



ALKOTÓELEMEINK NYOMÁBAN

Modellezett báriumcsillagok

Miből áll a világ? Hogyan jöttek létre a különböző elemek? Honnan származik az az anyag, ami nem csak környezetünket, de bennünket is felépít? A nukleáris asztrofizika számos olyan kérdésre hivatott választ adni, melyek természetes kíváncsisággal töltik el a világot szemlélőket. Megannyi, merőben különböző eszközzel kell megvizsgálnunk a világot, hogy felfedhessük ezeket a rejtélyeket. A nukleáris asztrofizikában a csillagászati észlelések mellett számítógépes modellezések, a csillagokban zajló nukleáris reakciók feltérképezéséhez használt atomfizikai kísérletek, vagy éppen meteoritok összetételének elemzése is kulcsfontosságú szerepet játszik.

A világegyetem keletkezésekor csak a legkönnyebb elemek jöttek létre – főként hidrogén és kis részben hélium. Mégis mik voltak azok a folyamatok, amik a ma közönségesnek számító, akár több mint ötven protont és neutronot tartalmazó atommagok (például arany, higany, ólom) kialakulásához vezettek? A válaszokat a csillagok életében, főleg drámai végtusájukban kereshetjük.

Merre teremnek eme elemek?

Ahhoz, hogy nehéz, nagy tömegszámú atomok keletkezzenek, szélsőséges fizikai körülményekre van szükség – rendkívül magas hőmérsékletre és nyomásra. Ezeket jelenlegi ismereteink szerint a természetben a csillagok, valamint a fejlődésük során bekövetkező kataklizmusok, robbanásos folyamatok képesek előállítani, egyfajta gigantikus méretű, kozmikus kohóként. Az, hogy pontosan milyen folyamatok mely elemeket és milyen mennyiségben képesek létrehozni, egy mai napig aktívan kutatott terület, ugyanis a csillagok működése egy rendkívül összetett, soktényezős jelenség.

Laboratóriumi körülmények között, műszereinkkel közvetlen módon nem tudunk a csillagok belsejében uralkodó körülményekhez hasonlót előállítani. Pusztán közvetve, fizikai ismereteinkre alapozva, jóformán csak az általuk kibocsátott fény és annak tulajdonságainak (intenzitása és hullámhossza) alapján tudunk bármit is mondani róluk.

A csillagok életútját a kezdeti tömegük határozza meg. A Napunkhoz hasonló, kisebb tömegű csillagokból jóval többet figyelhetünk meg, mint nagy tömegű társaikból. Ez azért is van így, mert jóval kevesebb kiemelkedően nagy tömegű csillag keletkezik, ám a fúziósan aktív élettartamot is drasztikusan befolyásolja a kezdeti tömeg. A nagy tömegű csillagok tetemes mennyiségű anyagot bocsátanak ki életük során a csillagközi térbe. Kisebb társaik szerényebb mértékben "szennyezik" környezetüket, ám mivel sokkal többen vannak, hasonló mértékben járulnak hozzá összességében a galaxisokat alkotó anyag fejlődéséhez.

A galaxisok kémiai fejlődése alatt annak nehéz elemekben való feldúsulását értjük. A kezdetben fém-szegény (a fém csillagászati szóhasználatnál élve a héliumnál nehezebb elemeket jelenti) környezetben keletkezett csillagok fejlődésük során egyre nehezebb elemeket állítanak elő, melynek egy részét visszajuttatják a csillagközi térbe. A csillagok újabb generációja (mint a Napunk) ebből a dúsult anyagból születik, tehát azok már kezdetben is nagyobb fémtartalommal rendelkeznek, mint elődeik, és a rendszert csak tovább gyarapítják.

A kis tömegű csillagok életútja dióhéjban

A csillagok aktív, nukleáris reakciókat produkáló idejük döntő többségét fősorozati csillagként töltik (a Hertzsprung–Russell-diagramon elfoglalt helyük alapján), ekkor magjukban a hidrogén héliummá fuzionál. Mikor a magban a hidrogén koncentrációja lecsökken, véget ér a hosszan tartó és stabil fősorozati állapot, a csillagfejlődés további szakaszai élesen kettéválnak a kis és nagy tömegű csillagok esetén. A nagyobb csillagok egészen a vasig folytatják a fúziós lépéseket különféle, a magot körülölelő héjakban, aminek termékeit egy szupernóva-robbanás kíséretében még tovább építik, majd szétszórják a térben.

Merüljünk el egy kicsit mégis a szolidabb, kis és közepes tömegű (0,4-8 naptömegű) csillagok fejlődésében! A hosszas fősorozati állapot végeztén beindul a mag körül egy rétegben a hidrogén további fúziója, ami során a csillag sugara rendkívüli mértékben megnő, és egy vörös óriás keletkezik (a Nap várhatóan a mostani méretének több mint százszorosára duzzad majd, körülbelül éppen a Föld pályájáig növekedve). A hégégés addig növeli a héliummag méretét, míg abban újabb fúziós folyamat indul be, és végül egy szén–oxigén mag keletkezik. Ezek után éri el a csillag az aszimptotikus óriáságot (AGB), és innentől AGB-csillagról beszélünk.

Az AGB-csillagok mélyén többféle fúziós reakció is zajlik: a szén–oxigén magot körülölelve a hélium, míg kissé kijebb a hidrogén reakciója zajlik. Ezek egymással váltakozva lobbannak be, úgynevezett termikus pulzációkat okozva. A kisebb tömegű AGB-csillagokban a hidrogénégető réteg alatt egy vékony héjban a ^{13}C feldúsul, ami ^{16}O -né alakulva kellő mennyiségű neutronot szabadít fel, hogy otthont adhasson a lassú neutronbefogásos folyamatnak (ezt a régiót hívjuk ^{13}C pocketnek). Egy kistömegű AGB-csillag belső szerkezetét láthatjuk az **1. ábrán**. Nagyobb tömegű AGB-kben a ^{22}Ne alakul ^{25}Mg -má, ám ehhez már igen magas hőmérséklet szükséges. A pulzációs epizódok során a

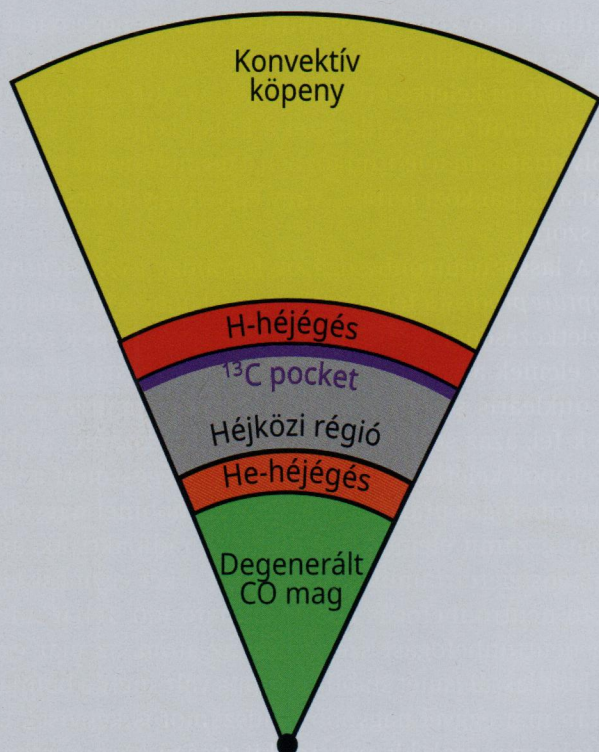
csillag külső köpenye benyúlik a hidrogénégető réteg alá, és konvekció segítségével a felszínre szállítja a folyamatban keletkezett anyagokat. Az AGB-szakaszban a rendkívül erős csillagszél a külső köpeny anyagát folyamatosan feléli, miközben a termelt nehéz elemeket a csillagközi térbe – vagy éppen egy társcsillagra – szórja.

A lassú neutronbefogásos folyamat (*slow neutron capture process*, s-folyamat) a vasnál nehezebb atomok keletkezésének mintegy feléért felelős. Ennek során az elemek a vasmagoktól kiindulva lépésről lépésre a nukleáris stabilitási völgy (**2. ábra**) mentén épülnek fel, azaz sorra egyre nagyobb rendszámú, stabil izotópok keletkeznek. Ez azért lehetséges, mert a neutronbefogás után keletkezett, az előbbinél nagyobb tömegszámú elemek instabilak és radioaktívak, ám átlagos élettartamuk kisebb, mint a két egymást követő neutronbefogás között várható idő. Tehát mire új neutronbefogást szenvedne az atom, az már egy β -bomlással ismét stabil izotóppá vált, mely a bomlás után már eggyel nagyobb rendszámot is képvisel. Ez a folyamat csak kis neutronkitettségi környezetben léphet fel – nagy tömegű csillagok robbanásos eseményeiben a bomlásra nincs idő két neutronbefogás között, így az ott uralkodó gyors neutronbefogásos folyamatban (*rapid neutron capture process*, r-folyamat) rendkívül neutrongazdag izotópok épülnek fel, melyek később bomlanak el stabil izotóppá.

Ha az atomokban az úgynevezett "mágikus számoknak" megfelelő számú neutron vagy proton található, az egy rendkívül stabil állapotot jelent, mert ezek a számok az atommagokban a zárt héjakhoz tartoznak. Így nem meglepő, hogy a mágikus neutronszámok környékén a neutronbefogással termelt elemek nagymértékben feldúsulnak. Ilyen magok esetén a neutronbefogásra mutatott hatáskeresztmetszet jelentősen lecsökken, tehát a nehezebb elemek felépítése megreked. Az s-folyamat termelésében ezért három csúcsot figyelhetünk meg: az első csúcsot az 50-es neutronszám környékén a Sr, Y és Zr; a második csúcsot a 82-es neutronszámok esetén a Ba, La, Ce, Nd és Sm jelöli ki; míg a 126-os neutronszámú Pb alkotja a harmadik csúcsot, amely az s-folyamat végét jelenti. De hol figyelhetjük meg ezeket az elemeket?

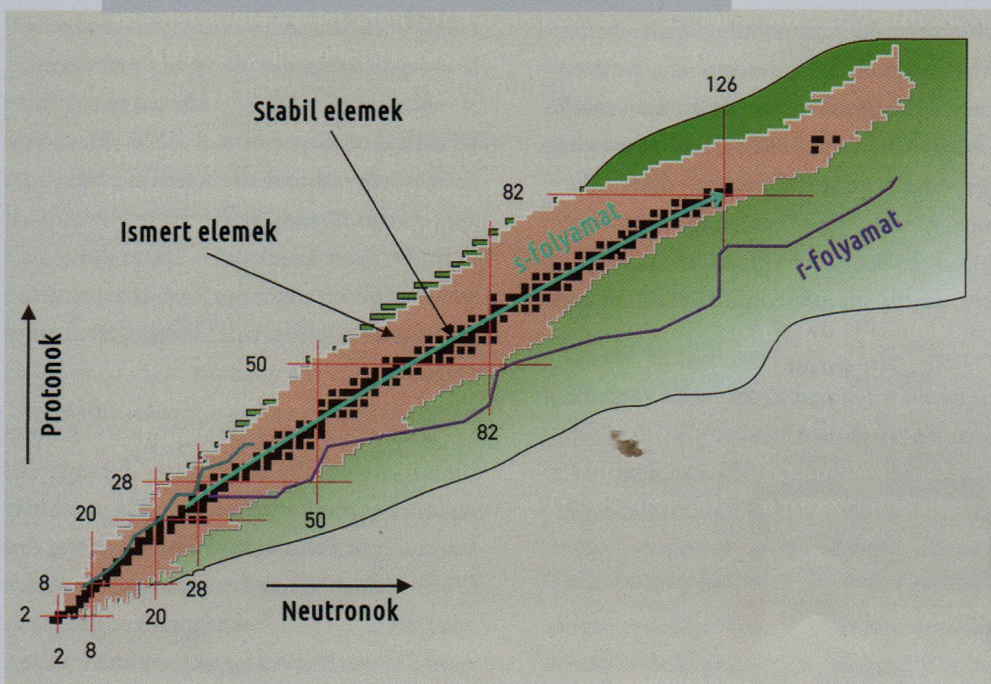
Báriumcsillagok

Az 50-es években spektroszkópiai méréseket elemezve olyan csillagokat találtak, melyek különös többletet mutattak egyes elemekben – leginkább a báriumban, nevük is innen ered, báriumcsillagokként (Ba-csillagok) ismeretesek [1]. AGB-csillagokra jellemző elemekben



1. ábra. Egy AGB-csillag keresztmetszetének sematikus ábráján figyelhetjük meg a különféle, egymásra épülő rétegek szerkezetét. Az ábra nem méretarányos, a külső köpeny a csillag sugarának mintegy 99 százalékát teszi ki.

2. ábra. A nukleáris stabilitási völgy és a neutronbefogásos folyamatok. A vízszintes tengelyen a neutron-, míg a függőleges a protonszámot láthatjuk. A középső, fekete elemek stabilak, a radioaktív bomlások során minden mag e "völgy" felé közeledik. Az s-folyamat során a völgy mentén épülnek fel az elemek. Ezzel szemben az r-folyamat során neutrongazdag elemek keletkeznek, melyek később bomlanak el. (Forrás: University of Rochester)



mutattak váratlan többletet, annak ellenére, hogy a mintában csak fősorozati vagy vörösóriás-ági csillagok szerepeltek, amik fejlődési állapotuk alapján magukban még nem állíthatták elő ezeket.

A látszólagos ellentmondásra a megoldás később egyértelművé vált: az ilyen csillagok kivétel nélkül kettős rendszerekben helyezkednek el, amiben a halványabb komponens immáron egy fehér törpe, ami a kis és közepes tömegű csillagok végstádiuma. A jelenleg jóval halványabb társcsillag kezdetben a nagyobb tömegű volt, így gyorsabban fejlődött, majd az AGB-fázisban anyaga egy részét átadta a ma Ba-csillagként megfigyelt társának. A tömegátadás pontos részletei egyelőre ismeretlenek, mégis főként az AGB-csillagok intenzív csillagszelének tulajdonítjuk, ami "ráfújta" a leendő Ba-csillagra külső rétegének anyagát. Azonban szerepet játszhat az AGB-fázis alatt drasztikusan megnőtt sugár is, ami átlépheti a Roche-határt, ahol már a másik csillag gravitációs tere dominál, ezzel magára húzva az AGB társa anyagának egy részét. Ennek művészi illusztrációját mutatja be a 3. ábra.

A tömegátadás nem különleges jelenség a világegyetemben. A legtöbb csillag kettős, vagy akár még több komponensből álló rendszerekben van jelen. Elsőként az úgynevezett *Algol-paradoxon* világított rá arra, hogy a csillagok között igenis felléphet jelentős mértékű anyagátadás. A paradoxont az okozta, hogy a híres Algol nevű fedési kettőscsillagot egy fősorozati és egy, a fejlődésben előrébb járó óriás alkotja, azonban a csillagfejlődési elméletének ellentmondóan a kisebb tömegű csillag érte el előbb az óriás állapotot. Ezt csak úgy tudjuk megmagyarázni jelenlegi ismereteinkkel, hogy a nagyobb tömegű komponens a várakozásoknak megfelelően óriássá vált, ekkor társának jelentős mennyiségű anyagot adott át, ezzel maga kisebb tömegű lett, mint fősorozati párja.

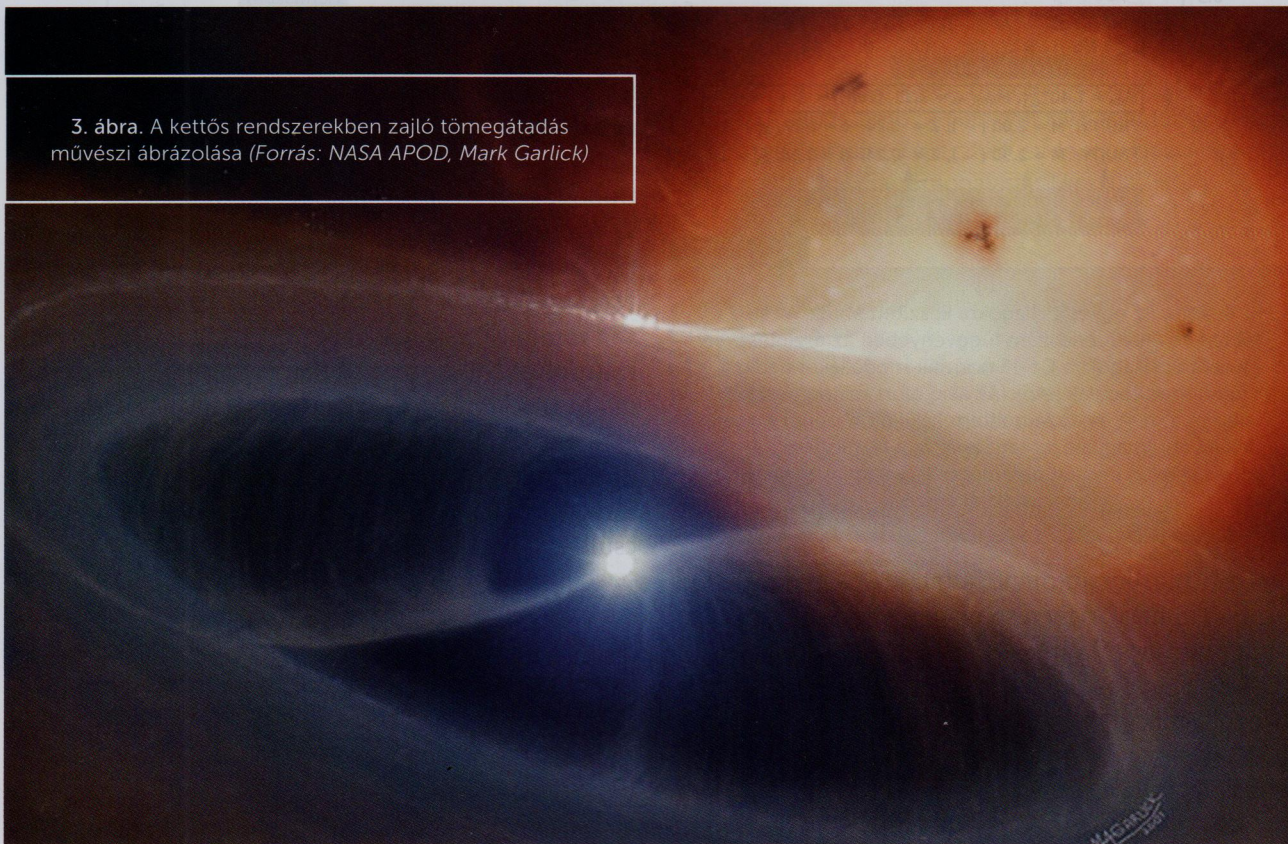
A Ba-csillagok elsőre jelentéktelennek tűnnek, hiszen miért is előnyös nekünk, hogy ha közvetett módon tudjuk rajtuk megfigyelni az AGB-csillagok nukleoszintézisének köszönhető elemeket? Az AGB-csillagok közvetlen vizsgálata számos problémába ütközik, például az intenzív csillagszél megnehezíti a spektrumok tiszta elemzését. Ezzel szemben a Ba-csillagokat inaktivitásuk miatt közvetlenül, tisztán vizsgálhatjuk.

Észlelések és modellek

A csillagok elemgyakoriságait, tehát azt, hogy felszínükön mekkora mértékben van jelen egy adott elem, spektroszkópiai mérések segítségével határozhatjuk meg. A Ba-csillagok többsége halvány, és precíz felbontásra van szükség beható vizsgálatukhoz. Ezt a feladatot gyakran még az ország legnagyobb távcsöve (Piszkéstető, 1 méter átmérőjű reflektor) sem tudja teljesíteni, így a legtöbb esetben külföldi eszközökhöz kell fordulnunk.

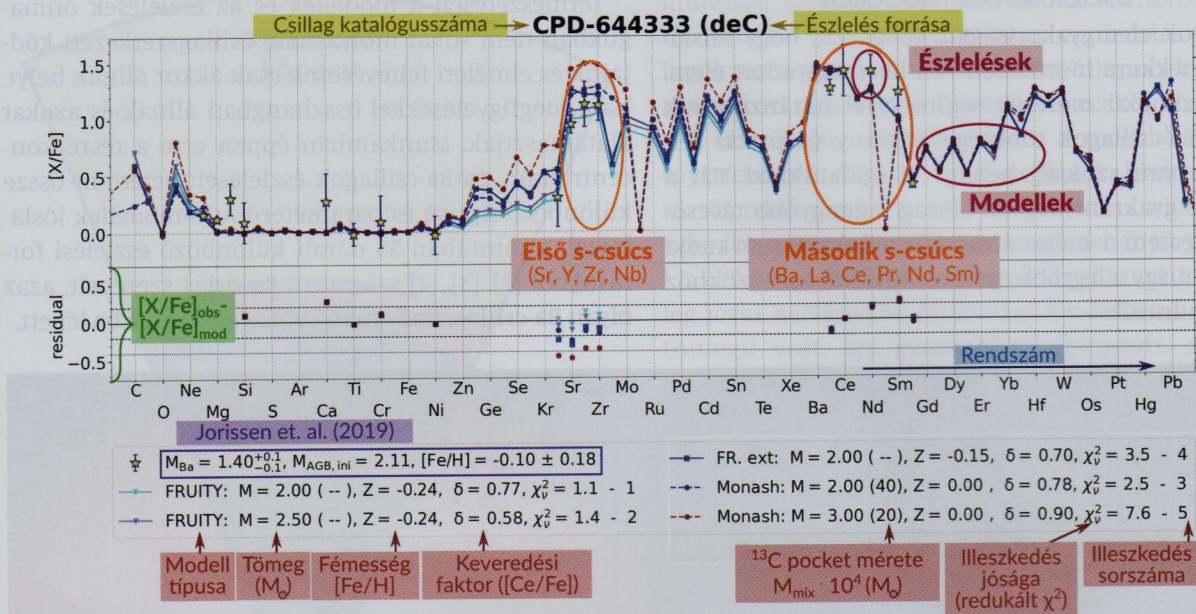
Természetesen a modellek és az észlelések önmagukban nem sokat mondanak. Csillagszerkezeti kódjaink és elméleti feltevéseink csak akkor állnak helyt, ha a megfigyelésekkel összhangban állnak és azokat alátámasztják. Munkámban éppen erre a részre koncentráltam, és Ba-csillagok észleléseit vetettem össze különböző típusú és paraméterű AGB-modellek jóslataival. A mintában 55 darab, különböző észlelési forrásokból [2], [3], [4] származó Ba óriás szerepelt, azaz olyan Ba-csillag, mely már a vörös óriás fázisba lépett.

3. ábra. A kettős rendszerekben zajló tömegátadás művészi ábrázolása (Forrás: NASA APOD, Mark Garlick)



Az elméleti megfontolásokat ezzel szemben több, az AGB-csillagok nukleoszintézisének leírására alkalmas, egymásól kissé eltérő numerikus modell képviseli. Ezek a kódok adott kezdeti tulajdonságok (tömeg, összetétel, stb.) mellett az ismert fizikai folyamatok segítségével állítják elő a csillagban zajló körülményeket: az adott pontbeli összetételt, nukleáris reakciókat, hőmérsékletet, nyomást, és számos egyéb paramétert. Ezek egydimenziós modellek, azaz egy vonalként kezelik a csillag belső szerkezetét, és csak a középponttól számított sugarat veszik számításba, tehát feltételezett a csillag gömbszimmetriája, ami jó közelítéssel teljesül, ám még így is napokat vesz igénybe egy modell lefuttatása.

Pár elméleti feltevéssel egyszerűen összeköthetjük a Ba-csillag észlelt és AGB társának elméleti összetételét. Természetesen az AGB anyagának csak egy kis hányadát adja át a Ba-csillagnak, és utóbbi spektrumában is keverednek az eredeti alkotóelemek az elszívott anyaggal. Ezért annak érdekében, hogy az észleléseket közvetlenül összevethessük a modellekkel, az elméleti eredményeket az észlelések szerint normálnunk kell. Ezt egy megbízhatónak ítélt elem (esetünkben a Ce) elemgyakoriságával végezhetjük, melyről feltesszük, hogy pontosan illeszkedik a modellekre, így megadja, hogy a Ba-csillag köpenyének mekkora része érkezett az AGB-csillagról, majd az összes többi elem e szerint számítható át.



4. ábra. Az egyes csillagokra készített ábrák. A felső táblán növekvő rendszám függvényében az észleléseket a sárga csillagok, a Ce-ra normált modelleket pedig a folytonos vonalak jelzik. Az alsó tábla minden észlelt elemre a mért és a számolt értékek különbségét tünteti fel. Az ábramagyarázat tartalmazza a [3] (Jorissen et al.) forrás alapján becsült paramétereit, valamint az illesztett modellek jellemzőit.

Algoritmusom automatizáltan megkeresi a legvalószínűbb tömegű és fémességű modelleket, majd ezeket átszámítva egy ábrán tünteti fel az észlelésekkel. Így közvetlen módon, minden egyes elemre összehasonlítható a modellek jóslata az észlelésekkel. A legjobb illeszkedést mutató modellhez tartozó tömeg és fémesség közelítőleg megadja az immáron fehér törpe társ AGB-szakaszában tapasztalt kezdeti paramétereit. A legszemléletesebb az illeszkedést ábrákon vizsgálni.

Az elemek titkai egy ábrán

Az eljárásom kétségtelenül legfontosabb végterméke a minden egyes csillagra automatikusan előállított grafikon, melyek magyarázatát a 4. ábra mutatja be. Ezek vízszintes tengelyén az egyes elemeket láthatjuk növekvő rendszám szerint. Az $[X/Fe]$ jellegű mennyiségek jelölik az elemgyakoriságokat a csillagászatban használatos rendszer szerint, a Nap összetételéhez viszonyított logaritmikus skálán.

A felső táblán a sárga csillaggal jelölt adatpontok az adott csillagban az egyes elemekre meghatározott, míg a folytonos vonallal összekötött pontok az egyes modellek által jósolt elemgyakoriságokat jelölik. Az alsó táblán az észlelt és az elméleti értékek különbsége látható.

A minta kellő adatszámú ponttal rendelkező, 46 darab csillagából 80 százalék esetén kielégítő illeszkedést találtunk. Ennek 83 százaléka az előzetes elemzések várákozásainak megfelelő modelleket javasolt, 6 esetben azonban meglehetősen kisebb tömeget kaptunk, mint azt előzetesen, a pályaparaméterek alapján becsülték ([3] forrásban).

A kozmikus szobamérleg, avagy hova tűntek a nehéz csillagok?

Mint láhattuk, azt, hogy a csillag milyen folyamatokat él át, a tömege határozza meg. Hogyan állapíthatjuk meg, hogy mekkora egy csillag tömege? Nyilvánvalóan nem látogathatjuk meg a csillagot egy házi szobamérleggel. Ennél jóval rafináltabban kell eljárunk, hiszen ismét csak közvetett módon, a tömege hatásaiból következtethetünk erre a tulajdonságra. Pontos adatra jóformán csak akkor számíthatunk, ha a csillag egy kettős rendszer része, és meg tudjuk figyelni a két komponens egymáshoz viszonyított mozgását. Igazából ekkor is csupán egy alsó határt szabhatunk meg, mivel a rendszer keringési síkjának a mi látóirányunkkal bezárt szöge, azaz inklinációja ismeretlen, valójában bármilyen értéket felvehet.

A mért elemgyakoriságokra való modellillesztés, melyet az eljárás során végzek, igen nagy bizonytalansággal tehető meg, azonban ha megfelelően sikerül, ez egy teljes mértékben inklinációfüggetlen tömegbecslési eljárásnak tekinthető. A legjobban illeszkedő modellek tömege megegyezik a Ba-csillag társának kezdeti AGB-tömegével. Viszonylag jól ismert az összefüggés

a kezdeti AGB-tömeg és a későbbi, fehér törpe korban tapasztalt tömeg között, így ebből meghatározható a fehér törpe tömege. Ezek után a pályaparaméterekből már megbecsülhető a Ba-csillag jelenlegi tömege is. A tömegviszonyok ismerete pedig alapvető a kettős rendszerek megértésében.

A vizsgált mintára rendelkezünk tömegbecslésekkel ([3] alapján), így az illesztés eredménye azzal összevethető volt. A legtöbb esetben az illesztés során hasonló értékeket mutattak a modellek, mint a pályaparaméterek alapján való becslés, ez alátámasztja az eljárásunk megfelelő voltát. Azonban a [3] szerint kiugróan nagy tömegűnek becsült csillagok esetén jóval kisebbek illeszkedtek megfelelően, így a mintában a modellillesztés szerint nem is szerepelt olyan csillag, mely 4 naptömegnél nagyobb tömegűnek adódott volna. A kezdetben [3] alapján becsült, valamint az eljárásom során illesztett tömegek hisztogramját az 5. ábra tünteti fel. Ez kezdetben kirívó konklúzió lehet az AGB-csillagok tömegére nézve, azonban oka feltehetőleg az észlelési pontosságban rejlik. Az ennél nagyobb tömegű AGB-k egyre kevésbé hatékonyan termelik az s-folyamat elemeit, így társukat, ha be is szennyezik, nem elég magas koncentrációban ahhoz, hogy kitűnjenek az átlagos csillagok közül, és azokat Ba-csillagként kategorizálva vizsgáljuk.

Mivel eljárásom automatizált, így az a jövőben felhasználható több csillag és szélesebb paraméter-értékekkel rendelkező modellek elemzésére is. A közeljövőben reményeink szerint hozzájutunk egy olyan nagyszámú

minta észleléseihez, amit kellően diverz modellek segítségével elemezve megszorításokat tehetünk a Ba-csillagok társainak tömegeloszlására.

Reményeink szerint ez hozzájárulhat a Ba-csillagok rendszerében történő, egyelőre jelentősen bizonytalan tömegátadási folyamatok feltérképezéséhez, valamint az AGB-modellek pontosításával jobb betekintést nyerhetünk a lassú neutronbefogásos folyamat működésébe, így egy lépéssel közelebb jutva a világunkat alkotó elemek keletkezésének felderítéséhez.

VILÁGOS BLANKA

A cikk a szakkollégiumi cikkpályázatunkra érkezett.

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALOM

- [1] Bidelman, W. P. and Keenan, P. C.: 1951, *Astrophys. J.* 114, 473
- [2] de Castro, D. B., Pereira, C. B., Roig, F., Jilinski, E., Drake, N. A., Chavero, C., and Sales Silva, J. V.: 2016, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 459, 4299
- [3] Jorissen, A., Boffin, H. M. J., Karinkuzhi, D., Van Eck, S., Escorza, A., Shetye, S., and Van Winckel, H.: 2019, *A&A* 626, A127
- [4] Karinkuzhi, D., Goswami, A., Sridhar, N., Masseron, T., and Purandardas, M.: 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 476, 3086
- [5] Pols, O., *Stellar Structure and Evolution* egyetemi jegyzet

E SZÁMUNK SZERZŐI

BÖLCSKEI ATTILA: PhD, főiskolai tanár, Óbudai Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Vizuális Ismeretek Tanszék; CSUTAK ZSOLT: doktorandusz, az NKE Amerika Tanulmányok Kutatóintézet kutatója; FARKAS CSABA: tudományos újságíró, Szeged; HÉRINCS DÁVID: meteorológus, HungaroControl, Budapest; HORVÁTH GÁBOR: egyetemi tanár, ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest; JÁNOSI IMRE: egyetemi tanár, Nemzeti Közzolgálati Egyetem Víz- és Környezetpolitika Tanszék, Budapest; JUHÁSZ GABRIELLA: egyetemi docens, Semmelweis Egyetem Gyógyszerhatástani Intézet, Budapest; KORDOS LÁSZLÓ: geológus, paleontológus; KÖKÖNYEI GYÖNGYI: egyetemi adjunktus, ELTE PPK Klinikai Pszichológia és Addiktológia Tanszék, Budapest; PERESZLÉNYI ÁDÁM: PhD, muzeológus, állatpreparátor, tudományos munkatárs, Deutsches Meeresmuseum, Stralsund, Németország; SZÁZ DÉNES: PhD, tudományos munkatárs, ELTE BDPK Fizika Tanszék, Szombathely; VILÁGOS BLANKA: ELTE Bolyai Kollégium, ELKH CSFK Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet.

KÖVETKEZŐ SZÁMUNKBÓL

DÁLYA GERGELY: Kozmológia gravitációs hullámokkal
SZARKA LÁSZLÓ: 140 év távlatából – A légköri szén-dioxid-szint változásai
VÖRÖS GÁBOR: Számolni a kockázattal

5. ábra. A [3] (Jorissen et al.) által becsült, valamint az algoritmus által illesztett tömegek eloszlása. Látható, hogy az illesztett eloszlás folytonos, de hasonló tartományban mozog, mint a becslések túlnyomó többsége.

