



Софийски университет "Св. Климент Охридски"
Физически факултет
Катедра Астрономия

Дипломна работа на:

Мария Боянова Любенова, ф№ 160084

**“Подписът на историята на
образуване на елиптичните
галактики върху техните системи
от кълбовидни звездни купове”**

научен ръководител: д-р Маркус Кислер-Патиг,
Европейска Южна обсерватория (ESO)
ръководител катедра: доц. д-р Валери Голев

София, 2005

Съдържание

1	Увод и мотивация на изследването.....	2
1.1	Сценарии за образуване на кълбовидни звездни купове.....	2
1.2	Защо да изследваме системите от кълбовидни купове.....	3
1.3	Предимствата на кълбовидните звездни купове.....	4
1.4	Цели.....	7
2	Наблюдение и обработка на данните.....	8
2.1	Избор на обекти и наблюдение.....	8
2.2	Основна обработка на данните.....	9
2.3	Фотометрия и калибриране.....	10
2.4	Сравнение с данни от космическия телелскоп Хъбъл.....	11
3	Избор на кандидати за кълбовидни звездни купове.....	13
4	Функция на светимостта.....	16
4.1	Тестове за пълнота.....	16
4.2	Точка на обръщане на функцията на светимостта.....	17
4.3	Специфична честота на кълбовидните купове.....	18
4.4	Кълбовидните купове като индикатор за разстояние.....	22
5	Поднаселения от кълбовидни звездни купове.....	27
5.1	Бедно и богато на метали поднаселение от купове.....	27
5.2	Произход на поднаселенията.....	27
5.3	Разпределение на цвета.....	29
5.4	Градиенти на цвета на кълбовидните купове в NGC 3923 и NGC 4742.....	32
5.5	Ъглово разпределение на кълбовидните купове.....	33
6	Заключение.....	35
	Литература.....	36

1 Увод и мотивация на изследването

Кълбовидните звездни купове са като перли в корона, които украсяват халото на много галактики, включително и Млечния път. Тези звездни струпвания съдържат типично 10^5 – 10^6 звезди, събрани в десетина парсека. Астрономите от дълго време се сблъскват с предизвикателството да обяснят как са могли да се образуват тези толкова плътни звездни системи. Един от първите успехи идва през 1950-те г., когато чрез теорията за звездната еволюция бе показано, че кълбовидните купове имат една и съща възраст и че възрастта на тези, които принадлежат на Млечния път, е сравнима с възрастта на самата Вселена. По-рано астрономите предполагаха, че кълбовидните купове във всички галактики са много стари и търсеха обяснение в механизмите за ранно образуване. Но доказателствата, че кълбовидни купове се образуват навсякъде, където протича бурно звездообразуване и особено в галактиките, в които то е провокирано от взаимодействия и сливане, нарастват в началото бавно, а след 1990 г. все по-бързо. Точно върху тези нови доказателства се концентрира представената дипломна работа.

В началото накратко ще обобщим съвременните теории за образуване на кълбовидни звездни купове, нуждата от изследването на системите, които те образуват и преимуществата, които ни дават. Така ще разберем по-добре някои от проблемите с първите сценарии за образуване и ще оценим изключителния прогрес, който бе постигнат в последното десетилетие.

1.1 Сценарии за образуване на кълбовидни звездни купове

Всеки подобен сценарий може да бъде отнесен към една от три широки категории, зависещи от това дали куповете са се образували преди, по време на или след образуването на приютяващите ги галактики.

Първият модел поставя раждането на кълбовидните купове преди да е протекъл протогалактичният колапс. Може би най-впечатляващият от тези сценарии е предложен от Peebles & Dicke (1986), според който най-малките гравитационно нестабилни облаци, образували се след рекомбинацията, са имали Джинсови маси от порядъка на 10^5 – 10^6 $M_\odot$ (слънчеви маси) и може би са били прогениторите на днешните кълбовидни звездни купове. Това разбира се обяснява защо всички купове в Млечния път изглеждат толкова стари. Но когато познанията ни за другите галактики нарастваха, в този сценарий бяха открити поне два сериозни недостатъка. Свойствата на системата от кълбовидни купове,

например металичността, се променят заедно със свойствата на галактиката, в която се намира, така че как биха могли куповете да са се образували много преди подслоняващата ги галактика. Второ, системите от кълбовидни купове са по-концентрирани към центъра в сравнение с тъмната материя, което е в конфликт с твърдението, че куповете са се образували много рано.

Вторият сценарий за образуване допуска, че кълбовидните купове са се образували едновременно с галактиките, в които се намират. Много подобни модели описват нарастването на студени и плътни облаци в равновесие с налягането на горещия газ по време на свиването на протогалактиката (Fall & Rees 1985, Larson 1987, 1988). Две от трудностите, които срещат тези сценарии са: (1) За да избегне бързото охлаждане и фрагментиране, протокупът трябва да има ниска металичност, но ние познаваме кълбовидни купове с почти слънчева металичност. (2) Трудно е да разберем защо нарастващите облаци, от които ще се образуват купове не се разсейват след първите няколко свръхнови, които избухнат в тях.

Третият вид сценарии предполагат, че кълбовидните купове се образуват или след галактиката им, или отделно от нея. Тези модели представляват голяма главоблъсканица и често границата между тях и вторичните сценарии не е особено ясна. Като основни се смятат четири от тях:

1. Куповете се образуват по време на сливания на галактики (Schweizer 1987, Ashman & Zepf 1992).
2. Образуване в протогалактични сегменти (Searle & Zinn 1978).
3. Образуване като ядра на бивши галактики-джуджета (Zinnecker, Keable & Dunlop 1988, Freeman 1990).
4. Образуване в охлаждащи се потоци (Fabian et al. 1984).

През последните няколко години наблюдателните доказателства в подкрепа на първите три сценария бързо нарастнаха, като същевременно се появиха силни доказателства против четвъртия.

1.2 Защо да изследваме системите от кълбовидни купове

Двата фундаментални въпроса по отношение на образуването и еволюцията на галактиките са кога и как те са се формирали и кога и как са образували звездите си. Трети възможен въпрос е до каква степен първите две точки са свързани.

За да отговорим на тези въпроси от наблюдателна гледна точка, можем да следваме два пътя. Първият ще бъде да наблюдаваме галактики на много големи червени отмествания, точно по времето когато са се образували те и/или техните звезди. Ще наречем този метод труден. Нужните наблюдения са изключително предизвикателни по много причини: голямо отместване на дължините на светлинните вълни, слаби звездни величини, малки ъглови размери и т.н. Въпреки това те се провеждат от много групи чрез наблюдение на линиите на поглъщане по

лъча на зрение към квазари или търсене на галактики с голямо червено отместване (Combes et al. 1999, Bunker & van Breugel 1999, Mazure et al. 1999).

Вторият начин е да изчакаме галактиките да достигнат много малки червени отмествания и тогава да се опитаме да извлечем информация за миналото им. Това ще бъде мързеливият начин. Той частично се изпълнява от изследването на дифузни звездни населения при $z = 0$ и сравнение със свойствата им при малки червени отмествания. Такива изследвания за фундаментални връзки, напр. фундаментална равнина, Mg- σ , се съвместяват със звездни населения, които еволюират напълно пасивно и са се образували при големи червени отмествания ($z > 2$). Като алтернативен метод за разбирането на формирането на галактики могат да се изследват сливанията на галактики при ниски до умерени червени отмествания (van Dokkum et al. 1999).

Къде в тази картина се вписват кълбовидните звездни купове? Тяхното изследване може да бъде класифицирано като най-мързеливият метод, тъй като те са наблюдаеми до почти $z = 0.03$. Кълбовидните купове са сред едни от най-старите обекти във Вселената, т.е. те са свидетели на по-голямата част, ако не и на цялата, история на галактиките си. Целта на изследването на системи от кълбовидни купове е да се извлече тяхната памет. Те се наблюдават фотометрично и спектроскопично, като по този начин се определят възрастта и обилието на тежки елементи, които се използват за да се разберат епохите на звездообразуване в галактиките. Кинематичната информация, която се получава от кълбовидните купове и особено от тези, които се намират на големи галактоцентрични разстояния, може да се използва, за да се разберат механизмите на образуване на самите галактики.

1.3 Предимствата на кълбовидните звездни купове

Когато гледаме към далечна галактика, ние я виждаме заобиколена от точкови източници, много от които са кълбовидни купове. Ако те могат да бъдат разрешени, всеки един от тях би изглеждал като някой от куповете, които се намират в Млечния път. За съжаление, въпреки дифракционно ограничените кадри от орбиталните телескопи, ние не можем да разделим куповете на отделни звезди на разстояние от 10 до 100 Мpc и трябва да изследваме техните интегрални свойства. Тогава изучаването на системата от кълбовидни звездни купове е еквивалентно на изследването на общите свойства на голям брой купове, които заобикалят дадена галактика, за да определим техните индивидуални качества и да ги сравним, също както и свойствата на системата като цяло, със свойствата на галактиката-домакин.

Чисто практическите предимства при наблюдаването на обекти на $z = 0$ е възможността те да бъдат изучени с големи подробности. Тези наблюдения са оправдани от това, че печалбата на детайли превъзхожда факта, че при по-големи червени отмествания виждаме събитията близо до времето, в което те действително са се случили. Пример за по-големия добив при извънгалактичните звездни купове е

откриването на поднаселения от купове около множество галактики от ранен тип. Наличието на два или повече механизма или епохи на звездообразуване в голям брой, ако не и при всички гигантски галактики не бяха открити чрез нито един друг тип наблюдения.

Голямата възраст на кълбовидните купове често се прилага като аргумент за тяхното изучаване, тъй като те са били свидетели на цялото минало на галактиката, включително и на най-ранните ѝ периоди. Ако това е цялата истина, кълбовидните купове не биха били полезни при изучаването на скорошните епохи на образуване на звезди. Какви са предимствата при наблюдаването на кълбовидни купове като показатели за звездообразуването, вместо директното изследване на дифузното звездно население на галактиката?

Кълбовидните купове трасират звездообразуването

Множество аргументи подкрепят факта, че кълбовидните купове маркират образуването на нови звезди в галактиките. Но ние знаем, че звезди могат да се образуват и без да се формират кълбовидни купове. Такъв пример е Големия Магеланов облак, в който в дадени епохи са се образували звезди, но не и купове (Geha et al. 1998). Но наблюденията подкрепят и противното твърдение: големите епизоди на звездообразуване предизвикват формирането на голям брой звездни купове. Например бурното звездообразуване във взаимодействащи си галактики е придружено от образуването на млади, масивни звездни купове (Schweizer 1997). Освен това крайният брой на кълбовидните купове е почти пропорционален на светимостта на галактиката, т.е. на количеството звезди в нея (виж Harris 1991). Това ни кара да обмислим възможността за близка връзка между образуването на купове и звезди. Допълнителна подкрепа за това твърдение е близката връзка между броя на млади звездни купове в спирални галактики и сегашните темпове на звездообразуване в тях (Larsen & Richtler 1999). Като цяло кълбовидните купове не са идеални индикатори на звездообразуването, защото те няма да се образуват по време на всяко едно кратко такова събитие. Но те ще маркират големите епохи на раждане на звезди, което е и нашата цел.

От практическа гледна точка

Кълбовидните купове съществуват около всички ярки галактики, наблюдавани досега. Техният брой, който е във връзка с масата на галактиката, обикновено е от няколко стотици до няколко хиляди. Още повече те могат да бъдат наблюдавани до около 100 Мpc. Това не е достатъчно голямо разстояние, но в него се включват хиляди галактики от всякакви типове и околни среди. По този начин изследването на кълбовидни купове не е ограничено от специфичния тип или околността на галактиката. От тази гледна точка дифузната звездна светлина и кълбовидните купове са еднакво подходящи.

Предимствата на звездните купове пред дифузното звездно население

Кълбовидните купове дават значително предимство когато се опитваме да определим историята на звездообразуването в дадена

галактика: те са значително по-прости структури. Такъв куп може да се характеризира с еднаква възраст и металичност на съставлящите го звезди, докато звездното население на цялата галактика трябва да бъде моделирано чрез неизвестна смесица от възрасти и металичности. Изследването на системата от кълбовидни купове дава като резултат голям брой дискретни точки възраст-металичност. Те могат да бъдат групирани, за да се определят средните възрасти и химическите обилия на основните под-населения, които се съдържат в галактиката.

В същия ред на мисли, както показахме по-горе, кълбовидните купове се образуват пропорционално на броя на звездите. Така броят на звездни купове в дадено население отразява значимостта на епизода на звездообразуване, който ги е създал. Преброяването на куповете в отделните под-населения показва точно относителната сила на отделните епохи на звездообразуване. За разлика от тях различните населения в дифузната звездна светлина зависят от светимостта си: малко (по маса), но скоро образували се звезди могат да светят много по-силно от по-големите, но по-стари системи, които вече са избледнели.

Премия

Както и при звездните населения, от спектъра, който първоначално е взет с цел да се определят възрастите и металичността, може да се получи кинематична информация. Кълбовидните купове имат предимството, че могат да бъдат проследени до разстояния, които не могат да бъдат достигнати от дифузната звездна светлина. Информацията за динамиката на куповете може да бъде използвана за изследване на образуването на цялата галактика.

Основната линия е, че кълбовидните купове проследяват добре историята на звездообразуването в галактиката, в която се намират и евентуално могат да бъдат използвани като показатели за образуването на самата галактика. Тяхното изследване осигурява повече предимства в сравнение с изследването на разсеяното звездно население и галактиките на голямо червено отместване и дава нови идеи за образуването и еволюцията на галактиките.

1.4 Цели

Целта на тази дипломна работа е да се запознаем с вероятните механизми за образуване и еволюция на галактиките от ранен тип и възможните наблюдателни последствия от тези събития. Разгледани са случаите на три елиптични галактики, NGC 3923, NGC 4742 и NGC 5831, за които се смята, че са претърпели сливане в еволюционната си история. В това изследване са използвани кадри, заснети с 8 m телескоп UT2 от системата VLT на Европейската южна обсерватория, ESO, в четири оптични широкоивични филтъра от фотометричната система на Johnson-Cousins.

Дипломната работа е организирана както следва: в Глава 2 са представени основни данни за изследваните галактики, наблюдението им и обработката на изображенията. Глава 3 засяга избора на кандидати

за кълбовидни звездни купове. В Глава 4 се дискутират възможностите за определяне на разстоянието до дадена галактика чрез функцията на светимостта на системата от кълбовидни купове в нея и съдържа заключения относно пълния брой на куповете в системата. Глава 5 е посветена на под-населенията от кълбовидни купове и техните свойства, които ни позволяват да изкажем предположение за механизма, по който са се образували изследваните от нас галактики. В Глава 6 са сумирани основните ни резултати.

2 Наблюдение и обработка на данните

2.1 Избор на обекти и наблюдение

В тази дипломна работа са използвани архивни данни за три елиптични галактики, които са членове на малки галактични групи: NGC 3923, NGC 4742 и NGC 5831. Те са избрани според цветовете си индекси и параметрите във фината си структура, които показват. Основните им свойства са представени в Таблица 1. Смята се, че тези галактики са претърпели сливане в еволюционната си история. За това можем да съдим по външния вид на галактиките на Фигура 1. NGC 3923 показва резки градиенти на светимостта си в зависимост от галактоцентричния радиус (галактиката изглежда като обвита в люспи), а на северозапад от NGC 4742 се вижда странно образуване, приличащо на приливна опашка, останала след галактичното сливане.

Системата от кълбовидни звездни купове на NGC 3923 е добре изучена от Zepf et al. (1994, 1995). Те интерпретират свойстата ѝ като индикатори за еволюцията на елиптичните галактики. Освен това тази галактика е една от най-ярките елипси извън плътен галактичен куп. Системите от кълбовидни купове на другите две цели не са били изследвани досега. Те също са членове на относително бедни галактични групи.

Наблюденията на трите галактики са направени в периода 26 – 28 май 2001 г. в рамките на наблюдателна програма P67.B-0034 с помощта на Focal Reducer and Low Dispersion Spectrograph 2 (FORS2), монтиран в Несмитовия фокус на 8 m телескоп UT2 от системата Very Large Telescope (VLT) в Обсерваторията Паранал в Чили на Европейската Южна обсерватория, ESO. Размерите на чипа на CCD камерата са 2048 x 2048 пиксела. Всеки пиксел отговаря на 0.2" в небето. Така резултантното поле на FORS2 е 6.8' x 6.8'. Галактиките са заснети в четири широкоивични филтъра от фотометричната система Johnson-Cousins с експозиционни времена, показани в Таблица 2. Наблюденията

ИМЕ	$(M - M)$	M_V	$(B - V)$	P. A.	D (MPC)
NGC 3923	31.80 ± 0.28	-22.32	0.9	48.0	23.9
NGC 4742	30.95 ± 0.16	-19.56	0.7	75.7	15.5
NGC5831	32.17 ± 0.17	-20.81	0.9	121.1	27.2

Таблица 1: Общи данни за използваните в това изследване галактики. Данните за цвета, позиционния ъгъл и видимите звездни величини са взети от базата данни HyperLeda. Модулите на разстоянието са взети от Tonry et al. (2001), от където са изведени и M_V .



Фигура 1: NGC 3923, NGC 4742 и NGC 5831 (от ляво на дясно) наблюдавани във филтър *R* с FORS2 на VLT. На тези изображения ясно се виждат фините структури и прахови ивици в галактиките и техните околности, които предполагат като механизъм на образуването им сливането на други по-малки галактики.

са проведени при добри атмосферни условия, със сиинг $\sim 1.0''$, но NGC 5831 е била наблюдавана, когато се е намирала едва на 25° над хоризонта, което се е отразило върху качеството на кадрите. Това условие по-късно ни накара да изберем малко по-различни критерии при избора на кандидати за кълбовидни звездни купове от първоначалната извадка обекти в тази галактика.

ИМЕ	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>I</i>
NGC 3923	600	360	240	360
NGC 4742	600	360	240	360
NGC 5831	600	600	240	600

Таблица 2: Експозиционни времена в секунди за трите изследвани галактики.

2.2 Основна обработка на данните

Предварителната обработка на кадрите с трите галактики и стандартните звезди е осъществена с помощта на пакета програми PYRAF, предназначен специално за астрономически цели. За изваждане на баяс и корекция за плоско поле използвахме под-програмата IMARITH. По време на наблюдателните нощи са заснети множество кадри с ток на тъмно, плоски полета и баяс, които индивидуалният изследовател може сам да комбинира. Но при обработването на архивни данни от VLT можем да се възползваме от вече комбинираните плоски полета и баяси, които идват заедно с поисканите от нас файлове на галактиките. Токът на тъмно на CCD матрицата на FORS2 е незначителен, поради което не е правена такава корекция.

За да моделираме дифузната звездна светлина от трите галактики, използвахме под-програмата MEDIAN, която прилага медианен филтър върху кадрите. Размерът на филтъра, 61×61 пиксела, бе избран след

няколко теста. След това от оригиналните кадри на галактиките в четирите филтъра извадихме моделираната дифузна звездна светлина, като по този начин получихме кадри, в които са останали само източници с повишена светимост. Те могат да бъдат звезди от Млечния път, галактики от фона, ярки обекти в изучаваните галактики, включително и кълбовидни звездни купове.

За да открием тези обекти използвахме програмата SExtractor (v. 2.3.2), която е разработена от Института по астрофизика в Париж с цел да открива източници в слабо населени звездни полета. С нейна помощ получихме списъци с координатите на всеки детектиран източник, инструменталната му звездна величина в няколко фотометрични апертури и грешката при определянето ѝ, ширина на половината от максимума (FWHM), елиптичност и параметъра star classifier, който дава вероятността даден източник да бъде звезда или не.

След допълнителното изискване кандидатите за кълбовидни купове да бъдат регистрирани и в четирите филтъра, получихме списъци с параметрите на 1298 обекта в NGC 3923, 857 обекта в NGC 4742 и 414 обекта в NGC 5831.

2.3 Фотометрия и калибриране

За да калибрираме звездните величини на така намерените обекти, използвахме направените през същите нощи наблюдения на звездното поле PG 0942-029, което включва пет стандартни звезди. Коефициентите на екстинкция на атмосферата и цветовете коефициенти са взети от интернет-страницата за контрол на качеството в Обсерваторията Паранал.

Тъй като кандидатите за кълбовидни купове са слаби, можем да достигнем максимално точна фотометрия като измерим звездната им величина в малка апертура и след това приложим апертурна корекция, за да отчетем отрязаната светлина от профилите им. За да изберем най-подходящата апертура и корекция, изискахме SExtractor да измери звездните величини на източниците в 6 различни апертури, които покриват 1 до 6 пъти характерната FWHM на изображенията, и в автоматично избрана от програмата апертура. На Фигура 2 е показана зависимостта на нул-пункта на звездните величини от апертурата. Виждаме, че кривата на нарастване на звездната величина с апертурата достига плосък участък. Автоматично измерената звездна величина лежи върху правата част на тази зависимост.

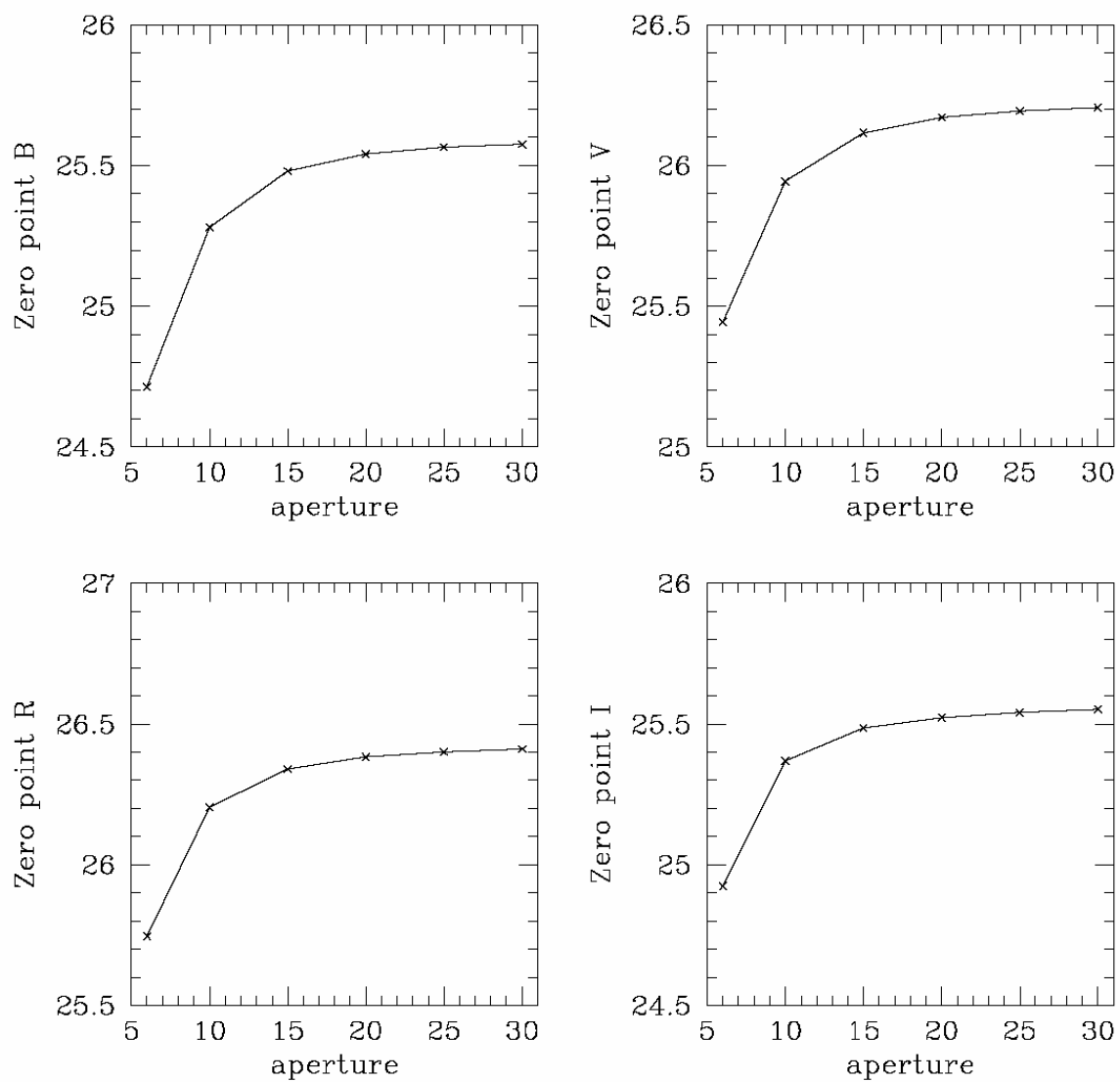
Определихме апертурните корекции като разлика между инструменталните звездни величини на 15-20 ярки, но ненаситени звезди във всеки кадър, измерени в апертура 10 пиксела и автоматично измерената звездна величина. Измерените корекции и техните грешки за всеки филтър са: $d_B = 0.265 \pm 0.011$, $d_V = 0.183 \pm 0.027$, $d_R = 0.204 \pm 0.028$ и $d_I = 0.102 \pm 0.016$.

Най-накрая звездните величини на източниците бяха коригирани за Галактично почервяване с помощта на картите на Schlegel et al. (1998), които дават стойности за $E(B - V)$ равни на 0.083 за NGC 3923, 0.042 за

NGC 4742 и 0.060 за NGC 5831. Отношенията на екстинкцията за четирите филтъра в зависимост от екстинкцията във V лъчи са взети от Cardelli et al. (1989).

2.4 Сравнение с данни от космическия телескоп Хъбъл

За да проверим точността на фотометрията ни, сравнихме калибрираните звездни величини на няколко източника в NGC 5831 от данните от FORS2 със звездните величини на същите източници, открити в изображения, направени с WFPC2 на космическия телескоп Хъбъл. Заключениеето ни е, че разликите са в рамките на очакваната фотометрична грешка без систематично отклонение между фотометрията от FORS2 и WFPC2.



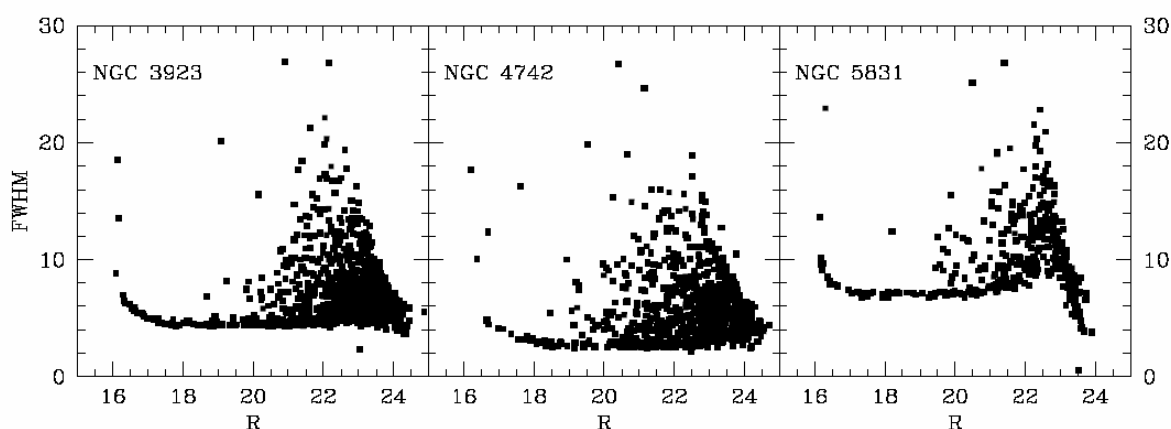
Фигура 2: Зависимост на нул-пункта на звездните величини от фотометричната апертура за четирите филтъра.

3 Избор на кандидати за кълбовидни звездни купове

Първият наблюдателен подпис на системата от кълбовидни звездни купове около отдалечена галактика е повишената плътност на компактни обекти около нея, които имат очакваните за кълбовидни купове звездни величини и цветове. На разстоянията, на които се намират изследваните от нас галактики (виж Таблица 1), кълбовидните купове изглеждат като светлинни точки и не могат да бъдат разделени на отделни звезди. Разбира се не можем да очакваме, че всички обекти с такива характеристики, които откриваме около изследваните галактики, са кълбовидни звездни купове. По-голямата част от тях са неразделени галактики от фона или звезди от Млечния път. За да изберем кои от откритите от SExtractor източници наистина са звездни купове, наложихме серия от критерии.

Първо, кандидатите за кълбовидни купове трябва да имат видими звездни величини в B и V филтър по-слаби от 18^m и в R и I филтър – по-слаби от 17^m , с грешка при фотометрията ≤ 0.1 , тъй като това са очакваните стойности на звездните величини на кълбовидните купове от Млечния път на разстоянията на изследваните галактики. Още повече че по-ярките източници започват да въздействат неагивно върху CCD-матрицата.

За да изключим източниците, които имат издължена форма, начертахме зависимостта на FWHM на всички обекти спрямо видимите им звездни величини, определени във филтър R, както е показано на Фигура 3. Обектите в NGC 3923 и NGC 4742, които имат стойност на FWHM по-голяма от 5 пиксела, която е и средната стойност за кадрите, бяха изключени от списъците. Избрахме този праг да бъде 10 пиксела в кадрите с NGC 5831 поради лошите атмосферни условия по време на наблюдението и малката височина на галактиката над хоризонта и



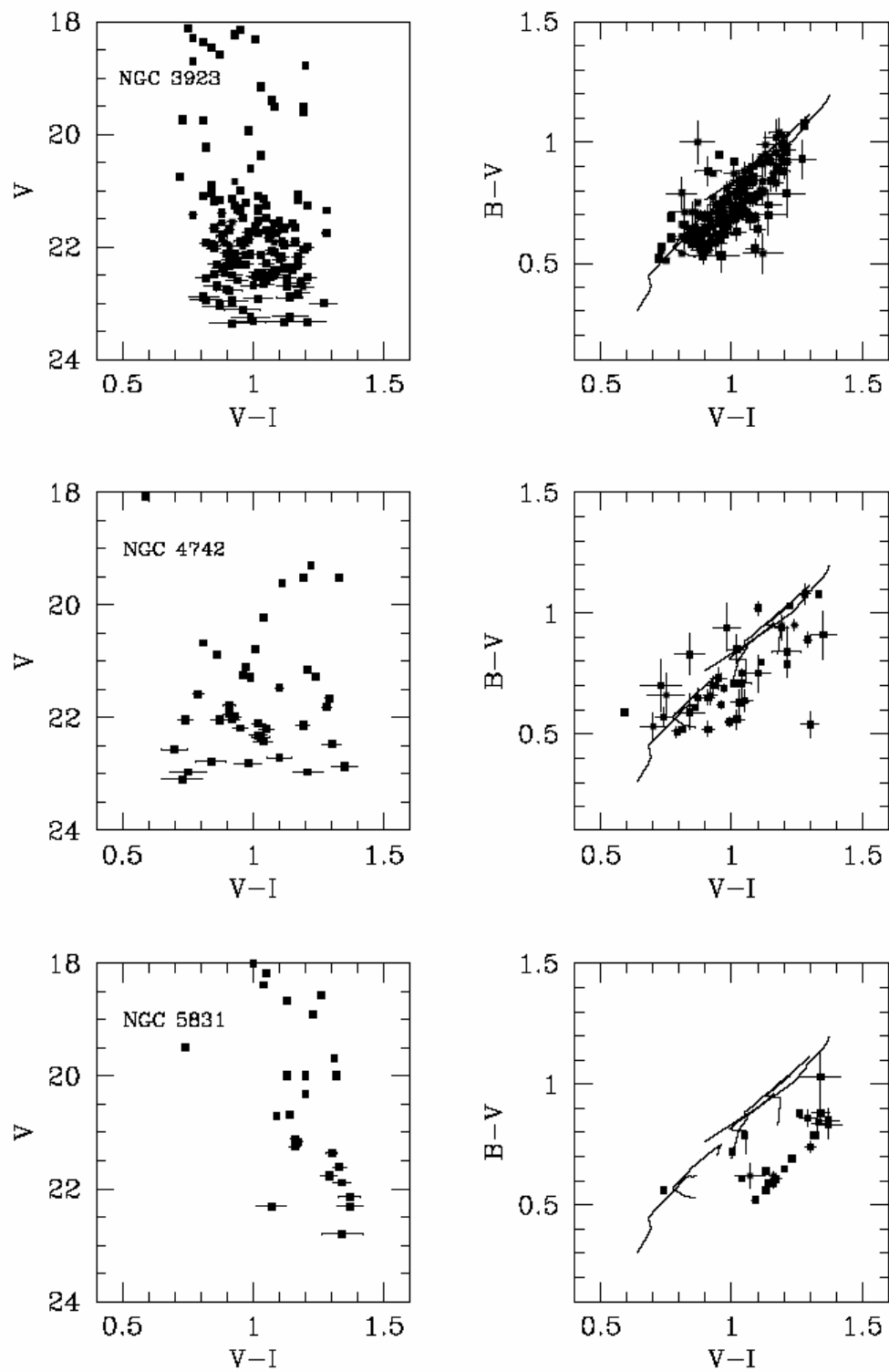
Фигура 3: FWHM във филтър R спрямо видимата звездна величина на обектите. Източници с по-голяма от средната за кадъра FWHM, са изключени от списъците с кандидати за кълбовидни купове, тъй като предполагахме, че това са галактики от фона.

допълнително условие за елиптичността на кандидатите – < 0.3 . Освен това обектите във всички галактики трябва да имат стойност на параметъра $\text{star classifier} > 0.5$. Припомняме, че този параметър, изходен продукт на SExtractor, дава вероятността откритият източник да бъде звезда (точков източник) или удължен обект (например галактика).

Фактът, че наблюдаваме изследваните от нас галактики в четири широкоивични филтъра ни позволява да намалим значително количеството на замърсяването в извадките ни с кандидати за кълбовидни звездни купове, защото можем да използваме двуцветна равнина, за да различим кълбовидните купове от други звездни населения или обекти от фона. Последното условие за кандидатите в трите галактики е да имат $(B - V)$ между 0.5 и 1.1 и $(V - I)$ между 0.5 и 1.35, тъй като това са стойностите за куповете от нашата Галактика.

За да отчетем замърсяването на извадката ни от звезди от Млечния път, използвахме модела на Синтезираното звездно население на Галактиката, предоставен от Обсерваторията в Безансон. Този модел предсказва няколко Галактични звезди, чиито параметри попадат в изискванията ни за кълбовиден звезден куп, по посока на трите изследвани галактики и потвърждава, че обектите с цветове извън наложените граници са звезди от Млечния път. Така първоначалните обширни списъци с кандидати за кълбовидни звездни купове бяха силно редуцирани. 156 източника в NGC 3923 съвпаднаха с наложените изисквания, в NGC 4742 – 41, а в NGC 5831 – 25 обекта.

На Фигура 4 са показани диаграми цвят-звездна величина и цвят-цвят за тях. Върху диаграмите цвят-цвят са начертани моделите на единствено звездно население (SSP) на Maraston (1998, 2004). С плътните линии е показана промяната на металичността с възрастта. Моделът проследява еволюцията при металичности Z от -2.25 до 0.67 пъти металичността на Слънцето $Z_{\odot}$ за възрасти между 1 и 15 млрд. г. Точно тук се изяснява основният недостатък на оптичната фотометрия при изследването на системите от кълбовидни звездни купове. Добре известно е, че широкоивичните оптични цветове са изродени по отношение на възрастта и металичността (Worthey 1994). Обикновено по-младата възраст се компенсира от по-висока металичност в почти всички широкоивични оптични цветове. До известна степен този проблем е решен от факта, че повечето кълбовидни купове са по-стари от няколко милиарда години и техните цветове не зависят значително от възрастта. Това означава, че извеждането на възрасти от оптични цветове е безнадеждно и ясно се вижда и в нашия случай, когато, въпреки че очакваме да наблюдаваме предимно по-млади купове, израждането възраст-металичност е очевидно. Заключениеето ни е, че не можем да определим възрастта и металичността на кълбовидните купове в трите галактики по този начин.



Фигура 4: Диаграми цвят-звездна величина и цвят-цвят за кандидатите за кълбовидни звездни купове в изследваните галактики.

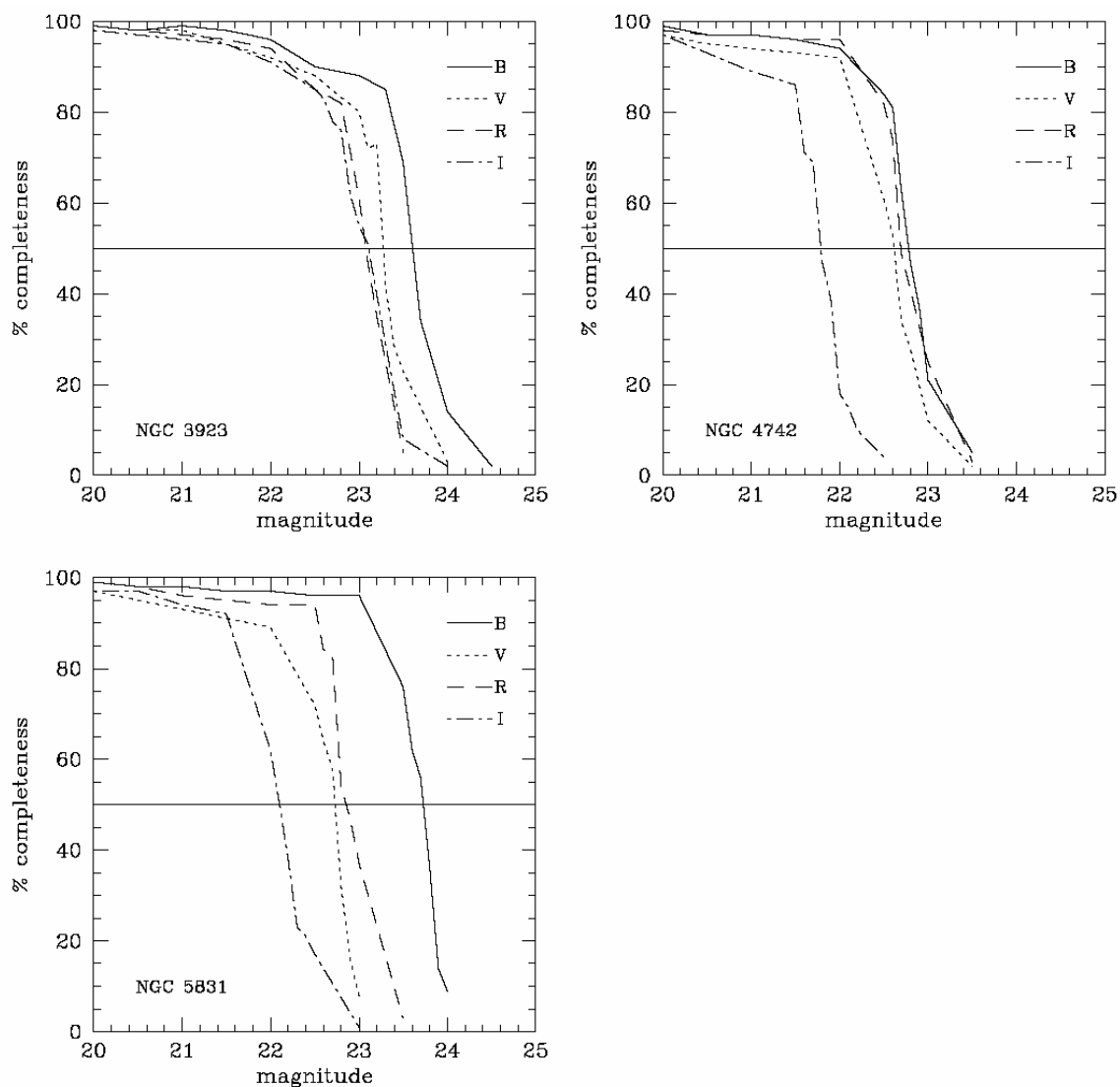
4 Функция на светимостта

4.1 Тестове за пълнота

Колкото и дълбоко да е едно наблюдение, съществува дадена звездна величина, след която започваме да откриваме все по-малка част от присъстващите източниците в полученото изображение. Тази зависимост се нарича функция на пълнотата и се изразява в проценти. При по-ярки звездни величини тя остава почти постоянна и равна на 100%, а след това рязко намалява почти до 0 в рамките на 0.5 до 1 звездни величини. Ограничаващата звездна величина при детектирането на кълбовидни звездни купове се намира при 50% пълнота на кадъра.

За да открием тази звездна величина в изображенията на трите галактики, ние направихме серия от тестове за пълнотата на всеки кадър. За да се направят тези тестове, трябва към оригиналните кадри да се добавят изкуствени точкови източници с известна звездна величина и след това да се осъществят същите стъпки за откриване на източниците, както в началото (т.е. SExtractor с даден праг над фона). След това списъкът с новооткритите обекти се сравнява със списъка с прибавените, като процента на съвпадение отразява пълнотата за дадената звездна величина.

В нашия случай към всеки кадър бяха прибавени около 1200 изкуствени точкови източника с известна звездна величина в граници от 4^m с помощта на под-програмата ADDSTAR на пакета PYRAF. За да се построят образите на изкуствените звезди, трябва първо да се реконструира предавателната функция на системата (PSF), като се използва същата характерна FWHM, както на оригиналните кадри. Функциите на пълнота за четирите филтъра на всяка галактика са показани на Фигура 5. От тези графики се вижда, че 50% пълнота в B филтър се достига при най-слабата звездна величина. Но средният цвят $B - V$ на кълбовидните звездни купове е 0.75, което означава, че B кадърът трябва да бъде толкова по-дълбок от този във V лъчи, за да могат всички купове, открити във V да се виждат и в B . Ето защо ние приемаме, че кадрите в B филтър са най-непълни. 50% пълнота се достига при 23.60^m за NGC 3923, 22.78^m за NGC 4742 и 23.78^m за NGC 5831. Това означава, че по-лесно можем да откриваме сини звездни купове, тъй като по-червените няма да се покажат толкова добре в нашите относително плитки B кадри. Този факт има сериозни последиствия върху пълнотата на извадката ни от кълбовидни купове като цяло.



Фигура 5: Зависимост на пълнотата на кадрите от звездната величина за NGC 3923, NGC 4742 и NGC 5831 в проценти. Плътната хоризонтална линия показва 50% пълнота, от която се определя граничната звездна величина за откриване на кандидати за кълбовидни звездни купове. Тестовите за пълнота са направени чрез прибавянето на 1200 изкуствени точкови източника във всеки кадър, както е описано в §4.1.

4.2 Точка на обръщане на функцията на светимостта

Анализът на системата от кълбовидни звездни купове около галактиките може да ни даде много важна информация за тяхната еволюционна история. Една важна характеристика на тези системи е функцията на светимостта на кълбовидните купове (Globular clusters luminosity function – GCLF), която се дефинира като вероятността да бъде наблюдаван кълбовиден куп с дадена звездна величина. Чрез нея може да бъде определен пълният брой на кълбовидните звездни купове около

галактиката с което ще се занимаем в този и следващия параграф. Освен това функцията на светимостта може да бъде използвана като стандартна свещ за определяне на разстоянието до галактиката. С този метод ще се запознаем в §4.4.

Стандартният метод, чрез който се определя пълния брой на куповете в една галактика, се базира на напасването на наблюдавания брой обекти в зависимост от звездната им величина към приета форма на функцията на светимостта им. Обикновено тази функция се представя с гаусиан:

$$N(m) = N_0 \exp[-(m-m_0)^2/2\sigma^2],$$

където N_0 е мащабен фактор, m_0 е звездната величина в точката на обръщане на GCLF, а σ е дисперсията на функцията. На Фигура 6 е показана една типична GCLF във филтър V за галактиката NGC 1380 (Della Valle et al. 1998), която има ясно изразен максимум.

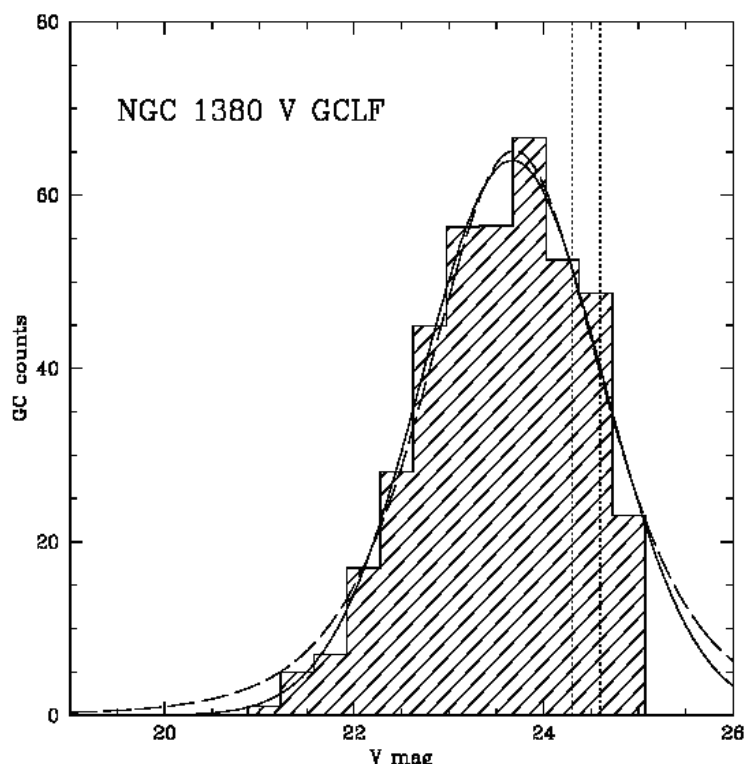
Абсолютната звездна величина на точката на обръщане за елиптични галактики е около $M_V(TO) \sim -7.33 \pm 0.04$, със $\sigma = 1.25$, определени от Harris (2000), като са използвани всички звездни купове от системата. Но напасването на GCLF с гаусиан може да бъде коректно единствено ако наблюденията достигат очакваната максимална стойност. В нашия случай това не е така. Чрез модулите на разстоянието от Tonry et al. (2001), базирани на флуктуации на повърхностната яркост, определихме видимите V_{TO} за всяка галактика, които се намират около 24.47^m за NGC 3923, 23.62^m за NGC 4742 и 24.84^m NGC 5831. Нашите най-слаби кандидати за кълбовидни звездни купове достигат почти 22^m във филтър V, като отчитаме непълнотата на кадрите. Те са около 2σ по-ярки от очакваните стойности на точките на обръщане за трите галактики, така че по този начин не можем да построим коректно GCLF. Въпреки това в §4.3 ще получим груби оценки за пълния брой на кълбовидните купове около изследваните от нас галактики в зависимост от различни стойности на V_{TO} и σ .

4.3 Специфична честота на кълбовидните купове

По принцип очакваме по-ярките галактики да съдържат повече кълбовидни звездни купове. Броят им може да се характеризира чрез специфичната честота, S_N , която представлява броя на кълбовидните купове, нормализиран към светимостта на галактиката. Специфичната честота се дефинира като

$$S_N \equiv N_t 10^{0.4(M_V+15)}$$

(Harris & van den Bergh 1981). N_t е оцененият пълен брой на куповете, които галактиката притежава, а M_V е абсолютната ѝ звездна величина. Ясно е, че $S_N = N_t$, ако M_V на изследваната галактика е равна на -15 .



Фигура 6: Типична функция на светимостта на кълбовидните купове (GCLF) във филтър V за галактиката NGC 1380 (Della Valle et al. 1998). С точкови линии са показани границите за 50% пълнота във филтър V и комбинацията (B, V, R), която е използвана, за да бъдат избрани кълбовидните купове. Видимата максимална звездна величина на функцията е достигната от наблюденията.

Както казахме по-горе, нашите наблюдения не са достатъчно дълбоки, за да достигнат максимума на GCLF, така че не можем да определим акуратно броя на кълбовидните купове около изследваните от нас галактики. Но можем да изберем различни комбинации от V_{TO} и σ и да изчислим най-вероятните специфични честоти и брой на куповете. Резултатите от нашите тестове са представени в Таблица 3.

Избрахме три различни стойности за точката на обръщане (-7.50 , -7.33 , -7.20) и сигма (1.20 , 1.25 , 1.40). Получените числа за S_N и N_t варират в големи граници. Ако приемем за най-правдоподобна комбинацията $M_V(TO)$ и $\sigma = (-7.33, 1.25)$, изведена от Harris (2000), специфичната честота на кълбовидните купове в NGC 3923 е 6.4 , а $N_t \approx 5500$. Тези стойности са близки до получените от Zepf et al. (1994) за системата от кълбовидни купове на тази галактика. За NGC 4742 броя на куповете е в границите от 200 до 650 с предпочетена комбинация $S_N = 6.5$, $N_t \approx 450$. За NGC 5831 тези стойности варират от 700 до 3000 кълбовидни купа с предпочитание към $S_N = 8.3$ и $N_t = 1750$.

Тези резултати ни карат да класифицираме изследваните от нас галактики като много богати на кълбовидни звездни купове. Интересно би било да сравним богатството на техните системи с други елиптични галактики. По принцип при галактиките от ранен тип се наблюдават по-високи специфични честоти, в сравнение със спиралните и

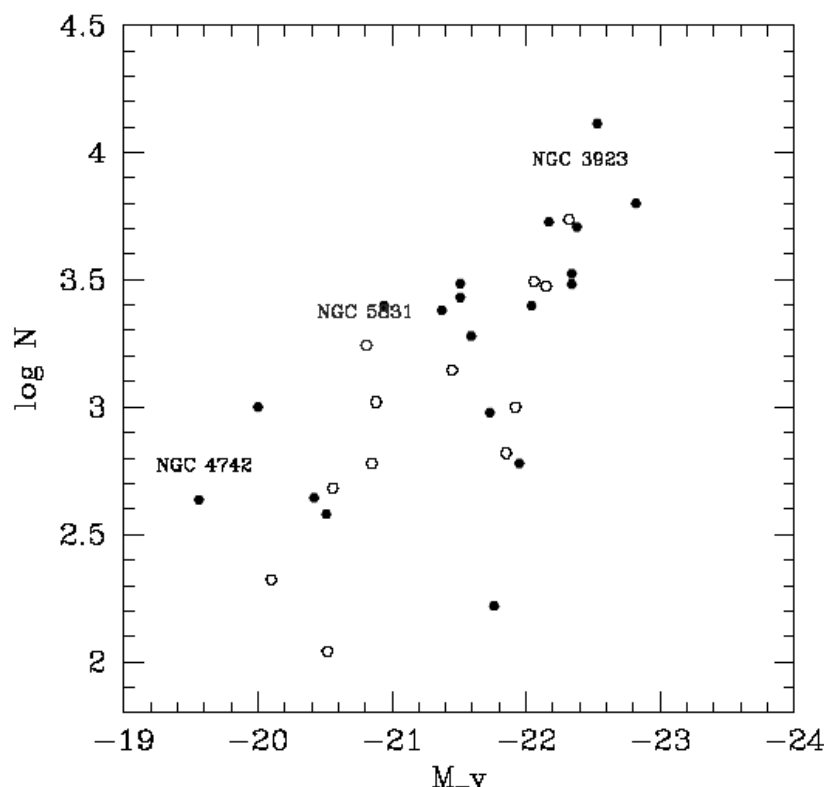
		NGC 3923		NGC 4742		NGC 5831	
$M_V(TO)$	σ	N_t	S_N	N_t	S_N	N_t	S_N
-7.50	1.40	2130	2.51	217	3.25	700	3.32
-7.50	1.20	4900	5.78	3177	4.75	1615	7.66
-7.33	1.25	5444	6.43	433	6.49	1750	8.30
-7.20	1.40	3500	4.13	325	4.78	1235	5.86
-7.20	1.20	980	1.16	650	9.75	3000	14.23

Таблица 3: Оценки за пълния брой на кълбовидни купове (N_t) в изследваните галактики и специфичната им честота (S_N) в зависимост от избраните V_{TO} и σ .

неправилните. На Фигура 7 е показана графика на абсолютната звездна величина M_V на галактиките спрямо логаритъм от общия брой на кълбовидните купове, които притежават. Данните за N_t са взети от списъка на Harris (1996) за системите от кълбовидни купове на 30 елиптични и cD галактики. Абсолютните звездни величини на галактиките във V лъчи са пресметнати от видимите им величини, взети от базата данни HyperLeda и модули на разстоянието от Tonry et al. (2001). Запълнените кръгчета представляват галактики в купове, незапълнените – галактики, които се намират в малки групи. Данните за групите са взети от списъка “Галактични групи на разстояние до 80 Мpc” от Fouqué et al. (1992). Всички групи в този списък съдържат поне три галактики с ъглов диаметър по-голям от 100”.

От тази графика се вижда, че NGC 3923 има значително по-богата система от кълбовидни звездни купове в сравнение с която и да било друга галактика, която се намира в малка група. Можем да заключим същото и за NGC 5831, докато NGC 4742 има относително бедна система. Но трябва да отчетем, че тези три галактики се намират в отдалечени галактични групи. NGC 3923 е най-големият и най-ярък член на своята собствена група, състояща се от 7 галактики на разстояние около 23 Мpc. NGC 5831 е в подобно положение. Тя принадлежи на групата на NGC 5846, която има 9 члена и е на разстояние 27 Мpc. NGC 4742 се намира на около 15.5 Мpc и е член на групата на NGC 4697, съдържаща 25 обекта. Тази група е относително богата, но NGC 4742 показва твърде малък брой на кълбовидните купове. Не трябва да забравяме, че вероятно поради големите разстояния, тези галактични групи не са изучени много добре и в тях за сега са открити само най-големите и ярки членове.

Изследваните от нас галактики ясно показват тенденцията за нарастване на броя на кълбовидните купове с увеличаване на светимостта L на приютяващата ги галактика. Според Zepf et al. (1994) връзката между N_t и L , комбинирана с подходящите условия за образуване на кълбовидни звездни купове, хвърля много светлина върху процеса на образуване на елиптичните галактики. Въпреки че механизмът на образуване на кълбовидни купове все още не е добре разбран, наблюденията показват новообразували се такива купове в множество галактики, в които в момента протича гравитационно



Фигура 7: Логаритъм от общия брой на кълбовидни звездни купове спрямо абсолютната звездна величина на приютяващата ги галактика. Запълнените кръгчета представляват галактики в големи галактични групи, незапълнените – в малки. Изследваните от нас галактики ясно показват тенденцията за нарастване на N_t с L .

взаимодействие или се сливат (Holtzman et al. 1992, Whitmore et al. 1993, Conti & Vacca 1994). Тези открития изглежда потвърждават по-ранни предположения, че сливанията на богати на газ галактики са благоприятни места за образуване на кълбовидни звездни купове (Schweizer 1987, Ashman & Zepf 1992). В частност, физическите условия в тези системи могат да предизвикат изграждането на много масивни и плътни молекулярни облаци, които вероятно са прогениторите на кълбовидните купове (Larson 1990, Ashman & Zepf 1992, Kumai, Basu & Fujimoto 1993, Harris & Pudritz 1994). Следователно можем да направим важно заключение от нашето изследване, че елиптичните галактики с по-висока светимост са се образували в условия, близки до сливането на богати на газ галактики.

Можем да наложим още по-строги ограничения върху процесите на образуване на елиптични галактики, когато комбинираме изследванията на кълбовидни звездни купове в тях с други видове наблюдения. По-точно, предположените от нашите резултати условия са интригуващи подобни на тези, които се предполагат от наблюдаваните отношения на Mg спрямо Fe. Това отношение прогресивно нараства при по-масивни и ярки елипси (Worthey, Faber & González 1992, Peletier 1989). Както Worthey et al. дискутират, разликите в отношенията на обилията като функция от масата на елиптичните галактики показва няколко неща.

Първо, епохите на звездообразуване в елиптичните галактики са били кратки в сравнение с времевите мащаби на свръхновите от тип I. Второ, началната функция на масите в ярки елипси е по-богата на масивни звезди, което довежда до наличието на повече свръхнови от II тип, от там и повече Mg. Трето, желязото селективно се изгубва чрез галактичните ветрове при по-масивните елипси. Третата възможност изглежда малко вероятна, тъй като е трудно да се уреди нужната селективна загуба на метали, зависеща от масата. Изключително бързото звездообразуване в елиптичните галактики като цяло не е в съответствие с наблюдаваната форма на разпределението на металичността на кълбовидните купове, която ще обсъдим в следващата глава. Това разпределение потвърждава епизодично образуване на два или повече пъти, вместо едно единствен бърз процес (Zepf & Ashman 1993, Zepf, Ashman & Geisler 1994a).

Представените в тази глава резултати обрисуват картина, в която богати на газ галактики се сливат, за да образуват гигантски елипси. Теоретичните аргументи, например Silk (1993), и наблюденията на близки сливащите се галактики и такива, в които протича активно звездообразуване, например Joseph (1991) и Rieke 1991, предполагат, че тези физически условия могат да доведат до звездни начални функции на масата, които са с повишено съдържание на масивни звезди. Така сливането на богати на газ системи може да бъде отговорно за връзката на броя на кълбовидните купове и обилията на тежките елементи с масата на елиптичните галактики.

4.4 Кълбовидните купове като индикатор за разстояние

В §4.3 използвахме свойствата на функцията на светимостта на кълбовидните звездни купове, GCLF, за да определим някои основни качества на системите от кълбовидни купове в изследваните от нас галактики. Правейки предположения за максималната стойност и сигма на GCLF и имайки предвид непълнотата на наблюденията ни, ние изчислихме очаквания пълен брой на куповете и тяхната специфична честота. За съжаление нашите наблюдения не са достатъчно дълбоки, за да ни позволят наблюдателно да определим точката на обръщане на тази функция. В противен случай от характеристиките на системата от кълбовидни купове на дадена галактика бихме могли да определим разстоянието до нея. Този метод все още не е станал модерен в литературата, предимно поради някои по-ранни резултати, които са в противоречие с други индикатори на разстоянието (например Ferrarese et al. 1999). Harris (2000) дава чудесно резюме, включително някои исторически забележки и детайлно описание на самия метод. Основната задача е да се измерят видимите звездни величини, най-често във филтър V, на голям брой кълбовидни купове от системата на дадена галактика. Така конструираното разпределение на звездните величини, или функция на светимостта, има характерна максимална стойност –

точката на обръщане. Абсолютната стойност на тази характеристична звездна величина се получава от местни или вторични индикатори за разстояние, като по този начин получаваме модул на разстоянието от наблюдаваната точка на обръщане. Обосновката на метода е предимно емпирична. Когато се сравняват точки на обръщане за галактики на едно и също разстояние, се получава разпръскване от 0.15^m . Така голям брой добре наблюдавани видими точки на обръщане могат да бъдат трансформирани в абсолютни, като се използват други индикатори за разстоянието, например Цефеиди, флуктуации на повърхностната яркост, функции на светимостта на планетарните мъглявини... Тук също се наблюдава съвсем малка дисперсия. Като се отчетат грешките при фотометрията, напасването на GCLF, приетите разстояния и т.н., дисперсията на самата точка на обръщане е $<0.1^m$, което я прави добра стандартна свещ. От теоретична гледна точка, тази постоянност на звездната величина на точката на обръщане отговаря на универсална характеристична маса в масовото разпределение на кълбовидните купове във всички галактики. Дали това е остатък от характерната маса на масовата функция на молекулярните облаци, които са в основата на произхода на кълбовидните купове, или се е появило по-късно, по време на процеса на образуване на самите купове, все още е неясно.

Абсолютната стойност на точката на обръщане е около $M_V(TO) \sim -7.5$, а видимата ѝ звездна величина може да се определи точно само ако максимумът на GCLF е достигнат от наблюденията. От наблюдателна гледна точка това означава, че данните трябва да достигат $V \sim 25$, за да се определят разстоянията до галактичните купове в Дева или Пещ ($D \sim 20$ Мpc). В момента космическият телескоп Хъбъл и 10 m телескопи обикновено достигат $V \sim 28$, така че този метод може да бъде прилаган до разстояние 120 Мpc.

Наблюдателните предимства на този метод пред други са, че кълбовидните звездни купове са по-ярки в сравнение с други стандартни свещи (с изключение на свръхновите, разбира се) и не се променят, така че не са нужни продължителни, повтарящи се наблюдения.

Съществуват два основни начина, по които можем да определим разстоянието до изследваната галактика чрез системата ѝ от кълбовидни звездни купове. Първият начин, който ще наречем класически, е описан много добре от Harris (2000). При този метод за построяване на GCLF се използват всички кълбовидни купове в системата. Освен това, той използва функцията на светимостта като вторичен индикатор и я калибрира чрез разстояния, определени с помощта на Цефеиди. Методът сравнява максимума на наблюдаваната GCLF с максимума на смесица от функциите на светимостта на множество елиптични галактики в куповете в Дева и Пещ. Така групата на Харис определя разстоянието до елипсите в купа в Косите на Вероника. На практика тези изследователи определят точна точка на обръщане на GCLF и я калибрират без други допълнителни корекции като $M_V(TO) = -7.33 \pm 0.04$ (Harris 2000) или $M_V(TO) = -7.26 \pm 0.06$, ако са използвани само галактиките от купа в Дева (Kavelaars et al. 2000).

Предимството на този метод е, че когато се използват всички кълбовидни купове (а не само ограничено поднаселение), често се избягват проблемите с малката статистика. Въпреки това методът има и

недостатъци. Основният от тях е наблюдателното потвърждение, че гигантските елиптични галактики имат няколко отделни поднаселения (ще дискутираме този въпрос в следващата глава), които имат различни възрасти и металичности. Това автоматично води към мисълта, че различните поднаселения в дадена галактика ще имат различни точки на обръщане. Като взимаме цялата система от кълбовидни купове, ние използваме смес от точки на обръщане. По принцип можем да се опитаме да коригираме за средната металичност, както предлагат Ashman et al. 1995, но тази корекция зависи от приетия модел на синтезирано звездно население (Puzia et al. 1999) и известно съотношение на бедни към богати на метали купове. Тази смес се променя не само от галактика на галактика (Gebhardt & Kissler-Patig 1999), но и с галактоцентричния радиус (Geisler et al. 1996, Kissler-Patig et al. 1997). Това довежда до преместване на точката на обръщане и разширяване на GCLF на цялата система. Тогава елиптичните галактики в Дева са валидни калибратори за други гигантски елипси с подобно отношение на бедни към богати на метали купове и за такива, при които наблюденията покриват близки радиуси. Това е потенциален проблем когато се сравняват наземни с изследвания от космическия телескоп Хъбъл, фокусирани върху вътрешните райони на галактиките. Или когато се сравняват близки галактики, при които центърът е много добре изразен с далечни, в които се виждат предимно кълбовидни купове от халото. В по-лошия случай, като игнорираме наличието на различни поднаселения и сравняваме много различни галактики в този аспект, можем да внесем грешки от порядък няколко десети от звездната величина.

Алтернатива на класически метод е да се фокусираме само върху бедните на метали купове. Идеята е да изолираме бедните купове от системата и да определим тяхната GCLF. Като калибратор можем да използваме GCLF на бедните на метали купове от Млечния път, като по този начин получаваме независимост от други извънгалактични индикатори на разстоянието. За функцията на светимостта на куповете от Млечния път трябва да определим отново абсолютно разстояние до всеки индивидуален куп, което ще ни даде абсолютна функция на светимостта. Индивидуалните разстояния до куповете се определят като се използват видимите звездни величини на хоризонталния клон в диаграмата на Херцшпрунг-Ръсел и металичността (Gratton et al. 1997). Този метод следва напълно различни пътища от тези, които в даден момент се опират на Цефеидите и е напълно независим от разстоянието до Големия Магеланов облак.

Така на практика определяме точна точка на обръщане за GCLF за бедните на метали кълбовидни купове в изследваната галактика. Нейната стойност е $M_V(TO) \sim -7.62 \pm 0.06$, получена от бедните на метали купове в Млечния път (Della Valle et al. 1998, Drenkhahn & Richtler 1999).

Предимствата на метода са, че той отчита познатите подструктури на системите от кълбовидни купове. Използването само на бедните на метали купове се мотивира от множество факти. Първо, изглежда че те имат истински универсален произход (Burgarella et al. 2000) и свойствата им изглеждат относително независими от галактичния тип, околна среда,

размери и металичност. Така в първо приближение те могат да бъдат използвани при галактики от всякакъв тип, без да се правят допълнителни корекции. Избирането на Млечния път като калибратор дори и за GCLF на елиптични галактики е обосновано от това, че кълбовидните купове са предимно обекти от халото.

Разбира се и този метод има недостатъци. Първият е, че ако искаме да използваме само бедните на метали кълбовидни купове, наблюдателните ни данни трябва да бъдат много по-богати в сравнение с данните, които се използват в съвременните изследвания на GCLF, което от своя страна изисква по-сложни и продължителни наблюдения. Освен това, дори при отлични данни, не е възможно идеално разделяне на бедни и богати на метали купове, а така извадката ни до известна степен ще бъде замърсена от богати на метали купове. Най-накрая си задаваме отново познатия въпрос: доколко универсална е точката на обръщане за GCLF на бедните на метали купове?

Ще дадем няколко примера за определяне на разстоянията чрез бедни на метали кълбовидни купове, представени от Della Valle et al. (1998) и Puzia et al. (1999). В първото изследване е получен модул на разстоянието за NGC 1380 в купа в Пещ ($m - M$) = 31.35 ± 0.09 . В този случай функциите на светимостта на бедните и богатите на метали купове имат една и съща максимална стойност, т. е. по-високата металичност се компенсира от по-млада възраст на населението от червени купове, така че тук принципно няма разлика дали използваме само бедното на метали население или цялата система. За сравнение, определените по цефеидния метод стойности и средното между Цефеидите, флукуациите на повдърхностната яркост и функцията на светимостта на планетарните мъглявини дава модул на разстоянието до купа в Пещ ($m - M$) = 31.54 ± 0.14 (Ferrarese et al. 1999) и ($m - M$) = 31.30 ± 0.04 (Kavelaars et al. 2000).

В случая с NGC 4472 в галактичния куп в Дева, Puzia et al. (1999) определят точки на обръщане за бедните и богати на метали купове равни на 23.67 ± 0.09 и 24.13 ± 0.11 респективно. Ако се използват само бедните на метали купове, полученото разстояние е ($m - M$) = 30.99 ± 0.11 . Тази стойност е много близка до получената чрез Цефеиди в шест галактики в Дева ($m - M$) = 31.01 ± 0.07 . И двата случая демонстрират чудесното съгласуване на GCLF метод с други популярни методи, въпреки напълно различните и независими калибратори, които се използват. Точността на GCLF винаги ще бъде ограничена от размера на извадката и е около 0.1.

Добър пример за така наречения класически метод е определянето на разстоянието до купа в Косите на Вероника. На разстояние от ~ 100 Мрс разделянето на бедните от богатите на метали купове е едва възможно и тогава трябва да се използва цялата система от кълбовидни купове. Kavelaars et al. (2000) извеждат стойности за точките на обръщане в галактиките NGC 4874 и IC 4051 в Сoma $M_V(TO) = 27.82 \pm 0.13$ и $M_V(TO) = 27.72 \pm 0.20$ съответно. Като използват елиптичните галактики в Дева за стандарт и приемат разстоянието до купа ($m - M$) = 30.99 ± 0.04 , те оценяват разстоянието до купа в Сoma на 102 ± 6 Мрс. Прибавяйки

множество стойности на точката на обръщане за отдалечени галактики (взети от Lauer et al. 1998), те построяват диаграма на Хъбъл за техниката на GCLF и определят константата на Хъбъл $H_0 = 69 \pm 9$ km/s/Mpc. Този пример отлично демонстрира постиженията на метода.

Като заключение можем да кажем, че методът вече е узрял и повечето грешки в анализа могат да бъдат избегнати, както и да бъдат избрани по-добри стандарти. В бъдеще данните от космическия телескоп Хъбъл и от класа на 10 m телескопи ще позволят точно определяне на разстоянията до 100 Mpc, а ако за това се използват само бедните на метали купове, тогава ще получим скала на разстоянията, напълно независима от разстоянието до Големия Магеланов облак или Цефеидите.

5 Поднаселения от кълбовидни звездни купове

В тази глава ще обърнем внимание на присъствието на поднаселения от кълбовидни звездни купове около гигантските елиптични галактики. Накратко ще обобщим различните сценарии, които могат да обяснят свойствата на тези толкова сложни системи.

5.1 Бедно и богато на метали поднаселение от купове

За първи път поднаселенията в системите от кълбовидни звездни купове са открити в Млечния път (Kinman 1959, Morgan 1959, Zinn 1985). Kinman (1959) посочва, че по-богатите на метали купове изглежда образуват по-сплесната и по-бързо въртяща се система в сравнение с по-бедните на метали. Zinn (1985) установява без съмнение подобно разделяне на две поднаселения. Куповете с металичност $[Fe/H] \geq -0.8$, т.е. богатите на метали, са наречени дискови кълбовидни купове, или G купове, а тези с $[Fe/H] < -0.8$, бедните на метали, са наречени купове от халото, или F купове. Сега се смята, че куповете от диска са свързани с балджа (Minitti 1995, Côté 1999). Наличието на множество компоненти на населението в други гигантски галактики за първи път е открито то Zepf & Ashman (1993). Очевидно поднаселенията са свързани с няколко отделни епохи или механизма на звездообразуване.

5.2 Произход на поднаселенията

Простият сценарий за сливане на два диска, който обяснява две поднаселения от кълбовидни купове (Ashman & Zepf 1992) намери силна подкрепа за дълго време сред астрономите, частично и поради липсата на алтернативи. Той бе подкрепен от откриването на новообразувани млади звездни купове във взаимодействащи си галактики (Lutz et al. 1991, Holtzman et al. 1992). Но по-късно се появиха и други сценарии, които обясняват присъствието на поне две отделни поднаселения.

5.2.1 Сценарий със сливане

Фактът, че сливанията на галактики могат да произведат нови кълбовидни звездни купове бе отбелязан в литературата веднага след като Toomre (1977) предположи, че елиптичните галактики може да са се образували при сливането на две спирали (Harris 1981, Schweizer 1987). Но първите догадки за последиците при сливане на две спирали са на Ashman & Zepf (1992). Те предсказват, че в резултатната галактика ще

има две населения от кълбовидни купове: едно старо, бедно на метали население от прогениторските спирали и едно новообразувано, младо, богато на метали население. Бедното на метали население ще бъде пространствено разширено и ще притежава част от орбиталния ъглов момент на сливането. Богатите на метали кълбовидни купове ще бъдат по-концентрирани към центъра.

5.2.2 Сценарий “на място”

Според този сценарий всички кълбовидни купове се образуват от субстанцията, която по-късно ще се превърне във финалната галактика. В този случай кълбовидните купове се образуват по време на колапса на галактиката, който протича в две отделни фази (Forbes et al. 1997, Harris et al. 1998, Harris et al. 1999). Първото образуване произвежда бедни на метали кълбовидни купове и звезди (подобно на Searle & Zinn 1978) и предизвиква собствения си край като йонизира газа или го издухва. Вторият колапс е малко след това (1-2 Gyr) и дава началото на богатата на метали компонента. Така и двете населения са свързани с родителската галактика.

5.2.3 Сценарии с поглъщане

Сценариите с поглъщане бяха преразгледани в детайли, за да обяснят наличието на голямо население от бедни на метали кълбовидни купове около галактиките от ранен тип. В тези сценарии богатите на метали купове принадлежат на самата галактика, докато бедните на метали са погълнати от или заедно с галактики-джуджета (Richtler 1994). Hilker (1998) и Hilker et al. (1999) предложиха, че по време на поглъщането на богати на звезди и газ джуджета може да се образуват нови кълбовидни купове. В тези сценарии бедните на метали купове няма да са свързани с крайната галактика, а свойствата им ще бъдат много по-близки до тези на кълбовидните купове в галактиките-джуджета. Освен това, единствено тези сценарии могат да обяснят лесно бедните на метали купове, които са по-млади от богатите. В малко по-различен сценарий Kissler-Patig et al. (1999b) отбелязват възможността централните гигантски елипси да са погълнали и богатите и бедните на метали купове от заобикалящите ги галактики със средни размери.

5.2.4 Пред-галактични сценарии

Тези сценарии са предложени преди много време от Peebles & Dicke (1968). В тях става дума за времето, когато Джинсовата маса в ранната Вселена е била подобна на масите на кълбовидните звездни купове. Преразгледани са отново от Kissler-Patig (1997b), Kissler-Patig et al. (1998b), Burgarella et al. (2000). Бедните на метали купове би трябвало да са се образували във фрагментите преди образуването на самата галактика, по-късно са изградили галактичното хало и подхранили с газ образуването на балджа. В този сценарий свойствата на бедните на метали купове също не са свързани с финалната галактика, докато тези на богатите на метали са. Също така бедните на метали купове са по-стари, отколкото богатите на метали.

В литературата всички тези сценарии се обсъждат като различни, но по същество те не се различават значително. Първият от тях обяснява наличието на богато на метали население, за разлика от последните два, които са се заели с бедните на метали. Тези три сценария не се изключват взаимно. Само сценарият “на място” свързва бедната и богатата на метали компонента. За богатите на метали купове въпросът се концентрира до това дали те са се образували по време на колапса на балджа или сфероидалната компонента или са се образували по време на бурно взаимодействие. По отношение на бедните на метали купове, разликите в трите последни сценарии са редимно семантични. Те се различават малко по отношение на това къде са се образували куповете и дали са свързани с финалната галактика. Обясняването на механизма, по който са се образували системите от кълбовидни купове вероятно се състои в намирането на точната смес от изложените по-горе механизми и така вероятно за всяка една галактика поотделно.

5.3 Разпределение на цвета

Наблюдателните данни за трите елиптични галактики, които използваме в това изследване, са получени в четири широкоивични филтъра от системата Johnson-Cousins – B , V , R и I . Ако искаме да определим възрастта и металичността на кълбовидните купове, като използваме фотометричните им свойства, ще срещнем проблем, защото широкоивичните филтри са изродени в това отношение. По-младата възраст се компенсира от по-висока металичност в почти всички оптични широкоивични цветове.

Най-широко употребяваният цвят в литературата, който се използва за разделяне на поднаселения, е $V - I$. За съжаление той не е достатъчно чувствителен към металичността, какъвто например е $V - K$, ако разполагаме с наблюдения в инфрачервената област или $C - T_1$ от Вашингтонската фотометрична система. Връзката цвят-металичност за тази система е:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = 2.35 (C - T_1)_o - 4.39$$

Тя е изведена от Geisler & Forte (1990) и се базира върху изследването на Harris & Canterna (1977) на Галактичните кълбовидни купове.

Тъй като нашите наблюдения са направени в системата Johnson-Cousins, ние се нуждаем от съответната връзка цвят-металичност. Ще използваме изведените от Forbes & Forte (2001) уравнения, които също се базират на Галактичните кълбовидни купове, но авторите потвърждават, че са приложими и при галактики от ранен тип.

$$\begin{aligned} (V - I)_o &= 0.49 (C - T_1)_o + 0.32 \\ [\text{Fe}/\text{H}] &= 4.79 (V - I)_o - 5.92 \end{aligned}$$

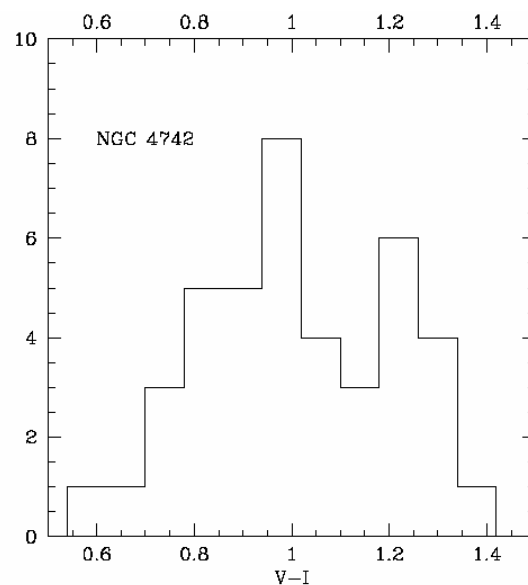
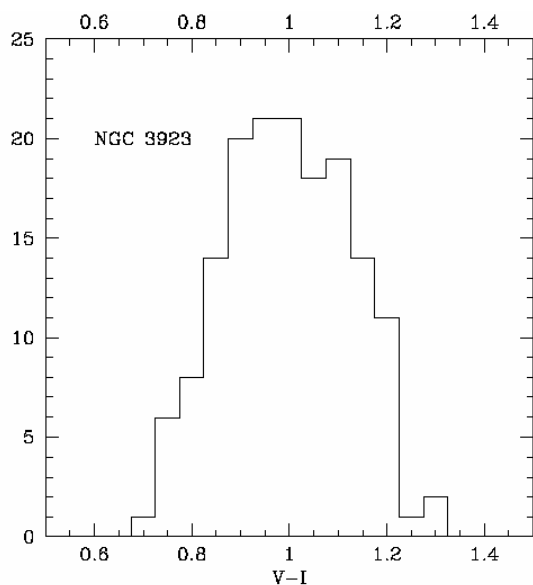
Определената от Zinn (1985) граница $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8$ за разделяне на куповете на бедни и богати на метали отговаря на $V - I = 1.07$.

Наличието на две отделни поднаселения в трите изследвани галактики може лесно да се види дори и на диаграмите цвят-звездна величина на Фигура 4, също както и на цветните хистограми на Фигура 8. Поради лошите наблюдателни условия на NGC 5831 данните ни не са достатъчно добри, за да определим достоверно свойствата на поднаселенията – среден цвят, пространствено разпределение и т.н. Вероятно максимумът на $V - I \sim 1.4$ се дължи на замърсяване от обекти извън NGC 5831 (например галактики от фона), които изглеждат като точкови източници с подобни на кълбовидните звездни купове цветове. Ето защо в тази глава ще се концентрираме само върху NGC 3923 и NGC 4742.

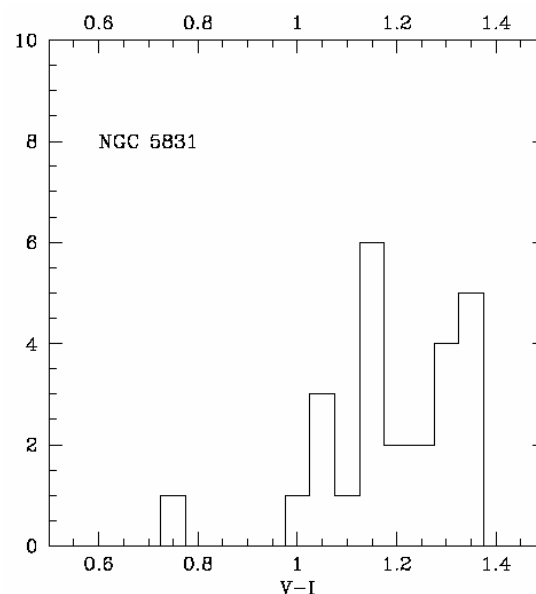
Цветовите на системата от кълбовидни купове на NGC 3923 вече е изследвана от Zepf et al. (1995) (накратко – Z95), които откриват две отделни поднаселения, използвайки $C - T_1$. Максимумът в разпределението на първата компонента е при $C - T_1 = 1.47$, като в нея влизат 54% от обектите. Максимумът на втората компонента се намира около $C - T_1 = 1.87$ и съдържа останалите 46% от обектите. Преведени в цвят $V - I$ тези стойности отговарят на 1.04 и 1.24 с грешка от 0.1^m . В нашето изследване на NGC 3923 двата максимума на цветовото разпределение лежат при $V - I = 0.95$ и $V - I = 1.1 \pm 0.1^m$, така че в рамките на грешката съвпадат с по-рано изведените резултати. Двата максимума в NGC 4742 се намират при 0.98 и 1.20 със същата грешка. За сравнение ще използваме списъка на Forbes & Forte (2001), който съдържа 28 галактики с ясно изразена двойственост в цветовото разпределение. Средният цвят $V - I$ на синьото население в тези галактики е 0.954 ± 0.008 , а на червеното население – 1.16 ± 0.05 . От тук виждаме, че получените от нас стойности за NGC 3923 са по-близки до средните цветове за други елиптични галактики, в сравнение с получените от Z95. Подобно явление вече е наблюдавано при още една галактика, NGC 3311, за която Secker et al. (1995) дават $V - I = 1.15$ и 1.28 за синия и червения максимум съответно, преведени от $C - T_1$. По-новите резултати на Brodie, Larson & Kissler-Patig (2000) показват нормални цветове за максимумите в разпределението на кълбовидните купове $V - I = 0.91$ и 1.09. Тези разлики могат да се дължат на грешки при определянето на нул-пункта на звездните величини.

Двойствеността в разпределението на цветовете на кълбовидните купове в двете галактики се описва много по-добре със смес от две населения с нормално разпределение и различни средни цветове, отколкото от едно нормално разпределено население.

Също както и други автори (Zepf et al. 1995), ние потвърждаваме, че системата от кълбовидни купове около NGC 3923 има двойно цветно разпределение и намираме, че системата на NGC 4742 притежава същото свойство. Присъствието на тези две населения в изучаваните галактики не може да бъде обяснено с прост модел на монолитен колапс. Изглежда че тези галактики са имали по-сложна история на образуването си. Освен това намираме, че отношението на червените (богати на метали) към сините (бедни на метали) купове в двете галактики е по-малко от единица. За NGC 3923 то е 0.49, а за NGC 4742 – 0.52. Моделът на Ashman & Zepf (1992), който се опитва да обясни защо специфичните честоти в елиптичните галактики са два и повече



Фигура 8: Хистограми за цвета $V - I$ за NGC 3923, NGC 4742 и NGC 5831. Ясно се забелязват поне два максимума в разпределението на цветовете им. Ширината на биновете е 0.5^m за NGC 3923 и NGC 5831 и 0.8^m за NGC 4742. Поради лошите наблюдателни условия не можем да определим достоверно свойствата на ститемата от кълбовидни купове на NGC 5831.



пъти по-големи от тези в спиралните галактики, предполага, че сливането на две или повече спирали създава население от кълбовидни купове, сравнимо по големина и брой с населенията, които първоначално се съдържат в спиралите. Това не се наблюдава в NGC 3923 и NGC 4742 и имаме несъгласие с този модел. От друга страна пълният брой на кълбовидните купове в елиптичните галактики по отношение на спиралните още не е добре известен. Възможно е разликите в специфичните честоти на типичните елиптични и спирални галактики да са по-малки, отколкото се смяташе по-рано и в този случай изискването за равен брой на новосъздадените купове при сливането ще отпадне.

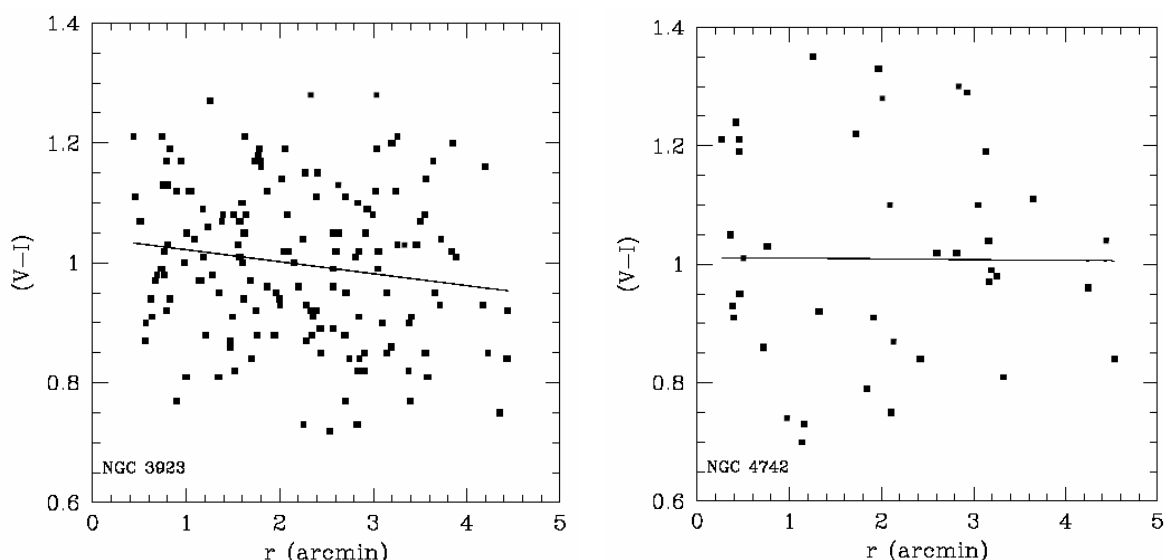
5.4 Градиенти на цвета на кълбовидните купове в NGC 3923 и NGC 4742

Радиалните градиенти на цветовете и металичността на кълбовидните купове могат да дадат някои идеи относно историята на образуване на тяхната система и галактиката, в която се намират. За тази цел на Фигура 9 представяме зависимостта на цвета $V - I$ от галактоцентричното разстояние r за всеки кълбовиден куп в дъгови минути за NGC 3923 и NGC 4742. Тези графики ясно показват голямото цветово разпределение при всички радиуси. В NGC 3923 се наблюдава слаб градиент на цвета – при по-голямо разстояние от центъра куповете стават по-сини, а в NGC 4742 е почти равен на 0. Тези градиенти са илюстрирани с правите линии на двете графики и са изчислени чрез метода на най-малките квадрати. Уравненията им за NGC 3923 и NGC 4742 са както следва:

$$\begin{aligned} V - I &= 1.043(\pm 0.023) - 0.020(\pm 0.009) r \\ V - I &= 1.012(\pm 0.057) - 0.001(\pm 0.024) r, \end{aligned}$$

където r е разстоянието на кълбовидния куп до центъра на галактиката в дъгови минути. В NGC 3923 се наблюдава слаб отрицателен градиент на сините купове, $\Delta(V - I)/\Delta r = -0.017 \pm 0.008$, а на червените е $\Delta(V - I)/\Delta r = 0.003 \pm 0.008$. При NGC 4742 градиентите на сините и червените купове се уравновесяват, като общия градиент на цвета на системата е почти равен на 0. Възможно е тази липса на градиент да се дължи на увеличаване на замърсяващите обекти при по-големи радиуси.

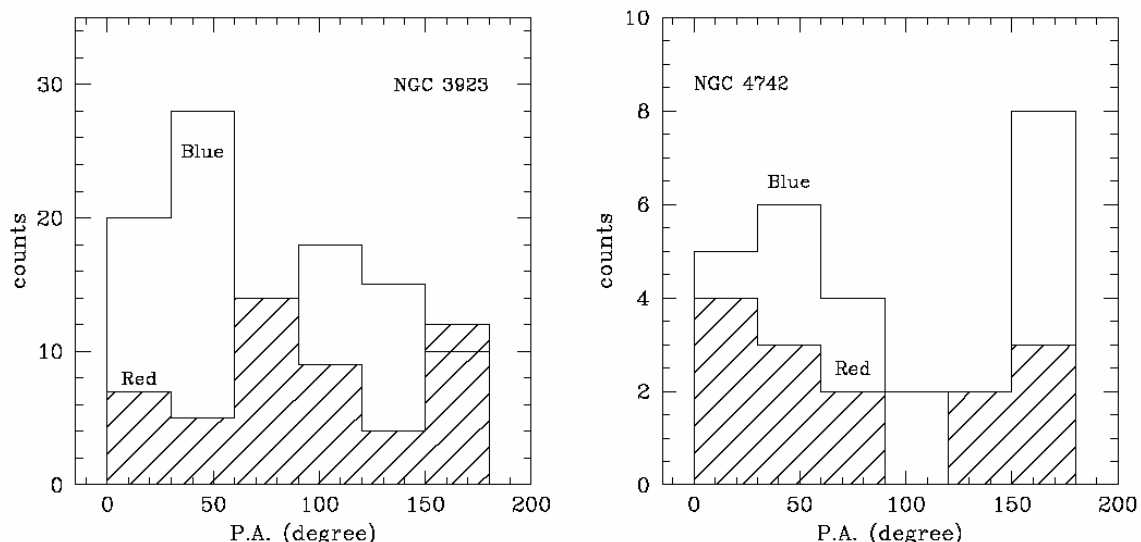
Всички модели, които ние разглеждаме, могат да обяснят защо синьото население от кълбовидни купове в елиптичните галактики е пространствено по-издължено, в сравнение с червеното. Lee et al. (1998) наблюдава градиент на цвета на цялото население от купове в NGC 4472 до $\sim 7'$ и показва, че това се дължи на нарастващо отношение на сините към червените купове при по-големи радиуси. Ние също наблюдаваме подобен градиент в NGC 3923, но не и при NGC 4742. Нулевият градиент не е предречен, нито се съгласува с нито един от предложените модели. В действителност, ако този резултат е верен, се появява интересния въпрос как са се образували богатите на метали купове, които се намират на голямо разстояние от центъра на галактиката.



Фигура 9: Зависимостта на цвета $V - I$ от галактоцентричния радиус на кълбовидните звездни купове в NGC 3923 и NGC 4742. С права линия са показани градиентите на цвета, изчислени чрез метода на най-малките квадрати.

5.5 Ъглово разпределение на кълбовидните купове

Според малкото до момента изследвания, чиято цел са били морфологичните свойства на червените и сините купове поотделно (Geisler et al. 1996, Kissler-Patig et al. 1997, Lee et al. 1998, Kundu & Whitmore 1998) бедното на метали население (сините купове) е по-сферично разпределено и изтеглено към по-голям радиус в сравнение с червеното, богато на метали население. Второто е по-сплеснато и изглежда, че следва елиптичността и позиционния ъгъл на дифузната звездна светлина на галактиката. Така по-голям брой на сините купове в дадена галактика може да предизвика плосък профил на пълтността за цялата система от кълбовидни купове. На Фигура 10 е показано ъгловото разпределение на сините и червените купове около NGC 3923 и NGC 4742 в сектори с големина 30° , след като сме приели точкова симетрия около центъра на галактиките. В NGC 3923 наблюдаваме точно обратното на това, което се наблюдава в по-рано изследвани галактики. Червените купове образуват почти сферична система, докато сините купове имат максимум при позиционния ъгъл на самата галактика. При NGC 4742 червените отново изглеждат почти сферично разпределени, а синьото население има максимум при позиционен ъгъл, който е перпендикулярен на ъгъла на дифузната звездна светлина. Интересното в случая е, че тази посока сочи към странно звездно образуване в северозападната част на кадъра, вероятно остатък от възможно сливане на галактики в миналото. Можем да предположим, че наблюдаваното нетипично ъглово разпределение на кълбовидните купове в двете



Фигура 10: Ъглово разпределение на сините и червени кълбовидни звездни купове в сектори от 30° след приета точкова симетрия около центровете на галактиките NGC 3923 и NGC 4742. Системата на червените купове е почти сферична, докато системата на сините е издължена.

галактики се дължи на неотдавнашното образуване на техните системи. Вече споменахме, че всички разглеждани модели за образуване на елиптичните галактики дават обяснение на наличието на бедна и богата на метали компонента в системите от кълбовидни купове. Моделът с поглъщане на галактики-джуджета обяснява големия брой на сини купове в изследваните от нас обекти. Но ъгловото им разпределение по-скоро потвърждава модела със сливане на две или няколко спирални галактики, тъй като в този случай бихме очаквали сините купове, чиито произход е от прогениторските спирали, да пренесат част от орбиталния ъглов момент на сливането.

6 Заключение

С тази диполмна работа си поставихме за цел да изследваме системите от кълбовидни звездни купове в три галактики от ранен тип. Основната ни идея бе да определим техните свойства и след това да ги съпоставим със съществуващите за момента хипотези за образуване на елиптични галактики. Най-важните ни резултати са свързани с потвърждаването на двойното разпределение на цветовете в NGC 3923 и намирането на такова в NGC 4742. Наличието на две компоненти на населенията от кълбовидни купове – бедна и богата на метали – и техните свойства, ни навежда към мисълта, че те са се формирали в два отделни епизода на звездообразуване. По-лесно можем да обясним свойствата им с механизъм на образуване на приютяващите ги галактики, в който протича бурно звездообразуване (както е при сливанията на богати на газ спирали) или поглъщането на фрагменти от или цели галактики-джуджета. Първата хипотеза се потвърждава и от тенденцията за нарастване на броя на кълбовидните купове с увеличаване на светимостта L на галактиката-домакин. Следователно можем да направим важно заключение, че елиптичните галактики с по-висока светимост са се образували в условия, близки до сливането на богати на газ галактики.

Като обобщение ще допълним, че кълбовидните звездни купове могат да бъдат използвани за много различни по вид изследвания. Те могат да ни разкажат за раждането на нови звезди в галактиките и особено за отделните епизоди на звездообразуване в тези от ранен тип. Могат да помогнат с обяснения как са се образували спиралните галактики и как са протекли бурните взаимодействия между тях. Освен всичко това, те са точен индикатор за разстояния – независим от Цефеидите и разстоянието до Големия Магеланов облак. Така че изследването на извънгалактични кълбовидни звездни купове е едно от най-разностранный полета в астрономията.

Част от изследванията в тази магистърска теза са направени в Главната квартира на Европейската Южна обсерватория, ESO, в Мюнхен, Германия в периода септември – ноември 2004 г, подкрепени със стипендия от ESO. Искam да изкажа дълбоката си благодарност към научния ми ръководител – д-р Маркус Кислер-Патиг, който ме въведе в удивителния свят на кълбовидните купове и освен че ме научи да обработвам изображения и да получавам смислена информация от тях, ми показва колко интересно и забавно може да бъде едно научно изследване. Специално благодаря на целия преподавателски екип в Катедрата по астрономия на СУ “Св. Климент Охридски”, които с готовност отговаряха на многобройните ми въпроси.

Литература

- Ashman, K.M. & Zepf, S.E. 1992, ApJ 384, 50
- Besançon Model of Stellar Population Synthesis, 2003 – 12
- Binney, J. & Merrifield, M. 1998, in “Galactic Astronomy” (Princeton: Princeton Univ.Press)
- Brodie, J.P., Larson, S., Kissler-Patig, M. 2000, ApJ 543, L19
- Bunker, A.J. & van Breugel, W.J.M. 1999, “The Hy-Redshift Universe: Galaxy Formation and Evolution at High Redshift”, ASP Conf. Ser.
- Burgarella, D., Kissler-Patig, M. & Buat, V. 2000, A&A
- Cardelli, J.A., Clayton, G.C. & Mathis, J.S. 1989, ApJ 345, 245
- Combes, F., Mamon, G.A. & Charmandaris, V. 1999, “Dynamics of Galaxies: from the Early Universe to the Present” ASP Conf. Ser., Vol.197
- Conti, P.S. & Vacca, W.D. 1994, ApJ 423, L97
- Côté, P. 1999, AJ 118, 406
- Della Valle, M., Kissler-Patig, M., Danziger, J & Storm, J. 1998, MNRAS 299, 267
- Drenkhahn, G. & Richtler, T. 1999, A&A 349, 877
- Fabian, A.C., Nulsen, P.E.J. & Canizres, C.R. 1984, Nature 310, 733
- Fall, S.M. & Rees, M.J. 1985, ApJ 298, 18
- Ferrarese, L. Ford, H.C., Huchra, J.P. et al. 1999, ApJS
- Forbes, D.A., Brodie, J.P. & Grillmair, C.J.. 1997, AJ 113, 1652
- Forbes, D.A. & Forte, J.C. 2001, MNRAS 322, 257
- Fouqué P, Gourgoulhon E, Chamaraux P, Paturel G, (1992), “Groups of Galaxies within 80 Mpc”, A&AS 93, 211.
- Freeman, K.C. 1990, in “Dynamics and Interactions of Galaxies”, ed. R. Wielen (Berlin: Springer), p. 36
- Gebhardt, K. & Kissler-Patig, M. 1999, AJ 118, 1526
- Geha, M.C., Hotzman, J.A., Mould, J.R. et al. 1998, AJ 115, 1045
- Geisler, D., Lee, M.G. & Kim, E. 1996, AJ 111, 1529
- Geisler, D. & Forte, J.C. 1990, ApJ 350, L5
- Gratton, R.G., Fusi Pecci, F., Carretta, E. et al. 1997, ApJ 491, 749
- Harris, W.E. 1991, ARA&A 29, 543
- Harris, W.E. 2000, “Globular Cluster Systems”, Lectures from the 1998 Saas-Fee Advanced School on Star Clusters, Springer
- Harris, W.E. & van den Bergh, S. 1981, AJ 86, 1627
- Harris 1996 – Compilation of other galaxies globular cluster systems
- Harris, W.E. & Pudritz, R.E. 1994, ApJ 429, 177
- Harris, W.E. 1981, ApJ 251, 497
- Harris, W.E., Harris, G.L.H. & McLaughlin, D.E. 1998, AJ 115, 1801
- Harris, G.L.H., Harris, W.E. & Poole, G.B. 1999, AJ 117, 855
- Harris, H.C. & Canterna, R. 1977, AJ 82, 798
- Hilker, M. 1998, PhD Thesis, Sternwarte Bonn
- Hilker, M., Infante, P. & Richtler, T 1999, A&AS 138, 55
- Holtzman, J.A., Faber, S.M., Shaya, E.J. et al. 1992, AJ 103, 691
- Joseph, R. 1991, in “Massive Stars in Starbursts”, ed. C. Leitherer et al., 259
- Kavelaars, J.J., Harris, W.E., Hanes, D.A. et al. 2000, ApJS
- Kissler-Patig, M., Richtler, T., Storm, J. Della Valle, M. 1997, A&A 327, 503

- Kissler-Patig, M. 1997b, PhD Thesis, Sternwarte Bonn
- Kissler-Patig, M., Forbes, D.A., Minniti, D. 1998b, MNRAS 298, 1123
- Kissler-Patig, M., Grillmair, C.J., Meylan, G. et al. 1999b, AJ 117, 1206
- Kissler-Patig, M. 2000, Reviews in Modern Astronomy 2000, p. 13
- Kinman, T.D. 1959, MNRAS, 119, 538
- Kumai, Y., Basu, B. & Fujimoto, M. 1993, ApJ 404, 144
- Kundu, A. & Whitmore, B.C. 1998, AJ 116, 2841
- Larsen, S.S. & Richtler, T. 1999, A&A 345, 59
- Larson, R.B. 1987, in "Nearly Normal Galaxies", ed. S.M. Faber (Springer, New York), p. 26
- Larson, R.B. 1988, in "The Harlow-Shapley Symposium on Globular Cluster Systems in Galaxies", ed. J.E. Grindley & A.G.D. Philip (Kluwer, Dordrecht), p.311
- Larson, R.B. 1990, PASP 102, 709
- Lauer, T.R., Tonry, J.R., Postman, M. et al. 1998, ApJ 499, 577
- Lee, M.G., Kim, E. & Geisler, D. 1998, AJ 115, 947
- Lutz, D. 1991, A&A 245, 31
- Maraston, C. 1998, MNRAS 300, 872
- Maraston, C. 2004, MNRAS *submitted*
- Mazure, A., Le Fevre, O. & Lebrun, V. 1999, "Clustering at High Redshift", Les Rencontres Internationales de l'IGRAP, ASP Conf. Ser.
- Minniti, D. 1995, AJ 109, 1663
- Morgan, W.W. 1959, AJ 64, 432
- Peebles, P.J.E. & Dicke, R.H. 1986, ApJ 154, 891
- Peletier, R.F. 1989. PhD Thesis, University Groningen
- Puzia, T.H., Kissler-Patig, M., Brodie, J.P. & Huchra, J. P. 1999, AJ
- Rhode, K.L. & Zepf, S.E. 2001, AJ 121, 210
- Richtler, T. 1994. , Reviews in Modern Astronomy, Vol. 8, ed. G. Klare, p. 163
- Rieke, G.H. 1991, in "Massive Stars in Starbursts", ed. C. Leitherer et al., 205
- Schweizer, F. 1987, in "Nearly normal galaxies" ed. S.M.Faber, New York: Springer, p.18
- Schweizer, F. 1997, in "The nature of elliptical galaxies", ASP Conf. Ser., Vol. 116, eds. M. Arnaboldi, G.S. Da Costa, P. Saha, p. 447
- Schweizer, F. 1998, in "Galaxies: Interactions and Induced Star Formation", Saas-Fee Advanced Course 26, ed. D. Friedli, L. Martinet, D. Pfenniger
- Searle, L. & Zinn, R. 1978, ApJ 225, 357
- Secker, J., Geisler, D., McLaughlin, D.E., Harris, W.E. 1995, AJ 109, 1019
- Schlegel, D.J., Finkbeiner, D.P. & Davis, M. 1998, ApJ 500, 525
- Silk, J.I. 1993, in "The Feedback of Chemical Evolution in the Stellar Content Of Galaxies", ed. D. Alloin & G. Stasinska (Paris: Obs. de Paris), 299
- Tonry, J.L., Dressler, A., Blakeslee, J.P., Ajhar, E.A. et al. 2001, ApJ 546, 681

- Toomre, A. 1977, in "The Evolution of Galaxies and Stellar Populations", eds. B.M. Tinsley & R.B. Larson, New Haven: Yale University Observatory, p.401
- van Dokkum, P.G., Franx, M., Fabricant, D. et al. 1999, ApJ 520, L95
- Whitmore, B.C., Schweizer, F., Leitherer, C., Borne, K. & Robert, C. 1993, AJ106, 1354
- Worthey, G., Faber, S.M., González, J.J. 1992, ApJ 389, 69
- Worthey, G. 1994, ApJS 95, 107
- Zepf, S.E. & Ashman, K.E. 1993, MNRAS 264, 611
- Zepf, S.E., Geisler, D. & Ashman, K.E. 1994a, ApJ 435, L117
- Zepf, S.E., Ashman, K.E. & Geisler, D. 1995, ApJ 443, 570
- Zinn, R. 1985, ApJ 293, 424
- Zinnecker, H., Keable, C.J., Dunlop, J.S., Cannon, R.D. & Griffiths, W.K. 1988, In IAU Symposium 126, "The Harlow-Shapley Symposium on Globular Cluster Systems in Galaxies", ed. J.E. Grindley & A.G.D. Philip (Kluwer, Dordrecht), p. 603