

**Csillagok kémiai analízise:
út a gömbhalmazok többszörös
csillagpopulációinak megértéséhez**

Mészáros Szabolcs

az MTA doktora cím megszerzéséért készített értekezés tézisei

Szombathely, 2023

1. A kutatások előzménye

A csillagászati spektroszkópia az elmúlt néhány évtizedben hihetetlen fejlődésen ment keresztül. Az 1990-es és a 2000-es évek elején a csillagszínképek kialakulásának és a csillaglégkörök szerkezetének elméleti modellezésében bekövetkező fejlesztések lehetővé tették a színképekben megfigyelhető abszorpciós vonalak alakjának pontosabb leírását és megértését. A 2010-es években induló nagy felbontású spektroszkópai égboltfelmérő programok már több százezer csillagról készítettek nagy jel/zaj arányú, nagyon jó minőségű spektrumokat. Ennek a két fejleménynek következményeként a csillagok színképéből kinyerhető fizikai információk, az effektív hőmérséklet, a felszíni nehézségi gyorsulás, a fémtartalom és a kémiai elemek koncentrációjának meghatározása a korábbiaknál sokkal pontosabbá vált.

A 2010-es évek egyik legfontosabb spektroszkópai égboltfelmérő programja a Sloan Digital Sky Survey (SDSS) harmadik fázisában (Eisenstein et al., 2011) induló APOGEE (Majewski et al., 2017) volt, amely 2020-ig végezte méréseit. Az APOGEE fő célkitűzése a Tejútrendszer alkotó csillagok kémiai összetételének meghatározása, ezzel pedig Galaxisunk kinematikai, dinamikai és kémiai fejlődésének alaposabb megismerése. Ezt a csillagok megfigyelt színképének elméleti modellekkel történő illesztéséből kapott fizikai paraméterek segítségével lehetett elérni. Az APOGEE 2013-as adatpublikálása volt az első, nagy felbontású spektroszkópai égboltfelmérő program által közzétett és szabadon elérhető adatbázis, amely közel 30 000 csillag fizikai paramétereit és kémiai összetételét tartalmazta.

2010 őszén kezdtem el dolgozni az Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) intézetben az SDSS–III adatain, és teljes jogú tagként a mai napig részt veszek az SDSS-együttműködésben, hozzáférve így az SDSS nem nyilvános adataihoz. Első feladatomban az volt, hogy a megfigyelt színképek illesztéséhez használt elméleti modellatmoszféra-rácsot (APOGEE–ATLAS-adatbázis) megalkossam, amely még jelenleg is az egyik legnagyobb ilyen elérhető adatbázis. Az APOGEE munkatársaként másik feladatomban az volt, hogy a publikussá tett atmoszferikus paraméterek (effektív hőmérséklet, felszíni nehézségi gyorsulás és metallicitás) értékeit az APOGEE-től független adatforrások alapján kalibráljam. Ez kitűnő lehetőséget teremtett ahhoz, hogy elsajátíthassam a csillagok kémiai összetételének meghatározási módszereit, amelyeket később a gömbhalmazok fejlődésének tanulmányozásakor hasznosítottam.

A gömbhalmazok csillagok gömb alakú, gravitációsan kötött csoportjai, amelyeknek több tízezer, de akár több tízmillió csillag is tagja lehet. A Tejútrendszerben kb. 150 gömbhalmaz található, elsősorban a halóban, de a központi dudor körül is ismerünk

néhányat. A legtöbb ilyen halmaz alig néhány tíz parszek átmérőjű, és mindegyik idős, több milliárd éves objektum, ezért fémtartalmuk alacsony. Ma már tudjuk, hogy minden gömbhalmazban legalább két csillagpopulációt figyelhetünk meg. A korábban keletkezett első populáció (FG) csillagaiban több C, O, Mg és kevesebb N, Na, Al található, míg a később keletkezett második generációs (SG) csillagok szegények C-ben, O-ban, Mg-ben, de gazdagak N-ben, Na-ban és Al-ban. Ez arra utal, hogy valamilyen folyamat feldúsította az utóbbi elemekkel azt a csillagközi felhőt, amelyből a második generáció tagjai keletkeztek, de ennek pontos folyamatát még ma sem ismerjük. 2014-től már az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium munkatársaként végeztem el a gömbhalmazok kémiai összetételének legkiterjedtebb felmérését.

2. Célkitűzések

Az APOGEE kezdeti tervei között 100000 csillag észlelése és fizikai paramétereinek meghatározása szerepelt (Majewski et al., 2017). Ezt elméleti spektrumok megfigyelésekre történő illesztésével kívánta elérni, ehhez pedig kellett egy új modellatmoszféra-adatbázis, amelyből az elméleti spektrumokat ki lehetett számolni. Választásom a szabadon használható ATLAS9-re (Kurucz, 1979) esett.

Az új ATLAS9-rács elkészítése mögötti motivációm kettős volt, egyrészt a korábbiaknál sokkal nagyobb elemgyakoriság-tartományt kellett lefedni a potenciálisan pekuliáris kémiai összetételű csillagok felfedezése miatt, másrészt pedig a modellekhez egy újabb, a Nap kémiai összetételét tartalmazó referenciatáblázatot kellett használni. Az új ATLAS9-rácsra épített új elméleti színeképek létrehozásával az volt a célom, hogy a James Webb-űrtávcső (JWST) műszereinek fluxuskalibrációjához szükséges spektrumadatbázist elkészítsem, amit az STScI munkatársaival együttműködve hajtottam végre. Az APOGEE DR10 adatkibocsátásában szereplő adatok kalibrálásával pedig a csillagász közösségnek kívántam bemutatni az APOGEE első adatainak pontosságát és használhatóságát.

A gömbhalmazok keletkezését és fejlődését magyarázó jelenlegi elméletek mindegyike többszörös csillagpopulációk jelenlétét tételezi fel. Az első populáció legnagyobb tömegű csillagai életük végén valamilyen fizikai folyamat során a magjukban hidrogénfúzió eredményeként megváltozott kémiai összetételű anyagot szétszórják a csillagközi térbe, ahol az az eredeti összetételű felhővel keveredik. A gömbhalmazok kutatásában a mai napig az egyik legfontosabb kérdés, hogy mi az a mechanizmus, amellyel az idősebb csillagok beszennyezik a kezdeti intersztelláris felhőt.

Jelenleg négy fontosabb elmélettel magyarázzák a kémiai inhomogenitásokat: közepes, 4 – 8 M_{\odot} tömegű AGB-csillagok csillagszelével (Ventura et al., 2001), növő robbanásával (Maccarone & Zurek, 2012), gyorsan forgó fősorozati csillagok tömegvesztésével

(Decressin et al., 2007), és sok nagy tömegű kettőscsillag jelenlétével (de Mink et al., 2009). Ezek a modellek különböző időtartamokkal és kezdeti tömegfüggvénnyel dolgoznak, de egyik sem tudja teljesen megmagyarázni a gömbhalmazokban észlelt elemgyakoriságok korrelációit és antikorrelációit.

A DR10 adatainak kalibrációja után gömbhalmazok kémiai összetételének vizsgálatával kezdtem el foglalkozni 2014-ben. Ez egy több éves projekthez vezetett, amelynek a végén sikerült az összes nagy és fényes gömbhalmaz többszörös csillagpopulációit feltérképezni. A célom kettős volt: egyrészt Carretta et al. (2009a,b,c) nyomán szerettem volna az északi és déli gömbhalmazok első részletes és szisztematikus felmérését elvégezni, másrészt pedig az így kapott elemgyakoriságokkal a szennyezést leíró modellek jóslatainak ellenőrzéséhez homogén és konzisztens módon kapott elemgyakoriságot szolgáltatni.

Mivel a [C/M] és az [N/M] elemgyakoriságokat nagyon nehéz az optikai tartományból meghatározni, ezért egyik fő célkitűzésem az volt, hogy ezeket az elemgyakoriságokat homogén módon, nagy számú csillagot használva tudjam vizsgálni a gömbhalmazokban. A legfontosabb megoldandó feladat a szennyezési modellek jóslatainak ellenőrzése volt. Az ω Cen egy különleges gömbhalmaz, amelynek fejlődését még ma sem értjük, és elképzelhető, hogy egy törpegalaxissal történt ütközés miatt alakult ki furcsa kémiai összetétele. Az ω Cen vizsgálatával célom annak kialakulásának és fejlődésének tanulmányozása volt.

3. Vizsgálati módszerek

Az APOGEE–ATLAS-adatbázis számításaihoz két külön programot írtam, az első az ODF-táblázatokat, és Rosseland-opacitásokat számoló programcsomag automatizálására szolgált, míg a második az ATLAS9-et automatizálta. Az ODF-, és Rosseland-opacitások számolásánál pontosan követtem a Fiorella Castelli által összeállított, és a honlapján (<https://wwwuser.oats.inaf.it/castelli/>) közzölt utasításokat. Ezekhez a DFSYNTHE, ODF és KAPPA9 nevű kódokat használtam. Az ATLAS9-nek Sbordone (2004, 2005) készítette el a linuxos verzióját, amelyet az Intel Fortran 11-es verziójú fordítójával telepítettem.

A JWST fluxuskalibrációjához használt spektrumrács (a spektrumrács egyenletesen mindatévelezett paraméterekkel létrehozott színeképek gyűjteménye) kiszámolásához az APOGEE-ATLAS-adatbázist használtam fel, amely az Asplund et al. (2005) által publikált Nap-referenciaértékeket használta. A spektrumszintézishez a SYNTHÉ linuxos verzióját (Sbordone, 2004) használtam. A SYNTHÉ esetében is pontosan követtem a Fiorella Castelli által a honlapján összeállított utasításokat, és létrehoztam egy kódot, amely

tetszőleges atmoszferikus paraméterekre automatikusan ki tudott számolni egy elméleti spektrumot a korábban létrehozott modellatmoszféra-fájl beolvasása után.

A gömbhalmazok csillagainak kémiai analízéséhez nagy számú elméleti színekpet kellett kiszámolni, amihez kifejlesztettem egy *autosynth* nevű algoritmust. Az *autosynth* először beolvas egy modellatmoszféra-fájlt, majd pedig elméleti színekp számolása után automatikusan képes az elemgyakoriságok illesztésére. A spektrumszintézishez a MOOG2013 (Snedden, 1973) nevű programot használtam, az *autosynth* pedig összehasonlította az elméleti spektrumokat a megfigyelttel, és χ^2 -illesztéssel meghatározta az adott abszorpciós vonalat legjobban leíró elemgyakoriságot egy előre megadott hullámhosszablakban. A spektrumszintézishez az APOGEE DR12-höz (Holtzman et al., 2015) kifejlesztett vonallistát (Shetrone et al., 2015) használtam. Ez a vonallista atomok és molekulák (CO, OH, CN, C₂, H₂, H₂O és SiH) atomfizikai paramétereit tartalmazta, amelyeket a H sávban található vonalokhoz optimalizáltak.

A H sávban több molekula abszorpciós sávja jelentősen befolyásolja a színekpben megjelenő atomi abszorpciós vonalak erősségét, ezért fontos volt, hogy a C, N és O elemek sávjait a többi elem előtt illesszem. A gömbhalmazokban a C és az α -elemek koncentrációja olyan nagy tartományon belül változik, hogy az már jelentősen megváltoztatja az atmoszféra szerkezetét a Nap csak fémtartalommal skálázott szerkezetéhez képest, ezért kidolgoztam egy eljárást, amely figyelembe vette ezt az elemek abszorpciós vonalainak illesztése során.

Az ASPCAP effektív hőmérsékleteinek alacsony metallicitásnál jelentkező kisebb problémái (Jönsson et al., 2018) miatt a 2MASS-színindexekből számoltam ki effektív hőmérsékleteket a González Hernández & Bonifacio (2009) egyenletei segítségével. A felszíni nehézségi gyorsulást a Padova-izokronok (Bertelli et al., 2008, 2009) segítségével a csillagok fejlődési állapotát figyelembe véve számoltam ki. A nehézségi gyorsulás értékeit az izokronokon interpolálva a fotometrius hőmérsékletek helyénél határoztam meg. 2018-ban az elemgyakoriságok meghatározása során a MOOG2013 használatáról áttértünk a BACCHUS (Masseron et al., 2016) nevű kódra, de a korábban kidolgozott lépéseket követtük.

4. Új tudományos eredmények

A tézispontok összesen 12 referált publikáció eredményeit foglalják össze. A 12 publikációból 8 az SDSS–III és –IV nem nyilvános adatainak felhasználásával készült.

1. Elméleti spektroszkópia

- Az APOGEE–ATLAS-adatbázis létrehozásával olyan modellatmoszféra-rácsot készítettem, amelyre alapozva több százezer csillag fizikai és kémiai paraméterei váltak meghatározhatóvá. A végső ATLAS9-adatbázis a korábbiaknál több nagyságrenddel nagyobb lett: 2099 elemgyakorisághoz összesen 853 943, a konvergenciakritériumnak eleget tevő modellatmoszféra található benne. Az APOGEE–ATLAS-adatbázisban az $[M/H]$ a -5 és $1,5$, a $[C/M]$ a $-1,5$ és 1 , az $[\alpha/M]$ pedig a $-1,5$ és 1 dex közötti tartományt fedi le $0,25$ vagy $0,5$ dex lépésközzel, fémtartalomtól függően. A modellek T_{eff} -értékei 3500 K és $30\,000$ K között, a $\log g$ -értékei a hőmérséklettől függően 0 és 5 dex között változnak. Az első nyilvános SDSS-adatok, amelyekben az APOGEE már ezeket az új modellatmoszférákat használta, a 12-es adatközlésben jelentek meg (Alam et al., 2015). Az SDSS szintén az APOGEE–ATLAS-modellekre építette a teljes 13-as (Albareti et al., 2017) és 14-es APOGEE-adatközlését (Abolfathi et al., 2018), a 16-os (Ahumada et al., 2020) és 17-es végső adatpublikálásnál (Abdurro'uf et al., 2022) pedig a 8000 K-nél magasabb hőmérsékletű csillagok esetében alkalmazták.
- A BOSZ-spektrumrács létrehozása lehetővé tette, hogy a JWST műszereinek fluxuskalibrációjához szükséges legújabb elméleti színeképek rendelkezésre álljanak. Ehhez az APOGEE–ATLAS-modellekre építve a korábban publikusan elérhető színeképrácsoknál sokkal nagyobb adatbázist hoztam létre, amihez a SYNTHE nevű programot használtam. A BOSZ-rács 312 különböző elemgyakoriságot és összesen 129 480 színeképet tartalmaz $-2,5$ és $0,75$ dex metallicitás között, amelyek 10 felbontásban érhetők el az STScI MAST honlapjáról. A BOSZ-rács szolgált a JWST-műszerek fluxuskalibrációjának alapjául, amelynek részleteiről Gordon et al. (2022) publikációjában lehet olvasni. A BOSZ színeképeit (és az APOGEE–ATLAS-adatbázist) több nagy égboltfelmérő program is felhasználta, köztük a sötét energiát kutató DESI nevű program (Dey et al., 2019) és a Gaia asztrometriai felmérés is a DR2 (Evans et al., 2018) fotometriai adatainak kalibrálásra.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [1], [7]

2. Az APOGEE atmoszferikus paramétereinek kalibrálása

- Az ASPCAP fejlesztése során az egyik legfontosabb kérdés az volt, hogy milyen interpolációs algoritmust használjunk az észlelt színeképek elméleti spektrumokkal történő illesztése során. A kérdés megválaszolása érdekében 400, véletlenszerű T_{eff} , $[\text{Fe}/\text{H}]$ és $\log g$ paraméterekkel generált modellatmoszférát számoltam ki, és az ezekből szintetizált színeképeket öt különböző algoritmussal (modellatmoszféra, lineáris, harmadfokú spline, harmad-, és negyedfokú Bezier-függvény) interpolált változatukkal hasonlítottam össze. A tesztspektrumok az F5 és G5 közötti színeképtartományt fedték le. Eredményeim azt mutatták, hogy a modellatmoszféra interpolálása adja a legnagyobb hibákat az IR-tartományban. A fluxusok interpolálása pontosabb eredményeket, a lineáris interpoláció nagyjából kétszer kisebb hibákat ad, mint az MA, de a magasabb rendű algoritmusok további nagyjából kétszeres javulást hoznak. A legpontosabb interpolációs eljárásnak a harmad- és negyedfokú Bezier-függvény adódott. Eredményeim hatására az APOGEE első adatkibocsátásában a harmad- és negyedfokú Bezier-függvényeket használták az elméleti spektrumrács interpolálására.
- A DR16-hoz használt MARCS-modellek 20%-át sajnos elégtelen konvergencia miatt nem lehetett kiszámolni. Ezek a modelleket tehát nem használhattuk, és a DR14-ben az így keletkezett lyukak paramétereire köré eső csillagok színeképeinek illesztése hibás volt a HRD tetején. A DR16-ban az egyik legfontosabb fejlesztés az volt, hogy ezeket a hiányzó színeképeket egy új interpolációs módszer felhasználásával kiszámítottam. Ehhez RBF-interpolációt használtam, és Faul et al. (2005) algoritmusát optimalizáltam az APOGEE-adatokhoz. A végső interpoláció pontossága a kontinuum-normált spektrumokban minden esetben 2%-nál jobb volt, de a hiba tipikus értéke csak 0,1% körül alakult. Az új interpolált spektrumok felhasználásával a DR16-ban meghatározott atmoszferikus paraméterek a HRD tetején ($T_{\text{eff}} < 3500$ K) már sokkal pontosabbak lettek, és nem mutattak a DR14-hez hasonló, csak a konvergált modellek paramétereire körüli csoportosulást.
- Az ASPCAP fejlesztése során kidolgoztam az első adatpublikálásában megjelenő atmoszferikus paraméterek és elemgyakoriságok kalibrációját. Ezt az ASPCAP-tól függetlenül meghatározott, és más asztrofizikai megfontolásokból származó paraméterek felhasználásával végeztem el. A kalibrációhoz használt mintához 20 nyílt- és gömbhalmazból 559 csillagot gyűjtöttem ki, amit a Kepler-mezőben észlelt változócsillagokkal egészítettem ki. Az ASPCAP eredeti effektív hőmérsékletei jól, 8 ± 161 K-en belül egyeznek az optikai tartományban meghatározott T_{eff} -értékekkel. A fotometrikus hőmérsékletek esetében már jelentősebb szisztematikus különbséget találtam, amelyet egy kalibrációs egyenlet segítségével átkonvertáltam a González Hernández & Bonifacio (2009) által meghatározott fotometriai értékekre, amelyek

nagyon közel esnek az abszolút hőmérsékletskálához. Az ASPCAP [M/H]-értékei nagyon jól egyeztek az irodalmi fémtartalmakkal a $-0,5 < [M/H] < 0,1$ dex tartományban. Az ennél fémszegényebb és fémgazdagabb csillagok esetén 0,2–0,3 dex eltérést figyeltem meg, amelyet egy empirikus korrekcióval összhangba tudtam hozni az optikai metallicitásokkal. A nehézségi gyorsulás esetében 0,2–0,3 dex eltérést találtam az izokron és az asztroszeizmológiai log g -hez képest is a $-0,5 < [M/H] < 0,1$ dex tartományban. Ezenkívül az eltérés nagyobb volt, és elérte akár az 1 dexet is. Fémszegény csillagok esetében az izokronokból meghatározott értékekkel, míg fémgazdag csillagoknál az asztroszeizmológiai értékeket tartalmazó minta alapján végeztem el az ASPCAP log g -értékeinek kalibrációját.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [2], [3], [4], [11]

3. Többszörös csillagpopulációk az északi gömbhalmazokban

Az északi gömbhalmazok egységes kémiai analízisének kivitelezésével elsőként sikerült a halmazok többszörös populációinak tulajdonságait homogén és konzisztens módon feltárnom. Összesen 10 gömbhalmazban 9 elem (Fe, C, N, O, Mg, Al, Si, Ca és Ti) gyakoriságát vizsgáltam 428 csillag légkörében az APOGEE DR10 nem nyilvános színképeit felhasználva. Az elemgyakoriságok felhasználásával a következő eredményekre jutottam:

- Mind a 10 gömbhalmazban sikerült kimutatnom az O és az Mg halmazon belüli, hibahatárnál jelentősen nagyobb szórását, ami a Ne–Na- és Mg–Al-ciklusok során keletkezett elemek SG-csillagok légkörében történő feldúsulásával magyarázható.
- A populációtagságot az M107-ben és az M71-ben az [N/Fe], a többi halmazban az [Al/Fe] felhasználásával egy dekonvolúciós algoritmus segítségével állapítottam meg. A csillagok az összes halmazban két populációra oszthatók: az FG-csillagokra alacsony Al- és N-elemgyakoriság, az SG-csillagokra pedig magas Al- és N-elemgyakoriság jellemző. A gömbhalmazok két csoportra oszthatók: (1) azok amelyekben az Al-eloszlás inkább két érték körül csoportosul (bimodális eloszlás), és a két érték között csak kevés csillag található (M92, M53, NGC 5466, M2 és M3), (2) az Al eloszlása inkább folyamatos (M15, M13 és M5).
- Az Al-Mg antikorrrelációt egyértelműen sikerült kimutatnom az M15-ben, M92-ben, M13-ban, M3-ban, M53-ban és az M5-ben, bár utóbbi kettőben az Mg változása nem annyira kiterjedt, mint a többi gömbhalmazban. A H sávban megjelenő három erős Al-vonal felhasználásával, és az irodalomban publikálnál több csillag észlelésével tág T_{eff} és [Fe/H]-tartományban is pontosan lehetett az [Al/Fe] elemgyakoriságot illeszteni, ami hozzájárult az Al-Mg antikorrreláció korábbiaknál részletesebb megfigyeléséhez.

- Az $[Al/Fe]$ szórása egyértelműen növekszik a gömbhalmazok fémtartalmának csökkenésével. Ez a megfigyelés megerősíteni látszik az AGB-szennyezési modell jóslatait. Eszerint közepes tömegű ($4 - 8 M_{\odot}$) AGB-csillagok nagyobb szerepet játszottak az alacsony fémtartalmú gömbhalmazok SG-csillagainak szennyezésében, mint a nagyobb fémtartalmú társaik.
- Az M15-ben egyértelműen kimutattam az Al és az Si közötti korrelációt. Ez a megfigyelés arra enged következtetni, hogy a nagyon alacsony fémtartalmú AGB-csillagokban a Mg–Al-ciklus olyan magas hőmérsékleten zajlott le, hogy Al helyett nagy mennyiségű Si keletkezett, amely az SG-csillagok légkörében megfigyelhető. Az M92-ben is megfigyeltem az M15-nél gyengébb Al-Si korrelációt.
- Az H sávban található OH, CO, és CN molekulák vonalainak illesztésével először sikerült az N-C antikorrelációt homogén és konzisztens módon vizsgálni. A nagy N-szórást mind a 10 gömbhalmazban sikerült kimutatni, bár a legalacsonyabb fémtartalmúakban csak felső határok használatával. Az AGB-szennyezési elmélet által jóslott korrelációt az $A(C+N+O)$ és $[Al/H]$ között nem sikerült megfigyelni, bár a CNO-elemgyakoriságok jövőbeli pontosabb mérése segíthet az elmélet jóslatainak ellenőrzésében.

A tézisponthoz tartozó publikáció: [5]

4. A gömbhalmazok HRD-jének és a kémiai összetételének kapcsolata

Az APOGEE- és más irodalmi elemgyakoriságok, valamint Peter Stetson földi U, B, V, R, I magnitúdóinak (Stetson et al., 2014) és a HST Treasury Project (Piotto et al., 2015; Soto et al., 2017) korai adatainak felhasználásával tanulmányoztam az Al-Mg antikorreláció és a CMD közötti kapcsolatot.

- Kollégámmal, Anibal García-Hernándezzel összesen 14 SG–AGB-csillagot fedeztünk fel négy gömbhalmazban. Ezzel sikerült tisztáznunk az Na-gazdag SG–AGB-csillagok hiányának problémáját, amelyet sikertelen azonosításuk vetett fel az NGC 6752 részletes vizsgálata során (Campbell et al., 2013). Ezt a megfigyelést rendkívül nehéz volt elméleti modellekkel megmagyarázni, mert a horizontális ágon beinduló extrém erősségű csillagszél nélkül a csillagfejlődési modellek az jóslták, hogy az SG-csillagok is elfejlődnek az AGB-re. Az M92-ben öt SG–AGB-csillagot fedeztem fel, ezzel bebizonyítva, hogy az SG–AGB-csillagok jelenléte független a fémtartalomtól, és nagy valószínűséggel minden gömbhalmazban léteznek ezek a csillagok.

- A $V-C_{U, B, I}$ diagramon egyértelműen sikerült az Al-tartalom alapján azonosítanom az FG- és SG-csillagokhoz tartozó RGB-t. Megfigyeléseim szerint azonban a $V-C_{U, B, I}$ diagram alakja nem változik attól függően, hogy a gömbhalmazban az Al eloszlása bimodális (M53, M3) vagy folytonos (M5, M13). Ez megfigyelési bizonyítékot adott Cassisi et al. (2013) elméleti tanulmányára, aki azt találta, hogy az Al értéke nem befolyásolja a CMD alakját. A rendkívül pontos HST-fotometria lehetővé tette, hogy a $C_{F275W, F336W, F435W}$ pszeudo-CMD-n látható többszörös RGB-sávok alakját az Al-eloszlás alakjával összehasonlítsam. Hasonlóan a $C_{U, B, I}$ indexhez, a $C_{F275W, F336W, F435W}$ pszeudo-CMD-n sem találtam összefüggést az Al-eloszlás és a pszeudo-CMD alakja között. Feltételezve azt, hogy a bimodális Al-eloszlás két csillagfejlődési fázis eredménye, lehetséges, hogy a csillagfejlődés mégiscsak folyamatos volt mindegyik gömbhalmazban, és egyszerűen nem telt el annyi idő a két csillagfejlődési epizód között, hogy a két populációhoz tartozó RGB jobban elváljon egymástól.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [6], [8]

5. Gömbhalmazok kémiai összetételének legkiterjedtebb felmérése

Összesen 2283 csillag és 31 gömbhalmaz Fe, Mg, Al, Si, C, N, és O elemgyakoriságait vizsgáltam az SDSS–IV APOGEE–2 nagy felbontású nem nyilvános színképeinek felhasználásával, ezzel elkészítve a gömbhalmazok kémiai összetételének jelenlegi legnagyobb felmérését. Ennek keretében az Al-Mg, N-C antikorrelációk és az Al-eloszlás tulajdonságait vizsgáltam a Tejúrendszer kémiai fejlődésének figyelembevételével, eredményeim a következők:

- A Fe szórása nem függ a halmazok fő paramétereitől (tömeg, abszolút fényesség, kor). A 3D/NLTE-korrekciók nélkül már nem lehetséges a fémességskálát az irodalminál tovább finomítani. Három fémességskála összehasonlításából megállapítottam, hogy a H sávból kapott $[Fe/H]$ 0,064-del magasabb az optikainál. Az ω Cen-en kívül egyetlen gömbhalmazban sem találtam a hibahatárnál jelentősen nagyobb Fe-szórást, bár a pontosság elég volt ehhez. Ezek között több, az irodalomban már dokumentált halmaz is volt: M22, M2, NGC 362, M54, és NGC 1851. Az M22, NGC 362, NGC 1851 esetében elegendően sok csillagot észleltünk az Fe-szórás detektáláshoz, de az M2 és M54 észlelési stratégiája 2019-ig még nem tartalmazta a fémgazdag populációkat.
- Az Al-Mg antikorreláció sűrűségterképeinek és az Al hisztogramjának felhasználásával több halmazban is találtam kettőnél több populációt: ω Cen, NCG 6752 és M79. Bár az első kettő korábbról ismert volt, az M79-ben ez az első alkalom, hogy kettőnél több populációt azonosítottak. A gömbhalmazok nagy általánosságban bimodális vagy folytonos Al-eloszlásúak. Az ω Cen Al-Mg antikorrelációját kirajzoló, Mg-ban szegény csillagaiban kevesebb Al-t találtam, mint az antikorreláció alakjából várható lett volna.

Az ω Cen-ben az Mg-szegény csillagok esetében kissé emelkedett $[K/Fe]$ -t fedeztem fel, de az APOGEE-adatok nem voltak elég pontosak a teljesen megbízható azonosításhoz. Később Garay et al. (2022) megerősítette eredményeimet, így az ω Cen lett a harmadik gömbhalmaz, amelyben sikerült megfigyelni a K-Mg antikorrrelációt.

- A korábbiaknál bonyolultabb kapcsolatot találtam az Al-szórás és a halmazok átlagos fémtartalma között. A megfigyelések továbbra is támogatják az AGB-szennyezési elméletet, de három jól elkülöníthető csoportot találtam: (1) $[Fe/H] < -1,3$ esetén az Al szórása 0,4 dexnél nagyobb, de a fémtalom szerint gyenge csökkenést mutat, (2) $[Fe/H] = -1,3$ és $-1,0$ között tág határok változik az Al-szórás, (3) $[Fe/H] > -1,0$ esetén pedig a legtöbb gömbhalmaz a hibahatárhoz közeli Al-szórást mutat. A Tejútrendszer kémiai fejlődésére korrigálva a fémszegény és fémgazdag halmazok Al-szórásának különbsége csökken, de az összefüggés komplexitása megmarad. Bár az Al-szórás függ a halmazok tömegétől, annak mértéke növekszik a korrekció után. A befogott gömbhalmazok közül az ω Cen és az NGC 2808 nagyobb Al-szórást mutat, mint a Tejútrendszerrel együtt keletkező társaik.
- Az N-C antikorrreláció az NGC 288 és az M10 kivételével minden gömbhalmazban folytonos eloszlást mutat. Ez ellentétben áll a korábbi irodalmi észlelésekkel, amelyek bimodális eloszlást figyeltek meg. Ennek oka valószínűleg az, hogy az APOGEE-észlelésekből sokkal több csillagra sikerült a $[C/Fe]$ -t és az $[N/Fe]$ -t meghatározni, mint korábban bármikor. Az $Mg+Al+Si$ és $C+N+O$ értéke mindegyik halmazban konstans. Az összegek nem függenek a fémtartalomtól, tömegtől vagy abszolút vizuális fényességtől, csak a halmazok korától, ami a normális kémiai evolúció eredménye. Az ω Cen-ben a $C+N+O$ nagyobb, mint a többi halmazé, megerősítve a korábbi irodalmi eredményeket.
- A 31 halmaz közül ötben nem látszik az Mg–Al-ciklus hatása: 47 Tuc, M4, M107, NGC 6388 és M71. Ezekben az Al-szórás közel van a hibahatárhoz, de az N szórása sokkal nagyobb, mint amelyet az $[N/Fe]$ hibájából következne. Ha létezett is az Mg–Al-ciklus a korai csillagokban, annak hatása nem látszódik, mert az FG-csillagok $[Al/Fe]$ elemgyakorisága megemelkedett, és a vastag korongéhoz hasonló. Ilyen magas $[Al/Fe]$ -nél az elemgyakoriság logaritmikus skálája miatt sokkal több Al-t kellett volna a korai csillagoknak termelni, hogy azt a jelenlegi hibahatárok mellett ki lehessen mutatni.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [9], [10]

6. Az ω Cen többszörös csillagpopulációinak vizsgálata

Az ω Cen vizsgálatával az volt a célom, hogy annak kialakulását és fejlődését megértsem. Az APOGEE nem nyilvános színekeit felhasználva összesen 982 csillag légkörében vizsgáltam a C, N, O, Mg, Al, Si, Ca és Fe elemgyakoriságát. Eredményeim a következők:

- Az ω Cen-ben összesen négy különböző fémtartalmú populációt azonosítottam, megerősítve Johnson & Pilachowski (2010) és Gratton et al. (2011) eredményeit. A legfémszegényebb populáció tartalmazza a halmaz csillagainak kb. 2/3-át. Megállapítottam, hogy a különböző fémtartalmú populációk különböző C–N- és Mg–Al-eloszlással rendelkeznek, a legfémszegényebb populációban az Al eloszlása folytonos egészen $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,5$ dexig, de bimodálissá válik a fémtartalom növekedésével. A legfémgazdagabb populációban az Al eloszlása a hibahatárhoz közeli, de az N nagy tartományt fed le. Az N–C antikorrreláció folytonos eloszlású $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,2$ dex alatt, és bimodális felette.
- Az $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ -eloszlás vizsgálatával arra a következtetésre jutottam, hogy az ω Cen legfémgazdagabb P7 populációja a vastag koronghoz hasonló eloszlást mutat, azonban az $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ - és $[\text{O}/\text{Fe}]$ -elemgyakoriságok szignifikánsan magasabbak azoknál, aminek magyarázatához több II-es típusú szupernóva-robbanást kellene feltételeznünk, mint amennyi a vastag korongban végbe mehetett. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a halmaz fejlődése során az ω Cen még azelőtt elnyelhetett egy törpegalaxist vagy egyesülhetett azzal, hogy a Tejútrendszer halójának belső régiójába került volna.
- A P7 populációban 6 olyan csillagot találtam, amelyek $[\text{Al}/\text{Fe}]$ elemgyakorisága 0-nál kisebb, és hasonlítanak a klasszikus halócsillagokra. Bár ezek az eredmények még megerősítésre várnak, ha megfigyelésem igazolódik, az további bizonyítékot szolgáltatna egy törpegalaxis elnyelésére.
- Az Al-ben gazdag, klasszikus SG-populációk a CNO-ciklus hatásaként FG-társaiknál magasabb $[\text{C}/\text{N}]$ -értéket mutatnak. Gyenge korrelációt találtam a $[\text{C}/\text{N}]$ és a fémtartalom között, ami arra utal, hogy a felkeveredés mértéke erősebb a magasabb metallicitások felé, megerősítve Lagarde et al. (2012) elméletének jóslatát. Az irodalomban korábban megfigyelt magasabb C+N+O értékeket is sikerült megerősítenem.

A tézisponthoz tartozó publikáció: [12]

7. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

[1] **Mészáros, Sz.**, Allende Prieto, C., Edvardsson, B., Castelli, F., García Pérez, A. E., Gustafsson, B., Majewski, S. R., Plez, B., Schiavon, R., Shetrone, M., de Vicente, A. 2012, *New ATLAS9 and MARCS Model Atmosphere Grids for the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)*, The Astronomical Journal, 144, 120

[2] **Mészáros, Sz.**, Allende Prieto, C. 2013, *On the interpolation of model atmospheres and high-resolution synthetic stellar spectra*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 430, 3285

[3] **Mészáros, Sz.**, Holtzman, J., García Pérez, A. E., Allende Prieto, C., Schiavon, R. P., Basu, S., Bizyaev, D., Chaplin, W. J., Chojnowski, S. D., Cunha, K., Elsworth, Y., Epstein, C., Frinchaboy, P. M., García, R. A., Hearty, F. R., Hekker, S., Johnson, J. A., Kallinger, T., Koesterke, L., Majewski, S. R., Martell, S. L., Nidever, D., Pinsonneault, M. H., O'Connell, J., Shetrone, M., Smith, V. V., Wilson, J. C., Zasowski, G. 2013, *Calibrations of Atmospheric Parameters Obtained from the First Year of SDSS-III APOGEE Observations*, The Astronomical Journal, 146, 133

[4] Ahn, Christopher P., ... **Mészáros, Sz.**, ... 2014, *The Tenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*, The Astrophysical Journal Supplement, 211, 17

[5] **Mészáros, Szabolcs**, Martell, Sarah L., Shetrone, Matthew, Lucatello, Sara, Troup, Nicholas W., Bovy, Jo, Cunha, Katia, García-Hernández, Domingo A., Overbeek, Jamie C., Allende Prieto, Carlos, Beers, Timothy C., Frinchaboy, Peter M., García Pérez, Ana E., Hearty, Fred R., Holtzman, Jon, Majewski, Steven R., Nidever, David L., Schiavon, Ricardo P., Schneider, Donald P., Sobeck, Jennifer S., Smith, Verne V., Zamora, Olga, Zasowski, Gail 2015, *Exploring Anticorrelations and Light Element Variations in Northern Globular Clusters Observed by the APOGEE Survey*, The Astronomical Journal, 149, 153

[6] García-Hernández, D. A., **Mészáros, Sz.**, Monelli, M., Cassisi, S., Stetson, P. B., Zamora, O., Shetrone, M., Lucatello, S. 2015, *Clear Evidence for the Presence of Second-generation Asymptotic Giant Branch Stars in Metal-poor Galactic Globular Clusters*, ApJ, 815, 4

[7] Bohlin, Ralph C., **Mészáros, Szabolcs**, Fleming, Scott W., Gordon, Karl D., Koekemoer, Anton M., Kovács, József 2017, *A New Stellar Atmosphere Grid and Comparisons with HST/STIS CALSPEC Flux Distributions*, The Astronomical Journal, 153, 234

[8] **Mészáros, Szabolcs**, García-Hernández, D. A., Cassisi, Santi, Monelli, Matteo, Szigeti, László, Dell'Agli, Flavia, Derezas, Alíz, Masseron, Thomas, Shetrone, Matthew, Stetson, Peter, Zamora, Olga 2018, *A photometric study of globular clusters observed by the APOGEE survey*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 475, 1633

[9] Masseron, T., García-Hernández, D. A., **Mészáros, Sz.**, Zamora, O., Dell'Agli, F., Allende Prieto, C., Edvardsson, B., Shetrone, M., Plez, B., Fernández-Trincado, J. G., Cunha, K., Jönsson, H., Geisler, D., Beers, T. C., Cohen, R. E. 2019, *Homogeneous analysis of globular clusters from the APOGEE survey with the BACCHUS code. I. The northern clusters*, Astronomy & Astrophysics, 622, 191

[10] **Mészáros, Szabolcs**, Masseron, Thomas, García-Hernández, D. A., Allende Prieto, Carlos, Beers, Timothy C., Bizyaev, Dmitry, Chojnowski, Drew, Cohen, Roger E., Cunha, Katia, Dell'Agli, Flavia, Ebelke, Garrett, Fernández-Trincado, José G., Frinchaboy, Peter, Geisler, Doug, Hasselquist, Sten, Hearty, Fred, Holtzman, Jon, Johnson, Jennifer, Lane, Richard R., Lacerna, Ivan, Longa-Peña, Penelopé, Majewski, Steven R., Martell, Sarah L., Minniti, Dante, Nataf, David, Nidever, David L., Pan, Kaike, Schiavon, Ricardo P., Shetrone, Matthew, Smith, Verne V., Sobeck, Jennifer S., Stringfellow, Guy S., Szigeti, László, Tang, Baitian, Wilson, John C., Zamora, Olga 2020, *Homogeneous analysis of globular clusters from the APOGEE survey with the BACCHUS code - II. The Southern clusters and overview*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 492, 1641

[11] Jönsson, Henrik, Holtzman, Jon A., Allende Prieto, Carlos, Cunha, Katia, García-Hernández, D. A., Hasselquist, Sten, Masseron, Thomas, Osorio, Yeisson, Shetrone, Matthew, Smith, Verne, Stringfellow, Guy S., Bizyaev, Dmitry, Edvardsson, Bengt, Majewski, Steven R., **Mészáros, Szabolcs**, Souto, Diogo, Zamora, Olga, Beaton, Rachael L., Bovy, Jo, Donor, John, Pinsonneault, Marc H., Poovelil, Vijith Jacob, Sobeck, Jennifer 2020, *APOGEE Data and Spectral Analysis from SDSS Data Release 16: Seven Years of Observations Including First Results from APOGEE-South*, The Astronomical Journal, 160, 120

[12] **Mészáros, Szabolcs**, Masseron, Thomas, Fernández-Trincado, José G., García-Hernández, D. A., Szigeti, László, Cunha, Katia, Shetrone, Matthew, Smith, Verne V., Beaton, Rachael L., Beers, Timothy C., Brownstein, Joel R., Geisler, Doug, Hayes, Christian R., Jönsson, Henrik, Lane, Richard R., Majewski, Steven R., Minniti, Dante, Munoz, Ricardo R., Nitschelm, Christian, Roman-Lopes, Alexandre, Zamora, Olga 2021, *Homogeneous analysis of globular clusters from the APOGEE survey with the BACCHUS code - III. ω Cen*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 505, 1645

8. Irodalmi hivatkozások listája

- Abdurro'uf, A. K., et al. 2022, ApJS, 259, 35
Abolfathi, B., et al. 2018, ApJS, 235, 42
Ahumada, R., et al. 2020, ApJS, 249, 3
Alam, S., et al. 2015, ApJS, 219, 12
Albareti, F. D., et al. 2017, ApJS, 233, 25
Asplund, M. et al. 2005, ASPC, 336, 25
Bertelli, G., et al. 2008, A&A, 484, 815
Bertelli, G., et al. 2009, A&A, 508, 355
Campbell, S. W., et al. 2013, Nature, 498, 198
Cassisi, S., et al. 2013, A&A, 554, 19
Carretta, E., et al. 2009a, A&A, 505, 117
Carretta, E., et al. 2009b, A&A, 505, 139
Carretta, E., et al. 2009c, A&A, 508, 695
Decressin, T., et al. 2007, A&A, 464, 1029
Dey, A., et al. 2019, AJ, 157, 168
Eisenstein, D. J., et al. 2011, AJ, 142, 72
Evans, D. W., et al. 2018, A&A, 616, 4
Faul, A., et al. 2005, IMA J. Numer. Anal., 25, 1
Garay, A., et al. 2022, ApJL, 928, L11
González Hernández, J. I., & Bonifacio, P. 2009, A&A, 497, 497
Gordon, K. D., et al. 2022, AJ, 163, 267
Gratton, R. G., et al. 2011, A&A, 534, 72
Holtzman, J. A., et al. 2015, AJ, 150, 148
Johnson, C. I., & Pilachowski, C. A. 2010, ApJ, 722, 1373
Jönsson, H., et al. 2018, AJ, 156, 126
Kurucz, R. L. 1979, ApJS, 40, 1
Lagarde N., et al., 2012, A&A, 543, 108
Maccarone, T. J., & Zurek, D. R. 2012, MNRAS, 423, 2
Majewski, S. R., et al. 2017, AJ, 154, 94
Masseron, T., et al. 2016, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1605.004
de Mink, S. E., et al. 2009, A&A, 507, L1
Piotto, G., et al. 2015, AJ, 149, 91
Sbordone, L. et al. 2004, MSAIS, 5, 93
Sbordone, L. 2005, MSAIS, 8, 61
Shetrone, M. D., et al. 2015, ApJS, 221, 24
Snedden, C. 1973, ApJ, 184, 839
Soto, M., et al. 2017, AJ, 153, 19
Stetson, P. B., et al. 2014, PASP, 126, 521
Ventura, P., et al. 2001, ApJL, 550, L65