

TRGB-РАССТОЯНИЯ ДО ГАЛАКТИК НА ОСНОВЕ СНИМКОВ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА ХАББЛА (HST) В ОДНОМ ФИЛЬТРЕ F814W¹

© 2021 г. Н. А. Тихонов^{1*}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Поступила в редакцию 16.07.2021 г.

После доработки 07.09.2021 г.; принята к публикации 07.10.2021 г.

Проведен анализ причин получения снимков в фильтрах V и I для измерения расстояний до галактик TRGB-методом. Показана возможность использования TRGB-метода при наличии снимков космического телескопа Хаббла (HST) только в одном фильтре F814W (I). На основе архивных HST снимков проведена звездная фотометрия 12 галактик: NGC1058, NGC1365, NGC1448, NGC3079, NGC3810, NGC4321, NGC4328, NGC4485, NGC4490, NGC4651, NGC6951, NGC7331, и TRGB-методом измерены расстояния. Для многих галактик этого списка такие измерения сделаны впервые. Сравнение полученных результатов для галактик с известными TRGB-измерениями показало хорошее соответствие.

Ключевые слова: звездная фотометрия галактик; TRGB-метод, расстояния до галактик.

DOI: 10.31857/S0320010821110061

ВВЕДЕНИЕ

При изучении строения Вселенной возникает вопрос об измерении расстояний до галактик. В настоящее время используется множество методов измерения расстояний (де Грейс, 2011), и каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Для близких галактик наиболее часто используют несколько методов: метод Цефеид, метод Талли–Фишера (TF) и метод флуктуации поверхностной яркости (SBF). Для некоторых галактик используют измерения яркости сверхновых звезд (SN) и метод планетарных туманностей (PN). В последние десятилетия наиболее массовым стал TRGB-метод (Ли и др., 1993) из-за его хорошей точности, относительной простоты и применимости ко всем типам галактик. К настоящему времени этим методом определены расстояния до нескольких сотен галактик.

TRGB-метод основан на измерении положения верхнего края ветви красных гигантов. Поскольку красные гиганты присутствуют во всех типах галактик, за исключением очень молодых, это стало

одной из причин широкого использования данного метода. Есть у TRGB-метода и свои недостатки. Красные гиганты имеют меньшую светимость, чем цефеиды или сверхновые звезды, поэтому метод применим только для относительно близких галактик, не дальше 25–30 Мпк. Уже в начале применения TRGB-метода была известна зависимость между металличностью красных гигантов и их светимостью (Ли и др., 1993), а поскольку галактики имеют разную металличность, то необходимо вводить поправки для вычисления светимости красных гигантов в зависимости от их металличности.

При использовании TRGB-метода проводится фотометрия звезд галактики в двух фильтрах (V и I) и строится диаграмма Герцшпрунга–Рассела (СМ-диаграмма), на которой выбирается ветвь красных гигантов и определяется положение верхнего края этой ветви. Используя работу Ли и др. (1993), можно определить расстояние до галактики, содержащей эти гиганты. Измерения TRGB-методом расстояний до галактик за пределами Местной группы проводятся в большинстве случаев по снимкам космического телескопа Хаббла с фильтрами F814W (I) и F606W или F555W (V).

Снимки в фильтре F814W (I) нужны для построения функции светимости, на которой определяют начало ветви красных гигантов по резкому изменению численности звезд, что наблюдается у

¹Based on observations with the NASA/ESA Hubble Space Telescope, obtained at the Space Telescope Science Institute, which is operated by AURA, Inc. under contract No. NAS5-26555. These observations are associated with proposal 10210, 10260, 11724, 13442, 15645, 15654.

*Электронный адрес: ntik@sao.ru

верхнего края ветви гигантов (TRGB-скачок). Возникает вопрос о необходимости снимков в фильтре V (F606W или F555W). Использование этих снимков можно объяснить четырьмя причинами. Причина первая — увидеть, что на CM-диаграмме звезд видна действительно ветвь красных гигантов. Вторая причина состоит в том, что для получения звездных величин в I фильтре нам необходимо знать поправки, которые зависят от показателя цвета звезды ($V - I$). Третья причина заключается в существовании зависимости между металличностью красных гигантов и их светимостью. В работе Ли и др. (1993) эта зависимость определяется на основе показателей цвета звезд ($V - I$). Четвертая причина состоит в дополнительной возможности селекции звезд по показателю цвета, что увеличивает в выборке содержание красных гигантов и делает измерение положения TRGB-скачка более точным.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ИЗ АРХИВА HST

Для проверки возможностей предлагаемого метода измерений с одним фильтром F814W нам потребовались снимки разных по морфологии объектов. В архиве HST телескопа имеются многочисленные снимки близких галактик, поэтому мы ограничились снимками трех разных по морфологии и светимости галактик: DDO187, NGC185 и M31. Трудно было подобрать поле для гигантской M31, поскольку в центральных областях очень высокая плотность звезд препятствовала точной фотометрии, а на далекой периферии в поле HST попадало слишком мало звезд для определения TRGB-скачка. Рабочий список галактик был получен на основе заявки ID15645, где все снимки получены только в одном фильтре F814W, но есть возможность для контрольной проверки по тем галактикам, снимки которых получались и ранее в двух фильтрах, и расстояния до них уже известны. Все снимки по заявке ID15645 просматривались визуально, и при определенных границах визуализации красные гиганты на снимках были видны. Фотометрия только подтвердила визуальный просмотр, поскольку мы не смогли определить положение TRGB-скачка на тех снимках, где не видели красных гигантов. Для галактик с противоречивыми результатами расстояний нам пришлось провести дополнительную фотометрию снимков по другим заявкам. Итог проверки показал правильность нашей фотометрии, хотя и с одним фильтром.

Данные об использованных архивных снимках представлены в табл. 1, где указаны номер заявки, заявитель, время экспозиции и число найденных звезд. При определении TRGB-скачка интервал светимости звезд резко сужается для увеличения

точности определения TRGB-скачка и для наглядности представления функции светимости.

ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Звездная фотометрия HST снимков с камерой ACS выполнялась пакетом программ DAOPHOT II (Стетсон, 1987; Стетсон, 1994), но при фотометрии снимков галактик NGC4485/90 с камерой WFC3 использовался пакет программ DOLPHOT 2.0². Фотометрия звезд обеими программами проводилась стандартным образом. Для DAOPHOT II это описано нами ранее (Тихонов и др., 2019), а пакет DOLPHOT 2.0 использовался в соответствии с рекомендациями Долфина (2016).

Процедура фотометрии состояла из предварительного маскирования плохих пикселей, удаления следов космических частиц и дальнейшей PSF-фотометрии найденных звезд. Для удаления незвездных объектов (звездных скоплений, далеких или компактных галактик) все звезды проходили селекцию по параметрам “CHI” и “SHARP”, которые определяют форму фотометрического профиля каждой измеряемой звезды (Стетсон, 1987). Профили незвездных объектов отличались от профилей изолированных звезд, выбранных нами в качестве стандартных, что позволило провести такую селекцию со списками звезд, полученных при работе DAOPHOT II и DOLPHOT 2.0.

Принципы фотометрии программами DOLPHOT и DAOPHOT одинаковы, но есть некоторые различия при их использовании. Например, в DAOPHOT в качестве PSF-звезд мы брали одиночные звезды из исследуемых полей, а в DOLPHOT использовалась библиотека PSF-профилей. При измерении положений TRGB-скачков оба метода дают сходные результаты, и значимых различий между ними не обнаружено.

НЕОБХОДИМОСТЬ СНИМКОВ В V ФИЛЬТРЕ ДЛЯ TRGB-МЕТОДА

Рассмотрим более подробно необходимость снимков в V фильтре (F555W или F606W) для измерения расстояний TRGB-методом. Причина первая — подтвердить наличие ветви красных гигантов на CM-диаграмме.

Изучение пространственного распределения звезд в галактиках показало, что вокруг эллиптических, спиральных и иррегулярных галактик существуют протяженные диски и гало, состоящие из красных гигантов и AGB звезд (Тихонов и др., 2005;

²<http://americano.dolphinim.com/dolphot/dolphot.pdf>

Таблица 1. Данные об архивных снимках HST

Заявка	Заявитель	Год	Объект	Камера	Фильтр	Экспозиция	Число звезд
10210	R. Tully	2004	DDO187	ACS	F814W	1174	10876
10210	R. Tully	2004	DDO187	ACS	F606W	985	10876
11724	M. Geha	2010	NGC185	ACS	F814W	5392	31153
11724	M. Geha	2010	NGC185	ACS	F606W	5392	31153
10260	W. Harris	2004	M31	ACS	F814W	2370	175761
10260	W. Harris	2004	M31	ACS	F606W	2370	175761
15645	D. Sand	2019	NGC1058	ACS	F814W	2172	73013
15645	D. Sand	2019	NGC1365	ACS	F814W	2172	110893
15645	D. Sand	2019	NGC1448	ACS	F814W	2208	45819
15645	D. Sand	2019	NGC3079	ACS	F814W	2360	92985
15645	D. Sand	2019	NGC3810	ACS	F814W	2120	77283
15645	D. Sand	2019	NGC4321	ACS	F814W	2128	101656
15654	J. Lee	2020	NGC4328	ACS	F814W	3558	56506
15654	J. Lee	2020	NGC4328	ACS	F606W	3217	56506
13442	R. Tully	2014	NGC4485	ACS	F814W	1000	52511
13442	R. Tully	2014	NGC4485	ACS	F606W	1000	52511
15645	D. Sand	2019	NGC4490	ACS	F814W	2208	90800
15645	D. Sand	2019	NGC4651	ACS	F814W	2128	79863
15645	D. Sand	2019	NGC6951	ACS	F814W	2456	58746
15645	D. Sand	2019	NGC7331	ACS	F814W	2152	62308

Рудик и др., 2006; Рехкуба и др., 2014). Протяженность таких гало у массивных эллиптических и спиральных галактик доходит до 100–200 кпк (Михос и др., 2013; Рехкуба и др., 2014; Тихонов и др., 2019). Достаточно протяженные диски есть и у иррегулярных галактик (Тихонов, 2005, 2006). Поэтому если галактика находится на расстоянии не дальше 25 Мпк, то на любом глубоком HST снимке периферии галактики в фильтре F814W (I) можно увидеть красные гиганты диска или гало. Таким образом, получение CM-диаграммы для визуализации ветви красных гигантов не является строгой необходимостью.

При переводе инструментальных величин в стандартную систему Крона–Казинца мы должны знать показатели цвета звезд, которые получаются после фотометрии звезд в двух фильтрах. Однако при работе в узком интервале показателя цвета,

т.е. при фотометрии красных гигантов, можно использовать среднее значение показателя цвета этих звезд и ошибка перевода будет незначительной. Например, в DAORHOT II для преобразования инструментальных звездных величин в V и I величины системы Крона–Казинца мы использовали уравнения перехода, полученные нами ранее (Тихонов и др., 2019):

$$(V - I) = 1.3213 \times (v - i) + 1.133, \quad (1)$$

$$I = i + 0.0592 \times (V - I) + 25.972, \quad (2)$$

где v и i — инструментальные звездные величины, а V и I — звездные величины в системе Крона–Казинца.

В уравнении (2) видна малая зависимость получаемой светимости звезды в фильтре I от показателя цвета звезды ($V - I$). Поэтому если мы будем

использовать среднее значение показателя цвета $(V - I) = 1.6$, что близко к реальным показателям цвета красных гигантов спиральных галактик, то звезды, которые в действительности краснее или голубее на 0^m2 , будут иметь ошибку измерения светимости в фильтре I всего лишь в 0^m01 . Таким образом, при фотометрии красных гигантов мы можем получить значения их светимости в I фильтре системы Крона–Казинса на основе измерений только в одном фильтре F814W. Конечно, такое вычисление не годится для одновременной фотометрии красных и голубых звезд, но в данной работе мы рассматриваем только красные гиганты, т.е. вторая причина получения снимков в V фильтре не является необходимым условием.

В третьей причине указывается, что на CM-диаграмме есть корреляция между показателем цвета ярчайших красных гигантов и их светимостью. В физическом смысле это зависимость между металличностью и возрастом звезд и их светимостью. Согласно работе Ли и др. (1993), изменение показателя цвета $(V - I)$ красных гигантов от 1.4 до 1.8 ведет к изменению положения TRGB-скачка (т.е. светимости ярчайших звезд) на 0.1 звездной величины. Рассмотрим действие этого эффекта в реальных галактиках. На рис. 1 представлены CM-диаграммы трех галактик разных типов: Igg (DDO187), Sph/E (NGC185) и Sb (M31). На диаграммах видно, что у карликовых галактик DDO187 и NGC185 ветви красных гигантов узкие, а у гигантской M31 большая ширина ветви красных гигантов указывает на присутствие звезд разной металличности и возраста. Очень населенная ветвь гигантов M31 простирается по показателю цвета от $(V - I) = 1.3$ при $I_{TRGB} = 20^m41$ до $(V - I) = 5.5$ при $I_{TRGB} = 22^m0$. На диаграмме рис. 1 M31 можно видеть, что падение блеска ярчайших красных гигантов при увеличении показателя цвета, т.е. при увеличении металличности, происходит нелинейно, что увеличивает сложность в определении зависимости между показателем цвета и светимостью.

В состав массивных галактик входят красные гиганты с разными значениями металличности и возраста (Харрис и др., 2007; Моначеси и др., 2013; Янг и др., 2018), а поскольку на ветви красных гигантов наибольшую светимость имеют звезды с наименьшей металличностью, то именно они и будут определять положение TRGB-скачка на функции светимости. Звезды высокой металличности, но меньшей светимости будут только размывать TRGB-скачок, уменьшая точность его измерения. Таким образом, независимо от присутствия высокометаллических звезд положение TRGB-скачка в спиральных галактиках будет измеряться по низкометаллическим звездам.

При измерении TRGB-методом выборку звезд следует проводить в максимально удаленных от

центра галактики полях. Это объясняется тем, что у массивных галактик уменьшение металличности звезд наблюдается вдоль радиуса галактики, т.е. в далекой от центра галактики выборке звезд ветвь красных гигантов будет более узкой, чем у центральных звезд, что повысит точность измерения TRGB-скачка и расстояния до галактики.

Следует также отметить, что у массивных галактик существуют протяженные диски и гало, состоящие из красных гигантов с более низкой по сравнению со звездами центральных областей металличностью. Звезды этих дисков и гало будут всегда попадать в выборку звезд, независимо от места ее расположения в галактике, а поскольку эти звезды периферии в наименьшей степени подвержены действию поглощения света родительской галактикой, то они будут влиять на положение TRGB-скачка у массивных галактик, хотя этих звезд в выборке будет очень немного.

В маломассивных галактиках (DDO187 и NGC185) красные гиганты имеют малый диапазон металличности, поэтому ветвь гигантов узкая (рис. 1), и положение TRGB-скачка определяется точнее, чем у массивных галактик.

Четвертая причина использования двух фильтров состоит в том, что появляется возможность проводить селекцию звезд по показателю цвета и таким образом увеличить в выборке содержание красных гигантов. При фотометрии с одним F814W фильтром такую селекцию провести невозможно, и поэтому приходится делать выборку звезд как можно дальше от центра галактики, где содержание других типов звезд, кроме красных гигантов, будет снижено.

Указанные выше неопределенности с фотометрическими параметрами звезд привели некоторых астрономов к использованию постоянного значения светимости красных гигантов на вершине их ветви независимо от показателя цвета: $M_I = -4^m04 - M_I = -4^m05$ для иррегулярных галактик (Беллаззини и др., 2001; Корбин и др., 2008) и $M_I = -4^m08$ для спиральных галактик (Сет и др., 2005). В других работах по определению расстояний (Якобс и др., 2009) поправка за показатель цвета вводится относительно среднего значения показателя цвета $(V - I) = 1.6$ красных гигантов спиральных галактик: $M_I = -4^m05 + 0.217((V - I) - 1.6)$. Поскольку у большинства спиральных галактик показатель цвета красных гигантов $(V - I)$ заключен в диапазоне от 1.4 до 1.8, то значение M_I этих гигантов может изменяться на $\pm 0^m04$, и, значит, такую максимальную ошибку измерений мы можем получить при определении расстояний без поправок на цвет гигантов. При измерении расстояния на основе одного фильтра F814W ожидаемый показатель цвета красных гигантов можно оценить по морфологии галактики и ее светимости,

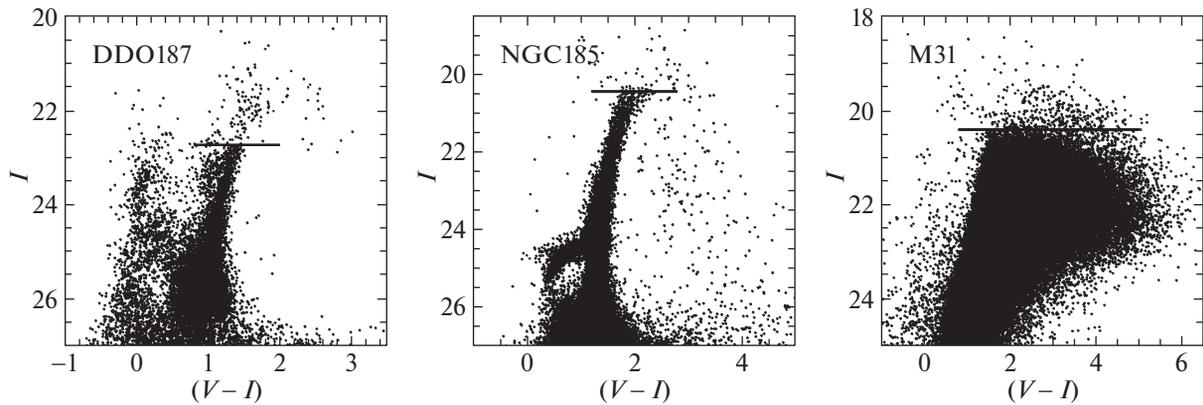


Рис. 1. CM-диаграммы звезд галактик разных типов: DDO187(Irr), NGC185(E/Sph) и M31(Sb), для которых проводилось сравнение измерений TRGB-скачка на основе фотометрии в одном или в двух фильтрах.

поэтому ошибка измерения светимости M_I может быть даже меньше чем $\pm 0^m.04$.

После анализа всех причин использования в TRGB-методе двух фильтров мы можем сделать вывод, что фотометрию с одним фильтром F814W можно применять для измерения расстояний до галактик. Основная ошибка, которая может появиться при таких измерениях, — это принятие скачка AGB звезд вместо скачка красных гигантов. В галактиках эти типы звезд занимают одни и те же области, и в выборку звезд они попадают вместе. AGB звезды ярче красных гигантов, поэтому на CM-диаграмме AGB-скачок расположен примерно на одну звездную величину выше TRGB-скачка. Градиент падения численной плотности звезд вдоль радиуса галактики у AGB звезд больше, чем у красных гигантов, поэтому, выбирая звезды как можно дальше от центра галактики, мы увеличиваем содержание красных гигантов и повышаем точность измерения расстояния. Конечно, как и при любых измерениях, при фотометрии с одним фильтром надо иметь некоторый опыт в звездной фотометрии галактик и в определении расстояний TRGB-методом.

У метода измерений на основе одного фильтра есть свои преимущества. Отпадает необходимость иметь снимки во втором фильтре, и поэтому появляется возможность использовать те многочисленные архивные HST снимки с одним F814W фильтром, которые невозможно было использовать для определения расстояний. Поскольку при одинаковых экспозициях красные гиганты в фильтрах F555W или F606W видны хуже, чем в фильтре F814W, то предел совместной фотометрии будет определяться снимками с наихудшим пределом, т.е. F555W или F606W, и расстояния до галактик станут неизмеримыми, хотя в фильтре F814W красные гиганты могут быть хорошо видны.

На рис. 2 представлены функции светимости звезд галактик DDO187, NGC185 и M31. Вертикальными отрезками отмечены положения TRGB-скачков, а тонкой линией показана функция Собе́ля (Мадоре, Фридман, 1995), максимумы которой указывают на резкое изменение численности звезд, что наблюдается на границе ветви красных гигантов (TRGB-скачок). Верхние диаграммы получены на основе фотометрии с одним фильтром F814W, а нижние диаграммы — с двумя фильтрами: F814W и F606W. В положениях TRGB-скачков верхних и нижних диаграмм есть небольшие различия от $0^m.01$ до $0^m.03$, которые появились из-за селекции по показателю цвета звезд и из-за неточности преобразования инструментальных величин в величины Крона—Казинца у звезд с большим показателем цвета. При оценке этих различий следует иметь в виду, что первоначальная точность TRGB-метода (Ли и др., 1993) была равна $0^m.1$, а после дополнительных исследований точность увеличилась до $0^m.06$ (Янг, Ли, 2017). Реальную точность TRGB-метода можно видеть на примере тех галактик, для которых были получены многочисленные измерения разными авторами. Из-за многих причин точность измерения TRGB-скачка получается хуже чем $0^m.1$, но это замечание относится также и к методу цефеид, который обычно относят к точным методам.

Таким образом, при определенных условиях для измерения расстояния достаточно иметь снимки только в одном фильтре F814W. Конечно, ошибка измерения расстояния в этом случае может быть больше, чем при использовании двух фильтров, но полученный результат все же будет намного точнее, чем результаты измерений методами SBF, TF или SN. Обычно автор метода склонен преувеличивать его точность, но сравнение измерений разными методами позволяет оценить точность каждого из них. Для метода Талли—Фишера Виллик (1996)

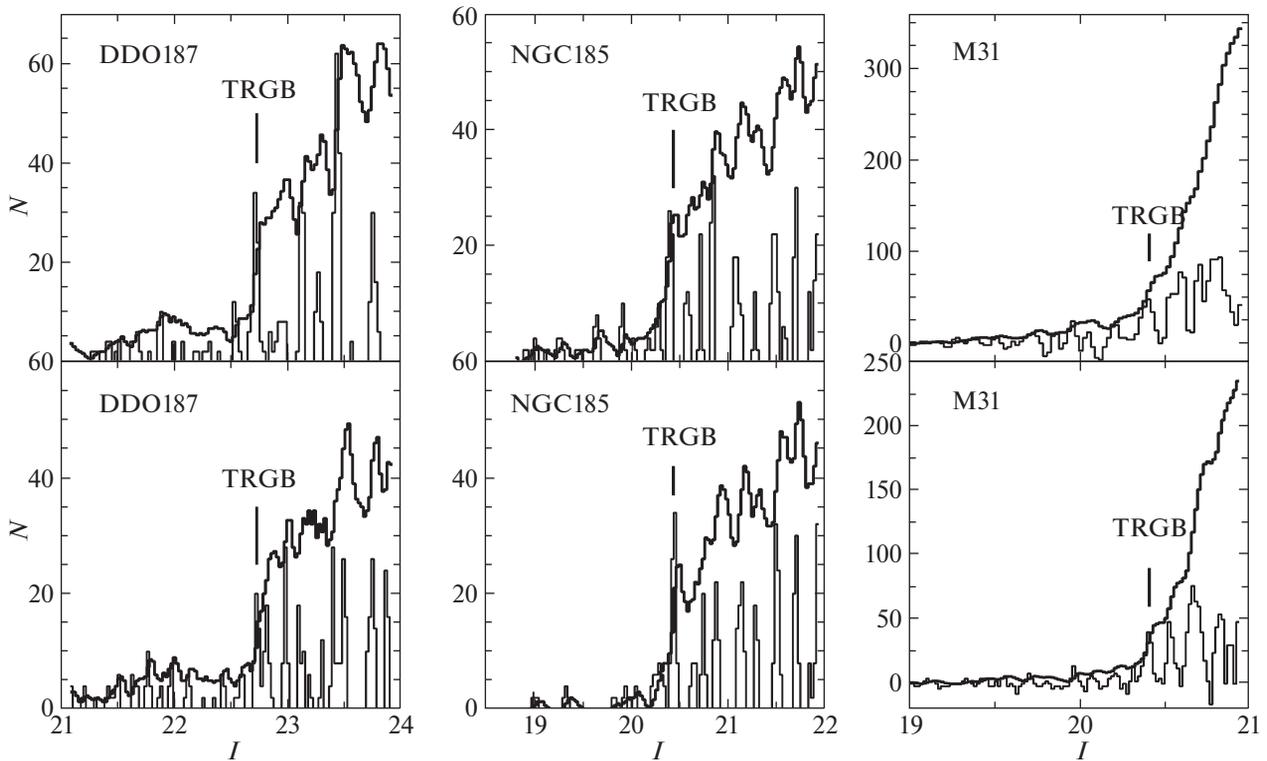


Рис. 2. Функции светимости галактик DDO187, NGC185 и M31 после фотометрии и селекции звезд только в одном фильтре F814W (верхний ряд) и в двух фильтрах F814W и F606W (нижний ряд). Тонкой линией отмечена функция Соболя, максимумы которой указывают на повышенные градиенты численности звезд, что наблюдается на границе ветви красных гигантов (TRGB-скачок). Положение TRGB-скачков отмечено вертикальными отрезками.

оценил точность в $\pm 0^m.4$, а в идеальных для этого метода наблюдениях галактик с ребра точность оценивается в $\pm 0^m.32$ (Макаров и др., 2018). Моделирование условий наблюдений для SBF метода показало, что его точность в лучшем случае не превышает $\pm 0^m.15$, в худшем случае — $\pm 0^m.65$ (Миске и др., 2003). Теоретически точность SBF метода не может быть выше $\pm 0^m.1$ (Блэйксли и др., 1999). В обзорной статье методов измерений точность по сверхновым звездам SNIa указана в $\pm 0^m.12$. Антипова и др. (2020) указывают точность метода в $\pm 0^m.18$, однако для близких галактик такая точность не подтверждается TRGB-измерениями, а для далеких галактик аналогичный контроль не существует. Для сравнения всех методов можно взять ключевую галактику M100. Метод TF дает значение расстояний от 11.0 до 23.5 Мпк, метод SNIa — от 11.6 до 27.6 Мпк, а SNIi — от 15 до 23 Мпк. Наши TRGB измерения и TRGB измерения Ананда и др. (2021) дают значения 18.50 и 18.44 Мпк.

Что касается проверки TRGB-метода с одним фильтром, то ранее мы успешно использовали этот метод при изучении звездных подсистем галактики M87 в скоплении Virgo (Тихонов и др., 2019).

ВЫБОР ГАЛАКТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

Для работы мы использовали архивные снимки галактик, полученные на HST по заявке ID15645. Все снимки получены только в одном фильтре F814W. В NED можно найти результаты измерения расстояний для этих галактик, полученные ранее разными по точности методами, поэтому можно сравнить наши результаты с уже имеющимися. Почти все галактики списка относятся к массивным галактикам с населением разной металличности, поэтому проверка TRGB-метода с одним фильтром проходила в наиболее трудных для этого метода условиях. Кроме снимков по заявке ID15645 мы использовали изображения заявки ID13442 для проверки результатов по галактике NGC4490 и ее близкого соседа NGC4485. Также для измерения расстояния до галактики NGC4328, соседней с NGC4321, мы использовали снимки заявки ID15654. Фотометрия галактик DDO187, NGC185 и M31 проводилась по снимкам заявок ID10210, 11724 и 10260. Величины поглощения света в направлениях на галактики взяты из работы Шлафли и Финкбайнер (2011).

Приведенные в табл. 2 результаты классификации галактик (T), величины гелиоцентрических

Таблица 2. Параметры исследованных галактик

Галактика	T	B_t	v_h	$a \times b$	D (Мпк)	D_{\min}	D_{\max}
NGC1058	SA(rs)c	11.82	518	3.0×2.8	10.72	1.4(1)	12.0(2)
NGC1365	SB(s)b	10.32	1636	11.2×6.2	18.12	7.9(1)	26.2(3)
NGC1448	SAcd	11.40	1168	7.6×1.7	18.04	10.2(4)	26.3(5)
NGC3079	SA(rs)c	11.54	1116	7.9×1.4	16.68	7.6(6)	22.6(7)
NGC3810	SA(rs)c	11.35	992	1.7×1.5	11.86	12.5(4)	24.9(8)
NGC4321	SA(rs)c	10.05	1571	7.4×6.3	15.50	11.0(9)	27.6(10)
NGC4328	SA0	14.04	479	1.2×1.0	14.06	14.8(11)	23.7(12)
NGC4485	IB(s)m	12.32	493	2.3×1.7	8.59	8.8(13)	9.1(14)
NGC4490	SB(s)d	10.22	565	6.3×3.1	8.83	4.2(4)	10.1(12)
NGC4651	SA(rs)c	11.39	788	4.0×2.6	20.24	4.8(15)	32.7(8)
NGC6951	SAB(rs)bc	11.64	1424	3.9×3.2	16.91	16.2(16)	33.0(17)
NGC7331	SA(s)b	10.35	816	10.5×3.7	14.39	7.2(18)	22.9(3)

скоростей (v_h), видимые величины (B_t) и размеры галактик в угловых минутах ($a \times b$) взяты из NED, а измеренные расстояния до галактик D (Мпк) получены нами. Минимальные (D_{\min}) и максимальные (D_{\max}) расстояния до галактик взяты из работ: (1) — Боттинелли и др. (1985), (2) — Киршнер и Кван (1974), (3) — Патюрель и Терикорпи (2006), (4) — Боттинелли и др. (1984), (5) — Джонис и др. (2009), (6) — Боттинелли и др. (1986), (7) — Караченцев и др. (2006), (8) — Экхолм и др. (2000), (9) — Спрингоб и др. (2009), (10) — Фолателли и др. (2013), (11) — Ананд и др. (2021), (12) — Тереу и др. (2007), (13) — Сабби и др. (2018), (14) — Талли и Фишер (1988), (15) — Лагаттула и др. (2013), (16) — Сорке и др. (2014), (17) — Винко и др. (2001), (18) — Осман и др. (1982).

После проведения звездной фотометрии были построены функции светимости (рис. 5–16), на которых по градиенту численности звезд определялось положение TRGB-скачка. Дополнительно к обычным функциям светимости в координатах ($I - N$) были построены функции светимости в логарифмических координатах ($I - \lg N$) (рис. 5–16). На таких диаграммах начало ветви красных гигантов хорошо определяется по изменению градиента функции светимости, даже если отсутствует TRGB-скачок. Функции светимости в координатах ($I - N$) показывают большое разнообразие из-за

различных условий выборки звезд у разных по морфологии галактик, но при использовании логарифмического масштаба у них появляются общие закономерности: повышение численности звезд на границе ветви AGB звезд и изменение градиента функции светимости на границе ветви красных гигантов.

После измерения положения TRGB-скачка мы использовали уравнения работы Ли и др. (1993) для вычисления расстояния. Для спиральных галактик мы принимали значение показателя цвета ветви гигантов $(V - I)_{TRGB} = 1.6$, а для показателя цвета ветви гигантов на уровне $M_I = -3.5$ использовали значение $(V - I)_{-3.5} = 1.45$. Полученные результаты измерений приведены в табл. 3. Ошибка измерения расстояния для каждой галактики вычислялась на основе суммирования нескольких источников ошибок: точности измерения положения TRGB-скачка, точности используемого метода, точности поправки для PSF профилей звезд и нескольких других, менее значимых ошибок измерений.

Приведенные в табл. 3 коэффициенты экстинкции A_B , A_I и видимые величины (B_t) взяты из NED, а остальные значения: I_{TRGB} — положения TRGB-скачков, $(m - M)$ — модули расстояний, D (Мпк) — расстояния до галактик, M_B — абсолютные величины галактик получены нами.

Таблица 3. Результаты фотометрии галактик

Галактика	I_{TRGB}	A_B	A_I	$(m - M)$	D (Мпк)	B_t	M_B
NGC1058	26.16	0.225	0.093	30.15	10.72 ± 0.71	11.82	-18.56
NGC1365	27.24	0.074	0.031	31.29	18.12 ± 0.98	10.32	-21.04
NGC1448	27.22	0.054	0.021	31.28	18.04 ± 1.02	11.40	-19.93
NGC3079	27.05	0.041	0.017	31.11	16.68 ± 0.85	11.54	-19.61
NGC3810	26.36	0.160	0.066	30.37	11.86 ± 0.80	11.35	-19.18
NGC4321	26.89	0.095	0.039	30.95	15.50 ± 0.69	10.05	-21.00
NGC4328	26.72	0.096	0.040	30.74	14.06 ± 0.94	14.04	-16.80
NGC4485	25.62	0.078	0.033	29.67	08.59 ± 0.58	12.32	-17.43
NGC4490	25.70	0.079	0.033	29.73	08.83 ± 0.60	10.22	-19.59
NGC4651	27.49	0.097	0.040	31.53	20.24 ± 1.45	11.39	-20.24
NGC6951	27.62	1.351	0.561	31.14	16.91 ± 1.13	11.64	-20.85
NGC7331	26.85	0.331	0.137	30.79	14.39 ± 0.96	10.35	-20.77

ЗАМЕЧАНИЯ О ГАЛАКТИКАХ

Спиральная галактика средней яркости NGC1058 расположена плашмя (рис. 3), что позволило нам по измеренному распределению плотности звезд вдоль радиуса выделить гало, звезды которого использовались нами для построения функции светимости (рис. 5) и определения расстояния ($D = 10.7$ Мпк). В NED можно видеть, что измерения методом Талли–Фишера давали заниженные значения расстояния (от 1.5 до 7.5 Мпк), в то время как методом сверхновых (SNII) были получены достаточно точные значения (10.6–12.0 Мпк).

Гигантская спиральная галактика NGC1365 (рис. 3) стала ключевым объектом для методов определения расстояний, поэтому для нее имеется очень много измерений, сведения о которых можно найти в NED. Это позволяет оценить точность каждого метода. Цефеидный метод дал значения расстояния от 17.2 до 26.2 Мпк, метод сверхновых (SNII) — от 16.4 до 18.5 Мпк, а метод Талли–Фишера — от 7.9 до 18.9 Мпк. При измерении TRGB-методом Янг и др. (2018) получили значение 18.1 Мпк, что точно совпадает с нашим результатом (18.12 Мпк), полученным по другим HST снимкам. Используемое нами изображение NGC1365 захватывало периферию галактики,

поэтому яркие сверхгиганты не влияли на точность измерения TRGB-скачка (рис. 6).

Расположенная на 18.0 Мпк (рис. 7) и видимая почти с ребра спиральная галактика NGC1448 (рис. 3) имеет много измерений расстояний (NED). По методу Талли–Фишера получены значения от 10.2 до 22.2 Мпк, метод сверхновых SNII дает значения от 11.9 до 26.3 Мпк, а сверхновых SNI — от 15.3 до 23.7 Мпк. Наиболее близкие к нашему результату расстояния получены по цефеидам ($D = 18.3$ Мпк, Рисс и др., 2016) и TRGB-методом с использованием снимков F814W и F606w ($D = 17.7$ Мпк, Хатт и др., 2018).

Спиральная галактика NGC3810 расположена по центру HST снимка (рис. 3) и для выбора красных гигантов остаются только краевые участки изображения. Галактика находится сравнительно близко (11.86 Мпк по нашим измерениям), поэтому не возникает трудностей с выделением красных гигантов (рис. 8). В NED указаны результаты измерения расстояния только методом Талли–Фишера (от 12.5 до 24.9 Мпк).

Для видимой с ребра спиральной галактики NGC3079 получены снимки двух полей (рис. 3). Мы получили результаты по каждому полю, но результат по второму полю более надежный (рис. 9), поскольку здесь больше места занимают гало и

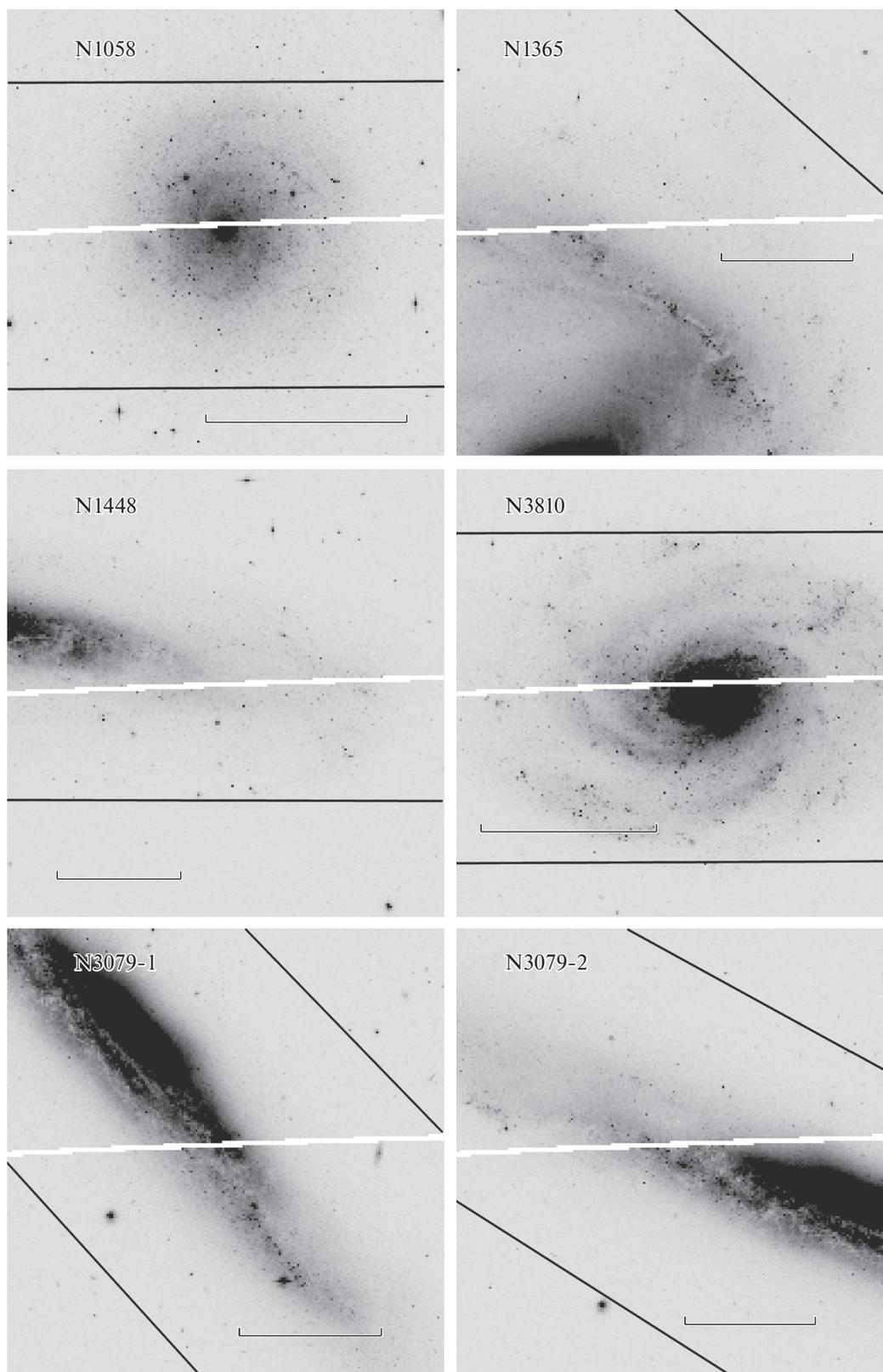


Рис. 3. Изображения изученных галактик на HST снимках в фильтре F814W. Белые полосы поперек каждого снимка возникают из-за пустой площади между чипами камеры ACS. Размер каждого снимка $3.5' \times 3.5'$. Области периферии галактик, где выбирались звезды для измерения расстояния, на снимках ограничены прямыми линиями. Центральные зоны галактик для измерений не использовались. Горизонтальный отрезок прямой линии на каждом снимке равен 5 кпк.

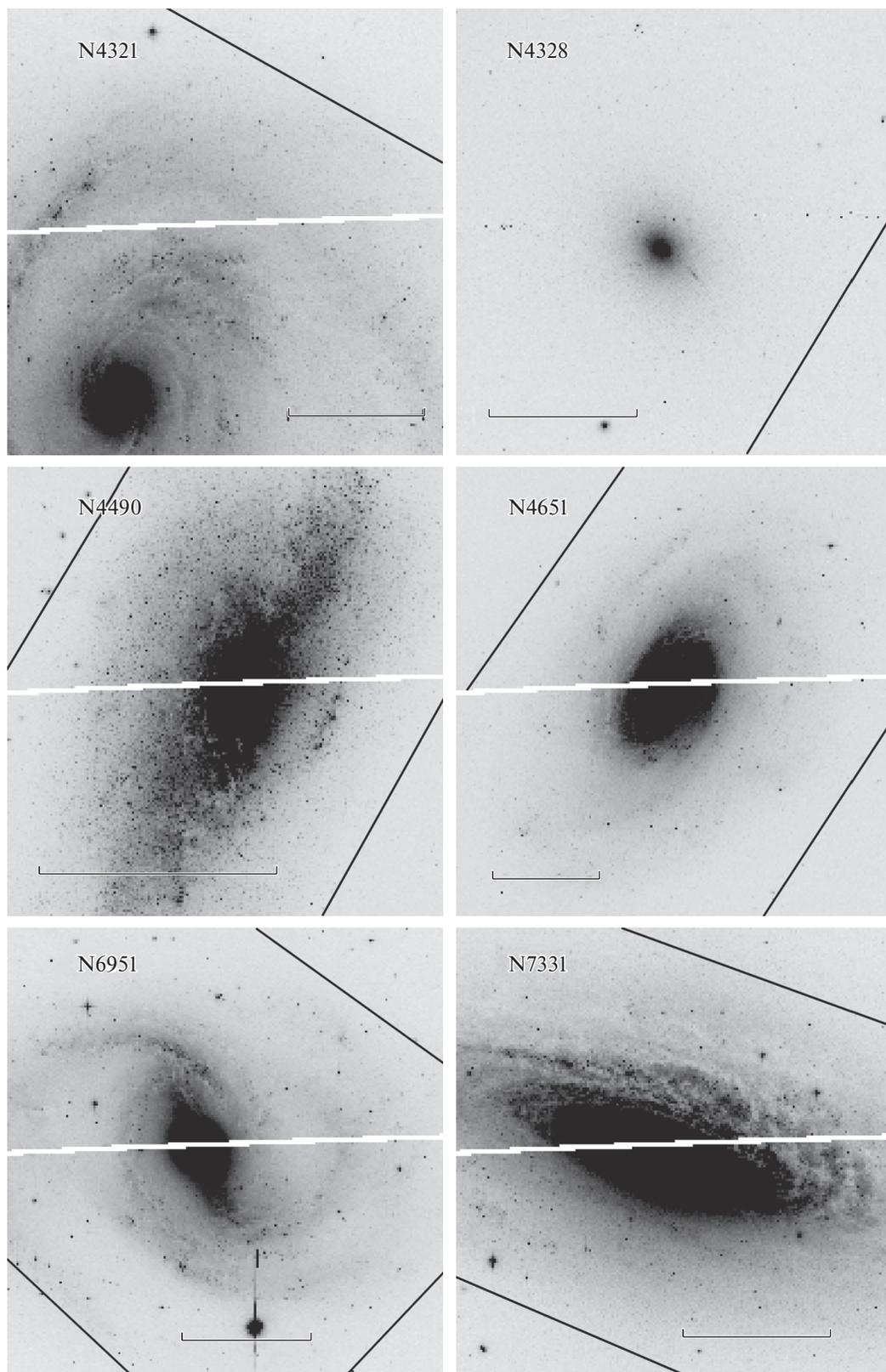


Рис. 4. Изображения галактик на HST снимках в фильтре F814W.

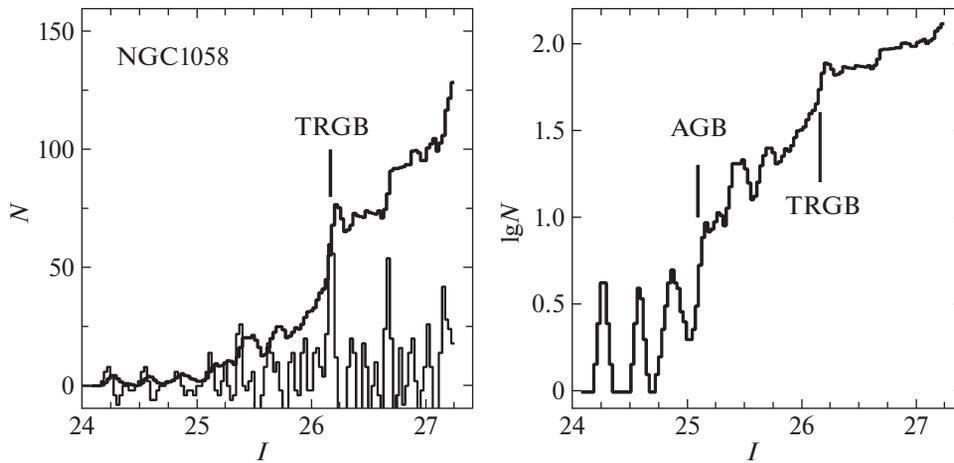


Рис. 5. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC1058 после фотометрии и селекции звезд в одном фильтре F814W. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка. Справа показана эта же функция светимости в логарифмических координатах численности звезд. При таком представлении положение TRGB-скачка видно более наглядно.

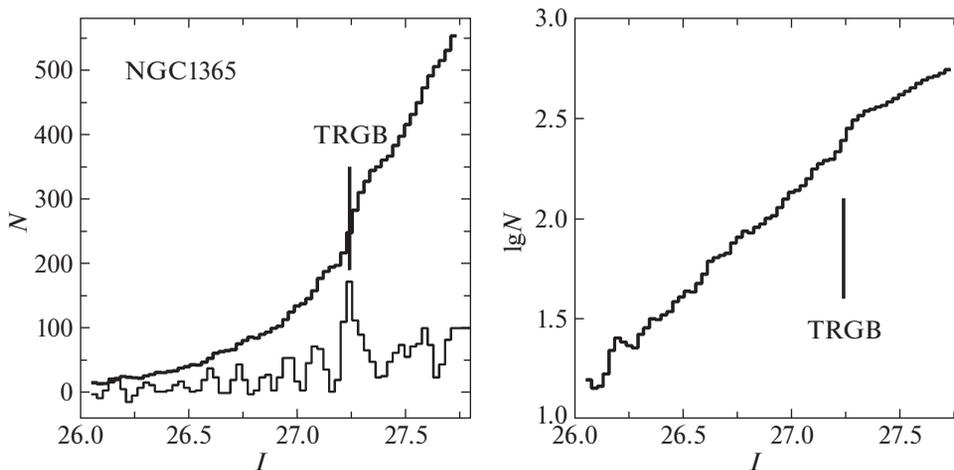


Рис. 6. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC1365 после фотометрии и селекции звезд в одном фильтре F814W. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка. Справа показана функция светимости в логарифмических координатах.

диск с красными гигантами. Положения TRGB-скачков двух полей различаются на 0^m03 , что находится в пределах ошибки измерений. По нашим измерениям NGC3079 расположена на расстоянии 16.7 Мпк, а измерения методом Талли–Фишера (NED) дают значения от 12.5 до 22.6 Мпк. Галактику NGC3079 Холмберг считал двойной галактикой под номером Holm156A (Холмберг, 1937) в паре с NGC3073, находящейся на угловом расстоянии $10'$. Лучевая скорость NGC3073 ($v_h = 1173$) мало отличается от скорости NGC3079, а на HST снимке с фильтром F850LP (ID10554) на периферии NGC3073 видны слабые красные гиганты. Точное расстояние до этой галактики пока неизвестно.

Спиральная галактика NGC4321 (M100, Holm387A) входит в список гигантских галактик

скопления Virgo (рис. 4) и является одной из ключевых галактик, для которых расстояния определялись разными методами. К сожалению, результаты многих измерений не внесли ясности относительно пространственного положения галактики в скоплении Virgo. По измерениям наиболее точным методом цефеид получены значения в интервале от 14.2 Мпк (Канбур и др., 2003) до 21.4 Мпк (Патюрель, Терикорпи, 2006). На основе других методов измерения (TF, SNI, SNI) получены оценки расстояния в этом же интервале значений. Недавно TRGB-методом получено значение расстояния $D = 15.44$ Мпк (Ананд и др., 2021), что указывает на расположение NGC4321 в центральных областях скопления Virgo. На используемом нами снимке (рис. 4) яркие области NGC4321

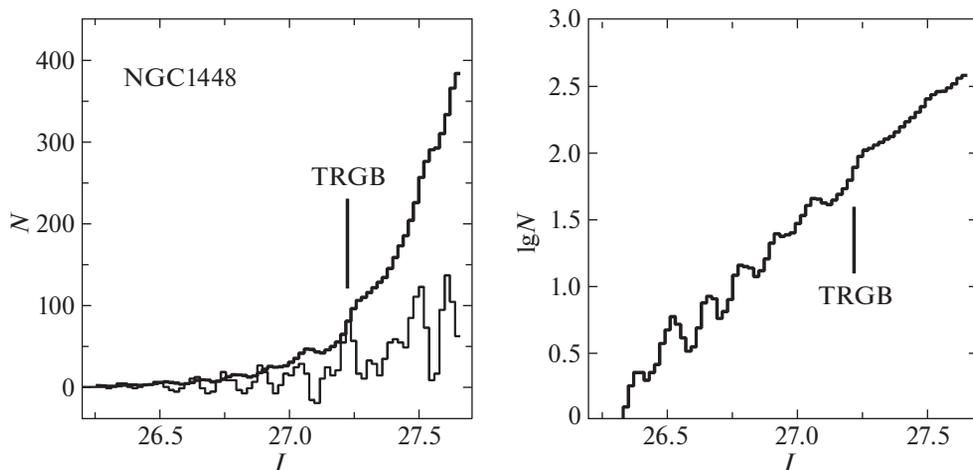


Рис. 7. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC1448. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

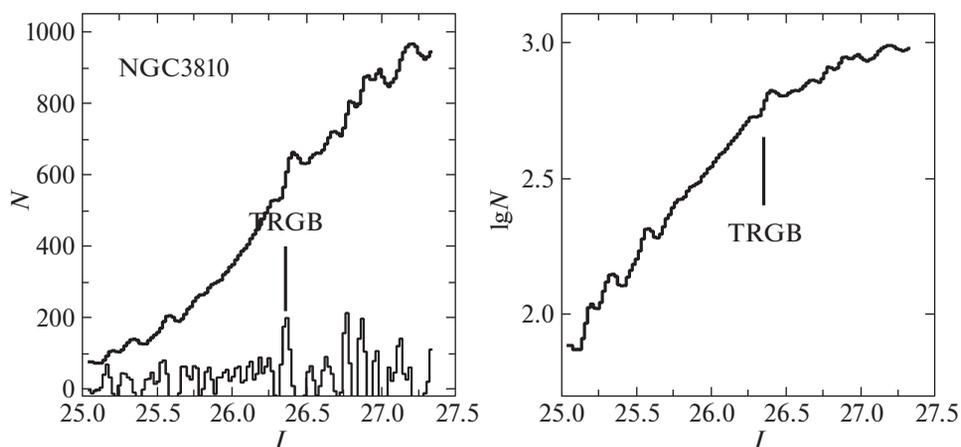


Рис. 8. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC3810. На диаграмме в логарифмическом масштабе начало ветви красных гигантов видно по изменению градиента функции светимости. Аналогичное изменение видно и на других диаграммах, например, на рис. 6 и рис. 7.

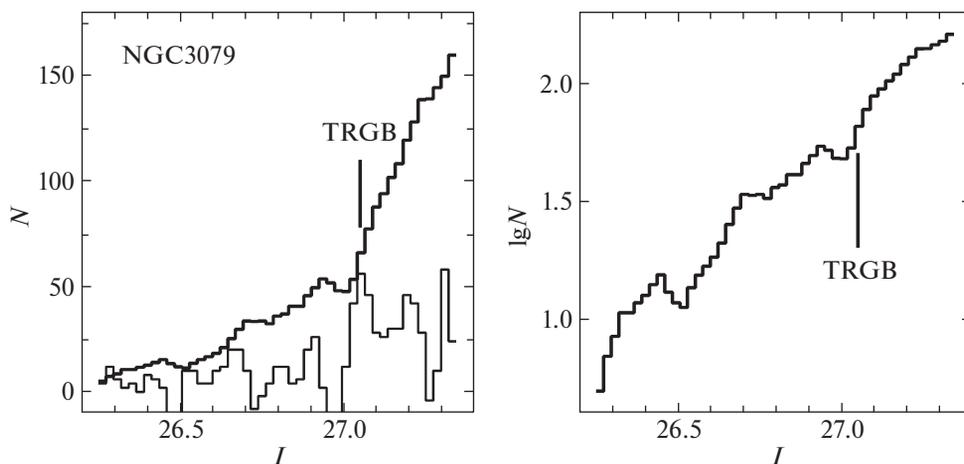


Рис. 9. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC3079. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

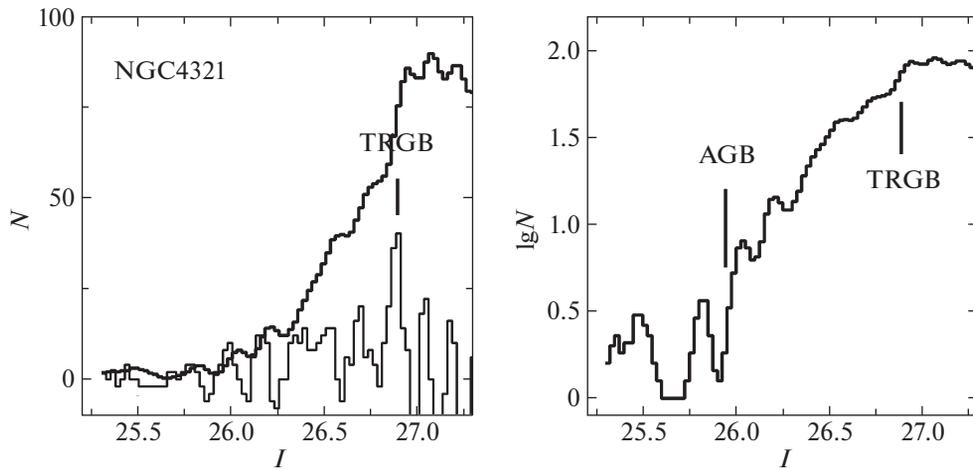


Рис. 10. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC4321. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

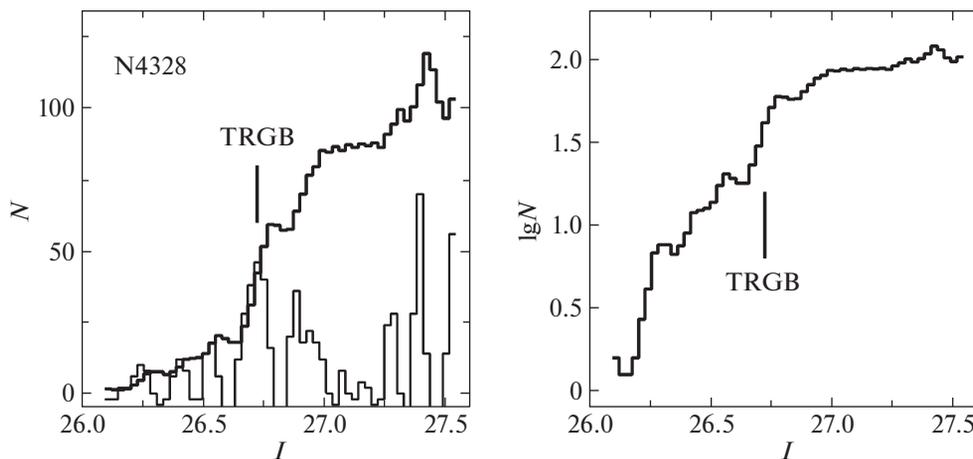


Рис. 11. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC4328. Положение TRGB-скачка при $I = 27.6$ ($D = 21.2$ Мпк) является предельным измеряемым значением для HST снимков с экспозицией 2456 с.

занимают значительную часть поля, поэтому звезды для измерений выбирались на краях снимка. Функция светимости красных гигантов достаточно надежно указывает на положение TRGB-скачка при $I = 26.89$ (рис. 10), что соответствует $D = 15.50$ Мпк. Полученный нами результат хорошо согласуется со значением Ананд и др. (2021), полученным по фотометрии других HST снимков.

Определение расстояния до NGC4328 (Holm387D) является трудным случаем. На эту линзовидную галактику (рис. 4) проецируется диск и гало массивной NGC4321, поэтому в выборке звезд по всему полю снимка HST присутствует очень большое число AGB звезд и красных гигантов гигантской NGC4321, которые сильно искажают значение TRGB-скачка для NGC4328. Чтобы уменьшить влияние NGC4321, мы использовали звезды в наиболее удаленном от NGC4321

участке снимка (правый нижний край NGC4328 на рис. 4). CM-диаграмма звезд этого поля показала, что красные гиганты NGC4328 обладают высокой металличностью, что соответствует морфологическому типу этой галактики, а TRGB-скачок находится на $I = 26.72$ (рис. 11). На основе работы Ли и др. (1993) мы получили расстояние $D = 14.06$ Мпк, а металличность красных гигантов $[Fe/H] = -0.8$. Малое расстояние до NGC4328 означает, что эта галактика находится на переднем крае скопления Virgo, а малая лучевая скорость ($v_h = 479$) указывает на движение NGC4328 от центра скопления. Из-за различия скоростей и расстояний между NGC4321 и NGC4328 нет оснований считать их физической парой галактик, хотя видны они близко друг от друга.

Галактика NGC4490 (рис. 4) входит в списки пекулярных и двойных галактик: Agr269

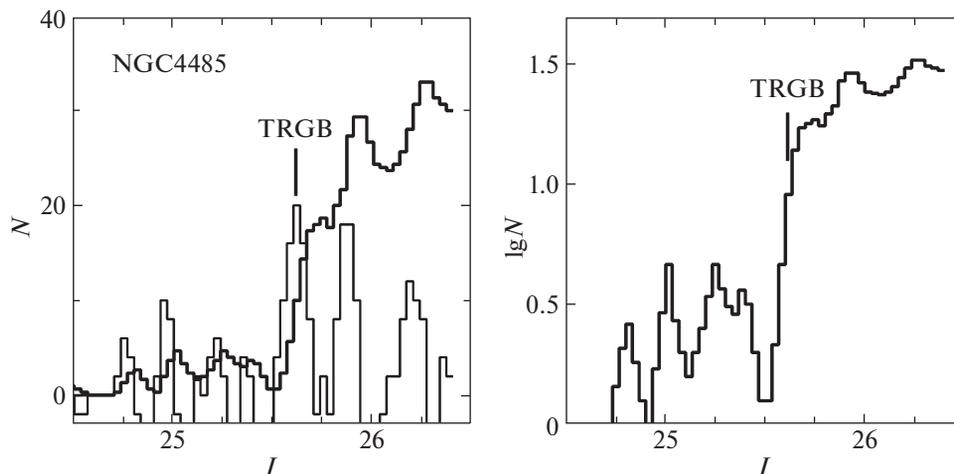


Рис. 12. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC4485. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

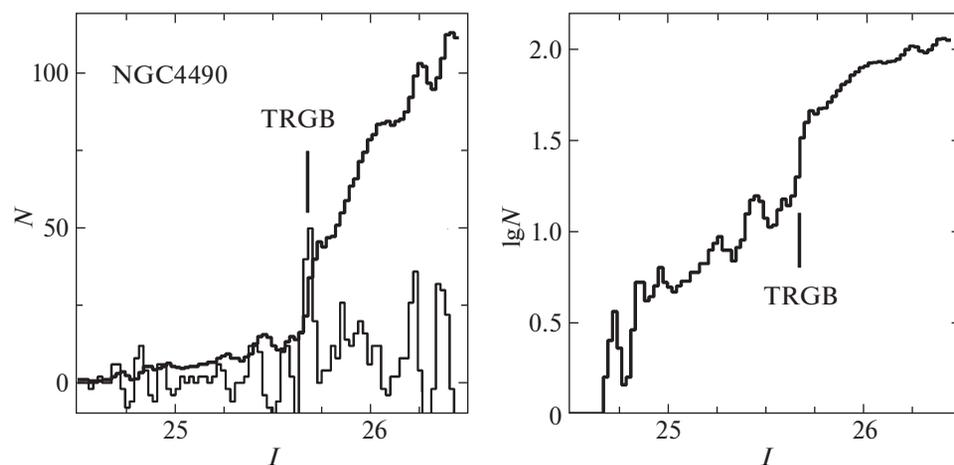


Рис. 13. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC4490. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

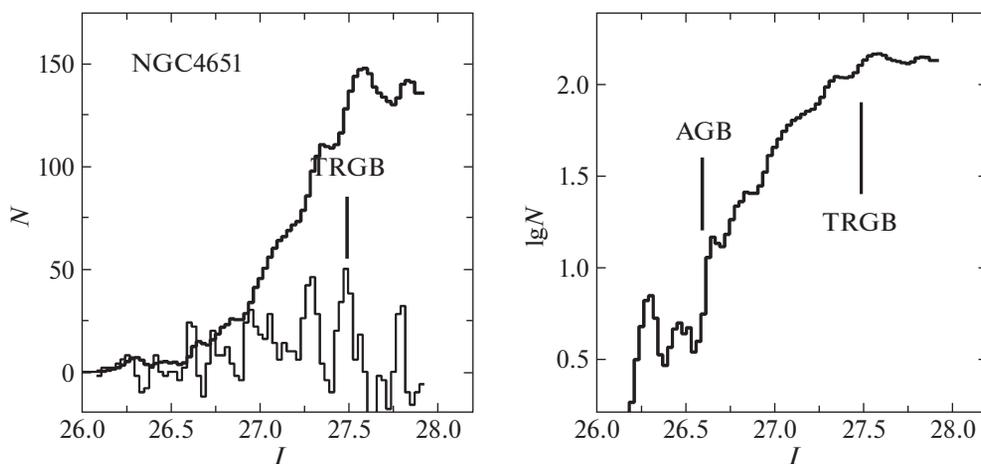


Рис. 14. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC4651. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

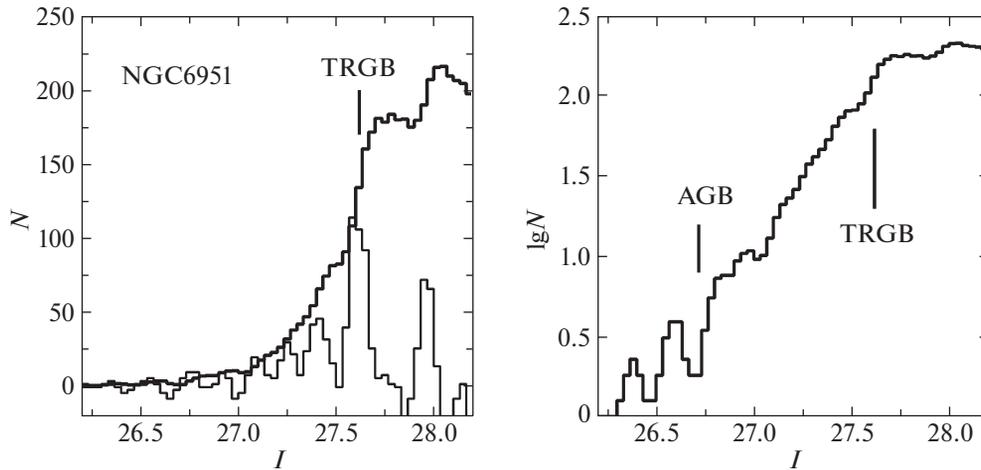


Рис. 15. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC6951. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

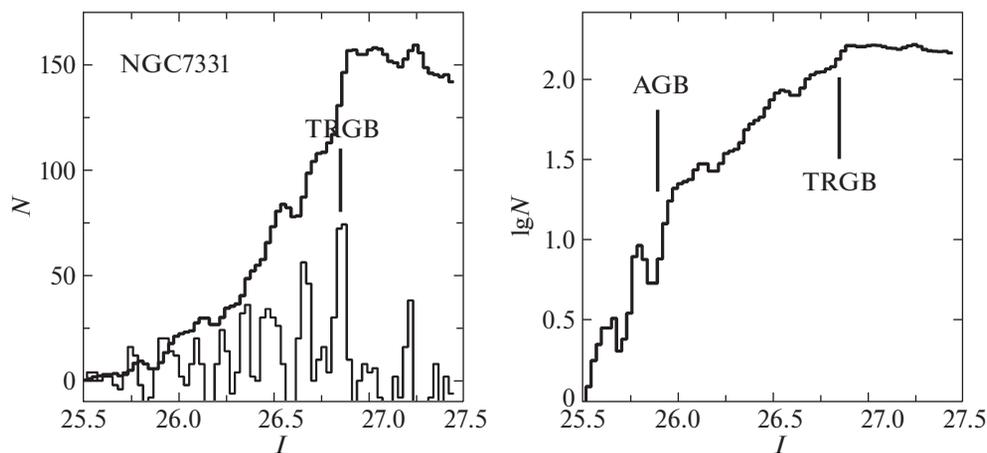


Рис. 16. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд NGC7331. Вертикальной линией отмечено положение TRGB-скачка.

(Арп, 1966), Holm414a (Холмберг, 1937), VV30a (Воронцов-Вельяминов, 1959), KPG341b (Караченцев, 1972). Ее близким соседом является галактика NGC4485. На снимках хорошо видны признаки взаимодействия, т.е. расстояния до двух галактик должны быть примерно одинаковые. Реальные измерения разными методами дают большой разброс. Для NGC4490 методом Талли–Фишера получены значения от 4.2 до 10.1 Мпк (NED), а TRGB-методом — 6.5 Мпк (Сабби и др., 2018). Для NGC4485 TRGB-методом Сабби и др. (2018) получили значение $D = 8.75$ Мпк, а еще раньше TRGB-методом было получено значение $D = 8.91$ Мпк (Талли и др., 2013). Видно противоречие в расстояниях, измеренных TRGB-методом, у двух взаимодействующих галактик. По одиночному снимку F814W галактики NGC4490 мы получили значение $D = 9.04$ Мпк, что сильно отличалось от результата Сабби и др. (2018), поэтому

следовало проверить их измерения для NGC4490. Мы использовали те же самые HST снимки и после фотометрии пакетом DOLPHOT 2.0 получили CM-диаграмму (рис. 17), на которой видно, что действительный TRGB-скачок находится при $I = 25.68$, а Сабби и др. (2018) в качестве TRGB-скачка использовали скачок AGB звезд, который находится примерно на одну звездную величину выше, поэтому и получили неверное расстояние. Можно отметить, что совершенно аналогичная ошибка допущена этими же авторами (Сабби и др., 2018) при определении расстояния до галактики NGC1433 (Тихонов, Галазутдинова, 2020).

Яркие области галактики NGC4651 (Arp189, VV56) занимают значительную часть используемого нами HST снимка (рис. 4), поэтому выборка звезд проводилась на краях изображения, где красные гиганты хорошо видны, а численность других, более ярких звезд незначительна. TRGB-

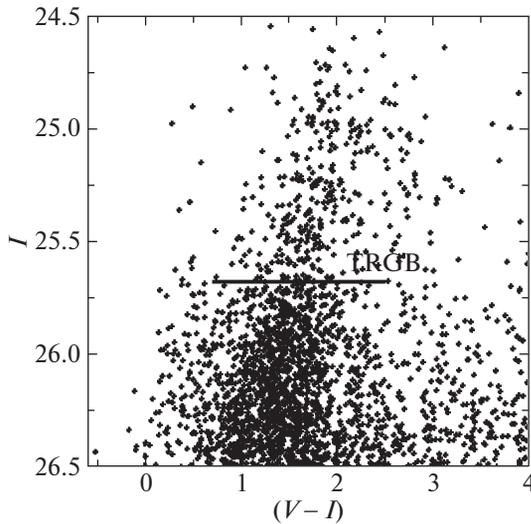


Рис. 17. CM-диаграмма звезд периферии NGC4490. Горизонтальной линией отмечено начало ветви красных гигантов (TRGB-скачок) при $I = 25.7$, что соответствует $D = 8.8$ Мпк.

скачок на функции светимости виден при $I = 27.49$ (рис. 14), что соответствует расстоянию $D = 20.24$ Мпк. При измерениях разными методами получены сильно различающиеся значения расстояния. По Талли–Фишеру расстояние находится в интервале от 4.8 до 32.7 Мпк (NED), а по SNI — 12.2 Мпк. Наиболее точная оценка расстояния получена по планетарным туманностям (PNLF) — 18.8 Мпк (NED).

Галактика NGC6951 находится в зоне Млечного пути и подвержена сильному поглощению света. Выборка звезд на снимке HST проводилась на краях снимка из-за центрального расположения галактики (рис. 4). TRGB-скачок виден при $I = 27.62$ (рис. 15), что соответствует $D = 16.91$ Мпк с учетом поглощения света $A_I = 0.56$. По сверхновым звездам (SNI) для NGC6951 получены расстояния от 18.3 до 33.0 Мпк (NED), а по методу Талли–Фишера — от 16.2 до 24.1 Мпк (NED).

Из-за больших размеров галактики NGC7331 (Holm795A) красные гиганты для TRGB-метода выбирались в двух полях на периферии галактики. TRGB-скачок на функции светимости виден при $I = 26.85$ (рис. 16), что соответствует 14.39 Мпк. Для галактики NGC7331 есть измерения расстояния методом цефеид с результатом от 14.4 до 22.9 Мпк), методом Талли–Фишера (от 9.0 до 16.3 Мпк) и методом флуктуации поверхностной яркости SBF (от 12.0 до 13.6 Мпк). Измерение лучевой скорости галактики NGC7337, которую Холмберг (1937) считал парой с NGC7331, показали, что эта галактика находится существенно дальше (NED).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе фотометрии HST снимков, полученных только в одном фильтре F814W, показано, что их можно использовать для измерения расстояний до галактик TRGB-методом. Сравнение наших результатов с имеющимися наиболее точными значениями расстояний показало хорошее соответствие до предельных значений в 20 Мпк. Для спиральных галактик мы принимали значение показателя цвета ветви гигантов $(V - I)_{TRGB} = 1.6$. Для массивных эллиптических галактик это значение должно быть больше $(V - I)_{TRGB} = 1.8 - 2.0$, но таких галактик нет в нашем списке.

Снимки, которые мы использовали для измерения расстояний (заявка ID15645), получены с экспозицией 2456 с в фильтре F814W. Фотометрический предел этих снимков $I = 28.1$, а это означает, что практически невозможно измерить положение TRGB-скачка для более слабых звезд, чем при $I = 27.6$. Для галактик с малым поглощением света это соответствует расстоянию 21.5 Мпк. Для измерения расстояний TRGB-методом до более далеких галактик необходимы снимки HST с более длительными экспозициями. Например, мы не смогли выделить красные гиганты и измерить расстояния до галактик NGC3632, NGC7714 и других, снимки которых также получены по используемой нами заявке ID15645.

Основная ошибка, которая может возникнуть при работе со снимками в одном фильтре, — это использование AGB звезд вместо красных гигантов, но, как показано в нашей работе, даже наличие снимков в двух фильтрах не спасает от этой ошибки при невнимательности исследователя. При использовании функции светимости в обычных координатах $(I - N)$, где I — светимость звезд, а N — их число, на диаграмме обычно не виден скачок более ярких звезд, чем красные гиганты — AGB звезд. Он расположен примерно на одну звездную величину от TRGB-скачка. Но если построить функцию светимости в координатах $(I - \lg N)$, то будут видны оба скачка, что позволяет избежать ошибки в отождествлении нужного нам TRGB-скачка. Градиент численности звезд увеличивается на границе AGB-скачка, а на границе TRGB-скачка он уменьшается, но функция светимости за границей TRGB-скачка становится более гладкая. Конечно, возможны некоторые отклонения от этого правила, но у большинства спиральных галактик функция светимости следует этому правилу.

В представляемой работе мы использовали снимки в фильтре F814W, но можно полагать, что дополнительное исследование позволит использовать снимки F850LP для изучения пространственной структуры скопления Virgo, поскольку именно

для этого скопления на HST получено множество снимков с указанным фильтром.

Галактики, для которых мы получили точные расстояния, находятся в разных пространственных структурах: скоплениях и группах. Наши результаты добавляют информацию о пространственном строении этих систем.

Работа основана на наблюдениях с космического телескопа Хаббла NASA/ESA, полученных в Научном институте космического телескопа, который управляется AURA, Inc. по контракту № NAS5-26555. Эти наблюдения связаны с заявками 10210, 10260, 11724, 13442, 15645, 15654. В настоящей работе были использованы базы данных NED, HyperLeda.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Национального научного фонда Болгарии в рамках научного проекта № 19-52-18007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананд и др. (G.S. Anand, J.C. Lee, S.D. Van Dyk, A.K. Leroy, E. Rosolowsky, E. Schinnerer, K. Larson, E. Kourkchi, et al.), *MNRAS* **501**, 3621 (2021).
2. Антипова и др. (A.V. Antipova, D.I. Makarov, and L.N. Makarova), *Astrophys. Bull.* **75**, 93 (2020).
3. Арп (H. Arp), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **14**, 1 (1966).
4. Беллазини и др. (M. Bellazzini, F. Ferraro, and E. Pancino), *Astrophys. J.* **556**, 635 (2001).
5. Блэйксли и др. (J.P. Blakeslee, E.A. Ajhar, and J.L. Tonry), arXiv:astro-ph/9807124 (1999).
6. Боттинели и др. (L. Bottinelli, L. Gouguenheim, G. Paturel, and G. Vaucouleurs), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **56**, 381 (1984).
7. Боттинели и др. (L. Bottinelli, L. Gouguenheim, G. Paturel, and G. Vaucouleurs), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **59**, 43 (1985).
8. Боттинели и др. (L. Bottinelli, L. Gouguenheim, G. Paturel, and P. Teerikorpi), *Astron. Astrophys.* **156**, 157 (1986).
9. Винко и др. (J. Vinko, B. Csak, Sz. Crismadia, G. Furesz, L.L. Kiss, K. Sarneczky, Gy. Szabo, K. Sziladi, and I.B. Biro), *Astron. Astrophys.* **372**, 824 (2001).
10. Виллик (J.A. Willick), astro-ph/9610200 (1996).
11. Воронцов-Вельяминов (B.A. Vorontsov-Velyaminov), *Atlas and Catalogue of interacting galaxies. Part I* (Moscow University, Moscow, 1959).
12. Де Грейс (R. de Grijs), *An Introduction to Distance Measurement in Astronomy* (John Wiley & Sons, Chichester, 2011).
13. Джонис и др. (M.I. Jones, M. Hamuy, P. Lira, J. Maza, A. Clocchiatti, M. Phillips, N. Morrell, M. Roth, et al.), *Astrophys. J.* **696**, 1176 (2009).
14. Долфин (A. Dolphin), DOLPHOT: Stellar photometry, *Astrophysics Source Code Library ascl:1608.013* (2016).
15. Канбур и др. (S.M. Kanbur, C. Ngeow, S. Nikolaev, N.R. Tanvir, and M.A. Hendry), *Astron. Astrophys.* **411**, 361 (2003).
16. Караченцев (I.D. Karachentsev), *AISAO* **7**, 3 (1972).
17. Караченцев и др. (I.D. Karachentsev, Yu.N. Kudrya, V.E. Karachentseva, and S.N. Mitronova), *Astrophysics* **49**, 450 (2006).
18. Кишнер, Кван (R.P. Kirshner and J. Kwan), *Astrophys. J.* **193**, 27 (1974).
19. Корбин и др. (M. Corbin, H. Kim, R. Jansen, R.A. Windhorst, and R. Cid Fernandes), *Astrophys. J.* **675**, 194 (2008).
20. Лагаттула и др. (D.J. Lagattula, J.R. Mould, L. Staveley-Smith, et al.), *Astrophys. J.* **771**, 88 (2013).
21. Ли и др. (M.G. Lee, W.L. Freedman, and B.F. Madore), *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993).
22. Мадоре, Фридман (B. Madore and W. Fridman), *Astron. J.* **109**, 16 45 (1995).
23. Макаров и др. (D.I. Makarov, N.A. Zaitseva, and D.V. Bizyaev), *MNRAS* **479**, 3373 (2018).
24. Миске и др. (S. Mieske, M. Hilker, and L. Infante), *Astron. Astrophys.* **403**, 43 (2003).
25. Михос и др. (J.C. Mihos, P. Harding, C.S. Rudick, and J. Feldmeier), *Astrophys. J. Lett.* **764**, L20 (2013).
26. Моначеси и др. (A. Monachesi, E.F. Bell, D.J. Radburn-Smith, M. Vlahic, J.S. de Jong, J. Bailin, J.J. Dalcanton, B.W. Holwerda, and D. Streich), *Astrophys. J.* **766**, 106 (2013).
27. Осман и др. (A.M.I. Osman, M.S. Ella, and I.A. Issa), *Astron. Nach.* **303**, 329 (1982).
28. Патюрель, Терикорпи (G. Paturel and P. Teerikorpi), *Astron. Astrophys.* **452**, 423 (2006).
29. Рехкуба и др. (M. Rejkuba, W.E. Harris, L. Greggio, G.L.H. Harris, H. Jerjen, and O.A. Gonzalez), *Astrophys. J. Lett.* **791**, L2 (2014).
30. Рисс и др. (A.G. Riess, L.M. Macri, S.L. Hoffmann, D. Scolnic, S. Casertano, A.V. Filippenko, B.E. Tucker, M.J. Reid, D.O. Jones, et al.), *Astrophys. J.* **826**, 56 (2016).
31. Рудик и др. (C.S. Rudick, J.C. Mihos, and C. McBride), *Astrophys. J.*, **648**, 936 (2006).
32. Сабби и др. (E. Sabbi, D. Calzetti, L. Ubeda, A. Adamo, M. Cignoni, D. Thilker, A. Aloisi, B.G. Elmegreen, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235**, 23 (2018).
33. Сорке и др. (J.G. Sorce, R.B. Tully, H.M. Courtois, T.H. Jarrett, J.D. Neill, and E.J. Shaya), *MNRAS* **444**, 527 (2014).
34. Сер и др. (A. Seth, J. Dalcanton, and R. de Jong), *Astron. J.* **129**, 1331 (2005).
35. Спрингоб и др. (C.M. Springob, K.L. Masters, M.P. Haynes, R. Giovanelli, and Ch. Marinoni), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **182**, 474 (2009).
36. Стетсон (P.B. Stetson), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **99**, 191 (1987).
37. Стетсон (P.B. Stetson), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 250 (1994).

38. Талли и др. (R.B. Tully, L. Rizzi, E.J. Shaya, H.M. Courtois, D.I. Makarov, and B.A. Jacobs), *Astron. J.* **138**, 323 (2009).
39. Талли и др. (R.B. Tully, H. Courtois, A.E. Dolphin, J.R. Fisher, Ph. Heraudeau, B.A. Jacobs, I.D. Karachentsev, D. Makarov, et al.), *Astron. J.* **146**, 86 (2013).
40. Теуреу и др. (G. Theureau, M.O. Hanski, N. Coudrean, N. Hallet, and J.-M. Martin), *Astron. Astrophys.* **465**, 71 (2007).
41. Тихонов (N.A. Tikhonov), *Astron. Rep.* **49**, 501 (2005).
42. Тихонов (N.A. Tikhonov), *Astron. Rep.* **50**, 517 (2006).
43. Тихонов и др. (N.A. Tikhonov, O.A. Galazutdinova, and I.O. Drozdovsky), *Astron. Astrophys.* **431**, 127 (2005).
44. Тихонов и др. (N.A. Tikhonov, O.A. Galazutdinova, and G.M. Karataeva), *Astrophys. Bull.* **74**, 257 (2019).
45. Тихонов, Галазутдинова (N.A. Tikhonov and O.A. Galazutdinova), *Astrophys. Bull.* **75**, 384 (2020).
46. Фолателли и др. (G. Folatelli, N. Morrell, M. Phillips, E. Hsiao, A. Campillay, C. Contreras, S. Castellon, M. Hamuy, et al.), *Astrophys. J.* **773**, 53 (2013).
47. Харрис и др. (W.E. Harris, G.L.H. Harris, A.C. Layden, and P.B. Stetson), *Astron. J.* **134**, 43 (2007).
48. Хатт и др. (D. Hatt, W.L. Freedman, B.F. Madore, I.S. Jang, R.L. Beaton, T.J. Hoyt, M.G. Lee, A.J. Monson, et al.), *Astrophys. J.* **866**, 145 (2018).
49. Холмберг (E. Holmberg), *AnLun.* **6**, 1 (1937).
50. Шлафли, Финкбайнер (E.F. Schlafly and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
51. Экхольм и др. (T. Ekholm, P. Lanoix, P. Teerikorpi, P. Fouque, and G. Paturel), *Astron. Astrophys.* **355**, 835 (2000).
52. Якобс и др. (B. Jacobs, L. Rizzi, B. Tully, E.J. Shaya, D.I. Makarov, and L. Makarova), *Astron. J.* **138**, 332 (2009).
53. Янг, Ли (I.S. Jang and M.G. Lee), *Astrophys. J.* **835**, 28 (2017).
54. Янг и др. (I.S. Jang, D. Hatt, R.L. Beaton, M.G. Lee, W.L. Freedman, B.F. Madore, T.J. Hoyt, A.J. Monson, et al.), *Astrophys. J.* **852**, 60 (2018).