

# EXTRA FELKEVEREDÉS ÓRIÁSCSILLAGOKBAN

Szigeti László, Mészáros Szabolcs, Szabó M. Gyula  
ELTE Gothard Asztrofizikai 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 Szegedi Tudományegyetemen. 2015 végén csatlakozott a szombathelyi Gothard Asztrofizikai Observatórium munkatársaihoz. Jelenleg Mészáros Szabolcs vezetése alatt az ELTE fizika doktori iskolájában PhD-hallgató. Kutatási területei a nagy felbontású spektroszkópiai felmérések (APOGEE), elemgyakoriság analízis, gömbhalmaz kinematika.

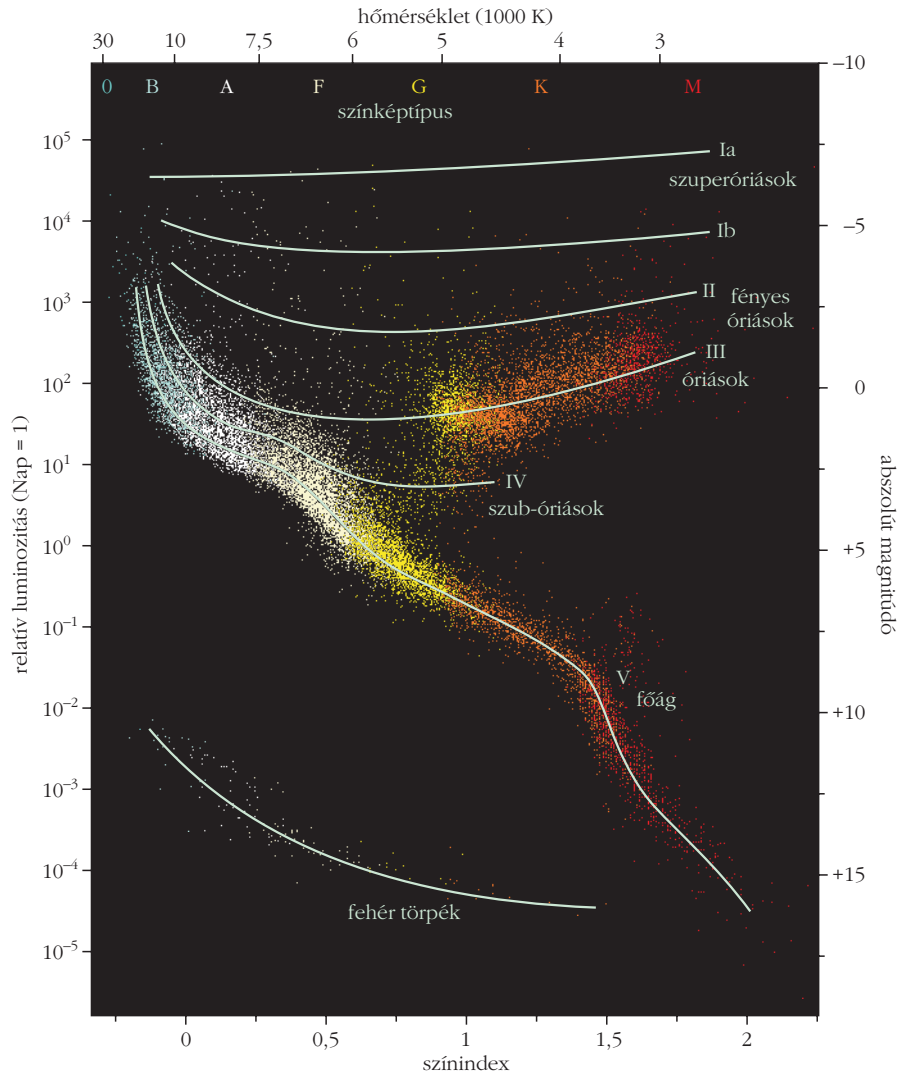
felkeveredési) folyamatokra tudunk következtetni.

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 elfejődött 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.



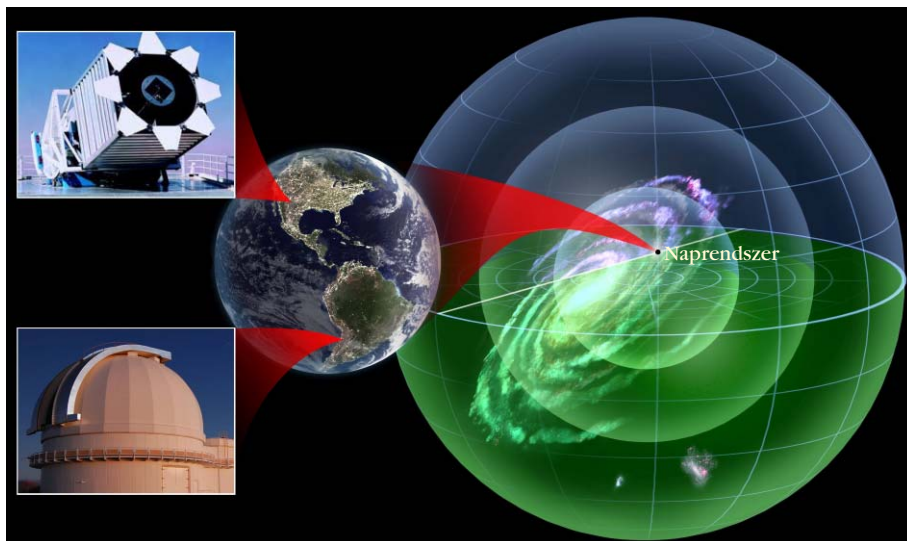
1. ábra. Az általunk vizsgált csillagok a Hertzsprung–Russell-diagramon az óriáságon helyezkednek el (III.). A vörös csomó az óriáság elején található csoportosulás, körülbelül 5000 K hőmérsékletű és nagyjából +1-es abszolút fényességű csillagok alkotják.

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  $^{13}\text{C}$  és kevesebb  $^{12}\text{C}$  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 ( $2\text{ p}^+$  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  $N_{\text{M}}$  és  $N_{\text{H}}$  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 felkeveredési folyamatok között.

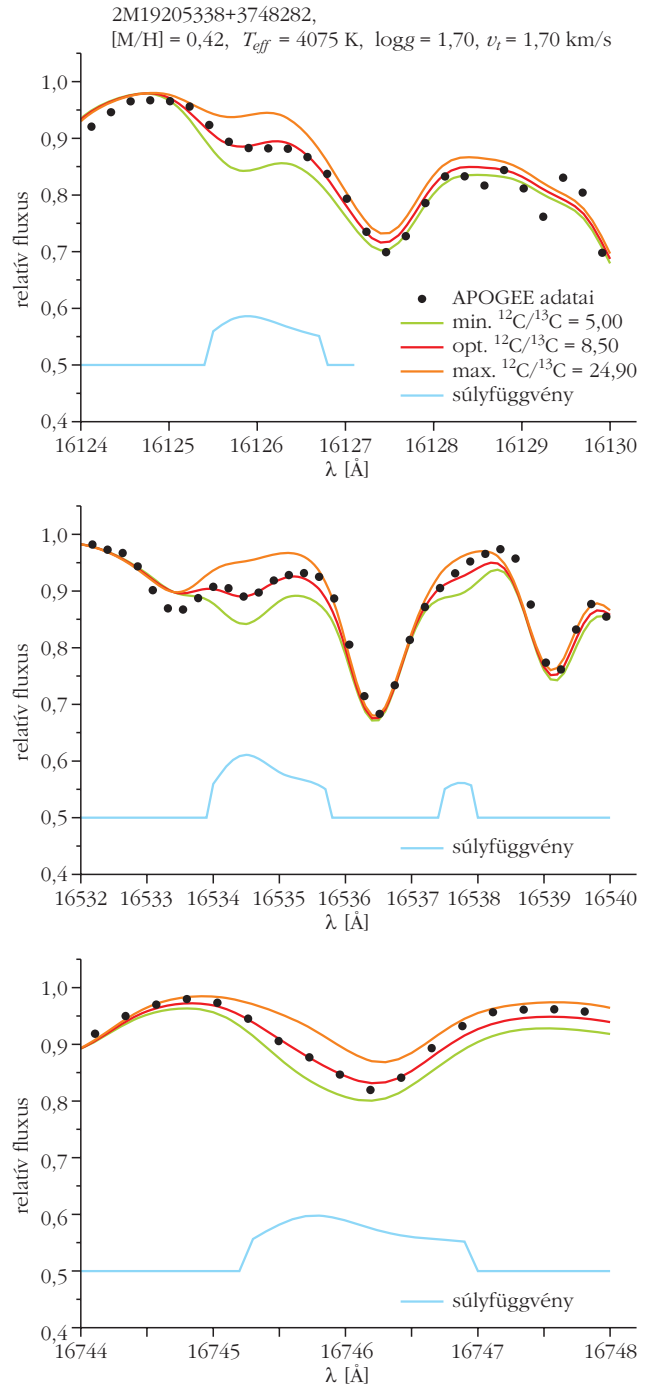
## A $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arány mérésének módszere

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  $\chi^2$  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.

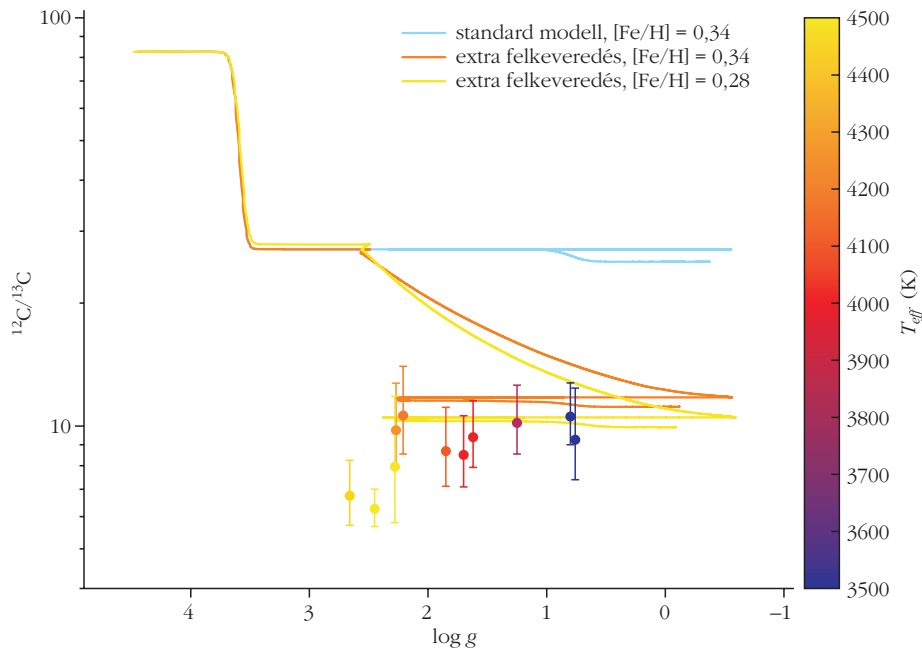
## Eredményeink

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 modellszámítások 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 ( $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,28$ ), míg a narancssárga a magasabb ( $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,34$ ) 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  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  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  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  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  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  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/Klimavaltozas/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.:  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  isotopic ratios in red-giant stars of the open cluster NGC 6791. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 474 (2018) 4810.