

Mire a Nap megvénül

Napunk csillagászati értelemben egy kistömegű törpecsillag, amely önszabályzó termionukleáris erőműként megteremti életünk fizikai alapjait. Cikkünkben áttekintjük a Naphoz hasonló csillagok fejlődését, a kapcsolódó jelenségek hátterét és következményeit, illetve megpróbáljuk elképzelni, milyen lesz a mai Naprendszer kb. 7,6 milliárd év múlva, amikor központi csillagunk vörös óriássá felfúvódva egészen a Föld jelenlegi pályaméretét meghaladóan kitágul.

Pillantás a Nap belsejébe

Napunk a csillagászat egyik legfontosabb etalonja, hiszen tömegét, sugarát, kisugárzott fényteljesítményét (luminozitását) általában ezen mennyiségek egységeként használjuk: így beszélünk 15 naptömegű fekete lyukakról, ezer napsugarú vörös szuperóriásokról vagy éppen százezer napluminozitású hiperóriás csillagokról. Legközelebbi csillagként az asztrofizikai elméletek legfontosabb kalibrációs tesztobjektuma, melynek fizikai jellemzői igen pontosan ismertek. A közelség miatt felszíni részletei nagy szögfelbontással tanulmányozhatók, a Nap által kibocsátott fotontenger színképi elemzése igen érzékeny vizsgálatokat tett lehetővé. Mindezek együttesen a csillagfejlődési elméletek nagyon pontos kidolgozását is eredményezték, így nyugodtan kijelenthetjük, hogy általában véve a csillagok evolúciójában is egyfajta etalon a Nap, melynek jelenlegi állapotából nagy pontossággal rekonstruálhatjuk a Nap típusú csillagok múltját, illetve előrejelezhetjük jövőjüket.

A csillagok kezdeti tömegfüggvénye, azaz a különböző tömegű csillagok gyakorisága egy egyszeri csillagkeletkezési esemény során, széles tömegtartományon keresztül jól közelíthető egy hatványfüggvénnyel, melynek a kitevője -2 közelébe esik (Salpeter 1955, Kroupa 2002). Ez azt jelenti, hogy a

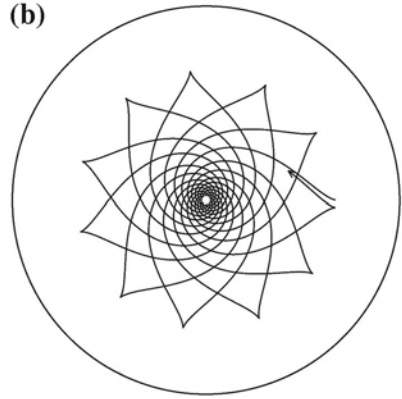
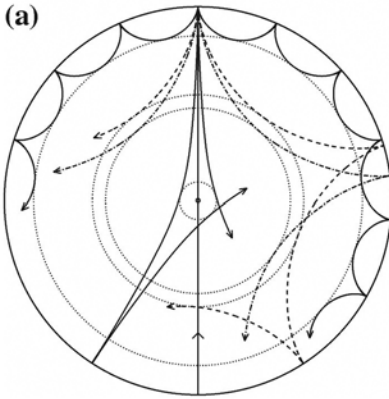
csillagkeletkezés folyamatai a kistömegű égitestek kialakulását részesítik előnyben, aminek következménye, hogy Tejútrendszerünk legtöbb csillaga a Naphoz hasonló, vagy még kisebb tömegű törpecsillag. Ugyanakkor az is következik ebből, hogy ha Napunk szerkezetét és fejlődését megértjük, akkor a csillagok többségének sorsáról meglepően pontos információkat tudunk leszűrni az asztrofizika törvényeire alapozva. Mindez többek között azért is jelentős, mert a más csillagok körül keringő bolygókra vonatkozó forradalmi felfedezések az elmúlt 15 évben megmutatták, hogy a bolygórendszerek igen gyakoriak, pl. a csillagukhoz igen közel keringő, ún. forró Jupiter típusú óriásbolygók a Nap típusú csillagok legalább 3–4%-ára jellemzők (Butler et al. 2006). Azaz Napunk jövője az idegen naprendszerek lehetséges sorsáról is sokat elárul.

Napunkra pillantva a különböző hullámhosszakon készült képek más és más tartományokat mutatnak be, melyek a forrongó naplégkör hőmérsékleti, ionizációs, mágneses, stb. tulajdonságait teszik meghatározhatóvá. A színképelemzés rendkívül hatékony módszer, melynek segítségével nagyon pontosan megállapíthatjuk a látható fényt kibocsátó tartományában mintegy 5800 K hőmérsékletű gázanyag pontos összetételét. A felszíni hőmérsékletből, csillag légköri paramétereiből viszonylag egyszerű feltevésekkel megbecsülhetjük a Nap belsejében uralkodó viszonyokat. Az asztrofizikai korai eredménye, hogy Napunk magjában sokmillió fokos hőmérséklet és hatalmas nyomás uralkodik, amely megteremti a fúziós reakciók igen hosszú időn keresztül stabil fennmaradását. Napunk anyagának kb. 73%-a hidrogén, majdnem 25%-a hélium, s valamivel kevesebb mint 2%-a nehezebb elemekből áll (csillagászati szóhasználatban mindezeket együtt fémeknek hívjuk). Jelenleg központi csillagunk magjának anyaga

mintegy 15 millió fokal hőmérsékletű és 150 ezer kg/m³ sűrűségű hidrogén-hélium keverék, melyben folyamatosan zajlik a hidrogén héliummá alakítása. Ebből a tényből két fontos következtetés vonható le: (i) Napunk jelenlegi állapotának élettartamát a fúzióra képes hidrogén mennyisége határozza meg; (ii) egy adott csillag magjának héliumtartalma igen érzékeny az égítést korára, tehát ha meg tudjuk becsülni a magbéli hélium arányát, öltünkbe hullhat egy hatékony korbecslési módszer.

letes szeizmológiára, ha nagyon nagy számú független rezgési állapot, ún. módus gerjesztődik egyszerre, ebben az esetben ugyanis a különböző hullámhosszú módusok eltérő mélységű rétegeket mintavételeznek (lásd 1. ábra).

A Naphoz hasonló csillagok szoláris oszcillációi kínálják mindeddig a legpontosabb módszert asztroszeizmológiára. A Napunktól nem túlzottan eltérő tömegű és hőmérsékletű égitestekben kb. a csillagsugár külső negyedét a konvektív zóna teszi ki, ahol a



Hullámterjedés a Nap belsejében. Balra: a felszín közelében gerjedő nyomási hullámok (p-módusok) behatolási mélysége erősen függ a frekvenciától: minél nagyobb a frekvencia, azaz rövidebb a hullámhossz, annál inkább a felszín közelében marad az adott hullám. Jobbra: a mag közelében gerjedő g-módusok nem képesek kijutni a csillag felszínéig. Utóbbiaknál a visszatérítő erő a gravitáció (Kiss 2008)

Feltehető a kérdés: hogyan lehet következtetni Napunk vagy más csillagok magjának héliumtartalmára? A választ az asztroszeizmológia (a Nap speciális esetében helioszeizmológia) szolgáltatja, melynek módszerei nagy mértékben hasonlítanak a geofizikusok szeizmikus vizsgálataira. Miként a földrengéshullámok terjedése bolygónk belsejében elárulja a mechanikai tulajdonságok változását egészen a Föld magjának határáig, ugyanúgy a csillagokban kialakuló állóhullámok frekvenciáinak megmérése, majd elméleti modellekkel való összehasonlítása is lehetővé teszi a csillagbelső szerkezetének feltérképezését. A pulzáló változócsillagok oszcillációi különösen akkor hasznosak rész-

forrásban lévő vízhez hasonlóan forró gázbuborékok emelkednek fel, majd lehűlve süllyednek vissza. A buborékok véletlenszerű mozgása által keltett nyomásváltozások (a csillag gázanyagának „bugyogása”) olyan, az egész csillagra kiterjedő rezgéseket váltanak ki, melyek a konvektív gerjesztés nélkül erősen csillapított módusokhoz tartoznak. A Nap esetében ezek jellemzően 5 perces periódusú oszcillációk, melyek valójában sok-sok ezer egyedi módus folyamatosan változó gerjesztése és csillapítása eredményeként figyelhetők meg.

Az asztroszeizmológia legmagasabb szintjét a szeizmikus inverzió jelenti, amely során a mért rezgési frekvenciákból meghatároz-

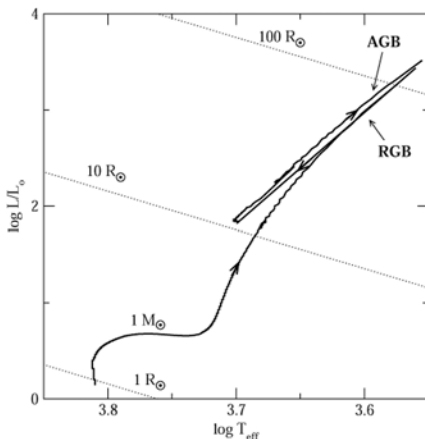
zuk a lokális hangsebesség értékét a csillag belsejében a központtól mért távolság függvényében. Mivel utóbbi a sűrűség, hőmérséklet és a plazma átlagos molekuláris tömegével jellemzett kémiai összetétel függvénye, a teljes inverzióból olyan paraméterek is levezethetők, mint a csillagmag pontos mérete, az ionizációs állapotokban bekövetkező hirtelen változások pontos elhelyezkedése, a konvektív zóna és az alatta levő sugárzási zóna mérete, de még az egész csillag forgási állapotának változása is a mélység függvényében (a terület friss áttekintését l. pl. Aerts et al. 2008).

A legrészletesebb vizsgálatokra mindeddig csak a Nap esetében kerülhetett sor, mivel még a legfinyesebb közeli, Nap típusú csillagok szoláris oszcillációit is egészen a legutóbbi évekig szinte lehetetlen volt detektálni. Mára a helyzet alapvetően megváltozott, a nagyon érzékeny sebességmérések mellett az ultraprecíz fotometriai űrtávcsövek (CoRoT, Kepler) is beszálltak a Nap típusú csillagok mérésekkel nagy kihívást jelentő oszcillációinak tanulmányozásába. A Kepler-űrtávcsőre vonatkozó részletes szimulációk alapján az asztroszeizmikus vizsgálatokkal valódi precíziós asztrofizika válik lehetségessé, hiszen a Nap típusú csillagok tömegét, sugarát és korát rendre 5%, 3% és 10% relatív hibával meg lehet határozni (Kjeldsen et al. 2009). Mindez a csillagok belső szerkezetére és fejlődésére vonatkozóan forradalmian új eredményekre fog vezetni a következő évtized elején – érdemes megemlíteni, hogy a kutatásokban az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetből is sokan részt vesznek a CoRoT és a Kepler űrtávcsövek asztroszeizmológiai tudományos konzorciumaiban.

A fejlődés útjai

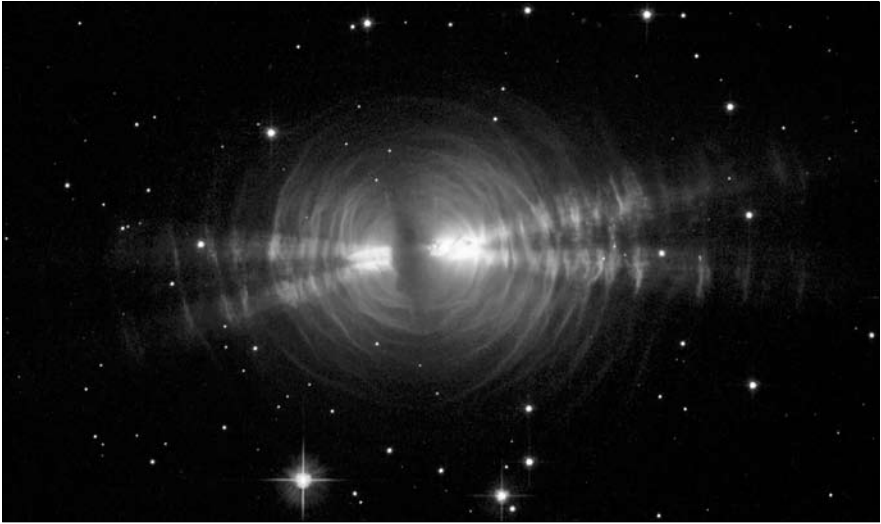
Amennyiben kellő részletességgel ismerjük egy csillag pillanatnyi belső szerkezetét, a magjában zajló energiatermelés magfizikai folyamatai determinálják a későbbi állapotok alakulását. Érthető, hogy a különböző magátalakulási reakciók hatáskeresztmetsze-

tei, melyeket a nukleáris asztrofizika mindmáig igyekszik pontosítani nagyenergiás kísérletekkel, illetve nagyon pontos számításokkal, kulcsfontosságú szerepet játszanak a fejlődési modellek technikai részleteiben. Nagy vonalakban azonban már bő fél évszázada ismerjük a csillagok fejlődését, aminek pontos lefutása elsősorban az égitestek kezdeti tömegétől függ. A Napunkhoz hasonló csillagok élettartama néhány milliárdtól néhány tízmilliárd évig terjed, míg pl. a 10–15 naptömegű objektumok alig pármillió év alatt elhasználják a fúziós reakciókra képes nukleáris üzemanyagukat, aminek bekövetkeztével szoppant nagy energiafelszabadulással járó szupernóva-robbanás zárja a csillag fejlődését.



2. ábra. Egy $1 M_{\odot}$ tömegű fémszegény csillag evolúciós útvonala a Hertzsprung–Russell-diagramon (Castellani et al. 2003 modelljei alapján)

Részletes evolúciós modellszámítások alapján tudjuk, hogy minden csillag a luminozitást a hőmérséklet függvényében ábrázoló Hertzsprung–Russell-diagram (HRD) fősozortán kezd életét, amikor a magbéli hidrogén–hélium fúzió felelős az energiatermelésért. A kis és közepes tömegű csillagokban (kb. fél és öt naptömeg között) a magbéli hidrogén elfogytával az energiatermelés kikerül a magból az azt övező hidrogénetető héjba. Mindeközben a csillag megkezdvi vándorlását a HRD jobb felső sarka felé, azaz luminozitá-



3. ábra. A Tojás-köd. A fák égvyűrűihez hasonló koncentrikus gyűrűk látszanak, melyek az aszimptotikus óriáságon jelentkező, időszakosan erősebb tömegvesztési folyamatokra utalnak. A két átlós „fény sugar” a központi csillag fénye, ami a csillagkörüli porburokból a sugarak irányában tud csak kijutni (HST PR)

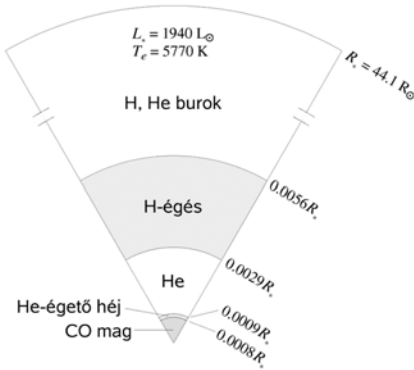
sa megnő, felfúvódik, hőmérséklete pedig lecsökken (2. ábra). Ekkor beszélünk (első) vörös óriáságról (Red Giant Branch, RGB), amihez jól meghatározott maximális luminozitás tartozik. A számítások szerint a csillagok tömegétől szinte teljesen független az RGB tetejének (tip of the Red Giant Branch, TRGB) luminozitása, ami így jól használható távolságindikátor is egyben. A TRGB-t a csillagok akkor érik el, amikor a héliummá átalakult magban beindul a hélium szénre való átalakulása; ehhez a csillag tömegének legalább 0,5–0,6 naptömegűnek kell lennie. A hélium–szén fúzió hirtelen kezdődik, ami érdekes módon a csillag összehúzódásával és felmelegedésével jár.

Amikor a magbéli hélium nagy része átalakul szénre, hasonló folyamat játszódik le, mint az első vörös óriáságra kerülés előtt: az energiatermelés újra kikerül a csillag magjából az azt övező, héliumban és hidrogénben gazdag héjakba. Ekkor a luminozitás újra megnő, emiatt a csillag újból felfúvódik vörös óriássá, hőmérséklete pedig ismét lecsökken 3000–4000 K közé. Ezt a második vörös óriáságot hívjuk aszimptotikus óri-

áságnak (Asymptotic Giant Branch, AGB), ahol a csillagok fejlődése markáns forduloponthez érkezik: a több száz napsugárra való kitágulás miatt a csillag anyagának külső részei igen távol kerülnek a tömegközépponttól, azaz a szökési sebesség pár km/s-ra lecsökken. Ilyenkor a legkisebb instabilitások is erős tömegvesztési folyamatokat indítanak el, aminek a végén a csillag tömegének jelentős része (akár 80–90%-a is!) ledobódik, létrehozva egy lassan táguló gázfelhőt, amit a forró csillagmag intenzív sugárzása fénylésre gerjeszt. Ekkor születik meg egy új planetáris köd (l. 3. ábra), közepén a lassan hűlő, általában szénből és oxigénből álló egykori maggal, ami csillagászati léptéken rövid idő múlva a fehér törpék közé kerül, mindenféle további energiatermelés nélkül.

A 2. ábrán ezt az útvonalat láthatjuk egy 1 naptömegű fémszegény csillagra, elméleti modellszámítások alapján (Castellani et al. 2003). Az átlós vonalak jelzik az 1, 10 és 100 R_{\odot} sugarú csillagok helyét. Jól látszik, hogy a Napunkhoz hasonló csillagok kb. 200 R_{\odot} méretig fúvódnak fel, miközben hőmérsékletük 3500 K-re csökken. A modellek jelentősen

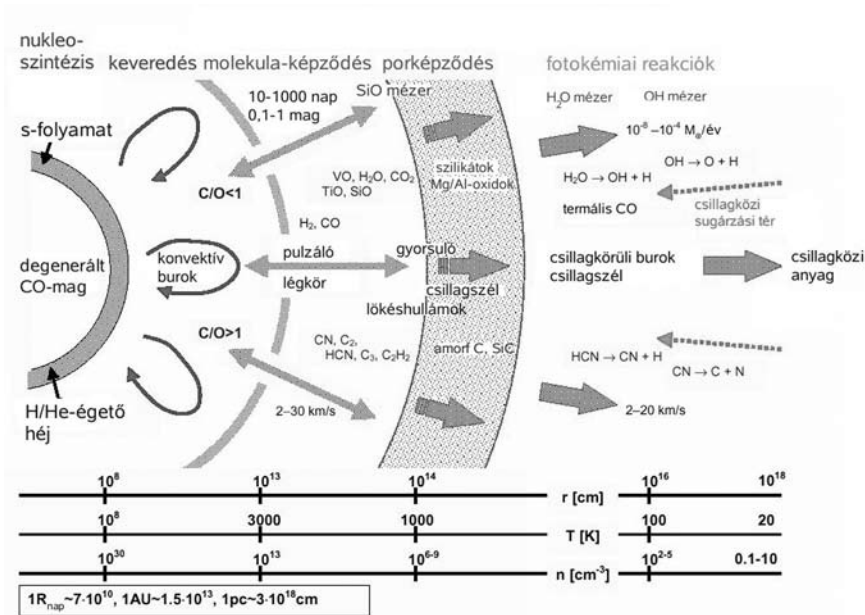
bizonytalanok a RGB és AGB tetején, ahol a tömegvesztés figyelembe vétele az elméleti számításokban rendkívül nehéz.



4. ábra. Egy $5 M_{\odot}$ tömegű AGB-csillag belső szerkezete. A magot övező héjak méretét meg kellett százszorozni az ábrázolhatóságához (Carroll & Ostlie 1996 nyomán)

Napunk fejlődése jelenleg nagyjából félúton jár az fősorozat előtti állapot és az aszimptotikus óriáság között. Az utóbbi állapotban lévő csillagok belső szerkezete nagyon jellegzetes (4. ábra). Legbelül az energiát nem termelő szén–oxigén mag van, aminek mérete a csillag sugarának egy ezrelékét sem éri el. Körülötte hélium- és hidrogénégető héjak találhatóak, melyeket egy héliumból álló réteg választ el. A csillag méretének több mint 99%-át a hidrogénből és héliumból álló felfúvódott burok teszi ki, aminek nagyrésztében a konvektív energiaterjedés dominál. Utóbbi jelenti az egyik legnagyobb nehézséget a csillagok modellezésében, mivel a turbulens konvektív zóna viselkedésének kiszámítása a legnehezebb hidrodinamikai feladatok közé tartozik.

A jelenleg is sok nyitott kérdés oka a vörös óriáscsillagok rendkívül összetett viselkedése. A konvekció által dominált burok folyamatosan megy át a csillagközi térbe, miközben a fotoszféra a Nap fotoszférájától nagyság-



5. ábra. Az AGB-csillagok rendkívül összetett rendszerek. Ez a szemantikus ábra kísérletet tesz a csillagmágtól a csillagközi térig terjedő tartományok elkülönítésére a bennük lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok alapján (J. Hron nyomán)

rendekkel vastagabb zóna. Eközben a csökkenő hőmérséklettel először molekula-, majd porképződés indul be, ami kihatással van a pulzáció és a tömegvesztés dinamikájára egyaránt. A csillag és burka sokszorososan csatolt rendszerként fogható fel, amiben a pulzáció csak egy a sok ismeretlen között (5. ábra).

Érdemes megjegyezni, hogy a változó csillagfejlődés fontos kísérőjelenségei a csillagok különböző instabilitásai. A vörös óriások tekintetében két alapvető instabilitás említhető meg:

- pulzációs instabilitás,
- energiatermelési instabilitás.

A pulzációs instabilitás a csillagok periodikus kitágulásával és összehúzódásával kapcsolatos, amit hasonló folyamatok gerjesztenek, mint a többi klasszikus pulzáló változócsillagban (pl. RR Lyrae-k, cefeidák). A nagy luminozitás és sugár, valamint a viszonylag kis tömeg következménye, hogy a pulzáció időskálája sokkal hosszabb, mint az említett klasszikus pulzáló változóknál. Míg egy 100 napsugarú és 8 naptömegű cefeida 15–20 napos periódussal távol ki és húzódik össze, addig egy 200 napsugarú és 1 naptömegű vörös óriás 200–300 napos periódusokkal jellemezhető.

Ezzel szemben az energiatermelési instabilitás (héliumhég-villanásként, illetve termális pulzusként is szokás emlegetni) a hidrogén- és héliumégető héjak időben változó viselkedéséhez köthető, jellemző időskálái néhány száz évtől százezer évig terjednek. Közvetlenül és emberi időskálán megfigyelhető hatásuk a pulzációs periódus változása, amely effektust mindeddig néhány vörös óriás változócsillagban sikerült kimutatni (pl. Gál & Szatmáry 1995).

A Nap és a bolygórendszer távoli jövője

Noha emberi léptékkel a klímaváltozás és globális felmelegedés sokkal sürgetőbb probléma, nem éréktelen azt sem meg-

vizsgálni, hogy mi fog történni Földünkkel, illetve a Naprendszerrel ama távoli jövőbe eső állapotban, amikor a Napunk vörös óriássá fúvódik fel. Mintegy 4,6 milliárd évvel ezelőtt a Nap luminozitása a jelenleginek mintegy 70%-a volt, azóta pedig egyenletes növekedett a kisugárzott fényteljesítmény a csillagfejlődés eredményeként. Meddig fog ez tartani és mik a várható következmények?

Érdekes felismerés, hogy a válasz bizonytalanságát domináló tényező Napunk tömegvesztése: noha becsült maximális mérete viszonylag jól meghatározott, a tömegvesztés eredményeként a bolygópályák tágulni fognak, azaz pl. Földünk Nap általi elnyelése meglehetősen ellentmondásos kérdés a szakirodalomban. Egy nemrégiben megjelent tanulmány szerint (Schröder & Connon Smith 2008) a jelenleg legpontosabbnak tekintett tömegvesztési modellek az első vörös óriásági (RGB) Napra 0,332 naptömeg elvesztését jósolják, mintegy 7,59 milliárd év múlva. Ekkor Napunk sugara 256 jelenlegi napsugár lesz, ami jelentősen nagyobb, mint most a Föld 215 R_{\odot} értékű pályasugara. Viszont csillagunk tömege szinte pontosan kétharmad részére csökken, aminek köszönhetően a földpálya mérete mintegy másfélszeresére megnő. (Érdemes megjegyezni, hogy Napunk később, az aszimptotikus óriáságon sem lesz ettől nagyobb, ugyanis addigra jelenlegi tömegének 45%-át elveszti, maximális sugara az AGB-n alig 180 R_{\odot} körül várható.)

Noha ez alapján azt gondolhatnánk, hogy Földünk meg fog menekülni, Schröder & Connon Smith számításai szerint a hatalmasra nőtt Nap árapály hatásai, illetve a kiterjedt, jelenleginél sokkal sűrűbb alsó légkörének fékező hatása együttesen azt fogják eredményezni, hogy Földünk bespirálozik a vörös óriás Nap belsejébe, ahol a fékezés megugrásával bolygónkra a teljes megsemmisülés vár. Viszont a jelenleg 1,15 csillagászati egységnél távolabbi bolygók, azaz már a Mars is túl fogja élni a Nap maximális méretét. Érdeklenség, hogy a 12 milliárd évnyi lassú fejlődés után Napunk



A Hubble Űrtávcső WFPC2 kamerájának legutolsó tudományos felvétele a Kohoutek 4-55 jelzésű planetáris ködről készült 2009. május 4-én

bolygóelnyelő fejlődése mindössze 5 millió évet vesz igénybe: ennyi idő alatt jut keresztül az egyre hidegebb kései Nap fotoszférája a belső bolygórendszeren. Az RGB tetejét elérve begyullad a magbéli hélium, ami kb. 130 millió évig fog kitartani. Ezután csillagunk elfejlődik az AGB-re, majd ennek tetejét elérve az utolsó nagy tömegvesztési hullám végén egy nagyjából fél naptömegnyi fehér törpét hagy maga után, egy rövid életű planetáris köd feltűnését és csillagközi térbe történő eloszlását lezárva.

Szintén izgalmas kérdés, hogy mi történik a Nap lakhatósági zónájával. Ez az a távolságtartomány csillagunk körül, melyen belül a földi típusú élet számára kedvezőek a körülmények. Pontosan definiálni szinte lehetetlen, a szakirodalomban az egyszerűség kedvéért szokás a folyékony víz lehetőségét kikötni a zónában. Természetesen a bonyolult légköri hatások miatt még ezt sem föltétlenül egyszerű pontosan kiszámítani valós bolygómodellekre. Jelenleg a Naprendszerben kb. 0,9 és 1,4 csillagászati egység között húzódik a lakhatósági zóna, amit Földünk kb. 1 milliárd év múlva a forró oldalon elhagy a Nap fejlődése miatt. Mintegy 5 milliárd év múlva

a lakhatósági zóna 1,3 és 1,9 CSE között lesz, ami a kitágult földpályát nem fogja magába foglalni, viszont a Mars pályáját igen. Az RGB tetejét elérve a majdnem 3000-szeres luminozitás-növekedés eredményeként a lakhatósági zóna kikerül 50 és 70 csillagászati egység közé, azaz a Kuiper-öv jelenleg fagyott üstökösmaimai várhatóan mind elpárolognak az óriási Nap sugárözönében. A Jupiter és Szaturnusz jégholdjai rövid ideig óceánholdakká válnak, majd várhatóan azok is elpárolognak, csak a szilárd kőzetmagjuk éli túl a megvénült Nap pár millió évig tartó fellángolását. Mire 130 millió évvel később újra vörös óriás lesz csillagunk, addigra csak egy kiégett és elpárolgott bolygórendszer maradványai kísérik Napunkat a csillagfejlődés utolsó stációján.

Kiss László

(Magyar Tudomány, 2009. október)

Irodalomjegyzék

- Aerts, C., et al., 2008, *Solar Physics*, 251, 3
 Butler, R.P., et al., 2006, *Astrophysical Journal*, 646, 505
 Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 1996, *An Introduction to Modern Astrophysics*, Addison-Wesley Publishing Company
 Castellani, V., et al., 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 404, 645
 Gál, J., Szatmáry, K., 1995, *Astronomy and Astrophysics*, 297, 461
 Kiss, L., 2008, *Válogatás a változócsillagászat új eredményeiből*, Meteor csillagászati évkönyv 2009, p. 184
 Kjeldsen, H., et al., 2009, *IAU Symp.* 253, 309
 Kroupa, P., 2002, *Science*, 295, 82
 Salpeter, E.E., 1955, *Astrophysical Journal*, 121, 161
 Schröder, K.-P., Connon Smith, R., 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386, 155