

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ ИНСТИТУТ ПО АСТРОНОМИЯ С НАЦИОНАЛНА АСТРОНОМИЧЕСКА ОБСЕРВАТОРИЯ

Звездни системи в Местната група: Звездни купове в Големия Магеланов Облак

Григор Бойков Николов

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен "доктор"

София, 2019г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Научния семинар на Института по Астрономия с НАО, проведен на 08.05.2019 г.

Дисертационният труд съдържа 111 страници, 57 фигури, и 7 таблици, цитирани са 128 източника. Организиран е в 7 глави и библиография. Дисертантът е асистент в Института по Астрономия с НАО, Българска Академия на Науките в отдел "Звезди и звездни системи".



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ ИНСТИТУТ ПО АСТРОНОМИЯ С НАЦИОНАЛНА АСТРОНОМИЧЕСКА ОБСЕРВАТОРИЯ

Звездни системи в Местната група: Звездни купове в Големия Магеланов Облак

Григор Бойков Николов

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен "доктор"

София, 2019г.

Благодарности

Моята най-дълбока признателност е за Мери Контизас всичко което знам за южните небеса дължа на нея. На научния ми консултант Хараламби Марков благодаря изключително много, че се нае да ме напътства, за да доведем настоящите изследвания до завършен край. На Илиан Илиев и Иванка Статева изказвам благодарности за безценните съвети през целия ми професионален път. Никола Петров ме просвети много за работата и живота на един астроном. Благодарен съм на Петко Недялков, Евгени Овчаров и всички мои колеги от Софийския Университет, че успяха да ми преподадат знанията си формално и неформално, и специално на Валери Голев за подкрепата по време на обучението ми. На колегите от Атинския университет - Адонис Карабелас, Евдокия Ливану, Янис Белас-Велидис и Евангелос Контизас съм благодарен за споделянето на гръцкия начин на живот и предоставените възможности да работим заедно, особено на Тасос Даперголас, който ме научи да работя с данни от Хъбъл. На всички колеги от Института по Астрономия благодаря за подкрепата през годините на работа заедно, а на колегите ми набори - Мая Белчева, Кирил Стоянов, Пламен Николов, Георги Латев, Александър Куртенков, специално благодаря за споделените моменти и идеи. Представения труд е частично финансиран с подкрепата на Фонд Научни Изследвания чрез договор КП-06-Н28/2. Накрая бих искал да благодаря и на семейството ми - сестра ми и майка ми, за подкрепата през целия ми живот. Годеницата ми Мария има моята любов и най-искрените ми благодарности, че е до мен.

1. Въведение

Близката галактика Голям Магеланов Облак предоставя възможност за изследване на звездни купове разделени на звезди с помощта на съвременни телескопи. Намира се на разстояние от 50 kpc, съдържа около 4300 звездни купа на различни възрасти: десетки купове с възрасти > 9 млрд.г. както и множество купове по-млади от 4 млрд.г.

Населените звездни системи могат да бъдат описвани динамично чрез методите на статистическата механика, разглеждайки ги като съвкупност от голям брой материални точки ($N > 10^3$) взаимодействащи си гравитационно. Главните процеси с принос към динамичната еволюция на такива системи са промяна на вектора на движение на звездите в гравитационното поле на системата, и близки срещи между членовете на купа. Последният процес предизвиква бавна пертурбация на звездните орбити във фазовото пространство и води до промяна на техните първоначални параметри. Характеристичното време, за което звезда губи спомена за първоначалното си орбитално състояние се нарича *време на релаксация*.

Всеки звезден куп съдържа звезди с различни маси. Близките срещи между звезди се стремят да доведат до изравняване на κu *нетичната* енергия (E_K) на членовете на купа - състояние в което кинетичната енергия на различните звезди е еднаква. Тъй като масата на звездите не се променя при срещите, величината, която изравнява кинетичните енергии е скоростта на звездите v. Като цяло, звездите с голяма E_K ($E_K = \frac{1}{2}mv^2$) губят енергия чрез придаване на скорост на тези с малка E_K . В обичайни системи, като напр. газ, този процес води точно до релаксирано състояние, в което усреднените скорости на частиците са обратнопропорционални на тяхната маса. Но в звездните системи масивните звезди, които губят E_K имат по-малки скорости и пропадат по-дълбоко в гравитационното поле към центъра на купа. От друга страна маломасивните звезди бавно дифундират към външната област на купа. Този процес се нарича *сегрегация на масите* в звездни купове.

Един от широко използваните методи за изследване на сегрегация на масите в звездни купове е промяна на характеристичен радиус за групи звезди с различни маси, M_R^{ch} (Farouki et al. (1983), de Grijs et al. (2002), Gouliermis et al. (2009)). Основно предимство на този метод е, че не е необходимо пряко измерване на звездните маси, а е достатъчно да има критерий за правилна подредба на звездите по маса. Приложеният в Глава 5 на дисертацията метод групира звездите по блясък във филтър V и използва за характеристичен r_c - радиуса на ядрото.

Цели на изследването

Процесите на образуване на звездни купове са все още не добре разгадани. Как се зараждат звездните купове, каква е тяхната еволюция? Може ли сегрегация на масите да бъде отъждествена в млади звездни купове?

В настоящата дисертация ще се опитам да хвърля светлина върху някои от тези теми. Главната цел на това изследване е да бъдат използвани превъзходните способности за ъглово разделяне на обектите на космическия телескоп Хъбъл и наличните архивни наблюдения на звездни купове от Големия Магеланов Облак за изследване на разпределението на звездите в извадка от купове и оценка на възрастта на звездното им население.

Наблюдения и методи на изследване

Настоящото изследване се базира на архивни данни от телескопа Хъбъл с неговата Широкоъгълна и Планетна камера 2 (WFPC2), чиято разделителна способност достига до 0.0455"/пиксел. В глава 2 от дисертационния труд са представени телескопа, камерата WFPC2, описание на наблюденията и пълния списък с използваните наблюдения в Таблица 2.2.

На калибрираните от архива изображения е направена фотометрия с HSTphot - пакет за фотометрия по функция на разпространение от точков източник (PSF), оптимизиран за условията на работа на WFPC2 камерата. Стъпките с направените в дисертационния труд фотометричните измервания са описани в глава 3. От изображенията са маскирани недостатъци (лоши пиксели, области на винетиране, и др.), определен е фона на небето на кадрите, премахнати горещи пиксели и космически лъчи и е направена PSF фотометрия. Каталогът на всеки изследван куп е изчистен от незвездни обекти и съдържа само звезди в полето на зрение на WFPC2 камерата.

Изследването на динамичното състояние на куповете е извършено чрез анализ на профили на звездната плътност за всеки звезден куп. Построяването на тези профили е направено на базата на преброяване на звезди от окончателния фотометричен каталог регистрирани в концентрични пръстени избрани по начина описан в глава 4. Звездната плътност в пръстен *i* изчисляваме като броя

3



Фигура 4.1: Полето на зрение на WFPC2 камера в пикселни координати (x,y), ефективните граници на четирите CCD детектора са отбелязани с червени линии, изключвайки областите на винетиране помежду им. С точки са нанесени звездите от NGC 2031 от всеки втори пръстен със стъпка 4 дъгови секунди от центъра на купа.

звезди $N_{stars}(i)$ върху площта на пръстена A(i)

$$f(i) = \frac{N_{stars}(i) \ C_c(i)}{A(i)}$$

където $C_c(i)$ е корекцията за непълнота определена от симулации на изкуствени звезди по време на фотометричните измервания.

В серия от статии King (1962) предлага емпирична формула, която добре описва радиалната плътност на кълбовидни купове в Млечния път и е приета за общовалидна за сферично-симетрични системи намиращи се в гравитационното поле на галактика. Моделът на King има следния аналитичен вид:

$$f(r) = f_0 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + (r/r_c)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (r_t/r_c)^2}} \right\}^2 + f_t$$

където r_c е радиуса на ядрото, r_t е радиуса на приливно взаимодействие, а отношението $c = log(r_c/r_t)$ е параметър на концентрация на звездния куп. Звездната плътност в центъра на купа е f_0 , а f_b е фоновата звездна плътност.

През 1987 Elson et al. показват, че разпределението на звезди в млади купове от Големия Магеланов Облак може да бъде описано чрез степенен закон. До такъв се редуцира моделът на King (1962) за малки радиуси, когато приливното взаимодействие от галактиката е пренебрежимо. Моделът на Elson et al. (1987) (за краткост EFF87) се представя аналитично с формулата:

$$f(r) = f_0 \left(1 + \frac{r^2}{a^2} \right)^{(-\gamma/2)} + f_b$$

където f(r) е радиалната звездна плътност, a е скалиращ параметър, свързан с радиуса на ядрото на купа като $r_c = a\sqrt{2^{2/\gamma}-1}$, параметърът γ е степенен фактор, f_0 е централната звездна плътност, а f_b е нивото на фонова звездна плътност.

За всеки от изследваните купове построяваме три типа профили на звездната плътност за различни подгрупи от звезди, като всеки профил е апроксимиран с представените по-горе формули на King (1962) или Elson et al. (1987) с цел определяне на структурни параметри на купа:

A) Построяваме профил на плътността използвайки всички звезди от даден куп. Така определяме структурните параметри чрез King (1962) или Elson et al. (1987) на звездния куп като цялостна система

В) Построяваме и моделираме профили на плътността за две подгрупи звезди, *ярки* и *слаби* – звезди по-ярки или по-слаби от 20 звездна величина във филтър V. Този подход показва общото поведение на радиуса на ядрото в зависимост от звездната величина С) Построяваме и моделираме профили на плътността за звездите от всяка звездна величина, подгрупи от една звездна величина (напр. 19 $\leq V < 20, 20 \leq V < 21,$ и т.н.). С този подход можем да анализираме промяната на определения чрез приложения модел радиус на ядрото за звезди с различен блясък.

Определените така радиуси на ядрото $r_c(m)$ за различни подгрупи звезди от купа ни позволяват да ги сравним и използваме като метод за оценка на сегрегация на масите.

5. Динамична еволюция на изследваните звездни купове

Сегрегация на масите в младите ГМО купове NGC 1711, NGC 1984, NGC 2004, NGC 2011, NGC 2031 и NGC 2214



Фигура 5.1,5.3: Диаграма за определяне сегрегация на масите - радиусът на ядрото като функция от звездната величина на звездите в NGC 1711 (Ляво) и NGC 1984 (Дясно).

Разглеждане на сегрегацията на масите в младите купове

На фигури 5.1, 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 е показан полученият от моделиране радиус на ядрото за звездите от различни звездни величини. С черни квадратни символи е означен радиусът определен за



Фигура 5.5,5.7: Диаграма за определяне сегрегация на масите - радиусът на ядрото като функция от звездната величина на звездите в NGC 2004 и NGC 2011.



Фигура 5.9,5.11: Диаграма за определяне сегрегация на масите - радиусът на ядрото като функция от звездната величина на звездите в NGC 2031 и NGC 2214.

групи звезди от 1 звездна величина, докато със сини триъгълници е определеният за *ярките (bright)* звезди по-ярки от V < 20, а със червени ромбове е радиусът определен за *слабите (faint)* звезди с величина V < 20. Със зелена звезда (*) е означен радиуса на ядрото определен по всички звезди от всички звездни величини за даден куп.

Зависимостта на радиуса на ядрото r_c от звездната величина на звездите в купа, както е представено на фигури 5.1 – 5.11 и в Таблица 5.2 в дисертационния труд, използваме като индикатор на сегрегация на масите в звездните купове. Когато наблюдаваме увеличаване на радиуса на ядрото с намаляване на звездната яркост (респ. увеличаване на звездната величина във V филтър), ние приемаме, че има индикация за сегрегация на масите. Сред изследваните обекти е NGC 1711, звезден куп вече заподозрян в сегрегация на масите от Subramaniam et al. (1993). В представената диагностична диаграма на фигура 5.1 можем да забележим увеличаване на радиуса на ядрото с увеличаване на звездната величина на звездите. Този наблюдателен факт също валидира използвания от нас метод за определяне на сегрегация на масите в звездни купове.

NGC 1984 се намира в област на активно звездообразуване в Големия Магеланов Облак. Относително големия брой на фонови звезди по-слаби от 20^m са вероятната причина за влияние върху профилите и зависимостта представена на фигура 5.3.

NGC 2004 е сред най-младите купове в изследваната извадка, съдържа в ядрото си ярки О и В свръхгиганти, някои от които са преекспонирани на използваните изображения. Граничната звездна величина за конструиране на профилите на плътността е V < 24, тъй като най-слабите звезди не могат да бъдат детектирани в централните области на купа. Richtler et al. (1997) докладва за сегрегация на масите в NGC 2004 по изследване на наклона на функцията на масите, като също отбелязват, че звездите с маса около 1.1 слънчеви маси, съответстващи на звездни величини 22–23 във филтър V, се открояват. По нашите резултати също можем да

твърдим, че има сегрегация на масите в NGC 2004. Въпреки сравнително голямото разсейване на данните, определеният радиус на ядрото за различните звездни величини звезди в купа се увеличава, (фигура 5.5), с увеличаване на звездната величина на звездите, също стойностите на r_c определени за *ярките* и *слаби* групи звезди потвърждават сегрегацията на масите в купа.

NGC 2011 е млад ГМО куп, намиращ се в ОВ асоцияцията LH 75. Според нашето изследване, диагностичната диаграма на фигура 5.7 показва наличие на сегрегация на звездите в купа. Сравнително голямата неточност на определения радиус на ядрото за най-ярките звезди с величини 15–16 във филтър V може да се обясни с малкия брой звезди от тези звездни величини.

NGC 2031 е млад звезден куп на възраст 227 млн.г.. На изображенията, които използваме в настоящото изследване, купа е добре разделен на звезди. Определения радиус на ядрото, представен на фигура 5.9, показва увеличение със звездната величина на звездите – индикация за сегрегация на звездите в купа. Най-масивните звезди се намират в ядрото на купа, докато слабите по-маломасивни звезди са разпределени преимуществено към външните области на купа.

NGC 2214 е млад звезден куп, намиращ се в покрайнините на Големия Магеланов Облак, който е възможно да е в процес на сливане (Bhatia & MacGillivray 1988). Фотометричният каталог на този куп включва звезди в диапазон по-голям от 10 звездни величини, като най-слабите звезди достигат 25 във филтър V. На фигура 5.11 от дисертационния труд е представен профила на плътността за купа с прилежащия му EFF87 модел, докато фигура 5.12 представя профилите на *ярки* и *слаби* подгрупи звезди от купа, съответно звезди с величини V < 20 и $V \ge 20$. Причината да разглеждаме звездите от купа разделени в тези две подгрупи е, че така има много

повече звезди в тези подгрупи, в сравнение с подгрупа състояща се от звезди с величини в диапазон от 1 звездна величина (напр. $19 \le V < 20, 20 \le V < 21, \text{ и т.н.}$). На фигура 5.11 е показана диагностичната диаграма за NGC 2214, от която е видно, че радиуса на ядрото се увеличава с увеличаване на звездната величина на звездите, което е индикация за сегрегация на масите в купа.

От направените изследвания можем да потвърдим, че определянето на радиуса на ядрото за различни звездни величини може да бъде използвано като метод за оценка за сегрегация на масите в звездни купове.

Разпределение на звездите в старите ГМО купове NGC 1754, NGC 1898, NGC 2005 и NGC 2019



Фигура 5.13,5.14: Диаграма за определяне сегрегация на масите - радиусът на ядрото като функция от звездната величина на звездите в NGC 1754 и NGC 1898.



Фигура 5.15,5.16: Диаграма за определяне сегрегация на масите - радиусът на ядрото като функция от звездната величина на звездите в NGC 2005 и NGC 2019.

Определяне на сегрегация на масите в стари купове

Диагностичните диаграми за сегрегация на масите за куповете NGC 1754, NGC 1898, NGC 2005 и NGC 2019 са представени на фигури 5.13 - 5.16. Със зелен цвят е отбелязана стойността на радиуса на ядрото за всички звезди от купа, докато с червен символ е стойността за звездите по-слаби от 20 величина във V филтър, а със син цвят е радиуса на ядрото определен по звезди с V < 20 от купа.

За звездният куп NGC 1754 на фигура 5.13 промяната на радиуса на ядрото в зависимост от звездната величина на звездите показва, че ярките звезди са по-концентрирани в сравнение със слабите звезди, което е индикация за сегрегация на масите в купа.

NGC 1898 е един от най-населените звездни купове в извадката. Намира се в покрайните на бара на галактиката Голям Магеланов Облак, от което има значителен принос на фона от галактиката към построените профили на плътността за купа. Получената от моделиране стойност на фонова звездна плътност f_b е показана в Таблица 5.4 от дисертационния труд. От диаграмата на фигура 5.14 можем да заключим, че наблюдаваме сегрегация на звездите в купа – радиуса на ядрото определен за различни звездни величини звезди в купа показва постепенно нарастване с намаляване на яркостта на звездите.

Построената диаграма за купа NGC 2005 на фигура 5.15 показва зависимост на увеличаване на получения радиус на ядрото с намаляване на звездната величина на звездите. Тази зависимост се потвърждава и когато разглеждаме двете групи звезди по-ярки и по-слаби от 20 величина в V филтър и можем да заключим, че и в NGC 2005 наблюдаваме сегрегация на звездите в купа.

Построените профили на плътността за звездния куп NGC 2019 не показват съществена промяна на радиуса на ядрото със звездната величина (фигура 5.16). В рамките на грешката на нашите данни, профилите и получения радиус на ядрото са еднакви за всичките звездни величини, затова можем да отхвърлим сегрегация на масите в NGC 2019 чрез метода на направеното изследване.

Сравнение на получените резултати с други изследвания

Тук представяме сравнение на получените резултати за структурни параметри на изследваните звездни купове с изследването на профилите на повърхностна яркост на същите купове от Mackey & Gilmore (2003) (за краткост M&G 2003). На фигура 5.18 от дисертационния труд определения в настоящата дисертация радиус на ядрото е нанесен срещу определения от M&G 2003 за същите купове. С кръгли символи са r_c , които ние определяме за звезден куп (звезди от всички звездни величини) в сравнение с r_c определен от M&G 2003. С триъгълни символи са представени стойностите определи от нас за звезди по-ярки от 20^m във филтър V, в сравнение със същия r_c определен от M&G 2003. Правата линия показва равенство между получените резултати.

Сравнение във вид на разлики между определените от нас стойности за *ярки* звезди и оценката на r_c от M&G 2003 е представено на Фигура 5.17. Правата линия показва равенство между резултатите. Определените от нас стойности на r_c са средно 2.5 дъгови секунди по-големи от оценката на Mackey & Gilmore (2003).



Фигура 5.17: Разликите между r_c определен за *ярки* звезди в куповете и радиуса на ядрото за същите купове публикуван от Mackey & Gilmore (2003). Правата линия показва равенство между резултатите.

Основно различие, което може да обясни систематично по-големите радиуси определени от нас е, че профилите представени в настоящата дисертация са профили на звездна плътност, базирани на брой звезди, докато Mackey & Gilmore (2003) използват повърхностна яркост за построяване на профили на куповете. Така приноса на ярките звезди към профила на повърхностната яркост е значително по-голям от приноса на по-слабите звезди. При използваните от нас профили на звездна плътност звездите от всички звездни величини имат еднаква тежест и принос към профила на купа. В резултат на това, профилите на повърхностна яркост на M&G 2003 са представителни най-вече за ярките звезди в куповете, докато нашите профили са представителни и за по-слабите по яркост звезди, които са също така по-населени в звездните купове. Това може да се забележи чрез сравнението представено на Фигура 5.18 в дисертационния труд. Изложените тук различия могат да обяснят също защо по-близко до стойността на r_c определена от Маскеу & Gilmore (2003) са нашите определени стойности за *ярки* звезди (представени на фигурите 5.17 и 5.18 с триъгълни символи).

6. Възраст на звездното население на ГМО купове

Определяне възрастта на NGC 2031

В последното десетилетие развитието на теоретичните модели доведе до възможността да сравняваме звездните населения както с теоретични изохрони, така и директно със синтетични звездни купове. В представеното в глава 6 от дисертационния труд изследване моделираме населението на звездните купове NGC 2004 и NGC 2031 чрез изохрони от моделите на Обсерваторията в Падова, така и чрез съответстващ синтетичен куп от моделите на Университета в Женева.

За звездния куп NGC 2031 построяваме наблюдателната диаграма цветови индекс - звездна величина за филтър V и цвят (V - I), която първо описваме с PARSEC v1.2S изохрони с металичност Z = 0.0056, типична за звездните купове в Големия Магеланов Облак. При прехвърлянето на абсолютните звездни величини на изохроните към наблюдателни величини използваме модул на разстоянието $(m - M)_0 = 18.48$ до купа. Почервеняването можем да оценим на E(V - I) = 0.17 в посока към NGC 2031. На фигура 6.5 са нанесени диаграмата цветови индекс - звездна величина за купа, както и изохрони съответстващи на възрасти с логаритъм logage = 8.30, 8.35, 8.40, 8.45, 8.50.

Когато моделираме звездното население на един куп с теоретич-



Фигура 6.5: Вляво: Диаграма цветови индекс - звездна величина за населението на купа NGC 2031 с нанесени PARSEC изохрони за логаритъм на възрастта *logage* = 8.30, 8.35, 8.40, 8.45, 8.50. Вдясно: Синтетичен звезден куп симулиран за *logage* = 8.35 нанесен със сиви кръгли символи и изохрона за същата възраст.

ни изохрони на базата на наблюдателната диаграма цветови индекс - звездна величина е необходимо да опишем синята част на Главната Последователност, тъй като там се намират единичните звезди принадлежащи на купа. Неразделените двойни звезди, чиято светлина се слива, лежат по яркост над единичните звезди на диаграмата, като по този начин правят Главната Последователност по-разширена и по цветови индекс. От тези теоретични модели изохрони намираме за най-добре описваща наблюдаваното звездно население на NGC 2031 с възраст 230 млн.г. ± 4 млн.г.

С цел потвърждение на получената чрез изохрони възраст заявихме симулация на синтетичен куп от SYCLIST моделите на Университета в Женева. Броя симулирани звезди сравним с броя звезди от фотометрията на купа. Металичността, модула на разстоянието на симулираното население са същите като при сравнението с изохрони (глава 6.2.4). Симулираните звезди са с маси между 1.7 и 15 \mathcal{M}_{\odot} и девет скорости на околоосно въртене и възраст 230 млн.г..

Определяне възрастта на NGC 2004

NGC 2004 е сред най-младите в извадката от звездни купове от Големия Магеланов Облак изследвани в дисертационния труд.

За определяне на възрастта на населението на NGC 2004 използваме изохрони от моделите PARSEC на Астрономическата Обсерватория в Падова. Апроксимирането на наблюдателната диаграма (изчистена от фонови звезди) с теоретични изохрони е направено визуално (вж. глава 6.3.3 от дисертационния труд), като е избрана изохроната, която най-добре отразява Главната Последователност и точката на обръщане – това са позициите на единичните звезди от купа, които представлява изохроната, докато неразделените двойни лежат над ГП (фигура 6.5). Използваните изохрони са с металичност Z = 0.008, а почервеняването в посока към NGC 2004 можем да оценим на E(V - I) = 0.3. Така определената от нас възраст на населението възлиза на 16 млн.г. (logage = 7.2), сравнима с публикувани други изследвания на NGC 2004.

С цел потвърждение на получената чрез изохрони възраст заявихме симулация на синтетичен куп от SYCLIST моделите на Университета в Женева. Броя симулирани звезди е 1000, сравним с броя звезди, принадлежащи на купа, след премахване на фоновите звезди. Металичността, модула на разстоянието и възрастта на симулираното население са същите като при сравнението с изохрони (глава 6.3.4 от дисертационния труд). Симулираните звезди са с маси между 0.8 и 120 \mathcal{M}_{\odot} от моделите с две скорости на околоосно въртене, с добавен фотометричен шум възлизащ на 0.1 звездна



Фигура 6.5: Диаграма цветови индекс - звездна величина за купа NGC 2004. Ляво: PARSEC изохрони за логаритъм на възрастта *logage* = 7.0, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, като с червена линия е изохроната на възраст 16 млн.г. Дясно: Най-добре описващата звездното население на купа с възраст 16 млн.г. РАRSEC изохрона и SYCLIST синтетичен звезден куп за същата възраст нанесен със сини точки.

величина. Двойните звезди в симулацията са 30%, типично за куповете в ГМО. За случая на NGC 2004, на фигура 6.8 вдясно, чрез сини кръгли символи е представена диаграмата на синтетичен звезден куп наложена върху наблюдаваната диаграма цветови индекс - звездна величина на купа.

Наблюдаваната диаграма цветови индекс - звездна величина на NGC 2004, симулирания синтетичен звезден куп, както и най-добре описващата изохрона се съгласуват много добре, като малките несъответствия могат да се обяснят с различията в използваните модели. И двата подхода потвърждават възрастта на звездното население на NGC 2004 от 16 млн.г. ± 4 млн.г.

7. Основни приноси

Основни резултати и приноси:

- В настоящата дисертация е представено изследване на звездните купове NGC 1711, NGC 1754, NGC 1984, NGC 1898, NGC 2004, NGC 2005, NGC 2011, NGC 2019, NGC 2031 и NGC 2214 в Големия Магеланов Облак. По архивни изображения с висока разделителна способност от космическия телескоп Хъбъл направихме прецизна PSF фотометрия на звезди в полето на тези купове, която използвахме за построяване на профили на звездна плътност и на диаграми цветови индекс - звездна величина.
- Определихме структурните параметри от профили на звездната плътност на младите купове NGC 1711, NGC 1984, NGC 2004, NGC 2011, NGC 2031, NGC 2214 чрез модел на (Elson et al. 1987), и на старите купове NGC 1754, NGC 1898, NGC 2005, NGC 2019 чрез модел на (King 1962).
- Построихме радиалните профили на звездна плътност за звезди с различни звездни величини в изследваните купове. Изменението на радиуса на ядрото като функция на звездната величина е използвано за първи път като метод за определяне на сегрегация на масите в тези купове.
- Потвърдихме наблюдаваната сегрегация на масите в NGC 1711 и NGC 2004, което също валидира използвания от нас метод.
- Разкрихме сегрегация на масите в младите купове NGC 2011,

NGC 2031 и NGC 2214.

- Наблюдаваме индикация за сегрегация на масите, вероятно в резултат на динамична еволюция на старите звездни купове NGC 1754, NGC 1898 и NGC 2005.
- Оценихме възрастта на BSDL 103 и BSDL 101 на $(6 \pm 1) \times 10^8$ г. чрез сравнение с теоретични изохрони. Сходството във възрастите предполага, че двата купа са образувани едновременно и най-вероятно са двойна система.
- Установихме, че обектът категоризиран като звезден куп КМНК 156 представлява две ярки звезди с величини G=13.08 и G=13.74 на ъглово разстояние едва 4.1 дъгови секунди една от друга. Този резултат е получен благодарение на използваните в дисертацията WFPC2 изображения с високо пространствено разрешение.
- показахме как ефект на уширение на Главната Последователност при точката на обръщане може да бъде постигнат само чрез определяне на фона на небето по при фотометрия на камери с повече от един CCD детектор. В представения случай по фотометрия на NGC 2031, на диаграмата цветови индекс звездна величина на купа, звездите лежащи върху WF3 CCD са отместени по цвят спрямо звездите от другите CCD детектори.
- Оценихме възрастта на звездното население на NGC 2031 на 227 ± 3 млн.г. чрез теоретични симулация на синтетичен куп и изохрони с металичност $Z = 0.0058 \pm 0.0002$ и почервеняване от E(V I) = 0.17 в посока към купа.
- Определихме възрастта на звездното население на NGC 2004 на 16 ± 4 млн.г. чрез теоретични изохрони и симулация на синтетичен звезден куп. Почервеняването в посока на NGC 2004 оценяваме на E(V I) = 0.3.

Списък с публикации, представени доклади и постери

Пълният списък с представени доклади е изложен в глава 7. Резултатите от настоящата дисертация са отразени в следните публикации:

- Nikolov G.; Kontizas, M.; Dapergolas, A.; Kontizas, E.; Golev, V.; Bellas-Velidis, I.; "The Distortions in the density profiles of star clusters of the Magellanic clouds", 2009, Publ. Astr. Soc. "Rudjer Boskovic", No. 9, p.363 Nikolov et al. (2009b) 2009PASRB...9..363N
- Nikolov, G.; Golev, V.; Kontizas, M.; Dapergolas, A.; Kontizas, E.; Bellas-Velidis, I., "The distortions in the density profiles in LMC clusters NGC 1850, NGC 2214 and BSDL 103", 2009, Annual of Sofia University "St. Kliment Ohridski", Faculty of Physics, vol. 102, p.107 Nikolov et al. (2009a) fulltext
- Nikolov, G.; Dapergolas, A.; Kontizas, M.; Golev, V.; Belcheva, M.; "Density profiles of populous star clusters in the Magellanic Clouds", 2010, Bulgarian Astronomical Journal, vol.14, p.43 Nikolov et al. (2010b) 2010BlgAJ..14...43N
- Nikolov, G.; Dapergolas, A.; Kontizas, M.; Golev, V.; Belcheva, M.; "Density Profiles of Star Clusters in the Magellanic Clouds", 2010, Astronomical Society of the Pacific, vol.424, p.236 Nikolov et al. (2010c) 2010ASPC..424..236N
- Nikolov, G.; Dapergolas, A.; Kontizas, M.; Golev, V.; "Indication of Stellar Stratification in Star Clusters in the Magellanic Clouds", 2010, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, vol.90, p.73 Nikolov et al. (2010a) 2010POBeo..90...73N
- 6. Nikolov, G.; Kontizas, M.; Dapergolas, A.; Belcheva, M.; Golev, V.; Bellas-Velidis, I.; "Indication of Mass Segregation in LMC Star

Clusters", 2012, Astrophysics and Space Science Proceedings, vol.29, p.227 Nikolov et al. (2012) 2012ASSP...29..227N

- 7. Nikolov, G.; Kontizas, M.; Dapergolas, A.; Belcheva, M.; Golev, V.; Bellas-Velidis, I.; "Distribution of stars in three Magellanic Clouds star clusters NGC 1754, NGC 2005, NGC 2019", 2013, Bulgarian Astronomical Journal, vol.19, p.9 Nikolov et al. (2013) 2013BlgAJ..19....9N
- 8. Николов, Г.; "Определяне възрастта на звездния куп NGC 2031 чрез изохрони и синтетичен модел" Сборник с доклади "120 години АО на СУ "Св. Климент Охридски"", том 1, стр.22
- Nikolov, G. B.; "Precise astrometry from half-century long observations of star cluster M 15", 2018, Astronomical and Astrophysical Transactions, vol.30, p.417 Nikolov (2018b) 2018A&AT...30..417N
- Nikolov, G.; "Mimicking multiple stellar populations", 2018, Memorie della Societa Astronomica Italiana, vol.89, p.85 Nikolov (2018a) 2018MmSAI..89...85N
- Nikolov, G.; Markov, H.; "Characterising LMC Star Cluster NGC 2004", 2019, AIP Conference Proceedings, vol.2075, p.090005 Nikolov & Markov (2019) 2019AIPC.2075i0005N

Библиография

- Bhatia, R. K. & MacGillivray, H. T. 1988, A&A, 203, L5 10
- de Grijs, R., Gilmore, G. F., Johnson, R. A., & Mackey, A. D. 2002, MNRAS, 331, 245 2
- Elson, R. A. W., Fall, S. M., & Freeman, K. C. 1987, ApJ, 323, 54–5, 20
- Farouki, R. T., Hoffman, G. L., & Salpeter, E. E. 1983, ApJ, 271, 11 2
- Gouliermis, D. A., de Grijs, R., & Xin, Y. 2009, ApJ, 692, 1678 2
- King, I. 1962, AJ, 67, 471 4, 5, 20
- Mackey, A. D. & Gilmore, G. F. 2003, MNRAS, 338, 85–13, 14, 15
- Nikolov, G. 2018a, Mem. Soc. Astron. Italiana, 89, 85–23
- Nikolov, G., Dapergolas, A., Kontizas, M., & Golev, V. 2010a, Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd, 90, 73 22
- Nikolov, G., Dapergolas, A., Kontizas, M., Golev, V., & Belcheva, M. 2010b, Bulgarian Astronomical Journal, 14, 43 22
- Nikolov, G., Dapergolas, A., Kontizas, M., Golev, V., & Belcheva,
 M. 2010c, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series,
 Vol. 424, 9th International Conference of the Hellenic Astronomical
 Society, ed. K. Tsinganos, D. Hatzidimitriou, & T. Matsakos, 236 22

- Nikolov, G., Golev, V., Kontizas, M., et al. 2009a, Annual of Sofia University "St. Kliment Ohridski Faculty of Physics 22
- Nikolov, G., Kontizas, M., Dapergolas, A., et al. 2009b, Publications of the Astronomical Society "Rudjer Boskovic", 9, 363–22
- Nikolov, G. & Markov, H. 2019, AIP Conference Proceedings, 2075, 090005 23
- Nikolov, G. B. 2018b, Astronomical and Astrophysical Transactions, 30, 417–23
- Nikolov, G. B., Kontizas, M., Dapergolas, A., et al. 2012, Astrophysics and Space Science Proceedings, 29, 227–23
- Nikolov, G. B., Kontizas, M., Dapergolas, A., et al. 2013, Bulgarian Astronomical Journal, 19, 9–23
- Richtler, T., Fischer, P., Mateo, M., Pryor, C., & Murray, S. 1997, in Astronomische Gesellschaft Abstract Series, Vol. 13, Astronomische Gesellschaft Abstract Series, ed. R. E. Schielicke, 75 9

Subramaniam, A., Sagar, R., & Bhatt, H. C. 1993, A&A, 273, 100 9