

Gömbhalmazok kormeghatározása űrtávcsöves adatokra illesztett izokrónokkal

Simon-Zsók Anett

ELTE TTK Fizika BSc II. évfolyam

Témavezetők:

Meridith Joyce, PhD

tudományos munkatárs

CSFK Csillagászati Intézet

Kalup Csilla

tudományos segédmunkatárs

CSFK Csillagászati Intézet



Kivonat

A gömbhalmazok a csillagok gravitációsan kötött, gömbszimmetrikus, központ felé sűrűsödő csoportosulásai, melyek néhány tízezertől a milliós nagyságrendig tartalmazhatnak főleg idős, fémszegény, II. populációs csillagokat. Munkám során a Gaia űrtávcső DR3 adatbázisának felhasználásával elkészítettem az NGC 5897 és M92 gömbhalmazok eddigi legpontosabb szín-fényesség diagramjait, annak érdekében, hogy különböző izokrón illesztési módszerekkel meghatározzam a halmazok életkorát. A két vizsgált gömbhalmaz után további 55 Tejútrendszerhez tartozó gömbhalmaz esetén is becslést adtam a halmazok korára és fémességére a letisztult szín-fényesség diagramjaikra való izokrón illesztések alapján. Ezáltal a távolságmodulus és csillagközi extinkció értékére is becslést adtam az egyes esetekben.

Mivel a Gaia űrtávcső nemcsak egy kitüntetett irányban észlel, hanem az egész Tejútrendszert térképezi fel, a galaxisunk különböző irányában látható gömbhalmazok vizsgálhatóak. Egy adott gömbhalmaz esetén a halmaz középpontjától a hozzávetőleges látszó sugarán belül lekértem az összes csillag asztrometriai és fotometriai paramétereit az adatbázisából. Ezután sajátmozgás alapján halmaztagság vizsgálatot végeztem, majd a Gaia űrtávcső adatfeldolgozással kapcsolatos publikációi alapján további instrumentális effektusok kiszűrését is elvégeztem, ezáltal kiválogatva a bizonyosan szisztematikus hibát okozó csillagokat az adatsoromból.

Az izokrón a csillagfejlődési vizsgálatok során használt elméleti modell, mely a szín-fényesség diagramon az azonos korú, de eltérő tömegű csillagokat összekötő görbét jelöli. A kiválasztott gömbhalmazok szín-fényesség diagramjára a MESA csillagfejlődési kód MIST (MESA Isochrones and Stellar Tracks) elméleti izokrónjait illesztettem. Módszerem 4 paraméteres illesztés, tehát nemcsak a pontos életkor meghatározására szolgál, hanem a fémesség, távolságmodulus és vörösödés értékeire is igen jó becslést ad.

Izokrón illesztés szempontjából azért érdekes a Gaia űrtávcső adatait vizsgálni, mert ezek a legújabb és legpontosabb asztrometriai adatok, melyek jelenleg rendelkezésünkre állnak, ebben rejlik a kutatásom újszerűsége is. A kapott eredményeket az NGC 5897 és M92 esetén összehasonlítottam más szakirodalmi publikációkkal, melyek jó egyezést mutattak mindenhol. Az általam implementált módszer alkalmas arra is, hogy tesztelje a MIST izokrónok alkalmazhatóságát a legújabb Gaia adatokon, szemben más korábbi űrtávcsöves és földi mérésekkel. Mivel a gömbhalmazok idős csillagokat tartalmaznak, tanulmányozásukkal nagyon sok információt megtudhatunk a korai Tejútrendszeréről és annak keletkezéséről. A mintám domináns életkora alapján becslést adtam a galaxisunk korára, mely hibahatáron belüli egyezést mutat egy friss, 2022-ben publikált cikkben meghatározott értékkel.

Tartalomjegyzék

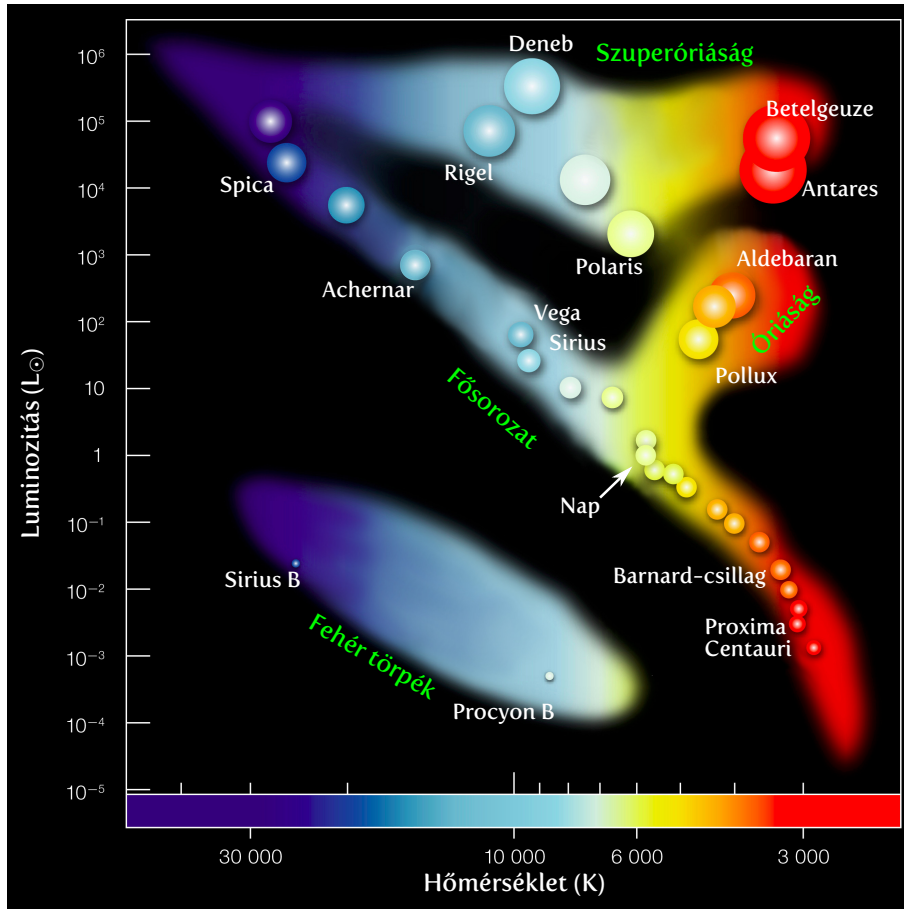
1. Bevezetés	4
1.1. Csillagok és csillagfejlődés	4
1.1.1. A csillagfejlődés leírásához szükséges alapegyenletek	5
1.1.2. Csillagkeletkezés	7
1.2. Gömbhalmazok	9
1.3. Szín-fényesség diagramok	10
1.4. Izokrónok	11
2. Felhasznált adatok	13
2.1. A Gaia űrtávcső és a DR3 katalógus	13
2.2. Adatok és bevezetett korrekciók	14
3. Az eljárás bemutatása	18
3.1. MIST adatbázis	18
3.1.1. Az EEP módszer	18
3.2. Izokrónok illesztése	20
3.3. A 4 dimenziós paraméter-illesztés	21
4. Eredmények	24
4.1. Illesztések a teszt gömbhalmazokra	24
4.1.1. Illesztések eredményei más gömbhalmazokra	25
5. Összefoglalás és kitekintés	29
Hivatkozások	32
A. Függelék	33

1. Bevezetés

1.1. Csillagok és csillagfejlődés

A csillagok forró, gázból és plazmából álló, nagy tömegű, gömbszerű égitestek. Olyan csillagközi felhőkben keletkeznek, amelyek többnyire molekuláris hidrogénből állnak, nagyon kis részüket alkotja por, ami általában grafit-, jég- vagy szilikátszemcsékből áll. A csillagok életük során különböző fejlődési szakaszokon mennek keresztül, melynek jellemzőit elsősorban a kezdeti tömegük határozza meg. A Hertzsprung-Russell-diagram (röviden HRD) az az ábra, amely ezt kiválóan képes szemléltetni, sokan a csillagászat legfontosabb grafikonjának tartják. A diagramon a csillagok hőmérsékletének függvényében (jobb oldali irányba csökken) van ábrázolva a fényességük (felfelé nő). Ezt szemlélteti az 1. ábra. Fontos kihangsúlyozni, hogy a csillagok nem véletlenszerűen helyezkednek el az ábrán, amelyek a dolgozat további részében kerülnek majd részletesebb bemutatásra (Szatmáry et al., 2011).

A különböző ágak a csillagok fejlődési szakaszának különböző állomásait jelentik. A legnépesebb ezek közül a fősorozat, amely a diagram bal felső sarkától a jobb alsó sarokig húzódik. Vizsgáljuk most meg közelebbről a fősorozaton levő csillagok tulajdonságait! A csillagok tömegüktől függő magasságban jelennek meg a fősorozaton (ez a HRD-n a nullkorú fősorozat, angolul ZAMS, azaz Zero Age Main Sequence). A főág jobb alsó sarkában találjuk a kis tömegű vörös törpecsillagokat, középen a Nap-típusú csillagokat, a bal felső sarokban pedig kékesfehér csillagokat, amik már igen nagy tömeggel rendelkeznek. A jobb felső sarokban a fősorozatból felfele ívelve az óriáság terül el. Ez a csillagfejlődés egy olyan szakasza, ahol már a nehezebb elemek fúziója zajlik a magban, egészen a szénig. Efölött húzódik a szuperóriás-ág, ahol már a nehéz elemek fúziója egészen a vasig megy el. Mindentől jól elkülönülve találjuk a bal alsó sarokban a fehér törpéket, melyek nevükhöz híven kicsik és nagy hőmérsékletűek.



1. ábra. Hertzsprung-Russell-diagram és annak fő ágai zöld színnel jelölve: főszorozat, óriáság, szuperóriáság és fehér törpék. (Forrás: Dályá 2021)

1.1.1. A csillagfejlődés leírásához szükséges alapegyenletek

Az alábbi differenciálegyenletek segítenek leírni azt, hogy egy csillag kialakulásához milyen egyensúlyi feltételek teljesülése szükséges, továbbá összefüggést teremtenek a csillag állapotjelzői között. Az első ilyen egyenlet a tömegmegmaradás egyenlete (1), ami összefüggést teremt a tömeg (m) és a sugár (r) között:

$$\frac{\partial m}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho \quad (1)$$

A hidrosztatikai egyensúly (2) is fontos kritérium, ahol p a nyomás, ρ sűrűség, g a gravitációs gyorsulás.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -G \frac{M}{r^2} \rho = g \rho \quad (2)$$

A (2) egyenlet azonban nem alkalmazható a csillagfejlődés minden szakaszára, azokban az esetekben a mozgásegyenletet (3) érdemes használni. Ekkor azt fejezzük ki, hogy a gázra a nyomásgradiens és a gravitációs erő hat.

$$\rho \frac{dv}{dt} = \frac{\partial p}{\partial r} - \rho g \quad (3)$$

Felírhatunk még egy egyenletet (4) a luminozitásra (L), ahol ϵ az egységnyi tömegben termelt energia.

$$\frac{\partial L}{\partial r} = 4\pi r^2 \epsilon \quad (4)$$

A hőmérséklet változására két egyenletet is felírhatunk; az első sugárzási energiatranszport esetén van érvényben (5), míg a másik konvektív energiatranszport esetén (6).

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{3}{16} \frac{\kappa \rho l}{acT^3 \pi} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} \frac{\partial T}{\partial p} \quad (6)$$

A gáz állapotegyenletére is felírhatunk egy összefüggést:

$$p = \frac{R}{\nu} \rho T + \frac{1}{3} a T^4 \quad (7)$$

Ismerve ezeket az egyenleteket már elméleti modelleket gyárthatunk a csillagfejlődés szemléltetésére. A Vogt-Russell tétel értelmében a csillagok belső szerkezetét és mérhető paramétereit a tömeg és a kémiai összetétel egyértelműen meghatározza.

Térjünk is ki ebből kiindulva a csillagok kémiai összetételére. A csillagászatban használt egyik módszer az összetétel jellemzésére a különböző elemarányok használata. Mivel a vas mennyisége könnyen mérhető a csillagok színekében, ezért leggyakrabban a vasatomok és hidrogénatomok arányára szoktak hivatkozni, ha fémességről van szó. A definícióban a Nap értékéhez viszonyítanak, aminek a fémességét nullának veszik, konvenció alapján.

$$[Fe/H] = \lg \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{csillag} - \lg \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{\odot} \quad (8)$$

Lévén a skála logaritmikus, ha egy csillag fémessége 1, akkor az tízszer gazdagabb vasban a Napnál. Természetesen akármilyen más kémiai elemre is lehet ehhez hasonlóan arányt definiálni. A $[Fe/H]$ index egy jó közelítést ad a csillagok teljes fémességére is (Dálya, 2021).

1.1.2. Csillagkeletkezés

A kezdeti gázfelhőben akkor kezdődik el az összehúzódás, amikor a belső energia kisebb, mint a saját gravitációs potenciális energiája, ez a következő összefüggéssel írható le, ahol a szorzófaktor egyenletes sűrűség esetén használható:

$$E_{pot} = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \quad (9)$$

A belső energiát az alábbi összefüggés alapján számolhatjuk, ahol n a részecskék száma, μ pedig a részecskék átlagos tömege:

$$E_{int} = \frac{3}{2} nkT = \frac{3}{2} \frac{kTM}{\mu} \quad (10)$$

A $|E_{pot}| > E_{int}$ egyenletből kifejezhetjük a sugarat:

$$R_J = 0,4 \cdot \frac{\mu GM}{kT} \quad (11)$$

Ez a Jeans-sugár, ami azt adja meg, hogy ennél kisebb kell legyen a gázfelhő sugara ahhoz, hogy összehúzódást szenvedjen el a saját gravitációs potenciális energiájától. Hasonlóan a sugárhoz, kezdeti tömegre is meghatározhatunk egy kritikus értéket (Jeans-tömeg):

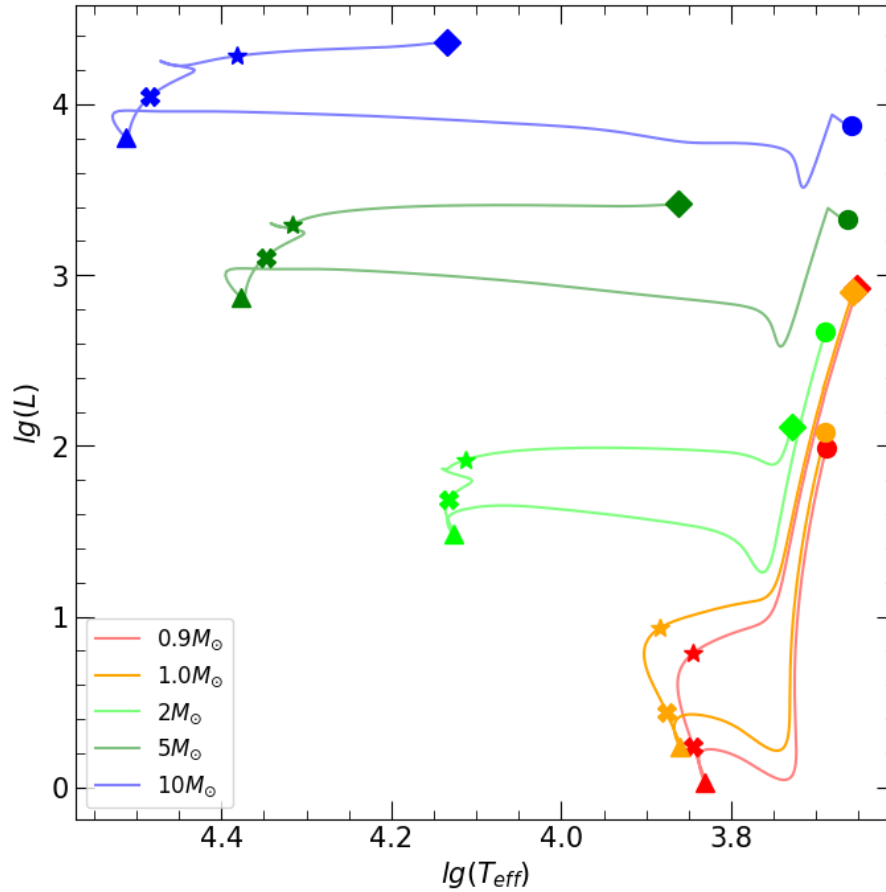
$$M_J = \left(2,5 \cdot \frac{kT}{\mu G}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Ez az összefüggés adja meg a minimális tömeget, ami az összehúzódáshoz kell. A fősorozati állapot előtt, 10^5 K fölött, a csillag közel hidrosztatikus egyensúlyi állapotokon keresztül zsugorodik tovább. Ha numerikusan megoldjuk a fent definiált egyenleteket, akkor a számítások jól tükrözik, hogy különböző kezdeti tömegű csillagoknak más befutott pályái vannak a HR diagramon.

A 2. ábrán a csillagok kezdeti állapotát ● jelzi, a nullkorú fősorozati (ZAMS) állapotot pedig a ▲, a különböző színek pedig különböző tömegeket jelölnek. A pályák közös tulajdonsága, hogy van egy kezdeti, közel függőleges szakaszuk, melynek a végén egy törés után balra fordulnak és ezután fordulnak a fősorozatra. A közel vertikális szakaszt Hayashi-fázisnak nevezik, ekkor az energiatranszportot a csillag egész mélységében a konvektív (6) egyenlet, a felszíni vékony rétegben pedig a sugárzási (5) egyenlet írja le. A Hayashi vonalon alig emelkedik a felszíni hőmérséklet, miközben a luminozitás csökken, hiszen a csillag átmérője is csökken.

A 2. ábráról az is leolvasható, hogy a fősorozatra csak bizonyos feltételeket teljesítő csillagok tudnak eljutni, nem létezik 3000 K alatti hőmérsékletű fősorozati csillag. Barna törpéknek

nevezzük azokat a csillagkezdeményeket, amelyek nem rendelkeznek akkora kezdeti tömeggel, hogy bennük meginduljanak a magreakciók (Muraközy & Ludmány, 2015).



2. ábra. Különböző csillagok fejlődési útjai. A csillagok kezdeti állapotát ● jelzi, a nullkorú fősorozati (ZAMS) állapotot pedig a ▲ szimbólum. Az x-el jelöltem azt a folyamatot, amikor a csillag gravitációs összehúzódásba kezd. Kisebb tömegű csillagoknál (narancssárga és piros görbék) ezek után a fázisok után létrejön a vörös óriás állapot (★ szimbólum), majd bekövetkezik a héliumvillanás (◆ szimbólum). Nagyobb tömegű csillagokra (zöld és kék görbék) a fősorozat után a ★ szimbólummal jelölt szubóriás állapot következik, amit a vörös óriás állapot követ ◆-al jelölve. (Forrás: saját ábra a MIST adatbázis adatai alapján)

Amikor gravitációs összehúzódás megszűnik, a csillag eléri a fősorozati állapotot, ekkor hidrosztatikai egyensúlyban van és állapotát az (1), (2), (4), (5) egyenletek írják le. Felírhatjuk a differenciálegyenletekre a következő határfeltételeket, hogy idealizálni lehessen a modellt: $M(0) = 0$, $L(0) = 0$, $P(R) = 0$, $T(R) = 0$. A négy egyenlet a négy határfeltétellel egyértelmű megoldást ad az egyenletekre, tehát elegendő a csillag kezdeti tömegét (M) megadni (vagy bármelyik más paraméterét, de ez a használatos) abból minden más paramétere (R , L , T) kifejezhető. Ezt a fentebb említett Vogt-Russell tétel részletesebb megfogalmazása.

A csillag energiatermelése a fősorozaton hidrogénfúzió által történik, ebben a központi

mag vesz részt, amely körülbelül 12%-a a csillag összes hidrogénkészletének. Ebben a központi magban nincs anyagkeveredés, így a folyamat csak addig áll fenn, amíg a csillag fel nem éli a teljes hidrogénkészletét. A nagyobb tömegű csillagok nagyobb intenzitással sugároznak, így hamarabb elfogyasztják a rendelkezésükre álló hidrogénmennyiséget, tehát a kisugárzott energia egyenesen arányos a csillag tömegével: $E \sim M$. Tudjuk azt is, hogy a luminozítás egységnyi idő alatt kisugárzott energiamennyiség: $L = \frac{E}{t}$. Továbbá ismert az az összefüggés, hogy fősorozaton $L \sim M^{3.5}$. Így adott tömegű csillagok fősorozaton töltött idejét egyszerű összefüggésekkel ki is lehet számítani:

$$t = M^{-2.5} \quad (13)$$

Erre egy szemléletes példa, hogy a Napunk esetén a stabil állapot hossza kb. 10 milliárd év, egy 20 naptömegű csillagé 5 milló év.

A kisebb tömegű ($<3M_{\odot}$) csillagok esetén a fősorozaton a hidrogénből álló mag a hőmérséklet-növekedés hatására gyorsuló ütemben zsugorodik, majd összezuhan. Ez tovább fűti a hidrogénből álló héjat, az energiatermelés felgyorsul, a megnövekvő központi hőmérséklet (T) hatására a csillag nagy mértékben tágul (R nő). A tágulás hatására a csillag külső tartományai hűlni kezdenek, létrejön a vörös óriás állapot, a 2. ábrán ezt ★ szimbólummal jelöltem. Ez az egyensúlyi helyzet a héliumfúzió beindulásáig tart. A vörös óriás fázisának végén a mag degenerált állapotba kerül (így a p nem függ a T -tól). A hirtelen felszabaduló energia robbanásszerűen indítja be az újabb és újabb fúziókat, ez a héliumvillanás (vagy hélium-héj villanás). A 2. ábrán ♦ jelöltem ezt, kisebb tömegű csillagok esetén.

A nagyobb tömegű fősorozati csillagok magjában lévő hidrogén atommagok hélium atommagokká történő átalakulása után létrejön egy tisztán héliumból álló mag, melyet egy hidrogénből álló, vékony héj vesz körül. A belső hőmérséklet nem elegendő a hélium fúziójához, ezért leáll az energiatermelés. Emiatt csökken a csillag magjában a nyomás (p), ekkor már nem lesz hidrosztatikai egyensúlyban a csillag, és gravitációs összehúzódásba kezd. A 2. ábrán x-el jelöltem a folyamatot. Emiatt felmelegedik a vékony hidrogénburok és beindul a magfúzió. Ekkor éri el a csillag a szubóriás állapotot, melyet a 2. ábrán a nagy tömegű csillagok esetén ★ szimbólummal jelöltem. A csillag viszont nincs sugárzási egyensúlyban, a vörös óriáság fele mozog (RGB – Red Giant Branch), ♦ alakkal jelölve a nagytömegű csillagok esetén ezen ág kezdetét.

1.2. Gömbhalmazok

A gömbhalmazok nevüket jellegzetes gömbszimmetrikus alakjukról kapták. Olyan csillagok csoportosulását jelenti, amelyek átlagosan $10^5 - 10^6$ csillagot tartalmaznak és a tagok egyre sűrűbben helyezkednek el a halmaz középpontja felé közeledve. A centrum sok esetben pedig

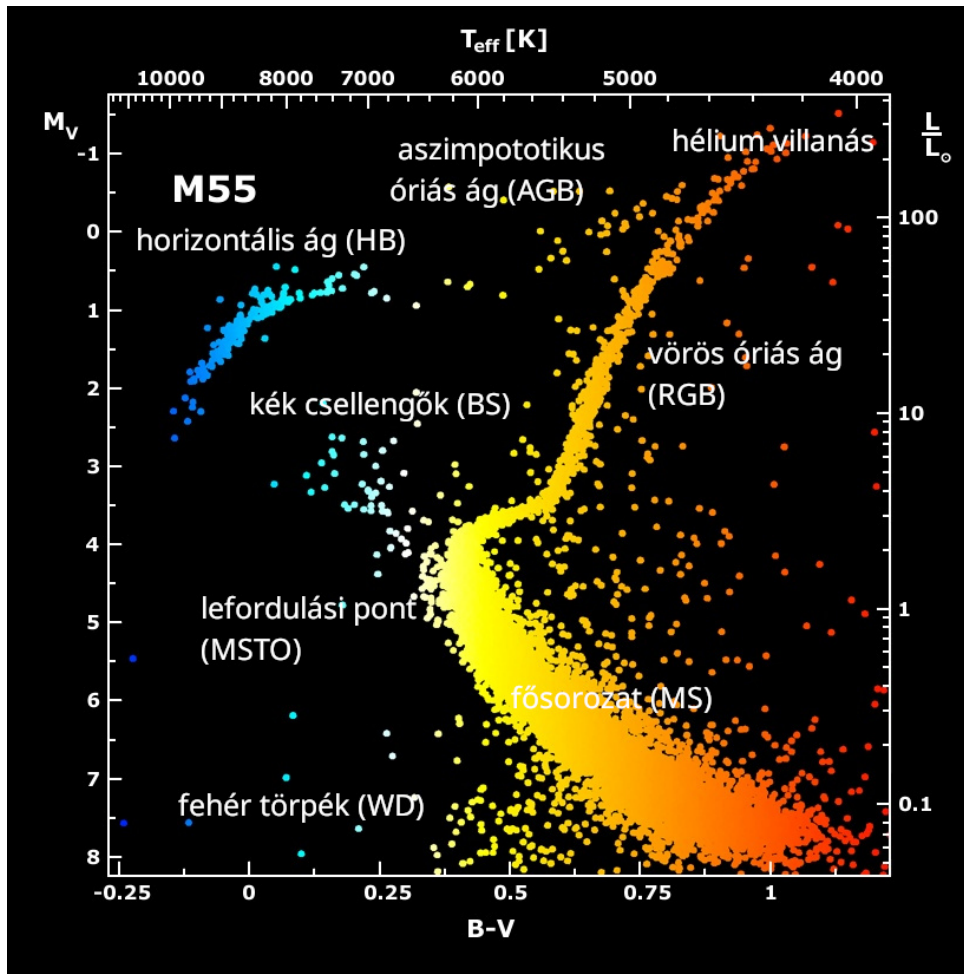
olyannyira sűrű, hogy a Földről nézve kisebb távcsővel a halmazt nem is tudjuk különálló csillagokra bontani. Jelenleg 168 gömbhalmazt ismerünk (Baumgardt & Vasiliev, 2021), melyek a Tejútrendszer halójában helyezkednek el, eloszlásuk gömbszimmetrikus a galaxismag körül, ellipszis pályákon keringenek, sebességük pedig jelentősen eltér a korongbeli sebességektől. Az idősebb gömbhalmazok, melyek kis fémtartalmúak, a galaxisunk centrumától távol, míg a fiatalabbak, melyek fémtartalma magasabb, a centrumhoz közel helyezkednek el (Tóth, 2013).

Többnyire öreg, II. populációs csillagok alkotják őket, melyek fémszegények. További érdekesség, hogy akadnak köztük olyanok is, melyek keringési iránya retrográd a Tejútrendszerben levő objektumok keringéséhez képest. Kialakulásuk mindmáig nem teljesen egyértelműen megértett folyamat. A legtöbb esetben azt a következtetést tudjuk levonni, hogy a csillagaik egyidőben keletkeztek, de erre ellenpéldát mutatnak pl. a Nagy Magellán-felhő gömbhalmazai, ahol a csillagok két külön populációra oszthatóak. Feltételezhetően úgy alakult ki bennük az új keletkezési hullám, hogy egy csillagközi molekulafelhővel ütköztek a gömbhalmazok (Harris & Zaritsky, 2009). Galaktikus gömbhalmazok esetén az elmúlt 10 év megfigyelései többféle csillaggeneráció jelenlétét mutatták ki, mely arra utalhat, hogy több, egymást követő hullámban zajlhatott bennük a csillagkeletkezés (Monelli et al., 2013; Bastian & Lardo, 2018). Általában két generációt figyeltek meg, de a legnagyobb gömbhalmazokban (pl.: ω Cen) többszörös csillagpopulációk is kimutathatók (Tailo et al., 2016). Mivel a gömbhalmazokban nagyon nagy a csillagsűrűség, kialakulhatnak ún. kék csellengők, amelyek olyan fősorozati csillagok, amik a szín-fényesség diagramon a lefordulási pont után helyezkednek el, tehát kékebbek és fényesebbek, mint társaik (Piotto et al., 2004).

1.3. Szín-fényesség diagramok

A fentebb említett Hertsprung–Russell-diagram egyik változata a szín-fényesség diagram (röviden CMD, azaz color-magnitude diagram). Ebben az esetben a diagramon hőmérséklet helyett a színindex szerepel, ami két különböző szűrővel mért fényességérték különbségét jelenti. A függőleges tengelyen a luminozitás helyett a magnitúdóban mért fényességértékek szerepelnek. Gömbhalmazok vizsgálatánál feltehetjük, hogy a benne levő csillagok azonos távolságra vannak a megfigyelőtől, tehát abszolút magnitúdó helyett elegendő a látszó fényesség értékeit venni, és ezeket ábrázolni a függőleges tengelyen.

Az 3. ábra szemlélteti azt, hogy milyen típusú csillagokat tudunk megfigyelni általában a gömbhalmazokban. Gömbhalmazok esetén feltételezzük, hogy a halmazt alkotó csillagok időben ugyanakkor nagyjából azonos összetétellel keletkeztek. Tehát a csillagoknak csak a kezdeti tömegük különbözik. Megfigyelhető a 3. ábrán, hogy a nagyobb tömegű csillagok hamarabb elválnak a főágtól, ezt a pontot nevezzük lefordulási pontnak (MSTO – Main Sequence Turnoff).

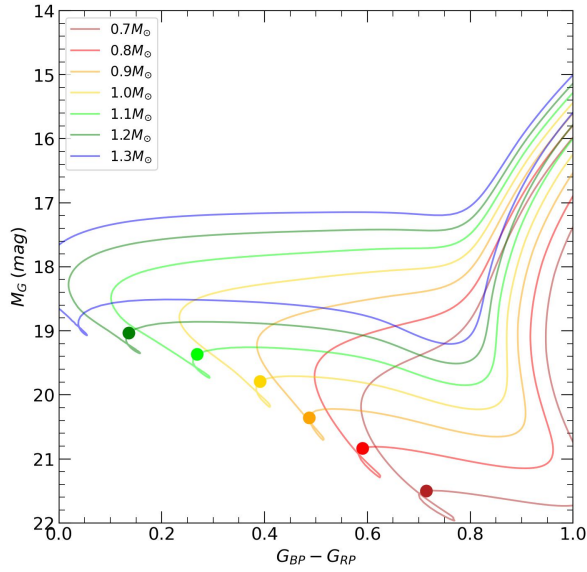


3. ábra. Az M55 gömbhalmaz Hertzsprung-Russell- és szín-fényesség-diagramja egyben. Az ábrán kivehetőek a gömbhalmazban levő csillagok, amelyek különböző életszakaszban vannak. (Forrás: B.J. Mochejska, J. Kaluzny, Swope Telescope, saját fordítás)

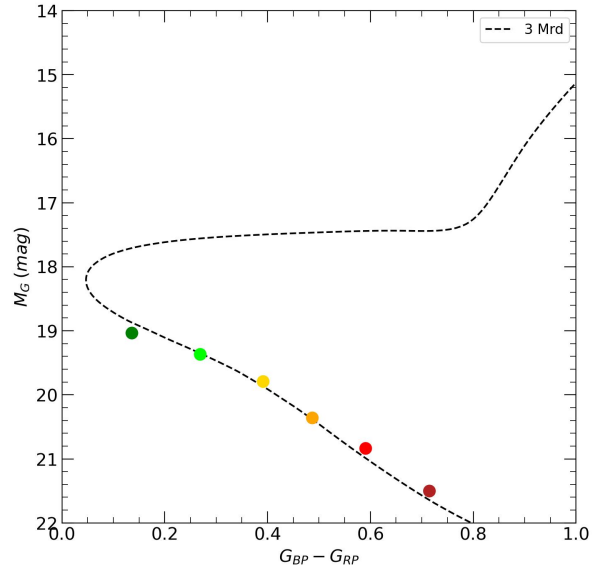
1.4. Izokróonok

A csillagfejlődési modellek a korábbi részben felsorolt egyenleteket oldják meg egydimenzióban. Ezek segítségével feltérképezhetjük azt, hogy a különböző fejlődési szakaszok során hogyan változnak a csillag állapothatározói. Ehhez szükségünk van arra, hogy időben nagyon sok pontban kiszámítsuk, hogy hogyan változnak a kezdeti érték függvényében az állapotjelzők. Ha sok pontban kiszámítjuk ezeket, akkor a pontokat összekötve megkaphatunk egy csillagfejlődési utat. Egy csillag élete során a HRD-n bejárt útját tehát elsősorban a tömege határozza meg. Emiatt van az, amit már korábban is észrevehettünk, hogy az azonos korú csillagok a grafikon különböző helyein jelenhetnek meg, kezdeti tömegüktől függően.

Ha több csillagfejlődési utat egymás mellé helyezünk szorosan, és jelöljük azokat a pontokat is, ami alapján meghatározzuk a görbét, akkor illeszteni tudunk az időben azonos pontokra is egy



(a) Különböző kezdeti tömegű csillagfejlődési utak, kiemelve adott időben azonos pontokat.



(b) Izokrón illesztése az időben azonos pontokra.

4. ábra. Csillagfejlődési utak transzformálása izokrónná (forrás: saját ábra a MIST adatbázis segítségével generált fejlődési utakra)

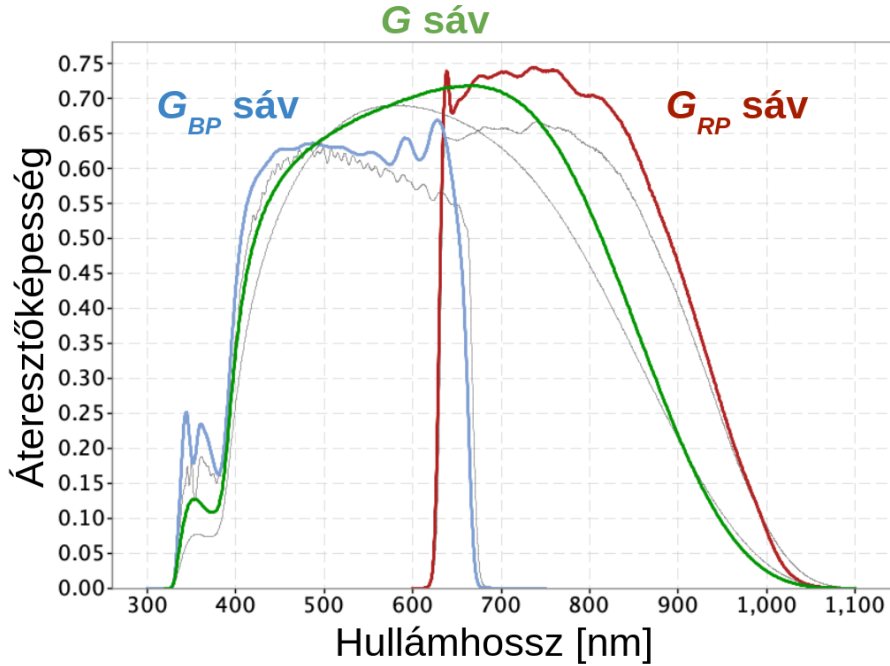
elméleti görbét, ezt hívjuk **izokrónnak** (*izo* – azonos, *kronosz* – kor). A 4. (a) ábrán láthatjuk a szorosan elhelyezkedő csillagfejlődési utakat, színes ● szimbólumokkal pedig az időben azonos fejlődési szakaszokat, mivel más a kezdeti tömeg minden csillagfejlődési útnál, ezért ezek a pontok máshol helyezkednek el, viszont ezekre is lehet egy görbét illeszteni, ezt láthatjuk az ábra (b) részén, és ez lesz maga az izokrón. Egy izokrón tehát a szín-fényesség diagramon az azonos fényességű és életkorú csillagokat köti össze.

2. Felhasznált adatok

A csillagászat az utóbbi évtizedekben olyan korba lépett, ahol az észlelési adatok pontossága sok esetben jóval megelőzi az elméleti modelljeink pontosságát. Ez azt jelenti, hogy ha pontosabb asztrofizikai paramétereket akarunk meghatározni csillagok esetén, akkor ez már nem az űrtávcsöveink pontosságán múlik, hanem a mérési adatok feldolgozásán, ami pedig az elméleti modelljeinkre és számítógépes szimulációinkra támaszkodik. A folyamatosan növekvő adathalmazok elemzésének érdekében meg kell bizonyosodnunk arról, hogy az elméleti modelljeink jól működnek-e ahhoz, hogy használatukkal helyes eredményeket és következtetéseket tudjunk megfogalmazni. Az általam használt csillagfejlődési modellek és izokrónok pontosságának korlátozottságairól Joyce & Chaboyer (2015) cikkében olvashatunk.

2.1. A Gaia űrtávcső és a DR3 katalógus

A Gaia űrtávcsövet az Európai Űrügynökség indította útjára azzal a céllal, hogy meghatározza több mint egymilliárd csillag asztrometriai, fotometriai és spektroszkópiai jellemzőit, ezáltal létrehozva az ismert csillagok tulajdonságaiból a valaha volt legnagyobb pontosságú adatbázisát. A Gaia 2022-es, harmadik adatközlése (a két részletben kiadott EDR3 és DR3) több mint 1,8 milliárd csillagról tartalmazott adatokat, amellyel már igen részletes képet tudott festeni a Tejútrendszerrel és galaxisunk kozmikus környezetéről (Gaia Collaboration et al., 2016, 2021). Ez a katalógus a 2014. július és 2017. május közötti időszak méréseit foglalja magába, ami közel 34 hónapnyi eredmény. Ezzel szemben az első adatközlés (DR1) a 14 hónapnyi, a második (DR2) pedig 22 hónapnyi mérést foglalt magába. A Gaia űrtávcsőre méltán szoktak asztrometriai űrobszervatóriumként hivatkozni, hiszen nem csak egy egyszerű távcsőről van szó. A fedélzeten egy 106 CCD-ből álló kamera áll, amiből 62 asztrometriai paramétereket meghatározó célokra van fenntartva, 14-et alacsony felbontású spektrofotometriára használnak (ebből 7 piros és 7 kék fotométer), a többi 12 kamerával közepes felbontású spektroszkópiai megfigyeléseket végeznek. A Gaia fotometriai rendszere háromféle tartományban rögzíti a csillagok fényességértékét, ezek rendre a G (fehér fény), G_{BP} (kék) és G_{RP} (vörös), ezen szűrők áteresztési függvényei a 5 ábrán láthatóak (Riello et al., 2021).



5. ábra. A Gaia űrtávcső színsávjainak áteresztési függvényei a DR3 katalógus alapján kalibrálva. A szürke vonalak az összeszerelés idején mért áteresztéseket jelzik. (Forrás: Riello et al. (2021), saját fordítás)

2.2. Adatok és bevezetett korrekciók

Az elemzést először az M92 és az NGC 5897 gömbhalmazokra végeztem el, mert a jelenlegi irodalomban ők tartoznak a legtöbbet vizsgált és elemzett halmazok közé (Koch & McWilliam, 2014; Ying et al., 2023). A kiválasztott gömbhalmazaim esetén a SIMBAD¹ adatbázisban megkerestem a halmaz égi koordinátáit (deklináció (δ) és rektaszcenzió (α)) és sajátmozgás komponenseit (deklináció irányú komponens (μ_δ) és rektaszcenzió irányú komponens (μ_α)). Továbbá az Aladin Lite² program használatával megnéztem az égen való elhelyezkedésüket, és megbecsültem a látszó átmérőjüket, hogy adott sugarú körön belül lekérhessem az adatokat a Gaia adatbázisból. Az 1. táblázat összefoglalja a két gömbhalmaz alapadatait, ezt a későbbiekben további halmazok esetén kikerestem, hogy az ők adatait is le tudjam kérni az adatbázisból.

Gömbhalmaz	α (fok)	δ (fok)	μ_α (mas/év)	μ_δ (mas/év)
NGC 5897	229,3516670	-21,0101110	-5.410	-3.46
NGC 6341 (M92)	259,2807920	+43,1359440	-4.930	-0.570

1. táblázat. A két vizsgált teszt gömbhalmaz alapadatai, a SIMBAD adatbázisból kikeresve.

¹<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

²<https://aladin.cds.unistra.fr/AladinLite/>

A lekért adatokon halmaztagság szűrést végeztem Bustos Fierro & Calderón (2019) módszerei alapján, illetve feltérképeztem a különböző instrumentális effektusokat. Ebbe beletartozik az eszköz pontatlanságából adódó mennyiségek korrekciója, a távolságmodulus szerepének felmérése, valamint a csillagközi vörösödés és extinkció feltérképezése (Baumgardt et al., 2019; Wang & Chen, 2019). Számos gömbhalmaz esetén ugyanis csillagközi por áll a fény útjában, emiatt a gömbhalmaz egyes csillagait vörösebbnek látjuk.

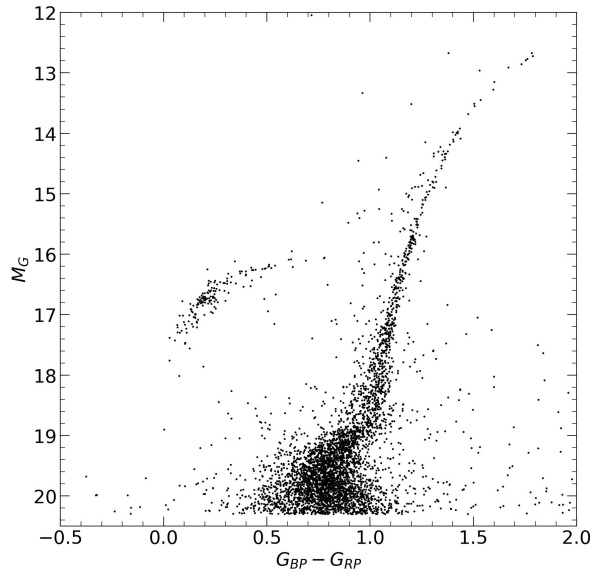
Első lépésként a Gaia adatbázisból³ lekértem ADQL (Astronomical Data Query Language) nyelv segítségével az M92 és az NGC 5897 halmazok középpontjától 5 ívperc sugáron belüli csillagok asztrometriai és fotometriai jellemzőit (az EDR3 katalógusból): ezek közé tartozott a *source_id* (a csillag azonosító száma), *ra* (rektaszcenzió), *dec* (deklináció), *parallax* (parallaxis), *pmra* (sajátmozgás rektaszcenzió komponense), *pmdec* (sajátmozgás deklináció komponense), *phot_g_mean_mag* (G sávban magnitúdó értékek), *bp_rp* (színindex).

Mivel így már minden paraméter a rendelkezésemre állt, a következő lépés, a CMD kirajzolása következett, melynek eredménye a 6. ábrán látható. Egy gömbhalmaz nemcsak onnan azonosítható, hogy a csillagok az égen egy adott gömbszimmetrikus térrészen csoportosulnak, hanem a halmaz tagjainak azonos sajátmozgással is rendelkezniük kell. A lekért csillagok sajátmozgása alapján tehát halmaztagság szűrést lehet végezni annak érdekében, hogy a CMD-n felrajzolt csillagok közötti előtér- és háttércsillagokat kiszűrjük, ezáltal „tisztítva” az adott halmazra vett mintánkat. Mivel már a Gaia archívumban a lekérésnél figyelembe vettem a deklinációs és rektaszcenziós értékeket, csak a sajátmozgást megadó deklinációs és rektaszcenziós értékekre hagyatkozhattam ebben az esetben.

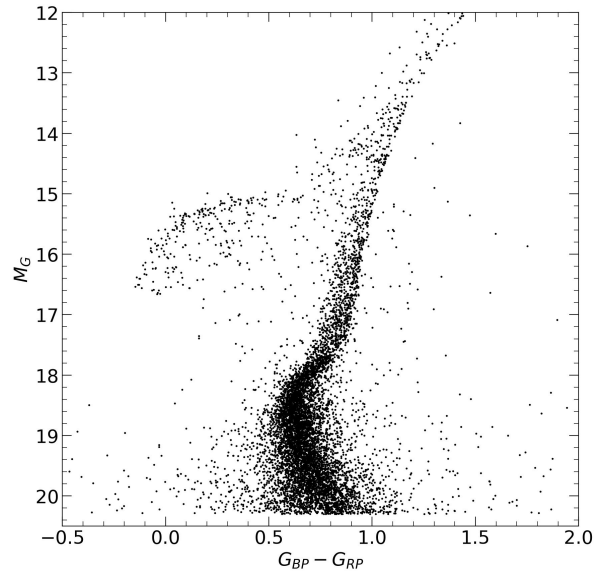
A sajátmozgás ábrát úgy készítettem el, hogy minden csillagot a két sajátmozgás paraméterének megfelelően feltüntettem egy ábrán. Itt már észrevehető volt, hogy azon csillagok, amelyek egy adott érték körül szorosan csoportosulnak, azok lesznek a halmazom tagjai. A SIMBAD adatbázisból kikerestem a halmaz sajátmozgás komponenseit, és ezt is feltüntettem az ábrán. Ilyen ábrákra példa a 7. ábra az NGC 5897 esetén.

Ezek után egy olyan kört vettem fel, ami magába foglalta a legtöbb csillagot, és melynek középpontját a halmaz sajátmozgás komponensei adták meg. A kört felosztottam tetszőlegesen vastag koncentrikus gyűrűkre, ahol azt vizsgáltam, hogy a középponttól kifelé haladva hogyan változik a csillagok száma. Ehhez mindössze annyit kellett tennem, hogy a csillagok számát normáltam az adott gyűrű területével (ezek a bin értékek mértékegység nélküli kvalitatív mennyiségek). Ezeket az értékeket ábrázoltam a csillagok számának függvényében a 7. ábrán. Így adott gömbhalmazra mindig meg tudtam határozni azt a pontot, ahol a csillagok száma belesimul a háttérbe, és ez alapján tudtam behatárolni a kört, amibe eső csillagok már a halmaz részei voltak.

³<https://gea.esac.esa.int/archive/>

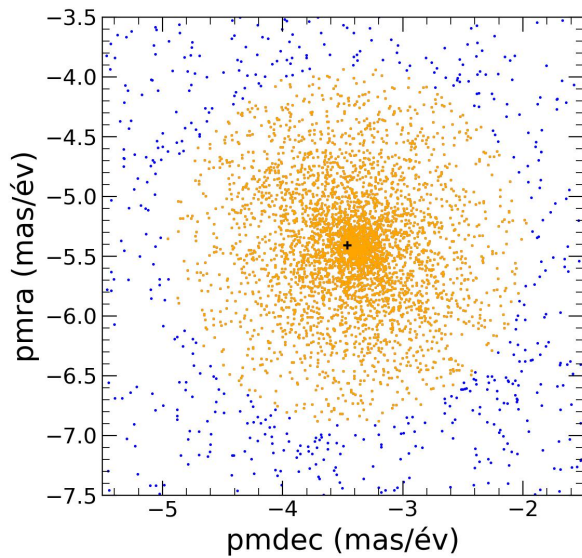


(a) NGC 5897 gömbhalmaz

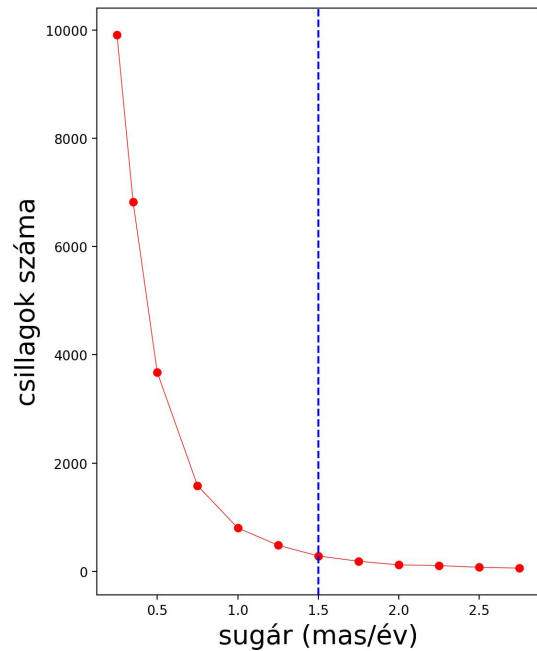


(b) M92 gömbhalmaz

6. ábra. Szűrés előtti szín-fényesség-diagramok, Gaia DR3 katalógus adatainak alapján.



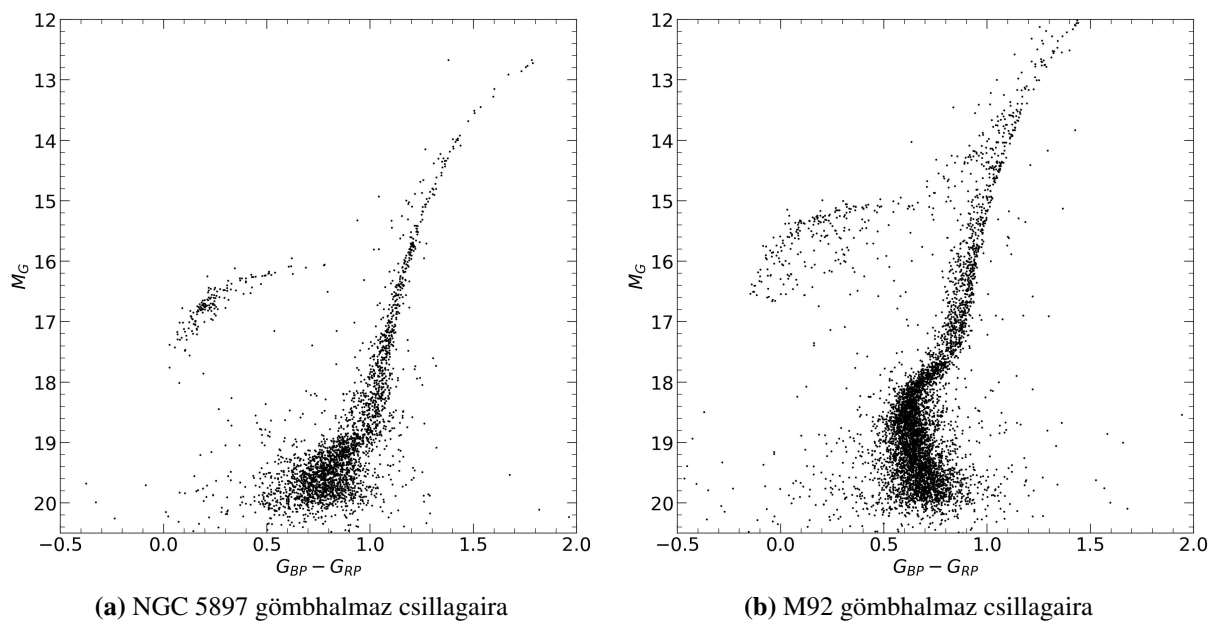
(a) Sajátmozgás diagram (narancssárga szín jelöli a halmaztagoknak tekintett, a kék pedig az abból kiszűrt csillagokat, a fekete kereszt pedig a halmaz egészének sajátmozgás centrumát)



(b) A gömbhalmaz radiális profilja (késsel a vágási határ)

7. ábra. Halmaztagság-vizsgálat az NGC 5897 gömbhalmaz esetén.

A korrekciók bevezetése után a szín-fényesség diagram láthatóan letisztultabb lett, azonban a lefordulási pont körül még mindig látványosan zajos volt az adat. Ezt a problémát szisztematikus hibák kiszűrésével oldottam meg. A Gaia adatbázishoz tartozó kiegészítő cikkek között részletesen taglalva van, hogy a halvány vörös csillagok esetén egy felülbecslés történik adott szűrők esetén a G_{BP} magnitúdó értékekre (Riello et al., 2021). Ezért még a Gaia adatbázisban a feltételek közé beszúrtam azt a feltételt, hogy a 20,3 magnitúdónál halványabb csillagokat ne kérje le. Így kaptam meg a végső letisztult szín-fényesség-diagramokat, amik a 8. ábrán láthatóak, és amire már izokrónt lehet illeszteni.



8. ábra. Instrumentális effektusokra és halmaztagságra szűrt szín-fényesség-diagramok. Szépen látható, hogy az előző diagramhoz képest a lefordulási pont környéke sokkal egyértelműbben kirajzolódik, mely nagyban segíti az izokrón illesztést.

3. Az eljárás bemutatása

Kutatásom során az általam kiválasztott gömbhalmazok csillagaira meghatározott szín-fényesség diagramokra kerestem a megfelelően illeszkedő izokrónt.

3.1. MIST adatbázis

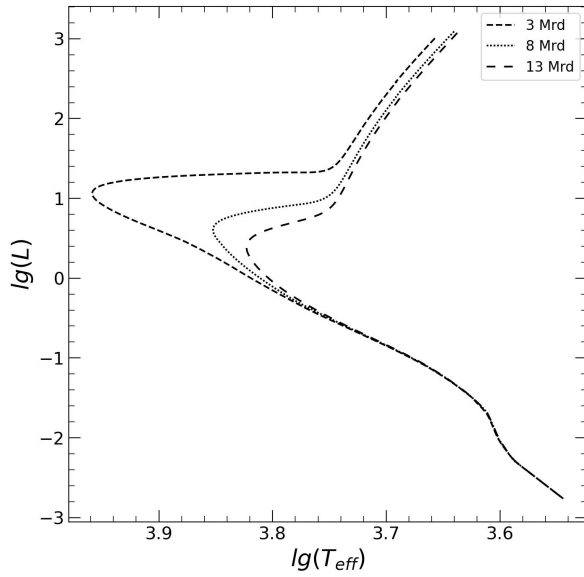
Ehhez szükségem volt különböző korú és fémességű izokrónok a legyártására, amiben a MIST⁴ adatbázis nyújtott segítséget. A MIST (MESA Isochrones and Stellar Tracks), izokrónok és csillagfejlődési utak generálására szolgál, melyhez az adatokat a MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) csillagfejlődési kód biztosítja (Dotter, 2016; Choi et al., 2016). A MESA a sztelláris asztrofizika számos területéhez járul hozzá különböző elméleti modellek számításaira alkalmas kódjaival. Egyesítve a numerikus és különböző fizikai elméleti modelleket, akármilyen csillagra képes szimulációt gyártani. Az asztrofizika szinte összes ága függ az ilyen csillagfejlődési modellek pontosságától, hiszen minden olyan paramétert, amit nem tudunk direkt módon megmérni, azt a modelljeink alapján tudjuk kiszámítani, megbecsülni. Izokrónok legyártásakor két paramétert kell megadni a programnak, az egyik a kor, a másik pedig a fémesség, ezt a 9. ábra szemlélteti.

3.1.1. Az EEP módszer

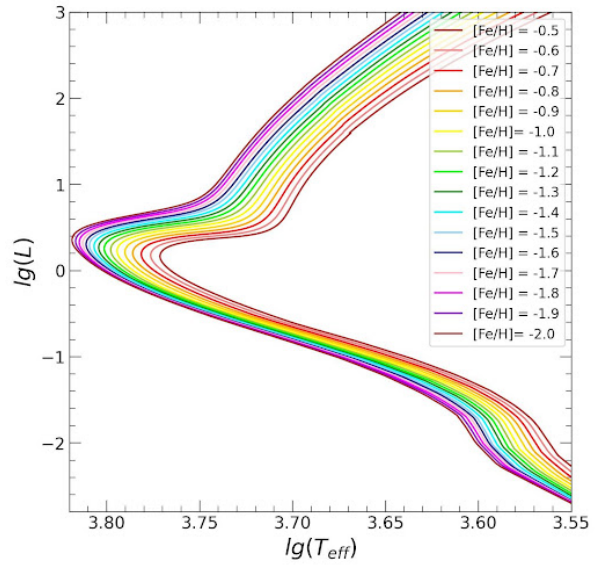
A MIST izokrónok csillagfejlődési utakból keletkeznek, az ún. EEP (Equal Evolutionary Points), azonos fejlődési állapotok módszere alapján, ezt szemlélteti a 10. ábra. Az izokrónokat a MIST weboldalán a Web Interpolator fül alatt lehet legenerálni. A kód az alábbi lépéseket végzi el, amikor a csillagfejlődési utakból izokrónt gyárt:

- Kezdetben az algoritmus veszi a különböző kezdeti tömegű, sűrűn elhelyezett izokrónokat, és jelöli rajtuk a csillagfejlődés főbb szakaszait, amit a bevezetésben már részleteztem. Ezek az elsődleges EEP pontok, amelyek fizikailag is jól definiáltak.
- Az 10. ábra *a)* részén megfigyelhetjük az elsődleges EEP pontokat:
 - PMS (Pre-main Sequence) – fősorozat előtti állapot
 - ZAMS (Zero Age Main Sequence) – nullkorú fősorozat
 - IAMS (Intermediate Age Main Sequence) – fősorozati állapot
 - TAMS (Terminal Age Main Sequence) – fősorozati állapot vége

⁴https://waps.cfa.harvard.edu/MIST/interp_isos.html



(a) Különböző korú izokrónok, azonos fémességgel. Fontos kiemelni, hogy minél idősebb egy izokróna, annál később fordul le a fősorozatról. Mivel a skála logaritmikus, a 3 és 8 milliárd éves és a 8 és 13 milliárd éves izokrónok közt is 5 milliárd év a különbség, mégis ahogy korban haladunk előre (és így a fősorozaton lefele) egyre nehezebben lehet az izokrónok lefordulási pontjait egymástól szétválasztani.



(b) Különböző fémességgű izokrónok, azonos korról. Minél fémgazdagabb egy csillag, annál hamarabb történik a fősorozatról való leválás.

9. ábra. MIST adatbázisból generált izokrónok, két fő tulajdonságuk alapján csoportosítva.

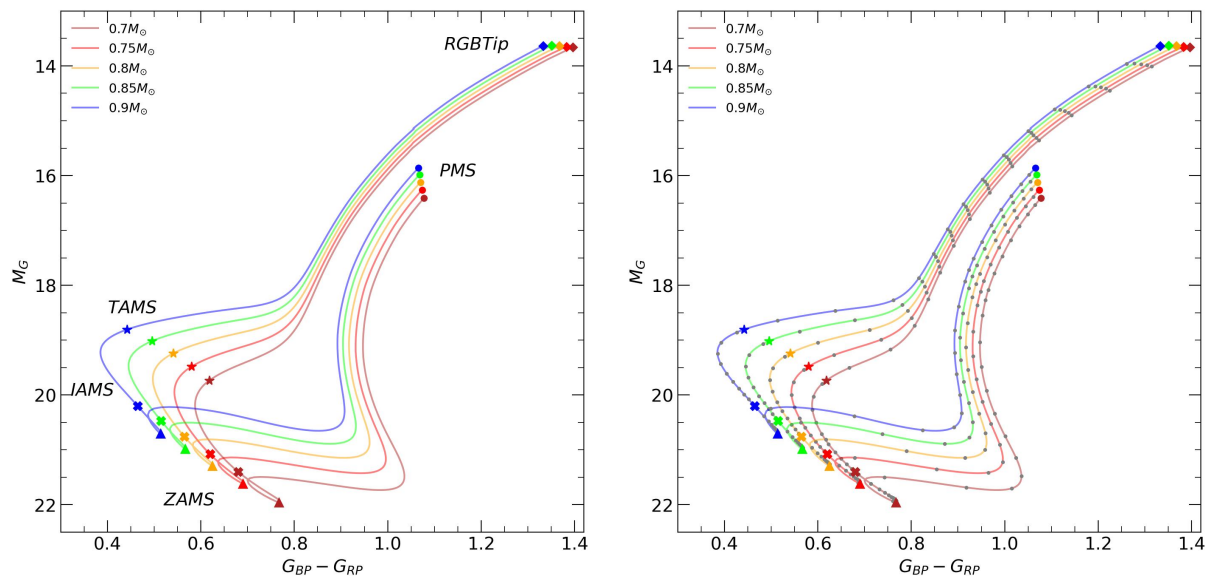
– RGB tip (Red Giant Branch tip) – vörös óriáság csúcsa

- A másodlagos EEP pontokat úgy lehet meghatározni, hogy vesszük a csillagfejlődési utakat és két elsődleges EEP között egyenlő távolságokra osztjuk fel az intervallumot.
- Itt az *egyenlő távolságra* fogalom egy metrikus függvény definiálását takarja, ugyanis ennek segítségével határozhatók meg a távolságok egy görbén.
- Ezután következik az interpoláció, amit az EEP-k által definiált rácspontokra végez el a MIST által használt algoritmus. Ez pedig arra alapszik, hogy kapcsolat van a kezdeti tömeg és az egyenlő fejlődési állapotok között.

Összefoglalva tehát, tulajdonképpen az algoritmus egy bázistranszformációt hajt végre. A minden pontban azonos tömegű csillagfejlődési utat, ami nem függ kortól, egy minden pontban azonos korú tömegtől nem függő görbévé alakítja át, ami az izokróna.

A felhasználó az oldalon kiválaszthatja a kezdeti paramétereket; ezekből a legfontosabb a kor és a fémesség. Ezen kívül még megadható az is, hogy milyen koordináta-rendszerben legyenek az adatok reprezentálva. Lévén az izokrónok elméleti görbék az alapértelmezett

legyártott adatok $\lg(L)$ és $\lg(T_{\text{eff}})$ lesznek, ahol L a luminozítás, T_{eff} pedig az effektív hőmérséklet. Ha a felhasználó ezeket észlelői koordinátákra akarja átranszformálni, akkor magnitúdóban mért fényességre és színindexre van szükségünk. Ennek kiválasztására is van lehetőség, ugyanis az algoritmus több, mint 24 különböző távcső színszűrőire képes ún. szintetikus fotometriai adatokat gyártani.



(a) Elsődleges EEP pontok és megnevezéseik: PMS (Pre-main Sequence) – fősorozat előtti állapot, ZAMS (Zero Age Main Sequence) – nullkorú fősorozat, IAMS (Intermediate Age Main Sequence) – fősorozati állapot, TAMS (Terminal Age Main Sequence) – fősorozati állapot vége, RGB tip (Red Giant Branch tip) – vörös óriáság vége.

(b) Első és másodlagos (szürke) EEP pontok. A másodlagos EEP pontok az elsődleges EEP pontok közötti egyenletes felosztás eredményei.

10. ábra. Azonos fejlődési állapotok (EEP) módszerének szemléletes bemutatása.

3.2. Izokrónok illesztése

Gömbhalmazok korának kiszámításakor feltételezzük, hogy csillagai nagyjából egy időben, és hasonló fémtartalommal keletkeztek. Minél idősebb egy adott halmaz, annál lentebb található a lefordulási pont a fősorozaton, a szín-fényesség diagramon. Ezen pont jelzi azt, hogy mennyire idős a gömbhalmaz, hiszen a kortól függ az, hogy mely tömegű csillagok nem lesznek már a fősorozat részei adott fényesség esetén. Továbbá fontos hangsúlyozni, hogy a nagyobb tömegű csillagok rövidebb életűek, tehát gyorsabban járják be fejlődési utakat és időben hamarabb hagyják el a fősorozatot. Ha egy gömbhalmaz csillagaira megtaláljuk a megfelelően illeszkedő izokrónát, akkor meg tudjuk becsülni annak korát. Mivel az izokrónok elsősorban elméleti görbék, koordináta-transzformációt kell végezni ahhoz, hogy az észlelési adatainkból

gyártott szín-fényesség-diagramjainkra tudjuk őket illeszteni. Ehhez szükséges ismernünk a távolságmodulus képletét:

$$m - M = -5 + 5 \log d + A \quad (14)$$

ahol m a látszó, M az abszolút fényesség, d a távolság parszekben, A pedig a magnitúdóban mért extinkció értéke. Az illesztés során alkalmazott függőleges eltolás segítségével lehet meghatározni, hogy a modell abszolút fényességeihez képest mennyivel volt halványabb a halmaz tagjainak mért fényessége, azaz megadható a távolságmodulus; míg egy ferde eltolásból (amely többnyire a vízszintes komponensre van nagyobb hatással) az extinkciós törvény segítségével lehet megbecsülni, hogy a csillag fénye mennyit vörösödött a csillagközi anyag fényelnyelése miatt.

Jelen esetben azt választottam, hogy az izokrónt az észlelői koordinátarendszerbe transzformálom. Ehhez a MIST adatbázisban lehetőségem volt kiválasztani azt, hogy a legenerált izokrón kimeneti fotometriai értékei legyenek a Gaia adatokhoz igazítva. Ezután pedig a távolságmodulust hozzá kellett adni a G_{BP} , G_{RP} , G értékekhez, hogy y irányban megfelelő legyen az eltolás. Az extinkciót pedig úgy korrigáltam, hogy a csillagok G_{BP} , G_{RP} és G értékeiből lehessen kivonni a bevitt extinkció értékét, ez volt az x irányú eltolás fő komponense.

3.3. A 4 dimenziós paraméter-illesztés

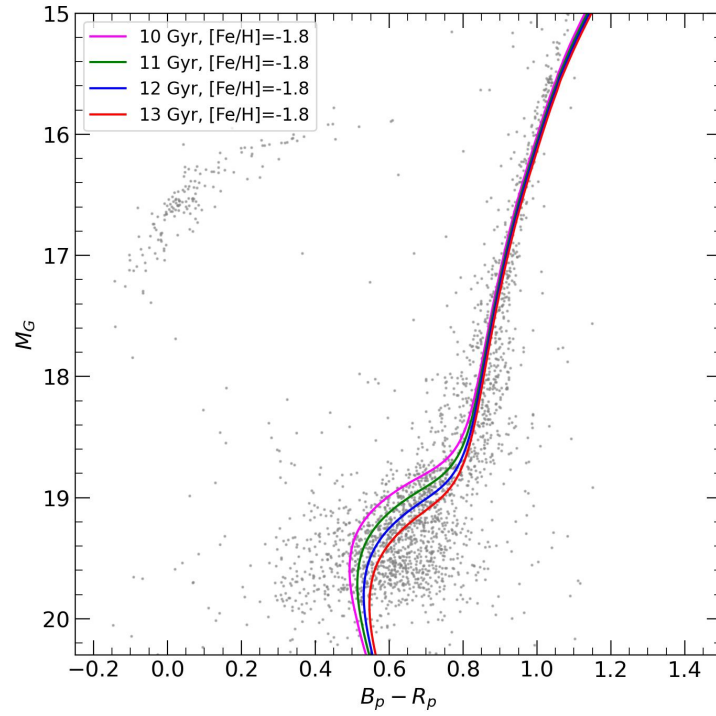
A módszerem elsősorban arra alapozom, hogy a MIST modell izokrónjai a hélium-villanásig pontosak, a horizontális ágon és az aszimptotikus óriáságon már fellépnek különböző szisztematikus hibák (Joyce & Chaboyer, 2015). Azonban gömbhalmazok esetén az életkor meghatározására a kulcsfontosságú szempont az izokrónnak a lefordulási pontra és a vörös óriáságra való illeszkedése. Illesztéseimkor tehát egy vágást végeztem az izokrónokon is az EEP (Equal Evolutionary Point) alapján. Megvizsgáltam több esetben is, hogy a vörös óriáság tetejéig, azaz a hélium villanás fejlődési szakaszig a modellek esetén nem lép fel semmi hiba.

A letisztult CMD-knek köszönhetően a megfelelően csonkított izokrónok illesztése az észlelési adatokra most már jóval könnyebben megy, mint korábban. Az illesztéshez egy *python* programot írtam, ahol interaktívan lehetett a MIST segítségével generált izokrónokat a Gaia adatok által meghatározott szín-fényesség diagramokon mozgatni.

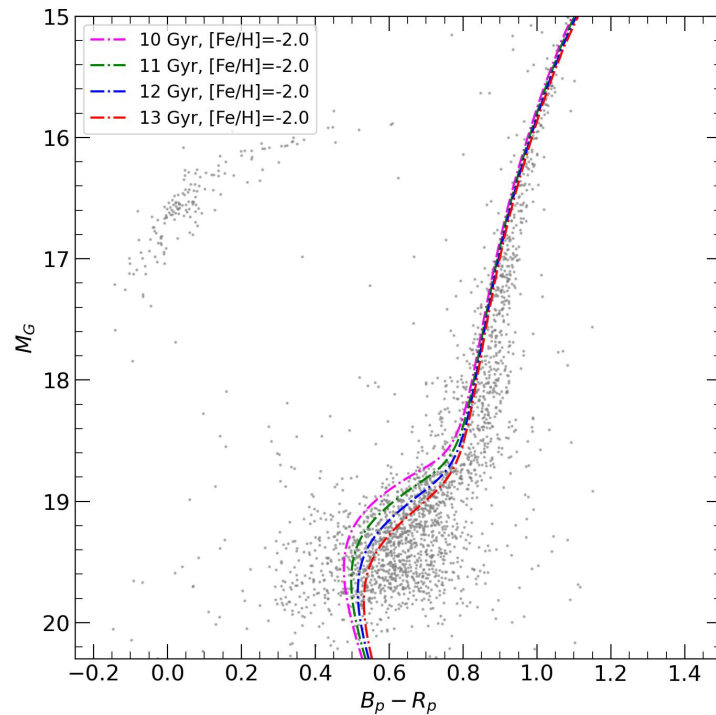
Első lépésben legeneráltam 24 izokrónt különböző életkorokra és fémességértékekre, meghatározva egy kezdeti alsó és felső határt: rendszerint 10, 11, 12 és 13 milliárd éves izokrónokat, ahol $[Fe/H] \in \{-2, -1, 0, 1\}$. Ezek után megnéztem, hogy az izokrónok közül melyik esetén áll fenn, hogy a lefordulási pont alakja hasonló a generált görbe alakjához. Ez volt a durva közelítés módszere. Fontos kiemelni azt is, hogy az izokrónok igen érzékenyek a fémességérték

változtatására. Sok esetben már a durva közelítési módszernél el kellett vetnem a nem odaillő fémességértékű izokrónokat.

Ezután pontosítottam a módszert: további izokrónok hoztam létre a MIST segítségével, ezúttal viszont figyelve, hogy közelebb legyenek egymáshoz a görbék, az eltérő fémességértékek közti különbséget 0,5 dex értékre módosítottam, az életkorokat pedig 0,5 milliárd éves különbséggel gyártottam le. A legvégső finomítás során szükség volt fémességben 0,1 dex-el eltérő izokrónok generálására. Illesztéskor tehát az izokrónok adatsorait betöltve már egy adott izokrón esetén a kor és fémesség adott volt, a változtatható paraméternek a távolságmodulus és az extinkció értékei maradtak. Két csúszka segítségével lehetett illeszteni az izokrónt, egyikkel a távolságmodulust lehetett beállítani, tehát magát az izokrónt mozgattam vele, a másik pedig a csillagok eltolásáért felelt, ez adta meg az extinkció értékét. Ezeket addig finomhangoltam minden esetben, amíg a lefordulási pontnál meg nem találtam vizuális választás alapján megfelelő illeszkedést.



(a)



(b)

11. ábra. Különböző korú és fémességű izokrónok illesztése az NGC 5897 gömbhalmaz szín-fényesség diagramjára. A különböző színek különböző izokrónok korait jelölik. Az a) ábrán a folytonos vonalnak $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,8$ -as fémességértéknek a b) ábrán a szaggatott vonallal jelölve pedig $-2,0$ -as fémességértéknek. Az izokrónok bár jelentősen különböznek korban mégis nagyon közel vannak egymáshoz a síkon.

4. Eredmények

Jelen dolgozatomban tehát a fentebb leírt módszerek alapján izokrón illesztéseket végeztem galaktikus gömbhalmazokra. Először két teszt halmazra (M92 és NGC 5897), majd a módszerek sikeres implementációja után további 55 gömbhalmazra. Összesen így 57 halmazra végeztem sikeres izokrón illesztést. Ezeket a gömbhalmazokat Forbes & Bridges (2010) cikkéből választottam ki, munkájukban ők 93 gömbhalmazt vizsgáltak, én ebből a táblázatban levő első 61 NGC katalógusszámmal is rendelkező halmazt választottam ki. Ezen mintából 6 gömbhalmazra (NGC 6287, NGC 5694, NGC 2419, NGC 5946, NGC 6284, NGC 6544) nem sikerült megfelelően illeszkedő izokrónt találni, ez annak tudható be, hogy nagyon kicsi a gömbhalmazok látszó szögátmérője, és ebből adódóan nem áll rendelkezésünkre elegendő csillag, hogy a megfelelő halmaztagság szűrést elvégezzük, valamint hogy a CMD egyes részeit kellően populánsan lefedjük.

4.1. Illesztések a teszt gömbhalmazokra

Elsőként az NGC 5897 halmaz illesztésének eredményeit foglalnám össze, amely a 2. táblázatban látható. Mint ahogyan az már korábban is említve volt, egy adott gömbhalmazra több izokrón is illeszkedhet, ennek függvényében pedig a fémességérték ($[Fe/H]$), a távolságmodulus (d) és az extinkciók (A_G) értéke is változik. Így a 2. táblázat sorai tehát külön-külön jó illesztések a halmazra. Táblázatom azt hivatott tükrözni, hogy egy 13 milliárd éves izokrón illesztését összevetve egy 12 milliárd éves hasonló fémességű izokrón illesztésével nagyon hasonló eredményeket lehet kapni, ezért is van az, hogy az illesztés hibája akár 0,5 és 1 milliárd éves is lehet. A 2. táblázat alapján elmondható, hogy az általam meghatározott életkor az NGC 5897 gömbhalmazra $12,5 \pm 0,5$ milliárd év, amely egyezést mutat a Forbes & Bridges (2010) cikkében meghatározott $12,3 \pm 0,5$ éves eredményével. A fémesség $[Fe/H] = -1,9 \pm 0,1$ dex érték körül mozog, amely nagyságrendileg megközelíti az előbb említett cikkben meghatározott $-1,73$ -as értéket, illetve még közelebbi egyezést mutat egy frissebb tanulmánnyal, mely a halmaz fémességét $-2,04 \pm 0,01$ értékűnek határozta meg (Koch & McWilliam, 2014). A távolságmodulus $15,97 \pm 0,07$ mag, amely jól közelíti a Baumgardt & Vasiliev (2021) cikkbéli $15,46$ -os értéket. Az extinkcióról az mondhatjuk el, hogy $A_G = 0,17 \pm 0,04$ mag érték körül mozog. Az eredmények hibáját az átlagtól való eltérések átlagaként számítottam ki.

Kor (Mrd év)	[Fe/H]	d (mag)	A_G (mag)
13,0	-1,8	15,9	0,18
13,0	-1,9	16,0	0,17
13,0	-2,0	15,9	0,18
12,5	-1,8	16,0	0,15
12,5	-1,9	16,0	0,17
12,5	-2,0	15,9	0,20
12,0	-1,8	16,1	0,15
12,0	-1,9	16,1	0,17
12,0	-2,0	15,9	0,21

2. táblázat. Eredménytáblázat az NGC 5897 gömbhalmaz izokrón illesztéseire.

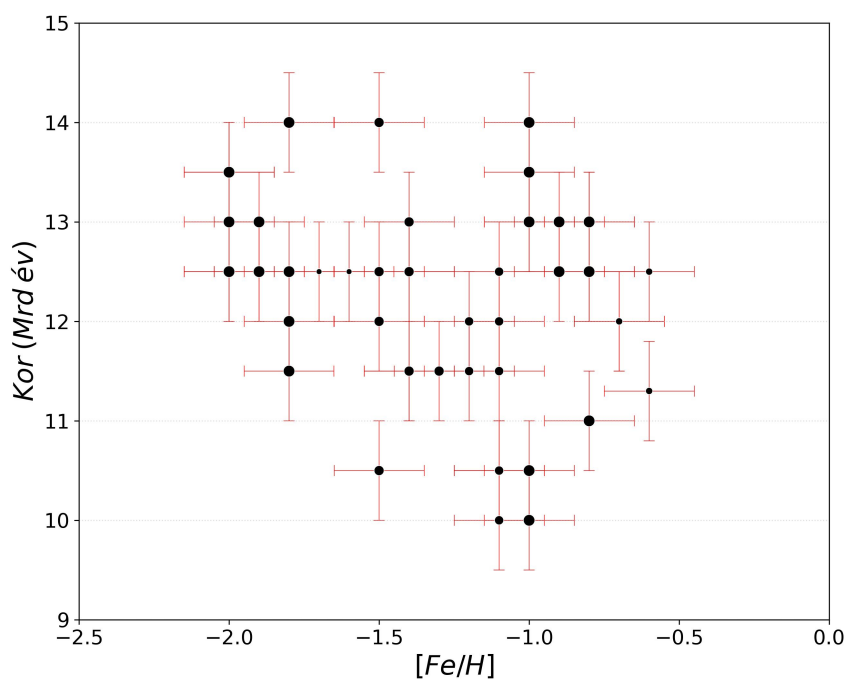
Hasonlóan elvégezhető ez az M92 gömbhalmazra, melyek eredményei a 3. táblázatban láthatóak összefoglalva. Ez esetben a kor $13,0 \pm 0,5$ milliárd év, mely hibán belül egyezik a Ying et al. (2023) cikkben meghatározott $13,80 \pm 0,75$ milliárd éves korral. A fémesség $[Fe/H] = -2,0 \pm 0,1$ dex érték körül mozog, amely jó egyezés mutat a Forbes & Bridges (2010) cikkében meghatározott $-2,16$ értékkel. A távolságmodulus $14,74 \pm 0,04$ magnitúdós értéke a Baumgardt & Vasiliev (2021) cikkből vett $14,6$ mag értékkel szintén összhangban van. Az extinkció ebben az esetben $A_G = 0,07 \pm 0,01$ mag körüli.

Kor (Mrd év)	[Fe/H]	d (mag)	A_G (mag)
13,0	-2,1	14,8	0,09
13,0	-2,0	14,74	0,07
13,0	-1,9	14,69	0,08
12,5	-2,1	14,75	0,05
12,5	-2,0	14,8	0,07
12,5	-1,9	14,77	0,08
13,5	-2,1	14,68	0,07
13,5	-2,0	14,75	0,06
13,5	-1,9	14,65	0,06

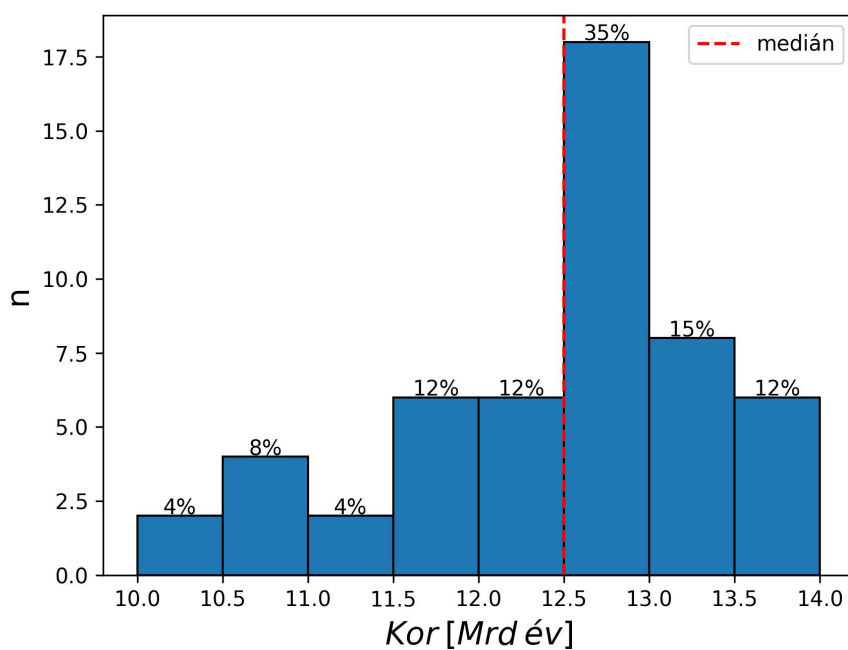
3. táblázat. Eredménytáblázat az M92 (NGC 6341) gömbhalmaz izokrón illesztéseire.

4.1.1. Illesztések eredményei más gömbhalmazokra

További 55 gömbhalmazra is elvégeztem az illesztéseket, az így meghatározott paraméterek a A2. táblázatban láthatóak a függelékben. A relatív hibák minden esetben azonosak. Azon túl, hogy meghatároztam minden gömbhalmazra a kort és a fémességet, érdekelt az is, hogy tudunk-e mondani valamit a két paraméter közötti összefüggésről. Ehhez ábrázoltam a gömbhalmazokat kor és fémesség függvényében, ezt láthatjuk a 12. ábrán.



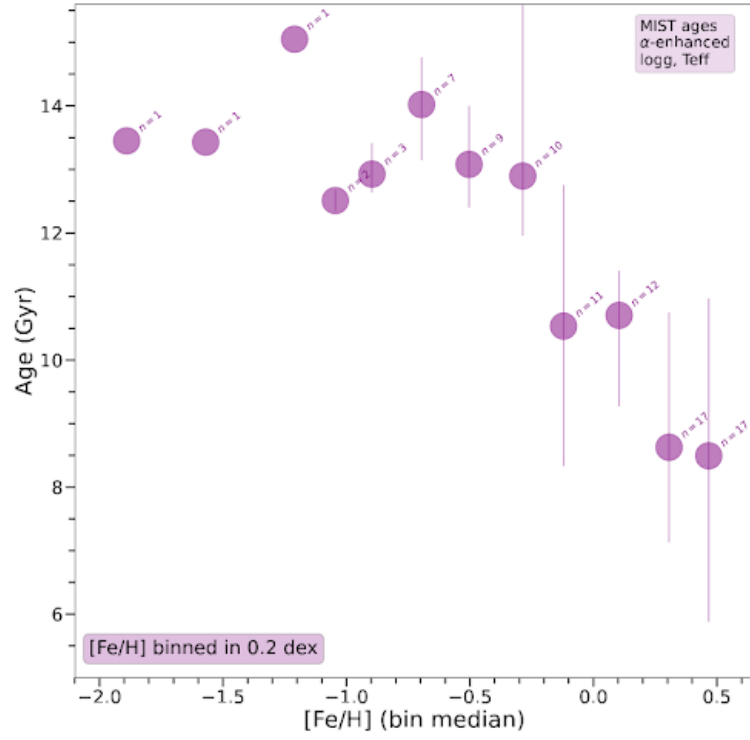
12. ábra. Az általam vizsgált gömbhalmazok kor-fémesség ábrája. Az adatpontok nagysága súlyozva van a tartományba eső gömbhalmazok számával.



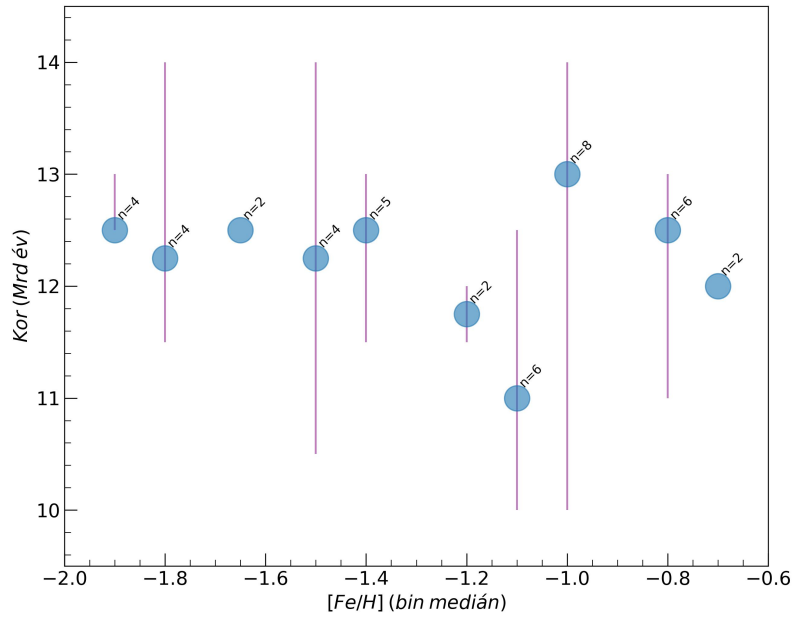
13. ábra. A vizsgált gömbhalmazok életkorának eloszlása a Tejútrendszerben. A piros szaggatott vonal a medián bint jelöli.

Erről az ábráról azonban még sok következtetést nem tudunk levonni, az ábrán a nagyobb pontok több modellt jelölnek, amik ugyanabba az adott binbe esnek, ezért az eredményeket ábrázoltam hisztogramos formában is a kor függvényében, ez látható a 13. ábrán. Ebből az derül ki, hogy a Tejútrendszerben a gömbhalmazok domináns életkora 12,5 milliárd év körül van. Ez egy becslést ad a Tejútrendszer életkorára is, ha feltételezzük, hogy a vizsgált gömbhalmazok csillagai a galaxisunkkal egyszerre keletkeztek. Ez a becslés a galaxisunk korára hibahatáron belüli egyezést mutat egy nemrégiben publikált cikkben meghatározott életkorral (Xiang & Rix, 2022).

Meridith Joyce 2023-as cikkében néhány galaktikus dudorban lévő törpe- és szubóriás csillag életkorát határozta meg szintén izokrón illesztéssel, majd ezt egy kor-fémesség ábrán súlyozva tüntette fel (14a ábra, Joyce et al. (2023)). Az ábrát reprodukáltam a saját gömbhalmazaim adataira a 14b. ábrán és azt találtam, hogy a két ábra a közös fémesség tartományon ugyanazt a trendet mutatja. Az eloszlás egyenletes, amiből arra következtethetünk, hogy $-0,5$ fémesség érték alatt nincs különösebb összefüggés a kor és a fémesség között.



(a)



(b)

14. ábra. (a) Joyce et al. (2023) ábrája, ami egy kor-fémesség eloszlást mutat a galaktikus dudor csillagaira (b) súlyozott kor-fémesség eloszlás az általam vizsgált gömbhalmazokra

5. Összefoglalás és kitekintés

Kutatásom során 57 gömbhalmaz tisztított szín-fényesség diagramját hoztam létre Gaia adatokból, melyekre aztán izokrónákat illesztettem. A teszt fázisban sikeresen elvégeztem az illesztést két kiválasztott gömbhalmazra (M92 és NGC 5897), majd a módszert további 55 gömbhalmazra is sikeresen alkalmaztam, ezt tükrözi a szakirodalmi értékekkel való egyezés.

Összességében tehát kidolgoztam egy egyszerű módszert arra, hogy Gaia adatokra elvégezve a megfelelő szűrést tetszőleges gömbhalmaz életkorát meg lehessen becsülni, ezzel együtt pedig a fémesség, távolságmodulus és csillagközi extinkció értékeket is meghatározni. Mivel a kiválasztott gömbhalmazaim mind a Tejútrendszerhez tartoznak, a korok alapján becslést tudtam adni galaxisunk korára is, feltéve azt, hogy a halmazokban levő csillagok a Tejútrendszerrel azonos időben keletkeztek. A kapott eredményem hibahatáron belüli egyezést mutat a legfrissebb publikált értékkel. Ezen túl a gömbhalmazok kor-fémesség ábrája arra világított rá, hogy a vizsgált fémesség tartományon a kor független a fémességtől.

A kutatás folytatásaként tervezem még több gömbhalmazra kiterjeszteni az illesztési módszert, külön figyelve arra is, hogy fémgazdagabb halmazok esetén tudunk-e mondani bármit a kor-fémesség függésükről, ahogy azt várnánk Joyce et al. (2023) munkája nyomán. Ez azért is szükséges, mert minél többféle gömbhalmazt vizsgálok meg, annál pontosabb becslést kaphatok a Tejútrendszer korára. Eddigi munkámban néhány olyan gömbhalmazra is végeztem illesztést, amelyben több csillagpopuláció is jelen van különböző fémesség értékekkel, ezt a továbbiakban részletesebben szeretném vizsgálni. Lévé a vizuális illesztés nem ad kellően pontos becslést a gömbhalmazok korára, egy automatizált illesztési módszer kifejlesztésén dolgozom, hasonlóan a Ying et al. (2023) cikkben részletezett szintetikus CMD gyártással és Voronoi tesszellációval. Továbbá, hogy a Gaia adatokban rejlő potenciált szemléltessem, az illesztéseket a Hubble űrtávcső mérési adataira is tervezem elvégezni az általam kiválasztott gömbhalmazokra. Végül szeretném a gömbhalmazokat kinematikailag is megvizsgálni, és összefüggést keresni a fémesség és a gömbhalmazok galaxisbeli elhelyezkedése, valamint sajátmozgása között. itt el van rontva egy hivatkozás a szintetikus cmdnel

Köszönetnyilvánítás

Hálásan köszönöm Kalup Csilla és Dr. Meridith Joyce témavezetőim szakmai segítségét, lelki támogatását és lektorálását. Valamint Dr. Molnár Lászlónak, aki kutatócsoportunk, a SeismoLab vezetőjeként elengedhetetlen háttértudást szolgáltatott a kutatásomhoz. Köszönöm a CSFK CSI demonstrátori programjának támogatását is. Nem utolsó sorban a Bolyai Kollégium fizikus szakszemináriumának és barátaimnak is megköszönöm a segítséget, akik jó meglátásaikkal és ötleteikkel hozzájárultak dolgozatom végső formájához.

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-23-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával és az NKFIH KKP–137523 „SeismoLab” Élvonal pályázat támogatásával készült.

Hivatkozások

- Bastian, N., & Lardo, C. 2018, ARA&A, 56, 83
- Baumgardt, H., Hilker, M., Sollima, A., & Bellini, A. 2019, MNRAS, 482, 5138
- Baumgardt, H., & Vasiliev, E. 2021, MNRAS, 505, 5957
- Bustos Fierro, I. H., & Calderón, J. H. 2019, MNRAS, 488, 3024
- Choi, J., Dotter, A., Conroy, C., et al. 2016, ApJ, 823, 102
- Dotter, A. 2016, ApJS, 222, 8
- Dálya, G. 2021, Bevezetés a csillagászatba (ELKH CSFK), 625
- Forbes, D. A., & Bridges, T. 2010, MNRAS, 404, 1203
- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., et al. 2016, A&A, 595, A1
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2021, A&A, 649, A1
- Harris, J., & Zaritsky, D. 2009, AJ, 138, 1243
- Joyce, M., & Chaboyer, B. 2015, ApJ, 814, 142
- Joyce, M., Johnson, C. I., Marchetti, T., et al. 2023, ApJ, 946, 28
- Koch, A., & McWilliam, A. 2014, A&A, 565, A23
- Monelli, M., Milone, A. P., Stetson, P. B., et al. 2013, MNRAS, 431, 2126
- Muraközy, J., & Ludmány, A. 2015, Bevezetés a csillagászatba (Debreceni Egyetem), 69
- Piotto, G., De Angeli, F., King, I. R., et al. 2004, ApJ, 604, L109
- Riello, M., De Angeli, F., Evans, D. W., et al. 2021, A&A, 649, A3
- Szatmáry, K., Székely, P., Szalai, T., & Szabó, M. G. 2011, Csillagászat (elektronikus BSc tananyag), 625
- Tailo, M., Di Criscienzo, M., D'Antona, F., Caloi, V., & Ventura, P. 2016, MNRAS, 457, 4525
- Tóth, L. V. 2013, A Tejútrendszer szerkezete (Eötvös Loránd Tudományegyetem), 184
- Wang, S., & Chen, X. 2019, ApJ, 877, 116

Xiang, M., & Rix, H.-W. 2022, *Nature*, 603, 599

Ying, J. M., Chaboyer, B., Boudreaux, E. M., et al. 2023, *AJ*, 166, 18

A. Függelék

Gömbhalmaz	Kor (Mrd év)	[Fe/H]	d (mag)	A_G (mag)
NGC 6171	14.0	-1.0	14.20	0.57
NGC 6144	14.0	-1.5	14.90	0.60
NGC 6779	14.0	-1.8	15.30	0.35
NGC 5466	13.5	-2.0	16.09	0.05
NGC 6304	13.5	-2.0	14.70	0.80
NGC 6362	13.5	-1.0	14.60	0.42
NGC 6366	11.3	-0.6	13.65	0.90
NGC 6341*	13.0	-2.0	14.74	0.07
NGC 6717	13.0	-1.0	14.90	0.26
NGC 104	13.0	-1.0	13.50	0.10
NGC 6637	13.0	-0.8	15.27	0.25
NGC 6723	13.0	-0.8	14.61	0.09
NGC 6541	13.0	-1.4	14.75	0.15
NGC 6652	13.0	-0.9	15.03	0.20
NGC 6426	13.0	-1.9	16.30	0.54
NGC 5824	12.5	-1.7	17.00	0.22
NGC 6681	12.5	-1.4	15.17	0.14
NGC 5024	12.5	-2.0	16.30	0.05
NGC 5927	12.5	-0.6	14.98	0.60
NGC 6218	12.5	-0.9	15.10	0.64
NGC 6352	12.5	-0.8	14.10	0.42
NGC 6397	12.5	-1.9	12.32	0.30
NGC 6656	12.5	-1.5	13.07	0.50
NGC 4372	12.5	-1.8	14.50	0.67
NGC 4833	12.5	-1.9	14.87	0.45
NGC 5286	12.5	-2.0	15.70	0.42
NGC 6093	12.5	-1.4	15.28	0.28
NGC 6101	12.5	-1.6	15.94	0.15
NGC 6121	12.5	-1.1	12.06	0.59
NGC 6624	12.5	-0.8	15.08	0.34
NGC 6496	12.5	-0.8	15.39	0.37
NGC 5897*	12.5	-1.9	16.35	0.17
NGC 5053	12.5	-2.0	16.36	0.05
NGC 5986	12.0	-1.2	15.66	0.36
NGC 6342	12.0	-0.7	15.48	0.52
NGC 6388	12.0	-0.7	15.59	0.47
NGC 6273	12.0	-1.5	15.23	0.42
NGC 6266	12.0	-1.1	14.96	0.55

A1. táblázat. Illesztések eredménye a kiválasztott gömbhalmazokra

Gömbhalmaz	Kor [mrd. év]	[Fe/H]	d	A
NGC 6752	12.0	-1.8	13.51	0.16
NGC 6205	11.5	-1.8	14.68	0.09
NGC 5139	11.5	-1.4	13.99	0.20
NGC 5272	11.5	-1.3	15.18	0.02
NGC 6235	11.5	-1.1	15.50	0.49
NGC 6254	11.5	-1.4	14.04	0.35
NGC 6441	11.5	-1.2	14.33	0.37
NGC 6584	11.0	-0.8	16.08	0.10
NGC 288	10.5	-1.1	15.22	0.05
NGC 5904	10.5	-1.1	14.61	0.03
NGC 6535	10.5	-1.5	15.05	0.56
NGC 6712	10.5	-1.0	15.25	0.54
NGC 362	10.0	-1.1	14.99	0.06
NGC 3201	10.0	-1.0	13.79	0.36

A2. táblázat. Illesztések eredménye a kiválasztott gömbhalmazokra