

УДК: 524.726

## ЗВЕЗДНЫЕ ДИСКИ И ГАЛО ВИДИМЫХ С РЕБРА СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК: NGC 891, NGC 4144, NGC 4244

Н.А.ТИХОНОВ, О.А.ГАЛАЗУТДИНОВА

Поступила 10 декабря 2004

Принята к печати 12 января 2005

Результаты звездной фотометрии на снимках ACS и WFPC2 камер космического телескопа Хаббла (HST) использованы для изучения звездного состава и пространственного распределения звезд трех, видимых с ребра спиральных галактик NGC 891, NGC 4144, NGC 4244. Измерения поверхностной плотности числа старых звезд выявили в этих галактиках две звездные подсистемы: толстый диск и гало. Границы найденных подсистем, состоящих большей частью из красных гигантов, определяются по изменению градиента плотности числа звезд. Найденные гало имеют сплюснутую у полюсов галактик форму и простираются от плоскости галактик до расстояний 8–25 кпк. Полученные результаты по распределению плотности числа звезд разного возраста перпендикулярно плоскости галактик позволяют уточнить представленную нами ранее модель звездной структуры спиральных галактик. На основании определения начала ветви красных гигантов (TRGB-метод) вычислены расстояния до исследуемых галактик:  $D = 9.82$  Мпк (NGC 891),  $D = 7.24$  Мпк (NGC 4144) и  $D = 4.29$  Мпк (NGC 4244).

1. *Введение.* К настоящему времени звездное население галактик достаточно подробно исследовано только в ближайших звездных системах Местной группы, где доминируют три спиральные галактики: M31, M33 и наша Галактика. В названных спиральных галактиках обычно выделяют четыре звездные подсистемы: балдж, тонкий диск, толстый диск и гало. Эти подсистемы имеют различные законы пространственного распределения звезд и состоят из звезд и скоплений, различающихся между собой средним возрастом и средним значением металличности [1–6]. Из-за того, что указанные подсистемы объемно вложены друг в друга, довольно трудно определить границы подсистем, поскольку во внутренней подсистеме содержатся звезды и внешних подсистем. Разделение звезд на подсистемы обычно выполняют на основе измерений фотометрических параметров звезд, их металличности и кинематических характеристик. Технические трудности при массовых определениях характеристик звезд и неопределенность в терминах при описании звездной морфологии галактик привели к некоторому хаосу в обозначении исследуемых звездных структур галактик. Хаос усугубляется тем обстоятельством, что наблюдения галактик проводятся в разных участках спектра, что, естественно, ведет к изменению видимой морфологии галактик. На основе методов поверхностной фотометрии достаточно надежно разработана методика разделения спиральных галактик

на два компонента: балдж и диск [7]. Под термином "диск" имеется в виду тонкий диск, где в настоящее время идут процессы звездообразования, и яркая часть толстого диска, населенная звездами более поздних типов. Что касается звездного гало галактик, то пока неизвестны ни форма гало, ни закон падения звездной плотности к внешней границе гало.

По аналогии со спиральными галактиками Местной группы, поиски толстых дисков и гало ведутся и в более далеких галактиках. Например, на основе изучения 47 галактик поздних типов было найдено, что большая часть этих галактик обладает толстым диском [8]. Однако это скорее качественная картина строения галактик. Поскольку для выявления толстых дисков использовались методы поверхностной фотометрии, то крайне сложно определить возрастной состав звездных дисков и установить их границы. Еще более запутанной оказывается ситуация с поисками и определениями гало. В ряде работ термином "гало" называется любая звездная структура за пределами тонкого диска. В этом случае отсутствует термин "толстый диск", а его место занимает термин "гало". Естественно, что такие псевдогало можно зарегистрировать в некоторых галактиках методами глубокой поверхностной фотометрии.

Для теорий происхождения и эволюции галактик крайне необходимо иметь однородные и достоверные результаты о протяженных звездных структурах галактик, поскольку они большей частью состоят из старых звезд с малой металличностью и хранят в себе информацию о первых этапах эволюции галактик. Получено уже достаточно много результатов по звездному строению близких галактик, но следует сделать основной шаг и определить понятия дисков и гало. Без таких определений будет происходить постоянная путаница с обозначениями тех звездных структур, которые наблюдаются в галактиках с использованием разнообразных методов.

Наиболее простое строение по наблюдаемой морфологии имеют иррегулярные галактики - ближайшие родственники спиральных галактик. В работах Миннити и его коллег [9,10] было объявлено об открытии звездного гало в двух иррегулярных галактиках: WLM и NGC 3109. Позднее, на основе изучения звездного населения 25 иррегулярных галактик Тихонов [11-13] показал, что каждая иррегулярная галактика имеет толстый диск, размеры которого в 2-3 раза больше видимого тела галактики. Молодые звезды в иррегулярных галактиках концентрируются к галактической плоскости и образуют диск, аналогичный тонким дискам спиральных галактик.

Изучение массивных иррегулярных галактик показало, что кроме толстого диска они могут иметь и гало, которое простирается на еще большие расстояния, чем толстый диск и имеет иной градиент падения звездной плотности. В настоящее время такие гало найдены нами вокруг

нескольких массивных иррегулярных галактик: IC 10, M 82, NGC 3077. На основании этих результатов становится понятным, что Миннити и его коллеги нашли, вероятно, в галактиках WLM и NGC 3109 толстые диски, но не гало, поскольку ими не были обнаружены изломы градиента плотности красных гигантов или резкие падения звездной плотности на границе толстого диска, как это видно в галактике IC 10 [11,14] и M 82 [13].

Исследованные нами ранее три спиральные галактики - NGC 55, NGC 300, M 81 - показывают наличие у них толстого диска и гало из красных гигантов [15], что морфологически объединяет их с массивными иррегулярными галактиками. Чтобы понять пространственную структуру толстых дисков и гало, необходимо исследовать галактики, видимые с ребра, так как только при таком расположении галактик мы можем увидеть и изучить протяженность толстого диска и гало перпендикулярно плоскости галактик. В данной работе мы восполняем существующий пробел и представляем результаты исследования звездного населения трех, видимых с ребра галактик.

2. *Данные об исследованных галактиках.* Основные характеристики исследованных нами галактик представлены в табл.1. Все галактики имеют развитую спиральную структуру, а светимость их сравнима со светимостью нашей Галактики.

Таблица 1

ДАННЫЕ ОБ ИССЛЕДОВАННЫХ ГАКАКТИКАХ

Название NGC	$V_4$	a x b угл. мин.	$B_1^0$ зв. вел.	Тип	$A_r$	$A_i$	Угол наклона	$m - M$	$M_{\text{аб}}$
891	528	13.5 x 2.5	9.37	SA(s)b? sp III	0.215	0.126	90	29.96	-20.59
4144	265	6.0 x 1.3	11.10	SAB(s)cd? sp III	0.050	0.029	84	29.30	-18.20
4244	244	19.4 x 2.1	9.28	SA(s)cd:sp III	0.069	0.040	90	28.16	-18.88

NGC 891. Галактика NGC 891, принадлежащая группе NGC 1023, морфологически наиболее подобна нашей Галактике. Можно было бы ожидать, что она обладает и сходными физическими параметрами, однако современный темп звездообразования в NGC 891 в 2-3 раза выше, чем в нашей Галактике. Возраст NGC 891 оценен в 11-13 млрд. лет [16,17], что в пределах ошибок соответствует возрасту нашей Галактики, равному 13.6 млрд. лет [18]. NGC 891 интенсивно изучалась во всех спектральных диапазонах. Исследование оптических изображений ( $BVI + H\alpha$ ) NGC 891 показывает две физически различные составляющие межзвездного диска этой галактики: плотную холодную, видимую на  $BVI$ -снимках в виде поглощения и состоящую из высокоструктурированных пылевых

облаков, прослеживающихся до 2 кпк от плоскости галактики, и теплую ионизованную, видимую на  $H\alpha$  снимках и равномерно распределенную по телу галактики с включением нитевидных структур [19]. Фотографические наблюдения NGC 891 в красных и синих лучах выявили две звездные составляющие - балдж и диск [20], причем граница диска была прослежена почти до найденной нами, на основе звездных подсчетов, границы толстого диска.

Исследования в радиодиапазоне показали, что галактика обладает газовым гало, где наблюдается CO [21] и атомарный водород [22], простирающийся до 5 кпк от галактической плоскости и составляющий ~15% от общей массы нейтрального водорода. Наиболее удаленные HI-облака зарегистрированы до 15 кпк от плоскости диска [23,24]. Диаметр водородного диска NGC 891 в 1.2 раза больше оптического диаметра галактики, определяемого по уровню изофоты  $\mu = 25 \text{ m}/\square''$  в фильтре *B* [25]. При использовании 3-х параметрической осесимметричной модели распределения звезд и пыли, для NGC 891 были определены параметры, которые наилучшим образом описывают распределение звезд и пыли в оптическом и ИК-диапазонах [26]. В этой модели шкала высот для звезд равна 0.4 кпк, а для пыли 0.26 кпк. Модель дает массу пыли  $1.1 \cdot 10^8 M_{\odot}$ .  $M_{\text{пыль}}/M_{\text{звезд}} = 165$ , что близко к значению, полученному для нашей Галактики [27].

*NGC 4144.* Из-за своей удаленности и отсутствия каких-либо особенностей морфологии галактика NGC 4144 чаще всего становится объектом наблюдений только при статистических исследованиях галактик [28-30]. 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 [31,32].

*NGC 4244.* Галактика имеет низкий темп звездообразования и удивительно спокойна в радиоконтинууме [33]. Наблюдения атомарного водорода показывают, что по оси *Z* водород виден до высоты 2'.5 (3.1 кпк) [34]. Диаметр водородного диска в 1.3 раза больше оптического диаметра на уровне изофоты  $\mu = 25 \text{ m}/\square''$  в фильтре *B* [25]. Галактика имеет слабую светимость в фильтре  $H\alpha$  и низкую поверхностную яркость в далеком ИК-диапазоне [35]. Глубокая ПЗС фотометрия (до 27.5 зв. вел. в фильтре *R*) показывает простую структуру NGC 4244: экспоненциальный диск со шкалой высот 250 пк. Доказательства второго компонента, толстого диска или гало найдены не были [36].

3. *Наблюдения.* Для изучения звездного населения галактик мы использовали архивные изображения, полученные в разные годы на ACS/WFC и WFPC2 камерах космического телескопа им. Хаббла (HST). Информация об использованных нами снимках содержится в табл.2.

На рис.1, 2 и 3 представлены изображения исследованных галактик,

взятые с цифрового Паломарского обзора (DSS), с указанием положения ACS/WFC и WFPC2 полей. Фотометрия звезд осуществлялась с помощью пакетов программ DAOPHOT в MIDAS и HSTPHOT [37,38]. Перевод

Таблица 2

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕЛЕСКОПЕ ИМ. ХАББЛА (HST)

NGC	Область на DSS снимке	Дата наблюдения	Фильтр	Расстояние от центра галактики угл. мин.	Экспозиция	Номер заявки в архиве ID	Измеренное число звезд
891	S1	2003-02-19	F814w	2.12	2 x 2620+2472	9414	108970
		2003-02-19	F606w	2.12	2 x 2620+2472	9414	
	S2	2003-02-20	F814w	7.94	2 x 1000	9676	900
	2003-02-20	F606w	7.94	2 x 400+4 x 500	9676		
4144	S1	2003-12-08	F814w	0.98	350	9765	63605
		2003-12-08	F606w	0.98	338	9765	
4244	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 x 500	9086	3945
		2001-06-30	F606w	2.09	6 x 500	9086	
	S3	2003-11-12	F814w	0.33	350	9765	115990
		2003-11-12	F606w	0.33	338	9765	

полученных DAOPHOT инструментальных звездных величин в фильтрах F555W, F606W, F814W в стандартную VI-систему Крона-Казинса выполнялся по методике, описанной в работах Хольцмана и др. [39,40]. Перевод

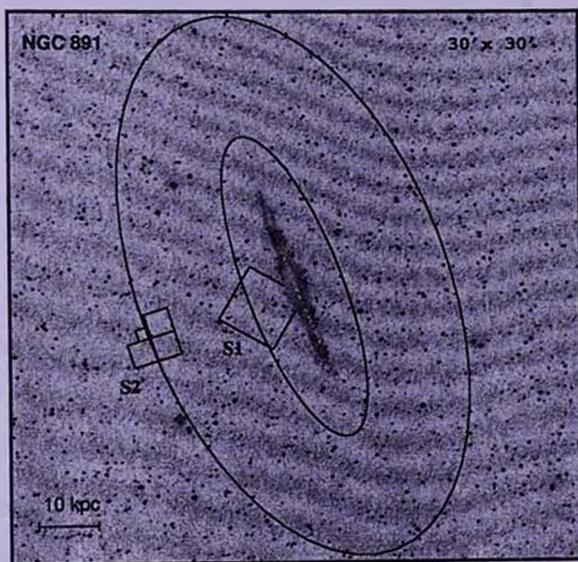


Рис.1. DSS-2 изображение галактики NGC 891 с разметкой положения исследуемых полей S1 (ACS/WFC) и S2 (WFPC2). Внутренний эллипс показывает найденную нами границу толстого диска, а внешний - гало.

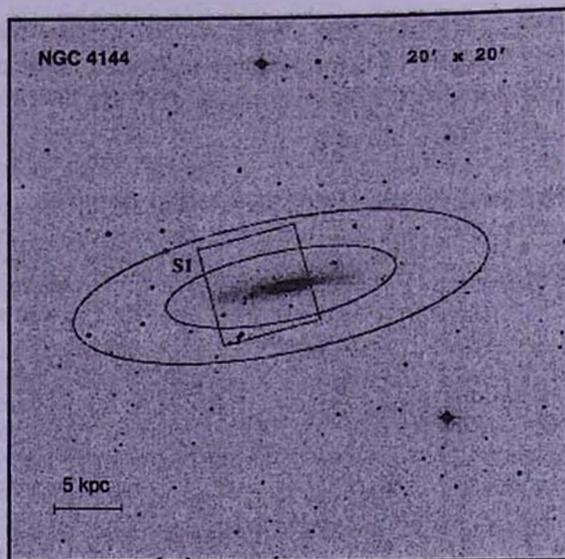


Рис.2. То же, что и на рис.1, для галактики NGC 4144.

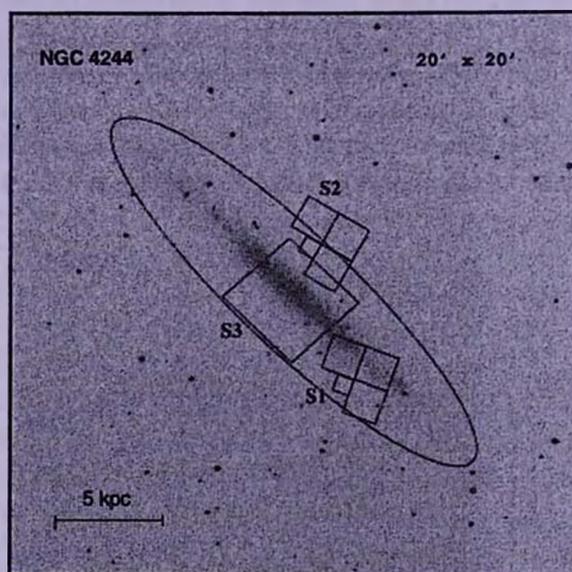


Рис.3. То же, что и на рис.1, для галактики NGC 4244. Отмечена только граница толстого диска.

ACS/WFC результатов в стандартную *VI*-систему осуществлялся на основе построения калибровочных зависимостей для поля в галактике IC10, где мы выполнили фотометрию одних и тех же звезд как с ACS/WFC, так и с WFPC2 камерами. Для получения цветовых зависимостей было использовано 60 калибровочных звезд с  $0 < (V-I) < 5$ . Точность перевода

звездных величин равна  $0^m.03$  для I-фильтра и  $0^m.04$  для V-фильтра. Полученные уравнения перевода инструментальных звездных величин в систему VI Крона-Казинса были проверены нами при фотометрии звезд известных галактик (NGC 55, NGC 300) и показали хорошее соответствие полученных результатов с результатами других авторов. Далекие галактики фона, звезды, неразрешенные из-за переналожения изображений близких соседей, и звезды, испорченные за счет дефектов матрицы, исключались из конечного списка звезд на основе сравнения их профилей со стандартным PSF-профилем звезды. Оставленные в списке звезды имели параметры  $|\text{SHARP}| < 0.3$  и  $|\text{CH}| < 1.2$  [37].

4. *Селекция звезд.* Для обеспечения максимальной однородности выборки звезд разных полей мы проводили селекцию звезд, основываясь на следующих условиях:

а) Чтобы исключить влияние длительности экспозиции на численность найденных в поле звезд (для разных полей использовались снимки разных научных программ), мы ориентировались на результаты, полученные с самой короткой экспозицией. Для всех изученных полей одной галактики мы устанавливали одну и ту же границу по светимости звезд, слабее которой звезды не использовались, даже если они и были видны на снимках некоторых полей галактики.

б) Процедура фильтрации следов космических частиц устраняла их на снимках в значительной степени, и частицы не могли исказить подсчеты плотности числа звезд при фотометрии в густых звездных полях. Однако три фотометрии разреженных звездных полей численность не устраненных следов космических частиц (т.е. фиктивных звезд) сравнима с численностью реальных слабых звезд. Это ведет к мнимому уменьшению радиентов звездной плотности исследуемых полей. Чтобы исключить этот эффект, нам пришлось использовать звезды на  $0^m.5$  звездной величины более яркие, чем фотометрический предел снимков, поскольку программа фильтрации частиц не в состоянии устранить самые слабые следы частиц. 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 числа звезд не подвержены влиянию остаточных следов космических частиц.

## 5. Результаты фотометрии.

5.1. *Диаграммы "цвет - величина" галактик NGC 891, NGC 4144, NGC 4244.* Результаты фотометрии звезд приведены в виде диаграмм "цвет-величина" (CMD) на рис.4. Полученные диаграммы являются обычными для спиральных галактик. Существенные различия диаграмм разных полей одной галактики легко объяснимы, поскольку исследуемые поля могут захватывать как области спиральных ветвей с яркими сверхгигантами, так и

области гало, где ярчайшими звездами могут быть только AGB-звезды, но где основное, видимое на снимках население составляют красные гиганты. На всех диаграммах проведены линии, показывающие положение границы ветви красных гигантов (TRGB), используемой для определения расстояний. В наиболее бедном звездами поле S2 галактики NGC 891 видна только макушка ветви гигантов

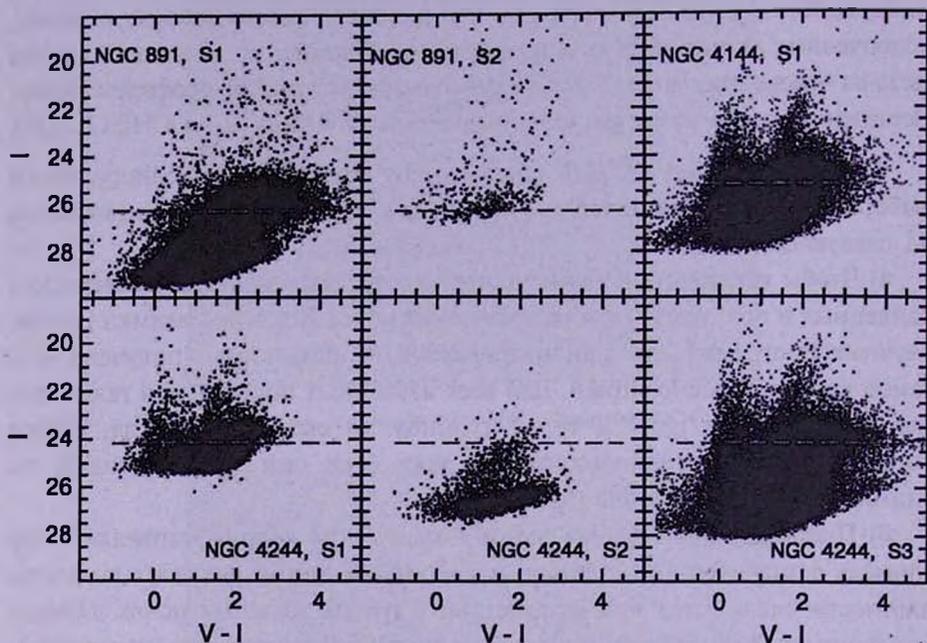


Рис.4. Диаграммы цвет-величина для всех полей изученных галактик. Пунктирная линия отмечает положение вершины ветви красных гигантов (TRGB).

при  $(V-I) = 1.5$  и сравнимое количество фоновых звезд. Из-за близости фотометрического предела снимков к светимости изучаемых звезд, мы ослабили для этого единственного случая наши критерии отбора звезд, исходя из реального предположения о больших ошибках фотометрии этих слабых звезд. Для этого поля наши критерии были:  $1.0 < (V-I) < 2.2$ ,  $I > 25.7$ .

**5.2. Определение расстояний.** Присутствие звезд ветви красных гигантов на полученных нами диаграммах "цвет-величина" (рис.4) позволяет найти точные расстояния до галактик, используя TRGB-метод [41].

Для вычисления расстояний мы использовали одно или два поля в каждой галактике, избегая областей звездообразования с яркими сверхгигантами и выбирая области с большим числом красных гигантов для того, чтобы уменьшить статистическую ошибку определения границы ветви гигантов. Использовались поля: S2 в NGC 891 (рис.1), S1 в NGC 4144 (рис.2), S1, S2 и S3 в NGC 4244 (рис.3). Функция светимости в  $I$ -фильтре звезд каждого поля имеет скачок, который соответствует началу ветви красных гигантов (рис.5). Зная видимую звездную величину красных

гигантов на вершине этой ветви, можно определить расстояния до галактик TRGB-методом [41]. Одновременно с определением расстояния измерялась средняя металличность красных гигантов в исследуемой области галактики. Следует отметить, что из-за градиентов металличности красных гигантов вдоль

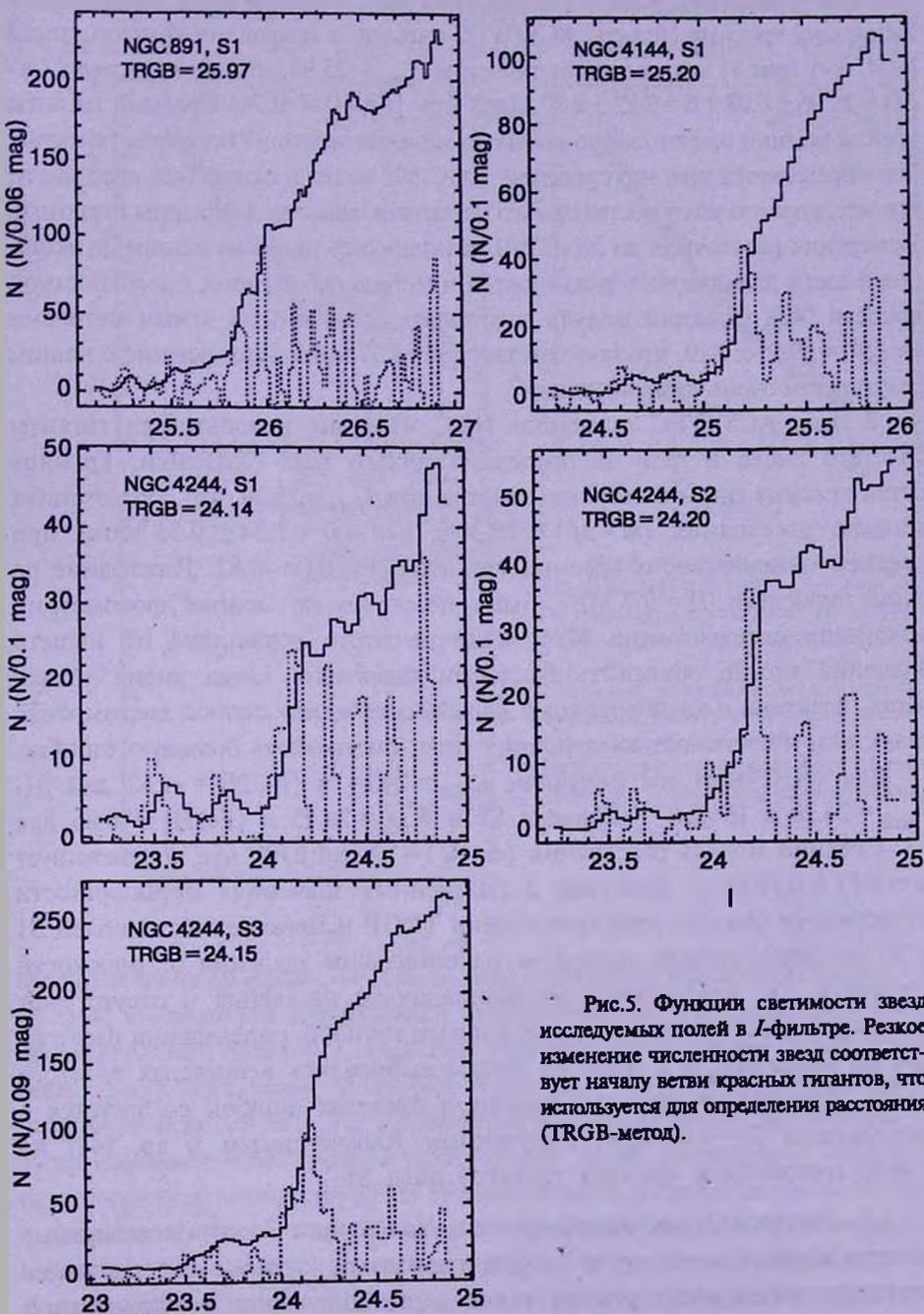


Рис.5. Функции светимости звезд исследуемых полей в  $I$ -фильтре. Резкое изменение численности звезд соответствует началу ветви красных гигантов, что используется для определения расстояния (TRGB-метод).

радиуса галактики полученные нами локальные значения металличности нельзя считать металличностью красных гигантов всей галактики и использовать их для построения глобальных статистических зависимостей параметров галактик. Это замечание не относится к карликовым иррегулярным галактикам, где градиент металличности вдоль радиуса галактики, вероятно, очень незначителен. Используя красные гиганты ACS/WFC снимка за пределами толстого диска NGC 891 (рис.1) мы получили значение  $I_{TRGB} = 25.97$ , что соответствует  $(m - M) = 29.96 \pm 0.08$  ( $D = 9.82 \pm 0.37$  Мпк) при  $[Fe/H] = -0.74$ . Красные гиганты этой галактики имеют самую высокую металличность из всех трех галактик. Это определяется тем, что галактика NGC 891 имеет и самую большую массу, препятствующую уходу обогащенного металлами вещества за пределы галактики. Измерения расстояния до NGC 891 выполнялись ранее на основе функции светимости планетарных туманностей и метода флуктуации поверхностной яркости [42]. Средний модуль расстояния, полученный этими методами  $(m - M) = 29.95 \pm 0.10$ , что соответствует  $D = 9.77$  Мпк. Расхождение с нашим результатом очень незначительно.

В поле ACS/WFC галактики NGC 4144 мы использовали гиганты толстого диска и гало за пределами яркого тела галактики. Граница ветви красных гигантов хорошо заметна при  $I_{TRGB} = 25.20$ , что соответствует модулю расстояния  $(m - M) = 29.30 \pm 0.10$  ( $D = 7.24 \pm 0.35$  Мпк) при средней металличности красных гигантов  $[Fe/H] = -0.82$ . Расстояние до этой галактики  $D = 9.7$  Мпк было получено на основе фотометрии ярчайших сверхгигантов [43]. Отличие этого результата от нашего значения можно объяснить наклоном галактики, когда видна только часть галактики и калибровочные зависимости между полной светимостью галактики и светимостью ярчайших звезд могут иметь большую ошибку.

Для NGC 4244 мы получили  $I_{TRGB} = 24.14$  и  $[Fe/H] = -1.62$  для S1,  $I_{TRGB} = 24.20$  и  $[Fe/H] = -1.66$  для S2 и  $I_{TRGB} = 24.15$  и  $[Fe/H] = -0.85$  для S3. Средний модуль расстояния  $(m - M) = 28.16 \pm 0.08$ , что соответствует  $D = 4.33 \pm 0.16$  Мпк. 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, где наблюдается малометалличное население и отсутствуют более яркие AGB-звезды. Это увеличивало точность определения расстояния до галактики, а в поле S3 звезды выбирались в пределах толстого диска. Измеренное нами расстояние в пределах ошибок согласуется с расстоянием  $D = 4.49$  Мпк, полученным Караченцевым и др. [44] на основе фотометрии красных гигантов поля S1.

**5.3. Распределение звезд по телу галактик.** Все три исследуемые галактики видны почти точно с ребра, и мы могли изучить в них изменение плотности числа звезд разных типов перпендикулярно экваториальной

плоскости галактики, то есть вдоль оси  $Z$  (рис.6, 7, 8). Основная трудность, которую нам пришлось преодолеть при подготовке результатов - разбросанность и разрывность полей наблюдений, которые мы использовали для изучения пространственного распределения звезд. При интерполяции результатов плотности числа звезд различных подсистем мы исходили из предположения, что толстые диски и гало имеют гладкую,

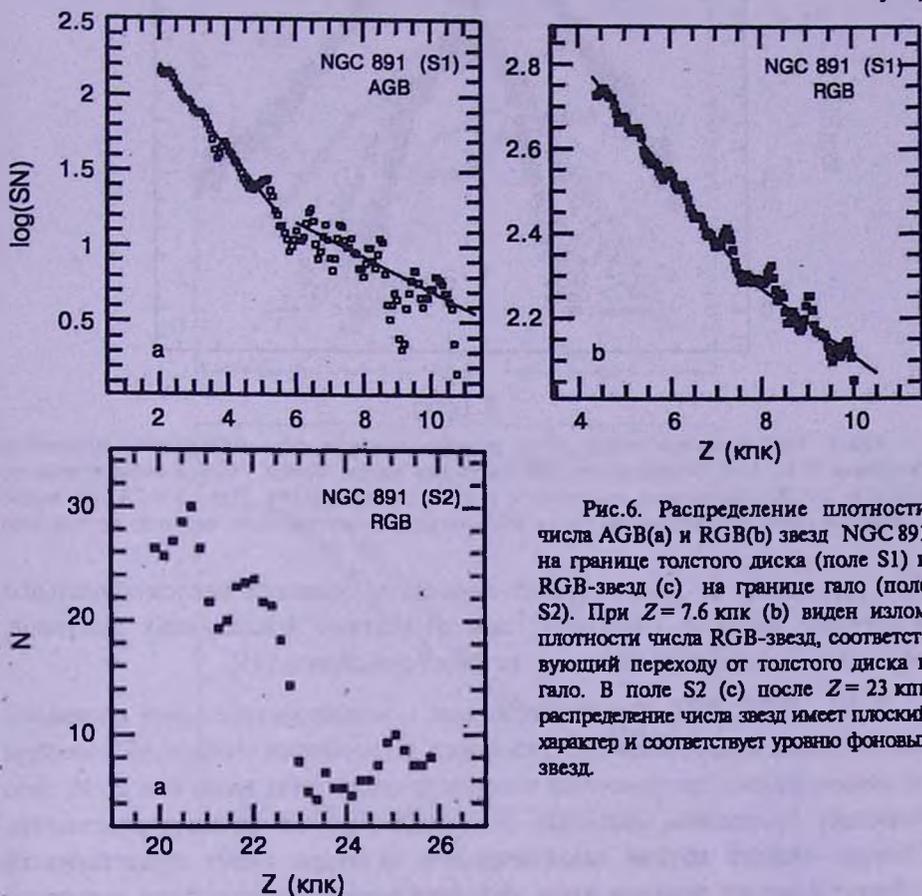


Рис.6. Распределение плотности числа AGB(a) и RGB(b) звезд NGC 891 на границе толстого диска (поле S1) и RGB-звезд (c) на границе гало (поле S2). При  $Z = 7.6$  кпк (b) виден излом плотности числа RGB-звезд, соответствующий переходу от толстого диска к гало. В поле S2 (c) после  $Z = 23$  кпк распределение числа звезд имеет плоский характер и соответствует уровню фоновых звезд.

осесимметричную форму, без каких-либо приливных искажений. На рис.7 и 8 видно, что хаотические флуктуации звездной плотности, наблюдаемые вблизи экваториальной плоскости галактики, исчезают при удалении от плоскости галактики, а зависимость "плотность числа звезд -  $Z$ -координата" принимает экспоненциальный вид. Это объясняется тем, что на малых расстояниях от экваториальной плоскости экранирование звезд газопылевой материей галактики существенно уменьшает светимость звезд, а слабые звезды перестают быть видимы. Кроме того, вблизи экваториальной плоскости наблюдается избыточная поверхностная плотность звезд. В этих условиях автоматическая программа фотометрии DAOPHOT перестает распознавать изображения близко

расположенных звезд и не включает их в список. Две названные причины ведут к фиктивному уменьшению вычисляемой звездной плотности, что мы и наблюдаем на рис.7 и 8 при малых расстояниях от галактической плоскости.

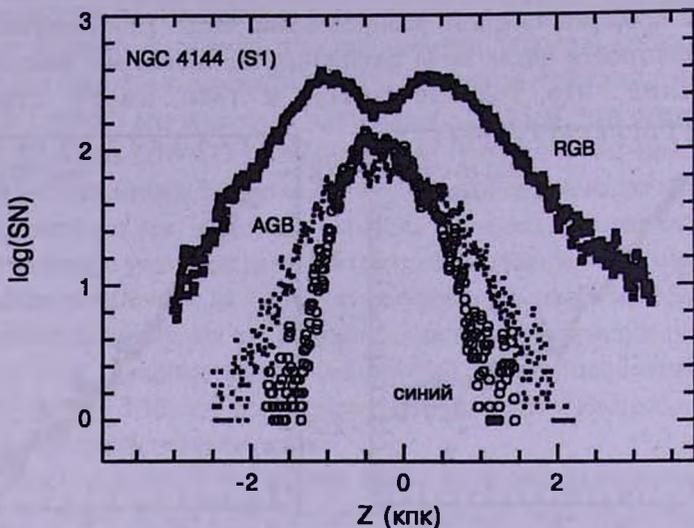


Рис.7. Распределение числа звезд разного возраста перпендикулярно плоскости галактики NGC 4144. Открытые кружки - молодые звезды. Точки - звезды промежуточного возраста (AGB). Сплошные квадраты - старые звезды (RGB). При  $Z = 2.4$  кпк видно изменение градиента плотности числа RGB-звезд, соответствующее переходу от толстого

Для удаленных от галактической плоскости областей экспоненциальное изменение звездной плотности, при отсутствии искажающих факторов, указывает на дисковый характер звездных подсистем [45].

5.3.1. *NGC 891*. Как видно на рис.1, используемые нами площадки расположены вдоль малой оси галактики. Ориентация снимка ACS-камеры не совсем удобна для подсчетов плотности числа звезд вдоль оси  $Z$ , но зато позволяет проследить изменение этой плотности на большое расстояние. Область снимка вблизи галактического экватора имеет существенный дефицит красных гигантов из-за эффектов экранирования телом галактики противоположной части диска и гало, поэтому мы наблюдаем там провал плотности числа красных гигантов. Аналогичный, но меньший провал плотности наблюдается и для более ярких AGB-звезд. Мы исключили эти области поглощения на графике распределения плотности числа звезд вдоль оси  $Z$ , чтобы нагляднее представить поведение плотности числа AGB и RGB-звезд на границе толстого диска и гало (рис.6). Более подробно поведение видимой плотности числа звезд разных типов вблизи экваториальной плоскости приведено далее, на примере галактик NGC 4144 и NGC 4244 (рис.7 и 8). В спиральных галактиках граница тонкого диска определяется областью распространения газопылевых облаков и молодых звезд. Эта граница в NGC

891 находится за пределами того интервала по Z-координате, который представлен на графике рис.6. То есть, все AGB и RGB-звезды, распределение которых представлено на рис.6, принадлежат толстому диску и гало. AGB-звезды в диске NGC 891 проявляют резкое падение численности по Z-координате и за пределами  $Z=6$  кпк (рис.6а) их численность незначительна. RGB-звезды

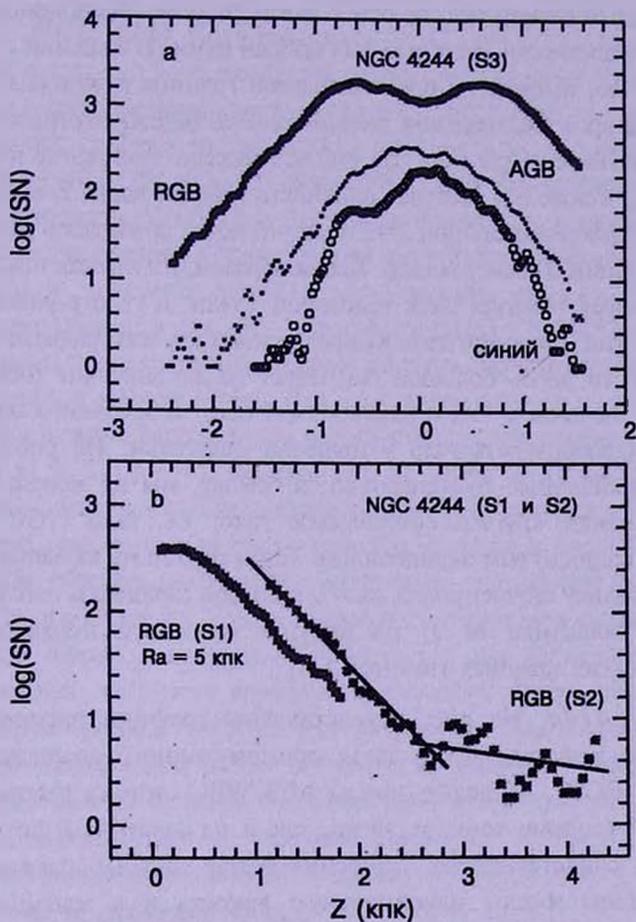


Рис.8. (а) То же, что на рис.7, но для галактики NGC 4244. Видно, что граница толстого диска находится за пределами поля S3. (б) Распределение старых (RGB) звезд в полях S1 и S2, перпендикулярно плоскости галактики. При  $Z=2.7$  кпк в распределении плотности числа звезд поля S2 виден переход от толстого диска к гало.

уменьшают свою численную плотность существенно медленнее и точка изменения градиента их плотности, т.е. граница толстого диска, становится малозаметной (рис.6б). Вероятно, дело в том, что массивные галактики, видимые с ребра, имеют гало с большим градиентом звездной плотности, сравнимым с градиентом плотности звезд толстого диска, и выявление в таких галактиках точки излома плотности числа звезд является непростой задачей.

На рис.6б у RGB-звезд излом градиента плотности наблюдается при

$Z=7.6$ кпк. По аналогии с результатами у видимых плашмя галактик [15] 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 изменения звездной плотности до нулевых значений плотности числа звезд. Таким образом, мы вычислили, что предполагаемый размер гало по оси  $Z$  равен 26.9кпк. Экспоненциальный характер падения плотности звезд гало был выбран нами по аналогии с толстым диском. К счастью, именно на предполагаемой границе гало нашлось поле WFPC2 (S2), которое подтвердило правомерность нашей экстраполяции и позволило уточнить размеры гало. На рис.6с показано поведение плотности числа 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 о размерах гало. 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 малой оси, то из такого предположения следует сплюснутость гало у полюсов галактики. На рис.1 видно, что, принимая найденные границы гало за основу, мы не можем вписать в размеры галактики круглое сферическое гало, т.е. гало NGC 891 по форме является сплюснутым эллипсоидом. Такая форма не является неожиданностью, поскольку сплюснутость гало у полюсов галактики наблюдается, вероятно, и в галактике M 31 на рисунке видимого поверхностного распределения ярких красных гигантов [46].

5.3.2. *NGC 4144*. На рис.7 представлены графики распределения плотности числа молодых звезд, звезд промежуточного возраста (AGB) и старых звезд (RGB). Молодые звезды ACS/WFC снимка распределены как на внешней стороне тонкого диска, так и на некоторой оптической глубине, о чем свидетельствует уширение ветви голубых сверхгигантов (рис.4). Эти звезды имеют максимальную яркость и в малой степени подвержены воздействию яркости и неравномерности фона вблизи экваториальной плоскости. Это видно на графике рис.7, где в распределении голубых звезд не заметно уменьшения их поверхностной плотности вблизи экваториальной плоскости галактики. Звезды промежуточного возраста (AGB) имеют меньший градиент падения плотности, чем молодые звезды, и простираются от плоскости галактики на большие расстояния, чем молодые звезды. Наиболее многочисленные звезды - красные гиганты - имеют наименьший градиент падения численной плотности. При расстоянии от галактической плоскости  $Z=2.4$ кпк у NGC 4144 наблюдается излом градиента плотности числа RGB-звезд, как и в галактике NGC 891.

Эту точку мы принимаем за границу толстого диска. При дальнейшем удалении от галактической плоскости, в области гало, экстраполяция экспоненциального падения плотности числа звезд дает возможность вычислить границу гало ( $Z = 5.4$  кпк). Так же, как и для галактики NGC 891, гало NGC 4144 имеет сплюснутую у полюсов галактики форму.

5.3.3. *NGC 4244*. Хотя галактика NGC 4244 похожа на NGC 4144 как по морфологии, так и по звездному составу, между ними имеются некоторые различия в соотношениях параметров внешних звездных структур. На рис.8 представлены графики распределения плотности звезд разного возраста. Так же, 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 (рис.8а) у NGC 4244 не наблюдается точки излома плотности числа 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 WFPC2 камеры (рис.3). Поле S1 не выходит за пределы диска NGC 4244, и в распределении численности красных гигантов незаметно изменение градиента плотности (рис.8б). Однако в поле S2 распределение RGB-звезд обнаруживает резкое изменение плотности числа звезд вдоль оси  $Z$ . До значения  $Z=2.7$  кпк градиент соответствует градиенту изменения плотности числа звезд поля ACS/WFC, но при дальнейшем удалении от галактической плоскости градиент испытывает резкое изменение, то есть наблюдается граница толстого диска (рис.8б). Переход от толстого диска к гало происходит при малых значениях звездной плотности. Границу гало ( $Z = 8$  кпк) можно оценить приближенно, вследствие недостатка 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 размером 16 кпк.

6. *Наблюдаемая модель звездного строения спиральной галактики*. Ранее, на основе изучения звездного населения трех спиральных галактик мы представили модель звездного строения спиральной галактики [15]. В этой модели мы рассмотрели изменение поверхностной плотности числа разных типов звезд вдоль радиуса галактики, от балджа до гало. Было показано, что границы тонкого диска хорошо оконтуриваются областью распределения молодых звезд. Граница толстого диска и гало определяется по точке излома градиента поверхностной плотности старых звезд - красных гигантов. Однако, из-за отсутствия данных, мы не могли в этой модели подробно представить распределение разных типов звезд перпендикулярно плоскости галактики. Но именно такие

характеристики и дают представление о трехмерной форме галактик. В данной работе мы взяли за основу эту, уже упоминавшуюся модель, но добавили в нее наши новые результаты по исследованию распределения звезд в галактиках вдоль оси  $Z$  (рис.9). Качественно, распределения звезд как вдоль радиуса галактики, так и вдоль оси  $Z$  похожи друг на друга. Молодые звезды занимают область тонкого диска, звезды промежуточного возраста образуют структуру большего размера, а старые звезды образуют толстый диск и гало.

В данную модель укладываются и результаты строения трех массивных иррегулярных галактик, IC 10, M 82, NGC 3077, где мы нашли существование и толстых дисков, и гало. Подобную, на первый взгляд, модель строения спиральных галактик можно найти во многих учебниках. Различия состоят в том, что представляемые ранее модели звездного строения спиральных галактик в значительной степени построены либо на основе пространственного строения единственной Галактики, либо на умозрительных предположениях, без приведения ссылок на конкретные исследования. Представляя

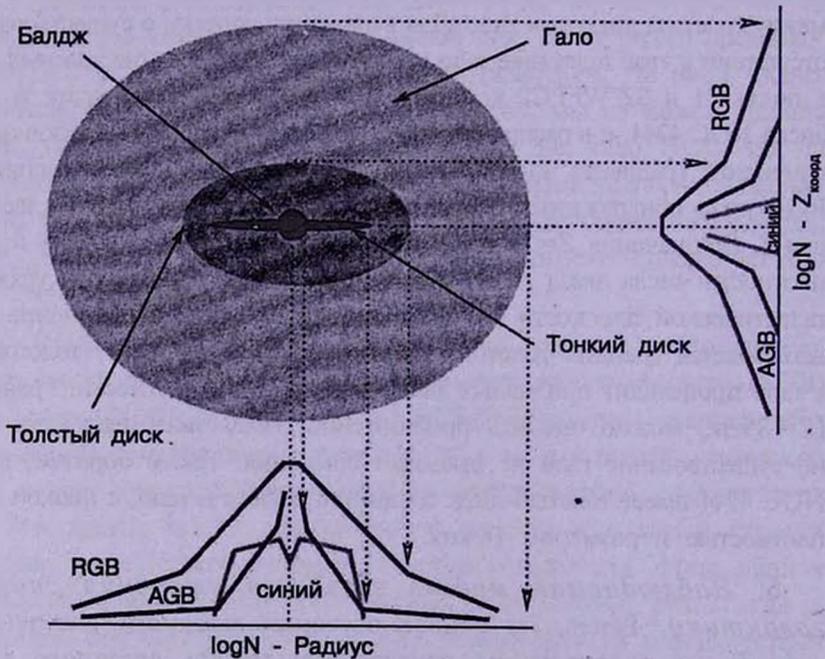


Рис.9. Трехмерная модель распределения плотности числа звездного населения вдоль радиуса и оси  $Z$  в спиральной галактике. Плотности разных типов звезд представлены в относительных единицах. Абсолютные размеры гало по  $Z$ -координате изменяются в пределах от 8 до 25 кпк индивидуально в каждой галактике.

согласующиеся между собой результаты звездного строения большого числа спиральных галактик, мы надеемся, что полученные нами наблюдательные данные будут способствовать созданию теоретических моделей происхождения и эволюции спиральных и иррегулярных галактик.

7. *Обсуждение.* Разрешение галактик на звезды дает возможность исследовать в галактиках пространственное распределение звезд разных типов, как молодых, так и звезд промежуточного возраста или старых звезд. Возможность селекции звезд по их типам принципиально отличает метод подсчета звезд от методов поверхностной фотометрии, поскольку дает возможность разделять звезды разной светимости и возраста, но подобного цвета (например, AGB и RGB). Второй особенностью метода подсчета звезд является возможность выделить пространственные структуры очень низкой поверхностной яркости, что пока технически недоступно методам поверхностной фотометрии. Мы использовали указанные преимущества, чтобы выяснить состав и протяженность звездных структур трех видимых с ребра спиральных галактик. При исследовании этих галактик, NGC 891, NGC 4144 и NGC 4244, выяснилось, что хотя морфологически все они имеют одинаковую структуру - тонкий диск, толстый диск и гало, но относительные размеры толстого диска и гало изменяются в больших пределах. Также не остается постоянной и поверхностная яркость гало на границе с толстым диском. Если в NGC 891 гало простирается до размера  $Z=23$  кпк и имеет высокую поверхностную яркость, то в NGC 4244 гало имеет в три раза меньшие размеры и низкую поверхностную яркость, послужившую препятствием для его обнаружения методами поверхностной фотометрии [36]. Принимая во внимание случайный выбор галактик, а также тот факт, что ранее мы уже выявили толстые диски и гало в трех спиральных галактиках, можно с большой вероятностью считать, что толстые диски и гало, состоящие из старых звезд, являются обязательной составной частью спиральных галактик. Кроме указанных в данной статье галактик, совершенно аналогичную структуру имеют видимые с ребра галактики IC 2233, IC 5052 и NGC 4631, что увеличивает статистическую значимость полученных нами результатов. Естественно, что процесс взаимодействия галактик может исказить звездную структуру, и к таким галактикам наши выводы неприменимы.

8. *Заключение.* На основе метода численного подсчета звезд проведено исследование звездных структур трех спиральных галактик, видимых с ребра. Изучение звездного населения разного возраста позволило получить следующие результаты:

а) Впервые, в галактиках NGC 891, NGC 4144 и NGC 4244 выявлены толстые диски и гало, состоящие главным образом из красных гигантов. Определены параметры найденных звездных подсистем.

б) Подтверждено найденное нами ранее различие градиентов звездной плотности толстого диска и гало, что дает возможность объективно определять их пространственные размеры.

в) Установлено, что гало спиральных галактик имеет сплюснутую у

полюсов галактик форму, что указывает, вероятно, на его вращение.

г) Впервые определены расстояния до галактик NGC 891 и NGC 4144 на основе фотометрии красных гигантов.

д) На основании полученных результатов представлена модель звездного строения спиральных галактик. Применение метода подсчета звезд показало, что измерения звездной плотности можно успешно использовать для выделения звездных подсистем и установления границ дисков и гало.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 03-02-16344.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
Россия, e-mail: ntik@sao.ru; dolly@sao.ru

## STELLAR DISKS AND HALOS OF THE EDGE-ON SPIRAL GALAXIES: NGC 891, NGC 4144, NGC 4244

N.A.TIKHONOV, O.A.GALAZUTDINOVA

The results of the stellar photometry of the images ACS/WFC and WFPC2 of the HST telescope are used to study stellar populations and spatial distribution of stars in three edge-on galaxies: NG C891, NGC 4144, NGC 4244. The measuring of the number density of the old stars revealed two stellar substructures in these galaxies: thick disk and halo. The borders of these substructures, consisting mainly of red giants, are determined by the change of number density gradient of the old stars. The revealed halos have flattened shapes and extend up to 25 kpc from the galaxy planes. The obtained results of number density distribution of different type stars perpendicular to the galaxy planes allow us verify our stellar model of spiral galaxies. Using the determination of the tip red giant branches (TRGB method) we have derived the following distances:  $D=9.82$  Mpc (NGC 891),  $D=7.24$  Mpc (NGC 4144),  $D=4.29$  Mpc (NGC 4244).

Key words: *galaxies:spiral - galaxies:individual:NGC891, NGC4144, NGC4244*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *A.Vallenari, G.Bertelli, L.Schmidtbreick*, *Astron. Astrophys.*, **361**, 73, 2000.
2. *J.X.Prochaska, S.O.Naumov, B.W.Carney, A.McWilliam, A.M.Wolfe*, *Astron. J.*, **120**, 2513, 2000.
3. *M.Chiba, T.C.Beers*, *Astron. J.*, **119**, 2843, 2000.
4. *M.Zoccali, A.Renzini, S.Ortolani et al.*, *astro-ph/0210660*, 2002.
5. *B.F.Williams*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **331**, 293, 2002.
6. *J.F.Rowe, H.B.Richer, J.P.Brewer, D.R.Grabtree*, *astro-ph/0411095*, 2004.
7. *J.M.Schombert, G.D.Bothum*, *Astron. J.*, **93**, 60, 1987.
8. *J.J.Dalcanton, R.A.Bernstein*, *Astron. J.*, **124**, 1328, 2002
9. *D.Minniti, A.A.Zijlstra*, *Astrophys. J.*, **467**, 13, 1996.
10. *D.Minniti, A.A.Zijlstra, M.V.Alonso*, *Astron. J.*, **117**, 881, 1999.
11. *Н.А.Тихонов*, Диссертация, Санкт-Петербург, Россия, 2002.
12. *Н.А.Тихонов*, *Астрон. ж.*, (в печати), 2005.
13. *Н.А.Тихонов*, *Астрон. ж.*, (в печати), 2005.
14. *I.Drozdzovsky, N.Tikhonov, R.Schulte-Ladbeck*, "The Outer Stellar Edges of Irregular Galaxies: IC10 and LeoA", *STScI May*, 2003.
15. *Н.А.Тихонов, О.А.Галазутдинова, И.О.Дроздовский*, *Astron. Astrophys.*, accepted, 2004.
16. *J.J.Gonzalez*, PhD thesis Univ. California, Santa Cruz, 1993.
17. *M.Cantiello, G.Raimondo, E.Brocato, M.Capaccioli*, *Astron. J.*, **125**, 2783, 2003.
18. *L.Pasquini, P.Bonifacio, S.Randich, D.Galli, R.G.Gratton*, *astro-ph/0407524*, 2004.
19. *J.C.Howk, B.D.Savage*, *Astron. J.*, **114**, 2463, 1997.
20. *P. van der Kruit, L.Searle*, *Astron. Astrophys.*, **95**, 116, 1981.
21. *S.Garcia-Burillo, M.Guelein, J.J.Cernicharo, M.Dahlem*, *Astron. Astrophys.*, **266**, 21, 1992.
22. *R.A.Swaters, R.Sancisi, J.M. van der Hulst*, *Astrophys. J.*, **491**, 140, 1997
23. *F.Flaternali, T.Oosterloo*, *Recycling Intergalactic and Interstellar Matter IAU Symposium Ser.*, v.217, *astro-ph/0310799*, 2004.
24. *F.Flaternali, T.Oosterloo, R.Sancisi, R.Swaters*, *astro-ph/0410375*, 2004.
25. *M.C.Martin*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **131**, 77, 1998.
26. *E.M.Xilouris, P.B.Alton, J.I.Davies et al.*, *Astron. Astrophys.*, **331**, 894, 1998.
27. *L.Spitzer*, *Physical Processes in the Interstellar Medium*, -New York, Wiley-Interscience, 1978, p.162.
28. *D.A.Hunter, J.S.III.Gallagher*, *Astron. J.*, **90**, 1789, 1985.
29. *A.Alonso-Herro, J.H.Knapen*, *Astron. J.*, **122**, 1350, 2001.
30. *I.Garcia-Ruiz, R.Sancisi, K.Kuijken*, *Astron. Astrophys.*, **394**, 769, 2002.
31. *R.A.Swaters, T.S. van Albada, J.M. van der Hulst, R.Sancisi*, *Astron. Astrophys.*, **390**, 829, 2002a.
32. *R.A.Swaters, M.Balcells*, *Astron. Astrophys.*, **390**, 863, 2002b.
33. *E.Hummel, R.Sancisi, R.D.Ekers*, *Astron. Astrophys.*, **133**, 1, 1984.
34. *R.P.Olling*, *Astron. J.*, **112**, 457, 1996.
35. *K.Kodaira, T.Yamashita*, *Publ. Astron. Soc. Jap.*, **48**, 581, 1996.

36. *A.M.Fry, H.L.Morrison, P.Harding, T.A.Boroson*, *Astron. J.*, **118**, 1209, 1999.
37. *P.B.Stetson*, *Users Manual for DAOPHOT II*, 1994.
38. *A.E.Dolphin*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **112**, 1383, 2000.
39. *J.A.Holtzmann, J.J.Hester, S.Casertano*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **107**, 156, 1995a.
40. *J.A.Holtzmann, C.J.Burrows, S.Casertano et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **107**, 1065, 1995b.
41. *M.G.Lee, W.L.Freedman, B.F.Madore*, *Astron. J.*, **417**, 553, 1993.
42. *L.Ferrarese, J.R.Mould, R.C.Kennicutt et al.*, *Astrophys. J.*, **529**, 745, 2000.
43. *I.D.Karachentsev, I.O.Drozdovsky*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **131**, 1, 1998.
44. *I.D.Karachentsev, M.E.Sharina, A.E.Dolphin et al.*, *Astron. Astrophys.*, **398**, 467, 2003.
45. *R. de Grijs, P.C. van der Kruit*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **117**, 19, 1996.
46. *D.Zucker, A.Kniazev, E.Bell et al.*, *Astrophys. J.*, **612**, L117, 2004.
47. *D.J.Schlegel, D.P.Finkbeiner, M.Davis*, *Astrophys. J.*, **500**, 525, 1998.