

függvényében. A ${}^4\text{He}$ és ${}^{16}\text{O}$ erősen kötött magokkal létrehozott reakciók vannak alul, a ${}^{6,7,8}\text{Li}$ -mal létrehozottak középen és a $2n$ -halo ${}^6\text{He}$ -mal nyert eredmények felül. Az ábra világosan utal arra, hogy a ${}^6\text{He}$ -ban két neutron lazán kötött, $2n$ -halót alkot.

Az 5. ábra középső részén a Li-izotópok r_c töltéssugara van feltüntetve a tömegszám függvényében. Az optikai izotópeloldást lézerspektroszkópai módszerekkel mérték. Látható, hogy a ${}^{11}\text{Li}$ -nál – a $2n$ -halo miatt – ugrásszerűen megnőtt a töltéssugár. Mérték a ${}^{11}\text{Li}$ tömegét is Penning-csapdában és meghatározták a $2n$ szeparációs energiát. Ezek egyúttal arra is utalnak, hogy a ${}^{11}\text{Li}$ -nál az $N = 8$ nem mágikus szám. A Penning-csapdában a részecske homogén mágneses térben kering és a keringési frekvenciából a tömeg nagy pontossággal meghatározható. A módszer nagyon kis mennyiségű (néhány atomnyi) és igen rövid felezési idejű (néhány ms) atommagok tömegének meghatározására is alkalmas részletesebben lásd az [5]-ben a IV.3.7. pontot.

Neutronbőr

Mind az elméleti relativisztikus Hartree–Fock-számítások, mind a kísérleti adatok arra utalnak, hogy az erősen neutrontöbbletes atommagokban neutronbőr épül ki a magtörzs felett. A neutronbőr vastagsága a $\Delta R_{np} = R_n - R_p$ neutron-, illetve protonmagsugár-különbséggel jellemezhető, ami például a ${}_{28}\text{Ni}$ - és ${}_{50}\text{Sn}$ -izotópoknál a tömegszám növekedésével egyértelműen nő.

Krasznahorkay és munkatársai [8] új eredményeket nyertek az ${}^{124}_{50}\text{Sn}$ - és ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ -atommagokban fellépő neutronbőr vastagságára. Ezek szerint

$$\Delta R_{np} = 0,21 \pm 0,05 \text{ fm a } {}^{124}\text{Sn-nál és}$$

$$\Delta R_{np} = 0,161 \pm 0,042 \text{ fm a } {}^{208}\text{Pb-nál.}$$

Az eredmények jól egyeznek a korábbi adatokkal. A neutronbőr meghatározásához (n,p) töltéscsere antianalóg óriásdipólrezonancia-módszert használtak. A módszer az egzotikus atommagoknál is ígéretes lehetőséget a nyújt a neutronbőr vastagságának meghatározására.

Kívánatos lenne, hogy szisztematikusan vizsgálják az alacsony sűrűségű neutronanyag (neutronbőr) előfordulását a rendszám függvényében, például ${}^{126-138}_{50}\text{Sn}$ -nál és sok más rövid felezési idejű izotópnál.

Az (e,e) reakciók információt adnak az atommagok töltéssugarára és töltéssűrűségére. Ezeket kombinálva a (p,p) szórási eredményekkel a nukleonok eloszlására és az anyagsűrűségekre is nyerhetők adatok.

Távlatilag nagy előrelépést jelentene, ha a radioaktív ionnyalábokat (RIB) előállító laboratóriumokban elektron-RIB ütközéseket is lehetne vizsgálni.



Az óriásrezonanciák, $Z = N$ atommagok, atommagtömeg-változások, hiperdeformált magok, túl a nukleonleszakadási határon és az elméleti vonatkozások tárgyalására a *Fizikai Szemle* következő számában, cikkünk második, befejező részében kerül sor.

Irodalom

1. V. I. Zagrebaev, W. Greiner, *Nucl. Phys. A* 944 (2015) 257.
2. A. Bracco et al.: *NuPECC Long Range Plan 2017, Perspectives in Nuclear Physics*. http://nupecc.org/publ/lrp_2017.pdf
3. H. En'yo, *Nucl. Phys. News* 25 (2015) 5.
4. Y. Suzuki, R. G. Lovas, K. Yabana, K. Varga: *Structure and reactions of light exotic nuclei*. Taylor and Francis, London (2003)
5. T. Fényes és mts.: *Atommagfizika I. 2. korszerűsített kiadás*, Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen (2009)
6. T. Fényes: *Structure of atomic nuclei*. Akadémiai Kiadó, Budapest (2002)
7. A. Lépine-Szily et al., *Nucl. Phys. News* 23/3 (2013) 5.
8. A. Krasznahorkay et al., *Phys. Lett. B* 720 (2013) 428 és *Phys. Scr.* (2013) 014018.

EXTRA FELKEVEREDÉS ÓRIÁSCSILLAGOKBAN

Szigeti László, Mészáros Szabolcs, Szabó M. Gyula
ELTE Gothard Asztrfizikai Observatórium, Szombathely

Szénizotóparány-változások a csillaglégkörökben

A csillagok életük jelentős részén (az úgynevezett fősorozaton) a magjukban hidrogénből fúzió útján héliumot gyártanak. Ez alapvetően kétféleképpen megy végbe: proton-proton és/vagy CNO-ciklus során. Az előbbinél a protonok közvetlenül egyesülnek, míg az utóbbi esetén a C, N és O katalizátorként működik. A CNO-ciklus évmilliárdok során megváltoztatja bizonyos elemek izotópjainak arányát a csillagok magjában.

Amikor a csillag magjában a hidrogén elfogy és a csillag felfúvódik, a magban lévő anyag valamilyen felkeve-

redési folyamat által a felszínre jut. Ez a felkeveredés megváltoztatja a kezdeti elemek arányát, és ebből a változásból a csillagok belsejében végbemenő (elsősorban



Szigeti László 2014-ben szerezte csillagász diplomáját a Szegei Tudományegyetemen. 2015 végén csatlakozott a szombathelyi Gothard Asztrfizikai Observatórium munkatársaihoz. Jelenleg Mészáros Szabolcs vezetésével az ELTE fizika doktori iskolájában PhD-hallgató. Kutatási területei a nagy felbontású spektroszkópiai felmérések (APOGEE), elemgyakoriság analízis, gömbhalmaz kinematika.

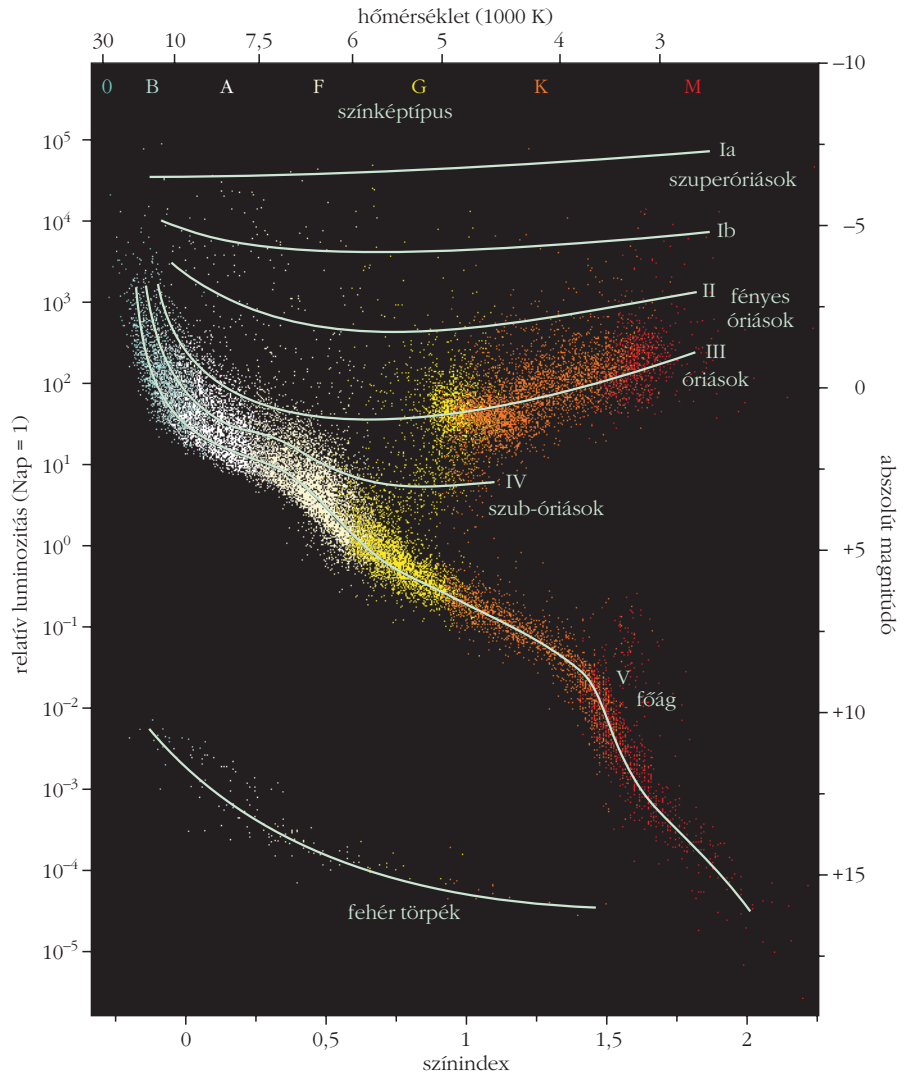
felkeveredési) folyamatokra tudunk következtetni.

A standard modell szerint, amikor egy csillag a Hertzsprung–Russell-diagramon (1. ábra) a fősorozatról a vörösóriáságra vándorol, megtörténik az első felkeveredés (first dredge-up). Ilyenkor a csillag magjában elfogy a hidrogén és a fúzió a magot körülvevő hidrogénhéjba tevődik át. A csillaglégkör opacitása jelentősen megnő (fotonok számára átlátszatlaná válik), ezért a fotonok sugárzási energiaszállítását az ionok konvekciós energiáttranszportja váltja fel. Az ekkor kialakuló konvekciós zóna a csillaganyagban mélyre, egészen abba a régióba hatol, ahol a fúzió már megváltoztatta összetételét. A felkeveredés alatt a teljes konvekciós zóna összetétele (a felszíné is) homogén módon feldúsul a fúzióból származó elemekkel. A standard modell által megjósolt elemarányokat a megfigyelésekkel összehasonlítva azt vesszük észre, hogy a $2,5 M_{\text{Nap}}$ nagyobb tömegű csillagokra a modell nagy pontossággal képes megjósolni a felszíni elemek összetételének változását, ellenben a kisebb ($0,7\text{--}2,5 M_{\text{Nap}}$) tömegű, a fősorozatról elfejlődött csillagok esetében már eltérés mutatkozik a megfigyelések és az elméleti számolások között.

Vizsgálatunk célpontjával a szén 12-es és 13-as izotópjának arányát választottuk. Ez az arány kiváló indikátora a csillag felkeveredési folyamatainak, mert míg a csillag belsejében a fúzió megváltoztatja az elemek arányát, addig a felszínen az elemek azon gázfelhő összetételét reprezentálják (a felkeveredés előtt), amiből a csillag kialakult. A Nap esetében ez a $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány 89. A standard modell alapján, egy Nap típusú csillag esetén az első felkeveredés folyamán a $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány 89-ről körülbelül 29-re csökken.



Mészáros Szabolcs a Magyar Tudományos Akadémia Prémium posztdoktori ösztöndíjasaként dolgozik az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriumában. Kutatási területe a csillagok fizikai paramétereinek és kémiai összetételének meghatározásán keresztül a Tejútrendszer csillaghalmozai kialakulásának és fejlődésének megértése.



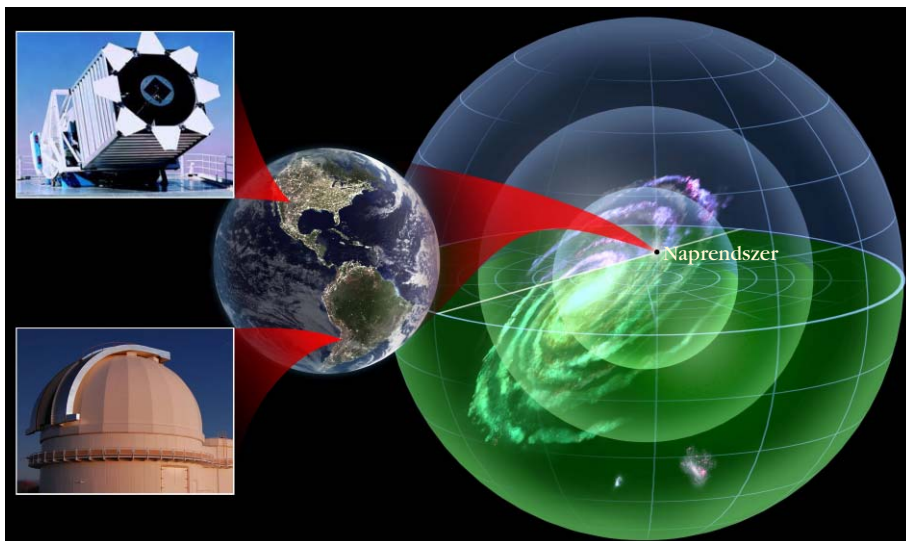
1. ábra. Az általunk vizsgált csillagok a Hertzsprung–Russell-diagramon az óriáságon helyezkednek el (III.). A vörös csomó az óriáság elején található csoportosulás, körülbelül 5000 K hőmérsékletű és nagyjából +1-es abszolút fényességű csillagok alkotják.

A már korábban említett CNO-ciklus során a csillag több 12-es tömegszámú szént alakít át más elemekké, mint 13-as izotópot, ezért utóbbi a magban feldúsul. A felkeveredés ezt az arányaiban több ^{13}C és kevesebb ^{12}C izotópot tartalmazó anyagot hozza a felszínre, ami a csillag légkörében lévő $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány csökkenéséhez vezet.

Ezek után a standard modell több változást nem jósol a csillag felszíni összetételében. Ezzel az állítással szemben – a megfigyelések alapján – azt tapasztaljuk,



Szabó M. Gyula csillagász, az MTA doktora, az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont igazgatója. Kutatási területe a bolygórendszerek fejlődése, az exobolygók és a csillagok kapcsolata, és a Naprendszer kis égitestjei. Kutatja az alkalmazott statisztika korszerű lehetőségeit a nagy adattárak vizsgálatában és a jelkeresésben. Számos égboltnemelési és űrtávcsöves program tudományos csoportjának tagja.



mok, például a Gaia-ESO, a GALAH és az APOGEE galaxisunk kémiai összetételét és ezen keresztül kémiai evolúcióját térképezik fel különböző hullámhosszakon, különböző térbeli felbontásokkal. A jelenlegi programok közül minden bizonnyal az APOGEE [3] a legjelentősebb, amely a Sloan Digitális Égboltfelmérő program részeként (SDSS-III) immár a második fázisánál tart. Célja, hogy nagy felbontású ($R = 225\,000$) spektrumokkal több mint fémmillió vörösóriás-ági csillag a kémiai összetételét térképezze fel az infravörös-tartományban.

2. ábra. Az APOGEE az egész égboltot belátja köszönhetően az új-mexikói és a chilei 2,5 méteres teleszkópoknak [3].

hogy az első felkeveredés után, a csillagok fejlődése során, a szén aránya tovább csökken, míg a nitrogén növekszik. A felszíni összetétel-változás magyarázatához egy extra felkeveredési folyamatra van szükség. A lehetséges elméleti mechanizmusok közül jelenleg a termohalin felkeveredés (thermohaline mixing) [1] a leginkább elfogadott magyarázat a jelenségre. Az elnevezés földtudományi analógiára utal: az óceánok vertikális, azaz le- és felfelé irányuló mozgásait is tartalmazó, mélytengeri áramlások összességét termohalin cirkulációnak nevezzük, mert ezeket az óceánok hőmérséklet- és sűrűségváltozásai irányítják [2].

A termohalin felkeveredés lényege, hogy a csillagok belsejében létrejövő konvektív áramlás nemcsak a hőmérséklettől függ, hanem a kémiai összetételen keresztül az átlagos molekulásúlytól is.

A lokálisan megváltozó átlagos molekulásúly indukálja a termohalin felkeveredést. Ahogy a csillag öregszik és halad a vörösóriáságon, a hidrogént égető héj külső részén egy reakció indul be, amely abban a régióban megváltoztatja az átlagos molekulásúlyt. A ${}^3\text{He}$ égése során a lokális átlagos molekulásúly csökken és a cella hőmérséklete magasabb lesz, mint a környezeté. Az égés során két ${}^3\text{He}$ részecskéből 3 részecske (2 p^+ és egy ${}^4\text{He}$) keletkezik, ami nyomásnövekedéshez vezetne. A környezetével egyensúlyban maradás végett a cella kitágul és emelkedni kezd a csillag légkörében. Amint az emelkedő cella és a környezet között kialakul a hőmérséklet- és molekulásúly-gradiens, a keveredés is beindul. A modell alapján ez a felkeveredés megváltoztatja a Li, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}$ és ${}^{14}\text{N}$ felszíni arányát.

Az égboltfelmérő programok szerepe

Az utóbbi években a nagy égboltfelmérő programok eredményei jelentősen fejlesztették tudásunkat a Tejútrendszer felépítéséről. A jelenleg is folyó nagy felbontású spektroszkópiai égboltfelmérő progra-

Am APOGEE által választott infravörös-tartomány érzékeny a ${}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C}$ arány változására, ezzel – több tízezer csillag esetében – téve lehetővé a felkeveredés mechanizmusának tanulmányozását. Az APOGEE egyedülálló az égboltfelmérő programok között, ugyanis jelenleg már az egész égboltról képes homogén adatsort rögzíteni. Az északi féltekén, az Apache Point Observatóriumban (Új-Mexikó) üzemelő 2,5 m átmérőjű Ritchey Chrétien-távcső mellett 2017-ben üzembe állt a chilei Las Campanason az Irénée du Pont-teleszkóp (2. ábra). A két távcső nagyon hasonló, de az adatsor homogenitását igazából a távcsövek fókuszaiiban működő két ikerspektrográf biztosítja.

A nyers spektrumokat az ASPCAP programcsomag automatizálva redukálja ki, és határozza meg az egyes objektumok fizikai paramétereit. A szoftver folyamatos fejlesztés alatt áll, ebben az ELTE-GAO is aktív szerepet vállal. Jelenleg a programcsomag 23 elem arányát képes meghatározni minden egyes objektumban, egyéb alapvető fizikai paraméterek – például az effektív hőmérséklet, log g, fémesség – mellett. Ezen adatokból a csillagok szerkezetére, kialakulására és fejlődésére tudunk következtetni. A csillagok kémiai evolúciójában fontos szerepet játszó egyik paraméter a csillag $[\text{M}/\text{H}]$ fémessége, amely az összes, héliumnál nehezebb elem aránya a hidrogénhez képest, és ennek értékét a Nap esetében mérhető megfelelő arányhoz viszonyítják:

$$[\text{M}/\text{H}] = \log \left(\frac{N_{\text{M}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{csillag}} - \log \left(\frac{N_{\text{M}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{Nap}},$$

ahol N_{M} és N_{H} a fém-, illetve hidrogénatomok koncentrációja. A fémesség a kor jelzője is egyben, hiszen az öregebb csillagok születésénél még kevesebb nehezebb elem volt a gázfelhőkben, mint később, a fiatalabb csillagok létrejöttkor. A nagy égboltfelmérő programokkal lehetőségünk nyílik olyan csillagok vizsgálatára is, amelyek fémtartalma jelentősen eltér

egymástól, ezáltal könnyebben azonosíthatjuk a lehetséges összefüggést a kémiai összetétel és a felkeveredés folyamata között.

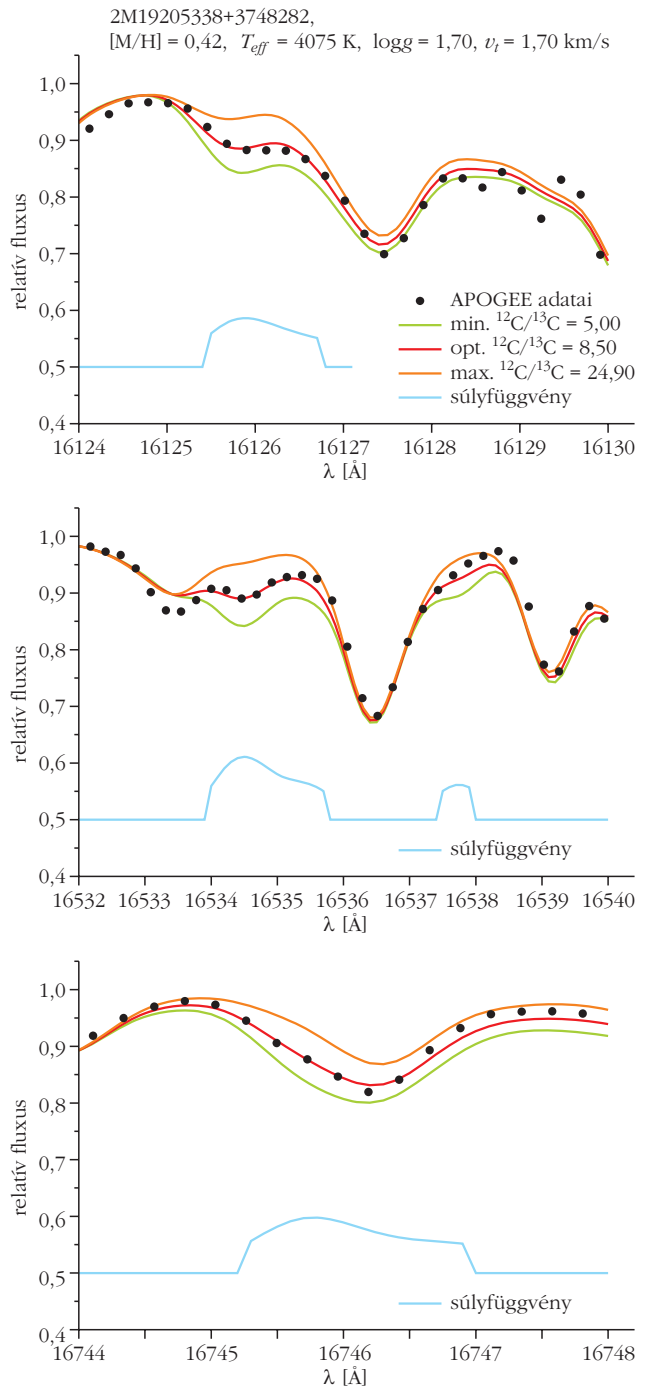
A $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány mérésének módszere

A $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány ismerete elengedhetetlen a felkeveredési mechanizmusok tanulmányozásában, azonban ezt az izotóparányt az ASPCAP jelenleg nem határozza meg. Ehhez azokat a korábban még nem definiált hullámhossztartományokat szükséges azonosítani, ahol a spektrum érzékeny a szénizotóparány változására. Az általunk meghatározott tartományok idén már be is kerültek az ASPCAP-ba. A $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány változására érzékeny hullámhossztartományokat elméleti spektrumok szintetizálásával lehet meghatározni [4]. Első közelítésben felhasználtuk az ASPCAP által származtatott paramétereket, például az effektív hőmérsékletet, a felszíni nehézségi gyorsulást ($\log g$), a metallicitást, $[\text{C}/\text{Fe}]$, $[\text{N}/\text{Fe}]$ és a mikroturbulens sebesség értékét. Második lépésben ezen paramétereket rögzítettük és új színeképeket számolva csak a $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ paramétert változtattuk. Eredményként több száz szintetikus spektrumot kaptunk, ezek – a $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arányt kivéve, amely egy kezdeti értéktől az általunk meghatározott lépésközzel egy maximális értékig tart – teljesen azonosak. A létrejött mesterséges spektrumokat – figyelembe véve az érzékeny régiókat – az APOGEE által rögzített nyers adattal hasonlítottuk össze (3. ábra), majd a χ^2 minimalizáló függvény segítségével kiválasztottuk a legjobban illeszkedőt és az ahhoz tartozó $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arányt.

A tanulmányhoz az NGC 6791 nyílthalmaz 11 csillagát használtuk [5]. Választásunk elsősorban azért esett erre a csillaghalmazra, mert fémekben az egyik leggazdagabb halmaz a Tejútrendszerben ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0,39$), ezáltal az extrém fémgazdag tartományban kiválóan alkalmas a felkeveredés folyamatának vizsgálatára. A jelenlegi megfigyelések az izotóparány észlelési nehézségei miatt főleg a fémekben szegényebb, illetve a Naphoz hasonló fémszerű csillagokkal foglalkoztak. A modellek igazolása, pontosítása magas fémtartalom esetén így különösen problémás. A másik szempont, hogy a halmaz a Kepler-mezőben található, gyakran észlelt (például a Kepler-űrtávcső által), és a csillagok paramétereit (például tömeg) is pontosan ismerjük. A halmaztagok kiválasztásánál szintén fontos szempont volt, hogy az észlelt spektrumok magas jel/zaj arányúak legyenek, így küszöbölendő ki a random megfigyelési hibákat. A csillagok felszíni hőmérséklete 3500 K-től 4500 K-ig terjed, ugyanis a szénizotóparány észlelési küszöbe magasabb hőmérsékleteken erősen romlik.

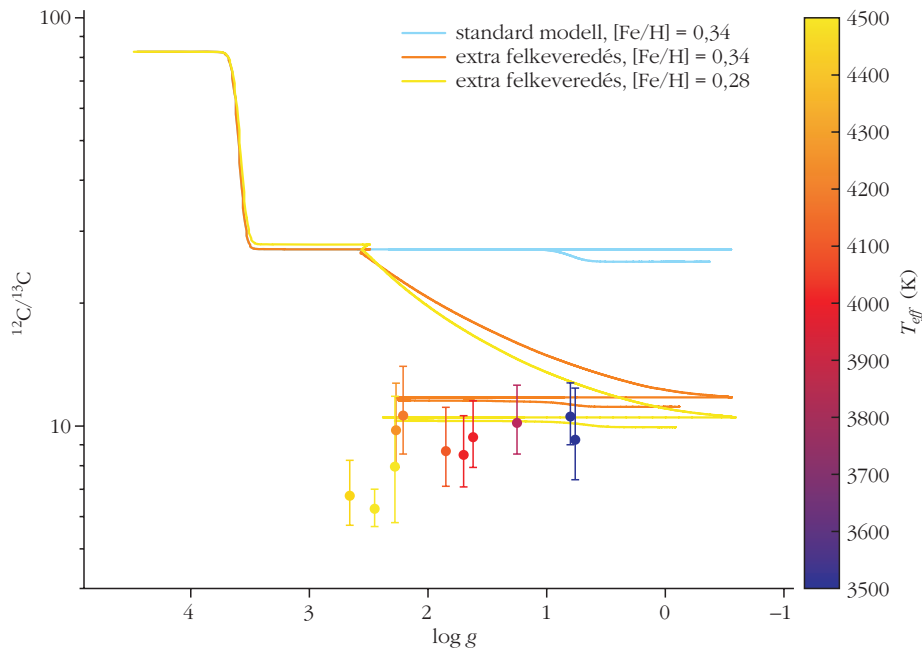
Eredményeink

Az első felkeveredés alapján az ilyen paraméterekkel jellemezhető csillagok esetében a várható $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány 26 és 30 körül lett volna, ezzel szemben az álta-



3. ábra. Az ábra a meghatározott hullámhossztartományokat, súlyokat, valamint a különböző izotóparányok spektrumokbeli megjelenését mutatja.

lunk megfigyelt arányok 6 és 11 között változtak. A meghatározott $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arányok konzisztensek a termohalin felkeveredési modell jóslataival, ellentmondva a standard modellnek [6]. Az izotóparány az észlelt tartományon belül nem korrelál a hőmérséklettel, bár a legforróbb 3 csillagra az értékek alacsonyabbak, de úgy gondoljuk, hogy ezen esetekben a csillagok egy későbbi evolúciós állapotban vannak (vörös kupac; red clump). Eredményeinket összevetettük a legújabb, immár magas fémséggel számolt és a termohalin felkeveredést is figyelembe vevő csillagfejlődé-



4. ábra. A különböző elméleti modellek összehasonlítása az általunk kapott eredményekkel.

si modellel. A 4. ábrán láthatjuk az összevetés eredményét. A három színes vonal a különböző modellek számítások alapján mutatja a csillagok felszíni szénizotóp arányát a felszíni gravitáció függvényében a csillag fejlődése során. A kék vonal a standard modell, amely nem veszi figyelembe az extra felkeveredést. Látható, hogy $\log g \sim 3,5$ után (első felkeveredés) az arány nem változik számottevően. A másik két modell már számításba veszi az extra felkeveredést is. A világosabb sárga vonal az alacsonyabb ($[Fe/H] = 0,28$), míg a narancssárga a magasabb ($[Fe/H] = 0,34$) fémességgel számolt értékeket mutatja. Látható, hogy itt az első felkeveredés után $\log g \sim 2,5$ körül megtörténik az extra felkeveredés. Mért értékeink hibahatár-

5. ábra. Az összehasonlításhoz használt M 67 nyílthalmaz részlete az SDSS felvételén.



ron belül jól egyeznek a modellel. A vörös kupac három legforróbb csillaga itt is láthatóan elkülönül a többi célponttól.

Eredményeinket összehasonlítottuk az M67 nyílthalmaz csillagaival (5. ábra). Választásunk azért esett az M67-re, mert a két halmaz csillagainak asztroszeizmikus és izokron illesztéssel meghatározott tömege megegyezik, viszont az M67 átlagos fémessége jelentősen alacsonyabb, a Napunkéhoz hasonló. Ez utóbbi halmazban a néhány csillagra meghatározott evolúciós állapot és $^{12}C/^{13}C$ arány alapján azt figyelhetjük meg, hogy a vörös kupac csillagainak izotóparánya 11 és 13 közötti, míg az általunk vizsgált

NGC 6791 csillagainál ez az arány alacsonyabb (8 körüli). Az összehasonlítás nem egyszerű, mert az NGC 6791-ben viszonylag kevés csillag fejlődési állapotát ismerjük, de az elméleti modellek alapján magasabb fémtartalom esetén a termohalin keveredés is kissé erősebben működik, ami összhangban van eredményeinkkel. Meg kell jegyezni, hogy a $^{12}C/^{13}C$ arány meghatározása nem konzisztens módon, nem azonos hullámhossztartományok alapján történt a két halmazban.

A jelenlegi adatok alapján nehéz jól alátámasztott összefüggéseket találni a szénizotóparány és egyéb paraméterek (evolúciós állapot, tömeg és fémtartalom) között. Ezen összefüggések meghatározása jövőbeli feladat, amelynek során sokkal több csillag esetében fogjuk konzisztens módszerrel meghatározni a $^{12}C/^{13}C$ arányt. Ehhez az APOGEE új pipeline-ja lesz segítségünkre, amelybe munkánk alapján már az izotóparány kiszámolása is be lesz építve.

Irodalom

- Charbonnel, C., Lagarde, N.: Thermohaline instability and rotation-induced mixing. I. Low- and intermediate-mass solar metallicity stars up to the end of the AGB. *Astronomy and Astrophysics* 522 (2010) id. A10.
- Bartholy Judit és Pongrácz Rita (szerk.): *Klímaváltozás*. ELTE (2013) http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/Kli_mavaltzas/index.html
- Mészáros, S.: Az APOGEE égboltfelmérés. *Meteor Csillagászati Évkönyv*, MCSE, Budapest (2018) 222–234.
- Mészáros, S., Martell, S. L., Shetrone, M., et al.: Exploring Anticorrelations and Light Element Variations in Northern Globular Clusters Observed by the APOGEE Survey. *The Astronomical Journal* 149 (2015) id. 153.
- Cunha, K., Smith, V. V., Johnson, J. A., et al.: Sodium and Oxygen Abundances in the Open Cluster NGC 6791 from APOGEE H-band Spectroscopy. *The Astrophysical Journal Letters* 798 (2015) id. L41.
- Szigeti, L., Mészáros, S., Smith, V. V., et al.: $^{12}C/^{13}C$ isotopic ratios in red-giant stars of the open cluster NGC 6791. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 474 (2018) 4810.