

# Porral takarva: dudor vidéki gömbhalmazok szín-fényesség diagramjai

Országos Tudományos Diákköri Dolgozat

**Kalup Csilla**

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Csillagász MSc



Témavezetők:

**Molnár László, PhD**

tudományos munkatárs

CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

**Szabó M. Gyula, DSc**

MTA doktora, kutatóprofesszor

ELTE GAO MKK

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

Csillagászati Tanszék

Budapest, 2022

# Tartalomjegyzék

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Bevezetés</b>                                                   | <b>2</b>  |
| 1.1. Gömbhalmazok és RR Lyrae csillagok . . . . .                     | 2         |
| 1.2. Motiváció és célkitűzés . . . . .                                | 7         |
| 1.3. A <i>Gaia</i> és az EDR3 katalógus . . . . .                     | 8         |
| 1.3.1. A „korrigált szintöbbslet” faktor . . . . .                    | 11        |
| 1.3.2. Túlbecsült $G_{BP}$ fluxus halvány, vörös forrásokra . . . . . | 16        |
| 1.4. Poreloszlás a Tejútrendszerben . . . . .                         | 17        |
| <b>2. Szín-fényesség diagramok</b>                                    | <b>20</b> |
| 2.1. Halmaztagság vizsgálat . . . . .                                 | 21        |
| 2.2. Vágás $G_{BP}$ alapján . . . . .                                 | 24        |
| 2.3. Színtérképek . . . . .                                           | 26        |
| 2.4. Vágás a korrigált szintöbbslet faktor alapján . . . . .          | 29        |
| <b>3. Relatív színtérképek</b>                                        | <b>35</b> |
| <b>4. Összehasonlítás</b>                                             | <b>38</b> |
| 4.1. Extinkció térképekkel . . . . .                                  | 38        |
| 4.2. Asztrofotókkal . . . . .                                         | 39        |
| 4.3. Szakirodalmi vizsgálatokkal . . . . .                            | 41        |
| <b>5. Összefoglalás</b>                                               | <b>43</b> |
| <b>6. Köszönetnyilvánítás</b>                                         | <b>45</b> |
| <b>Irodalomjegyzék</b>                                                | <b>48</b> |

# Kivonat

A *Kepler* űrtávcső K2 missziója során számos gömbhalmazról készített méréseket, melyek többségének analízisét még senki nem végezte el, mivel ez speciális eljárásokat igényel. Az egyik előző OTDK munkám során a C15-ös kampányban mért NGC5897 gömbhalmaz részletes analízisével foglalkoztam, míg a 2021/22 tanévben a C11-es gömbhalmazok vizsgálatával foglalkozom. A C11-es kampány során a *Kepler* a központi dudor irányába végzett méréseket, ami miatt két fő nehézséggel találkozhatjuk szembe magunkat: a nagy csillagsűrűséggel, valamint a centrum környéki jelentős, és fraktálszerűen szerteágazó porfelhőkkel. A csillagsűrűség miatt a legtöbb adatredukáló pipeline nem működik megfelelően, és az asztrometriai bekötést részben manuálisan kell elvégezni, a halmazok elé inhomogén módon benyúló por-filamentek pedig csillagközi vörösödést okoznak, ráadásul nem egységesen minden csillagra, hanem a halmaz különböző pontjain lévő csillagoknál különböző mértékben.

A jelen dolgozatban tárgyalt kutatási program célja a C11 során is mért M9, M19 és NGC6293 gömbhalmazok minél tisztább szín-fényesség diagramjának felrajzolása, majd ennek segítségével a halmazok előtti változó vörösödés feltérképezése. Mivel az infravörös portérképek, melyek általánosságban az extinkciós értékeket szolgáltatják a vörösödés korrigálására, nem elég nagy felbontásúak, hogy az egyes halmazok előtti néhány ívperces változásokat is lekövezzék, ezért egy alapos és homogén fotometriai felmérésre van szükségünk ezek tanulmányozásához: a *Gaia* űrobszervatóriumra, melynek segítségével korábban még senki nem végezte el ezeket a vizsgálatokat.

Munkám során a *Gaia* EDR3 katalógusát használtam, hogy létrehozzam az egyes halmazok szín-fényesség diagramjait, valamint relatív színtérképeit. Ehhez sajátmozgás alapján halmaztagság vizsgálatot végeztem, majd az EDR3 katalógusban található adatok és azok precíz felhasználásának részleteit ismertető publikációk alapján eltávolítottam a szignifikáns szisztematikus hibákat okozó adatpontokat, illetve tovább tisztítottam a halmazokról kapható szín-fényesség diagramokat. Végül a fősorozat és az óriáságak alakjának levonásával kiküszöböltem a halmaztagok fejlődési állapotából fakadó színkülönbségeket, és a kapott módosított színindexekből létrehoztam a halmazok relatív színtérképeit, amiket elsődlegesen már a por okozta vörösödés dominál.

# 1. fejezet

## Bevezetés

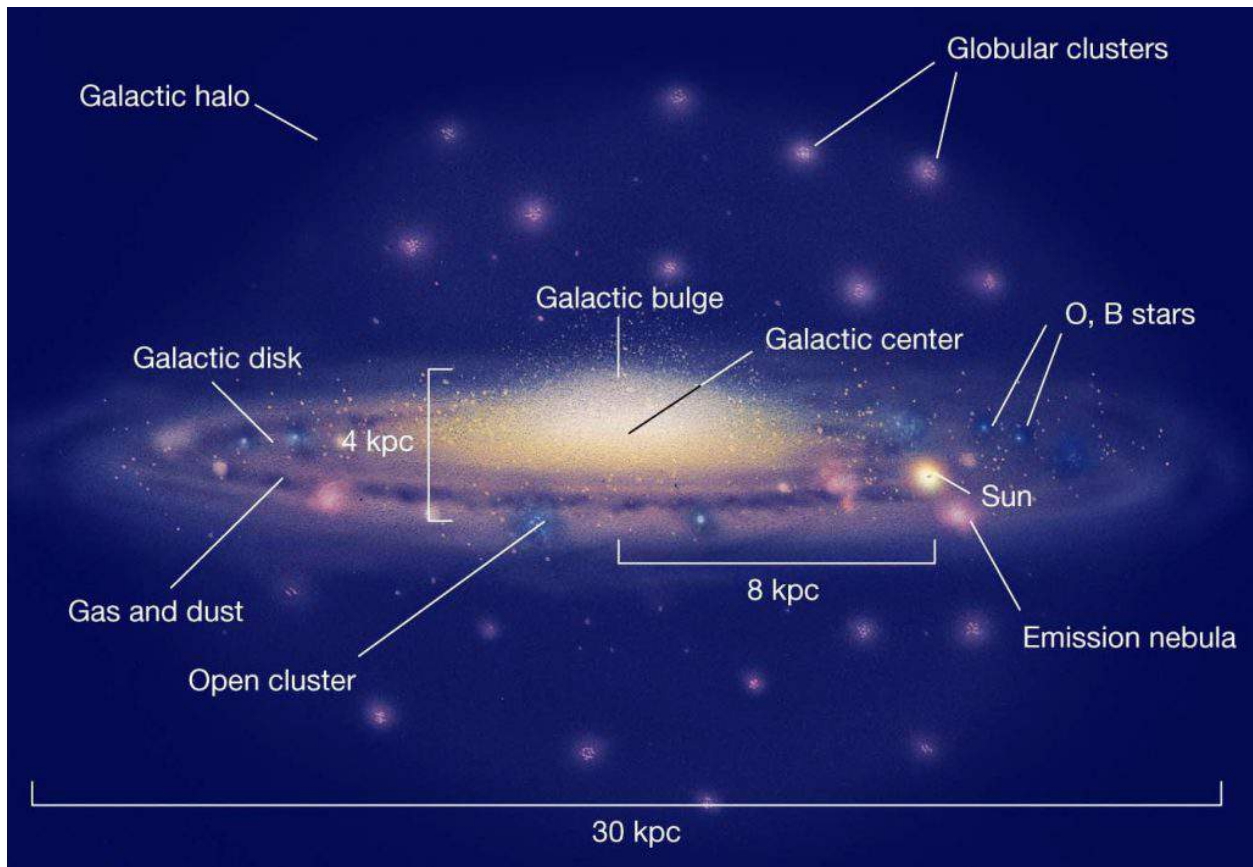
### 1.1. Gömbhalmazok és RR Lyrae csillagok

A gömbhalmazok a csillagok gravitációsan kötött, gömbszimmetrikus, központ felé sűrűsödő csoportosulásai, melyek néhány tízezertől a milliós nagyságrendig tartalmazhatnak főleg idős, fémszegény, II. populációs csillagokat. Jelenleg több, mint 150 gömbhalmazt ismerünk<sup>1</sup>, amik az 1.1. ábrához hasonló módon, a Tejútrendszer központi dudora körüli halóban helyezkednek el. A gömbhalmazok keletkezésének elmélete máig aktív kutatási terület, annyi azonban bizonyos, hogy számos olyan tulajdonságot mutatnak, melyek szorosan kapcsolódnak az anyagalaxisuk jellemzőihez. Mindezek miatt a gömbhalmazok nemcsak a csillagok fejlődését és működését, hanem a Tejútrendszer dinamikáját és evolúcióját is segítik feltárni (Beasley, 2020).

A gömbhalmazok tanulmányozásának egyik sarokköve a szín-fényesség diagram (*color-magnitude diagram*, röviden CMD), ahol a halmaz csillagainak fényességét ábrázoljuk a szín-index függvényében, erre látható egy példa az 1.2. ábrán. Mivel a halmaz tagjai gyakorlatilag azonos távolságra találhatók tőlünk, az abszolút magnitúdó helyett elengedő a látszó fényességet használni. Ahogy egy Hertzsprung-Russell diagram esetén, itt is kirajzolódnak az egyes csillagfejlődési stádiumok. Mivel a gömbhalmazok főleg idős csillagpopulációkat tartalmaznak, a csillagok többsége már elhagyta a fősorozatot, így annak csak a vörös széle látszódik. Élesen kirajzolódik azonban az ún. lefordulási pont, ahonnan a szubóriáság indul, és amit a vörös óriáság követ, dominálva az egész diagramot. Ezen kívül jól kivehető még az ún. horizontális ág, ahova a csillagok a vörös óriáságról fejlődnek át egyensúlyi állapotba kerülve, magjukban hélium fúzióval, amit hidrogén héj-égés egészít ki. Az itt található csillagok közel azonos luminozitásúak, ezért a vízszintes tengellyel közel párhuzamosak, innen ered az ág neve is. Megfigyelhető még az aszimptotikus óriáság is, illetve előfordulhatnak ún.

---

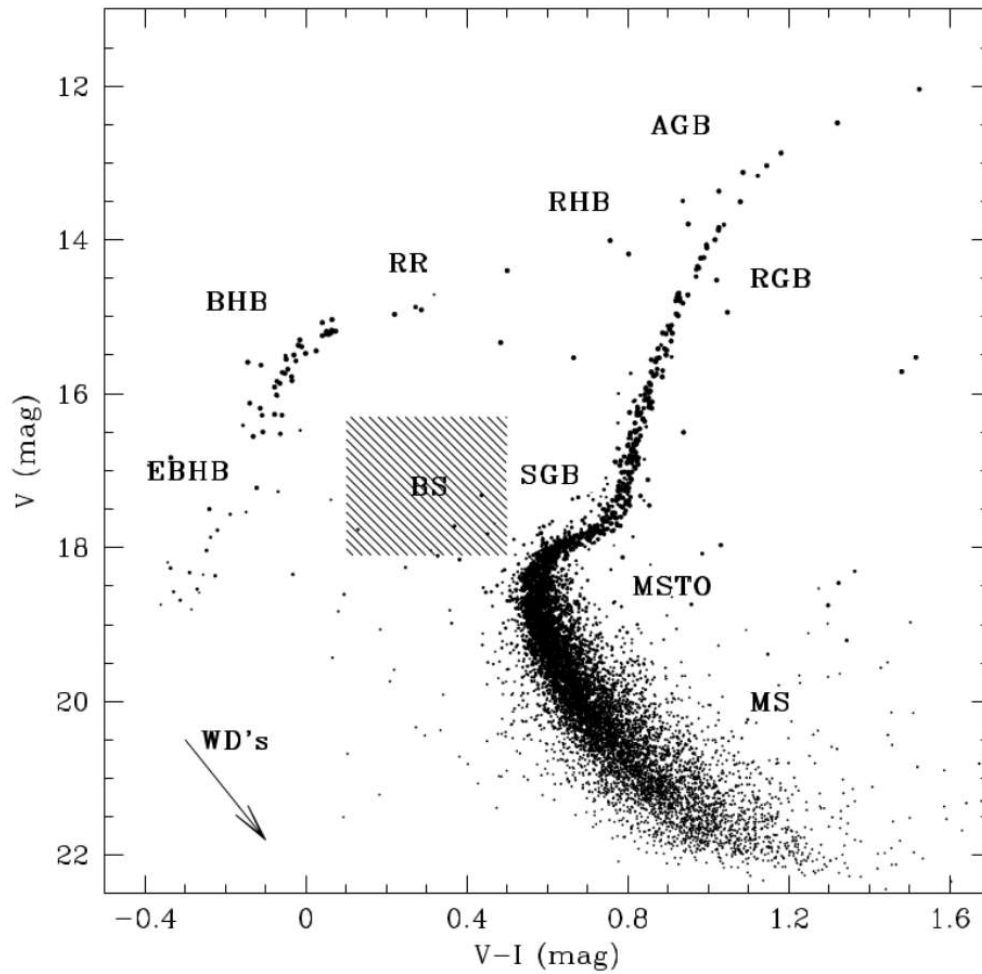
<sup>1</sup>[https://www.messier.seds.org/xtra/supp/mw\\_gc.html](https://www.messier.seds.org/xtra/supp/mw_gc.html)



1.1. ábra. A Tejútrendszer sematikus felépítése: a galaxis középpontja (*galactic center*) körül található, csaknem 3 kpc sugarú, gömbszimmetrikus tömegeloszlású, nagy csillagsűrűségű belső rész a központi dudor (*galactic bulge*). Az itt található gáz, por és csillagok a teljes tömeg nagyjából ötödét teszik ki, a maradék pedig a galaktikus korongba (*galactic disk*) összpontosul, mely egy, a galaktikus síkhoz közelebbi, fiatal, vékony korongból, és egy kintebbi, idősebb, vastag korongból áll. Míg a nyílthalmazok (*open cluster*), mint fiatal csillagcsoportosulások a korong síkjában helyezkednek el, a gömbthalmazok (*globular cluster*) a korongot és dudort gömbszimmetrikusan átfogó halóban találhatók. Forrás: Pearson Education Inc.

kék csellengő (*blue straggler*) csillagok is, amik a lefordulási pont után, a fősorozat fényesebb és kékebb részén helyezkednek el. Ezeket először Allan Sandage fedezte fel 1953-ban, az M3 gömbthalmazról végzett vizsgálataiban során (Sandage, 1953). A jelenlegi elméletek szerint ezek a csillagok kölcsönható kettős rendszerekben alakulnak ki, de pontos eredetük máig kutatás tárgyát képezi (Piotto et al., 2004).

Azok a csillagok, melyek azonos korról és kémiai összetétellel rendelkeznek, és csupán tömegben térnek el egymástól, a szín-fényesség diagramokon egyetlen izokrónnal (az azonos korú, de eltérő tömegű csillagok helyét kijelölő vonallal) illeszthetők. Izokrónok létrehozásához numerikus csillagmodelleket használhatunk, amik adott kezdeti feltételek (tömeg, kémiai összetétel) mellett az idő múlását követve számolnak fejlődési utakat (*stellar tracks*).



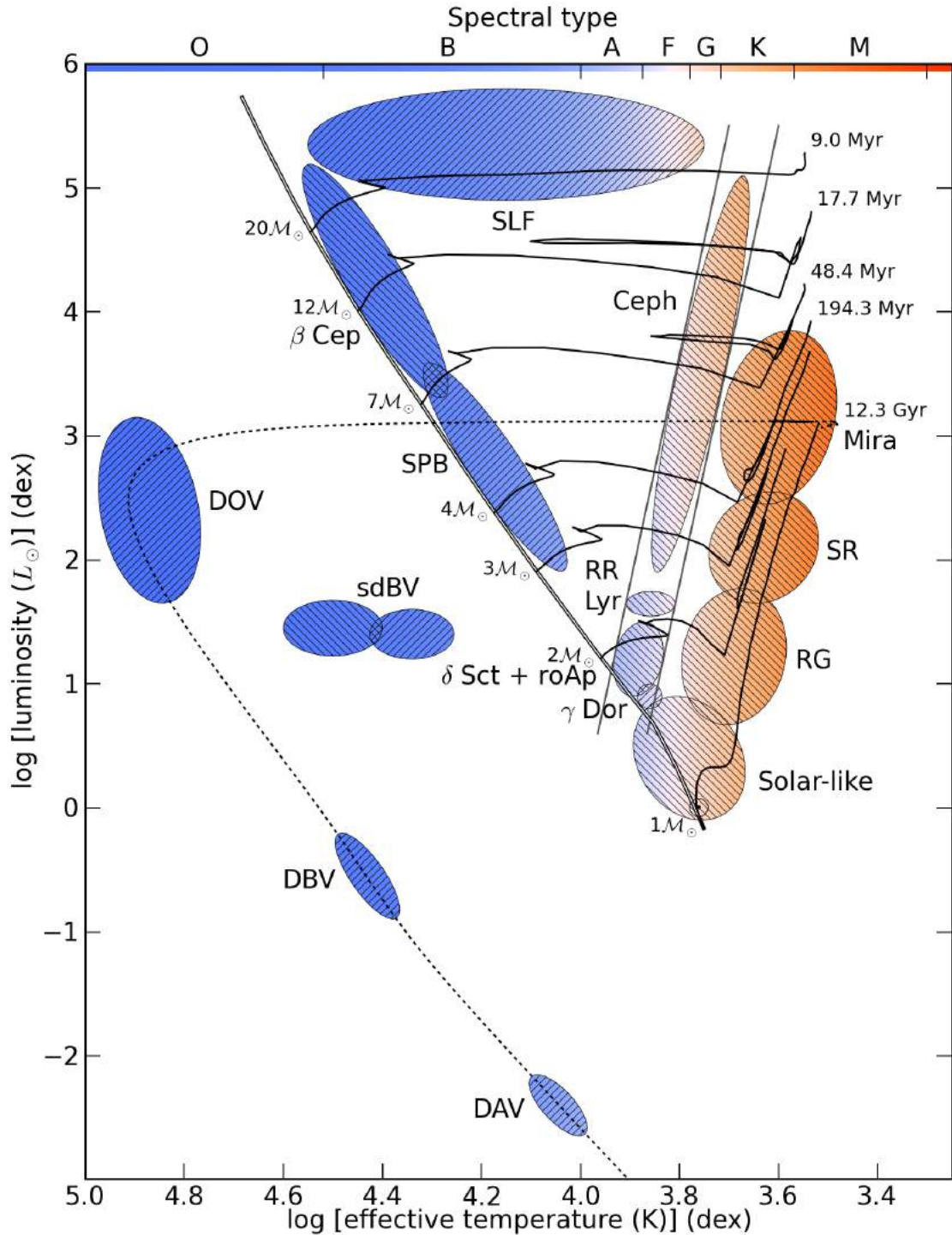
1.2. ábra. Az M13 gömbhalmaz szín-fényesség diagramja. Az ábrán remekül kivehetőek a CMD-k jellegzetes részletei: fősorozat (MS), lefordulási pont (MSTO), szubóriás ág (SGB), vörös óriáság (RGB), aszimptotikus óriáság (AGB), horizontális ág vörös széle (RHB), RR Lyrae lyuk (RR), kék horizontális ág (BHB), extrém (kék) horizontális ág (EBHB), kék csellengők (BS) és fehér törpék (WDs). Forrás: Beasley (2020).

Jelenleg a gyakran használt izokrón-adatbázisok közé tartozik például a PARSEC és COLIBRI csillagfejlődési utakból számolt padovai adatbázis (Bressan et al., 2012; Marigo et al., 2013); a BaSTI fejlődésiút- és izokrón-adatbázis (Hidalgo et al., 2018); és a MESA fejlődési modellek alapján számolt MIST adatbázis (Choi et al., 2016). Izokrónok segítségével képesek lehetünk egy csillaghalmaz korának és további fizikai paramétereinek (pl.: távolság, fémesség, elszennvedett extinkció) meghatározására, vagy akár többféle csillagpopuláció elkülönítésére is. Az utóbbi években ugyanis az egyre pontosabb megfigyeléseknek köszönhetően már a gömbhalmazok szín-fényesség diagramjaiban is többféle csillaggenerációt véltek felfedezni, ami arra utalhat, hogy jelentős részükben (vagy egyes vizsgálatok szerint csaknem az összesben) több, egymást követő hullámban zajlhatott a csillagkeletkezés (Monelli et al., 2013). A

későbbi generációt kémiaiilag gazdagítják az előzőben felrobbanó szupernóvák, így ezek picit eltérő kémiai összetétellel rendelkeznek. Jellemzően két generációt figyeltek meg a halmazokban, de a legnagyobb gömbhalmazokban, mint az  $\omega$  Centauri, többszörös csillagpopulációk is kimutathatók (Tailo et al., 2016). A Vogt-Russell-tétel értelmében ezek a szín-fényesség diagramokon párhuzamos nyomvonalakként jelennek meg (pl.: Wagner-Kaiser et al. (2016), Bastian & Lardo (2018)).

A halmazok szín-fényesség diagramjai jelentős segítséget nyújtanak a különböző pulzáló változócsillagok klasszifikálásában, vagy új változók keresésében is, hiszen az egyes pulzáló változótípusok Hertzsprung-Russell diagramon jól körülhatárolható területeken helyezkednek el (1.3 ábra). Közülük az egyik legjelentősebb az aszimptotikus óriáságtól lefelé, enyhén a kékebb részek felé húzódó ún. klasszikus instabilitási sáv (az 1.3. ábrán két szürke, párhuzamos vonallal körülhatárolva), ahol számos jól ismert pulzátor (pl.: cefeidák, RR Lyrae-k,  $\delta$  Scuti-k) helyezkedik el. Az RR Lyrae típusú pulzáló változócsillagok a horizontális ág és a klasszikus instabilitási sáv metszeténél találhatók, instabilitási sávjuk kék szélé 7250 K, a vörös szélé pedig 6000 K körül húzódik. Fejlődési állapotukból fakadóan kis tömegű (0,6-0,7  $M_{\odot}$ ) óriás csillagok (4-6  $R_{\odot}$ ), melyek abszolút fényessége közel konstans ( $V \approx +0,6$  mag), ezáltal standard gyertyaként távolságmeghatározásra használhatóak (Catelan & Smith, 2015). Habár a névadójuk a Lant csillagkép 7 magnitúdós RR Lyrae változója, melyet a 20. század elején Williamina Fleming fedezett fel (Pickering et al., 1901), magát a változó csoportot nem a Tejútrendszeren belül, hanem gömbhalmazokban ismerték fel, főleg Solon Bailey munkájának köszönhetően, aki több száz képviselőjüket fedezte fel (pl.: Bailey (1902); Bailey & Pickering (1913); Bailey et al. (1919)). Emiatt egy ideig szokás volt őket hagyományosan halmazváltozóként is emlegetni, az utóbbi évtizedekben azonban, a megfigyelések és a rendelkezésre álló adatok nagyságrendi megnövekedésével ez már nem helytálló kifejezés rájuk. A nagy felmérések, mint az OGLE, a Catalina Sky Survey és a *Gaia* adatai alapján a halóban, a központi dudorban és a Tejútrendszer öreg, vastag korongjában, vagy akár a Magellán-felhőkben is bőségesen, több tízezrestől akár több százezres nagyságrendig is megtalálhatóak (Drake et al. (2014); Soszyński et al. (2016); Clementini et al. (2019)).

Jellemzően 0,2-1 napos időskálán, radiálisan pulzálnak, pulzációjuk fő mozgatórugója pedig a  $\kappa$  és  $\gamma$  mechanizmus. Az RR Lyrae csoporton belül két jelentős altípust különböztünk meg: az alaplómódusban pulzáló RRab, és az első felhangban pulzáló RRc csillagokat. Az RRab-k az instabilitási sáv vörös, míg az RRc-k a kék széléhez vannak közelebb. Előfordulhat, hogy a csillag mindkét módusban pulzál, őket RRd-knek nevezzük, és a szín-fényesség diagramon az RRab és RRc csillagok közt helyezkednek el. A *Gaia* űrtávcső mérései alapján a Tejútrendszerben az RRab-k az összes ismert RR Lyrae körülbelül 70%-át, az RRc-k a 30%-át, az RRd csillagok pedig nagyjából 1%-ot tesznek ki (Clementini et al., 2019).



1.3. ábra. Pulzáló és oszcilláló változócsillagok a HRD-n. A nulla korú fősorozat dupla vonallal, a különböző kezdeti tömegű csillagmodellek fejlődési utai (és a hozzájuk tartozó élettartamok) vastag vonallal, a fehér törpe hűlési útvonal szaggatott vonallal, a klasszikus instabilitási sáv pedig szürke vonallal látható. A klasszikus instabilitási sávban helyezkednek el a cefeida, RR Lyrae, illetve  $\delta$  Scuti csillagok pulzációs tartományai. Forrás: Aerts (2021).

Az RR Lyrae csillagok szerkezetét, és így a pulzációját is meghatározza az adott csillag kémiai összetétele, melynek egyik jellemzője a csillag fémességét jó közelítéssel leíró  $[\text{Fe}/\text{H}]$  index. Ezt elsősorban spektroszkópiai mérésekből lehet meghatározni, viszont már a fénygörbe tulajdonságaiból is következtethetünk rá. Habár ez kevésbé pontos ( $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.2 - 0.5$  dex), mégis roppant fontos, hiszen spektroszkópiai mérésekből nagyságrenddel kevesebb észlelés születik, mint fotometriai megfigyelésekből. Az így kapott fémességet fotometriai fémességnek nevezzük, melyet egy, a periódus, a  $\varphi_{31}$  relatív Fourier-paraméter, és a  $[\text{Fe}/\text{H}]$  közötti empirikus relációból számolhatunk ki (Jurcsik & Kovács, 1996). A relációk adott színsávra vannak definiálva, a *Kepler* űrtávcsőre például Nemec et al. (2013) számolt új relációt.

## 1.2. Motiváció és célkitűzés

Munkám motivációját az adja, hogy a *Kepler* űrtávcső a K2 misszió során számos gömbhalmazt is megfigyelt, név szerint: M4, M9, M19, M80, NGC5897, NGC6293, NGC6355 és Terzan 5 (Howell et al., 2014). Ezek közül eddig az M4-ről készült publikáció (Wallace et al., 2019), illetve az M80 halmaz lett feldolgozva (Molnár et al., in prep). Ezekből az látszik, hogy a korábbi földi mérésekkel szemben az űradatok alacsonyabb zajszintű és hosszú időn keresztül, megszakításmentes adatai továbbra is lehetővé teszik olyan jelenségek felfedezését, melyek az az RR Lyrae csillagok pulzációjának összetett, és máig nem teljesen tisztázott dinamikai folyamataira utalnak (pl.: újfajta, millimagnitudós amplitúdóval gerjesztett további módusok felfedezése).

A feldolgozatlan és publikálatlan mérések között szerepeltek tehát a C11-es kampányból az M9, M19, NGC6293, NGC6355, Terzan 5, valamint a C15-ös kampányból az NGC5897 halmazok. Ezek közül a 2020/21 tanévben az NGC5897 gömbhalmaz analízisével foglalkoztam, melynek során a K2 méréseket *Gaia* adatokkal kombináltam, ezáltal létrehozva a halmaz színfényesség diagramját, amelyen a halmaz ismert változóit ellenőriztem, valamint potenciális új RR Lyrae jelölteket azonosítottam a csillagok horizontális ágon való elhelyekedése alapján. Az így kiválasztott célpontokra aztán sűrű csillagmezők redukálására kifejlesztett képkivonásos fotometriát alkalmaztam, ezáltal 13 korábban is ismert változóról, valamint 1 általam felfedezett új RR Lyrae csillagról kaptam fénygörbéket. A K2SC python szoftver segítségével a *Kepler* apró elmozdulásaiból fakadó szisztematikus hibákat is kiiktattam a fénygörbékből, tovább csökkentve a fénygörbék zajszintjét (Aigrain et al., 2016). Ennek eredményeképp a kinyert 12 elemű RR Lyrae minta frekvencia analízisével az eddigieknél pontosabb klasszifikációt készítettem, továbbá sikerült két csillagnál eddig nem ismert modulációt, hat csillagnál pedig új, kis amplitúdójú plusz módusokat felfedeznem. A kapott eredményeket összehasonlítva OGLE, TESS, valamint az M3 gömbhalmaz piszkéstetői méréseivel azt mondhatjuk,

hogy az NGC5897 RR Lyrae csillagai több szempontból is érdekesek (Jurcsik et al., 2015; Molnár et al., 2021). Egyrészt a halmazon belül az egyes altípusok eloszlása fordított arányt mutat, mint általánosságban (77% RRc és 23% RRab), másrészt az egyes altípusokon belül ezek a csillagok az átlagnál hosszabb periódussal rendelkeznek. Olyannyira, hogy az itt található RR Lyrae-re a Nemec et al. (2013) cikkben szereplő fotometriai fémesség képlet nem is alkalmazható, mert kívül esnek a 0,7 napig bekalibrált periódustartományon. Mindezek oka valószínűleg a halmaz, és ezáltal a benne lévő RR Lyrae csillagok alacsony ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.04$ ; Koch & McWilliam (2014)) fémességében keresendő.

Számos lehetőség és további kutatási potenciál rejlik abban, hogy a maradék *Kepler* gömbhalmazokat is feldolgozzam. Míg azonban az NGC5897 a Mérleg csillagképben található, addig a C11-es gömbhalmazok jóval kisebb galaktikus szélességgel rendelkeznek. A K2 misszió C11-es kampánya során a *Kepler* 2016. szeptember 24. és december 8. között a Tejútrendszer központi dudorának irányába végzett méréseket. Ennek következtében ez az egyik legsűrűbb csillagmező, amit az űrtávcső a teljes pályafutása során észlelt. Az átlagos csillagsűrűség a  $11,5 < Kp < 14,5$  magnitúdó tartományban 6 959 csillag/négyzetfok (a dudor környékén akár 25 000 csillag/négyzetfok is), szemben az átlagos 900 csillag/négyzetfok sűrűséggel. Emiatt a legtöbb adatredukáló pipeline az ilyen sűrű részeknél nem is működik, az asztrometriai bekötést részben manuálisan kell elvégezni, ennek a pontos megvalósítása még jelenleg is munka tárgyát képezi. A C11-es kampány nehézségét nemcsak a sűrű csillagmezők adják, hanem az is, hogy a Tejútrendszer központi vidéke számos csillagközi gáz- és porfelhőt tartalmaz, melyek inhomogén módon be-benyúlnak a halmazok elé. Ez csillagközi vörösödést okoz, ráadásul nem egységesen minden csillagra, hanem a halmaz különböző pontjain lévő csillagoknál különböző mértékben, így a szín-fényesség diagramjuk sokkal nagyobb szórást mutat.

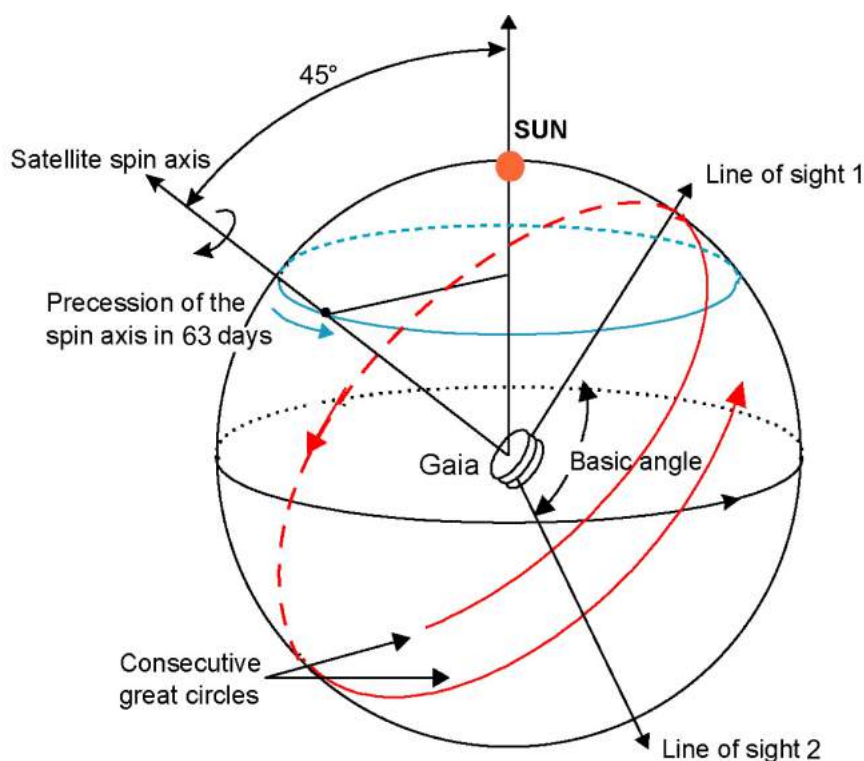
A jelen dolgozatban tárgyalt kutatási program célja a C11 során is mért M9, M19 és NGC6293 gömbhalmazok szín-fényesség diagramjainak elemzése *Gaia* adatok segítségével, mely lehetőséget biztosít, hogy homogén módon vizsgáljam az egyes halmazokat. A fő kérdéskör, amit a dolgozatban körüljárók, hogy hogyan lehet a *Gaia* adatok alapján a lehető legtisztább CMD-eket megkapni a halmazokra, illetve *Gaia* színadatok segítségével hogyan térképezhetem fel a gömbhalmazok csillagainak (elhelyezkedéstől függően különböző mértékű) vörösödését.

### 1.3. A *Gaia* és az EDR3 katalógus

A *Gaia* egy asztrometriai űrobszervatórium, mely 2013-ban indult útjára azzal a fő céllal, hogy elkészítse a Tejútrendszerünk 3-dimenziós térképét. Ennek érdekében minden eddiginél

nagyobb pontossággal határozza meg több mint egymilliárd csillag asztrometriai jellemzőit (mint pozíció, sajátmozgás, parallaxis), kiegészítve fotometriai és spektroszkópai mérésekkel. Ezzel a galaxisunk csillagainak körülbelül 1%-ának tulajdonságairól kaphatunk információkat, melyek olyan, máig nyitott tudományos kérdés megválaszolását segítik elő, mint például a Tejútrendszer stuktúrájának, dinamikájának és evolúciójának, vagy a csillagok működésének és fejlődésének megértése.

Az űreszköz Lissajous pályán kering a Nap-Föld rendszer L2-es Lagrange pontja körül, ahol egyszerre 2 tengely mentén forog: a Naptól 45 fokos szögtávolságra lévő tengelye körül 6 óránként ( $60''/s$ ) körbefordul, ez a tengely pedig 63 napos precesszióval fordul körbe a Nap iránya körül. Ennek, és a Föld-L2 rendszer Nap körüli éves mozgásának eredményeképp az eszköz 6 havonta a teljes égboltot végig tudja szkennelni, az eredeti 5 éves misszió alatt pedig egy-egy csillagot átlagosan 70-szer mért (lásd: 1.4. ábra).

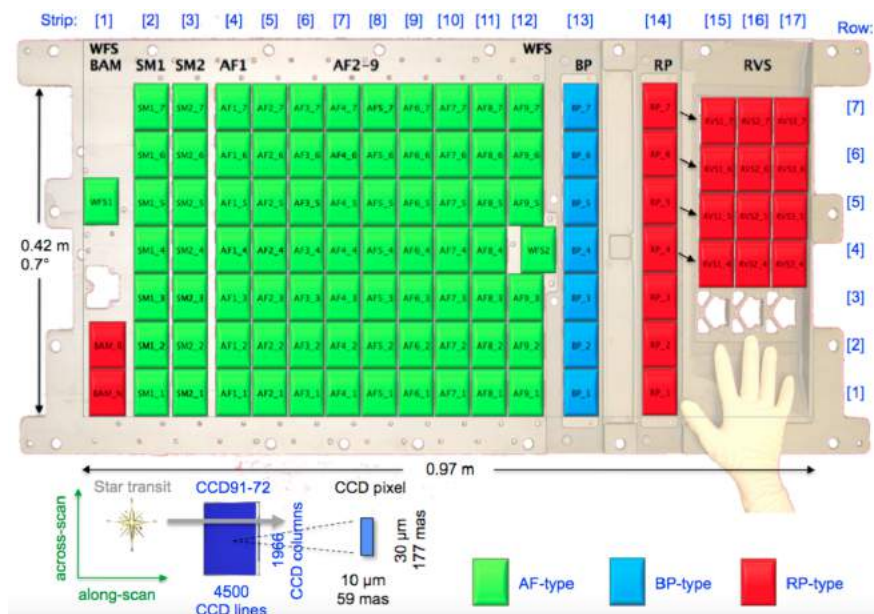


1.4. ábra. Sematikus ábra a *Gaia* űrtávcső mozgásáról. Az eszköz 3 tengely mentén forog: a Naptól 45 fokos szögtávolságra lévő tengelye körül 6 óránként ( $60''/s$ ) körbefordul, ez a tengely pedig 63 napos precesszióval fordul körbe a Nap iránya körül. Mindezekhez (mely nincs az ábrán) hozzáadódik a Föld-L2 rendszer éves mozgása a Nap körül. A „basic angle” az űreszközben lévő két távcső között lévő 106,5 fokos bázis- vagy alapszög. A piros nyomvonalak távolsága a jobb szemléltethetőség kedvéért el van túlozva. Forrás: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/scanning-law>, ESA/Karen O’Flaherty

A *Gaia* százezred ívmásodperc pontosság alatt képes méréseket végezni, szemben az elődjével, a HIPPARCOS űrtávcsővel, mellyel nagyságrendileg ezred ívmásodperces pontosságot lehetett elérni (Perryman et al., 1997). A *Gaia* fedélzetén két távcső található, egymástól fix 106,5 fokos távolságra, melyek közös fókuszsíkkal rendelkeznek, ahova egyszerre esik a két távcső képe. Ebben a fókusz síkban található egy 106 darab, egyenként 4500x1966 pixeles CCD-ből álló kamera (lásd: 1.5. ábra), melyből 62 darab alkotja az asztrometriai célokat szolgáló panelt. Az adatmennyiség minimalizálása érdekében nincs az összes CCD képe elementve, hanem az egyes CCD-ken belül csak az egyedi csillagok és szűk környezetük. Az itt mért fényesség az ún.  $G$  magnitúdónak felel meg, mely 330–1050 nm közötti hullámhossztartományt fog át. Az eszköz 60"/s tengelyforgási sebessége, valamint a két távcső fix bázisszöge miatt ugyanazon csillagok 106,5 perccel később ismét megjelennek a CCD-n, ezáltal az egyik távcső a másik referenciájaként tud funkcionálni. A Nap iránya körül precesszáló tengely szögtávolsága és szögsebessége úgy van megválasztva, hogy a két egymást követő 6 órás kör nyomvonala még átfedje egymást, de elég nagy legyen ahhoz is, hogy a misszió ideje alatt az égen elérhető összes csillag elegendően sokszor keresztül is haladjon a CCD-ken a mért jellemzők kívánt pontosságának eléréséhez. Az asztrometriai CCD-ken kívül 14 darab CCD kamera alacsony felbontású spektrofotometriához készült. Ebből 7 CCD kék (BP), 7 CCD piros fotométer (RP), melyek rendre 330–680 nm és 630–1050 nm hullámhosszakon észlelnek. A maradék 12 CCD közepes felbontású ( $R \approx 11\,700$ ) spektroszkópiai megfigyeléseknek van fenntartva, ahol a spektrumokat egy radiális sebesség-mérő spektrométerben lévő rács állítja elő (Gaia Collaboration et al., 2016a).

A *Gaia* mért és származtatott mennyiségeit adatközlések formájában teszik nyilvánosan elérhetővé a *Gaia* archívum<sup>2</sup> oldalon keresztül. Az első *Gaia* adatközlés (Data Release 1, röviden DR1) 2014. július vége és 2015. szeptember közepe közötti időszakban gyűjtött méréseket foglalja magába, és több mint egymilliárd csillagról tartalmaz pozíció és fényesség adatot (Gaia Collaboration et al., 2016b). A második adatközlés, a DR2, 2018 tavaszán érkezett meg, és már összesen 1,7 milliárd csillagot tartalmaz, melyek közül több mint 1,3 milliárdra van 5-paraméteres asztrometriai megoldás (azaz nemcsak pozíció, hanem sajátmozgás és parallaxis érték is), valamint  $G$ ,  $G_{BP}$  és  $G_{RP}$  magnitúdók. Ezen kívül több millió csillagra van radiális sebesség mérés, több tíz millió csillagra extinkció, vörösödés, sugár és luminozitás, valamint több száz millió csillagra effektív hőmérséklet (Gaia Collaboration et al., 2018). A *Gaia* DR3 2022 nyarán várható, mely 34 hónapnyi mérés (2014. július 25. - 2017. május 28.) adatait használja fel. Összehasonlításképpen: a DR1 14 hónap, a DR2 22 hónap mérésein alapul. Mivel az adatok feldolgozásának egy része már megtörtént, a másik része viszont még hónapokat vesz igénybe, ezért 2020. december 3-án kiadtak egy előzetes adatbá-

<sup>2</sup><https://gea.esac.esa.int/archive/>



1.5. ábra. A *Gaia* fókusz síkjában lévő CCD kamera mező. A zöld színnel jelöltek a térképező és asztrometriai CCD-k, a BP és RP sávokhoz tartoznak a kék- és vörös tartományban érzékeny kamerák, az RVS alatti piros CCD-k pedig a radiális sebesség mérés spektrométeréhez tartoznak. Forrás: *Gaia Data Release 2 Documentation* (van Leeuwen et al., 2018)

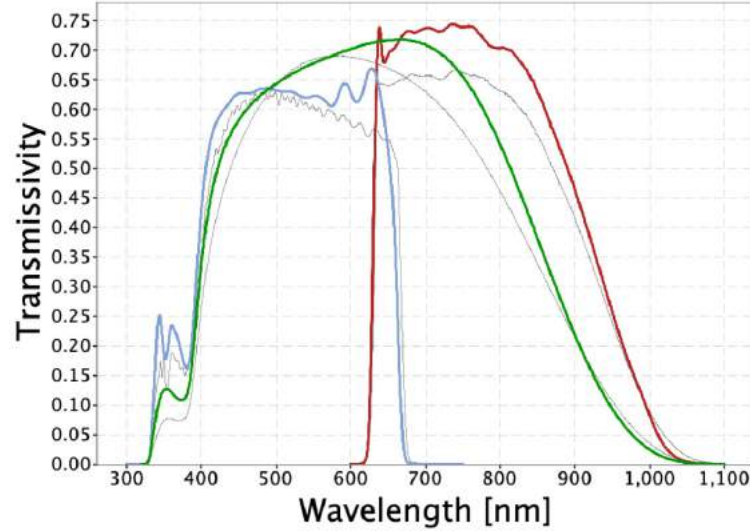
zist (EDR3, vagyis Early Data Release 3), ahol több millió csillagról már elérhető pontosabb asztrometriai és fényesség adat (Gaia Collaboration et al., 2021a).

Minden egyes adatközlés mellé a *Gaia* kollaboráció bőséges szakirodalmi háttérrel is nyújt az adatok értelmezéséhez és felhasználásához. Ezek a cikkek három nagy csoportba oszthatók: összefoglaló cikkek (pl. adott katalógus tartalmáról és jellemzőiről: Gaia Collaboration et al. (2021a)), belső adatfeldolgozás részleteivel kapcsolatos cikkek (pl. az asztrometriai megoldások technikai részletei: Lindegren et al. (2021a), vagy a *Gaia* PSF (*point spread function*) és LSF (*line spread function*) modellezése: Rowell et al. (2021)), valamint az új katalógus adataival elérhető tudományos eredményekről szóló cikkek (pl. a Magellán-felhők tulajdonságainak vizsgálata: Gaia Collaboration et al. (2021b)). Mivel a célom az volt, hogy *Gaia* fényesség adatokból szín-fényesség diagramokat hozzak létre, majd ezek segítségével feltérképezem a halmazon belüli változó vörösödést, ezért engem elsősorban az EDR3-al elérhető fotometriai pontosság, és a publikált katalógusban lévő esetleges hibák és instrumentális effektusok érdekeltek, melyekről részletesebben Riello et al. (2021) cikkében olvashatunk.

### 1.3.1. A „korrigált szintőbblet” faktor

A *Gaia* katalógusokban három-féle fényesség érték érhető el:  $G$ ,  $G_{BP}$  és  $G_{RP}$  magnitúdók, amik rendre a látható, a kék és a vörös tartományoknak felelnek meg. A pontos áteresztési

függvények az 1.6 ábrán láthatóak.



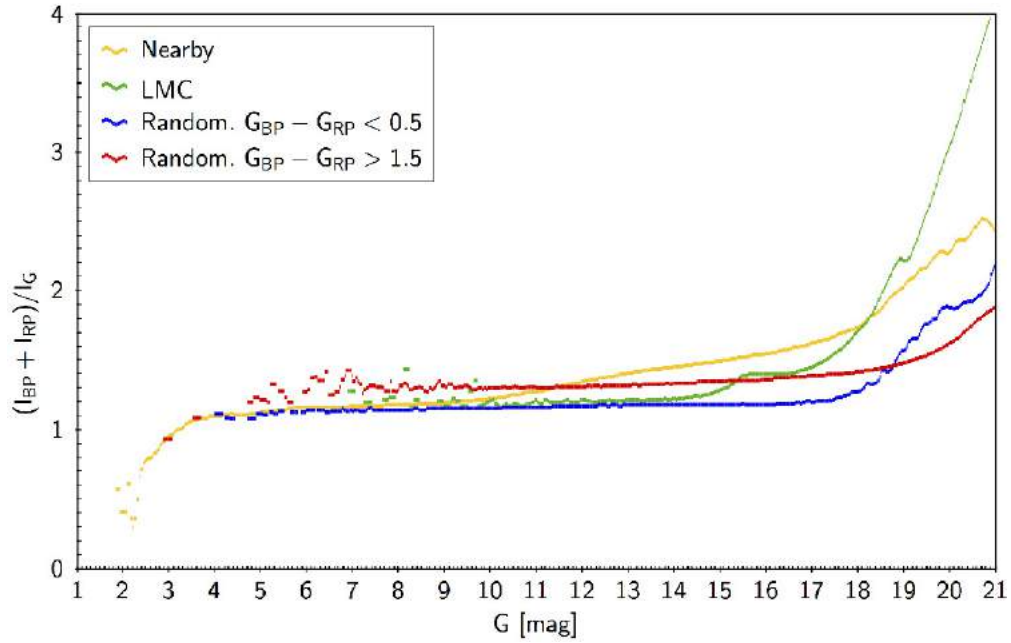
1.6. ábra. A *Gaia*  $G$  (zöld vonal),  $G_{BP}$  (kék vonal), és  $G_{RP}$  (piros vonal) szűrőinek áteresztési függvényei az EDR3 fotometriai rendszerhez. A szürke vonalak az eredeti, felbocsátás előtti áteresztéseket jelzik. Forrás: Evans et al. (2018).

Az  $I_{BP}$  és  $I_{RP}$  fluxusok más módon vannak feldolgozva és ezáltal meghatározva, mint az  $I_G$  fluxus, ami miatt érzékenyebbek a más, közeli forrásokból, vagy az egyenetlen háttérfényességből fakadó kontaminációra. Emiatt érdemes leellenőrizni azt, hogy a három sávban mért fluxusok konzisztensek-e azzal, amit egy ideálisnak tekinthető forrás esetében várnánk. Az áteresztési függvényekből kifolyólag azt várjuk, hogy ha egy csillag kék és vörös fluxusát összeadjuk, majd leosztjuk a  $G$  fluxussal, akkor egy 1-hez közeli, vagy annál valamivel nagyobb számot kapunk. Ennek vizsgálatára a DR2-ben bevezették az alábbi  $C$  szintöbbslet („color excess”) mennyiséget:

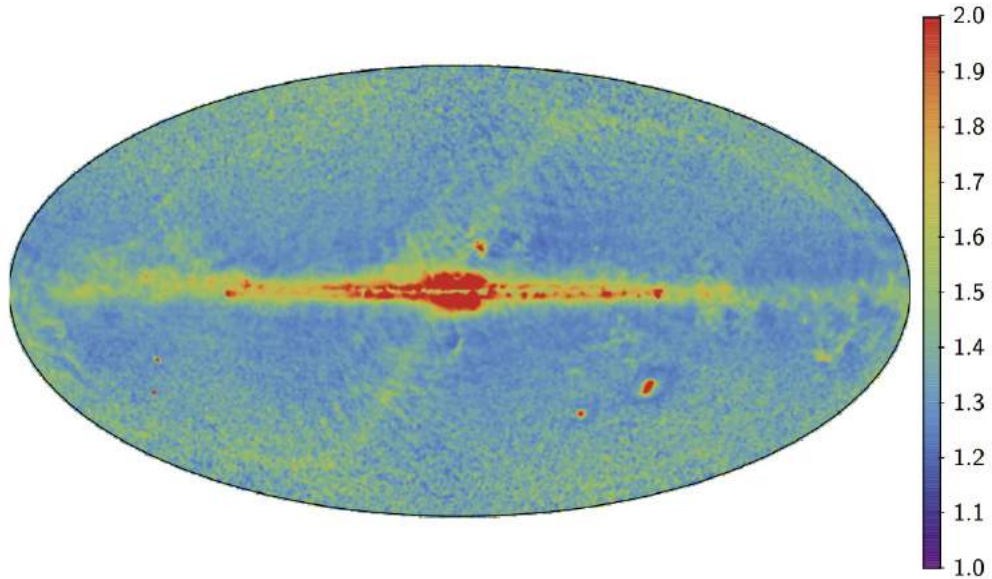
$$C = \frac{I_{BP} + I_{RP}}{I_G}$$

A DR2 adatok alapján, ha ábrázoljuk  $C$ -t a  $G$  magnitúdó függvényében, különböző csillag minták (közeli csillagok, Nagy Magellán-felhő csillagai, random válogatott kék, valamint vörös csillagok) medián  $C$  értékeit véve (1.7. ábra), akkor azt mondhatjuk, hogy 17-18 magnitúdóig a  $C$  egy körül van, tehát (a fenti definíció alapján) a csillagok egészen „jól viselkednek” (kivéve a legfényesebb  $G < 3,5$  részeket, ahol szaturációs problémák lépnek fel), 18 magnitúdó fölött azonban élesen romlik a helyzet.

A 1.8. ábrán a medián  $C$  értékeket láthatjuk az égbolton. A leglátványosabban a Tejútrendszer síkja és a Magellán-felhők ugranak elő, melyek mivel igen zsúfolt égterületek, nem jelentenek nagy meglepetést. Ami érdekesebb, hogy az ekliptika síkja is egyértelműen kiraj-



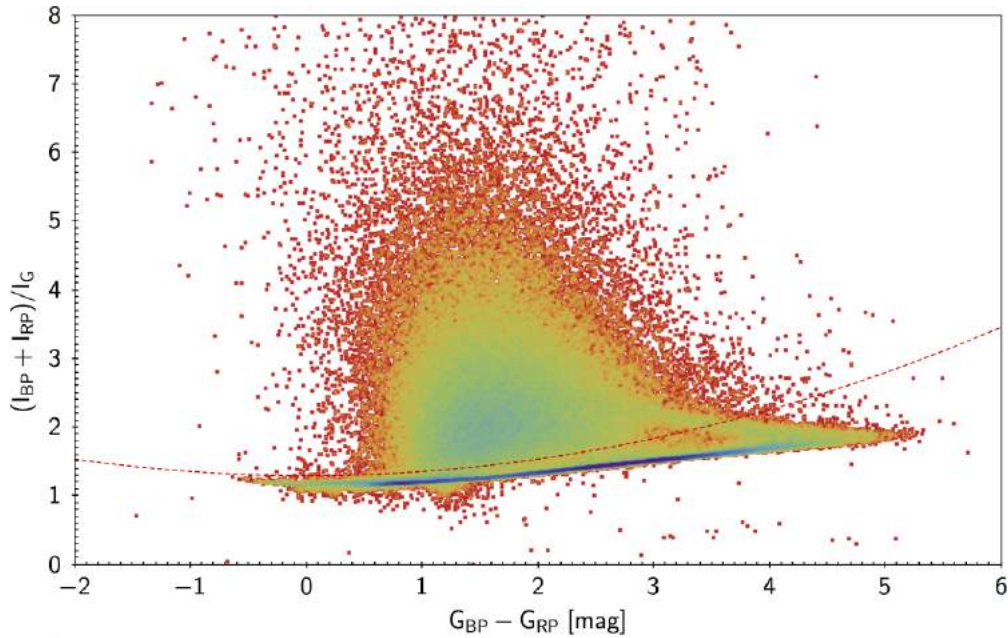
1.7. ábra. Medián szintöbbslet faktor a  $G$  magnitúdó függvényében közeli forrásokra (sárga vonal), a Nagy Magellán-felhő középpontja körüli forrásokra (zöld vonal), és random kék- valamint piros színű forrásokra (kék és piros vonalak). Forrás: Evans et al. (2018).



1.8. ábra. Medián szintöbbslet értékek random mintára, galaktikus koordináta-rendszer szerint feltüntetve. Forrás: Evans et al. (2018).

zolódik, ami arra utal, hogy az itt lévő csillagok esetében az állatövi fény miatt az égi háttér modellezése nem volt tökéletes, és ez nyomot hagyott a fluxusokon, főleg a halvány csillagok esetében. A magas szintöbbslet értékek mögött tehát számos ok húzódhat, a legvalószínűbbek között a zsúfolt látómező, környező fényes csillagok okozta szennyeződések, kettősség,

kiterjedt objektumok, vagy nem megfelelő háttérlevonás állhat. Az Evans et al. (2018) cikk bevezetett egy  $C$  érték alapján történő szűrést, így a DR2-ben csak azok a források maradtak benne, amikre teljesült, hogy  $C < 5$ . A helyzetet azonban bonyolítja, hogy  $C$  erős függést mutat a *Gaia* színindexszel. A 1.9. ábrán látható a DR2  $C$  értékeinek ábrázolása  $G_{BP} - G_{RP}$  függvényében, mely jól mutatja, hogy az égitestek többsége tényleg  $C < 5$  alatt található, viszont maguk az értékek 0,02-től több mint 700-ig változhattak. Az ábrán lévő piros szaggatott vonal jelöli azt a határt, ami alatt a *Gaia* kollaboráció a csillagokat „jól viselkedő forrásoknak” nevezi. Ennek a görbének az egyenlete:  $1,3 + 0,06(G_{BP} - G_{RP})^2$ . Ez a komplex színfüggés nehezen interpretálhatóvá teszi a  $C$  értékét.



1.9. ábra. Színtöbblet faktor a szín függvényében közeli ( $\varpi > 15$  mas) csillagmintára. Forrás: Evans et al. (2018).

Hogy más szempontból is megvizsgálhassuk a kérdést, Riello et al. (2021) bevezeti a  $C^*$  korrigált színtöbblet faktort („corrected color excess”):

$$C^* = C - f(G_{BP} - G_{RP})$$

ahol  $f$  az a függvény, mely megadja, hogy adott színindex esetén milyen színtöbbletet várunk „jó minőségű fotometriai értékekkel rendelkező források esetén”. A függvény meghatározásához 200 000 jól megfigyelhető, *arany*<sup>3</sup> besorolású forrásból áll mintát használtak. A Riello

<sup>3</sup>A katalógusban szereplő fényesség értékek előállítására három különböző fotometriai pipeline áll rendelkezésre. Hogy az egyes források esetében melyiket használják, az attól függ, hogy az adott forrás milyen színű

et al. (2021) cikkben azt találták, hogy a különböző szintartományokhoz rendelhető  $C$  értékeket 3 különböző polinom kombinálásával lehet jól megilleszteni: a kék szélén egy kvadratikus összefüggéssel, a vörös szélén egy egyenessel, középen pedig egy harmadfokú függvénnyel. Az illesztés eredményei a 1.1 táblázatban láthatóak, vizuálisan pedig a 1.10 felső ábrán. A 1.10 alsó ábrán jól látszik, amit a  $C^*$  definíció értelmében várunk is, hogy az értékek ideális esetben nulla körül csoportosulnak.

| $a_i$ | $x < 0,5$ | $0,5 \leq x < 4.0$ | $x \geq 4.0$ |
|-------|-----------|--------------------|--------------|
| $a_0$ | 1,154360  | 1,162004           | 1,057572     |
| $a_1$ | 0,033772  | 0,011464           | 0,140537     |
| $a_2$ | 0,032277  | 0,049255           | -            |
| $a_3$ | -         | -0,005879          | -            |

1.1. táblázat. Az  $f(x) = a_i \cdot x_i$  polinomok együtthatói és felhasználási tartományai ( $x = G_{BP} - G_{RP}$ ), melyeket a  $C(G_{BP} - G_{RP})$  összefüggésre illesztettek. Forrás: Riello et al. (2021).

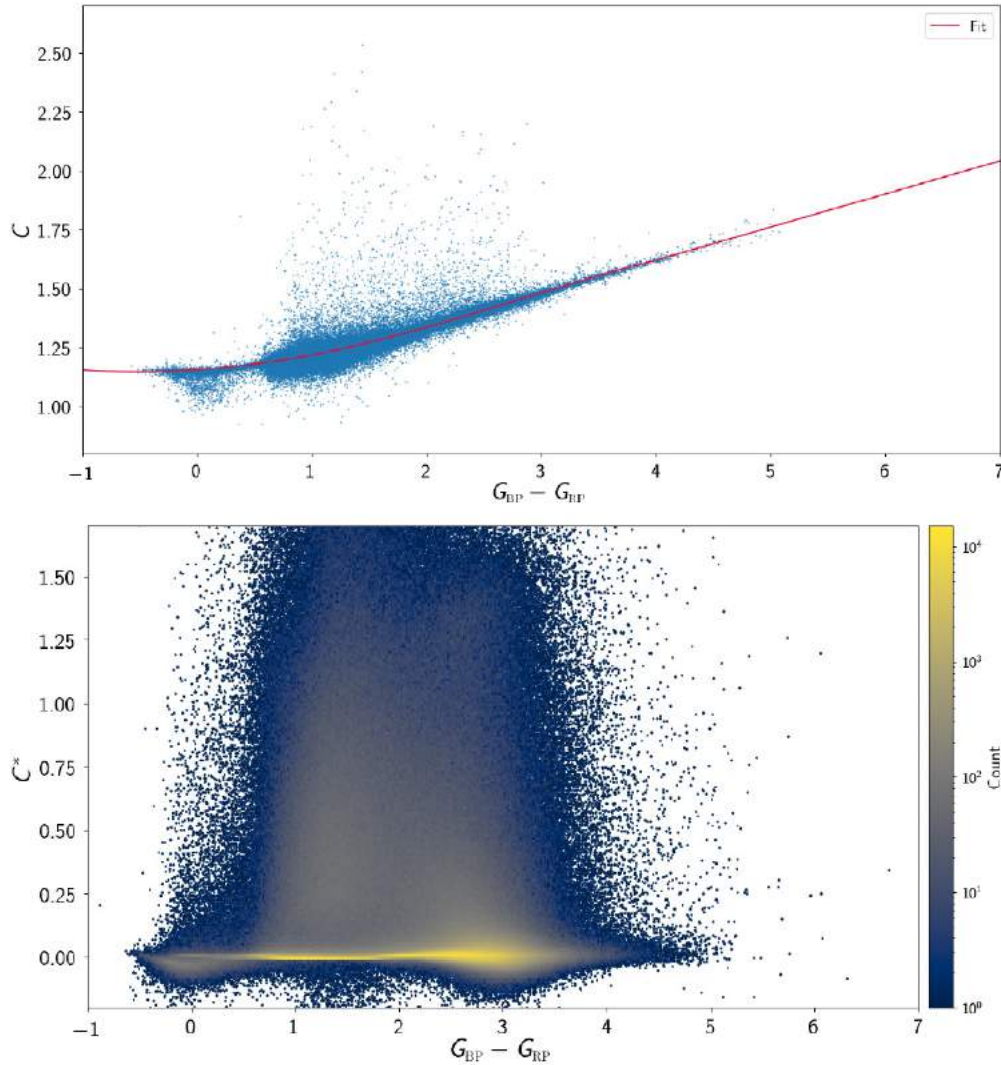
Az, hogy miképp használható a  $C^*$  érték egy-egy adatsor minőségének javítására, továbbra is egy összetett kérdés. Maga a  $C^*$ , hasonlóan  $C$ -hez, azt mutatja ki elsősorban, hogy van valami inkonzisztencia a  $G$ ,  $G_{BP}$  és  $G_{RP}$  fotometriai értékek között - azonban hogy ez honnan ered, melyik szűrő oldaláról, arról nem mond semmit. Éppen ezért a Riello et al. (2021) cikk azt ajánlja, hogy ne „minőség indikátor”-ként tekintsünk rá, és mindig az adott tudományos kérdés céljainak megfelelően próbáljuk alkalmazni egy adott minta szűrésére. Az ajánlott szűrési kritérium  $C^*$  alapján:  $|C^*| < N \cdot \sigma_{C^*}$ , ahol

$$\sigma_{C^*}(G) = c_0 + c_1 \cdot G^{c_3}$$

A fenti egyenletben lévő konstansok értékei rendre  $c_0 = 0,0059898$ ,  $c_1 = 8,817481 \cdot 10^{12}$  és  $c_3 = 7,618399$ . Az  $N$  értéke teljes mértékben a felhasználóra van bízva. Az 1.11 ábrán egy példa látható a  $C^*$ -nak a  $G$  függésére, valamint az ezekhez rendelt  $\pm\sigma$ ,  $\pm3\sigma$  és  $\pm5\sigma$  vonalakra.

---

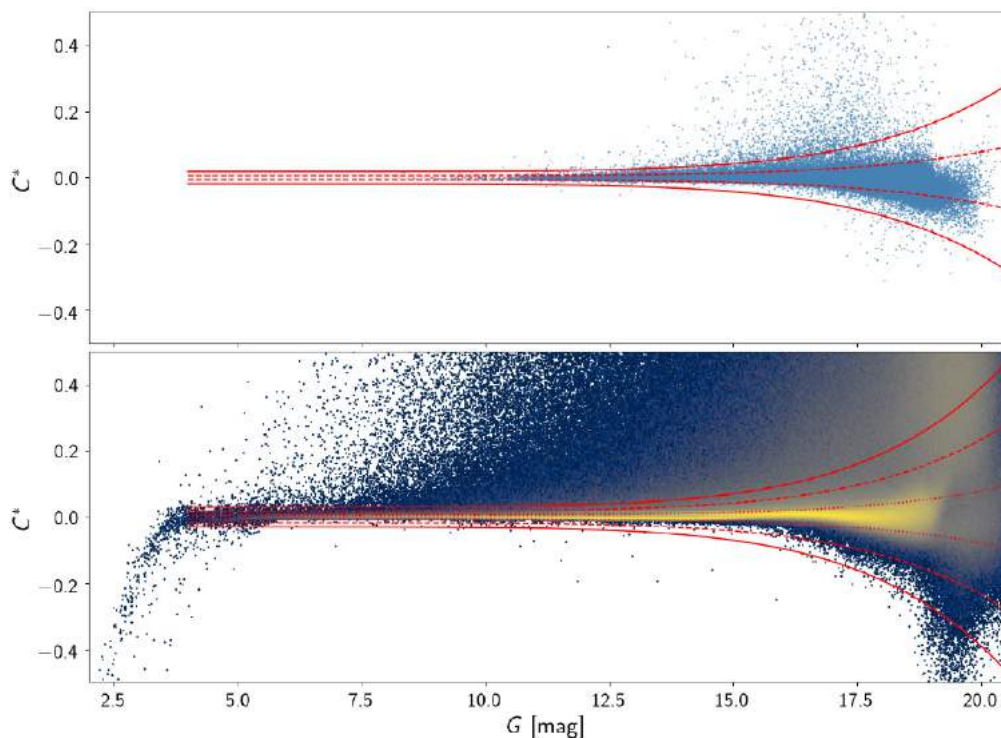
információkkal rendelkezik. Attól függően pedig, hogy az egyes források adatai mely feldolgozási folyamat alapján kerültek a katalógusba, megkülönböztetük arany, ezüst és bronz besorolású forrásokat (Riello et al., 2018).



1.10. ábra. *Felső ábra:* a  $C(G_{BP} - G_{RP})$  függés meghatározása. Kékkel a 200 000 „arany” besorolású csillagminta, pirossal a 3 illesztett polinom. *Alsó ábra:*  $C^*(G_{BP} - G_{RP})$  függés egy közeli csillagokból álló random mintára. Forrás: Riello et al. (2021).

### 1.3.2. Túlbecsült $G_{BP}$ fluxus halvány, vörös forrásokra

A *Gaia* DR2-nél bevezettek egy  $1 \text{ e}^{-}\text{s}^{-1}$  fluxus határt: ha egy adott mérési időpont során egy égitest fluxusa ennél kisebb, azt a mérést kizárják az égitest súlyozott közepes fluxusának számításakor, hogy megelőzzék az extrém kilógó pontok okozta problémákat a  $G$  sávban. Ez a fluxus limit  $G$ -ben nem okoz problémát, ugyanis ez fényességben  $G \approx 25,8$  magnitúdót jelent, mely sokkal kisebb mint az űreszköz forrás detektálási limitje. Ez a küszöbérték azonban szintén alkalmazva lett a  $G_{BP}$  és  $G_{RP}$  sávokra is, melynek következtében minél vörösebb és halványabb csillagokat nézünk, azok természetükből fakadóan annál kisebb, akár több magnitúdóval halványabb  $G_{BP}$  értékkel rendelkeznek. Az alapértelmezett fluxuslimit érték

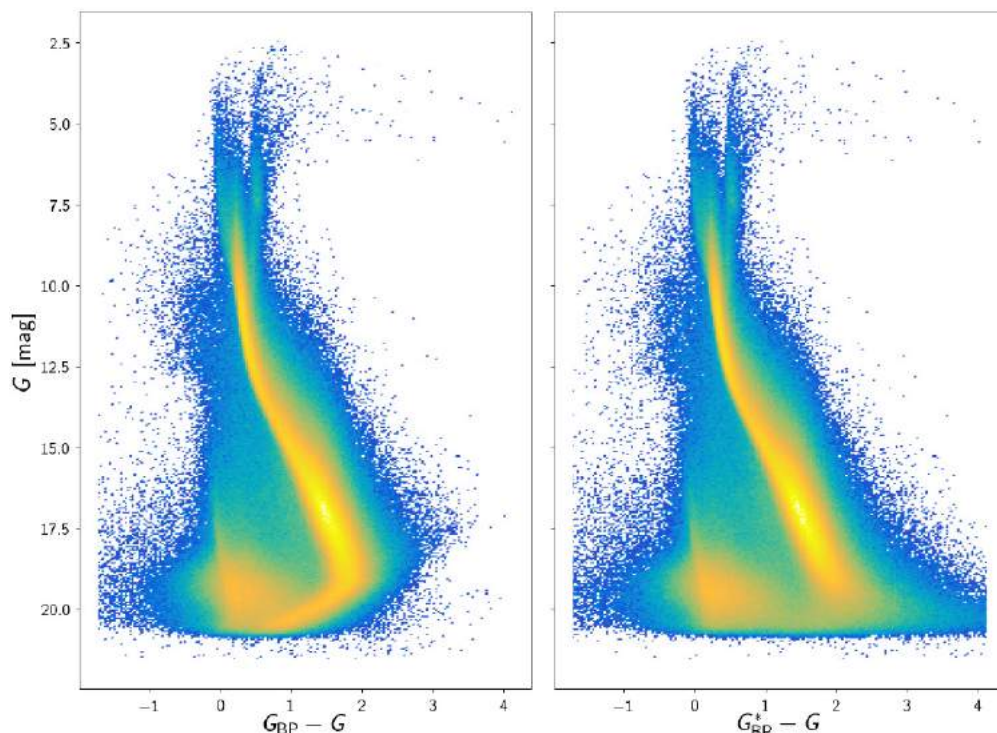


1.11. ábra. A  $C^*$  értékének  $G$  függése. *Felső ábra:* mintacsillagokra  $\pm\sigma$  (szaggatott vonal) és  $\pm 3\sigma$  (folytonos vonal) határokkal. *Alsó ábra:* közeli csillagmintára  $\pm\sigma$  (pontosított vonal),  $\pm 3\sigma$  (szaggatott vonal) és  $\pm 5\sigma$  (folytonos vonal) határokkal. Forrás: Riello et al. (2021).

miatt a rendszer kiszűri a nagyon alacsony kék fluxusú, de helyes méréseket is, és elkezd szisztematikusan túlbecsülni ezt a fényesség értéket. Erre látványos példa a 1.12. ábrán látható szín-fényesség diagram, melynek vörös vége nem várt módon kék irányba kanyarodik. A jelenség a  $G_{RP}$  fluxusban is észrevehető (hiszen erre is az  $1 \text{ e}^{-\text{s}^{-1}}$  limit van beállítva), viszont Riello et al. (2021) vizsgálatai alapján ennek a mértéke jóval kisebb, és összemérhető a fotometria hibájával, így nem szükséges ez alapján is vágni a vizsgált adatsort. A  $G_{BP}$  alapú ajánlott vágás  $G_{BP} < m$ , ahol  $20,3 \leq m \leq 20,9$  mag, egyéni preferencia alapján.

## 1.4. Poreloszlás a Tejútrendszerben

Tejútrendszerünk alapvetően kétféle összetevőből áll: látható és „láthatatlan”, ún. sötét anyagból. Míg a látható, barionos anyag a galaxisunk  $7 \pm 1\%$ -át teszi ki, ezalatt nemcsak csillagokat és az esetlegesen hozzájuk tartozó kisebb égitesteket (pl.: bolygók, kisbolygók, üstökösök) értjük, hanem jelen van ún. csillagközi anyag is. Bár a csillagközi anyag sűrűsége igen kicsi (jobban közelíti a vákuumot, mint amit a Földön mesterségesen képesek vagyunk előállítani), az őt alkotó hideg gáz, por és egyéb részecske mennyiség tömege a Tejútrendszer látható anyagának  $15 \pm 2\%$ -át teszi ki, és ahogy azt az 1.1. ábrán is láthattuk, főleg a galaxisunk sík-



1.12. ábra. Szín-fényesség diagram kb. 3,4 millió közeli forrásra az EDR3-ból. *Bal oldal:* CMD közvetlenül az EDR3 katalógus adataiból. *Jobb oldal:* ugyanaz, csak újraszámolt  $G_{BP}$  értékeket használva, miután figyelembe vették az 1.3.2. fejezetben ismertetett szisztematikát.  $G_{BP}$  értékek újraszámolásának módja nem publikus, a javasolt korrekciós eljárás 1.3.2.-ben van kifejtve. A Forrás: Riello et al. (2021).

jában helyezkednek el (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016). Ennek jelentős része atomi vagy molekuláris gáz (főleg hidrogén, hélium, illetve némi szén, nitrogén és oxigén) és mindösszesen 0,7%-nyi por (Misiriotis et al., 2006). A por mennyisége elsőre jelentéktelennek tűnhet, ám ha nem veszünk róla tudomást, méréseink és számításaink merően eltérhetnek a valóságtól. A csillagközi anyag földi észlelésekre gyakorolt hatásáról először 1930-ban számolt be részletesebben Robert Trümpler (Trümpler, 1930a,b), addig a csillagközi anyag figyelmen kívül hagyása például a távolságmérésben szisztematikusan nagyobb távolságokat eredményezett.

Csillagközi por alatt nanométerestől mikrométeres méretig terjedő, főleg szén, szilikát vagy vas szemcséket értünk. A poron keresztül haladó fénysugarak csillagközi fényelnyelést szenvednek, melynek következtében egy adott égitest (pl. egy csillag) észlelt fényessége csökken, színe pedig az eredetihez képest vörösebb lesz (Draine, 2003). Ezt nevezzük interstelláris extinkciónak, amely hullámhossz függő, hiszen a por részecskék nemcsak elnyelik a sugárzás egy részét, hanem szórják is, és mivel a méretük a kék fény hullámhossz tartományába esik, ezáltal a rövidebb hullámhosszú fénysugarakat (UV és kék) jobban szétszórják, mint a hosszabbakat (vörös, infravörös). A vörösödés jellemzésére az alábbi, ún. *színexcesszust*

használjuk:

$$E(B - V) = (B - V)_v - (B - V)_m$$

ahol a  $v$  indexű színindex a csillag valódi színindexe, az  $m$  indexű pedig a vörösödést szenvedett, megfigyelt színindex. A kettő különbsége adja a színexcesszust.

A csillagközi por legmarkánsabb megjelenési formái a Tejútrendszer síkján átívelő sűrű felhők. Fényszennyezés-mentes égbolt alatt szabad szemmel is feltűnő, ahogy a Tejút csillagok ezreivel teli lévő csíkját középen sötét porfelhők takarják el (pl. a Hattyú csillagképénél az *Északi szeneszsák*). A por feltérképezéséhez infravörös tartományban kell szemlélnünk az eget, hiszen a porszemcsék 3–500  $\mu\text{m}$ -en sugároznak (Draine, 2003). Mivel a földi légkör nem engedi át ezt a tartományt, az első átfogó vizsgálatokat az infravörös űrtávcsövek megfigyelései szolgáltatták. Ilyen volt például az IRAS, mely kimutatta, hogy a por egészen magas galaktikus szélességeig felnyúlik (ez a galaktikus cirrusz), illetve hogy a szerkezete fraktálszerű, vagyis erősen struktúrált több nagyságrenden át, akár ívperces méretskálákon is (Low et al., 1984). Ahhoz, hogy a csillagok extinkció- és vörösödés-korrigált fényességeit meghatározhassuk, kulcsfontosságú a csillagközi por eloszlásának feltérképezése. Az egyik legfontosabb globális portérkép az SFD (Schlegel, Finkbeiner és Davis) volt, mely az IRAS és COBE műholdak infravörös méréseiből határozta meg a por oszlopsűrűségét és hőmérsékletét, amiből teljes extinkciót lehetett számolni (Schlegel et al. (1998), illetve az újrakalibrált verzió: Schlafly & Finkbeiner (2011)). Ezek a térképek azonban nem veszik figyelembe azt, hogy a csillagok nem feltétlen helyezkednek el a teljes pormennyiség mögött, ami nem véletlen, hiszen a por távolságát is figyelembe vevő, 3D-s térképek elkészítése sokkal nehezebb. Egyik lehetséges módszer a csillagok fotometriai és asztrometriai adatainak modellezése. A Bayestar portérkép térbeli elemekre, ún. „voxelekre” (*volumetric pixel*) számol extinkció értékeket a Pan-STARRS, 2MASS és *Gaia* nagy égboltfelmérések adatai alapján, viszont a Pan-STARRS felmérés korlátai miatt ez csak az égbolt háromnegyedét fedi le. A fotometriai és asztrometriai adatok korlátai miatt pedig a térbeli felbontás is gyorsan csökken a Naptól távolodva (Green et al., 2014, 2019).

Mivel az infravörös portérképek, melyek általánosságban az extinkciós értékeket szolgáltatják a vörösödés korrigálására, nem elég nagy felbontásúak, hogy az egyes halmazok előtti néhány ívperces változásokat is lekövessék (még a fentebb felsoroltak sem), ezért egy alapos és homogén fotometriai felmérésre van szükségünk ezek tanulmányozásához. Erre biztosít egyedülálló lehetőséget a *Gaia* űrobszervatórium.

## 2. fejezet

# Szín-fényesség diagramok

A K2 misszió során észlelt, még redukálatlan halmazok közül jelen munka során az M9, M19 és NGC6293 gömbhalmazokon dolgoztam. Az egyes gömbhalmazok középpontjának, sajátmozgásának és parallaxisának értékeit a SIMBAD<sup>1</sup> adatbázisból kértem le, ezek a 2.1. táblázatban láthatóak. A halmazok középpontjának ismeretében aztán a *Gaia* archívum<sup>2</sup> EDR3 adatbázisából ADQL (Astronomical Data Query Language) nyelv segítségével lekértem az adott halmaz középpontjától 4-5 ívperc sugarú körben a csillagokat. A lekért terület sugarát szemmel, az Aladin Lite<sup>3</sup> online, interaktív égbolt atlasz Pan-STARRS képeinek segítségével választottam ki: elsődleges célom az volt, hogy a halmaz sűrűbb részeit lefedjem, a legkülsőbb részeket azonban, ahol potenciálisan több előtér- és háttércsillag lehet, inkább levágtam. Összesen 21 mennyiség volt számomra érdekes: Gaia azonosító (ID), rektaszcenzió ( $\alpha$ ), deklináció ( $\delta$ ), sajátmozgás  $\alpha$ - és  $\delta$ -komponensei ( $\mu_\alpha$ ,  $\mu_\delta$ ), parallaxis ( $\varpi$ ) és hibája,  $G$ ,  $G_{BP}$  és  $G_{RP}$  magnitúdók, fluxusok és hibák,  $G_{BP} - G_{RP}$  színindex, színtöbblet faktor (`phot_bp_rp_color_excess`) és a fotometriai feldolgozás minősége (`phot_proc_mode`).

A galaxisunk központi dudorának vidékén két fő nehézséggel találjuk szembe magunkat: a nagy csillagsűrűséggel, valamint a centrumban található jelentős pormennyiséggel. Éppen ezért, ha egy gömbhalmaz középpontja körül adott sugáron belül lekérjük a csillagokat és kirajzoljuk a szín-fényesség diagramjukat, az ábrán megjelenő ponthalmaz első ránézésre olykor csak nyomokban tartalmazza egy klasszikus gömbhalmaz CMD részeit. Erre láthatunk egy példát a 2.1. ábrán, ahol a vizsgált halmazaim középpontja körül lekért csillagok CMD-je látható. Ahhoz, hogy tisztább képet kaphassunk, két megközelítést kell alkalmazhatunk: először a halmaz sajátmozgásának ismeretében halmaztagság vizsgálatot kell tartani, majd ezután a por által okozott vörösödést feltérképezni, hogy az extinkció miatt elkent CMD

---

<sup>1</sup><http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

<sup>2</sup><https://gea.esac.esa.int/archive/>

<sup>3</sup><https://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/>

ágakat az elvárásoknak megfelelően összébb tudjam húzni.

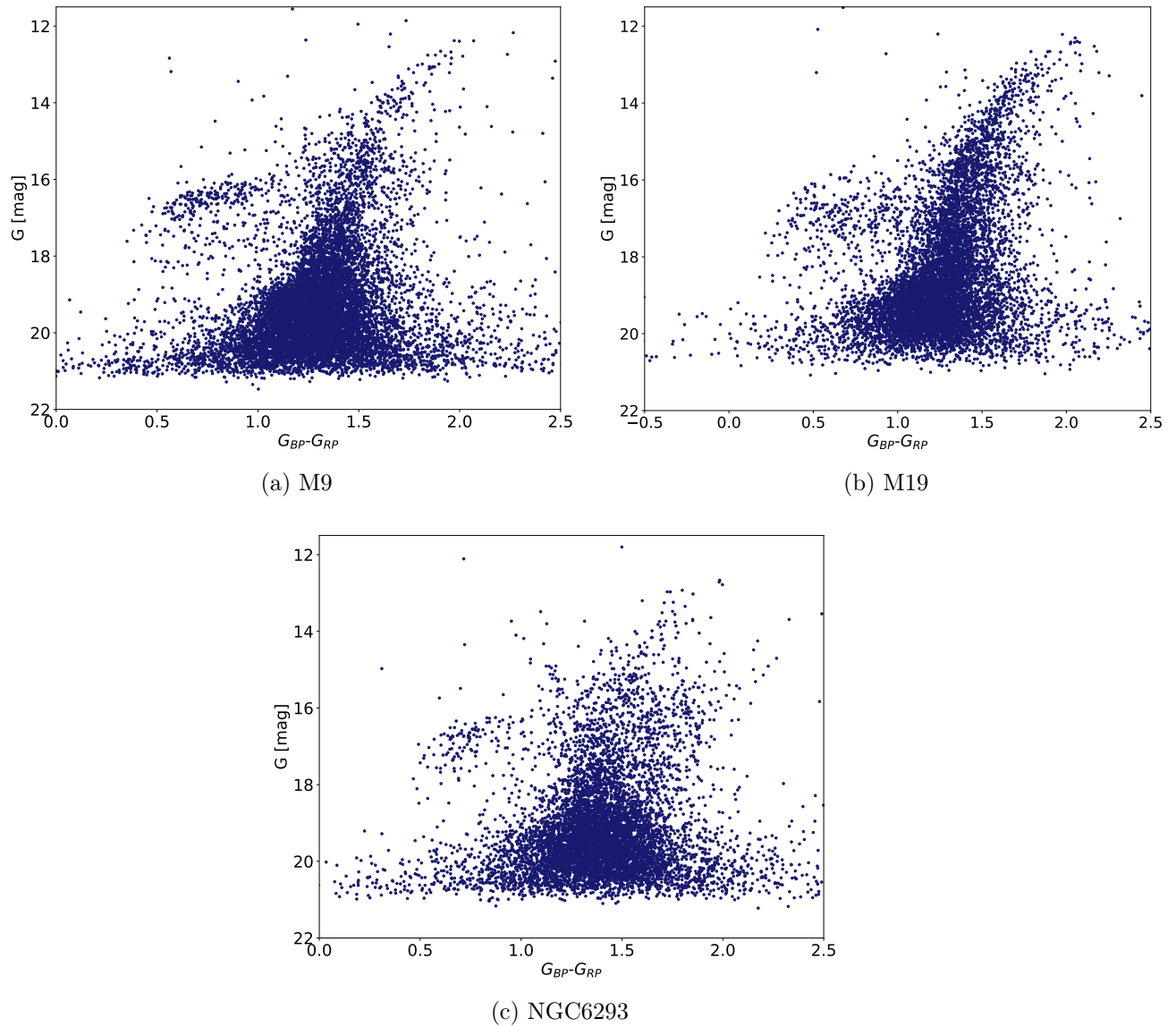
| Gömbhalmaz | $\alpha$ [fok] | $\delta$ [fok] | $\mu_\alpha$ [mas/év] | $\mu_\delta$ [mas/év] | $\varpi$ [mas] |
|------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| M9         | 259,79908      | -18,51625      | -2,21                 | -3,21                 | 0,1117         |
| M19        | 255,65704      | -26,26794      | -3,23                 | 1.66                  | 0,0935         |
| NGC6293    | 257,54342      | -26,58172      | 0.87                  | -4.31                 | 0,0891         |

Forrás: SIMBAD adatbázis.

2.1. táblázat. A vizsgált gömbhalmazok alapadatai. Az  $\alpha$  és  $\delta$  a halmaz középpontjának égi koordinátáit (rektaszcenzió és deklináció), a  $\mu_\alpha$  és  $\mu_\delta$  a halmaz sajátmozgásának  $\alpha$ - és  $\delta$  irányú komponenseit, a  $\varpi$  pedig a halmaz parallaxisát jelöli. A *mas* mennyiség milliívmásodpercet jelöl.

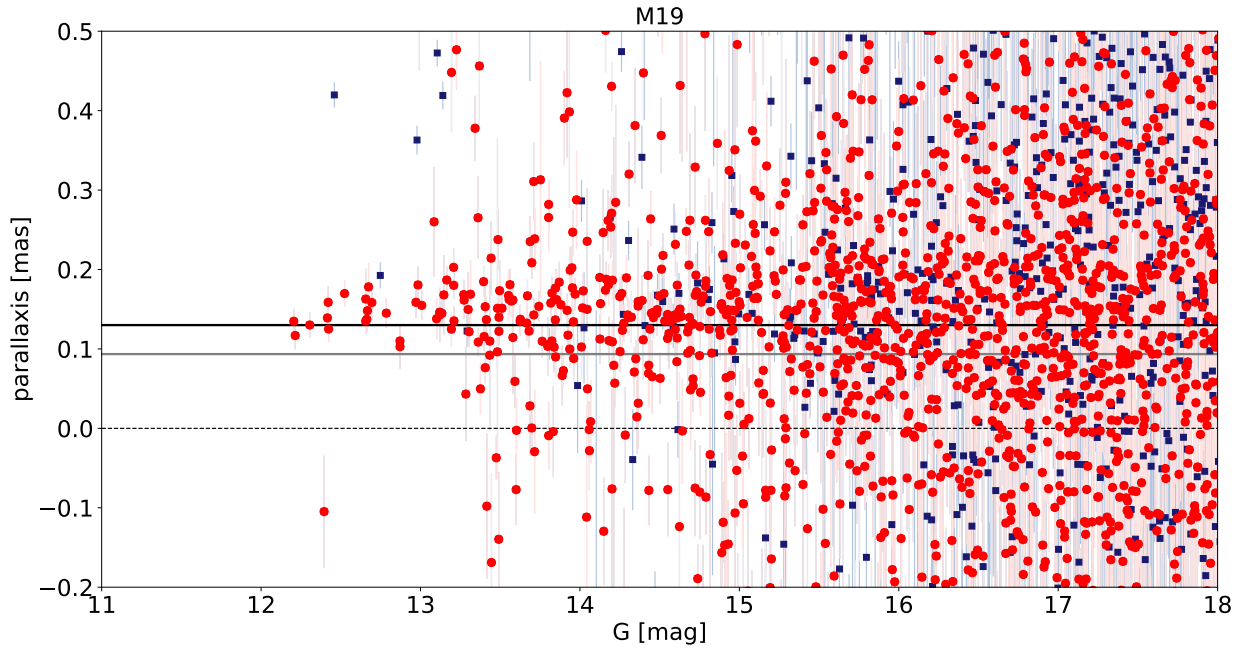
## 2.1. Halmaztagság vizsgálat

A *Gaia* EDR3 adatokat szemlélve öt olyan mennyiség van, mely segítségünkre lehet a gömbhalmazok csillagainak kiválogatásában az előtér- és háttércsillagok közül:  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\mu_\alpha$ ,  $\mu_\delta$ , és  $\varpi$ . Adná magát a gondolat, hogy végezzünk szűrést parallaxis alapján, hiszen a halmazhoz tartozó csillagok egy adott parallaxis-érték körül kellene csoportosuljanak. A halmaz csillagai azonban túlságosan halványak és távol vannak, ezért a gyakorlatban ez mégsem használható: míg a legfényesebb csillagok statisztikailag még valamennyire visszaadhatják a halmazt, a parallaxis pontossága erősen skálázódik a fényességgel, a halmaz döntő többsége pedig túl halvány ehhez, illetve az irodalmi parallaxis értékek körül is maradtak még tisztázatlan kérdések (Baumgardt & Vasiliev, 2021). Ennek szemléltetése a 2.2. ábrán látható: a folytonos vonalak jelölik a halmaz irodalmi parallaxisait, a piros pontok a sajátmozgás szűrés során kapott halmaztagokat, a kék négyzetek pedig az előtér- és háttércsillagokat. Látható, hogy nem ritka például az sem, hogy a csillagokra negatív parallaxist kapunk (ennek okairól, és a *Gaia* parallaxisok használatáról bővebben: Luri et al. (2018)). Az ábra elkészítéséhez a Lindgren et al. (2021b) cikkben részletezettek alapján, a `gaiadr3-zeropoint` python package segítségével kiszámoltam az egyes csillagok zéruspont értékeit, amivel aztán korrigáltam a parallaxis értékeket. Erre azért van szükség, mert a kvazár mérések alapján a parallaxisuk eloszlásának csúcsa nem pont a nullában van, hanem átlagosan 0,029 milliívmásodperccel arrébb a negatív tartományban (Groenewegen, 2021). Ez az ún. *offset* érték megjelenik az egyes csillagoknál is, és függ az égi pozíciótól, a fényességtől és a színtől. Így az ezzel kapcsolatos paraméterek ( $G$  magnitúdó,  $\lambda$  ekliptikai hosszúság, `astrometric_params_solved`,



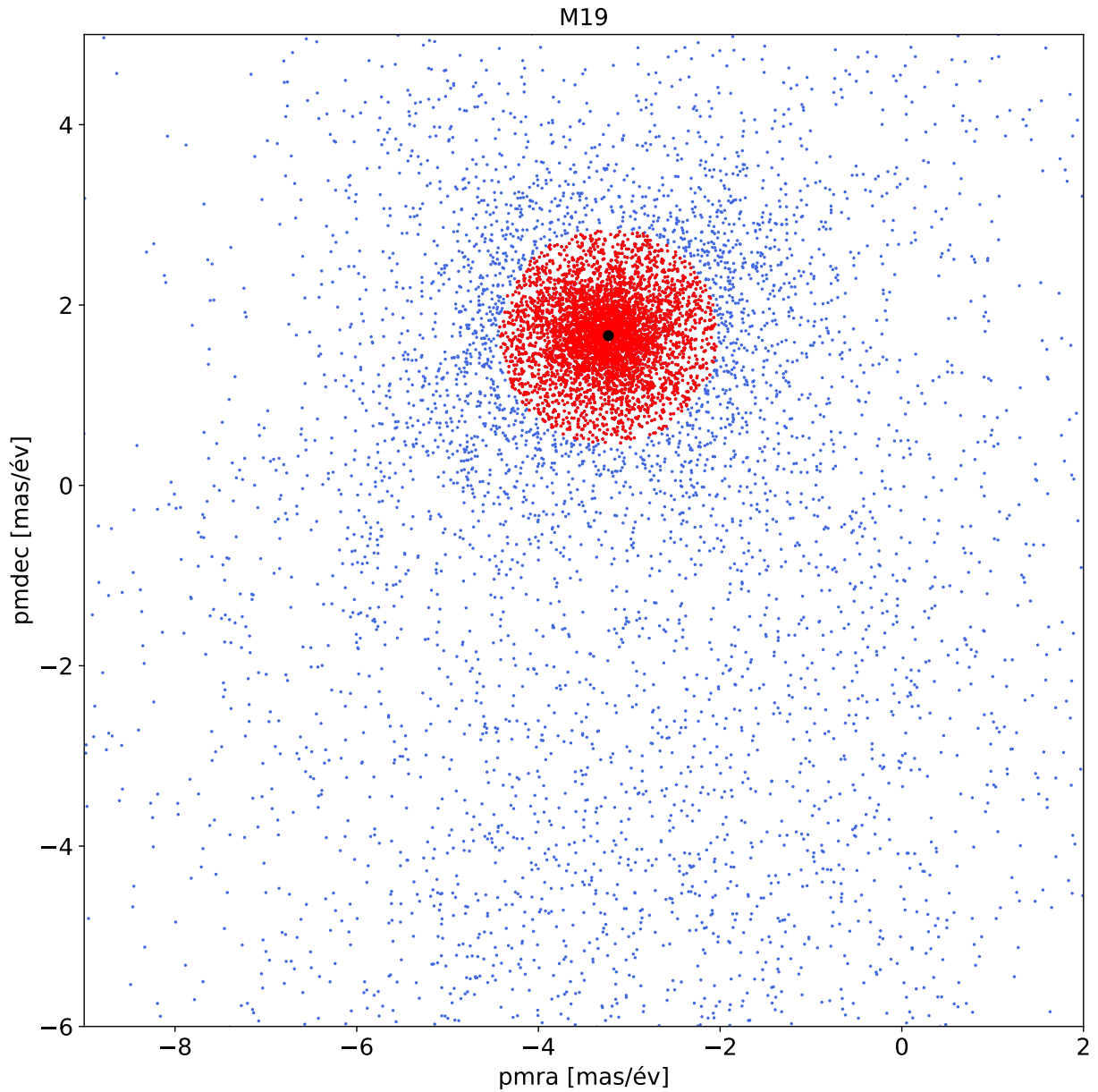
2.1. ábra. A vizsgált halmazok középpontja körül lekért csillagokból kirajzolt nyers szín-fényesség diagramok.

`nu_eff_used_in_astrometry` és `pseudocolour`) alapján lehet az egyes csillagokra meghatározni. Végül tehát egyedül a sajátmozgás komponensek alapján szűrtem meg a csillagokat, hiszen az égi koordinátákat a *Gaia* lekérésnél már eleve figyelembe vettem. A várakozásoknak megfelelően, ha felrajzoltam a lekért terület sajátmozgás diagramját, akkor a halmaz tagjai egy adott érték (a halmaz sajátmozgása) körül csoportosultak. Ahhoz, hogy eldöntsem, hol vágjam meg az adatsort, mit tekintsek még halmaztagnak és mit már nem, kirajzoltam a halmaz sajátmozgásától számított sajátmozgás szerinti „radiális profilt”.



2.2. ábra. Az M19 gömbhalmaz körül 4 ívperc sugarán belül lekért csillagok  $\varpi$  parallaxisa a  $G$  fényesség függvényében. A halmaztagok piros, az elő- és háttércsillagok kék pontokkal láthatóak. A szaggatott vonal a nullát, a folytonos vonalak az irodalmi értékeket jelölik. A folytonos szürke vonal a SIMBAD adatbázisból elérhető érték (Shao & Li (2019) cikke alapján), a folytonos fekete vonal pedig a jelenlegi egyik legfrissebb, *Gaia* EDR3 adatokon alapuló érték (Baumgardt & Vasiliev, 2021). A  $mas$  mennyiség milliívmásodpercet jelöl.

Először vettem a halmaz sajátmozgásának értéke körül egy tetszőlegesen nagy sugarú kört. A körterület mérete nem számított, csak az, hogy kellően nagy legyen, hogy már szemmel láthatóan magába foglaljon számos nem halmaztagot is. Ezt követően felosztottam ennek a körnek a sugarát sugárirány mentén 15 részre, hogy ennyi koncentrikus kört kapjak (ezzel kellően sima profilt kapok). Az egyes körvonalak által közrefogott körgyűrűkben (a legbelső esetén a körön belül) megszámoltam a csillagokat, majd ezt az értéket normáltam az adott területtel. Ezeket ábrázolva a körgyűrű binek függvényében kirajzolódott, hogyan változik a csillagok száma, ha egyre messzebb és messzebb megyünk a halmaz sajátmozgásának értékétől. Minden esetben annál a sugárnál vágtam meg az adatsort, ahol ez a profil is levágott, és innentől kezdve csak ezekkel a csillagokkal dolgoztam tovább. A fentebb leírtakra láthatunk egy példát az M19-es gömbhalmazzal. A 2.3. ábrán a halmaz sajátmozgás diagramjának részlete látható, kék pontokkal jelölve a középponttól 4 ívpercen belül lekért csillagok sajátmozgásait. A 2.4. ábra alapján a sajátmozgás térben a halmaz sajátmozgásától számított 1,44 mas/év sugáron kívül már több mezőcsillag adódna hozzá a mintához, mint halmaztag. A 2.3. ábra piros csillagai jelölik a 1,44 mas/év sugáron belüli, halmaztagként azonosított csillagokat.

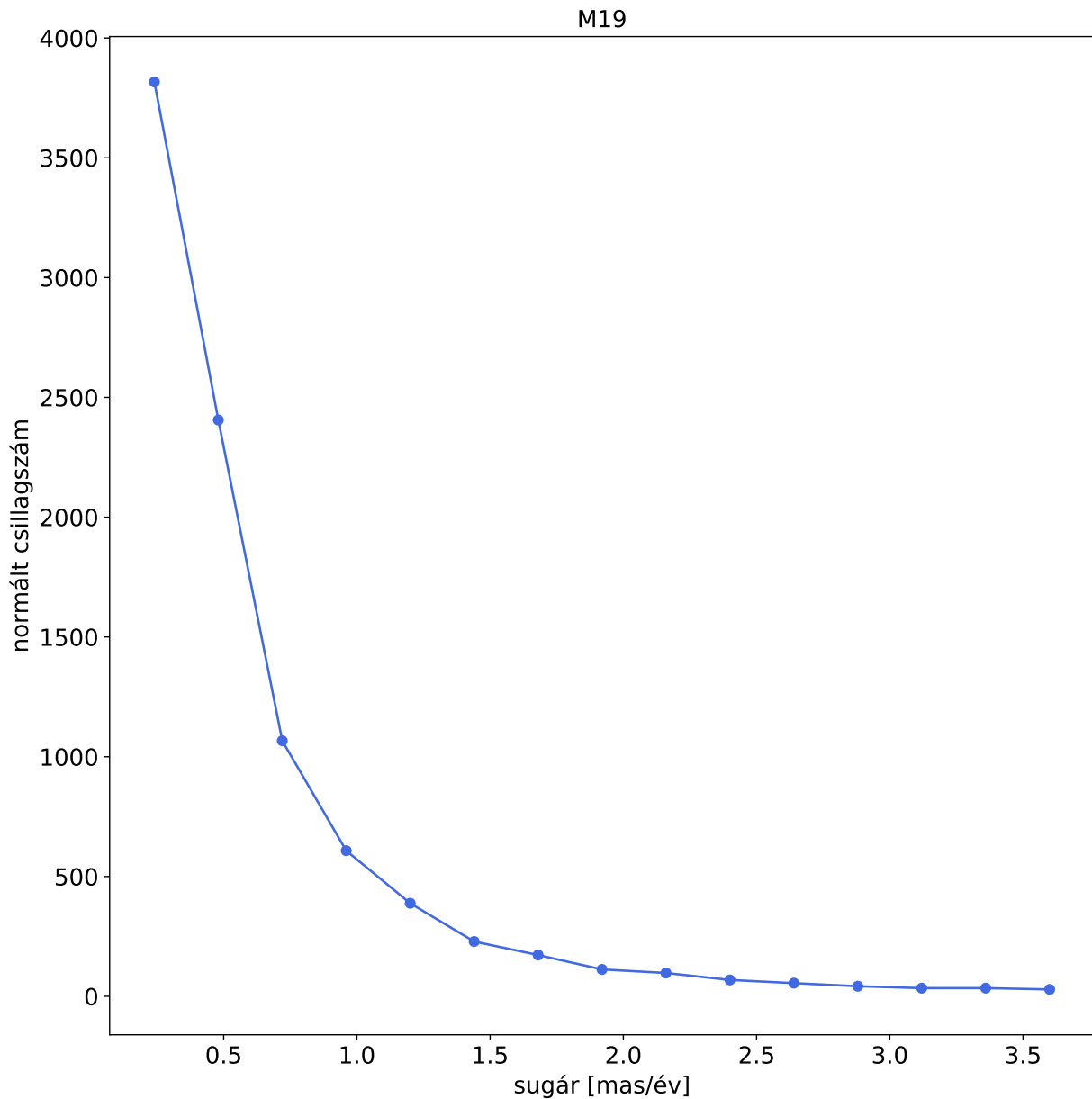


2.3. ábra. Az M19 gömbhalmaz középpontjától 4 ívpercen belül lekért csillagok sajátmozgás diagramjának részlete. A fekete pont a halmaz irodalmi sajátmozgása, a pirossal ábrázolt csillagok pedig azokat jelölik, amiket sajátmozgás alapján a halmazhoz tartozónak tekintek.

## 2.2. Vágás $G_{BP}$ alapján

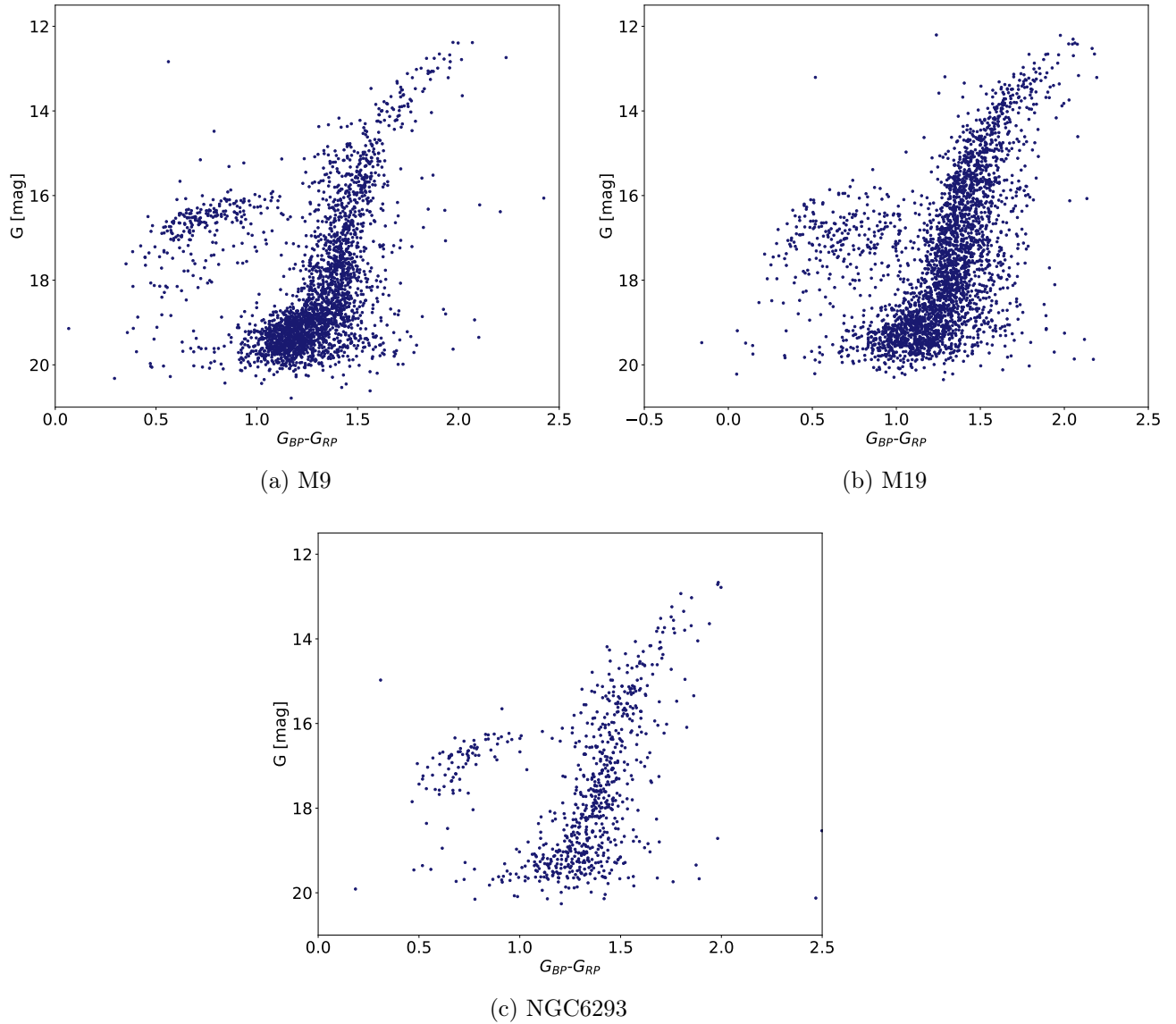
A Riello et al. (2021) cikkben javasoltak alapján a munkám során az alábbi vágást alkalmaztam, hogy elkerüljem a nagyon halvány csillagok kék fluxusában jelentkező kalibrációs problémákat:

$$G_{BP} \leq 20,3 \text{ mag}$$



2.4. ábra. Az M19 gömbhalmaz sajátmozgás diagramján, a halmaz sajátmozgás értékétől vett radiális profil. A halmaztagokat ez alapján szűrtem meg, azon csillagokat vettem a halmazhoz tartozónak, melyek a 6. körvonalon belül, azaz az irodalmi értéktől 1,44 mas/év sugáron belül helyezkedtek el.

Ez a  $G$  és  $G_{BP} - G_{RP}$  síkon egy kis hajlásszögű egyenes vágást jelent, melynek következtében maga a CMD vége is 20,3 magnitúdó körül megáll, illetve a lefordulási pont környéke sokkal letisztultabbá válik. A vizsgált halmazaim sajátmozgás- és  $G_{BP}$  alapú vágása utáni CMD-i az 2.16. ábrákon láthatóak.

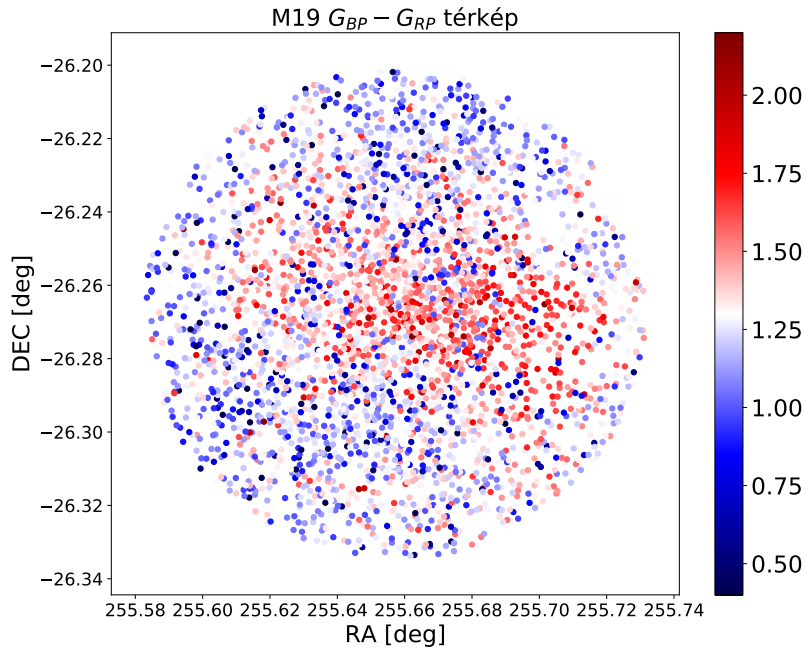


2.5. ábra. A vizsgált halmazok sajátmozgás és  $G_{BP}$  alapú vágása utáni szín-fényesség diagramjai.

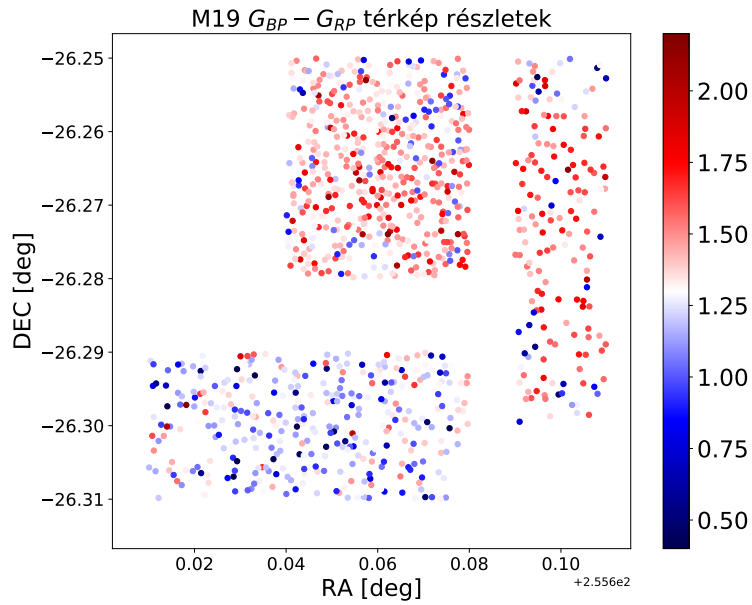
### 2.3. Színtérképek

Nézzük meg, hogy néz ki a halmazok sajátmozgás- és  $G_{BP}$  vágások utáni színtérképe! A 3.2. ábrán az M19 gömbhalmaz csillagai láthatóak RA-DEC szerint, ahol az egyes pontok színe az adott csillag  $G_{BP} - G_{RP}$  értékétől függ. A választott színsáv kékből hajlik vörösbe, ahol a semleges színnek (fehér) az adott CMD vörös óriásága közel függőleges szakaszának színindexét vettem: ehhez képest definiálom a vörösebb-kékebb tartományokat. A kapott színtérképen azonnal szemünkbe ötlenek különböző tartományok.

A halmaz jobb szélénél ( $\alpha \sim 255, 71^\circ$ ) a csillagok szisztematikusan vörösebbnek tűnnek,



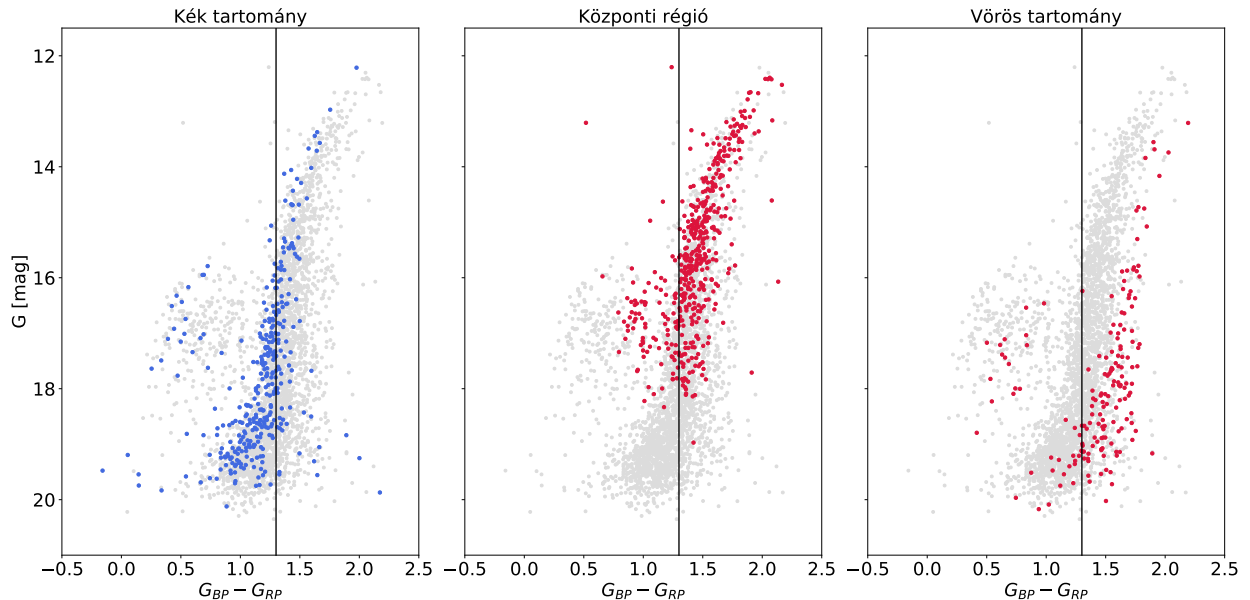
2.6. ábra. Az M19 gömbhalmaz csillagai égi koordináta szerint, ahol a színekódolás az adott csillag *Gaia*  $G_{BP} - G_{RP}$  színindexére utal. A kékebb-vörösek színtartományok a CMD közel függőleges vörös óriáságához vannak viszonyítva.



2.7. ábra. Az M19 gömbhalmaz bizonyos (szövegben részletezett) csillagai égi koordináta szerint, ahol a színekódolás az adott csillag *Gaia*  $G_{BP} - G_{RP}$  színindexére utal. A kékebb-vörösek színtartományok a CMD közel függőleges vörös óriáságához vannak viszonyítva.

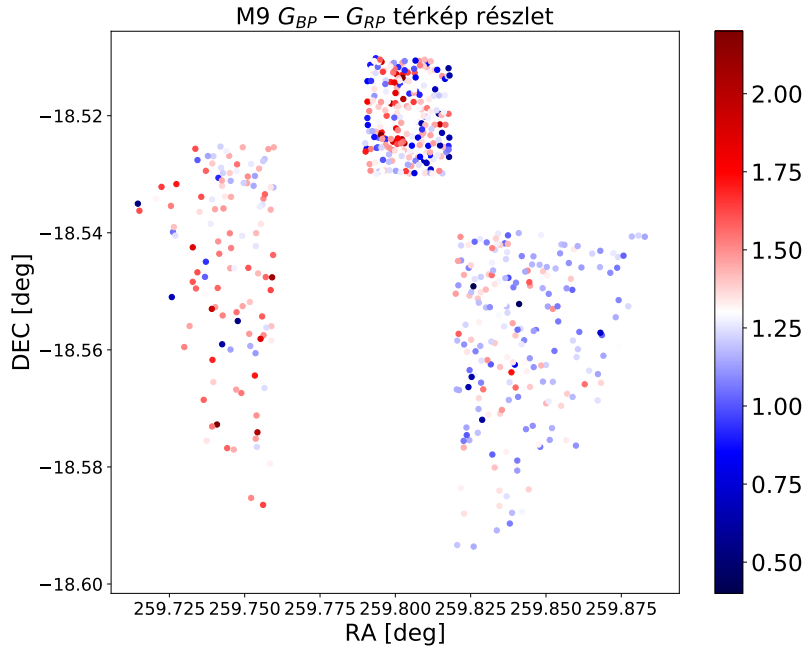
míg a halmaz alsó ( $\delta \sim -26, 31^\circ$ ) szelete egyenletesen kékebbnek. A halmaz harmadik érdekes része a központi régió, mely szintén inkább vörösnek tűnik. A legbelsőbb régió azért is érdekes, mivel ez a gömbhalmaz legsűrűbb része, ahol felmerülhet a kérdés, hogy vajon a *Gaia* mit és mennyire képes látni belőle. Annak érdekében, hogy teljesebb képet kapjak, mik állhatnak az egyes területek színbeli eltérése mögött, kirajzoltam a 2.7. ábrán definiált három tartomány szín-fényesség diagramjait.

A 2.8. ábra bal oldalán a *kék tartomány*, a középső részen a *központi régió*, a jobb oldali részen pedig a halmaz *vörös szélének* egy-egy rész-CMD-je látható. Ami azonnal feltűnik, hogy a *kék tartomány* csillagaiból kirajzolt ábra egy sokkal letisztultabb, keskenyebb CMD-t tár elénk. Az egyes képeken behúzott fekete vonalak a bal oldali ábra vörös óriáságának közel függőleges részéhez vannak igazítva, hogy könnyebb legyen összehasonlítani az egyes CMD-ket. A *központi régió* CMD-je azt mutatja, hogy a *Gaia* csak a legfényesebb ( $G \gtrsim 18$  mag) vörös óriáscsillagokat látja, melyek azonban a kékebb részhez képest kicsit, de láthatóan ( $\sim 0,15$  mag) el vannak vörösödve. Végül a jobb oldali részen jól kivehető az is, hogy a *vörös szélet* csillagai a *kék tartomány* csillagaihoz képest jelentősen el vannak vörösödve ( $\sim 0,3$  mag), viszont emellett megjegyzendő, hogy önmagában ez a CMD is sokkal letisztultabb képet fest, mint ha a halmaz teljes területéről vett halmaztagok CMD-jét vizsgálnánk. Ebből már egyértelműen látszik az, hogy a halmaz elé inhomogén módon belóg egy porfelhő, mely ezáltal a halmaz különböző pontjain a csillagok különböző mértékű vörösödését okozza.



2.8. ábra. A 2.7. ábrán jelölt 3 tartomány szín-fényesség diagramjai. Az egyes ábrákon a szürke **pontok** a teljes terület CMD-je.

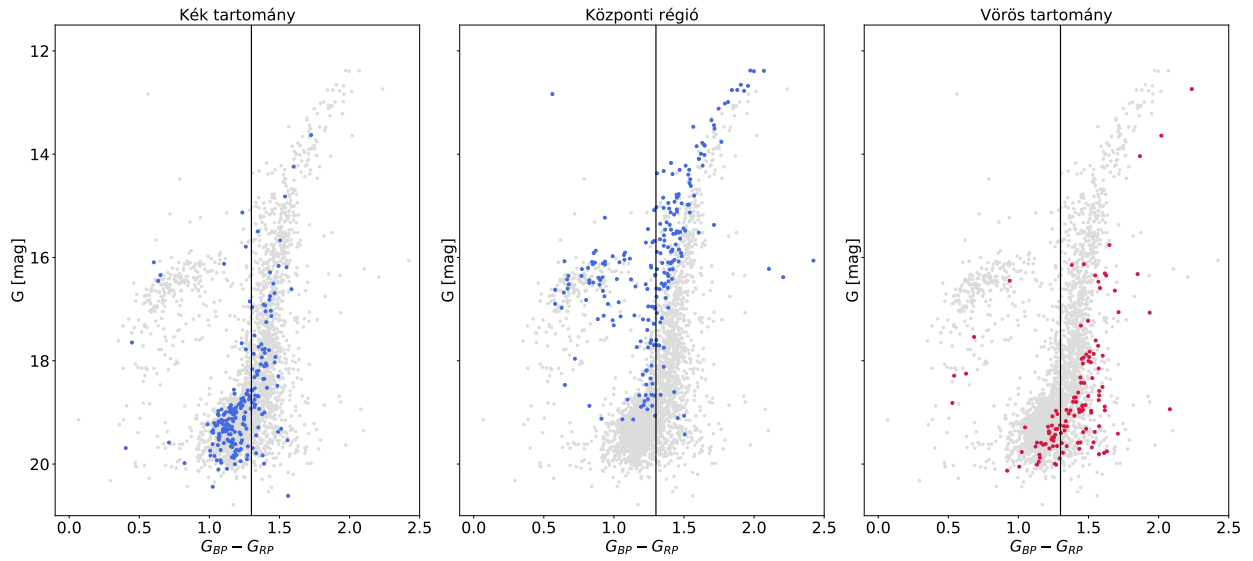
Hasonló célból vettem szemügyre az M9 halmaz színtérképét is. A 2.9. ábrán látható módon szintén három tartományt különböztettem meg: a *központi régió* mellett a halmaz jobb alsó szélénél ( $\alpha \sim 259,85$  fok) egy *kék tartományt*, a bal alsó szélénél ( $\alpha \sim 259,74$  fok) pedig egy *vörös tartományt*. Az egyes régiók szín-fényesség diagramjai a 2.10. ábrán láthatóak, ahol a fekete függőleges vonal jelen esetben a központi régió CMD-jének vörös óriáságához van igazítva, melyről érdemes megemlíteni, hogy az ábra alapján a halmaz egyik legkevésbé elvörösödött része. Mivel az M9 egy kisebb halmaz, mint az M19, így egységnyi tartományon belül kevesebb csillagot találunk, emiatt a kapott rész CMD-k kevesebb csillagot tartalmaznak. Ettől függetlenül az itt is jól láthatóan kirajzolódik előttünk, hogy a különböző színű területek CMD-i egymáshoz képest el vannak tolva, illetve a középpontban a *Gaia* itt is főleg a fényesebb vörös óriáscsillagokat tudta megfigyelni.



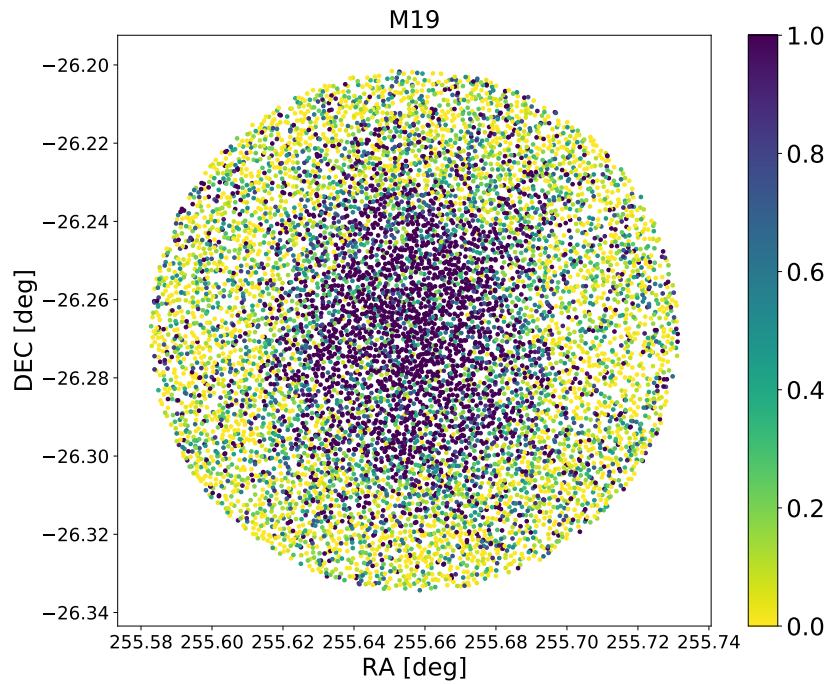
2.9. ábra. Az M9 gömbhalmaz bizonyos (szövegben részletezett) csillagai égi koordináta szerint, ahol a színkódolás az adott csillag *Gaia* színindexére utal. A kékebb-vörösek színtartományok a CMD közel függőleges vörös óriáságához vannak viszonyítva.

## 2.4. Vágás a korrigált színtöbblet faktor alapján

Az 1.3.1 fejezetben bevezetett  $C^*$  érték nem érhető el közvetlenül az EDR3 adatbázisból, azt a fentebb leírt, Riello et al. (2021) cikk által megadott módszer alapján saját magam számoltam ki minden csillagra, amit vizsgáltam. A 2.11. ábrán az M19 esetén láthatóak a



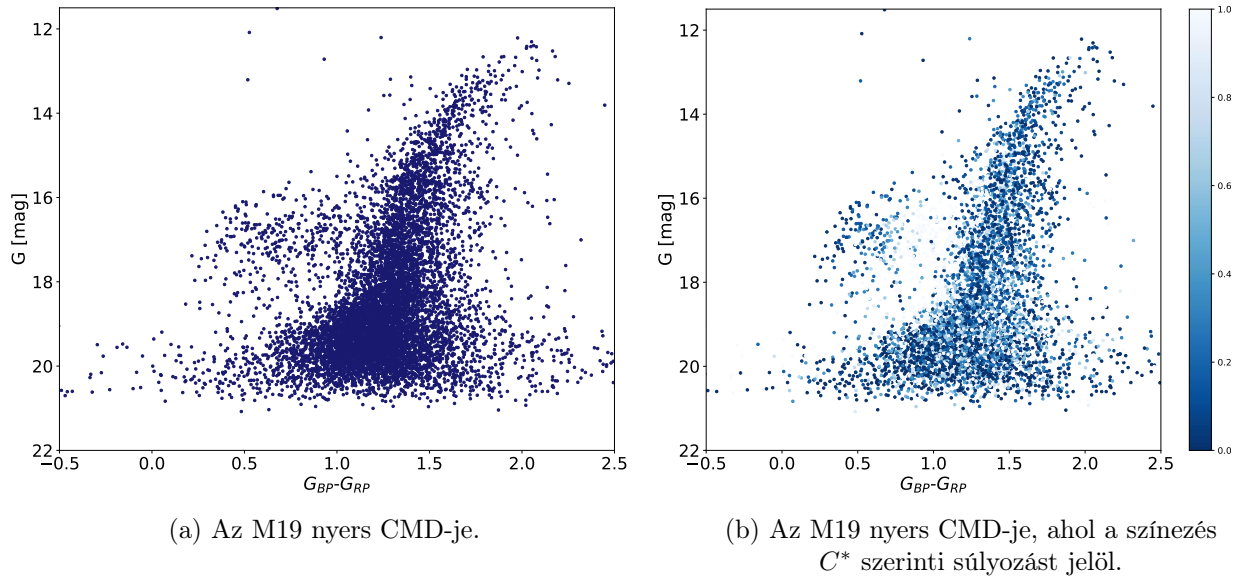
2.10. ábra. A 2.9. ábrán jelölt 3 tartomány szín-fényesség diagramjai az M9-re.



2.11. ábra. Az M19 gömbhalmaz csillagainak RA-DEC szerinti ábrázolása, ahol a színkód az adott csillagra számolt  $C^*$  értéket jelöli.

lekért terület csillagai, ahol a színkódolás a  $C^*$  értékére utal (mely most a jobb láthatóság kedvéért csak a 0–1 közötti értékeket mutatja).

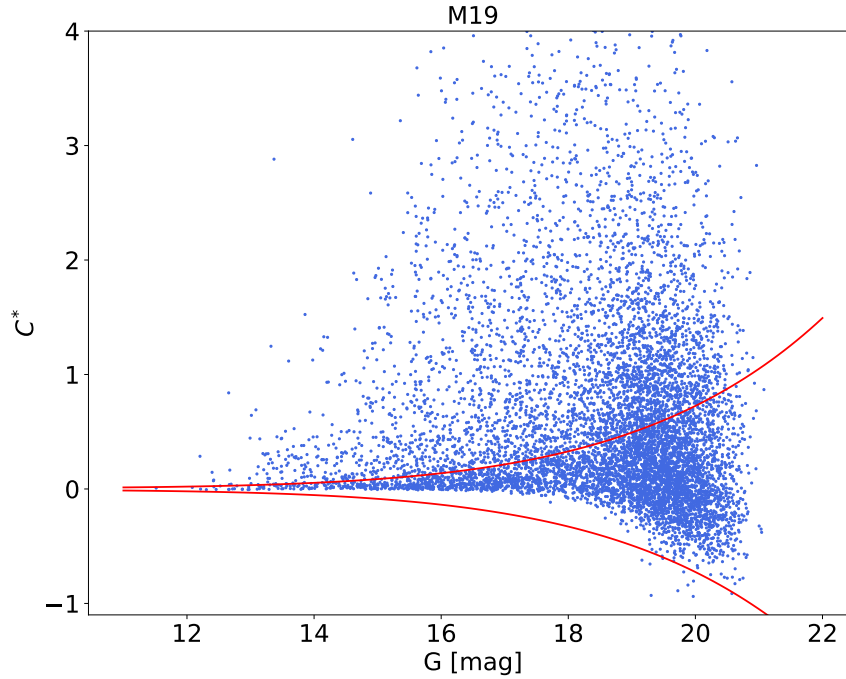
Ami egyértelműen látszik, hogy a gömbhalmaz legbelsőbb régiójában döntő többségében magas  $C^*$  értékek találhatók, ennek oka valószínűleg a nagy csillagsűrűség. Felmerül a



2.12. ábra. A  $C^*$  faktor hatásának vizsgálata az M19 nyers CMD-jének segítségével.

kérdés: vajon érdemes-e  $C^*$  alapján is szűrni az adatsort, és ha igen, akkor hogyan? Először vizuális alapon vizsgáltam, hogy látok-e jelentős javulást, ha figyelembe veszem ezt a faktort is. A 2.12. ábrákon egy-egy vágtatlan CMD látható. A különbséget az adja, hogy a jobb oldali ábrán annál sötétebb színű egy-egy pont, minél kisebb a  $C^*$  értéke. Mindenféle egyéb megkötés nélkül már így is jól látható, hogy a CMD minősége javul, hiszen a lefordulási pont környéke, vagy a horizontális ág és az óriáság közti szakasz is letisztultabban látszik.

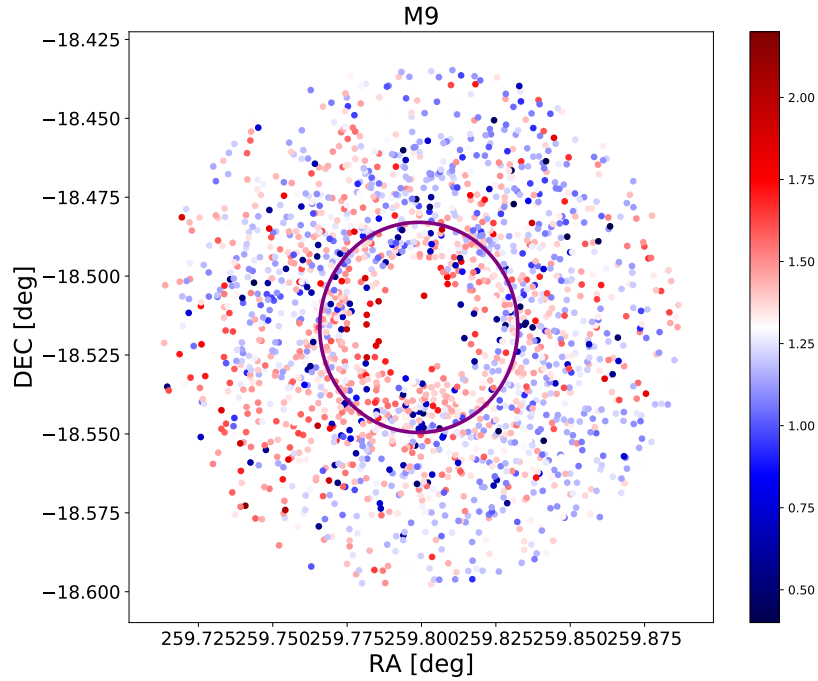
A 2.13 ábrán kékkel az M19 csillagainak  $C^*(G)$  függése, pirossal pedig a  $10\sigma$  határ látható. Összehasonlítva ezt az 1.11. ábrával, itt is azt látjuk, hogy az ideális mintához képest nagyobb  $C^*$  értékekkel dolgozom. Első közelítőben az ábrázolt  $10\sigma$  határoló vonalat választottam vágásnak, hogy ne dobjak ki túl sok csillagot. Ennek a vágásnak azonban lesz egy nem kívánt következménye is: elesnek azoktól a csillagoktól, melyek a halmaz központi részében helyezkednek el. A 2.14. ábrán pont egy ilyen vágás utáni, a közepén lyukas színtérkép látható. Ahogy a rész CMD-k vizsgálatakor már láttuk, a középpontban főleg a fényesebb ( $G \gtrsim 18$ ) csillagokat látjuk, a 2.15. ábrán pedig az is jól látszik, hogy ezen fényesebb csillagok jelentős része kívül esik a  $10\sigma$  határoló görbén. Ennek az ellensúlyozására, hogy ne veszítsem el teljesen a halmaz közepét, bevezettem egy feltételt a  $C^*$  vágásba: ha a halmaz külsőbb részén lévő csillagokról van szó, akkor a  $10\sigma$  görbe alapján vágok, ha azonban a belsőbb régió csillagairól, akkor  $C^* < 0,5$  vágást alkalmazok. Ennek a választásnak az oka az adatok és a  $C^*$  indikátor kapcsolatának empirikus feltérképezésén alapult. A vizsgálataim során nem találtam olyan vágási pontot, mely egyértelműen az optimális vágási pontnak bizonyult. Ha túl kicsi  $C^*$  értéket választottam, még mindig nem lett elég csillagom ahhoz, hogy egy



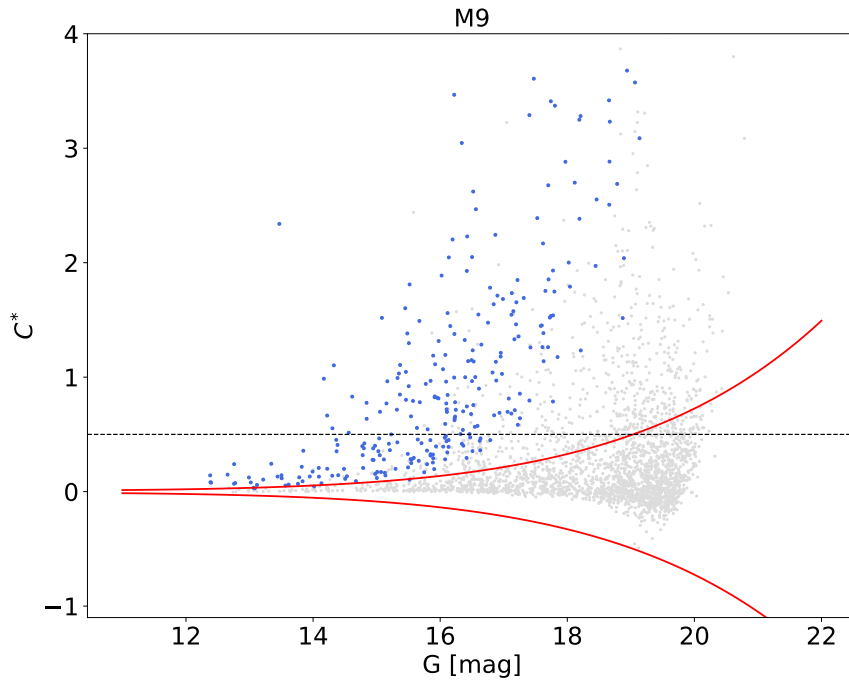
2.13. ábra. Az M19 gömbhalmaz csillagainak  $C^*(G)$  eloszlása, és a  $10\sigma_{C^*}$  vonalpár.

színtérképet alkossak belőlük, ha pedig túl nagyok választottam, akkor a CMD elkezdett zajosodni. A  $C^* = 0,5$  érték bizonyult egy olyan kompromisszumnak, ami már épp elegendő csillagot szolgáltat a további vizsgálatokhoz, de ki is zár számos, túl magas  $C^*$  értékekű csillagot is. Mindezek tükrében a 2.15. ábrát szemlélve azt is mondhatjuk, hogy ezzel a vágással tényleg elsősorban a megbízhatóbb, fényesebb csillagokat használom fel a további analízishez. Azt, hogy mit tekintek belső, illetve külső csillagnak, az alapján döntöttem el, hogy a 2.14. ábrán az adott gömbhalmaz RA-DEC radiális profiljában milyen sugár értéknél kezdődött a csillagszám csökkenése. A lila karika ezt a határt jelöli rajta.

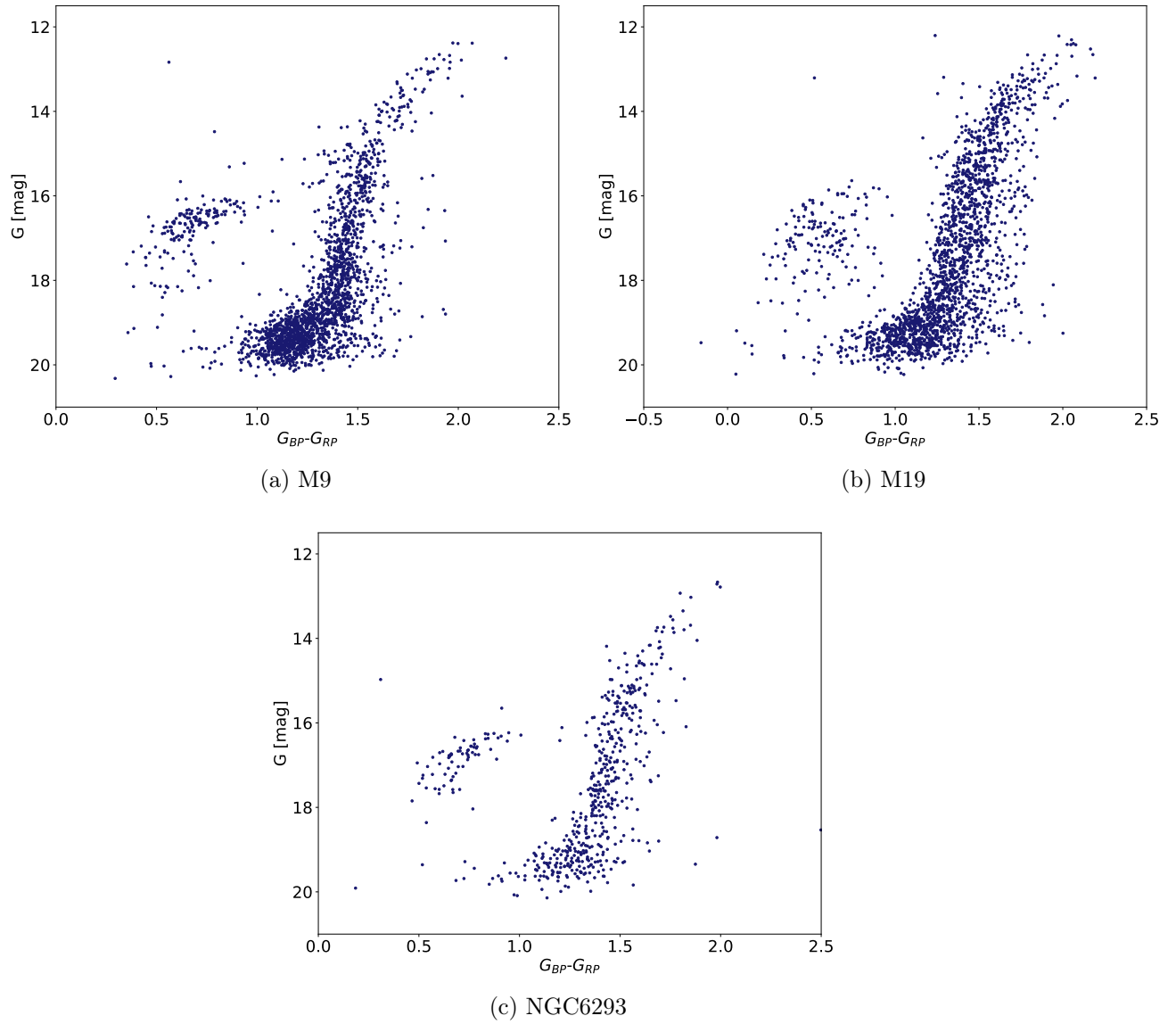
A fentebb ismertetett vágási módszert alkalmaztam mindhárom halmazra, így jutottam el végül a 2.16. ábrán látható sajátmozgás,  $G_{BP}$  és  $C^*$  alapú vágás utáni tisztított szín-fényesség diagramokhoz.



2.14. ábra. Az M9 gömbhalmaz színtérképe a  $C^* < 10\sigma$  vágás után. Az ábrán lévő lila karika jelöli azt a részt, ahonnan kezdve (a halmaz radiális profilja alapján) a csillagszám drasztikusan elkezd csökkenni.



2.15. ábra. Az M9 gömbhalmaz csillagainak  $C^*(G)$  eloszlása, késsel a 2.14. ábra lila karikáján belüli csillagok, szürkével a többi halmaztag. A piros vonalpár a  $10\sigma_{C^*}$  határoló görbe, a szaggatott fekete vonal a karikán belüli csillagok  $C^*$  vágási kritériuma.

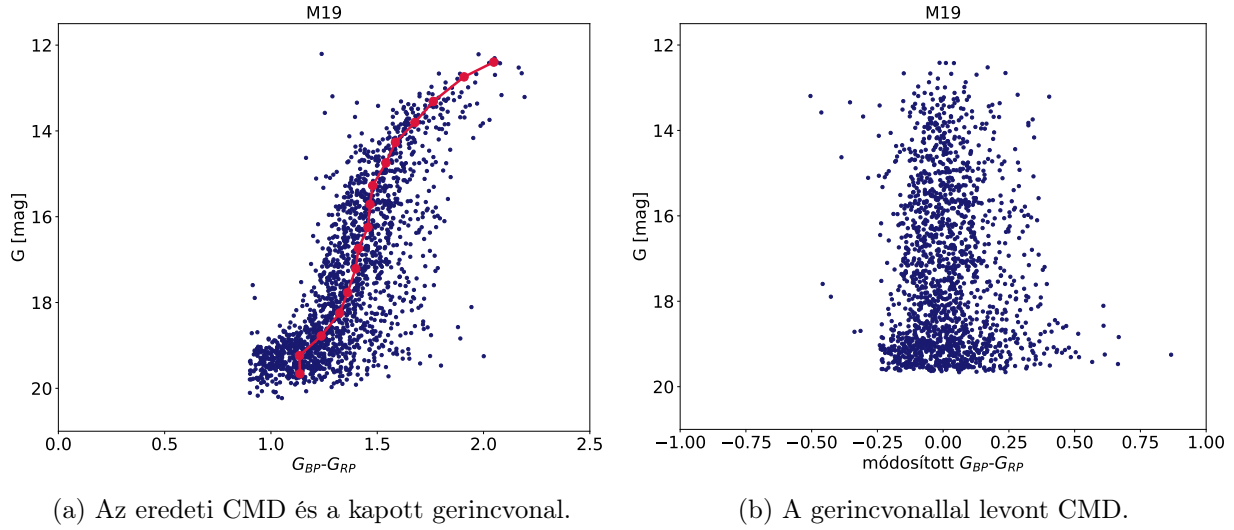


2.16. ábra. A vizsgált halmazok sajátmozgás,  $G_{BP}$  és  $C^*$  alapú vágása utáni végleges szín-fényesség diagramjai. A három halmaz közül a legdrámaibban az M19 esetében látszódik a változó mértékű vörösödés miatti CMD elkenődés.

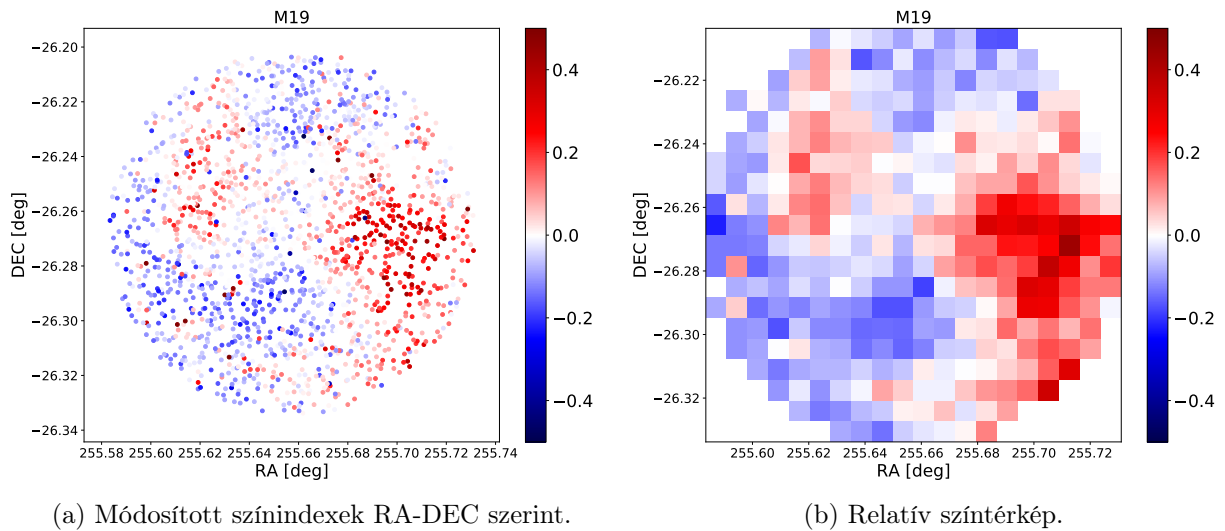
## 3. fejezet

# Relatív szintérképek

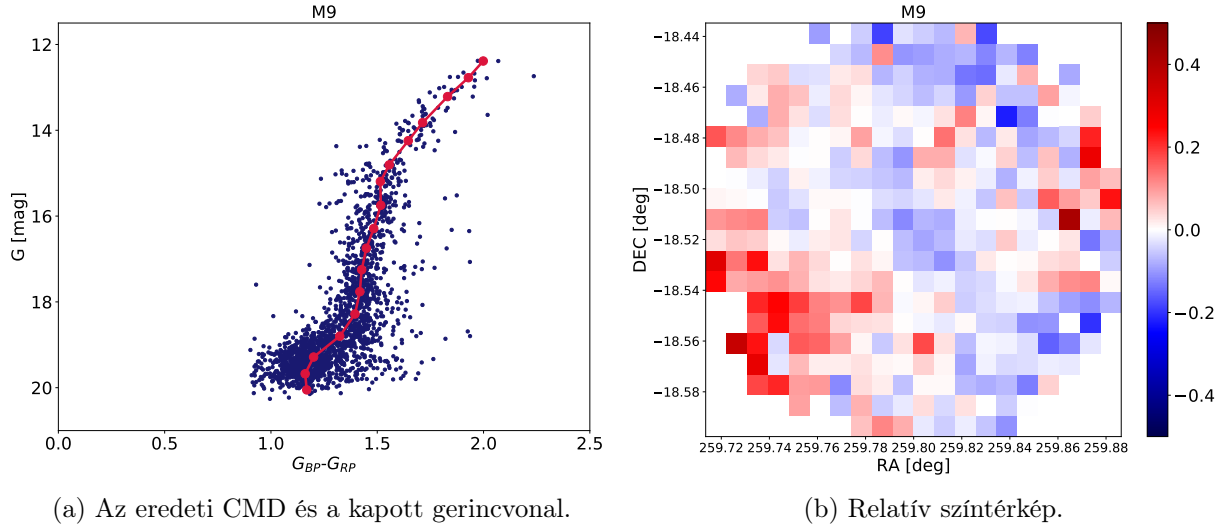
Ha csak a por okozta változó mértékű vörösödést akarjuk vizsgálni, ki kell iktatnunk a fejlődési állapotból fakadó szín különbségeket, tehát hogy egy csillag amiatt vörösebb, mert nem a fősorozaton, hanem a vörösóriás-ág tetején van. Ennek érdekében létrehoztam egy *gerincvonalat*, mely a fősorozattól kezdve az óriáság tetejéig leköveti a CMD alakát, majd ezt minden egyes CMD pontból levontam. Ehhez csak a CMD horizontális ág környékétől mentes részét használtam, amit  $G$  alapján 0,5 magnitúdónként vízszintesen felszeleteltem, majd minden ilyen  $\Delta G$  sávban vettem a medián értékeket. Az így létrehozott pontok közt lineáris interpolációval megkaptam végül a gerincvonalat (3.1.a ábra), melynek levonása után a kapott, módosított  $G_{BP} - G_{RP}$  értékeket már a por okozta vörösödés dominálja (3.1.b ábra). Hogy egyedi pontok színértékei (3.2.a ábra) helyett egy szintérképet kaphassak, felbontottam a RA-DEC koordinátákat 20x20 binre, melyeken belül vettem a pontok módosított színindexének mediánját. Ez a relatív szintérkép, mely a 3.1.b ábrán látható, egy relatív vörösödés térképet rajzol ki a halmaz előtt. Úgy tűnik, hogy a halmaz jobb szélébe ( $\alpha \sim 255,7 \pm 0,02^\circ$ ) erősen beleharap egy porfelhő, mely valamennyire keresztül halad a halmaz középpontján is, majd  $\alpha \sim 255,63^\circ$  és  $\delta \sim -26,24^\circ$  értékeknél egy újabb, kisebb porcsomóként tapasztalható.



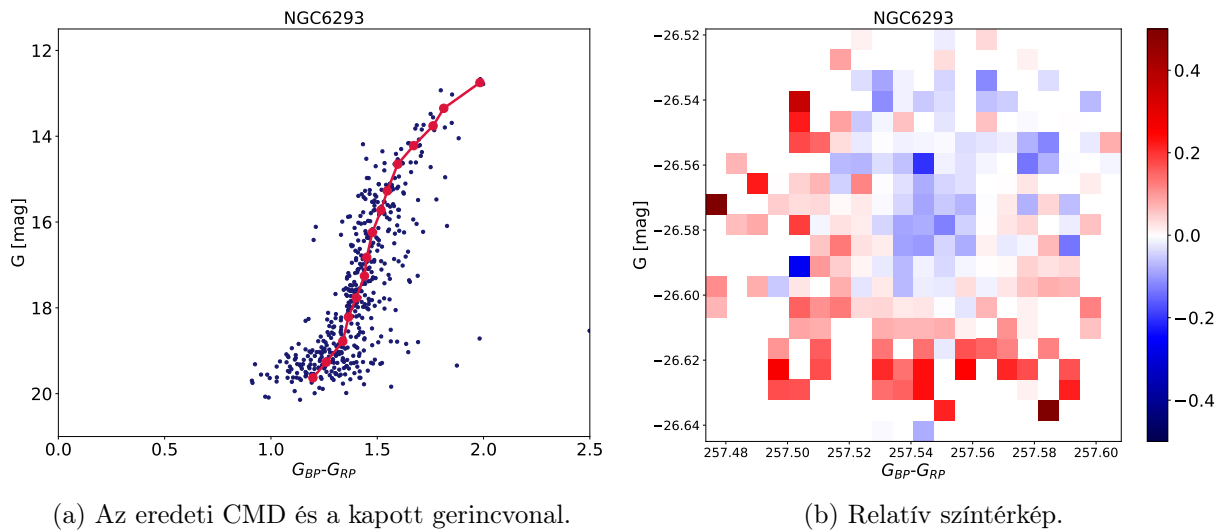
3.1. ábra. Gerincvonal levonás az M19 esetében.



3.2. ábra. Relatív szintérték létrehozása az M19 esetében. A színskala a gerincvonaltól való színindex-eltérést mutatja, magnitúdóban.



3.3. ábra. Relatív színtérkép létrehozása az M9 esetében. A színskála a gerincvonalról való színindex-eltérést mutatja, magnitúdóban.



3.4. ábra. Relatív színtérkép létrehozása az NGC6293 esetében. A színskála a gerincvonalról való színindex-eltérést mutatja, magnitúdóban.

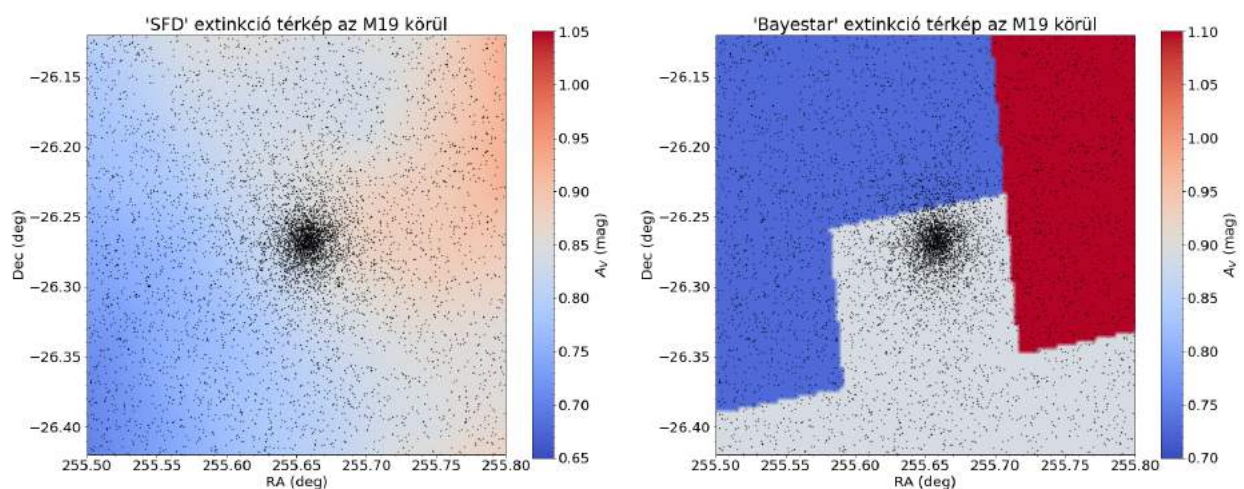
## 4. fejezet

# Összehasonlítás

Hogy az eredményeket értékelhessem, különböző, egymástól független módszerekkel kapott eredményeket és képeket kerestem, elsősorban az M19 halmazról.

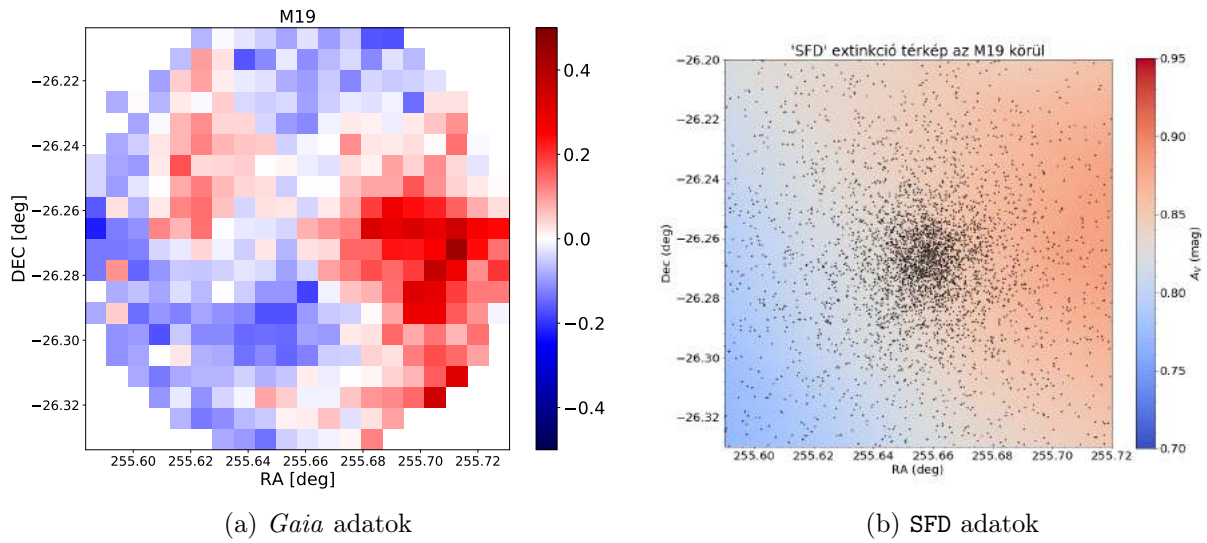
### 4.1. Extinkció térképekkel

Az első ötlet, ami adja magát az összehasonlításra, hogy ismert portérképekkel vessem össze a halmaz előtti vörösödést. Ehhez az `mw dust` python alapú szoftvert használtuk, melynek segítségével kétféle felmérés alapján is meghatároztuk az M19 környéki extinkció mértékét (Bovy et al., 2016). A kapott térképek az 4.1. ábrán láthatóak. A **Bayestar** pixelek (jobb oldalon) a gömbhalmazokkal összemérhető méretűek, míg az **SFD** térkép (bal oldalon) simább, de valójában egyik sem biztosít kellő felbontást annak felmérésére, hogy milyen skálán és mértékben változik a gömbhalmaz előtti extinkció.



4.1. ábra. Extinkció térképek az `mw dust` programmal létrehozva.

A 4.2. ábrán az általam kapott relatív szintértékép, és a 4.1. ábra SFD térképének egyforma skálára nagyított változata látható egymás mellett. Az SFD térképen pusztán annyi látszódik, hogy a halmaz nagyobb rektaszcenzióval rendelkező szélé vörösebb, míg az ellentétes kékebb, ám a kettő közötti finomabb struktúrák, ha vannak is, ahogyan azt a szintértéképem mutatja, nem kivehetőek.

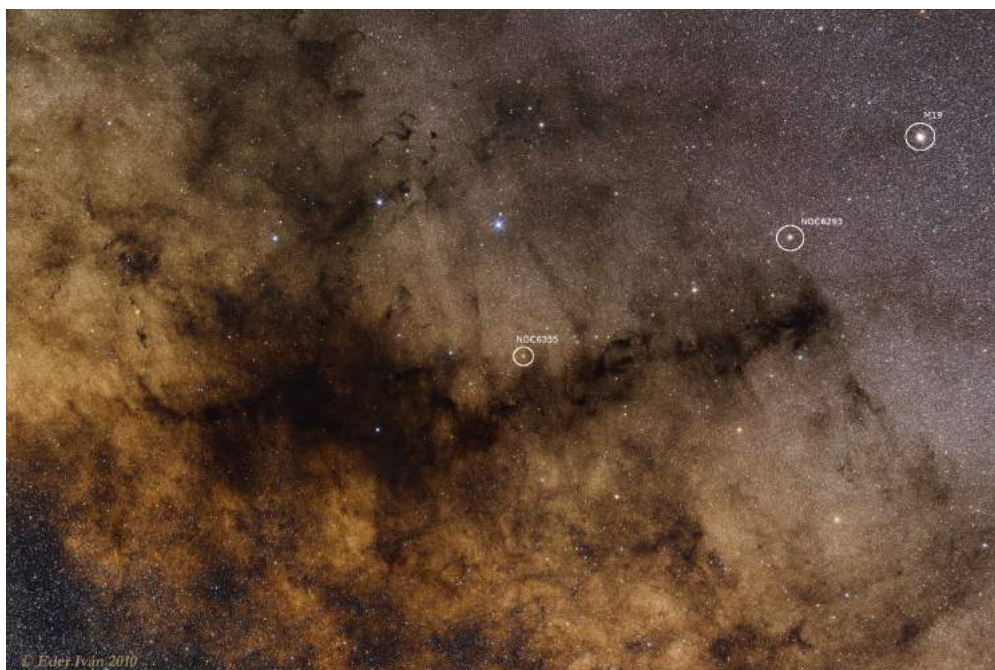


4.2. ábra. Az *mw dust* szoftverrel legyártott M19 körüli SFD térkép, és az általam *Gaia* adatokból kapott szintértékép összevetése.

## 4.2. Asztrofotókkal

A legelső vizuális teszt, ami elé állíthatom a térképemet, ha asztrofotósok M19 vagy annak környéki képeivel hasonlítom össze. A 4.3. ábrán a Pipa-köd látható, fehérrel bekarikázva a K2-ben is mért, jól kivehető M19, NGC6293 és NGC6355 halmazok. Ez a kép is tökéletesen mutatja, hogy a halmazok környéki, fraktálszerű porfilamentek a halmazok méretskálája szintjén is változatosak lehetnek, ezáltal változó mértékű extinkcióval sújtva a csillagaikat.

A 4.3. ábrán egy halvány, de még kivehető, a kép felső szélével csaknem párhuzamos porsáv vezet az M19 gömbhalmaz felé. A 4.4. ábrán az M19 környékére láthatunk ráközelítve, ahol a fent említett porsáv a bal alsó sarokból egy 45 fokos egyenesként nyúlik be a képbe, és jól láthatóan elfedi a halmaz egy részét is. Ez még a 4.1. ábra SFD térképén is kivehető. A 4.5. ábrán a 4.4. ábra központi része látható kivágva, és a *gimp* szoftver segítségével a kontraszt érték megnövelve. Az ábra a 3.2.b ábrának megfelelően RA-DEC irányba is be lett forgatva a jobb összehasonlíthatóság kedvéért. Szépen látszik, ahogyan pont ugyanaz a ké-

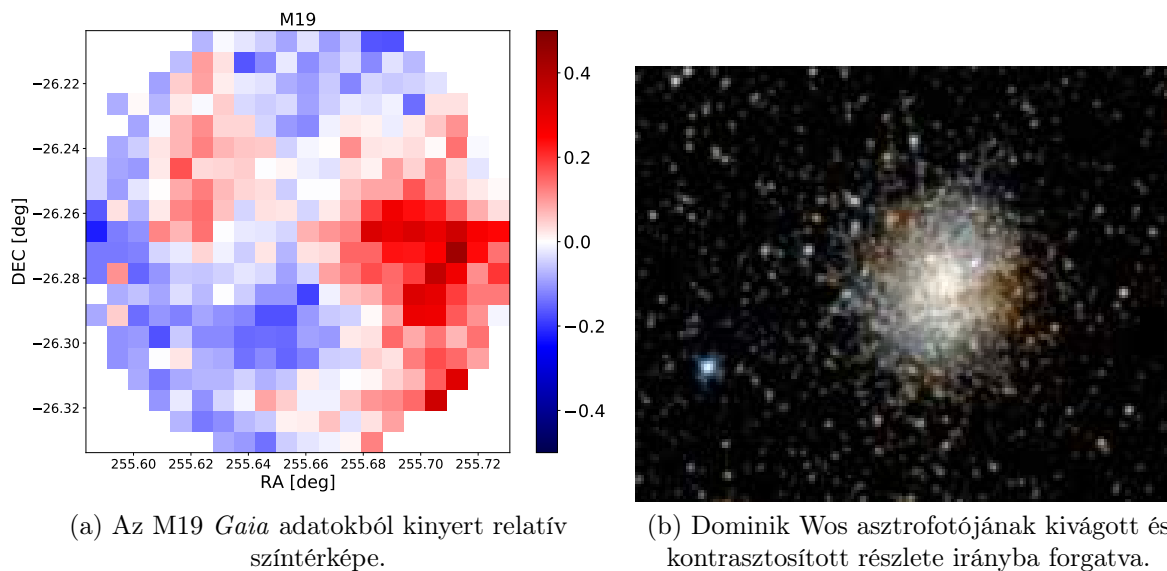


4.3. ábra. Éder Iván asztrofotója a Pipa-ködről, melyen a K2 halmazok közül 3 is megtalálható (fehérrel bekarikázva, név szerint: M19, NGC6293, NGC6355). Forrás: [https://www.astroeder.com/pipe\\_eder\\_hu.html](https://www.astroeder.com/pipe_eder_hu.html)



4.4. ábra. Dominik Wos asztrofotója az M19-ről. Forrás: <https://astrofotografia.eu/messier-19-m19-or-ngc6273/>

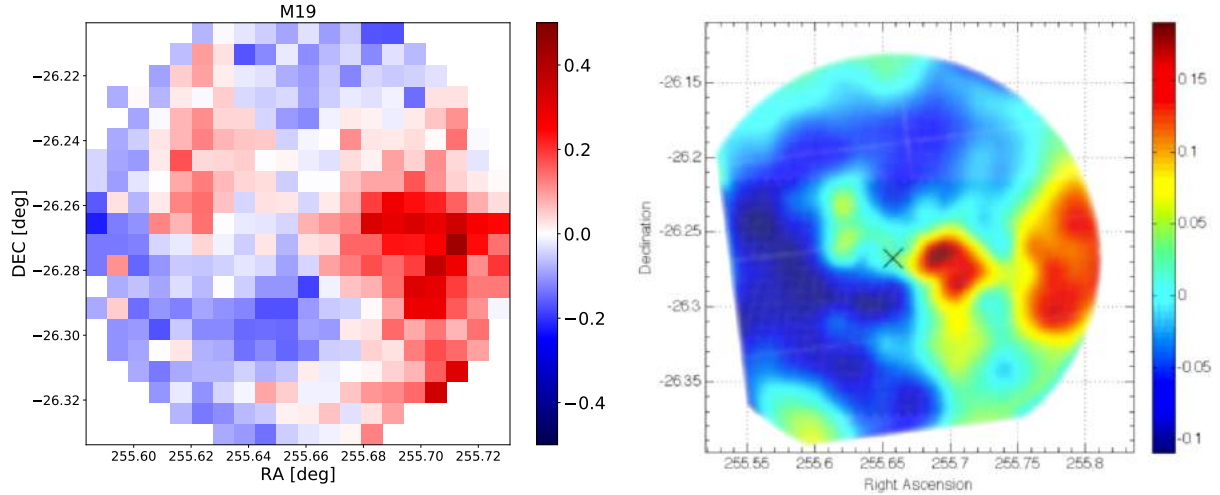
vörös mintázat rajzolódik ki a halmaz előtt, mint ami az általam kapott relatív szintértéken is.



4.5. ábra. Az általam kapott relatív szintérték, és egy asztrofotó részlet összevetése az M19 esetén.

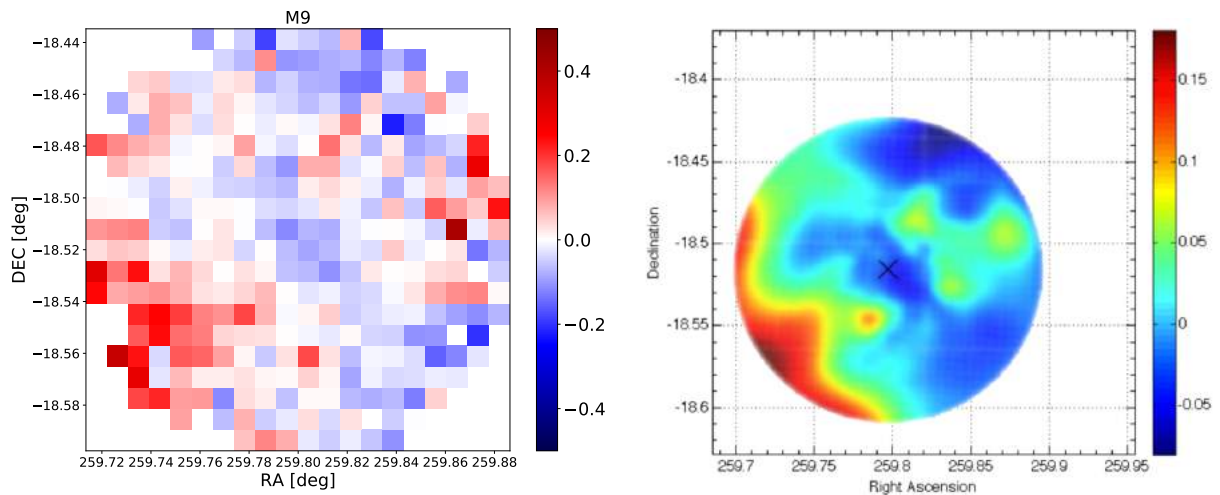
### 4.3. Szakirodalmi vizsgálatokkal

Mivel nem állnak rendelkezésre infravörös adatokból kellően részletes vörösödés értékek, ezért hasonló vizsgálatokhoz mindenképpen alapos és homogén fotometriai adatsorok szükségesek. Ilyen irányú törekvésekre a *Gaia* korszak előttről példa Alonso-García et al. (2012) munkája, ahol a Hubble űrtávcső és a földi 6,5 méteres Magellan Telescope adatait használták, hogy feltérképezzék 25 dudor környéki gömbhalmaz előtti változó vörösödését. Vizsgálatuk során a három halmazomból kettőt (M9 és M19) ők is vizsgálták, így ezeket vetem össze a saját eredményeimmel. Az összehasonlítások a 4.7. és 4.7. ábrákon láthatóak. Mindkét esetben az általam kapott, és az irodalomban fellelhető mintázatok jó egyezést mutatnak, melyeket a CMD-k gerincvonalának levonása nélkül, pusztán a fotometriai és szín adatokból még nem látnánk.

(a) *Gaia* adatokból általam kinyert relatív színtérkép.

(b) Forrás: Alonso-García et al. (2012).

4.6. ábra. Az általam kapott relatív színtérkép, és Alonso-García et al. (2012) eredményeinek összevetése az M19 esetén. Míg a baloldali színskála a gerincvonaltól való színindex-eltérést mutatja magnitúdóban, a jobboldali skála a számított  $E(B - V)$  extinkció-eltéréseket jelöli.

(a) *Gaia* adatokból általam kinyert relatív színtérkép.

(b) Forrás: Alonso-García et al. (2012).

4.7. ábra. Az általam kapott relatív színtérkép, és Alonso-García et al. (2012) eredményeinek összevetése az M9 esetén. Míg a baloldali színskála a gerincvonaltól való színindex-eltérést mutatja magnitúdóban, a jobboldali skála a számított  $E(B - V)$  extinkció-eltéréseket jelöli.

## 5. fejezet

# Összefoglalás

A jelen dolgozatban ismertetett munka során az M9, M19 és NGC6293 gömbhalmazok *Gaia* adatokon alapuló szín-fényesség diagramjait, valamint relatív szintértékeiket hoztam létre, melyeket korábban a szakirodalomban ebben a formában még senki sem publikált. Célom az egyes gömbhalmazok minél tisztább szín-fényesség diagramjának felrajzolása volt, ahonnan egyértelművé vált, hogy a halmazok előtti inhomogén poreloszlás ívperces nagyságrendű, hiszen változó vörösödést okoz a halmazon belül. Mivel a javarészt infravörös méréseken alapuló portérképek felbontása nem elég nagy ehhez a méretskálához, fotometriai úton kell a halmazon belüli extinkciót feltérképezni. Bár az infravörösben gyűjtött fotometria kevésbé érzékeny az extinkcióra és vörösödéssre, ebben a tartományban nincs a *Gaia*-hoz mérhető infravörös adatbázis (erre lenne egy megoldás a GaiaNIR projekt: Hobbs et al. (2016)).

Első lépésként a *Gaia* EDR3 archívumból lekértem az M9, M19 és NGC6293 halmazok középpontjától 4-5 ívperc sugáron belüli csillagok asztrometriai és fotometriai, valamint egyéb adatindikátor jellemzőit. Az ezek alapján elért eredmények a következőkben foglalhatók össze:

- I. Adott halmaz középpontja körül lekért csillagok parallaxisára zérusponthi korrekciót végezve bemutattam, hogy a vizsgált gömbhalmazaim esetén a parallaxis nem alkalmas a halmaztagok elkülönítésére. Így a sajátmozgás adatokra támaszkodva végeztem halmaztagság szűrést, az egyes halmazok sajátmozgás-térbeli radiális profiljainak segítségével. Látható az is, hogy az irodalomban fellelhető M19 parallaxis értékek közül a halmaztagság vizsgálatom alapján is a legfrissebb, nagyobb  $\varpi$  érték preferálható.
- II. A Riello et al. (2021) cikk alapján kétféle további vágást eszközöltem. Végeztem egy vágást  $G_{BP} < 20,3$  magnitúdó alapján, hogy a halvány, vörös csillagokat sújtó szisztematikus hibát kiküszöböljem az adatsorból. Ezen kívül, az adatbázisban szereplő  $C$  (phot\_bp\_rp\_color\_excess) faktorból meghatároztam minden csillag  $C^*$  korrigált

színtöbblet értékeit, és teszteltem, hogy empirikusan milyen vágást érdemes ennek alapján használni ahhoz, hogy tovább tisztítsam a gömbhalmazok szín-fényesség diagramjait.

- III. Megvizsgáltam továbbá a halmaztagok égi koordináta szerinti *Gaia* színindexének eloszlását. Az M19 részletesebb vizsgálata során sikerült elkülönítenem egy kékebb és egy vörösebb részt, mely részterületeken a csillagok által alkotott CMD-k sokkal letisztultabb képet festenek, és egymáshoz képest akár  $\sim 0,3$  magnitúdóval el vannak vörösödve. Sikerült kimutatnom azt is, hogy a halmaz központi régiójában a *Gaia* csak a  $G \gtrsim 18$  mag fényességű vörös óriáscsillagokat látja, és ez a terület is mutat a többtől különböző vörösödést. Hasonló, jól elkülöníthető területeket találtam az M9 esetében is.
- IV. Annak érdekében, hogy a színkülönbségeket a por okozta vörösödés, és ne az egyes csillagok eltérő fejlődési állapota dominálja, meghatároztam a CMD-k alakját lekövető gerincvonalakat, majd ez le is vontam az egyes adatpontokból. Az így kapott módosított színindexet ábrázolva RA-DEC szerint kirajzolódott az egyes halmazok relatív színtérképe.
- V. A kapott relatív színtérképeket aztán összehasonlítottam különböző extinkció térképekkel, asztrofotókkal, valamint egy, a szakirodalomban hasonló megközelítéssel végzett vörösödés térképpel is. Utóbbi esetében az általam kapott M9 és M19 eredmények konzisztensek a publikált térképekkel.

További terveim között szerepel, hogy a relatív színtérképeim alapján a szín-fényesség diagramokat korrigáljam a differenciális vörösödéssre. Ezáltal tudok majd változókat (kifejezetten RR Lyrae csillagokat) azonosítani a halmazokban, amit aztán a halmazok K2 fotometriájával kombinálva a már ismert változók pulzációs tulajdonságait eddig nem látott pontosságával tudom majd feltérképezni, illetve lehetőségem nyílik új változók keresésére is - ahogyan azt az NGC5897 halmaz esetében is tettem. Másrésztől a pontosabb CMD lehetővé teszi izokronok illesztését is, ezáltal pedig tudok kort és fémességet becsülni a halmazokra. A fémesség azért is érdekes, mert a bevezetőben említett módon az RR Lyrae csillagok fénygörbe alakjából lehetséges fotometriai fémességet becsülni, melyet aztán össze lehet vetni a többi, független módszerekkel kapott értékekkel is.

## 6. fejezet

# Köszönetnyilvánítás

A témavezetőmnek, Molnár Lászlónak, számtalan dologért hálás lehetek. Nagyon izgalmas témán tudunk együtt dolgozni, ahol folyamatosan újabb és újabb eredményekbe botlunk, amit aztán közös erővel igyekszünk értelmezni, megmagyarázni, vagy épp tovább gondolni. Köszönöm, hogy bármikor fordulhatok hozzá a kiapadhatatlan kérdéseimmal, amikre aztán mindig alapos válaszokat, vagy remek iránymutatásokat kapok. Külön élmény számomra, hogy nyitott a különböző ötleteimre és megközelítéseimre, és folyamatosan bátorít a munkámban! Külön köszönöm azt a rengeteg segítséget, türelmet és biztatást, amivel hozzájárult ennek a dolgozatnak is az elkészüléséhez.

Köszönöm még neki a SeismoLab KKP-137523 Élvonal, valamint Szabó Róbertnek az LP2018-7 Lendület pályázatokból kapott támogatásokat. Köszönöm még Szabó M. Gyulának a segítségét, hogy hozzájárult a 2021. évi ÚNKP-21-2 ösztöndíjam elnyeréséhez, melynek keretében ez a dolgozat is megvalósult.

# Irodalomjegyzék

- Aerts, C. 2021, *Reviews of Modern Physics*, 93, 015001
- Aigrain, S., Parviainen, H., & Pope, B. J. S. 2016, *MNRAS*, 459, 2408
- Alonso-García, J., Mateo, M., Sen, B., et al. 2012, *AJ*, 143, 70
- Bailey, S. I. 1902, *Annals of Harvard College Observatory*, 38, 1
- Bailey, S. I., Leland, E. F., Woods, I. E., & Pickering, E. C. 1919, *Annals of Harvard College Observatory*, 78, 195
- Bailey, S. I., & Pickering, E. C. 1913, *Annals of Harvard College Observatory*, 78, 1
- Bastian, N., & Lardo, C. 2018, *ARA&A*, 56, 83
- Baumgardt, H., & Vasiliev, E. 2021, *MNRAS*, 505, 5957
- Beasley, M. A. 2020, *Globular Cluster Systems and Galaxy Formation*, 245–277
- Bland-Hawthorn, J., & Gerhard, O. 2016, *ARA&A*, 54, 529
- Bovy, J., Rix, H.-W., Green, G. M., Schlafly, E. F., & Finkbeiner, D. P. 2016, *ApJ*, 818, 130
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., et al. 2012, *MNRAS*, 427, 127
- Catelan, M., & Smith, H. A. 2015, *Pulsating Stars*
- Choi, J., Dotter, A., Conroy, C., et al. 2016, *ApJ*, 823, 102
- Clementini, G., Ripepi, V., Molinaro, R., et al. 2019, *A&A*, 622, A60
- Draine, B. T. 2003, *ARA&A*, 41, 241
- Drake, A. J., Graham, M. J., Djorgovski, S. G., et al. 2014, *ApJS*, 213, 9
- Evans, D. W., Riello, M., De Angeli, F., et al. 2018, *A&A*, 616, A4

- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., et al. 2016a, *A&A*, 595, A1
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2016b, *A&A*, 595, A2
- . 2018, *A&A*, 616, A1
- . 2021a, *A&A*, 649, A1
- Gaia Collaboration, Luri, X., Chemin, L., et al. 2021b, *A&A*, 649, A7
- Green, G. M., Schlafly, E., Zucker, C., Speagle, J. S., & Finkbeiner, D. 2019, *ApJ*, 887, 93
- Green, G. M., Schlafly, E. F., Finkbeiner, D. P., et al. 2014, *ApJ*, 783, 114
- Groenewegen, M. A. T. 2021, *A&A*, 654, A20
- Hidalgo, S. L., Pietrinferni, A., Cassisi, S., et al. 2018, *ApJ*, 856, 125
- Hobbs, D., Høg, E., Mora, A., et al. 2016, arXiv e-prints, arXiv:1609.07325
- Howell, S. B., Sobek, C., Haas, M., et al. 2014, *PASP*, 126, 398
- Jurcsik, J., & Kovács, G. 1996, *A&A*, 312, 111
- Jurcsik, J., Smitola, P., Hajdu, G., et al. 2015, *ApJS*, 219, 25
- Koch, A., & McWilliam, A. 2014, *A&A*, 565, A23
- Lindgren, L., Klioner, S. A., Hernández, J., et al. 2021a, *A&A*, 649, A2
- Lindgren, L., Bastian, U., Biermann, M., et al. 2021b, *A&A*, 649, A4
- Low, F. J., Beintema, D. A., Gautier, T. N., et al. 1984, *ApJL*, 278, L19
- Luri, X., Brown, A. G. A., Sarro, L. M., et al. 2018, *A&A*, 616, A9
- Marigo, P., Bressan, A., Nanni, A., Girardi, L., & Pumo, M. L. 2013, *MNRAS*, 434, 488
- Misiriotis, A., Xilouris, E. M., Papamastorakis, J., Boumis, P., & Goudis, C. D. 2006, *A&A*, 459, 113
- Molnár, L., Bódi, A., Pál, A., et al. 2021, *ApJS*, arXiv:2109.07329
- Monelli, M., Milone, A. P., Stetson, P. B., et al. 2013, *MNRAS*, 431, 2126
- Nemec, J. M., Cohen, J. G., Ripepi, V., et al. 2013, *ApJ*, 773, 181

- Perryman, M. A. C., Lindegren, L., Kovalevsky, J., et al. 1997, *A&A*, 500, 501
- Pickering, E. C., Colson, H. R., Fleming, W. P., & Wells, L. D. 1901, *ApJ*, 13, 226
- Piotto, G., De Angeli, F., King, I. R., et al. 2004, *ApJL*, 604, L109
- Riello, M., De Angeli, F., Evans, D. W., et al. 2018, *A&A*, 616, A3
- . 2021, *A&A*, 649, A3
- Rowell, N., Davidson, M., Lindegren, L., et al. 2021, *A&A*, 649, A11
- Sandage, A. R. 1953, *AJ*, 58, 61
- Schlafly, E. F., & Finkbeiner, D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
- Shao, Z., & Li, L. 2019, *MNRAS*, 489, 3093
- Soszyński, I., Udalski, A., Szymański, M. K., et al. 2016, *AcA*, 66, 131
- Tailo, M., Di Criscienzo, M., D’Antona, F., Caloi, V., & Ventura, P. 2016, *MNRAS*, 457, 4525
- Trumpler, R. J. 1930a, *Lick Observatory Bulletin*, 420, 154
- . 1930b, *PASP*, 42, 267
- van Leeuwen, F., de Bruijne, J. H. J., Arenou, F., et al. 2018, Gaia DR2 documentation, , .  
<https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/>
- Wagner-Kaiser, R., Stenning, D. C., Sarajedini, A., et al. 2016, *MNRAS*, 463, 3768
- Wallace, J. J., Hartman, J. D., Bakos, G. Á., & Bhatti, W. 2019, *ApJL*, 870, L7