composition of the examined carbonaceous chondrites, the weight percent distribution of the Mg/Fe ratio ranges between

0.348/0.652 and 0.393/0.607 (Table 2), corresponding to molar Mg/Fe ratios between 1.2 and 1.5. This suggests that in the original chemical composition of the Solar System, the abundance of magnesium-bearing silicate and oxide phases exceeded that of iron-bearing phases by 20–50 mol%.

In certain mineral phases of carbonaceous chondrites - for instance, in aggregates with fayalitic composition-the proportion of iron-rich mineral components exceeds that of magnesium-rich phases by approximately two orders of magnitude (fayalite aggregate: Mg = 0.3 wt%, Fe = 99.7 wt%; see Table 2). The formation of these iron-rich mineral phases is likely the result of non-equilibrium condensation processes, consistent with previous findings in the literature (Bose et al., 2010).

2. Thesis

Based on my research, the S/Fe ratio characteristic of the Solar System (4.897788) can be considered average based on my comparative analysis of the corresponding abundance ratios in G-type main-sequence stars located within a 30-parsec galactic radius of the Sun. In the studied sample of 165 stars, 91 stars (55% of the total) exhibit S/Fe ratios within the range of 0.4-0.6, which is close to the solar value of 0.49. The full range of S/Fe values in the sample spans from 0.060 to 2.138, indicating substantial interstellar diversity in the relative abundances of sulfur and iron.

The publication of the results: 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.

The potential rocky planets forming around stars with S/Fe ratios between 0.4 and 0.6 may exhibit sulfur abundances comparable to those of the inner planets of the Solar System, including Earth-provided that other conditions required for planet formation are also met.

3. Thesis

A positive correlation exists between increasing C/O and C/Si ratios. Consequently, as the C/O ratio increases, the proportion of silicon carbide (SiC) rises relative to silicates and oxides among the mantle-forming minerals of carbon-rich terrestrial planets. In the sample of 175 stars, 88 objects exhibit a C/Si ratio falling within the $C/O \geq 0.55$ range. Within this carbon-rich domain, the dominant subset (75%) of G-type main-sequence stars located within 30 parsecs of the Sun is characterized by C/Si ratios reaching up to 17.279—a value exceeding the solar reference (7.58578) by 127.78% in the highest value. The average C/Si ratio in this subset is 8.512.

The publication of the results: 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.

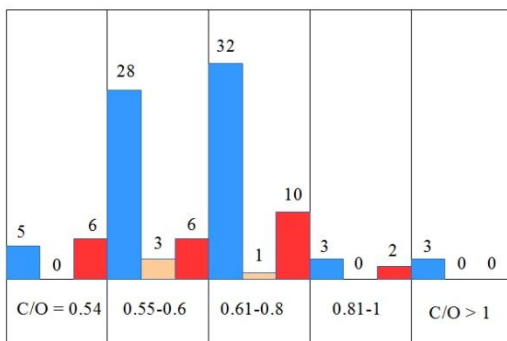


Figure 1. Distribution of C/Si ratios for G-type stars within 30 parsecs, shown for ranges of the C/O elemental ratio equal to or exceeding the solar reference value. Blue indicates the number of stars with C/Si ratios higher than the solar C/Si value, orange denotes values equal to the solar ratio, and red represents values lower than the solar C/Si ratio (Futó and Gucsik 2023b).

Consequently, in the case of the analyzed stars, the increase in the C/Si and C/O elemental ratios exhibit a positive correlation. It can also be established that with increasing C/O ratio, the proportion of silicon carbide among the major mantle-forming minerals of carbon-rich terrestrial planets gradually increases, due to a decreasing degree of oxidation within the planetary interiors. As a

result, with increasing C/O ratio, more silicon reacts with carbon to form silicon carbide (SiC) in the mantle, leading to a higher proportion of SiC relative to silicates and oxides.

4. Thesis

Based on my research, the mantles and crusts of potential rocky planets orbiting G- and F-type stars within 30 parsecs of the Sun—characterized by sub-solar C/O ratios and elevated Mg/Si ratios and hosting planetary companions—are expected to contain a higher proportion of Ca- and Al-bearing mineral phases than the rocky planets of the Solar System. Among the studied G-type stars with elevated Mg/Si ratios, 82.22% display Ca/Si ratios higher than the solar value (0.0631), while 95.56% show Al/Si ratios above the solar benchmark (0.0724). For F-type stars in the same category, these proportions are 65.9% and 47.73%, respectively.

The publication of the results: 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.

In the studied stellar sample, G-type stars with super-solar Mg/Si elemental ratios (ranging from 1.06 to 1.48, compared to the solar value of 1.05) predominantly exhibit elevated Ca/Si and Al/Si ratios, with 82.22% and 95.56%

of them, respectively, exceeding the solar benchmarks. Among F-type stars with similarly high Mg/Si values, 65.9 % and 47.73% show Ca/Si and Al/Si ratios above solar levels, respectively. In cases where Ca/Si exceeds the solar value, the Ca/Si ratios range from 0.065 to 0.098 in the G-type sample, and from 0.064 to 0.096 among the F-type stars. The Al/Si ratio varies between 0.074 and 0.11 for G-type stars and between 0.074 and 0.166 for F-type stars.

According to the findings, the average Ca/Mg and Al/Mg elemental ratios for F-type stars are 0.0624 and 0.08529, respectively, both higher than the corresponding solar values (Ca/Mg = 0.060256; Al/Mg = 0.06918). In contrast, G-type stars show a slightly lower average Ca/Mg ratio (0.0598) but a higher average Al/Mg ratio (0.07565) relative to solar reference values.

Consequently, it is likely that the mantles and crusts of rocky exoplanets formed around nearby stars contain a somewhat higher proportion of calcium- and aluminum-bearing mineral phases relative to magnesium-rich minerals, compared to the rocky planets formed in the outer regions of the Solar System, such as Earth and Mars.

5. Thesis

It was determined that within a 30-parsec volume centered on the Sun, the majority of G- and F-type stars with Mg/Si ratios higher than the solar value (1.05) exhibit O/Si ratios exceeding the solar value (14.125): 79.66% for G-type stars and 97.1% for F-type stars. This implies more oxidized mantle conditions and favors the formation of oxygen-rich mineral phases. The mean O/Si ratio determined for G-type stars is 16.26, slightly higher than the solar O/Si ratio, whereas F-type stars show a substantially higher mean O/Si ratio of 22.586.

The publication of the results: 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.

Planets forming under conditions of elevated O/Si ratios are likely to be enriched in Mg- and O-bearing minerals, such as MgO₂ (Lobanov et al., 2015), and—depending on calcium abundance—CaO₂ (Nelson et al., 2015). Their upper mantles may therefore contain olivine in high proportions, along with its higher-pressure polymorphs.

6. Thesis

Based on my sample, within a 50-parsec volume the Mg/Si-Fe/Si elemental ratio combination that is very similar to that of the Solar System (Mg/Si = 1.05; Fe/Si = 0.87) is rare (G-type stars: 3.59 %; F-type stars: 4.26 %), even within the narrow ranges Mg/Si = 1.03-1.07 and Fe/Si = 0.85-0.89. For most of the investigated stars, at least one of these components deviates significantly from solar-like values, indicating that the combination of solar-relevant elemental ratios (Mg/Si-Fe/Si) is not typical of the examined stellar population.

The publication of the results: Futó P., Gucsik A. (2025): 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. Open Astronomy. 34. 20250017.

Table 3. Low standard deviations associated with elemental abundance distributions in the complete, planet-hosting, and within-50-parsec G- and F-type stellar samples (table compiled by the author).

Element ratios	Mg/Si	Fe/Si
G-stars-standard deviation	0.143	0.119
F- stars-standard deviation	0.18	0.12

For most of the examined elemental abundance ratios, standard deviation values close to zero indicate a strong concentration around the mean, which contribute to the accuracy of the calculated averages for estimating the frequency of solar reference ratios.

Table 4. Relative frequency distribution of sub-solar, solar, and super-solar values of the relevant elemental abundance ratios for G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun (table compiled by the author).

G-stars	Mg/Si	Fe/Si
Subsolar	20.5 %	44.1 %
Solar identical	4.7	7.4
Supersolar	74.8	48.5
F-stars	Mg/Si	Fe/Si
Subsolar	35.66 %	57.36 %
Solar identical	6.59	5.43
Supersolar	57.75	37.21

The elevated Mg/Si ratio frequencies observed in both stellar samples, the supersolar Fe/Si ratio frequencies in G-type stars, as well as the less than 10% occurrence of solar-like values-all in addition to the average elemental ratios-further highlight the atypical nature of the solar reference values.

Table 5. Relative frequency ratios of stars deviating from the solar reference value in the G- and F-type stellar samples, with respect to one or both components of the Mg/Si-Fe/Si elemental abundance ratio combination (table compiled by the author).

Significant difference from the solar reference value	G-type stars	F-type stars
One component of the combination	59.28%	56.98%
Both component of the combination	17.17%	19.38%

If, in the case of G- and F-type stars, typically only one component of the Mg/Si–Fe/Si ratio combination deviates significantly from the solar value, this trend already supports the previous conclusion that the solar Mg/Si-Fe/Si combination is not typical.

7. Thesis

Based on the research findings, I determined that within a 50-parsec radius around the Sun, the solar C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si elemental abundance ratios of G- and F-type stars are atypical when compared to the abundance patterns observed in the studied stellar sample of non-hosts and planet-hosts.

The publication of the results: Futó P., Gucsik A. (2025): The stellar Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si ratios and the mineral diversity of rocky exoplanets. Open

In the complete samples, a significant majority (ranging from 55.66% to 87.98%) of G- and F-type main-sequence stars exhibit super-solar C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si abundance ratios. Exceptions to this trend are found in G-type stars with super-solar C/O and Fe/Si ratios and in F-type stars with super-solar Al/Si and Fe/Si ratios, where the occurrence frequencies of these ratios fall within the range of 37.21% to 48.5%. Similarly, most G- and F-type stars hosting planets display elemental abundance ratios exceeding solar values for C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si, with occurrence rates ranging between 53.85% and 100%. Exceptions include G-type planet-hosting stars with super-solar Ca/Si and Fe/Si ratios, and F-type stars with super-solar C/O ratios, where the respective occurrence frequencies range from 43.04% to 49.37%.

	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
	1.5	1.89	0.15	0.2	0.15	1.5
	1.31			Al/Si		1.48
		1.5		0.15	0.12	
	1	1.124	0.1		0.1	1
		1.05	0.098			0.87
		0.73	0.064	0.081678		0.84074
	0.54		0.0631	0.0724	0.05363	0.5
	0.5		0.05	0.05	0.05	0.48
	0.531		0.043	0.049	0.0457	
					0.032	
	0.12					

Figure 2.a. Mean values of the C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si ratios in the G-type stellar sample; the black line indicates the solar reference value, the grey line represents the mean elemental ratio, and the scatter denotes measurement uncertainties present in the source data (Futó and Gucsik 2025).

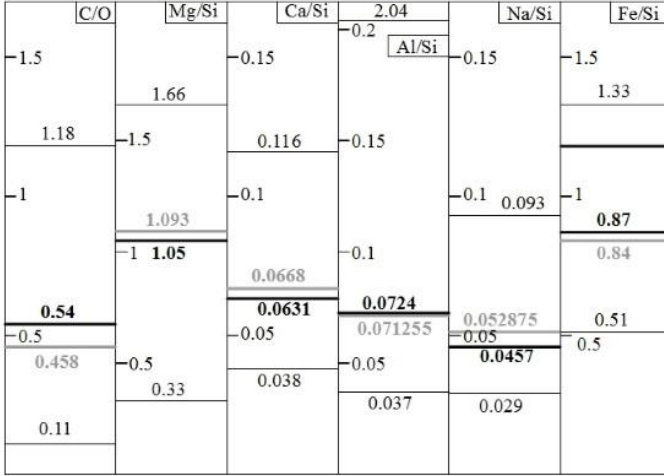


Figure 2.b. Mean values of the C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si ratios in the F-type stellar sample; the black line indicates the solar reference value, the grey line represents the mean elemental ratio, and the scatter denotes measurement uncertainties present in the source data (Futó and Gucsik 2025).

Table 6. Low standard deviations associated with elemental abundance distributions in the complete 50-parsec G- and F-type stellar samples (table compiled by the author).

Standard deviation	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
G-stars	0.146	0.143	0.027	0.012	0.01	0.119
F-stars	0.1429	0.18	0.0102	0.0218	0.0106	0.12

Table 7. Relative frequency distribution of sub-solar, solar, and super-solar values of the relevant elemental abundance ratios for G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun (table compiled by the author).

G-stars	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Subsolar	49%	20.5	38.48	11.3	16.02	44.1
Solar identical	4.5	4.7	5.86	1.17	1.76	7.4
Supersolar	46.5	74.8	55.66	87.7	82.22	48.5
F-stars	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Subsolar	7.36	35.66	31.01	54.26	23.64	57.36
Solar identical	4.66	6.59	2.71	1.94	2.33	5.43
Supersolar	87.98	57.75	66.28	43.8	74.03	37.21

	C/O		Mg/Si		Ca/Si		Al/Si		Na/Si		Fe/Si	
	Full	< 0.65	Full C/O	C/O < 0.65	Full C/O	C/O < 0.65	Full C/O	C/O < 0.65	Full C/O	C/O < 0.65	Full C/O	C/O < 0.65
-1			1.5		-0.1		0.15		-0.1		-1	
			1.1497	1.152								0.87
			-1	1.05			-0.1				0.863	0.8625
					0.063	0.0636	0.0885	0.088				
	0.575					0.0631		0.0724	0.056	0.0553		
	-0.54	0.535			-0.05				-0.05		-0.5	
	0.5		-0.5				0.05			0.0457		
G-stars												

Figure 3.a. Average elemental abundances of planet-hosting G-type stars for the full sample and for the C/O < 0.65 subset (Futó and Gucsik 2025).

	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
	< 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65	C/O < 0.65
-1		1.5	-0.1	-0.15	-0.1	-1
		1.05				0.9038
	-1	1.0246		-0.1		0.87
			0.06547			
			0.0631	0.076	0.0575	
	0.54		-0.05	0.0724	-0.05	0.5
	0.5 0.5146			0.05	0.0457	
		-0.5				
F-stars						

Figure 3.b. Average elemental abundances of planet-hosting F-type stars for the full sample. (Futó and Gucsik 2025).

Table 8. Low standard deviations associated with elemental abundance distributions in planet-hosting 50-parsec G- and F-type stellar samples (table compiled by the author).

Standard deviation	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
G-stars	0.104	0.157	0.006	0.0107	0.0082	0.0092
F-stars	0.064	0.118	0.0048	0.0055	0.005	0.054

Table 9. Relative frequency distribution of sub-solar, solar, and super-solar values of the relevant elemental abundance ratios for planet-hosting G- and F-type stars located within 50 parsecs of the Sun (table compiled by the author).

G-stars	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Subsolar	30.38 %	16.46	48.1	5.06	5.06	41.77
Solar identical	6.33	0	8.86	1.27	1.27	8.86
Supersolar	63.29	83.54	43.04	93.67	93.67	49.37
F-stars	C/O	Mg/Si	Ca/Si	Al/Si	Na/Si	Fe/Si
Subsolar	30.77	38.46	30.77	15.38	0	15.38
Solar identical	23.08	7.69	7.69	0	0	15.38
Supersolar	46.15	53.85	61.54	84.62	100	69.24

The elemental abundance distributions for the entire stellar sample, as well as for the subset of planet-hosting stars, show a similar pattern in that, for at least two-thirds of the examined elemental ratios, the occurrence of supersolar values exceeds 50% among G- and F-type stars. Observing similarities with the solar reference values offers an opportunity to refine the estimation of these elemental ratios, with particular emphasis on comparing solar values to the elemental compositions characteristic of other planetary systems.

The prevalence of super-solar Mg/Si ratios among these stars suggests that, in the case of any potentially forming rocky planets, the mineralogy of the upper mantle may be dominated by olivine phases, along with a higher proportion of pyroxenes enriched in calcium, aluminum, and sodium.

Thesis 8.

The results demonstrate that the solar C/O and Mg/Si elemental ratio combination is atypical among G- and F-type stellar populations within 50 parsecs of the Sun. Only 2.34 and 1.55 % of the analyzed samples exhibit solar-like values (C/O=0.52-0.56; Mg/Si=1.03-1.07) for both ratios simultaneously. This suggests that the mineralogical composition of terrestrial planets in the inner Solar System is not a representative model for rocky planets forming in our local Galactic neighborhood.

Based on the data, it can be concluded that in both the full stellar samples and the subset of planet-hosting stars, the majority of stars exhibit elemental abundance combinations characterized by super-solar Mg/Si ratios. Specifically, 74.8% of G-type stars and 57.75% of F-type stars in the full sample, as well as 83.54% of planet-hosting G-type stars and 53.85% of planet-hosting F-type stars, show Mg/Si ratios exceeding the solar value. Moreover, one of the examined G- or F-type stellar samples exhibit a combination of elemental abundance ratios (C/O-Mg/Si-Ca/Si-Al/Si-Na/Si-Fe/Si) similar to that of the Sun: (C/O=0.54±0.02-Mg/Si=1.05±0.02-Ca/Si=0.063±0.003-Al/Si=0.0724±0.012-Na/Si=0.0457±0.012-Fe/Si=0.87±0.0213)

The publication of the results: Futó P., Gucsik A. (2025):
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*. *Open Astronomy*. 34. 20250017.

From the perspective of rocky planet formation, the Mg/Si and C/O ratios-both of which are key parameters-typically show significant deviations from the solar average values characteristic of the Solar System.

Among the analyzed G-type stars ($n = 512$), only 12 objects simultaneously exhibit C/O ratios in the range of 0.52-0.56 and Mg/Si ratios between 1.03 and 1.07. In the sample of F-type stars ($n = 258$), only 4 stars meet these same criteria.

Given that the chemical composition of the solid-phase material available during planet formation fundamentally determines the mineralogical makeup of the resulting planets, it can be inferred that the mineralogy of the terrestrial planets in the inner Solar System is not representative of the expected mineralogical properties of potential rocky planets in the analyzed stellar populations.

Table 10. Relative frequency of stars with C/O-Mg/Si ratio combinations significantly deviating from the solar values, in the full sample and in the subsample of G- and F-type stars with confirmed planets, considering cases where either one or both components of the combination show significant deviation (table compiled by the author).

Significant difference from the solar reference value (full sample)	G-type stars	F-type stars
One component of the combination	87.89 %	89.15 %
Both component of the combination	33.98%	41.09 %
Significant difference from the solar reference value (planet-host stars)	G-type stars	F-type stars
One component of the combination	62 %	76.92 %
Both component of the combination	16.46 %	7.69 %

The relative frequencies associated with significant deviations of one component of the C/O-Mg/Si ratio pair from the solar value confirm that the Sun’s elemental abundance combination can be considered atypical both within the overall G- and F-type stellar sample and among the population of planet-hosting stars.

Within the sample of G-type stars, only a single star (HIP 116937) was found to exhibit a six-element abundance pattern similar to that of the Sun.

The results of this study suggest that the six key elemental abundance ratios characteristic of the Solar System (C/O, Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, Na/Si, and Fe/Si), as well as their specific combination, are atypical among G-

and F-type stellar populations located within 50 parsecs of the Sun in the Milky Way.

5. SUMMARY

The topic of this dissertation represents a novel direction not only within the Hungarian fields of cosmochemistry and geochemistry, but also at the international level, particularly in the context of Solar System cosmochemical research and comparative exoplanetology.

Based on my research, it can be concluded that the majority of G- and F-type stars located in the Sun's galactic neighborhood exhibit Mg/Si ratios that exceed the solar value. This finding is consistent with previous studies highlighting the dominance of elevated stellar Mg/Si ratios. In contrast, stars with sub-solar C/O ratios are considerably more common than those with super-solar carbon-to-oxygen ratios. Furthermore, the average C/O and C/Si ratios characteristic of the Solar System do not fall within the range typical for the majority of the examined G- and F-type stars. However, the solar S/Fe ratio appears to be broadly representative.

Among the elemental ratios influencing the mineralogical architecture of rocky planets, the variability of the C/O, Mg/Si, and Fe/Si ratios has the most significant impact. The observed differences between the solar and stellar values of these two latter ratios-especially when considered in combination-suggest that the Solar System's chemical composition in this respect is far from average compared to its local galactic environment. These deviations likely have far-reaching implications for the mineralogical structures of rocky planets forming around

different stars.

My results also indicate that the elemental ratios Ca/Si, Al/Si, Ca/Mg, and Al/Mg generally do not deviate substantially from their respective solar values. Nevertheless, even relatively small variations in these ratios can induce noticeable differences in the mineralogy of planetary mantles-particularly when these are considered alongside deviations in C/O, Mg/Si, Fe/Si, and Na/Si. Specifically, I found that in the case of G- and F-type stars, the C/O ratio tends to be lower, while the Mg/Si, Ca/Si, Al/Si, and Na/Si ratios are typically higher than the corresponding solar values. The specific combination of these six elemental ratios at solar values is rare among the analyzed stellar populations, making the Solar System chemically atypical in terms of the conditions that govern rocky planet formation within our galactic neighborhood.

The atypical nature of the solar Mg/Si and Fe/Si ratios-along with the combined solar values of the six aforementioned elemental ratios-likely contributed to the emergence of Earth's unique mineralogical structure.

The findings and conclusions presented in this dissertation may provide a new perspective on modern theories concerning the origin of the Solar System and the Earth. Moreover, by introducing a novel comparative framework, this research has the potential to shape future directions in planetary science and cosmochemistry.

REFERENCES

Asplund, M, Grevesse, N, Sauval, J. (2005). The solar chemical composition. *Cosmic Abundances Rec Stellar Evolution Nucleosynthesis*. 336:25.

Asplund M, Grevesse N, Sauval AJ, Scott P. (2009). The chemical composition of the Sun. *Annual Rev. Astron Astrophys*. 47:481522.

Bond J. C, O'Brien D. P, Lauretta D. S. (2010): The compositional diversity of extrasolar terrestrial planets. I. In situ simulations. *Astrophys J*. 715:1050–1070.

Bose M, Floss C, Stadermann F. J. (2010): An investigation into the origin of Fe-rich presolar silicates in Acfer 094. *ApJ*. 714:1624.

Futó P. (2017 a): 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. 2017 b. On the bulk silicate composition of carbonaceous chondrites. In: Hayabusa Symposium 2017. Abstract: OA-P19

Futó, P, Vanyó J., Simonia I., Sztakovics J., Nagy M., Gucsik A., Dönczö B., Kertész Zs., Novák R., Csámer Á. (2021): 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., Gucsik A. (2025): 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*. *Open Astronomy*. 34. 20250017.

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.

Hinkel, N. R, Timmes, F. X, Young, P. A, Pagano, M. D, Turnbull MC. (2014): Stellar abundances in the solar neighborhood: the Hypatia Catalog. *Astronomical Journal*. 148:54.

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.

McDonough, W. F., Sun, S. (1995): The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223-253.

McWilliam A. (1997): Abundance ratios and galactic chemical evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 35. 503-556.

Moriarty, J, Madhusudhan, N, Fischer D. (2014): Chemistry in an evolving protoplanetary disk: effects on terrestrial planet composition. *Astrophysical Journal*.787:81.

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.

Sztrókay K. I, Tolnay V, Földváriné-Vogel M. (1961): Mineralogical and chemical properties of the carbonaceous chondrite from Kaba, Hungary. *Acta Geologica Hungarica*.7:57-103.

Wasson J. T, Kallemeyn G. W. (1988): Compositions of chondrites. *Philos. Trans.R. Soc.A, Mathematical and Physical Sciences*.325, 535—544.

Weisberg M. K, Prinz M, Clayton R. N, Mayeda T. K. 1993. The CR (Renazzo-type) carbonaceous chondrite group and its implications. *Geochim. Cosmochim. Acta*.57:1567-1586.



Registry number: DEENK/35/2026.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Péter Futó
Doctoral School: Doctoral School of Earth Sciences
MTMT ID: 10070282

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (2)

1. **Futó, P.**, Gucsik, A.: The stellar Mg/Si, C/O, Ca/Si, Al/Si, Na/Si and Fe/Si ratios and the mineral diversity of rocky exoplanets.
Open Astron. 34 (1), 1-20, 2025. EISSN: 2543-6376.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/astro-2025-0017>
IF: 0.5 (2024)
2. **Futó, P.**, Vanyó, J., Simonia, I., Sztakovics, J., Nagy, M., Gucsik, A., Dönczö, B., Kertész, Z., Novák, R., Csámer, Á.: 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 Astron. 30 (1), 45-55, 2021. EISSN: 2543-6376.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/astro-2021-0006>
IF: 0.935

Foreign language abstracts (4)

3. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Rocky exoplanets with Ca- and Al-rich crustal and accessory mantle minerals.
In: 55th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 55 Virtual Conference. (2024)
4. **Futó, P.**, Gucsik, A.: 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.
In: 55th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 55 Virtual Conference. (2024)
5. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Implications for the bulk elemental composition of terrestrial planets I. The stellar and planetary S/Fe molar ratio.
In: 54th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 54 Virtual Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1-2, 2023.
6. **Futó, P.**, Gucsik, A.: 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.
In: 54th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 54 Virtual Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1-2, 2023.





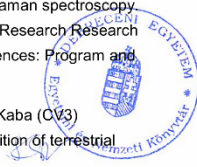
List of other publications

Foreign language conference proceedings (1)

7. **Futó, P.**, Gucsik, A.: A köpeny eredetű, a kozmikus anyagmintákra és a cirkumstelláris környezetekre jellemző Mg/Si arányok komparatív vizsgálata.
In: XXVI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság - EMT, Kolozsvár, 58-61, 2025, (ISSN 2784-093X)

Foreign language abstracts (15)

8. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Carbon-rich mineral composition of silicate-dominated rocky planets in a large fraction of Low-Mg/Si planetary systems.
In: 56th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 56 Virtual Conference. (2025)
9. Fűrj, J., **Futó, P.**: Limitations of the zircon dating in shock metamorphic rocks on Earth.
In: 56th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 56 Virtual Conference. (2025)
10. **Futó, P.**, Gucsik, A.: The variations of the original planetary abundance ratios in solar-like stars polluted by terrestrial planetary materials.
In: 56th Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 56 Virtual Conference. (2025)
11. **Futó, P.**, Gucsik, A.: A plausible bulk mineral composition for the martian mantle.
1-2, 2022.
12. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Compositional information for the bulk S-contents of metallic cores of iron meteorite parent bodies. Implications for the sulphur abundance of the metallic core of the Earth.
In: The 13 th Symposium on Polar Science : National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems : Session OS Space and upper atmospheric sciences : Program and Abstracts
13. **Futó, P.**: The rocky planets with magnesium-depleted mantle composition.
In: 53rd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 53 Virtual Conference. (2022)
14. Csámer, Á., Skíta, D., Rigó, I., Veres, M., **Futó, P.**, Vanyó, J., Gucsik, A.: Barberton impact spherules, South Africa: pursuing of shock metamorphism by using Raman spectroscopy.
In: The 12th Symposium on Polar Science: National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems, Session OG, Polar Geosciences: Program and Abstracts, [s.n.], Tokyo, 19-20, 2021.
15. **Futó, P.**, Gucsik, A.: Chemical analyses of Fe - rich chondrule phases in Kaba (CV3) carbonaceous - chondrite. Implications on the bulk elemental composition of terrestrial planetary cores.
In: The 12th Symposium on Polar Science : National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems : Session OA Antarctic meteorites : Program and Abstracts





16. Gucsik, A., **Futó, P.**, Szarvas, R., Nagy, A., Nagy, D., Simonia, I., Vanyó, J., Csámer, Á., Rázsai, A., Kristály, F., Veres, M.: Micro-Raman Spectroscopy of the Barberton Impact Spherules from South Africa: An Application to the Identification of Shock Metamorphism.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
17. **Futó, P.**, Gucsik, A.: On the bulk mineralogical composition of carbonaceous chondrites in low-Mg/Si planetary systems.
In: The 12th Symposium on Polar Science : National Institute of Polar Research Research Organization of Information and Systems : Session OA Antarctic meteorites : Program and Abstracts
18. **Futó, P.**: Optimal core sizes for Earth-Like habitability.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
19. Gucsik, A., **Futó, P.**, Vitéz, L., Viczián, D. R., Nyíri, Z., Szarvas, R., Nagy, A., Nagy, D., Simonia, I., Vanyó, J., Csámer, Á., Rázsai, A., Kristály, F., Veres, M.: Shock Stage Clarification of Plagioclase Samples from Asteroid Itokawa Using Raman and Cathodoluminescence Microscopy and Spectroscopy.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
20. **Futó, P.**: The rocky planets with magnesium-rich mantle composition.
In: 52nd Lunar and Planetary Science Conference: LPSC 52 Virtual Conference. (2021)
21. **Futó, P.**: On the bulk mineralogical composition of carbonaceous chondrites in high-Mg/Si planetary systems.
In: The 11th Symposium on Polar Science - Antarctic Meteorites, [s.n.], Tokyo, 1, 2020.
22. Gucsik, A., **Futó, P.**, Simonia, I., Vanyó, J., Csámer, Á.: Space Weathering-related Evolution of Finegrained Asteroidal and Cometary Materials: An Implication for the Sample Return Planetary Missions.
In: Proceedings of the 5th International Conference on Research, Technology and Education of Space / editors László Bacszárdi and Kálmán Kovács, Faculty of Electrical Engineering and Informatics Budapest University of Technology, Economics and Hungarian Astronautical Society, Budapest, 1-4, 2020.

Total IF of journals (all publications): 1,435

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 1,435

The Candidate's publication data submitted to the Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

27 January, 2026

