

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM TTIK
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

TDK DOLGOZAT

Csillagok effektív hőmérséklete és színindexe
közötti összefüggés modellezése az LSST és
Roman Űrtávcső korában

Készítette: **Karsai Endre Zsombor**

Fizikus MSc szakos hallgató

Témavezető: **Dr. Mészáros Szabolcs**

tudományos főmunkatárs, Eötvös Loránd Tudományegyetem

Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont

Belső konzulens: **Dr. Szalai Tamás**

adjunktus, SZTE TTIK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék

Szeged, 2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és tudományos motiváció	2
2. IRFM módszer	3
3. A jövő nagy fotometriai égboltfelmérő programjai	4
3.1. LSST	4
3.2. Roman-úrtávcső	6
4. Alkalmazott módszerek	9
4.1. A BOSZ spektrális adatbázis	9
4.2. APOGEE égboltfelmérő program áttekintése és célpontok kiválasztása . . .	11
4.3. Az általam írt kód ismertetése	13
5. Eredményeim	15
5.1. Gaia és 2MASS színek és magnitúdók reprodukálása	15
5.2. LSST és Roman szín-fényesség diagramok bemutatása	20
5.3. LSST szín és effektív hőmérséklet közti összefüggésének illesztése	22
5.4. A Roman-úrtávcső szín és effektív hőmérséklet közti összefüggésének illesztése	25
6. Összefoglalás	29
Hivatkozások	31
Nyilatkozat	31
Saját eredmények	34

1. Bevezetés és tudományos motiváció

A fotometriai mérések kiemelkedő szerepet játszanak a csillagászatban, hiszen segítségével meghatározhatók a csillagok és más égitestek alapvető fizikai paraméterei, mint a fényesség, szín és hőmérséklet. A csillagászat történetében a fotometria a csillagok és galaxisok vizsgálatának egyik legfontosabb módszerévé vált, lehetővé téve, hogy a fény különböző hullámhosszain mérve értékes információkat nyerjünk az égitestek fejlődési állapotáról, összetételéről és távolságáról. Továbbá a fényességek változásának mérésével információkat kaphatunk változócsillagokról, szupernóvákról, kisbolygókról, valamint exobolygókról is. Az univerzum nagy léptékű vizsgálata érdekében a modern égboltfelmérő programok akár több milliárd objektum fotometriai adatait gyűjthetik össze, amelyek jelentős mértékben bővítik tudásunkat az univerzumról és a galaxisunkról.

A következő évtizedben két kiemelkedő égboltfelmérő program, a Legacy Survey of Space and Time (LSST) (Ivezić et al. 2019) és a Roman Space Telescope (Spergel et al. 2013), alapvetően új adatokat szolgáltatnak majd, amelyek lehetőséget adnak a csillagpopulációk soha nem látott részletességű vizsgálatára. Az LSST hatalmas mennyiségű fotometriai adatot fog gyűjteni több milliárd csillagról és galaxisról a látható és közeli infravörös hullámhossztartományban. A Roman Space Telescope, amely a látható fény tartományában halványabb, távoli galaxisokra és csillagokra koncentrál, további mélyreható információkat nyújt majd az univerzum szerkezetéről és evolúciójáról.

A dolgozatomban a BOSZ spektrális adatbázis (Mészáros et al. 2024) segítségével modellezem a Gaia (Gaia Collaboration et al. 2021) és az APOGEE (Abdurro'uf et al. 2022) által közösen észlelt csillagok ezen két jövőbeli égboltfelmérő program által használt szűrőkben mért magnitúdóit, abból a célból, hogy az effektív hőmérséklet és a színindex közötti összefüggést illesszem. Az APOGEE által meghatározott atmoszferikus paraméterek ismeretében a BOSZ elméleti spektrális adatbázis adatait interpolálva meghatározhatók az előbb említett csillagok esetére a szintetikus magnitúdók. A számolásaim során csak a kis vörösödésű csillagokat veszem figyelembe. A színindex és az effektív hőmérséklet között nincs egyértelműen leírható kapcsolat, így ezeket különböző modellfüggvények tesztelésével illesztésével tudom meghatározni. A két mennyiség közötti kapcsolat pontos ismeretében lehetőségünk nyílik több milliárd csillag effektív hőmérsékletének egyszerű meghatározására.

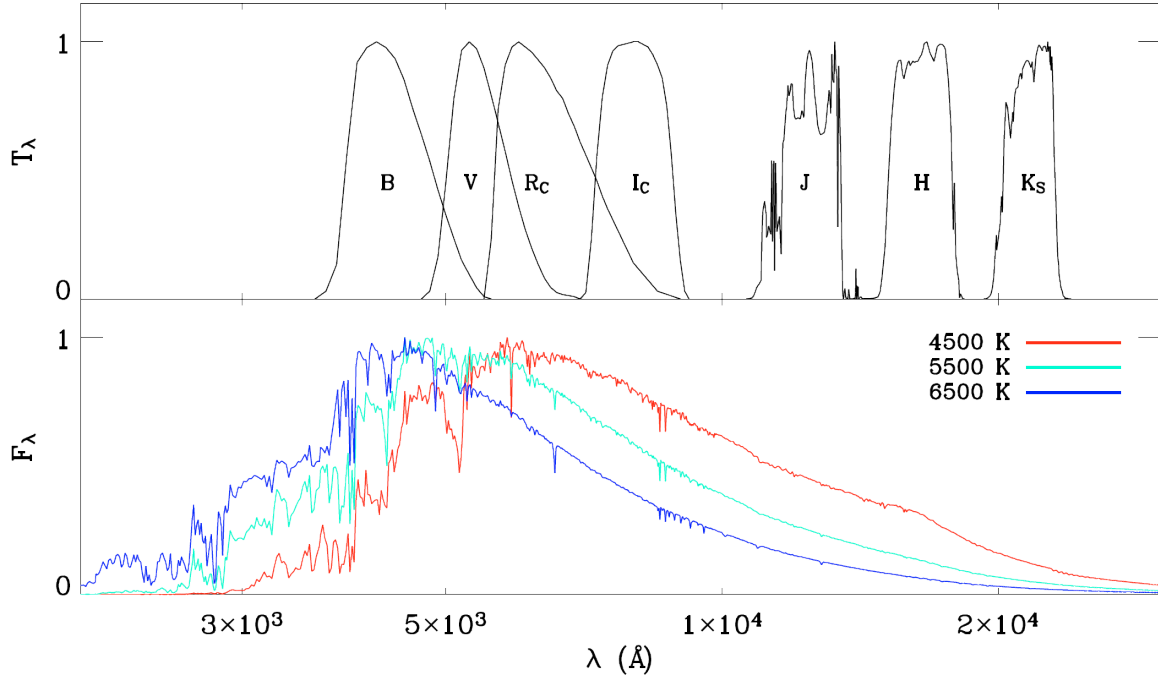
2. IRFM módszer

A csillagok egyik legfontosabb paramétere az effektív hőmérséklet, amely jelentős hatással van a csillag többi atmoszferikus paraméterére, mint a fémtartalom és kémiai összetétel. A legközvetlenebb módszert a csillagok effektív hőmérsékletének meghatározására az interferometriából származó szögátmérők biztosítják, feltéve, hogy a bolometrikus fluxusok is meghatározhatóak, lásd Code et al. (1976). Azonban ez a módszer nagyon időigényes, sok bizonytalanságot és hibát kell figyelembe venni. Az effektív hőmérséklet meghatározására több indirekt módszer közül az InfraRed Flux Method (innenről IRFM) az egyik legtöbbet használt, amely egy olyan, nagyjából modellfüggetlen fotometriai módszer, amelyet eredetileg szögátmérők néhány százalék pontosságú meghatározására találtak ki. Lényege, hogy a csillag bolometrikus fluxusát—azaz a teljes hullámhosszon mért sugárzási energiáját—és az infravörös tartományban mért fluxusát viszonyítja egymáshoz. Az IRFM egy olyan indexre támaszkodik, amelyet egy csillag bolometrikus és infravörös monokromatikus fluxusának aránya határoz meg. Ha egy csillag mért és modellezett fluxusa is a rendelkezésünkre áll, akkor az előző arányt két felületelemen értelmezett mennyiséggel összevetve (σT_{eff}^4 , $\mathcal{F}_{\text{IR,modell}}$) megkaphatjuk a csillag effektív hőmérsékletét nagyjából 1 % pontossággal. Ez a módszer képes felvenni a versenyt az intenzitásfotometriával abban az esetben, ha a fluxus megfelelő kalibrációja biztosított (Blackwell & Shallis (1977), Blackwell et al. (1979), Blackwell et al. (1980)). Az IRFM módszert az évek során sikeresen alkalmazták különböző színekposztályú és metallicitású csillagok effektív hőmérsékletének meghatározására (Casagrande et al. 2021; González Hernández & Bonifacio 2009).

Az IRFM Casagrande et al. (2021) által is alkalmazott változatát korábban már validálták Naphoz hasonló csillagokra, a Hubble-űrtávcső (HST) abszolút színekép-fotometriájára, valamint interferometriából származó szögtávolságokra (Casagrande et al. (2006), Casagrande et al. (2010)). Általában a 2MASS égboltsfelmérő program (Skrutskie et al. 2006) infravörös fotometriáját felhasználva határozzák meg az effektív hőmérséklet értékét, amelyet fotometriai hőmérsékletnek is szoktak nevezni. Például, a Casagrande et al. (2021)-ben alkalmazott IRFM módszer során minden csillagra a Gaia (BP, RP) valamint a 2MASS JHK_S színeket használták fel a bolometrikus és infravörös fluxusok kiszámításához. Az 1. ábrán látható példában nem a BP, RP szűrőket alkalmazzák a fluxusok meghatározásához, hanem a B, V, R_C, I_C szűrőket. Az ezeken a sávokon kívül eső tartományon a fluxust elméleti modell alapján lehet meghatározni adott T_{eff} , $\log(g)$ és $[\text{Fe}/\text{H}]$ értékek mért fluxusokra való illesztésével.

Az IRFM hőmérsékletek meghatározása egy komplikált folyamat, ezért az egyszerűség kedvéért érdemes olyan hőmérsékletskálát választani, ami az IRFM skálához kellően közel van. Dolgozatomban ezért a fotometriai (IRFM) hőmérsékletek helyett az APOGEE

DR17 által biztosított hőmérséklet skálát alkalmaztam, ugyanis ezek eltérése egymástól meglehetősen kicsi (< 100 K) (Jönsson et al. 2020; Abdurro'uf et al. 2022).



1. ábra. A felső ábrán az IRFM módszerhez alkalmazott Johnson-Cousins-2MASS szín-szűrők láthatók Casagrande et al. (2010)-ból, az alsó ábrán pedig szintetikus spektrumok három különböző effektív hőmérséklet esetére.

3. A jövő nagy fotometriai égboltfelmérő programjai

3.1. LSST

Az LSST (Large Synoptic Survey Telescope), új nevén Vera C. Rubin Obszervatórium, egy nagyszabású égboltfelmérő program, amely az égbolt széles körű, szisztematikus és ismétlődő megfigyelésére épül Ivezić et al. (2019). Az első észlelések a tervek szerint 2025 januárjában fognak kezdődni, a felmérések pedig 2025 augusztusában. Ez az égboltfelmérő program a legnagyobb szabású asztrofizikai projektek közé tartozik, és az égbolt nagy területeinek monitorozásával hatalmas mennyiségű adatot gyűjt majd, amely révén a kutatók jobban megérthetik az univerzum struktúráját és fejlődését. A program segíteni fog a galaxisunk csillagainak és csillagpopulációinak tanulmányozásában, valamint új csillagok, változócsillagok és bolygórendszerek felfedezésében. Ezek a megfigyelések hozzájárulnak a Tejútrendszer szerkezetének és történetének megértéséhez is. Az obszervatórium hat szín-szűrőt fog alkalmazni (u, g, r, i, z, y), melyek a 300-tól 1100 nm-ig terjedő hullámhossztartományt fedik le. A szín-szűrőket a 2. ábra mutatja be, valamint

a szűrőkre jellemző minimális, közép és maximális hullámhosszakat a 1. táblázat tartalmazza. Az LSST a Cerro Pachón hegyen található Chilében, amely az égboltfelmérés szempontjából kiváló elhelyezkedést biztosít. Az obszervatóriumban található Simonyi teleszkóp fő jellemzője a 8,4 méteres átmérőjű, rendkívül nagy fénygyűjtő képességű tükör, melynek köszönhetően rövidebb expozíciós idővel, gyorsan képes adatokat gyűjteni az égbolt hatalmas területeiről. Az LSST különlegessége a hatalmas látómező, amely egyetlen expozíció alatt körülbelül 9,6 négyzetfok égboltot képes lefedni. A rendszer egyedülállóan gyors, és képes lesz az égboltot három éjszaka alatt teljes egészében átvizsgálni. Az égbolt 10 éven keresztül tartó monitorozásával hosszútávú lefedettséget biztosítanak, amely lehetővé teszi az objektumok mozgásának, fényességváltozásainak és új égi események (pl. szupernóvák, kisbolygók, üstökösök) észlelését. A képeket készítő CCD kamera a valaha készült legnagyobb digitális kamera, 3200 megapixeles felbontással, ami lehetővé teszi az égbolt legapróbb részleteinek megörökítését.

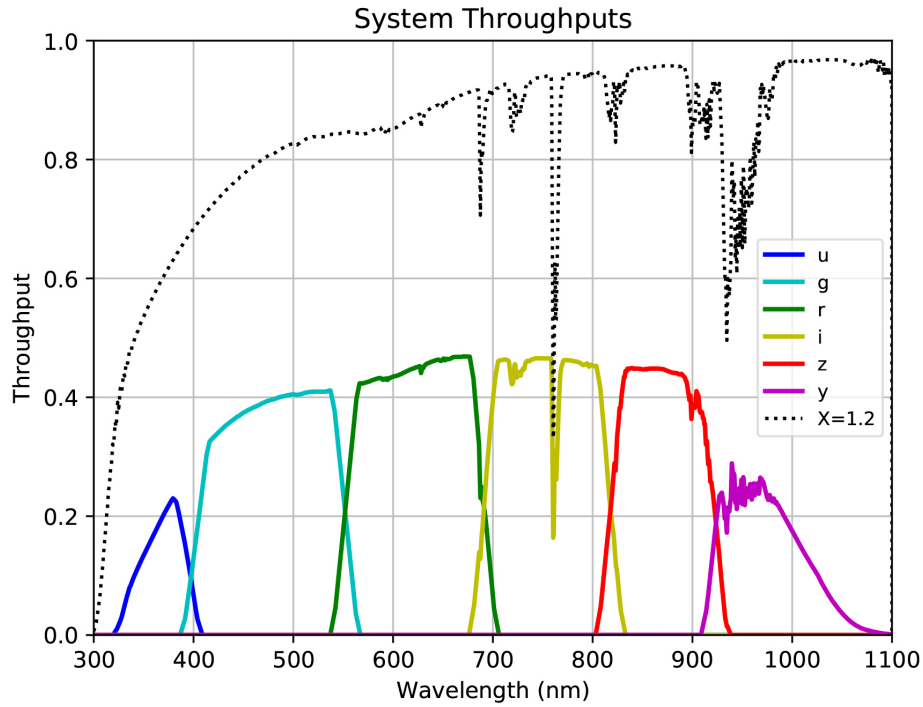
Az LSST négy tudományos témában kíván kiemelkedő eredményeket elérni:

- A sötét energia és sötét anyag vizsgálata gyenge gravitációs lencsézés, akusztikus barion oszcillációk és Ia típusú szupernóvák fotometriája révén.
- A Naprendszer kis objektumainak feltérképezése, különösen a Földközeli kisbolygók és a Kuiper-öv objektumaira koncentrálna. Az LSST várhatóan 10–100-szorosára növeli az itt katalogizált objektumok számát.
- Tranziens csillagászati események, például nóvák, szupernóvák, gamma-kitörések, kvazárok vizsgálata és felfedezése.
- A Tejútrendszer szerkezetének és fejlődésének vizsgálata.

LSST szűrő	$\lambda_{\min}$ (Å)	$\lambda_{\max}$ (Å)	λ_k (Å)
u	3061,21	4080,36	3584,08
g	3871,96	5665,26	4807,75
r	5376,31	7055,18	6241,87
i	6765,95	8325,18	7563,60
z	8035,64	9380,16	8718,83
y	9091,29	10999,99	10142,44

1. táblázat. LSST szűrőkre jellemző minimális, maximális és közepes hullámhosszak Angströmben. (Forrás: <http://svo2.cab.inta-csic.es/svo/theory/fps/index.php?mode=browse&gname=LSST>)

Munkám során az LSST által felhasznált szűrők közül az u, r és y sávokban mérhető magnitúdókkal számoltam és az u–y színt használtam fel a szín és effektív hőmérséklet



2. ábra. LSST szűrők. A függőleges tengely a teljes áteresztőképességet mutatja, a vízszintes tengely pedig a hullámhosszat. Az átviteli függvény magában foglalja az atmoszferikus áteresztőképességet (1,2 légköri tömeg feltételezése mellett; szaggatott vonal), az optikai rendszert és a detektor érzékenységet. (Forrás: Ivezić et al. (2019))

közötti összefüggés meghatározásához. Azért ezt a két szűrőt választottam, mert ezek hullámhosszának különbsége lesz a legnagyobb, így az u – y színindex lesz a legalkalmasabb a szín és effektív hőmérséklet közti összefüggés megállapítására.

3.2. Roman-űrtávcső

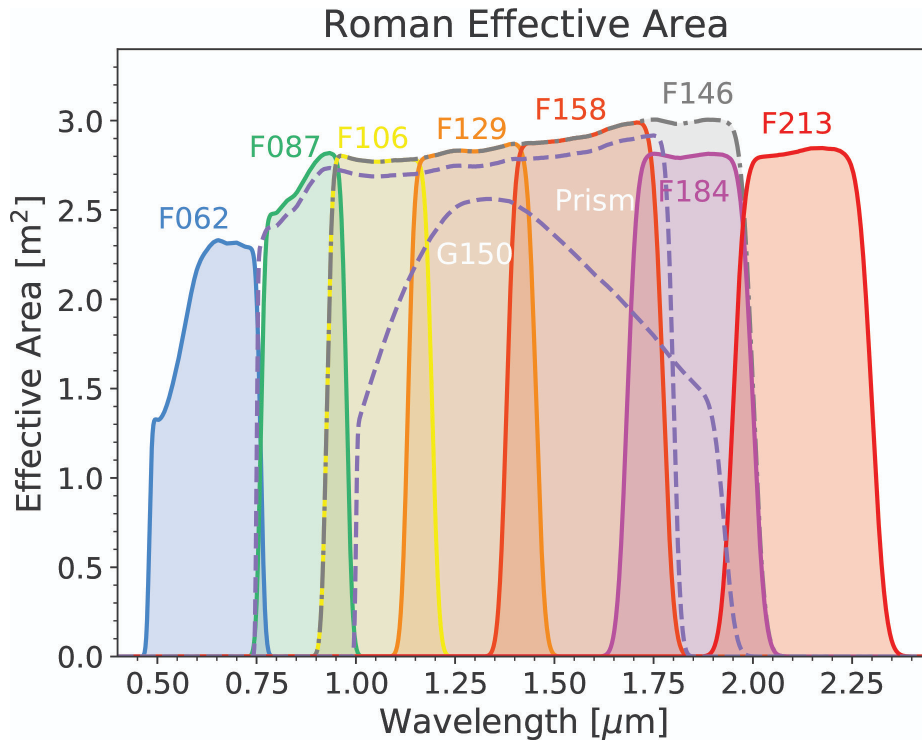
A Roman Space Telescope (teljes nevén Nancy Grace Roman Space Telescope), korábbi nevén Wide-Field Infrared Survey Telescope (WFIRST), magyarul Roman-űrtávcső, egy jövőbeli űrtávcső, amelyet a NASA fejleszt az univerzum infravörös tartományban történő széles látómezejű vizsgálatára (Spergel et al. 2013). Az űreszközt várhatóan 2027 májusában fogják felbocsátani, és ezt követően pár hónap múlva, 2027 végén vagy 2028 elején kezd méréseket végezni. A teleszkóp nevét Nancy Grace Romanról, a NASA első vezető csillagásznőjéről kapta, aki jelentős szerepet játszott a Hubble-űrtávcső létrehozásában. A Roman-űrtávcső a Hubble-űrtávcsőhöz hasonló méretű (2,4 m átmérőjű a főtükre), de annál 100-szor nagyobb látómezővel rendelkezik az infravörös tartományban, így képes lesz az égbolt nagy területeit vizsgálni. Fő célja az univerzum szerkezetének, fejlődésének és a sötét energia természetének tanulmányozása. A Roman-űrtávcső forradalmasítani

fogja infravörös tartományban az égboltfelmérést és az asztrofizikai kutatásokat, különösen a sötét energia természetének feltárásában és az exobolygók kutatásában. A távcső két fő tudományos eszközzel rendelkezik:

- Wide Field Instrument (WFI): A WFI képes lesz nagy látómezőjű infravörös felvételeket készíteni, érzékeny a közeli infravörös tartományra (0,48–2 mikron), és kiválóan alkalmas nagyobb égi területek gyors átvizsgálására. Ez lehetővé teszi a kozmológiai távolságok nagy pontosságú mérését és az univerzum sötét energia által befolyásolt tágulásának tanulmányozását.
- Koronográf: Ez az eszköz segít közvetlenül észlelni és tanulmányozni a csillagok körül keringő exobolygókat. A koronográf képes lesz a központi csillag fényét blokkolni, lehetővé téve a bolygók és környezetük megfigyelését, valamint azok atmoszférájának tanulmányozását.

Az űrteleszkóp színszűrőire jellemző hullámhosszakat a 2. táblázatban feltüntettem és a 3. ábrán pedig láthatjuk is ezeket a szűrőket. Nagyjából a 0,5 mikrontól 2,3 mikronig terjedő hullámhossztartományt fedik le az űrteleszkóp által használt szűrők. A Roman-űrtávcső legfontosabb tudományos céljai:

- Alapvető kérdések megválaszolása a sötét energiáról, kiegészítve az Európai Űrügynökség (ESA) által vezetett Euclid küldetést, többek között a következő kérdések vizsgálatával: Az univerzum gyorsuló tágulását egy új energiakomponens okozza, vagy az általános relativitáselmélet kozmológiai méretarányban való érvénytelensége? Ha az oka egy új energiakomponens, akkor ennek energiasűrűsége állandó térben és időben, vagy változott az univerzum története során? Három független módszert fog alkalmazni a sötét energia kutatására: akusztikus barion oszcillációk, távoli szupernóvák megfigyelése és gyenge gravitációs lencsézés.
- Egy exobolygó-leltár elkészítése, amely új kérdéseket segít megválaszolni az élet lehetőségeiről az univerzumban: Milyen gyakoriak a Naprendszerhez hasonló bolygórendszerek? Milyen típusú bolygók találhatók a bolygórendszerek hideg, külső régióiban? Mi határozza meg a földszerű égitestek lakhatóságát? Továbbá gravitációs mikrolencsézés segítségével lehetővé teszi olyan exobolygók felfedezését, amelyek tömege csupán néhányszorosa a Holdénak.
- Primordiális feketelyukak észlelése, abban az esetben, ha ilyenek valóban léteznek.
- Koronográf alkalmazása exobolygók közvetlen megfigyelésére, amely először teszi lehetővé a legközelebbi csillagszomszédaink körül keringő bolygók közvetlen képének és spektrumának rögzítését. Ezek a bolygók a Naprendszer óriásbolygóíhoz hasonlóak lehetnek, és részletesen tanulmányozhatók ezzel a technológiával.



3. ábra. A Roman-űrtávcső színszűrői. A vízszintes tengelyen a hullámhosszak, a függőleges tengelyen az effektív terület látható, amely azt mutatja meg, hogy a bejövő fénynek mekkora része jut el ténylegesen a detektor felületére és kerül érzékelésre. (Forrás: https://roman.gsfc.nasa.gov/science/WFI_technical.html)

Roman szűrők	$\lambda_{\min}$ (μm)	$\lambda_{\max}$ (μm)	λ_k (μm)
F062	0,48	0,76	0,62
F087	0,76	0,977	0,869
F106	0,927	1,192	1,06
F129	1,131	1,454	1,293
F158	1,38	1,774	1,577
F184	1,683	2	1,842
F213	1,95	2,3	2,125
F146	0,927	2	1,464

2. táblázat. A Roman-űrtávcső szűrői és az azokra jellemző minimális, maximális és közepes hullámhossz mikrométerben. (Forrás: https://roman.gsfc.nasa.gov/science/WFI_technical.html)

4. Alkalmazott módszerek

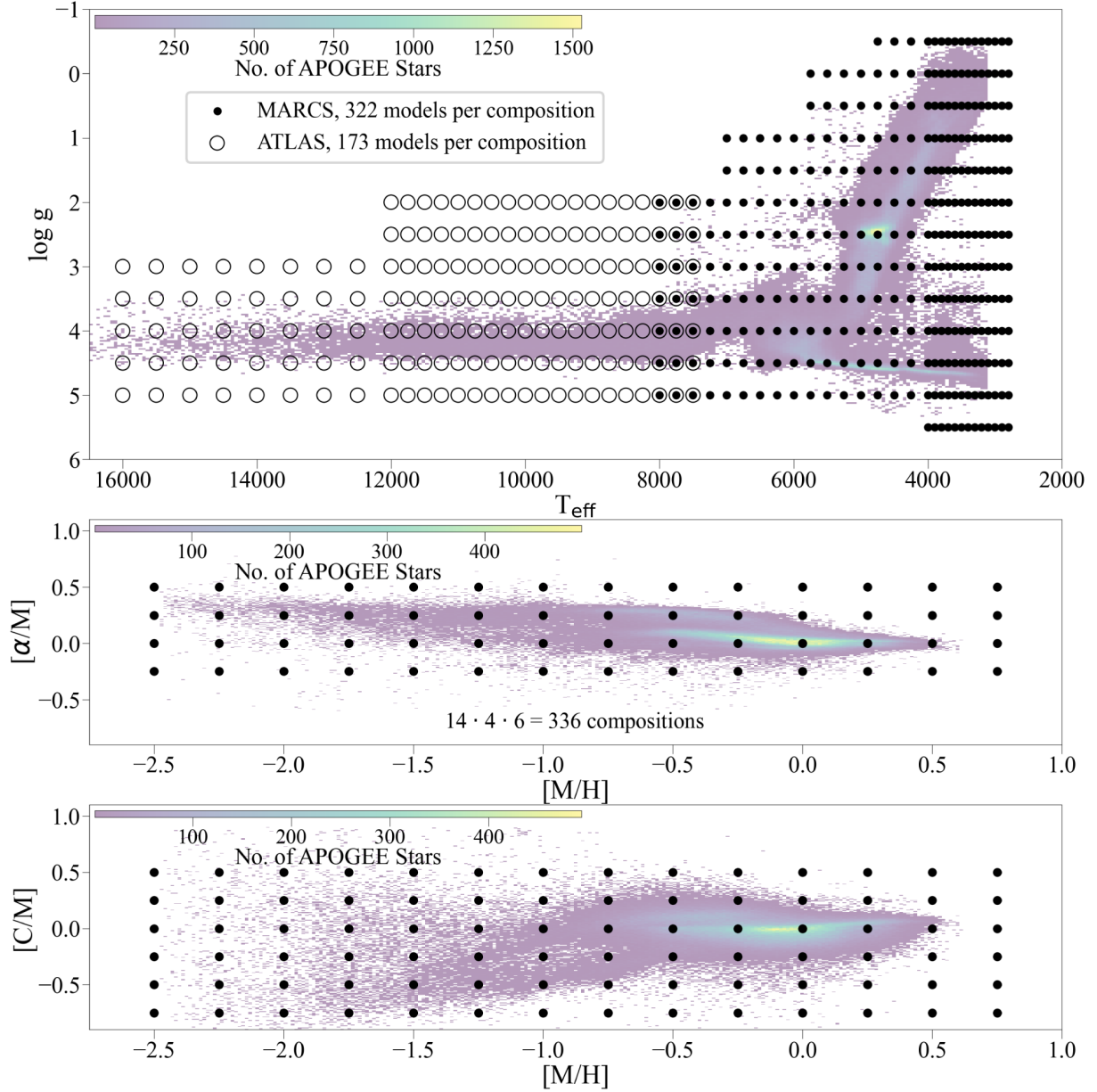
4.1. A BOSZ spektrális adatbázis

A dolgozatomban a szintetikus magnitúdók meghatározására az új BOSZ spektrális adatbázist használtam fel Mészáros et al. (2024), Bohlin et al. (2017). Az egyik legnagyobb újítása ennek a verzióknak az, hogy a 8000 K alatti effektív hőmérséklettel rendelkező csillagok elméleti színeképének esetében lecserélték az ATLAS9 modell atmoszférákat MARCS-ra, amíg a 8000 K feletti ATLAS9 modellek az eredetiek maradtak Mészáros et al. (2012) munkájából. A BOSZ rács hűvös vége most már 2800 K-ig tart. Ahogy a 4. ábra is mutatja, a rácsban a metallicitás $-2,5$ és $0,75$ dex között változik, a $[\alpha/\text{M}]$ elemgyakoriság $-0,25$ és $0,5$ dex között, a $[\text{C}/\text{M}]$ széntartalom pedig $-0,75$ és $0,5$ dex között, mindhárom esetben $0,25$ dex-es lépésközzel. Ezek a kémiai variációk megegyeznek minden T_{eff} és $\log g$ párra a teljes adatbázisban.

Az új BOSZ szintetikus adatbázist a Synspec (Hubeny et al. (2021)) segítségével és annak Synple nevű Python wrapperével számították ki. A modell atmoszféra beolvasása után a kód elvégzi az állapotegyenlet megoldását, beolvassa az atomi és molekuláris vonalak listáját, hogy kiszámolja a vonalak teljes opacitását, hozzáadja a kontinuum opacitást és megoldja a sugárzási transzport egyenletet. A cikkben szereplő összes spektrum lokális termodinamikai egyensúlyt feltételez.

A 2024-es verzióban összesen 23 molekula opacitását vették figyelembe: C_2 , CH , CN , CO , H_2 , H_2O , MgH , NH , OH , SiH , SiO , TiO , AlH , AlO , CaH , CaO , CrH , FeH , MgO , NaH , OH^+ , TiH , és VO . Az új molekulák közül sok jelentős abszorpcióval rendelkezik az 5000 K-nél hidegebb csillagok esetén és jelentősen befolyásolják az optikai és infravörös tartományban számolt fluxus értékét. Ezek a molekulák főleg a CaH , FeH , OH^+ és VO . Az összes modellt négy mikroturbulens sebesség értékkel számolták ki, $v_{\text{micro}} = 0, 1, 2$, és 4 km s^{-1} . Az összes spektrum tartománya 50 nm-től 32 μm -ig tart, a hullámhosszakat 200 nm felett levegőben, 200 nm alatt pedig vákuumban tekintették.

Az új spektrumok fluxusaiban is jelentős változás figyelhető meg az előző BOSZ rácshoz képest. A változást egyrészt az okozza, hogy az ATLAS9 modell atmoszférákat lecserélték a MARCS modellekre, másrészt pedig az újabb folytonos és vonalas opacitások használatával magyarázható. A két modell között a legnagyobb különbség az UV tartományban van. A folytonos opacitásokban történt változás leginkább a 10000 és 16000 K effektív hőmérsékletű csillagoknál jelenik meg. A fluxusokban akár 10–15 % változás is bekövetkezik ezeken a hőmérsékleteken a Balmer-ugrás közelében, 360 és 400 nm között, valamint 850 és 900 nm között a Paschen-ugrás közelében. A hidrogénvonalak közötti eltérés az infravörös tartományban is megmarad, de legfeljebb 5–7 %-ra csökken. A leghűvösebb,



4. ábra. Az új BOSZ rács által lefedett paraméterter. A felső ábrán a rács $T_{\text{eff}} - \log g$ diagramja, a középső ábrán a $[M/H] - [\alpha/M]$ diagram, az alsó ábrán pedig a $[C/M]$ az $[M/H]$ függvényében. 336 különböző kémiai összetétel szerepel az adatbázisban és minden összetétel tartalmaz 322 MARCS és 173 ATLAS9 modell atmoszférát. Az APOGEE DR17 által vizsgált csillagok sűrűségét az ábrákon a háttérben megjelenő hisztogram szemlélteti. Ez alapján láthatjuk, hogy a kiválasztott paraméterek lefedik a Tejútrendszerben megfigyelt csillagok többségét. (Forrás: Mészáros et al. (2024))

3500 és 5000 K közötti hőmérsékleteknél az új BOSZ fluxusok jelentősen alacsonyabbak a 200 és 500 nm közötti hullámhossztartományban, mint a régi rács esetében. Ez részben valószínűleg az OH+ hozzáadásával magyarázható, amelynek erős abszorpciós sávjai vannak ebben a hullámhossztartományban, amikor $T_{\text{eff}} < 5500$ K. A 450 és 720 nm közötti

sávban a fluxus 20 %-tól –40 %-ig tartó változása jelenik meg 3500 K-nél és 4000 K-nél, de magasabb hőmérsékleten nem. Ennek a változásnak az oka nagy valószínűséggel az új TiO vonalak sora által okozott általánosan erősebb abszorpció.

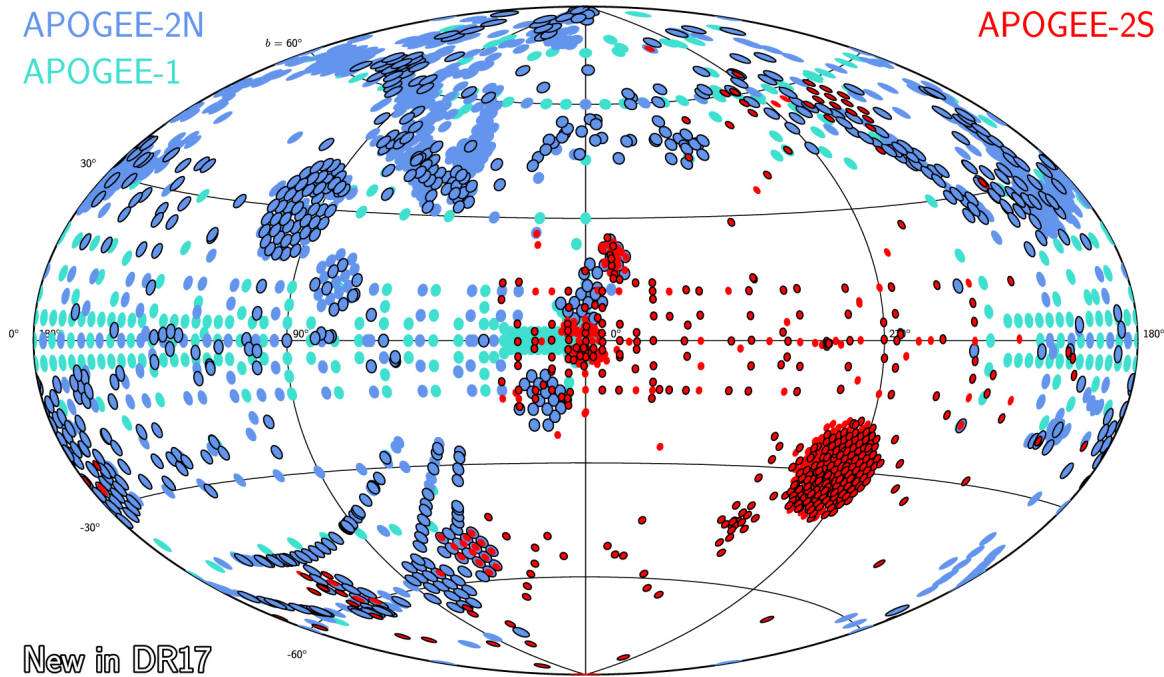
Az új és a régi BOSZ spektrumok közötti különbség általában ± 10 %-on belüli, ha a hullámhossz nagyobb, mint $1\ \mu\text{m}$. A spektrumok közötti eltérés a hőmérséklet csökkenésével nő, és 3500 K-nál éri el a maximumot. Mivel a legnagyobb eltérés csak a leghidegebb modellek spektrumaiban jelentkezik, így az eltérés a H_2O abszorpciós sávjainak változásaira, valamint az OH^+ hozzáadására vezethető vissza. A H_2O jelentősen elnyelő az $1\ \mu\text{m}$ feletti tartományban, míg az OH^+ erős abszorpciós sávokkal rendelkezik az $1,5$ és $8\ \mu\text{m}$ közötti tartományban.

4.2. APOGEE égboltfelmérő program áttekintése és célpontok kiválasztása

Az APOGEE égboltfelmérő program (Majewski et al. 2017) fő célja a Tejútrendszer kémiai dinamikájának a feltérképezése két, majdnem egyforma, többcsatornás, közeli infravörös tartományban működő nagy felbontású spektrográffal, melyek egyike az északi, a másik pedig a déli féltekén helyezkedik el Abdurro'uf et al. (2022). A DR17 a hatodik adatközlés a programból, amely két részben történt (APOGEE-1 és APOGEE-2), kiterjedve a Sloan Digital Sky Survey III (SDSS-III) (Eisenstein et al. 2011) és az SDSS-IV-re (Blanton et al. 2017). Az SDSS-III részeként az APOGEE-1 felmérés nagyjából 3 évig tartott 2011 augusztusától 2014 júliusáig. A felméréshez az Apache Point Observatory (APO) területén található, 2,5 méteres Sloan Foundation Telescope-ot használták. Az SDSS-IV elején az APOGEE-2 folytatta a méréseket nagyjából 6 évig az északi féltekén (APOGEE-2N). A vártnál nagyobb égbolton elért hatékonyságnak köszönhetően az APOGEE-2N megfigyelései 2020 novemberében zárultak le, összesen mintegy 7,5 évnyi hatékony adatgyűjtéssel. Ennek következtében számos program eredeti, 6 évre tervezett működését sikerült meghosszabbítani és kibővíteni. 2017 áprilisában megkezdődtek a mérések az újonnan épített APOGEE-2S spektrográffal és a hozzá tartozó száloptikai csatlakozólemezes infrastruktúrával a 2,5 méteres Irénée du Pont teleszkópon, a Las Cumbres Observatory (LCO) területén. Az APOGEE-2S megfigyelések 2021 januárjában fejeződtek be.

A DR17-ben található APOGEE adatok magukba foglalják az összes SDSS-III APOGEE-1 és SDSS-IV APOGEE-2 eredményt, amelyeket az említett két műszerrel végeztek az APO működésének kezdetétől (2011 szeptemberétől) egészen az SDSS-IV működésének végéig az APO-n és az LCO-n (2021 januárjáig). A DR17 657135 egyedi objektumról tartalmaz adatokat. Ezek az adatok spektrumok, radiális sebességek, atmoszferikus paraméterek, valamint egyedi elemek elemgyakoriságai. A végleges APOGEE adatokat

szemléltető galaktikus térkép az 5. ábrán látható, ahol minden kör egy adott lefedett égboltterületet jelöl.



5. ábra. Az APOGEE DR17 lefedettsége az égbolton galaktikus koordináta-rendszerben ábrázolva. Az ábrán a színezés azt jelöli, hogy melyik területet melyik felmérés során vizsgálták. A sötétebb kék az APOGEE-2N, a világosabb kék az APOGEE-1, a piros pedig az APOGEE-2S által felmért területeket jelölik. Azok a területek, amelyek esetén a DR17 új megfigyelésekkel szolgált, fekete körvonallal vannak jelölve. (Forrás: Abdurro'uf et al. (2022))

A csillagok paramétereit és az elemgyakoriságokat az APOGEE Stellar Parameters and Chemical Abundance Pipeline (ASPCAP; García Pérez et al. (2016)) segítségével lettek meghatározva. Az ASPCAP alap módszertana ugyanaz maradt a DR17-ben is, mint az előző felmérésekben, viszont új szintetikus spektrális rácsokat alkalmaztak. Az adatbázisban megtalálhatóak a nyers, valamint a korrigált spektroszkópiail csillagparaméterek és kémiai elemgyakoriságok. A korrigált effektív hőmérsékleteket az IRFM effektív hőmérséklet skálához kalibrálták, emiatt a két skála közti különbség kellő mértékben kicsi ahhoz, hogy a dolgozatomban az ASPCAP hőmérsékleteket használjam az IRFM hőmérsékletek helyett (González Hernández, J. I. & Bonifacio, P. (2009)). A korrigált felszíni gravitáció ($\log g$) értékeket pedig asztroszeizmológiai mérésekkel (Serenelli et al. (2017)) és izokrónokkal (Berger et al. (2020)) való összevetéssel korrigálták.

Ahhoz, hogy a dolgozatomban a szintetikus magnitúdókat meg tudjam határozni, először ki kellett választanom azokat a csillagokat, amelyeket az APOGEE és a Gaia közösen észlelt. Koordináták alapján összeállítottam egy csillagkatalógust ezen csillagokból, majd ezeket szűrtem bizonyos kritériumok szerint. A kiválasztást és a szűrést a Tool for OPERations on Catalogues And Tables (TOPCAT) nevű programmal végeztem el, és a későbbiekben csak azokkal a csillagokkal számoltam, amelyek a paraméterek szerinti szűrés után is a katalógusban maradtak. A paraméterek szerinti szűrés menetét az alábbiakban részletezem.

Annak érdekében, hogy a mintából kizárhassam a pulzáló változócsillagokat és a kettős vagy többes rendszereket, az APOGEE által meghatározott $v_{scatter}$ (szórás) mennyiséget használtam fel. Mivel minden objektumról különböző időpontokban több mérés is készült, a spektrumból származó radiális sebességértékekre esetenként jelentősen eltérő eredményeket kaphatunk. Az ebből az eltérésből származó $v_{scatter}$ szórás értékét 1 km s^{-1} -ban maximalizáltam annak érdekében, hogy az ilyen típusú csillagokat kizárjam a mintából. A radiális sebességek bizonytalanságának felső korlátját is 1 km s^{-1} -ban szabtam meg annak érdekében, hogy az olyan csillagok ne kerülhessenek a katalógusba, amelyekre ez a hiba túl nagy lenne. A túl távoli csillagok kizárása érdekében a parallaxis értékek hibájára is korlátot szabtam, maximum 10% hibát engedtem meg. Az előbb részletezett szűréseket elvégezve a végleges katalógus 295 055 csillagot tartalmaz. A munkám során ezen csillagok esetére határoztam meg a szintetikus magnitúdókat a különböző égboltfelmérő programok által használt sávokban.

4.3. Az általam írt kód ismertetése

Ebben a fejezetben az általam felhasznált interpolációs algoritmust fogom ismertetni, amely a BOSZ spektrális adatbázisból származó szintetikus csillagparamétereket felhasználva a Gaia és az APOGEE által közösen mért csillagokra, a Gaia, 2MASS, LSST és Roman űrtávcső szintetikus magnitúdó értékeket határoz meg az APOGEE atmoszferikus paramétereinek függvényében.

Ahhoz, hogy elkerüljük, hogy extrapoláció által téves eredményeket kapjunk, a csillagok paramétereit a BOSZ spektrális adatbázis szintetikus paramétereire kell illeszteni. A 4. ábrán látható a BOSZ rács által lefedett paramétertér. A kód az adatok beolvasása után egy függvénnyel kiszűri azokat a csillagokat, amelyek paramétereit nem ezekbe a tartományokba esnek. A paraméterhatárokat a 3. táblázat tartalmazza.

Az általam előállított adatbázisból 192049 csillag esik ebbe a paramétertérbe. Mivel a rendelkezésemre álló szintetikus magnitúdók nem egyéni csillagokra vonatkoznak, hanem a BOSZ adatbázis mintavételezéséhez vannak rögzítve, a BOSZ rácsot felhasználva 6 dimenzióban kell interpolációt elvégeznem.

Paraméter	Értéktartomány
T_{eff}	2800 – 8000 K
$\log g$	−0,5 – 5,5
[M/H]	−2,5 – 0,75
[α /M]	−0,25 – 0,5
[C/M]	−0,75 – 0,5
E(BP-RP)	0 – 5
d	0 – 1000000 pc
A_G	0 – 3,1

3. táblázat. A BOSZ spektrális adatbázis paramétertere miatt szükséges megkötések a kiválasztott csillagok tulajdonságaira.

Az RBF (Radial Basis Function) interpoláció egy olyan matematikai módszer, amelyet különböző méretű adathalmazok közötti folytonos értékek becslésére használnak, különösen akkor, ha a rendelkezésre álló adatok térben (vagy más dimenziókban) szétszórtan helyezkednek el. Az RBF egy olyan függvény, amelynek értéke kizárólag az ismert pontoktól mért távolságtól függ, és független a koordináta-rendszer elhelyezkedésétől, ezért az interpoláció működik bármennyi dimenzióban (Jönsson et al. 2020). A szűrés után az általam választott RBF interpolációs módszer működéséhez az APOGEE adatokat normalizálni kell, majd a normált adatsorra elvégezni az interpolációt. Az interpolált értéket az ismert pontok RBF-jeinek összegeként értelmezhetjük, ami azt jelenti, hogy minden ismert ponthoz tartozik egy RBF, amely hozzájárul az interpolált értékhez. Az RBF-ek tipikusan pozitív definit függvények, ami azt jelenti, hogy ezek a függvények minden pontban pozitívak, így biztosítják a sima, stabil interpolációt. A csillagparaméterek interpolációja esetén az adatok viszonylag ritkák (nem folytonosak vagy sűrűek a teljes tartományban), így olyan módszerre volt szükség, amely ezt figyelembe veszi. A multi-quadric RBF az egyik leggyakrabban használt RBF, amely különösen hatékony ritka adathalmazok esetén és lehetőséget ad arra, hogy az adatok közötti távolságokat hatékonyan kezeljük, miközben pontos becsléseket kapunk a köztes értékekre.

Minden egyes RBF függvényhez tartozik egy ismert pont (x_i), amelyet egy megfelelő súly értékkel (w_i) szorzunk meg, és az r_0 paraméterrel skálázunk. A függvény értékét így megkaphatjuk

$$y(x) = \sum_{i=1}^N w_i \left(\|x - x_i\|^2 + r_0^2 \right)^{0,5} \quad (1)$$

szerint. Ez azt jelenti, hogy minden interpoláció során az ismert pontokat különböző súlyokkal vesszük figyelembe, és a távolságot nemcsak az adott ismert ponttól mérjük, hanem azt egy skálázó paraméterrel is korrigáljuk. Ez teszi az RBF interpolációt ru-

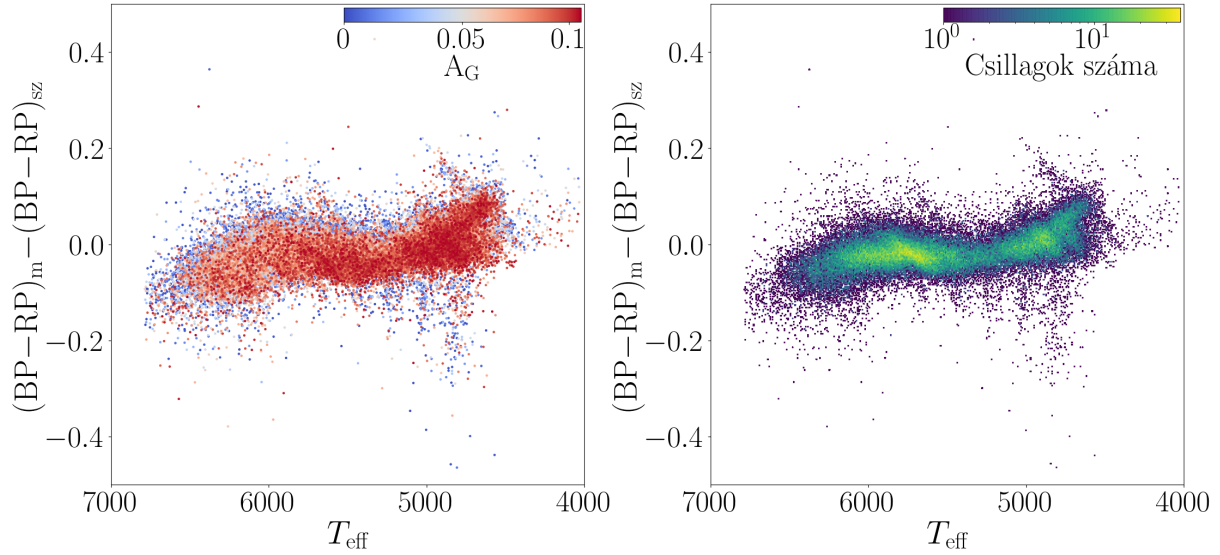
galmassá, hiszen különböző súlyokat rendelhetünk az egyes ismert pontokhoz az interpoláció pontosságának növelése érdekében. Pythonban az RBF interpolációt a SciPy könyvtár `scipy.interpolate.Rbf` moduljával végeztem el, és az interpolálás során 6 paramétert használtam fel, ezek a T_{eff} , a $\log g$, az $[M/H]$, az $[\alpha/M]$, a $[C/M]$ és az A_G . A BOSZ spektrális adatbázisból számolt bolometrikus korrekciók esetében az A_V értékeket használták fel, amely kis vörösödések esetén közelíthető az A_G extinkcióval. Mivel a két érték közötti átváltásra nem ismert összefüggés, az adatsoromat kis vörösödésekre korlátoztam ($A_G < 0,1$), ahol a két extinkció közelítőleg megegyezik. Az A_G értékeket a Gaia DR3 adatbázisából vettem át (Gaia Collaboration et al. 2023). Kiveszem továbbá a katalógusból a vörös törpe csillagokat, amelyekre $T_{\text{eff}} < 4500$ K és $\log g > 3$ egyszerre teljesül, ugyanis ezen csillagok elemgyakoriságai, köztük a $[M/H]$, $[\alpha/M]$ és $[C/M]$, pontatlanok. Továbbá kiszűröm a 4250 K-nél hűvösebb és 0,1-es szén elemgyakoriságnál nagyobb széntartalmú csillagokat, ugyanis ezek a szénben gazdag csillagok a megfigyelt spektrum pontatlan illesztése miatt rendelkeznek nagyobb széntartalommal. A szűrés után a kezdeti 192049 csillagból 67664 marad, amely nagyjából a harmada az eredeti mintának. A kód felhasználásával először a Gaia és 2MASS által észlelt színeket és magnitúdókat reprodukáltam, majd pedig a két nagy jövőbeli égboltfelmérő program, az LSST és a Roman-űrtávcső különböző szűrőkben vett szintetikus magnitúdó értékeit határoztam meg.

5. Eredményeim

5.1. Gaia és 2MASS színek és magnitúdók reprodukálása

Az adatok interpolálása után ellenőriztem, hogy az interpoláció megfelelő pontossággal képes-e a megfigyelt magnitúdók reprodukálására. Ez úgy lehetséges, ha olyan égboltfelmérő programok színszűrőire állítjuk elő ezeket a szintetikus paramétereket, amelyekre már rendelkezésünkre állnak mérési eredmények. Ebben a fejezetben a Gaia és a 2MASS nagy égboltfelmérő programok adataira végeztem el ezt az összehasonlítást. A Gaia esetében a BP–RP szín és a G abszolút magnitúdó, a 2MASS esetében pedig a J–K szín és a H magnitúdó az, amelyeket interpolálással előállítottam és rendelkezésemre is állnak mérési adatok. Először a BP–RP színekre vizsgáltam meg a mért és számolt értékek közötti különbséget az effektív hőmérséklet függvényében, amely a 6. ábrán látható.

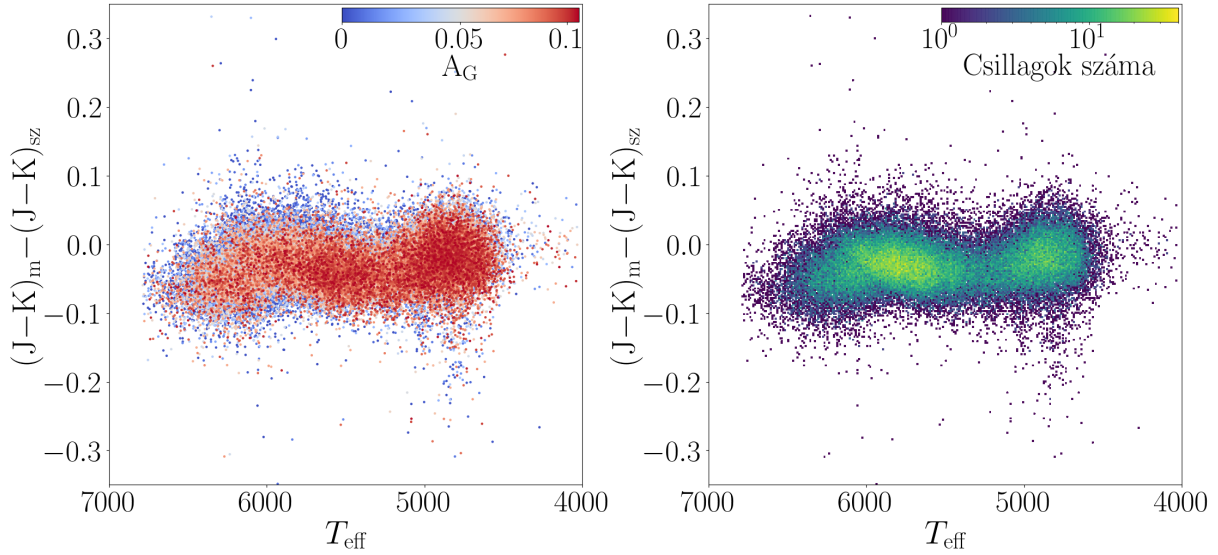
Az ábra jobb oldalán az extinkciót szemléltető színskálán a kék szín az alacsony, a piros szín pedig a nagy értékeket jelöli. Mivel az adatsoromat korlátoztam, kizárólag alacsony A_G értékkel rendelkező csillagokra, így azt várom, hogy a két érték közötti eltérés nem lesz nagy, ugyanis alacsony A_G értékek esetében az $A_G \approx A_V$. Ekkor pedig a számításaim



6. ábra. A Gaia égboltfelmérő program során mért (jelölés: m) BP–RP szín és az általam interpolációval kiszámolt szintetikus (jelölés: sz) BP–RP szín különbsége az effektív hőmérséklet függvényében. A baloldali ábrán a színskála az A_G extinkció értékeket szemlélteti annak érdekében, hogy vizsgálni tudjuk, hogy az eltérés hogyan függ az extinkciótól.

várhatóan pontosak lesznek. Nagyobb A_G értékek esetében tapasztalhatnánk jelentősebb eltérést. Ezért az várható, hogy a különbségek értékei látszólag a 0 közelében helyezkednek el. Ez teljesült is, mivel a BP–RP színek számolt és mért értéke közötti különbség átlaga $-0,014$ magnitúdó, az átlagtól mért szórása pedig $0,041$ magnitúdó. Valamint vizuálisan is megfigyelhető a feltételezett viselkedés, ugyanis a jobb oldali ábra azt mutatja, hogy a csillagok többsége a 0 színkülönbség környékén helyezkedik el. Azt mondhatjuk tehát, hogy a szűrt csillagokra az általam meghatározott BP és RP szintetikus magnitúdó értékek megfelelően pontosak a későbbi számításaimhoz.

A 2MASS J–K színre is hasonlóan elvégeztem az összehasonlítást, amely a 7. ábrán látható. Ezen az ábrán is ugyanaz a viselkedés várható, mint amelyet a BP–RP színek esetén leírtam. Mint látható, grafikon alapján itt is visszakaptam ezt az előzetes várakozásaimmal megegyező viselkedést. A színkülönbségek a 0 érték körül szórnak, és nem figyelhető meg jelentős eltérés. A bal oldali ábrán azt figyelhetjük meg, hogy az A_G érték nagysága nem befolyásolja különösebben a mért és számolt J–K szín közötti eltérést. A jobb oldali hisztogram pedig azt szemlélteti, hogy a csillagok többsége a 0 érték környékén helyezkedik el, ahogy az várható is volt. A színkülönbségek átlagértéke az ábrán $-0,030$ magnitúdó, az átlagtól való szórás pedig $0,041$ magnitúdó. Mivel ebben az esetben is kicsi lett a szórás, a J és K magnitúdók interpolációval előállított értékei is kellően pontosnak bizonyultak.

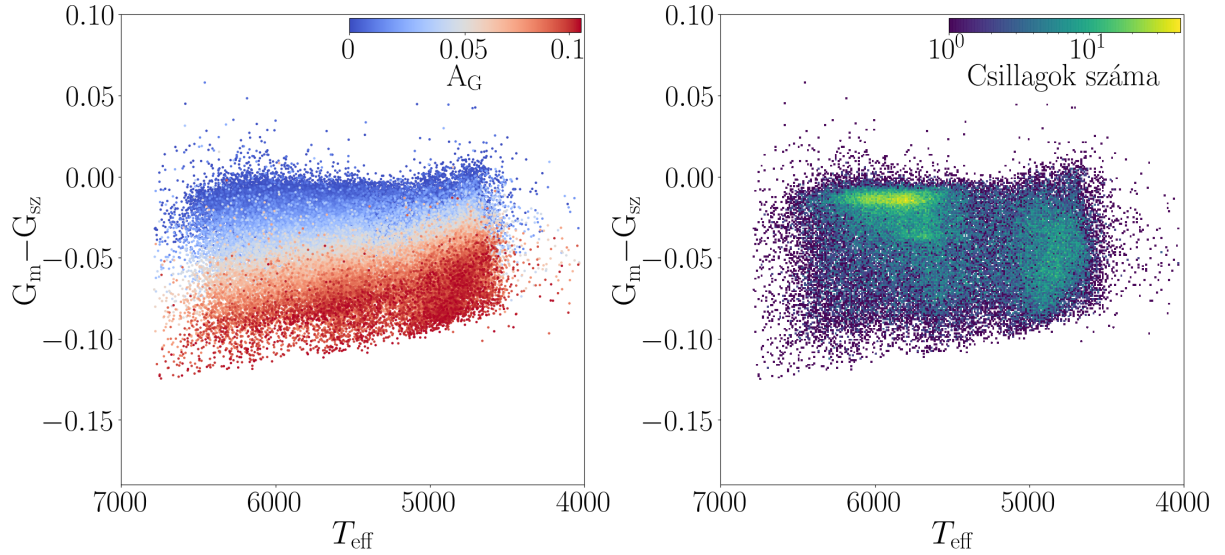


7. ábra. A 2MASS égboltfelmérő program során mért $J-K$ szín és az általam interpolációval kiszámolt szintetikus $J-K$ szín különbsége az effektív hőmérséklet függvényében. A baloldali ábrán a színskala az A_G extinkció értékeket szemlélteti annak érdekében, hogy vizsgálni tudjuk, hogy az eltérés hogyan függ az extinkciótól.

A színek közti különbségeket az effektív hőmérséklet függvényében vizsgálva nem kellene, hogy jelentős eltérést eredményezzen az extinkció, ugyanis a két magnitúdó egymásból való kivonásakor az kiesik az egyenletből. Az ábráim alapján a Gaia BP–RP és a 2MASS $J-K$ színek esetében is azt mondhatjuk el, hogy nem látszódik olyan tendencia, amely a nagyobb vörösödésű csillagok esetében egyre nagyobb eltérést mutatna. Az extinkció csak az abszolút magnitúdók esetében fellépő eltérés vizsgálatakor mutat közvetlen összefüggést az interpolációval előállított értékek pontosságában. Ezt szemlélteti a Gaia G szűrőjére a 8. ábra.

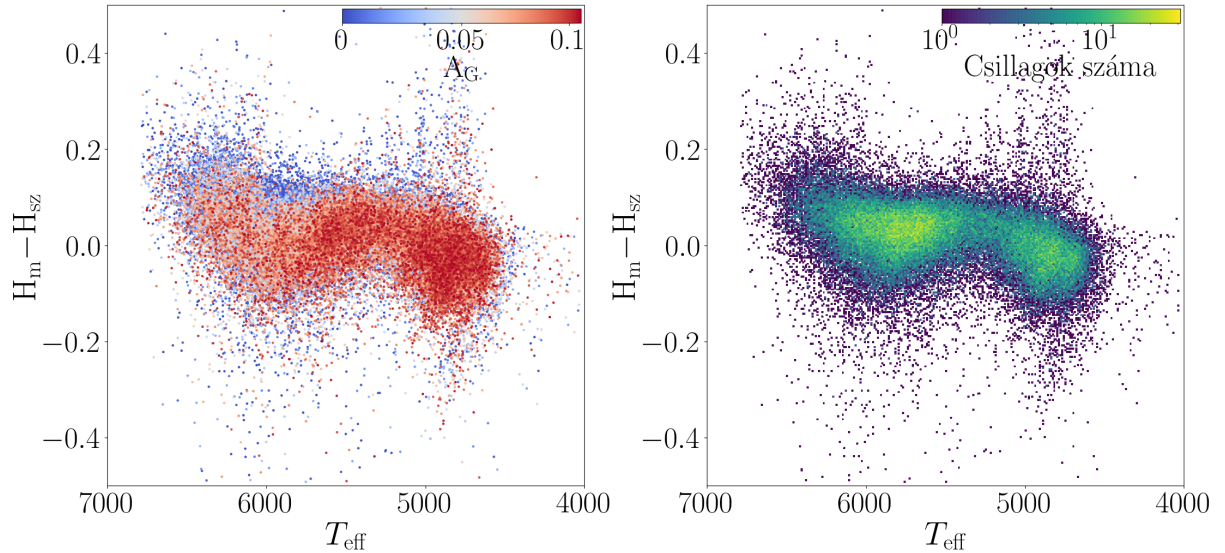
A bal oldali, extinkció szerint színezett ábrán ebben az esetben egyértelműen az figyelhető meg, hogy nagyobb A_G érték nagyobb magnitúdók közti különbséget eredményez. Ez azzal magyarázható, hogy a G és H magnitúdók esetében benne marad a szintetikus magnitúdók értékében az a hiba, amit az okoz, hogy A_V helyett A_G extinkciókkal dolgoztam, viszont az általam felhasznált BOSZ spektrális adatbázisban az A_V értékeket használták fel a bolometrikus korrekciók meghatározásához.

Az is látszik azonban, hogy azáltal, hogy maximum 0,1-re korlátoztam az A_G értékét, maximális extinkció esetében is csak nagyjából $-0,1$ lesz a $G_m - G_{sz}$ különbség. A jobb oldali ábra alapján ezen felül az is megfigyelhető, hogy az erősebb extinkció-függés ellenére a csillagok többségére ez a különbség szintén a 0 közelében van. Az ábrázolt pontok átlagértéke ebben az esetben $-0,040$ magnitúdó, a szórása pedig $0,024$ magnitúdó. Ez azt is bizonyítja, hogy az alkalmazott szűrés megfelelő mértékű volt, ugyanis még a G mért



8. ábra. A Gaia G színszűrőjében mért és az általam a G szűrőre számolt szintetikus magnitúdók különbsége az effektív hőmérséklet függvényében. A bal oldali ábrán a szín-skála az A_G extinkció értékét szemlélteti.

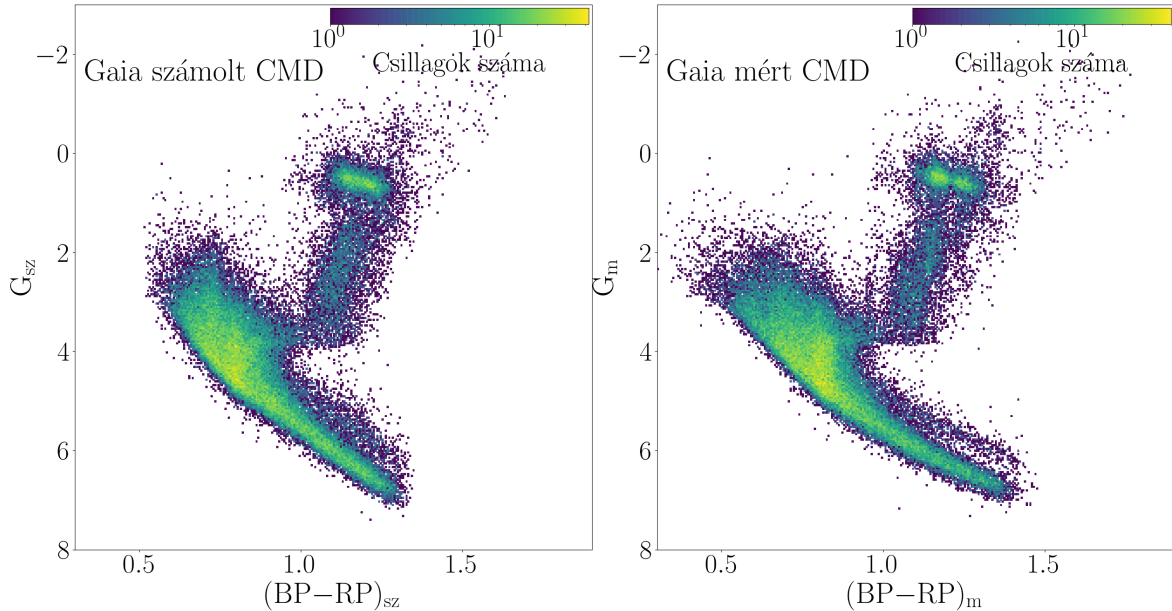
és számolt magnitúdók különbsége esetén is kis eltérés volt megfigyelhető. Ahhoz, hogy véglegesen igazoljam, hogy az általam alkalmazott módszer és a kiválasztott csillagok alkalmasak a jövőbeli égboltfelmérő programok szín-effektív hőmérséklet összefüggésének meghatározására, még szükség van arra, hogy megvizsgáljam a 2MASS esetében a mért és számolt H magnitúdók különbségét.



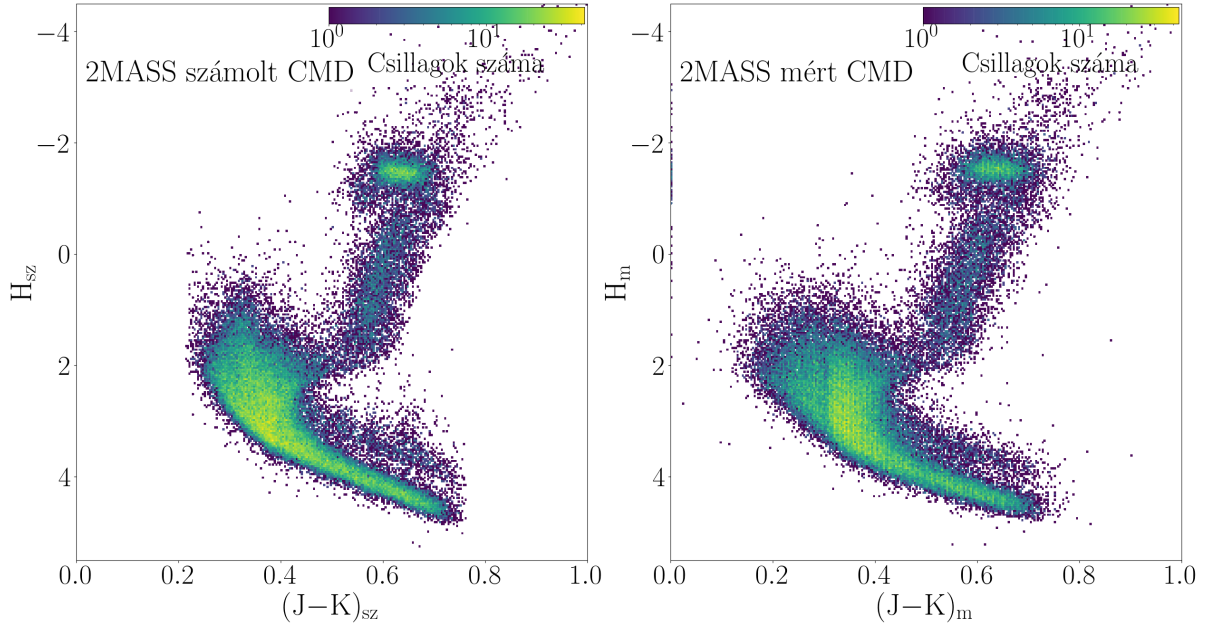
9. ábra. A 2MASS H színszűrőjében mért és az általam a H szűrőre számolt szintetikus magnitúdók különbsége az effektív hőmérséklet függvényében. A bal oldali ábrán a szín-skála az A_G extinkció értékét szemlélteti.

A 9 ábrán látható a 2MASS H színszűrőjében mért és az általam a H szűrőre számolt szintetikus magnitúdók különbsége az effektív hőmérséklet függvényében. A 2MASS H szűrője esetében azt figyeltem meg, hogy a magasabb extinkcióval rendelkező csillagoknál a mért és számolt abszolút magnitúdók nem egyértelműen eredményeznek egyre nagyobb mértékű eltérést, valamint a csillagok többsége a Gaia esetéhez hasonlóan a 0 színkülönbség körül helyezkedik el. Ennek oka az, hogy az infravörös tartományban az extinkció jóval kisebb, mint a látható tartományban. A $H_m - H_{sz}$ átlagértékére 0,018 magnitúdónak adódott, az átlag körüli szórásra pedig 0,075 magnitúdót kaptam. Mivel ebben az esetben is alacsony szórást kaptam, úgy veszem, hogy az általam előállított szintetikus magnitúdók más égboltfelmérő programok adatait is képesek modellezni.

Ebben a szűkebb paramétertartományban is megfelelő mennyiségű csillag adata áll rendelkezésemre az illesztésekhez, így a két jövőbeli égboltfelmérő program, az LSST és a Roman-űrtávcső esetében is ezeket a csillagokat fogom felhasználni a szintetikus magnitúdók előállításához. Előtte azonban ábrázoltam, hogy ezekkel a szűrt csillagokkal a Gaia és a 2MASS szín-fényesség diagramjai hogyan viszonyulnak a mérések után kapott diagramokhoz. Abból kifolyólag, hogy az általam a Gaia és a 2MASS esetére előállított szintetikus magnitúdók jellemzően nagyon közel voltak a mérési eredményekhez, azt vártam, hogy a két program szintetikus szín-fényesség diagramja is nagyon hasonló lesz a mérésekből származó diagramhoz. A két égboltfelmérő program szín-fényesség diagramja a 10. és 11. ábrákon látható.



10. ábra. A Gaia égboltfelmérő program szín-fényesség diagramja (CMD). A program során mért BP–RP szín és G magnitúdó a kiválasztott mintára, valamint ezek reprodukálása az általam alkalmazott interpolációs módszerrel.



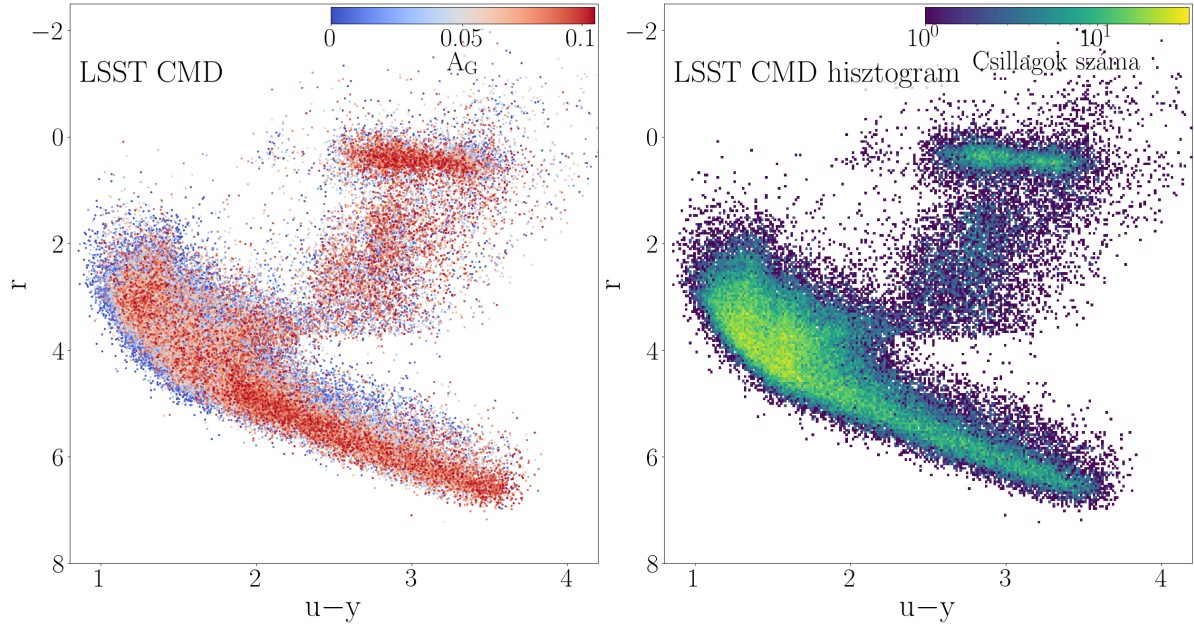
11. ábra. A 2MASS égboltfelmérő program szín-fényesség diagramja (CMD). A program során mért $J-K$ szín és H magnitúdó a kiválasztott mintára, valamint ezek reprodukálása az általam alkalmazott interpolációs módszerrel.

Mindkét esetben azt mondhatjuk el, hogy a mért és számolt szín-fényesség diagramok nagyon jó egyezést mutatnak egymással. A Gaia esetében a főszorozat és a vörös óriás ág is nagyon hasonló mindkét esetben, viszont a 2MASS megfigyelt CMD-jén a főszorozaton erős csíkozódás látható a jobboldali diagramon. Ezt a 2MASS mérései során történt fotometriai hiba okozhatja, melynek mértéke a több század magnitúdót is elérheti. Megállapítottam továbbá azt is, hogy a 2MASS számolt diagramon a szórás mindenhol kisebb, mint a mért adatok felhasználása esetében.

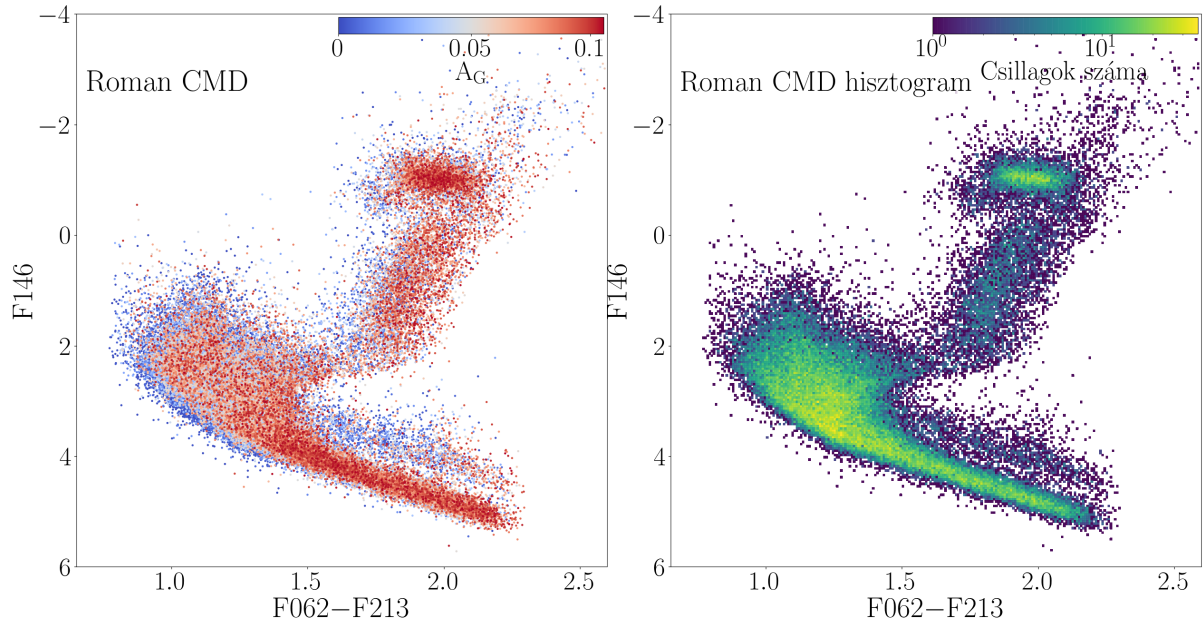
5.2. LSST és Roman szín-fényesség diagramok bemutatása

A Gaia és a 2MASS programokhoz hasonlóan az LSST és a Roman-űrtávcső esetében is kiválasztottam három színszűrőt, melyek közül kettő a távcső által lefedett hullámhossztartomány két szélén, a harmadik pedig a tartomány közepén helyezkedik el. Az LSST esetében az u , r és y , a Roman-űrtávcső esetében az F062, F143 és az F213 szűrők segítségével rajzoltam fel a szín-fényesség diagramokat. Ebben az esetben is a megszűrte, 67664 csillagból álló adatbázist használtam fel, és ezen objektumokra végeztem el az interpolációt a megfelelő szűrőkben.

A 12. és a 13. ábrák tartalmazzák az ábrázolt szintetikus szín-fényesség diagramokat. A szín-fényesség diagram jellegzetes ágai szépen kirajzolódnak mindkét esetben.



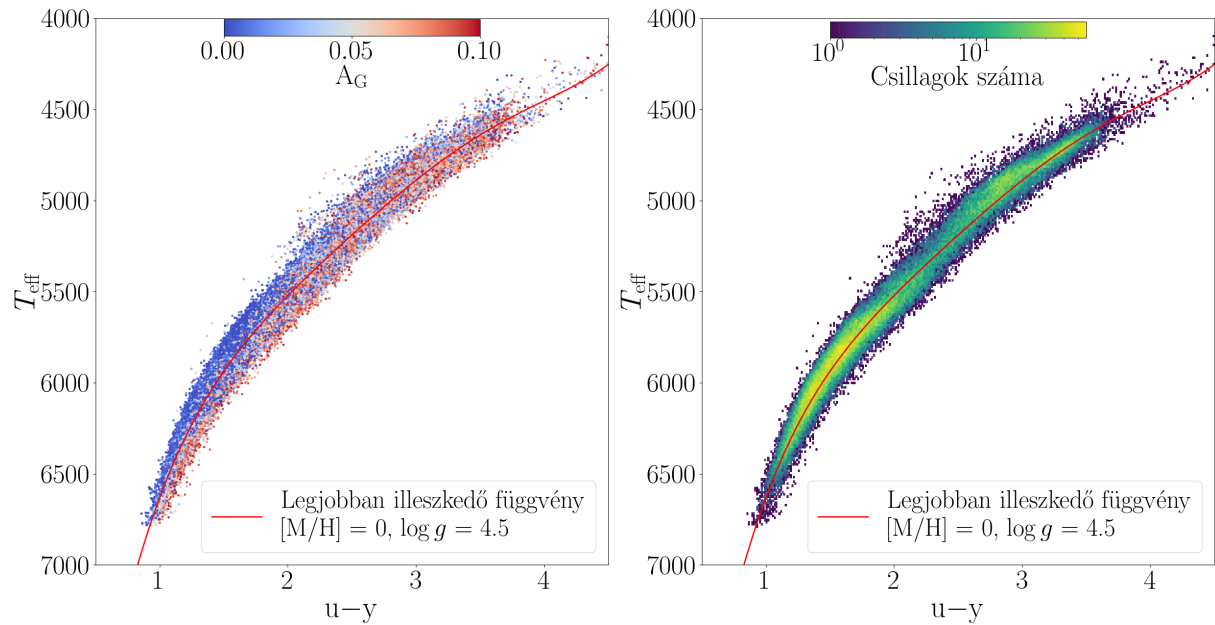
12. ábra. Az LSST jövőbeli égboltfelmérő program szintetikus szín-fényesség diagramja. A vízszintes tengelyen az $u-y$ szín, a függőleges tengelyen pedig az r abszolút magnitúdó van ábrázolva.



13. ábra. Az Roman-űrtávcső szintetikus szín-fényesség diagramja. A vízszintes tengelyen az $F062-F213$ szín, a függőleges tengelyen pedig az $F143$ abszolút magnitúdó van ábrázolva.

5.3. LSST szín és effektív hőmérséklet közti összefüggésének illesztése

Annak érdekében, hogy az effektív hőmérséklet és a szín közötti összefüggést pontosan meghatározzam, különböző típusú polinomokat illesztettem az adatokra. Az egyszerű elsőfokú, csak színtől függő polinomtól fokozatosan haladtam egyre magasabb fokú tagok felé. Azt tapasztaltam, hogy a tisztán a színtől függő tagnak legfeljebb harmadfokúnak érdemes lennie. A függvényekhez hozzáadtam vegyes tagokat is, amelyek a fémességtől ($[M/H]$) és/vagy a felszíni gyorsulástól függenek, majd vegyes magasabb rendű tagokat. Ezt addig folytattam, amíg azt nem tapasztaltam, hogy újabb tagok hozzáadásával már nem lesz jelentősen pontosabb az illesztés. A legpontosabb illeszkedést adó függvény a 14. ábrán látható. Az $[M/H]$ és $\log g$ értékeket 0-ra és 4,5-re rögzítettem annak érdekében, hogy két dimenzióban tudjam ábrázolni az eredményeimet.



14. ábra. Az LSST szín és effektív hőmérséklet közti összefüggését szemléltető ábra. A grafikonon ábrázoltam a két paraméter közti összefüggés illesztésekor legjobban illeszkedő függvény görbéjét. A bal oldali ábrán a színskála az A_G extinkció értékét jellemzi az egyes csillagokra.

A legjobban illeszkedő függvény egyenlete a következő alakot ölti:

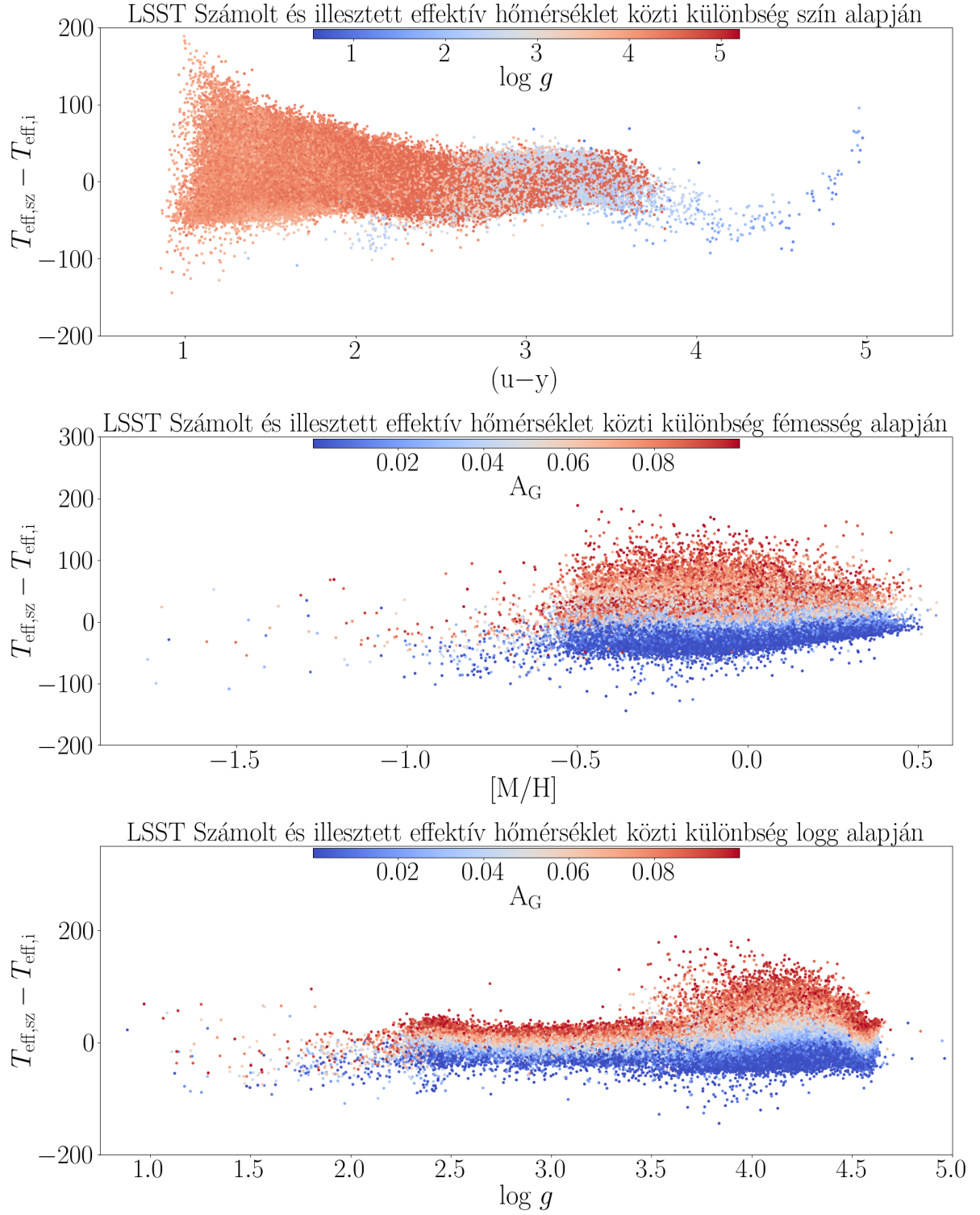
$$\begin{aligned}
T_{\text{eff}} = & a_0 + a_1 \cdot (u-y) + a_2 \cdot (u-y)^2 + a_3 \cdot (u-y)^3 + a_4 \cdot [M/H]^2 \\
& + a_5 \cdot [M/H] + a_6 \cdot \log(g)^2 + a_7 \cdot \log(g) + a_8 \cdot [M/H] \cdot \log(g) \\
& + a_9 \cdot [M/H] \cdot (u-y) + a_{10} \cdot \log(g) \cdot (u-y) \\
& + a_{11} \cdot \log(g) \cdot (u-y)^2 + a_{12} \cdot \log(g) \cdot (u-y)^3 \\
& + a_{13} \cdot \log(g) \cdot (u-y)^4 + a_{14} \cdot \log(g) \cdot (u-y)^5,
\end{aligned} \tag{2}$$

ahol az a_i szorzó tényezők az adott égboltfelmérő programra – jelen esetben az LSST-re – jellemző konstansok. Ezek illesztéssel meghatározott értékeit a 4. táblázat tartalmazza.

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
10062,51	-3423,27	789,24	-67,26	69,17	455,55	17,92	86,25
a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	
-17,11	-24,13	-940,44	917,83	-368,88	66,84	-4,54	

4. táblázat. Az illesztett modell konstansai az LSST szín és effektív hőmérséklet közti összefüggést meghatározó egyenletben.

A konstansok értéke is segített a megfelelő modellfüggvény kiválasztásában, ugyanis ha azt tapasztaltam, hogy az újonnan hozzáadott taghoz tartozó konstans abszolút értéke nagyon kicsi a többi konstanshoz képest, akkor arra következtettem, hogy ez nem járul hozzá jelentősen az effektív hőmérséklet értékéhez, azaz felesleges az a tag, így kivettem azt az egyenletből. Ezekkel az illesztett konstansokkal az összefüggés képes egyszerű módon becslést adni az LSST által észlelt csillagok effektív hőmérsékletére a mért $u-y$ szín alapján, ha az $u-y$ 1 és 3,75 között van. Ha a csillagok fémtartalmát és felszíni nehézségi gyorsulását meg tudjuk becsülni spektroszkópai vagy fotometriai mérésekből, akkor az összefüggést sikeresen tudjuk alkalmazni. Annak érdekében, hogy szemléltethessem az illesztés pontosságát és a pontosság függését az egyenletben lévő mennyiségektől, ábrázoltam az interpolációból számolt, és az illesztésből kapott összefüggésbe való behelyettesítés által kapott effektív hőmérsékletek különbségét a szín, a fémesség és a felszíni gravitáció függvényében. Ez a 15. ábrán látható. A felső ábrán a felszíni gravitáció szerint, a másik két ábrán az extinkció szerint vannak színezve az adatpontok. Ezt az ábrát felhasználtam a megfelelő modellfüggvény kiválasztásakor is, ugyanis ennek segítségével tudtam figyelni, hogy melyik paraméter függvényében lép fel nagyobb eltérés. Ha újabb tag hozzáadásával a számolt és illesztett hőmérséklet közötti különbség nem változott jelentősen, akkor azt a tagot feleslegesnek tartottam és nem adtam hozzá a végső egyenlethez. Így tudtam elérni azt az illesztési pontosságot, ami az ábrán is látható, ahol egyik paraméter függvényében sem tapasztalhatunk kiugró növekedést a két effektív hőmérséklet közti különbségben.



15. ábra. Az interpolált, valamint a legjobban illeszkedő függvényből számolt effektív hőmérséklet értékek különbsége a szín, a fémesség, valamint a $\log g$ függvényében ábrázolva az LSST égboltfelmérő program esetére. Az felső ábrán a színskála a $\log g$, a középső és az alsó ábrán az A_G extinkció értékének az illesztés pontosságára kifejtett hatását szemlélteti.

Az eltérés $\log g$ -től való függésének csökkentésének érdekében be kellett vezetnem magas rendű vegyes tagokat, ahol a $\log g$ az első, az $u-y$ pedig magasabb rendű hatványokkal is szerepel. Ezek alkalmazásával viszont jelentősen csökkent a $\log g$ okozta eltérés az effektív hőmérsékletekben.

Az is látszik, hogy esetenként 100–150 K eltérés is megfigyelhető az illesztett és az interpolációból számolt effektív hőmérsékletek között, azonban a hőmérséklet-különbségek szórása 29,39 K-nek adódott. Ez nem jelent problémát, ugyanis ezek az értékek már az APOGEE által meghatározott effektív hőmérsékletek hibájának (50–150 K) a nagyságrendjébe esnek (Jönsson et al. 2020), vagyis ennél sokkal pontosabb illeszkedést elérni az eredeti adatok hibája miatt nem lehetséges. Kijelenthetem tehát, hogy találtam egy összefüggést, amely megfelelő pontossággal leírja, hogyan függ az effektív hőmérséklet a színtől, a fémességtől és a felszíni gravitációtól.

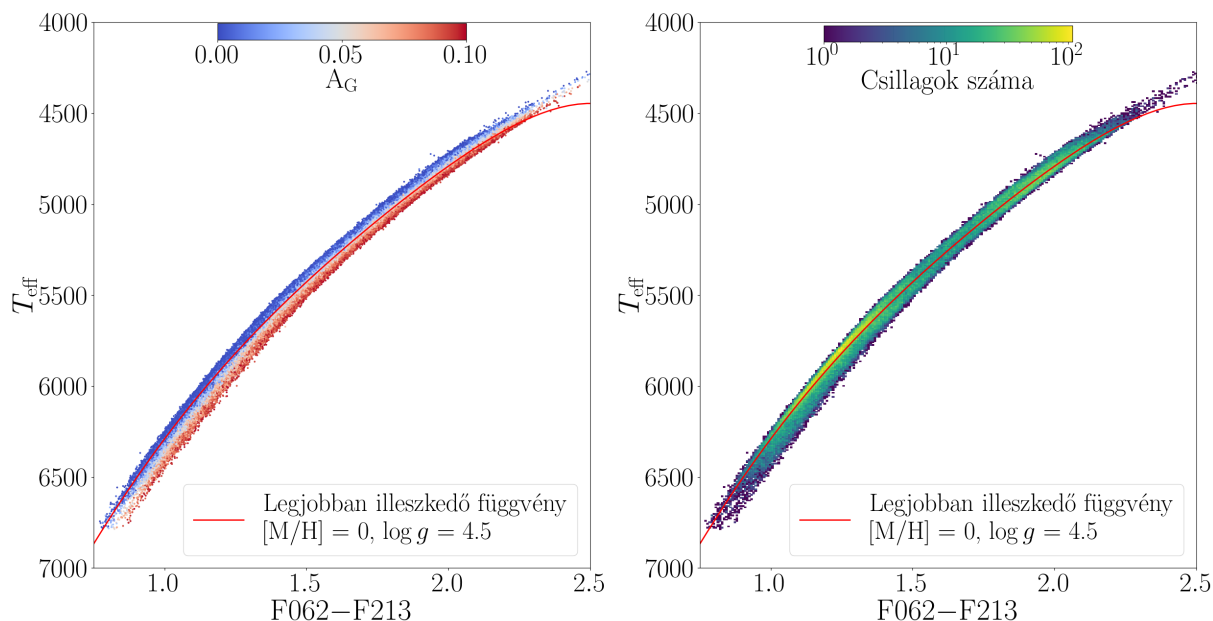
5.4. A Roman-űrtávcső szín és effektív hőmérséklet közti összefüggésének illesztése

Az előző alfejezetben leírtakhoz nagyon hasonlóan elvégeztem a színindex és az effektív hőmérséklet közti korreláció meghatározását a Roman-űrtávcső jövőbeli adataira is. A Roman esetében is megvizsgáltam ugyanazokat a lehetséges modellfüggvényeket, és itt is az a függvény bizonyult legalkalmasabbnak az interpolációból számolt adatok illesztésére, amelyet az LSST esetében is leírtam.

A 16. ábrán látható a Roman-űrtávcső által alkalmazott F062–F213 színindex függvényében az effektív hőmérséklet. Az ábrán feltüntettem az illesztésből kapott legjobban illeszkedő függvényt is, amely képes leírni a két mennyiség közötti korrelációt. Vizuálisan is megfigyelhető, hogy az illesztett görbe jól illeszkedik az interpolált adatpontokra. Az (3) egyenlet az illesztésből meghatározott összefüggés a Roman-űrtávcső F062–F213 színindexe és az effektív hőmérséklet között. Befolyásolja a korrelációt a fémesség és a felszíni gravitáció is, így ezek is megjelennek az egyenletben.

$$\begin{aligned}
T_{\text{eff}} = & a_0 + a_1 \cdot (\text{F062} - \text{F213}) + a_2 \cdot (\text{F062} - \text{F213})^2 + a_3 \cdot (\text{F062} - \text{F213})^3 \\
& + a_4 \cdot [\text{M}/\text{H}]^2 + a_5 \cdot [\text{M}/\text{H}] + a_6 \cdot \log(g)^2 + a_7 \cdot \log(g) + a_8 \cdot [\text{M}/\text{H}] \cdot \log(g) \\
& + a_9 \cdot [\text{M}/\text{H}] \cdot (\text{F062} - \text{F213}) + a_{10} \cdot \log(g) \cdot (\text{F062} - \text{F213}) \\
& + a_{11} \cdot \log(g) \cdot (\text{F062} - \text{F213})^2 + a_{12} \cdot \log(g) \cdot (\text{F062} - \text{F213})^3 \\
& + a_{13} \cdot \log(g) \cdot (\text{F062} - \text{F213})^4 + a_{14} \cdot \log(g) \cdot (\text{F062} - \text{F213})^5
\end{aligned} \tag{3}$$

Az egyenletben szereplő konstansokat az illesztés során határoztam meg, azok értékét a 5. táblázat tartalmazza. Ebben az esetben is szükség van az összes tagra az egyenletben, ugyanis az illesztési konstansok közül egyik sem lett nagyon kicsi, amikor az LSST

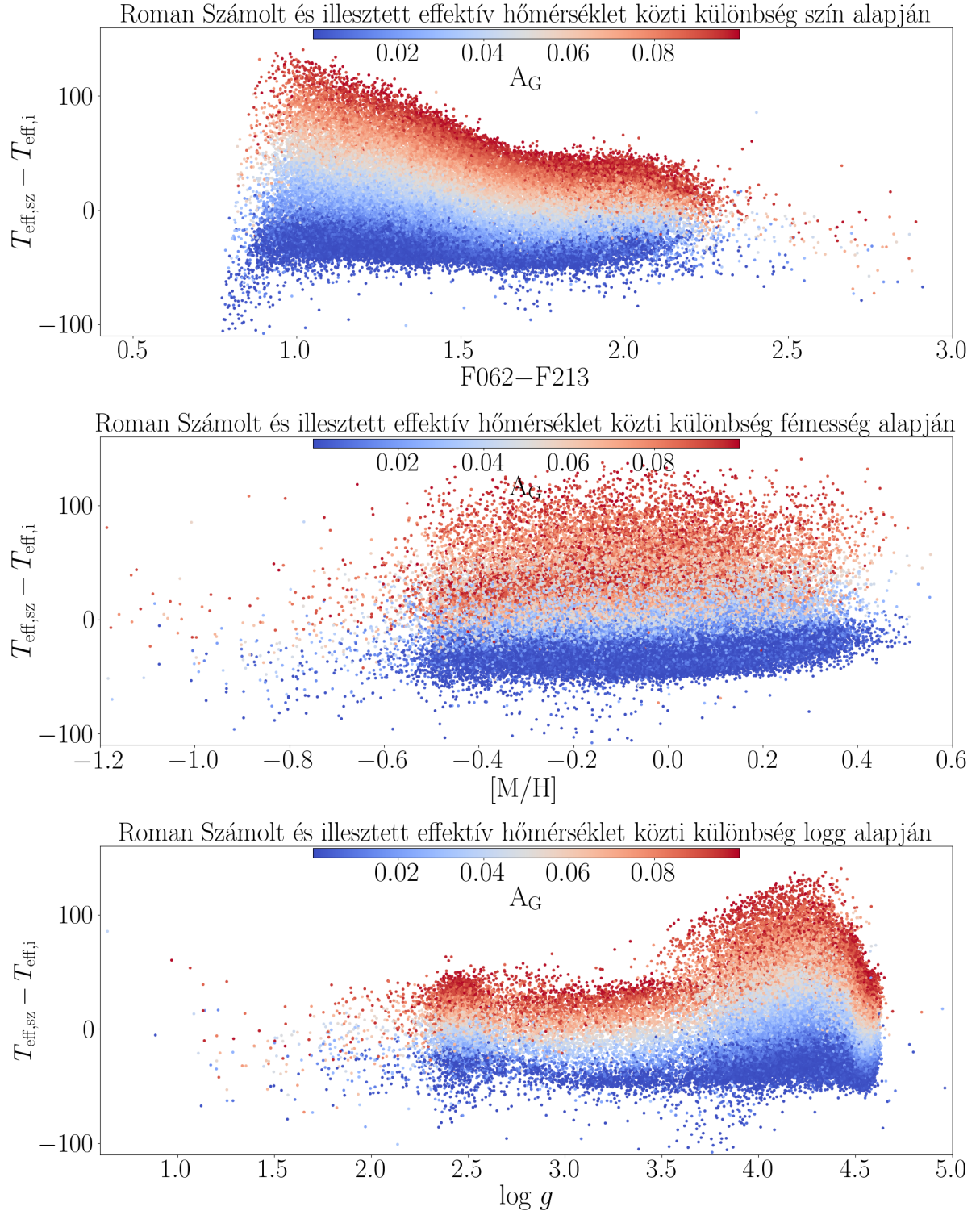


16. ábra. A Roman-űrtávcső szín és effektív hőmérséklet közti összefüggését szemléltető ábra. A grafikonon ábrázoltam a két paraméter közti összefüggés illesztésekor legjobban illeszkedő függvény görbáját. A bal oldali ábrán a színskála az A_G extinkció értékét jellemzi az egyes csillagokra.

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
10286,29	-6270,33	2384,12	-350,57	-38,31	-442,36	-21,59	-163,86
a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	
45,87	106,13	740,87	-784,82	533,63	-207,69	32,57	

5. táblázat. Az illesztett modell konstansai a Roman szín és effektív hőmérséklet közti összefüggést meghatározó egyenletben.

helyett a Roman adatait illesztettem. A konstansokon kívül itt is figyeltem a 17. ábra viselkedését, amely azt szemlélteti, hogy az illesztett és az APOGEE által meghatározott, adott színhez, fémességhez és felszíni gravitáció értékhez tartozó effektív hőmérsékletek különbsége hogyan változik a különböző paraméterek függvényében. Az ábrán látható, hogy egyik paraméter függvényében sem változik jelentősen a két érték közti különbség. Az extinkció szerinti színezés miatt azonban az figyelhető meg, hogy a közel 0 A_G értékkel rendelkező csillagokra az illesztésből kapott effektív hőmérséklet nagyobb lesz, mint az interpolációból származó. Ez azonban nem bír fizikai jelentéssel, pusztán csak arról van szó, hogy az illesztéskor a csillagok extinkciója 0 és 0,1 között változik, így a két szélsőérték között helyezkedik el nagyjából az illesztett függvény is. Ez a 16. ábrán is látszódik, hogy az adatpontokból álló sáv közepénél halad az illesztett görbe, és a görbe alatt a kék, a görbe felett a piros pontok helyezkednek el.



17. ábra. Az interpolált, valamint a legjobban illeszkedő függvényből számolt effektív hőmérséklet értékek különbsége a szín, a fémesség, valamint a $\log g$ függvényében ábrázolva a Roman-űrtávcső esetében. Az első ábrán a színskála a $\log g$, a második és harmadik ábrán az A_G extinkció értékének az illesztés pontosságára kifejtett hatását szemlélteti.

Ezen az ábrán is látszódik, hogy az effektív hőmérsékletek szórása az APOGEE által mért effektív hőmérsékletek hibájához hasonló nagyságú, pontosan 33,70 K, emiatt úgy veszem, hogy elértem a bemeneti adatok által megengedett maximális pontosságot az illesztésnél. Ezzel az általam illesztett függvénnyel a jövőben a Roman-űrtávcső által észlelt csillagokra egyszerűen meg lehet határozni a csillagok egyik legfontosabb paraméterét, az effektív hőmérsékletet, ha tudunk becslést adni a fémességre és a felszíni gravitációra, valamint hogyha az adott csillagra az F062 – F213 szín 1 és 2,5 közötti értéknek adódott a mérés során.

6. Összefoglalás

A dolgozatom keretében a Gaia és az APOGEE által közösen észlelt csillagok esetére végeztem el a Gaia, a 2MASS, az LSST és a Roman-űrtávcső színszűrőire szintetikus magnitúdók meghatározását, a James Webb űrtávcső fluxuskalibrációjához kifejlesztett BOSZ elméleti színeképadatbázis segítségével. A Gaia és a 2MASS égboltfelmérő programokat arra használtam, hogy az általam alkalmazott módszert ellenőrizsem és megvizsgáljam, hogy képesek-e az interpolációból származó szintetikus adatok kellő pontossággal reprodukálni a mérésekből származó BP, G, RP, J, H és K magnitúdókat. Arra jutottam, hogy különböző kritériumok szerint szűrni kell a csillagokat, valamint az A_G extinkció értékét 0,1-ben maximalizáltam. Miután megbizonyosodtam arról, hogy mindkét program esetén kellő pontossággal visszakaptam a mérési eredményeket minden szín és abszolút magnitúdó esetében, arra következtettem, hogy a módszer alkalmazható az LSST és a Roman-űrtávcső szintetikus magnitúdóinak előállítására is.

Az LSST és a Roman-űrtávcső olyan nagyszabású égboltfelmérő programok, amelyek nagyban hozzájárulnak majd a galaxisunk és az univerzum megértéséhez. A munkám során fő célom az volt, hogy a két jövőbeli égboltfelmérő program kiválasztott színindexei és az effektív hőmérséklet között pontos korrelációt találjak. Egy ilyen összefüggés segítségével ha egyszerű becslést adunk a metallicitásra és a felszíni gravitációra, pusztán a színindexből könnyedén kiszámolható több milliárd csillag effektív hőmérséklete, amely a csillagok egyik legalapvetőbb paramétere. A szintetikus magnitúdókat a Python-ba beépített RBF interpolációval végeztem el a BOSZ spektrális adatbázis segítségével. Ezzel a módszerrel kiszámoltam az LSST és a Roman-űrtávcső szintetikus szín és abszolút magnitúdó értékeket, majd pedig különböző típusú modellfüggvényeket illesztettem az adott színindexhez tartozó effektív hőmérséklet értékekre. Mivel a csillagok fémessége és a felszíni gravitációja is hatással van az effektív hőmérsékletre, ezeket a mennyiségeket is hozzáadtam a modellfüggvényhez. Sok lehetséges függvény próbaillesztése után arra jutottam, hogy a (2) és (3) egyenletek képesek legpontosabban leírni a két mennyiség közti korrelációt. Az illesztett egyenletből számolt és az APOGEE által mért effektív hőmérsékletek különbségének a szórása az APOGEE hőmérsékletek hibájának határán belül van, így kijelenthető, hogy kellő pontossággal sikerült elvégezni az illesztést az adatpontokra. Az általam meghatározott két összefüggéssel a jövőben az LSST és a Roman-űrtávcső által észlelt csillagok $u-y$ és F062–F213 színindexeiből több milliárd csillag effektív hőmérséklete egyszerű behelyettesítéssel meghatározható.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani a témavezetőmnek, Dr. Mészáros Szabolcsnak, akinek a segítőkészsége, támogatása és iránymutatása nélkül nem készülhetett volna el a dolgozatom. köszönettel tartozom az MTA-ELTE Lendület Tejútrendszer Kutatócsoport tagjainak, ugyanis az általam feldolgozott témát a kutatócsoport támogatta. Köszönöm továbbá Derekas Aliznak, Cseh Borbálának, Dr. Szalai Tamásnak, Halmai Dávidnak és mindenki másnak, aki a segítségével hozzájárult a dolgozatom elkészítéséhez.

Nyilatkozat

Alulírott Karsai Endre Zsombor Fizikus MSc szakos hallgató a *Csillagok effektív hőmérséklete és színindexe közötti összefüggés modellezése az LSST és Roman Űrtávcső korában* 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.

Szeged, 2024.11.15.

Karsai Endre Zsombor
Fizikus MSc, I. évfolyam

Hivatkozások

- Abdurro'uf, Accetta, K., Aerts, C., et al. 2022, , 259, 35
- Berger, T. A., Huber, D., van Sadlers, J. L., et al. 2020, , 159, 280
- Blackwell, D. E., Petford, A. D., & Shallis, M. J. 1980, , 82, 249
- Blackwell, D. E. & Shallis, M. J. 1977, , 180, 177
- Blackwell, D. E., Shallis, M. J., & Selby, M. J. 1979, , 188, 847
- Blanton, M. R., Bershady, M. A., Abolfathi, B., et al. 2017, , 154, 28
- Bohlin, R. C., Mészáros, S., Fleming, S. W., et al. 2017, , 153, 234
- Casagrande, L., Lin, J., Rains, A. D., et al. 2021, , 507, 2684
- Casagrande, L., Portinari, L., & Flynn, C. 2006, , 373, 13
- Casagrande, L., Ramírez, I., Meléndez, J., Bessell, M., & Asplund, M. 2010, , 512, A54
- Code, A. D., Davis, J., Bless, R. C., & Brown, R. H. 1976, , 203, 417
- Eisenstein, D. J., Weinberg, D. H., Agol, E., et al. 2011, , 142, 72
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2021, , 649, A1
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., et al. 2023, , 674, A1
- García Pérez, A. E., Allende Prieto, C., Holtzman, J. A., et al. 2016, , 151, 144
- González Hernández, J. I. & Bonifacio, P. 2009, , 497, 497
- González Hernández, J. I. & Bonifacio, P. 2009, AA, 497, 497
- Hubeny, I., Allende Prieto, C., Osorio, Y., & Lanz, T. 2021, arXiv e-prints, arXiv:2104.02829
- Ivezić, Ž., Kahn, S. M., Tyson, J. A., et al. 2019, , 873, 111
- Jönsson, H., Holtzman, J. A., Allende Prieto, C., et al. 2020, , 160, 120
- Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., et al. 2017, , 154, 94
- Mészáros, S., Allende Prieto, C., Edvardsson, B., et al. 2012, , 144, 120
- Mészáros, S., Bohlin, R., Allende Prieto, C., et al. 2024, , 688, A197

Serenelli, A., Johnson, J., Huber, D., et al. 2017, , 233, 23

Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. 2006, , 131, 1163

Spergel, D., Gehrels, N., Breckinridge, J., et al. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1305.5422

Saját eredmények

- A dolgozatom célja az volt, hogy két nagy jövőbeli égboltfelmérő program, az LSST és a Roman-űrtávcső esetére kettő, a jövőben általuk alkalmazott szűrőn keresztül mért magnitúdóból könnyedén meghatározható legyen a csillagok effektív hőmérséklete, amely a csillagászat kulcsfontosságú paramétere és nehezen meghatározható.
- Az effektív hőmérséklet és a szín közötti összefüggések meghatározásához az APOGEE spektroszkópiai égboltfelmérő program által mért effektív hőmérsékleteket használtam fel. Az LSST és a Roman-űrtávcső esetében a mérési eredmények hiánya miatt a BOSZ spektrális adatbázisból számolt elméleti színeket használtam.
- Ezeket a magnitúdóértékeket Python felhasználásával RBF interpolációval meghatároztam az APOGEE és a Gaia által közösen észlelt csillagok egy részére. A dolgozatban leírtak alapján a szükséges szűréseket elvégeztem az adatsoron, és az így kapott 67664 csillag APOGEE program által meghatározott atmoszferikus paramétereit használtam fel az interpolációhoz.
- Az interpoláció első lépéseként sikeresen reprodukáltam a Gaia és a 2MASS égboltfelmérő program által mért magnitúdó értékeket, így egy olyan módszert kaptam, amellyel ezeknek a csillagoknak bármelyik jövőbeli égboltfelmérő program szűrőiben mért szintetikus magnitúdó értékeit elő tudom állítani.
- Ettől kezdve rendelkezésemre álltak a szintetikus szín és az APOGEE effektív hőmérsékletek és elkezdhettem a két paraméter közti korrelációnak a meghatározását. Ezt illesztéssel végeztem el figyelembe véve azt, hogy az effektív hőmérséklet értékét a felszíni gravitáció és a fémesség is befolyásolja.
- Pythonban az illesztéseket különböző próbafüggvényekkel végeztem, amelyek a felszíni gravitációtól, a fémességtől és a színtől függő tagokat tartalmaztak a dolgozatban leírtak szerint. A megfelelő függvény kiválasztásakor figyeltem, hogy a három paraméter hogyan befolyásolja az illesztett és az APOGEE hőmérséklet különbségét.
- Az LSST és a Roman-űrtávcső esetére is sikeresen elvégeztem az illesztéseket és két olyan összefüggéshez jutottam, amellyel a jövőben ezen két égboltfelmérő program mért szín értékeiből könnyen és gyorsan effektív hőmérsékletet lehessen számolni, ha ismerjük valahonnan a felszíni gravitációt és a fémességet.