

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM TTK
CSILLAGÁSZATI TANSZÉK

TDK DOLGOZAT

Csillagok luminozításának és sugarának meghatározása új bolometrikus korrekciók alapján

Készítette: **Harmati Beáta**
Csillagász MSc szakos hallgató

Témavezető: **Dr. Mészáros Szabolcs**
tudományos főmunkatárs, Eötvös Loránd Tudományegyetem
Gothard Asztrofizikai Obszervatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont

Budapest, 2022

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. Fotometria a csillagászatban	2
1.2. Tudományos motiváció	4
2. Szintetikus fotometria	5
2.1. Magnitúdórendszerek	6
2.1.1. Az ST magnitúdórendszer:	6
2.1.2. Az AB magnitúdórendszer:	6
2.1.3. A Vega magnitúdó rendszer:	6
2.2. Bolometrikus korrekciók	7
3. Égboltfelmérő programok áttekintése	8
3.1. Gaia	9
3.2. 2MASS	10
3.3. APOGEE	11
4. Alkalmazott módszerek	12
4.1. A BOSZ spektrális adatbázis	12
4.2. SPECIES	12
4.3. Az általam írt kód ismertetése	14
5. Eredményeim: új bolometrikus korrekciók	16
5.1. A Gaia-2MASS színindexek összehasonlítása, illetve asztrofizikai paraméterek- től való függése	16
5.1.1. A háttércsillagok kiválasztása	16
5.1.2. A színindexek asztrofizikai paraméterektől való függésének bemutatása	17
5.2. Az APOGEE-csillagok kiválasztása	18
5.2.1. A csillagok kiválasztása	18
5.3. Bolometrikus korrekciók	20
5.3.1. Gaia DR3 bolometrikus korrekciók	20
5.3.2. Az APOGEE DR17 bolometrikus korrekciók meghatározása	20
6. Eredményeim: Sugarak és luminozítások meghatározása	25
6.1. Gaia DR3 sugarak és luminozítások meghatározása	25
6.2. Az általam használt módszer	25
7. Összefoglalás	32
8. Köszönetnyilvánítás	34
Hivatkozások	35
Nyilatkozat	37

1. Bevezetés

1.1. Fotometria a csillagászatban

A nagy felbontású spektroszkópiai és fotometriai égboltfelmérő programok megjelenésével egyre fontosabbá válik a csillagok megfigyelt paramétereinek (sugár, luminozitás) elméleti modellekkel történő meghatározása. A nagy égboltfelmérő programok adatait sokféleképpen használják az Univerzum feltérképezésére. A fotometria segítségével különböző objektumok fényességváltozásait lehet megfigyelni: például változócsillagokét, szupernóvákét, aktív galaxisokét, galaxisokét, kisbolygókét stb. Ennek használatával meg tudják határozni például a szupernóvák energiakibocsátását, vagy a csillagok forgási periódusát. A fotometria nagy szerepet játszik exobolygók felfedezésében is: a csillagok megfigyelése során némelyiknél észrevehető periodikus fényességcsökkenés, melyet sok esetben egy előtte áthaladó bolygó okoz, ezzel a módszerrel jó eséllyel lehet Naprendszeren kívüli bolygókat detektálni.

A különböző fotometriai égboltfelmérő programok általában más központi hullámhosszon és több szűrővel mintavételezik a csillagok fényességét. Ezek ismeretében elő lehet állítani a megfigyelt objektum ún. spektrális energiaeloszlását (SED, Spectral Energy Distribution). A SED a frekvencia vagy a hullámhossz függvényében ábrázolt fényesség-, illetve fluxussűrűség. A csillagászatban a fényességet magnitúdóban mérjük, ezt pedig a beérkező fluxusból lehet kiszámítani.

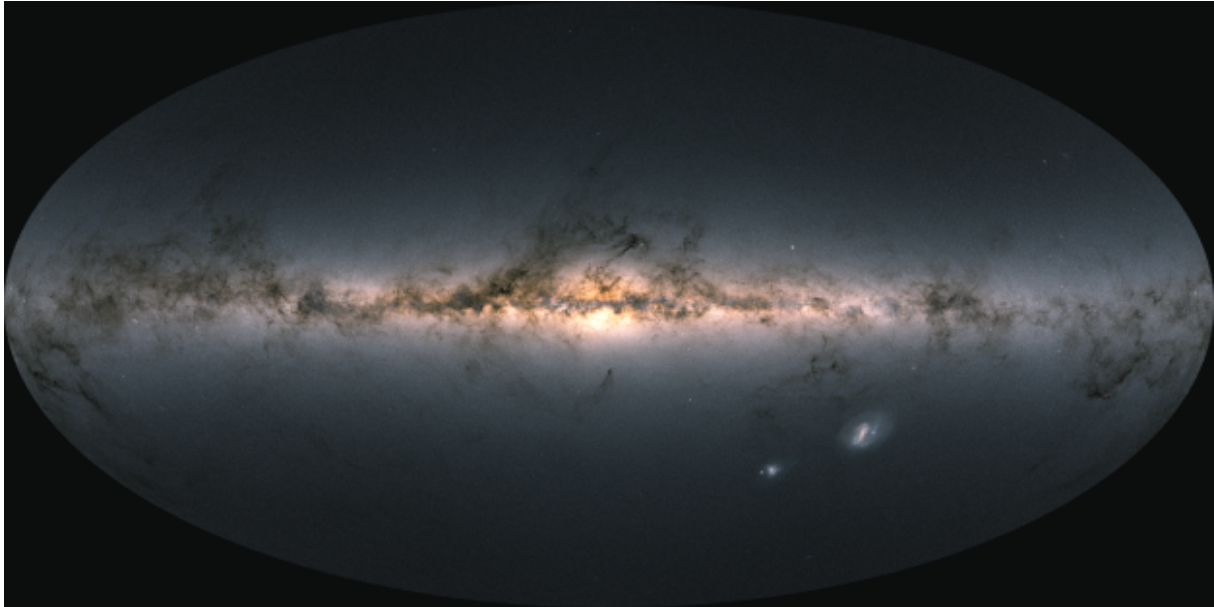
Spektrográfokkal a csillagok színeképeit is felvehetjük, azok elemzésével a csillagok fizikai paramétereit lehet meghatározni, ilyen az effektív hőmérséklet, metallicitás vagy a különböző kémiai elemek jelenléte a csillagban. Ha ismerjük a vizsgált csillagok ezen paramétereit, illetve elhelyezkedésüket a Tejútrendszerben (annak melyik részén, a korongban, haloban, esetleg a spirálkarokban vannak), valamint a tőlünk mért távolságát, akkor onnan következtethetünk a galaxis kialakulására, fejlődésére.

A szintetikus fotometria legfőbb célja, hogy elméleti modellekből kiszámolja a csillagok megfigyelt fényességeit és színindexeit, melyeket aztán a bolometrikus korrekció meghatározására, illetve a magnitúdók és a színindexek közötti átváltásra lehet használni a csillagok fizikai paramétereinek figyelembe vételével. De a szintetikus fotometria a csillagok egyik legnehezebben meghatározható paramétereinek, a sugaruknak és a luminozitásuknak kiszámolására is megoldást kínál.

A csillag luminozításának meghatározásához szükség van a bolometrikus korrekció ismeretére, ami a csillag teljes abszolút bolometrikus fényességének és a látszó fényességének különbsége. A szintetikus fotometria felhasználásával a csillagok spektrális energiaeloszlását leíró függvényekből és nagy felbontású szintetikus színeképekből kiszámítható a csillagok elméleti színindexe, a tetszőleges szűrőben mért magnitúdója és bolometrikus magnitúdója. Az elméleti spektrumok előnye, hogy a spektrum integrálásából könnyen kiszámolható a teljes bolometrikus fényesség.

A gyakorlatban használt fotometriai rendszerek és szűrők általában olyan hullámhossztartományra vannak optimalizálva, amelyek a legérzékenyebbek a következő paraméterekre: effektív hőmérséklet (T_{eff}), felszíni gravitáció ($\log g$), illetve fémesség ($[M/H]$). Maga a szintetikus fotometria kulcsfontosságú a csillagokra jellemző paraméterek megfigyelhető értékeké történő konvertálásához, és a cél tulajdonképpen ilyen mérhető mennyiségek (mint például magnitúdó, színindex) előállítás.

A nagy skálás fotometriai mérések megjelenésével egyre fontosabbá vált a szintetikus fotometria előrejelzéseinek összehasonlítása a megfigyelésekkel. A Gaia-űrtávcsőnek köszönhetően már rendkívül pontos asztrometriai, fotometriai és távolságadatok állnak rendelkezésre közel 1.8 milliárd csillagra [Gaia Collaboration, 2016]. Az 1. ábra mutatja a GAIA harmadik adatkibocsátása alapján a teljes égbolt képét.



1. ábra. Teljes égbolt képe a Gaia EDR3 adatai alapján [Gaia Collaboration, 2016]

A megfigyelésen alapuló eredményeket csillagmodellekkel összehasonlítva azonban a bolometrikus korrekciók által okozott korlátozásokkal kell szembenézni. Bonyolultabb rendszerek, mint például halmazok vagy galaxisok vizsgálatakor az általuk tartalmazott csillagok magnitúdóiból és színeiből szintetikus fotometria felhasználásával megkaphatóak a fent említett paraméterek (effektív hőmérséklet, felszíni gravitáció, fémesség). A szűrőrendszereket úgy alakították ki, hogy azok csillagok spektrumaiban olyan régiókat jelöljenek ki, ahol a légköri paraméterek változnak; és ezeknek a változásoknak a nyomai elég nagyok ahhoz, hogy a fotometriai adatokban kimutathatóak legyenek.

A csillagok fizikai paraméterei, a csillagok színeivel szoros összefüggésben vannak. A széles sávú színek leginkább a csillagok effektív hőmérsékletével állnak korrelációban, de a közeli ultrabolya felé a $\log g$ és a fémesség esetében is felismerhető összefüggés, [Ridgway et al, 1980, Bell és Gustafsson, 1989, Alonso et al, 1996, Ivezic et al, 2008, Casagrande et al, 2010]. Ugyanakkor a szélessávú fotometria nem csak egyedi csillagok, hanem kiterjedt csillagpopulációk, illetve akár az égbolt 1-1 részének feltérképezésére is használható, az sem akadály, ha halványak az objektumok. A keskeny, illetve közepes sávú fotometria, bár e tekintetben sokkal korlátozottabb, viszont sokkal érzékenyebb a csillagok kémiai összetételére [Strömgren, 1966, Wing, 1977, McClure R. D., van den Bergh S., 1968, Golay M., 1972, Mould J. R., Siegel M. J, 1972, Worthey et al, 1994].

A csillagok paramétereinek meghatározása fotometriai adatok alapján alapvető feladat. Ezeket tapasztalati úton kiszámolt kalibrációs formulák kötik össze, amelyek azonban csak bizonyos spektráltípusokra érvényesek. Ezzel kapcsolatban Casagrande-nek és társainak már több sikeres eredménye is van; például törpe- és szubóriás csillagok effektív hőmérsékletének illetve fémességének összekapcsolása a fotometriai indexekkel [Casagrande et al. 2010, 2011].

Elengedhetetlen tehát, hogy a magnitúdókat fluxusokká, a fluxusokat pedig magnitúdókká

tudjuk alakítani, akár megfigyelt, akár szintetikus fluxusról legyen szó. Mindemellett a szintetikus fotometriával végzett mérésekből kapott eredmények másra is felhasználhatók. Ha például a szín-hőmérséklet összefüggést hűvösebb és nagyobb luminozitású csillagokra szeretnénk kiterjeszteni, akkor azt megtehetjük úgy, hogy a teljes mértékben elméleti összefüggések eloszlásának rácsára illesztjük a megfigyelt eredményt [Buser, R. 1986]. Ezen felül a fémességfüggés is megmondható ezen módszer segítségével: például gömbhalmazok fémességére lehet következtetni az őket alkotó csillagok színindexeiből.

A szintetikus fotometria tehát rendkívül fontos módszer a különböző információk közötti összefüggések felismerésére.

1.2. Tudományos motiváció

A dolgozatban bemutatott munkával az a célom, hogy az elméleti spektrumokból kapott magnitúdókat és bolometrikus korrekciókat minden korábbinál pontosabban meghatározzam, ezzel pedig az APOGEE [Majewski et al., 2017] égboltfelmérő program által észlelt csillagok sugarát és luminozitását pontosítsam.

A Gaia esetében a Grp, G, és Gbp szűrőkre, a 2MASS esetén a J, H és K szűrőkre fogok szintetikus magnitúdókat és bolometrikus korrekciókat számolni, ezeket pedig az APOGEE adataival kombinálom. A csillagok színindexei leginkább a csillagok effektív hőmérsékletével állnak korrelációban, de a közeli ultraibolya felé a $\log g$ és a fémesség is befolyásolja a színindexek mértékét. Ezen kívül egyedi kémiai összetételek is szerepet játszanak a színindexek és a bolometrikus korrekció mértékében. Az APOGEE több szempontból is előnyös választás: a csillagokhoz a hőmérsékleten kívül egyedi nagy pontosságú kémiai összetételek is elérhetők (lásd 3.3 fejezet), ráadásul ezek a paraméterek egyazon mérésből származnak.

Célom, hogy az APOGEE DR17 [Majewski et al., 2017] adatait felhasználva az eddigieknél pontosabb sugár- és luminozitásértékeket kapjak a számítások során, ugyanis az APOGEE-adatokból származó paraméterek hibája kisebb, mint a Gaia-méréseké.

Az elméleti spektrumokból kiszámolt magnitúdók segítségével az eddigieknél pontosabb bolometrikus korrekciókat tudok számolni, mert az eddigi modellekkel ellentétben a számításaim során használt új modellek egy új, eddig nem alkalmazott kémiai elem, a szén elemgyakoriságát is figyelembe veszik. A szén jelenléte ugyanis a spektrumban nagyfokú eltérést okozhat magas széntartalom esetén. Így a dolgozat során fényt tudok deríteni arra, hogy a szén mennyiségének figyelembe vétele mennyiben befolyásolja a bolometrikus korrekciót, azon keresztül pedig a csillagok sugarának és luminozitásának nagyságát. Ezen felül az α -elemek gyakoriságában is újabbak és pontosabbak az általam használt modellek: eddig használt intervallumnál (+0,0 és +0,4) szélesebb tartományt tartalmaznak. Ezeket az újításokat figyelembe véve új, és immár pontosabb bolometrikus korrekciókat számolhatok. Ebből az következik, hogy az interpolálás során az eddigiekhez képest kisebb hibával tudom illeszteni a paramétereket, így a számolások eredményeként az eddigieknél is pontosabb sugár- és luminozitásértékeket kapok.

A dolgozat során a szintetikus fotometria elméleti alapjait a 2. fejezetben ismertetem, az általam használt adatokat szolgáltató égboltfelmérő programokat pedig a 3. fejezetben fogom bemutatni. A 2.2. szekcióban kifejtem, hogy a paramétereket milyen módszerekkel és képletekkel számoltam ki, valamint az általam írt és használt program működését mutatom be. Végül az 5 és 6 fejezet tartalmazza a számolások kiértékelését, az azokból levont következtetéseket és az új eredményeket.

2. Szintetikus fotometria

Ebben a fejezetben a szintetikus fotometria alapjait ismertetem. A bevezetőben már említettem, hogy a szintetikus fotometria a csillagászat problémáinak rendkívül széles skálájára kínál megoldást. Fő céljai közé tartozik a különböző fotometriai rendszerek közti transzformációkkal kapcsolatos eljárások, és különböző fotometriai mennyiségek kalibrálása a csillagok fizikai paramétereit alapul véve, [Straizys, 1996]. Straizys összefoglaló cikke [Straizys, 1996] az alábbiakban foglalja össze a szintetikus fotometria legfőbb céljait:

- magnitúdók és színindexek közötti átváltás különböző fotometriai rendszerek között,
- magnitúdók és színindexek redukálása a légkörön kívül,
- fotometriai mennyiségek kalibrációja csillaglégkörmodellek felhasználásával a csillagok fizikai paramétereit alapján,
- feketetest-sugárzó égitestek (Nap és csillagok), nem termális források színindexeinek kalibrációja.

A szintetikus fotometriára az első megközelítés Strömgrentől származik, aki az alábbi formulát használta [Strömgren, 1937]:

$$F_e(\lambda) = \frac{\int F(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int R(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

[Strömgren, 1937] elméleti szempontból elemezte az $R(\lambda)$ válaszfüggvénynek, és a $F(\lambda)$ spektrális energiaszűrőfüggvénynek megfelelő $F_e(\lambda)$ effektív heterokromatikus fluxusokat.

Manapság, mikor nagy erőforrással rendelkező számítógépek állnak rendelkezésre, ez a módszer rendkívül egyszerűen elvégezhető [Buser, R. 1986].

A szintetikus fotometria alapötlete a megfigyelt színek reprodukálása a bemeneti spektrumok (ezek általában elméleti spektrumok, melyeket én is alkalmazni fogok) felhasználása alapján. Ehhez ismerni kell T válaszfüggvényt, mely a műszer (optika, detektor, szűrő), bizonyos hullámhossztartományon adott válasza. Fontos, hogy ha a megfigyelések földfelszíniek, akkor a légkör hatását is figyelembe kell venni.

A szintetikus magnitúdó a $\int_{x_a}^{x_b} f_x T_\zeta dx$ kifejezés logaritmusával arányos, az x_a és x_b a kijelölt hullámhossztartomány határai. Ezen egyenletből is látható, hogy a magnitúdó heterokromatikus mérésnek is tekinthető, melyben az információ a spektrumban van „elrejtve”, mindez a T_ζ válaszfüggvénnyel súlyozva. Az így kapott magnitúdó értéke több mindentől függ: ilyen például, a hullámhossztartomány lefedettsége, az áteresztőképesség, valamint a spektrum egyéb fizikai paramétereit.

A spektrális jellemzőket különböző színkombinációkat alkalmazva tudjuk kideríteni: ezek a spektrumban megjelenő jellegzetességek. A csillagok színeiből a spektrum egyes jellemzőire lehet következtetni, melyek a csillag alapvető paramétereiről árulkodnak. Ilyenek a kontinuum meredeksége, illetve a fémvonalak megjelenése és azok intenzitása.

A fényrendek bevezetése eredetileg Hipparkosztól származik. Ő kezdte el még a Kr. előtti 3. században látszó fényesség alapján osztályozni a csillagokat. Ő először 6 osztályba sorolta azokat. Az első magnitúdójúak voltak az égbolt legfényesebb csillagai, ezek kétszer olyan fényesek voltak, mint a második magnitúdós csillagok. A hatodik kategóriába pedig a szabad szemmel még éppen észrevehető csillagok kerültek. Pogson számszerűsítette a magnitúdóskálát: ezt fejezi ki a ma is ismert Pogson-képlet. Ez alapján a 1 magnitúdó fényességkülönbség 2,5-szeres intenzitásváltozást jelent [Pogson, 1856]:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \frac{\int_{x_a}^{x_b} f_{x,1} T_{\zeta} dx}{\int_{x_a}^{x_b} f_{x,2} T_{\zeta} dx} \quad (2)$$

Ez az összefüggés tartalmazza a szem áteresztőképességét a T függvény formájában, míg m_2 és $f_{x,2}$ az etaloncsillaghoz tartozó magnitúdó és bemeneti fluxusérték. Fontos, hogy itt nemlineáris transzformációról van szó, ami okozhat torzításokat a számítások során, ennek előfordulási esélyét pedig a rossz minőségű adatok használata növeli, illetve véletlenszerű hibák is előfordulhatnak mind a fluxus-, mind a magnitúdóértékekben.

2.1. Magnitúdórendszerek

2.1.1. Az ST magnitúdórendszer:

Az ST monokromatikus rendszer a következő képlettel írható le:

$$m_{ST} = -2,5 \cdot \log_{10}(f_{\lambda}) + ZP_{\lambda} \quad (3)$$

A rendszert úgy definiálták, hogy az egységnyi hullámhosszra vonatkoztatott $F_{\lambda} = 3.63 \cdot 10^{-9}$ erg s⁻¹ cm⁻² Å⁻¹ fluxussűrűség esetén a magnitúdó $m_{ST} = 0$ legyen, míg ZP_{λ} értéke $-21,1$.

Az ST magnitúdórendszer alapvetően ritkán használt rendszer. Azonban Wilmer 2018-ban egy munkájában a Nap abszolút magnitúdóját becsülte meg különböző szűrőkben, illetve a Vega rendszerről AB és ST rendszerekbe történő átváltásokat is bemutatott a Napra mért magnitúdóértékek segítségével elvégzett számolásokkal. Ehhez Wilmer földi és űrben elhelyezkedő távcsöveket egyaránt felhasznált [C. N. A. Wilmer, 2018].

2.1.2. Az AB magnitúdórendszer:

Ez egy fluxusméréseken alapuló magnitúdórendszer, melynek alapegysége a spektrális fluxussűrűség. A rendszer hasonlít az ST-hez, a formula a következőképp néz ki:

$$m_{AB} = -2.5 \cdot \log(f_{\nu}) + ZP_{\nu} \quad (4)$$

Itt a monokromatikus fluxus egysége $f_{\nu}^0 = 3,631 \cdot 10^{-20}$ erg s⁻¹ cm⁻² Hz⁻¹, $ZP_{\nu} = -48,6$, melynek értékét úgy határozták meg hogy egy flat spektrum esetében: $m(AB) = V$ [Oke, J.B., 1974].

A konverzió AB magnitúdórendszerből másik rendszerekre ugyan lehetséges, de nem feltétlenül triviális. Ennek oka az, hogy az átváltás pontossága nagyban függ megfigyeléseket lefedő hullámhossztartománytól.

Az AB magnitúdórendszert 1974-ben J.B. Oke és társai alkalmazták fehér törpékkel kapcsolatos kutatásokra. Az volt a cél, hogy a fehér törpékre is alkalmazható modellatmoszférák megjelenésével a megfigyelt spektrális energiaeloszlásokat ezekkel összehasonlítsák, majd pontos effektív hőmérsékletet és gravitációs értékeket határozzanak meg. Az ehhez kapcsolódó méréseket pedig AB magnitúdórendszerben végezték el, az α Lyrae csillag kalibrációját alapul véve, Oke 1970-es mérései alapján [Oke, J. B. et al, 1970].

2.1.3. A Vega magnitúdó rendszer:

Vizsgálataim során a Vega magnitúdórendszert alkalmaztam. Ez az egyik legtöbbet használt rendszer, itt a Vega csillag (α Lyr) az etaloncsillag. Visszatulva a fent említett ST és AB magnitúdórendszerekre: körülbelül 5475 Å hullámhossznál ez a két magnitúdó azonos. Végül Oke

és Gunn [Oke and Gunn, 1983] határoztak úgy, hogy 5480 Å hullámhosszon nézték Vega abszolút fluxusát, és így definiálták a hullámhosszat, ahol a magnitúdók a két rendszerben rendre: $m_{AB} = m_{Vega}$. Az ST és AB magnitúdórendszerekhez a fluxusértékeket úgy választják meg, hogy mindhárom rendszerben a Vega hasonló magnitúdóértékű legyen. Itt fontos megjegyezni, hogy nem a rendszerek definícióiban történnek a módosítások, hanem magukat a megfigyeléseket szabványosítják a megfelelő rendszerekre. Ezt pedig a nullpontok eltolásával teszik úgy, hogy azok a definícióknak megfelelőek legyenek. A Vega csillag több szűrőrendszer alapjaként is szolgál mint például a Gaia és a 2MASS is. Bár a VEGA rendszer nullpontját megfigyelési szempontból standard csillagok hálózata együttesen határozza meg, formálisan egyetlen objektumhoz lehet rögzíteni. A VEGA rendszer definíciója heterokromatikus mérésekre:

$$m_{VEGA} = -2,5 \cdot \log \frac{\int_{\lambda_f}^{\lambda_i} \lambda f_{\lambda} T_{\zeta} d\lambda}{\int_{\lambda_f}^{\lambda_i} \lambda T_{\zeta} d\lambda} + ZP_{\zeta} \quad (5)$$

Ebben az egyenletben ZP_{ζ} minden egyes sávra ki van számolva, a csillag ismert abszolút fluxusa és megfigyelt magnitúdója alapján a következőképpen:

$$ZP_{\zeta} = m_{\star, \theta} = -2,5 \cdot \log \frac{\int_{\lambda_f}^{\lambda_i} \lambda f_{\star} T_{\zeta} d\lambda}{\int_{\lambda_f}^{\lambda_i} \lambda T_{\zeta} d\lambda} \quad (6)$$

Ebben az egyenletben az $m_{\star, \theta}$ a Vega abszolút magnitúdója, míg a $f_{\star}$ a fotometriai rendszer kalibrálásához szükséges mennyiség.

A fentiek alapján tehát ZP mennyisége rendkívül fontos a szintetikus fotometria előállítása során. Értékének pontosításához többféle módszer is rendelkezésre áll, például lehet az adott sávban mért megfigyelt magnitúdót korrigálni, de akár az adoptált abszolút kalibráción is lehet módosítani. A Vega rendszer alapjául szolgáló α Lyr csillagra a legjobb abszolút fluxusérték a CALSPEC könyvtárból¹ érhető el. Ennek a modellspektrumnak a pontossága 1% körül van [Bohlin, 2007]. Ezt átszámítva ZP értéke mindössze 0,01 magnitúdónak adódik. A szintetikus magnitúdók generálása során általában ezt az abszolút fluxust fogjuk alkalmazni, ahogyan Casagrande és mtsai is tették [Casagrande et al, 2014].

Az átváltás két fotometriai rendszer között matematikailag könnyen kivitelezhető. Azonban a gyakorlatban már kevésbé működik: az észlelések során figyelembe kell venni azokat a tényezőket, melyek magukban a mérésekben is eltérést, pontatlanságot okoznak. Ilyen faktorok például a légkör állapota, valamint az eszköz korlátai, azaz az elektronikából származó hibák. Ennek következménye az is, hogy a világűrből végzett fotometriai mérések nagyságrendekkel pontosabbak, mint amit a Föld felszínéről el tudunk érni.

2.2. Bolometrikus korrekciók

A csillagok luminozitásának meghatározásához szükség van az adott szűrőre definiált bolometrikus korrekcióra. A szintetikus spektrumok tartalmazzák a felületi fényesség mennyiségét (H_{λ} , ennek mértékegysége $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$).

Az f_{teljes} mennyiség a teljes fluxust jelenti tetszőleges távolságból mérve. Ennek kiszámítására a (7). képlet alkalmazható, amennyiben az csillagközi extinkciót elhanyagolhatjuk:

$$f_{\text{teljes}} = (R/d)^2 \cdot F_{\text{teljes}}, \quad (7)$$

¹<https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/reference-data-for-calibration-and-tools/astronomical-catalogs/calspec>

ahol R a csillag sugara, F_{teljes} az R távolságból mért teljes fluxus (tehát a csillag felszínén mért teljes fluxus), a d pedig az a távolság ahonnan az f_{teljes} fluxust mérjük, mely az én esetemben 10 parszek. A teljes felszíni fluxust az elméleti spektrumokból kaphatom meg a görbe alatti terület integrálásával.

A szintetikus fluxusok számolásához tehát a távolság ismeretében megfelelő a (7).egyenlet. Legtöbbször azonban a szintetikus színeket számolják ki, azaz két szűrőn keresztül mért mennyiség különbségét, ezáltal elérve hogy a távolságot tartalmazó arányszámtól való függést el lehessen hanyagolni: így az egyszerűség kedvéért Casagrande és mtsai munkájához hasonlóan [Casagrande et al, 2014] $d=10$ pc értéket fogok venni távolságnak, így pedig kiszámolhatóvá válik az abszolút magnitúdó is.

A bolometrikus korrekció mennyiségét a látszó és a bolometrikus fényesség különbsége adja. Abból kiindulva hogy ez is különbségként számítható, a távolságot tartalmazó arányszámtól való függést ebben az esetben is el lehet hanyagolni. A bolometrikus korrekció értéke (BC) tehát az adott ζ sávban a (8). képlettel kapható meg:

$$BC_{\zeta} = m_{\text{bol}} - m_{\zeta} = M_{\text{bol}} - M_{\zeta} \quad (8)$$

ahol m_{bol} a látszó, míg M_{bol} az abszolút bolometrikus magnitúdó, m_{ζ} és M_{ζ} pedig rendre a ζ sávban mért látszó és abszolút magnitúdókat jelölik. Tehát a (8).egyenlet alapján egy adott ζ sávban a bolometrikus korrekció nagysága megegyezik a látszó és az abszolút magnitúdókkal számolva is.

Az abszolút bolometrikus magnitúdót (M_{bol}) a (9).egyenlet alapján lehet kiszámolni:

$$M_{\text{bol}} = m_{\zeta} + BC_{\zeta} + 5 - 5 \cdot \log(d) - A_{\zeta}, \quad (9)$$

ahol A_{ζ} az extinkció, d pedig a csillag távolsága parszekben. A (9).egyenletben m_{ζ} értéket a Gaia méréseiből kapjuk, BC_{ζ} -t a (8) egyenlet alapján számolhatjuk, míg az extinkciót a Gaia DR3 adatbázisból lehet megkapni.

A látszó bolometrikus magnitúdót ismerve egyenes út vezet a csillag luminozitásának kiszámításához, melyhez a 10 egyenletet használom fel:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 10^{\frac{M_{\text{bol}} - M_{\text{bol},\odot}}{-2,5}} \quad (10)$$

amely a luminozításértékeket $L_{\odot}$ egységekben adja meg. A Nap luminozitása $L_{\odot} = 3,828 \cdot 10^{26}$ W.

A luminozítás ismeretében a Stefan–Boltzmann-törvényt felhasználva a csillagok sugara kiszámítható, mely egyenlet a következőképpen fejezhető ki:

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L}{L_{\odot}} \frac{T_{\text{eff},\odot}^2}{T_{\text{eff}}^2}}, \quad (11)$$

ahol R jelöli a keresett sugarat, míg $R_{\odot}$ a Nap sugara $6,96 \cdot 10^8$ m, T_{eff} a csillagok, míg $T_{\text{eff},\odot}$ a Nap effektív hőmérséklete, 5772 K.

3. Égboltfelmérő programok áttekintése

A nagy felbontású spektroszkópiai és fotometriai égboltfelmérő programok megjelenésével egyre fontosabbá vált a csillagok paramétereinek (sugár, luminozítás) elméleti modellekkel történő meghatározása. A szintetikus fotometria egyik legfőbb célja a csillagok megfigyelt

fényességeinek és színindexeinek elméleti modellekből történő meghatározása, melyet aztán a bolometrikus korrekció kiszámolására, illetve a magnitúdók és színindexek közötti átváltására lehet használni a csillagok fizikai paramétereire figyelembevételével.

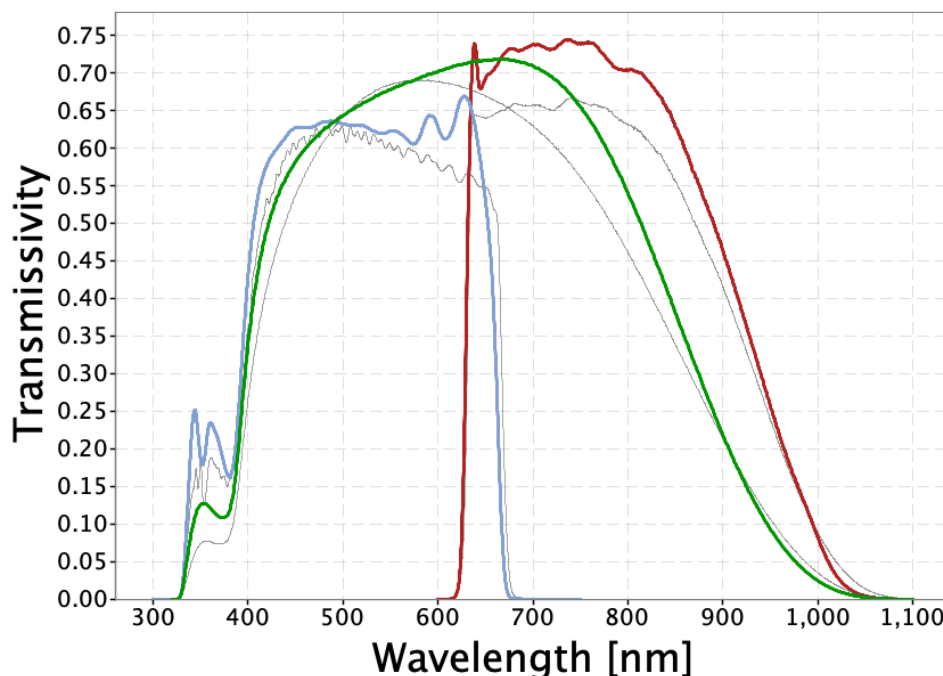
Mivel az összes APOGEE-csillagra elérhetőek a Gaia és a 2MASS adatai, ezért ennek a két nagy égboltofelmérő programnak fotometriai színindexeit hasonlítom össze.

A csillagok fizikai paramétereinek (luminozitás, sugár) meghatározásához az APOGEE program [Majewski et al., 2017] által mért effektív hőmérsékleteket veszem alapul.

3.1. Gaia

Az Európai Űrügynökség (ESA) által 2013-ban felbocsátott Gaia-űrteleszkóp, [Gaia Collaboration DR2] célja csillagászati objektumok helyzetének, távolságának, fényességének, színindexének és fizikai paramétereinek nagy pontosságú meghatározása az optikai tartományban. Ennek az asztrometriai űrszondának a legfontosabb célja, hogy az évtized végére az általa összegyűjtött adatok alapján elkészíthető legyen a Tejútrendszer háromdimenziós térképe, illetve annak dinamikai története is megállapítható legyen.

A Gaia harmadik adatkibocsátása 2022 júniusában történt². A Gaia DR3-ban spektroszkópiai adatok is nyilvánosságra kerültek: összesen 217 millió csillag spektráltípusát állapították meg, ezen kívül még részletes spektroszkópiai paraméterek (effektív hőmérséklet, log g , fémeség) érhetőek el 2,3 millió forró, valamint 94.000 hűvösebb csillagra. Mindemellett 128 millió csillagról evolúciós adatokat is tartalmaz az adatkibocsátás, mint például a becsült tömeg és életkor. A távolságmérés pontossága a legközelebbi csillagok esetében 0,001%, míg a galaxis középpontjában (tőlünk 30.000 fényévre) 20%.



2. ábra. A Gaia DR3 szűrőfüggvényei³

A szintetikus modellek alapján a Gaia 3 szűrőjére számolok magnitúdóértékeket: ezek rendre a G (szélessávú), Grp (vörös oldali) és Gbp (kék oldali) szűrők, lásd 2 ábra. A Gaia 3. adat-

²<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>

kibocsátásával magnitúdóértékek szűrőnként rendre 1,806, 1,54 és 1,55 milliárd forrásra nagy pontosságú magnitúdóértékek is megjelentek.

Szűrőfüggvény	G	GBP	GRP
$G < 13$ mag	0,3 mmag	0,9 mmag	0,6 mmag
$G = 17$ mag	1 mmag	12 mmag	12 mmag
$G = 20$ mag	6 mmag	108 mmag	52 mmag

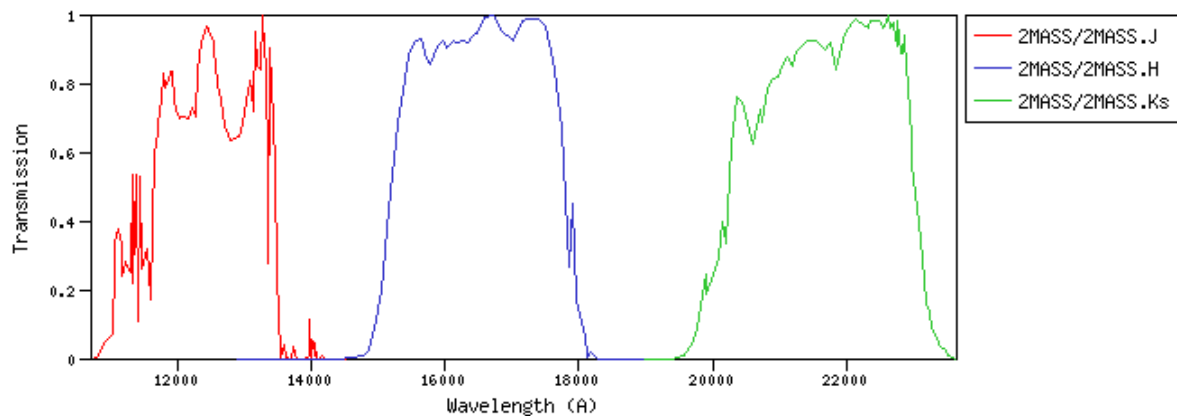
1. táblázat. A Gaia DR3 szűrőfüggvények pontosságai:⁴

A Gaia DR3-nak [Creevey et al, 2022] számomra legrelevánsabb részét a csillagok asztrofizikai paraméterei képezik. Ilyenek például log g , metallicitás, α -elemek aránya, valamint az effektív hőmérséklet értéke. Ezen paraméterek felhasználásával a Gaia minden korábbinál több csillagra szolgáltatott luminozitás- és sugárértékeket a DR3 részeként.

3.2. 2MASS

Dolgozatomban a 2MASS fotometriai adatait arra használom, hogy az általam számolt magnitúdókat és színindexeket validálni tudjam a Gaia és a 2MASS színindexei közötti összefüggések elméleti reprodukciójával.

A 2MASS a NASA által végrehajtott teljes infravörös égboltfelmérés volt, mely 1997-től 2001-ig zajlott. Az égboltfelmérés két közel egyforma távcsőhöz kapcsolható: egyik az Egyesült Államokban, Arizonában, a Whipple Observatóriumhoz tartozó Mt. Hopkins, a másik Chileben La Serena közelében a Cerro Tololo Inter-American Observatory megfigyelőhelyen működik. Mindkét eszköz ugyanolyan 1,3 méteres teleszkóp, azonos kamerákkal felszerelve. Amíg a Gaia optikai tartományban észlel, a 2MASS által lefedett hullámhossztartomány a közeli infravörösben található, 1200 és 2200 nanométer között.

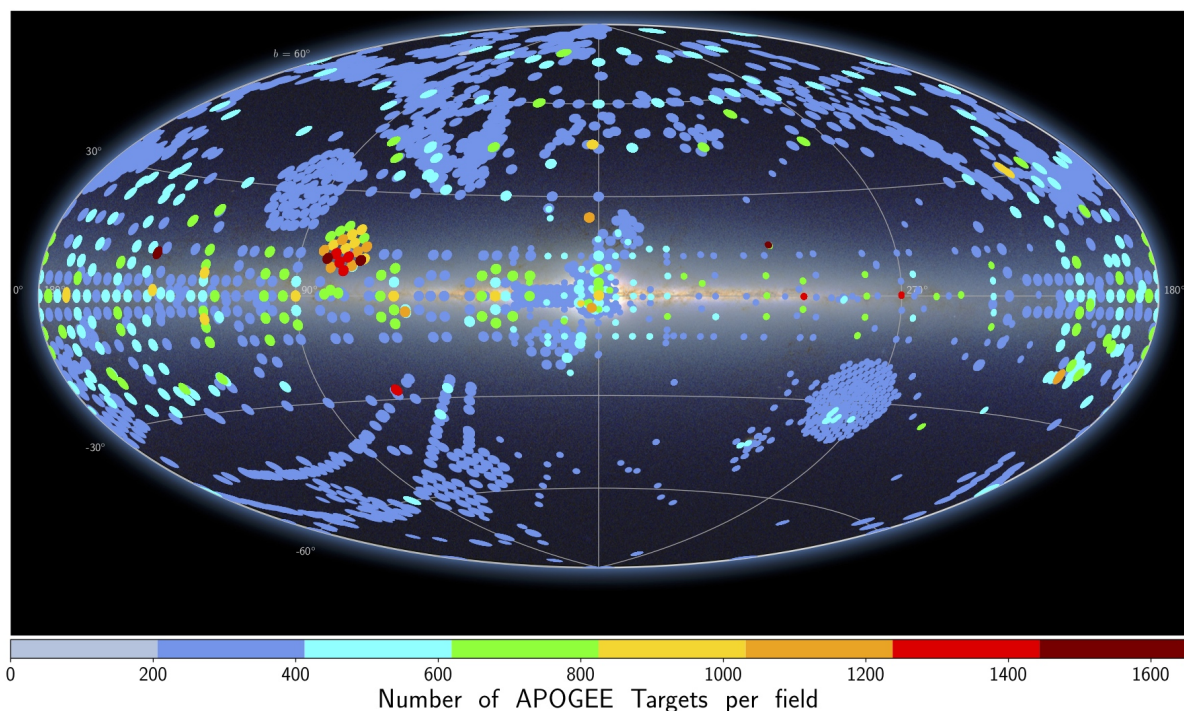


3. ábra. A 2MASS szűrőfüggvényei⁵

A 2MASS pontforrás-katalógusa több mint 500 millió objektumot, csillagokat és galaxisokat egyaránt tartalmaz, míg a kiterjedt forrásokra vonatkozó katalógus (XSC) körülbelül 1,6 millió galaxisból áll. Az ún. Nagy Galaxisatlász (Large Galaxy Atlas, LGA) körülbelül 600 közeli galaxist és halmazt tartalmaz. A 2MASS-hoz tartoznak az All-Sky Quicklook illetve az Atlas képek, ezek pedig az egész infravörös égboltot hivatottak lefedni.

3.3. APOGEE

Az APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) spektroszkópai égboltfelmérő program méréseinek hosszú távú célja a Tejútrendszer kialakulásának felderítése. Ehhez több százezer csillagról vesznek fel nagy felbontású spektrumokat ($R = 22500$), a hasonló felbontású programok között egyedülként a közeli infravörös tartományban. A vizsgált csillagok nagy része a vörösóriás-ágon illetve fősorozati állapotban van, a Tejútrendszer minden részéről [Majewski et al., 2017]. Maga az APOGEE program célja, hogy a vizsgált csillagok kémiai összetételét meghatározza, melynek során nagy hangsúlyt kapnak az idősebb, ezáltal fémszegényebb csillagok. Erre azért van szükség, mert az ilyen csillagok tulajdonságainak vizsgálatával kerülhetünk egyre közelebb a Tejútrendszer múltjához, illetve abból visszavezetve a kialakulásához.



4. ábra. Az APOGEE által célba vett területek eloszlása a Tejútrendszerben ⁶

A jelenlegi legfrissebb APOGEE-adatbázis a DR17 [Majewski et al., 2017]. A 4.ábra szemlélteti az APOGEE DR17 objektumait: az általa megfigyelt mezők eloszlása látható a 2MASS teljeségbolt-képére vetítve. A színek a célpontok számának megfelelően változik. A 17. adatkibocsátás tartalmát Abdurro'uf foglalta össze 2022-ben [Abdurro'uf et al, 2022]: A DR17 körülbelül 657.000 csillagra tartalmaz adatokat; ebből körülbelül 370.000 vörös óriáscsillag. Az adatok tartalmaznak radiális sebesség-méréseket, atmoszférikus paramétereket, valamint egyedi kémiai elemek abundanciáit. Azért az APOGEE által publikált adatbázisra esett a választás a számításokhoz, mert innen nagyon sok különböző paraméter egyetlen mérési folyamaton keresztül érhető el, így ezek az adatok konzisztensnek tekinthetők: mivel egyetlen távcső mérte le ezeket az adatokat, ugyanolyan beállítások, illetve feltételek mellett, nagyban lecsökken a hibák és bizonytalanságok mértéke is.

A DR17 tartalmazza az APOGEE–1 és APOGEE–2 felmérések adatait egyaránt. Előbbi 2011–2014 között tartott, és a Tejútrendszer különböző részeit (például vastag és vékony korongok, küllő) alkotó csillagokat térképezte fel azzal a céllal, hogy megfigyelje, a galaxis egyes struktúrái között milyen kapcsolat van, milyen hatással vannak egymás fejlődésére. Ezzel

ugyanis tisztább képet kaphatunk arról, hogy ezek a szerkezeti elemek hogyan keletkezhettek, valamint mely csillagok keletkeztek a Tejútrendszerben, és melyek azok, amelyeket valamilyen esemény illetve kölcsönhatás során a Galaxis befogott. Ugyanis ezek a csillagok kémiai összetételükben jelentős eltérést mutathatnak egymástól.

Az APOGEE–2 felmérés hasonló elven zajlott 2017–2021 között; a különbség, hogy több csillagot figyelt meg. Az ehhez használt spektrográfok az APOGEE–2N, illetve APOGEE–2S, előbbi az Apache Point Observatóriumban helyezkedik el az Egyesült Államok területén, míg utóbbi a Las Campanas Observatóriumban kapott helyet Chilében. A két spektrográfon párhuzamosan folytak a mérések, eredményeiket pedig a DR17 tartalmazza. A DR17 adatbázis sok különböző adatot listáz a csillagokról: ilyenek a nagy felbontású spektrumok, valamint a radiális sebesség-mérésekből származó adatok, mindemellett atmoszférikus paramétereket (effektív hőmérséklet, fémesség, felszíni gravitációs gyorsulás), illetve kémiai elemek abundanciáit is tartalmazza, ezeket a csillagok luminozitásának és sugarának kiszámításához használok fel a dolgozatban.

4. Alkalmazott módszerek

4.1. A BOSZ spektrális adatbázis

Az általam felhasznált elméleti spektrumok, melyek az ATLAS9-APOGEE [Mészáros et al, 2012] nevű csillagatmoszféra-modellekre alapuló BOSZ elméleti spektrális adatbázisból származnak [Bohlin et al, 2017], a korábbi hasonló adatbázisokhoz viszonyítva több szempont miatt is pontosabbak. Azért előnyös szintetikus könyvtárak felhasználása, mert azok a csillagok paramétereinek rendkívül széles skáláját le tudják fedni, beleértve ebbe a hőmérsékletet, fémességet és az α -elemeket és a szenet is.

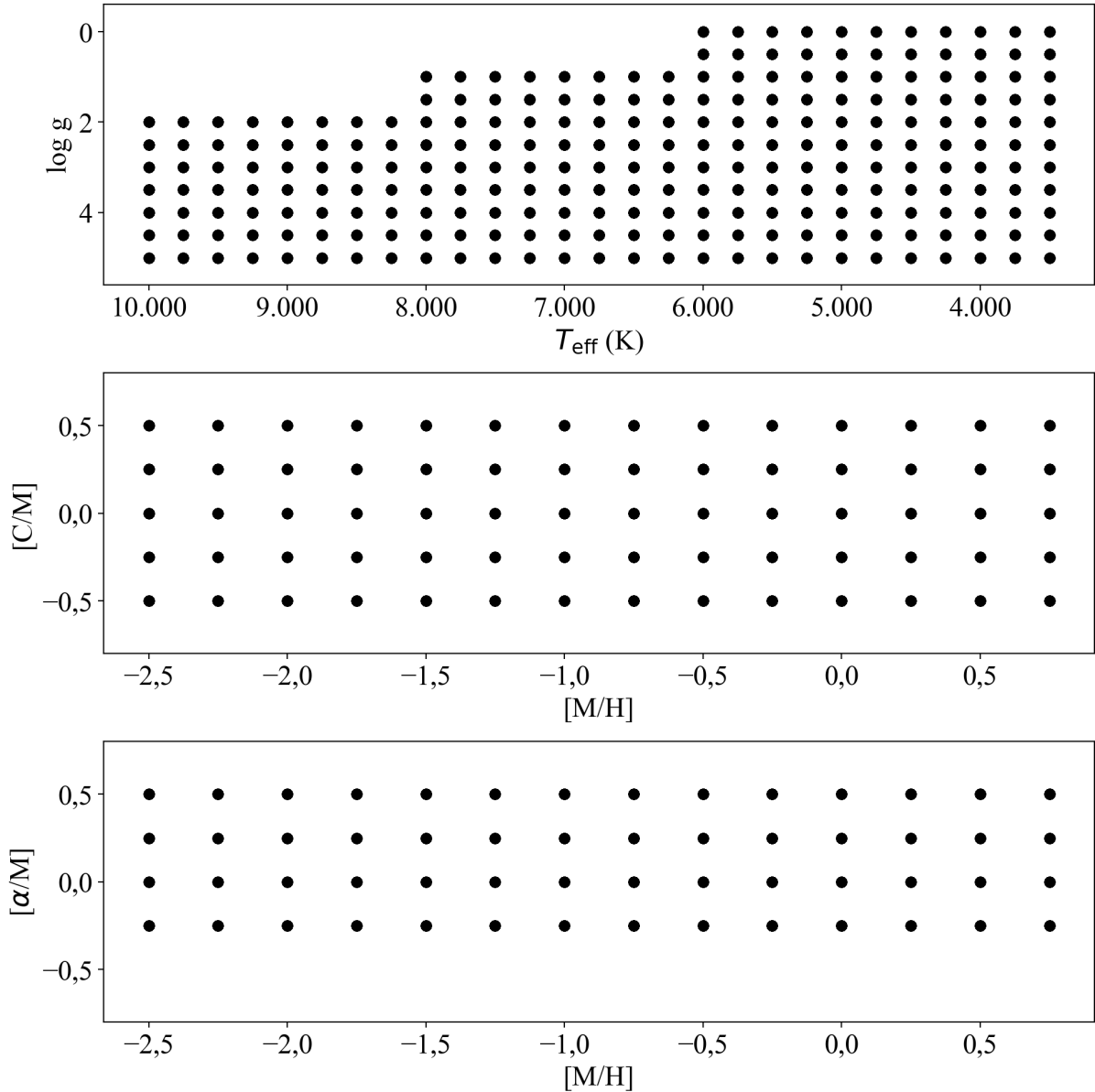
A 5.ábrán a három panelen azon paraméterek lefedettségét látjuk egymás függvényében, amelyek kombinációira kiszámoltam a bolometrikus korrekciókat. Ez az ábra az általam használt paramétertartományt mutatja csak, a teljes BOSZ adatbázis magasabb hőmérsékletekre is kiterjed. A legfelsőn az x tengelyen a kiszámolt, elméleti effektív hőmérséklet értékek láthatók, a lépésköz 250 K, míg y tengelyen a $\log g$, ahol rendre 0,5-el növekednek az értékek. A 10.000K-es levágásra azért volt szükség, mert a BOSZ spektrumok csak 100 nm-től tartalmazzák a csillagok színeképét és az ennél magasabb hőmérsékletű csillagok esetében már jelentős mennyiségű fluxus jelentkezik 100 nm alatt. A második panelen hasonló módon a szénabundancia van feltüntetve a metallicitás függvényében, itt mindkét mennyiség esetén 0,25-el nő lépésként az érték. Míg a legutolsó panelen szintén a metallicitás függvényében az α -elemek gyakorisága figyelhető meg. A 0 a Napban megfigyelhető abundanciát jelenti, a tengelyeken az értékek pedig az attól való eltérést mutatják⁷

4.2. SPECIES

A csillagatmoszféra-modellekből a magnitúdókat egy `species` nevű python-kód segítségével számoltam ki a az egyes szűrőkre modellenként⁸. Mindenekelőtt a `species` osztályt kell feltételezni. Ez az osztály tartalmazza a számításokhoz szükséges függvényeket: ide tartozik maga a szintetikus fotometria számításai mint a fluxusok és magnitúdók közötti átváltás.

⁷<https://archive.stsci.edu/prepds/bosz/>

⁸https://species.readthedocs.io/en/latest/tutorials/synthetic_photometry.html



5. ábra. Az általam használt BOSZ-modellek rácsai, ahol az egyes paneleken a paraméterek értékpárjainak eloszlásai láthatóak. Felső panel: $T_{\text{eff}} - \log g$ grid, ahol a felszíni gravitáció értékei vannak feltüntetve effektív hőmérséklet függvényében, míg a középsőn és az alsón rendre a szén és α -elemek mennyiségei láthatóak a fémesség függvényében.

A species osztály összeköttetésben van a SVO—Spanish Virtual Observatory⁹-tartalmával. Az említett oldalon számos földi és űrben működő eszköz fel van sorolva, a hozzájuk tartozó szűrőkkel együtt. Ezt az adatbázist kéri le a species, és ezek segítségével az oldal mögött lévő beépített függvények alapján lehet kiszámolni az egyes szűrőkben mért magnitúdóértékeket. A SVO oldalon listázott szűrőfüggvényekből választottam ki azokat, amelyekben a magnitúdóértékét szeretném megkapni, ezek a 2MASS J, H, K illetve a Gaia Gbp, Grp és G szűrőket jelentik. Ezeket pontosan az oldal által feltüntetett módon kellett beadni a `synphot.spectrum_to_flux` függvénynek, amely kiszámítja az általunk megadott szűrő(k)ben a fluxus értékét. Hibaszámítást is lehet végezni, ezt beépített Monte Carlo—módszerrel számolja a program. A hibaszámí-

⁹<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php?asttype=astro>

tással külön nem foglalkoztunk, ugyanis elméleti spektrumokhoz nem társítunk hibát. Ehhez hasonlóan megkapható a szintetikus magnitúdó a `synphot.spectrum_to_magnitude` függvény segítségével. A `species` csomag úgy van kalibrálva, hogy a magnitúdóértékeket a Vega-ához viszonyítva adja meg, és a feltételezés az, hogy a Vega fényessége minden szűrőben 0,03 magnitúdó értékű. Ennek megvalósításához a program letölti a Vega spektrumát, és annak felhasználásával számolja ki a szintetikus spektrumokra a magnitúdóértékeket.

4.3. Az általam írt kód ismertetése

A fentebb részletezett `species` csomag számításait automatizáltam és az alapján számoltam magnitúdóértékeket 69232 szintetikus spektrumra, melyek a 4.1.fejezetben ismertetett paraméterekkel rendelkeznek (lásd 5. ábra). A programom a nyers szintetikus spektrumot kezdi el feldolgozni a következőképpen: először a hullámhosszértékeket átkonvertálja levegőbeli hullámhosszra. Erre azért van szükség, mert alaphoz a hullámhosszértékek vákuumra vannak megadva, azonban a légköri hatásokat figyelembe véve ez az érték módosul. A konverzióhoz a 12 képletet alkalmaztam:

$$\lambda_{\text{leveg}} = \frac{\lambda \cdot 10^{-4}}{1 + 2,735182 \cdot 10^{-4} + \frac{131,4182}{\lambda^2} + \frac{2,76249 \cdot 10^8}{\lambda^4}} \quad (12)$$

Ezt követően a BOSZ-modellekben publikált felületi fényességet fluxussá és a megfelelő mértékegységre (W m^{-2}) konvertáltam:

$$f_2 = 10 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left(\frac{R_{\odot}}{1 \text{ CSE}} \right)^2 \quad (13)$$

A spektrumokban a hullámhosszintervallumot leszűkítettem olyan értékek közé, amelyeket az adott szűrők lefednek, ezzel rövidítve a program futási idejét. Ezt bármikor lehet és kell módosítani annak függvényében, hogy melyik szűrőkre szeretnénk a magnitúdókat kiszámolni. Esetemben a megadott intervallum 0,295 és 2,4 mikrométer között volt. A következő lépésben a spektrum alatti terület integrálásával kiszámoltam az elméleti spektrum teljes fluxusát. A spektrumokhoz a különböző paraméterek (effektív hőmérséklet, $\log g$, fémesség, α -elemek gyakorisága, illetve a szénmennyiség) az őket tartalmazó fájlok neveiben találhatók. Fontos megjegyezni hogy a paraméterek nem explicit módon vannak benne a fájlnevében, hanem megfeleltetésekkel vannak belekódolva. Így ennek megfelelően írtam egy programot, amely feldolgozza a fájlnevében a paramétereket és a hozzájuk tartozó kódolt mennyiséget. Ezeket kiválasztja, átszámolja, majd egymás mellé rendre oszlopokba rendezi.

Ezek után az általam használt szűrőfüggvény-családokat választottam ki és adtam meg a programnak: ehhez összeköttetés szükséges az SVO-adatbázissal. A Gaia és a 2MASS szűrőfüggvény-családjai a következők: G, Gbp és Grp, valamint J, H és K.

Ezek megadása után a program minden egyes beadott spektrumra 10 pc távolságból a fent felsorolt szűrőke kiszámolja a magnitúdóértékeket 5 tizedesjegyre. Így minden spektrumhoz 6 magnitúdóérték társult.

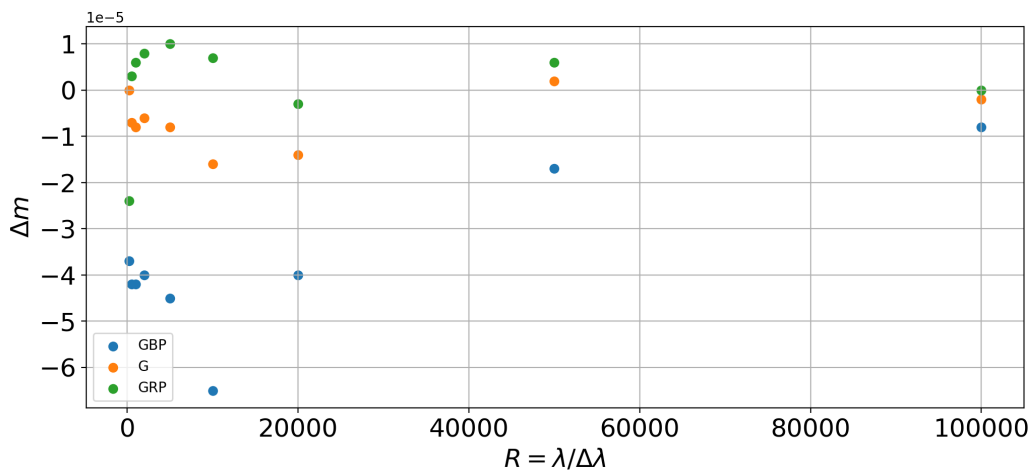
Miután a magnitúdókat megkaptam, következik a bolometrikus korrekció kiszámítása. Ehhez a Casagrande által használt képletet alkalmaztam [Casagrande et al, 2018], mely rendezés után a következőképpen néz ki:

$$BC = -\frac{5}{2} \cdot \log_{10} \left(\frac{f_2}{3,1978 \cdot 10^{-11}} \right) - m_{\xi} + 14,74 \quad (14)$$

Az egyenletben található konstans már tartalmazza a Nap bolometrikus korrekcióját, melyet 4,74-nek vettem, illetve luminozitását, ($L_{\odot} = 3.826 \cdot 10^{33}$ ergs/s).¹⁰, valamint az egységes mértékegységekre való átváltáshoz szükséges konstansokat melyek rendre: $1 R_{\odot} = 6,957 \cdot 10^8$ m a $3,086^{16}$ értéket, ami a parszek méterben kifejezve, illetve szükség van a csillagászati egység centiméterbe történő átváltására. Az m_{ξ} érték helyére a kiszámolt magnitúdókat behelyettesítve és a számolást elvégezve a képlet megadja szűrőnként a bolometrikus korrekciók értékét.

Az általam használt spektrumok felbontása 300.000, ez a BOSZ-modellek között fellelhető legnagyobb felbontás, melyből kifolyólag a legnagyobb pontosság érhető el a számolások során. Azonban a számítások futtatása előtt tesztet végeztem arról, hogy valójában mennyivel térnek el egymástól a különböző számítások során kapott magnitúdóértékek, ha a számolás során a felbontást változtatom.

Ehhez egy alacsony hőmérsékletű vörös óriáscsillag spektrumát használtam. A metallicitás, illetve a $\log g$ értéke is 0 volt, míg az effektív hőmérsékletet 3750 K-nek választottam. Azért erre esett a választásom, mert az ilyen típusú csillagoknak van a legrészletesebb spektrumuk, illetve ebből következik, hogy a fizikai paraméterekben bekövetkező bármilyen kis változás is nagy eltéréseket okozhat a spektrumban. Ezért fontosnak tartottam a felbontás hatását vizsgálni, hogy minél pontosabb eredményeket kaphassak. Fontos kiemelni, hogy a felbontás növelésével együtt a számolás futási ideje is növekszik. A felbontásértékek, melyben a spektrumok rendelkezésre álltak: 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10.000, 20.000, 50.000, 100.000, 300.000. A tesztelés céljából mindegyik felbontás esetén elvégeztem a magnitúdók kiszámolását a Gaia szűrőire. A 6. ábrán az x tengelyen a felbontások vannak feltüntetve, míg az y tengelyen a 300.000-es felbontásból és az alacsonyabb felbontásoknál számolt magnitúdók közötti különbség látható. Látszik hogy a 20.000 alatti felbontások esetén akár $6 \cdot 10^{-5}$ eltérés is lehet magnitúdóban. Ez pedig azt jelenti hogy az itt számolt hibák már megközelítik a GAIA által publikált legkisebb hibákat. Ez 100.000 felé nagy mértékben csökken, ott az eltérés 10^{-5} -nél is kisebb. A fentiek alapján végül a 300.000-es vagyis az elérhető lehető legnagyobb felbontást választottuk, és azt alkalmazzuk a legpontosabb eredmények elérése érdekében.



6. ábra. A pontosság változása az R felbontás növelésével a Gaia szűrőire számolt magnitúdók alapján.

¹⁰https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2015_English.pdf/

5. Eredményeim: új bolometrikus korrekciók

5.1. A Gaia-2MASS színindexek összehasonlítása, illetve asztrofizikai paraméterektől való függése

Jelen (al)fejezetben a Gaia és a 2MASS égboltfelmérő programok egyes színindexeinek összehasonlításával foglalkozom; külön kitérve a kettő közötti kapcsolat szemléltetésére. Ezzel lehetőségem nyílik a saját számításom pontosságának ellenőrzésére, illetve új, egyéb paraméterektől való függést is be fogok mutatni. A választásomat indokolja, hogy meghatározó égboltfelmérő programokról van szó, mind a Gaia, mind a 2MASS tartalmaz fotometriai adatokat az APOGEE által észlelt csillagokról.

A színindexek között fennálló kapcsolat ábrázolását több lépésben végeztem el. Először kiválasztottam a Gaia DR3 adatbázisából háttércsillagokat a TOPCAT program¹¹ segítségével. Ezek azok a csillagok, melyekhez az általam kiszámolt színeket fogom viszonyítani. A csillagokat különböző paraméterek alapján szűrtem (amit lentebb részletesen kifejtek, lásd 5.1.1. alfejezet), majd az általam szintetikus spektrumokból számolt magnitúdókból megállapított színeket GAIA háttércsillagainak előterében ábrázoltam.

5.1.1. A háttércsillagok kiválasztása

A megfelelő háttércsillagok kiválasztásában Carrasco kutatásaira¹² támaszkodtam, aki a Gaia DR2 csillagaira alkalmazta a vágásokat. Mivel az általa alkalmazott objektumokhoz képest a változás nem túl jelentős a DR3 csillagait illetően, így az ő munkájában szereplő vágásokat használtam mintaként a válogatás során. Első lépésben azokat a csillagokat választottam ki, amelyek a G szűrőben 10 fényesebbek. A következő lépésben a fluxus σ -jára adtam meg egy határt: a 15 képletet alkalmaztam a Gaia G, Grp, Gbp szűrőire.

$$\sigma_{\text{filter}} = 2,5 \cdot \log_{10} \cdot \frac{\text{flux}_{\text{filtererror}}}{\text{flux}_{\text{filter}}}, \quad (15)$$

ahol σ_{filter} a keresett σ -érték, míg a $\text{flux}_{\text{filter}}$ az átlagos fluxus szűrőnként, a $\text{flux}_{\text{filtererror}}$ pedig annak a hibáját jelenti. A fenti számításra alapozva alkalmaztam egy szűrést a csillagokra: σ_{filter} értéke szűrőnként egy meghatározott maximumértéket vehet fel: ezek σ_G -re vonatkozóan 0,01, míg σ_H , valamint σ_K esetében 0,03 lehetnek. Bár a Gaia-nál a hibák alapvetően aszimmetrikusak, kis hibák esetén a hibatartományt szimmetrikusnak lehet tekinteni. A 15 képlet alkalmazását, és a szimmetrikus hibát azért alkalmazhattam, mert a Gaia-nak alapvetően kicsi, néhány század magnitúdós hibája van, ez pedig beleesik abba a tartományba, amikor a fenti módszerek jól használhatók.

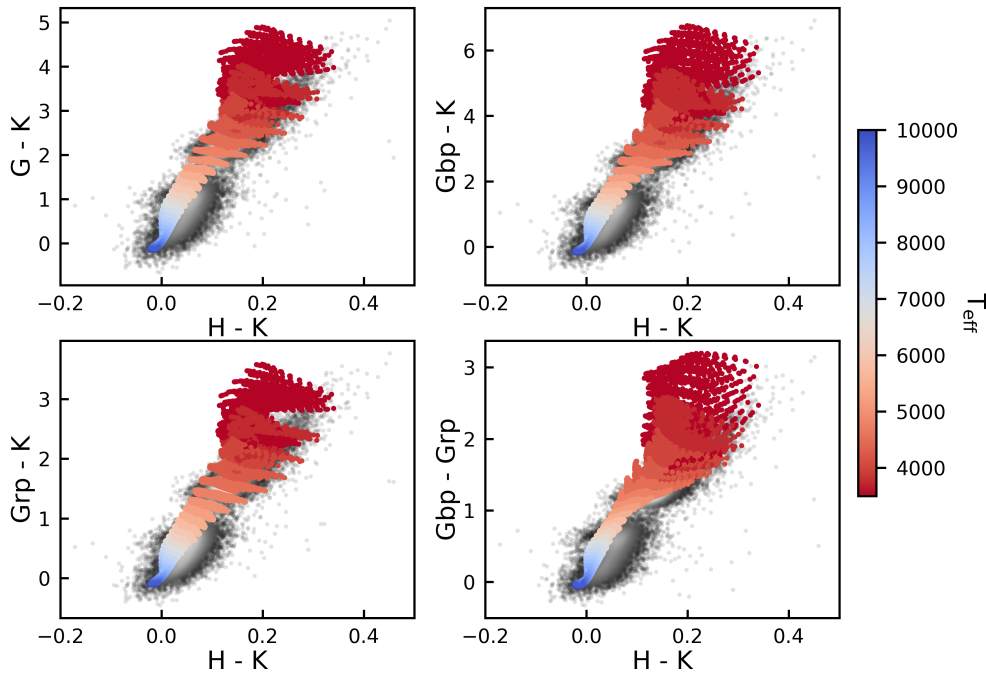
Ezen felül a nagy vörösödéssel rendelkező csillagok is kivágásra kerültek: ennek oka, hogy nagy távolságra lévő csillagok esetén a csillagközi anyag, por stb. módosítja a csillagok színét abban az értelemben, hogy azt a vörös felé tolja el. Ez a HRD-n bal oldali irányba történő elmozdulást jelent. A szóban forgó változás körülbelül 60 parszekig elhanyagolható, mely azt jelenti, hogy a háttércsillagok maximális vörösödése 0.02 értékig terjedhet úgy, hogy a vörösödés hatása minimális legyen.

¹¹<http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>

¹²https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/Data_processing/chap_cu5pho/sec_cu5pho_calibr/ssec_cu5pho_PhotTransf.html

5.1.2. A színindexek asztrofizikai paraméterektől való függésének bemutatása

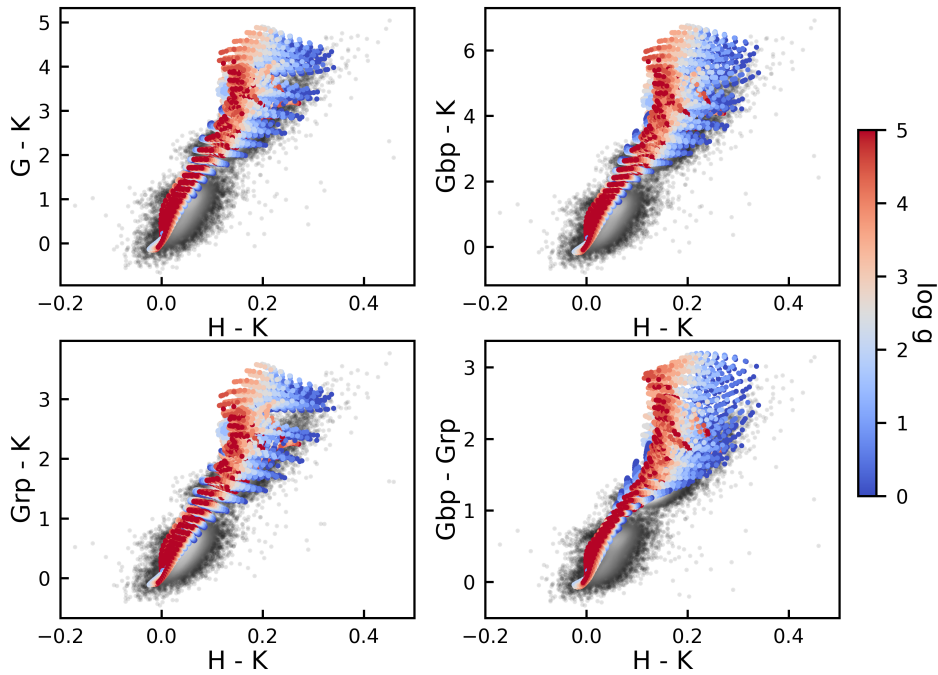
Az alábbiakban az asztrofizikai paraméterek színekre gyakorolt hatását vizsgálom, melyeket a 7, 8, valamint 9 ábrán szemléltetek. A fentiek alapján kiszűrt csillagok alkotta háttérére immár rá tudtam vetíteni az általam számolt magnitúdók különbségeit, melyeket feltüntettem a Gaia DR3-ban fellelhető csillagokra. A csillagokhoz a magnitúdóértékeken felül különböző fizikai paraméterek is társulnak: effektív hőmérséklet, log g , valamint a fémesség, ezek függése pedig rendre a 7, 8 valamint 9 ábrán láthatóak és az ezen paraméterek hatását különböző színek segítségével szemléltetem.



7. ábra. A Gaia-2MASS színindexek effektív hőmérséklettől való függése. A négy panelen az x tengelyeken a 2MASS két szűrője alapján számolt $H-K$ szín látható, míg az y tengelyen a Gaia-2MASS szűrőiből vegyesen számolt színek, rendre: $G-K$, $Gbp-K$, $Grp-K$ és $Gbp-Grp$. A szürke pontok a háttércsillagokat jelölik sűrűség szerint, a sötétebb területek a kevésbé, míg a világosszürke/fehér részek a csillagok sűrűbb eloszlását jelentik.

A Gaia DR3-ból származó háttércsillagokkal való összehasonlítás során arra a következtetésre jutottam, hogy az általam számolt színindexek helyesen adják vissza a megfigyelt összefüggéseket a Gaia és 2MASS között, ezért a szintetikus spektrumok alapján számolt magnitúdók helyesek. Az ellenőrzésen kívül a különböző asztrofizikai paraméterek befolyását is vizsgálom az ábrákon a színindexekre, mégpedig úgy, hogy a paraméterek értékének függvényében színeztem a csillagokat ábrázoló pontokat. Első körben az effektív hőmérséklettől való függést tárgyalom (7. ábra): a kék pontok jelzik a forróbb, míg a vörösek a hidegebb csillagokat. Az effektív hőmérséklet tartománya 3500–10.000 K. A pontok elhelyezkedésében konzisztens trend figyelhető meg: minél forróbbak a csillagok, annál nagyobb a $H-K$ és az y tengelyeken látható $G-K$, $Gbp-K$, $Grp-K$, $Gbp-Grp$ színindex is.

Megvizsgáltam a log g és metallicitás hatását is. A 8 és 9 ábrán szemléltetem, hogy ezen paraméterek változtatása a színindexekben hogyan mutatkozik meg. Az y tengelyen feltüntetett



8. ábra. A Gaia-2MASS színindexek felszíni gravitációtól való függése. A panelek leírása valamint a színek jelölése a 7. ábra leírásánál olvasható.

színeket vizsgálva látható, hogy a 2MASS $H-K$ színindexe jelentősen függ a felszíni gravitáció mértékétől 5000 K alatt. Az óriáságon lévő alacsonyabb felszíni gravitációval rendelkező csillagok $H-K$ színindexe konzisztensen nagyobb, mint a fősorozaton tartozkodó magas $\log g$ -jú rendelkező csillagoké. Ez az erős $\log g$ -függés a többi színindexben kevésbé figyelhető meg.

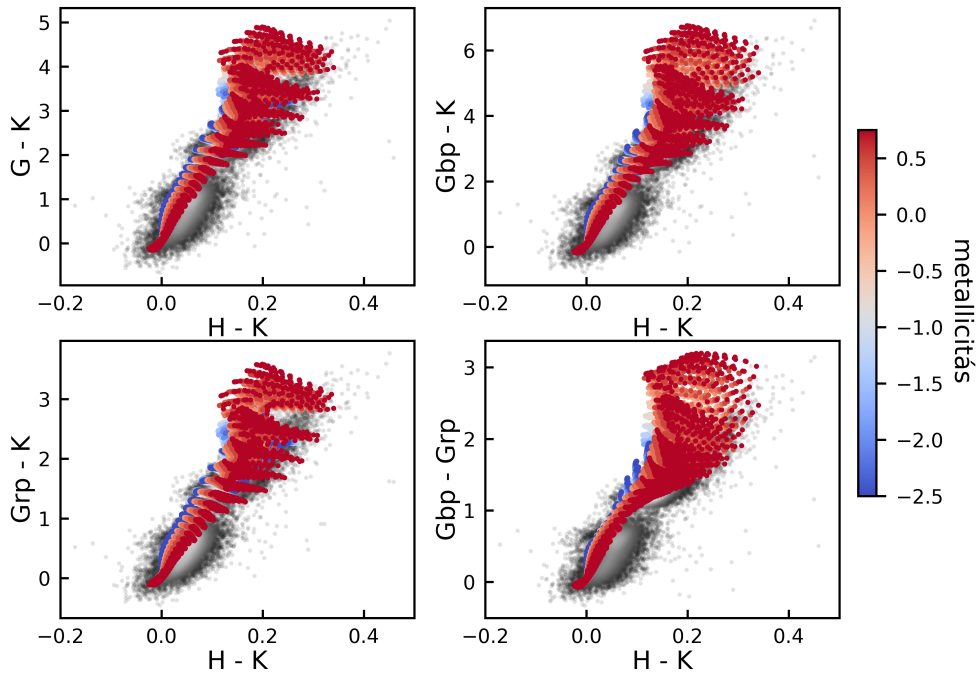
Végül, de nem utolsó sorban a Naphoz viszonyított fémességtartalmat is feltüntettem a 9. ábrán, szemléltetve annak színindexektől való függését. A fémtartalomtól való függés kisebb mint amit a hőmérsékletnél és felszíni gravitációs gyorsulásnál láttunk. Általánosságban elmondható, hogy az alacsonyabb fémtartalmú csillagok 9. ábrán látható színindexei alacsonyabbak, mint a magasabb fémtartalmú csillagok esetében, aminek oka az, hogy a magas fémtartalmú csillagok légkörében a nagyobb abszorpció több fényt nyel el.

5.2. Az APOGEE-csillagok kiválasztása

Az alábbiakban részletezem, hogyan választottam ki az APOGEE méréseiből azokat a csillagokat, melynek luminozitását és sugarát meg akartam határozni.

5.2.1. A csillagok kiválasztása

A csillagok új, pontosabb paramétereinek meghatározásához az első feladatomban az APOGEE és a Gaia által közösen észlelt csillagok összegyűjtése volt: az adatbázisok összefésülése során a koordináták alapján összeállítottam egy csillagkatalógust, melybe azok az objektumok kerültek, amelyeket mindkét program észlelt; majd ezeket bizonyos kritériumok szerint szűrtem.



9. ábra. A Gaia-2MASS színindexek metallicitástól való függése. A panelek leírása valamint a színek jelölése a 7. ábránál olvasható.

Az adatbázist a Tool for Operations on Catalogues And Tables (TOPCAT)¹³ nevű program alkalmazásával értem el, és a kiválasztás paramétereit is ebbe a programba vittem fel. A továbbiakban csak olyan csillagokra végeztem el a számításokat, illetve ábrázolásokat, amelyek a szűrés után is a mintában maradtak. Az alábbiakban részletezem azt, hogy milyen paraméterek mentén/szerint kerültek kiválasztásra a csillagok, illetve azt, hogy ezek szűrése milyen módon történt.

Első lépésben az APOGEE által számolt, $v_{scatter}$ (szórás) mennyiség alapján végeztem el a vágást. Minden objektumról több mérés készült különböző időpontokban, ezek alapján pedig rendelkezésünkre áll egy szórás. Ez az érték nagyon nagy is lehet, ugyanis az eltérő időpontokban felvett spektrumok különböző radiálissebesség-értékeket adhatnak, ha kettőscsillagokról vagy pulzáló változócsillagokról van szó. Azért, hogy ezeket kizárhassam a mintából, $v_{scatter}$ maximális értékét 1 km/s-ban szabtam meg. Ezt követően a radiális sebesség hibája alapján végeztem a paraméterek vágását. A v_{rad} bizonytalansága szintén rendelkezésre állt, ugyanis ezt az APOGEE-n belül a saját módszereikkel kiszámolták. Ennek alapján szintén 1 km/s felső korlátot állítottam be, annak érdekében, hogy ne számoljak olyan csillagokkal ahol a hiba nagyon nagy, ez ugyanis téves eredményekhez vezethet. Ezen felül a parallaxis hibája alapján is válogattam, kiszűrve ezzel a nagyon távoli objektumokat, ahol a mérések pontatlanabbak. A fentiekből kifolyólag a parallaxis csak pozitív lehet, melynek hibája a mérés során legfeljebb 10%.

A fenti szűrések alkalmazásával a végső adatbázisom, melyekre a fizikai paramétereket meghatározom, 219.690 csillagot tartalmazott.

¹³<http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>

5.3. Bolometrikus korrekciók

A 2.2. fejezetben taglalt módszer alapján kiszámoltam a bolometrikus korrekció értékét 69.232 szintetikus spektrumra. Ezek segítségével fogom az APOGEE által észlelt csillagok bolometrikus korrekcióit is kiszámolni. Ebben a fejezetben az új bolometrikus korrekciókat a Gaia DR3 adatai által számoltakkal hasonlítom össze.

5.3.1. Gaia DR3 bolometrikus korrekciók

Ehhez az általam felhasználni kívánt Gaia bolometrikus korrekciókat Creevey és munkatársai [Creevey et al, 2022] munkája alapján válogattam ki. Ebben a tanulmányban a bolometrikus korrekciók a G szűrőre lettek meghatározva (BC_G) a T_{eff} , $\log g$, $[M/H]$, valamint $[\alpha/M]$ paraméterek függvényében, melyhez a MARCS szintetikus modellatmoszférákat [Gustafsson et al., 2008] vették alapul. Ebben az adatközlésben BC_G kiszámolása során az $[\alpha/M]$ mennyiségre 0,0-t feltételeztek, ugyanis e paraméter az általuk felhasznált modelleknél csak kevés csillaghoz volt elérhető. Más paraméterek esetén a számítások során alkalmazott paramétereket és az ahhoz tartozó intervallumokat a 2.táblázat tartalmazza.

A számítást egy nyilvánosan is elérhető python scripttel végezték, ami T_{eff} , $\log g$, $[M/H]$ valamint $[\alpha/M]$ ismeretében kiszámolja BC_G értékét. Az effektív hőmérséklet tartományát kibővítették A típusú csillagok modelljeivel: ezek közepes hőmérsékletű objektumokat takarnak. A bolometrikus korrekcióra kapott értékeik enyhe eltolódást mutattak a MARCS-rácshoz képest, ezért a szerzők 0,2 magnitúdó értékű módosítást hajtottak végre abból a célból, hogy a két modellatmoszféra adatbázis közötti, BC-kben megjelenő ugrást korrigálják. [Creevey et al, 2022]

A számítás az alábbi képletek alapján történt a beépített program segítségével: a bolometrikus korrekciók meghatározásához az abszolút magnitúdó ismeretére van szükség, melyet a látszó magnitúdó, a távolság, valamint az esetlegesen fellépő extinkció (erre a Gaia esetében a GSP-Phot ad becslést) felhasználásával lehet kiszámolni. Az abszolút magnitúdót az alábbi képlet segítségével számolták [Creevey et al, 2022]:

$$M_{XP} = G_{XP} - A_{XP} - 5 \cdot \log_{10} d + 5 \quad (16)$$

ahol G_{XP} a megfigyelt látszó magnitúdó, az A_{XP} a becsült extinkció, míg d a távolság parsekben mérve. Ezek ismeretében meghatározható a bolometrikus korrekció, melyre az alábbi képletet használták:

$$BC_{XP} = 4,74 - 2,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) - M_{XP}, \quad (17)$$

ahol L a luminozitás, $L_{\odot}$ a Nap esetében, míg M_{XP} a 16. egyenletben kiszámolt abszolút magnitúdó.

5.3.2. Az APOGEE DR17 bolometrikus korrekciók meghatározása

Munkám során a korábbam már részletesen tárgyalt vágás alapján megmaradt APOGEE-csillagokra (lásd 5.2. fejezet) számoltam bolometrikus korrekciókat a BOSZ modellatmoszférák gridjeinek segítségével [Bohlin et al, 2017], interpolációs algoritmus alkalmazásával, 5 dimenzióban. Az alkalmazott dimenziók a fizikai paraméterek voltak, melyeket a modellspektrumok tartalmaztak: T_{eff} , $\log g$, $[M/H]$, $[\alpha/M]$ valamint ez esetben a szén ($[C/M]$), ami a Gaia bolometrikus korrekciók számolása során nem állt rendelkezésre. Az újdonság a számításaim során, hogy nemcsak pontosabb atmoszférikus paramétereket tudunk használni a BC-k meghatározásánál,

hanem az $[\alpha/M]$ tartomány kiszélesítésével annak befolyását pontosabban felmérhetjük, és a $[C/M]$ mennyiség hatását is beleveszem a számításokba.

A modellek esetén a bolometrikus korrekciók kiszámításához a 14 egyenletet használtam fel. Miután ezek már rendelkezésre álltak, elvégezhettem az interpolációt, hogy a csillagokra vonatkozó BC értékeket is megkaphassam, melyekből a sugarakat és a luminozításokat az egyes objektumokra meg tudom határozni.

Az interpoláció elvégzéséhez az RBF (radial basic function, radiális bázisfüggvény) nevű, pythonba beépített interpolációs algoritmust használtam fel, pontosabban ennek a *multiquad-ratic* verzióját: ez magasabb dimeziójú terekre - mint amilyen az enyém is - jól használható. A keresett függvény alakjáról nem tudunk semmit, mindössze bizonyos mérési pontok állnak rendelkezésünkre-, ezeket esetünkben a BOSZ-rácsok adatai tartalmazzák, illetve az azokra számolt bolometrikuskorrektció-értékek a lefedett rácpontokban.

A 10 ábrán feltüntettem mind a 219.690 csillagra a bolometrikus korrekciókat effektív hőmérséklet függvényében. A bal oldali ábrán az általam számolt BC-értékek láthatóak, míg a jobboldalin a Gaia DR3-ban használt BC_G -ket ábrázoltam. Az x tengelyen az effektív hőmérsékleteket tüntettem fel, melyek az APOGEE által kalibrált T_{eff} értékek. A szürkével jelölt pontok a felhasznált effektív hőmérséklet-BC tartományt jelölik: esetemben a BOSZ-adatbázisból általam számolt értékeket, míg a Gaia-nál a DR3 keretében publikált, MARCS-gridből a Gaia-csoport által megállapított értékeket.

A rácsokról összességében kijelenthető, hogy bár a Gaia által alkalmazott MARCS-modellek szemmel láthatóan sűrűbb mintavételezést tartalmaznak az effektív hőmérsékletet illetően, a BOSZ-modellek több mint kétszerannyi pontot tartalmaznak. Számszerűsítve a Gaia-hoz 28.821-t használtak fel, ezzel ellentétben az én számításom 69.232 rácpontból épül fel. A 2 és 3 táblázatokban feltüntettem mind a Gaia által alkalmazott MARCS-, mind az általam használt BOSZ-modellek esetén a paraméterterek intervallumait:

T_{eff}	$\log g$	$[\text{Fe}/\text{H}]$	$[\alpha/\text{Fe}]$
2500–8000 K	-0,5–5,5 dex	-5,0–1,0 dex	0–0,4 dex

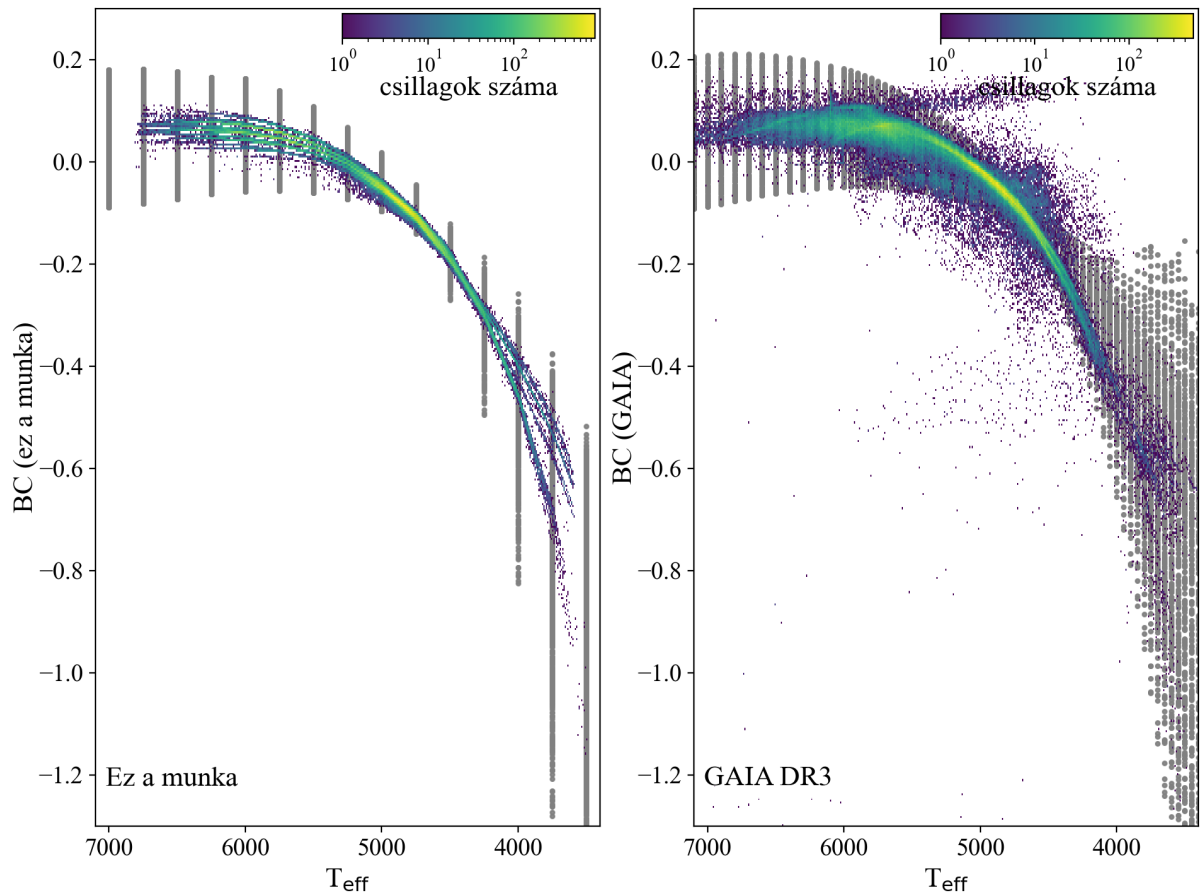
2. táblázat. A fizikai paraméterek intervallumai a MARCS-modellekben [Gustafsson et al., 2008].

T_{eff}	$\log g$	$[\text{M}/\text{H}]$	$[\alpha/\text{M}]$	$[C/\text{M}]$
3500–10000 K	0–5,0 dex	-2,5–0,75 dex	-0,25–0,5 dex	-0,75–0,5 dex

3. táblázat. A fizikai paraméterek intervallumai a BOSZ-modellekben [Bohlin et al, 2017].

Az általam alkalmazott rács előnye, hogy sokkal nagyobb tartományban mintavételezem az $[\alpha/M]$ értékeket. Míg az én számításaim alapjául szolgáló rács esetén ez -0,25–0,5 között lévő tartomány, a Gaia által használt modellben ez az érték mindössze 0–0,4 közötti. Mindemellett az én számításaim egy új paramétert, a szén jelenlétét is figyelembe veszik. A $[C/M]$ tartomány értéke -0,75–0,5 között van a számításokban, ez a Gaia esetében minden spektrumnál 0-ra van állítva. Azért fontos a szén figyelembe vétele, mert a szénben gazdag légkörű, főleg alacsonyabb hőmérsékletű csillagok esetén a spektrum alakja megváltozik.

A 10. ábrán a bolometrikus korrekcióra számolt eredményeimet mutatom be, és vetem össze azt a Gaia által számoltakkal. Ha szemügyre vesszük a bolometrikus korrekcióimat, elsőre kitűnhet, hogy az általam számoltak esetében sokkal kisebb a szórás, és azok végig a rácsot lefedve jelennek meg az ábrán, ellentétben a Gaia DR3-ban publikált értékekkel. A legnagyobb



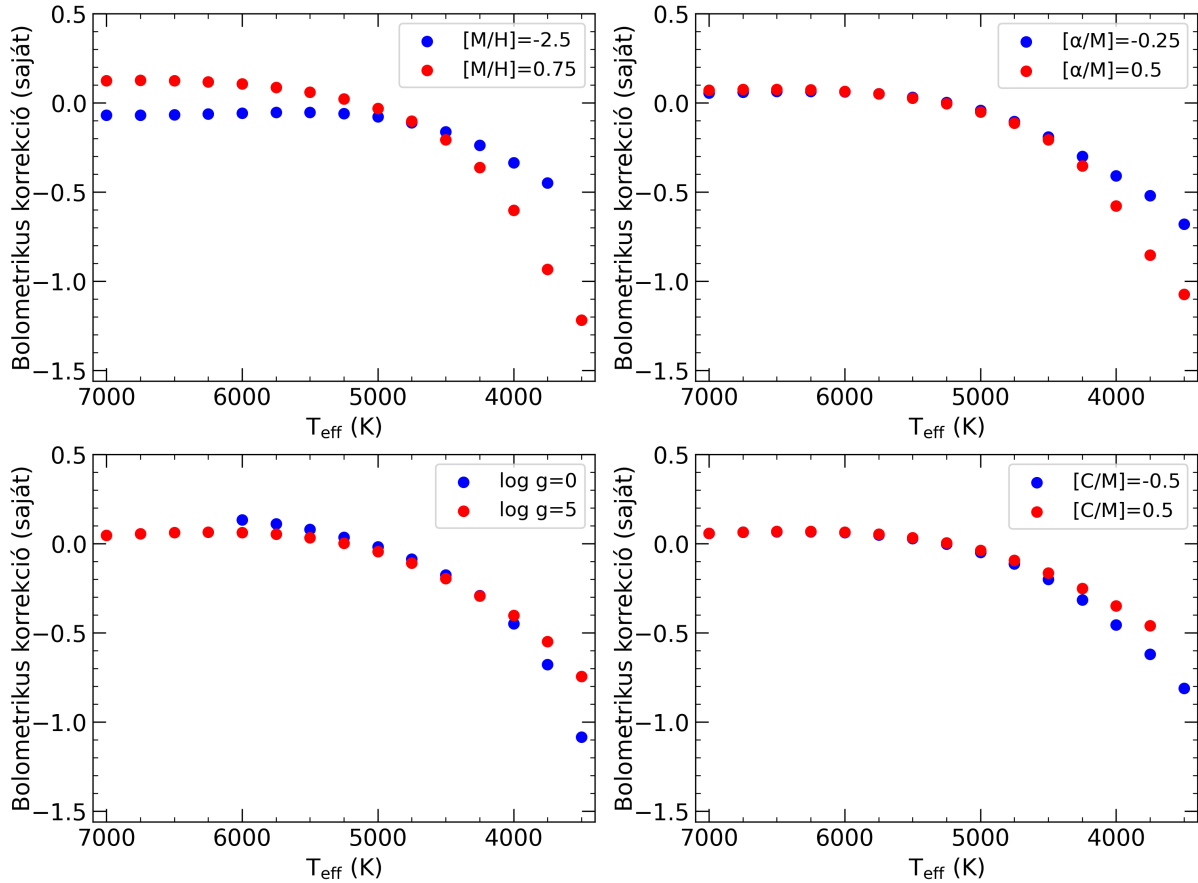
10. ábra. A bolometrikus korrekció a T_{eff} függvényében háttérben a rácsokkal. A panelek x tengelyein a BC-k kiszámításához felhasznált effektív hőmérsékleteket tüntettem fel. A bal oldali ábrán az általam számolt bolometrikus korrekció látható, az eloszlás sűrűsége szerint színeze, míg a jobb oldalán ugyanilyen módon a Gaia által számolt értékek szerepelnek. [Creevey et al, 2022]. A háttérben a számoláshoz alkalmazott rácsokat tüntettem fel szürkével (BC a hőmérséklet függvényében).

eltérés a 4500–5300 K körüli tartományon figyelhető meg, ahol a BC_G értéke 0,1 és 0,2 közötti tartományba esik, míg sok csillag Gaia DR3-ban publikált bolometrikus korrekciója az általuk használt rácson kívülre került.

Azonban, ahogy azt említettem, a Gaia esetében az effektív hőmérséklet mintavételezése részletesebb; ezt az én esetemben a későbbiekben interpolációs eljárással lehet majd helyesbíteni, így el lehet érni az általuk alkalmazott pontosságot de akár növelni is lehetett a későbbiekben. Ebből következik, hogy a T_{eff} mintavételezése is növelhető lesz, ami által a jövőben még pontosabb bolometrikus korrekciókat is elérhetünk.

A 11. ábra bemutatja, hogy a modellekben az egyes paraméterek értéke hogyan befolyásolja a bolometrikus korrekciókat. A négy ábra hasonló: mindegyiken az effektív hőmérséklet függvényében ábrázoltam BC értékét, a színezések pedig az egyes asztrofizikai paraméterek értékeit jelölik. Minden esetben a kézzel jelölt a rácson kívülre került, míg a piros a legmagasabb (a Naphoz viszonyítva természetesen).

A pontok hasonlóan követik egymást a különböző esetekben: a bolometrikus korrekció értéke nagyjából 0 körül indul a megadott hőmérséklet-tartományon, eleinte konstans marad, és 4-5000 K körül elkezd egyre nagyobb negatív értékeket felvenni. Alapvetően elmondható, hogy a BC az effektív hőmérséklet csökkenésével az általunk alkalmazott szűrők esetében - mint pél-



11. ábra. Az egyes paramétereknek megfelelő bolometrikus korrekciók: az ábrán a kék és a piros színek a paraméterek minimum- és maximumértékeit jelölik, ezek rendre: a fémesség, α -elemek aránya, felszíni gravitáció valamint a széntartalom. At x tengelyeken rendre az effektív hőmérsékletek, míg az y tengelyen a bolometrikus korrekció értékei vannak feltüntetve.

dául a GAIA G szűrője - egyre növekszik. Ennek az az oka hogy a dolgozat vizsgált, magasabb T_{eff} -tel rendelkező csillagoknál a keletkező sugárzás nagyobb része az optikai tartományba esik, míg a hőmérséklet csökkenésével, egyre inkább infravörösben bocsájtják ki a sugárzásuk nagyobb részét a csillagok.

Esetemben a lefedett hőmérséklet-tartományba F, G és K színképtípusú csillagok tartoznak, így jelen szakaszban az általam számolt értékek követik a mintát: minden képen a bolometrikus korrekció mértékének növekedése látható a hőmérséklet csökkenésével egyetemben, negatív irányba.

A négy ábra a négy asztrofizikai paraméterre fókuszálva mutatja be a bolometrikus korrekció függését: a felső paneleken az $[M/H]$, valamint $[\alpha/M]$ intervallumok láthatók, az alsókon pedig a felszíni gravitáció valamint a szén mennyiségének a függését mutatom be a színek segítségével. Az ábrák első ránézésre hasonlóknak tűnnek, ahogy arra fentebb is utaltam, azonban külön-külön megvizsgálva őket több eltérést is felfedezhetünk. Ami a fémességet illeti, a különböző színű pontok által kirajzolt két (alacsony, illetve magas) fémbőség görbéje ugyan azonos irányt követ, a levágás tendenciája különböző. Míg a Napnál alacsonyabb fémbességű csillagok esetén a bolometrikus korrekció értéke lassabban lesz egyre negatívabb, addig a Napnál fémesebb csillagok esetén ez a levágás nagyobb: a görbe meredekebben tart a negatív irányba. Az α -elemek bőségét megfigyelve a második panelen hasonló tendencia látható: a csökkenés 5000 K körül, vagyis a G színképosztályú csillagoknál kezdődik, és megállapítható, hogy mi-

nél magasabb az abundancia az α -elemeket illetően, annál meredekebb lesz a csökkenés. E fizikai paraméter esetén a különbség az intervallum két határa között hasonlóan számottevő, mint az $[M/H]$ -t vizsgálva. A szóban forgó eltérés nem elhanyagolandó: az ábrán látszik, hogy alacsony hőmérsékletű csillagoknál az α -elemek befolyásoló hatása számottevő. Ezt pedig az általam használt modellek segítségével pontosabban meg lehet állapítani, mint a Gaia-adatok által használt modellekkel. Ugyanis a Gaia esetében, ahogyan az a táblázatról is leolvasható, az α -elemeket kisebb intervallumon vették figyelembe, mint ahogyan azt én a saját számításaim során a BOSZ-modellekkel kivitelezni tudtam: a határait α -elemek abundanciájára egyaránt a felső és alsó irányba is bővebbek a Gaia-énál. Az általam használt modellek között megjelennek a Napnál alacsonyabb α -elemgyakoriságúak, ilyeneket a MARCS-modellek nem tartalmaznak, valamint a felső határ 0,4 dex helyett 0,5 dexig terjed ki. Az ábráról leolvasható, hogy minél kisebb ez az elemgyakoriság, a bolometrikus korrekciók értékei annál kevésbé meredeken tartanak a negatív irányba; míg magasabb $[\alpha/M]$ -értékek esetén ez számottevőbb. Ebből arra a következtetésre juthattam, hogy ha az abundancia magasabb, úgy a BC mértéke is nagyobb lesz. Mivel nálam magasabb abundanciák is definiálásra kerültek, így pontosabb BC-eredményeket kaptam, mint ahogyan azt a Gaia esetében számolták.

A 11. ábra két alsó panelén a színezés logikája azonos: az intervallum felső határát a piros, míg az alsót a kék pontok által kirajzolt görbe jelzi. Ezeken a paneleken a felszíni gravitációt és a szénbőséget tüntettem fel: az összrendezés itt a felsőkhöz hasonlóan érvényesül, azzal a különbséggel, hogy azokon a magasabb értékek esetében figyelhető meg növekedés a negatív irányba. Ami a $\log g$ -t illeti, itt az intervallumok határainak megfelelő mennyiség viselkedését figyelembe véve megállapítható, hogy a különbség köztük kisebb, mint a felső két panelen, azonban meg is vannak cserélve: az alacsonyabb felszíni gravitációval rendelkező csillagok esetében a bolometrikus korrekciók értéke alacsonyabb, mint a Nappal azonos (ez volt az intervallum felső határa az általam használt rács esetében) $\log g$ -vel rendelkező csillagok esetében. Végül a szénbőség hatását mutatom be a BC-kre vonatkozóan. Az ábra a $\log g$ -hez hasonló leginkább: a Naphoz viszonyítva szénben gazdagabb csillagok esetében a pontok itt is kevésbé meredeken növekednek a negatív irányba, mint az annál nagyobb fémtartalommal rendelkező csillagoknál.

A szénbőséget mutató ábra különleges szerepet tölt be a másik három fizikai paraméter BC-re gyakorolt hatása mellett: a szénbőség ugyanis a Gaia által használt atmoszféramodellekben még nem volt definiálva. Ennek okán úgy számoltak, mintha a csillagok szénbősége a Napéval azonos (tehát ebben az értelemben 0) lenne, és csak a maradék három paramétert, vagyis a fémességet, az α -elemek értékét, valamint a felszíni gravitációt használták fel mint a BC értékét befolyásoló tényezőket. Azonban az általam használt BOSZ-modellekbe a szénbőség is beintegrálásra került: ha összehasonlítjuk a másik hárommal, látható, hogy a szén jelenléte csaknem olyan mértékben befolyásolja a bolometrikus korrekció értékét, mint a többi paraméter figyelembe vétele. Az ábráról leolvashatjuk, hogy a széntartalom is erős befolyással bír a BC mértékére a számolások folyamán. Mindezek fényében kijelenthető, hogy a szén hatása nem elhanyagolható a BC-értékek számolása során. Megfigyelhető, hogy a Napénál alacsonyabb szénbőséggel rendelkező csillagok esetében meredekebben veszik fel a BC-k a negatív értékeket, míg magasabb szénabundanciáknál kicsit kevésbé, azonban a különbség ebben az esetben is felfedezhető.

E három panel vizsgálatát követően elmondható hogy a bolometrikus korrekció értékét jelentős mértékben befolyásolja a fent említett fizikai paraméterek értéke; vagyis a tendencia, hogy mely hőmérsékletnél mennyire negatív értéket vesz fel, függ a fizikai paraméterek nagyságától. Az is világossá vált, hogy a szén önálló figyelembe vétele a számítások során szintén számottevő módon befolyásolhatja a BC mértékét, még hozzá pontosabbá téve azokat.

6. Eredményeim: Sugarak és luminozítások meghatározása

A bolometrikus korrekciók ismeretében lehetőség nyílt a csillagok sugarainak és luminozításainak meghatározására, melyet az alábbi fejezetben taglalok. Az első részben felvázolom, hogy a GAIA DR3 alapján Creevey és munkatársai [Creevey et al, 2022] hogyan számolták ki azokat. Lentebb pedig azt fejtem ki, hogy saját magam az APOGEE által észlelt csillagokra hogyan határoztam meg az új sugár- és luminozításértékeket. A sugarak és luminozítások minősége és eloszlása legszemléletesebben a Hertzsprung–Russel-diagram ábrázolásával mutatható be.

6.1. Gaia DR3 sugarak és luminozítások meghatározása

A fizikai paramétereket, mint a sugár és a luminozítás, a FLAME modul (Final Luminosity Age Mass Estimator ¹⁴) különböző beépített függvényei segítségével számolták ki. A két megnevezett paraméter kiszámításához szükség van az objektumok látszó magnitúdóira, meg kell határozni a bolometrikus korrekció mértékét, amelyből a fenti mennyiségek közvetlenül kiszámíthatók.

A luminozítás-értékeket a 18 képlet alapján állapította meg a program:

$$-2,5\log(L) = M_G + BC_G(T_{\text{eff}}) - M_{\text{bol},\odot} \quad (18)$$

ahol a luminozítás napegységekben van megadva, a Nap bolometrikus korrekciója az IAU definíció alapján 4,74 mag, míg a bolometrikus korrekció itt csak az effektív hőmérséklet függvénye. A sugár meghatározása pedig a Stefan–Boltzmann-törvény (lásd 19. egyenlet [Creevey et al, 2022]) alapján történt:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\odot}}\right)^4 \quad (19)$$

ahol L a luminozítás (napluminozítás egységekben), R a csillagok sugara, szintén nap-egységben, míg T_{eff} az effektív hőmérséklet, $T_{\odot} = 5772$ K pedig a Nap effektív hőmérséklete.¹⁵

6.2. Az általam használt módszer

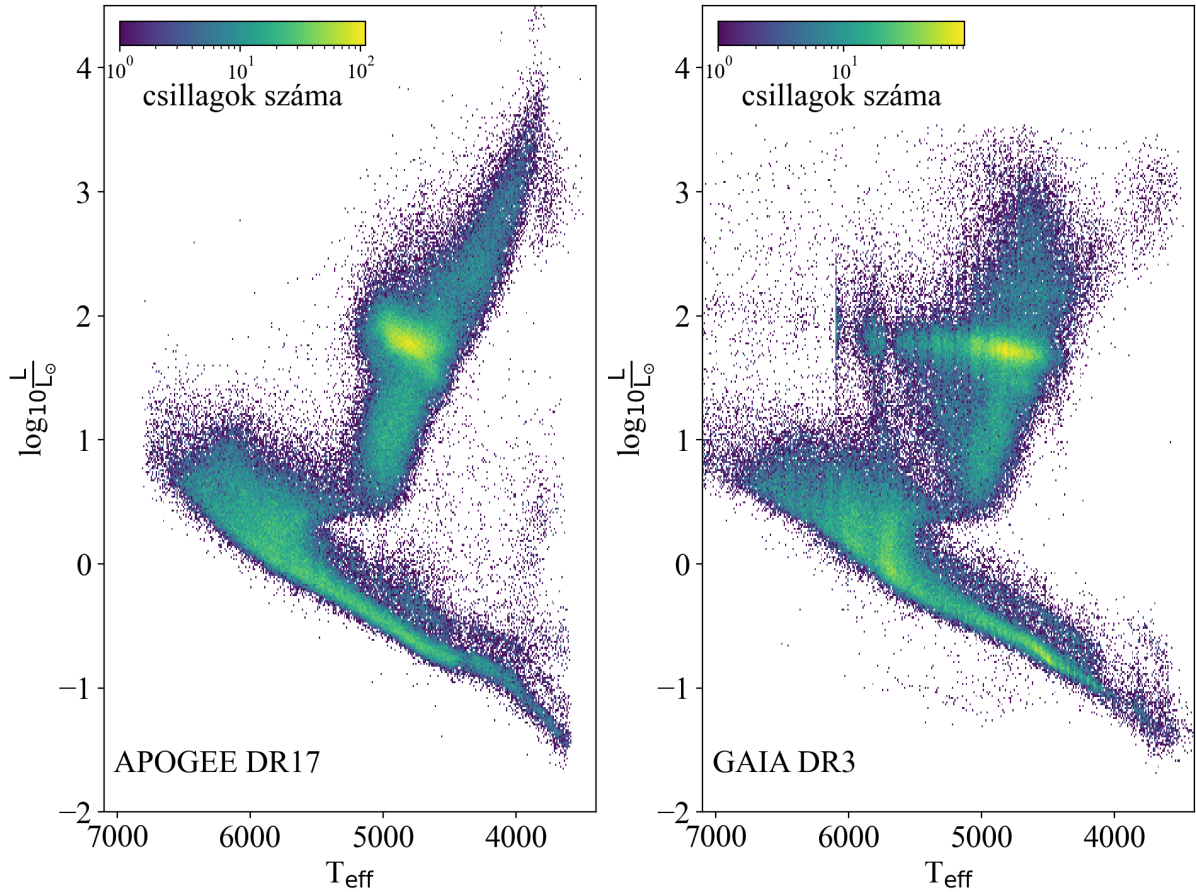
Saját számításaimhoz a 10 illetve 11 egyenleteket használtam fel. A luminozításhoz immár rendelkezésre álltak az interpolációval megállapított bolometrikus korrekciók. Az alkalmazott asztrofizikai paraméterek, mint a $\log g$, metallicitás, α -elemek abundanciája, illetve a szén jelenléte, mind az APOGEE DR17-ben publikált, kalibrált értékek voltak.

Miután megkaptam az új luminozítás- illetve sugárértékeket a csillagokra, immár tudtam Hertzsprung–Russel-diagramot ábrázolni. A 12 ábrán a klasszikus HRD ($T_{\text{eff}} - \log(L)$) látható. A két panel közül a bal oldalon az általam számolt luminozítás az APOGEE DR17 effektív hőmérsékletének függvényében, a jobb oldali panelre pedig a Gaia által a harmadik adatközlésükben publikált luminozítások kerültek.

A különbség a két panel összehasonlítása után szembetűnő. A GAIA-hoz képest sokkal kisebb szórást mutatnak az általam számolt luminozításértékek a teljes effektív hőmérséklet tartományon. Az APOGEE-n alapuló számítások esetében fellelhető szórás az az alacsony hőmérsékleteknél a Nap luminozításértékéhez hasonló tartományban előforduló csillagok környékén a legjelentősebb. Ennek magyarázatára két lehetséges forgatókönyvet vettem számításba:

¹⁴https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/Data_analysis/chap_cu8par/sec_cu8par_apsis/ssec_cu8par_apsis_flame.html

¹⁵https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2015_English.pdf/



12. ábra. A Hertzsprung–Russel-diagramon az effektív hőmérséklet függvényében a luminozítás van feltüntetve. A bal oldali panelen az általam számolt luminozításértékek szerepelnek az APOGEE hőmérsékleteinek függvényében, míg a jobb oldalon a Gaia $T_{\text{eff}}\text{-log}(L/L_{\odot})$ értékei szerepelnek.

egyik, hogy a HRD szóban forgó tartományában a mai ismereteink szerint születendő csillagok fordulnak elő, ez pedig azt feltételezi hogy az APOGEE észlelt csillagkeletkezési régiókat is. A másik, hogy azok a pontok mérési hibákból származnak.

A kérdéses csillagokat tartalmazó tartományt kivágtam az alábbi paraméterek alapján: az effektív hőmérséklet értékeket 3500 és 4200 K közötti értékekre szűkítettem le, míg a luminozítások értékeit csak $1,3 L/L_{\odot}$ and $-0,6 L/L_{\odot}$ között vettem figyelembe. Ezeknek a kritériumoknak 1035 csillag felelt meg, melyeknek az adatbázis segítségével kikerestem a koordinátáit abból a célból, hogy meg tudjam vizsgálni, vajon csillagkeletkezési régiókból származnak-e. A koordináták vizsgálata során egyértelműen meg tudtam állapítani, hogy egyes csoportosulások helyén találhatóak olyan régiók, ahol aktív a csillagkeletkezés. A 4 táblázatban alább összefoglaltam ezeket:

Ezen felül a Hertzsprung–Russel-diagram ágain fellelhető különbségeket vizsgáltam meg. Ami a fősorozatot illeti, a két panelen az elhelyezkedésük nagyjából egyforma. Alacsony hőmérsékleteknél sokkal több csillag helyezkedik el, mint a Gaia-nál: ennek oka lehet egyrészt a fentebb tárgyalt csillagkeletkezési régiók helyes besorolása, valamint az ahogyan a 11 ábrán látható, hogy az APOGEE esetére a bolometrikus korrekciók értéke pontosabb a paraméterek befolyásoló hatásának figyelembe vétele miatt. A BC-k pontossága pedig hatással van a későbbiekben mind a luminozítás mind a sugár értékének pontosságára. Az APOGEE-hőmérsékletek függvényében ábrázolt luminozítás-értékeknél észrevehető egy kisebb görbület, amely a Gaia-

Csillagkeletkezési régió	Rektaszcenzió	Deklináció
Taurus-molekulafelhő	70,25	+25,87
Orion-köd	83,2	-5,39
Tarantula-köd	84,67	-69,1
ρ Ophiuchi felhőkomplexum	247,25	-24,541
AFGL 2591	307,354	+40,189

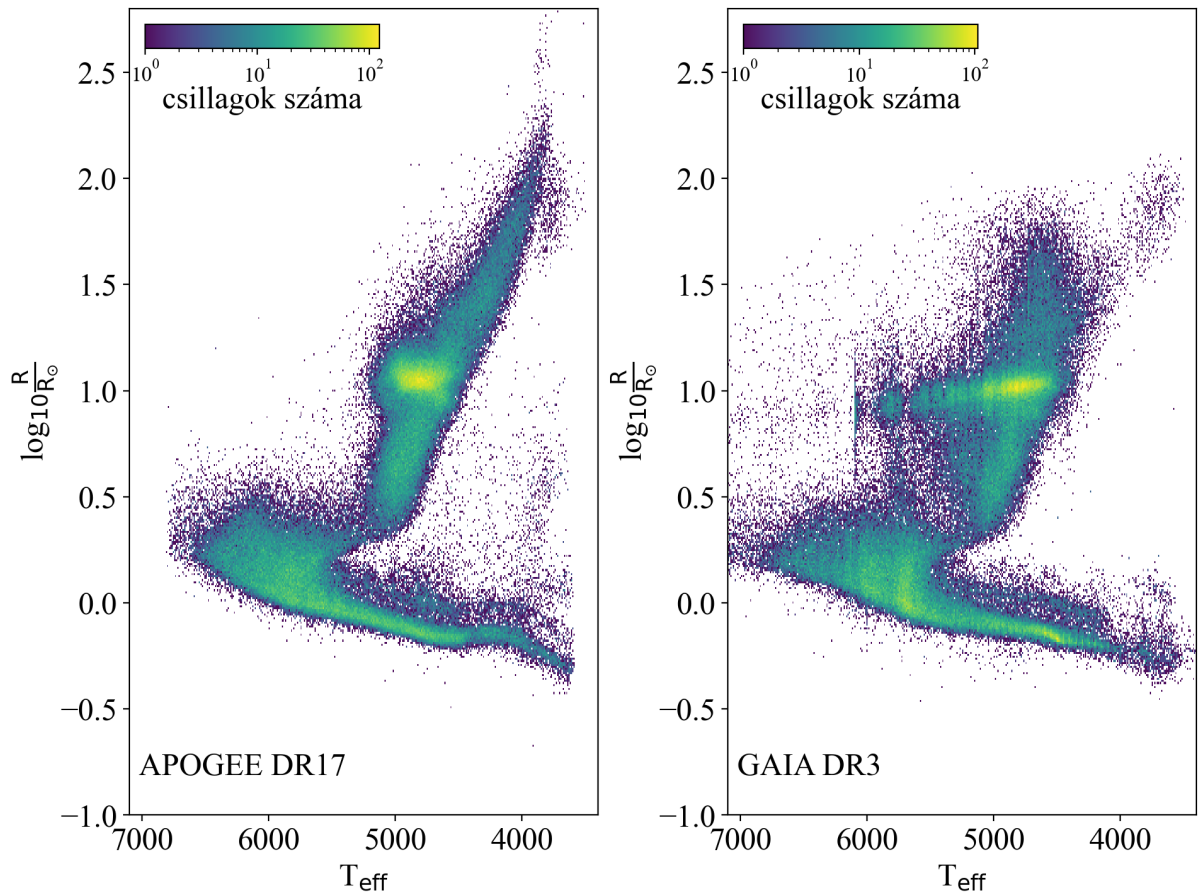
4. táblázat. Csillagkeletkezési régiók a koordinátaikkal.

ban nem jelenik meg, ennek háttérében az APOGEE hőmérsékletek kalibrációja áll. Ezen felül a Gaia-nál 4600, illetve 5800 K körül a fősorozaton megjelenik egy sűrűbb rész, ezek az APOGEE esetében kiegyenlítettebbek. Ez betudható a fizikai paraméterek pontosításának, ugyanis így az eloszlás sokkal egyenletesebb a fősorozatot illetően. Összességében a bolometrikus korrekciók értékét leginkább a hőmérséklet befolyásolja, emögött a sugárzás áll: alacsonyabb T_{eff} -ek esetén ugyanis annak csökkenésével a sugárzásuk egyre kisebb részét bocsájtják ki a látható tartományban, ez ebben az esetben az infravörös felé tolódik el, ez pedig a BC-k értékének növekedését okozza.

Tovább lépve a vörösóriás-ágra, a bal oldali ábrán szintén sokkal kisebb szórás látható, valamint a Gaia adataiban csíkozódás vehető észre, ez valószínűleg az effektív hőmérsékletek inhomogén eloszlásának tudható be. A vörösóriás-ágon mindkét panelen megtalálható egy sűrűbb terület, ez az úgynevezett „vörös csomó”, (angolul red clump). Ez a rész körülbelül 5000 K hőmérséklet körül található, és itt nagyjából a fősorozattal párhuzamos eloszlást követnek a csillagok. Ezeket az objektumokat az jellemzi, hogy elfejlődtek a fősorozatról, és a magasabb luminozitások illetve alacsonyabb hőmérsékletek felé haladnak a HRD-n. Mialatt fejlődnek, a nyomás és a hőmérséklet megnő a magban, ez pedig héliumégést indít el ott (He-flash hélium-felvillanás) keretein belül. Ez a folyamat robbanásszerű, ilyenkor a csillag egy egész galaxis fényével világít. A magban ezek után történő He-égés következtében a csillag stabil állapotba kerül, emiatt látható a vörösóriás-ágnak ezen a szakaszán több csillag, és ezek alkotják a vörös csomót. A két panelen a vörös csomót megvizsgálva szintén különbségek figyelhetők meg: az APOGEE-adatokból számolt diagram esetén ezen pontok eloszlásának szórása sokkal kisebbnek tűnik, emögött pedig a pontosabb bolometrikus korrekciók kiszámítása és pontosabb effektív hőmérsékletek állnak. A vörös csomó mindössze a 5200-4800 K-es tartományra terjed ki. A Gaia értékeinél a vörös csomó csillagai sokkal szélesebb tartományon helyezkednek el effektív hőmérséklet tekintetében, mint az APOGEE-nál, valamint egyenetlenebb a csillagok eloszlása is. A Gaia-nál a vörös csomó-beli csillagoknál előfordulhat, hogy a minőségi szűrés ellenére maradhattak a mintában olyan objektumok amelyek nem tartoznak oda [Creevey et al, 2022], ez pedig a bolometrikus korrekciók illetve a hőmérsékletek mellett szintén okozhat pontatlanságot.

Tovább tanulmányozva a 12.ábrát, a vörösóriás-ágon felfelé haladva magasabb luminozitások felé az eltérés egyre jelentősebb a két panel között. A Gaia-nál a vörösóriás-ág nem terjed ki olyan alacsony hőmérsékletekig, mint az APOGEE esetében, hiszen előbbinél 4500 körül az ág megtörik, majd 4000 K körül egy kisebb szünetet is észre lehet venni. Ezzel szemben a bal oldali panelen a vörösóriás-ág egy egyenletes alakot követ egészen 3800 K hőmérsékletig, törés nélkül, és az alacsony T_{eff} -ek felőli oldalán nem vehető észre számottevő szórás. A GAIA esetén ez nem lineáris, 4200 K körül és a $10^{2,5}$ - $10^{2,7}$ $L_{\odot}$ értékek környezetében az adatok határa egy konstans hőmérséklet körül kezd el ingadozni, és sokkal nagyobb szórás látható az APOGEE-hez viszonyítva.

Az APOGEE-hőmérsékletekhez sokkal nagyobb luminozitású csillagokat találunk: a Gaia-



13. ábra. A bal oldali panelen a csillagok általam kiszámolt sugárértékek szerepelnek logaritmusikus skálán a hozzájuk tartozó hőmérséklet függvényében, míg a jobb oldalin ugyanez a Gaia számításai alapján

nál a legnagyobb luminozitás mindössze $10^{3.5} L_{\odot}$, míg a másik esetben akár egy nagyságrenddel nagyobb értékekkel is találkozunk, ez pedig számottevő különbség. A hőmérséklet tekintetében pedig a vörösóriás-ág teteje alacsonyabb hőmérsékletekig is kiterjed, mint a Gaia esetében.

Az eltérésekért nemcsak a hőmérséklet meghatározásának pontossága a felelős, a bolometrikus korrekciók értéke is nagyban befolyásolta a sugár- és luminozitasadatokat. Ugyanis itt alacsony effektív hőmérsékletről van itt szó, ebben az esetben pedig az $[\alpha/M]$ illetve $[C/M]$ asztrofizikai paraméterek szerepe már megjelenik. Ahogyan T_{eff} csökken, a Gaia adatainál nagyobb szórás illetve kevésbé egységes elhelyezkedés jellemzi a csillagokat, míg az APOGEE-nél a csillagok az alacsony hőmérséklet ellenére is követik a trendet. Ez támasztja alá, hogy a fent megnevezett fizikai paraméterek, melyek a bolometrikus korrekciók kiszámításának alapjául szolgáltak, immár nagyobb szerepet játszanak közvetetten a luminozitas-értékek kiszámítása során.

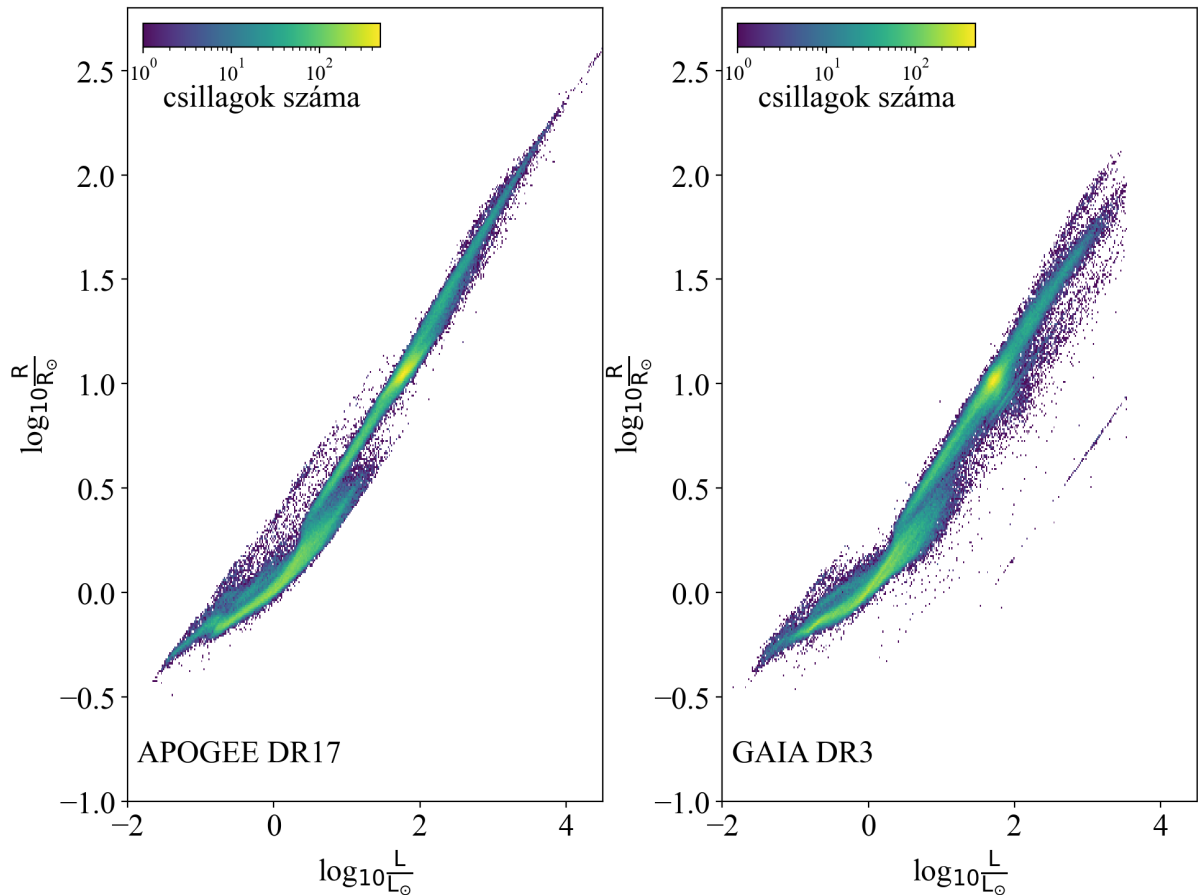
Ezen felül a 12. ábra mindkét panelén a vörösóriás-ág mellett magas luminozitasoknál feltűnik egy csillagesoportosulás, olyan aszimptotikus óriáságbeli csillagok csoportja, melyek már elfejlődött állapotban vannak, és széntartalmuk magasabb lehet a hasonló hőmérsékletű RGB csillagokénál. Míg én a számításaim során a szén abundanciáját is figyelembe vettem, addig a Gaia esetében a luminozitas és a sugarak megállapításához használt modellatmoszférák esetében konkrétan a szénabundancia tárgyalására nem került sor. Ennek köszönhető az is, hogy a szénben gazdagabb óriások helyén a Gaia hőmérsékleteknél a széncsillagoknál nagyobb szóró-

dás figyelhető meg, míg az APOGEE T_{eff} -eket tartalmazó HRD-n sokkal határozottabb alakot öltenek a csillagok, kisebb szórással. Így megállapíthattam, hogy a széngazdag objektumok esetében is pontosabb luminozítás-értékeket számoltam ki, ehhez pedig kellett a modellekben a szén figyelembevétele, mindemellett az alacsony hőmérsékletek pontossága is nagyban befolyásolta a méréseket. A gondolatmenet helyességét a következőképpen ellenőriztem: a csillagkeletkezési régiókhoz hasonlóan a luminozítás- és hőmérséklet-értékeket leszűkítettem arra a területre a HRD-n, ahol az AGB csillagok helyezkednek el, körülbelül a $2,5$ és $3,3 L/L_{\odot}$, valamint a 3500 – 4300 K közötti intervallumokra, és csak a $0,1$ -nél nagyobb $[C/M]$ értékűeket vettem figyelembe. Az itt elhelyezkedő csillagok több mint felére azt találtam, hogy szénben gazdagok, így levonható az a következtetés is, hogy az aszimptotikus óriáság tetején lévő szén-csillagok luminozítás-értékei pontosabbak lettek. Összességében elmondható, hogy az AGB széngazdag csillagait mindkét égboltfelmérő program helyesen osztályozta.

A Gaia esetén körülbelül $10^{3,5} L_{\odot}$ a legmagasabb luminozítás-érték, az APOGEE esetén ez $10^{4,5} L_{\odot}$ -ig is felér. Ez a különbség rendkívül jelentős. Mindemellett nincs olyan határozott felső határa a luminozításoknak mint a Gaia esetén, tehát mivel az APOGEE pontosabban határozza meg az effektív hőmérsékleteket, mint a Gaia, így a luminozításértékek is pontosabbak lettek a számítások során.

A 13. ábrán a sugárértéket ábrázoltam: a csillagok sugara és luminozitása közötti összefüggés a Stefan–Boltzmann-törvény felhasználásával írható le, így a luminozításokat az y tengelyen kicseréltem a sugárértékekre (napsugáregységben, annak logaritmusát véve). Az elvárásoknak megfelelően hasonló ábrát kaptam mint a luminozítások esetében. A Hertzsprung–Russell-diagram ágai ugyanúgy kirajzolódnak a sugarak esetében is, mint a luminozításoknál. A két panel között a különbségek is hasonlóak: a fősorozat mindkét esetében lapos, a sűrűbb régiók megtalálhatóak a Gaia számításai során, míg az APOGEE esetén az általam számolt sugaraknál az eloszlás egyenletesebb. A feltehetően csillagkeletkezési régióból származó adatok úgyszintén megtalálhatóak a fősorozat fölött alacsony hőmérsékleteknél, ez a Gaia esetében nem látszik, ott ezek a csillagok a fősorozat mellett helyezkednek el valamekkora szórással. A fősorozatnál alacsony hőmérsékleten szintén kevésbé konzisztensek a csillagokat jelölő pontok a baloldali ábrán, nagyobb a szórás a Gaia adatainál, de az APOGEE hőmérséklet-kalibrációjából származó görbület a sugarak esetén is fellelhető.

Az adatok pontosságára, valamint arra, hogy itt kisebb szórást tapasztalunk, a magyarázat ugyanaz mint a luminozítások esetében: alacsony effektív hőmérsékletek esetén az α -elemek abundanciájának, valamint a széntartalomnak nem elhanyagolható befolyása van a bolometrikus korrekciókra. A BC-k pedig szükségesek az abszolút magnitúdó kiszámolásához, melyből utána a luminozítás- illetve sugárértékre szert lehet tenni. Az alacsony hőmérsékleteknél a fősorozat vége felé is látszik a különbség. Tovább lépve a vörösóriás-ágra: a Gaia esetében ezen ág kiterjedése szélesebb, 1000 – 2000 K hőmérséklettartományt is lefedhet, ez az APOGEE-nél sokkal kisebb: maga az ág vastagsága 500 – 700 K között mozog. A vörös csomó-beli csillagokat itt is megtaláljuk: az APOGEE-nál valóban csomó alakban helyezkednek el nagyjából 700 K hőmérséklettartományt lefedve. A Gaia esetén egy kiterjedtebb csomót lehet látni: ez esetben akár 1500 K-t is lefedő tartományban helyezkednek el a héliumfelvillanáson átesett csillagok. Ez pedig csaknem kétszer akkora tartomány, mint amekkorát APOGEE esetében tapasztalunk, illetve nem is párhuzamos a fősorozattal. A vörösóriás-ág tetejét megfigyelve mindkét ábrán szintén szembeötlő különbséggel találkozunk, hasonlóképp a luminozításokhoz. A fejlődésük vége felé járó vörös óriásoknak van a legnagyobb méretük, és ezekre az APOGEE adatai alapján számolt sugárértékeim jelentősen nagyobbak a Gaia-énál. Előfordulnak csillagok, melyekre ez a sugárérték akár több mint fél nagyságrenddel nagyobb, ez pedig jelentős különbség. A Gaia által számolt sugaraknál a $10^2 R/R_{\odot}$ -nál levágás vehető észre, annál nagyobb értékű su-



14. ábra. A bal oldali képen az általam, az APOGEE effektív hőmérsékletei alapján számolt sugárértékek szerepelnek a luminozítás függvényében, mindkét mennyiség logaritmusát feltüntetve. A jobb oldalon az adatok a GAIA számításaiból származnak.

garak a jobb oldali ábrán nincsenek, míg a bal oldalin a vörösóriás-ág nagyobb sugárértékekre terjed ki. A HRD-nek ezen a szakaszán találhatóak a szénben gazdagabb AGB csillagok is: ismét párhuzamot lehet vonni a luminozításoknál számolt eltérésekkel. Az AGB csillagok csoportja a sugaraknál is megjelenik mind a Gaia, mind az APOGEE esetében a vörösóriás-ágtól balra. Mivel a széntartalom a BOSZ-modellek része, ezért annak figyelembe vétele pontosította a bolometrikus korrekciók értékeit, amelyből kifolyólag az általam számolt sugárértékek is pontosabbak lettek.

Végül a 14.ábrán a sugárértékeket ábrázoltam a luminozítás függvényében. A paneleken a pontok alakja egy-egy növekvő egyenes mentén helyezkedik el, ahogyan az a luminozítás-sugár összefüggésből következik, és kivehetőek rajta a HRD ágai. Mindkét esetben alacsonyabb luminozításoknál a sűrűbb régióban (körülbelül $0,5 R/R_{\odot}$, illetve nagyjából $1,4 L/L_{\odot}$ -ig) bezárólag helyezkedik el a fősorozat. Felette pedig a vörösóriás-ág húzódik, benne a szembetűnő sűrűbb régióval, mely az ág többi részéhez képest relatíve több csillagot tartalmazó terület, a fentiekhez hasonlóan a vörös csomót hivatott mutatni. A vörösóriás-ág kiterjedésének különbsége is szembetűnő: mind a sugarak, mind a luminozítások értékeinél csaknem egy nagyságrenddel nagyobb értékeket számoltam az APOGEE adataival. Számottevő különbség a két ábra között, hogy a vörösóriás-ágtól balra a Gaia-adatokban jelentős szórást látunk, ezek azok a magasabb hőmérsékletű csillagok, melyek esetében a GAIA mérései pontatlanok voltak. Hasonló szórás ugyanis az APOGEE adatokkal számolt R és L értékeknél nem jelenik meg. Szintén szembetűnő kü-

lönbséget látunk a fősorozat fölött, alacsony luminozításoknál: itt ugyanis a már fentebb tárgyalt csillagkeletkezési régiók látszanak. A baloldali panelen a 14 .ábrán a fősorozat „mellett”, egy kevésbé sűrűbb szakaszban helyezkednek el a születő csillagok. Számottevő különbség, hogy a Gaia esetén a csillagkeletkezési régiók gyakorlatilag „egybeolvadnak” a fősorozattal. Ezeket a most képződő csillagokat koordináták alapján összefoglaltam a 4.táblázatban. Ez ismételt alátámasztása annak, hogy az APOGEE a csillagkeletkezési régiókat helyesen tudta besorolni.

7. Összefoglalás

A dolgozatom elsődlegesen arra irányult, hogy a BOSZ spektrális adatbázis [Bohlin et al, 2017] pontosabb fizikai paramétereinek alkalmazásával új bolometrikus korrekciókat számítsak, majd az APOGEE DR17 [Creevey et al, 2022] méréseit felhasználva meghatározzam a csillagok sugarát és luminozitását.

Az elméleti bevezetőben (1. fejezet) általánosan ismertettem a csillagászati fotometria sajátosságait, illetve részleteztem a felhasználási módjait. Kitértem rá, hogy milyen típusú objektumok figyelhetők meg, esetleg fedezhetők fel vele.

A 2. fejezetben a szintetikus fotometria elméleti alapjait vázoltam fel. Kifejtettem bizonyos felhasználási módjait, valamint összefoglaltam azokat az alapegyenleteket, melyek alapján a szintetikus fotometriai számítások történnek. Ismerettem az általam használt különböző magnitúdórendszereket, illetve azok elméleti hátterét, tárgyaltam a hozzájuk tartozó matematikai összefüggéseket. Ezt követte a bolometrikus korrekciók elméleti tárgyalása, ahol bemutattam, hogy pontosan mik is a BC-k, valamint a kiszámításukhoz szükséges matematikai hátteret.

A 3. fejezetben ismertettem azokat az égboltpelmérő programokat, melyeknek adatait később felhasználtam: ezek rendre a Gaia, a 2MASS illetve az APOGEE voltak. Összefoglaltam ezek alapvető paramétereit, többek közt azt, hogy a méréseket végző műszerek hol találhatóak, valamint bemutattam a programok fő céljait. Az adatbázisaik tartalmaira is kitértem, különös tekintettel annak általam felhasznált, illetve számomra releváns részeire, valamint taglaltam a 2MASS és a Gaia esetében a szűrőfüggvényeket, melyeket a későbbi számítások során alkalmaztam.

A 4. fejezetben az általam alkalmazott módszereket ismertettem: mindenekelőtt a számítások alapjául szolgáló BOSZ spektrális adatbázist mutattam be. Részleteztem a modellek fizikai paramétereit, azok intervallumait, valamint azt, hogy milyen lépésközökkel tartalmazzák a fizikai paramétereket. Leírtam a számításom folyamatát: a species kód működését, valamint azt, hogy hogyan használtam fel azt a magnitúdók kiszámításához. Feltüntettem azokat az egyenleteket, amelyek szükségesek voltak ahhoz, hogy megkapjam a fluxus, illetve bolometrikus korrekció értékeit.

A BOSZ adatbázisban [Bohlin et al, 2017] többféle felbontású spektrum állt rendelkezésre, rendre 200 és 300 000 között. Bemutattam, hogy hogyan vizsgáltam meg, mely felbontású spektrumokat érdemes alkalmaznom a számításokhoz. Erre azért volt szükség, hogy felmérjem, lesz-e olyan mértékben pontosabb a számítás, hogy kijelenthető legyen, megéri az elérhető legnagyobb felbontású spektrumokat alkalmazni. A számítások ezt visszaigazolták, így eszerint jártam el.

Kutatásom eredményeit a 5. és 6. fejezetekben ismertettem. A először az általam kiszámolt Gaia- és 2MASS-magnitúdókból számított színindexeket hasonlítottam össze, illetve bemutattam azoknak a különféle asztrofizikai paraméterektől való függését. Ennek helyességét azzal ellenőriztem, hogy a Gaia DR3 adatbázisából letöltöttem úgynevezett „háttércsillagokat”, és azoknak a különböző Gaia-2MASS színindexeit ábrázoltam a háttérben; utána pedig az általam számolt értékeket hasonlítottam össze az irodalomban szereplőkkel. Az értékeim jó egyezést mutattak a Gaia színindexeivel.

Mivel dolgozatom célja a csillagok sugar- és luminozítás-értékeinek kiszámítása, ezért ki kellett választanom azokat a csillagokat, amelyekre ezeket a számításokat el szeretném végezni. Az 5.2. alfejezetben részletesen kifejtettem, hogy az APOGEE DR17[Majewski et al., 2017] adatbázisból milyen feltételek alapján végeztem el a számomra releváns csillagok kiválasztását.

Ezt követően a bolometrikus korrekciókat mutattam be az 5.3. fejezetben. Mivel munkámat a Gaia számításaival hasonlítottam össze, ezért először részletesen tárgyaltam az általuk alkal-

mazott módszereket, azt, hogy hogyan számolták a BC-értékeiket. Majd a saját módszereimre tértem ki: részleteztem a BC-értékek meghatározását, kitérve a modellek paraméterein alapuló interpolációra. Ábrázoltam az általam, illetve a Gaia által számolt bolometrikus korrekciókat. Részleteztem, hogy mik az alapvető különbségek, valamint kifejtettem a modellek közötti eltérések sajátosságait, értve ezt a fizikai paraméterek által lefedett intervallumokra, arra, hogy azok mennyiben különböznek egymástól, és ez a bolometrikus korrekciókra milyen hatással van, az $[\alpha/M]$ szélesebb intervallumon történő tárgyalásának következményeit, valamint a szén mint önálló elem abundanciájának figyelembe vételét. Megállapítottam, hogy a bolometrikus korrekció alacsony hőmérsékleten számottevő módon változik, illetve azt is, hogy a fent említett paraméterek szintén számottevően befolyásolják a BC-értékeket.

A továbbiakban azt vázoltam fel, hogy a megállapított bolometrikus korrekciók felhasználásával hogyan kell sugár- és luminozítás-értékeket számolni: a Gaia esetében röviden összefoglaltam, hogy ők milyen módszert alkalmaztak, majd ismertettem az általam használt formulákat. A matematikai leírás és a szükséges egyenletek felvázolását követően összehasonlítás céljából Hertzsprung–Russel-diagramokon szemléltettem a Gaia, illetve az általam számolt sugár- és luminozítás-értékeket. Az eredmények összevetése során több következtetést is levonhattam. Az egyik az, hogy az APOGEE helyesen azonosította a csillagkeletkezési régiókban lévő csillagokat, amelyek a Gaia esetében nem látszanak. Szintén különbségek vehetőek észre a különböző fejlődési állapotokat szemlélve: alacsony hőmérséklet esetén a fősorozaton az én számításaim konzisztensebbnek tűnnek, valamint nem észlelhető az a csíkozódás, amely a Gaia-nál az inhomogén hőmérséklet-eloszlás miatt látszódik. A vörösóriás-ág is sokkal kisebb szórással jelenik meg az általam számolt adatokból ábrázolt HRD-n, és a vörös csomó, illetve a vörösóriás-ág tetejének csillagai is konzisztensebben helyezkednek el. Ennek hátterében az APOGEE pontosabb effektív hőmérsékletei és bolometrikus korrekciói állnak.

8. Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Mészáros Szabolcsnak a szakmai segítségért, a dolgozattal kapcsolatos tanácsaiért, és mindazért, amit ezalatt az időszak alatt tanulhattam tőle. Köszönet illeti az MTA-ELTE Lendület Tejútrendszer Kutatócsoport minden tagját, illetve a Gothard Asztrofizikai Obszervatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont munkatársait, akik a felmerülő kérdések során készséggel segítettek. Külön szeretném kiemelni Hegedűs Violát és Kovács Józsefet, akik a tanácsaikkal szintén gazdagították a dolgozatomat. Köszönet illeti Gebhard Eriket, aki számos gyakorlati tanáccsal látott el a munka során, valamint Horváth Margarétát, aki szintén készséggel rendelkezésemre állt, amikor kérdésem volt. Hálával a családomnak, illetve minden barátomnak a lelki támogatásért, és mindenkinek, aki a legkisebb mértékben is hozzájárult ahhoz, hogy a dolgozatom elkészülhessen.

Hivatkozások

- [Abdurro'uf et al, 2022] Abdurro'uf, Accetta K., Aerts C., Silva Aguirre V., Ahumada R., Ajgaonkar N., Filiz Ak N., et al., 2022, *ApJS*, 259, 35
- [Alonso et al, 1996] Alonso et al, *A&A*, 313, 873, 1996
- [Arp, 1961] Arp, H. 1961, *ApJ*, 133, 869
- [Bell és Gustafsson, 1989] Bell és Gustafsson, *MNRAS*, 236, 653, 1989
- [Bohlin, 2007] Bohlin R. C., 2007, in C. Sterken, ed., *The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization*. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 364, pp.
- [Bohlin et al, 2017] *The Astronomical Journal*, Volume 153, Issue 5, article id. 234, 11 pp. (2017).
- [Buser, R. 1986] IN: Highlights of astronomy. Volume 7 - Proceedings of the Nineteenth IAU General Assembly, Delhi, India, November 19-28, 1985 (A87-12451 02-90). Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 1986, p. 799-804. NASA-SNSF-supported research.
- [C. N. A. Wilmer, 2018] C. N. A. Wilmer, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236:47 (14pp), 2018 June
- [C. Jordi et al, 2010] C. Jordi et al, *A&A* 523, A48 (2010)
- [Casagrande et al, 2014] Casagrande et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 444, Issue 1, 11 October 2014, Pages 392–419,
- [Casagrande et al, 2018] Casagrande et al., *MNRAS* 475, 5023–5040 (2018)
- [Casagrande et al, 2010] Casagrande et al, 2010, *A&A*, 512, A54+
- [Casagrande et al. 2010, 2011] Casagrande et al., 2010 *Astronomy and Astrophysics* 512, A54+; 530, A138
- [Castelli and Kurucz, 2013] *Modelling of Stellar Atmospheres, Poster Contributions*. Proceedings of the 210th Symposium of the International Astronomical Union held at Uppsala University, Uppsala, Sweden, 17-21 June, 2002. Edited by N. Piskunov, W.W. Weiss, and D.F. Gray. Published on behalf of the IAU by the Astronomical Society of the Pacific, 2003., p.A20
- [Creevey et al, 2022] Creevey, O. L., Sordo, R., Paillet F., et al. 2022, *A&A*, "Gaia Data Release 3: Astrophysical parameters inference system (Apsis) I - overview"
- [Eggen et al, 1962] Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, *ApJ*, 136, 748
- [G. Rau et al, 2017] G. Rau et al, *A&A* 600 A92
- [Gaia Collaboration DR2] GAIA Collaboration et al, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 595, id.A1, 36 pp.
- [Gaia Collaboration, 2016] Gaia Collaboration et al., 2016, *A&A*, 595, A1

- [Golay M., 1972] Golay M., 1972, *Vistas in Astronomy*, 14, 13
- [Gustafsson et al., 2008] Gustafsson et al, *A&A* 486, 951-970 (2008)
- [IAU 2015 Resolution B2] IAU 2015 Resolution B2, passed by the XXIXth IAU General Assembly in Honolulu, 13 August 2015
- [Ivezic et al, 2008] Ivezić Z. et al., 2008, *ApJ*, 684, 287
- [Johnson és Morgan 1953] Johnson H. L., Morgan W. W., 1953, *ApJ*, 117, 313
- [King I. 1952] King I. 1952, *AJ*, 57, 253
- [Majewski et al., 2017] Majewski S. R., Schiavon R. P., Frinchaboy P. M., et al. 2017, *AJ*, 154, 94
- [McClure R. D., van den Bergh S., 1968] McClure R. D., van den Bergh S., 1968, *AJ*, 73, 313
- [Mészáros et al, 2012] *The Astronomical Journal*, Volume 144, Issue 4, article id. 120, 8 pp. (2012).
- [Mould J. R., Siegel M. J, 1972] Mould J. R., Siegel M. J., 1982, *PASP*, 94, 223
- [Oke, J. B. et al, 1970] Oke, J. B., and Schild, R. E. 1970, *Ap. J.*, 161, 1015
- [Oke, J.B., 1974] Oke, J.B. 1974, *ApJS*, 27, 21
- [Oke and Gunn, 1983] Oke J. B., Gunn J. E., 1983, *ApJ*, 266, 713
- [Pogson, 1856] Pogson N., *MNRAS* 17,12
- [Ridgway et al, 1980] Ridgway S. T., Joyce R. R., White N. M., Wing R. F., 1980, *ApJ*, 235, 126
- [Straizys 1963a,c,e, 1964d] Straizys V.1963a, *Bull. Vilnius Obs.*, No. 5, 1 ; 1963c, *Bull. Vilnius Obs.*, No. 6, 9; 1963e, *AZh*, 40, 332 = *Soviet Astron.*, 7, 253; 1964d, *AZh*, 41, 979 = *Soviet Astron.*, 8, 784
- [Straizys, 1996] V. Straizys *Baltic Astronomy*, vol. 5, 459-476, 1996
- [Strömgren, 1937] *Handbuch der Experimentalphysik (Astrophysik)*, Akademische Verlagsgesellschaft, M.B.H. Leipzig, Vol. 26, p. 319.
- [Strömgren, 1966] Strömgren B., 1966, *ARA&A*, 4, 433
- [Wing, 1977] Wing R. F., 1967, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- [Worthey et al, 1994] Worthey G., Faber S. M., Gonzalez J. J., Burstein D., 1994, *ApJS*, 94, 687

Nyilatkozat

Alulírott Harmati Beáta Csillagász MSc szakos hallgató a *Csillagok luminozitásának és sugarának meghatározása új bolometrikus korrekciók alapján* című dolgozat szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2022.12.13.

Harmati Beáta
Csillagász MSc, II. évfolyam