



SZÉNEN GAZDAG PLANÉTÁK

Egzotikus és bizarr világok

A Tejútrendszerben nagy számban létezhetnek olyan bolygók, melyek kémiai összetétele merőben különbözik a Földétől vagy a Marsétól. Egyesek fémekben, míg mások szénben akár jelentős mértékben gazdagabbak lehetnek, mint a Naprendszer Föld-típusú bolygói. A szénben gazdag planéták között előfordulhatnak egzotikus, sőt bizarrnak nevezhető világok is, melyek eddig csupán a sci-fi szerzők képzeletében éltek. Egyre több jel mutat arra, hogy az eddig látottaktól különböző bolygók valóban létezhetnek és a nem is olyan távoli jövőben a felfedezéseknek köszönhetően tudományos tényként kezelhetjük majd őket.

A szén a negyedik leggyakoribb elem a Világegyetemben, csupán a hidrogén, a hélium és az oxigén előzi meg a sorban. A Naprendszer kőzetbolygói azonban szénben meglehetősen szegény égitestek, a fémes összetevők mellett döntően oxigénben gazdag ásványok, szilikátok és oxidok építik fel őket. Földünk például kevesebb, mint 0,01 százalék szenet tartalmaz. Marc Kuchner és munkatársai kozmokémiai és asztrofizikai megfontolások alapján vetették fel, hogy galaxisunkban olyan bolygótestek is létezhetnek, melyeket túlnyomórészt szén alapú ásványok építenek fel [1].

A protoplanetáris korong (protoplanetary disk, PPD) anyagában a szénnek az oxigénhez viszonyított aránya (C/O) kulcsfontosságú tényező, mert döntő mértékben meghatározza a keletkező bolygók kémiai összetételét. A Naprendszerben a C/O arány 0,55. Azonban ha egy protoplanetáris korongban a C/O arány nagyobb, mint 1, akkor az abban kialakuló sziklás bolygónak uraldománosan szén alapú ásványi összetétele lesz. A szilárd

felszínű bolygótestekben a leggyakoribb szén alapú ásványi összetevők a grafit, a gyémánt, valamint a különböző karbidok lehetnek, melyek fémek és fémfémek szénvel alkotott vegyületei. A karbidok közül planetáris testekben egyéb ásványfajták mellett nagy valószínűség szerint a szilícium-karbid (SiC), titán-karbid (TiC), valamint a vas-karbidok (Fe_3C , Fe_7C_3) fordulhatnak elő leggyakrabban. Egy tanulmány szerint a szénben bővelkedő összetételű planéták a korábban gondoltnál nagyobb gyakorisággal fordulhatnak elő, ugyanis 0,8 feletti C/O arány esetén nemcsak a csillag közelében keletkezhetnek szénbolygók, hanem a születő bolygórendszer külső régióiban is. A kutatók vizsgálatai arra is rámutattak, hogy 0,65-0,8 közötti, de még akár 0,65-nél kisebb C/O arány mellett is kialakulhatnak szénben gazdag bolygók a PPD-k csillaghoz közeli zónájában [2].

0,8-nél kisebb C/O aránynál a szilícium szilikátásványokban van jelen. Ha pedig a C/O arány 0,8 és 1 közötti, akkor karbidok és szilikátok egyaránt részt vesznek a

kialakuló kis tömegű bolygók alsó köpenyének felépítésében (szén-szilikát bolygók). A kőzetbolygók szilikát ásványaiban szénben gazdag ásványi környezetben – megfelelő fizikai feltételek mellett – az oxigént helyettesítheti a szén. Ezek az úgynevezett oxikarbidok ($\text{SiO}_x\text{C}_{4-x}$) [3], melyek nagy valószínűség szerint megtalálhatók a szén-szilikát bolygók köpenyében és alsó kérgében [4, 5].

A szenes planétákon az ég színét leginkább a sárga különféle árnyalatai jellemezhetik, a légkör összetevői uralkodóan szénvegyületek (CO , CH_4). A csapadék a körülményektől függően bután és benzol is lehet, a felszínen metán, illetve olajos összetételű iszap- és szuroktavak is létezhetnek.

Ilyen szénbolygók keletkezhetnek a csillagok különböző fejlődési végállapotai körüli, magas széntartalmú csillagközei környezetben is, így például pulzárrok és fehér törpék kísérői is lehetnek. A formálódó bolygórendszerekben a bolygótestek összetételének alakulása a galaxison belüli elhelyezkedéstől is függ. A C/O arány a galaxisok peremvidékétől a középpont irányába haladva nő, emellett értéke magasabb az idős csillagokból álló halmazokban. Így Napunk galaktikus környezetéhez képest a jövőben nagyobb eséllyel fedezhetünk majd fel szénbolygókat a Tejútrendszer centrumának vidékén, valamint az öreg csillagokat tartalmazó gömbhalmazokban is. A Világegyetem fejlődésével párhuzamosan nő a szénnek az oxigénhez viszonyított aránya, amely azt eredményezi, hogy a galaxisokban a szilikátos köpenyű és kérgű bolygókéhoz viszonyítva fokozatosan nő a szén alapú ásványokból felépülő bolygók aránya.

Égi gyémántok

Különleges keletkezési körülmények között rendkívül magas lehet a szénnek az egyéb elemekhez viszonyított aránya, ilyen kémiai körülmény mellett pedig a kialakuló bolygószerű objektum akár teljes egészében gyémántból állhat. Az 5,7 milliszekundumos PSR J1719-1438 jelű pulzár kísérője (PSR J1719-1438 b) egy, a csillagtárs intenzív sugárzása hatására anyagának jelentős részét elvesztett csillagmaradványból (fehér törpe) átalakult bolygószerű objektum [6, 7]. A mintegy 2,6 Jupiter-tömegű, legalább $23,3 \text{ g/cm}^3$ átlagsűrűségű, valószínűleg főként gyémánttá átalakult szénből felépülő, rendkívül alacsony tömegű szén fehér törpe (ultra-low mass carbon white dwarf) mindössze 2 óra 11 perc alatt kerüli meg a pulzárt.

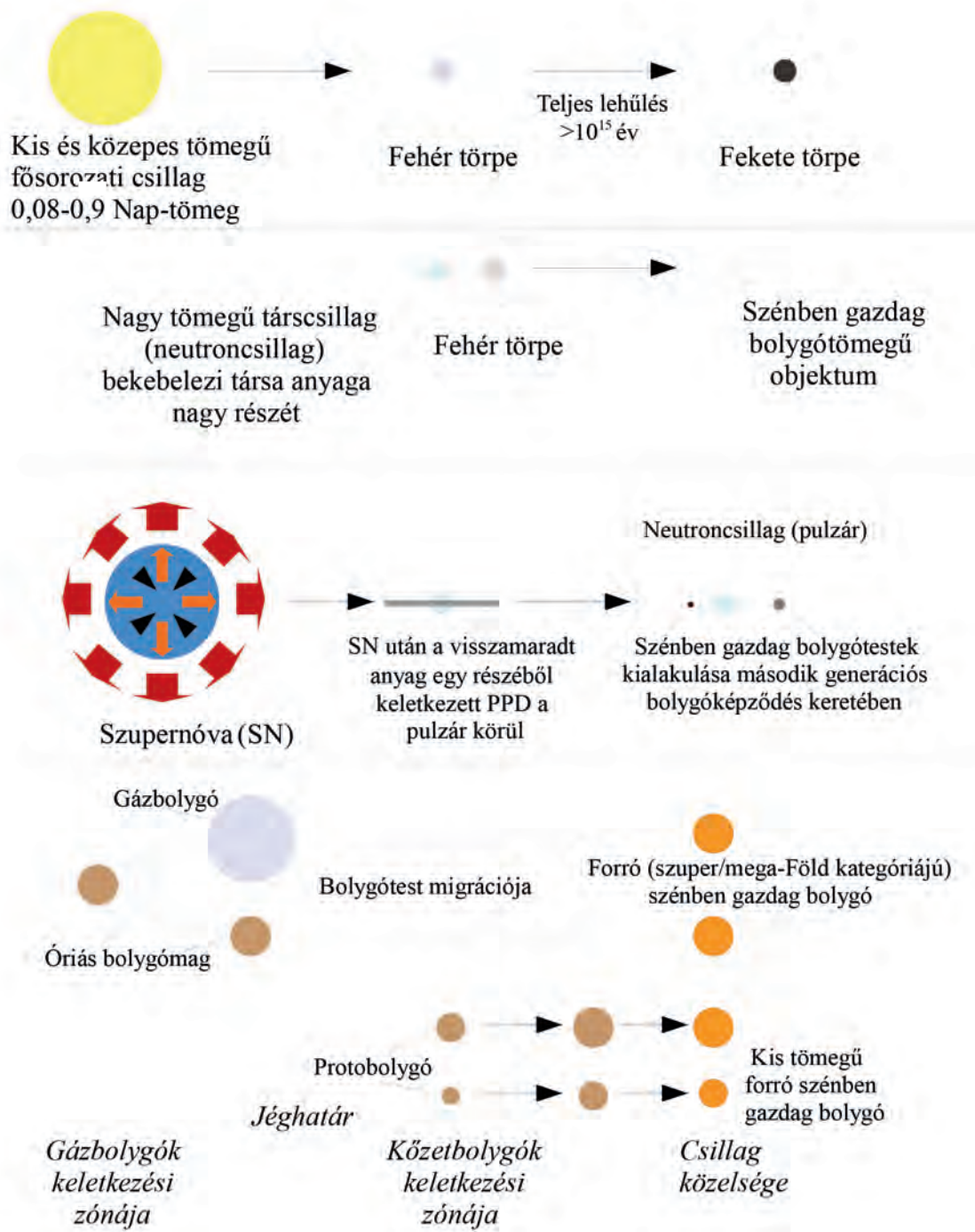
Noha nem bolygó, de az égitestek kémiáját tanulmányozva mindenképpen érdekes a Vízöntő csillagkép irányában, tőlünk 871 fényévre található PSR J 2222-0137 jelű pulzár is, amely egy kettős rendszer egyik

tagja, a másik tag pedig egy 1,05 naptömegű halvány törpecsillag [8]. Ez utóbbihoz hasonló, túlnyomórészt szénből és oxigénből álló fehér törpék az elméleti előrejelzések szerint megfelelően hosszú idő elteltével oly mértékben kihűlnek, hogy belsejükben a szén kristályosodott formában lehet jelen, azaz gyémánttá alakul át. A kis és közepes tömegű csillagok fejlődésének végállapota egy ilyen hipotetikus objektumtípus, az úgynevezett fekete törpe. E bizarr égitestek legbelső zónájában az anyag valószínűleg degenerált formában lehet jelen, külső burkukban pedig a szén gyémánttá átalakult alakja lehet a domináns összetevő. Napjainkban egyetlen képviselőjét sem ismerjük, mivel egy fehér törpe teljes kihűlése, azaz fekete törpévé történő átalakulásának időtartama nagyságrendekkel meghaladja a Világegyetem életkorát.

A kerámiabolygóktól a gyémántgyűrűs planétáig

A szén a fémek közül leggyakrabban a szilíciummal alkot vegyületet, amely a nyolcadik leggyakoribb elem az Univerzumban. Ennek alapján a szénbolygók populációjának jelentős hányada szilícium-karbidból épülhet fel. A karbidok a nem-oxid kerámiák jellegzetes képviselői, melyeket – főként a szilícium-karbidot – nagy keménység, valamint magas hőmérsékleten is nagy szilárdság jellemez. Az SiC után a leggyakoribbak közül további potenciális köpenyalkotó lehet az alumínium-karbid, valamint a titán-karbid is. A karbidos bolygók fémes magja a vas és egyéb fémek (elsősorban nikkell) mellett pedig nagy valószínűséggel tartalmaz különböző ásványi fázisokba rendeződő vas-karbidot is, mely a bolygótestek legbelső részében uralkodó fizikai viszonyok mellett a legáltalánosabb szénvegyület lehet. A nikkell a tizenharmadik helyen áll a kozmikus elemgyakorisági sorban, melynek karbidja a vas után az egyik legjellemzőbb komponens lehet a szénbolygók fémes magjában. Az ilyen bolygók kérge az SiC mellett a kémiai differenciálódásnak megfelelően kis sűrűségű grafitból is állhat, mely a szilícium-karbidhoz hasonlóan szintén nagy mennyiségben kondenzálódhat a szénben gazdag protoplanetáris korongokban. Elegendően vastag grafitréteg alatt magas nyomáson a grafit gyémánttá alakul át, amely akár vastag rétegben is jelen lehet a szénbolygók belsejében.

A szénbolygókban az említettek mellett egyéb más karbidok is lehetnek köpeny és kéregalkotók a bolygótestek kémiai környezetének függvényében. Az összetétel a szén alapú ásványok típusainak alapvető kompozícióját tekintve valószínűleg gyakran jelenik



1. ábra. Szénben gazdag bolygótetek, illetve bolygószerű objektumok kialakulásának plauzibilis forgatókönyvei

meg az Fe-Si-C rendszerben. Az ilyen típusú bolygók jellemzően vasban gazdag magot tartalmaznak, melyet szilikátokban vagy szilícium-karbidban gazdag köpeny ölel körül, kérgük legfelső rétegét pedig grafit is alkothatja [9]. Még nagyobb lehet a kémiai változosság az Fe-S-Si-C rendszerben, mely esetében a

szénbolygók fémes magjában (pontosabban annak adott differenciálódott öveiben) a kén gyakorisága jelentős lehet a többi könnyű elemhez képest [10].

Hakim Kaustubh és munkatársai egy vizsgálat eredményeinek közlésében arra mutatnak rá, hogy a szénben gazdag bolygóbelső viszonyai mellett a szilícium-karbid

meghatározott kémiai környezetben oxidálódik, melynek eredményeként kvarc, grafit és vas-szilicid (Fe-Si) olvadék keletkezik. Ilyen feltételek mellett a köpenyben SiC-hiány jelentkezik, az ilyen planéták magját pedig domináns hányadban Fe-Si ötvözet alkothatja [11]. E kompozíció kialakulásához egyebek mellett megfelelő mennyiségű oxigén jelenléte is szükséges, így a valóságban a szilikátokban, vas-szilicidben és kvarcban bővelkedő, ugyanakkor szénben is gazdag ásványi összetételű égitesteknek éppúgy létezniük kell a Világegyetemben, mint a karbidos bolygóknak. A szilárd felszínű szénbolygók között – az uralkodóan szilikátos összetételű bolygókhoz hasonlóan – minden bizonnyal léteznek nagy tömegű égitestek is, melyek populációjának egy része főként karbidos összetételű lehet. Ennek megfelelően a masszív szilikátos planéták mellett létezniük kell úgynevezett karbid szuper-Földeknek, illetve karbid mega-Földeknek is [12].

Egy szénben gazdag óriás bolygó nagy méretű, grafitos felszínű holdjának kérge alatt a holdbelső nyomásvizonyai mellett az elemi szén gyémánttá alakulhat át. Ha a hold valamilyen fizikai hatásra (ütkezés, árapályerők) széttöredezik, az így keletkező fragmentumokból egy időszakos gyémántgyűrű alakulhat ki az anyabolygó körül [11]. Olyan eset is lehetséges, amikor egy PSR J1719-1438 b-hez hasonló, egykori csillagnak a korábbi fúzióban keletkezett szénből álló magja fragmentálódik a jóval nagyobb tömegű társcsillag árapályerői következtében. Anyaga átmenetileg szintén gyémántdarabok és szemcsék alkotta gyűrűt képez a központi objektum, neutroncsillag körül.

Szénkémia, aktív geodinamika és az élet

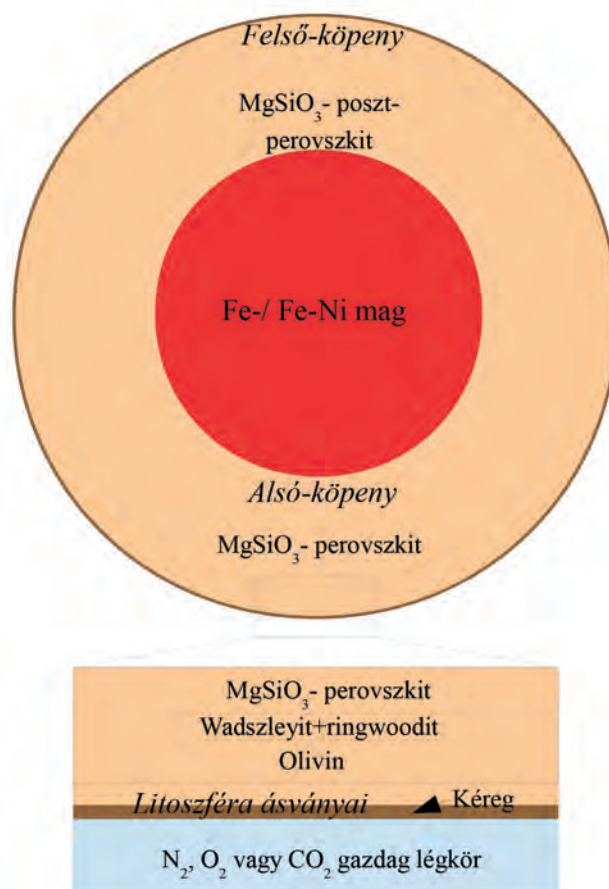
Bolygótudományi szempontból a szénben gazdag planetáris objektumok vizsgálata – például a gyémántbolygókat vagy az élet lehetőségeit tekintve – igazi kuriózumnak számíthat majd a jövőben. Mit mondhatunk el a szénplanéták nyújtotta lehetőségekről az élet kialakulásának vonatkozásában? A szén alapú élet kialakulása és fejlődése szempontjából az ilyen típusú bolygók felszíne akár alkalmasabb hely is lehet, mint az olyan szilikátos bolygóké mint a mi Földünk?

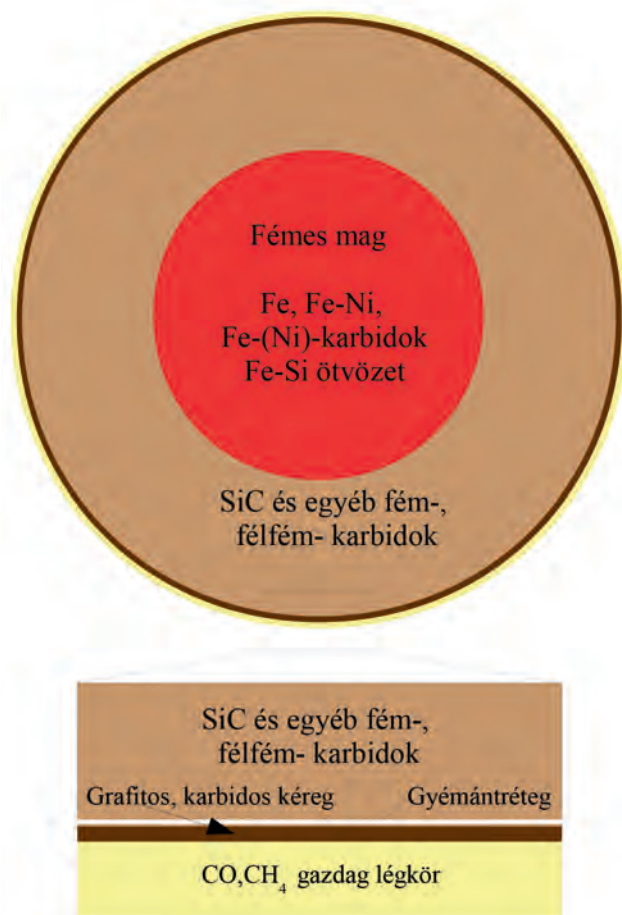
Egy érdekes tanulmány szerint az élet elsőként szénbolygókon születhetett meg a korai Világegyetemben [13]. A kis tömegű csillagok fémekben rendkívül szegény, szénben gazdag alosztályát képviselik az úgynevezett CEMP-csillagok (Carbon-Enhanced Metal-Poor stars). Fém tartalmuk százszor-ezerszer kisebb a Napénál, ami azt jelenti, hogy azelőtt keletkeztek még mielőtt a csillagközi tér feldúsult volna nehéz elemekkel. A kis tömegű CEMP-csillagok körüli szénbolygók detektálása és

vizsgálata bőséges információkkal szolgálhat nem csupán arról, hogyan kezdődött a bolygóképződés a korai Világegyetemben, de arról is, hogy vajon mikor jelenhetett meg az élet először az Ősrobbanás után.

„Jó okunk van feltételezni, hogy a földönkívüli élet szénelapú lesz, hasonlóan a földi élethez...” fogalmaz a cikk vezető szerzője, Natalie Mashian. Noha más alapú létformák létezése sem kizárt, azonban ha az élet általánosan előforduló jelenség, akkor bonyolultságot eredményező sajátosságai okán a szénelapú élet elterjedt lehet az Univerzumban. A szén alapú élet általunk ismert formájához folyékony vízre is szükség van. 1-nél magasabb C/O arány esetén a protoplanetáris korongokban a szén az oxigénnel főként szén-monoxidot képez, s mindössze kevés oxigén marad a vízjég képződéséhez. Ezekben a rendszerekben a kisbolygók, üstökösök vízben szegények lesznek, a sziklás bolygók pedig a felszíni óceánok hiánya miatt szárazak. Légkörüket az oxigénben gazdag gázok (CO_2 , O_2 , O_3) hiánya jellemzi. Ugyanakkor megvan a lehetősége, hogy a száraz, kevés vizet tartalmazó szénbolygókon éppúgy kialakulhat a szénelapú, de a földitől mégis oly

2. ábra. Földhöz hasonló összetételű szilikátos bolygó





3. ábra. Szénbolygó lehetséges összetétele

sok tekintetben különböző élet, abban az esetben, ha rendelkeznek az összes elégséges feltétellel. A jelentős mértékben grafitos felszínű szénbolygóknak például vékony légköre lehet és valószínűleg kevésbé alkalmasak az élet hordozására, mint azok a szénben szintén gazdag planéták, melyek felszínén már a szénen kívül elegendő mennyiségben megtalálhatók egyéb, az élet számára szükséges elemek is [9].

A vizsgálatok szerint Földünkön a lemeztektonika kedvezett a már kialakult élet továbbfejlődésének, a biológiai diverzitás fokozódásának. A lemeztektonikát az aktív geodinamika teszi lehetővé, mely bolygónk naprendszerbeli helyzete mellett, főként annak fizikai és kémiai tulajdonságainak köszönhető. A köpenyben működő hőkonvekció a tektonikus lemezek mozgásának hajtómotorja. A köpenyáramlásoknak nem csupán fizikai, de kémiai feltételei is vannak. A magasabb széntartalmú köpenyben, a szilikátokétól eltérőek lehetnek az egyes alkotó ásványok azon termodinamikai tulajdonságai, melyek

a konvekció teljesülését meghatározó Rayleigh-szám alakulása szempontjából fontosak. Így például a SiC-ből felépülő köpenyben meghatározott mélységben a konvekció akár erőteljesebb is lehet [14], mint az uralkodóan szilikátos ásványokból álló bolygótetek köpenyében. Ez a körülmény módosíthatja a felszíni geokémiát, és adott esetben akár még kedvezőbbé is teheti a szénbolygók által kínált feltételeket az élet fejlődése számára.

Jelenleg azonban még csekély a tudásunk az élet lehetőségéről, nem tudhatjuk biztosan, hogy az a földihez képest milyen formákat ölthet más bolygókon. Az arra alkalmas bolygókon a magasabb széntartalom önmagában még korántsem biztos, hogy minden esetben együtt jár a földihez hasonló komplex életformák kialakulásával, de adott körülmények között nagy valószínűséggel növelheti a szénalapú élet kifejlődésének esélyét.

FUTÓ PÉTER

IRODALOM

- 1 Kuchner M. J., Seager S. (2005): Extrasolar Carbon Planets. ArXiv: astro-ph/0504214
- 2 Moriarty J. et al. (2014): Chemistry in an evolving protoplanetary disk: Effects on terrestrial planet composition. *Astrophysical Journal*. 787. 81.
- 3 Sen S. et al. (2013): Carbon substitution for oxygen in silicates in planetary interiors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 15904
- 4 Futó P. (2014): A new planet-class: carbon-silicate planets. *Lunar and Planetary Science Conference XLV*, 1046, Houston
- 5 Futó P. (2015): Újdonságok a kis tömegű exobolygók kutatása terén. *Űrtan Évkönyv 2014*. MANT, pp. 108-114.
- 6 Bailes M. et al. (2011): Transformation of a star into a planet in a millisecond pulsar binary. *Science*. 333. 1717-1720.
- 7 van Haaften, L. M. et al. (2013): Formation of the planet orbiting the millisecond pulsar J1719-1438. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 291,133-136.
- 8 Kaplan D. L. et al. (2014): A 1.05 M companion to PSR 2222-0137: The coolest known white dwarf? *Astrophysical Journal*. 789. 119.
- 9 Hakim K. et al (2018): Mineralogy, Structure and Habitability of Carbon-enriched Rocky Exoplanets: A Laboratory Approach. ArXiv:1807.02064.
- 10 Deng L. et al. (2013): Effect of carbon, sulfur and silicon on iron melting at high pressure: Implications for composition and evolution of the planetary terrestrial cores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 114. 220-233.
- 11 Hakim K. et al. (2018): Capturing the oxidation of silicon carbide in rocky exoplanetary interiors. *Astronomy and Astrophysics*. 618. L6.
- 12 Futó P. (2019): Possible formation scenarios and mineralogical types of carbon-rich solid planets. *Lunar and Planetary Science Conference L*, 1307, Houston
- 13 Mashian M., loeb A. (2016): CEMP stars: possible hosts to carbon planets in the early Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460, 2482-2491.
- 14 Nisr C. et al. (2017): Thermal expansion of SiC at high pressure temperature and implications for thermal convection in the deep interiors of carbide exoplanets. *Journal of Geophysical Research*. 122. 124- 133.