

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

*УДК 524.74-85*

**Галазутдинова Ольга Александровна**

**ЗВЕЗДНОЕ НАСЕЛЕНИЕ ПЕРИФЕРИИ  
ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК**

(01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия)

**ДИ С С Е Р Т А Ц И Я**  
на соискание ученой степени  
кандидата физико - математических наук

Научный руководитель :  
доктор физико - математических наук  
**ТИХОНОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Нижний Архыз

– 2005 –

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Поверхностная и звездная фотометрия в галактиках</b>	<b>15</b>
1.1 Стандартная ПЗС-фотометрия . . . . .	15
1.2 PSF-фотометрия в пакете MIDAS . . . . .	15
1.3 Особенности фотометрии HST изображений . . . . .	19
1.4 Особенности звездной фотометрии пакетом HSTphot . . . . .	20
1.5 Постановка задачи и выбор объектов . . . . .	21
1.6 Метод поверхностной фотометрии и метод подсчета звезд . . . . .	22
1.7 Выбор звезд . . . . .	23
<b>2 Этюды о строении галактик</b>	<b>27</b>
2.1 Эмпирические приближающие функции и разложение профилей. . . . .	27
2.2 Красные гиганты (RGB) и звезды асимптотической ветви гигантов (AGB)	28
2.3 TRGB метод определения расстояний до галактики . . . . .	31
2.4 Наша Галактика . . . . .	33
2.4.1 Толстый диск . . . . .	34
2.4.2 Гало . . . . .	35
2.5 Толстый диск и гало в дисковых галактиках . . . . .	37
2.6 Основные теории формирования толстого диска и гало в дисковых галактиках . . . . .	39
<b>3 Структура спиральных галактик, видимых плашмя</b>	<b>43</b>
3.1 Галактика M 81 . . . . .	44
3.2 Галактика NGC 300 . . . . .	50
3.3 Галактика NGC 4395 . . . . .	52
3.4 Общие выводы по галактикам, видимым плашмя . . . . .	53
<b>4 Структура спиральных галактик, видимых с ребра</b>	<b>60</b>
4.1 Галактика NGC 891 . . . . .	60
4.2 Галактика NGC 55 . . . . .	65
4.3 Галактика NGC 4144 . . . . .	68
4.4 Галактика NGC 4244 . . . . .	71
4.5 Галактика IC 2233 . . . . .	74
4.6 Галактика NGC 4631 . . . . .	78
4.7 Галактика NGC 5023 . . . . .	85
4.8 Галактика IC 5052 . . . . .	86
4.9 Галактика NGC 4945 . . . . .	89



4.10 Общие выводы по исследованию звездных подсистем в галактиках, видимых с ребра .....	91
<b>5 Структура иррегулярных галактик .....</b>	<b>92</b>
5.1 Галактика NGC 2366 .....	93
5.2 Галактика NGC 2976 .....	98
5.3 Галактика NGC 5253 .....	101
5.4 Галактика NGC 1569 .....	104
5.5 Галактика NGC 4214 .....	109
5.6 Галактика NGC 4449 .....	111
5.7 Общие выводы по исследованию иррегулярных галактик .....	114
<b>6 Наблюдаемая модель звездного строения спиральных галактик .....</b>	<b>116</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>121</b>
<b>Литература .....</b>	<b>124</b>
<b>Список рисунков .....</b>	<b>138</b>
<b>Список таблиц .....</b>	<b>148</b>
<b>Приложение А .....</b>	<b>149</b>

# Введение

Открытие В. Бааде в 40-х годах прошлого века двух типов звездного населения спиральных галактик заложило основу для всех дальнейших теорий эволюции звездного населения в галактиках (Baade, 1944). Стало понятно, что галактики имеют в своем составе как молодые, так и старые звезды и, что во многих их них процессы звездообразования идут и в настоящее время. Eggen, Lynden-Bell и Sandage (1962) впервые показали, что изучать историю звездообразования нашей Галактики можно на основе исследования ее звездного состава и кинематики звезд. Более поздние наблюдения подтвердили, что звезды Галактики можно разделить на несколько отдельных подсистем, различающихся между собой возрастом, дисперсией скоростей и плотностью распределения в пространстве.

К настоящему времени среди исследователей нет единого мнения о пространственных размерах звездных подсистем Галактики, поэтому мы приводим в таблице 1 один из вариантов, отражающий состояние современных исследований в этой области (Chaves, 2002). Таблица 1 дает представление о параметрах звездных структур, которые можно ожидать и в других спиральных галактиках, если все они имеют примерно одинаковое строение.

Таблица 1: Характеристики звездных подсистем, выделяемых в нашей Галактике

Название структуры	Возраст	$[Fe/H]$	Дисперсия скоростей	$h_z$ , пк
Тонкий диск		$-0.5 \div -0.3$	20 км/с	50
Балдж	смешанный	смешанное	120 км/с	400
Толстый диск	$\sim 12$ млрд. лет	$-2.4 \div -0.5$	60 км/с	1450
Звездное гало	12 – 14 млрд. лет	$-5.0 \div -1.5$	90 км/с	3000

$h_z$  — масштаб падения яркости вдоль оси  $Z$

В истории изучения звездного состава галактик можно отметить несколько значи-

мых моментов, определяющих дальнейшие направления исследований. До конца 70-х годов считалось, что спиральные галактики состоят из трех компонентов: балджа, диска и гало. Относительные размеры этих составляющих зависят от типа галактики. Если звездный состав и морфология балджей и дисков интенсивно исследовались, то вопрос о звездном населении и размерах гало относился только к нашей Галактике ввиду удаленности других систем, и решение его было весьма затруднено техническими возможностями тех лет.

В 1979 году Burstein (1979) и Tsikoudi (1979) опубликовали работы, где на основе поверхностной фотометрии было показано, что диски линзовидных галактик имеют сложное строение и состоят из двух компонентов, различающихся между собой градиентом падения поверхностной яркости к краю галактики. Судя по цвету, оба компонента имели сходный звездный состав и состояли большей частью из красных гигантов. Для более протяженного компонента диска был введен термин „толстый диск”. Но попытка обнаружить подобные толстые диски в спиральных галактиках окончилась неудачно, хотя исследователи увеличили фотометрический предел в 30 раз. Поэтому вопрос о существовании толстых дисков в спиральных галактиках остался открытым.

Позднее Gilmore и Reid (1983) выяснили, что малометаллические старые звезды образуют в Галактике более протяженную подсистему, чем тонкая подсистема из молодых звезд. Поскольку термин „толстый диск” был уже введен для обозначения сходных подсистем S0 галактик, то это название перешло в обозначение протяженной звездной подсистемы нашей Галактики. Что касается других спиральных галактик, то оставалось неясно, существуют ли у них толстые диски, хотя можно было предполагать их существование по аналогии с нашей Галактикой. Быстрому решению проблемы мешала низкая поверхностная яркость толстых дисков, а разрешение их на отдельные звезды технически было возможно только у галактик Местной группы.

Schombert & Bothum (1987) на основе поверхностной фотометрии представили метод разделения спиральных галактик на два компонента: балдж и диск. С помощью этого метода были разделены на данные подсистемы и исследованы несколько сотен галактик. Под термин „диск” у авторов подпадала вся масса звезд тонкого и частично толстого диска. Разделить диски спиральных галактик на два компонента, как это бы-

ло сделано в S0 галактиках, не представлялось возможным из-за низкой поверхностной яркости толстого диска в большинстве галактик.

Кроме вопросов морфологии и теории образования галактик и их подсистем, интерес к периферии спиральных галактик возник у исследователей при интерпретации кривых вращения спиральных галактик. Форма кривых вращения свидетельствовала о существовании значительных масс невидимой материи на периферии этих галактик. Присутствие массивных темных гало было необходимо и для объяснения кривых вращения иррегулярных галактик, в особенности галактик очень низкой поверхностной яркости. По мере развития светоприемников делались многочисленные, но безуспешные, попытки „увидеть” эту невидимую массу. Ясно, что наиболее подходящими для таких поисков являются галактики, видимые с ребра.

В 1996 и 1999 годах Minniti с коллегами объявили об открытии ими звездного гало в двух иррегулярных галактиках (WLM и NGC 3109). Позднее этот факт не подтвердился, но работы Minniti et al. (1996, 1999) вместе с другими работами по звездному составу галактик инициировали новый интерес к периферийным областям галактик. Основа нового подхода состояла в разрешении периферии галактик на звезды на очень глубоких многоцветных снимках и дальнейшем изучении получаемых при этом диаграмм Герцшпрунга – Рассела (Цвет – Звездная величина). Наиболее близкие галактики M31 и M33 стали предметом постоянных исследований на предмет поиска слабого гало (Pritchett & van den Bergh (1988), Durrell, Harris & Pritchett (1994) Ferguson et al. (2002), Brown et al. (2003), Rowe et al. (2005)). Было установлено, что эти галактики имеют слабую протяженную звездную подсистему, но осталось неясным, является ли она толстым диском или гало.

В 1998–2005 годах Тихоновым (2002, 2005a, 2005b) было установлено, что карликовые иррегулярные галактики имеют тонкий и толстый диски из красных гигантов, а гало присутствует, вероятно, только у массивных иррегулярных галактик. Кроме того, было показано морфологическое сходство в глобальном звездном строении иррегулярных и спиральных галактик.

За последние десять лет появилось много публикаций по изучению звездного состава галактик за пределами Местной группы. Поскольку наблюдения проводились в

разных спектральных диапазонах так, что наиболее уверенно выделялась та или иная галактическая подсистема, выявились неразработанность и несовершенство терминологии морфологического описания звездного строения галактик. У разных авторов одна и та же звездная пространственная подсистема в галактике могла иметь разные названия: диск, толстый диск или гало. Ясно, что это создавало трудности при сравнении параметров звездных подсистем разных галактик. Например, отсутствие метода определения границ толстых дисков привело к тому, что даже для самой близкой и наиболее изученной галактики М 31 до сих пор нет данных о размере толстого диска, не говоря уже о гало.

Мы предлагаем способ разделения звездных подсистем в галактиках на основе построения функций изменения численной плотности звезд вдоль радиуса. При таком подходе распределение плотности молодых звезд определяет размеры тонкого диска, а распределение старых звезд — размеры толстого диска и гало. Граница между толстым диском и гало устанавливается по точке излома градиента численной плотности звезд. Мы считаем, что данный способ дает возможность определить пространственные размеры звездных подсистем галактик и создать их точную морфологическую терминологию.

Таким образом, в основу нашего способа определения пространственных размеров звездных подсистем положен метод звездных подсчетов, поскольку на исходном этапе он дает возможность разделить звезды по возрасту, а в дальнейшем исследовать пространственное распределение в галактике звезд каждого типа.

Используя указанную методику, мы изучили достаточно представительную выборку спиральных и иррегулярных галактик, для каждой из которой были определены достаточно точные границы звездных подсистем и продемонстрированы возможности предлагаемых в работе подходов.

## **Актуальность проблемы**

При рассмотрении теорий происхождения звездных подсистем галактик можно констатировать не дефицит теорий, а дефицит наблюдений. Основываясь только на подробном изучении двух-трех галактик Местной группы, к тому же взаимодействующих, трудно

решить вопрос о происхождении гало в спиральных галактиках. Согласно одним теориям оно могло быть образовано в результате приливных взаимодействий галактик; согласно другим теориям гало образовалось в результате гравитационного разрыва маломассивных галактик–спутников. Можно надеяться, что наши результаты о звездном строении гало спиральных галактик за пределами Местной группы дадут аргументы в пользу той или иной теории происхождения звездных подсистем.

История исследования далекой периферии спиральных галактик насчитывает не один десяток лет. Полученные по радионаблюдениям кривые вращения спиральных и иррегулярных галактик указывают на существование значительных масс темной материи за пределами видимых тел галактик. В некоторых моделях строения галактик для объяснения природы невидимой материи предполагается существование протяженных гало из маломассивных слабосветящихся звезд. Для оптической регистрации таких гало проводились многочисленные наблюдения, в большей части неудачные. Вопрос о природе невидимой материи остается до сих пор не решенным. Использование снимков космического телескопа им. Хаббла (HST) с эффективной камерой ACS/WFC позволяет регистрировать красные гиганты и субгиганты в ближайших галактиках, а применение метода численного подсчета звезд ведет к возможной регистрации крайне низкой поверхностной яркости, вплоть до  $\mu \sim 31^m/\square''$ . Такая методика позволила нам зарегистрировать вокруг спиральных галактик протяженные звездные толстые диски и еще более протяженные гало, состоящие из старого звездного населения.

Найденные нами зависимости изменения звездной плотности в диске и гало позволяют, при некоторых дополнительных предположениях об интенсивности звездообразования, вычислить полное число красных гигантов в галактиках. Учитывая, что стадия красного гиганта занимает сравнительно небольшой временной интервал в жизни звезды ( $\sim 10^6$  лет), можно на основе прямых звездных подсчетов и теории звездной эволюции оценить полное число звезд в галактике и вклад массы гало и толстого диска в общую массу галактики. Учет этих масс должен ослабить проблему скрытой массы, но конкретные вычисления выходят за пределы задач, поставленных в данной работе, и являются предметом будущих исследований.

## Цели и задачи исследования

Целями данной диссертационной работы являются:

1. Проведение звездной фотометрии в периферийных областях спиральных и иррегулярных галактик и уточнение расстояний до галактик TRGB методом.
2. Выделение в галактиках звезд разного типа и анализ распределения по телу галактик численной плотности молодых звезд, звезд промежуточного возраста и старых звезд.
3. Определение пространственных размеров звездных подсистем в галактиках.
4. Построение эмпирической модели звездного строения периферии дисковых галактик.

## Научная новизна

1. В работах по теме данной диссертации **впервые** определен звездный состав гало спиральных галактик за пределами Местной группы, что позволило с достаточной достоверностью построить эмпирическую модель звездного строения периферии галактик.
2. При определении пространственной границы между толстыми дисками и гало у спиральных галактик **впервые** было установлено, что градиенты падения численной плотности красных гигантов вдоль радиуса галактик в дисках и гало имеют разные значения, а точка перегиба может служить надежным индикатором границы между ними.
3. **Впервые** у видимых с ребра галактик удалось определить размеры звездных гало, формы которых оказались близки к сплюснутым у полюсов галактик эллипсоидам.
4. **Впервые** были найдены пространственные соотношения между размерами толстого диска и гало у видимых с ребра спиральных галактик.

## Научная и практическая ценность работы

1. При работе над диссертацией были *разрешены на звезды* периферийные области спиральных галактик и *показано*, что наблюдаются толстые диски и гало, состоящие большей частью из красных гигантов с пониженным содержанием металлов.
2. При вычислении градиентов падения численной плотности звезд вдоль радиуса галактик *было найдено*, что градиенты диска и гало имеют разные значения, а точка перегиба между ними дает возможность *определить границу между толстым диском и гало и найти размеры* толстого диска. Выход на фоновую плотность звезд позволяет определить размеры и форму гало.
3. При исследовании звездного населения спиральных галактик были определены формы и размеры толстых дисков и гало, что может быть использовано при сравнении теоретических моделей с наблюдательными данными.
4. Полученные результаты по определению численной плотности звезд вдоль радиуса галактик могут быть использованы для вычисления распределения массы вдоль радиуса и полной звездной массы у исследуемых галактик.

## Апробация работы

Основные результаты диссертации изложены в пяти печатных работах. Они докладывались на "Всероссийской Астрономической конференции" (Москва, Россия 3–10 июня 2004 г.), а также на семинарах Специальной Астрофизической Обсерватории РАН, Санкт-Петербургского Университета и Софийского Национального Университета.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, шести Глав, Заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 251 наименование, и одного Приложения. Общий объем диссертации (без приложения) — 149 страниц, в том числе 65 рисунков и 1 таблица. Представленная диссертация является результатом работ, выполненных в 2000–2005 гг.



Во *Введении* приводится обоснование актуальности работы, сформулированы цель, задачи, новизна и научная ценность полученных результатов. Кратко представлено содержание диссертации, приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В *Первой главе* дано описание методов фотометрии звезд в галактиках. В разделе 1.1 отмечается, что вся обработка изображений проводилась с помощью астрономических пакетов программ DAOPHOT II в MIDAS и HSTPHOT.

Раздел 1.2 посвящен описанию основного, используемого в работе метода — PSF-фотометрии в пакете MIDAS. Отмечены предварительные этапы подготовки изображений к проведению звездной фотометрии и указываются эффекты, влияние которых необходимо учитывать при фотометрии.

В разделе 1.3 говорится об особенностях проведения звездной фотометрии изображений, полученных на HST:

- 1) о способе удаления следов космических частиц;
- 2) о переводе звездных величин в стандартную систему;
- 3) о параметрах отбора звездообразных объектов.

Особенности звездной фотометрии при обработке объектов пакетом HSTphot (Dolphin, 2000a,b) рассматриваются в разделе 1.4.

О принципах отбора галактик для дальнейшего исследования в них распределения численной плотности звезд различного возраста говорится в разделе 1.5. Указывается, что для изучения удаленной периферии галактик требуется надежная регистрация очень низких значений поверхностной яркости. Требуемых значений поверхностной яркости можно достичь при использовании метода подсчета звезд.

В разделе 1.6 отмечается, что для решения поставленной в работе задачи, метод подсчета звезд имеет преимущество перед методом поверхностной фотометрии.

О том, как производился отбор звезд для анализа распределения их численной плотности по телу галактик и о влиянии фоновых звезд на выборку исследуемых звезд говорится в разделе 1.7.

Во *Второй главе*, носящей обзорный характер, представлены теоретические основы

исследуемой тематики. В разделе 2.1 даны теоретические и эмпирические зависимости, используемые для описания распределения поверхностной яркости дисковых галактик. Краткая информация об эволюции маломассивных звезд и физических процессах, которые приводят звезду на ветвь красных гигантов и на асимптотическую ветвь, содержится в разделе 2.2.

В разделе 2.3 приводится один из методов определения расстояния до галактик, основанный на определении светимости вершины ветви красных гигантов (TRGB метод).

Информация о характеристиках звездного населения периферийных подсистем нашей Галактики, полученная разными исследователями за последние десятилетия, содержится в разделе 2.4. Здесь помещены сведения о кинематике, металличности и размерах двух подсистем Галактики: толстого диска и гало.

В разделе 2.5 проводится обзор имеющихся в литературе результатов исследований толстых дисков и гало дисковых галактик: ближайших (M 31, M 33) и более удаленных (NGC 891, NGC 5907 и других).

В разделах 2.6 и 2.7 даны общие представления о двух теориях образования дисковых галактик и о формировании в них толстых дисков и гало.

*Третья глава* включает в себя исследования распределения звезд в видимых плоскостях или под небольшим углом наклона спиральных галактиках. Информация об исследованиях трех галактик M 81, NGC 300, NGC 4395 помещена в разделах 3.1 – 3.3. Здесь анализируются результаты исследования этих галактик, выполненные к настоящему времени разными авторами, говорится об определении расстояний до исследуемых галактик и о локальном значении металличности в изучаемых полях. На основании результатов распределения численной плотности делается вывод о различии градиентов численной плотности звезд толстого диска и гало и указывается на возможность использования этого эффекта для определения границы между толстым диском и гало. Приведены размеры найденных толстых дисков и доказательство обнаружения протяженного звездного гало во всех исследованных галактиках.

В *Четвертой главе* представлены результаты исследования галактик, видимых с ребра. В разделах 4.1–4.8 для каждой из девяти галактик: NGC 891, NGC 55, NGC 4144, NGC 4244, IC 2233, NGC 4631, NGC 5023, IC 5052, NGC 4945 представлены общие сведе-

ния об их особенностях и результаты исследования, имеющие отношения к изучаемым в данной работе глобальным звездным подсистемам. На итоговых графиках показаны распределения численной плотности звезд разного возраста. Дано объяснение характера распределения звездного населения при удалении от галактической плоскости. Результатом исследования для каждой галактики являются размеры звездных подсистем. Отмечается приоритет в открытии звездных гало у галактик за пределами Местной группы. Указана сплюснутость форм гало у полюсов галактик. В конце главы делается вывод о морфологическом подобии звездных подсистем в галактиках, видимых с ребра.

В *Пятой главе* исследуется распределение звезд в иррегулярных галактиках: NGC 2366, NGC 2976, NGC 5253, NGC 1569, NGC 4214, NGC 4449. В каждой галактике найден толстый диск из старых звезд. В двух галактиках отмечено наличие звездного гало. Указывается на подобие звездных подсистем иррегулярных и спиральных галактик.

В *Шестой главе* приводится *эмпирическая модель звездного строения дисковых галактик*. Показаны соотношения между пространственными размерами звездных подсистем и параметрами распределения звезд различного типа по телу галактик. Указывается, что границу тонкого диска следует устанавливать на основании распределения численной плотности молодых звезд. Делается вывод о том, что граница между толстым диском и гало может быть надежно установлена на основании изменения градиентов численной плотности старых звезд — красных гигантов. Приводятся зависимости между полученными в работе размерами подсистем и параметрами из литературных источников.

В *Заключении* сформулированы основные результаты диссертации.

В *Приложении* к диссертации приводятся 4 таблицы. В *первой таблице* содержатся общие сведения об исследуемых галактиках, взятые из баз данных NED, LEDA, а также определенные нами значения модуля расстояния до галактик и их абсолютные звездные величины. Во *второй таблице* приведен журнал наблюдений полей, обработанных нами для исследования распределения плотности числа звезд в спиральных галактиках.

В *третьей таблице* представлены итоговые значения размеров исследованных нами структур и ошибки определения размеров этих структур. В четвертой таблице указаны параметры прямых, аппроксимирующих толстые диски и гало, их ошибки и значимость различия градиентов диска и гало.

### **На защиту выносятся:**

1. Результаты звездной фотометрии в 18 дисковых галактиках.
2. Результаты исследований распределения численной плотности звезд разного типа по телу 18 галактик и выводы об экспоненциальном падении звездной плотности от центра к периферии и зависимости градиента численной плотности от возраста звезд.
3. Результаты определения размеров звездных подсистем (толстого диска и гало) на основе изменения градиента численной плотности красных гигантов и полученные численные соотношения между размерами этих подсистем.
4. Эмпирическая модель звездного строения периферии дисковых галактик.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

1. Tikhonov N.A. and Galazutdinova O.A., *Astronomy & Astrophysics*, 2002, **394**, 33 (“*Photometry of red giants in the disk of IC 1613*”)
2. Tikhonov N.A., Galazutdinova O.A. and Aparicio A., *Astronomy & Astrophysics*, 2003, **401**, 863 (“*Stellar content of NGC404 — the nearest S0 galaxy*”)
3. Тихонов Н.А. и Галазутдинова О.А., *Тезисы докладов “ВАК-2004”*, МГУ, ГАИШ, 3–10 июня 2004 г., с. 111 (“*Звездные диски и гало спиральных галактик*”)
4. Tikhonov N.A., Galazutdinova O.A. and Drozdovsky I.O., *Astronomy & Astrophysics*, 2005, **431**, 127 (“*Thick disks and halos of spiral galaxies M 81, NGC 55 and NGC 300*”)
5. Тихонов Н.А. и Галазутдинова О.А., *Астрофизика*, 2005, **48**, вып. 2, 261 (“*Звездные диски и гало видимых с ребра спиральных галактик: NGC 891, NGC 4144 и*”)

*NGC 4244*)

## **Личный вклад автора**

При работе над темой автором диссертации и Тихоновым Н.А. была проведена глубокая звездная фотометрия 18 галактик. Вклад в получение результатов фотометрии у названных исполнителей одинаков.

При анализе и интерпретации полученных результатов вклад всех соавторов публикаций одинаков.

# Глава 1

## Поверхностная и звездная фотометрия в галактиках

### 1.1 Стандартная ПЗС-фотометрия

В 80-х годах прошлого века произошло резкое изменение наблюдательных возможностей астрономии. Для регистрации двумерных изображений стали широко использоваться приборы с зарядовой связью — ПЗС матрицы, имеющие ряд существенных преимуществ над фотоэмульсией. ПЗС матрица является панорамным приемником с линейной зависимостью выходного сигнала от падающего потока, высоким квантовым выходом и большим динамическим диапазоном. Недостатками ПЗС матрицы являются ее сравнительно небольшие размеры и высокая стоимость качественных астрономических матриц.

Для обработки наблюдательных данных, полученных с помощью ПЗС матриц, применяют разнообразные пакеты программ. Наиболее распространенными являются IRAF (Image Reduction and Analysis Facility; Национальная Оптическая Обсерватория, США), MIDAS (Munich Image Data Analysis System; Европейская Южная Обсерватория) и HSTphot (Hubble Space Telescope photometry).

Для звездной фотометрии в данной работе использовались пакеты MIDAS, где под оболочкой собраны программы разных авторов, и HSTphot (Dolphin, 2000a,b).

### 1.2 PSF-фотометрия в пакете MIDAS

Современные методы звездной фотометрии можно подразделить на две подгруппы:

1. *Апертурная фотометрия.* В наиболее развитом виде этот способ использовался

еще при работе с электрофотометрами. Полученные на ПЗС матрицах снимки позволяют применить этот метод без особых изменений, однако наличие глубокого изображения дает возможность выбирать место измерения фона без присутствия там слабых звезд. При модифицированном методе апертурной фотометрии фон измеряется по кольцевой апертуре вокруг объекта, что весьма затруднительно было сделать в электрофотометрии.

2. Фотометрия на основе профиля яркости изображения звезды (*PSF-фотометрия*). Данный метод возможен только при цифровых формах изображений, поскольку все операции по вписыванию профилей в изображения звезд и вычислению интегральных величин производятся на ЭВМ. При использовании фотоэмульсий проводилась оцифровка изображений с помощью микроденситометров и дальнейшая работа с изображениями в цифровой форме.

Каждый из названных методов имеет свои преимущества и недостатки. При работе с малым числом изолированных звезд апертурная фотометрия может дать более точный результат, но при работе с большим числом звезд или фотометрии звезд в населенных областях метод апертурной фотометрии становится совершенно неприемлемым, а PSF-фотометрия дает хорошие результаты.

При работе с апертурной фотометрией инструментальная звездная величина объекта находится по формуле:

$$m = -2.5 \lg \left( I^{S+F} - I^F \cdot \frac{N^{S+F}}{N^F} \right), \quad (1.1)$$

где  $I^{S+F}$  — суммарная яркость звезды плюс фон внутри апертуры, содержащей  $N^{S+F}$  пикселей, а  $I^F$  — суммарная яркость  $N^F$  пикселей фона.

Для преобразования инструментальных величин в стандартную международную систему необходимо иметь уравнения перехода, которые получаются из фотометрии звезд-стандартов, снятых в ту же ночь. То есть методика апертурной фотометрии с ПЗС весьма мало отличается от фотометрии звезд с электрофотометром.

В основе PSF-фотометрии лежит постулат о независимости формы профиля звезды от ее яркости. Форма профиля звезды может изменяться в зависимости от положения звезды на матрице. Эти изменения могут быть связаны как с оптическими аберрациями

телескопа, так и с методом считывания заряда, накопленного на матрице при экспозиции объекта. Оценки звездных величин объекта получаются при вписывании заранее найденного PSF–профиля в изображение объекта.

Можно выделить два вида программ PSF–фотометрии. Первый — это программы типа DAOPHOT (Stetson, 1987), которые строят эмпирический PSF–профиль исходя из полученных изображений. Второй — программы типа HSTphot, где используется синтетический PSF–профиль. Как это часто бывает, каждый вид программ имеет свои плюсы и минусы. Работа с этими программами показала, что точность фотометрии звезд у HSTphot выше, но фотометрический предел примерно на  $0^m.7$  меньше, чем при использовании программы DAOPHOT. В некоторых случаях такие отличия имеют решающее значение.

Для определения PSF в контексте DAOPHOT на каждом снимке выбираются несколько изолированных звезд (так называемых PSF–звезд), находящихся в областях с равномерным фоном. Профиль звезды аппроксимируется одной или несколькими аналитическими функциями внутри заданного радиуса, а затем вычисляется усредненная двумерная таблица остатков, учитывающая отличия реальных профилей от выбранного аналитического представления. На основе всех отобранных, удовлетворяющих условиям, звезд снимка находится средний PSF–профиль, который вписывается во все найденные при поиске звезды. В DAOPHOT II начальный список компактных объектов с измерением их координат и яркостей получают с помощью процедур FIND и PHOT. При этом программы используют технические параметры светоприемника (ПЗС матрицы): шум считывания, коэффициент преобразования (число фотоэлектронов, соответствующих 1 ADU), минимальный уровень яркости для поиска звезд и другие параметры. Программа автоматического поиска звезд (FIND) для двумерного изображения выдает таблицу, содержащую координаты найденных объектов  $(x_0, y_0)$ , их относительные звездные величины  $(m)$ , а также два параметра, характеризующие форму найденного звездного изображения: sharpness (компактность объекта) и roundness (округлость изображения). Эти параметры используются в дальнейшем для селекции диффузных объектов и следов космических частиц.

До запуска программы PSF–фотометрии звездные величины всех найденных объек-



тов предварительно оцениваются процедурой апертурной фотометрии (подпрограмма PHOT), которая автоматически измеряет яркости в ряде concentрических апертур (в нашем случае использовались 12 апертур).

На последнем этапе фотометрии для получения уточненных координат и звездных величин использовалась программа ALLSTAR, которая работает со всем списком найденных объектов. В каждый объект вписывается найденный ранее PSF–профиль, нормированный к яркости объекта, и оценивается разность профилей фотометрируемого объекта и модельного PSF–профиля. В результате получается значение яркости объекта и массив остатков ( $\Delta_{ij}$ ), которые содержат яркость фона, случайный шум и систематические ошибки в оценке параметров профилей объектов. Поправки параметров звездных профилей  $\Delta x_{0,k}$ ,  $\Delta y_{0,k}$ ,  $\Delta m_{0,k}$  и оценка фона неба в точке  $ij$  могут быть найдены путем решения методом наименьших квадратов следующей системы уравнений:

$$\Delta_{ij} = sky_{ij} + \sum_{k=1}^N \left[ \Delta x_{0,k} \left( \frac{\partial P_k}{\partial x} \right)_{ij} + \Delta y_{0,k} \left( \frac{\partial P_k}{\partial y} \right)_{ij} + \Delta h_k \left( \frac{\partial P_k}{\partial m} \right)_{ij} \right], \quad (1.2)$$

где  $sky_{ij}$  — фон неба в точке  $ij$ ,  $P_k$  — PSF–профиль, построенный с параметрами  $x_{0,k}$ ,  $y_{0,k}$ ,  $m_{0,k}$ .

При работе программы ALLSTAR делается несколько итераций, с тем чтобы получить значения параметров поправок профилей. При этом на каждом шаге используются уточненные оценки параметров профилей и фона неба. Итерационный процесс прекращается, когда полученные поправки оказываются несущественными.

При подготовке снимков к проведению звездной фотометрии пакетом MIDAS выполнялись следующие вспомогательные операции:

- процедура удаления космических частиц, которых особенно много на HST снимках;
- приведение всех снимков к одной системе координат (сдвиг, поворот);
- суммирование и медианное усреднение всех снимков исследуемых галактик в разных фильтрах с целью выявления большого числа звездообразных объектов.

После окончания фотометрии программой ALLSTAR и получения таблицы результатов в нее вносились следующие поправки:

- поправка за геометрическую дисторсию;
- поправка за неэффективность переноса заряда;
- поправка за чувствительность матрицы.

Окончательным этапом PSF-фотометрии является перевод инструментальных звездных величин в международную BVRI систему.

### 1.3 Особенности фотометрии HST изображений

В нашей работе использовались изображения из архива космического телескопа им. Хаббла (HST). Оптика телескопа HST имеет угловое разрешение  $0.''1$ . Снимки HST, в отличие от снимков наземных телескопов, имеют большое число следов от космических частиц. Малые угловые размеры звездных изображений ( $0.''1 = 1$  пиксел) создают трудности *при устранении на снимках следов космических частиц*, ввиду их сходства с реальными звездами. Стандартная процедура *filter/cosmic*, встроенная в MIDAS, в данном случае работает неудовлетворительно. Особенно трудно удалить частицы, если получено только по одному снимку в каждом фильтре, так как в этом случае нельзя произвести медианное сложение изображений, при котором удаляются следы частиц.

В этом случае неплохо работает метод, предложенный Тихоновым (2002). Для этого два центрированных изображения (в том числе и в разных фильтрах) делятся друг на друга и к результату такого деления применяется стандартная процедура удаления частиц *filter/cosmic*. Для получения изображения без следов космических частиц делается обратная процедура (умножение изображений), но умножение делается на очищенное от следов космических частиц изображение. При этом мы получаем исходное изображение, но уже без следов частиц. Такая же процедура проделывается для второго изображения. В результате мы имеем два изображения в разных фильтрах, но без следов космических частиц. Опыт показывает, что предел звездной фотометрии при использовании таким образом очищенных снимков, получается глубже, а точность увеличивается.

При фотометрии HST/WFPC2 снимков *переход от инструментальной системы к международной* осуществляется на основе уравнений, полученных при фотометриче-

ских исследованиях и тестировании HST (Holtzmann et al., 1995a,b), с помощью подпрограмм, написанных И. О. Дроздовским. При фотометрии звезд снимков ACS/WFC перевод инструментальных звездных величин в стандартную  $VI$  систему Крона–Казинса осуществлялся на основе калибровочных зависимостей, построенных для звезд иррегулярной галактики IC10, в которой Н. Тихоновым была выполнена фотометрия одних и тех же звезд как с ACS/WFC, так и с WFC2 камерами:

$$(V - I) = 1.321 \cdot (v - i) + 1.133 \quad (1.3)$$

$$I = i + 0.059 \cdot (V - I) + 25.972 \quad (1.4)$$

При получении представленных зависимостей использовано 60 калибровочных звезд с цветом  $0 < (V - I) < 5.0$ . Точность уравнений перевода звездных величин меньше  $0^m01$  для  $I$  и  $V$  фильтров, а результирующая точность фотометрии равна  $0^m02$  для  $I$  фильтра и  $0^m03$  для  $V$  фильтра и определяется общей точностью фотометрии калибровочных звезд и программы HSTPHOT (Dolphin, 2000a,b). Полученные уравнения перевода инструментальных звездных величин в систему  $VI$  Крона–Казинса были проверены нами при фотометрии звезд известных галактик (NGC55, NGC4244) и показали хорошее соответствие наших результатов с результатами других авторов при определении расстояний до этих галактик.

Далекие галактики фона, звезды, неразрешенные из-за наложения изображений близких соседей, и звезды, испорченные за счет дефектов матрицы, исключались из конечного списка звезд на основе сравнения их профилей с PSF–профилем звезды. Оставленные для анализа звезды имели параметры:  $|SHARP| < 0.3$ , и  $CHI < 1.3$  (Stetson, 1994). Эти интервалы могли быть уменьшены при рассмотрении каждой конкретной галактики в зависимости от качества выполненной фотометрии.

## 1.4 Особенности звездной фотометрии пакетом HSTphot

Если при обработке изображений пакетом DAOPHOT мы не находили на снимках ярких изолированных звезд для создания PSF–профиля, то звездная фотометрия проводилась с помощью пакета программ HSTphot 1.1 (Dolphin, 2000a). HSTphot использует библиотеку Tiny Tim модельных функций точечного источника (PSF).

Перед запуском этапа фотометрии маркировались плохие пиксели и другие дефекты изображений (процедура *mask*). Очистка изображений от космических лучей и обнаружение горячих пикселей проводились с помощью процедур *crmask* и *hotpixels*. Оценка средней величины фона неба выполнялась процедурой *getsky*. Звездная фотометрия и фотометрия искусственных звезд проводились с помощью процедуры *hstphot* в фильтрах F814w, F606w, F555w с ключом 64. Использование этого ключа позволяло кроме итоговых таблиц с фотометрией звезд получить таблицы с искусственными звездами, анализ которых позволял определять полноту выборки звезд. Поправка за геометрическую дисторсию была осуществлена процедурой *distort*. Точность определения фотометрического нуля-пункта в пакете HSTphot примерно  $0^m05$  (Dolphin, 2000b), что определяет и точность всей фотометрии.

## 1.5 Постановка задачи и выбор объектов

Чтобы изучить пространственную структуру звездных подсистем дисковых галактик необходимы наблюдения галактик одного типа, видимых как с ребра, так и плашмя. В галактиках, видимых с ребра, легко определить форму галактики по оси  $Z$  и выявить диск и гало, если они имеются. В таких галактиках легче выявить границы распределения звезд разных типов из-за их проекции на малый участок неба. Галактики, видимые плашмя, дают возможность изучить закон распределения звезд от центра до периферии галактики, что невозможно сделать в галактиках, видимых с ребра. Таким образом, наблюдения галактик, видимых под разными углами, дают возможность изучить пространственные формы распределения звезд.

Из каталога близких галактик Karachentsev et al.(2004) были выбраны галактики со скоростями меньше, чем 600 км/с и морфологическим типом по Вокулеру больше, чем 0.5 (de Vaucoulers et al., 1991). После составления предварительного списка галактик ( $\sim 180$ ), удовлетворяющих этим условиям, была проведена проверка этого списка на предмет пересечения его с архивными изображениями WFPC2 и ACS камер космического телескопа HST. В списке осталось 30 галактик, из которых в 18 галактиках исследуемые поля располагались как в центральных областях, так и на периферии. Отметим, что все исследованные изображения были получены по тематике разных про-

грамм и поэтому выборка изображений была неоднородной (см. Табл.2, Приложение А). О преодолении следствий неоднородности выборки говорится в разделе 1.7.

В галактиках, видимых с ребра и имеющих малые размеры по сравнению с размерами поля телескопа, для изучения поведения численной плотности звезд было достаточно исследовать звезды одного ACS поля. В галактиках, видимых плашмя и имеющих значительные размеры, приходилось исследовать распределение звезд, как минимум, в двух полях, расположенных в разных участках тела галактики.

## 1.6 Метод поверхностной фотометрии и метод подсчета звезд

Поверхностная яркость звездного гало галактик на 7—10 звездных величин слабее, чем поверхностная яркость центральных звездных структур (диск и балдж). Исследования показывают, что методом поверхностной фотометрии мы можем обнаружить толстый диск и гало только в нескольких близких галактиках, где эти структуры имеют достаточную яркость. Технические недостатки ПЗС матриц, проблемы с плоскими полями, рассеянием света и ряд других причин не позволяют в ближайшее время получить надежную поверхностную фотометрию для галактик с поверхностной яркостью  $\mu > 29 - 30^m / \square''$ . Учитывая, что даже для грубых оценок звездного состава требуются измерения цвета гало, неопределенности каждого из двух фильтров ведут к совершенно неприемлемым точностям измерения цвета звездных структур. В реальности, чтобы выявить протяженные звездные структуры, для многих галактик требуются еще более низкие пределы фотометрии. Поэтому, если разделение подсистем галактик на балдж и тонкий диск можно надежно выполнить на основе поверхностной фотометрии снимков (Kent, 1985, Byun & Freeman, 1995, Baggett et al., 1998, Prieto et al., 2001), то определение *размеров* толстого диска и гало и проведение *границы* между ними является значительно более трудной задачей из-за низкой поверхностной яркости этих компонентов. Методы поверхностной фотометрии в этом случае мало пригодны из-за их недостаточной чувствительности.

Разрешение галактик на звезды и подсчеты поверхностной плотности звезд разных типов дают возможность проследить изменение звездной составляющей галактик до

очень низких значений поверхностной яркости, вероятно до  $32^m \div 33^m$ , то есть до более слабых уровней, чем границы толстого диска или гало. Одна из причин более глубокого предела метода звездных подсчетов состоит в том, что на получаемой диаграмме „цвет – звездная величина” удаляются яркие фоновые звезды и распределение численной плотности звезд исследуемой галактики строится без их влияния. Для поверхностной фотометрии это сделать технически невозможно. Кроме того, метод звездных подсчетов дает возможность изучить распределение конкретных типов звезд по телу галактики, что невозможно сделать на основе метода поверхностной фотометрии, так как в один и тот же интервал цвета попадают звезды разного типа (например, красные гиганты и AGB звезды с малой металличностью, или звезды сгущения Red Clump и звезды ветви красных гигантов). Таким образом, для анализа поверхностной плотности звезд различного возраста метод численного подсчета звезд на сегодняшний день является оптимальным.

## 1.7 Выбор звезд

Целью исследований было определение численной плотности звезд на разных расстояниях от центра галактики и вычисление изменения этой плотности при увеличении расстояния от центра галактики. На получаемые результаты могут влиять несколько разнообразных эффектов:

а) Эффект, связанный с использованием снимков разных программ. Естественно, что длительность экспозиций и применяемые фильтры могли изменяться от поля к полю и создавать разнородность результатов. Чтобы исключить влияние эффекта используемой экспозиции на численность обнаруженных в поле звезд и создать единую шкалу предельной звездной величины, мы ориентировались на результаты, полученные с самой короткой экспозицией, и на всех диаграммах „цвет – звездная величина” устанавливали одну и ту же границу по светимости звезд, слабее которой звезды не использовались, даже если они и были видны на снимках.

б) Эффект, связанный с процедурой фильтрации космических частиц. Фильтрация устраняла их в значительной степени, и частицы не могли исказить результаты подсчетов численной плотности звезд при фотометрии в густых звездных полях. Однако,

при фотометрии разреженных звездных полей, расположенных в гало, численность не устраненных космических частиц могла быть сравнима с численностью реальных слабых звезд. Это приводило к фиктивному уменьшению градиентов звездной плотности исследуемых полей. Чтобы исключить этот эффект, нам пришлось использовать звезды на  $1^m$  более яркие, чем фотометрический предел снимков. Такие ограничения уменьшали число звезд в используемых полях и увеличивали статистические флуктуации, но зато мы могли быть уверены, что наши результаты по измерению поверхностной плотности звезд не подвержены влиянию остаточных следов космических частиц.

в) Эффект, влияющий на результаты измерения звездной плотности в густых звездных полях. Наложение звезд друг на друга или их близкое расположение ведет к их исключению из списков объектов при фотометрии в DAOPHOT II или HSTphot. Чем больше звездная плотность, тем больший процент звезд исключается из списков фотометрии. В первую очередь, это касается слабых звезд, которых не остается совсем, если исследуемое поле имеет особенно высокую звездную плотность. В этом случае фотометрический предел становится низким, несмотря на длительные экспозиции. Чтобы учесть этот эффект, в исследуемых полях проводилась фотометрия искусственных звезд и на основе результатов этих измерений вносились поправки в результаты измерения звездной плотности.

г) Эффект влияния фоновых звезд на конечные результаты исследования распределения звезд по телу галактик. Мы провели фотометрические исследования HST полей на нескольких галактических широтах, стараясь придерживаться тех же значений широты, что и у изучаемых галактик. Результаты исследования представлены на рис. 1.1.

На представленных диаграммах (рис. 1.1) видно, что фоновые звезды не образуют каких-либо мест их скупенности, и численность их сравнительно невелика. Эти особенности фоновых звезд важны при выявлении малонаселенных частей галактик, поскольку красные гиганты исследуемой галактики образуют на диаграмме явное сгущение (ветвь гигантов) среди фоновых звезд. Значения численности фоновых звезд на диаграммах (рис. 1.1) помогают в примерных оценках уровня фоновых звезд, но более точные значения уровня фоновых звезд находились для каждой галактики индивиду-

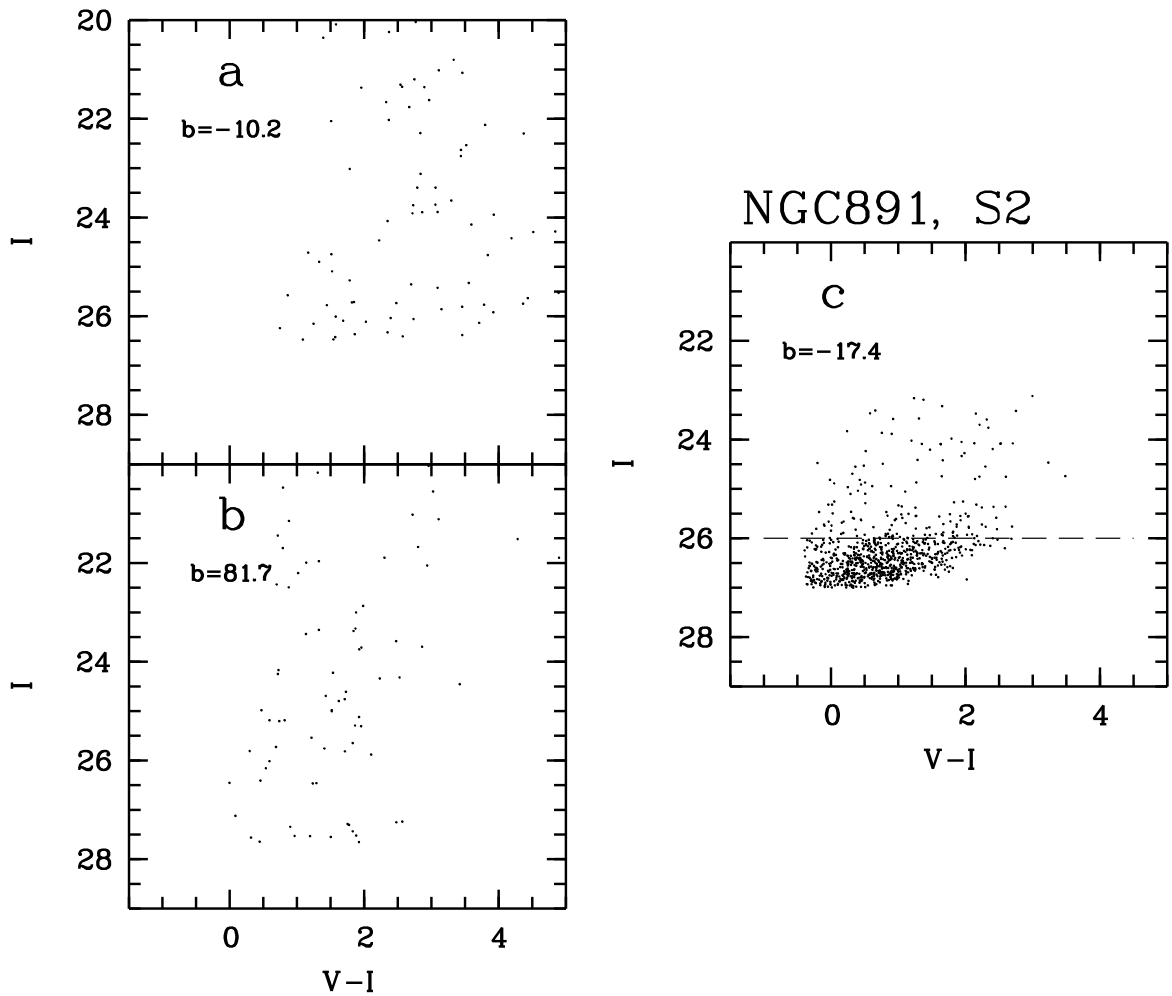


Рис. 1.1: *a.* и *b.* Диаграмма „цвет – звездная величина” ACS полей, расположенных на разных галактических широтах, в которой присутствуют только фоновые звезды. *c.* Диаграмма „цвет – звездная величина” удаленного поля S2 галактики NGC891, в котором присутствуют как звезды, принадлежащие галактике, так и фоновые звезды.

ально. Для этого анализировалось распределение звезд на диаграмме „цвет – звездная величина” удаленной площадки, которую мы считаем фоновой. Если на ней присутствуют красные гиганты, даже в небольшом количестве, то в распределении численности звезд вдоль оси „ $(V - I)$ ” заметно повышение численности звезд на характерном для красных гигантов значении цвета. Дополнительный контроль фоновой площадки на отсутствие красных гигантов осуществлялся построением распределения численной плотности звезд по координатам „ $X$ ” и „ $Y$ ”. Отсутствие явного градиента в распределении звезд (рис. 1.2) указывало на то, что красных гигантов в исследуемой области нет, поскольку только они принадлежат к звездным подсистемам и могут вносить существенный градиент в распределение численной плотности.



д) Чтобы найти истинные расстояния от центра галактики до исследуемых HST-полей с учетом наклона диска галактики необходимо вводить поправки. При вычислении действительных расстояний мы применяли простые формулы наклона диска, предполагая, что толщина диска не сильно искажает наши выводы, по крайней мере не изменяет их основное содержание:

$$Radius_0 = \sqrt{((D_a)^2 + (D_b / \cos(i))^2)}, \quad (1.5)$$

где  $D_a$  — проекция видимого расстояния исследуемой площадки на большую ось галактики,  $D_b$  — проекция видимого расстояния на малую ось,  $i$  — угол наклона галактики к лучу зрения.

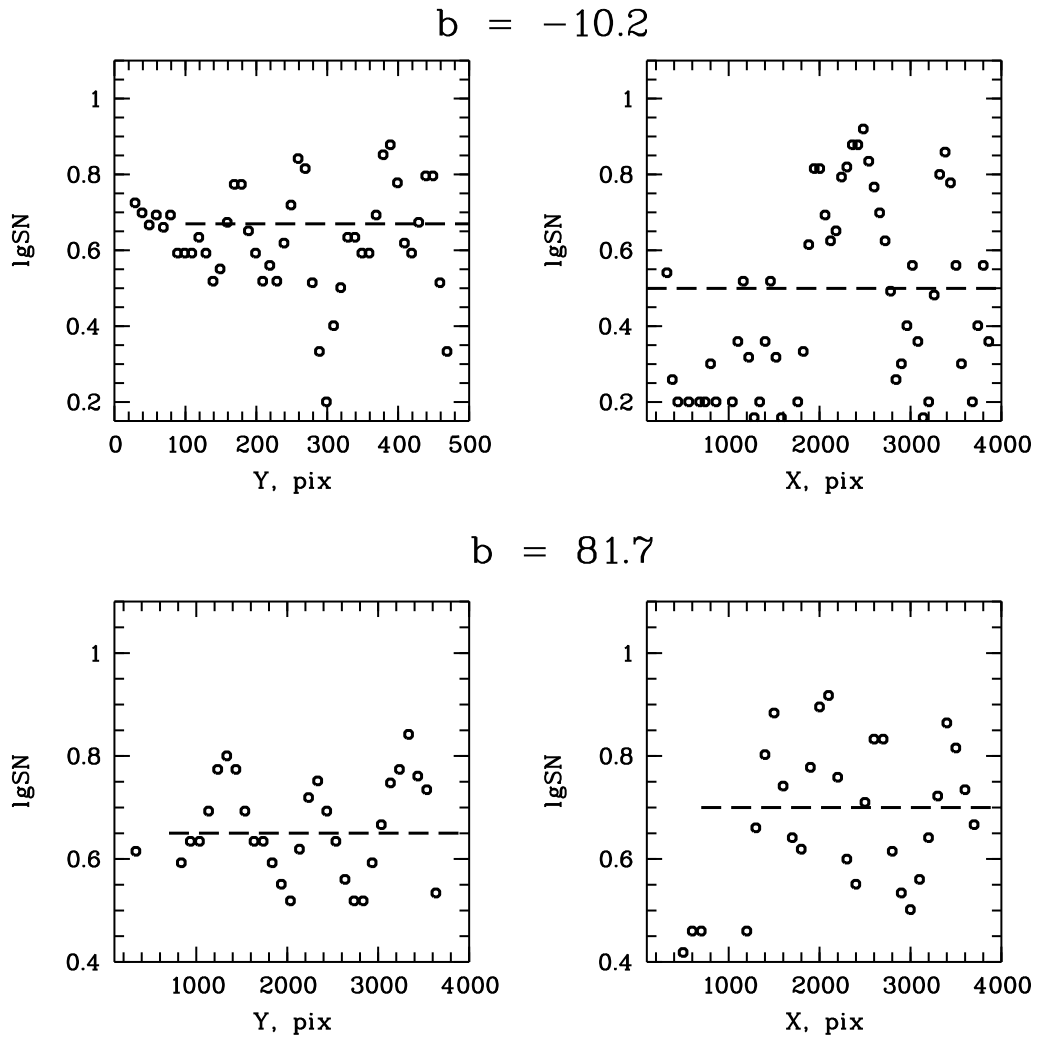


Рис. 1.2: Результаты сканирования площадок (рис. 1.1) с фоновыми звездами. Пунктирной линией показан средний уровень фоновых звезд в исследуемых областях.

## Глава 2

# Этюды о строении галактик

### 2.1 Эмпирические приближающие функции и разложение профилей.

За последние десятилетия методами поверхностной фотометрии (как с фотографическими носителями информации, так и с помощью ПЗС матриц) для галактик всех типов получены параметры глобального строения основных звездных подсистем, балджа и диска. В эллиптических галактиках и балджах дисковых галактик изменение яркости вдоль радиуса хорошо описывается уравнением Вокулера (de Vaucouleurs, 1962).

$$\lg \frac{I(R)}{I_e} = -3.33 \cdot \left[ \left( \frac{R}{R_e} \right)^{1/4} - 1 \right], \quad (2.1)$$

где  $R_e$  — эффективный радиус,  $I_e$  — соответствующая этому радиусу поверхностная яркость.

Изменение яркости вдоль радиуса в дисках спиральных галактик следует иному, чем в эллиптических галактиках, закону и описывается экспоненциальным распределением (Freeman, 1970), которое имеет вид:

$$I(R) = I_0 \cdot \exp \left( -\frac{R}{h_R} \right), \quad (2.2)$$

где  $h_R$  — характерный масштаб падения яркости в экспоненциальном диске по радиусу  $R$ , а  $I_0$  — центральная поверхностная яркость.

Для видимых с ребра галактик широкое распространение получило приближение разрезов вдоль малой оси следующей формулой (van der Kruit & Searle, 1981, 1982):

$$I(Z) = I_0 \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{Z}{Z_0}\right), \quad (2.3)$$

где  $Z_0$ — масштаб распределения яркости вдоль  $Z$ -координаты ( $Z_0 = 2h_z$ ).

Этот закон распределения поверхностной яркости вдоль  $Z$ -координаты получен теоретически для модели локально-изотермического диска и, как оказалось, он хорошо описывает наблюдаемое распределение яркости в центральных областях галактик. При удалении от центра для описания поверхностной яркости больше подходит экспоненциальный закон распределения (2.2). Комбинация формул 2.2 и 2.3 дает широко используемую трехмерную формулу распределения светимости в галактических дисках:

$$I(R, Z) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (2.4)$$

Поскольку приводимые формулы 2.1 – 2.4 получены на основе метода поверхностной фотометрии, то они описывают только сравнительно яркие подсистемы галактик. Что касается распределения яркости в слабом гало или разделения подсистем на более тонкие структуры (толстый и тонкий диски), то формулы, в приводимом виде, не в состоянии описать эти эффекты.

Применение метода численного подсчета звезд разного возраста выявило зависимость между возрастом звезд и значением градиента плотности вдоль радиуса галактики, причем распределение плотности звезд любого возраста имело экспоненциальный характер. Суперпозиция таких экспоненциальных функций с разными градиентами может создать функцию распределения звезд неэкспоненциального вида. Поэтому мы считаем, что формулы распределения поверхностной яркости в галактиках вдоль их радиуса должны быть скорректированы с учетом возраста звезд.

## 2.2 Красные гиганты (RGB) и звезды асимптотической ветви гигантов (AGB)

На диаграмме „цвет – звездная величина” любой спиральной или иррегулярной галактики, за исключением единичных молодых галактик, ветвь красных гигантов выделяется большой населенностью. Причина этого заключается в огромном числе маломассивных

звезд, которые образуют толстый диск и гало. Звезды, с массами меньше чем  $2.5M_{\odot}$  попадают на ветвь красных гигантов не ранее чем через  $1.5 - 2$  млрд. лет после рождения. Основная же масса красных гигантов имеет больший возраст, поэтому есть основания относить их к старому звездному населению галактик. Красные гиганты являются звездами высокой светимости ( $-4^m \lesssim M_{\text{I}} \lesssim 0^m$ ), находящимися на стадии горения водорода в толстой оболочке, окружающей их гелиевые ядра. Детальное описание этой стадии эволюции звезд содержится в работах Sweigart & Gross (1978), Масевич и Тутуков (1988), Sweigart, Greggio & Renzini (1989, 1990), Salaris, Cassisi & Weiss (2002).

Расчеты эволюции показывают, что после выгорания водорода в центральных областях звезд с массами  $0.8 - 2.3M_{\odot}$ , там образуются вырожденные гелиевые ядра. Эти звезды и являются красными (суб)гигантами. Горение гелия в ядре оказывается нестационарным из-за вырождения ядра, которое снимается в результате нескольких последовательных вспышек звезды. Зона горения в ходе этих вспышек перемещается в центр звезды. Наступление гелиевой вспышки неизбежно, если эволюция звезды не сопровождается потерей массы ( $\sim 0.2M_{\odot}$ ) в виде звездного ветра или сброса водородной оболочки. Характерное время горения гелия в ядре  $\sim 10^8$  лет. Переход звезды с вершины ветви гигантов на горизонтальную ветвь занимает около миллиона лет. После выгорания гелия в центре звезды образуется углеродно-кислородное ядро, оболочка быстро расширяется и звезда с горизонтальной ветви переходит в область красных сверхгигантов. Традиционное деление звезд на красные гиганты и красные сверхгиганты несколько условно, поскольку оно отражает только различие в размерах и светимостях звезд при сходном внутреннем строении: оба класса звезд имеют горячее плотное ядро и очень разреженную протяженную атмосферу.

Для точности заметим, что звезды попадают в область диаграммы Герцшпрунга-Рессела, занимаемую красными гигантами и красными сверхгигантами, дважды. Первый раз — на время от  $\sim 10^3$  лет ( $M \sim 10M_{\odot}$ ) до  $\sim 10^8$  лет ( $M \sim 0.5M_{\odot}$ ) — на стадии гравитационного сжатия, когда в звезде еще не идут ядерные реакции. Второй раз — после термоядерного выгорания в ее ядре водорода на время, которое составляет менее 10% времени жизни звезды. Звезды с массами  $M \leq 10M_{\odot}$  превращаются сначала в красный гигант, а затем — в красный сверхгигант, а звезды с  $M > 10M_{\odot}$  превращаются

непосредственно в красный сверхгигант.

**Звезды малой и промежуточной массы** после выгорания водорода и гелия в ядре оказываются на диаграмме Герцшпрунга–Рессела на *асимптотической ветви гигантов* (AGB). Источником энергии таких звезд является попеременное горение водорода во внешнем слоевом источнике, и гелия — в слое вокруг вырожденного углеродно-кислородного ядра. Сложное строение такой звезды приводит к тепловым пульсациям, процессам перемешивания вещества в оболочке звезды и выносу вещества в поверхностные слои. Большой градиент температуры в оболочке приводит к интенсивной конвекции. Асимптотическая ветвь гигантов — необходимый этап эволюции всех звезд с начальными массами  $0.8 - 9M_{\odot}$  на последних стадиях ядерной эволюции. Звезда в это время является красным сверхгигантом с эффективной температурой  $2000 - 3000^{\circ}$ . Дальнейшая эволюция звезды приводит к сбрасыванию внешней оболочки и образованию планетарной туманности и белого карлика.

При отборе звезд для анализа их пространственного распределения мы проводили селекцию таким образом, чтобы иметь по возможности наиболее „чистое” население того или иного возраста. Поскольку ветвь AGB звезд проходит рядом с ветвью RGB гигантов, то из-за ошибок фотометрии и замывания этих ветвей, у нас не было возможности разделить их. Однако, исходя из того, что населенность ветви AGB звезд намного меньше населенности RGB звезд, мы не принимали во внимание присутствие в выборке красных гигантов незначительно числа AGB звезд. На статистические выводы это влияло весьма незначительно. Выбор AGB звезд проводился выше границы ветви красных гигантов. В эту область диаграммы Герцшпрунга–Рессела попадают как незначительное число старых маломассивных звезд, так и звезды среднего возраста относительно больших масс. Это создает неопределенность в терминах, когда указывается область звезд среднего возраста с находящимися там одновременно и старыми звездами малых масс.

## 2.3 TRGB метод определения расстояний до галактики

Среди всех методов определения расстояний до галактик, TRGB метод (the Tip of the Red Giant Branch), использующий в качестве „стандартной свечи” светимость ярчайших красных гигантов стал наиболее массовым за последние годы. Метод совмещает в себе точность метода цефеид и простоту метода ярчайших сверхгигантов. Если за все годы методом цефеид были определены расстояния до 25–30 галактик, то использование метода TRGB позволило за 10 лет определить расстояния до 250 галактик (Karachentsev et al., 2004). В нашей работе этот метод использовался для измерения расстояний до всех исследуемых галактик, поэтому остановимся на нем более подробно.

Еще в начале 20-го века Х. Шепли предложил использовать красные гиганты шаровых скоплений для определения расстояний до самих скоплений. Однако применение при фотометрии красных гигантов  $B$  и  $V$  фильтров приводило к сильной зависимости получаемой светимости гигантов от их металличности, что вводило в решение задачи еще одно неизвестное, и не способствовало популярности этого метода. В 40-х годах прошлого века В. Бааде разрешил на звезды шаровые скопления спиральной галактики М 31 и доказал тождество этих звезд (красных гигантов) со звездами населения II типа, которые он видел на снимках по всему телу этой галактики. Этот факт был использован Бааде для получения модуля расстояния до М 31 по красным гигантам. Sandage (1971) отметил одинаковую светимость красных гигантов в трех близких галактиках (М 31, М 33 и IC 1613) и указал на возможность использования ярчайших красных гигантов для оценки расстояний до галактик Местной группы. Применять красные гиганты в качестве „стандартной свечи” эпизодически пробовали многие астрономы (Graham, Mould, Kristian, Da Costa, Freedman и другие). Сама основа метода TRGB имеет физический смысл, поскольку вершина ветви красных гигантов состоит из звезд в стадии вспышки гелиевого ядра, яркость которой, согласно теоретическим расчетам, не зависит от металличности и возраста звезд. Трудность применения TRGB метода, кроме проблем с фотометрией слабых звезд, заключалась в отсутствии калибровки по металличности, которую выполнили Da Costa & Armandroff (1990) используя шаровые скопления нашей Галактики. В своей работе Da Costa & Armandroff (1990) по-

строили ветви красных гигантов шаровых скоплений Галактики, которые имели разные значения металличности и известные модули расстояния, измеренные ранее по звездам RR Лиры (скопления M15, NGC 6397, M2, NGC 6752, NGC 1851, 47 Tuc). На основании результатов фотометрии был сделан вывод, что положение вершины ветви красных гигантов определяется как:  $M_{I,TRGB} = -4.^m0 \pm 0.^m2$ . Было также исследовано положение TRGB и значения металличности (в интервале  $-2.2 < [Fe/H] < -0.7$  dex с точностью 0.07 dex) в зависимости от цвета ветви гигантов.

$$[Fe/H] = -15.16 + 17.0 \cdot (V - I)_{0,-3} - 4.9 \cdot [(V - I)_{0,-3}]^2 \quad (2.5)$$

В последнем соотношении  $(V - I)_{0,-3}$  — цвет ветви гигантов, определяется при  $M_I = -3.^m$ . Da Costa & Armandroff (1990) сделали вывод о хорошем согласии положения TRGB в цвете  $I$  с теоретическими изохронами.

Следующий шаг в разработке метода TRGB был сделан Lee et al. (1993). Используя результаты Da Costa & Armandroff (1990) и зная расстояния до нескольких близких галактик Lee et al. (1993) получили достаточно удобные формулы для вычисления металличности красных гигантов и определения расстояния до галактики. На рисунках 2.1a и 2.1b из статьи Lee et al. (1993) приведено эмпирическое положение ветвей красных гигантов со значениями металличности  $[Fe/H] = -2.17, -1.58, -1.29$  и  $-0.71$  dex по результатам работы Da Costa & Armandroff (1990). Видно, что положение TRGB в цвете  $I$  не зависит от металличности, в то время как в цвете  $V$  положение TRGB изменяется на  $-1.^m3$  и более по мере возрастания  $[Fe/H]$ . В работе Lee et al., (1993) была показана также независимость положения границы TRGB в цвете  $I$  от возраста звезд. На рисунке 2.1c, взятом из работы Lee et al. (1993), приведена диаграмма  $[M_I, (V - I)_0]$  с нанесенными теоретическими изохронами разного возраста (7, 9, 13, 17 млрд. лет) и металличностью  $[Fe/H] = -1.3$  dex. Видно, что независимо от возраста звезд, положение  $M_I$  вершины ветви красных гигантов остается постоянным, а цвет TRGB изменяется всего лишь на  $0.^m1$ .

В работе Lee et al. (1993) отмечается, что из-за разницы расстояний ошибки фотометрии красных гигантов в галактиках значительно больше, чем в шаровых скоплениях Галактики. Поэтому следует оценивать металличность на уровне  $M_{I,TRGB} = -3.^m5$ , то

есть на  $0.^m5$  ниже положения TRGB, где цвет ветви красных гигантов меньше подвержен влиянию посторонних звезд. С учетом этих требований, на основании результатов работы Da Costa & Armandroff (1990), авторы (Lee et al., 1993) приводят новое выражение для металличности ветви красных гигантов:

$$[Fe/H] = -12.64 + 12.6 \cdot (V - I)_{-3.5} - 3.3 \cdot [(V - I)_{-3.5}]^2 \quad (2.6)$$

Безотносительно получаемой уравнением 2.6 точности измерения металличности, следует отметить, что при выявлении градиентов металличности мы использовали только разности цветов ветви гигантов, положения которых определялось с точностью  $0.^m02$ .

При практическом использовании данного уравнения мы корректировали светимость и цвет звезд исследованной галактики за поглощение света на основании работы Schlegel et al. (1998). Далее строилась диаграмма „цвет — величина”  $[(V - I)_0, I_0]$ , на которой выделялась ветвь красных гигантов. В тех случаях, когда численность красных гигантов велика, примерное положение границы TRGB можно оценить визуально. Однако более точно и объективно это можно сделать применением к функции светимости красных гигантов фильтра Собея, отмечающего места резкого изменения градиента функции светимости.

Применяя уравнение 2.6, а также и другие уравнения из работы Lee et al. (1993) к результатам точной фотометрии красных гигантов, мы получили не только расстояния до галактик, но и средние значения металличности звезд. К достоинствам метода TRGB относится также малая зависимость получаемых результатов от внутреннего поглощения света в исследуемой галактике, так как красные гиганты обычно наблюдаются вдали от областей звездообразования, где присутствие газа и пыли делает поглощение света неравномерным и довольно значительным.

## 2.4 Наша Галактика

Во Введении приводились сведения о разделении Галактики (табл. 1) на звездные подсистемы, согласно одной из распространенных в настоящее время теорий. Поскольку, из всех звездных подсистем галактик наш интерес относится в наибольшей степени



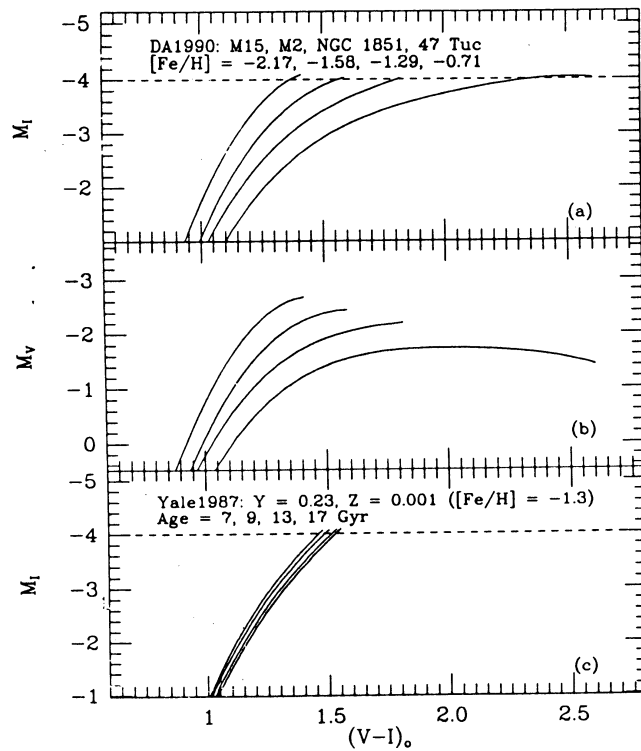


Рис. 2.1: **а)** Эмпирическое положение ветвей красных гигантов на диаграмме  $[M_I, (V - I)_0]$  шаровых скоплений Галактики: М 15, М 2, NGC 1851 и 47 Тус, металличности которых равны:  $-2.17, -1.58, -1.29$  и  $-0.71$ , соответственно. **б)** Зависимость  $[M_V, (V - I)_0]$  для тех же скоплений. **в)** Диаграмма  $[M_I, (V - I)_0]$ , показывающая положение теоретических изохрон для значения металличности  $[Fe/H] = -1.3$  и возрастов 7, 9, 13 и 17 млрд. лет.

к толстому диску и гало, то строение этих подсистем Галактики следует рассмотреть более подробно.

### 2.4.1 Толстый диск

*Звездный толстый диск* в Галактике впервые был выявлен и назван в работе Gilmore & Reid (1983) на основании звездных подсчетов. Особенно интенсивно толстый диск изучался в последние годы с целью определения его глобальных фотометрических и кинематических параметров (Beers et al., 2002, Chen et al., 2001, Ojha, 2001, Kerber et al., 2001, Chiba & Beers, 2000). Выяснилось, что толстый диск является структурой, звезды которой имеют пониженное, по сравнению с тонким диском, содержание металлов. Значение металличности звезд толстого диска заключено в пределах  $[Fe/H] = -2.5 \div -0.5$  (Beers et al. 2002, Chiba & Beers, 2000), а среднее значение металличности равно  $-0.7 \sim -0.5$  (Robin et al., 1996, Layden, 1995, Gilmore, Wyse & Jones,

1995). Разброс металличности указывает на неоднородный звездный состав толстого диска. Частично, это можно объяснить строением всех звездных подсистем, когда во внешнюю подсистему вложена внутренняя. В этом случае невозможно точно разделить звезды толстого диска и гало, которые имеют отличия в средних значениях металличности.

Возраст толстого диска известен с большой неопределенностью, однако считается, что он старше обогащенных металлами шаровых скоплений, возраст которых не превышает 12 млрд. лет. Поверхностная яркость толстого диска составляет  $\sim 10\%$  от яркости тонкого диска, а экспоненциальное падение яркости толстого диска имеет масштаб  $h_z < 1450$  пк (см. табл.1, Введение). Reyle & Robin (2001) нашли начальную функцию масс (IMF) толстого диска для звезд с массой  $0.2 \div 0.8 M_{\odot}$ :

$$\frac{dn}{dm} \sim m^{-0.5}, \quad (2.7)$$

Оказалось, что начальная функция масс для маломассивных звезд толстого диска отличается от функции масс тонкого диска, но сходна с функцией масс маломассивных звезд гало.

Chiba & Beers (2000) проанализировали кинематику 1203 звезд с пониженным содержанием металлов и нашли, что толстый диск вращается со средней тангенциальной скоростью 200 км/с. Они также определили градиент скорости по высоте  $dV/dz = -30 \pm 3$  км/с на кпк и определили эллипсоид скоростей звезд толстого диска  $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = 46 \pm 4, 50 \pm 4, 35 \pm 3$  км/с.

## 2.4.2 Гало

Поскольку гало является наиболее малоизученной подструктурой Галактики, то его определение также расплывчато. Считается, что гало содержит несколько компонент: звездную, газовую и темную материю. Звездная составляющая Галактики состоит из шаровых скоплений с пониженным содержанием металлов и звезды поля. Масса этих объектов составляет около 1% от общей звездной массы Галактики ( $\sim 10^9 M_{\odot}$ ). Большинство звезд гало имеет, вероятно, возраст более 12 млрд. лет. Видимый звездный состав гало: красные гиганты, AGB звезды, звезды RR Лиры, а также разного рода суб-

карлики. В отличие от диска и балджа, угловой момент гало близок к нулю (Freeman, 1987). Величина средней тангенциальной скорости вращения гало равна  $30 - 50$  км/с, значение градиента скорости по высоте равно  $dV/dz = -56 \pm 6$ , эллипсоид скоростей звезд гало  $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = 141 \pm 11, 106 \pm 9, 94 \pm 8$ . На высоте  $Z > 5$  кпк над плоскостью диска вращение звезд гало незначительно (Chiba & Beers, 2000).

Поскольку наша Галактика является единственной системой, где мы можем изучить трехмерное распределение ее объектов, то понятен интерес к исследованию объектов составляющих гало. Harris (1976) и Zinn (1985) установили степенной закон распределения плотности шаровых скоплений в звездном гало ( $\rho \sim r^{-3.5}$ ). Параметры пространственного распределения звезд RR Лиры были представлены в нескольких работах: Saha (1985) ( $\rho \sim r^{-3.5}$ ), Preston, Shectman & Beers (1991) ( $\rho \sim r^{-3.2}$ ) и Ivezić et al. (2000) ( $\rho \sim r^{-2.7}$ ). Пространственное распределение плотности голубых звезд горизонтальной ветви, полученное в работах Preston et al. (1991), Kinman, Suntzeff & Kraft (1994), имеет сходный закон распределения ( $\rho \sim r^{-3.5}$ ) на высоте  $Z > 5$  кпк над плоскостью диска. Подобие параметров распределения голубых звезд горизонтальной ветви и звезд RR Лиры не является удивительным, поскольку и те и другие относятся к самому старому населению галактики и имеют возраст более 10–12 млрд. лет.

Предполагается, что поверхностная яркость гало должна быть  $\mu_V \sim 30^m/\square''$  на расстоянии 8 кпк от центра (Binney & Merrifield, 1998). Если эти предположения верны, то маловероятно увидеть гало в других галактиках средствами поверхностной фотометрии.

Марсаков и Боркова (2001) предполагают, что все население звезд Галактики состоит из трех подсистем, различающихся занимаемыми объемами в Галактике. Исследуя структуру подсистем авторы делают вывод, что малометаллические звезды и шаровые скопления являются составляющими быстро вращающейся и сплюснутой подсистемы толстого диска, которая обладает значительным отрицательным вертикальным градиентом металличности. Металлические медленные звезды поля и скопления с экстремально голубыми горизонтальными ветвями образуют генетически связанную с толстым диском сферическую, медленно вращающуюся подсистему протодискового гало. Быстрые звезды поля и скопления с комплексными горизонтальными ветвями образу-

ют сфероидальную подсистему внешнего аккрецированного гало, примерно в три раза большего размера, чем две предыдущие.

Приведенные выше параметры звездных подсистем нашей Галактики указывают на сложность изучения и некоторую условность выделения таких подсистем. Это же подчеркивает и тот факт, что для нашей Галактики можно найти публикации, авторы которых приводят несколько иные, чем в таблице 1, значения параметров тонкого или толстого дисков и гало.

## 2.5 Толстый диск и гало в дисковых галактиках

Авторы открытия толстых дисков в линзовидных галактиках Burstein (1979) и Tsikoudi (1979) безуспешно пробовали найти их и в спиральных галактиках. Низкая поверхностная яркость этих подсистем создавала технические трудности для их изучения. Ситуация изменилась только после создания технически совершенных ПЗС матриц большого формата, однако это не решало вопросы терминологии и происходила постоянная путаница в названиях звездных структур.

Morrison et al. (1999) методом поверхностной фотометрии исследовали ряд галактик, видимых с ребра, на наличие у них толстых дисков. Они указали, что глубокие снимки NGC 891 и NGC 4565 подтверждают наличие толстого диска вокруг этих галактик. Возможно, что толстый диск имеется у NGC 5907, а у NGC 4244 толстый диск найден не был (Fry et al., 1999). Выводы, которые авторы тастей делают при анализе результатов изучения этих галактик, а также на основании исследования нашей Галактики и M 31 следующие: у этих галактик экспоненциальный масштаб толстого диска  $h_z$  меняется от 1 до 2.5 кпк, а светимость толстого диска составляет 5 – 28% от светимости тонкого диска.

Исследуя часть этих же галактик мы нашли, что NGC 4244 обладает хорошо видимым толстым диском и слабым гало. Расхождение получаемых результатов в большей степени отражает неопределенность в названиях звездных подсистем галактик. Естественно, определенную трудность привносит сам метод поверхностной яркости, когда нет возможности отдельно исследовать звезды разного возраста и результатом таких исследований является суперпозиция из распределений нескольких типов звезд.

Достаточно типичной, показывающей технические трудности при обнаружении слабых протяженных структур является и ситуация с NGC 5907, спиральной галактикой, видимой с ребра. Понадобились многочасовые экспозиции на светосильном телескопе (Zheng et al., 1999), чтобы доказать, что в этой галактике отсутствует гало, „найденное” ранее несколькими разными (!) авторами на разных телескопах.

Dalcanton & Bernstein (2002) провели многоцветную фотометрию 47 галактик поздних типов, видимых с ребра. Они нашли, что почти все исследованные ими галактики имеют в красных лучах большие размеры, чем в синих. Авторы интерпретируют этот факт, как обнаружение ими толстых дисков, которые имеют сходную поверхностную яркость, пространственное распределение, средний возраст и металличность. Исходя из измерений показателя цвета найденных вокруг галактик оболочек, Dalcanton & Bernstein (2002) считают, что процессы формирования толстых дисков являются общими для всех галактик. Возраст толстых дисков оценен ими как 6 млрд. лет и более.

Guhathakurta et al. (2005) утверждают, что в гало M 31, ближайшей к нам спиральной галактики, имеются красные гиганты, которые распределены с профилем поверхностной яркости по закону  $\Sigma(r) = \Sigma_0 \cdot r^{-2.3 \pm 0.3}$  в области  $r = 30 - 150$  кпк. Тем самым авторы доказывают, что галактика имеет гораздо большие размеры, чем ранее предполагалось, а большая часть предыдущих исследований периферии относилась скорее к внешней части балджа, чем к гало, поскольку переход между балджем и гало вдоль малой оси происходит на расстоянии 30 кпк от центра.

Недавние наблюдения красных гигантов в M 33, другой ближайшей спиральной галактики позднего типа, демонстрируют отсутствие сфероидального компонента вокруг нее (McConnachie et al., 2004), что не мешает этой галактике иметь протяженное гало.

На базе SDSS обзора Zibetti et al. (2004) суммировалт более 1000 изображений дисковых галактик, видимых с ребра, и дошли до уровня поверхностной яркости  $\mu \sim 31^m / \square''$  в трех цветовых полосах, получив одно глубокое приведенное изображение дисковой галактики. Авторы данной работы сравнили полученный результат с простой моделью строения галактики (тонкий диск + толстый диск) и показали, что только добавив к данной модели умеренно плоское ( $c/a \sim 0.6$ ) степенное гало ( $I \sim r^{-2}$  или  $\rho \sim r^{-3}$ ), можно воспроизвести основные особенности наблюдаемых профилей. Авторы указывают на

факт корреляции между светимостью диска галактики и светимостью его гало.

Анализируя полученные на HST/WFPC2 снимки четырех близких галактик видимых с ребра, Mould (2005) указывает, что в них присутствуют красные гиганты, средняя металличность которых находится в пределах  $Z = 1/6 - 1/10 \cdot Z_{\odot}$ . Градиент цвета красных гигантов едва заметен вдоль малой оси, что указывает на отсутствие градиента металличности.

## 2.6 Основные теории формирования толстого диска и гало в дисковых галактиках

В современной литературе можно найти множество теорий, объясняющих происхождение и существование звездных подструктур спиральных галактик, однако большая их часть является разновидностью двух основных теорий формирования толстого диска и гало в спиральных галактиках, подобных нашей:

- монократный диссипативный коллапс протогалактики (Eggen, Lynden-Bell & Sandage, 1962),
- хаотичная аккреционная модель или модель иерархического слияния (Searl & Zinn, 1978).

В основе первой модели лежит идея о том, что звездное гало и толстый диск сформировались путем быстрого коллапса протооблака. Согласно этой теории, в первичном веществе из-за гравитационной неустойчивости происходил процесс выделения протогалактик с характерными массами порядка  $10^{12} M_{\odot}$ . Многообразие форм галактик связано с различными начальными условиями на момент образования протогалактик. Из быстро вращающейся протогалактики возникала спиральная галактика, а из медленно вращающейся — эллиптическая.

При сжатии протогалактики происходило превращение газового облака в звездную систему. Дальнейшая эволюция галактики определялась процессами эволюции звезд, химической эволюцией межзвездной среды, а также структурно-динамической эволюцией всей звездной системы.

Звезды *первого поколения* обогатили первичный газ химическими элементами тяжелее гелия. Это наиболее старые звезды галактик, состоящие из водорода, гелия и очень малой примеси тяжелых элементов. В звездах *второго поколения* заметна примесь тяжелых элементов, так как они образовались из уже обогащенного тяжелыми элементами первичного газа.

Масса газа, не вошедшая в образовавшиеся звезды и выброшенная в ходе эволюции этих звезд, имела некоторый орбитальный момент и под влиянием гравитации всей системы опускалась к плоскости симметрии, образуя диск. Здесь, в самых плотных фрагментах газа зарождалось новое поколение звезд.

Несколько миллиардов лет назад сжатие протогалактики завершилось. Создались условия для образования спиральной структуры, а рождение звезд происходило уже в спиральных ветвях. Это звезды *третьего поколения* (тип I), их возраст сейчас — от 1 до 5 млрд. лет.

По мере истощения запасов межзвездного газа рождение звезд становилось менее интенсивным. А когда исчерпаются все запасы газа, спиральная галактика, вероятно, превратится в линзовидную, состоящую из маломассивных красных звезд. Эллиптические галактики уже находятся на этой стадии: весь газ у них израсходован 10—15 млрд. лет назад.

С подходом Eggen, Lynden-Bell & Sandage (1962) согласуются новые данные по шаровым скоплениям, полученные Борковой и Марсаковым (2000). Они полагают, что шаровые скопления малой массы образовались в удаленных регионах Галактики в то время, когда протогалактика сколлапсировала до размеров  $R \sim 12$  кпк. Подсистема старого гало образовалась за короткое время, поэтому невозможно проследить изменение со временем ее размеров и металличности. Продолжающийся коллапс газопылевой протогалактики после окончания формирования старого гало привел к увеличению угловой скорости вращения и быстрому сплющиванию будущей подсистемы. Межзвездная среда, однако, не успела глубоко перемешаться, что привело к сильному отрицательному градиенту металличности в этой подсистеме. Скачок химических и пространственно-кинематических характеристик шаровых скоплений при переходе к толстому диску свидетельствует о существовании достаточно длительной задержки звездообразования.

Такая задержка позволила протогалактике существенно обогатиться тяжелыми элементами, частично перемешать их и сколлапсировать до значительно меньших размеров. В результате образовалась богатая металлами, довольно плоская, быстро вращающаяся и с малой дисперсией скоростей подсистема толстого диска. Похоже, что ни металличность, ни толщина толстого диска со временем не менялись.

Еggen, Lynden-Bell & Sandage (1962) считают, что если модель диссипативного коллапса протогалактики верна, то должна существовать корреляция между малым содержанием металлов в звездах гало и их орбитальным эксцентриситетом. Chiba & Beers (2000) не нашли подобной корреляции.

Searl & Zinn (1978) предложили вторую гипотезу формирования толстого диска и гало, в основу которой положили тот факт, что ими были найдены шаровые скопления с большим разбросом по возрасту, но не было существенного градиента возраста с увеличением расстояния от галактического центра. Отсюда Searl & Zinn сделали предположение, что население звездной периферии могло быть сформировано путем аккреции независимых фрагментов массами  $\sim 10^8 M_{\odot}$ , вероятно карликовых галактик, имевших свою собственную историю эволюции до слияния.

Подход Searl & Zinn разрабатывается в последние годы, так как все больше фактов свидетельствуют о том, что звездная периферия является особой областью в галактиках (Wyse, 1999a, 1999b). Это подтверждают наблюдения карликовой сфероидальной галактики в Стрельце (Ibata et al., 1995), которая находится в процессе приливного взаимодействия с Галактикой вместе с принадлежащими ей 4–5 шаровыми скоплениями, а также существование экстраприливных звезд вокруг некоторых сфероидальных спутников (Gould et al., 1992, Irwin & Hatzimitriou, 1995, Kuhn, Smith & Hawley, 1996, Majewski et al., 2000b).

Исследования Freeman & Bland-Hawthorn (2002) показали, что толстый диск Галактики был сформирован одиночным тепловым событием, произошедшим около 10 миллиардов лет назад. С тех пор толстый диск не подвергался значительным слияниям с другими галактиками.

Моделирование, проведенное Walker et al. (1996) показало, что слияния могут утолщать и динамически „утеплять” диск. Взяв для расчетов две галактики, одна из кото-



рых по параметрам подобна нашей Галактике, а другая на порядок меньше по массе, они нашли, что слияние с 45% массы спутника происходит за 1 млрд. лет. „Утепление” и утолщение диска происходит из-за перехода дисковой орбитальной энергии в тепловую. Несмотря на изменения своих параметров, оригинальный диск не разрушается из-за процесса слияния. Заметим, что моделирование Walker et al. (1996) приводит к заметному искривлению звездного диска.

Kroupa (2002) считает, что прямое падение спутника на галактику не приводит к нагреванию толстого диска, а прохождение спутника может привести к вспышке звездообразования в тонком диске и увеличению дисперсии скоростей у существующих звезд. После этого процесс звездообразования замедляется.

Brook et al. (2004) отождествил формирование толстого диска с эпохой хаотического слияния сложных дисков ( $z = 2$ ), состоящих из перемешанного газа и звезд.

Таким образом, если верна вторая гипотеза о происхождении дисковых галактик (Searl & Zinn, 1978), то исследование звезд гало должно дать информацию о химическом составе сливающихся карликовых галактик (Eggen, 1977, Helmi & White, 1999, Harding et al., 2001, Majewski et al., 2000a). На сегодняшний день предлагается следующая общая картина формирования Галактики в рамках модели иерархического слияния: при большом красном смещении ( $Z > 1 \div 2$ ) у галактик сформировался тонкий звездный диск. После этого прошли процессы слияния галактик с последующей газовой аккрецией и формированием толстого диска. Существенного процесса слияния галактик в дальнейшем не происходило.

## Глава 3

# Структура спиральных галактик, видимых плашмя

Наблюдения галактик, видимых под разными углами к лучу зрения, дают возможность изучить законы распределения звезд разных типов как вдоль радиуса галактики, так и перпендикулярно ее экваториальной плоскости. Используя достаточно представительную выборку галактик можно на основе таких наблюдений построить трехмерное распределение звезд в галактике и получить модель звездного строения.

Спиральные галактики, видимые под небольшим наклоном, позволяют изучить пространственное распределение звезд в балдже и тонком диске, а также установить закон распределения звезд вдоль радиуса галактики. Среди спиральных галактик, видимых почти плашмя, выделяются две близкие галактики: М 31 и М 33. Однако, исходя из очень больших размеров этих галактик, для глубокого исследования их звездного населения требуется очень много наблюдательного времени HST или применения телескопа с большим полем. Полученные в настоящее время снимки М 31 и М 33 охватывают большую часть видимых границ галактик, но фотометрический предел этих снимков не позволяет изучать распределение звезд горизонтальной ветви или звезд RR Лиры. Исходя из сказанного, мы ограничились спиральными галактиками меньших размеров, для которых в архиве HST нашлись снимки нескольких полей: М 81, NGC 300 и NGC 4395. Молодое звездное население, образующее тонкие диски галактик М 81 и NGC 300 изучено достаточно подробно (Zickgraf et al., 1990, Georgiev et al., 1992a,b, Pritchett et al., 1987, Kizskurno-Koziej, 1988, Pierre & Azzopardi, 1988) и мы будем касаться его в нашей работе лишь поверхностно. Поскольку в протяженных структурах галактик, толстых дисках и гало мы наблюдаем, в основном, красные гиганты и в меньшей степени AGB

звезды, то именно они и стали объектами наших исследований.

### 3.1 Галактика М 81

Галактика М 81 (рис. 3.1) является центральной галактикой близкой группы, состоящей примерно из 30 галактик разных типов (Börngen et al. 1982, 1984, Karachentseva et al., 1985). Незначительное расстояние до М 81, приемлемый наклон ее диска и многочисленность участков наблюдений на HST делают эту галактику привлекательным объектом для исследований (см. таблицы 1 и 2, Приложение А). Молодое звездное насе-

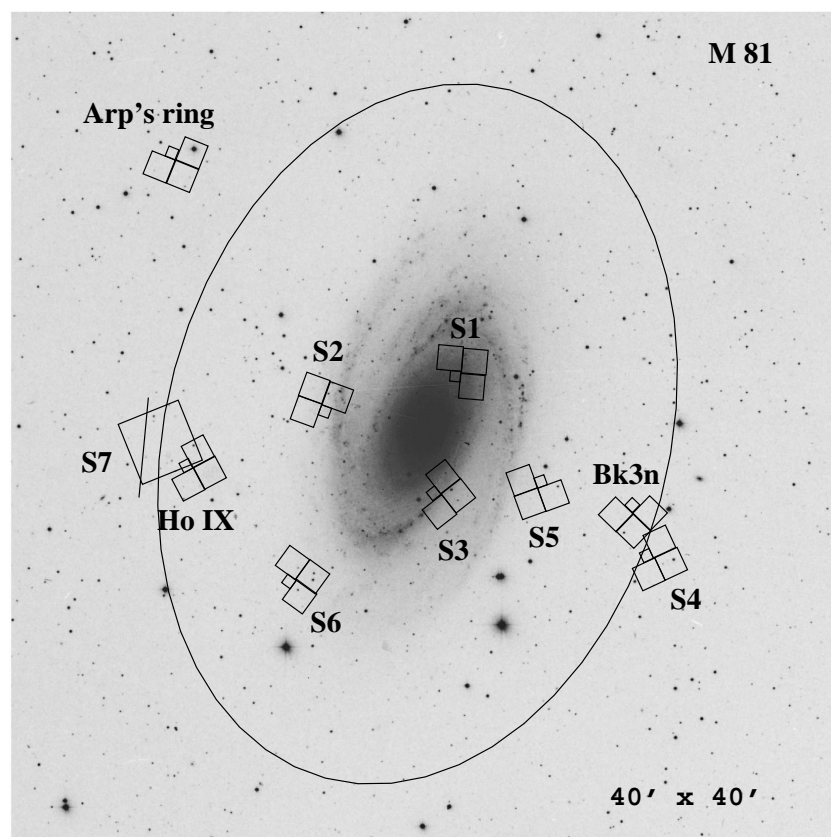


Рис. 3.1: DSS-2  $40' \times 40'$  изображение галактики М 81. Показано расположение исследуемых полей (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, Bk3n, Ho IX, Arp's ring), полученных на HST/WFPC2 и ACS/WFC. Эллипсом очерчена граница между толстым диском и гало, полученная в результате экстраполяции данных. Линией, пересекающей поле S7, показана уточненная граница толстого диска в этом поле.

ление М 81, расположенное в основном в спиральных рукавах, изучалось многократно, но о звездной периферии галактики мало что известно. Методами поверхностной фо-

тометрии профиль яркости галактики построен до  $\mu_V \sim 25 - 26^m/\square''$  (Tenjes et al., 1998), но точность фотометрии на периферии галактики, особенно показателя цвета, не высока по причине низкой поверхностной яркости. Кроме того, показатель цвета периферии галактики мало что говорит о звездном составе этих областей, поскольку AGB и RGB звезды, существенно различаясь по возрасту, могут иметь одинаковые показатели цвета, из-за чего оценки возраста периферии на основе поверхностной фотометрии становятся ненадежными. Так как спектральные наблюдения периферии невозможны из-за крайне низкой поверхностной яркости окраины толстого диска и тем более гало, то фотометрия звезд остается единственным методом изучения звездного состава. Радионаблюдения галактики М 81 выявили водородные мосты, тянущиеся от М 81 к соседним галактикам: М82, NGC2976 и NGC3077 (van der Hulst, 1978, Appleton et al., 1981, Yun et al., 1994, Westpfahl et al., 1999, Boyce et al., 2001). Образующиеся при взаимодействии галактик длинные волокна газа являются гравитационно-неустойчивыми образованиями и могут разрываться на отдельные области, образуя молодые галактики (Barnes & Hernquist, 1992, Elmegreen et al., 1993, Duc et al., 1998, Weilbacher, 2002). Кандидаты в такие молодые галактики найдены во многих взаимодействующих системах галактик (Deeg et al., 1998, Hunsberger et al., 1996). В нескольких работах высказывалось предположение, что карликовые галактики (HoIX, Garland, BK3N), наблюдаемые в пределах водородных мостов М 81, могут быть именно такими молодыми объектами (Miller, 1995, Flynn et al., 1999, Boyce et al., 2001). Sakai & Madore (2001), сравнивая HST наблюдения с теоретическими изохронами, нашли, что возраст молодых звезд в Garland не превосходит 150 млн. лет. Makarova et al. (2002) подтвердили интенсивное звездообразование в Garland, а также в HoIX и BK3N в интервале 50–150 млн. лет назад. Однако, авторы этой работы не учитывали присутствие на их исходных  $[(V - I), I]$  диаграммах звезд гало М 81 и NGC3077, вблизи которых находятся исследуемые карликовые галактики. Поэтому полученные в этой статье результаты по истории звездообразования для времени более 1 млрд. лет относятся скорее к звездам гало М 81 и NGC3077, чем к исследуемым карликовым галактикам.

В настоящее время в группе М 81 определены расстояния до многих галактик на основе фотометрии красных гигантов (Karachentsev et al., 2002), в то время как до са-

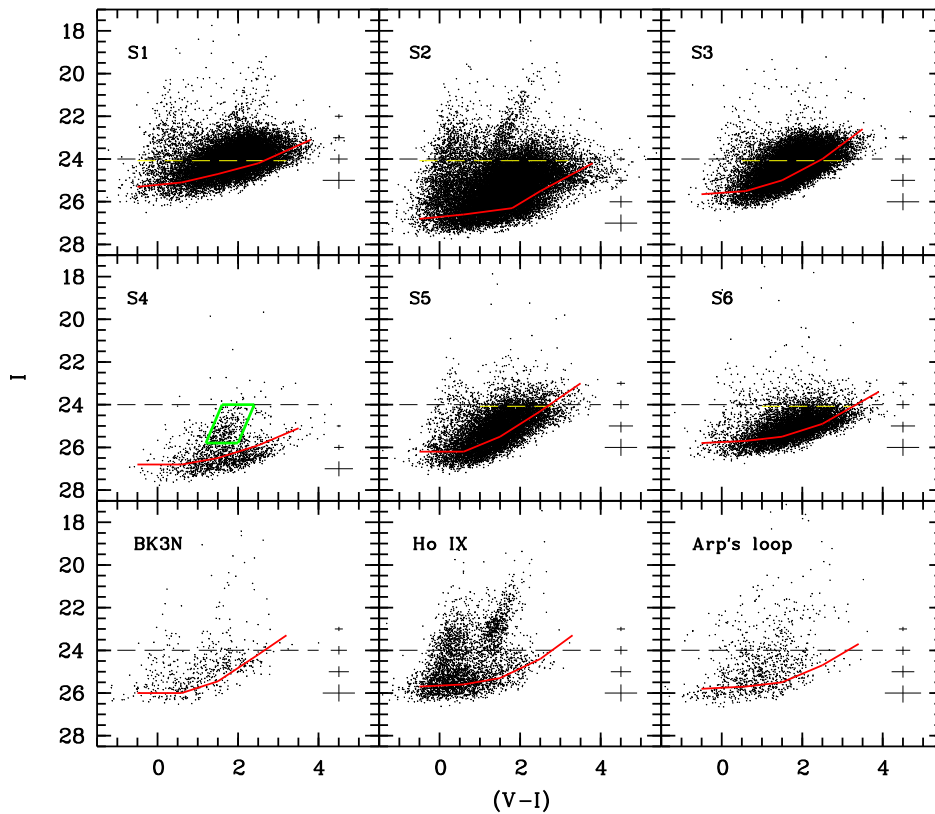


Рис. 3.2:  $[(V - I), I]$  диаграммы исследуемых полей галактики М 81. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия), определенный на основе фотометрии искусственных звезд.

мой М 81 **расстояние** определено по цефеидам ( $(m - M) = 27.75 \pm 0.08$ , Freedman et al.(2001)). Выясняя точности измерения расстояний разных методов Lee et al. (2002) и Kim et al. (2002) нашли существенную разность ( $0^m3$ ) между значениями модулей расстояний до галактики М 33 определенными на основе метода цефеид и красных гигантов. На вероятное существование аналогичной разности у М 81 указывает тот факт, что среднее значение расстояний до 14 карликовых галактик группы равно  $(m - M) = 27^m91$  (Karachentsev et al., 2002). Кроме того, для двух эллиптических галактик (BK5N и F8D1) модули расстояний равны, соответственно,  $27^m9$  и  $28^m0$  (Caldwell et al., 1998), что превышает расстояние до М 81. Эту асимметрию пространственного строения группы М 81 можно объяснить использованием разных методов при определении расстояний.

Для вычисления расстояний мы использовали несколько полей, избегая областей звездообразования с яркими сверхгигантами, и выбирая области с большим числом красных гигантов для того, чтобы уменьшить статистическую ошибку определения вер-

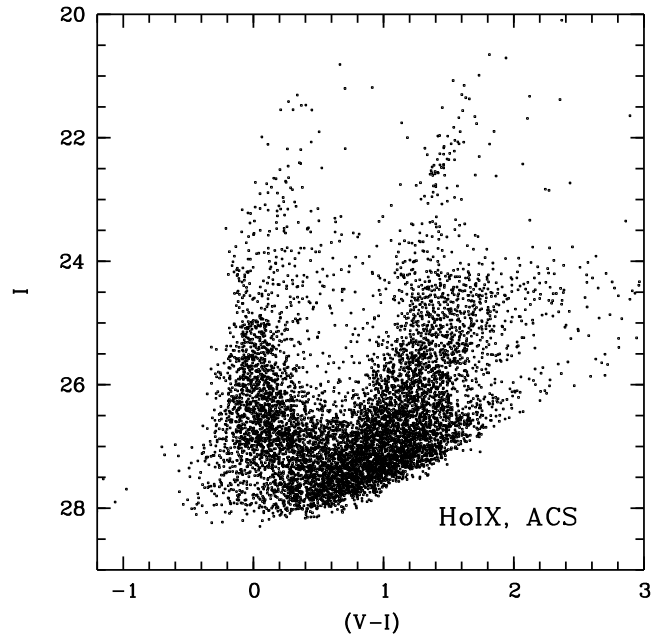


Рис. 3.3: Диаграмма „цвет — величина” исследуемого поля S7 галактики M 81. Ветви голубых и красных сверхгигантов принадлежат карликовой галактике HoIX, а ветвь красных гигантов — галактике M 81.

шины ветви красных гигантов (TRGB). Эти поля в M 81 — S2, S3, S4, S5 и S6 (рис. 3.1). Диаграммы „цвет — величина” этих полей представлены на рисунках 3.2 и 3.3, а графики неполноты выборки звезд в полях S3 и S4 можно увидеть на рисунке 3.4.

Используя метод Lee et al. (1993) (см. пункт 2.3) мы определили расстояние до галактики и средние значения металличности красных гигантов. Получены следующие значения модулей расстояний для различных полей в M 81:

- в S2 —  $(m - M) = 27.89 \pm 0.10$ ,
- в S3 —  $(m - M) = 27.89 \pm 0.10$ ,
- в S4 —  $(m - M) = 27.95 \pm 0.10$ ,
- в S5 —  $(m - M) = 27.95 \pm 0.10$ ,
- в S6 —  $(m - M) = 27.95 \pm 0.10$ .

Полученный нами средний модуль расстояния для M 81 равен  $(m - M) = 27.93 \pm 0.04$ , ( $D = 3.85 \pm 0.08$  Мпк), что близко к значению среднего модуля расстояния для 16 других карликовых галактик в группе  $(m - M) = 27.9$ , найденного с помощью TRGB метода

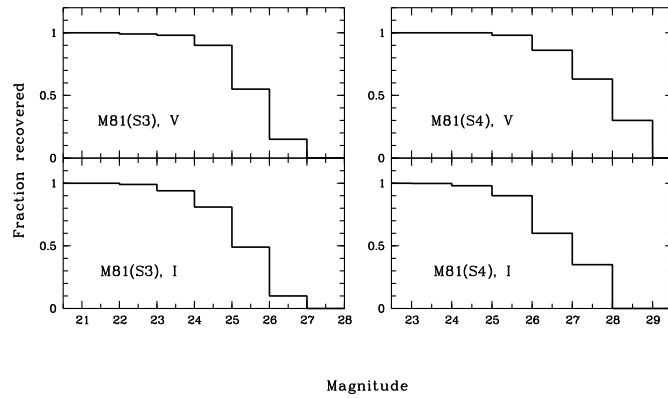


Рис. 3.4: График неполноты выборки звезд галактики М 81 (площадки S3 и S4), построенный на основе теста с искусственными звездами.

(Caldwell et al., 1998, Karachentsev et al., 2002). Это указывает на то, что М 81 находится в центре группы, и нет никакой асимметрии в пространственном расположении галактик группы.

**Изменение металличности** при удалении от центра галактики наблюдается как в нашей Галактике, так и в других спиральных галактиках при изучении звездных скоплений (Friel & Janes, 1993, Rolleston et al., 2000) и НII областей (Shaver et al., 1983, Marquez et al., 2002). Для спектральных измерений металличности старого звездного населения — красных гигантов, доступны только близкие галактики (Reitzel & Guhathakurta, 2002) из-за малой светимости изучаемых звезд. В разрешаемых на звезды галактиках среднюю металличность красных гигантов измеряют фотометрическими методами — по положению ветви красных гигантов на  $[(V - I), I]$  диаграмме (см. пункт 2.3). Поскольку, фотометрию красных гигантов можно проводить на больших расстояниях от центра галактик, где наблюдаются крайне низкие уровни светимости, и спектральные методы неприменимы для этих областей, то фотометрический метод измерения металличности остается единственным методом получения этого параметра звезд. Из-за разнородности используемых нами наблюдений мы не ставили задачу подробного исследования распределения металличности старых звезд в галактиках. Но сравнение отдельных участков фотометрии показывает, что градиент металличности надежно определяется в галактике М 81. Значение металличности во внутренних полях S2, S3, S5, S6 равно  $[Fe/H] = -0.65 \pm 0.03$ , а металличность внешнего поля S4 равна  $[Fe/H] = -0.77$ . Выбранные для исследования **распределения плотности**

числа звезд площадки находятся как на периферии М 81, так и в областях спиральных ветвей, где большая плотность звезд и множество ярких сверхгигантов затрудняют фотометрию более слабых красных гигантов и уменьшают полноту выборки. На основе фотометрии искусственных звезд для всех полей получены графики неполноты выборки. На рис. 3.4 эти графики приведены для примера только для двух полей S3 и S4. Мы учитывали полученные значения неполноты, умножая измеренные поверхностные плотности звезд на соответствующие коэффициенты. В галактике М 81 была взята выборка красных гигантов в диапазоне величин  $24^m0 < I < 25^m0$  и  $25^m5 < V < 26^m5$ . По графикам неполноты (рис. 3.4) видно, что для поля S3 полнота нашей выборки звезд равна 0.80 в фильтре  $I$  и 0.35 в фильтре  $V$ . То есть мы регистрируем всего лишь одну треть красных гигантов поля. Для поля S4 полнота списка равна 0.95 и 0.90, соответственно, и исправление за неполноту выборки в этом поле незначительно. AGB звезды имеют более высокую светимость по сравнению со звездами RGB и коррекции за неполноту выборки почти не требуется для них. Для увеличения статистической надежности результатов вычислялась поверхностная плотность звезд (AGB или RGB) в каждом из трех чипов полей HST (исключая малый PC чип). Полученные результаты изменения численной плотности звезд вдоль радиуса галактики представлены в виде графиков на рис. 3.5. На них виден излом распределения плотности звезд, что соответствует границе толстого диска и началу гало. Видно также, что RGB звезды имеют меньший градиент численной плотности, чем AGB звезды. Разница градиентов ведет к изменению численного соотношения RGB/AGB звезд вдоль радиуса галактики. Радиус толстого диска RGB звезд равен  $22'$ , что соответствует  $\sim 25$  кпк.

Дополнительное исследование ACS/WFC изображения (поле S7) указывает на то, что изменение градиента в распределении поверхностной плотности числа RGB звезд происходит на  $R = 24'$  (рис. 3.6). Это на  $2'$  отличается от полученного нами ранее размера толстого диска по интерполяции наклонов прямых (Tikhonov et al., 2005) (рис. 3.5) и находится в пределах ошибок измерения размера толстого диска.

Имеющиеся HST снимки не позволили нам достичь внешней границы гало. Приближенная экстраполяция показала, что радиус гало должен быть не менее 40 кпк.

На некоторых снимках, кроме звезд диска и гало М 81, присутствуют звезды кар-



ликовых галактик: BK3N, HoIX, Arp's ring. Такие случаи хорошо заметны на графиках распределения звезд вдоль радиуса (рис. 3.5, верхний график), поскольку в таких полях к звездам диска или гало M 81 добавляются звезды карликовой галактики. На рис. 3.5 эти точки лежат выше общей зависимости. Анализ результатов фотометрии показывает, что карликовые галактики BK3N и HoIX содержат в своем составе AGB звезды, но не содержат RGB звезд. Это хорошо согласуется с предположением о том, что данные галактики могут быть молодыми приливными образованиями (Miller, 1995, Flynn et al., 1999, Boyce et al., 2001). Отсутствие в этих галактиках RGB звезд ведет к трудностям при определении расстояний до них. Значения расстояний, полученные в работе Karachentsev et al. (2002), относятся к звездам диска и гало M 81, но не к BK3N и HoIX. В поле Arp's ring присутствуют как AGB, так и RGB звезды. Особенно это заметно на 3 чипе WFPC2. Поскольку RGB звезды имеют возраст не менее 1 — 2 млрд. лет, то и кольцо имеет не меньший возраст. Присутствие на диаграмме „цвет–величина” кольца Арпа голубых звезд указывает, что в нем до сих пор продолжается слабый процесс звездообразования.

## 3.2 Галактика NGC 300

Спиральная галактика NGC 300 (рис. 3.7) принадлежит группе Скульптора. Наклон галактики ( $i = 40^\circ$ ) позволяет изучать как ее центральные области, так и периферию. Общие сведения о галактике и журнал HST наблюдений исследуемых полей содержатся в таблицах 1 и 2 (см. Приложение А).

Водородный диск NGC 300 имеет большие размеры:  $55' \times 35'$  (Rogstad et al., 1979, Puche et al., 1990) и простирается далеко за пределы видимого изображения галактики, что дает некоторые основания предполагать существование у этой галактики гало. Кроме отмеченных ранее фотометрических исследований молодого населения NGC 300, в галактике проведены спектральные наблюдения отдельных молодых сверхгигантов, на предмет выявления градиента металличности звезд вдоль радиуса галактики (Bresolin et al., 2002).

Расстояние до галактики  $D = 2.02$  Мпк получено методом цефеид (Freedman et al., 2001). Используя TRGB метод (Lee et al., 1993) и результаты фотометрии полей S1,

S2 и S3 мы получили **модуль расстояния** до NGC 300:  $(m - M) = 26.50 \pm 0.15$  ( $D = 2.00 \pm 0.13$ ) Мпк. Значение средней металличности равно  $[Fe/H] = -0.87$ . Полученный нами результат находится в согласии со значением, найденным по цефеидам.

Диаграммы „цвет – величина” части исследованных областей представлены на рис. 3.8. Для изучения распределения RGB звезд вдоль радиуса использовались поля S1, S2 и S3. Названные поля расположены почти по диаметру галактики и вследствие этого имеют одинаковую коррекцию за наклон галактики к лучу зрения. Поэтому при исследовании этих полей мы не учитывали коррекцию за наклон, как это делали для галактики M 81. Полученные результаты представлены на рис. 3.9, где хорошо видно, что толстый диск и гало имеют разные градиенты падения численной плотности красных гигантов. Изменение плотности звезд толстого диска достаточно хорошо описывается экспонентой, а для звезд гало недостаточно данных для принятия того или иного закона падения численной плотности RGB звезд. Точка пересечения распределений численной плотности звезд в толстом диске и гало дает нам размеры толстого диска. Размеры гало остаются неопределенными из-за отсутствия удаленных от центра галактики HST снимков.

На цветных снимках (MPG/ESO 2.2-m + WFI) в NGC 300 виден голубоватый диск, который имеет резкую границу на периферии. В этот диск погружены все спиральные ветви. Размеры таких дисков обычно и принимают за видимые размеры галактик. Поле S2 находится на границе этого голубого диска и можно изучить все изменения звездного состава при пересечении границы видимого диска. На рис. 3.10 видно, что численность голубых звезд, сверхгигантов и гигантов главной последовательности, резко падает на границе ( $R \sim 5.7'$ ) до нуля. Уменьшается почти до нуля и численность AGB звезд, но толстый диск из красных гигантов не испытывает какого-либо заметного изменения плотности звезд и монотонно продолжается за границу голубого диска (рис. 3.10).

Размер толстого диска NGC 300 (рис. 3.9) относительно размеров тонкого диска оказывается не столь значительным (без учета угла наклона  $R \sim 9'$ ), как это наблюдается у карликовых галактик (Тихонов, 2005а,б, Tikhonov, Galazutdinova & Aparicio, 2003). В NGC 300 толстый диск всего лишь в 1.5 раза больше тонкого диска галактики. Имея недостаточную статистику, трудно сделать вывод о закономерности или случайности

этого явления.

### 3.3 Галактика NGC 4395

Спиральная галактика NGC 4395 принадлежит группе галактик в Большой Медведице. Основным интерес к NGC 4395 вызван существованием у нее активного ядра. Галактика имеет сравнительно низкую поверхностную яркость и не имеет балджа. В центре галактики, по расчетам Fillipenko & Ho (2003) находится маломассивная черная дыра с  $M \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$ . Присутствие черной дыры в галактике без балджа является уникальным явлением и вызывает интенсивные исследования. NGC 4395 исследовалась в ультрафиолетовом и в рентгеновском диапазоне (Fillipenko et al., 1993, Kraemer et al., 1999, Lira et al., 1999, Moran et al., 1999, Chenshaw et al., 2004). Диаметр водородного диска NGC 4395 в пересчете на определенное нами расстояние равен  $\sim 18$  кпк (Martin, 1998), и, как показали наши измерения, этот диаметр меньше, чем определенные нами размеры толстого диска и гало. Поверхностная фотометрия, проведенная Swaters (2002a) до  $\mu_R \sim 28^m/\square''$ , ограничивается областью тонкого диска (см. рис. 3.11). Knäuper et al. (2003) провели поверхностную фотометрию NGC 4395 в ИК диапазоне. Полученный ими фотометрический профиль галактики указывает скорее на малую чувствительность используемого фотометра и, косвенно, на незначительность массы пыли в галактике.

Расстояние до NGC 4395 было определено разными методами:

$D = 4.2$  Мпк, методом ярчайших звезд (Karachentsev & Drozdovsky, 1998);

$D = 4.6$  Мпк, TRGB методом (Karachentsev et al., 2003a);

$D = 4.0 \pm 0.3$  Мпк, по звездам типа RR Lyra и долгопериодическим цефеидам.

Определенное нами значение модуля расстояния равно  $(m - M) = 28.34 \pm 0.2$  ( $D = 4.66 \pm 0.4$  Мпк), что согласуется со значениями, полученными другими авторами.

Общие сведения о галактике и журнал HST наблюдений исследуемых полей содержатся в таблицах 1 и 2 (см. Приложение А). Расположение выбранных полей показано на рис. 3.11. К сожалению, отсутствуют поля, расположенные в промежуточной области между полями S1 и S3. На рис. 3.12 представлены диаграммы „цвет – звездная величина” площадок S1, S2 и S3. Как в любой спиральной галактике на диаграмме

[(V-I),I] видны ветви молодых сверхгигантов и старых звезд. Для изучения **распределения численной плотности звезд** были использованы поле WFPC2 и два поля ACS/WFC.

Результаты вычислений представлены на рис. 3.13. Поскольку центральные поля занимают только часть галактики, то на диаграммах видны флуктуации численной плотности голубых звезд из-за присутствия в полях S1 и S2 нескольких областей звездообразования. Распределение красных гигантов в центре имеет плавный характер, что особенно видно по полю S2. Отсутствие изменения градиента в распределении красных гигантов указывает на то, что толстый диск галактики начинается довольно близко (не более 1 кпк) от центра. Поле S3 довольно удачно попало на границу толстого диска. Распределение красных гигантов в этом поле (без учета угла наклона галактики к лучу зрения) показано на рис. 3.13 (нижний график). Видно, что при  $R \sim 15.5 - 20$  кпк наблюдается резкое изменение градиента численной плотности, что является границей между диском и гало. Недостаточная протяженность гало не позволяет надежно оценить градиент падения звездной плотности и вычислить размеры гало. Найденную границу нельзя интерпретировать как границу гало, поскольку за пределами 18 кпк имеется достаточное число красных гигантов. Отметим, что поле S3 расположено за пределами водородного диска, размеры которого определены в работе Martin (1998).

### 3.4 Общие выводы по галактикам, видимым плашмя

В трех спиральных галактиках, видимых с небольшим наклоном, что не мешает исследованию, проведена звездная фотометрия многих полей и построены диаграммы "цвет – величина". На основании этих диаграмм выделены звезды разного возраста и определены параметры их распределения по телу галактик. Результаты наших исследований подтвердили известные ранее сведения о глобальном строении галактик и дополнили их новыми данными. Как и следовало ожидать, молодые сверхгиганты распределены в области тонкого диска, на границе которого их плотность падает до нуля. Распределение молодых звезд вдоль радиуса галактики подвержено некоторым флуктуациям из-за случайного распределения областей звездообразования вдоль спиральных ветвей, но в целом наблюдается, вероятно, экспоненциальное падение их численной плотно-

сти вдоль радиуса галактики (Tikhonov et al., 2005). Звезды промежуточного возраста (AGB) также испытывают резкое изменение численности на границе тонкого диска, однако их распределение простирается в область толстого диска и даже гало, где их численность незначительна. Наиболее многочисленны звезды на диаграммах "цвет – величина *красные гиганты*, указывают на наличие в спиральных галактиках двух звездных подсистем: толстого диска и гало. *Распределение красных гигантов* в толстом диске вдоль радиуса галактики следует экспоненциальному закону, а на границе диска испытывает резкое изменение градиента, что собственно и принято нами за границу между толстым диском и гало. Недостаточность данных не позволяет нам определить закон изменения численной плотности красных гигантов в гало, но сам факт существования звездного гало, впервые выявленного у спиральных галактик за пределами Местной группы не вызывает сомнения. Принимая во внимание случайность выборки галактик, можно предполагать присутствие гало у всех спиральных галактик, что подтверждает и факт присутствия гало у галактик, видимых с ребра, о чем пойдет речь в следующей главе.

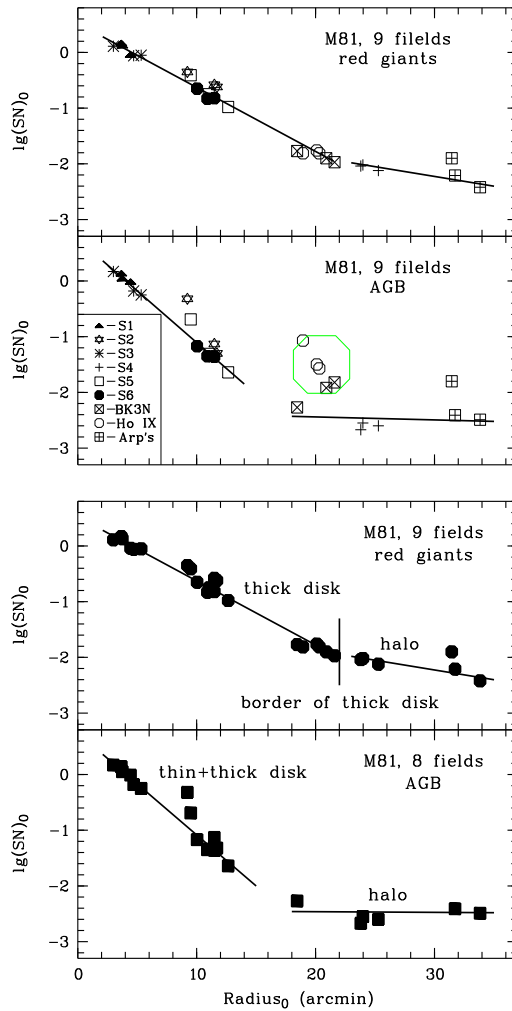


Рис. 3.5: *Верхний график.* Распределение численной плотности RGB и AGB звезд вдоль радиуса М 81, исправленное за наклон галактики и за неполноту выборки звезд. Отклонения некоторых точек от среднего уровня звездной плотности является результатом суммирования звезд ВКЗН, HoIX и Arp's ring и звезд основных структур М 81. *Нижний график.* Распределение численной плотности звезд М 81, в котором учтено „загрязнение” основных структур М 81 звездами карликовых ВКЗН, HoIX и Arp's ring. Наблюдаемое изменение градиента численной плотности позволяет определить границу толстого диска.

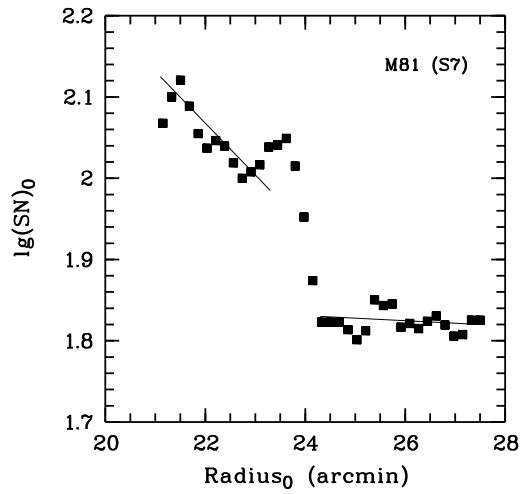


Рис. 3.6: Распределение численной плотности звезд в поле S7 галактики М 81. При  $R = 24'$  происходит изменение градиента численной плотности RGB звезд, что указывает на границу между толстым диском и гало.

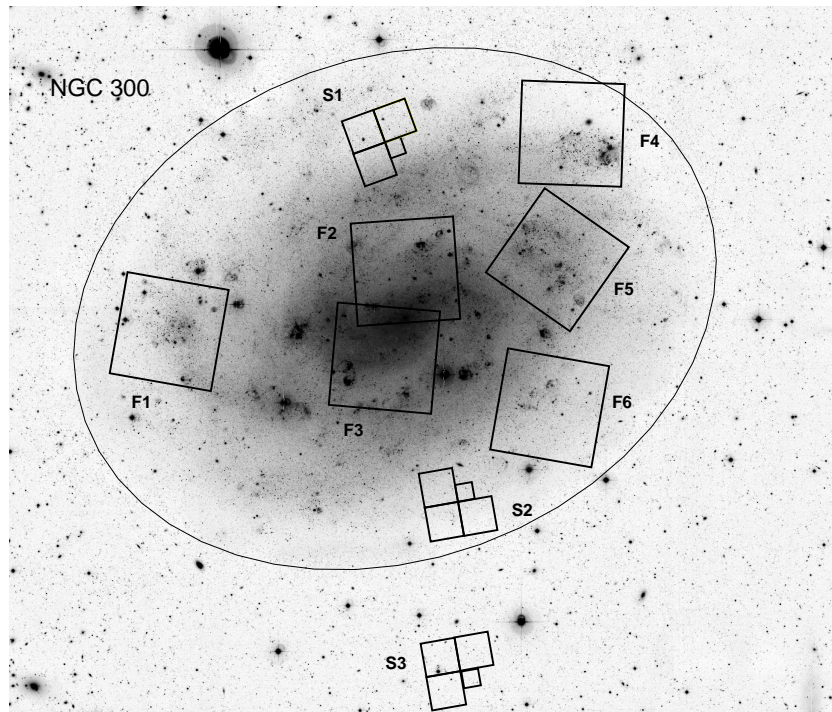


Рис. 3.7:  $34' \times 33'$  WFI изображение NGC 300, полученное на MPG/ESO 2.2 метровом телескопе. Показаны положения девяти (WFPC2 и ACS/WFI) исследуемых полей: S1, S2, S3, F1, F2, F3, F4, F5, F6. Эллипсом обозначена граница между толстым диском и гало.

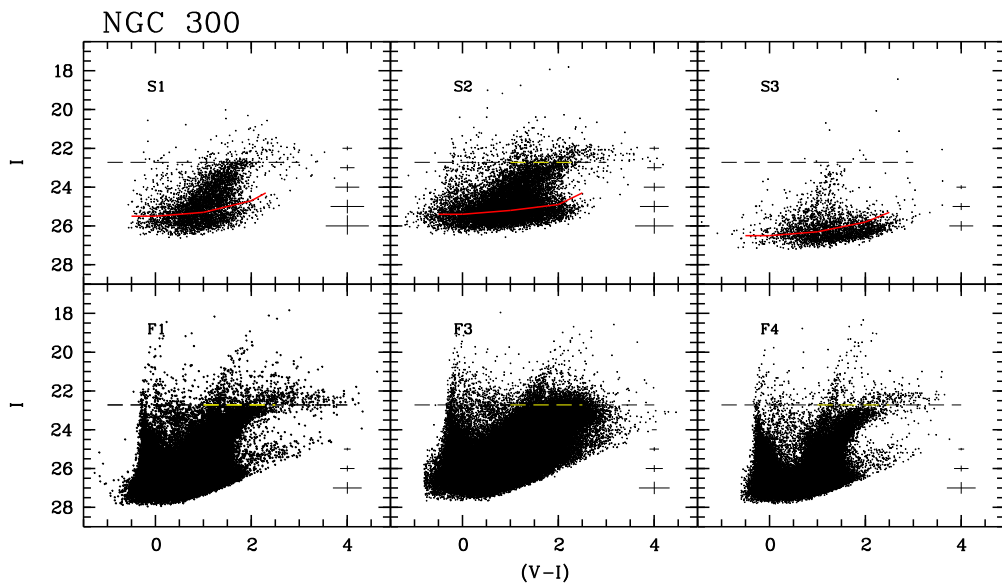


Рис. 3.8: Диаграмма „цвет – величина” полей S1, S2, S3, F1, F2, F3 NGC 300. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 22.67$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия).

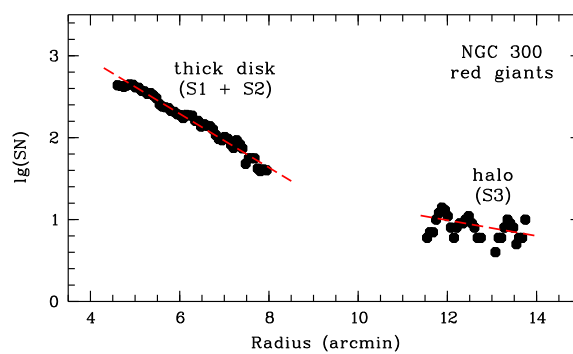


Рис. 3.9: Распределение численной плотности RGB звезд вдоль радиуса галактики NGC 300. Видно, что прямые, аппроксимирующие распределение красных гигантов на разных расстояниях от центра галактики, имеют различные наклоны (см. табл. 4, Приложение А). Пересечение прямых указывает на точку перехода от толстого диска к гало на  $R \sim 9'$  (без учета угла наклона галактики).



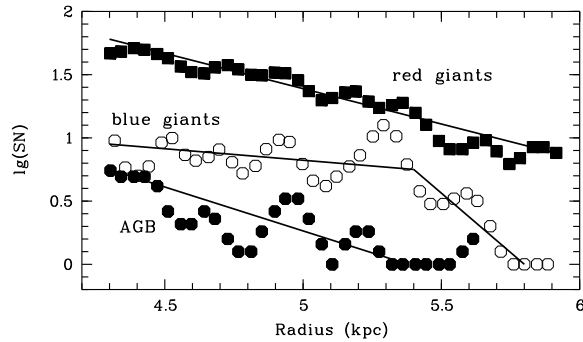


Рис. 3.10: Распределение численной плотности RGB, AGB и голубых звезд в тонком диске NGC 300 (поле S2). Падение до нуля значения численной плотности голубых звезд на  $R = 5.7$  кпк указывает на границу тонкого диска. Видно, что красные гиганты имеют монотонное распределение в пределах всего поля, что указывает на принадлежность этих звезд другой подсистеме (толстому диску).

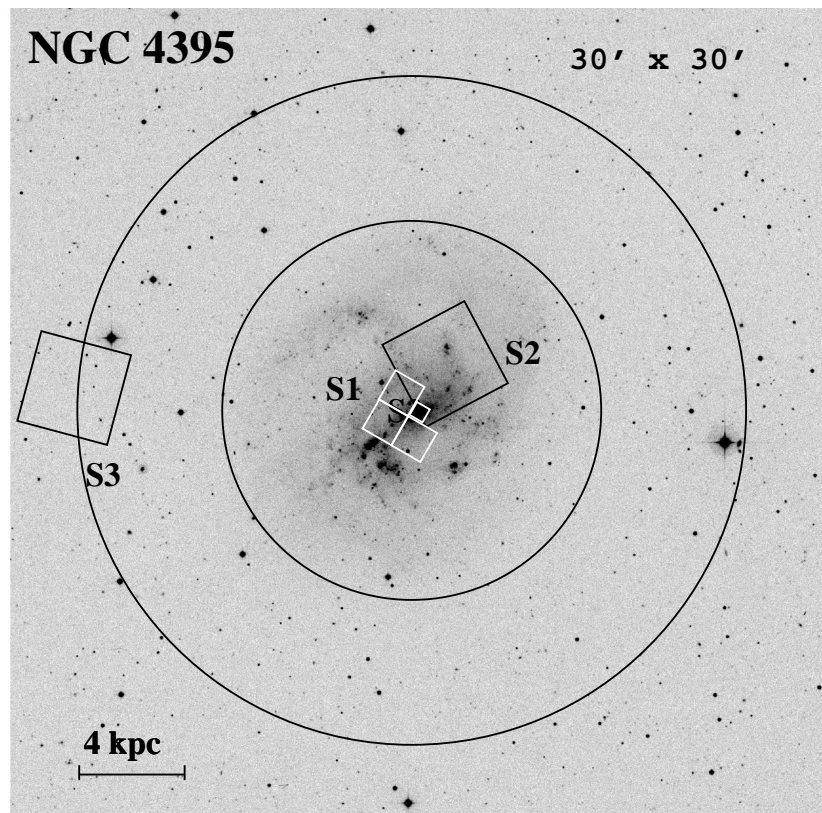


Рис. 3.11: DSS-2 изображение галактики NGC 4395. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2 и ACS/WFC. Внутренний круг указывает на минимальную ориентировочную границу тонкого диска. Внешний – на границу между толстым диском и гало.

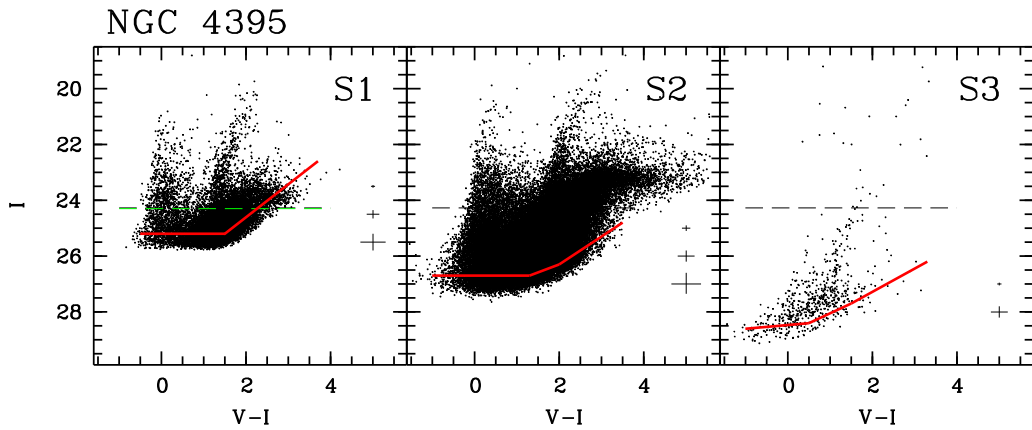


Рис. 3.12: Диаграммы „цвет – звездная величина” для исследуемых полей NGC 4395. Пунктиром показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 24.27$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия).

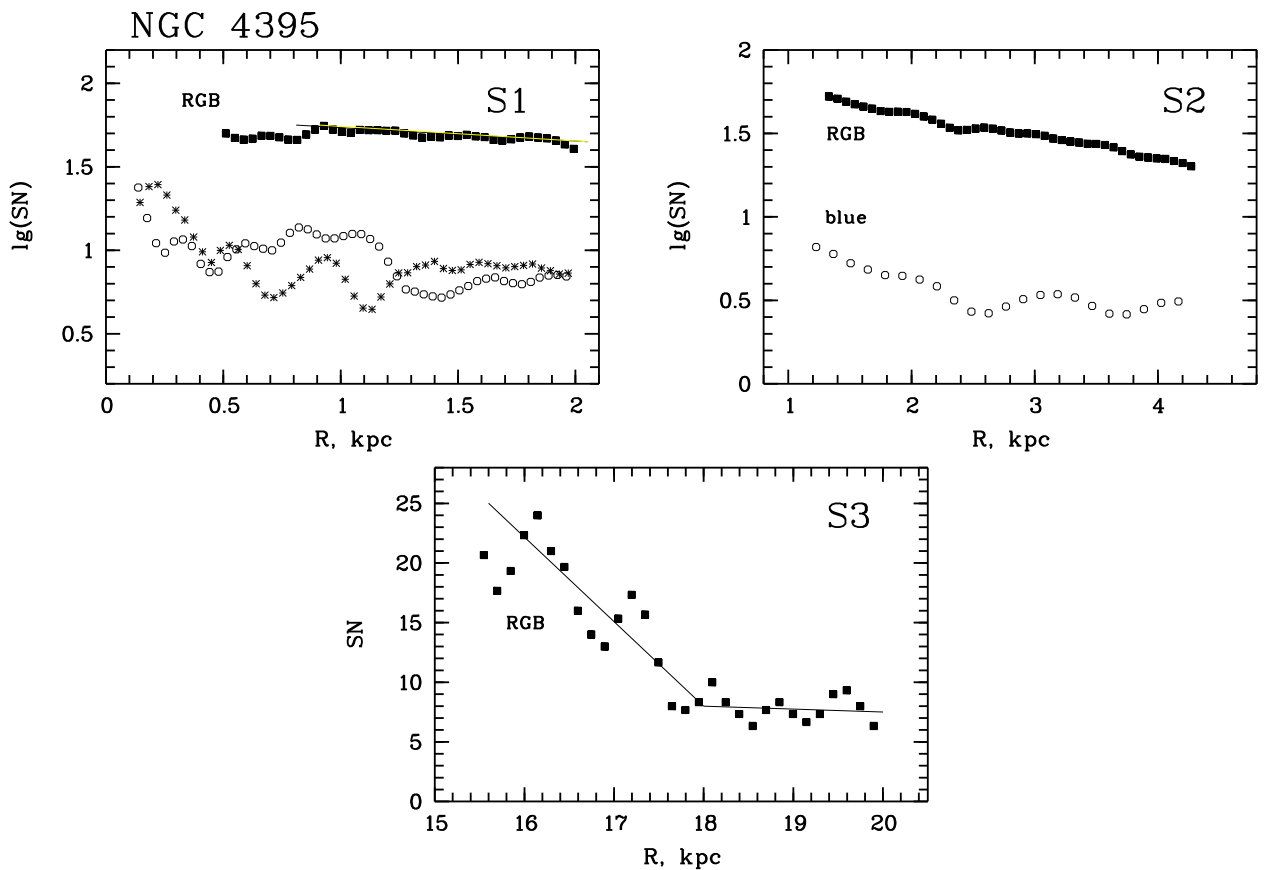


Рис. 3.13: Распределение численной плотности красных гигантов в исследуемых полях NGC 4395. Изменение градиента плотности в поле S3 соответствует границе между толстым диском и гало.

## Глава 4

# Структура спиральных галактик, видимых с ребра

Результаты, полученные нами по звездной структуре галактик, видимых плашмя, мы дополнили исследованиями галактик, наблюдаемых с ребра, так как только при таком расположении галактик мы можем изучить протяженность и форму звездных подсистем перпендикулярно плоскости галактик. Кроме того, поскольку у видимых с ребра галактик мы наблюдаем толстый диск под большим углом, градиент падения численной плотности звезд будет выше, а это облегчает регистрацию границы толстого диска. И, наконец, решается вопрос, действительно ли в спиральных и иррегулярных галактиках „толстый диск” является толстым.

### 4.1 Галактика NGC 891

Принадлежащая группе NGC 1023, галактика NGC 891, вызывает интерес астрономов тем, что она морфологически подобна нашей Галактике. Поэтому можно ожидать, что она обладает и сходными физическими параметрами. Однако оказалось, что, например, современный темп звездообразования в NGC 891 в  $2 \div 3$  раза выше, чем в нашей Галактике. Возраст NGC 891 оценен в  $11 \div 13$  млрд. лет (Gonzalez, 1993, Cantiello et al., 2003), что в пределах ошибок соответствует возрасту Галактики (13.6 млрд. лет) (Pasquini et al., 2004). NGC 891 интенсивно изучалась во всех спектральных диапазонах. Исследование оптических изображений ( $BVI + H_\alpha$ ) показывает две физически различные составляющие межзвездного диска этой галактики:

- 1) плотная холодная, видимая на  $BVI$  снимках в виде поглощения, и состоящая из

газопылевых облаков, прослеживающихся до 2 кпк от плоскости галактики;

2) теплая ионизованная, видимая на  $H_\alpha$  снимках, и равномерно распределенная по телу галактики с включением нитевидных структур (Howk & Savage, 1997).

Глубокие фотографические снимки NGC 891 в красных и синих лучах выявили две звездные составляющие — балдж и диск (van der Kruit & Searle, 1981). Сравнение показало, что в этой работе диск был прослежен почти до найденной нами на основе HST наблюдений границы толстого диска. Радиоданные по NGC 891 показали, что галактика обладает газовым гало, которое состоит из  $CO$  (Garcia-Burillo et al., 1992) и  $HI$  (Swaters et al., 1997). Гало из  $HI$  простирается до  $Z = 5$  кпк от галактической плоскости и составляет  $\sim 15\%$  от общей массы нейтрального водорода. Наиболее удаленные  $HI$  облака зарегистрированы на расстоянии 15 кпк от плоскости диска (Flaternali & Oosterloo, 2004, Flaternali et al., 2004), что существенно меньше определенного нами размера звездного гало. Вероятной причиной такой недооценки размеров галактики в радиодиапазоне является просто низкий предел таких наблюдений. Принимают, что диаметр водородного диска NGC 891 в 1.2 раза больше ее оптического диаметра, определенного по уровню изофоты  $\mu = 25^m/\square''$  (Martin, 1998). Xilouris et al. (1998), используя трехпараметрическую осесимметричную модель распределения звезд и пыли в NGC 891, определили параметры, которые наилучшим образом описывают распределение звезд и пыли в оптических и ИК полосах. В этой модели характерный масштаб падения яркости экспоненциального диска для звезд равен 0.4 кпк, а для пыли 0.26 кпк. Модель дает массу пыли  $M_{dust} = 1.1 \cdot 10^8 M_\odot$ . Отношение  $M_{gas}/M_{dust} = 165$  близко к значению, полученному для нашей Галактики (Spitzer, 1978). Приведенные выше цифры говорят о том, что по некоторым параметрам NGC 891 действительно имеет сходство с нашей Галактикой.

Полученная нами для этой галактики диаграмма „цвет – величина” позволяет надежно определить расстояние до NGC 891, используя многочисленные красные гиганты, видимые на диаграмме (рис. 4.1) и TRGB метод (см. пункт 2.3).

Для вычисления расстояния было использовано поле S1. TRGB метод позволяет одновременно с определением расстояния измерять среднюю металличность красных гигантов в исследуемой области галактики.

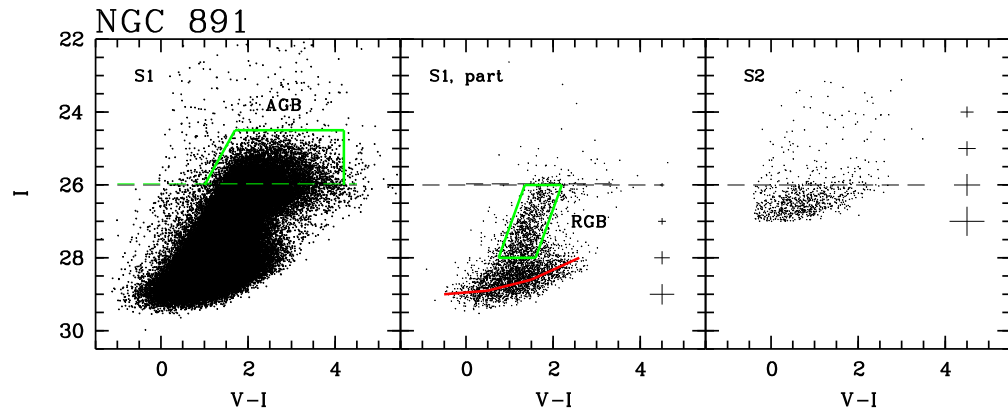


Рис. 4.1: Диаграммы „цвет — величина” исследуемых полей галактики NGC 891. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Значение  $I_{TRGB} = 25.97$  определено по исследованию звезд в поле S1. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия). Серыми линиями выделены области AGB и RGB звезд, используемые для анализа численного распределения.

Используя красные гиганты ACS/WFC снимка за пределами толстого диска NGC 891 с тем, чтобы в значительной степени уменьшить влияние более ярких AGB звезд, (рис. 4.2) мы получили значение  $I_{TRGB} = 25.97$ , что соответствует модулю расстояния  $(m - M) = 29.96 \pm 0.08$  (Тихонов и Галазутдинова, 2005). Высокое значение металличности красных гигантов ( $[Fe/H] = -0.74$ ) в NGC 891 обусловлено, по-видимому, большой массой галактики, что препятствует уходу обогащенного металлами вещества из галактики. Примерно такую же металличность имеют и красные гиганты толстого диска массивной галактики M 81. Полученный нами модуль расстояния до NGC 891 почти совпадает со средним модулем расстояния, полученным на основе функции светимости планетарных туманностей и метода флуктуации поверхностной яркости —  $(m - M) = 29.95 \pm 0.10$  (Ferrarese et al., 2000b).

Как видно из рис. 4.2, используемые нами площадки расположены вдоль малой оси галактики. Ориентация снимка ACS камеры неудобна для подсчетов плотности звезд вдоль оси  $Z$ , но зато позволяет проследить изменение плотности на большее расстояние. Область снимка вблизи галактического экватора имеет существенный дефицит красных гигантов из-за эффектов экранирования телом галактики противоположной части диска, а также из-за влияния яркого фона галактики на полноту выборки и чрезмерного сгущивания звезд. Поэтому мы наблюдаем в экваториальной области галактики провал численной плотности красных гигантов. Аналогичный, но меньший провал численной

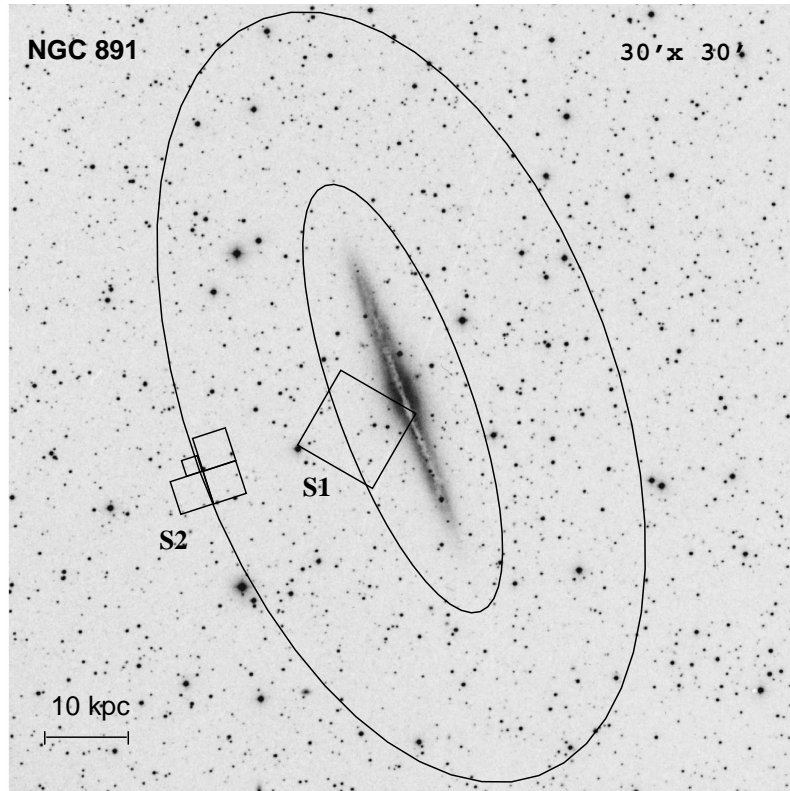


Рис. 4.2: DSS-2 изображение галактики NGC 891. Показано расположение исследуемых полей, полученных на камерах WFPC2 и ACS телескопа HST. Внутренний эллипс указывает на границу между толстым диском и гало. Внешний — границу гало.

плотности звезд вдоль оси  $Z$  наблюдается и у более ярких AGB звезд. Мы исключили эти экваториальные области на графике **распределения звезд** для более наглядного представления поведения плотности AGB и RGB звезд на границе толстого диска и гало (рис. 4.3).

В спиральных галактиках граница тонкого диска определяется областью распространения газопылевых облаков и молодых звезд. Эта граница в NGC 891 находится на  $Z < 2$  кпк от плоскости галактики. Все AGB и RGB звезды, распределения которых представлены на рис. 4.3 а, b, с, принадлежат толстому диску и гало. AGB звезды в диске NGC 891 показывают довольно резкое падение своей численности вдоль оси  $Z$ , и за пределами  $Z = 6$  кпк (рис. 4.3) их число незначительно. Плотность числа RGB звезд уменьшается существенно медленнее, и точка перегиба, то есть точка изменения градиента их численной плотности, выделяется менее заметно, чем у AGB звезд (рис. 4.3b).

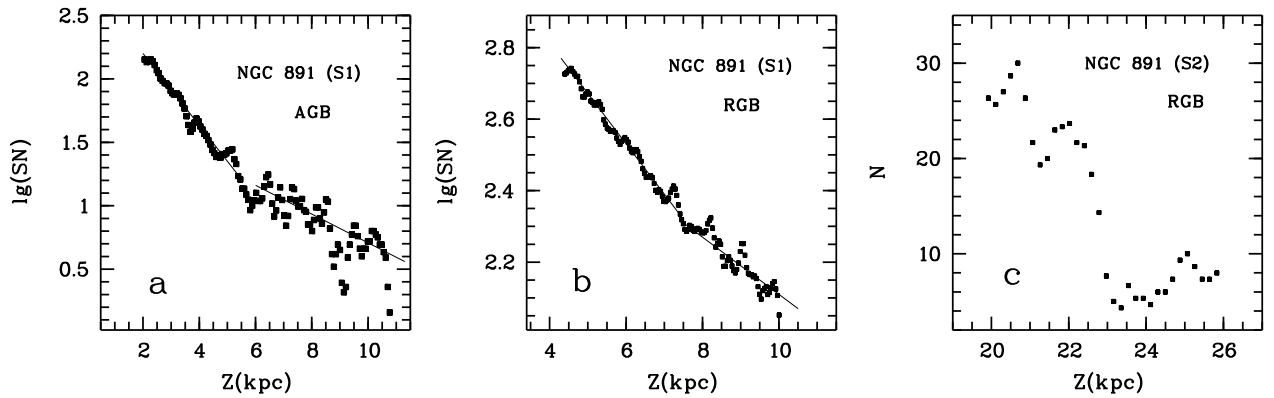


Рис. 4.3: *a.* Численная плотность распределения AGB звезд ( $SN$ ) вдоль оси  $Z$  галактики NGC 891. Виден излом в распределении на расстоянии  $Z = 5.6$  кпк. *b.* Распределение численной плотности красных гигантов NGC 891. Излом в распределении красных гигантов виден на расстоянии  $Z = 7.6$  кпк. Точка излома соответствует границе между толстым диском и гало. *c.* Распределение численной плотности RGB звезд в поле S2: звездная плотность убывает вдоль  $Z$  координаты и падает до фоновых значений при  $Z = 23$  кпк.

Успеху работы способствовало использование ACS камеры с ее большим полем и более глубоким фотометрическим пределом. Значительное увеличение выборки звезд позволило нам определить границы толстого диска в NGC 891. На рис. 4.3b у RGB звезд излом градиента плотности наблюдается при  $Z = 7.6$  кпк. По аналогии с галактиками, видимыми плашмя, точка излома плотности красных гигантов определяет границу толстого диска и начало более протяженного гало. Вычислив градиент плотности RGB звезд по начальному участку гало, мы экстраполировали данные до нулевых значений плотности звезд. Таким образом, мы вычислили, что предполагаемый размер гало по оси  $Z$  равен 27 кпк. Экспоненциальный характер падения плотности звезд гало был выбран нами по аналогии с толстым диском, а также на основе тех измерений плотности гало, которые мы провели в галактике NGC 300. В архиве HST телескопа на предполагаемой границе гало нашлось поле S2, которое подтвердило правомерность проведенной экстраполяции и позволило уточнить размеры гало. На рис. 4.3c показано поведение плотности RGB звезд в поле S2. Звездная плотность убывает вдоль  $Z$  координаты и падает до фоновых значений при  $Z = 23$  кпк, что почти совпадает с результатом нашей экстраполяции размера гало. Ошибка определения размеров толстого диска равна  $\pm 2.1$  кпк (табл. 3, приложение А). Таким образом, измерения показывают, что NGC 891 имеет толстый диск толщиной 15 кпк и гало с размером по  $Z$  координате 46 кпк. Если

исходить из предположения, что градиент падения звездной плотности вдоль большой оси имеет то же значение (обычно он имеет меньшее значение), что и вдоль оси  $Z$ , то из такого предположения прямо следует, что гало у полюсов галактики сплюснуто. Такая форма гало не является неожиданностью, поскольку сплюснутость гало наблюдается и в галактике M 31 при построении видимого поверхностного распределения ярких красных гигантов (Zucker et al., 2004).

Сравнение размеров толстого диска NGC 891 и нашей Галактики, где обычно принимают размеры толстого диска не более 4 кпк, указывает на существенную разницу размеров звездных подсистем этих галактик.

## 4.2 Галактика NGC 55

Спиральная галактика NGC 55 (тип SB(s)m) (рис. 4.4) принадлежит группе Скульптора, состоящей примерно из 30 галактик (Cote et al., 1997, Jerjen et al., 2000). Большой угол наклона галактики делает ее перспективным объектом для изучения распределения звездного населения вдоль оси  $Z$ . Этому способствует и относительная близость NGC 55 к нашей Галактике.

**Расстояние** до NGC 55 определялось разными методами:

$D = 1.45$  Мпк, Graham (1982) — на основе фотометрии красных гигантов;

$D = 1.34$  Мпк, Pritchett et al. (1987) — по фотометрии углеродных звезд;

$D = 1.34$  Мпк, Karachentsev et al. (2003b) — методом Талли-Фишера;

$D = 2.00$  Мпк, Van de Steene et al. (2004) — по светимости планетарных туманностей.

При вычислении модуля расстояния мы выбрали поле S3, у которого на диаграмме „цвет – величина” (рис. 4.5) наблюдается большое число красных гигантов, что повышает точность определения верхней границы ветви красных гигантов. Для поля S3 мы получили модуль расстояния  $(m - M) = 26.64 \pm 0.10$  ( $D = 2.13 \pm 0.10$  Мпк). Средняя металличность красных гигантов  $[Fe/H] = -1.25$  (Tikhonov et al., 2005). Полученное расстояние отличается от принимаемого повсеместно значения  $D = 1.6$  Мпк (Puche et al., 1991), но находится в согласии с утверждением Graham (1982), что галактики NGC 55 и NGC 300 расположены на одинаковом расстоянии. Определенное позже (Davidge, 2005) значение расстояния до этой галактики на основе того же TRGB метода,  $D = 2.00$  Мпк,



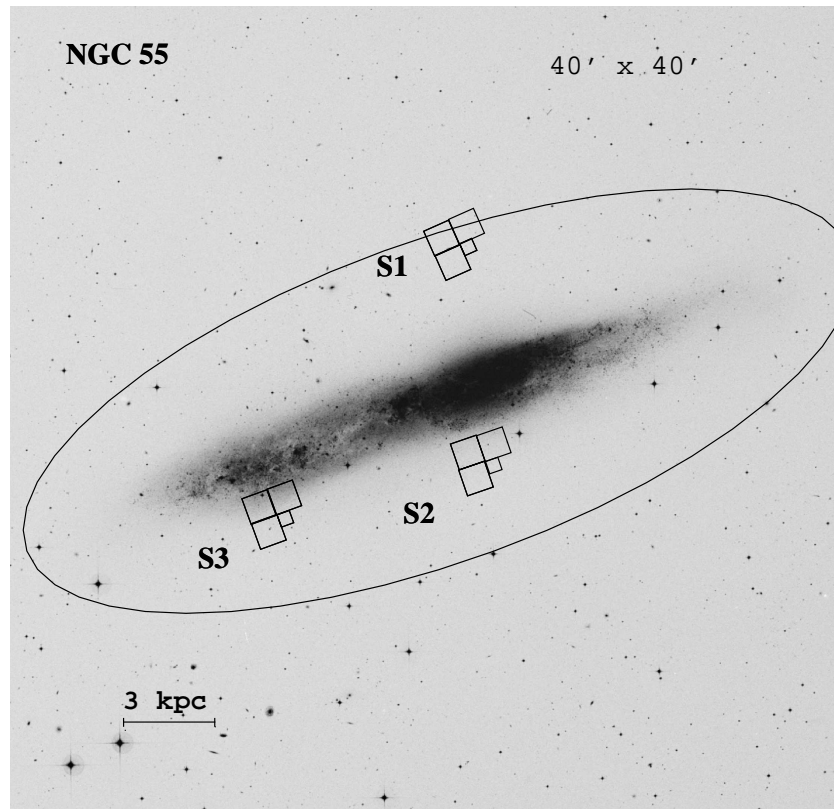


Рис. 4.4: DSS-2 изображение галактики NGC 55. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2. Эллипсом обозначена предполагаемая граница между толстым диском и гало.

согласуется с нашим значением.

Галактика NGC 55 имеет большие видимые размеры, что затрудняет полное исследование звездной структуры ее периферии при малом поле зрения HST/WFPC2 телескопа. Однако, принимая во внимание отсутствие видимых гравитационных искажений формы этой галактики, и как следствие, симметричность ее звездных подсистем, мы можем изучать пространственную структуру NGC 55 на основе исследования всего лишь нескольких малых площадок. Водородный диск HI у NGC 55 имеет размеры  $45' \times 12'$  (Puche et al., 1991). Вероятно, звездное население этой галактики тоже простирается на такие же расстояния, но пока проверить это с помощью наблюдений невозможно.

Для изучения звездных подсистем галактики NGC 55 мы использовали снимки трех полей HST/WFPC2 (см. таблица 2, Приложение А), находящихся на разных расстояниях от плоскости галактики (рис. 4.4). На полученных диаграммах „цвет – величина” этих полей (рис. 4.5) видны населенные ветви красных гигантов, то есть в каждом поле

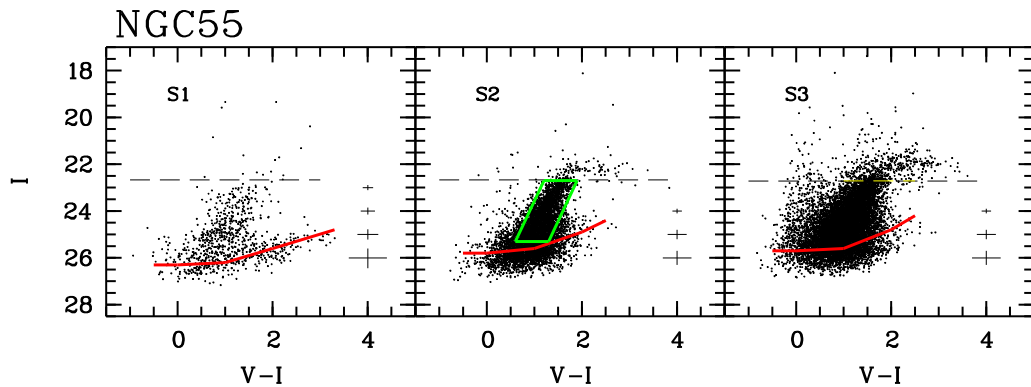


Рис. 4.5: Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики NGC 55. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 22.67$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия). Ромбом выделена область ветви красных гигантов, которая использовалась для анализа распределения численной плотности.

нашлось достаточное число звезд, чтобы уверенно построить распределение численной плотности красных гигантов вдоль оси  $Z$  на интервале от 2 до 7 кпк (рис. 4.6). Выяснилось, что распределение плотности красных гигантов полей S1, S2 и S3 представляет единую зависимость падения плотности числа RGB звезд к краю галактики вдоль оси  $Z$ . Это означает, что красные гиганты полей S1, S2 и S3 принадлежат к одной подсистеме — толстому диску. На графике (рис. 4.6) распределения численной плотности красных

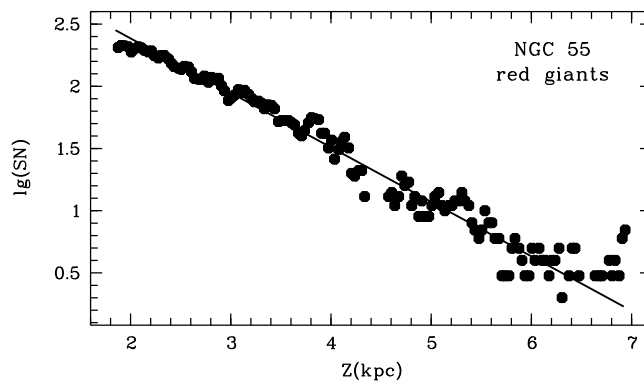


Рис. 4.6: Распределение численной плотности RGB звезд вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 55 (поля S1, S2, S3).

гигантов не наблюдается переход от толстого диска к гало. Вероятно, ни одно из трех полей не достигло границ диска, полутолщина которого не меньше 6 кпк. Можно предпологать, что начинающееся на 6 кпк отклонение распределения плотности красных

гигантов от прямой линии (рис. 4.6) соответствует переходу от диска к гало. Возможно также, что это просто флуктуация численной плотности звезд диска. Для выявления границы между диском и гало нужны дополнительные снимки галактики вдоль малой оси. Можно предположить, что падение плотности красных гигантов вдоль большой оси происходит аналогично падению плотности вдоль малой оси. В этом случае отношение осей толстого диска NGC 55 равно примерно  $2.5 : 1$ , что соответствует средним значениям подобных соотношений для толстых дисков иррегулярных галактик (Тихонов, 2002, Tikhonov & Galazutdinova, 2002). Так же, как и в других исследованных галактиках, численная плотность AGB звезд в NGC 55 убывает к краю галактики быстрее, чем плотность RGB звезд. В результате этого на диаграммах „цвет – величина” далекой периферии галактик мы видим относительно малое число AGB звезд. Бедная статистика AGB звезд и малое число HST полей NGC 55 делают график распределения AGB звезд мало информативным, и мы не приводим его в данной работе.

### 4.3 Галактика NGC 4144

Из-за удаленности и отсутствия особенностей морфологии галактика NGC 4144 (рис. 4.7) была объектом наблюдений только при статистических исследованиях галактик (Hunter & Gallagher, 1985, Alonso-Herrero & Knapen, 2001, Garcia-Ruiz et al., 2002). Сравнения радиоданных в *HI* и оптических наблюдений в фильтрах *B* и *R* показали, что галактика обладает толстым водородным диском, размеры которого превышают размеры видимого тела галактики (Swaters et al., 2002a, 2002b). Имеющийся в архиве космического телескопа ACS/WFC снимок NGC 4144 охватывает значительную часть галактики и позволяет провести подробное исследование ее звездных подсистем (рис. 4.7). Диаграмма „цвет – величина” звезд этой площадки представлена на рис. 4.8. На диаграмме, типичной для спиральных галактик, выделяются ветви голубых и красных сверхгигантов, а также большой массив красных гигантов и AGB звезд.

Для определения **расстояния** до NGC 4144 мы использовали гиганты толстого диска и гало за пределами яркого тела галактики. Граница ветви красных гигантов хорошо заметна при  $I_{TRGB} = 25.20$  (Тихонов и Галазутдинова, 2005), что соответствует модулю расстояния  $(m - M) = 29.30 \pm 0.10$  ( $D = 7.24 \pm 0.35$  Мпк). Средняя металличность крас-

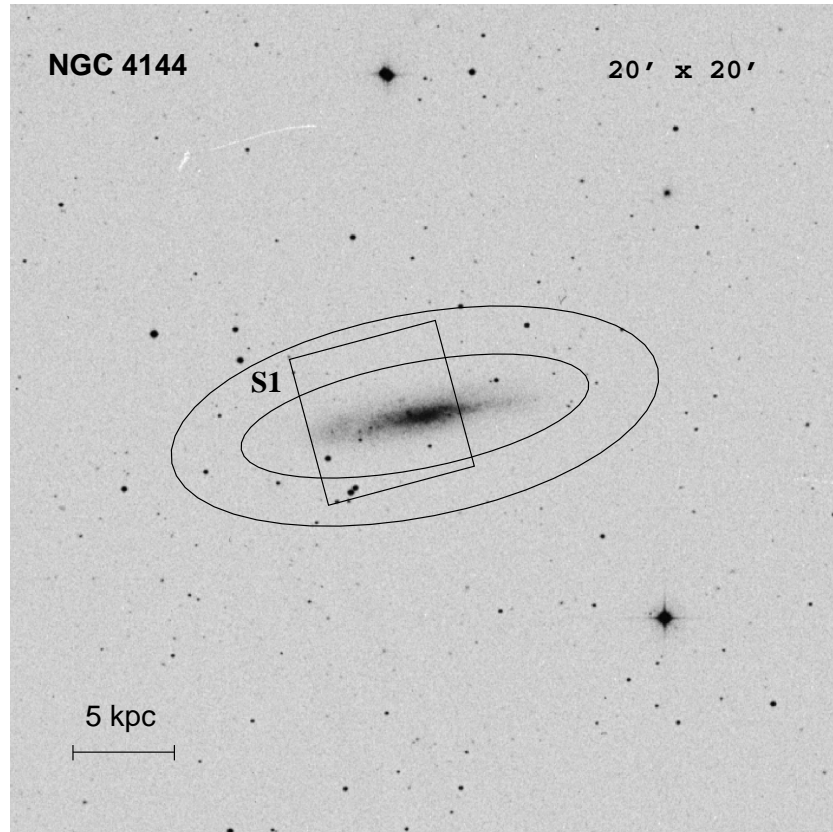


Рис. 4.7: DSS-2 изображение галактики NGC 4144. Показано расположение ACS/WFC поля. Внутренний эллипс соответствует границе между толстым диском и гало, а внешний — границе гало.

ных гигантов  $[Fe/H] = -0.82$ . Расстояние до этой галактики  $D = 9.7$  Мпк было получено ранее на основе фотометрии ярчайших сверхгигантов (Karachentsev & Drozdovsky, 1998). Существенное различие в полученных расстояниях можно объяснить наклоном галактики, при котором видна только ее часть, и применение калибровочных зависимостей между полной светимостью галактики и светимостью ее ярчайших сверхгигантов могут привести к большим ошибкам.

На рис. 4.9 представлены графики **распределения вдоль оси Z численной плотности** молодых звезд, звезд промежуточного возраста (AGB) и старых звезд (RGB). Из-за влияния экваториального газопылевого диска молодые звезды галактики видны как на внешней стороне тонкого диска, так и на некоторой оптической глубине, о чем свидетельствует уширение ветви голубых сверхгигантов (рис. 4.9). Эти ярчайшие звезды галактики в самой малой степени подвержены при их фотометрии воздействию яркости и неравномерности фона вблизи экваториальной плоскости. Это видно на гра-

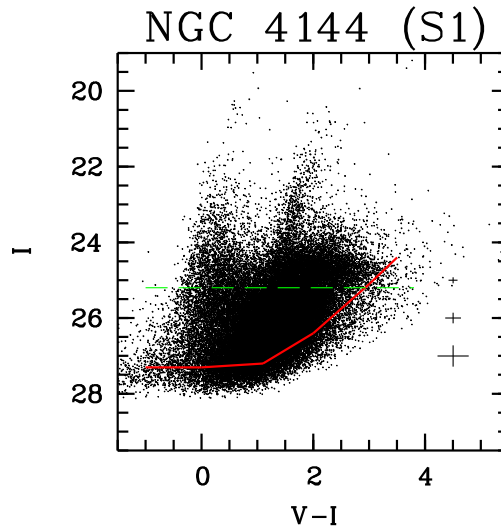


Рис. 4.8: Диаграмма  $[(V - I), I]$  поля S1 галактики NGC 4144. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 25.20$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия).

фиге рис. 4.9, где в распределении голубых звезд не заметно уменьшения их поверхностной плотности вблизи экваториальной плоскости галактики.

Распределение AGB звезд вдоль оси  $Z$  имеет меньший градиент падения численной плотности по сравнению с яркими молодыми звездами, и AGB звезды дальше простираются от плоскости галактики, чем молодые звезды. AGB звезды, имея меньшую яркость относительно сверхгигантов, подвержены при фотометрии воздействию неравномерности фона галактики и присутствию соседних ярких звезд. Это приводит к неполноте выборки в экваториальных областях галактики и появлению на экваторе провала в численной плотности AGB звезд. Наиболее многочисленные звезды — красные гиганты — имеют наименьший градиент падения численной плотности вдоль оси  $Z$ . А на расстоянии  $Z = 2.4$  кпк от плоскости галактики в их распределении наблюдается излом градиента плотности, также как и в галактике NGC 891. Точка излома градиента принята нами за границу толстого диска. Экстраполяция экспоненциального падения плотности звезд вдоль оси  $Z$  позволяет вычислить границу гало при  $Z = 5.4$  кпк. Также как и в галактике NGC 891, гало NGC 4144 имеет сплюснутую у полюсов галактики форму.

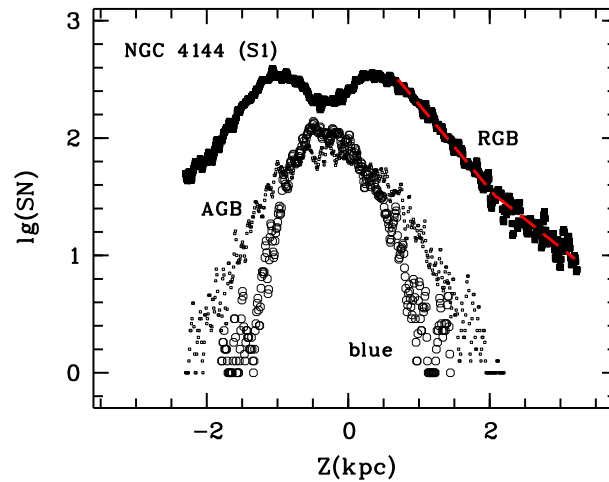


Рис. 4.9: Зависимость численной плотности RGB звезд вдоль оси  $Z$  галактики NGC 4144. Распределение голубых звезд показано кружками, AGB — точками, RGB — квадратами.

#### 4.4 Галактика NGC 4244

Галактика NGC 4244 (рис. 4.10) имеет низкий темп звездообразования и удивительно спокойна в радиоконтинууме (Hummel, 1984). Наблюдения атомарного водорода (Olling, 1996) показывают, что по оси  $Z$  водород виден до  $2.5'$  (3.1 кпк). Диаметр водородного диска в 1.3 раза больше оптического диаметра на уровне изофоты  $\mu = 25^m/\square''$  (Martin, 1998), что скорее всего указывает только на малую чувствительность радионаблюдений. NGC 4244 слабо видна в фильтре  $H\alpha$  и имеет низкую поверхностную яркость в далеком ИК диапазоне (Kodaira & Yamashita, 1996).

Глубокая ПЗС фотометрия (до  $\mu_R = 27.5^m/\square''$ ) показывает простую дисковую структуру NGC 4244: характерный масштаб падения яркости экспоненциального диска равен 250 пк. Доказательств существования звездной компоненты, расположенной за пределами диска найдено не было (Fry et al., 1999).

Имея снимки трех полей галактики (см. табл. 2, Приложение А), можно было надеяться на получение надежных значений модуля расстояния до галактики и размеров звездных подсистем. Диаграммы „цвет – величина” всех трех полей NGC 4244 представлена на рис. 4.11. Диаграммы сильно отличаются друг от друга наличием тех или иных типов звезд, что только подчеркивает, что снимки попали на разные подсистемы галактики: (тонкий диск + толстый диск) или (толстый диск + гало). При вычислении

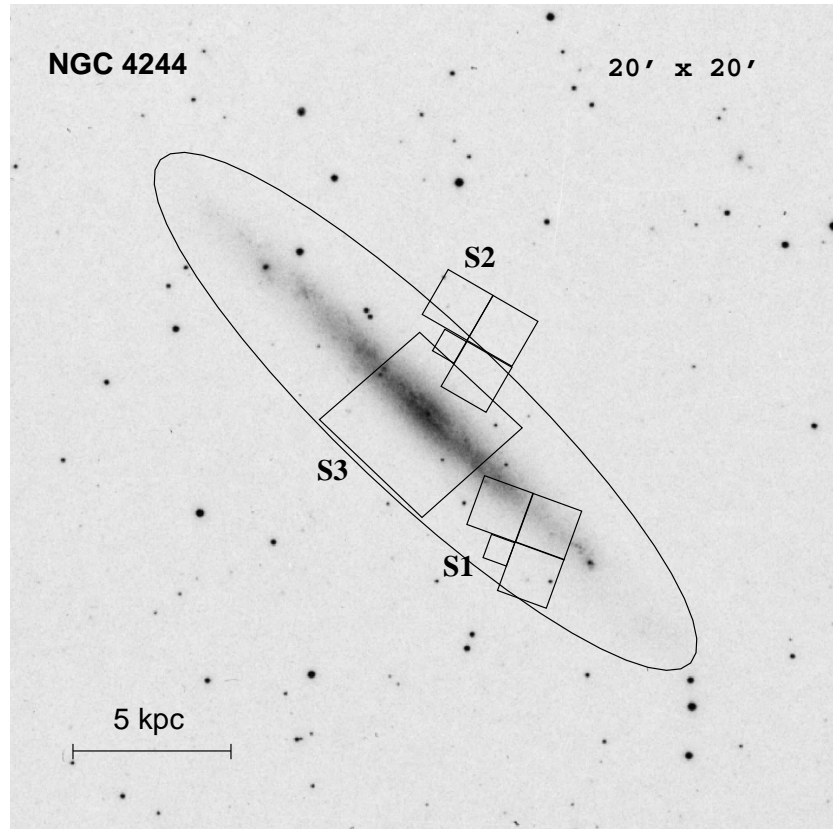


Рис. 4.10: DSS-2 изображение галактики NGC 4244. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2. Эллипсом очерчена граница толстого диска. Предполагаемая граница гало должна проходить на  $Z \sim 8$  кпк.

**расстояния** до NGC 4244 мы использовали все три поля. Используя упомянутый ранее TRGB метод (см. пункт 2.3) мы получили:

$$I_{TRGB} = 24.14 \text{ и } [Fe/H] = -1.62 \text{ для S1};$$

$$I_{TRGB} = 24.20 \text{ и } [Fe/H] = -1.66 \text{ для S2};$$

$$I_{TRGB} = 24.15 \text{ и } [Fe/H] = -0.85 \text{ для S3}.$$

Получен средний модуль расстояния  $(m - M) = 28.16 \pm 0.08$ , что соответствует  $D = 4.33 \pm 0.16$  Мпк (Тихонов и Галазутдинова, 2005). Различия в полученных значениях металличности объясняются тем, что при вычислении TRGB и металличности полей S1 и S2 мы использовали звезды на максимальном удалении от плоскости галактики, что увеличивало точность определения расстояния до галактики, а в поле S3 звезды выбирались в пределах толстого диска. Определенное нами расстояние в пределах ошибок согласуется со значением  $D = 4.49$  Мпк, полученным в работе Karachentsev et al. (2003a) на основе фотометрии красных гигантов одного поля S1.

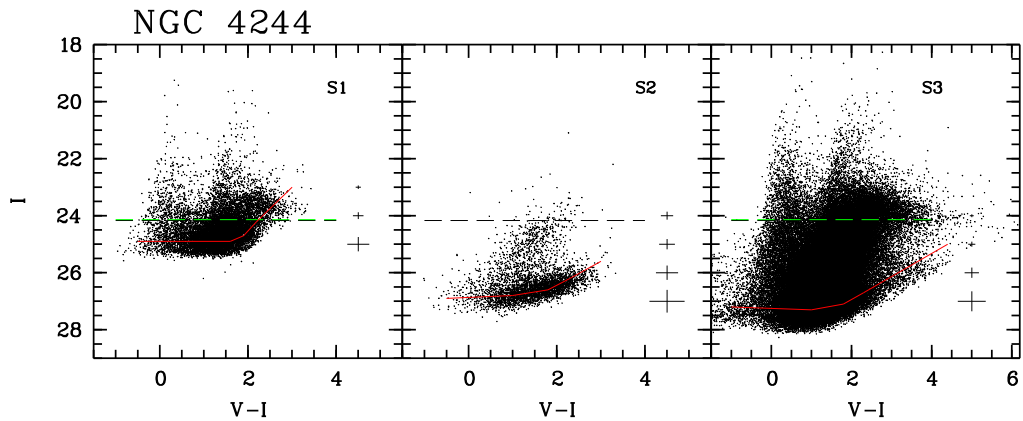


Рис. 4.11: Диаграммы „цвет — величина” исследуемых полей (S1, S2, S3) галактики NGC 4244. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов. Среднее значение  $I_{TRGB} = 24.16$ . Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия).

Хотя галактика NGC 4244 похожа по морфологии и по звездному составу на NGC 4144, между ними имеются некоторые различия в соотношениях параметров внешних звездных подсистем. На рис. 4.12 представлены графики **распределения численной плотности звезд** разного возраста. Также как и в NGC 4144, молодые звезды NGC 4244 концентрируются в наиболее узкой экваториальной области. Звезды промежуточного возраста имеют более широкое распределение, а старые звезды имеют минимальный градиент падения плотности и занимают наиболее протяженную область. Различие между галактиками состоит в том, что на графике NGC 4244 (рис. 4.12a) не наблюдается точки излома звездной плотности красных гигантов, что соответствовало бы границе между толстым диском и гало. Для выяснения вопроса о существовании или отсутствии в этой галактике гало мы изучили распределение красных гигантов в полях S1 и S2 (рис. 4.10). Поле S1 не выходит за пределы диска NGC 4244 и в распределение красных гигантов не заметно изменения градиента плотности (рис. 4.12b). Распределение звезд в поле S2 обнаруживает резкое изменение плотности вдоль оси  $Z$ . До значения  $Z = 2.7$  кпк градиент соответствует градиенту изменения плотности звезд поля ACS/WFC, но при дальнейшем удалении от галактической плоскости градиент испытывает резкое изменение, то есть наблюдается граница толстого диска (рис. 4.12b). Переход от толстого диска к гало происходит при малых значениях звездной плотности. Размеры гало ( $Z \sim 8$  кпк) можно оценить приблизительно, вследствие недостаточной



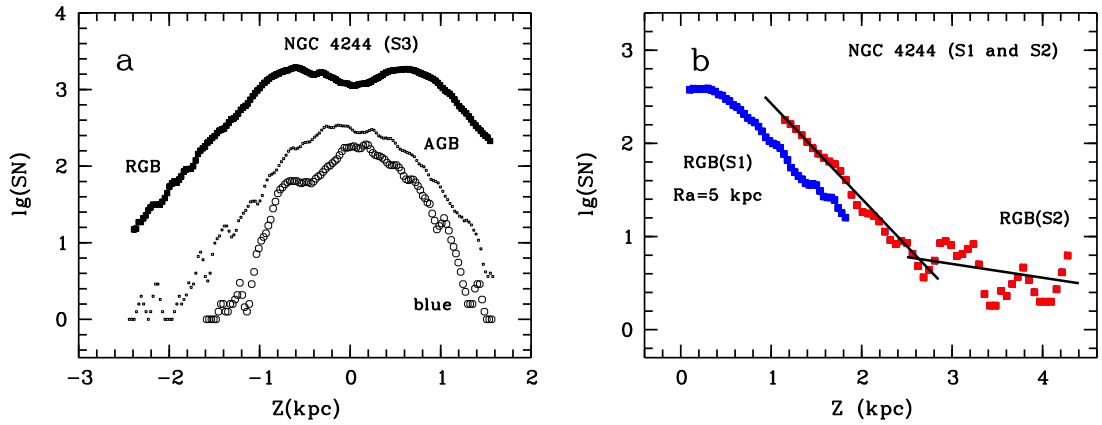


Рис. 4.12: Распределение численной плотности звезд вдоль малой оси галактики NGC 4244. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов. При  $Z = 2.7$  кпк (b) виден резкий излом градиента численной плотности красных гигантов, который интерпретируется нами, как переход от подсистемы толстого диска к гало.

статистики данных, но существование гало не вызывает сомнения. Таким образом, галактика NGC 4244 имеет толстый диск толщиной 5.4 кпк и гало с низкой звездной плотностью и толщиной  $\sim 16$  кпк. Также как и в NGC 4144 и NGC 891, гало NGC 4244 имеет сплюснутую у полюсов галактики форму.

## 4.5 Галактика IC 2233

IC 2233 — одна из наиболее плоских карликовых галактик позднего типа. Попытки найти у нее гало (Gallagher & Hudson, 1976) методом поверхностной фотометрии в фильтрах  $BVi$  не привели к положительным результатам.

Наблюдения в радиодиапазоне на  $\lambda = 21$  см (Stil & Israel, 2002a) указывают на размеры водородного диска, сравнимые с размерами видимого тонкого диска. Противоположные стороны HI диска слабо деформированы (Garcia-Ruiz et al., 2002). Общая масса водорода в галактике  $M_{HI} = 10.2 \cdot 10^8 M_{\odot}$ . Кривая вращения IC 2233 вдоль большой оси имеет симметричную форму до расстояний  $120''$ .

Изображение исследуемой галактики помещено на рис. 4.13. Результаты звездной фотометрии галактики представлены в виде диаграмм „цвет – величина” на рис. 4.14. Приведенное на диаграмме (рис. 4.14, левый график) уширение ветвей голубых и красных сверхгигантов, и частично красных гигантов, связано с наличием поглощения в

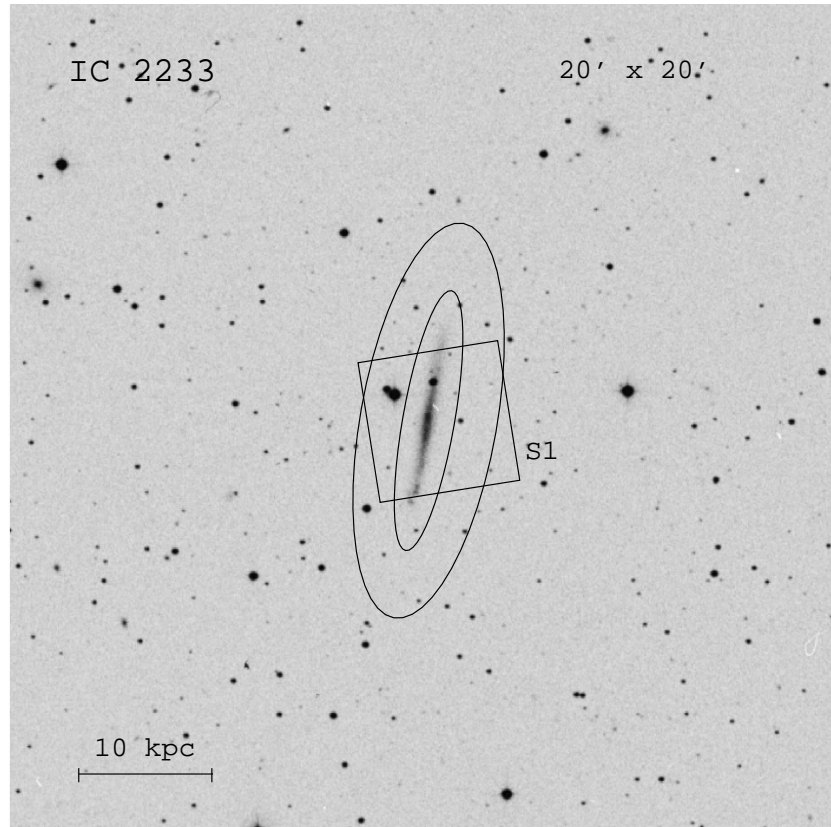


Рис. 4.13: DSS-2 изображение галактики IC 2233 с указанием положения ACS/WFC поля. Эллипсами обозначены границы найденных толстого диска и гало.

газо-пылевых облаках диска галактики. Большое число звезд на диаграммах „цвет – величина”, имеющих разные степени покраснения, замыкает тонкие особенности в морфологии строения ветвей сверхгигантов и гигантов. Чтобы нагляднее представить распределение звезд, мы поместили диаграмму „цвет – величина” (рис. 4.14, правый график) отдельных, удаленных от экваториальной плоскости, участков галактики. На этой „урезанной” диаграмме хорошо видна ветвь красных гигантов и ее верхняя часть, используемая для определения расстояния.

На точность определения TRGB влияет населенность ветви гигантов и присутствие более ярких AGB звезд. Чтобы увеличить число используемых RGB звезд и уменьшить влияние AGB звезд были выбраны области за пределами яркого тела галактики. Поскольку плотность AGB и RGB звезд убывает при удалении от плоскости галактики с разными градиентами, выбирая далекие области, мы получали диаграммы „цвет – величина” с максимальным отношением численности RGB/AGB звезд (рис. 4.14, правый график). Однако, для слишком удаленных областей мы имели диаграммы с малым

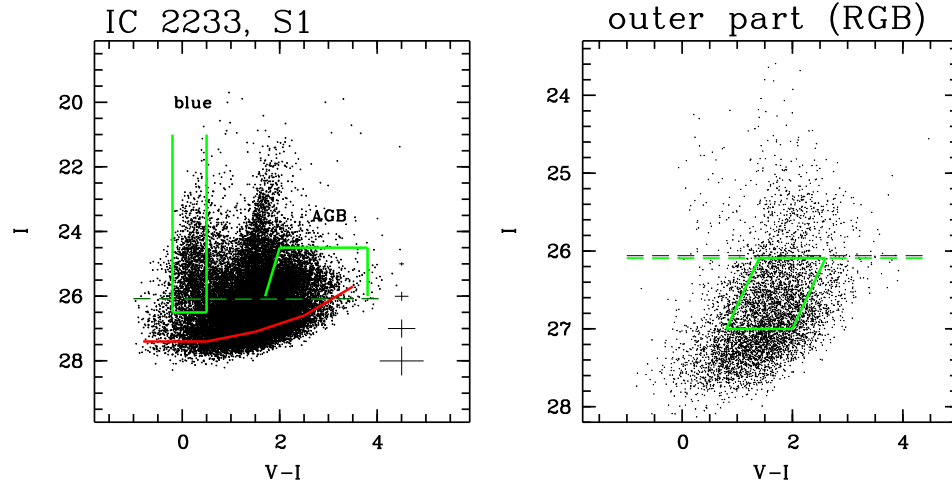


Рис. 4.14: Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики IC 2233. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Серой линией очерчены области звезд AGB и голубых звезд. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия).

числом RGB звезд, что увеличивало статистические ошибки определения границы ветви красных гигантов. После нескольких проб были найдены области с достаточным числом красных гигантов и небольшим количеством AGB звезд, наличие которых не влияет на точность измерений.

Для галактики IC 2233 нами найден **модуль расстояния**  $(m - M) = 30.09 \pm 0.08$  ( $D = 10.42 \pm 0.38$  Мпк) и средняя металличность  $[Fe/H] = -0.93$ . Точность определения расстояния до галактики вычислялась на основе ширины пика функции Собеля, а также степени смещения положения этого пика при небольших изменениях пространственного положения использованной площадки.

В литературе указаны следующие значения расстояния до галактики IC 2233: 7.7 Мпк (Rossa & Dettmar, 2003), 6.9 Мпк (Wilcots & Prescott, 2004), 10.6 Мпк (Tully, 1988). Видно, что некоторые измерения существенно отличаются от полученного нами значения  $D = 10.4$  Мпк.

На рис. 4.15 представлены графики **распределения плотности числа** молодых звезд, звезд AGB и RGB. Молодые звезды ACS/WFC снимка видны как на внешней стороне тонкого диска, так и на некоторой оптической глубине, о чем свидетельствует присутствие голубых, непокрасневших звезд и уширение ветви голубых сверхгигантов (рис. 4.14) из-за неравномерностей поглощения газопылевой материей галактики. Для фотометрической программы DAOPHOT эти звезды имеют максимальную яркость и

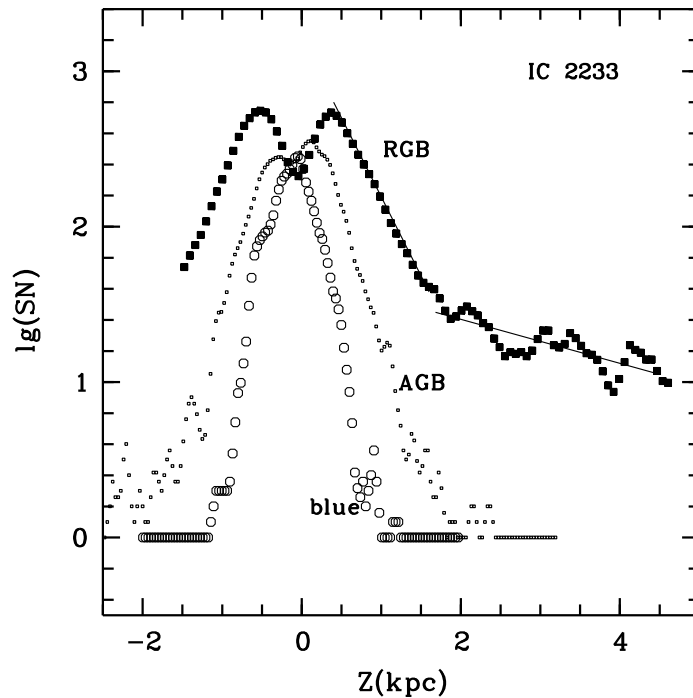


Рис. 4.15: Распределение численной плотности звезд вдоль оси  $Z$  галактики NGC 2233. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов.

в малой степени подвержены воздействию яркости и неравномерности фона галактики вблизи экваториальной плоскости. Указанные причины ведут к тому, что на графике (рис. 4.15) в распределении голубых звезд не заметно резкого уменьшения их поверхностной плотности вблизи экваториальной плоскости галактики. AGB звезды имеют светимость меньшую, чем яркие сверхгиганты. И хотя AGB звезды простираются за пределы тонкого диска, условия их фотометрических измерений таковы, что часть AGB звезд теряется на неравномерном и ярком фоне галактики. В результате мы наблюдаем на графике распределения AGB звезд (рис. 4.15) небольшое уменьшение их численности вблизи экваториальной плоскости галактики. При удалении от экваториальной плоскости AGB звезды резко уменьшают свою численность по экспоненте, и при  $Z = 1.6$  кпк их плотность падает почти до нуля. Красные гиганты имеют наименьший градиент падения численной плотности при удалении от галактической плоскости. Вблизи же галактической плоскости красные гиганты, как наиболее слабые звезды из всех изучаемых типов, подвержены дискриминации в максимальной степени из-за яркого и неравномерного фона галактики, что ведет к фиктивному уменьшению

их поверхностной плотности. На расстоянии  $Z = 1.9$  кпк от галактической плоскости наблюдается излом в экспоненциальном падении плотности числа RGB звезд. Эту точку излома плотности мы принимаем за границу толстого диска. При дальнейшем удалении от границы толстого диска в область гало также наблюдается экспоненциальное падение плотности числа RGB звезд, но с меньшим градиентом. Экстраполяция падения плотности RGB звезд гало до их фонового уровня дает значение полутолщины гало  $Z = 4.8$  кпк. Относительно малые размеры найденного гало по сравнению с размером галактики вдоль большой оси указывают на сплюснутую у полюсов галактики форму гало. Вероятно, это указывает на вращение гало. Некоторые исследователи считают, что IC 2233 и NGC 2537 образуют физическую пару галактик (Stil & Israel, 2002a). Видимых искажений толстого диска у IC 2233 не найдено, в отличие от взаимодействующей галактики NGC 4631 (см. пункт 4.6). Поэтому для вычисления размеров толстого диска и гало было использовано предположение о симметрии структур. Мы сравнили найденные нами размеры толстого диска и гало IC 2233 по  $Z$  координате с размерами водородного диска, приводя все данные к расстоянию  $D = 10.4$  Мпк. По измерениям Stil & Israel (2002a) толщина  $HI$  диска  $\sim 3$  кпк, а у Wilcots & Prescott (2004)  $\sim 7.9$  кпк. Изучение эмиссионного газа в IC 2233 показало существование эмиссионных областей до расстояний  $Z = \pm 1.0$  кпк (Miller & Veilleux, 2003). По нашим измерениям размер толстого диска галактики вдоль оси  $Z$  равен  $3.8 \pm 0.1$  кпк, а размер гало — 9.6 кпк.

## 4.6 Галактика NGC 4631

NGC 4631 — галактика с активным процессом звездообразования. Она была одной из первых спиральных галактик, в которой было открыто нетепловое радиогало (Ekers & Sancisi, 1977), распространяющееся до расстояний  $Z_{max} = 9$  кпк (Golla & Hummel, 1994). В оптическом и ультрафиолетовом диапазоне NGC 4631 имеет многочисленные HI области, пылевые волокна и молодые звездные скопления, рассеянные по всему диску (Rand, Kulkarni & Hester, 1992, Smith et al., 2001). Четыре водородных образования (шпурь (spur)), видимых в ней, указывают на приливное взаимодействие с галактикой NGC 4627 (Rand, 1994).

Изображение исследуемой галактики помещено на рис. 4.16. Результаты звездной

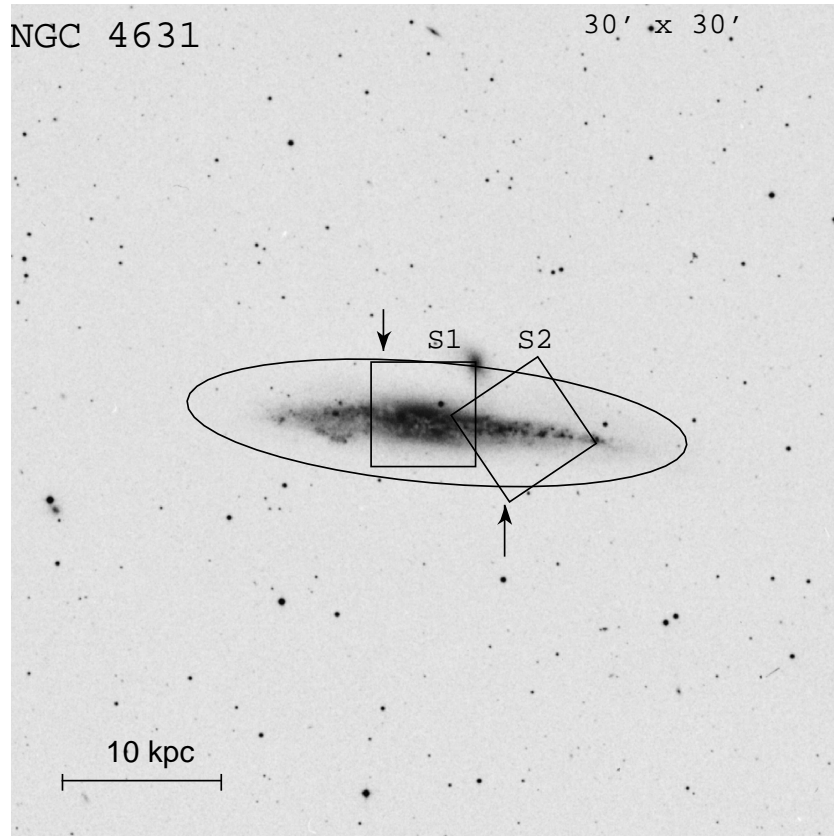


Рис. 4.16: DSS-2 изображение галактики NGC 4631 с указанием положения ACS/WFC полей. Эллипсом обозначена граница толстого диска.

фотометрии представлены в виде диаграмм „цвет – величина” на рис. 4.17. Уширение ветвей голубых и красных сверхгигантов (рис. 4.17, левый график) и, частично, красных гигантов связано с поглощением в газопылевых облаках диска галактики. Большое число звезд на диаграммах „цвет – величина”, имеющих разные степени покраснения, замывает тонкие особенности в морфологии строения ветвей сверхгигантов и гигантов.

**Галактика NGC 4627**, диаграмма „цвет – величина” которой показана на рис. 4.17 (правый график), случайно попала на снимок. Судя по сходству скоростей, она является спутником NGC 4631. Холмберг включил эти галактики в свой список пар галактик под номером Holm442 (Holmberg, 1937), а Агр увидел в них пекулярность и включил их в свой каталог как Agr281 (Agr, 1966). Карликовая галактика NGC 4627 классифицируется как эллиптическая галактика E4, pec (NED). На диаграмме „цвет – величина” звезд этой галактики (рис. 4.17, правый график) видна населенная ветвь красных гигантов и значительное количество AGB звезд. Кроме того, хорошо заметны звезды главной последовательности (при  $-0.4 < (V - I) < 0.4$  и  $26 < I < 27$ ). Изучение распределе-

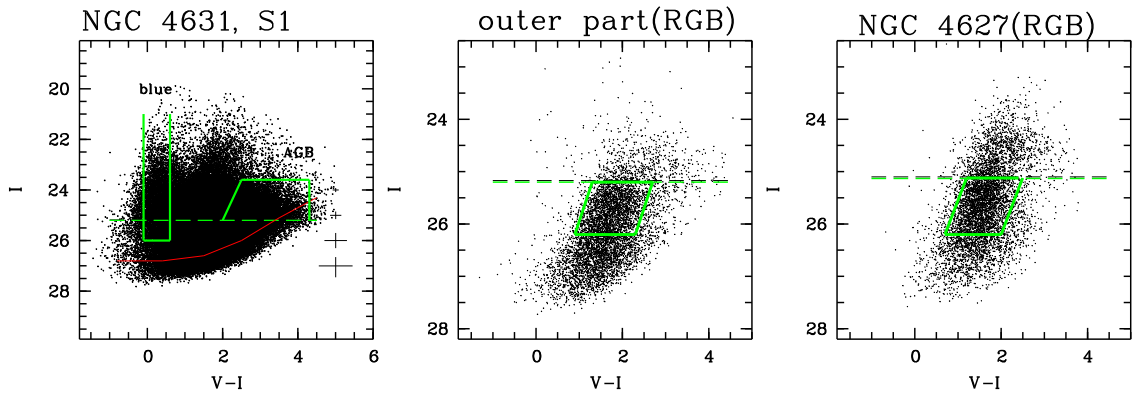


Рис. 4.17: Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики NGC 4631. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Слева. Серой линией очерчены области AGB и голубых звезд. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия). В середине. Серым ромбом показана область исследуемых красных гигантов. Справа. Диаграмма „цвет – величина” близкой спутниковой галактики NGC 4627.

ния этих звезд по телу галактики выявило их концентрацию к центру галактики. В этой галактике присутствуют в небольшом количестве и более яркие голубые звезды (рис. 4.17) — вероятные голубые сверхгиганты. К сожалению, мы не имеем изображения всей галактики, чтобы подробно изучить распределение в ней всех типов звезд. Полученная диаграмма „цвет – величина” указывает на то, что NGC 4627, возможно, является не эллиптической, а иррегулярной галактикой с вялым звездообразованием. На это указывает цвет галактики ( $(B - V) = 0.62$  (RC3)), а также наличие эмиссионных линий  $OII$  в центральной области галактики (Bettoni & Buson, 1987).

Для галактики NGC 4631 в HST архиве имеется два поля, снятых на ACS/WFC (см. табл. 3, приложение А). В поле S1 попадает балдж галактики с многочисленными яркими AGB звездами и часть соседней галактики NGC 4627, поэтому для определения **расстояния** мы выбрали северо-восточный участок изображения. На рис. 4.16 это место отмечено стрелкой. По красным гигантам S1 найдены модуль расстояния  $(m - M) = 29.29$  и  $[Fe/H] = -0.93$ . В поле S2 мы выбрали звезды в южной части снимка, чтобы избежать присутствия звезд галактики NGC 4627. Для этой области снимка (отмечено стрелкой) получены  $(m - M) = 29.22$  и  $[Fe/H] = -1.31$ . Среднее расстояние до галактики NGC 4631 по двум полям:  $(m - M) = 29.26 \pm 0.04$  ( $D = 7.11 \pm 0.13$  Мпк). NGC 4627 близка пространственно к NGC 4631 и для нее  $(m - M) = 29.13$

( $D = 6.70 \pm 0.15$  Мпк).

Для галактики NGC 4631 Sofue et al. (1990) приводят значение расстояния 5.3 Мпк, Rand & van der Hulst (1993) используют значение 7.5 Мпк.

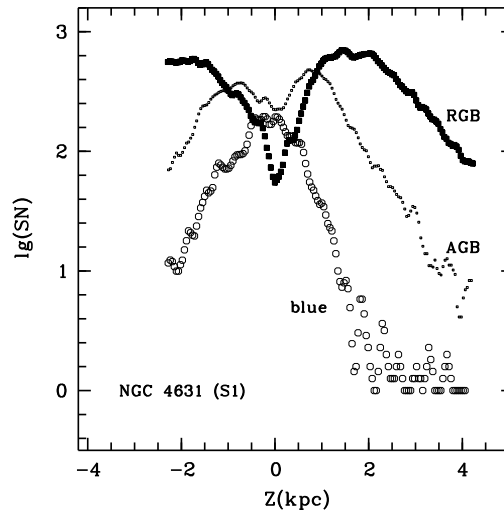


Рис. 4.18: Распределение численной плотности звезд поля S1 вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 4631. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов.

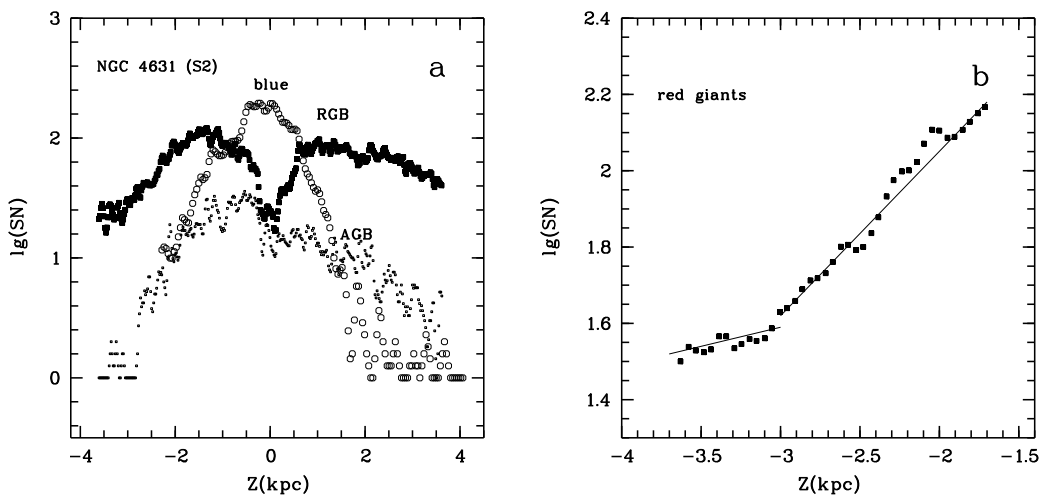


Рис. 4.19: Распределение численной плотности звезд поля S2 вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 4631. Обозначения те же, что на рис. 4.18.

В архиве HST имеются снимки двух полей галактики NGC 4631 (рис. 4.16). **Распределения численной плотности звезд** вдоль оси  $Z$  в поле S1 (рис. 4.18) имеют симметричный относительно плоскости галактики вид и принципиально не отличаются от аналогичных распределений в галактиках IC 2233 и IC 5052. Плотность числа молодых звезд близка к нулю на расстоянии  $\sim 2.0$  кпк от плоскости галактики, AGB



звезды простираются до расстояния 4.0 кпк, а изменения градиента в распределении RGB звезд на графике (рис. 4.18) не наблюдается из-за недостаточности размера поля. Надо иметь в виду, что на рис. 4.18 представлены распределения звезд вдоль оси  $Z$  недалеко от центра галактики, где все звездные подсистемы имеют максимальные размеры. На рис. 4.19а аналогичные распределения звезд представлены для поля S2. Распределение молодых звезд имеет симметричную относительно плоскости галактики форму и присутствие соседней галактики NGC 4627 никак не влияет на форму их распределения по оси  $Z$ . Совершенно иначе смотрятся распределения AGB и RGB звезд (рис. 4.19а). Если южная сторона галактики (противоположная от соседней NGC 4627) имеет распределения звезд, не отличающиеся от распределений в других галактиках, то северная сторона галактики имеет явную асимметрию. AGB звезды простираются здесь до 4 кпк (2.8 кпк на северной стороне галактики) и имеют максимальное значение поверхностной плотности в 2.3 раза меньше, чем на южной стороне. RGB звезды на южной стороне не имеют видимых аномалий в своем распределении по оси  $Z$ . При  $Z = 3.1$  кпк наблюдается граница толстого диска и гало (рис. 4.19b). На северной стороне галактики RGB звезды, аналогично AGB звездам, имеют более пологое и более протяженное распределение и уменьшенное в 1.5 раза значение максимальной плотности. Для объяснения

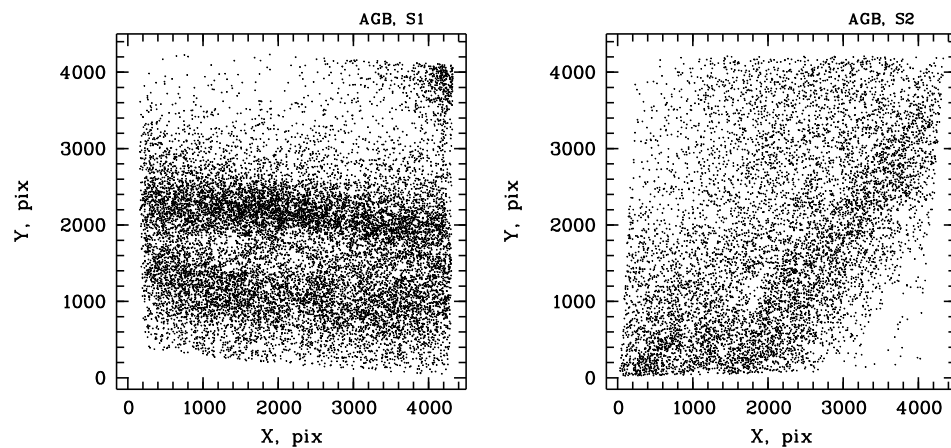


Рис. 4.20: Пространственное распределение AGB звезд в полях S1 и S2 в NGC 4631.

распределения наиболее убедительным представляется следующее рассуждение. Взаимодействие галактик не влечет за собой деформацию толстого диска и гало NGC 4631, а наблюдаемые распределения (рис. 4.18, 4.19а,b) являются просто суммой распределений звезд отдельных галактик — NGC 4631 и NGC 4627. Но простое суммирование дало бы

превышение плотности звезд на северной стороне галактики NGC 4631, что противоречит наблюдаемой картине. Поэтому приходится ввести существенное поглощение света в газопылевом диске или гало галактики NGC 4627. Кроме того, необходимо предполагать единственное расположение галактик: NGC 4627 находится в пределах толстого диска NGC 4631. В этом случае AGB звезды северной стороны NGC 4631 испытывают поглощение света и оказываются на диаграмме „цвет – величина” (рис. 4.17) ниже той TRGB границы, которая разделяет AGB и RGB звезды. Поэтому при подсчете звездной плотности AGB звезд происходит занижение вычисляемой величины плотности. Уменьшение максимальной плотности AGB звезд в 2.3 раза указывает на то, что при таком предположении среднее поглощение в полосе  $I$  должно достигать одной звездной величины, что вполне допустимо (Golla et al., 1996, Martin & Kern, 2001). Вклад карликовой галактики NGC 4627 может выявиться в том, что на рис. 4.19а будет наблюдаться непрерывное пространственное распределение AGB звезд, растянутое вдоль оси  $Z$  и принадлежащее двум галактикам. Аналогичным образом можно объяснить и асимметрию распределения RGB звезд. Для объяснения разницы в уменьшении максимумов плотности AGB и RGB звезд (2.3 и 1.5 раза соответственно) следует иметь в виду, что RGB звезды имеют более обширное пространственное распределение и могут в меньшей степени экранироваться предполагаемым газопылевым диском карликовой галактики NGC 4627. Существование такого газопылевого диска (spiral 4), возможно принадлежащего галактике NGC 4627, наблюдается по распределению излучения в нейтральном водороде (Rand & van der Hulst, 1993, Rand, 1994).

На рис. 4.20 приведены распределения AGB звезд по телу галактики NGC 4631 в полях S1 и S2. На рис. 4.20 (поле S1) газопылевая область в плоскости галактики делит диск AGB звезд на две части, в каждой из которых видно падение плотности числа звезд к краю диска и к центру галактики, где плотность числа звезд уменьшается из-за яркости диска и присутствия поглощающей материи. Сгущение звезд при  $X = 4000$  и  $Y = 4000$  принадлежит галактике NGC 4627. На рис. 4.20 (поле S2) плоскость галактики проходит под углом  $50^\circ$ . К югу от плоскости галактики диск AGB звезд виден без каких-либо иррегулярностей. К северу от плоскости галактики AGB звезды распределены весьма неравномерно. Сгущение звезд при  $X = 500$  и  $Y = 500$  принадлежит

продолжению диска AGB звезд, который наблюдается на рис. 4.20 (поле S1). Наблюдаемую на рис. 4.20 (поле S2) малую плотность числа звезд при  $X = 800$  и  $Y = 3000$  можно объяснить либо влиянием газопылевого облака, видимого на карте HI (Rand, 1994), либо неравномерностью деформации звездного диска NGC 4631. При дальнейшем удалении от NGC 4627 вдоль диска NGC 4631 при  $X = 2000$  и  $Y = 3500$  (поле S2) снова наблюдается повышение плотности числа AGB звезд, что можно объяснить только физической деформацией толстого диска и рассеянием составляющих его звезд. Наблюдаемый в HI spur3 NGC 4631 (Rand & van der Hulst, 1993, Golla et al., 1996) примерно соответствует данному месту галактики.

Вид распределения RGB звезд подобен распределению AGB звезд. Примерная экстраполяция размеров гало по рис. 4.19а дает приближенное значение 8–10 кпк. Спектральные наблюдения NGC 4631 выявили присутствие эмиссионных линий до расстояний  $Z = 7$  кпк (Martin & Kern, 2001), что примерно согласуется с результатами наших измерений размеров гало.

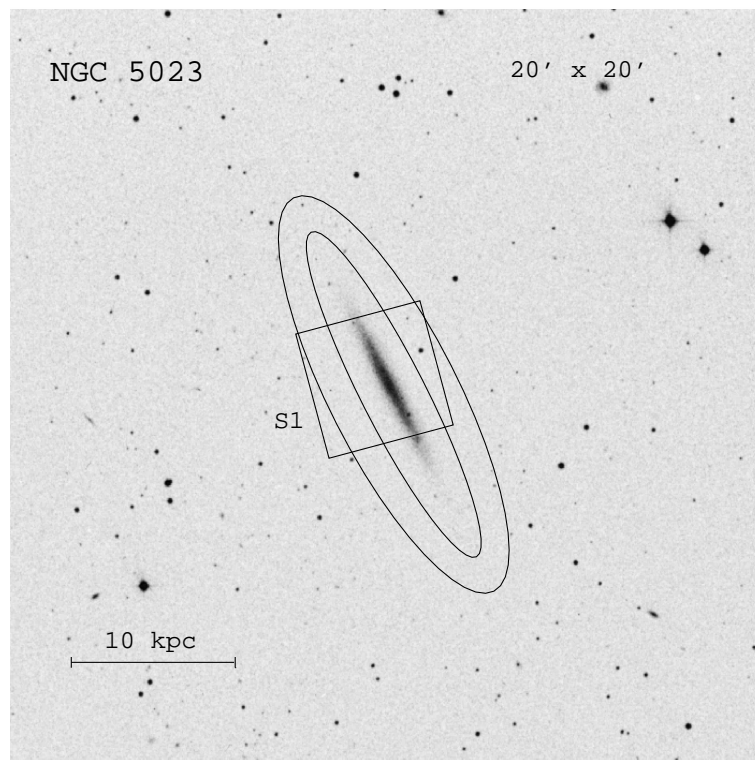


Рис. 4.21: DSS-2 изображение галактики NGC 5023 с указанием положения ACS/WFC поля. Эллипсами обозначены границы найденных толстого диска и гало.

## 4.7 Галактика NGC 5023

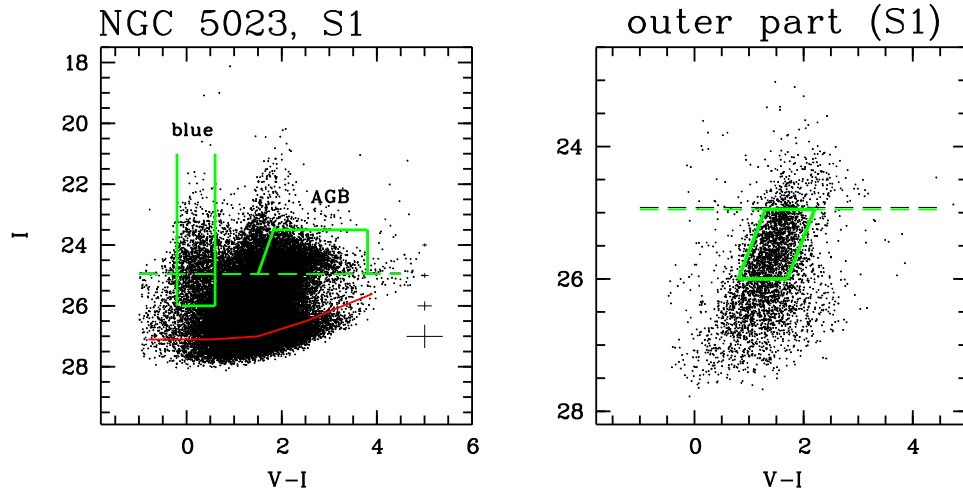


Рис. 4.22:  $[(V - I), I]$  диаграммы исследуемого поля галактики NGC 5023. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Слева. Серой линией очерчены области AGB и голубых звезд. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия). Справа. Ромбом показана область красных гигантов, использованная нами для вычисления распределения звезд.

Исследования выявили в NGC 5023 искривления в диске, которые наблюдаются и в дисках NGC 4244 и в дисках нашей Галактики (Florido et al., 1991). Поскольку галактика NGC 5023 видна с ребра (рис. 4.21), то невозможно связать эти искривления с какими-либо проявлениями в морфологии этой галактики. При наблюдении в нейтральном водороде яркое тело галактики имеет гладкую форму, а водородный контур плотности имеет максимальный размер по оси  $Z = \pm 2.0$  кпк. Видны также отдельные, более удаленные, водородные облака (Swaters et al., 2002a).

Результаты звездной фотометрии NGC 5023 представлены на диаграмме „цвет – величина” (рис. 4.22). Для галактики NGC 5023 мы определили **модуль расстояния**  $(m - M) = 28.94$  ( $D = 6.14 \pm 0.14$  Мпк) и среднее значение металличности  $[Fe/H] = -1.76$ .

Для галактики NGC 5023 van der Kruit & Searl (1982) принимали расстояние 8 Мпк (по измерению скорости). На основе фотометрии ярчайших сверхгигантов Sharina et al. (1999) определили расстояние до NGC 5023 ( $D = 5.4$  Мпк). Swaters (2002a) использует значение  $D = 4.8$  Мпк.

**Распределения разных типов звезд** в галактике NGC 5023 (рис. 4.23) аналогич-

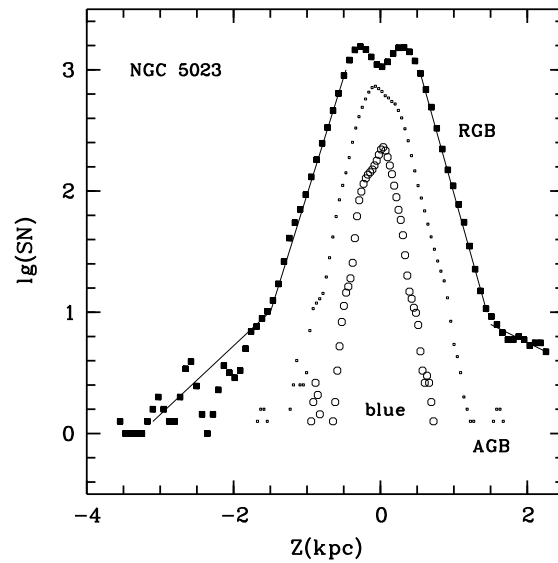


Рис. 4.23: Распределение численной плотности звезд вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 5023. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов.

ны распределениям в галактиках IC 2233 и IC 5052. Галактика NGC 5023 имеет очень вытянутую форму, отношение осей у нее  $a/b = 9.3$ . Молодые звезды сосредоточены в тонком диске в области  $Z = \pm 0.8$  кпк. Диск AGB звезд имеет толщину  $Z = \pm 1.3$  кпк от плоскости галактики, а диск из красных гигантов имеет размер  $Z = \pm 1.6$  кпк. За пределами толстого диска уверенно прослеживается гало из красных гигантов, толщина которого  $Z = \pm 3.2$  кпк. Переход от толстого диска к гало наблюдается при низкой светимости:  $lg(SN) = 1.0$ . Если бы эта галактика располагалась немного дальше, то число регистрируемых гигантов уменьшилось бы, и указанных экспозиций (см. табл. 2, Приложение А) было бы недостаточно для уверенной регистрации гало.

## 4.8 Галактика IC 5052

В изолированной галактике IC 5052 Rossa & Dettmar (2003) выявили яркое гало и протяженную эмиссию в радиодиапазоне. Однако размеры гало авторы не приводят. На представленных Ryan-Weber et al. (2003) контурах плотности, IC 5052 имеет толщину по оси  $Z = 3.6$  кпк, однако видны и более удаленные водородные волокна. Изображение галактики из DSS-2 обзора помещено на рис. 4.24. Результаты звездной фотометрии ACS поля (см. табл.2, Приложение А) представлены в виде диаграмм „цвет – величина” на рис. 4.25.

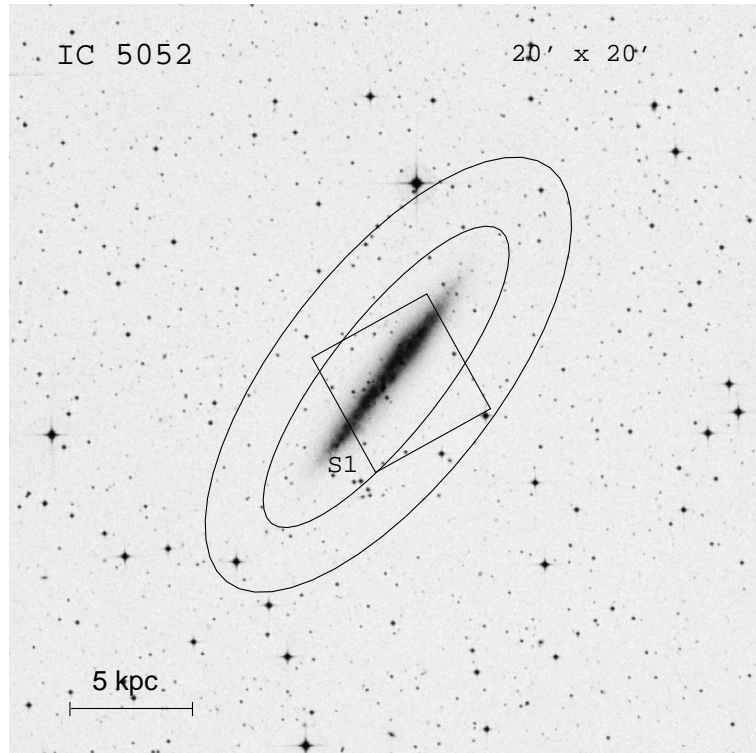


Рис. 4.24: DSS-2 изображение галактики IC 5052 с указанием положения ACS/WFC поля. Эллипсами обозначены границы найденных толстого диска и гало.

Для галактики IC 5052 методом TRGB нами были получены **модуль расстояния**  $(m - M) = 28.75$  ( $D = 5.62 \pm 0.20$  Мпк) и средняя металличность  $[Fe/H] = -0.95$ . Для галактики IC 5052 Karachentsev et al. (2004) приводят значение расстояния 6.3 Мпк, Rossa & Dettmar (2003) дают значение 7.9 Мпк, Ryan-Weber et al. (2003) — 5.9 Мпк, а Becker et al. (1988) — 9.2 Мпк.

**Распределения звезд** разного возраста в галактике IC 5052 (рис. 4.26) практически не отличается от распределений звезд в галактике IC 2233. Молодые звезды сосредоточены в тонком диске в области  $Z = \pm 1.0$  кпк. AGB звезды занимают интервал  $Z = \pm 1.6$  кпк от плоскости диска, а красные гиганты образуют толстый диск размером  $Z = \pm 1.9$  кпк, за границей которого плотность красных гигантов гало также уменьшается, но уже с меньшим градиентом. Экстраполяция до фоновых звезд дает размер гало  $Z = \pm 4.0$ . Следует обратить внимание на относительно больший градиент падения плотности красных гигантов в гало галактики IC 5052, чем в гало IC 2233. Две эти галактики отличаются отношением осей:  $a/b = 8.9$  у галактики IC 2233 и  $a/b = 7.4$  у IC 5052.

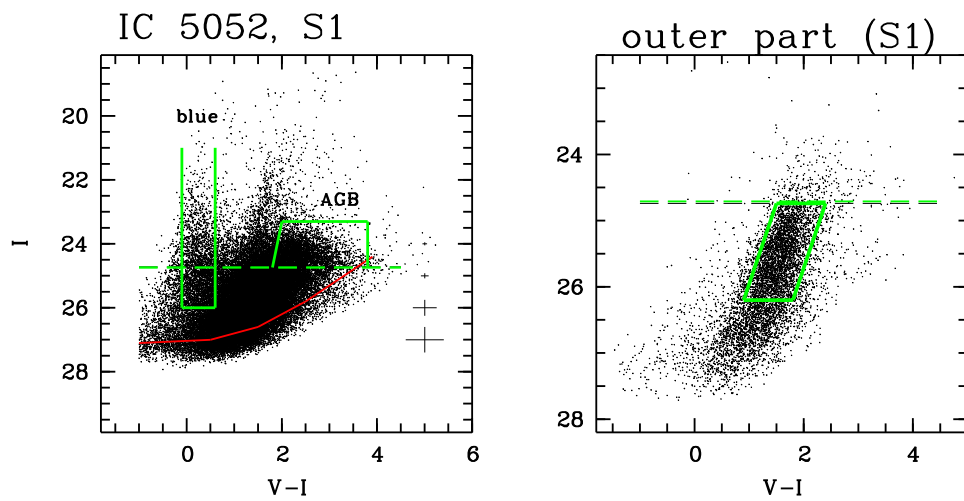


Рис. 4.25: Диаграммы „цвет – величина” поля S1 галактики IC 5052. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Серой линией очерчены области AGB и голубых звезд. Серым ромбом показана область исследуемых красных гигантов. Указаны боксы ошибок фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд.

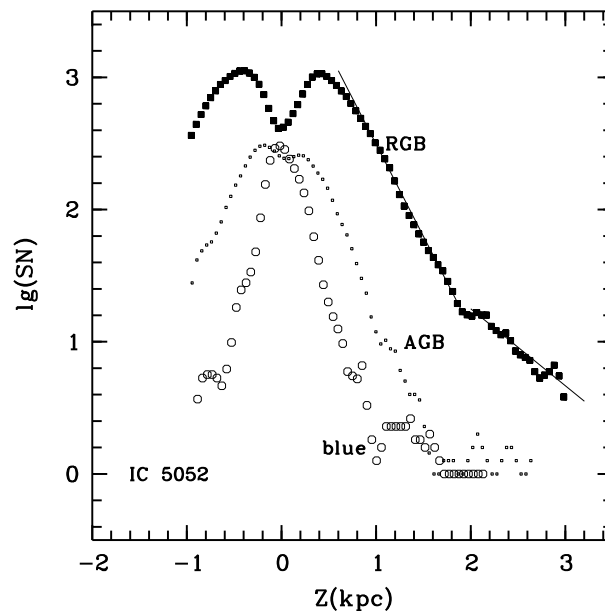


Рис. 4.26: Распределение численной плотности звезд вдоль оси  $Z$  в галактике IC 5052. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов.

## 4.9 Галактика NGC 4945

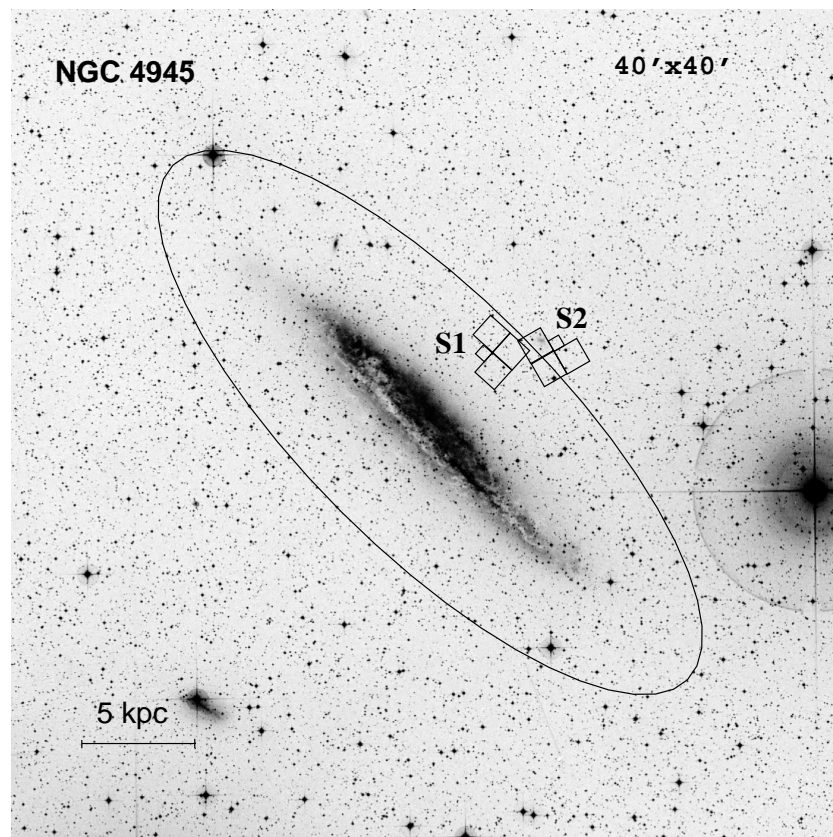


Рис. 4.27: DSS-2 изображение NGC 4945. Показаны поля, полученные на HST/WFPC2.

В сейфертовской галактике NGC 4945 (рис. 4.27), расположенной в группе Центавра, изучена в основном ядерная область. Наблюдения в радиодиапазоне на частоте  $1.4\text{GHz}$  указывают на эмиссию от компактного ядерного источника, видимость которого в визуальной области затруднена из-за газа и пыли в спиральных ветвях (Mills & Glanfield, 1965). Ядро содержит яркий мазер на  $\nu = 22\text{GHz}$ , работающий на молекулах  $\text{H}_2\text{O}$  (dos Santos & Lepine, 1979). В ядре отождествлено 80 линий от 19 молекул, определены изотопы углерода, азота, кислорода и серы (Wang et al., 2004). Эти наблюдения интерпретируются либо в терминах быстро вращающегося молекулярного кольца вблизи ядра, либо на основе двух групп облаков вдоль луча зрения, одна из которых движется по направлению к ядру, другая — него.

Анализ кривой вращения дает значение общей массы галактики  $M = 8.8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  (Ables et al., 1987). NGC 4945 является сильнейшим излучателем в ИК диапазоне, наблюдается явление потери массы в галактике (Nakai, 1989) и отсутствие радиогало



(Elmoultie et al., 1997). Пространственная и кинематическая корреляция между распределением  $CO$  и  $HI$  проведена Ott et al. (2001). Внешние области NGC 4945 с точки зрения исследования звездного населения не привлекали внимания астрономов.

Mauersberger et al. (1996) суммировали попытки определить расстояние до этой галактики по принадлежности к группе Центавра. Они приняли расстояние до нее равным 3.7 Мпк, взяв среднее значение по всем известным определениям расстояния до членов группы. Диаграмма „цвет – звездная величина” NGC 4945 помещена на

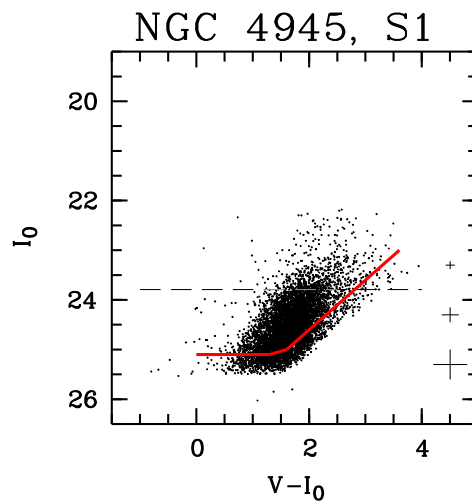


Рис. 4.28:  $[(V - I), I]$  диаграмма поля S1 галактики NGC 4945 с учетом поглощения. Пунктиром показано положение  $I_{TRGB} = 24.13$ . Сплошная линия демонстрирует уровень 50% полноты выборки звезд. Указаны боксы ошибок фотометрии.

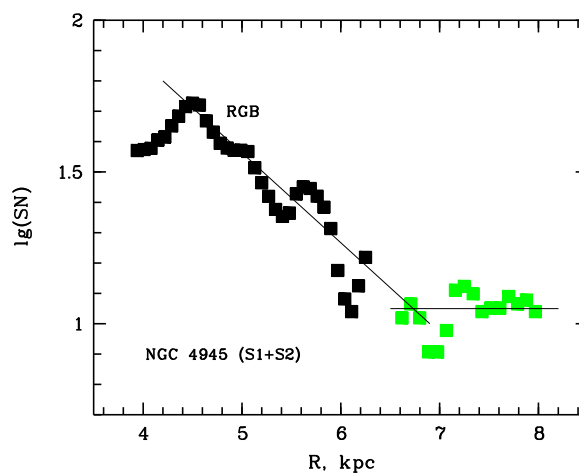


Рис. 4.29: Распределение численной плотности красных гигантов в исследуемых полях S1 и S2 галактики NGC 4945.

рис. 4.28. На основе TRGB метода нами определено положение вершины ветви крас-

ных гигантов  $I_{TRGB} = 24.13 \pm 0.05$  и оценен модуль расстояния до самой галактики:  $(m - M) = 27.91 \pm 0.25$  ( $D = 3.82 \pm 0.4$  Мпк).

Для исследования **распределения звезд вдоль радиуса** мы анализировали две площадки S1 и S2 (рис. 4.29). Второе поле S2 снято только в  $V$  фильтре. Из-за удаленности полей от центра галактики подавляющее большинство объектов на диаграмме „цвет – величина” могут быть только красными гигантами с небольшой примесью звезд фона. Анализ распределения этих звезд показан на рис. 4.29. Видно изменение градиента числа звезд на стыке исследуемых площадок. Изменение градиента происходит на расстоянии  $R = 6.8$  кпк от центра. Возможны два варианта интерпретации этой ситуации. Первый: здесь мы видим границу между толстым диском и гало (рис. 4.27). Второй: из-за того, что галактика расположена на низкой галактической широте ( $b \sim 12^\circ$ ), здесь мы имеем выход на фоновые звезды, то есть гало у галактики мы не видим. Для прояснения данного вопроса требуются дополнительные площадки для исследования.

#### 4.10 Общие выводы по исследованию звездных подсистем в галактиках, видимых с ребра.

В девяти галактиках, видимых с ребра проведена звездная фотометрия и построены диаграммы „цвет – величина”. Используя полученные диаграммы, мы выделили звездное население разного возраста и провели исследование распределения звездной плотности перпендикулярно плоскости галактики. Общие принципы строения звездных подсистем галактик, которые были отмечены при изучении галактик, видимых в плашмя, оказались верны и для галактик видимых с ребра: молодые сверхгиганты концентрируются в пределах тонкого диска и имеют экспоненциальное падение плотности вдоль оси  $Z$ ; толстый диск состоит большей частью из красных гигантов и незначительного числа звезд асимптотической ветви гигантов; звездное гало (в тех галактиках, в которых мы его видим) состоит из красных гигантов меньшей средней металличности, чем гиганты толстого диска. Относительные размеры гало, тонкого и толстого дисков меняются от галактики к галактике. Гало галактик, видимых с ребра не имеет сферической формы. Выявлена тенденция: чем больше галактика сплюснута, тем больше сплюснено ее гало.

## Глава 5

# Структура иррегулярных галактик

Распространение наших исследований звездного состава подсистем и на иррегулярные галактики связано с тем, что по многим физическим параметрам не существует границы между спиральными и иррегулярными галактиками, то есть оба типа галактик представляются единым множеством дисковых галактик разных масс. Сравнительное исследование параметров звездных подсистем иррегулярных и спиральных галактик дает возможность выявить влияние массы галактики на ее звездную морфологию.

Карликовые иррегулярные галактики, видимые плашмя и с ребра, исследованы в работах Tikhonov & Galazutdinova (2002) и Тихонова (2005а,б), где показано существование у них тонкого и толстого диска и отсутствие звездных гало, которые наблюдаются у массивных спиральных, а иногда и у иррегулярных галактик. Чтобы прояснить вопрос о существовании или отсутствии гало, нами изучены яркие иррегулярные галактики, занимающие промежуточное место между массивными спиральными и карликовыми иррегулярными галактиками. Не исключено, что ряд исследователей могут относить некоторые из этих галактик к спиральным, что только подчеркивает сложность и условность разделения подобных галактик на морфологические типы.

Более простое строение иррегулярных галактик, по сравнению со спиральными, позволяет сделать оценку численности и массы красных гигантов в галактиках. Первая такая оценка была нами сделана для галактики IC 1613 (Tikhonov & Galazutdinova, 2002), где измеренное отношение массы красных гигантов к светимости галактики равно  $M_{red}/L_{gal} = 0.16$ . Для вычисления всей звездной массы галактики следует учесть малое время нахождения звезды в стадии красного гиганта. После таких поправок отношение  $M_{stars}/L_{gal}$  может увеличиться в десятки раз.

## 5.1 Галактика NGC 2366

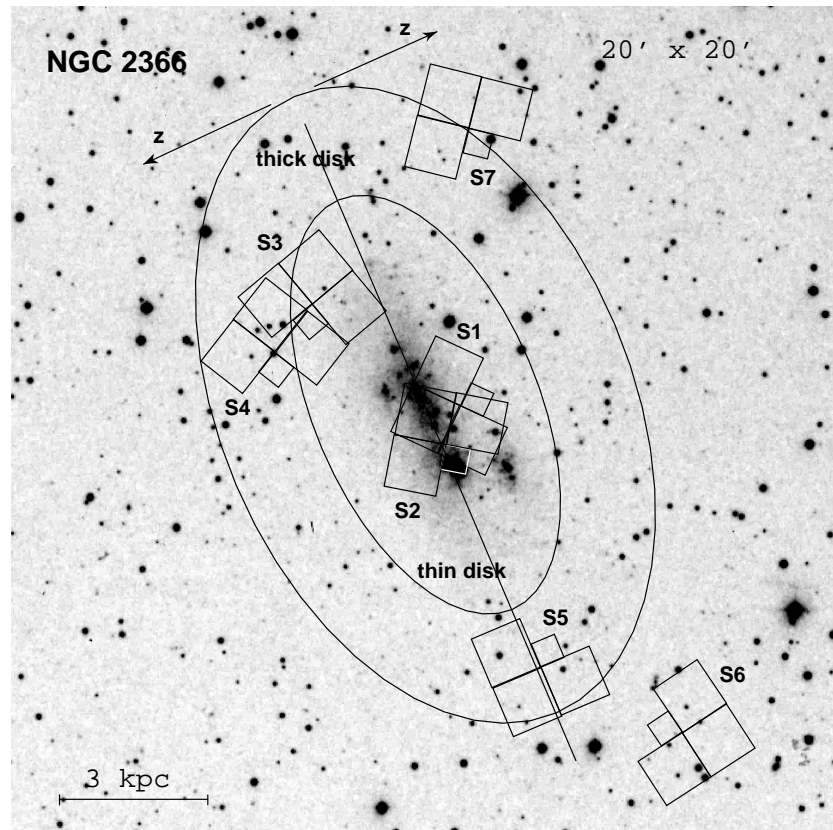


Рис. 5.1: Изображение NGC 2366, взятое из DSS-2 обзора. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2. Указаны направления  $Z$ , вдоль которых производился анализ распределения звезд. Внутренний эллипс ограничивает пространство тонкого диска. Внешний соответствует границе между толстым диском и гало.

Галактика NGC 2366 (рис. 5.1) классифицируется как иррегулярная галактика с баром, IB(s)m, типа БМО и относится к группе галактик M81. На снимках в фильтрах  $UBVJHKH_{\alpha}$  (Hunter et al., 2001) видна овальная форма диска, видимого под углом почти  $90^{\circ}$ , с экспоненциальным падением яркости от центра к краю. Наблюдаемое асимметричное распределение ярких молодых звезд вдоль главной оси галактики связано с наличием областей звездообразования. Особо активное звездообразование идет в области гигантского  $HII$  комплекса NGC 2363, но в целом, темп звездообразования в NGC 2366 не намного превышает среднее значение темпа звездообразования в других галактиках подобного типа.

Aparicio et al. (1995), исследуя возраст звезд NGC 2366, указали на вспышку звездообразования в этой галактике, происходившую  $\sim 50$  млн. лет назад. Однако, в некото-

рых областях звездообразования видны звезды не старше 6 млн. лет, то есть активное звездообразование продолжается в этой галактике и в настоящее время.

На карте распределения нейтрального водорода NGC 2366 заметны две вытянутые структуры, расположенных параллельно большой оси (Hunter et al., 2001). Изучив распределение молодых звезд галактики, мы интерпретируем эти структуры как слабые спиральные ветви. Поведение азимутально-усредненной поверхностной плотности  $HI$  в NGC 2366 сравнимо с поведением поверхностной плотности  $HI$  в иррегулярных галактиках, за исключением внешних частей, где падение плотности происходит медленнее и излучающие области тянутся дальше (Hunter et al., 2001). Внешняя граница распределения  $HI$  примерно согласуется с внешними частями оптического изображения, но имеет асимметрию относительно изофоты в  $V$  фильтре. Richer & Sancisi (1994) отмечают, что эта особенность является общей для дисковых галактик. Цвет галактики вдоль радиуса не изменяется (Hunter et al., 1999), как в большинстве иррегулярных галактик.

Для NGC 2366 были получены следующие оценки **расстояния**:

$m - M = 27.07$ , Sandage & Tammann (1974) (по голубым сверхгигантам);

$m - M = 27.10$ , de Vaucouleurs (1978) (по голубым сверхгигантам);

$m - M = 27.62$ , Tikhonov et al. (1991) (по голубым сверхгигантам);

$m - M = 27.68$ , Tolstoy et al. (1995) (по цефеидам);

$m - M = 27.67$ , Thuan & Izotov (2005) (TRGB метод).

Для NGC 2366 на космическом телескопе им. Хаббла получено достаточно много снимков разных участков галактики (см. табл.2, Приложение А), и мы использовали это обстоятельство для изучения распределения звезд и измерения расстояния.

Диаграммы „цвет – величина” центральных областей (S1, S2) являются вполне обычными диаграммами для галактик с активным звездообразованием (рис. 5.2). В удаленных от центра площадках (S4, S6, S7) на диаграммах видны только красные гиганты с немногочисленными AGB звездами (S3). Верхняя граница ветви красных гигантов определялась по 4 площадкам (S1, S2, S3, S4). Среднее значение  $I_{TRGB}^0 = 23.47$ , что соответствует модулю расстояния  $(m - M) = 27.48 \pm 0.15$  ( $D = 3.13 \pm 0.25$  Мпк). Средняя металличность красных гигантов составляет  $[Fe/H] = -1.96$ .

Для изучения *распределения звезд* по телу галактики были выбраны два направ-

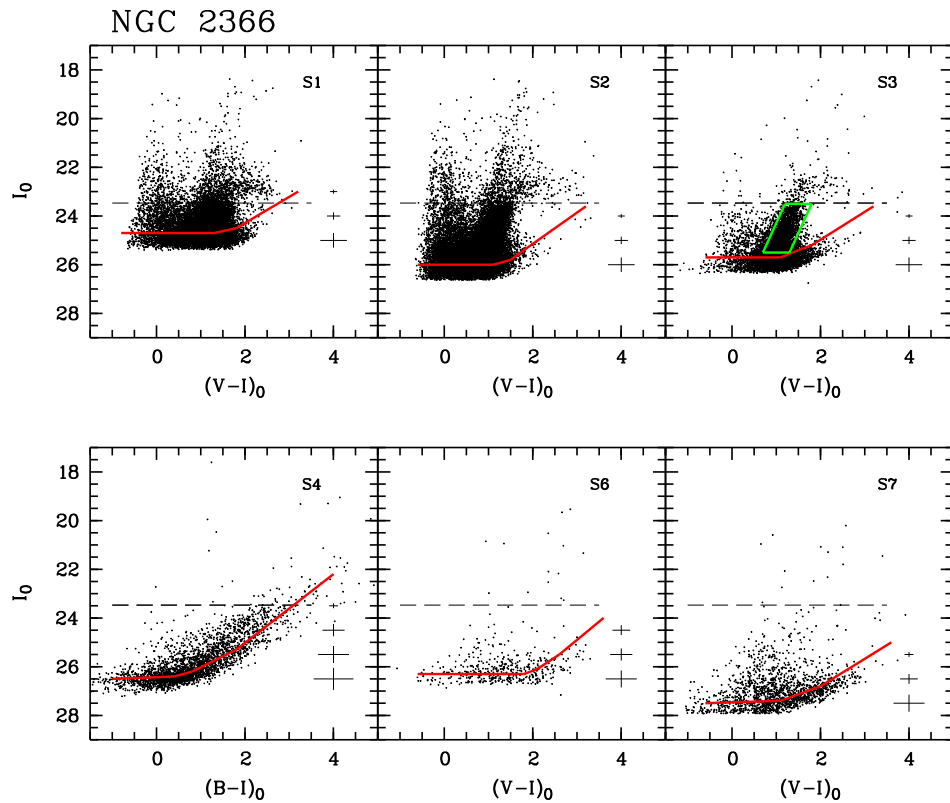


Рис. 5.2: Диаграммы „цвет — величина” для исследуемых полей (S1, S2, S3, S4, S6, S7) галактики NGC 2366. Пунктиром показано положение  $I_{TRGB}^0 = 23.47$  с учетом поглощения света, сплошной линией — уровень 50% полноты выборки звезд. Указаны боксы фотометрических ошибок. На диаграмме площадки S3 ромбом очерчена область ветви красных гигантов, используемая нами для определения параметров распределения.

ления: перпендикулярно экваториальной плоскости галактики (вдоль оси  $Z$ ) и вдоль радиуса (от центра галактики к ее периферии).

На рис. 5.3а видно, что на фоне общего падения численной плотности звезд при удалении от центра, существует зона повышенной плотности молодых звезд на расстоянии 0.9 кпк от центра галактики. Эта зона совпадает с одним из двух водородных образований, тянущихся параллельно большой оси галактики. Hunter et al. (2001) и Thuan et al. (2004) интерпретируют вытянутые водородные структуры как  $HI$  кольцо, наклоненное к лучу зрения под углом  $60^\circ$ . Найденная нами повышенная плотность голубых звезд в области этого предполагаемого кольца позволяет представить ситуацию по-иному. Во-первых, возможно, что эта вытянутая звездно-газовая структура связана с приливным взаимодействием NGC 2366 с соседними галактиками (например, с NGC 2403). Во-вторых, возможно, что галактика NGC 2366 видна не под углом  $90^\circ$ , и указанные

вытянутые образования являются просто слабыми спиральными ветвями галактики. Подобные галактики с малозаметной спиральной структурой также находятся в группе M81. Это NGC 4236 и IC 2574. В противоположность молодым звездам, красные гиганты не проявляют повышения численной плотности в зоне предполагаемого кольца или спиральных ветвей (рис. 5.3а), что не противоречит гипотезе о существовании спиральной структуры в этой галактике, так как подобное независимое от спиральной структуры распределение красных гигантов наблюдается и в явно спиральной галактике NGC 300 (Tikhonov, Galazutdinova & Drozdovsky, 2005).

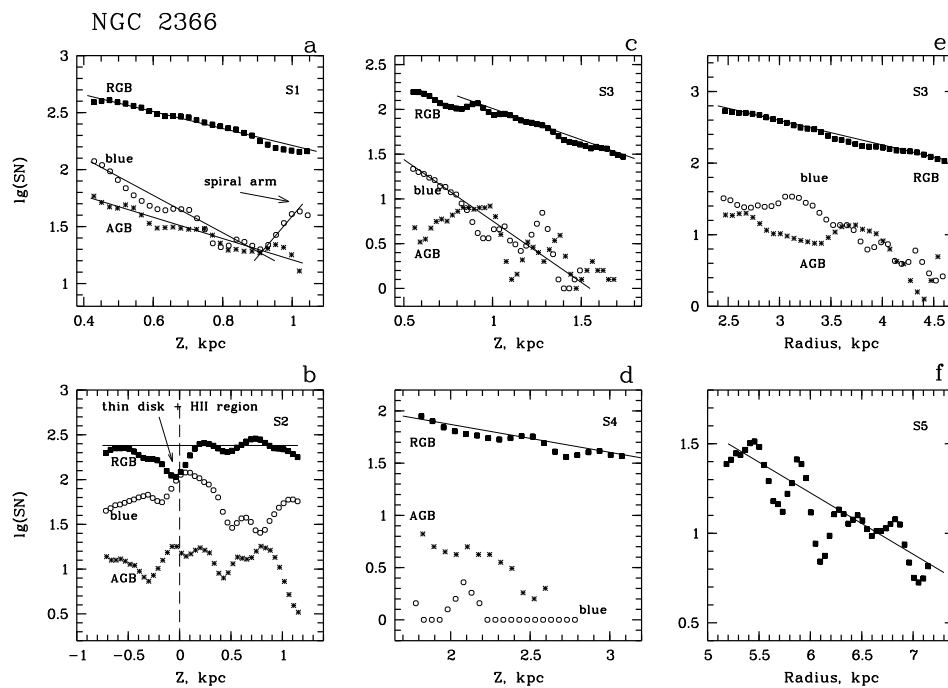


Рис. 5.3: Распределение численной плотности звезд разного типа в исследуемых полях (S1, S2, S3, S4, S5) NGC 2366 вдоль оси  $Z$  и вдоль радиуса  $R$ . Полными квадратами обозначены красные гиганты, кружками – голубые звезды, звездочками – звезды асимптотической ветви гигантов.

Граница тонкого диска NGC 2366 определяется на основе распределения звезд в полях S3 (рис. 5.3с,е) и S4 (рис. 5.3д). На рис. 5.3с и 5.3д численность голубых звезд падает до нуля на расстоянии 1.5 – 2.2 кпк от плоскости галактики. AGB звезды этих полей простираются несколько дальше голубых звезд, но малая численность AGB звезд ведет к существенным флуктуациям их плотности и неопределенности вычисления границ их распространения. Красные гиганты этих же полей имеют малый градиент падения плотности, демонстрируя свою значительную протяженность и монотонность падения

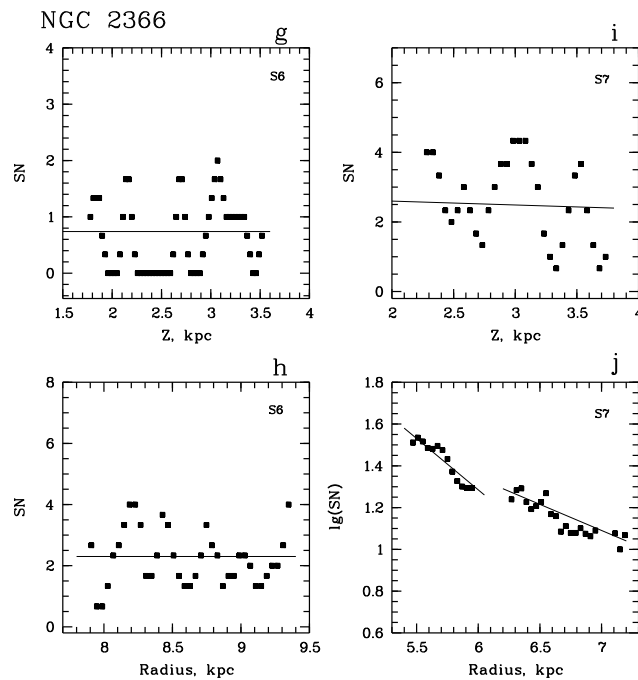


Рис. 5.3: *Продолжение:* Распределение численной плотности звезд разного возраста в полях S6 и S7 галактики NGC 2366 вдоль оси  $Z$  и вдоль радиуса  $R$ .

плотности. Более удаленная от центра галактики площадка S5 снята в одном фильтре. Поскольку в этой области могут быть только фоновые звезды и красные гиганты NGC 2366, то выбирая интервал светимости звезд поля S5 между TRGB и фотометрическим пределом с 50 % полнотой выборки (на основе фотометрии искусственных звезд), мы будем иметь список звезд, состоящих большей частью из красных гигантов. Распределение звезд, выбранных таким образом, демонстрирует падение численной плотности вдоль радиуса (рис. 5.3f) без явных признаков границы между толстым диском и гало.

В распределении красных гигантов вдоль радиуса в поле S7 (рис. 5.3j) наблюдается явное изменение градиента падения численной плотности на расстоянии 6.1 кпс от центра. Можно предполагать, что здесь мы видим границу между толстым диском и гало. Резкий провал в распределении звезд, видимый на этом графике, связан со стыковкой ПЗС чипов матрицы и не имеет отношения к реальному распределению звезд. В распределении звезд этой площадки перпендикулярно радиусу (рис. 5.3i) отсутствует градиент изменения плотности звезд, что и должно быть, если звезды поля S7 принадлежат галактике NGC 2366.

В самом удаленном поле S6 (рис. 5.3 g,h) в распределении красных гигантов отсут-



ствуется падение численной плотности, что может указывать либо на отсутствие в этом поле звезд галактики NGC 2366, либо на очень малые градиенты падения численной плотности звезд гало, выявление которых требует обработки больших участков гало галактики.

В итоге, при исследовании звездного населения галактики NGC 2366 определены размеры тонкого диска вдоль оси  $Z \sim 3 \div 4$  кпк и толстого диска вдоль радиуса в направлении на площадку  $R_{S7} \sim 12$  кпк (рис. 5.1). Предполагается существование гало, но для более надежных выводов и определения размеров гало необходимо провести новые наблюдения. Определенные нами размеры звездных подсистем NGC 2366 мало соответствуют тем средним размерам, которые получены для иррегулярных галактик (Тихонов, 2005 а,б), но в большей степени соответствуют размерам подсистем спиральных галактик (Tikhonov et al., 2005), что косвенно подтверждает гипотезу о наличии в NGC 2366 спиральных ветвей.

## 5.2 Галактика NGC 2976

NGC 2976, принадлежащая группе M81, классифицируется как пекулярная галактика SAc(pec) из-за хаотичной клочковатой структуры ее тела в области, где можно было бы ожидать присутствие спиральных ветвей. По массе ( $M_{total} = 3.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ ) и светимости NGC 2976 несколько уступает классической иррегулярной галактике БМО. Наблюдения в оптическом и ИК диапазонах показали, что галактика NGC 2976 не имеет балджа, что делает ее сходной с иррегулярными галактиками.

Bronkalla et al. (1992), исследовав звездный состав галактики, заключили, что у NGC 2976 имеются 2 различных области:

- 1) более массивная система, внутренний диск, в котором сконцентрированы многочисленные молодые ассоциации звезд ( $R < 1.5$  кпк)
- 2) маломассивная система, внешнее гало, которое состоит из звезд, возраст которых превышает 5 млрд. лет.

Названные авторы исследовали поверхностную яркость в NGC 2976 до изофоты  $25^m5$  в  $V$  фильтре, но этого предела совершенно недостаточно для выявления действительно слабых внешних частей галактики.

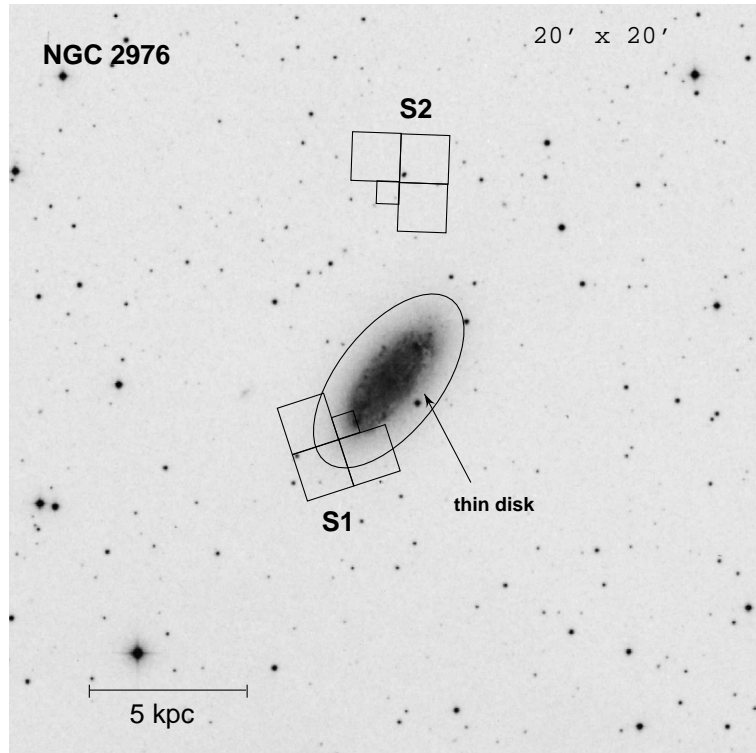


Рис. 5.4: DSS-2 изображение галактики NGC 2976. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2. Эллипсом обозначена граница тонкого диска.

Позднее, Stil (1999) получил профиль поверхностной яркости галактики в фильтре  $I$  в области  $0' - 6'$ . Он разделил внутренние и внешние области галактики по изменению наклона в профиле поверхностной яркости. Было найдено, что граница разделения двух различающихся областей галактики находится на  $R = 90 \div 110''$  ( $1.5 \div 1.8$  кпк) от центра. Существование балджа доказано не было.

Simon et al. (2003) проанализировали поля скоростей в  $H_\alpha$  и  $CO$ . Целью авторов было измерение формы профиля плотности распределения темной материи в гало галактики. Параллельно они исследовали распределение звезд, нейтрального и молекулярного водорода. Было найдено, что молекулярный газ сконцентрирован в центральных областях галактики, а распределение  $HI$  и звезд прослеживается до  $170''$  от центра, что незначительно превышает размер указанного на рис. 5.4 тонкого диска. Было отмечено также, что в пределах  $R = 100'' \div 170''$  падение плотности водорода и звезд происходит по сходным зависимостям.

**Расстояние** до NGC 2976 определялось TRGB методом:  $D = 3.56 \pm 0.38$  Мпк (Karachentsev et al., 2002). Наши измерения дают несколько большее значения мо-

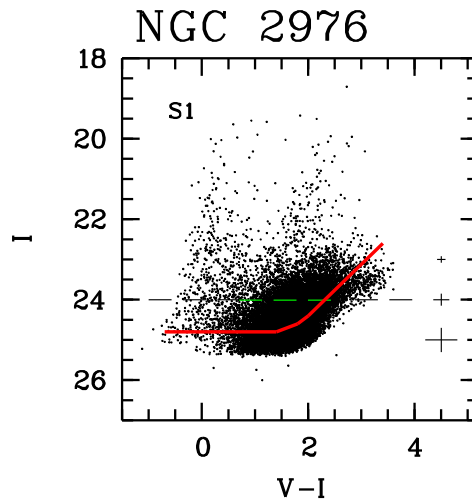


Рис. 5.5:  $[(V - I), I]$  диаграмма поля S1 галактики NGC 2976. Пунктирная линия указывает положение вершины ветви красных гигантов  $I_{TRGB} = 24.02 \pm 0.08$ . Сплошная линия показывает 50% уровень полноты выборки звезд. Справа указаны боксы ошибок.

для расстояния при использовании того же TRGB метода:  $(m - M) = 27.99 \pm 0.20$  ( $D = 3.97 \pm 0.37$  Мпк). Мы считаем наше значение более реальным, поскольку наблюдается взаимодействие NGC 2976 с галактикой M81, которая имеет модуль расстояния  $(m - M) = 27.93 \pm 0.04$ , что соответствует  $D = 3.85 \pm 0.08$  Мпк (Tikhonov et al., 2005).

Полученная нами диаграмма „цвет – величина” поля S1 представлена на рис. 5.5. Хорошо видны ветви голубых и красных сверхгигантов, а также большое количество AGB и RGB звезд. Площадка S2 снята только в одном фильтре (см. табл.2, Приложение А). Поскольку на таком расстоянии от галактики звездный состав поля определяется только фоновыми звездами Галактики и красными гигантами самой NGC 2976, то несложно выполнить селекцию звезд по границе TRGB, оставив в конечном списке только красные гиганты и незначительное количество фоновых звезд.

На рис. 5.6а представлены *распределения звезд* разного возраста NGC 2976 вдоль малой оси. В распределении молодых звезд (голубые сверхгиганты) заметна небольшая асимметрия, но несмотря на это, видно, что численность голубых звезд падает до нуля на расстоянии  $Z \sim 1$  кпк (в области поля S2), что соответствует границе тонкого диска. Распределения AGB и RGB звезд имеют меньшие градиенты изменения численной плотности звезд и более протяженную область своего присутствия. Незначительный размер поля S1 не позволяет представить все тонкости распределения этих звезд в цен-

тральных частях галактики. Отметим только, что вид распределения красных гигантов и AGB звезд в центральных областях NGC 2976 (рис. 5.6a) мало отличается от обычного распределения таких звезд в центральных областях иррегулярных галактик, где флуктуации в распределении яркости фона и поглощающей материи ведут к флуктуациям распределения относительно слабых звезд, какими являются на снимках красные гиганты. Анализ распределения звезд площадки S2 (рис. 5.6b) показывает наличие градиента плотности звезд вдоль радиуса галактики. Это подтверждает предположение о существовании красных гигантов NGC 2976 в поле S2.

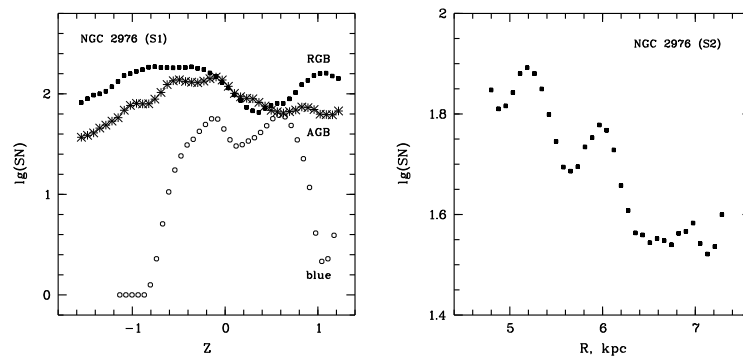


Рис. 5.6: Распределение численной плотности звезд вдоль радиуса галактики NGC 2976. Кружками показано распределение голубых звезд, звездочками — звезд AGB, квадратами — красных гигантов.

Значительный градиент изменения плотности числа звезд в поле S2 указывает на то, что это поле лежит в пределах толстого диска галактики, а не гало, то есть размеры толстого диска NGC 2976 в направлении на S2 не менее 6 кпк. По графику невозможно установить точное значение границы толстого диска, и нужны дополнительные снимки для определения размеров толстого диска и выявления звезд гало.

### 5.3 Галактика NGC 5253

NGC 5253, расположенная в группе Центавра, является ближайшей I0/S0 карликовой галактикой с недавней вспышкой звездообразования по всему телу галактики. DSS-2 снимок галактики NGC 5253 представлен на рис. 5.7. Общая масса NGC 5253 равна  $2 \cdot 10^9 M_{\odot}$  (Bottinelli, Gougenheim & Heidemann, 1972), что составляет 1% от массы нашей Галактики. Сравнение показывает, что светимость NGC 5253 ( $L = 3 \cdot 10^9 L_{\odot}$ ) более чем в 100 раз превосходит светимость самой большой области звездообразования в Га-

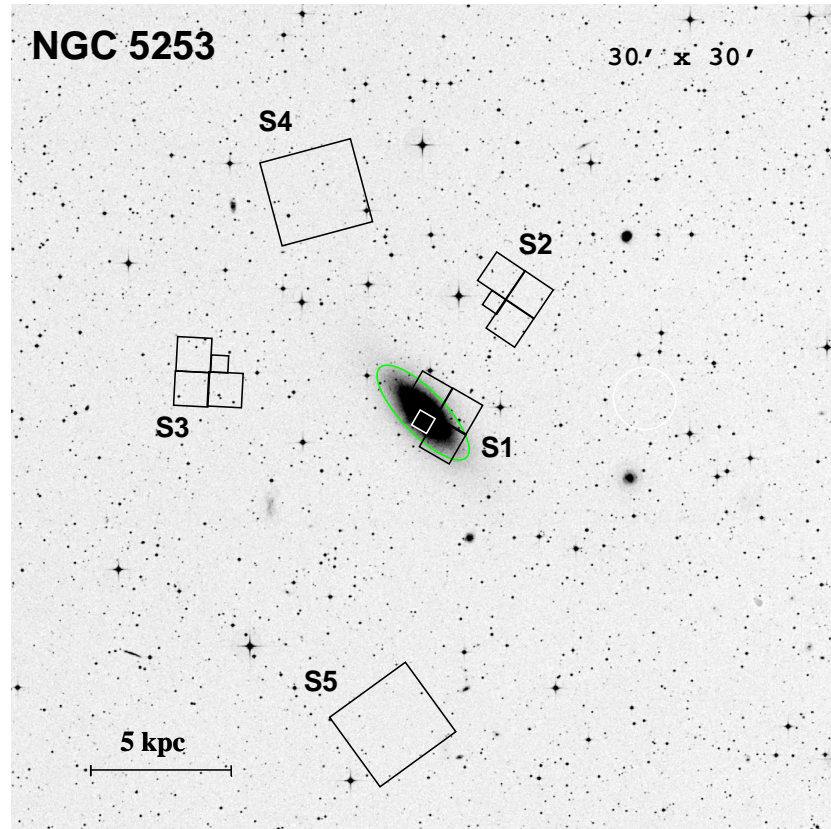


Рис. 5.7: DSS-2 изображение галактики NGC 5253. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2 и ACS/WFC. Серым эллипсом очерчена граница между тонким и толстым диском.

лактике (Beck et al., 1996). Молодые массивные звезды в центральной области NGC 5253 образуют сверхскопление, свойства которого сходны со свойствами шаровых скоплений (Meurer et al., 1995, Gorjian, 1996). Turner, Beck & Hurt (1997) полагают, что очень слабая эмиссия связана с очень низкой металличностью аккрецирующего на галактику газа. Нет другой такой галактики, где при столь мощном звездообразовании имелось бы столь малое содержание  $CO$ . Металличность NGC 5253, определенная Kobulnicky & Skillman (1995), равна  $1/6Z_{\odot}$ , что не отклоняется от средних значений металличности карликовых галактик. Сходное значение металличности дают Ferrarese et al. (2000a). Harris et al. (2004) оценили возраст выделенных ими скоплений в NGC 5253 в 20 млн. лет, а их массу примерно  $10^2 - 10^5 M_{\odot}$ . Gibson et al. (2000) по цефеидам определили **расстояние** до NGC 5253, равное 3.3 Мпк, что соответствует модулю расстояния  $(m - M) = 27.6$ .

На рис. 5.8 представлены диаграммы „цвет – величина” исследованных нами полей

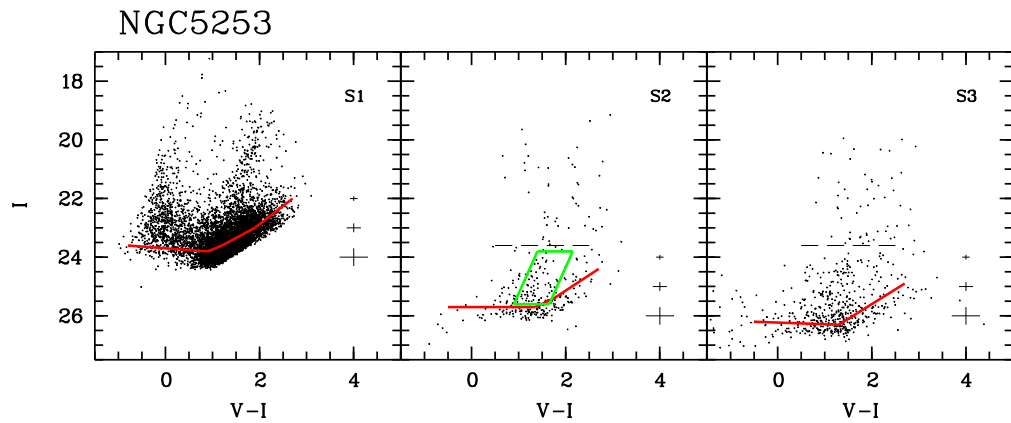


Рис. 5.8: Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики NGC 5253. Пунктирной линией указана предположительная граница TRGB, определенная нами на основе модуля расстояния, полученного Gibson et al.(2000). Нанесены боксы фотометрических ошибок. Уровень 50% полноты выборки звезд указан сплошной линией. Ромбом выделена область ветви красных гигантов поля S2, используемая для анализа распределения их численной плотности.

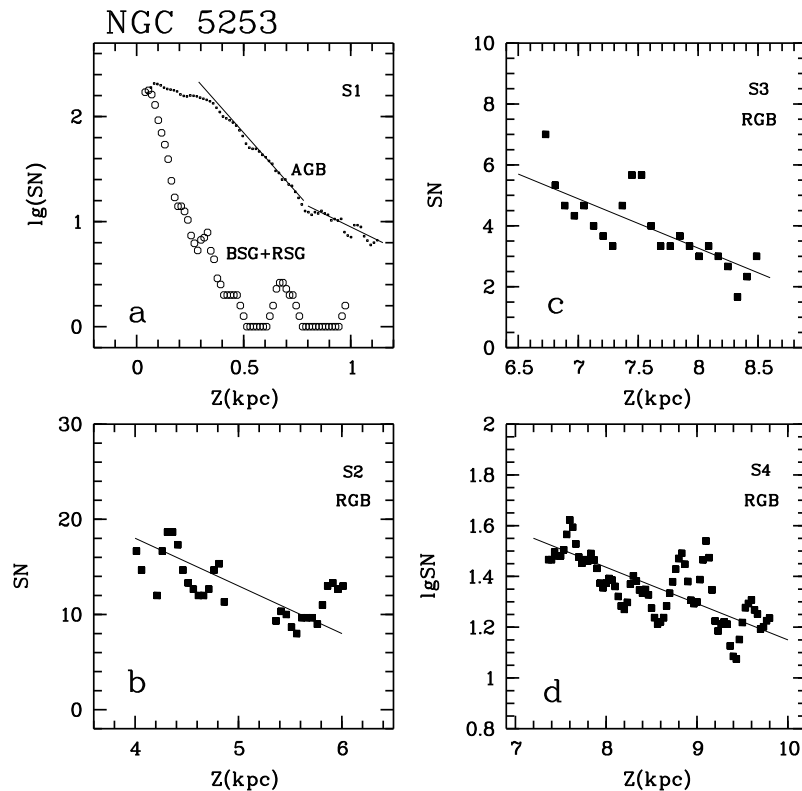


Рис. 5.9: Распределение численной плотности звезд NGC 5253 вдоль радиуса галактики. Кружками показано распределение голубых звезд, точками — звезд AGB, квадратами — красных гигантов.

S1, S2 и S3. В поле S1 попадают яркие части галактики, и на диаграмме видны ветви молодых сверхгигантов. Малая экспозиция снимков поля S1 препятствует регистрации на диаграмме „цвет – величина” протяженной ветви красных гигантов, поэтому мы ограничились для поля S1 анализом распределения только молодых звезд и звезд промежуточного возраста. Поля S2 и S3 расположены далеко от центра галактики, и на диаграммах „цвет – величина” (рис. 5.8) видны только малонаселенные ветви красных гигантов и некоторое количество фоновых звезд.

**Распределение звезд** разного возраста в исследованных площадках представлено на рис. 5.9. Численность молодых звезд (голубых и красных сверхгигантов) (рис. 5.9а) падает до нуля на расстоянии  $Z \sim 0.7$  кпк, что определяет границу тонкого диска. Распределение AGB звезд имеет меньший градиент падения численности, а на расстоянии  $Z \sim 0.8$  кпк от центра галактики виден излом в распределении AGB звезд (рис. 5.9а), что наблюдается в иррегулярных галактиках с достаточно большим числом AGB звезд. Распределение красных гигантов в центральной части NGC 5253 подвержено влиянию яркого и неоднородного фона галактики и дает мало информации для изучения распределения старых звезд, поэтому на рис. 5.9а оно не приводится. Анализ распределения плотности числа звезд в полях S2, S3 и S4 (рис. 5.9b,c,d) показывает существование во всех полях градиентов численной плотности красных гигантов. Поле S5, наиболее удаленное от центра галактики, имеет равномерное распределение численной плотности звезд, за исключением края поля, наиболее близкого к NGC 5253. Это дает возможность оценить размеры гало вдоль малой оси  $Z \sim 14$  кпк. Поскольку мы не наблюдаем на рис. 5.9 изломов в распределении красных гигантов, то у нас нет прямых доказательств, что при  $Z \sim 14$  кпк мы действительно наблюдаем границу гало, а не толстого диска. Однако, используя статистику соотношений между размерами тонкого и толстого дисков иррегулярных галактик (Тихонов, 2005б), и, зная размеры тонкого диска NGC 5253, можно предполагать, что граница толстого диска должна проходить при  $Z \sim 1.2 \div 3.2$  кпк, но не  $Z \sim 14$  кпк, как мы наблюдаем в NGC 5253. То есть, красные гиганты, наблюдаемые за пределами  $Z \sim 1.2 \div 3.2$  кпк, могут относиться только к гало.

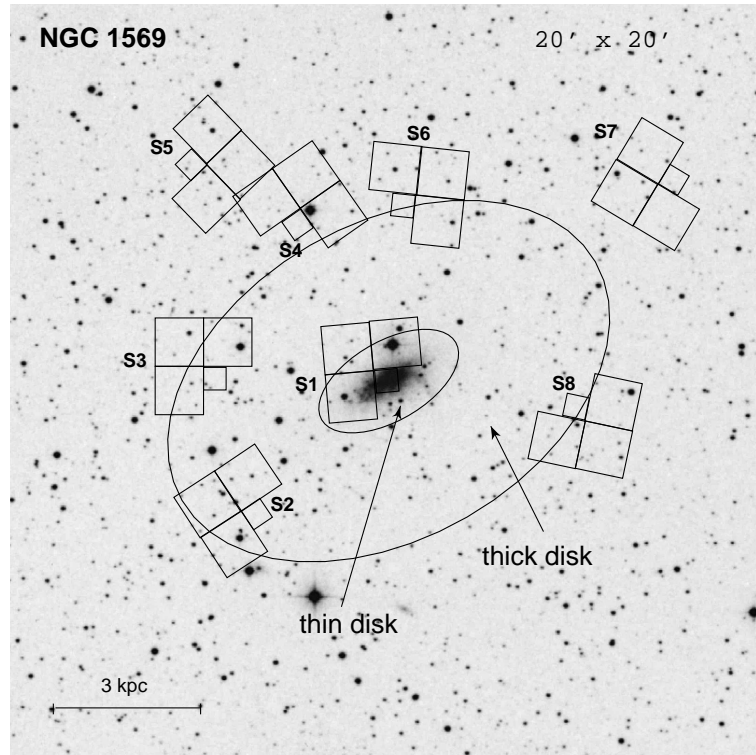


Рис. 5.10: DSS-2 изображение NGC 1569. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2. Внутренний эллипс — граница тонкого диска, внешний — возможная граница толстого диска.

## 5.4 Галактика NGC 1569

Иррегулярная галактика NGC 1569 (IBm;Sbrst Sy1 по NED) принадлежит группе галактик IC 342. Внимание исследователей она привлекает возможностью построения ее истории звездообразования, так как является близкой галактикой с очень активным процессом звездообразования. Общая масса галактики равна  $\sim 3.3 \cdot 10^8 M_{\odot}$  (Israel, 1988), а масса водорода  $\sim 1.1 \cdot 10^8 M_{\odot}$ . Металличность галактики по спектральным наблюдениям мало отличается от средней металличности иррегулярных галактик таких же масс,  $Z \sim 1/4 \cdot Z_{\odot}$  (Calzetti, Kinney & Storchi-Bergmann, 1994, Gonzalez-Delgado et al., 1997). Размеры галактики по наблюдениям HI примерно равны  $3.5 \times 1.5$  (Martin et al., 2002), а Stil & Israel (2002b) указывают на существенно большие размеры HI:  $5.5 \times 3.5$ .

Приведенные параметры указывают на то, что NGC 1569 является обогащенной газом галактикой, находящейся в активной стадии химической эволюции. В центре галактики расположены два сверхмассивных звездных скопления, которые появились при



недавнем процессе звездообразования. В одном из скоплений газ с массой  $\sim 10^5 M_\odot$  превратился в звезды внутри 1 пк. Наблюдения показывают, что распределение холодного газа антикоррелирует с областями недавнего звездообразования. Глубокие  $H_\alpha$  изображения показывают, что нагретый ионизованный газ структурирован в волокна и арки размером в несколько килопарсек и ориентирован вдоль малой оси галактики (Hunter et al. 1993, Devost et al., 1997).

Greggio et al. (1998), исследовав WFPC2/HST изображения в фильтрах  $B$  и  $V$ , нашли, что  $0.1 \div 4$  млн. лет назад в галактике прошла мощная вспышка звездообразования. В интервале времени  $1.5 \div 0.15$  млрд. лет назад в галактике произошла другая, менее мощная вспышка звездообразования. Однако, в галактике присутствует и более старое звездное население. Aloisi et al. (2001), на основе ИК снимков NICMOS/HST, показали присутствие в теле галактики красных гигантов с возрастом 15 млрд. лет и с низкой металличностью  $[Fe/H] = -0.72$ . Методом поверхностной фотометрии Stil (1999) получил профиль поверхностной яркости NGC 1569 в фильтрах  $B$  и  $I$  на радиусах  $22 \div 200''$ .

Измерения **расстояния** до галактики выполнялись неоднократно. Arp & Sandage (1985) получили модуль расстояния до NGC 1569:  $(m - M) \sim 29$ ,  $D = 6.3$  Мпк. Israel (1988) учитывал поглощение света в Галактике и получил значение модуля расстояния:  $(m - M) \sim 26.7 \pm 0.6$ . На основе фотометрии ярчайших сверхгигантов Karachentsev et al. (1994) определили расстояние до галактики  $D = 1.8 \pm 0.4$  Мпк. Более точное значение,  $D = 1.95 \pm 0.2$  Мпк, получено на основе TRGB метода (Makarova & Karachentsev, 2003).

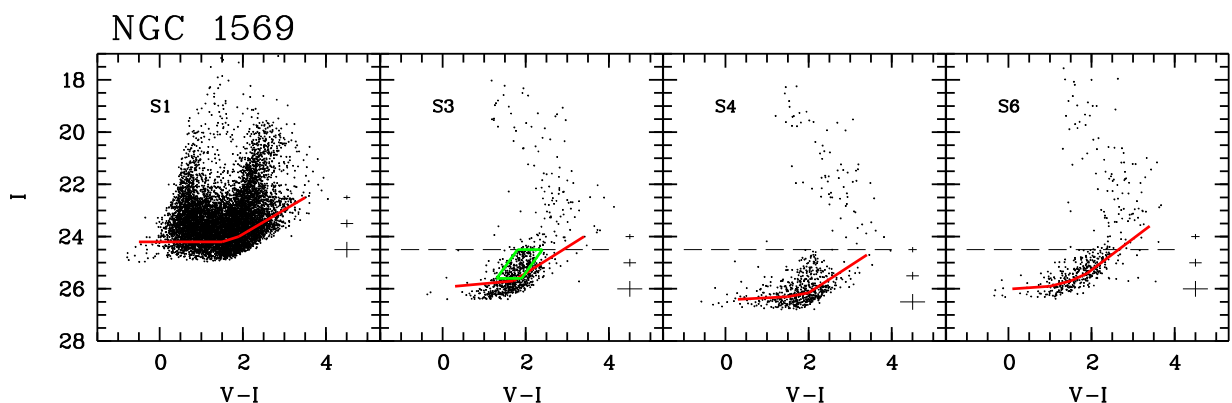


Рис. 5.11: Диаграммы „цвет – величина” четырех из восьми исследуемых полей в NGC 1569. Пунктиром показано положение  $I_{TRGB} = 24.40 \pm 0.05$ . Серым ромбом в поле S3 выделена область красных гигантов, используемая для анализа распределения. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд.

На рис. 5.10 представлен DSS-2 снимок галактики NGC 1569 с разметкой использованных нами HST полей камеры WFPC2. Журнал наблюдений этих полей можно найти в таблице 2 (см. приложение А). На рис. 5.11 представлены диаграммы „цвет – величина” четырех из восьми исследованных нами полей. Поля S2, S5, S8 имеют снимки только в одном фильтре, а поле S7 имеет снимки с коротким временем экспозиции. На представленных диаграммах видно, что в центральной области галактики (поле S1) находится большое число молодых сверхгигантов, но присутствуют и более старые звезды — AGB и RGB гиганты. На периферии галактики (поля S3, S4 и другие) наблюдаются лишь красные гиганты и немногочисленные AGB звезды. На полученных диаграммах видна ветвь красных гигантов. По ней мы определили расстояние до галактики методом TRGB (см. пункт 2.3) и получили, что среднее значение по трем площадкам (S3, S4, S6) равно  $D = 2.65 \pm 0.25$  Мпк. Поглощение света в Галактике в направлении на NGC 1569 мы вычислили на основе сравнения положения ветви голубых сверхгигантов с положением ветви сверхгигантов галактики 7Zw403, в которой также идет процесс активного звездообразования, но сама галактика находится в зоне малого поглощения света Млечным Путем. Величина определенного таким способом поглощения света оказалась близкой к величине, указанной в NED (Schlegel et al., 1998) и полученной на основе ИК наблюдений.

Молодые звезды NGC 1569 проявляют резкую концентрацию к центру, и на основании их распределения несложно определить границу тонкого диска, которая представлена на рис. 5.10 внутренним эллипсом. Существенно сложнее построить пространственное **распределение** старых звезд, поскольку отсутствуют снимки на промежуточных расстояниях между тонким диском и гало. В удаленных от центра галактики полях S2 — S8, состоящих главным образом из красных гигантов, в распределении звезд видны изменения градиентов численной плотности (рис. 5.12). Точки перегиба на этих графиках определяют границу толстого диска NGC 1569 (рис. 5.10, внешний эллипс). За пределами указанного толстого диска не наблюдается градиента изменения плотности звезд вдоль радиуса, поэтому у нас нет оснований считать, что NGC 1569 кроме протяженного толстого диска имеет и гало. Размер толстого диска в направлении на площадки S3 и S6 равен  $\sim 4$  кпк. Учет наклона галактики к лучу зрения приводит к сле-

дующим размерам толстого диска в направлениях на площадки S3 и S6:  $R_{S3} = 7.9$  кпк и  $R_{S6} = 8.3$  кпк.

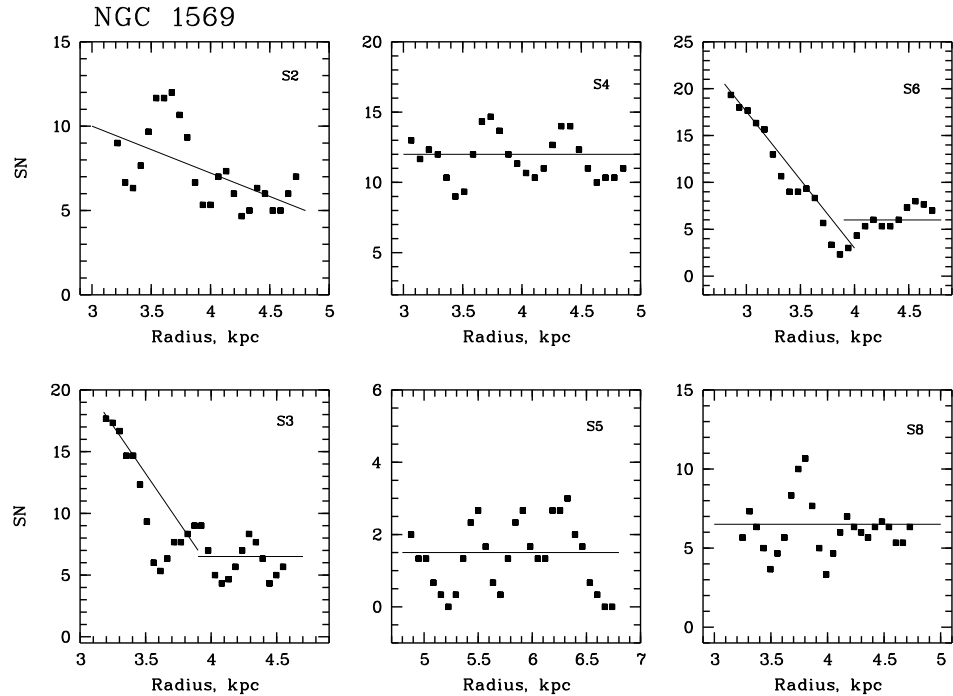


Рис. 5.12: Численная плотность красных гигантов в исследуемых полях. Изменение градиента числа звезд заметно в полях S3 и S6.

## 5.5 Галактика NGC 4214

Близкая карликовая галактика NGC 4214, IAB(s)m *III* по NED, принадлежит облаку галактик в созвездии Гончих Псов. Морфологически она состоит из многочисленных областей звездообразования, которые тянутся вдоль центральной бароподобной структуры, окруженной диском из нейтрального водорода, диаметр которого  $\sim 15'$  (Allsopp, 1979). Содержание металлов в NGC 4214  $Z \sim 1/4 \cdot Z_{\odot}$  (Kobulnicky & Skillman, 1996) и не отличается от средних значений металличности для иррегулярных галактик. В центральной части галактики были выделены две основные, богатые звездами Вольфа-Райе, области звездообразования. На основании спектрально-синтетических моделей исследователи полагают, что большая область (NGC 4214-I) имеет возраст 4 млн. лет, а малая область (NGC 4214-II) — 2.5÷3 млн. лет (Leitherer et al., 1996, Mas-Hesse & Kunth, 1999). Из радионаблюдений найдена общая масса молекулярного газа  $\sim 5.1 \cdot 10^6 M_{\odot}$ . При сравнении морфологии в линии с оптическими наблюдениями корреляций не вы-

является. Не выявлено также связи между максимальной концентрацией  $HI$ ,  $CO$  и местоположением начинающегося звездообразования.

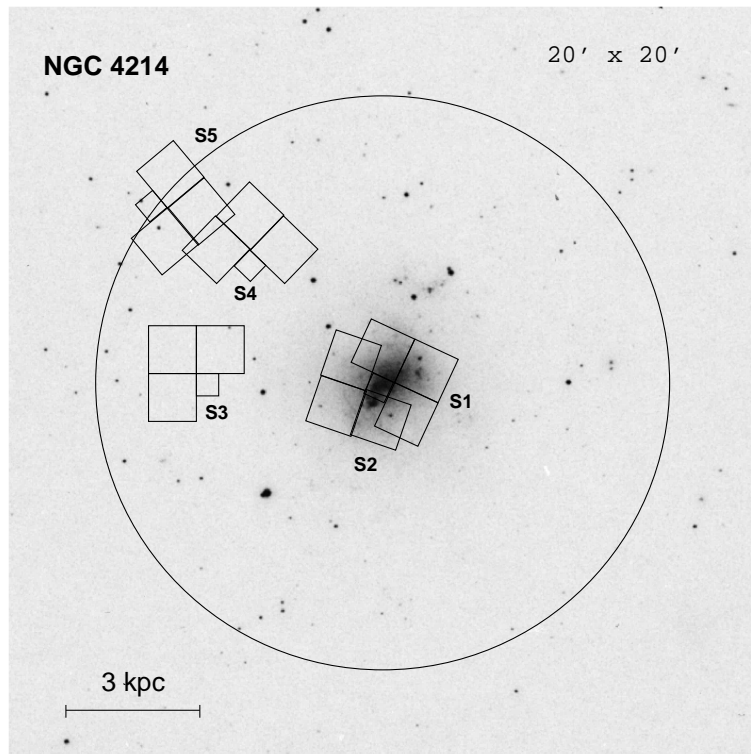


Рис. 5.13: DSS-2 изображение NGC 4214. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2. Кругом очерчена граница толстого диска.

**Расстояние** до NGC 4214 определялось многими авторами. Allsopp (1979), Thronson et al. (1988), Leitherer et al. (1996), Martin (1998) на основе определения лучевой скорости галактики получили значения в диапазоне  $D \sim 3.6 \div 7$  Мпк. Расстояние  $D = 4.1$  Мпк было получено на основе фотометрии голубых сверхгигантов (Makarova, Karachentsev & Georgiev, 1997). Позднее на основе TRGB метода были получены следующие значения расстояния до NGC 4214:

$D \sim 2$  Мпк, Норр et al. (1999);

$D = 2.7 \pm 0.3$  Мпк, Drozdovsky et al. (2002);

$D = 2.94 \pm 0.18$  Мпк, Maiz-Apellaniz et al. (2002).

Полученное нами значение модуля расстояния  $(m - M) = 27.34 \pm 0.2$  ( $D = 2.94 \pm 0.3$  Мпк) согласуется со значениями, полученными авторами двух последних работ.

Расположение исследуемых полей показано на рис. 5.13. Журнал наблюдений этих полей содержится в таблице 2 (Приложение А). На рис. 5.14 представлена диаграмма

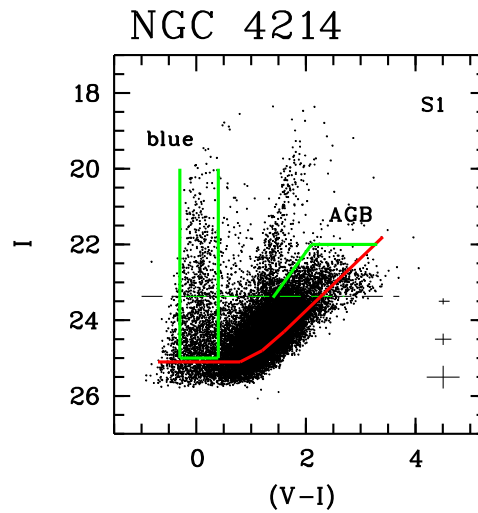


Рис. 5.14: Диаграмма  $[(V - I), I]$  для центрального поля S1 галактики NGC 4214. Пунктиром показано положение вершины ветви красных гигантов  $I_{TRGB} = 23.37$ , определенное по полю S1. Выделены области голубых и AGB звезд. Указаны уровень 50% полноты выборки звезд и боксы ошибок фотометрии.

„цвет – величина” звезд поля S1. Диаграмма поля S2 имеет аналогичный вид и поэтому не приводится. Из-за близости галактики NGC 4214 на диаграмме (рис. 5.14) хорошо видны ветви сверхгигантов, населенная ветвь красных гигантов и, расположенная выше TRGB, область AGB звезд. Поля S3, S4 и S5 имеют снимки только в одном фильтре, что несколько затрудняет работу по выделению звезд галактики среди фоновых звезд. К счастью, положение этих полей на периферии галактики указывает на однородность их звездного состава и облегчает задачу изучения в них пространственного распределения звезд.

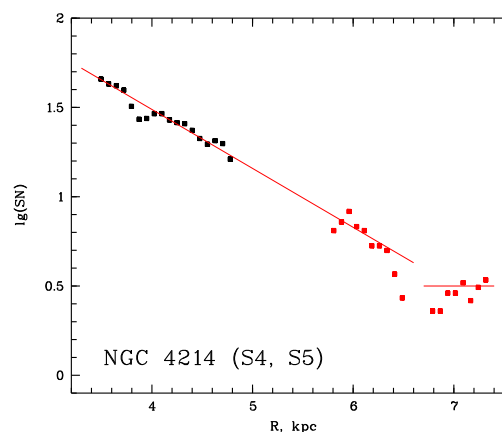


Рис. 5.15: Численная плотность RGB звезд в полях S4 и S5 галактики NGC 4214.

Каждое из центральных полей S1 и S2 имеет большое количество звезд разного возраста, но именно центральное положение этих полей делает их малопригодными для определения глобального *распределения* звезд по телу галактики. Даже граница тонкого диска расположена дальше границ полей S1 и S2. Более удаленные поля S3, S4 и S5 показывают изменение плотности звезд вдоль радиуса галактики и их можно использовать для определения размеров звездных структур.

На рис. 5.15 представлено распределение плотности числа звезд (без учета угла наклона галактики к лучу зрения) вдоль радиуса галактики в полях S4 и S5. Излом в падении численности звезд с выходом на фоновые значения наблюдается в поле S5 при  $R = 6.8$  кпк. Флуктуации в распределении звезд связаны как со статистикой, так и с пробелами данных на стыке отдельных чипов ПЗС матрицы камеры WFPC2 космического телескопа HST. Принимая во внимание вероятные размеры тонкого диска и статистические соотношения между размерами звездных подсистем, можно предполагать, что на расстоянии  $R \sim 7$  кпк от центра галактики мы наблюдаем границу толстого диска, а не гало. Поправки за наклон галактики изменяют этот размер весьма незначительно.

## 5.6 Галактика NGC 4449

NGC 4449 (IBm по NED) — одна из наиболее ярких иррегулярных галактик с активным процессом звездообразования. Так же, как и представленная нами ранее галактика NGC 4214, она входит в состав облака галактик в Гончих Псах. Галактика NGC 4449 относится к галактикам с высокой поверхностной яркостью. Например, по интегральной светимости NGC 4449 превосходит БМО в 1.4 раза, а по темпам звездообразования в 2 раза, хотя обе галактики имеют сходные размеры. Среди других иррегулярных галактик NGC 4449 выделяется очень высоким содержанием нейтрального водорода ( $N_{HI} = 10^{19}$  атомов на  $\text{см}^2$ ), который простирается на 6 радиусов Холмберга (van Woerden et al., 1975, Bajaja et al., 1994), что примерно в 3 раза превышает протяженность водородного гало в других иррегулярных галактиках (Huchtmeier et al., 1981). Клочковатый вид галактики указывает на ее сложную структуру. Например, van Woerden et al. (1975) и Bajaja et al. (1994) нашли противоположные градиенты скорости

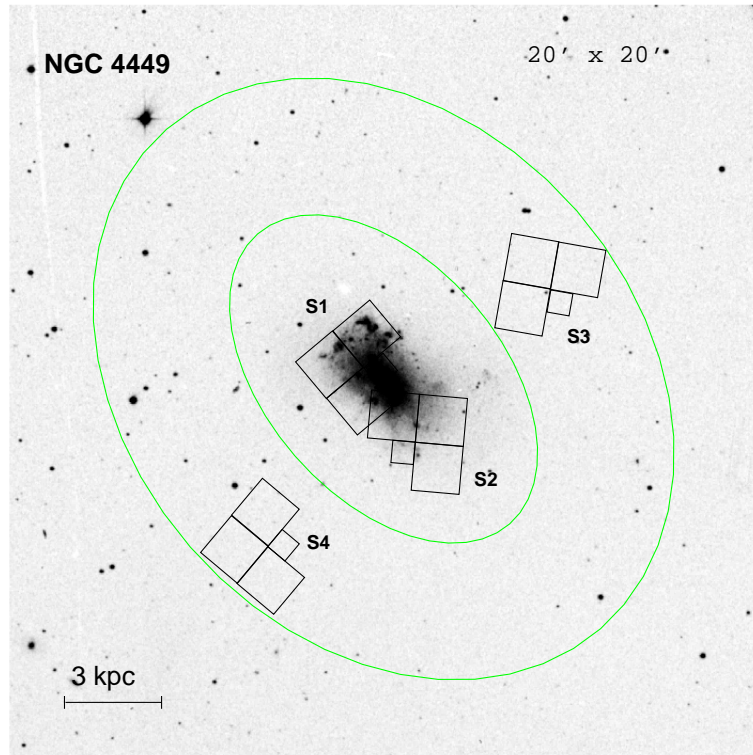


Рис. 5.16: Поле DSS-2 с изображением галактики NGC 4449. Отмечено положение площадок HST/WFPC2, используемых нами для фотометрии звезд. Внутренний эллипс указывает максимальный предполагаемый размер тонкого диска. Внешний эллипс — минимальный предполагаемый размер толстого диска.

газа во внутренних и внешних областях галактики. Hunter et al. (1998) разрешили часть газа на огромные протяженные облака и длинные струи, окутывающие галактику. Такая структура интерпретируется ими как результат взаимодействия или возможного слияния с другой галактикой (Hunter et al., 1998). Theis & Kohle (2001) в своей модели показывают, что иррегулярная галактика DDO 125, расположенная, по их предположению, на расстоянии 41 кпк от NGC 4449, могла бы быть возможным партнером по взаимодействию галактик. В этом случае наблюдаемые особенности протяженного водородного диска могут быть объяснены в рамках гравитационного взаимодействия между DDO 125 и NGC 4449. Однако эта гипотеза полностью отпадает, поскольку расстояние между галактиками оказалось намного больше, чем Theis & Kohle (2001). Расстояние между галактиками, определенное в работе Karachentsev et al. (2004) равно  $\sim 1.6$  Мпк. Глубокая поверхностная фотометрия NGC 4449 проведена Swaters (2002a) до  $\mu_R \sim 28^m/\square''$ .

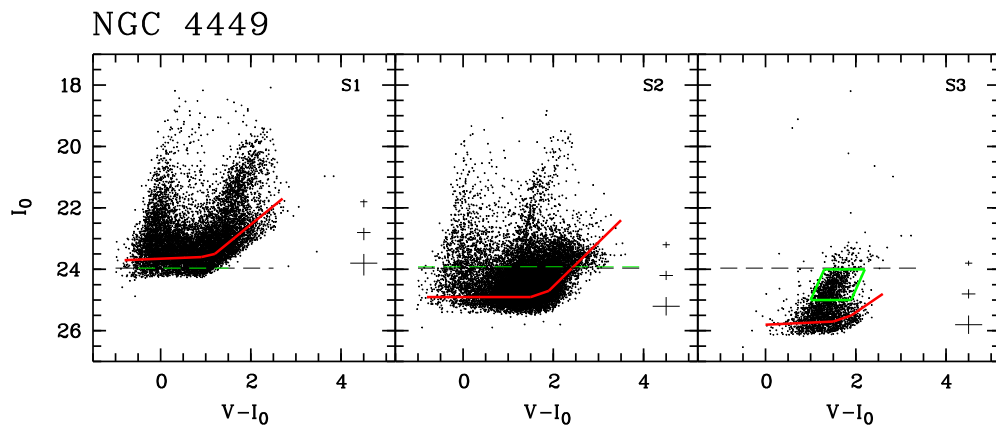


Рис. 5.17:  $[(V - I)_0, I_0]$  диаграммы (с учетом поглощения света) исследуемых полей NGC 4449. Пунктиром показано положение вершины ветви красных гигантов  $I_{TRGB} = 24.00 \pm 0.03$ . Серым ромбом выделена используемая нами область красных гигантов (поле S3). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд.

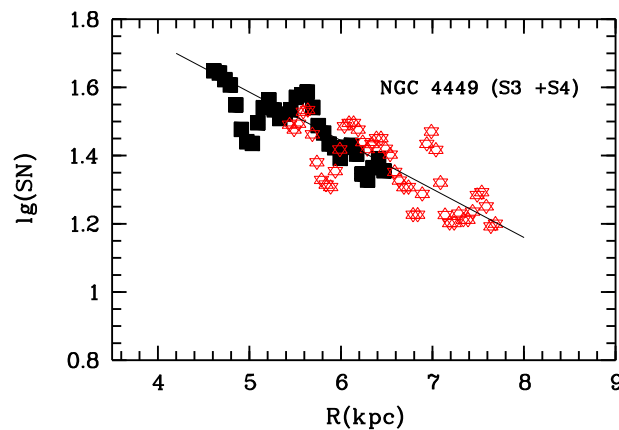


Рис. 5.18: Поверхностная плотность красных гигантов в исследуемых полях NGC 4449. Квадратами обозначено распределение красных гигантов в поле S3, звездами — в поле S4.

**Расстояние** до NGC 4449 было получено на основе светимости ярчайших голубых звезд  $D = 2.9$  Мпк (Karachentsev & Drozdovsky, 1998) и на основе TRGB метода  $D = 4.2$  Мпк (Karachentsev et al., 2003a). Полученное нами значение модуля расстояния на основе фотометрии звезд в полях S2 и S3 равно  $(m - M) = 28.06 \pm 0.2$  ( $D = 4.10 \pm 0.4$  Мпк). Найденная металличность  $[Fe/H] = -0.99$ . Расположение исследованных нами площадок показано на рис. 5.16. Журнал наблюдений этих площадок содержится в таблице 2 (Приложение А). На рис. 5.17 представлены полученные диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей S1, S2 и S3. Хорошо видны населенные ветви голубых и красных сверхгигантов и AGB звезд центральных полей галактики



и полное отсутствие молодых звезд на периферии галактики, в области протяженного толстого диска. *Распределение* молодых звезд в центральных областях NGC 4449 подобно распределению звезд в других иррегулярных галактиках (Тихонов, 2005а,б), и здесь не приводится из-за его малой информативности. Отметим только, что граница распространения молодых звезд находится за пределами полей S1 и S2 (рис. 5.16). Красные гиганты NGC 4449 имеют более обширную область распространения. На рис. 5.18 показано изменение численной плотности красных гигантов вдоль малой оси (без учета угла наклона) в полях S3 и S4, расположенных по разным сторонам от центра галактики. Несмотря на то, что поле S4 снято только в одном фильтре, и это увеличивает трудности выявления гигантов, видно, что графики изменения численности RGB звезд в обоих полях имеют одинаковый градиент, что подтверждает правильность нашей методики выявления красных гигантов в поле S4 и указывает на симметричность внешней формы NGC 4449. На рис. 5.18 не наблюдается резкого изменения градиента численной плотности красных гигантов, то есть звезды полей S3 и S4 принадлежат одной подсистеме — толстому диску галактики, граница которого лежит вдоль малой оси за пределами этих полей (внешний эллипс на рис. 5.18). На основании полученных данных по изменению плотности звезд можно уверенно говорить о существовании тонкого и толстого дисков в NGC 4449, но из-за малой протяженности вдоль радиуса полей HST невозможно сказать что-либо о наличии или отсутствии звездного гало за пределами толстого диска.

## 5.7 Общие выводы по исследованию иррегулярных галактик.

Цель изучения иррегулярных галактик состояла в том, чтобы прояснить вопрос о наличии или отсутствии гало в зависимости от массы галактики. В работах Тихонова (2005а,б) были исследованы 24 иррегулярные, большей частью маломассивные галактики, но только у одной массивной галактики (M 82) было найдено гало. Наши исследования шести иррегулярных, сравнительно массивных галактик, показали, что две галактики, NGC 2366 и NGC 5253, с высокой степенью вероятности обладают гало. Галактика NGC 1569 гало не имеет. NGC 4214 и NGC 4449 могут иметь гало, но для

обнаружения гало необходимы новые HST наблюдения, ориентированные на решение именно этого вопроса. Таким образом, наши исследования дают дополнительные основания для вывода о зависимости между массой галактики и присутствием в ней гало. Изучение звездных подсистем иррегулярных галактик показало, что морфологически они подобны спиральным галактикам и обладают теми же звездными подсистемами: тонким и толстым дисками и гало.

## Глава 6

# Эмпирическая модель звездного строения спиральных галактик

Для построения предлагаемой модели мы использовали результаты исследования звездного населения девяти галактик, видимых с ребра, и трех галактик, видимых почти плашмя. Галактики выбирались случайным образом, исходя из наличия достаточного числа изображений в архиве HST. Полученные результаты для каждой из галактик не противоречат предлагаемой общей модели звездного строения. Таким образом, мы можем с большой вероятностью утверждать, что представляемая модель имеет общий характер и может быть применена для большинства спиральных галактик.

Создавая модель звездного строения, мы объединили результаты распределения численной плотности звезд галактик, видимых под разными углами. На одном графике (рис. 6.1), показаны зависимости численной плотности молодых звезд, звезд промежуточного возраста и старых звезд от галактоцентрического радиуса. Поскольку плотности звезд у каждой галактики имеют индивидуальные значения, также как и размеры звездных структур, то мы не могли оцифровать оси графиков абсолютными значениями. Поэтому, мы сохранили на рис. 6.1 действительные относительные размеры структур, и поведение численной плотности разных типов звезд при удалении от центра галактики, представлено в качественном виде. При этом мы сохранили примерные соотношения в численной плотности звезд разного возраста.

Представленная на рис. 6.1 модель показывает, что балдж галактик состоит из большого числа AGB звезд и красных гигантов. Голубые звезды в балдже менее представительны, чем в соседних с балджем областях, где начинаются спиральные ветви. Общее распределение молодых звезд определяет область тонкого диска. Вблизи границы

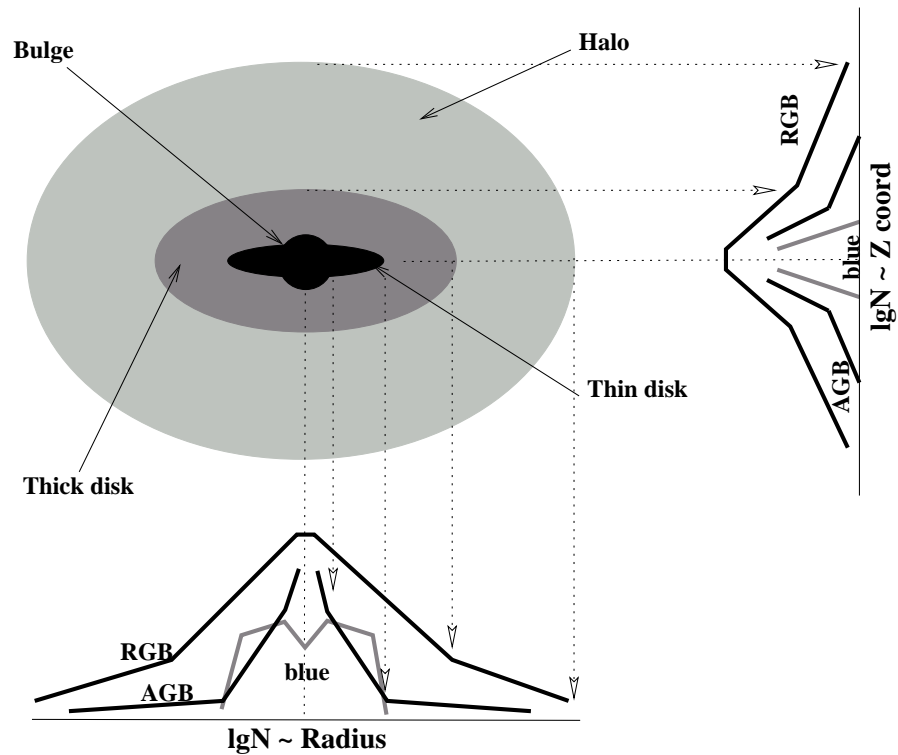


Рис. 6.1: Эмпирическая модель звездного строения спиральной галактики. На графиках показано качественное поведение численной плотности звезд разного типа при удалении от центра галактики.

тонкого диска происходит изменение градиента численной плотности звезд промежуточного возраста – AGB звезд. Однако небольшое количество AGB звезд можно найти и дальше от центра галактики, в толстом диске и гало. У наиболее многочисленных звезд – красных гигантов видно протяженное экспоненциальное падение их численной плотности к краю галактики и резкий излом градиента на границе толстого диска.

Распределения старых звезд и звезд промежуточного возраста вдоль плоскости галактики или вдоль оси  $Z$  качественно сходны между собой. Исключение составляют молодые звезды, распределения которых различаются между собой.

Следует помнить, что звездные подсистемы заполнены также звездами меньшей светимости, чем красные гиганты. К сожалению, пределы фотометрии имеющихся снимков не позволяют зафиксировать эти слабые звезды и определить их распределение в пространстве.

Сравнивая нашу эмпирическую модель строения спиральной галактики с теми теоретическими моделями, о которых речь шла в главе II, мы можем сказать, что под-

тверждается экспоненциальное падение численной плотности звезд. Что касается иных законов изменения, то они могут относиться к более близким к центру областям, где особенности программ DAOPHOT II и HSTphот в густонаселенных звездных полях могут создавать иллюзию иных, чем экспоненциальный, законов изменения численной плотности звезд. Этому способствует и тот факт, что градиенты падения численной плотности звезд зависят от возраста звезд. Не имея возможности учитывать возраст звезд при построении видимых распределений поверхностной яркости, метод поверхностной фотометрии выдает сумму распределений звезд всех возрастов, и эта сумма не будет экспоненциальным распределением, хотя и создается из отдельных распределений экспоненциального вида.

Поскольку изменения звездной плотности в толстом диске и гало имеют разные градиенты, то это дает возможность установить границу между звездными подсистемами и определить размер толстого диска. Экстраполируя распределения численной плотности красных гигантов, мы определили размеры гало и выяснили его сплюснутость у полюсов галактик. Основные результаты определения размеров толстых дисков и гало в исследуемых галактиках приведены в таблице 3 Приложения А. Имея несколько галактик разных степеней вытянутости и светимости мы можем попытаться найти основные соотношения между звездными подсистемами галактик.

Среднее значение *отношения размеров толстого и тонкого дисков* для исследуемых *спиральных галактик* равно (рис. 6.2а):

$$\langle R_{tt} \rangle = \frac{R_{thick\ disk}}{R_{thin\ disk}} = 2.0 \pm 0.7. \quad (6.1)$$

Для сравнения на рис. 6.2а показаны точки, соответствующие иррегулярным галактикам, видимым с ребра, из работы Тихонова (2005б).

Среднее значение отношения размера гало к размеру толстого диска равно (рис. 6.2с):

$$\langle R_{ht} \rangle = \frac{R_{halo}}{R_{thick\ disk}} = 2.5 \pm 0.6. \quad (6.2)$$

Вопрос о сравнении найденных нами размеров протяженных звездных структур и размеров водородных дисков довольно сложен и пока не решается однозначно. Пространственные параметры звездных структур (толстых дисков и, частично, гало) нами

определены вполне надежно и изменению не подлежат. Что касается размеров водородных дисков, то они зависят от чувствительности и времени накопления радиотелескопов и изменяются весьма заметно, при изменении названных параметров аппаратуры. Прежде чем приводить сравнение, следует определить параметры сравнения. Тем не менее, мы можем сделать приближенный вывод: при достаточных накоплениях размеры HI дисков превышают размеры найденных нами толстых дисков. Однако, размеры найденных гало превышают размеры HI дисков более чем в 1.5 раза.

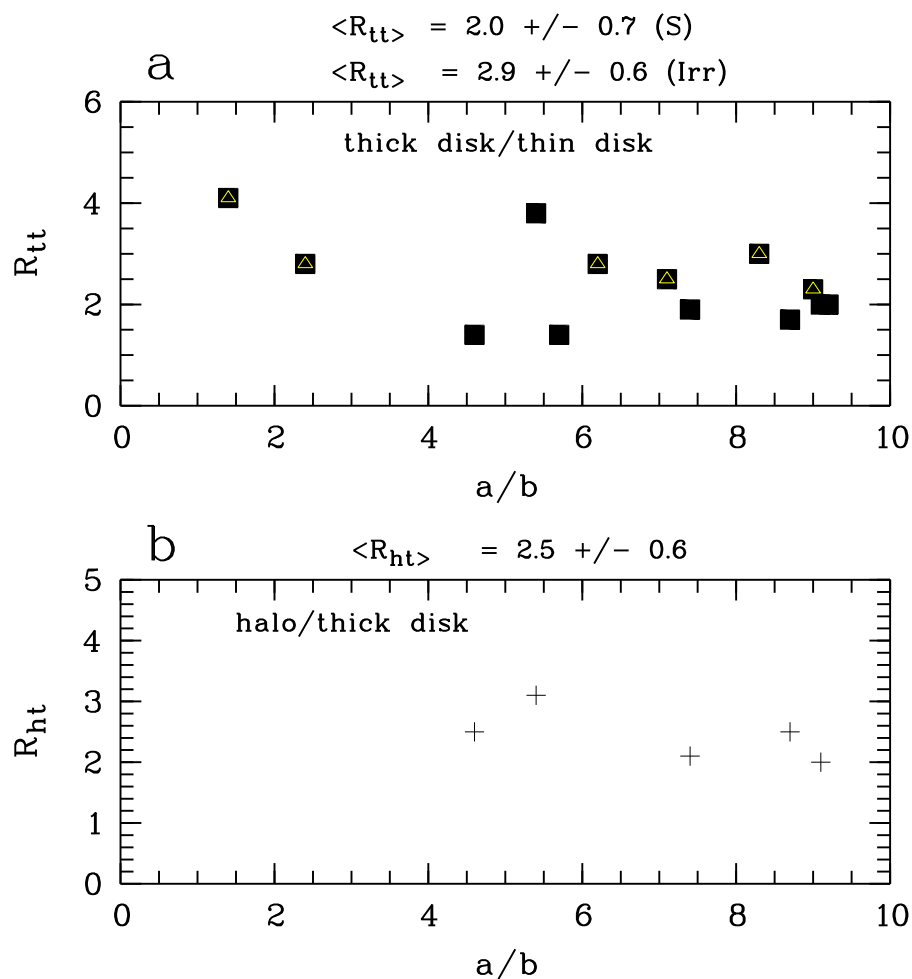


Рис. 6.2: Соотношения между полученными в работе параметрами галактик. *a.* Зависимость между сжатием галактики ( $a/b$ ) и отношением размеров толстого диска к тонкому. Квадратами обозначены спиральные галактики. Квадратами с вписанными треугольниками — иррегулярные галактики. *b.* Зависимость между сжатием галактики ( $a/b$ ) и отношением размера гало к размеру толстого диска.

При экстраполяции прямых при определении размеров гало возникает вопрос о значимости и точности приводимых результатов. При экстраполяции зависимости в по-

строении участвуют множество точек. И хотя флуктуации численной плотности звезд вдоль прямой могут быть весьма значительны, точность проведения прямой оказывается достаточно хорошей. В таблице 4 (Приложение А) приведены ошибки определения коэффициентов наклона прямых и постоянных множителей, аппроксимирующих распределение красных гигантов в толстых дисках и гало, а также коэффициенты значимости этих наклонов. В таблице 3 (Приложение А) приведены ошибки определения размеров толстых дисков, полученные на основе ошибок аппроксимирующих зависимость прямых из таблицы 4.

В предложенную эмпирическую модель звездного строения спиральных галактик укладываются и результаты строения иррегулярных галактик (Тихонов, 2005b), с тем условием, что только массивные иррегулярные галактики могут иметь гало, как это обнаружено у галактик IC10, M82 и NGC3077.

Процесс взаимодействия галактик искажает звездную структуру толстых дисков и гало (например, у галактики NGC 4631), и к таким галактикам наша модель не применима.

Мы надеемся, что полученные нами результаты по звездному строению галактик будут способствовать созданию более обоснованных теоретических моделей происхождения и эволюции спиральных и иррегулярных галактик.

# Заключение

Эта работа была направлена на исследование в галактиках двух протяженных звездных подсистем: толстого диска и гало. Для решения задачи нами была проведена звездная фотометрия 18-ти спиральных и иррегулярных галактик разной светимости, расположенных за пределами Местной группы.

На основе построенных диаграмм „цвет – звездная величина” в галактиках были выделены звезды разного возраста и были определены параметры их пространственного распределения.

Решить задачу помогло применение метода звездных подсчетов, вместо традиционного метода поверхностной фотометрии. Используя этот метод, мы

- 1) достигли более глубоких фотометрических пределов, по сравнению с методом поверхностной фотометрии, при условии использования этих же самых исходных снимков;
- 2) изучили распределение конкретных по возрасту типов звезд.

Этого принципиально невозможно сделать на основе метода поверхностной фотометрии, так как в один и тот же интервал цвета попадают звезды разного возраста (например, красные гиганты и AGB звезды с малой металличностью).

*Выводы*, полученные при изучении распределения звезд следующие:

- 1) Впервые исследованы глобальные звездные подсистемы у спиральных галактик за пределами Местной группы.

- 2) В случайно выбранных спиральных и иррегулярных галактиках разной светимости найдены толстые диски, состоящие из старых звезд — красных гигантов, а в тех спиральных галактиках, где имелись условия для поиска, были открыты и протяженные гало, также состоящие из старых звезд.

- 3) Определено, что распределения AGB и RGB звезд толстого диска и, вероятно, гало следуют экспоненциальному закону.



4) Найдено, что градиенты падения численной плотности звезд вдоль радиуса галактики зависят от возраста звезд. Более молодые звезды имеют больший градиент падения плотности, по сравнению со старыми звездами.

5) Впервые найдено, что градиенты численной плотности красных гигантов толстого диска и гало имеют разные значения, что использовано нами для определения границы толстого диска.

6) Впервые оценено, что размер гало спиральных галактик в  $2 \div 3$  раза превышает размер толстого диска.

7) Впервые показано, что гало имеют сплюснутые у полюсов галактик формы, что, вероятно, указывает на вращение гало.

Принимая во внимание случайный выбор галактик, можно с большой вероятностью считать, что толстые диски и гало, состоящие из старых звезд, являются обязательной составной частью спиральных галактик.

## Перспективы

Найденные нами зависимости изменения звездной плотности в диске и гало позволят в дальнейшем, на основе прямых звездных подсчетов и теории звездной эволюции оценить полное число звезд в галактиках и вклад звездных гало и толстого диска в массу галактик. Учет этих масс должен ослабить проблему скрытой массы в галактиках.

Можно также надеяться, что полученные нами результаты о звездном строении спиральных галактик позволят внести ясность в теорию происхождения и эволюции звездных подсистем.

При исследовании звездных структур мы использовали, главным образом, красные гиганты, которые уверенно выделяются с помощью звездной фотометрии и имеют возраст в несколько миллиардов лет. Но за пределами нашего внимания остались AGB звезды. Это объясняется тем, что на диаграмме „цвет – звездная величина” в те интервалы, которые мы выбирали для выделения AGB звезд, попадают звезды в диапазоне возраста от сотен миллионов лет до нескольких миллиардов лет. Для использования этих звезд в определении зависимости „возраст — толщина диска” потребуются дополнительные селекционные параметры этих звезд, что уменьшит статистическую выборку и

увеличит неопределенность выводов. Поэтому мы оставили этот тип звезд для будущих исследований.

## Благодарности

В заключение хочу выразить благодарности всем, кто способствовал выполнению этой работы:

- моему научному руководителю — Николаю Александровичу Тихонову — за предложенную тему исследования, научное и административное руководство работой, за его терпение во время подготовки диссертации к защите.
- всем сотрудникам лаборатории ВАК и особенно Коротковой Галине Геннадьевне и Шариной Маргарите Евгеньевне за техническую поддержку.
- Дроздовскому Игорю Олеговичу (НИАИ СПбГУ) за предоставление ряда уникальных программ, которые использовались при проведении звездной фотометрии.
- Комаровой Виктории Николаевне за ценные замечания.
- Каратаевой Гульнаре Мирсатовне (НИАИ СПбГУ) за помощь и поддержку в процессе подготовки диссертации.
- Всем соавторам за возможность совместной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 00-02-16584-а, 03-02-16344-а).

# Литература

Ables J.G., Forster J.R., Manchester R.N., Rayner P.T., Whiteoak J.B., Mathewson D.S., Kalnajs A.J., Peters & Wehner H., 1987, MNRAS 226, 157

Allsopp N.J., 1979, MNRAS 188, 765

Aloisi A., Clampin M., Diolati E., Greggio L., Leitherer C., Nota A., Origlia L., Parmeggiani G., Tosi M., 2001, AJ 121, 1425

Alonso-Herrero A. & Knapen J.H., 2001, AJ 122, 1350

Aparicio A., Cepa J., Gallart C., Castaneda H.O. et al., 1995, AJ 110, 212

Appleton P.N., Davies R.D., Stephenson R.J., 1981, MNRAS 195, 327

Arp H.C., 1966, ApJS 14, 1

Arp H.C. & Sandage A.R., 1985, AJ 90, 1163

Baade W., 1944, ApJ 100, 137

Baggett W.E., Baggett S.M., Anderson K.S.J., 1998, AJ 116, 1626

Bajaja E., Huchtmeier W.K. & Klein U., 1994, A&A 285, 385

Barnes J.E. & Hernquist L., 1992, Nature 360, 715

Beck S.C., Turner J.L., Ho P.T.P., Lacy J.H., Kelly D.M., 1996, ApJ 457, 610

Becker R., Mebold U., Reif K., van Woerden H., 1988, A&A 203, 21

Beers T. C., Drilling J. S., Rossi S., Chiba M., Rhee J., Führmeister B., Norris J. E., von Hippel T., 2002, AJ 124, 931

- Bettoni D. & Buson L.M., 1987, A&AS 67, 341
- Binney J. & Merrifield M., 1998, Galactic Astronomy (Princeton: Princeton Univ. Press)
- Боркова Т.Н. и Марсаков В.А., 2000, АЖ, т.77, №10, 750
- Börngen F., Karachentseva V.E., Schmidt R., Richter G.M., Thaenert W., 1982, AN 303, 287
- Börngen F., Karachentseva V.E., Karachentsev I.D., 1984, AN 305, 53
- Bottinelli L., Gougenheim L. & Heidemann J., 1972, A&A 17, 445
- Boyce P. J., Minchin R. F., Kilborn V. A., Disney M. J., Lang R. H., Jordan C. A., Grossi M., Lyne A. G., Cohen R. J., Morison I. M., Phillipps S., 2001, ApJ 560L, 127
- Bresolin F., Gieren W., Kudritzki R.-P., Pietrzynski G., Przybilla N., 2002, ApJ 567, 277
- Bronkalla W., Notni P., Mutter A.A.-R., 1992, Astron. Nachr. 313, 1
- Brook C., Kawata D., Gibson B., Freeman K., 2004, ApJ 612, 894
- Brown T.M., Ferguson H.C., Smith E., Kimble R.A. et al., 2003, ApJ 592, 17
- Burstein D., 1979, ApJ 234, 829
- Byun Y.I. & Freeman K.C., 1995, ApJ 448, 563
- Caldwell N., Armandroff T.E., Da Costa G.S., Seitzer P., 1998, AJ 115, 535
- Calzetti D., Kinney A.L. & Storchi-Bergmann T., 1994, ApJ 429, 582
- Cantiello M., Raimondo G., Brocato E., Capaccioli M., 2003, AJ 125, 2783
- Chaves T., 2002, [www.astro.queensu.ca/~tchaves/research/galactic.html](http://www.astro.queensu.ca/~tchaves/research/galactic.html)
- Chen B., Stoughton C., Smith J. A., Uomoto A., Pier J. R., Yanny B., Ivezić Z., York D. G., Anderson J.E., Annis J. & 7 coauthors, 2001, ApJ 553, 184

- Chenshaw D.M., Kraemer S.B., Gabel J.R., Schmitt H.R., Fillipenko A.V., Ho L.C., Shields J.C., Turner T.J. et al., 2004, ApJ 612, 152
- Chiba M. & Beers T., 2000, AJ 119, 2843
- Cote S., Freeman K.C., Carignan C., Quinn P.J., 1997, AJ 114, 1313
- Da Costa G.S. & Armandroff T.E., 1990, AJ 100, 162
- Dalcanton J. & Bernstein R., 2002, AJ 124, 1328
- Davidge T.J., 2005, ApJ 622, 279
- Deeg H.J., Munoz-Tunon C., Tenorio-Tagle G., Telles E., Vilchez J.M., Rodriguez-Espinosa J.M., Duc P.A., Mirabel I.F., 1998, A&AS 129, 455
- de Vaucouleurs G., 1962, ApJ 136, 107
- de Vaucouleurs G., 1978, ApJ 224, 710
- de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H. J., Buta R.J., Paturel G., Fouque P., 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (New York: Springer)
- Devost D., Roy J.R. & Drissen L., 1997, ApJ 482, 765
- dos Santos P.M. & Lepine J.R.D., 1979, Nature 278, 34
- Dolphin A.E., 2000a, PASP 112, 1383
- Dolphin A.E., 2000b, PASP 112, 1397
- Drozdovsky I., Schulte-Ladbeck R., Hop U., Greggio L., Crone M.M., 2002, AJ 124, 811
- Duc P.-A., Mirabel I.F., 1998, A&A 333, 813
- Durrell P.R., Harris W. E., Pritchett C.J., 1994, AJ 108, 2114
- Eggen O.J., 1977, ApJ 215, 812
- Eggen O.J., Lynden-Bell D. & Sandage A.R., 1962, ApJ 136, 748

- Ekers R.D. & Sancisi R., 1977, A&A 54, 973
- Elmegreen B.G., Kaufman M., Thomasson M., 1993, ApJ 412, 90
- Elmouttie M., Haynes R.F., Jones K.L., Ehle M., Beck R., Harnett J.I., Wielebinski R., 1997, MNRAS 284, 830
- Ferguson A. M. N., Irein M. J., Ibata R.A., Lewis G.F., Tanvir N. R., 2002, AJ 124, 1452
- Ferrarese L., Ford H.C., Huchra J., Kennicutt R.C.Jr., Mould J.R., Sakai S., Freedman W.L., Stetson P.B., Madore B.F., Gibson B.K. & 7 coauthors, 2000a, ApJ 128, 431
- Ferrarese L., Mould J.R., Kennicutt R.C. et al., 2000b, ApJ 529, 745
- Fillipenko A.V. & Ho L.C., 2003, ApJ 588, 13
- Fillipenko A.V. & Ho L.C., Sargent W.L.W., 1993, ApJ 410, L75
- Flaternali F. & Oosterloo T., Recycling intergalactic and interstellar matter IAU Symposium Series, v. 217, 2004, astro-ph/0310799
- Flaternali F., Oosterloo T., Sancisi R., Swaters R., 2004, astro-ph/0410375
- Florido E., Battaner E., Sanchez-Saavedra M.L., Prieto M., Mediavilla E., 1991, MNRAS 251, 193
- Flynn L., Walterlos R.A.M., Thilker D.A., Fierro V., 1999, 5-9 January, AAS Meeting 193 - Austin, Texas
- Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B. K., Ferrarese L. et al., 2001, ApJ 553, 47
- Freeman K.C., 1970, ApJ 160, 811
- Freeman K.C., 1987, ARAA 25, 603
- Freeman K.C. & Bland-Hawthorn J., 2002, ARAA 40, 487
- Friel E.D. & Janes A., 1993, A&A 267, 75

- Fry A.M., Morrison H.L., Harding P., Boroson T. A., 1999, AJ 118, 1209
- Gallagher J.S. & Hudson H.S., 1976, ApJ 209, 389
- Garcia-Burillo S., Guelein M., Cernicharo J.J., Dahlem M., 1992, A&A 266, 21
- Garcia-Ruiz I., Sancisi R., Kuijken K., 2002, A&A 394, 769
- Georgiev Ts. B., Bilkina B.I., Tikhonov N.A., 1992a, A&AS 95, 581
- Georgiev Ts. B., Bilkina B.I., Tikhonov N.A., 1992b, A&AS 96, 569
- Gilmore G. & Reid N., 1983, MNRAS 202, 1025
- Gilmore, G., Wyse, R. F. G. & Jones J. B., 1995, AJ 109, 1095
- Gibson B.K., Stetson P.B., Freedman W.L., Mould J.R., Kennicutt R.C.Jr., Huchra J.P., Sakai S., Graham J.A., Fassett C.I., Kelson D.D. & 7 coauthors et. al , 2000, ApJ 529, 723
- Golla G., Dettmar R.-J., Domgorgen H., 1996, A&A 313, 439
- Golla G. & Hummel E., 1994, A&A 284, 777
- Gonzalez J.J., 1993, PhD thesis Univ. California, Santa Cruz
- Gonzalez-Delgado R.M., Leitherer C., Heckman T., Cervino M., 1997, ApJ 483, 705
- Gorjian V., 1996, AJ 112, 1886
- Gould A., Guhathakurta P., Richstone D. & Flynn C., 1992, ApJ 388, 345
- Graham J.A., 1982, ApJ 252, 474
- Greggio L., Tosi M., Clampin M., De Matchi G., Leitherer C., Nota A., Sirianni M., 1998, ApJ 504, 725
- Guhathakurta P., Ostheimer J.C., Gilbert K.M., Rich R.M., Majewski S.R., Kalirai J.S., Reitzel D.B., Patterson R.J., 2005, astro-ph/0502366

- Harding P., Morrison H.L., Olszewski E.W., Arabadjis J., Mateo M. et al., 2001, AJ 122, 1397
- Harris W.E., 1976, AJ 81, 1095
- Harris J., Calzetti D., Gallagher J.S., Smith D.A., Conselice C. J., 2004, ApJ 603, 503
- Helmi A. & White S.D.M., 1999, MNRAS 307, 495
- Holmberg E., 1937, Annals of the Observ. of Lund, 6, 1
- Holtzmann J.A., Hester J.J., Casertano S., 1995a, PASP 107, 156
- Holtzmann J.A., Burrows C.J., Casertano S., Hester J.J., Trauger J.T., Watson A.M., Worthey G., 1995b, PASP 107, 1065
- Hopp U., Schulte-Landbeck R.E., Greggio L., Crone M.M., 1999, in ASP Conf. Ser 192, Spectrophotometric Dating of Stars and Galaxies, ed I. Hubeny, S. Heap & R. Cornett (San Francisco: ASP), 85
- Howk J.C. & Savage B.D., 1997, AJ 114, 2463
- Huchtmeier W.K., Seiradakis J.H. & Materne J.H., 1981, A&A 102, 134
- Hummel E., Sancisi R., Ekers R.D., 1984, A&A 133, 1
- Hunsberger S.D., Chareton J.C., Zaritsky D., 1996, ApJ 462, 50
- Hunter D.A., Elmegreen B.G., van Woerden H., 2001, ApJ 556, 773
- Hunter D.A. & Gallagher J.S. III, 1985, AJ 90, 1789
- Hunter D.A., Hawley W.N. & Gallagher J.S. III, 1993, AJ 106, 1797
- Hunter D.A., Wilcots E.M., van Woerden J.S. & Kohle S., 1998, ApJ 495, L47
- Hunter D.A., van Woerden H., Gallagher J.S., 1999, AJ 118, 2184
- Ibata R., Gilmore G., Irwin M.J., 1995, MNRAS 277, 781
- Irwin M. & Hatzidimitriou D., 1995, MNRAS 277, 1354



- Ivezic Z., Goldston J., Finlator K., Knapp G.R., Yanny B., McKay T.A., Amrose S., Krisciunas K., Willman B., Anderson S. and 32 coauthors, 2000, AJ 120, 963
- Israel F.P., 1988, A&A 194, 24
- Jerjen H., Binggeli B. & Freeman K.C., 2000, AJ 119, 593
- Karachentsev I.D. & Drozdovsky I.O., 1998, A&ASS 131, 1
- Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Huchtmeier W.K. & Makarov D.I., 2004, AJ 127, 2031
- Karachentsev I. D., Dolphin A. E., Geisler D., Grebel E. K., Guhathakurta P., Hodge P. W., Karachentseva V. E., Sarajedini A., Seitzer P., Sharina M. E., 2002, A&A 383, 125
- Karachentsev I. D., Sharina M.E., Dolphin A. E., Grebel E. K., Geisler D., Guhathakurta P., Hodge P. W., Karachentseva V. E., Sarajedini A., Seitzer P., 2003a, A&A 398, 467
- Karachentsev I.D., Grebel E.K., Sharina M.E., Dolphin A.E., Geisler D., Guhathakurta P., Hodge P.W., Karachentseva V.E., Sarajedini A., Seitzer P., 2003b, A&A 404, 93
- Karachentseva V. E., Karachentsev I. D., Börngen F., 1985, A&AS 60, 213
- Karachentsev I. D., Tikhonov N.A., Sazonova L.N., 1994, Ast. Letter 20, 84
- Kent S.M., 1985, ApJS 59, 115
- Kerber L. O., Javiel S. C. & Santiago B.X., 2001, A&A 365, 424
- Kim S.C., Sung H., Lee M.G., 2002, astro-ph/0203032
- Kinman T.D., Suntzeff N.B. & Kraft R.P., 1994, AJ 108, 1722
- Kiszkurno-Koziej E., 1988, A&A 196, 26
- Knapen J.H., de Jong R.C., Stedman S., Bramich D.M., 2003, MNRAS 344, 527
- Kobulnicky H.A. & Skillman E.D., 1995, AJ 454, L121

- Kobulnicky H.A. & Skillman E.D., 1996, ApJ 471, 211
- Kodaira K. & Yamashita T., 1996, PASJ 48, 581
- Kraemer S.B., Ho L.C., Chenshaw D.M., Filippenko A.V., Shields J.C., 1999, ApJ 520, 564
- Kroupa P., 2002, MNRAS 330, 707
- Kuhn J.R., Smith H.A. & Hawley S.L., 1996, ApJ 469, L93
- Layden A.C., 1995, AJ 110, 2288
- Lee M.G., Freedman W.L., Madore B.F., 1993, AJ 417, 553
- Lee M.G., Kim M., Sarajedini A., Geisler D., Gieren W., 2002, ApJ 565, 959
- Leitherer C., Vacca W., Conti P.S., Filippenko A.V., Robert C. & Sargent W.L.W., 1996, ApJ 465, 717
- Lira P., Lawrence A., O'Brein P., Johnston A., Terlevich R., Bannister N., 1999, MNRAS 305, 109
- Maiz-Apellaniz J., Cieza L. & Mackenty J.W., 2002, AJ 123, 1307
- Majewski S.R., Ostheimer J.C., Kunkel W.E., Paterson R.J., 2000a, AJ 120, 2550
- Majewski S.R., Ostheimer J. C., Patterson R. J., Kunkel W. E., Johnston K. V., Geisler D., 2000b, AJ 119, 760
- Makarova L.N., Grebel E.K., Karachentsev I.D., Dolphin A.E., Karachentseva V.E., Sharina M.E., Geisler D., Guhathakurta P., Hodge P. W., Sarajedini A., Seitzer P., 2002, A&A 396, 473
- Makarova L.N. & Karachentsev I.D., 2003, Astrophizika 46, 144
- Makarova L.N., Karachentsev I.D. & Georgiev Ts.B., 1997, Astron. Lett. 23, 379
- Márquez I., Masegosa J., Moles M., Varela J., Bettoni D. & Galletta G., 2002, A&A 393, 389

- Марсаков В.А. и Боркова Т.Н., 2001, 6-12 августа, ВАК, Санкт-Петербург
- Martin M.C., 1998, A&AS 131, 77
- Martin C. & Kern B., 2001, ApJ 555, 258
- Martin C.L., Kobulnicky H.A. & Heckman T.M., 2002, ApJ 574, 663
- Масевич А.Г. и Тутуков А.В., 1988, Эволюция звезд: теория и наблюдения, Москва, Наука.
- Mas-Hesse J.M. & Kunth D., 1999, A&A 349, 765
- Mauersberger R., Henkel C., Whiteoak J. B., Chin Y.-N., Tieftrunk A.R., 1996, A&A 309, 705
- McConnachie A. W., Irwin M. J., Ferguson A. M. N., Ibata R. A., Lewis G. F., Tanvir N., 2004, MNRAS 350, 243
- Meurer G.R., Heckman T.M., Leitherer C., Kinney A., Robert C., Garnett D.R., 1995, AJ 110, 2665
- Miller B.W., 1995, BAAS 185, 1365
- Miller S.T. & Veilleux S., 2003, ApJ 592, 79
- Mills B.Y. & Glanfield J.R., 1965, Nature 208, 10
- Minniti D. & Zijlstra A. A., 1996, ApJ 467, 13
- Minniti D., Zijlstra A. A. & Alonso M. V., 1999, AJ 117, 881
- Moran E.C., Fillipenko A.V., Ho L.C., Shields J.C., Belloni T., Comastri A., Snowden S.L., Sramek R.A., 1999, PASP 111, 801
- Morrison H.L., Fry A., Harding P., Boroson T., Stinebring D., Miller E., AAS Meeting 193 - Austin, Texas, January 1999
- Mould J., 2005, AJ 129, 698

- Nakai N., 1989, PASJ 41, 1107
- Ojha D. K., 2001, MNRAS 322, 426
- Olling R.P., 1996, AJ 112, 457
- Ott M., Whiteoak J.B., Henkel C., Wielebinski R., 2001, A&A 372, 463
- Pasquini L., Bonifacio P., Randich S., Galli D., Gratton R.G., 2004, astro-ph/0407524
- Pierre M. & Azzopardi M., 1988, A&A 189, 27
- Preston G.W., Schectman S.A. & Beers T.C., 1991, ApJ 375, 121
- Pritchett C.J., Schade D., Richer H.B., Crabtree D., Yee H.K.C., 1987, ApJ 323, 79
- Pritchett C.J. & van den Bergh S., 1988, ApJ 331, 135
- Prieto M., Aguerri J.A.L., Varela A.M., Munoz-Tunon C., 2001, A&A 367, 405
- Puche D., Carignan C. & Bosma A., 1990, AJ 100, 1468
- Puche D., Carignan C., Wainscoat R. J., 1991, AJ 101, 447
- Rand R.J. & van der Hulst J.M., 1993, AJ 105, 2098
- Rand R.J., 1994, A&A 285, 833
- Rand R.J., Kulkarni S.R. & Hester J.J., 1992, ApJ 396, 97
- Reitzel D.B. & Guhathakurta P., 2002, AJ 124, 234
- Reyle C. & Robin A.C., 2001, A&A 373, 886
- Richer O.-G., Sancisi R., 1994, A&A 290, L9
- Robin A.C., Haywood M., Creze M., Ojha D.K., Bienayme O., 1996, A&A 305, 125
- Rogstad D.H., Crutcher R.M. & Chu K., 1979, ApJ 229, 509
- Rolleston W.R.J., Smart S.J., Dufton P.L., Ryans R.S.I., 2000, A&A 363, 537
- Rossa J. & Dettmar R.-J., 2003, A&A 406, 493

- Rowe J.F., Richer H.B., Brewer J.P., Crabtree D.R., 2005, *AJ* 129, 729
- Ryan-Weber E.V., Webster R.L., Staveley-Smith L., 2003, *MNRAS* 343, 1195
- Saha A., 1985, *ApJ* 289, 310
- Sakai S., Madore B.F., 2001, *ApJ* 555, 280
- Salaris M., Cassisi S. & Weiss A., 2002, *PASP* 114, 375
- Sandage A. 1971, in *Nuclei of Galaxies*, edited by D.J.K. O'Connell (Amsterdam:North-Holland), 601
- Sandage A. & Tammann G.A., 1974, *ApJ* 191, 603
- Schlegel D. J., Finkbeiner D.P., Davis M., 1998, *ApJ* 500, 525
- Schombert J.M. & Bothum G.D., 1987, *AJ* 93, 60
- Searle L. & Zinn R., 1978, *ApJ* 225, 357
- Sharina M., Karachentsev I., Tikhonov N., 1999, *Astr. Lett.* 25, 322
- Shaver P.A., McGee R.X., Danks A.C., Pottasch S.R., 1983, *MNRAS* 204, 53
- Simon J.D., Bolatto A.D., Leroy A., Blitz L., 2003, *ApJ* 596, 957
- Smith A.M. et al., 2001, *ApJ* 546, 829
- Sofue Y., Handa T., 1990, *PASJ* 42, 745
- Spitzer L., 1978, *Physical Processes in the Interstellar Medium*, New York, Wiley-Interscience, p.162
- Stetson P.B., 1987, *PASP* 99, 191
- Stetson P.B., *Users Manual for DAOPHOT II*, 1994
- Stil J.M., 1999, *Dwarf galaxies: Dynamics and star formation*, Dissertation, Leiden, Netherlands

- Stil J.M. & Israel F.P., 2002a, A&A 389, 29
- Stil J.M. & Israel F.P., 2002b, A&A 392, 473
- Swaters R.A., van Albada T.S., van der Hulst J.M., Sancisi R., 2002a, A&A 390, 829
- Swaters R.A., Balcells M., 2002b, A&A 390, 863
- Swaters R.A., Sancisi R. & van der Hulst J.M., 1997, ApJ 491, 140
- Sweigart A.V. & Gross P.G., 1978, ApJS 36, 405
- Sweigart A.V., Greggio L. & Renzini A., 1989, ApJS 69, 911
- Sweigart A.V., Greggio L. & Renzini A., 1990, ApJ 364, 527
- Tenjes P., Haud U., Einasto J., 1998, A&A 335, 449
- Tikhonov N.A., Bilkina B.I., Karachentsev I.D., Georgiev T.B., 1991, A&AS 89, 1
- Тихонов Н.А., 2002, Диссертация, Санкт-Петербург, Россия
- Тихонов Н.А., 2005а, АЖ 82, н.7, 1
- Тихонов Н.А., 2005б, АЖ, принято к печати
- Tikhonov N.A. & Galazutdinova O.A., 2002, A&A 394, 33
- Tikhonov N.A., Galazutdinova O.A., Aparicio A., 2003, A&A 401, 863
- Tikhonov N. A., Galazutdinova O. A., Drozdovsky I. O., 2005, A&A 431, 127
- Тихонов Н.А. и Галазутдинова О.А., 2005, Астрофизика 48, н. 2, 261
- Theis C. & Kohle S., 2001, A&A 370, 365
- Thim F., Hoessel J.G., Saha A., Claver J., Dolphin A., Tammann G.A., 2004, AJ 127, 2322
- Thronson H.A.J., Hunter D.A., Teleso C.M., Greenhouse M., Harper D.A., 1988, ApJ 334, 605

- Thuan T.X., Hibbard J.E. & Levrier F., 2004, AJ 128, 617
- Thuan T.X. & Izotov Y.I., 2005, astro-ph/0503429
- Tolstoy E., Saha A., Hoessel J.G., McQuade K., 1995, AJ 110, 1640
- Tsikoudi V., 1979, ApJ 234, 842
- Tully R.B., 1988, Nearby Galaxies Catalog ( Cambridge: Cambridge Univ. Press)
- Turner J.L., Beck S.C. & Hurt R.L., 1997, ApJ 474, 11
- van der Hulst J.N., 1978, in Structure and Properties of Nearby Galaxies, IAU Symp., No.77, (Reidel, Dordrecht and Boston), 269
- van der Kruit P.C. & Searle L., 1981, A&A 95, 116
- van der Kruit P.C. & Searle L., 1982, A&A 110, 61
- Van de Steene G.C., Jacoby G.H., Praet C., Guardullo R., Dejonghe H., 2004, astro/ph 0407348
- van Woerden H., Bosma A. & Mebold U., 1975, in La Dynamique des Galaxies Spirales, ed. L Weliachew (Paris: Editions du Centre National de la Recherche Scientifique), 484
- Walker I. R., Mihos J. C., & Hernquist L., 1996, ApJ 460, 121
- Wang M., Henkel C., Chin Y.-N., Whiteoak J.B., Hunt Cunningham M., Mauersberger R., Muders D., 2004, astro-ph/0405346
- Weilbacher P.M., 2002, PhD Dissertation, Notingen
- Westpfahl D. J., Coleman P. H., Alexander J., Tongue T., 1999, AJ 117, 868
- Wilcots E.M. & Prescott M.K.M., 2004, AJ 127, 1900
- Wyse R.F.G., 1999a, in ASP Conf. Ser. 165, The Third Stromlo Symposium: The Galactic Halo, ed. B. K. Gibson, T. S. Axelrod, & M. E. Putman (San Francisco: ASP)

Wyse R.F.G., 1999b, in *The Formation of Galactic Bulges*, ed. Carollo C. M., Ferguson H. C. & Wyse R. F. G. (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 195

Xilouris E. M., Alton P. B., Davies J. I., Kylafis N. D., Papamastorakis J., Trewella M., 1998, *A&A* 331, 894

Yun M.S., Ho P.T.P., Lo K.Y., 1994, *Nature* 372, 530

Zheng Z., Shang Z., Su H., Burstein D. et al., 1999, *AJ* 117, 2757

Zibetti S., White S.D.M. & Brinkmann J., 2004, *MNRAS* 347, 556

Zickgraf F.-J., Humphreys R. M., Sitko M. L., Manley T., 1990, *PASP* 102, 925

Zinn R., 1985, *ApJ* 293, 424

Zucker D., Kniazev A., Bell E., Martinez-Delgado D. et al., 2004, *ApJ* 612, L117.



# Список иллюстраций

1.1	<i>a.</i> и <i>b.</i> Диаграмма „цвет – звездная величина” ACS полей, расположенных на разных галактических широтах, в которой присутствуют только фоновые звезды. <i>c.</i> Диаграмма „цвет – звездная величина” удаленного поля S2 галактики NGC891, в котором присутствуют как звезды, принадлежащие галактике, так и фоновые звезды. . . . .	25
1.2	Результаты сканирования площадок (рис. 1.1) с фоновыми звездами. Пунктирной линией показан средний уровень фоновых звезд в исследуемых областях. . . . .	26
2.1	<b>a)</b> Эмпирическое положение ветвей красных гигантов на диаграмме $[M_I, (V - I)_0]$ шаровых скоплений Галактики: M 15, M 2, NGC 1851 и 47 Tuc, металличности которых равны: $-2.17$ , $-1.58$ , $-1.29$ и $-0.71$ , соответственно. <b>b)</b> Зависимость $[M_V, (V - I)_0]$ для тех же скоплений. <b>c)</b> Диаграмма $[M_I, (V - I)_0]$ , показывающая положение теоретических изохрон для значения металличности $[Fe/H] = -1.3$ и возрастов 7, 9, 13 и 17 млрд. лет. . . . .	34
3.1	DSS-2 $40' \times 40'$ изображение галактики M 81. Показано расположение исследуемых полей (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, BK3N, Ho IX, Arp's ring), полученных на HST/WFPC2 и ACS/WFC. Эллипсом очерчена граница между толстым диском и гало, полученная в результате экстраполяции данных. Линией, пересекающей поле S7, показана уточненная граница толстого диска в этом поле. . . . .	44

- 3.2  $[(V - I), I]$  диаграммы исследуемых полей галактики М 81. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия), определенный на основе фотометрии искусственных звезд. . . . . 46
- 3.3 Диаграмма „цвет — величина” исследуемого поля S7 галактики М 81. Ветви голубых и красных сверхгигантов принадлежат карликовой галактике HoIX, а ветвь красных гигантов — галактике М 81. . . . . 47
- 3.4 График неполноты выборки звезд галактики М 81 (площадки S3 и S4), построенный на основе теста с искусственными звездами. . . . . 48
- 3.5 *Верхний график.* Распределение численной плотности RGB и AGB звезд вдоль радиуса М 81, исправленное за наклон галактики и за неполноту выборки звезд. Отклонения некоторых точек от среднего уровня звездной плотности является результатом суммирования звезд BK3N, HoIX и Agr’s ring и звезд основных структур М 81. *Нижний график.* Распределение численной плотности звезд М 81, в котором учтено „загрязнение” основных структур М 81 звездами карликовых BK3N, HoIX и Agr’s ring. Наблюдаемое изменение градиента численной плотности позволяет определить границу толстого диска. . . . . 55
- 3.6 Распределение численной плотности звезд в поле S7 галактики М 81. При  $R = 24'$  происходит изменение градиента численной плотности RGB звезд, что указывает на границу между толстым диском и гало. . . . . 56
- 3.7  $34' \times 33'$  WFI изображение NGC 300, полученное на MPG/ESO 2.2 метровом телескопе. Показаны положения девяти (WFPC2 и ACS/WFI) исследуемых полей: S1, S2, S3, F1, F2, F3, F4, F5, F6. Эллипсом обозначена граница между толстым диском и гало. . . . . 56
- 3.8 Диаграмма „цвет — величина” полей S1, S2, S3, F1, F2, F3 NGC 300. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 22.67$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия). . . . . 57

- 3.9 Распределение численной плотности RGB звезд вдоль радиуса галактики NGC 300. Видно, что прямые, аппроксимирующие распределение красных гигантов на разных расстояниях от центра галактики, имеют различные наклоны (см. табл. 4, Приложение А). Пересечение прямых указывает на точку перехода от толстого диска к гало на  $R \sim 9'$  (без учета угла наклона галактики). . . . . 57
- 3.10 Распределение численной плотности RGB, AGB и голубых звезд в тонком диске NGC 300 (поле S2). Падение до нуля значения численной плотности голубых звезд на  $R = 5.7$  кпк указывает на границу тонкого диска. Видно, что красные гиганты имеют монотонное распределение в пределах всего поля, что указывает на принадлежность этих звезд другой подсистеме (толстому диску). . . . . 58
- 3.11 DSS-2 изображение галактики NGC 4395. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2 и ACS/WFC. Внутренний круг указывает на минимальную ориентировочную границу тонкого диска. Внешний – на границу между толстым диском и гало. . . . . 58
- 3.12 Диаграммы „цвет – звездная величина” для исследуемых полей NGC 4395. Пунктиром показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 24.27$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия). . . . . 59
- 3.13 Распределение численной плотности красных гигантов в исследуемых полях NGC 4395. Изменение градиента плотности в поле S3 соответствует границе между толстым диском и гало. . . . . 59
- 4.1 Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики NGC 891. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Значение  $I_{TRGB} = 25.97$  определено по исследованию звезд в поле S1. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия). Серыми линиями выделены области AGB и RGB звезд, используемые для анализа численного распределения. . . . . 62

- 4.2 DSS-2 изображение галактики NGC 891. Показано расположение исследуемых полей, полученных на камерах WFPC2 и ACS телескопа HST. Внутренний эллипс указывает на границу между толстым диском и гало. Внешний — границу гало. . . . . 63
- 4.3 *a.* Численная плотность распределения AGB звезд ( $SN$ ) вдоль оси  $Z$  галактики NGC 891. Виден излом в распределении на расстоянии  $Z = 5.6$  кпк. *b.* Распределение численной плотности красных гигантов NGC 891. Излом в распределении красных гигантов виден на расстоянии  $Z = 7.6$  кпк. Точка излома соответствует границе между толстым диском и гало. *c.* Распределение численной плотности RGB звезд в поле S2: звездная плотность убывает вдоль  $Z$  координаты и падает до фоновых значений при  $Z = 23$  кпк. . . . . 64
- 4.4 DSS-2 изображение галактики NGC 55. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2. Эллипсом обозначена предполагаемая граница между толстым диском и гало. . . . . 66
- 4.5 Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики NGC 55. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 22.67$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия). Ромбом выделена область ветви красных гигантов, которая использовалась для анализа распределения численной плотности. . . . . 67
- 4.6 Распределение численной плотности RGB звезд вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 55 (поля S1, S2, S3). . . . . 67
- 4.7 DSS-2 изображение галактики NGC 4144. Показано расположение ACS/WFC поля. Внутренний эллипс соответствует границе между толстым диском и гало, а внешний — границе гало. . . . . 69
- 4.8 Диаграмма  $[(V - I), I]$  поля S1 галактики NGC 4144. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов ( $I_{TRGB} = 25.20$ ). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия). . . . . 70

- 4.9 Зависимость численной плотности RGB звезд вдоль оси  $Z$  галактики NGC 4144. Распределение голубых звезд показано кружками, AGB — точками, RGB — квадратами. . . . . 71
- 4.10 DSS-2 изображение галактики NGC 4244. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2. Эллипсом очерчена граница толстого диска. Предполагаемая граница гало должна проходить на  $Z \sim 8$  кпк. . . . . 72
- 4.11 Диаграммы „цвет — величина” исследуемых полей (S1, S2, S3) галактики NGC 4244. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов. Среднее значение  $I_{TRGB} = 24.16$ . Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия). . . . . 73
- 4.12 Распределение численной плотности звезд вдоль малой оси галактики NGC 4244. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов. При  $Z = 2.7$  кпк (b) виден резкий излом градиента численной плотности красных гигантов, который интерпретируется нами, как переход от подсистемы толстого диска к гало. . . . . 74
- 4.13 DSS-2 изображение галактики IC 2233 с указанием положения ACS/WFC поля. Эллипсами обозначены границы найденных толстого диска и гало. . . . . 75
- 4.14 Диаграммы „цвет — величина” исследуемых полей галактики IC 2233. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Серой линией очерчены области звезд AGB и голубых звезд. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд(сплошная линия). . . . . 76
- 4.15 Распределение численной плотности звезд вдоль оси  $Z$  галактики NGC 2233. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов. . . . . 77
- 4.16 DSS-2 изображение галактики NGC 4631 с указанием положения ACS/WFC полей. Эллипсом обозначена граница толстого диска. . . . . 79

- 4.17 Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики NGC 4631. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). *Слева.* Серой линией очерчены области AGB и голубых звезд. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд (сплошная линия). *В середине.* Серым ромбом показана область исследуемых красных гигантов. *Справа.* Диаграмма „цвет – величина” близкой спутниковой галактики NGC 4627. . . . . 80
- 4.18 Распределение численной плотности звезд поля S1 вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 4631. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов. . . . . 81
- 4.19 Распределение численной плотности звезд поля S2 вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 4631. Обозначения те же, что на рис. 4.18. . . . . 81
- 4.20 Пространственное распределение AGB звезд в полях S1 и S2 в NGC 4631. 82
- 4.21 DSS-2 изображение галактики NGC 5023 с указанием положения ACS/WFC поля. Эллипсами обозначены границы найденных толстого диска и гало. 84
- 4.22  $[(V - I), I]$  диаграммы исследуемого поля галактики NGC 5023. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). *Слева.* Серой линией очерчены области AGB и голубых звезд. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки (сплошная линия). *Справа.* Ромбом показана область красных гигантов, использованная нами для вычисления распределения звезд. . . . . 85
- 4.23 Распределение численной плотности звезд вдоль оси  $Z$  в галактике NGC 5023. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов. 86
- 4.24 DSS-2 изображение галактики IC 5052 с указанием положения ACS/WFC поля. Эллипсами обозначены границы найденных толстого диска и гало. 87

- 4.25 Диаграммы „цвет – величина” поля S1 галактики IC 5052. Пунктирной линией показано положение вершины ветви красных гигантов (TRGB). Серой линией очерчены области AGB и голубых звезд. Серым ромбом показана область исследуемых красных гигантов. Указаны боксы ошибок фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд. . . . . 88
- 4.26 Распределение численной плотности звезд вдоль оси  $Z$  в галактике IC 5052. Квадратами показано распределение красных гигантов, кружками — голубых звезд, точками — звезд асимптотической ветви гигантов. 88
- 4.27 DSS-2 изображение NGC 4945. Показаны поля, полученные на HST/WFPC2. 89
- 4.28  $[(V - I), I]$  диаграмма поля S1 галактики NGC 4945 с учетом поглощения. Пунктиром показано положение  $I_{TRGB} = 24.13$ . Сплошная линия демонстрирует уровень 50% полноты выборки звезд. Указаны боксы ошибок фотометрии. . . . . 90
- 4.29 Распределение численной плотности красных гигантов в исследуемых полях S1 и S2 галактики NGC 4945. . . . . 90
- 5.1 Изображение NGC 2366, взятое из DSS-2 обзора. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2. Указаны направления  $Z$ , вдоль которых производился анализ распределения звезд. Внутренний эллипс ограничивает пространство тонкого диска. Внешний соответствует границе между толстым диском и гало. . . . . 93
- 5.2 Диаграммы „цвет — величина” для исследуемых полей (S1, S2, S3, S4, S6, S7) галактики NGC 2366. Пунктиром показано положение  $I_{TRGB}^0 = 23.47$  с учетом поглощения света, сплошной линией — уровень 50% полноты выборки звезд. Указаны боксы фотометрических ошибок. На диаграмме площадки S3 ромбом очерчена область ветви красных гигантов, используемая нами для определения параметров распределения. . . . . 95
- 5.3 Распределение численной плотности звезд разного типа в исследуемых полях (S1, S2, S3, S4, S5) NGC 2366 вдоль оси  $Z$  и вдоль радиуса  $R$ . Полными квадратами обозначены красные гиганты, кружками – голубые звезды, звездочками – звезды асимптотической ветви гигантов. . . . . 96

- 5.3 *Продолжение:* Распределение численной плотности звезд разного возраста в полях S6 и S7 галактики NGC 2366 вдоль оси  $Z$  и вдоль радиуса  $R$ . . . . . 97
- 5.4 DSS-2 изображение галактики NGC 2976. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2. Эллипсом обозначена граница тонкого диска. . . . . 99
- 5.5  $[(V - I), I]$  диаграмма поля S1 галактики NGC 2976. Пунктирная линия указывает положение вершины ветви красных гигантов  $I_{TRGB} = 24.02 \pm 0.08$ . Сплошная линия показывает 50% уровень полноты выборки звезд. Справа указаны боксы ошибок. . . . . 100
- 5.6 Распределение численной плотности звезд вдоль радиуса галактики NGC 2976. Кружками показано распределение голубых звезд, звездочками — звезд AGB, квадратами — красных гигантов. . . . . 101
- 5.7 DSS-2 изображение галактики NGC 5253. Показано расположение исследуемых полей, полученных на HST/WFPC2 и ACS/WFC. Серым эллипсом очерчена граница между тонким и толстым диском. . . . . 102
- 5.8 Диаграммы „цвет – величина” исследуемых полей галактики NGC 5253. Пунктирной линией указана предположительная граница TRGB, определенная нами на основе модуля расстояния, полученного Gibson et al.(2000). Нанесены боксы фотометрических ошибок. Уровень 50% полноты выборки звезд указан сплошной линией. Ромбом выделена область ветви красных гигантов поля S2, используемая для анализа распределения их численной плотности. . . . . 103
- 5.9 Распределение численной плотности звезд NGC 5253 вдоль радиуса галактики. Кружками показано распределение голубых звезд, точками — звезд AGB, квадратами — красных гигантов. . . . . 103
- 5.10 DSS-2 изображение NGC 1569. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2. Внутренний эллипс — граница тонкого диска, внешний — возможная граница толстого диска. . . . . 105



- 5.11 Диаграммы „цвет – величина” четырех из восьми исследуемых полей в NGC 1569. Пунктиром показано положение  $I_{TRGB} = 24.40 \pm 0.05$ . Серым ромбом в поле S3 выделена область красных гигантов, используемая для анализа распределения. Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд. . . . . 106
- 5.12 Численная плотность красных гигантов в исследуемых полях. Изменение градиента числа звезд заметно в полях S3 и S6. . . . . 108
- 5.13 DSS-2 изображение NGC 4214. Показаны исследуемые площадки, полученные на HST/WFPC2. Кругом очерчена граница толстого диска. . . . 109
- 5.14 Диаграмма  $[(V - I), I]$  для центрального поля S1 галактики NGC 4214. Пунктиром показано положение вершины ветви красных гигантов  $I_{TRGB} = 23.37$ , определенное по полю S1. Выделены области голубых и AGB звезд. Указаны уровень 50% полноты выборки звезд и боксы ошибок фотометрии. 110
- 5.15 Численная плотность RGB звезд в полях S4 и S5 галактики NGC 4214. . 110
- 5.16 Поле DSS-2 с изображением галактики NGC 4449. Отмечено положение площадок HST/WFPC2, используемых нами для фотометрии звезд. Внутренний эллипс указывает максимальный предполагаемый размер тонкого диска. Внешний эллипс — минимальный предполагаемый размер толстого диска. . . . . 112
- 5.17  $[(V - I)_0, I_0]$  диаграммы (с учетом поглощения света) исследуемых полей NGC 4449. Пунктиром показано положение вершины ветви красных гигантов  $I_{TRGB} = 24.00 \pm 0.03$ . Серым ромбом выделена используемая нами область красных гигантов (поле S3). Указаны ошибки фотометрии и уровень 50% полноты выборки звезд. . . . . 113
- 5.18 Поверхностная плотность красных гигантов в исследуемых полях NGC 4449. Квадратами обозначено распределение красных гигантов в поле S3, звездами — в поле S4. . . . . 113
- 6.1 Эмпирическая модель звездного строения спиральной галактики. На графиках показано качественное поведение численной плотности звезд разного типа при удалении от центра галактики. . . . . 117

- 6.2 Соотношения между полученными в работе параметрами галактик. *a.* Зависимость между сжатием галактики ( $a/b$ ) и отношением размеров толстого диска к тонкому. Квадратами обозначены спиральные галактики. Квадратами с вписанными треугольниками — иррегулярные галактики.
- b.* Зависимость между сжатием галактики ( $a/b$ ) и отношением размера гало к размеру толстого диска. . . . . 119

# Список таблиц

1	Характеристики звездных подсистем, выделяемых в нашей Галактике . . .	3
A.1	Общие сведения об исследуемых галактиках . . . . .	150
A.2	Журнал наблюдений полей, полученных на HST. . . . .	151
A.3	Итоговые размеры звездных структур . . . . .	154
A.4	Таблица расчетов наклонов градиентов толстого диска и гало, ошибки и значимость определения наклонов . . . . .	154

# Приложение А

Таблица А.1: Общие сведения об исследуемых галактиках

Название	R.A.(2000.0)	DEC.(2000.0)	$V_h$	$B_t^0$	Type	$A_v$	$A_i$	$i$	$m - M$	$M_{abs}$
NGC55	00 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup> 53. <sup>s</sup> 60	-39°11'47"9	129	7.63	SB(s)m:sp	0.044	0.026	85.0	26.64	-19.01
NGC 891	02 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup> 33. <sup>s</sup> 41	+42°20'56."9	528	9.37	SA(s)b? sp HII	0.215	0.126	90.0	29.96	-20.59
NGC300	00 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 54. <sup>s</sup> 48	-37°41'03"8	144	8.49	SA(s)d	0.042	0.025	40.0	26.50	-18.01
NGC1569	04 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> 49. <sup>s</sup> 06	+64°50'52."6	-104	9.42	IBm;Sbrst Sy1	2.320	1.358	68.4	27.11	-17.69
NGC2366	07 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 54. <sup>s</sup> 66	+69°12'56."8	100	10.95	IB(s)m	0.120	0.070	90.0	27.48	-16.53
IC2233	08 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 58. <sup>s</sup> 91	+45°44'31."7	565	11.70	SB(s)d: sp	0.171	0.100	90.0	30.09	-18.39
NGC2976	09 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup> 15. <sup>s</sup> 46	+67°54'59."0	3	10.30	SAc pec HII	0.230	0.135	61.5	27.99	-16.69
M 81	09 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup> 33. <sup>s</sup> 17	69°03'55"1	-34	7.39	SA(s)ab: LINER Sy1.8	0.266	0.155	59.0	27.93	-17.20
NGC4144	12 <sup>h</sup> 09 <sup>m</sup> 58. <sup>s</sup> 60	+46°27'25."8	265	11.10	SAB(s)cd? sp HII	0.050	0.029	83.6	29.30	-18.20
NGC4214	12 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> 39. <sup>s</sup> 17	+36°19'36."8	291	10.14	IAB(s)m HII	0.072	0.042	42.1	27.34	-17.11
NGC4244	12 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> 29. <sup>s</sup> 66	+37°48'25."6	244	9.28	SA(s)cd: sp HII	0.069	0.040	90.0	28.16	-18.88
NGC4395	12 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> 49. <sup>s</sup> 92	+33°32'48."3	319	10.57	SA(s)m; LINER Sy1.8	0.057	0.033	70.7	28.34	-17.77
NGC4449	12 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 11. <sup>s</sup> 12	+44°05'36."8	207	9.94	IBmHII	0.064	0.037	56.1	28.06	-18.12
NGC4631	12 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup> 08. <sup>s</sup> 01	+32°32'29."4	606	8.61	SB(s)d	0.056	0.033	90.0	29.26	-20.65
NGC4945	13 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 27. <sup>s</sup> 48	-49°28'05."6	560	7.43	SB(s)cd: sp Sy2	0.585	0.343	82.7	27.91	-20.48
NGC5023	13 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 12. <sup>s</sup> 60	+44°02'28."4	407	11.59	Scd	0.060	0.035	90.0	28.94	-17.35
NGC5253	13 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 55. <sup>s</sup> 96	-31°38'24."4	404	10.47	Im pec; HII Sbrst	0.186	0.109	90.0	27.6	-17.10
IC5052	20 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> 01. <sup>s</sup> 63	-69°11'35."9	598	10.52	SBd:sp	0.168	0.098	90.0	28.75	-18.23

Данные о галактиках взяты из NED

Коэффициенты поглощения взяты по Schlegel et al.(1998)

Угол наклона галактики взят из LEDA

Значения  $m - M$ ,  $M_{abs}$  получены в данной работе

Таблица А.2: Журнал наблюдений полей, полученных на HST.

Название галактики	Область	Дата наблюдений	Фильтр	Расстояние от центра галактики (")	Время экспозиции	Номер заявки на HST	Число звезд на диаграмме	
NGC 55	S1	2001-06-13	F814w	8.00	4×500	9086	832	
		2001-06-13	F606w	8.00	4×500	9086		
	S2	2000-06-15	F814w	3.59	2×800+900	8697	5654	
		2000-06-15	F555w	3.59	3×800	8697		
	S3	2000-06-10	F814w	8.97	2×800+900	8697	10532	
2000-06-10		F555w	8.97	3×800	8697			
NGC891	S1	2003-02-19	F814w	2.12	2×2620+2472	9414	108970	
		2003-02-19	F606w	2.12	2×2620+2472	9414		
	S2	2003-02-20	F814w	7.94	2×1000	9676	900	
		2003-02-20	F606w	7.94	2×400+4×500	9676		
NGC 300	S1	2001-09-13	F814w	7.12	2×500	8584	4387	
		2001-09-13	F555w	7.12	2×500	8584		
	S2	2001-07-02	F814w	5.99	2×300	9162	12004	
		2001-07-02	F606w	5.99	2×300	9162		
	S3	2001-06-20	F814w	12.83	4×500	9086	2520	
		2001-06-20	F606w	12.83	4×500	9086		
	F1	2002-07-17	F555w	8.05	1080	9492	89615	
		2002-07-17	F814w	8.05	1080	9492		
	F2	2002-07-19	F555w	2.07	1080	9492	182106	
		2002-07-19	F814w	2.07	1080	9492		
	F3	2002-09-28	F555w	0.91	1080	9492	191107	
		2002-09-28	F814w	0.91	1080	9492		
	F4	2002-07-21	F555w	8.97	1080	9492	53494	
		2002-07-21	F814w	8.97	1080	9492		
	F5	2002-12-25	F555w	5.45	1080	9492	128370	
		2002-12-25	F814w	5.45	1080	9492		
	F6	2002-09-26	F555w	6.15	1080	9492	68730	
		2002-09-26	F814w	6.15	1080	9492		
	NGC1569	S1	1998-10-21	F814w	0.50	500	6423	23270
			1998-10-21	F555w	0.50	880	6423	
S2		2001-08-12	F606w	5.15	300+500	9244	—	
		S3	2000-10-19	F814w	5.07	3000	8059	840
2000-10-19			F606w	5.07	1800	8059		
S4		2000-12-13	F814w	5.22	3900	8059	730	
		2000-12-13	F606w	5.22	5400	8059		
S5		1998-02-25	F606w	7.44	300+500	7909	—	
		S6	2002-01-07	F814w	5.03	2000	8059	448
2002-01-07			F606w	5.03	1400	8059		
S7		2002-08-05	F814w	6.54	100+300	9634	—	
		2002-08-05	F606w	6.54	200	9634		
S8	2000-05-03	F606w	5.22	2300	8544	—		

Название галактики	Область	Дата наблюдений	Фильтр	Расстояние от центра галактики (')	Время экспозиции	Номер заявки на HST	Число звезд на СМД
NGC2366	S1	2000-09-18	F814w	0.72	600	8601	11403
		2000-09-18	F606w	0.72	600	8601	
	S2	2000-12-12	F814w	1.20	4100	8769	17165
		2000-12-11	F555w	1.20	6700	8769	
	S3	2002-01-08	F814w	3.42	2×1000	9318	6008
		2002-01-08	F606w	3.42	2×700	9318	
	S4	2001-12-29	F814w	3.66	2×1000	9318	2853
		2001-12-29	F450w	3.66	2×1000	9318	
	S5	1999-07-27	F606w	7.00	2×500	8090	—
		1999-07-27	F606w	7.00	2×1000	8090	
		1999-07-27	F606w	7.00	2×1200	8090	
		1999-07-27	F606w	7.00	2×1500	8090	
	S6	1996-04-19	F814w	10.03	3400	5971	450
		1996-04-19	F606w	10.03	7900	5971	
S7	1996-12-07	F814w	6.54	15000	6802	1648	
	1996-12-07	F606w	6.54	4200	6802		
IC2233	S1	2004-04-29	F814w	0.40	2×350	9765	27120
		2004-04-29	F606w	0.40	2×338	9765	
NGC2976	S1	2000-09-11	F814w	1.38	600	8601	19700
		2000-09-11	F606w	1.38	600	8601	
	S2	2001-03-12	606w	5.12	2×1000	8805	—
M 81	S1	1998-04-17	F814w	2.96	1000+1200	7909	18164
		1998-04-17	F606w	2.96	2×1000	7909	
	S2	1999-01-26	F814w	5.18	3×1500	8059	22933
		1999-01-26	F606w	5.18	5×1500	8059	
	S3	2001-06-04	F814w	3.47	4×500	9073	19143
		2001-06-04	F555w	3.47	4×500	9073	
	S4	2001-06-30	F814w	12.78	3×1400	9086	1611
		2001-06-30	F606w	12.78	4×1300	9086	
	S5	2001-09-01	F814w	6.09	2×1100	8584	10150
		2001-09-01	F555w	6.09	2×1100	8584	
	S6	2002-05-28	F814w	9.52	800	9634	7810
		2002-05-28	F606w	9.52	2×500	9634	
	S7	2004-02-07	F814w	12.61	1160	9796	7550
		2004-02-07	F555w	12.61	1160	9796	
BK3N	2000-08-29	F814w	10.87	600	8061	519	
	2000-08-29	F606w	10.87	600	8061		
Ho IX	2001-06-27	F814w	11.39	600	8061	3655	
	2001-06-27	F606w	11.39	600	8061		
Arp's loop	2000-07-30	F814w	17.61	600	8061	956	
	2000-07-30	F606w	17.61	600	8061		
NGC4144	S1	2003-12-08	F814w	0.98	350	9765	63605
		2003-12-08	F606w	0.98	338	9765	

Название галактики	Область	Дата наблюдений	Фильтр	Расстояние от центра галактики (')	Время экспозиции	Номер заявки на HST	Число звезд на СМД
NGC4214	S1	1997-07-01	F814w	0.18	2×600	6569	18002
		1997-07-01	F555w	0.18	2×600	6569	
	S2	1997-06-29	F814w	0.38	200	6716	8610
		1997-06-29	F555w	0.38	200	6716	
		1997-12-09	F814w	0.64	200	6716	6662
		1997-12-09	F555w	0.64	200	6716	
	S3	2003-02-25	F606w	5.29	2×500	9676	—
	S4	2001-04-09	F606w	5.15	2×1000	9244	—
S5	1998-07-23	F606w	7.30	900	7909	—	
NGC4244	S1	2001-06-11	F814w	3.77	600	8601	9680
		2001-06-11	F606w	3.77	600	8601	
	S2	2001-06-30	F814w	2.09	6×500	9086	3945
		2001-06-30	F606w	2.09	6×500	9086	
	S3	2003-11-12	F814w	0.33	350	9765	115990
		2003-11-12	F606w	0.33	338	9765	
NGC4395	S1	1998-01-06	F814w	0.48	3×500	6464	18000
		1998-01-06	F555w	0.48	3×500	6464	
	S2	2004-06-18	F814w	1.84	340	9774	97900
		2004-06-18	F555w	1.84	680	9774	
	S3	2004-04-26	F814w	12.74	4000	9033	3096
		2004-04-19	F606w	12.74	4000	9033	
NGC4449	S1	1998-01-09	F814w	0.63	200	6716	9780
		1998-01-09	F555w	0.63	200	6716	
	S2	2001-05-28	F814w	1.74	600	8601	16821
		2001-05-28	F606w	1.74	600	8601	
	S3	1996-02-21	F814w	5.09	2×700	5971	2430
		1996-02-22	F606w	5.09	700+800	5971	
	S4	2001-12-23	F606w	5.27	3×1000	9244	—
	NGC4631	S1	2003-08-03	F814w	0.51	2×350	9765
2003-08-03			F606w	0.51	2×338	9765	
S2		2004-06-09	F814w	3.42	2×350	9765	108980
		2004-06-09	F606w	3.42	2×338	9765	
NGC4945	S1	2001-06-25	F814w	4.59	4×500+2×600	9086	12000
		2001-06-25	F606w	4.59	4×500+2×600	9086	
	S2	1998-03-25	F606w	6.93	2×500+700	7909	5150
NGC5023	S1	2004-07-02	F814w	0.35	2×350	9765	49628
		2004-07-02	F606w	0.35	2×338	9765	
IC5052	S1	2003-12-13	F814w	0.31	2×350	9765	63108
		2003-12-13	F606w	0.31	2×338	9765	
NGC5253	S1	1997-07-26	F814w	0.53	200	6716	7100
		1997-07-26	F555w	0.53	200	6716	
	S2	1999-07-26	F814w	5.32	1000+1500	8059	720
		1999-07-26	F606w	5.32	1000+1500	8059	
	S3	1996-03-12	F814w	8.06	2900	5971	560
		1996-03-12	F606w	8.06	2800	5971	
	S4	2002-08-20	F775w	8.63	400+600	9480	—
	S5	2004-03-09	F775w	10.68	2×500	9575	—



Таблица А.3: Итоговые размеры звездных структур

Название галактики	$a \times b$ (')	$a \times b$ (кпк)	Размеры		$\sigma_{td}$ (кпк)	Размеры гало (кпк)
			тонкого диска (кпк)	толстого диска (кпк)		
NGC 55	$32.4 \times 5.6$	$20.0 \times 3.5$				
NGC 891	$13.5 \times 2.5$	$38.6 \times 7.2$	$? \times 4.0$	$? \times 15.2$	$\pm 2.1$	$? \times 47.0$
NGC 300	$21.9 \times 15.5$	$12.8 \times 9.0$	$? \times 10.4$	$? \times 20.0$	$\pm 1.5$	
NGC 1569	$3.6 \times 1.8$	$2.8 \times 1.4$				
NGC 2366	$8.1 \times 3.3$	$7.4 \times 3.0$				
IC 2233	$5.2 \times 0.6$	$15.8 \times 1.8$	$? \times 2.2$	$? \times 3.8$	$\pm 0.1$	$? \times 9.6$
NGC 2976	$5.9 \times 2.7$	$6.8 \times 3.1$				
M 81	$26.9 \times 14.1$	$30.1 \times 15.8$		$? \times 82.0$	$\pm 6.0$	
NGC 4144	$6.0 \times 1.3$	$12.6 \times 2.7$	$? \times 3.2$	$? \times 4.4$	$\pm 0.5$	$? \times 10.8$
NGC 4214	$8.5 \times 6.6$	$7.3 \times 5.6$	$? \times 3.0$			
NGC 4244	$19.4 \times 2.1$	$24.4 \times 2.6$	$? \times 2.6$	$? \times 5.2$	$\pm 0.5$	
NGC 4395	$13.2 \times 11.0$	$17.9 \times 14.9$			$\pm 2.5$	
NGC 4449	$6.2 \times 4.4$	$7.4 \times 5.2$		$? \times \sim 14$		
NGC 4631	$15.5 \times 2.7$	$32.1 \times 5.9$	$? \times 4.4$	$? \times 6.0$	$\pm 0.4$	$? \times 16 - 20$
NGC 5023	$7.3 \times 0.8$	$14.2 \times 1.6$	$? \times 1.6$	$? \times 3.2$	$\pm 0.1$	$? \times 6.4$
NGC 4945	$20.0 \times 3.8$	$22.2 \times 4.2$		$? \times 13.6$		
NGC 5253	$5.0 \times 1.9$	$4.8 \times 1.8$	$? \times 2.0$			$? \times 14$
IC 5052	$5.9 \times 0.8$	$9.6 \times 1.3$	$? \times 2.0$	$? \times 3.8$	$\pm 0.2$	$? \times 8.0$

Таблица А.4: Таблица расчетов наклонов градиентов толстого диска и гало, ошибки и значимость определения наклонов

Название галактики	толстый диск				гало				значимость наклонов
	$k$	$l$	$\sigma_k$	$\sigma_l$	$k$	$l$	$\sigma_k$	$\sigma_l$	
NGC55	-0.44	3.27	0.01	0.03					
NGC 891	-0.14	3.34	0.002	0.01	-0.097	3.05	0.005	0.04	8.0
NGC300	-0.32	4.24	0.01	0.05					
IC2233	-1.02	3.19	0.01	0.01	-0.15	1.72	0.015	0.05	50.0
M 81	-0.12	3.58	0.004	0.05	-0.03	1.74	0.007	0.19	6.0
NGC4144	-0.71	2.99	0.01	0.01	-0.45	2.42	0.02	0.06	12.0
NGC4244	-1.09	3.54	0.02	0.05	-0.31	1.68	0.09	0.32	9.0
NGC4395	-0.18	4.14	0.03	0.49	-0.02	1.18	0.03	0.63	20.0
NGC4449	-0.13	2.18	0.01	0.06					
NGC4631	-0.45	2.97	0.01	0.03	-0.09	1.83	0.03	0.10	12.0
NGC5023	-1.88	3.88	0.02	0.02	-0.35	1.21	0.06	0.02	25.0
NGC4945	-0.23	2.65	0.02	0.12	0.00	0.59	0.04	0.26	4.0
IC5052	-1.38	3.86	0.02	0.03	-0.58	2.39	0.03	0.08	25.0

$k$  и  $l$  являются коэффициентами уравнения прямой  $lg(SN) = k \cdot R + l$ .

$\sigma_k$  и  $\sigma_l$  — ошибки определения этих коэффициентов.

Значимость наклонов определяется формулой:  $(k_{thick\ disk} - k_{halo})/\sigma_{max}$ .