

Pontosabb RR Lyrae fotometriai fémességek nyomában a Gaia űrtávcsővel

36. Országos Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat

Varga Vázsony

ELTE TTK Fizika BSc. II. évfolyam

Témavezető: Molnár László, PhD

CSFK CSI, tudományos főmunkatárs



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar, Fizikai Intézet
2023.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Az RR Lyrae csillagok	3
2.1. Az RR Lyrae-k osztályozása és pulzációs módusai	3
2.2. Az RR Lyrae-k mint standard gyertyák	4
2.3. Az RR Lyrae-k mint a fémességeloszlás indikátorai	5
3. Fotometriai fémességbecslés RR Lyrae csillagokkal	6
3.1. Spektroszkópiai fémesség	6
3.2. A fénygörbealak jellemzése és a Blazskó-moduláció	7
3.3. Az összefüggés felismerése és az első illesztések	10
3.4. A <i>Gaia</i> űrtávcső fotometriai fémességbecsléséről	11
4. A reláció illesztése a <i>Gaia</i> űrtávcsőre	14
4.1. A <i>Gaia</i> űrtávcső és a DR3 adatközlés	14
4.2. A használt spektroszkópiai adatsorok	14
4.2.1. A C21 adatsor	15
4.2.2. Az APOGEE adatsor	15
4.2.3. A GALAH adatsor	17
4.2.4. A CARRS adatsor	17
4.3. A használt adatsorok szűrése és összehasonlítása	18
4.4. Illesztés az RRab-kre	20
4.5. Illesztés az RRC-kre	23
5. A pontosított reláció gyakorlati alkalmazása	26
5.1. A Bailey-diagram	26
5.2. A Magellán-felhők fémességeloszlása	28
5.3. További alkalmazási lehetőségek	34
6. Összefoglalás és kitekintés	34
Köszönetnyilvánítás	36
Irodalomjegyzék	39

1. Bevezetés

A csillagok szerkezetének, életútjának, az általuk mutatott változásoknak egyik meghatározó paramétere a fémesség, ami azt írja le, hogy a hidrogén és a hélium mellett mennyi azoknál nehezebb kémiai elem található meg bennük. Mivel az életútjuk végére érő csillagok egyre több és több nehéz elemmel dúsítják fel a galaxist, fémtartalmukból következtethetünk a születésük körülményeire, típusaik, populációik fémességeloszlásából pedig a galaxis kémiai fejlődésére. A kémiai összetételt azonban általában csak színekpek felvételével és annak részletes elemzésével lehet megállapítani, ami nagyon idő- és erőforrás-igényes munka lehet, ha nagyszámú csillagra szeretnénk elvégezni.

Az RR Lyrae típusú pulzáló változócsillagok a Lokális Csoport fémességeloszlásának indikátorai: fénygörbéjük periódusa és alakja alapján becslést adhatunk a fémtartalmukra. Ezt egy empirikus összefüggéssel tehetjük meg, ami azok altípusaira, az RRab és az RRc csillagokra külön-külön érvényes. Az igazán statisztikus csillagsokaságok esetén hasznos reláció azonban nem alkalmazható általánosan, bármely műszer által felvett RR Lyrae fotometriai adatsorra: a fénygörbék alakja függ a berendezés áteresztési függvényétől, így a használt empirikus reláció színsávonként újraillesztendő.

A *Gaia* űrtávcső több százezer RR Lyrae csillag fotometriai adatait biztosítja, így a galaxisunk környéke fémességeloszlási trendjeinek felmérésére igen hatékonyan alkalmazható. Ennek legszélesebb és legáltalánosabban használt, *G* színsávjára jelenleg a szűrők különbözőségének ellenére egy, a *Kepler* űrtávcső *Kp* sávjára illesztett összefüggés használt a nemzetközi szakirodalomban, köztük magában a *Gaia* űrtávcső katalógusában is.

Dolgozatomban négy nagyfelbontású spektroszkópai adatsor és a *Gaia* űrtávcső legutóbbi adatkibocsátásában közölt fotometriai mérései alapján megmutatom, hogy sem az RRab, sem az RRc csillagokra vonatkozó eddigi összefüggés használhatósága a *Gaia* *G* sávra nem kielégítő, mindkét reláció újraillesztésre szorul. Ezt a munkát el is végzem, körültekintően figyelembe véve a különböző statisztikus és szisztematikus hibákat, és szem előtt tartva az összefüggés minél szélesebb paraméterterre való helyes illeszkedésének igényét. Ezután kitűzöm a további pontosítási lehetőségeket, és diszkutálom a kapott összefüggéseket.

A *Gaia* űrtávcsőre általam elsőként illesztett összefüggés segítségével korrigálom a *Gaia* misszió Bailey-diagramja RRab fémességeloszlásának azon hibás, az észleléseknek teljesen ellentmondó trendjeit, amiket a jelenleg alkalmazott összefüggés a paraméterter szélein való szisztematikus eltérései okoznak. Emellett megvizsgálom a Magellán-felhők fémességeloszlását, megerősítve a Nagy Magellán-felhőben észlelhető fémességgradiens jelenlétét, és pontosítva annak értékét.

2. Az RR Lyrae csillagok

A kutatásom magját az RR Lyrae típusú pulzáló változócsillagok képezik (a továbbiakban RR Lyrae-k). Az RR Lyrae-k az egyik leghasznosabb változócsillag-csoportot jelentik az idős csillagpopulációk távolságának és egyéb tulajdonságainak felmérésére. Ezek sárga óriáscsillagok, amelyek a Hertzsprung–Russell-diagram horizontális ágán, az instabilitási sávban helyezkednek el. Abszolút fényességük $-0,6$ mag körüli, felszíni hőmérsékletük 6000 K és 7250 K között oszlik el. Pulzációjuk periódusa $0,2$ és $1,0$ nap közötti, amplitúdója, a használt színsávtól és a csillagtól magától függően, $0,5 - 1$ mag nagyságrendű.

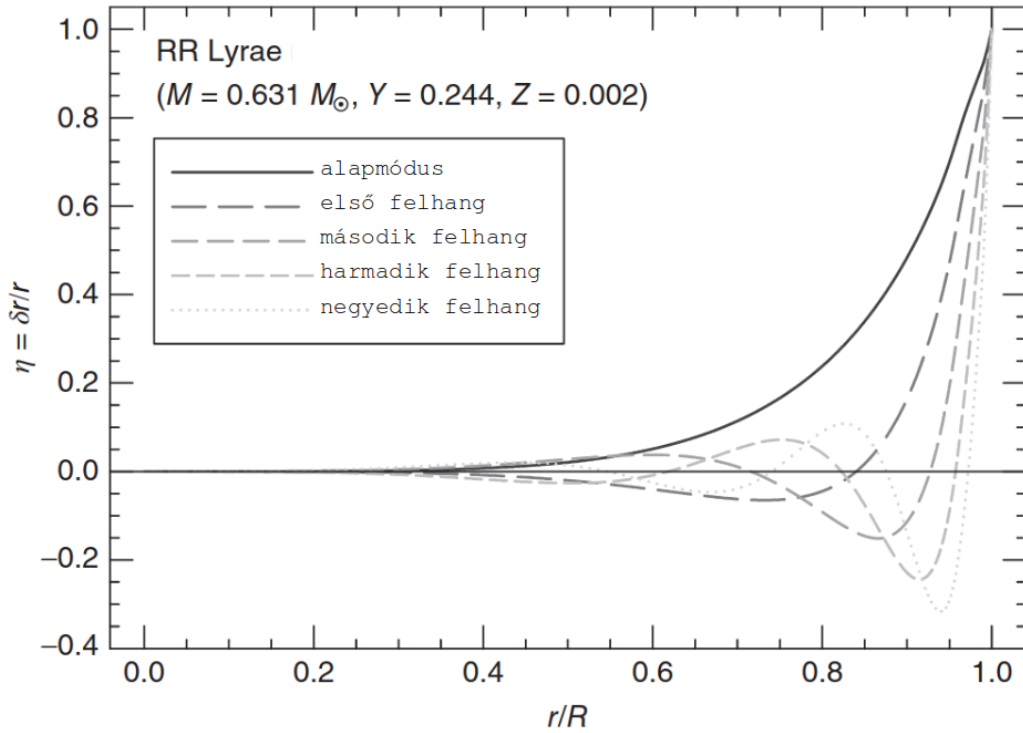
Idős csillagok, így előfordulási arányuk a galaktikus haló idős gömbhalmazaiiban különösen magas. Az 1890-es években Solon Bailey és Edward Pickering is a gömbhalmaztag RR Lyrae-ket különítették el először, ami miatt az immár RR Lyrae típusú változócsillagoknak nevezett objektumokra eleinte *halmaz-változók*ként hivatkoztak.

2.1. Az RR Lyrae-k osztályozása és pulzációs módusai

Az RR Lyrae-k csoportosításához azokat Bailey fénygörbealak, pulzációs periódus és amplitúdó szerint három csoportra osztotta, a, b és c típusú csillagokra (Bailey, 1902). Schwarzschild 1940-ben felvetette, hogy az a és b típusú csillagok alaphangú, míg a c típusúak első felhangú radiális pulzátorok lehetnek, ami később megerősítést nyert (Schwarzschild, 1940, 1941). Ezen felül az a és b típusok – a c típustól elkülönülve – egy összefüggő tartományt fednek le a pulzációs amplitúdót a pulzációs periódus függvényében ábrázoló ún. Bailey-diagramon, így mostanra ezeket nem különböztetjük meg: az RR Lyrae-k klasszifikációja tehát pulzációs módus szerint történik, ahol az alaphangon pulzáló változókat az RRab-k, az első felhangban pulzálókat pedig az RRC-k csoportjába osztjuk. Később az RRd csillagokat is definiálták, amikben mind alaphangon, mind első felhangban végzett radiális pulzációkat megfigyelhetünk (Jerzykiewicz & Wenzel, 1977). A teljes populáció kb. 65%-át RRab-k, kb. 35%-át RRC-k teszik ki, míg RRd-k csupán kb. 0,7%-át (Clementini et al., 2022). Az RRd csillagok kicsiny száma miatt munkám során csak az RRab és RRC populációk vizsgálatával, illetve azok használatával fogok foglalkozni.

A fent említettek szerint az RRab és az RRC csillagok is radiális pulzációt mutatnak, előbbiek alaphangban, utóbbiak pedig első felhangban. A radiális pulzáció, idealizálva, azt jelenti, hogy a csillag egyes anyagrétegei gömbszimmetrikusan, adott középponttól való távolság mellett a polárszögektől függetlenül ugyanakkora nagyságú, radiális irányú sebességgel tágulnak szét vagy húzódnak össze, a felszín mindvégig közelítőleg gömbfelület marad. A különbség az alaphangon és a felhangban zajló pulzáció között abban mutatkozik, hogy míg előbbi esetben a sugár függvényében konstans előjelű a sebességprofil, azaz egy tetszőleges pillanatban a csillag egyes rétegei vagy mind kifelé, vagy mind befelé mozognak (persze sugárfüggő értékű sebességgel), az N . felhangban végzett pulzáció esetén a sebességprofilnak az origón kívül N (az RRC-k esetén tehát egy) zérushelye, csomópontja van. Azaz felhangú pulzáció esetén egyes régiók kifelé tágulnak egy adott időpillanatban, míg mások befelé. Az ilyen pulzációkat a lineáris adiabadikus hullámegyenlet (Linear Adiabatic Wave Equation, LAWE) segítségével modellezhetjük, persze bizonyos korlátok mellett. Az egyes pulzációs módusok esetén az egyes gömbhéjak sugárának így eredményül kapott $\delta r/r$ normált változását, azaz a gömbhéj sugara megváltozásának a csillag teljes sugarához viszonyított arányát az 1 ábrán láthatjuk a sugár függvényében.

Az alaphangú RRab csillagok P pulzációs periódusa $0,4$ naptól $1,0$ napig terjed, az első



1. ábra. Valós RR Lyrae modell: Egy fémszegény radiális pulzátor a lineáris adiabatikus hullámegyenlettel (LAWÉ) számolt pulzációs módusai. Forrás: Catelan & Smith (2015a)

felhangban pulzáló RRc-ké ennél rövidebb, 0,2 és 0,4 nap közötti. Az RRab-k amplitúdója átlagosan nagyobb, fénygörbéjük gyorsabb felfutású, mint lecsengésű, sokkal egyértelműbben aszimmetrikus, mint a közel szinuszos pulzációt mutató RRc csillagoké.

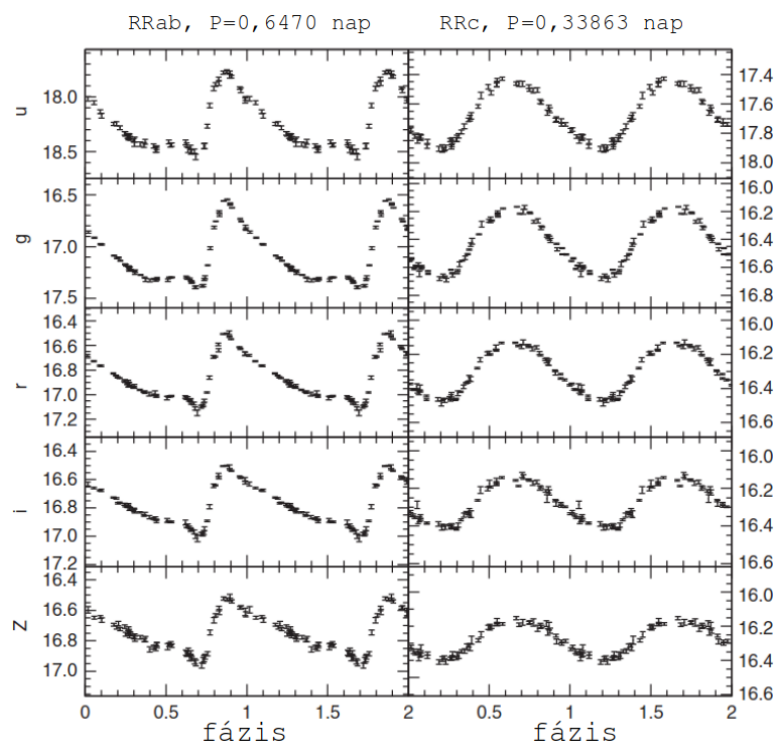
Mivel a pulzáció során nemcsak a csillagok mérete, de a hőmérséklete is változik, a beérkező intenzitás spektrális eloszlása a pulzáció fázisa szerint módosul. Ebből az következik, hogy egy adott RR Lyrae pulzációját vizsgálva különböző színszűrőkkel eltérő fénygörbealakokat kaphatunk, például a pulzációs amplitúdó is akár többszörös lehet egy adott áteresztési függvény esetében, mint egy másik eszközzel mérve azt. A 2. ábrán az SDSS (Sloan Digital Sky Survey) *ugriz* szűrőiben látható egy-egy fénygörbe az RRab és az RRc típusból.

2.2. Az RR Lyrae-k mint standard gyertyák

Az RR Lyrae csillagok a fentebb említettek szerint igencsak hasznos objektumok. Egyik hasznosítási módjuk a fotometriai parallaxis, azaz fénygörbéjük alapján az abszolút fényességük, abból pedig átlagos látszó magnitúdójuk ismeretében és a megfelelő extinkcióértékek felhasználásával távolságuk meghatározása, amiből az azokat tartalmazó csillagászati objektumok távolsága is adódik. Ahogy a cefeidákra, úgy ezekre a csillagokra is létezik periódus-luminozítás reláció (pl. Catelan et al., 2004; Rich et al., 2018), amivel az adott színsávbeli átlagos $\langle M \rangle$ abszolút magnitúdójukra a P pulzációs periódusuk függvényében becslés adható az alábbi alakban:

$$\langle M \rangle = a \cdot \log_{10} P + b,$$

ahol a és b az adott színsávra vonatkozó illesztési paraméterek. Megjegyzendő, hogy V sávra az összefüggés illesztése szinte teljes, a periódustól való függetlenséget, azaz állandó abszolút magnitúdót, $a \approx 0$ együtthatót javasol. Sőt, a többi esetben is közel állandóak az abszolút fényességek, az RRab-k teljes periódustartományán is jócskán 1^m alatti különbségek tapasztalhatóak.



2. ábra. Egy-egy tipikus RRab és RRC fénygörbe az SDSS *ugriz* szűrősor különböző sávjában. Jól látható, hogy mind a fénygörbealak, mind a pulzációs amplitúdó módosul ezek között. Forrás: Catelan & Smith (2015b)

Ezt a tényt a Magellán-felhők vizsgálatánál, a galaxis részét alkotó csillagok kiválogatásánál ki fogom használni.

Az egyes csillagok átlagos abszolút fényessége nemcsak a periódusukból, hanem spektrumok felvételével a 3.1. alfejezetben részletezett $[\text{Fe}/\text{H}]$ indexszel jellemzett fémességükből is meghatározható a fentihez hasonló alakú reláció illesztésével:

$$\langle M \rangle = a \cdot [\text{Fe}/\text{H}] + b$$

Bár a fenti relációk a Lokális Csoporton belül, főként a Tejútrendszerben és annak közvetlen környezetében kiválóan használhatók, elsősorban gömbhalmazok távolságának meghatározására, például a cefeidáknál jóval halványabb lévén az RR Lyrae csillagok ennél nagyobb skálán nem használhatóak a jelenleg elérhető műszerezettséggel.

2.3. Az RR Lyrae-k mint a fémességeloszlás indikátorai

Mint azt nemcsak a gyakorlat, hanem különböző elméleti modellek (többek között a fentebb említett LAWE) is mutatják, a csillagokban zajló pulzációs folyamatok függenek a csillag kémiai összetételétől, dominánsan az összfémettségtől, vagyis a héliumnál nehezebb elemek a csillag egészéhez viszonyított arányától. Ez azt jelenti, hogy az egyes csillagok fénygörbéjét felvéve következtethetünk az összfémettségre, a spektroszkópiánál egy sokkal kevésbé erőforrás-igényes módszert adva erre.

Az így kapott, ún. fotometriai fémességértékek persze a nagyfelbontású spektrumokból kapotknál jóval nagyobb bizonytalanságokat hordoznak, azonban nem csillagonként, hanem statisztikusan kezelhető sokaságokra alkalmazva azt kellő pontosságú és rendkívül hasznos mérőszám

is lehet (pl.: Kunder & Chaboyer, 2008). A dolgozatom további részével ennek részleteivel foglalkozom.

A 2. fejezet a szövegben említett hivatkozásokon kívül elsősorban a Catelan & Smith (2015a) és Catelan & Smith (2015b) könyvfejezeteken alapul.

3. Fotometriai fémességbecslés RR Lyrae csillagokkal

A fotometriai fémességbecslés a 2. fejezetben felvezetetteknek megfelelően egyes RR Lyrae csillagok felvett fénygörbéje, valamint a pulzáció szempontjából domináns fizikai paraméter, az összfémesség között teremt empirikus kapcsolatot. Elsődleges haszna abban rejlik, hogy számos fotometriai misszió, például a jelen dolgozatban részletesen tárgyalt *Gaia* űrtávcső, hatalmas léptékben bocsát rendelkezésünkre fotometriai adatokat, jóval nagyobb mennyiségben, mint spektrumokat a legnagyobb spektroszkópai felmérések. A hatalmas számú rendelkezésre álló adatpont miatt statisztikus módon, például egyes csillaghalmazok fémmésgeloszlásának meghatározására kiválóan alkalmazható az egyébként különálló adatpontonként nagyobb bizonytalanságot tartalmazó becslés, valamint a spektroszkópia számára túl halvány csillagokra is fémmésgbecslést tud szolgáltatni.

Az összefüggéssel való munka során azonban figyelembe kell vennünk azt, hogy mint oly sok más csillagászati összefüggés, ez is, bár fizikai alapokon nyugszik, empirikus, tisztán tapasztalati úton megalkotott. Ennek megfelelően annak alakja és a benne használt paraméterek amellet, hogy részben indokolható asztrofizikai illetve mérés technikai alapon a használatuk, elsősorban empirikus alapon választottak. Így nem kőbe vésett az, hogy milyen függvényalakokkal, milyen paraméterekkel megközelítve optimális a függvény illeszkedése, ezeket mindig kritikus szemmel, lehetőség szerint több opciót megvizsgálva érdemes megközelíteni.

A következő alfejezetek során az ebben az összefüggésben használt illetve használható paraméterekbe nyújtok bevezetést.

3.1. Spektroszkópai fémesség

Ahogy asztrofizikában általában, úgy jelen dolgozatban is a héliumnál nehezebb elemekre hivatkozom fémekként. Ami a csillagok pulzációs folyamatait annak kémiai összetétele tekintetében dominánsan meghatározza, az a fémeknek a csillag teljes anyagához viszonyított aránya. Ez a Z -vel jelölt, fémmésgnek nevezett mennyiség csillagról csillagra változik, a Nap esetében a jelenleg leginkább elfogadott érték $Z_{\odot} = 0,014$ (Asplund et al., 2009), az idős, fémszegény RR Lyrae-k esetén ez tipikusan 1-2 nagyságrenddel kisebb. Fontos megjegyezni, hogy egy csillag fémmésgé élete túlnyomó része során állandónak vehető. Így az RR Lyrae-k esetén észlelt fémmésgék is a születéskori fémmésgéikkel egyeznek meg, vagyis fémmésgeloszlásukat meghatározva környezetünk korai, nagyságrendileg 10 milliárd éves állapotának trendjeit vizsgáljuk, ami hasznos lehet többek között a galaxis kémiai fejlődésének (Galactic Chemical Evolution, GCE) vizsgálata esetén (Martínez-Vázquez, 2021).

Míg a csillagszeizmológiában, azaz a csillagpulzációk vizsgálatakor a fent definiált Z fémmésg a legközvetlenebbül és legegyszerűbben használható, az egyes elemarányok között nagyságrendi különbségek lévén a fémmésgeloszlások vizsgálata esetén egyszerűbb logaritmikus skálán, 1 nagyságrendű számértékekkel dolgoznunk. A szakirodalom ilyen esetekben általánosan a

Naphoz mint referenciához viszonyítja az egyes elemarányokat. A fémesség leírására a talán legáltalánosabban használt mennyiség ezek közül az ún. $[\text{Fe}/\text{H}]$, vagyis vas-hidrogén index. Ez spektroszkópiai úton elsősorban nagyfelbontású színeképek vas- és hidrogén-vonalaiból határozható meg (bár más módszerek is léteznek, úgy mint az alább bemutatott ΔS -módszer), és az alábbi módon definiáljuk:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe, csillag}}}{N_{\text{H, csillag}}} \right) - \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe, Nap}}}{N_{\text{H, Nap}}} \right),$$

ahol az N értékek a jelölt elemek részecskeszámának felelnek meg. A csillag fémességének leírására azért használhatjuk a vas hidrogénhez viszonyított arányát a teljes fémességé helyett, mivel ezek igen erős korrelációt mutatnak egymással.

Nagy felbontású színeképek teljes spektrumillesztésével azonban a vas részaránya helyett a teljes fémtartalmat leíró $[\text{M}/\text{H}]$ index is meghatározható, ami közvetlenebbül jellemzi a csillag fémességét. Ezt a $[\text{Fe}/\text{H}]$ index esetéhez hasonlóan a Naphoz mint referenciához viszonyítjuk az egyes objektumok elemarányai segítségével, az alábbi definíció mellett, ahol az M index a fémekre együttesen utal:

$$[\text{M}/\text{H}] = \log_{10} \left(\frac{N_{\text{M, csillag}}}{N_{\text{H, csillag}}} \right) - \log_{10} \left(\frac{N_{\text{M, Nap}}}{N_{\text{H, Nap}}} \right).$$

A fent említetteknek megfelelően az $[\text{M}/\text{H}]$ és a $[\text{Fe}/\text{H}]$ indexek jó közelítéssel, jelen kutatás kapott eredményeinek elvárt pontosságán belül egyeznek, de mégiscsak két elviekben meg nem egyező mennyiségről beszélünk, amiknek így fontos az elkülönítése.

A fenti összefüggések esetén arra fontos még figyelniük, hogy az egyes esetekben a Nap elemösszetételére vonatkozó referenciaértékek, az ún. zérópontok eltérhetnek. Emiatt több spektroszkópiai adatsor együttes használata esetén az ezek közötti különbségekre, azaz a zéróponti eltérésekre korrigálnunk kell a lehető legnagyobb precizitás eléréséhez. Ezek mellett pedig az észlelési és feldolgozási különbségekből is adódhatnak szisztematikus eltérések az egyes adatso-
rok között.

A nagy felbontású spektroszkópia mellett a fémesség meghatározására más módszerek is léteznek, amelyek egyike az RR Lyrae-kre használható ún. ΔS -módszer. Ez, bár az egyes elemarányokat külön-külön nem adja meg, a vas-hidrogén indexet kis felbontású spektrumból is képes jól megbecsülni, a hidrogén Balmer α , β és γ vonalainak, valamint a Ca II K vonalának ekvivalens szélességeire illesztett empirikus összefüggésből (Crestani et al., 2021).

Munkámban nagy felbontású spektrumokból kapott $[\text{Fe}/\text{H}]$ és $[\text{M}/\text{H}]$ értékekkel dolgozom azok közvetlensége és pontossága miatt. Ennek ellenére nem kizárt a lehetősége a jövőben annak, hogy egy rendkívül nagy elemszámú, ΔS -módszerrel becsült fémességkatalógus rendelkezésemre álljon, amely esetben így kapott értékek az általam végzett illesztésben való használata is megfontolandó lehet.

3.2. A fénygörbealak jellemzése és a Blazskó-moduláció

Az eddigiekben kifejtettek szerint a fotometriai fémességbecslés a $[\text{Fe}/\text{H}]$ index megbecslésére törekszik az alapján, hogy milyen a pulzáció fénygörbéje. Jelen alfejezet a fénygörbe leírásának lehetőségeivel foglalkozik.

Egy szigorúan periodikus fénygörbe jellemzéséhez a kulcs annak valamilyen nagy N -ed rendig menő Fourier-sorral való illesztése az alábbi alakban:

$$m(t) = A_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cdot \cos\left(\frac{2k\pi}{P}t + \varphi_k\right)$$

Tehát a fénygörbét – egy konstans eltolás mellett – N darab szabad amplitúdójú és fázisszögű koszinuszfüggvény összegével illesztjük, ahol bár elviekben az illesztés annál pontosabb, minél nagyobb N , annak értékét természetesen korlátozza a rendelkezésre álló fénygörbék minősége, pontossága, illetve hogy hány adatpontból állnak. N nagyságrendjét érzékelteti, hogy például a reláció első, jelenlegi formájában használt illesztése esetében (l. 3.3. fejezet) $N = 15$ rendig történt az illesztés (Jurcsik & Kovács, 1996).

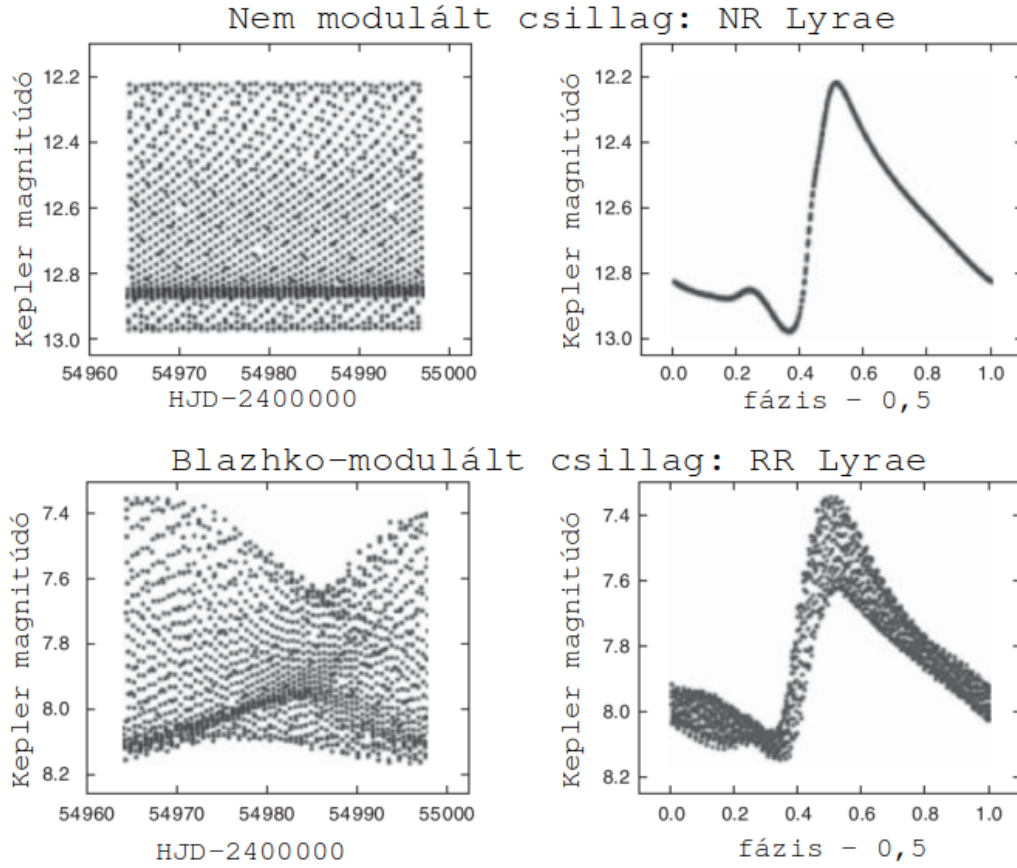
A szakirodalomban gyakori nem koszinuszokkal, hanem szinuszokkal illeszteni a fénygörbét (pl. Jurcsik & Kovács (1996), Nemec et al. (2013)), ami azonban a szabad φ_k fázisszögek miatt teljesen ekvivalens, csupán a kapott fázisszögeken kell a megfelelő korrekciót elvégezni a $\cos \varphi = \sin(\pi/2 - \varphi)$ összefüggésből adódóan.

A fenti illesztés számos paramétert rendelkezésre bocsát, ami használható a fénygörbe jellemzésére: a P pulzációs periódust, valamint az átlagos fényesség mellett N amplitúdót és N fázisszöget. Ezek alapján illeszthető lenne egy $2N + 2$ dimenziós reláció is a fényesség meghatározásához, de ez nyilvánvalóan se nem cél, se szükség nincs rá, mivel nagy N -ek felé tartva az egyes A_k amplitúdók nullához tartanak. Mindemellett nem is lenne célravezető, mivel adott mennyiségű adatpontra sokkal nagyobb számú szabad paraméteres illesztést kellene végezni.

A rendelkezésre álló paraméterekből tehát néhány, a fényességet a leginkább domináns módon jellemezni képest kell kiválasztani. Ami a leginkább adja magát, az a P periódus. Ennek amellet, hogy a fényesség-befolyásolta pulzációs folyamatok talán legfőbb jellemzője, ami erősen korrelál a mérettel, így a hőmérséklettel is, több fontos előnye van a gyakorlati alkalmazás szempontjából is. Egyrészt, a fénygörbe Fourier-sorral való illesztéséből ezt nagyon pontosan megkapható, a bizonytalansága a többi paraméteréhez képest elhanyagolható, másrészt pedig a periódus egy jól definiált fizikai mennyiség, ami a műszerektől, színsávoktól, kiértékelési módoktól függetlenül ugyanannak kell adódjon.

Azonban csak a periódusból nem lehetséges a fényességet kellő pontossággal meghatározni, így az amplitúdók és fázisok halmazából is választani kell egy vagy több elemet. A fázisok helyett általában fáziskülönbségeket használjuk, azaz az egyes illesztett koszinuszfüggvények egymáshoz viszonyított eltolását tekintjük. Itt nem közvetlenül a $\frac{2k\pi}{P}$ körfrekvenciájú függvények közötti eltolást vizsgáljuk, hanem azt, hogy ezeket a függvényeket azonos periódussal ábrázolva mekkora lenne köztük az eltolás, így a φ_{kl} , k és l , $k > l$ indexű függvények közötti fáziskülönbséget $\varphi_{kl} \equiv l\varphi_k - k\varphi_l$ módon definiáljuk, ahol általában az $l = 1$ esetet vizsgáljuk, amely esetben értelemeszerűen $\varphi_{k1} \equiv \varphi_k - k\varphi_1$ adódik. A reláció illesztésének történetében számos, különböző számú dimenziójú, különböző amplitúdókat és fáziskülönbségeket tartalmazó kombinációt kipróbáltak, amelyeket a 3.3. és 3.4. alfejezetekben foglalkozunk össze.

Mostanra a szakirodalomban általánosan elterjedt a $\varphi_{31} \equiv \varphi_3 - 3\varphi_1$ fáziskülönbség használata vált; a használt *Gaia* DR3 fotometriai adatsor is ennek értékeit tartalmazza, munkámban is ezeket fogom használni. A φ_{31} paraméter használatát azonban nehezíti a tény – amelyen természetesen semelyik másik amplitúdó vagy fáziskülönbség használata nem segítene –, hogy a fénygörbealak, így maga a φ_{31} paraméter is függ a használt színsávtól, így az összefüggés nem alkalmazható általánosan, hanem műszerenként, áteresztési sávonként újraillesztendő.



3. ábra. Egy Blazhko-modulált (RR Lyrae) és egy nem modulált (NR Lyrae) RR Lyrae típusú változócsillag összehasonlítása. Előbbi fénygörbealakja egyértelműen kevésbé jól definiált, inkább sáv-, mint vonalszerű. Forrás: Catelan & Smith (2015b)

Az összefüggés pontos illesztését és jó alkalmazhatóságát egy, az RR Lyrae csillagok kb. 50%-ánál (Jurcsik et al. 2008, Molnár et al. 2022) megfigyelhető jelenség, a Blazhko-moduláció akadályozza. Ezt 1906-ban fedezte fel Szergej Blazhko orosz csillagász (Blazhko, 1906), és azt jelenti, hogy a pulzációs periódus és amplitúdó nem teljesen állandó, hanem lassan változik, így az átlagos periódus szerint feltekert fénygörbe is sokkal kevésbé lesz pontos, sokkal inkább fog sávyszerű, mint vonalszerű alakot mutatni. Az RR Lyrae csillagok prototípusa, az RR Lyrae csillag maga is Blazhko-modulációt mutat; ennek egy nem modulált csillaggal való összehasonlítását a 3. ábra mutatja. A modulált csillagok értelemszerűen jóval nagyobb hibát hordoznak a φ_{31} paraméterben, sőt, a periódusban is. Bár ezek szűrése célszerű, az egyes paraméterek – úgy mint a periódusidő és a φ_{31} – értékei várakozásaink szerint a középértékek körül oszcillálnak, nagyszámú adatpont esetén így kiátlagolódnak, nem okozva nagy szisztematikus eltérést.

Jelen munkában – ahogy a használt fotometriai adatbázisban, a *Gaia* DR3-ban meg van adva – a koszinuszos illesztéssel dolgozom, a φ_k -val jelölt fázisok és φ_{kl} -vel jelölt fáziskülönbségek erre vonatkoznak; ezt a szinuszos illesztések esetére könnyedén át lehet váltani, a szinuszos illesztés φ_{31}^s paramétere esetén a következő módon: $\varphi_{31}^s = \varphi_{31} + \pi$ (Nemec et al., 2013).

3.3. Az összefüggés felismerése és az első illesztések

Az RR Lyrae csillagok RRab csoportja fotometriai fémességbecslésének lehetőségére Kovács Géza és Zsoldos Endre 1995-ben publikált cikkükben mutattak rá (Kovács & Zsoldos (1995), a szakirodalomban és a továbbiakban KZS95). Az általuk javasolt empirikus módszerrel – amit jelenleg is használunk, és jelen munka központi kérdését alkotja – a csillagok $[\text{Fe}/\text{H}]$ indexe megbecsülhető tisztán a pulzációs fénygörbe alapján. KZS95 a spektroszkópiai $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékekre való illesztést V -sávbeli fotometriai adatokkal végezve számos különböző paraméterre és különböző fokú polinomra kipróbálta, a P periódus mellett másodfokú illesztés esetén φ_{21} -től és A_1 -től φ_{81} -ig és A_8 -ig, harmadfokú esetén φ_{41} -ig és A_4 -ig.

A munka megerősítette a 3.2. alfejezetben a periódus kiváló használhatóságával kapcsolatban kifejtett várakozásokat azzal, hogy a periódust minden paraméterszámú és fokú illesztés esetén használatra egyértelműen érdemes paraméternek találta. Összességében egy 3+1 ($[\text{Fe}/\text{H}] = f(P, A_3, \varphi_{31})$) és egy 5+1 ($[\text{Fe}/\text{H}] = f(P, A_1, A_3, \varphi_{31}, \varphi_{51})$) dimenziós másodfokú illesztést talált optimálisnak, amelyekből azonban nem használta mind a 10 illetve 21 szabad paramétert, hanem a nagyon nagy relatív hibájúakat elvetette, amivel kevesebb szabadsági fokkal tudott közel azonos minőségű illeszkedéshez jutni. Ezek korrigált RMSD-je (az illesztésből kapott és a mért adatok korrigált átlagos négyzetes eltérése) rendre 0,23 és 0,18 dex-nek adódott.

Az illesztést Kovács Géza Jurcsik Johannával fejlesztette tovább (Jurcsik & Kovács 1996, JK96). A munka három, egységesített nagyfelbontású és ΔS -módszerrel kapott spektroszkópiai adatsorral dolgozott, KZS95-nél jóval több csillaggal, és pontosabb, ugyancsak V -sávbeli RRab fotometriai mérési eredményeket használva. Az egyes adathalmazok összehasonlításakor JK96 azt találta, hogy a Blazskó-modulált csillagok nem növelik észrevehetően az illeszkedés bizonytalanságát, így nem kellett elvetni azokat.

JK96 a pontosabb rendelkezésre álló adatokkal azt találta, hogy a fémséget alapvetően meghatározó paraméterek az empirikus illesztésben a P periódus és a φ_{31} fáziskülönbség, és hogy egy lineáris trend az összefüggés alapja. Ennek megfelelően az általuk javasolt és illesztett függvényalak egy háromdimenziós lineáris összefüggés, azaz lényegében egy – térbeli – síkillesztés. Bár a függvényalakra vonatkozóan azóta pontosabb adatsorokkal dolgozva a magasabb, leginkább másodfokú polinomokkal való munka vált általánossá (Nemec et al. (2013), Mullen et al. (2021)), JK96 azon eredménye, miszerint a fémséget a periódus és a φ_{31} paraméter függvényében érdemes becsülni, mindmáig a legáltalánosabban használt illesztési módot jelenti.

Az összefüggésnek az RRab csillagok esetére való felismerése és kalibrációja után az RRC-kre való első illesztésre még több, mint tíz évet várni kellett. Morgan et al. (2007) munkájukban kétféle fémességskálát használva (Zinn & West (1984), ZW84; Carretta, E. & Gratton, R. G. (1997), GC97) illesztettek fotometriai fémességbecslő összefüggést, ugyancsak P és φ_{31} függvényében. Ők általános másodfokú (tehát 6 szabad paraméteres) polinomillesztésből indultak ki, de az optimális illeszkedés függvényalakja függni mutatkozott a használt fémességskálától: míg a ZW84 skála esetén mind a 6 együttható szignifikáns volt, a GC97 skálát használva 4 szabad paraméteres illesztés bizonyult megfelelőnek, a P^2 és a $\varphi_{31} \cdot P$ tagok együtthatóit zérusnak véve, amely illesztések RMSD-je rendre 0,145 és 0,142 dex-nek adódott. A két skála esetén külön-külön az adatpontok csaknem 90%-a 0,2 dex-es hibahatárok között volt, közöttük azonban 0,14 dex-es szisztematikus eltérést tapasztaltak. Ez megerősíti annak igényét, hogy különböző skálán értelmezett spektroszkópiai $[\text{Fe}/\text{H}]$ adatsorok csillagait együtt használva meg kell tenni a zéróponthi korrekciókat, valamint korrigálni kell minden szisztematikus eltérésre, amire lehetőség adódik.

3.4. A *Gaia* űrtávcső fotometriai fémességbecsléséről

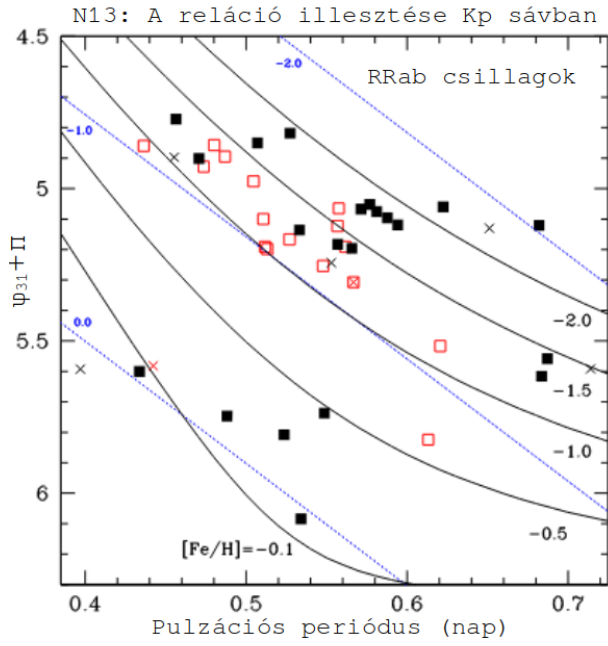
A *Gaia* űrtávcsővel, pontosabban annak *G* fotometriai sávjával történő fotometriai fémességbecslésre jelenleg a *Kepler* űrtávcsőre és annak *Kp* fotometriai áteresztési sávjára illesztett reláció (Nemec et al. (2013), a továbbiakban N13) van használatban. Az N13 illesztés rendkívül pontos, *Kp* sávbeli fotometriai adatokat használ: A *Kepler*-mező 41 RR Lyrae-jére egyenként hozzávetőlegesen 970 napnyi kvázifolytonos fénygörbe áll rendelkezésre, ami alapján az egyes csillagoknak mind a periódusát, mind a φ_{31} Fourier-paraméterét nagy pontossággal ismerjük, valamint a Blazskó-modulációt mutató csillagok is egyértelműen kitűnnek – ebben a cikkben mutattak rá az akkor ismert legkisebb mértékű Blazskó-modulációra. Ezekből 37 csillagra áll rendelkezésre fémességérték, amiket a hawaii-i 10 méteres Keck-I és a 3,6 méteres CHFT távcsövekkel, rendre az ESPaDOnS és a HIRES nagy felbontású spektrográfokkal vettek fel. Ezek a fémességek Carretta et al. (2009) (a szakirodalomban és a továbbiakban C9) skáláján vannak értelmezve.

N13 mind az RRab, mind az RRc csillagokra meghatározta az optimális fotometriai fémségbecslő függvényt. Az illesztés ezen esetekben is 2+1 dimenzióban, P és φ_{31} függvényében zajlott, másodfokú polinomillesztésből kiindulva. Az RRab csillagok esetén a kalibráció 26 válogatott adatpont alapján történt, amelyek közül 17 nem Blazskó-modulált, 9 viszont igen. Itt az illesztés a P^2 paraméter együtthatója nullának vételével bizonyult optimálisnak, amely illesztés 0,084 dex RMSD-t produkált. Ennek az illesztésnek azonban, amellet, hogy kiváló minőségű és válogatott fotometriai és spektroszkópiai adatpontok figyelmes vizsgálatán alapul, és rendkívül kicsi szórást mutat, van két nagyon lényeges gyengesége is.

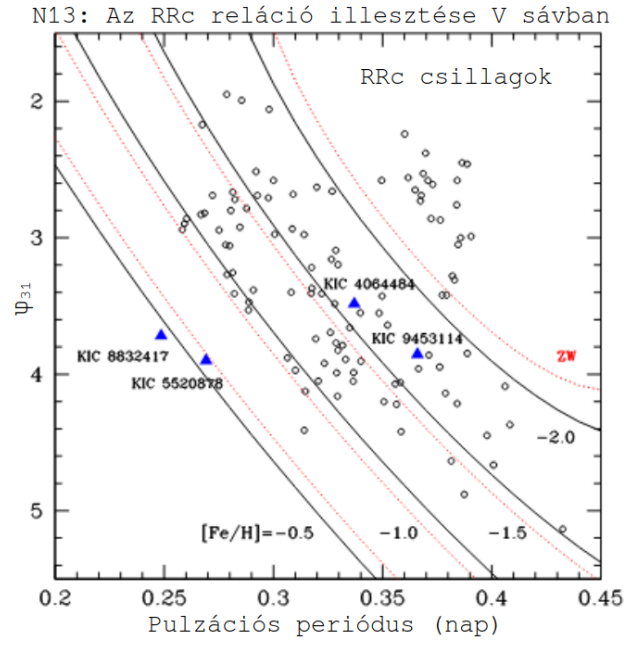
Az egyik az, hogy a használt adatpontok száma nem túl nagy, ami, mivel a fémség nem csak a használt paraméterektől függhet, már néhány szerencsétlenül kilógó adatpont esetén is igen nagy szisztematikus hibát okozhat. A másik, még ennél is lényegesebb probléma pedig, hogy az illesztés paramétertere, azaz az adatpontok által lefedett tartomány igen szűk. Míg a fémségek nagy skálán terülnek szét, és a φ_{31} paraméterek eloszlása is kielégítő, a periódusok eloszlása komoly egyoldalúságot mutat: a nagyjából 0,35 – 1,0 nap periódusú RRab csillagok közül *egyáltalán nincsen* 0,7 nap feletti periódusú adatpont (4a. ábra) – vélhetően ez is közrejátszhatott abban, hogy P kvadratikusan tagjának együtthatója az illesztésben jó közelítéssel nullának vehetőnek adódott. Ez azt jelenti, hogy az összefüggést a 0,7 nap $< P$ tartományra alkalmazva tisztán extrapolációt használunk, ami egy ilyen jellegű, empirikus összefüggés esetén akár alapjaiban rossz eredményt is adhat. Emellett az 5.1. alfejezetben megmutatott módon az N13 által használt mintából a kis amplitúdójú RRab adatpontok is hiányoznak.

Az RRc-kre való illesztéshez a *Kepler*-mezőben csupán négy csillag állt N13 rendelkezésére, amelyek vizsgálata szintén a fent részletezett műszerekkel és módszerekkel történt. Mivel ezekre önmagukban irreális lett volna egy összefüggés illesztése, N13 a kalibrációhoz ezen négy adatpont mellett az első, Morgan et al. (2007) által közölt, *V* sávbeli RRc illesztés értékeit is használta, amihez az RRc csillagok *Kp* φ_{31} adatait az – egyébként a nem modulált RRab-kra illesztett –, Nemec et al. (2011) által kalibrált relációval *V* sávba alakította, négy pontos, és a paraméterteret nagyobb fémségek irányába kibővítő, értékes adatpontokkal növelve az adathalmazt. Az illesztés (4b. ábra) mind a 6 szabad paraméter megtartása mellett adódott optimálisnak, amelyet N13 végeredményként ugyancsak a C9 fémségskálán adott meg.

Ahogy azt a 3.2. alfejezetben részletezem, a fotometriai fémségbecslés relációja, a fénygörbealakokkal együtt, színsávfüggő. Azért használjuk mégis a *Kepler* űrtávcső *Kp* sávjára végzett illesztéseket a *Gaia* *G* sávra, mert mind a *Kepler* *Kp*, mind a *Gaia* *G* sáv detektora látható és közeli infravörös tartományokon érzékeny, hasonló a két áteresztési függvény. Azonosnak

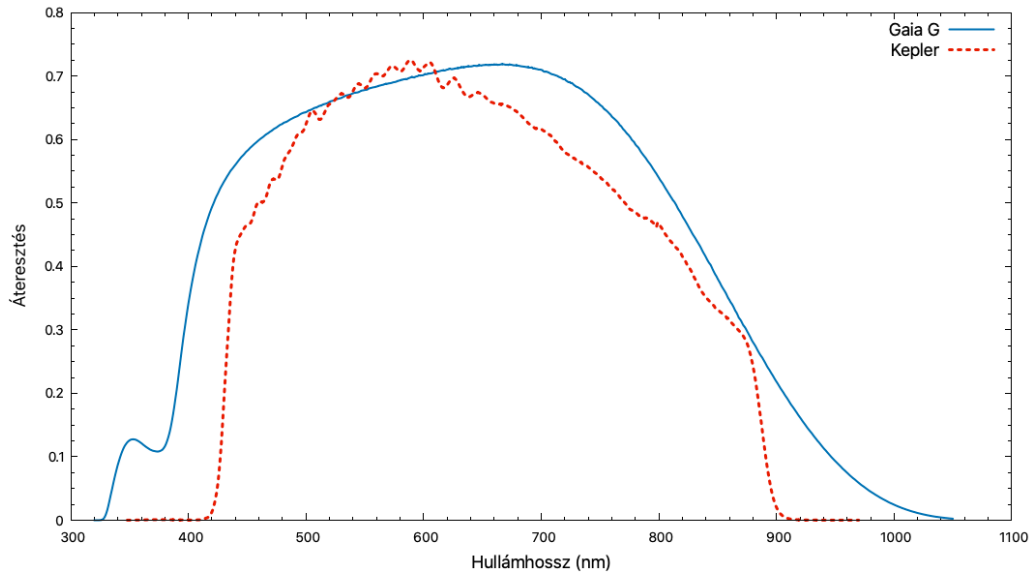


(a) A fekete, teli négyzetek a nem modulált, a piros, üres négyzetek a Blazhko-modulációt mutató csillagokat reprezentálják, a keresztek egyéb missziókból származó, összehasonlító adatpontokat. A folytonos fekete vonalak N13, a szaggatott kékek összehasonlítás céljából JK96 izometallicitás-vonalait jelzik.

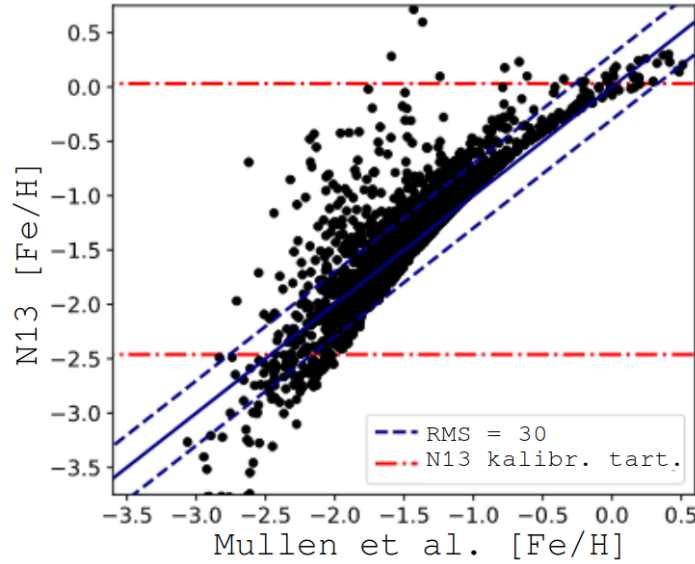


(b) A Kepler-mező RRc csillagait kék háromszögek jelzik, Kp sávból V -be transzformálva, az üres körök pedig Morgan et al. (2007) munkájából származó, az illesztésben ugyancsak felhasznált RRc adatpontok. A piros és a kék vonalak is a frissített illesztés azonos fémességű pontjait jelzik, a szaggatott pirosak ZW84, a feketék C9 fémességskáláján.

4. ábra. N13 illesztése az RRab és RRc csillagokra. Forrás: Nemec et al. (2013).



5. ábra. A *Kepler* Kp és a *Gaia* (E)DR3 G színsávok összehasonlítása. Mint látható, a két áteresztési függvény hasonló, de nem azonos, a G sáv mindkét irányban nagyjából 100 nm-rel szélesebb (Van Cleve & Caldwell, 2016; Gaia Collaboration et al., 2021).



6. ábra. Mullen et al. (2021) és az N13 illesztések összehasonlítása RRab csillagokra. A teljes egyezés különböző színsávokban felvettek lévén nem elvárt, de meglepően nagy a tapasztalt szisztematikus eltérés.

ugyanakkor nem azonosak, a G sáv például mindkét szélen távolabbi hullámhossztartományokig terjed (Rowe et al. (2009), Jordi et al. (2010)), így a G sávbeli fémességbecslés mindenképp szisztematikus hibát hordoz emiatt. A két áteresztési függvény összehasonlítását az 5. ábra mutatja be.¹

Ezt követően Mullen et al. (2021) pontosították a V , és elsőként megadták az I sávbeli RRab illesztést. A V sávban kapott értékeit összehasonlítva az N13 által Kp sávra adottakkal nagyon egyértelmű szisztematikus eltéréseket tapasztaltak a két formula között (6. ábra). Ez nem teljesen váratlan, mivel a V és a Kp sávok nem azonosak, viszont ha mindkét illesztést a saját sávjában teljesen megfelelőnek tekintjük, az a reláció alakjának nagyon erős színsávfüggésére utal, ami alapján sejthető, hogy az N13 reláció *Gaia* adatoktól való szisztematikus eltérése akár igen nagy is lehet.

Mivel a *Gaia* G fotometriai sávra jelenleg használt, fotometriai fémességbecslésre vonatkozó illesztések közül az RRab csillagokra alkalmazható a periódusokban csak szűk paraméterterre volt illesztve, nem kellően sok adatpont használata mellett, egy újabb kalibrációval való összehasonlítás pedig vagy rossz illeszkedésre, vagy a reláció erős színsávfüggésére utalt; mert az RRC csillagoké csupán 4 közvetlen adatpontra épült, és végül nem is közvetlenül Kp sávra lett illesztve; valamint a *Gaia* G és a *Kepler* Kp sávjainak különbözősége okán mindenképp levonhatjuk azt a következtetést, hogy a *Gaia* űrtávcső fotometriai fémességbecslése *Gaia* fotometriai adatok használatával mind RRab-k, mind RRC-k esetén felülvizsgálandó, és várhatóan újra is illesztendő.

¹Az ezen ábrázolt adatok forrása: *Gaia* (E)DR3 passbands, ill. SVO Filter Profile Service.

4. A reláció illesztése a *Gaia* űrtávcsőre

A *Gaia* űrtávcső segítségével, mint ahogy arra az eddigi fejezetek során rámutattam, fotometriai fémességbecslést lehet végezni a megfelelően pontos mérési adatokkal rendelkező RRab és RRc csillagokra. Ezen összefüggés pontosságában viszont van indokunk kételkedni, így célszerű annak felülvizsgálata és szükség esetén újraillesztése.

A következő alfejezetek betekintést nyújtanak a munkám során használt fotometriai és spektroszkópai adatsorok részleteibe.

4.1. A *Gaia* űrtávcső és a DR3 adatközlés

A *Gaia* űrtávcső az Európai Űrügynökség missziója, amely 2013 óta gyűjt adatokat. Küldetésének legfőbb céljai eddig nem látott pontosságú asztrometria, tehát többek között távolságmérés, emellett radiális sebességek kimérése egy szűk sávban végzett spektroszkópiával, valamint három színsávban (G – látható és közeli infravörös, G_{BP} – kék, G_{RP} – vörös és közeli infravörös tartomány) fotometriai adatok biztosítása, G sávban több, mint 20^m -ig.

A *Gaia* egy teljeségbolt-felmérő műszer, amely látómezejét az egész égbolton periodikusan végigvezeti, így asztrometriai méréseiből csillagok pozíciójának időfüggését, fotometriájából pedig a csillagok fénygörbéjét képes előállítani.

A misszió eredményei teljesen szabadon hozzáférhetőek, azokat feldolgozás után néhány évente közzéteszik. Eddig három ilyen adatkibocsátás (data release, röviden DR) történt (Gaia Collaboration et al. (2016), Gaia Collaboration et al. (2018), Gaia Collaboration et al. (2022)); a legújabb, az ún. DR3 2022. júniusában vált elérhetővé. Ennek adatainak egy részét az EDR3 (early data release, előzetes adatkibocsátás) már egy évvel korábban nyilvánosságra hozta (Gaia Collaboration et al., 2021).

Dolgozatomban a *Gaia* DR3 adataival dolgozom. Ennek katalógusa több, mint 270000 felismert RR Lyrae csillagot tartalmaz (Clementini et al., 2022). Ezek közül a G sávban mért φ_{31} paraméterek, azok $\Delta\varphi_{31}$ bizonytalanságával együtt, valamint az azokból N13 relációjával számolt fotometriai fémességek elérhetőek több, mint 130000 csillagra. Ez a hatalmas rendelkezésre álló adathalmaz mindenképp megerősíti az űrtávcső fotometriai fémességbecslésre való használatának lehetőségét és igényét.

A műszerrel való fotometriai fémességbecslés talán egyetlen lényeges nehézsége a fotometriai adatok pontatlansága. Mivel az *Gaia* esetében a csillagok nincsenek kvázi-folytonosan mérve, csillagonként csak néhány tucat adatpont áll rendelkezésre, ami miatt a φ_{31} paraméterek lényegesen pontatlanabbak lesznek. Munkámban azzal a 63837 csillaggal foglalkozom, amelyekre $\Delta\varphi_{31} < 0,2$, amely szűrőt egyes esetekben még szorosabbra húzok.

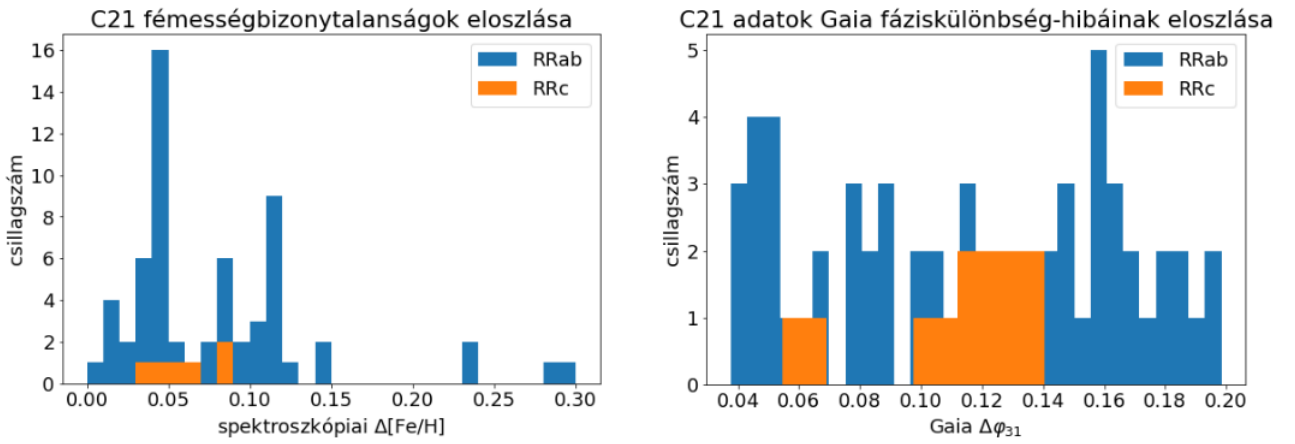
4.2. A használt spektroszkópai adatsorok

A fotometriai mérések ismertetése után a munkámban használt négy nagy felbontású spektroszkópai adatsort jelen alfejezet mutatja be egyenként, majd összehasonlítva.

4.2.1. A C21 adatsor

Crestani et al. (2021) a ΔS -módszer kalibrálásához egy nagy felbontású és kiváló minőségű, többnyire számos színkép összegzésével készült spektroszkópiai adathalmazt állított össze 143 mezőbeli RR Lyrae-re, amiből 111 RRab, 32 pedig RRc típusú. Az adatok többségét alkotó, ebből a célból felvett spektrumok látható tartományban készültek (a közeli infravörös egy részének tartalmazásával), amiket más forrásokból származó, szintén látható tartománybeli nagy felbontású spektrumokkal egészítettek ki. Az ezekből megkapott $[\text{Fe}/\text{H}]$ indexek Asplund et al. (2009) zérópontjára lettek hozva.

A *Gaia* DR3 kis φ_{31} -hibájú csillagokra vágott katalógusával vett metszését és összeegyeztetését tisztán koordináták alapján egy saját fejlesztésű Python kóddal végeztem, ami után 70 megfelelő adatpont adódott. Ebből 61 olyan RRab és 6 olyan RRc van², aminek minden használni kívánt adatára szerepel érték. Az ezekre vonatkozó bizonytalanságok eloszlása a 7. ábrán látható.



7. ábra. A C21 adatok fémesség- és φ_{31} -bizonytalanságainak hisztogramja.

4.2.2. Az APOGEE adatsor

Az APOGEE misszió (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) az SDSS-III (Sloan Digital Sky Survey) részeként az égbolt nagy skálájú, homogén, minden nagy csillagpopulációra kiterjedő spektroszkópiai felmérését tűzte ki célul. Ezt infravörös tartományban ($1,51 - 1,70 \mu\text{m}$) végzi, és elsődlegesen az objektumok és velük a Tejútrendszer kémiai összetételének vizsgálatára irányul (Majewski et al., 2017). A nagy felbontású spektroszkópiát számos (~ 300) optikai szálon, különböző csillagok egyszerre történő mintavételezésével végzi. A misszió legutóbbi adatközlése 2022 első felében történt meg az SDSS DR17 keretében (Abdurro'uf et al., 2022). Ebben 733901 csillag spektroszkópiai adatait tették szabadon elérhetővé.

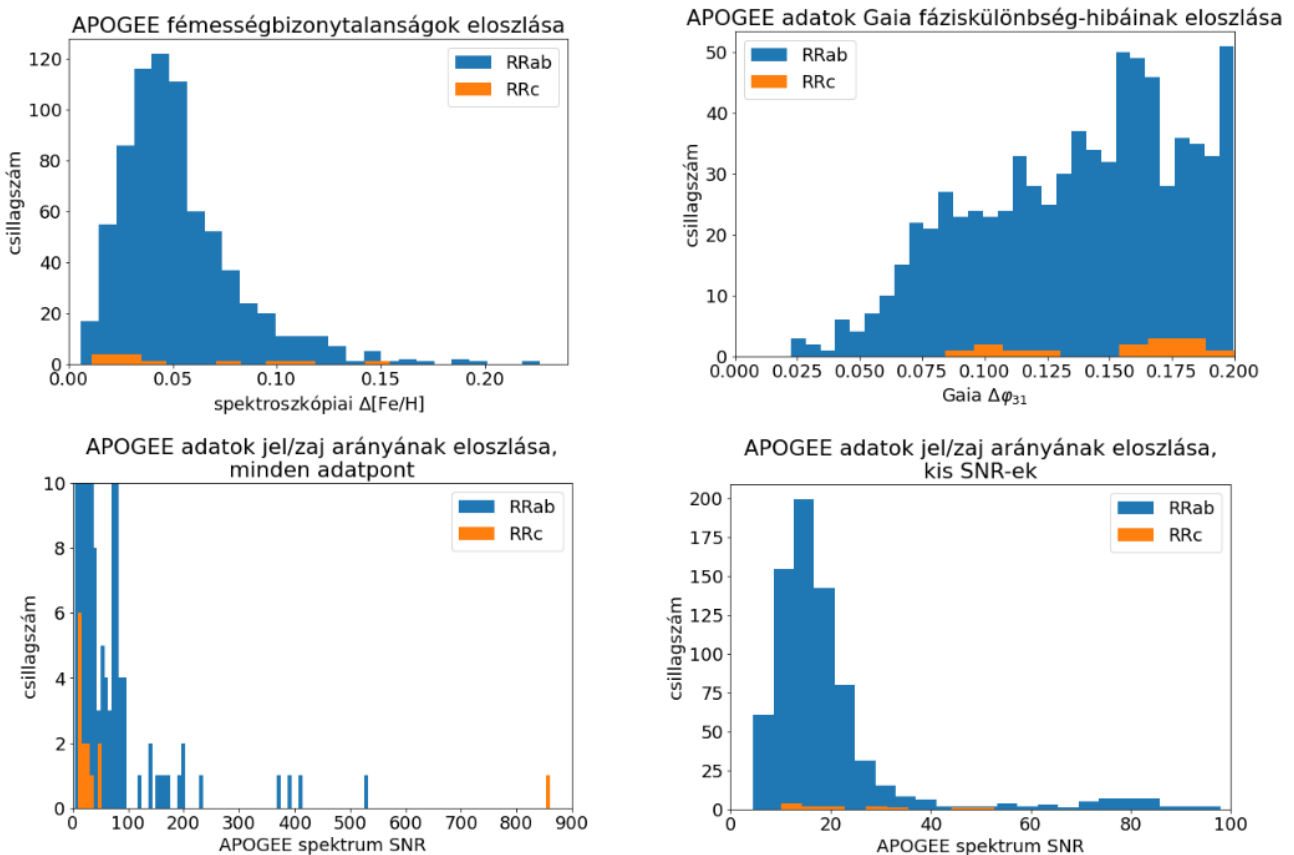
A mintát a *Gaia* DR3 katalógussal a Python `astropy.coordinates` modulja `SkyCoord` függvényének segítségével, tisztán koordináták alapján vettem össze, 2 ívmásodperces bizonytalanságot megengedve az egyes katalógusbeli szférikus helyzetek között. Így 1420 RR Lyrae adatpont adódott. Ezekből elvettem azokat, amelyek `STAR_BAD` flaggel, azaz a mérés rossz

²Az RRab és RRc csillagok válogatását itt és a továbbiakban az alapján végeztem, hogy a *Gaia* DR3 katalógusban melyik periódusok vannak megadva: ahol csak alaphangú, ott az RRab, ahol csak első felhangú, ott az RRc csoportba klasszifikáltam a csillagot; mindkettő megadása esetén RRd csillagról van szó, amelyekkel jelen munkában nem foglalkozom.

minőségére való figyelmeztetéssel voltak ellátva, ami után 942 olyan RR Lyrae maradt, amivel megkezdhettem a munkát.

Az APOGEE adatsor különlegessége, hogy nemcsak $[\text{Fe}/\text{H}]$, hanem $[\text{M}/\text{H}]$ értékeket is tartalmaz. Itt a csillag teljes fémtartalmára utaló $[\text{M}/\text{H}]$ index a teljes spektrumillesztésből adódik, és ez az, amire az APOGEE esetén fémességként hivatkoztunk a DR17 előtt, és hivatkozunk részben mindmáig. Ebben a $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékek az $[\text{M}/\text{H}]$ indexekből vannak továbbszámolva, így valamivel több bizonytalanságot hordoznak, de ma már ezeket is jól használhatóként mutatja be a misszió dokumentációja. Bár a $[\text{Fe}/\text{H}]$ és $[\text{M}/\text{H}]$ értékek igen erős korrelációt mutatnak egymással, mégiscsak elvi különbség van közöttük, amit figyelembe kell venni. Épp ezért munkámban a többi adatsor $[\text{Fe}/\text{H}]$ adatait az APOGEE $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékeivel együtt kezelem, azok az $[\text{M}/\text{H}]$ -nál kisebb közvetlensége és némileg nagyobb hibája ellenére is. Az APOGEE fémességskálájának Holtzman et al. (2015) szerint 0,1 – 0,2 dex-es szisztematikus eltérése lehet más fémességskálákhoz képest.

Mint az a 8. ábrán is látható, a spektroszkópiai fémességek hibája igen kicsi, a minta rengeteg nagyon pontos méréssel rendelkező RR Lyrae csillagot tartalmaz. Az adatsor dokumentációja szerint azonban ezek a hibák jelentősen alulbecsültek, valójában ezen értékek nagyjából kétszeresei. Ezt figyelembe veszem az illesztésekben az adatpontok súlyozásakor is. A spektrumok többsége viszont igen alacsony jel/zaj arányú, igen kicsiny részük van csak az APOGEE dokumentáció által vágási határnak javasolt $\text{SNR} = 50$ érték felett. Ez vélhetően főleg annak köszönhető, hogy az infravörös hullámhosszakon a 400 – 500 nm közötti maximumokkal sugárzó RR Lyrae-k Planck-görbéje már jórészt lecsengett, a forró csillagok kis jelet adnak ezen a tartományon.

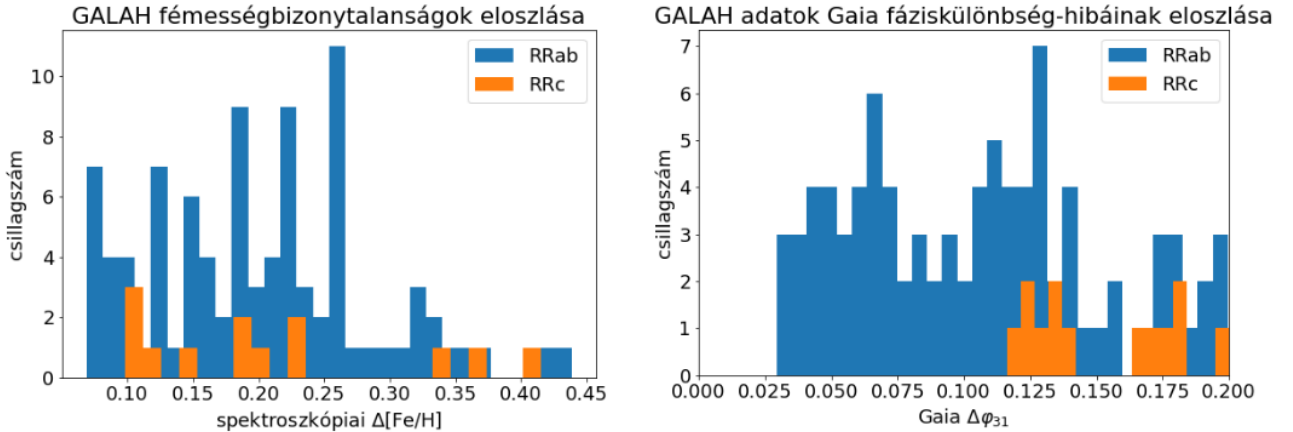


8. ábra. Az APOGEE adatpontok fémesség- és φ_{31} -bizonytalanságainak, valamint a spektrumok SNR-jének eloszlása.

4.2.3. A GALAH adatsor

A GALAH (Galactic Archaeology with HERMES) misszió több, mint egymillió csillagra végez a látható tartomány négy sávjában nagy felbontású spektroszkópiát a 3,9 m tükörátmérőjű AAT (Anglo-Australian Telescope) HERMES spektrográfiával, egyszerre akár mintegy 392 csillag színképét különböző optikai szálakon felvéve (De Silva et al., 2015). A spektrumokból kapott fémességek Grevesse et al. (2007) zérópontjainak megfelelően kerültek kiszámításra.

A program legfrissebb adatközlése (GALAH+ DR3) 2021 második felében történt (Buder et al., 2021), amely összesen 678423, nagyrészt 2 kpc távolságnál közelebbi csillag $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékét és egyéb paramétereit tette közzé, a GALAH első fázisának adatain és a HERMES néhány egyéb felmérésén együttesen alapulva. A GALAH+ DR3 katalógus a *Gaia* DR3 ID-kat is tartalmazza, így annak adatai az APOGEE missziónál leírt STAR_BAD flagekre szűrve, közvetlenül azonosító alapján lettek párosítva, Mészáros Szabolcs segítségével. Ezután 128 használható adatpont maradt – a felmért csillagok számának arányában az APOGEE misszióhoz képest vélhetően azért ilyen kevés, mivel a GALAH misszió nagyrészt a közelebbi környezetünkre korlátozódott, ahol az RR Lyrae-k számaránya sokkal kisebb, mint például a halóban. Ezek válogatása után, a lentebb leírt vágások elvégzése előtt, 90 olyan RRab és 13 olyan RRc maradt, amelyekre minden szükséges adat rendelkezésemre állt. Az innen származó adatpontok bizonytalanságait a 9. ábra mutatja be.



9. ábra. A GALAH adatok fémesség- és φ_{31} -bizonytalanságainak eloszlása.

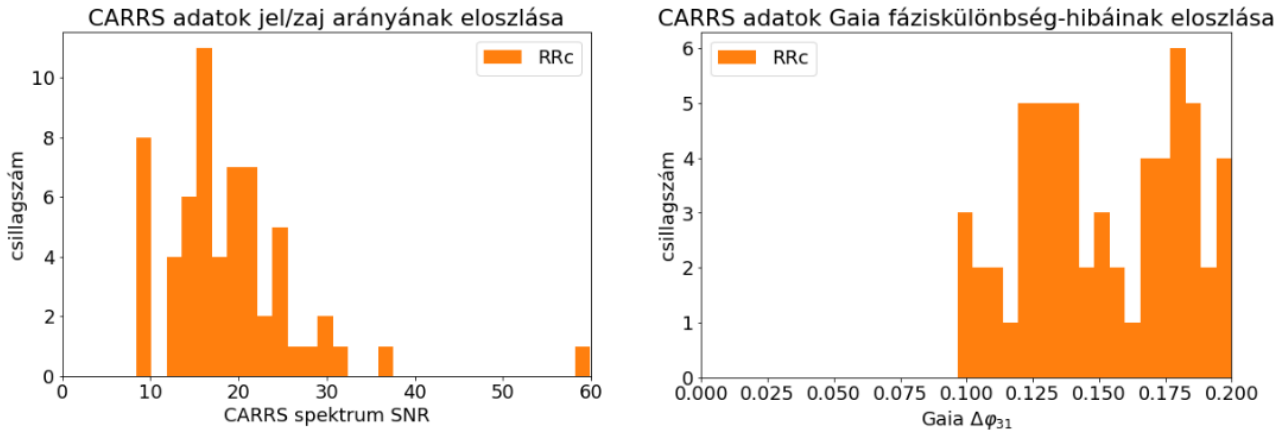
4.2.4. A CARRS adatsor

Sneden et al. (2018) munkája a CARRS (Carnegie RR Lyrae Survey) misszió alacsony SNR-ű (jel/zaj arányú) echelle spektrumokból adott meg $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékeket Chadid et al. (2017) fémességskáláján. Ez az adatsor kizárólag RRc csillagok fémességeit tartalmazza.

Ez 274 spektrumot, illetve az azok alapján mért $[\text{Fe}/\text{H}]$ értéket tartalmaz, amelyből azonban valójában csak 261 különálló csillag, 13 pedig újramért adatpont, ezek között pedig 3 feltételezhető δ Sct csillag is megtalálható. A három δ Scutit manuálisan kitöröltem az adatsorból, és bár a cikk az egyes spektrumokat külön-külön csillagként kezelte, én nem ezt tettem: a kétszer mért spektrumok közül a magasabb SNR-rel rendelkezőket hagytam meg, a másikat elvettem; egy esetben azonos SNR és csupán 0,05 dex-es eltérés esetén a magasabb fémességet tartottam meg; egy esetben, két hasonló SNR és szignifikánsan különböző fémesség esetén pedig mind a

kettőt elvettem. Így 257 adatponttal dolgoztam. Ezek bizonytalanságainak, valamint jel-zaj arányainak eloszlását mutatja be a 10. ábra.

A csillagokat az ASAS ID-ban szereplő kis pontosságú koordináta alapján egyeztettem a *Gaia* DR3 vágott katalógusával, amit, mivel a CARRS adatok ezeket az értékeket is tartalmazták, lehetőségem volt a megadott pulzációs periódusidők segítségével ellenőrizni. Ezek minden, a koordinátára való szűrés utáni esetben nagy pontossággal megegyeztek, megerősítve az elvégzett csillagegyeztetés helyességét. A koordináták alapján végzett egyeztetést ebben az esetben is az `astropy.coordinates` modullal végeztem, az APOGEE esetéhez hasonló módon. Mindez után 61 használható RRC adatpont maradt.



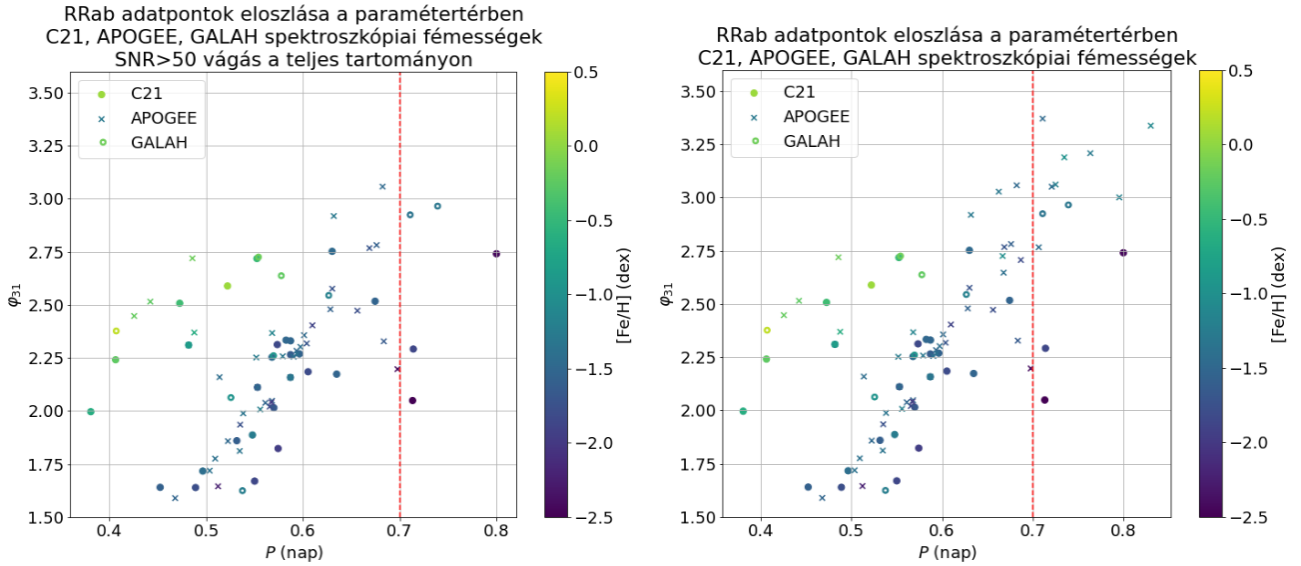
10. ábra. A CARRS adatok spektrumjai jel/zaj arányának és a hozzájuk tartozó φ_{31} -bizonytalanságoknak eloszlása.

4.3. A használt adatsorok szűrése és összehasonlítása

Az egyes adatsorokban, mint azt a 7., 8., 9. és 10. ábra is mutatja, igen nagy bizonytalanságú adatpontok is szerepelnek mind a spektroszkópiai, mind pedig a fotometriai fémességek tekintetében. Ezeket a bizonytalanságokat egyrészt célszerű figyelembe vennem az illesztés elvégzésekor, másrészt a lehető legtöbb rossz minőségű adatpontot érdemes elvetnem, amely vágás után még kellő mennyiségű adatponttal rendelkezem.

Ezen szűrések során az alábbi fő szempontokat vettem figyelembe:

- A katalógusokban összesen kb. 100 adott típusú csillag környékén és afelett már lényegesebb az, hogy csak minél jobb minőségű adatpontokat használjunk, mint hogy még több, nagyobb bizonytalansággal terhelt adatpontot is belevegünk az illesztésbe. Ez különösen fontos azért, mert más illesztésekkel (pl. N13) ellentétben itt a fotometriai adatok is szignifinás mértékű hibával terheltek.
- Az egyes vágások legyenek az adatsorok között következetesek, ne legyen közöttük túl nagy különbség. Ez az elv az RRC és az RRC csillagok között a fémességek tekintetében ugyancsak érvényes, a φ_{31} értékek esetén azonban nem, mivel azok az RRC-k esetében a fénygörbék jellegéből adódóan sokkal kevésbé egyértelműek, természetükből fakadóan nagyobb a bizonytalanságuk.
- A b) szempontnak látszólag ellentmondhat, de kis mértékben fontos a határok rugalmas kezelése, a többi elv jobb teljesülése érdekében.



11. ábra. A paraméterter betöltöttsége RRab csillagok esetén. A bal oldali ábrán $SNR < 50$ vágás érvényes, a jobb oldalin a finomított szűrés, $P > 0,65$ nap esetén a $20 < SNR < 50$ csillagokat is figyelembe véve.

- d) Lényeges a visszacsatolás: a későbbiekben részletezettek szerint figyelembe kell venni, hogy a vágások szűkítése jár-e a paraméterter szélén lévő, annak teljessége szempontjából fontos adatpontok kényszerű elvetésével, valamint hogy az illeszkedés minősége, többek között RMSD-je hogyan módosul.

Az a) pontnak megfelelően az RRab csillagok esetén igencsak leszűkítettem a határokat, a $\Delta\phi_{31}$ -ét 0,12-ig, a spektroszkópiai fémesség bizonytalanságát 0,12 dex-ig. Az APOGEE adatok esetén a $\Delta[Fe/H]$ felső határát némileg tovább csökkentettem – a c) pontnak megfelelően – két okból: egyrészt, mivel az APOGEE adatok fémességeinek hibája a 4.2.2. fejezetben kifejtetteknek megfelelően a megjelölteknek nagyjából kétszerese; másrészt, mert a fémességek az infravörös tartománybeli spektrumok miatt az optikai hullámhosszokon felvettekhez képest (ahogy erre Holtzman et al. (2015) is felhívja a figyelmet) szisztematikus eltérést mutathat, így előnytelen, ha nagy mértékben dominálnak.

Mindemellett az $SNR < 50$ APOGEE adatokat is elvetettem az adatsor dokumentációjának javaslatai szerint, ami igen jelentős csökkenéssel járt a használható adatpontok számában, ahogy az a 8. ábráról is könnyen leolvasható. Az SNR -re való szűrés után a legnagyobb spektroszkópiai fémességbeli bizonytalanság csupán 0,037 dex-nek adódott. Ezzel a szűréssel azonban $P \gtrsim 0,7$ tartományon, ahova az illesztés kiterjesztése jelen munka egyik fő célja, alig néhány adatpont marad, holott számos APOGEE RRab esik arra a tartományra, amelyek spektroszkópiai becsült fémességének hibája igen kicsi, csak SNR -je nem nő a meghatározott limit fölé. Ennek megfelelően a paraméterter lehető legteljesebb lefedése érdekében $P > 0,65$ nap esetén a $20 < SNR < 50$ csillagokat is belevettem az illesztésbe. Megjegyzendő, hogy az így bekerült legnagyobb spektroszkópiai fémesség bizonytalanság 0,052 dex, aminek a realisabb becslésnek bizonyuló kétszerese is a többi adatsor vágása alatt van, így nem kerültek be az illesztett adathalmazba a kelleténél bizonytalanabb adatpontok. A paraméterter az ilyen irányú engedés előtti és utáni betöltöttségét a 11. ábra mutatja.

Az RRc csillagok esetén a kiindulási adathalmaz elemszáma is jócskán 100 alatti, így azok szűrését nem szigorítottam sokkal tovább, csupán az RRab-k esetén megállapított $\Delta[Fe/H]$

vágásokat végeztem el, valamint a CARRS adatok esetén – mivel azoknál $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ nem, csak SNR van megadva – az $\text{SNR} < 9$ adatpontokat elvetettem. A pontos határ meghúzásakor a d) pont szem előtt tartásával az alsó határ helyét, amit enélkül $\text{SNR} = 10$ -nek választottam volna, kicsit csökkentettem, hogy egy kiemelkedően magas fémességű adatpont segíthesse a paramétertér minél szélesebb lefedését.

Az egyes spektroszkópai adatsorok legfőbb jellemzőit, valamint a válogatások és vágások előtti és utáni elemszámait az 1. táblázat tartalmazza.

Adatsor:	C21		APOGEE		GALAH		CARRS
A spektrumok tartománya:	látható		közeli infravörös		látható		látható
Gaia DR3, $\Delta\varphi_{31} < 0.2$ metszet elemszáma:	70		773		128		61
Csillagegyeztetés alapja:	koordináta		koordináta		Gaia DR3 ID		koordináta, periódus
Vágások:	RRab	RRc	RRab	RRc	RRab	RRc	RRc
Gaia $\Delta\varphi_{31} \leq$	0,12	0,20	0,12	0,20	0,12	0,20	0,20
Spektr. $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] \leq$	0,12	0,12	0,09	0,09	0,12	0,12	—
Spektrum $\text{SNR} \geq$	—	—	50 ill. 20	50	—	—	9
Megfelelő adatpont:	29	6	40 + 12	2	9	4	59

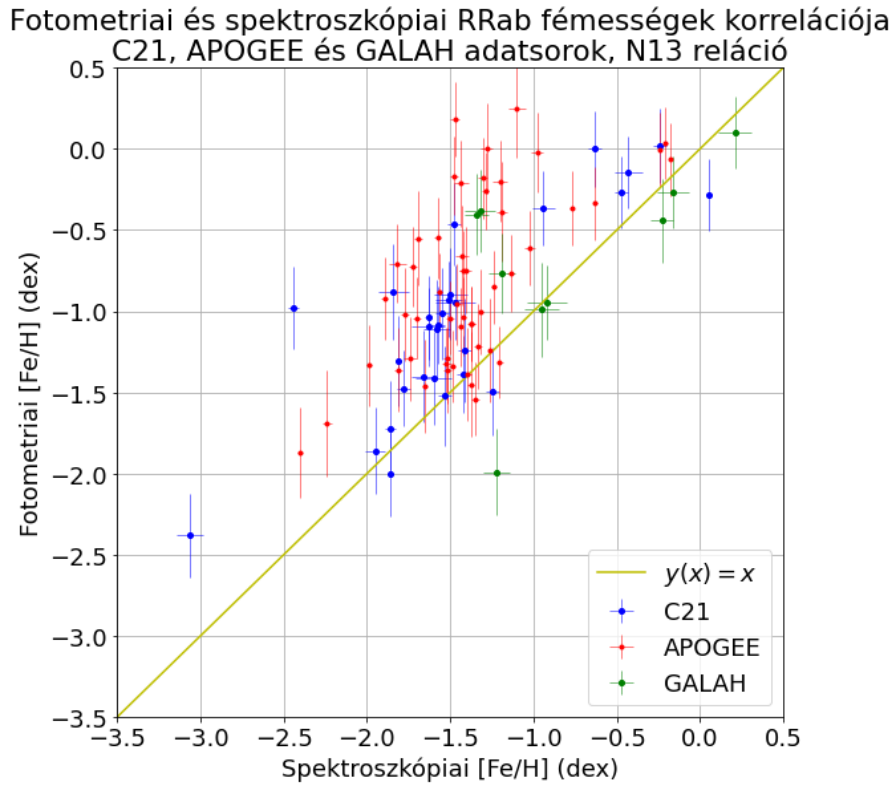
1. táblázat. A használt spektroszkópai adatsorok legfőbb jellemzői, a *Gaia* DR3 katalógussal való keresztegyeztetésének módjai, valamint a rajtuk végzett vágások értékei. Az APOGEE RRab-k esetén az $\text{SNR} = 50$ -nél való vágás $P = 0,65$ nap alatt, az $\text{SNR} = 20$ -nál való afelett értendő, valamint a megfelelőnek bizonyuló adatpontszám is.

4.4. Illesztés az RRab-kre

A 4.3. alfejezet ismertette a megvágott adatsorokat, amelyeket az illesztések elvégzéséhez használhatunk. Mint azt a 3.4. alfejezetben megmutattam, célszerű újrailleszteni mind az RRab, mind az RRc csillagok fotometriai fémességbecslésének összefüggését. Ezt az RRab-k esetére a 12. ábra rendkívül erősen alátámasztja: teljesen egyértelmű, jócskán hibahatárokon kívüli a jelenlegi összefüggéssel becsült fotometriai fémségek szisztematikus eltérése a spektroszkópiából kapottaktól.

A szűrések határainak meghatározása és az adatpontok a későbbiekben részletezett súlyozása mellett a munkám egyik sarkalatos pontja az egyes adatsorok együttes kezelésének pontos módja.

A teljes pontosság igénye mellett a különböző forrásokból származó spektroszkópai adatsorokat nem összegezhethetném egy nagy adathalmazzá, és végezhetném el arra az illesztést, mivel az egyes adatsorok a 4.2. alfejezetben bemutatottak szerint különböző fémességskálákra értelmezettek, különböző zéróponttal, azaz a Nap fémességére más-más értékeket használva, valamint nem pontosan egyező feldolgozási módokkal lettek kiszámolva. Tehát az egyes adatsorok $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékei ugyanazt igyekeznek leírni, ám bár elvi, és ugyan nem nagy, de nem is elhanyagolható szisztematikus eltérések lehetnek közöttük. A 4.2. alfejezetben bemutatottak szerint ezek az eltérések nagyjából $0,1 - 0,2$ dex nagyságrendűek lehetnek.



12. ábra. A használt RRab adatsor csillagai *Gaia* fotometriai és spektroszkópiai fémességeinek összehasonlítása. Teljesen egyértelmű a szisztematikus eltérés: Az N13 reláció jelentősen felülbecsüli a *Gaia* fémességértékeket.

Ezeknél azonban sokkal nagyobb szisztematikus eltéréseket okoz az, ha nem fedjük le a lehető legnagyobb paraméterteret. A 11. ábra jobb oldali paneljén látszik, hogy ahhoz, hogy teljes elvárható tartományt kellő sűrűségben adatpontokkal tudjuk lefedni, nem elegendő egyetlen adatsor használata: a C21 és az APOGEE csillagok együttes alkalmazására mindenképpen szükség van. Mivel a homogenitás előnyével már semmiképp nem lehet élni, érdemes használni a csupán 9 megfelelő adatpontból álló, de a nagy periódusú és nagy fémességű tartományt értékes adatpontokkal kiegészítő GALAH adatsort is. Ahogy az a 6. fejezetben is olvasható, az egyes missziók fémességértékei között adódik néhány lehetőség a szisztematikus eltérések csökkentésére, többek között a zéróponti korrekciók megtételével. Én ezeket jelen munkámban még nem végeztem el, azonban az eredmények esetleges publikációja előtt ez mindenképp egy hátralévő feladat.

A fentieknek megfelelően az RRab csillagokra vonatkozó illesztést a C21, az APOGEE és a GALAH szűrt adatsorainak együttes használatával teszem meg, mégpedig a $[Fe/H]$ indexet a P periódus és a φ_{31} fáziskülönbség függvényében becsülve. Az illesztés elvégzése előtt két kérdés vár megválaszolásra: az egyik az, hogy milyen alakú függvény illesztendő az adatsorra, a másik pedig, hogy az adatpontok súlyozását milyen paramétereknek illetve bizonytalanságoknak függvényében érdemes végezni. A használt függvényalaknak az eddigi illesztések tapasztalatainak megfelelően (3.3., 3.4. alfejezetek) az általános másodfokú, tehát hat szabad paraméteres polinomot választom, az együtthatókat az alábbiak szerint definiálva, ahol a P periódus napokban, a $[Fe/H]$ fémesség pedig dex-ben van megadva:

$$[Fe/H] = a \cdot P^2 + b \cdot \varphi_{31}^2 + c \cdot P\varphi_{31} + d \cdot P + e \cdot \varphi_{31} + f$$

Ez az általánosság természetesen csökkenthető abban az esetben, ha egyes illesztési paraméterek

hibahatáron belül zérus értéket vesznek fel, vagy ha az együtthatók bizonytalansága általánosan túl nagyok adódik.

Az egyes adatsorokon belül a súlyozást a $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ bizonytalanságokkal fordítottan arányosan végeztem. Ez tovább lenne pontosítható a $\Delta\varphi_{31}$ értékek figyelembevételével, amire például a Python `scipy.odr.ODR` függvénye segítségével való illesztés jelenthetne megoldást. Ez azonban a vele való munka során a kezdeti paraméterektől nagyon erősen függve mindig csak egy lokális optimumot talált meg, használatához az algoritmus módosítására lenne szükség. Én így a Python `scipy.optimize` moduljának `curve_fit` függvényével³ végeztem az illesztést, a bizonytalanságokat minden esetben csak súlyokként, nem mint a paraméterek valódi hibáját kezelve.

Az adatsorok közötti súlyozás szintén a fémességek hibáján alapul. A C21 és GALAH adatok között – a hibabecsléseket megfelelően feltételezve – nem vezettem be egységtől különböző szorzót súlyozáskor, az APOGEE adatok bizonytalanságát viszont a katalógusban becsültek kétszeresének vettem, annak a 4.2.2. alfejezetben részletezett feltevésnek megfelelően, hogy azok nagyjából egy 2-es faktorról alulbecsültek.

Az illesztés során tehát a súlyokat a spektroszkópiai fémességek bizonytalanságai reciprokanak feleltettem meg a C21 és a GALAH adatpontok esetén, az APOGEE csillagoknál pedig az így kapott érték felének. A kapott függvény a következőnek adódott:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 7,7 \cdot P^2 - 0,15 \cdot \varphi_{31}^2 + 0,03 \cdot P\varphi_{31} - 15,2 \cdot P + 1,78 \cdot \varphi_{31} + 1,51$$

Itt az illesztés súlyozott közepes négyzetes eltérése (RMSD, az illesztéssel egyező súlyozással⁴) 0,5947 dex-ről 0,2436 dex-re javult, a paraméterek hibái pedig rendre a következők: $\Delta a = 3,8$, $\Delta b = 0,26$, $\Delta c = 1,71$, $\Delta d = 4,2$, $\Delta e = 0,69$, $\Delta f = 1,30$.

Jól látható, hogy a φ_{31}^2 együtthatója jócskán hibahatáron belül nulla, így ezen tag elvetése mellett döntöttem ($b = 0$). Azért ezt vetem el elsőként, és nem a még pontosabban nulla $P\varphi_{31}$ együtthatót, mivel utóbbi φ_{31} -et alacsonyabb rendben tartalmazza. Az összefüggést immár csupán 5 szabad változóval újraillesztve a következő paraméterek adódtak:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 8,3 \cdot P^2 - 0,80 \cdot P\varphi_{31} - 13,8 \cdot P + 1,53 \cdot \varphi_{31} + 1,37,$$

ahol az együtthatók bizonytalanságai a következők: $\Delta a = 3,7$, $\Delta c = 0,94$, $\Delta d = 3,5$, $\Delta e = 0,53$, $\Delta f = 1,28$, az RMSD pedig 0,2441 dex, ami láthatóan alig, csupán 0,0005 dex-szel nagyobb a hat szabad paraméteres illesztésével. Ez alátámasztja, hogy a φ_{31}^2 tag együtthatóját zérusnak vehetem az illeszkedés jóságának lényeges romlása nélkül.

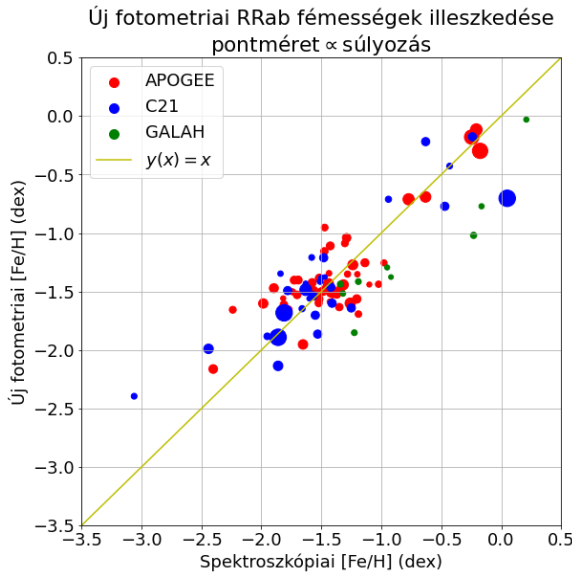
A $P\varphi_{31}$ tag együtthatója 6 paraméteres illesztés esetén szinte pontosan nulla volt, 5 paraméter esetén pedig ez még mindig teljesült egyszeres hibahatáron belül. Ezek indokolják a reláció illesztésének megpróbálását ezen paraméter ugyancsak nullának vétele mellett ($b = 0$ és $c = 0$),

³A függvény súlyozáshoz használt `sigma` argumentumához az egyes súlyok négyzetgyökét kellett megadnom ahhoz, hogy az adatpontok a kívánt súllyal rendelkezzenek.

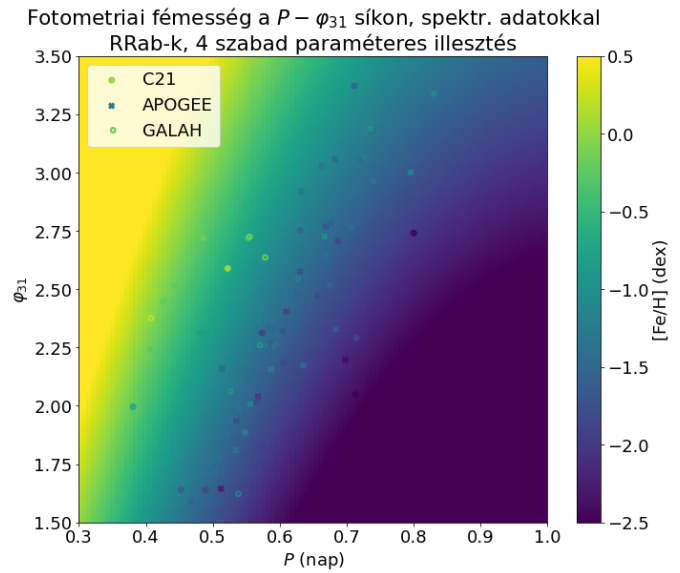
⁴RMSD: Root Mean Square Deviation, az egyes adatpontok mért és becsült értékei eltérésének súlyozott négyzetes közepe:

$$RMSD = \sqrt{\sum_i w_i \left([\text{Fe}/\text{H}]_{\text{mért}, i} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{számolt}, i} \right)^2},$$

ahol a w_i értékek az egyes adatpontok súlyai, úgy, hogy $\sum_i w_i = 1$. Mind a régi, mind az új illesztésekre vonatkozó RMSD kiszámításakor az illesztésnél a fémességbizonytalanságokkal bevezetett w_i súlyokat alkalmazom. A szabad paraméterek számára nem végzek korrekciót.



(a) Az új RRab fotometriai és spektroszkópiai fémességek korrelációja. Bár az adatok továbbra is szórnak az egyezés egyeneséhez képest, az eddigi illesztéssel (12. ábra) ellentétben ez valóban az $y(x) = x$ egyenes körül történik; sikerült megszabadulni fémességek szisztematikus felülbecslésétől, az illeszkedés minősége szignifikánsan javult.



(b) Az RRc fotometriai fémességbecslés új egyenlete színezéssel, a spektroszkópiai fémességekkel együtt ábrázolva. A vizualizáció a kiugró adatpontok kiemelését segíti: míg ezek egyértelműen látszanak, a jó egyezést mutatóak a háttérbe olvadnak.

13. ábra. Az új RRab illesztés vizualizációja.

aminek jóságáról az RMSD növekedésének mértéke ad visszajelzést. Az így kapott egyenlet:

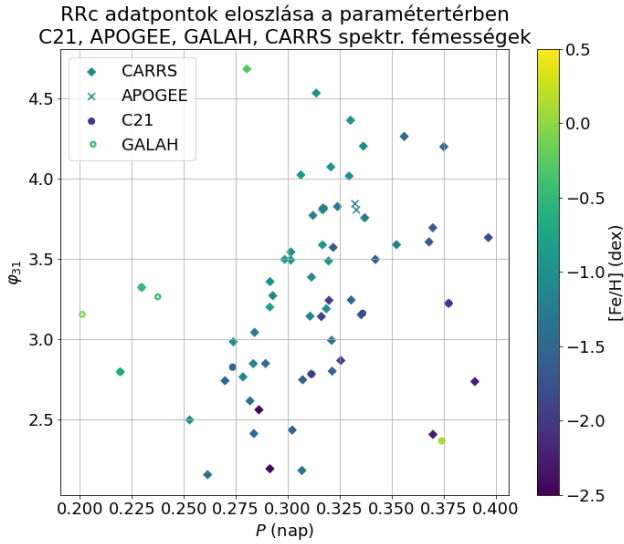
$$[\text{Fe}/\text{H}] = 6,5 \cdot P^2 - 13,9 \cdot P + 1,08 \cdot \varphi_{31} + 1,95,$$

ahol az együtthatók bizonytalanságai a következők: $\Delta a = 3,0$, $\Delta d = 3,5$, $\Delta e = 0,09$, $\Delta f = 1,08$, az RMSD pedig 0,2451 dex, ami csupán 0,0010 dex-szel nagyobb az öt szabad paraméteres illesztésénél, ami igen kis különbség. Ez alátámasztja azt, hogy érdemes ezt, a csupán négy (a , d , e , f) szabad paraméteres összefüggést használni.

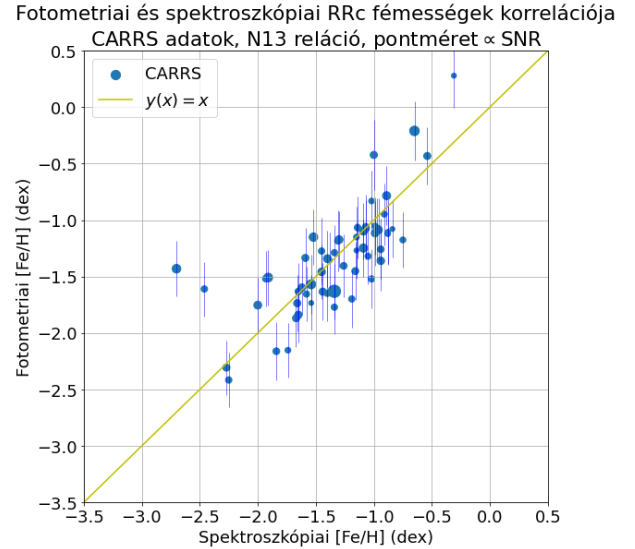
Nagyon fontos kiemelni, hogy bár a kapott paraméterek nagy hibája nyomjelzője lehet például annak, hogy kevesebb illesztési paraméter mellett is kellően pontos lehet az összefüggés, az egyes paraméterek nem korrelálatlanok, így hibás lenne az egyes paraméterek egyenkénti bizonytalanságaiból magának az illesztésnek a pontosságára következtetni, tehát például a fotometriai fémességtértek bizonytalanságának megadását megkísérelni az egyes paraméterek hibáiból Gauss-féle hibaterjedéssel származtatni. Az egyes P és φ_{31} értékek alapján a kapott $[\text{Fe}/\text{H}]$ index hibabecsléséhez ennél jóval összetettebb módszerekre van szükség, amikkel jelen munkában nem dolgozom. Az illesztett összefüggést, valamint a kapott fotometriai fémességtértek spektroszkópiával való összehasonlítását a 13a. és 13b. ábrák mutatják be, a teljes illeszkedés minőségét pedig az RMSD segít leírni.

4.5. Illesztés az RRc-kre

A 4.3. alfejezetben elvégzett szűrés után a 14a. ábrán látható adatpontok maradtak meg. Mint az a grafikonon jól látható, a CARRS adatsorok önmagukban is kiválóan lefedik az elvárható



(a) Az RRc adatpontok paraméterterbeli eloszlása. A CARRS adatsor a teljes elvárható tartományt lefedi.



(b) Az RRc csillagok esetén használt CARRS adatsorra a fotometriai és az N13 spektroszkópiai fémettségek összehasonlítása.

14. ábra. Az RRc adatsorok jellemzése.

paraméterteret, nem jelent lényeges javulást a néhány más forrásból származó adatponttal való együttes alkalmazás. Ennek következtében azért, hogy a minta homogenitását és egy jól definiált fémettségskálán való értelmezhetőségét megtartsam, a CARRS adatsoron kívüli csillagokat elvetem, és a továbbiakban kizárólag az abból maradt, 59 csillagból álló homogén mintával dolgozom.

Mint a 14b. ábrán látható, az RRc csillagok jelenlegi fotometriai fémettségei és a mért, spektroszkópiai értékek között nem figyelhető meg olyan egyértelmű szisztematikus eltérés, mint az RRab-k esetén, de a jelenlegi, N13 illesztés 3.4. alfejezetben részletezett nagyfokú közvetettsége miatt mégis érdemes újrailleszteni az összefüggést.

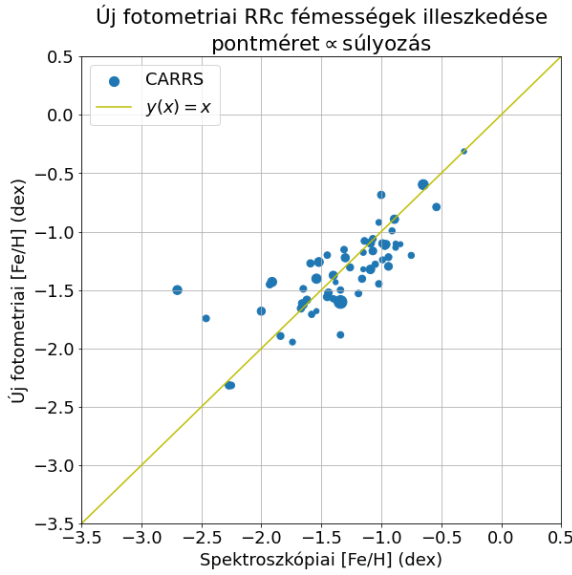
Az adatpontok súlyozását ebben az esetben az SNR értékekkel arányosan végeztem. Az RRab-k esetéhez hasonlóan itt is a `scipy.optimize.curve_fit` függvénnyel dolgoztam, és ebben az esetben is az ott ismertetett általános másodfokú polinomiális illesztésből indultam ki. Ebből az alábbi összefüggés adódott:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 9,3 \cdot P^2 - 0,12 \cdot \varphi_{31}^2 - 1,52 \cdot P\varphi_{31} - 9,8 \cdot P + 1,80 \cdot \varphi_{31} - 2,25,$$

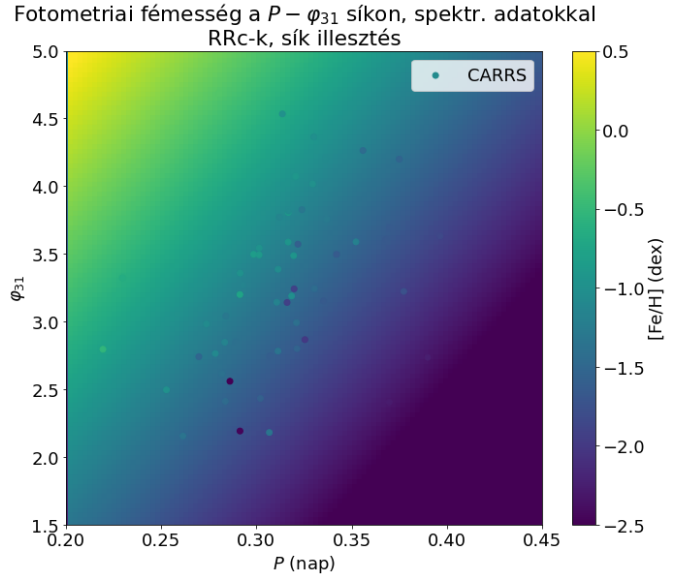
ahol az együtthatók bizonytalanságai rendre a következőknek adódtak: $\Delta a = 20,8$, $\Delta b = 0,11$, $\Delta c = 2,31$, $\Delta d = 13,2$, $\Delta e = 0,89$, $\Delta f = 2,73$, az RMS pedig az eredeti 0,3399 dex-ről 0,2971 dex-re csökkent.

Látható, hogy szinte az összes illesztési paraméter bizonytalansága az értékével hasonló nagyságú, ami a közöttük lévő korreláció miatt közel sem jelenti azt, hogy az így kapott összefüggés alapján később számolt értékek nagy bizonytalansággal terheltek lennének, azt viszont indikálja, hogy az illesztés vélhetően kevesebb szabad paraméterrel, alacsonyabb rendű polinommal is hasonló pontossággal megvalósítható.

Ennek megfelelően a másodfokú tagok együtthatói közül egy-egy, majd kettő-kettő nullának vételével próbálkoztam, de egyik sem adott kielégítő relatív pontosságú együtthatókat. Végül, a JK96 által végzett első ilyen jellegű RRab illesztéshez hasonló módon, a síkillesztés mellett



(a) Az új RRc fotometriai és spektroszkópiai fémességek korrelációja. Bár az adatok továbbra is szórnak az egyezés egyeneséhez képest, az eddigi illesztéshez (14b. ábra) képest sikerült az illesztési paraméterek számát és az átlagos négyzetes eltérést egyszerre csökkenteni.



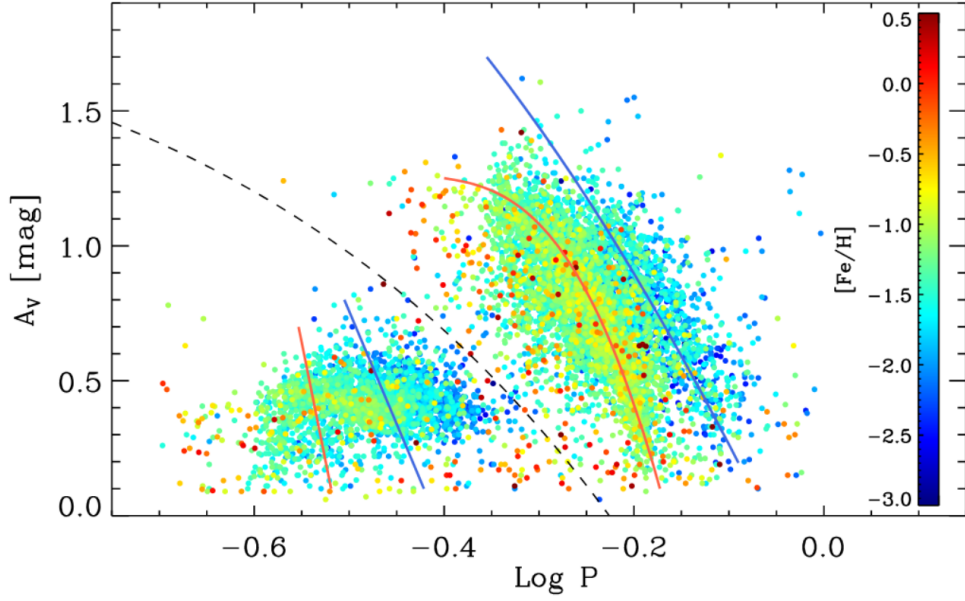
(b) Az RRc fotometriai fémességbecslés új egyenlete színezéssel, a spektroszkópiai fémességekkel együtt ábrázolva. A vizualizáció a kiugró adatpontok kiemelését segíti: míg ezek egyértelműen látszanak, a jó egyezést mutatóak a háttérbe olvadnak.

15. ábra. Az új RRc illesztés vizualizációja.

állapodtam meg, amivel a következő összefüggést kaptam:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -8,8 \cdot P + 0,53 \cdot \varphi_{31} - 0,36.$$

Itt a paraméterek bizonytalanságaira rendre $\Delta d = 1,2$, $\Delta e = 0,08$, $\Delta f = 0,37$, az illesztés RMSD értékére pedig 0,3033 dex adódott, ami az általános másodfokú függvény illesztése esetén kapott 0,2971 dex értéknél 0,0062 dex-szel több, ami nem nagy ahhoz képest, hogy a szabad paraméterek száma felére csökkent, és még mindig jobb az eredeti, több szabad paraméterrel megtett illesztésnél. Az így kapott összefüggést, valamint a becsült értékek a spektroszkópiai adatokkal való korrelációját a 15a. ábra mutatja. A spektroszkópiai és fotometriai fémességek láthatóan kiválóan egyeznek.



16. ábra. Fabrizio et al. (2021): Oosterhoff-dichotómia a Bailey-diagramon. Az RRC csillagok a bal alsó, az RRab-k a jobb felső régióban láthatóak. A fémességértékek kis felbontású spektroszkópiából a ΔS -módszerrel voltak kiszámítva. $\log P$ alatt a napokban vett periódus 10-es alapú logaritmusára értendő, az y -tengelyen pedig a V sávbeli pulzációs amplitúdó látható.

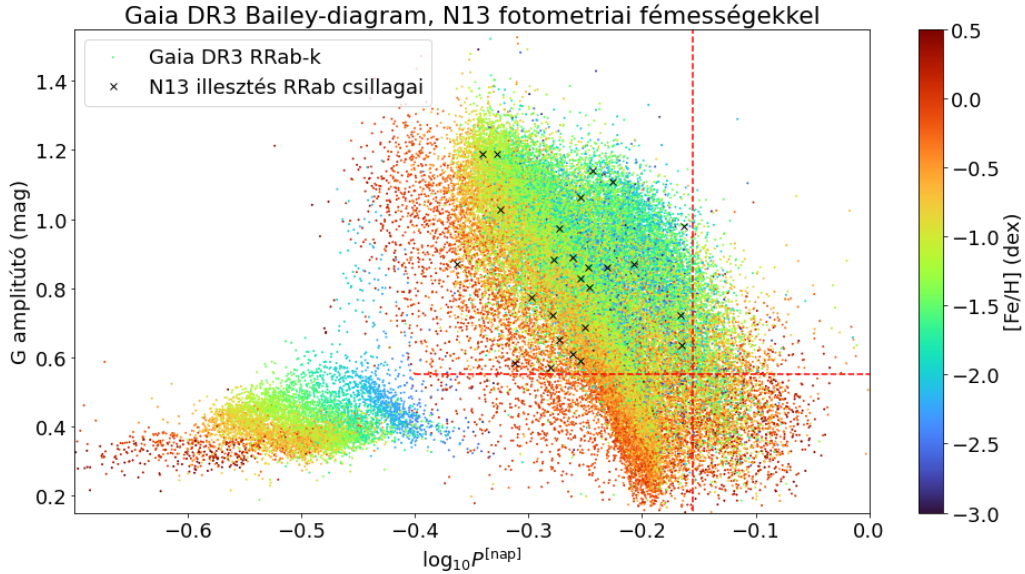
5. A pontosított reláció gyakorlati alkalmazása

Eddig bemutatott munkámban sikerült mind az RRab, mind az RRC csillagokra vonatkozó fotometriai fémességbecslés összefüggését pontosítanom. A továbbiakban az új relációk gyakorlati hasznát mutatom meg a Bailey-diagram pontosításán és a Magellán-felhők fémességeloszlásának vizsgálatán keresztül.

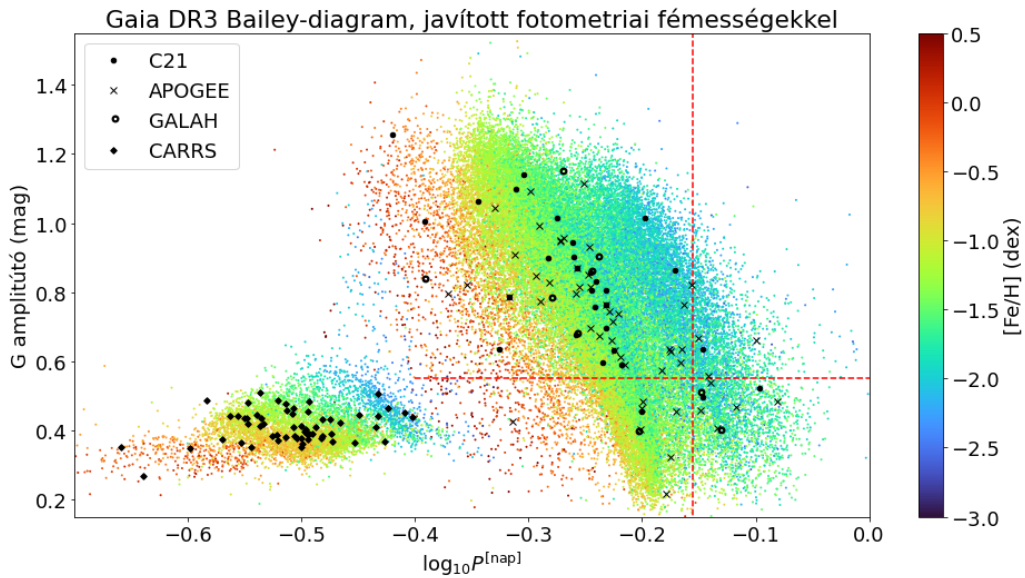
5.1. A Bailey-diagram

A 2.1. alfejezetben már említett Bailey-diagram pulzáló változócsillagok esetén a fénygörbe teljes amplitúdóját és periódusát mutatja közös ábrán. Az RR Lyrae-k Bailey-diagramját gyakran érdemes a fémségek bemutatásával, általában azok szerint színezve ábrázolni.

A Bailey-diagram jelentőségét az adja, hogy a rajta ábrázolt mennyiségek nem függenek a távolságtól, az interstelláris extinkciótól és vörösödéstől sem, a rajta látható csillagok eloszlása csupán a fémség, illetve a csillagok egyéb belső fizikai tulajdonságai szerint alakul ki, úgy mint a hőmérséklet, a tömeg és a luminozitás. Emiatt az egyes tulajdonságaikban különböző csillagpopulációk is különválnak rajta, úgy mint az RR Lyrae-k különböző átlagos fémségű és periódusú ún. Oosterhoff-csoportjai (Fabrizio et al., 2021). Ez a kettősség, az Oosterhoff-dichotómia a 16. ábrán jól láthatóan megmutatkozik: a tipikusan rövidebb periódusú OoI és a hosszabb periódusú OoII csoport trendjeit az adatpontok sűrűsége, valamint a fémségek kirajzolják. Utóbbinak az az oka, hogy, bár amplitúdó és periódus alapján is próbálkoztak fotometriai fémségbecsléssel, például KZS95, a $[Fe/H]$ értékek nem becsülhetők pontosan kizárólag ezen két paraméter alapján, hanem más, az Oosterhoff-csoportok között szisztematikusan eltérő adatoktól is függhetnek. Így az OoI és az OoII csoportok fémségeloszlása a Bailey-diagramon egymáshoz képest némileg eltolódni látszik.



17. ábra. Az N13 illesztés alapján készített *Gaia* DR3 Bailey-diagram a számolt fémességekkel színezve, az RRab illesztéshez használt N13 adatpontok feltüntetésével. Az ezek által le nem fedett, így N13 által extrapolációval becsült, kis amplitúdójú és nagy periódusú régiókban egy, az észleléseknek (16. ábra) teljesen ellentmondó, a fémességet jelentősen túlbecslő trend jelenik meg. Ezen régió határait szaggatott vonalak jelzik.



18. ábra. Az új illesztések alapján készített *Gaia* Bailey-diagram fémességekkel, a használt adatpontokat feltüntetve mind RRab-k, mind RRc-k esetén. Mindkét csoport paramétertere szinte teljesen kielégítő módon le van fedve, az RRab-k az észleléseknek ellentmondóan fémgazdagnak tűnő régiói immár helyesen látszanak. Az ábra a 17. ábrán bevezetett, a régi illesztés paraméterterének két határát jelző szaggatott vonalakat is mutatja.

A *Gaia* űrtávcső fotometriai fémességbecslésre való használata a Bailey-diagram és hasonló, statisztikusan kezelhető csillagsokaságok vizsgálata esetén kiemelten hasznos: Ha a fotometriai fémességbecslés függvényének illesztésében nincsen nagy szisztematikus hiba, akkor a statisztikusnak tekinthető eltérések a trendekben nem mutatkoznak meg, a sok ezres vagy akár tízezres adatsorokban ezek kiejtik egymást.

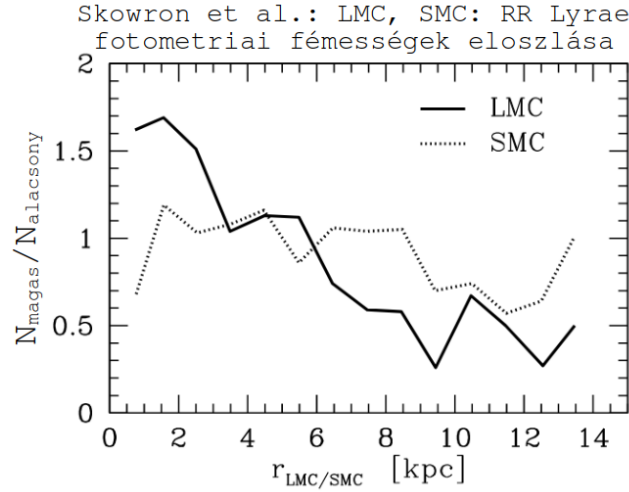
A *Gaia* űrtávcső jelenlegi, N13 szerint kapott fotometriai fémességeinek Bailey-diagramon való eloszlása a 17. ábrán látható. Ezen az RRab csillagokra nagy periódusoknál és kis amplitúdóknál teljesen egyértelmű eltérés mutatkozik a 16. ábra spektroszkópai módszerekkel kapott fémességeloszlásától: ezekben a régiókban *Gaia* mindmáig használt fotometriai fémességbecslési összefüggéséből egy, az észlelésekkel alá egyáltalán nem támasztott, fémgazdag trend mutatkozik. Ennek nemcsak az észlelések mondanak ellent, hanem a pulzációs modellek is, amik szintén nem mutatják az izometallicitás-vonalak nagy periódusok és kis amplitúdók esetén mutatkozó, nagyobb amplitúdók felé való elhajlását (Catelan & Smith, 2015a).

Ennek okát nagy valószínűséggel az adja, hogy N13 illesztéséhez felhasznált mintában a 17. ábrán látható módon egyáltalán nem szerepelt se $A_G = 0,55^m$ -nál kisebb G sávbeli amplitúdójú csillag, se $P = 0,7$ napnál hosszabb periódusú, így az ellentmondásos régiókra az eddigi illesztés függvénye tisztán extrapolációval végzett becslést, ami egy hasonló, empirikus összefüggés esetén alapjaiban rossz eredményre is vezethet – ez jelen esetben vélhetően valóban be is következett.

A jelen munkában pontosított fotometriai fémességbecslő reláció segítségével újraszámoltam ezen csillagok fémességeit, és ennek megfelelően újraábrázoltam a Bailey-diagramot a javított fotometriai fémességekkel (18. ábra). Ezen az illesztésben használt adatpontokat is feltüntettem, amik láthatóan szinte az egész paraméterteret lefedik mind az RRab, mind az RRC csillagok tartományán; előbbiek esetén sokkal szélesebben, mint az eddigi illesztés. Míg RRC-k esetén mindkét esetben hasonló és az észlelésekkel is jól egyező fémességeloszlást kapunk, tisztán látszik, hogy az RRab-k a javított relációval kapott fémességei az egyéb mérésekből és modellekből kapottakkal sokkal jobban egyeznek. Ez nemcsak a kapott Bailey-diagram kiváló használhatóságát, hanem az illesztések során végzett munkám helyességét is megerősíti.

5.2. A Magellán-felhők fémességeloszlása

A Tejútrendszer két nagy kísérő törpegalaxisa, a Magellán-felhők fémességeloszlását már több ízben, több csillagpopuláció segítségével vizsgálták. Choudhury et al. (2021) például vörös óriások infravörös tartományon való vizsgálatával arra a konklúzióra jutottak, hogy a Nagy Magellán-felhőben (Large Magellanic Cloud, LMC) $(-0,008 \pm 0,001)$ dex/kpc értékű fémességgradiens észlelhető. A galaxisok RR Lyrae populációinak legutóbbi vizsgálatát Skowron et al. (2016) végezték OGLE fotometriai adatok segítségével, az N13 reláció alapján végzett RRab fotometriai fémességbecsléssel. Ők azt a következtetést vonták le, hogy az LMC-ben van, míg az SMC-ben (Kis Magellán-felhő) nincs egyértelműen kimutatható fémességgradiens. Munkájukban a galaxisok középpontjától vett távolság szerint kiloparszekenként átlagolt fémességértékek trendjének vizsgálatával állapították meg az LMC fémességgradiensének létét és átlagos $(-0,019 \pm 0,002)$ dex/kpc, valamint a belső 5 kpc-ben vett $(-0,029 \pm 0,002)$ dex/kpc értékét. A fémességgradiens létét az általuk nagyon magas vagy nagyon alacsony fémességűnek definiált csillagok számának a középponttól vett távolság függvényében való ábrázolásával támasztották alá (19. ábra). Ez a módszer nemcsak azért bizonytalan, mivel a kilógó adatpontok hordozhatják a legnagyobb hibát, lehetnek például valójában előtércsillagok, hanem azért is, mivel



19. ábra. Skowron et al. (2016): A Magellán-felhők kiugróan magas illetve alacsony C13 fotometriai fémességű adatpontjainak aránya a galaxis középpontjától vett sugár függvényében. Az LMC-ben megfigyelhető számottevő fémességgradiens, az SMC-ben nem.

mint azt arra az 5.1. alfejezet rámutat, a C13 reláció által magas fémességűnek becsült csillagok igen jelentős hányada valójában közepes vagy alacsony fémességű, amely szisztematikus hiba a kapott fémességgradiens-értéket is nagy mértékben befolyásolhatja.

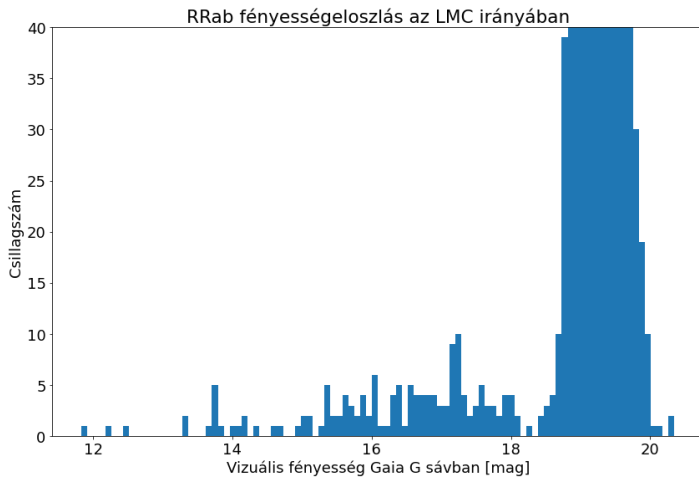
Következtetésként levonható, hogy még ha a több módszerrel való megerősítés miatt vélhetően valós is az így kapott fémességgradiens az LMC idős RR Lyrae populációjában, léte megerősítésre, illetve értéke pontosításra érdemes. Ezzel együtt célszerű a munka SMC-re kapott eredményeit is felülvizsgálni. A továbbiakban ennek megfelelően megvizsgálom a munkám eredményeként kapott új *Gaia* fotometriai fémességek segítségével mindkét Magellán-felhő fémességeloszlását.

Ehhez mind az LMC, mind az SMC esetén a megfelelő minőségű adatpontok hozzávetőlegesen 90%-át kitevő R_{Rab} csillagokat és a rájuk illesztett relációt alkalmaztam. Mindkét objektum esetén egyelőre csak a belső régiót vizsgáltam, az LMC esetén a középponttól vett 8 kpc-es, az SMC esetén 6 kpc-es sugárral. Megjegyzendő, hogy további vizsgálatokkal ennél nagyobb régiót is érdemes lehet lefedni, mivel még észlelhetőek mindkét esetben kijebb is csillagok. Viszont a kis számsűrűségű régiók esetében jóval elővigyázatosabbnak kell lenni, mivel az előtércsillagok túl nagy aránya ill. nem megfelelő kiszűrése esetén önmagában az egyes galaxisok kifelé történő számsűrűség-csökkenése miatt hamis fémességgradienst tudnak mutatni.

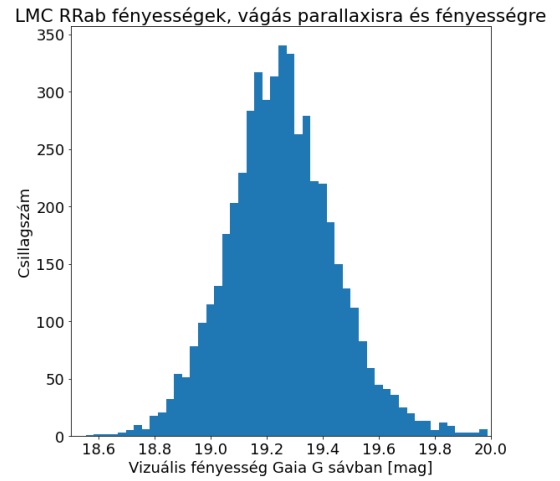
Még a nagy számsűrűségű régiók tekintése mellett is célszerű szűrni az előtércsillagokra, amennyire csak lehetséges. Ezt két módszerrel tettem meg. A szűrés alapja mindkét esetben a távolság volt, az első esetben közvetlenül, a *Gaia* trigonometrikus parallaxisok használatával. Másodszer a 2.2. alfejezetben leírtakat használtam ki, miszerint 1^m alatti az egyes csillagok abszolút fényességének a szórása, amiből következően látszó fényesség alapján is lehetséges az egymáshoz közeli halmaztagokat kiválasztani.

A távolság vágásakor az elvárt feltételt annak választottam, hogy a mért parallaxis legyen kétszeres hibahatáron belül nulla. Ami ezen kívül esik, az valószínűleg vagy nagyon közel van, vagy valamilyen okból igen pontatlan a mérése, ami egyéb bizonytalanságokra is utalhat.

A fényességekre való vágásakor az összes adott irányba eső, a fotometriai adatsor (*Gaia* DR3, $\Delta\varphi_{31} < 0,2$) részét alkotó RR Lyrae G sávbeli látszó fényessége szerint azokat vettem bele



(a) Az LMC irányába látszó RRab-k fényességeinek eloszlása. A kb. $18,5^m - 20^m$ között húzódó csúcs tartozik az LMC-hez magához, az annál fényesebb csillagok valószínűleg előtércsillagok. Az LMC csúcsának nagy részét levágtam a többi adat jobb láthatósága érdekében.



(b) Az LMC RRab-inek fényességek eloszlása, az adott irányban látszó csillagok parallaxis és fényesség szerint való szűrése után.

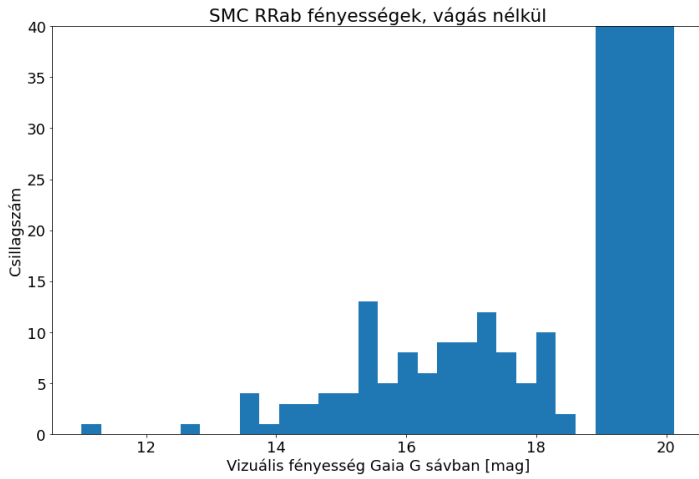
20. ábra. Az Nagy Magellán-felhő RRab csillagainak fényességek eloszlása.

az illesztésbe, amikből mindkét esetben teljesen egyértelműen, csúcsként kiemelkedett az adott Magellán-felhő. A vágások előtti és utáni fényességek eloszlásokat az LMC esetén a 20. ábra, az SMC-re vonatkozóan pedig a 21. ábra mutatja be.

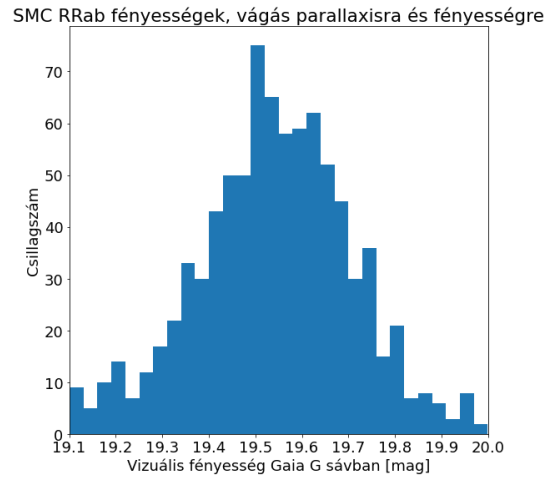
Az LMC csillagait koordináta szerint ábrázolva egy nagyon érdekes és furcsán szabályos sűrűsödésre lehetünk figyelmesek (22a. ábra). Ez nem egy valódi alakzat, hanem mérési szisztematikák okozzák: a *Gaia* űrtávcső missziójának első néhány hetében folyamatosan egy sávot mért az ún. EPSL (Ecliptic Pole Scanning Law) mintának megfelelően (Gaia Collaboration et al., 2016). Ez, az ekliptikai pólusok között húzódó tartomány éppen az LMC irányába esik, sőt, éppen ott a legszűkebb a sáv, a régióban végzett sokkal több mérés okán pedig sokkal több RR Lyrae fénygörbét tudott megfelelő minőségben felvenni az űrtávcső, mint azon kívül (Clementini et al., 2016). Legtöbb esetben hasznosak lennének ezek a plusz, jó minőségű adatpontok, ebben az esetben viszont, amikor egy helyfüggő eloszlás vizsgálata a cél, ilyen inhomogenitások szisztematikus hibát okozhatnak.

A minél pontosabb eredmények eléréséhez a fentiek okán homogenizáltam az adatsort. Ehhez először is főkörökkel körbeillesztettem a régiót (22b. ábra), majd meghatároztam azt, hogy ebbe az LMC figyelembe vett területének, valamint a rajta észlelt RR Lyrae-knek mekkora hányada esik bele. Ezek arányát véve azt kaptam, hogy az EPSL-ben átlagosan 2,31-szeres a csillagsűrűség a tartomány többi részéhez képest. A homogenizálást úgy végeztem, hogy az EPSL-ből véletlen adatpontokat vettem el úgy, hogy a 2,31-es szorzó egységre csökkenjen. A véletlen válogatás során nem vettem figyelembe az egyes adatpontok EPSL-en belüli helyzetét, mivel jó közelítéssel feltételezhettem, hogy a távcső ebből a sávból szinte minden ide eső, kellően fényes RR Lyrae fénygörbét megfelelő minőségben fel is vette, és nem okoz nagy eltérést az, hogy az EPSL egyes részei az LMC-n belül is szűkebbek, így ott még több mérés lett elvégezve.

Az így kapott, homogenizált LMC mintát a 23a., az ilyen korrekció elvégzésére nem szoruló SMC csillagok eloszlását pedig a 23b. ábra mutatja. Az így kapott, a fényességek eloszlás vizsgálatára használt minták rendre 3845 és 854 csillagot tartalmaznak. Megjegyzendő, hogy a galaxisok látszó középpontjának közvetlen környezetében egy-egy kis régióban igen kevés csillag van a

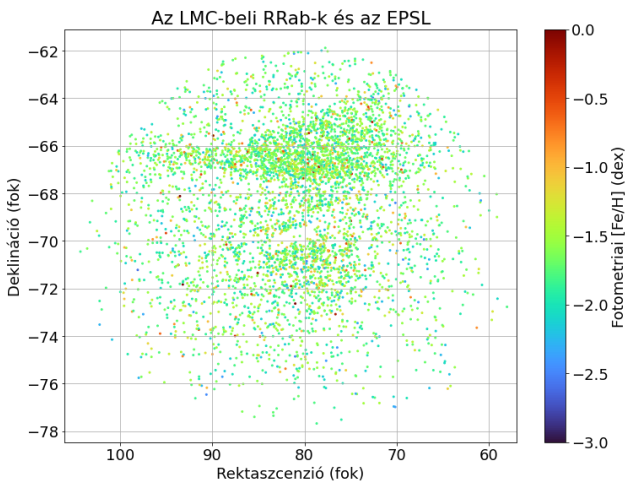


(a) Az SMC irányába látszó RRab-k fényességeinek eloszlása. A kb. $19^m - 20^m$ között húzódó csúcs tartozik az SMC-hez magához, az annál fényesebb csillagok valószínűleg előtércsillagok. Az SMC csúcsának nagy részét levágtam a többi adat jobb láthatósága érdekében.

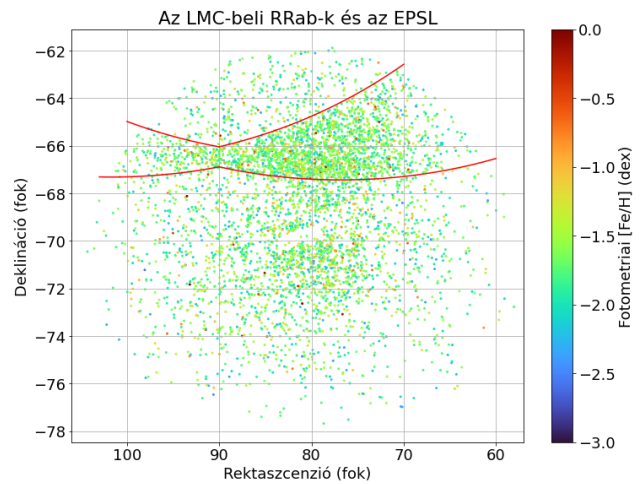


(b) Az SMC RRab-inek fényességeloszlása, az adott irányban látszó csillagok parallaxis és fényesség szerinti szűrése után.

21. ábra. A Kis Magellán-felhő RRab csillagainak fényességeloszlása.

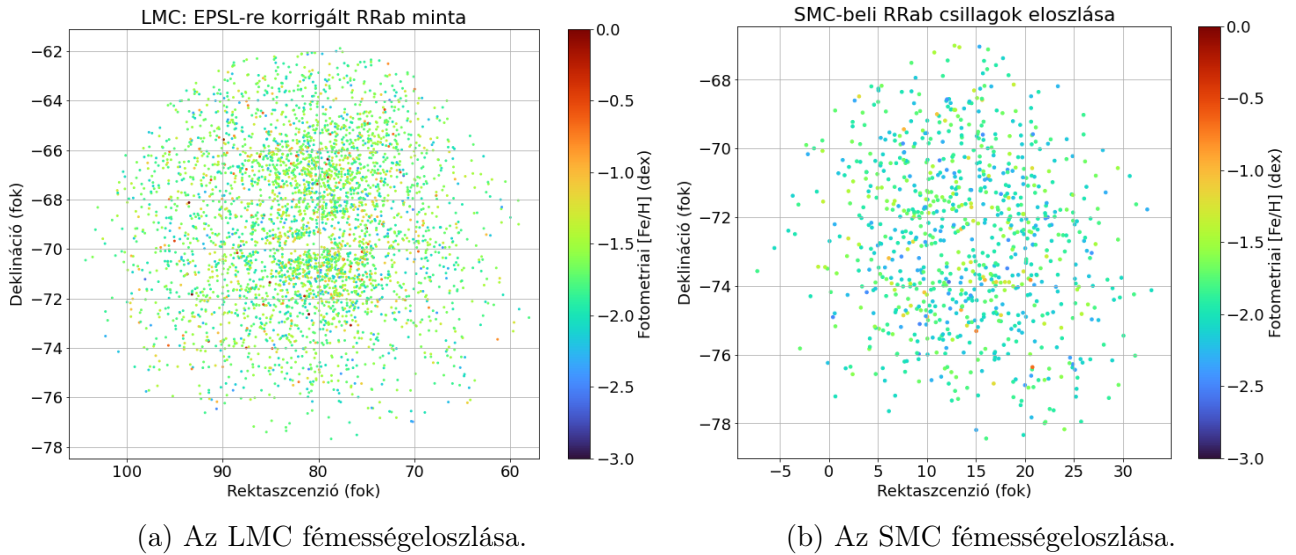


(a) Az LMC fémességeloszlása. -66° deklináció körül elnyúlva egyértelmű csillagsűrűsödésnek látszik az EPSL, amely sávban kiugróan sok mérést végzett az űrtávcső.



(b) Az LMC fémességeloszlása az EPSL főkörökkel körbeillesztve.

22. ábra. A Nagy Magellán-felhő *Gaia* $\Delta\varphi_{31} < 0,2$ csillagai szférikus pozíció szerint ábrázolva, és az új kalibrációval számolt fémességértékek szerint színeztve, parallaxis és fényesség szerint vágva, az EPSL sávjának csillagsűrűsödésére való korrekció előtt.



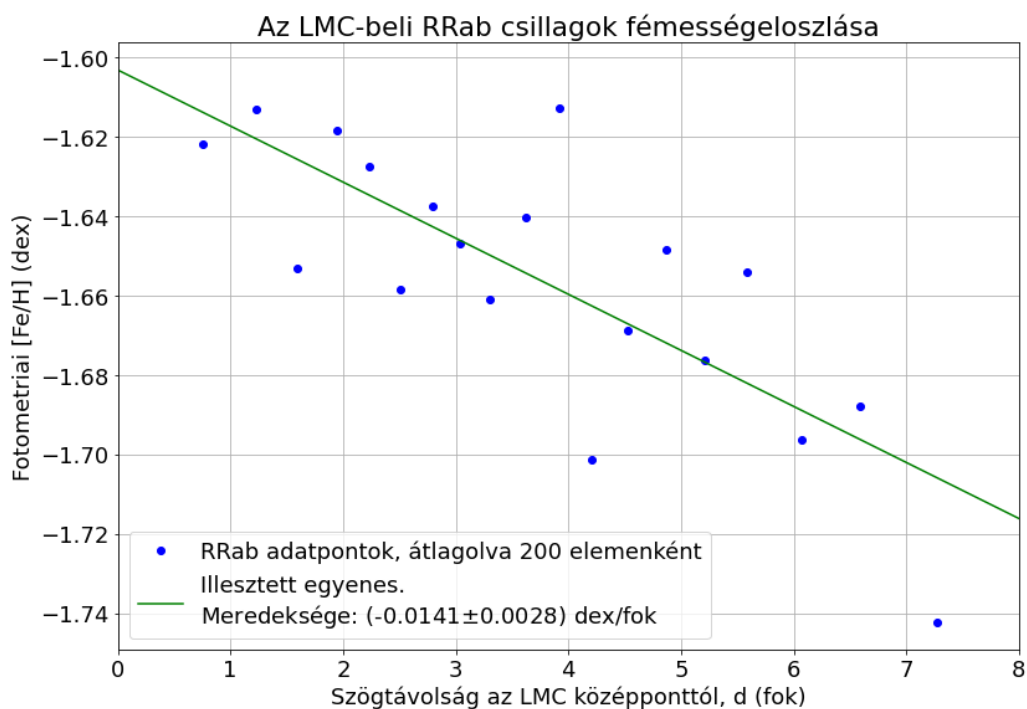
23. ábra. A fémességeloszlások vizsgálatához használt minták: A Magellán-felhők $Gaia \Delta\varphi_{31} < 0,2$ csillagai szférikus hely szerint ábrázolva, és az új kalibrációval számolt fémességértékek szerint színezve. A minta vágott parallaxis és fényesség szerint, továbbá az LMC esetén korrigált EPSSL sávjának csillagsűrűsödésére.

mintában, ennek oka az lehet, hogy az itteni, legsűrűbb tartományokon már nem volt képes az űrtávcső az egyes csillagok felbontására.

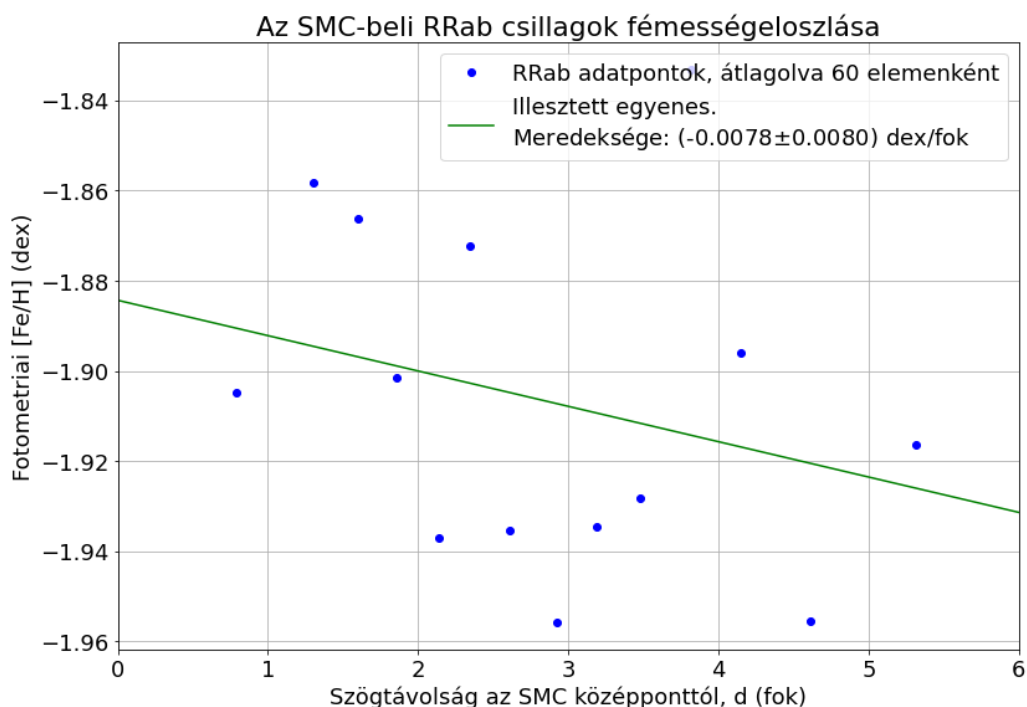
A minták csillagainak fotometriai fémességeit a középponttól vett távolság függvényében különböző számú, az LMC esetén 200, az SMC esetén 60 adatpontként átlagoltam, valamint a pontonkénti átlagos középponttól vett távolság függvényében ábrázoltam, és a gradiens értékének nagyságrendi megbecslése érdekében egyenest illesztettem rájuk, amely átlagolt adatpontok és egyenesek a 24. és 25. ábrákon láthatóak. Előbbiről leolvasható, hogy a Nagy Magellán-felhőben egyértelmű fémességgradiens mutatkozik, amely értéke $-0,014 \pm 0,003$ dex/fok. Megjegyzendő, hogy az átlagolási ráták módosításával ez az érték nem változott lényegesen.

Ezek a Skowron et al. (2016) által használt adattal, miszerint az LMC átlagos távolsága 50,56 kpc, hozzávetőlegesen $-0,012 \pm 0,003$ dex/kpc értékűnek adódik. Ez sokkal közelebb van a vörös óriások populációjára meghatározott $(0,008 \pm 0,001)$ kpc-es értékhez, mint a Skowron et al. (2016) által kapott átlagos $(-0,019 \pm 0,002)$ dex/kpc, valamint a belső 5 kpc-ben vett $(-0,029 \pm 0,002)$ dex/kpc érték, sőt: az általam kapott RR Lyrae és a szakirodalmi vörös óriás fémességgradiens hibahatárok körül egyezik. Ez persze különböző csillagpopulációk lévén nem feltétlenül elvárt, viszont az általam kapott érték mindenképp egy sokkal konzervatívabb becslést ad a különböző populációk közötti fémességgradiens-értékek eltérésére.

Bár a 25 ábrának megfelelően a Kis Magellán-felhőben nem mutatkozik hibahatáron túli fémességgradiens (értéke $-0,008 \pm 0,008$ dex/fok), léte itt is sejthető, de semmiképpen nem alátámasztott.



24. ábra. A Nagy Magellán-felhő fémességeloszlása a középpontjától vett távolság függvényében. Ez egyértelműen megerősíti fémességgradiens jelenlétét: a külső régiók felé haladva az átlagos fémességek egyértelmű csökkenését tapasztaljuk.



25. ábra. A Kis Magellán-felhő fémességeloszlása a középpontjától vett távolság függvényében. Az erre illesztett egyenes mereksége hibahatár környéki, ami ugyan sejteti az SMC fémességgradiensének lehetőségét, semmiképp nem bizonyítja azt.

5.3. További alkalmazási lehetőségek

A *Gaia* űrtávcső segítségével kapott fotometriai fémességértékek szórása, más missziók és színsávok eseteihez viszonyítva, a kevesebb adatpontból álló *Gaia* fénygörbék miatt nagyobb, így kisszámú vagy akár csupán egy-egy csillag esetére méginkább csak nagyságrendi becslésként alkalmazható. Olyan esetekben viszont, amikor statisztikusan kezelhető csillagsokaságokban jelentkező trendek vizsgálata a cél, mint például a Bailey-diagram fémességekkel együtt való vizsgálata, vagy különböző, nagyszámú észlelt RR Lyrae-t tartalmazó objektumok fémesség-eloszlása, a hatalmas léptékben rendelkezésünkre álló adatok miatt könnyen, hatékonyan és pontosan használhatóak a *Gaia* űrtávcső fotometriai fémességei.

Két tervezett kutatási területet külön kiemelnék. A *Kepler* űrtávcső több gömbhalmazt is megfigyelt a K2 küldetése során, amelyekben RR Lyrae csillagok fénygörbéit is rögzítette (Kuehn et al., 2017; Wallace et al., 2019). Ezek jellemzően hosszú periódusú, és igen alacsony fémességű változók, amelyekre az N13 képlet pontatlan fémességértékeket ad. Így a gömbhalmaztag csillagok fémességét is pontosabban megbecsülhetem az új illesztéssel – aminek bár a leírtaknak megfelelően nagy lehet a bizonytalansága, a várható hiba a N13-mal becsléshöz még mindig szignifikánsan kisebb.

Emellett a Kepler és TESS űrtávcsövek nagyszámú RRc csillagot figyeltek meg, amelyekben a radiális felhangon kívül további kis amplitúdójú módusok is nagy számban megfigyelhetők. A pulzációs modellekkel való összehasonlításhoz a fémességre adott becslés nagy előrelépést fog jelenteni (Molnár et al., 2022; Netzel & Smolec, 2022).

6. Összefoglalás és kitekintés

Dolgozatom elején bemutatam a kutatásom szempontjából lényeges ismereteket, valamint munkám szakirodalmi háttérét, úgy mint az RR Lyrae csillagokat, valamint a rájuk alkalmazható fotometriai fémességbecslés mibenlétét és történetét. Rámutattam, hogy a *Gaia* űrtávcső *G* színsávjára még nem lett kalibrálva a fotometriai fémességbecslés összefüggése, és a jelenleg arra alkalmazott, eredetileg a *Kepler* űrtávcső *Kp* sávjának megfelelően kalibrált reláció több okból valószínűsíthető, hogy nagy mértékű szisztematikus eltéréseket tartalmaz.

Munkámban négy spektroszkópiai adatsorral dolgoztam, amelyek közül három (C21, APOGEE, GALAH) mind RRab, mind RRc, egy pedig (CARRS) csak RRc csillagokat tartalmaz. Ezeket részletesen ismertetett irányelvek szerint, kiemelt körülményekkel szűrtem. A megmaradt adatpontok közül az RRab csillagok esetén a lehető legszélesebb paraméterter elérése érdekében a három adatsor együttes használata mellett döntöttem, az RRc-k esetén pedig a homogenitás céljából csak az adatok túlnyomó többségét kitevő adatsorral dolgoztam.

Megmutattam, hogy az RRab csillagok esetén mindenféleképp az összefüggés újraillesztésére van szükség, valamint hogy az RRc-k esetén is érdemes ennek megtétele. Az optimalizáció általános másodfokú polinommal való kezdése után mindkét esetben a szabad illesztési paraméterek számának csökkentése mellett döntöttem, végül az RRab-k esetén 4, az RRc-k függvényalakjában pedig csupán 3 szabad paraméter mellett állapodva meg. A *Gaia* űrtávcső javított fotometriai fémességbecslése így RRab-k esetére az alábbiak adódott, koszinusz alapú Fourier-felbontás mellett:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 6,5 \cdot P^2 - 13,9 \cdot P + 1,08 \cdot \varphi_{31} + 1,95,$$

ahol az eddigi becslésbeli 5 helyett használt csupán 4 szabad paraméterrel is a mért és becslt

értékek súlyozott közepes négyzetes eltérése (súlyozott RMSD) 0,5947 dex-ről 0,2451 dex-re csökkent. RRc csillagok esetén a következő eredmény adódott:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = -8,8 \cdot P + 0,53 \cdot \varphi_{31} - 0,36,$$

ahol a súlyozott RMSD az eddigi 6 szabad paraméter helyett csupán hárommal való illesztés mellett is csökkent, 0,3399 dex-ről 0,3033 dex-re. Tehát mindkét RR Lyrae altípus esetén az illesztési paraméterek számának csökkentése ellenére is sikerült a mért és becsült értékek közötti eltéréseket csökkentenem.

A javított összefüggésekkel sikerült korrigálnom az RRab-k esetére a fémességeloszlást is ábrázoló Bailey-diagram az eddigi illesztés alapján az észleléseknek teljesen ellentmondó trendjét, amit az okozott, hogy az összefüggés kalibrációjában nem szerepeltek sem hosszú periódusú, sem pedig kis amplitúdójú csillagok, így az ezen tartományokban kapott fotometriai fémességek tisztán extrapoláció segítségével voltak meghatározhatóak. Az új Bailey-diagram mind az RRab-k, mind az RRc-k esetén az észlelésekkel való egyezése megerősítette az illesztésekkel kapcsolatban végzett munkám helyességét.

Munkám eredményeit a Magellán-felhők belső régiói fémességeloszlásának vizsgálatára is felhasználtam. A megfelelő szűrések elvégzése után, ami a Nagy Magellán-felhő esetén egy szignifikánsan több észlelést és adatpontot tartalmazó sáv túlsúlyára való korrekciót is tartalmazott, meghatároztam az egyes galaxisok középpontjától vett távolság függvényében azok fémességeloszlását. A munka eredményeként a Nagy Magellán-felhőben megerősítettem a fémességgradiens jelenlétét a belső régiók felé való fémességnövekedés formájában, valamint pontosítottam annak értékét, ami így $-0,014 \pm 0,003$ dex/fok értékűnek adódott. A Kis Magellán-felhő esetén a gradiens értéke egyszeres hibahatár körülinek adódott, így annak léte bár sejthető, semmiképp nem bizonyított.

Bár már az eddigi munkám során is igen jelentős mértékben sikerült javítanom elsősorban az RRab csillagokra vonatkozó összefüggés helyességén, kínálkozik még néhány lehetőség az illeszkedés pontosítására, amiket az eredmények esetleges publikációja előtt mindenképp érdemes megtenni. Ezek közül a legfőbb az egyes spektroszkópiai adatsorok azonos fémességskálára hozása. Ennek a legfőbb eleme a zéróponti korrekció megtétele, azaz a Nap referenciaként használt fémességeinek azonos értékre hozása. Emellett esetenként pontosabb szisztematikus korrekciók megtételére is lehetőség nyílik: Az APOGEE és a GALAH adatsor közötti különbségekre például Hegedűs et al. (2022) munkája kis fémességek esetén 0,05 dex-ig terjedő trendet mutat, amit figyelembe lehet venni az adatsorok együttes használatánál.

További javulást jelenthet mind az RRab, mind az RRc adatsorokra való illesztéskor az, ha a φ_{31} fáziskülönbség bizonytalanságait is figyelembe veszem. A hátralévő munka részét alkotja az is, hogy a fotometriai paraméterek függvényében a becsült fémesség bizonytalanságára becslést adjak, ami az illesztési paraméterek nagymértékű korrelációja miatt nem egy egyszerű feladat.

A kutatási területen a további munkára vonatkozó terveim között szerepel ugyanezen illesztés a *Gaia* szűkebb áteresztésű, G_{BP} és G_{RP} színsávjaira való illesztése, valamint a TESS úrtávcső esetére megtett kalibráció – ahogy a *Gaia* G sáv esetén, e két esetben is elsőként tenném ezt meg.

Az RRc csillagokra általam újraillesztett relációt, illetve az így rendelkezésünkre álló fémességértékeket az 5.3 alfejezetben kifejtetteknek megfelelően egyes gömbhalmazbeli RR Lyrae-k fémességbecslésére, valamint 2023. tavaszától Molnár László mellett Henryka Netzel társtéma-vezetésével kis amplitúdójú nemradiális pulzációkat is mutató RRc csillagok módusai fémességfüggése leírásának segítésére szeretném felhasználni.

Köszönetnyilvánítás

Hálás szívvel köszönöm témavezetőmnek, Molnár Lászlónak az elmúlt másfél év folyamatos odafigyelését, törődését és odaadó támogatását, valamint a dolgozathoz adott számos javaslatát, korrekcióját! Köszönöm Mészáros Szabolcsnak az APOGEE és GALAH adatsorok használatához nyújtott számos tanácsát, Bódi Attilának pedig az `astropy` modullal kapcsolatos segítségét! Hálás vagyok családomnak és barátaimnak türelmükért, segítségükért és támogatásukért.

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-22-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával, illetve a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal KKP-137523 „SeismoLab“ Élvonal pályázatának támogatásával készült.

Hivatkozások

- Abdurro'uf, Accetta, K., Aerts, C., et al. 2022, ApJS, 259, 35, doi: 10.3847/1538-4365/ac4414
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., & Scott, P. 2009, ARA&A, 47, 481, doi: 10.1146/annurev.astro.46.060407.145222
- Bailey, S. I. 1902, Annals of Harvard College Observatory, 38, 1
- Blažko, S. 1906, Mitteilung über veränderliche Sterne, Zenodo, doi: 10.1002/asna.19061720303
- Buder, S., Sharma, S., Kos, J., et al. 2021, MNRAS, 506, 150, doi: 10.1093/mnras/stab1242
- Carretta, E., Bragaglia, A., Gratton, R., D'Orazi, V., & Lucatello, S. 2009, A&A, 508, 695, doi: 10.1051/0004-6361/200913003
- Carretta, E., & Gratton, R. G. 1997, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 121, 95, doi: 10.1051/aas:1997116
- Catelan, M., Pritzl, B. J., & Smith, H. A. 2004, ApJS, 154, 633, doi: 10.1086/422916
- Catelan, M., & Smith, H. A. 2015a, Pulsating Stars (John Wiley & Sons, Ltd), 73–156, doi: <https://doi.org/10.1002/9783527655182.ch5>
- . 2015b, Pulsating Stars (John Wiley & Sons, Ltd), 157–182, doi: <https://doi.org/10.1002/9783527655182.ch6>
- Chadid, M., Sneden, C., & Preston, G. W. 2017, ApJ, 835, 187, doi: 10.3847/1538-4357/835/2/187
- Choudhury, S., de Grijs, R., Bekki, K., et al. 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 507, 4752, doi: 10.1093/mnras/stab2446
- Clementini, G., Ripepi, V., Leccia, S., et al. 2016, A&A, 595, A133, doi: 10.1051/0004-6361/201629583
- Clementini, G., Ripepi, V., Garofalo, A., et al. 2022, Gaia DR3: Specific processing and validation of all-sky RR Lyrae and Cepheid stars – The RR Lyrae sample, arXiv, doi: 10.48550/ARXIV.2206.06278
- Crestani, J., Fabrizio, M., Braga, V. F., et al. 2021, The Astrophysical Journal, 908, 20, doi: 10.3847/1538-4357/abd183
- De Silva, G. M., Freeman, K. C., Bland-Hawthorn, J., et al. 2015, MNRAS, 449, 2604, doi: 10.1093/mnras/stv327
- Fabrizio, M., Braga, V. F., Crestani, J., et al. 2021, ApJ, 919, 118, doi: 10.3847/1538-4357/ac1115
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A.G.A., Prusti, T., & et al. 2022, A&A, doi: 10.1051/0004-6361/202243940
- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., et al. 2016, A&A, 595, A1, doi: 10.1051/0004-6361/201629272

- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2018, *A&A*, 616, A1, doi: 10.1051/0004-6361/201833051
- . 2021, *A&A*, 649, A1, doi: 10.1051/0004-6361/202039657
- Grevesse, N., Asplund, M., & Sauval, A. J. 2007, *SSRv*, 130, 105, doi: 10.1007/s11214-007-9173-7
- Hegedűs, V., Mészáros, S., Jofré, P., et al. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2211.03416. <https://arxiv.org/abs/2211.03416>
- Holtzman, J. A., Shetrone, M., Johnson, J. A., et al. 2015, *AJ*, 150, 148, doi: 10.1088/0004-6256/150/5/148
- Jerzykiewicz, M., & Wenzel, W. 1977, *AcA*, 27, 35
- Jordi, C., Gebran, M., Carrasco, J. M., et al. 2010, *A&A*, 523, A48, doi: 10.1051/0004-6361/201015441
- Jurcsik, J., & Kovács, G. 1996, *A&A*, 312, 111
- Jurcsik, J., Sódor, Á., Hurta, Z., et al. 2008, *MNRAS*, 391, 164, doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13676.x
- Kovács, G., & Zsoldos, E. 1995, *A&A*, 293, L57
- Kuehn, C. A., Moskalik, P., & Drury, J. A. 2017, in *European Physical Journal Web of Conferences*, Vol. 160, *European Physical Journal Web of Conferences*, 04011, doi: 10.1051/epjconf/201716004011
- Kunder, A., & Chaboyer, B. 2008, *AJ*, 136, 2441, doi: 10.1088/0004-6256/136/6/2441
- Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., et al. 2017, *AJ*, 154, 94, doi: 10.3847/1538-3881/aa784d
- Martínez-Vázquez, C. E. 2021, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 529, *RR Lyrae/Cepheid 2019: Frontiers of Classical Pulsators*, ed. K. Kinemuchi, C. Lovekin, H. Neilson, & K. Vivas, 235
- Molnár, L., Bódi, A., Pál, A., et al. 2022, *ApJS*, 258, 8, doi: 10.3847/1538-4365/ac2ee2
- Morgan, S. M., Wahl, J. N., & Wieckhorst, R. M. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 374, 1421
- Mullen, J. P., Marengo, M., Martínez-Vázquez, C. E., et al. 2021, *ApJ*, 912, 144, doi: 10.3847/1538-4357/abefd4
- Nemec, J. M., Cohen, J. G., Ripepi, V., et al. 2013, *ApJ*, 773, 181, doi: 10.1088/0004-637X/773/2/181
- Nemec, J. M., Smolec, R., Benkő, J. M., et al. 2011, *MNRAS*, 417, 1022, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19317.x
- Netzel, H., & Smolec, R. 2022, *MNRAS*, 515, 3439, doi: 10.1093/mnras/stac1793

- Rich, J. A., Madore, B. F., Monson, A. J., et al. 2018, *ApJ*, 869, 82, doi: 10.3847/1538-4357/aae980
- Rowe, J. F., Matthews, J. M., Seager, S., et al. 2009, in *Transiting Planets*, ed. F. Pont, D. Sasselov, & M. J. Holman, Vol. 253, 121–127, doi: 10.1017/S1743921308026318
- Schwarzschild, M. 1940, *Harvard College Observatory Circular*, 437, 1
- . 1941, *ApJ*, 94, 245, doi: 10.1086/144329
- Skowron, D. M., Soszyński, I., Udalski, A., et al. 2016, *AcA*, 66, 269. <https://arxiv.org/abs/1608.00013>
- Snedden, C., Preston, G. W., Kollmeier, J. A., et al. 2018, *The Astronomical Journal*, 155, 45, doi: 10.3847/1538-3881/aa9f16
- Van Cleve, J. E., & Caldwell, D. A. 2016, *Kepler Instrument Handbook*, Kepler Science Document KSCI-19033-002, id.1. Edited by Michael R. Haas and Steve B. Howell
- Wallace, J. J., Hartman, J. D., Bakos, G. Á., & Bhatti, W. 2019, *ApJL*, 870, L7, doi: 10.3847/2041-8213/aaf8ac
- Zinn, R., & West, M. J. 1984, *ApJS*, 55, 45, doi: 10.1086/190947