

УДК 524.7

Т. Н. Якобчук, Ю. И. Изотов

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

Галактика I Zw 18: определение возраста и расстояния по наблюдениям на Космическом телескопе Хаббла

Представлены результаты фотометрического анализа звездного населения голубой компактной карликовой (BCD) галактики I Zw 18 по данным наблюдений 2003 г. на Космическом телескопе Хаббла. Полученные с помощью пакета DOLPHOT диаграммы цвет-звездная величина (CMD) достигают 29^m в V- и I-полосах. В гало I Zw 18 не было обнаружено доминирующего населения звезд ветви красных гигантов (RGB), из чего сделан вывод, что все звезды в I Zw 18 имеют сравнительно небольшой возраст и еще не успели распространиться по большому объему. Тем самым I Zw 18 является пока единственной известной галактикой, у которой нельзя выделить гало старых звезд. Исследования функций светимости звезд показали, что точка обрыва ветви вероятных красных гигантов (TRGB) имеет различное положение на CMD для главного тела I Zw 18 ($I_{\text{TRGB}} = 27.2^m$) и для С-компонента ($I_{\text{TRGB}} = 26.5^m$). Для разрешения этого противоречия на основе теоретических зависимостей $M_{I,\text{TRGB}}$ от возраста и показателя цвета TRGB выдвинута гипотеза, что в I Zw 18 только началось формирование RGB, и красные гиганты имеют различный возраст в главном теле и С-компоненте. Таким образом было найдено, что модуль расстояния для I Zw 18 равен $m - M = 30.2 - 30.7^m$, что соответствует расстоянию $D \approx 11 - 14$ Мпк, при этом возраст наиболее старых звезд в главном теле составляет около 1.2 млрд лет, а в С-компоненте, по-видимому, 1.5—2 млрд лет. Получены также CMD BCD-галактик NGC 2366, NGC 4068, UGC 6456 и SBS 1415+437 и найдены светимости их ярчайших голубых (BL) и красных (RSG) сверхгигантов, а также асимптотической ветви гигантов (AGB), что дало возможность провести независимую проверку оценок расстояния до I Zw 18 по TRGB. По BL-звездам расстояние до I Zw 18 равно 11—12.6 Мпк, а по RSG — 12.6—14.5 Мпк. AGB-звезды I Zw 18 дают более противоречивый результат ($D = 13.2 - 16.6$ Мпк).

ГАЛАКТИКА I ZW 18: ВИЗНАЧЕННЯ ВІКУ ТА ВІДСТАНІ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ НА КОСМІЧНОМУ ТЕЛЕСКОПІ ГАББЛА, Якобчук Т. М., Изотов Ю. І. — Представлено результати фотометричного аналізу зоряного населення блакитної компактної карликової (BCD) га-

лактики I Zw 18 за даними спостережень 2003 р. на Космічному телескопі Габбла. Отримані за допомогою пакету DOLPHOT діаграми колір — зоряна величина (CMD) досягають 29^m у V- та I-смугах. У гало I Zw 18 не було виявлено домінуючого населення зірок вітки червоних гігантів (RGB), з чого зроблено висновок, що всі зорі I Zw 18 мають порівняно невеликий вік і ще не встигли поширитись по великому об'єму. Тим самим I Zw 18 поки єдина відома галактика, в якій не можна виділити гало старих зір. Дослідження функцій світності зір показали, що точка обриву вітки ймовірних червоних гігантів (TRGB) має різне положення на CMD для головного тіла I Zw 18 ($I_{\text{TRGB}} = 27.2^m$) і для C-компонента ($I_{\text{TRGB}} = 26.5^m$). Для вирішення цього протиріччя на основі теоретичних залежностей $M_{I,\text{TRGB}}$ від віку та показника кольору TRGB було висунуто гіпотезу, що в I Zw 18 тільки почалось формування RGB, і червоні гіганти мають різний вік у головному тілі і C-компоненті. Таким чином було знайдено, що модуль відстані для I Zw 18 дорівнює $m - M = 30.2\text{—}30.7^m$, що відповідає відстані $D \approx 11\text{—}14$ Мпк, при цьому вік найстаріших зір у головному тілі складає близько 1.2 млрд років, а в C-компоненті, скоріше всього, у районі 1.5—2 млрд років. Отримано також CMD BCD-галактик NGC 2366, NGC 4068, UGC 6456 і SBS 1415+437 та знайдено світності їхніх найяскравіших блакитних (BL) і червоних (RSG) надгігантів, а також асимптотичної вітки гігантів (AGB), що дало змогу провести незалежну перевірку оцінок відстані до I Zw 18 по TRGB. За BL-зорями відстань до I Zw 18 дорівнює 11—12.6 Мпк, а за RSG — 12.6—14.5 Мпк. AGB-зорі I Zw 18 дають більш суперечливий результат ($D = 13.2\text{—}16.6$ Мпк).

GALAXY I Zw 18: DETERMINATION OF AGE AND DISTANCE FROM OBSERVATIONS WITH THE HUBBLE SPACE TELESCOPE, by Yakobchuk T. M., Izotov Y. I. — We present a photometric study of stellar populations in the blue compact dwarf (BCD) galaxy I Zw 18 from the Hubble Space Telescope observations in 2003. The resulting color-magnitude diagrams (CMD), obtained with the DOLPHOT package, reach ≈ 29 mag in V and I. No dominant population of red giant branch (RGB) stars was revealed in the halo of I Zw 18, implying that all stars in I Zw 18 are quite young and have not scattered yet in the large volume. Thus I Zw 18 appears to be the only galaxy, where the halo of old stars is not detected. The derived stellar luminosity functions show that the tip of the possible red giant branch (TRGB) stars has a different location on the CMDs for the main body of I Zw 18 ($I_{\text{TRGB}} = 27.2$ mag) and the C component ($I_{\text{TRGB}} = 26.5$ mag). Using the theoretical dependences of $M_{I,\text{TRGB}}$ on the age and color of the TRGB, we resolve this contradiction, proposing the hypothesis that the formation of RGB stars in I Zw 18 is recently started and red giants have different ages in the main body and the C component. We found the distance modulus for I Zw 18 to be $(m - M) = 30.2\text{—}30.7$ mag, corresponding to the distance $D \approx 11\text{—}14$ Mpc. We estimate the age of oldest stars in the main body to be ~ 1.2 Gyr, while in the C component their age ranges from 1.5 Gyr to 2 Gyr. Besides, we derived the CMDs of the BCD galaxies NGC 2366, NGC 4068, UGC 6456 and SBS 1415+437, as well as found the luminosities of their brightest blue (BL) and red (RSG) supergiants, and asymptotic red giants (AGB), which allows us to perform an independent check of the distance to I Zw 18 derived from the TRGB. It is found that the distance to I Zw 18 derived from the brightness of BL stars and RSG stars is 11—12.6 Mpc and 12.6—14.5 Mpc, respectively. On the other hand, the distance determined from the brightness of AGB stars is more uncertain and larger, $D = 13.2\text{—}16.6$ Mpc.

ВВЕДЕНИЕ

Голубая компактная карликовая галактика I Zw 18 была открыта Цвикки в 1966 г. [35]. Первоначально считалось, что она состоит из двух отдельных галактик с расстоянием между центрами $5.8''$, соединенных между собой яркой перемычкой. Позже было показано, что эти «галактики» являются областями активного звездообразования (SE- и NW-компоненты). Дэвидсон и Дуфор [5, 10] дополнили главное тело I Zw 18 рядом других компонентов, но физическая связь была доказана только для С-компонента (по измерениям лучевых скоростей с использованием линий нейтрального водорода [34] и эмиссионных линий ионизированного газа [8, 14, 27, 34]).

В 1972 г. Саргент и Сирл [31] провели спектральные наблюдения I Zw 18 и обнаружили, что она обладает крайне низким содержанием элементов тяжелее гелия. Принимая во внимание также очень голубой цвет галактики, они заключили, что современный темп звездообразования в I Zw 18 значительно превышает средний темп в прошлом. Были выдвинуты две гипотезы: либо I Zw 18 является молодой галактикой, либо звездообразование в ней имело место и в прошлом, но происходило в коротких вспышках, разделенных длительными спокойными периодами. Дальнейшие спектральные исследования подтвердили очень низкую металличность I Zw 18 с содержанием кислорода всего $1/50$ солнечного значения [11, 14, 15, 18, 21, 26, 31, 33].

Наблюдения Хантер и Тронсона [13] на Космическом телескопе Хаббла впервые дали возможность разрешить главное тело I Zw 18 на отдельные звезды. Их фотометрия показала наличие множества молодых массивных звезд главной последовательности (MS), а также голубых (BL) и красных (RSG) сверхгигантов, сконцентрированных в основном вокруг SE- и NW-областей, без признаков звездного населения старше нескольких десятков миллионов лет. Позже в работе [9] по новым данным был сделан вывод, что активное звездообразование в I Zw 18 началось 30—50 млн лет назад и продолжается до сих пор. В то же время в разрешенном на звезды С-компоненте было обнаружено более старое население красных звезд с возрастом 100—300 млн лет.

Алоизи с сотрудниками [1], используя метод синтетических диаграмм цвет—звездная величина (CMD), заключили, что образование звезд в I Zw 18 происходило на протяжении последних 0.5—1 млрд лет и достигло особо высокой активности в последние 15—20 млн лет. Возраст С-компонента они оценили равным 0.2 млрд лет. Остлин [25] по наблюдениям в ближнем ИК-диапазоне, приняв расстояние до I Zw 18 равным 12.6 Мпк, сделал вывод о существовании двух населений в галактике: красных гигантов с возрастом 10—20 млн лет и значительно более старых (0.1—5 млрд лет) асимптотических гигантов.

В работе Изотова и Туана [17], которая базируется на оптических наблюдениях I Zw 18 на новой камере HST/ACS, подтверждается наличие в галактике звездных населений разного возраста: начиная от голубых MS-звезд (возраст ≤ 30 млн лет) и заканчивая звездами асимптотической ветви гигантов (AGB) (~ 100 —500 млн лет). Сравнивая яркость AGB-звезд в I Zw 18 и BCD галактике UGC 4483, авторы определили расстояние до I Zw 18 равным $D = 12.6 \dots 15$ Мпк, с предпочтением в сторону больших значений. Важно, что, несмотря на глубину полученных снимков, на новых CMD не было выявлено развитой ветви красных гигантов (RGB), поэтому сделан вывод, что I Zw 18 является действительно молодой галактикой с возрастом не больше 500 млн лет. Тем не менее, Момани и др. [24] по результатам повторного анализа этих же данных, но с более глубокими

CMD, все же не исключают возможности наличия в галактике старых RGB-звезд.

Как правило, возраст отдельных звезд в галактиках определяется с помощью теоретических изохрон [9, 1, 25]. На результат такой процедуры сильно влияет точность определения расстояния и металличности, качество принятых моделей звезд, а также ошибки фотометрии. Так, известно, что модели RGB дают систематические отклонения показателей цвета от наблюдаемых показателей для RGB шаровых скоплений Галактики. В свою очередь неопределенность значения металличности порождает т. н. проблему вырождения «возраст — металличность», когда один и тот же цвет RGB можно получить как за счет меньшего возраста и большей металличности, так и наоборот. Наиболее распространенным стал метод определения расстояний до галактик по точке обрыва RGB (TRGB), который основан на том факте, что абсолютная звездная величина TRGB практически не зависит от возраста и металличности RGB после 2 млрд лет и равна $M_{\text{TRGB}} \approx -4.0^m$ [20, 23]. Важно, что обнаружение TRGB в случае I Zw 18, кроме расстояния, может наложить четкие ограничения и на минимальный возраст галактики.

Используя данные наблюдений HST/ACS в 2003 г. и новый программный пакет для фотометрии DOLPHOT (модифицированная версия HSTphot [6]), мы получили диаграммы цвет — звездная величина, которые почти на 1^m глубже, чем в работе [17]. Кроме того, мы уделили особое внимание учету ошибок наблюдений, поиску RGB-звезд, их распределению по объему, а также оценке возраста и расстояния до галактики.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Изображения I Zw 18 были получены с 26 мая по 6 июня 2003 г. на камере ACS, установленной на Космическом телескопе Хаббла (рис. 1). Всего получено 50 изображений в фильтрах F555W и F814W (полосы V и I в системе Джонсона-Коузинс). Для удаления из изображений следов космических частиц на каждой орбите получены две экспозиции в одном из фильтров. Полное время экспозиции составило 43520 с (V) и 24300 с (I). Галактика наблюдалась на ПЗС-чипе WFC1 с полем зрения 200×100" (0.05"/пкл), ориентация которого не изменялась в течение наблюдений. Наряду с I Zw 18, в нашей работе мы используем данные для карликовых галактик SBS 1415+437, NGC 2366, NGC 4068 и UGC 6456, которые также наблюдались на HST (см. табл. 1) и сравниваем их с данными для I Zw 18.

Все необходимые изображения были получены из архива Космического телескопа Хаббла после автоматической стандартной обработки OTFR с использованием последних на момент запроса калибровочных файлов. Для фотометрических измерений использовались пакеты HSTphot и DOLPHOT, которые были написаны Дольфином [6] специально для обработки данных, полученных на камерах WFPC2 и ACS. На предварительном этапе для

Таблица 1. Детали наблюдений

Галактика	Инструмент	V, с	I, с	Номер заявки	Автор заявки
I Zw 18	HST/ACS	43520	24300	9400	T. Thuan
SBS 1415+437	HST/ACS	20160	20160	9361	A. Aloisi
NGC 4068	HST/ACS	1200	900	9771	I. Karachentsev
NGC 2366	HST/WFPC2	6700	4100	8769	T. Thuan
UGC 6456	HST/WFPC2	4200	4200	6276	J. Westphal

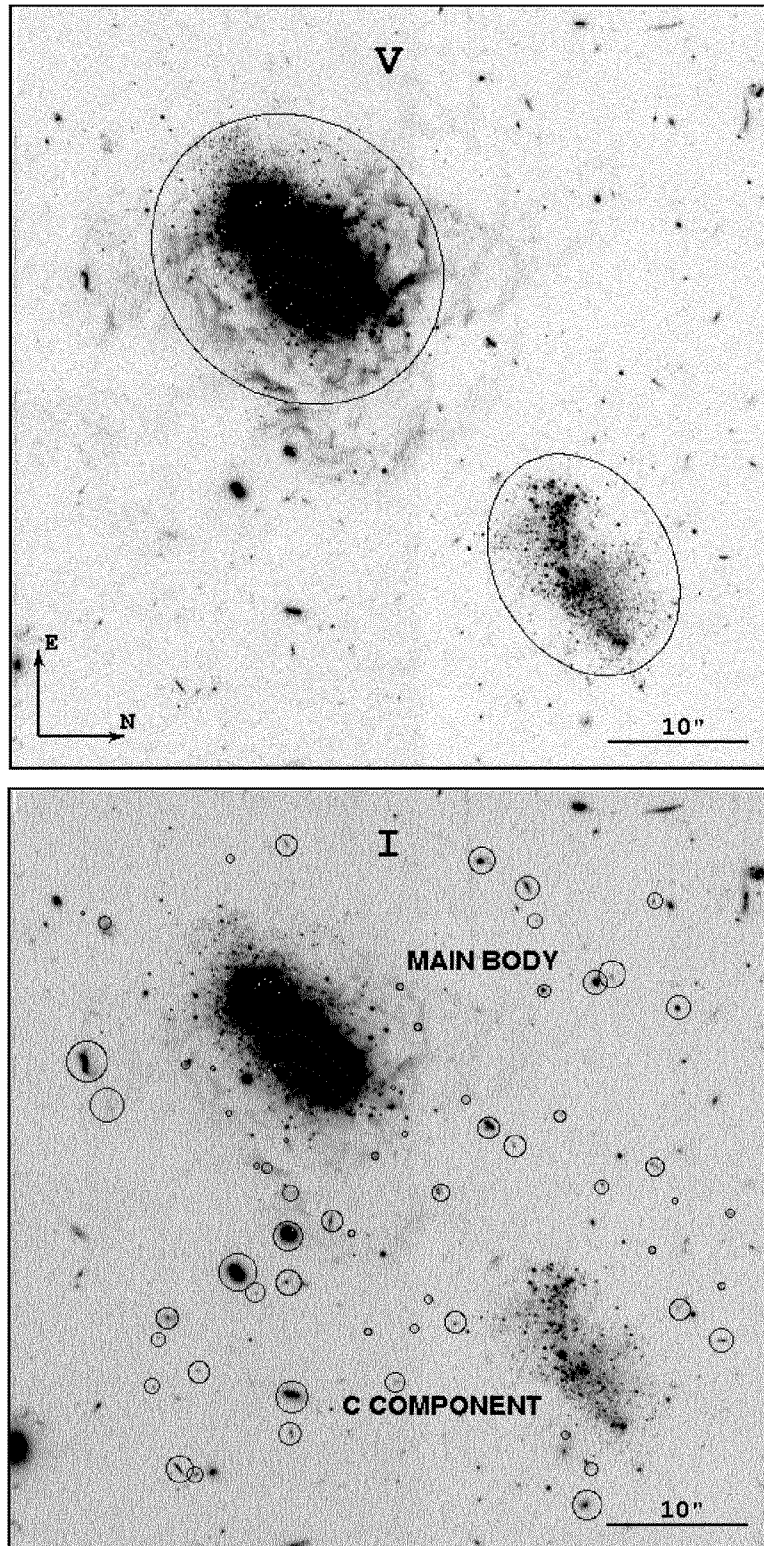


Рис. 1. Изображения I Zw 18, полученные на HST с камерой ACS/WFC в фильтрах V и I. Вверху эллипсами обозначены внутренние границы гало главного тела и С-компонента. Внизу кружками отмечены фоновые объекты, которые были удалены из нашего анализа вручную

каждого изображения исключались дефектные пиксели матрицы, удалялись космические частицы и создавалось изображение фона. В случае использования техники «dithering» определялись приблизительные смещения, которые необходимо задавать для совмещения изображения.

Для определения звездных величин в HSTphot и DOLPHOT используются функции рассеяния точки, смоделированные пакетом Tiny Tim [19]. В рамках пакетов HSTphot/DOLPHOT изображения в разных фильтрах обрабатываются одновременно с учетом смещений и поворотов между ними. Кроме того, процедура фотометрии включает в себя апертурные коррекции и поправку на эффективность передачи зарядов в ПЗС-матрицах. Окончательный список содержит координаты, звездные величины зарегистрированных объектов в инструментальной и стандартной фотометрических системах, а также ошибки их измерений.

Значения большинства параметров фотометрии были взяты по умолчанию из описания HSTphot и DOLPHOT. Рабочий порог регистрации был равен отношению сигнал/шум $S/N = 5$ для ACS-данных и $S/N = 3$ для WFPC2-изображений. Все полученные звездные величины были исправлены за поглощение света Галактикой, значения которого были взяты из базы данных NED [28].

ДИАГРАММЫ ПОКАЗАТЕЛЬ ЦВЕТА— ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА I ZW 18

На рис. 2 представлены диаграммы показатель цвета — звездная величина I Zw 18 для звезд главного тела и С-компонента, которые были получены одновременно в фильтрах V и I . На обеих диаграммах хорошо выделяется главная последовательность ($V - I \approx 0^m$, $23 < I < 29$), состоящая из молодых звезд, а также асимптотическая ветвь гигантов (AGB) ($0.6 < V - I < 2.0$). Как видно, в случае С-компонента главная последовательность доходит только до $I \approx 24^m$ (единственная точка с координатами $I = 22.2^m$, $V - I = 0.2^m$ является на самом деле звездным скоплением [9]), что указывает на низкую активность звездообразования в последние 10 млн лет, как уже отмечалось ранее [1, 9, 17]. Наличие AGB-звезд на обеих диаграммах указывает по крайней мере еще на один эпизод звездообразования в прошлом (несколько сотен миллионов лет тому назад). Правее главной последовательности располагаются бедные последовательности голубых (BL)

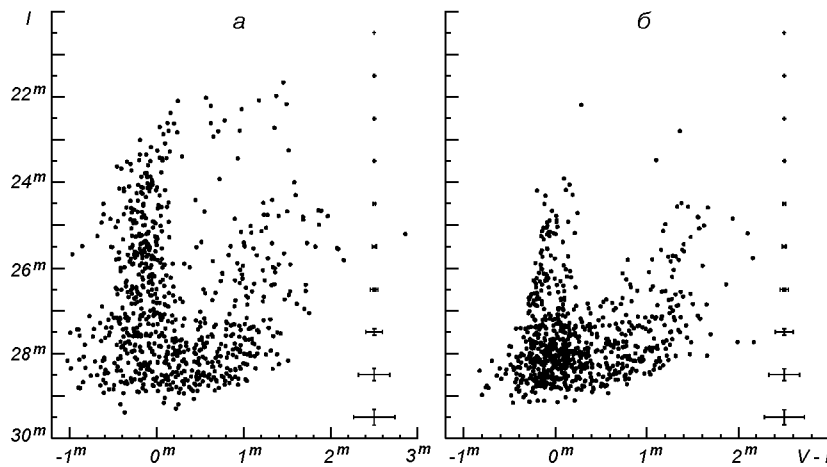


Рис. 2. Диаграммы цвет—звездная величина 787 звезд I Zw 18 для главного тела (а) и 812 звезд С-компонента (б). Показаны средние ошибки звездной величины I и показателя цвета $V - I$

($V - I \geq 0^m$) и красных (RSG) ($V - I > 0.8^m$, $I < 24^m$) сверхгигантов. Их относительная немногочисленность возможно объясняется эпизодическим характером звездообразования в I Zw 18 и отсутствием активного звездообразования 10—100 млн лет тому назад.

Основной же интерес для нас представляют звезды в нижней правой части диаграмм ($I < 26.5^m$, $0.8 < V - I < 1.5$), где должны находиться RGB-звезды. Но прежде необходимо сделать отдельное замечание относительно происхождения крайних точек слева ($V - I < -0.5^m$) и справа ($V - I > 1.2^m$) слабее $I \approx 27^m$. Мы считаем, что ввиду их слабости эти точки являются скорее всего ложными объектами, реальными звездами с большими ошибками или, в случае «голубых» точек, компактными сгущениями ионизированного газа. Кроме того, их большие показатели цвета можно объяснить более сильным внутренним поглощением света в их направлении, которое может достигать $A_V = 0.5^m$ [3]. Как бы там ни было, анализируя диаграммы для главного тела I Zw 18 и С-компонента, нельзя не отметить их явное отличие от диаграмм, которые были получены для других известных карликовых галактик, в которых было обнаружено RGB-население. И хотя наши данные на 1^m глубже, чем в работе [17], на обеих диаграммах плотность точек в красной части по-прежнему очень невелика, и их количество заметно больше в голубой части. Кроме того, не наблюдается четкого разделения между AGB- и RGB-населением, хотя при наличии развитой ветви красных гигантов количество RGB-звезд должно значительно превышать количество AGB-звезд.

ЗВЕЗДНОЕ НАСЕЛЕНИЕ ГАЛО I ZW 18

Во всех известных галактиках наблюдается четкая сегрегация молодых и старых звездных населений, так что RGB-звезды, как правило, занимают гораздо больший объем, чем, например, MS или AGB, которые концентрируются ближе к областям звездообразования [7, 29, 30]. Учитывая этот факт, мы провели пространственную селекцию в I Zw 18 и построили CMD для звезд, которые не попадают в области внутри эллипсов на рис. 1, *a*. Результат этой процедуры представлен на рис. 3, *a*. Как видно, основная часть MS- и AGB-звезд после селекции отсеивается, однако при этом на диаграмме не намечается никакой RGB: и голубые, и красные точки

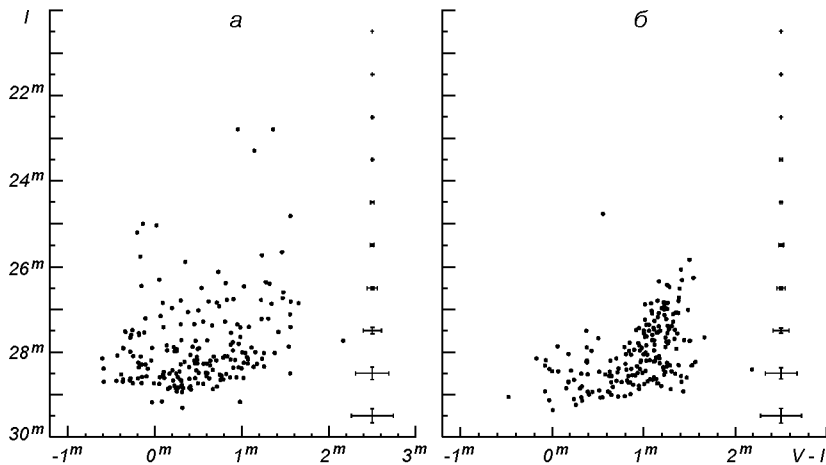


Рис. 3. Диаграммы цвет—звездная величина, полученные: *a* — для 200 звезд гало I Zw 18, *б* — для 198 звезд гало SBS 1415+437. Число точек на диаграмме для SBS 1415+437 подогнано под статистику I Zw 18 методом Монте-Карло

распределены почти равномерно в нижней части CMD. Скопление звезд слабее $I = 28^m$ представляет собой скорее всего ложные объекты, а если и принять его за RGB, то при $I_{\text{TRGB}} = 28^m$ мы получим расстояние до I Zw 18 $D \approx 25$ Мпк, что представляется маловероятным.

Мы провели также исследование звездного состава гало другой VCD-галактики SBS 1415+437, которая хорошо подходит для сравнения с I Zw 18, так как она обладает низкой металличностью ($Z = Z_{\odot}/21$ [15]) и находится на большом расстоянии ($D = 13.6$ Мпк [2]). Она, как и I Zw 18, также наблюдалась на камере HST/ACS (рис. 4). На диаграмме CMD для SBS 1415+437 значительно больше точек (рис. 5), и на ней хорошо видна богатая RGB с точкой обрыва около $I_{\text{TRGB}} = 26.5^m$. Результат пространственной

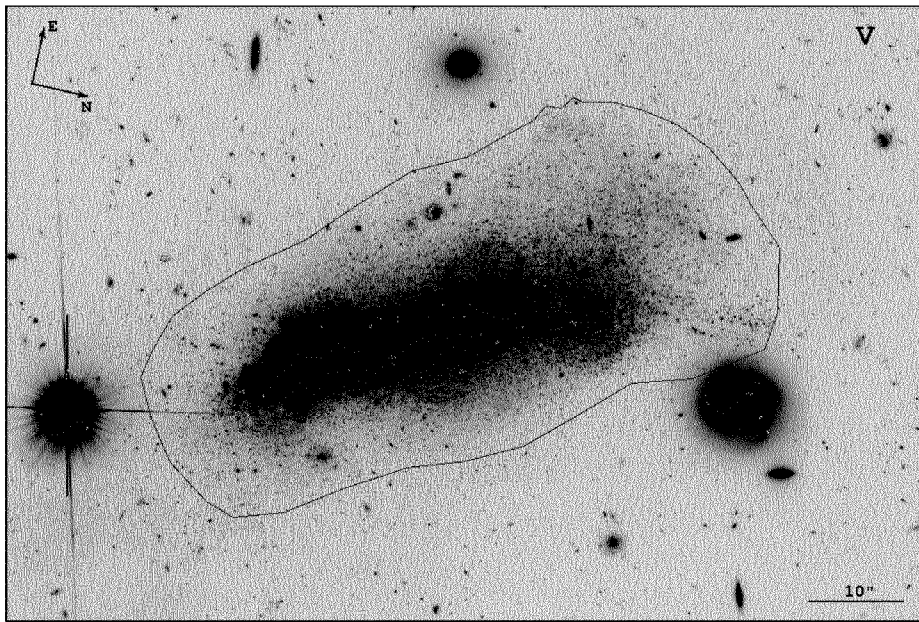


Рис. 4. Изображение VCD-галактики SBS 1415+437, полученное на камере HST/ACS в V-фильтре. Внутренняя граница гало отмечена сплошной линией

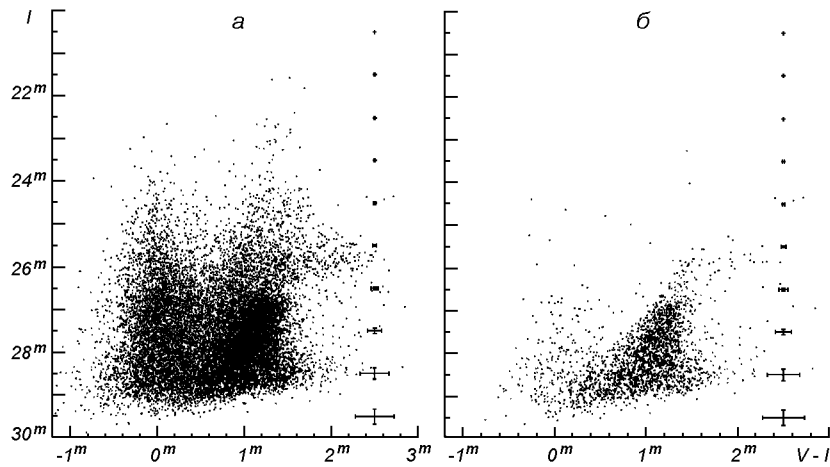


Рис. 5. Диаграммы цвет—звездная величина для всех 15468 звезд SBS 1415+437 (а) и всех 2393 звезд гало (б)

селекции (рис. 5, б) в данном случае прекрасно демонстрирует доминирование старого RGB-населения на периферии галактики. Даже если искусственно уравнивать количество звезд на этой CMD и на диаграмме для I Zw 18 (рис. 3, б), плотность точек в красной области остается заметно больше, чем в голубой, причем сохраняется даже положение TRGB. Отсутствие заметного RGB-населения в гало I Zw 18 указывает на то, что все звезды в этой галактике имеют относительно небольшой возраст и в процессе релаксации еще не успели переместиться на большие расстояния [17].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО I ZW 18

Измерение TRGB. Определение расстояния до галактик с помощью метода TRGB основывается на предположении, что звезды, которые населяют RGB, достаточно стары — не моложе 2 млрд лет, так как в этом случае абсолютная звездная величина TRGB в полосе I очень мало зависит от возраста и металличности и составляет $M_{I,TRGB} \approx -4.0^m$. Хотя такое условие выполняется почти для всех известных галактик, в которых были зарегистрированы RGB-звезды, возраст I Zw 18 неоднократно оценивался равным 0.1—1 млрд лет [1, 9, 17], поэтому для нее обычный TRGB-метод может быть неприменим.

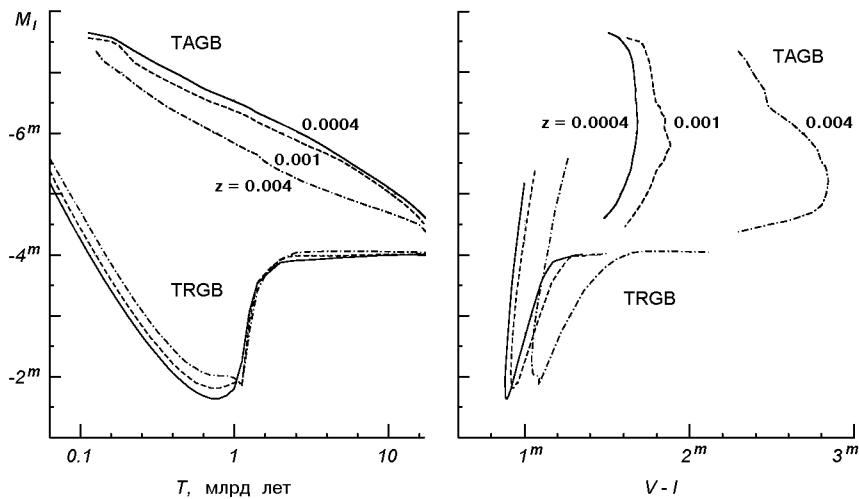


Рис. 6. Теоретические зависимости абсолютных звездных величин M_I TRGB и TAGB от возраста в годах (а) и показатель цвета (б) для трех металличностей $Z = 0.0004, 0.001$ и 0.004 по данным [12]

На рис. 6 показаны теоретические зависимости абсолютной звездной величины TRGB (и TAGB) от возраста и цвета по данным библиотеки звездных изохрон Жирарди и др. [12]. Видно, что кривые для TRGB после 2 млрд лет ($\lg(t) > 9.3$) почти параллельны временной оси со значением $M_I \approx -4.0^m$. С другой стороны, при уменьшении возраста наблюдается резкое уменьшение звездной величины и показателя цвета TRGB.

На рис. 7 показаны CMD для главного тела и С-компонента I Zw 18, где большими точками отмечены участки, которые использовались для построения функций светимости RGB- и AGB-звезд и определения TRGB. Эти участки выбраны довольно субъективно, с таким расчетом, чтобы

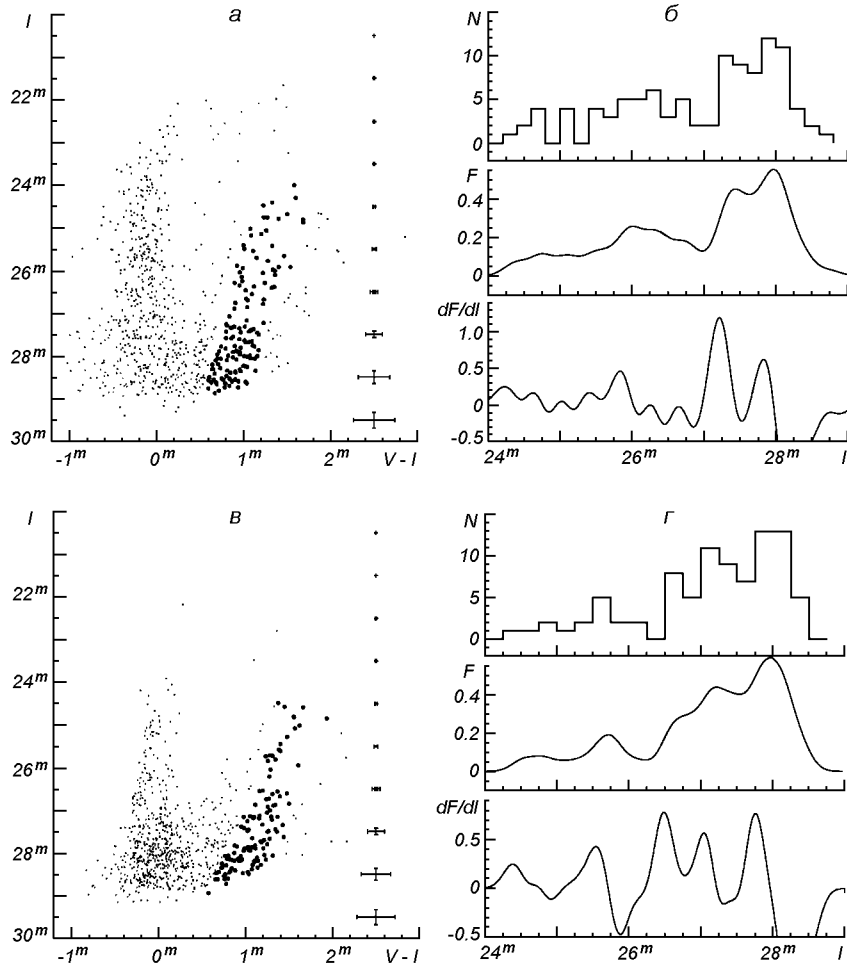


Рис. 7. Определение положения TRGB на CMD (слева) и функции светимости (справа) для главного тела (а, б) и для С-компонента I Zw 18 (в, з). При построении функций светимости использовались только звезды, обозначенные большими точками на CMD

набрать побольше вероятных RGB звезд и при этом исключить RSG- и MS-звезды, лежащие левее, а также очень «красные» точки с большими ошибками. Ввиду малого объема выборки другой выбор точек может значительно повлиять на результат. Для построения функций светимости мы применили т. н. метод ядерной оценки плотности [32]. Этот метод позволяет строить гладкие кривые распределения и лучше отражает мелкие вариации плотности, чем хорошо известный метод гистограмм, где при малом числе точек результат сильно зависит от выбора единичного интервала. Суть метода состоит в том, что каждое дискретное значение звездной величины m_i заменяется некоторой функцией ядра $K(m, m_i, h)$, где m — переменная, а h — масштабный параметр. Значение плотности в заданном положении m определяется как сумма K по всем значениям m_i . Для ядерной функции в виде гауссианы эта сумма запишется в виде

$$F(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} hn} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(m - m_i)^2}{2h^2}\right],$$

где n — количество звезд в выборке, m_i — звездная величина i -й звезды. Другое преимущество метода состоит в том, что он позволяет взять аналитическую производную от функции светимости по переменной m , максимумы и минимумы которой позволяют определить резкие изменения плотности. После ряда тестов мы выбрали масштабный параметр равным $h = 0.15$, так как он дает для нашей выборки оптимальную функцию светимости, не слишком смазанную и не слишком детальную.

На рис. 7 показаны также функции светимости, полученные для главного тела и С-компонента I Zw 18. Максимумы производных функций светимости принимались за начало RGB. Найдено, что для главного тела $I_{\text{TRGB}} = 27.2^m$, а для С-компонента $I_{\text{TRGB}} = 26.5^m$. Очевидно, это невозможно, если $M_{I,\text{TRGB}} \approx -4.0^m$, потому что эти компоненты находятся на одном расстоянии. Такое расхождение положений TRGB для главного тела и С-компонента в I Zw 18 нельзя объяснить и внутренним поглощением, поскольку оно недостаточно велико и, тем более, должно быть больше в главном теле. Однако это исключается, так как TRGB в главном теле имеет меньший показатель цвета, чем в С-компоненте. Полученное противоречие можно разрешить, если предположить, что в I Zw 18 мы наблюдаем еще несформировавшиеся RGB. Тогда разница положений TRGB в 0.7^m объясняется разным возрастом красных гигантов в главном теле и С-компоненте.

Используя цветовые характеристики найденных TRGB и теоретические кривые на рис. 6, мы можем определить абсолютную величину TRGB для главного тела и С-компонента. Ранее [4, 22, 16, 17] уже было показано, что теоретические изохроны с возрастом 15 млрд лет имеют систематический сдвиг в голубую сторону относительно RGB шаровых скоплений с той же металличностью. Из рис. 8 видно, что это расхождение зависит от металличности, и для I Zw 18 при доле тяжелых элементов по массе $Z = 0.0004$ разница $V - I$ составляет около $0.15-0.2^m$. Есть основания полагать, что с уменьшением возраста эта величина может уменьшаться, так как молодые изохроны лучше описывают наблюдения. Учитывая это, из рис. 6 для С-компонента при цвете $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1.35^m$ мы получаем $M_{I,\text{TRGB}}$ в интервале от -3.8 до -4.0^m . Для главного тела I Zw 18 при $(V - I)_{\text{TRGB}} = 1.05^m$ мы попадаем в область резкого падения кривой, поэтому абсолютная величина TRGB определяется хуже и будет в районе $M_{I,\text{TRGB}} = -3.5...-3.0^m$. Полученные значения $M_{I,\text{TRGB}}$ дают в результате модуль расстояния $m - M = 30.2...30.7^m$, так что расстояние до I Zw 18 равно $D \approx 11...14$ Мпк. Кроме того, используя эти данные, можно оценить и максимальный возраст компонентов I Zw 18. Из кривой на рис. 6, а возраст лучше определяется для главного тела I Zw 18, так как на участке $M_{I,\text{TRGB}} =$

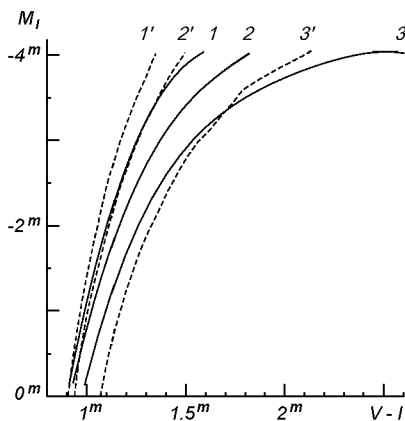


Рис. 8. Сравнение наблюдаемых RGB шаровых скоплений: 1 — M2 ($Z = 0.0005$), 2 — NGC 1851 ($Z = 0.001$), 3 — 47 Tuc ($Z = 0.004$); 1'—3' — теоретические изохроны с возрастом 15 млрд лет и металличностью $Z = 0.0004, 0.001, 0.004$ соответственно

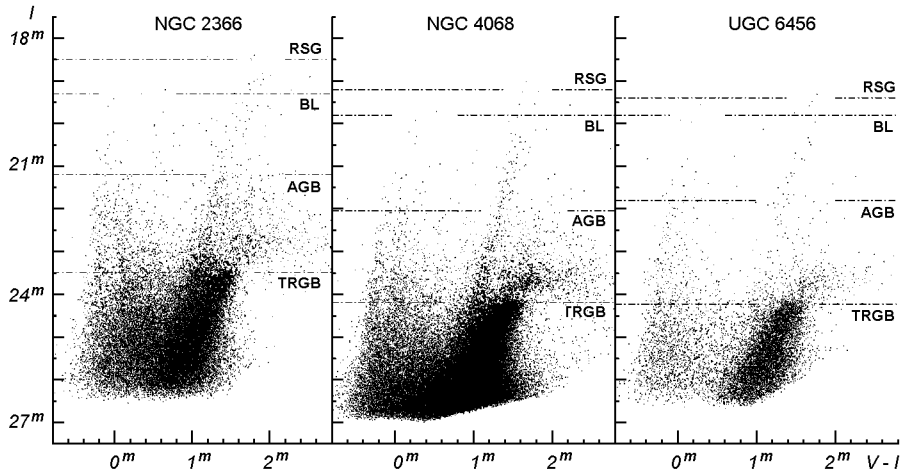


Рис. 9. Диаграммы цвет—звездная величина для звезд карликовых галактик NGC 2366, NGC 4068 и UGC 6456. Горизонтальными линиями показаны видимые звездные величины ярчайших звезд различных типов

Таблица 2. Видимые и абсолютные звездные величины TRGB, ярчайших BL-, RSG- и AGB-звезд

Галактика	I_{TRGB}	$M_{I,\text{TRGB}}$	I_{BL}	$M_{I,\text{BL}}$	I_{RSG}	$M_{I,\text{RSG}}$	I_{AGB}	$M_{I,\text{AGB}}$
SBS1415+437	26.81	-3.92	22.6	-8.13	21.6	-9.13	24.18	-6.55
NGC 4068	24.19	-3.97	19.8	-8.36	19.2	-8.96	22.04	-6.12
NGC 2366	23.48	-4.00	19.3	-8.18	18.5	-8.98	21.19	-6.29
UGC 6456	24.22	-4.01	19.8	-8.43	19.4	-8.83	21.80	-6.43
I Zw 18			22.1		21.7		24.5	

$= -3.5...-3.0^m$ он мало изменяется и составляет около 1.2 млрд лет. Для С-компонента возраст менее определен, но согласно нашим доводам он должен быть больше, попадая в интервал от 1.5 до 2 млрд лет.

Ярчайшие BL-, RSG- и AGB-звезды. Другая возможность найти расстояние до I Zw 18 и проверить полученные результаты — использовать другие типы звезд с известной светимостью. С этой целью мы отобрали несколько галактик, в которых проходит активное звездообразование и имеются яркие массивные молодые звезды, а также надежно определяется TRGB.

На рис. 9 представлены CMD карликовых галактик NGC 2366, NGC 4068 и UGC 6456, которые, наряду с SBS 1415+437, были использованы для сравнения с I Zw 18. Вначале для каждой галактики мы находили положение TRGB, применяя гладкие функции светимости и их производные. Затем по эмпирическим формулам Да Коста и Армандроффа [4] и Ли и др. [20], куда входит средний показатель цвета на уровне TRGB и на $0.4-0.5^m$ ниже TRGB, находили абсолютную звездную величину TRGB. Определив модуль расстояния, можно легко определить абсолютные величины любых звезд на CMD.

В табл. 2 приведены результаты наших измерений видимых и абсолютных звездных величин TRGB, а также наиболее ярких BL-, RSG- и AGB-звезд в рассмотренных галактиках. Как мы видим, выбранные типы звезд имеют похожую светимость во всех объектах, хотя нужно иметь в

виду, что эти данные базируются на выборках малых объемов, так что нельзя говорить об их высокой точности. Тем не менее, если мы примем, что ярчайшие BL-звезды в I Zw 18 имеют величину $M_{I, BL} = -8.1...-8.4^m$, мы получим модуль расстояния к ней равным $m - M = 30.2...30.5^m$ ($D = 11...12.6$ Мпк). Это отвечает положению TRGB с $M_I = 4.0^m$ вблизи $I = 26.2...26.5^m$, где на CMD I Zw 18 не наблюдается никаких резких изменений плотности точек. Такой результат хорошо согласуется с нашим предположением, что RGB I Zw 18 находится на стадии формирования и еще не достигла $M_I = -4.0^m$. Модуль расстояния для I Zw 18 по RSG-звездам равен $m - M = 30.5...30.8^m$, что соответствует расстоянию $D = 12.6—14.5$ Мпк. Это значение хотя и больше, чем по BL, также входит в ранее найденный по TRGB-методу диапазон $m - M$.

Сложнее найти модуль расстояния по AGB-звездам. Теоретически светимость ярчайших AGB-звезд уменьшается почти линейно с логарифмом возраста (рис. 6). Но на наблюдаемых CMD рассматриваемых галактик, в том числе I Zw 18, можно заметить некоторую «полку», выше которой плотность AGB-звезд заметно уменьшается. Именно по ней мы и определяли абсолютную звездную величину ярчайших AGB-звезд. Конечно, как и в случае BL- и RSG-звезд, выборка здесь невелика, и пока неясно, является ли подмеченная особенность артефактом или альтернативным индикатором расстояния до галактик. Найденная нами светимость ярчайших AGB-звезд колеблется в интервале от $M_I = -6.1$ до -6.6^m , что дает модуль расстояния для I Zw 18 $m - M = 30.6...31.1^m$ ($D = 13.2...16.6$ Мпк) и TRGB с $M_I = -4.0^m$ при $I = 26.6...27.1^m$. Это больше наших предыдущих оценок и выходит за диапазон ожидаемых положений TRGB. Конечно, возможно, что ярчайшие AGB-звезды I Zw 18 слабее, чем у галактик SBS 1415+437 ($M_I = -6.6^m$) или UGC 6456 ($M_I = -6.4^m$), и они имеют $M_I = -6.0...-6.1^m$. В этом случае модуль расстояния, определенный по AGB-звездам, не будет противоречить нашим результатам по TRGB. В противном случае при расстояниях 15—16 Мпк наше предположение о разном возрасте RGB-звезд в главном теле и С-компоненте исключается из-за различия получаемых значений TRGB при $M_I = -4.0^m$ от найденных нами. И тогда нужно искать другие способы, чтобы объяснить столь голубой цвет вероятных RGB-звезд ($V - I \approx 1^m$) и отсутствие однозначно определяемого положения TRGB на CMD для главного тела и С-компонента.

ВЫВОДЫ

На основе архивных данных наблюдений, полученных на камере HST/ACS, был проведен фотометрический анализ звездного населения в голубой компактной карликовой (BCD) галактике I Zw 18. Оценки блеска звезд в полосах V и I , полученные с помощью нового пакета DOLPHOT, позволили нам построить глубокие диаграммы цвет—звездная величина (CMD), достигающие в V и $I \approx 29^m$, что на 1^m слабее, чем в работе Изотова и Туана [17].

Диаграмма цвет — звездная величина для внешних областей I Zw 18 показывает, что эта галактика не имеет протяженного гало из старых звезд ветви красных гигантов (RGB), в отличие от других известных галактик. Этот вывод подтверждается сравнением CMD гало I Zw 18 и другой BCD-галактики SBS 1415+437 — в последней галактике отчетливо видна ветвь красных гигантов и практически отсутствуют более молодые звезды. По-видимому, система I Zw 18 является достаточно молодой и находится на стадии динамической релаксации наиболее старого звездного населения.

Несмотря на небольшую выборку и отсутствие выраженной RGB, мы попытались определить положение точки обрыва ветви красных гигантов (TRGB), которая является индикатором расстояния. Оказалось, что положения TRGB на CMD различны для главного тела I Zw 18 ($I_{\text{TRGB}} = 27.2^m$) и С-компонента ($I_{\text{TRGB}} = 26.5^m$). Для объяснения этого противоречия была выдвинута гипотеза, что I Zw 18 представляет собой уникальный объект, где происходит формирование RGB, причем красные гиганты в главном теле и С-компоненте имеют различный возраст. Используя теоретические зависимости абсолютной звездной величины $M_{I,\text{TRGB}}$ от показателя цвета TRGB, мы нашли, что в главном теле I Zw 18 $M_{I,\text{TRGB}} = -3.5...-3.0^m$, и его предельный возраст составляет 1.2 млрд лет. Для С-компонента $M_{I,\text{TRGB}}$ попадает в интервал от -3.8 до -4.0^m , и она имеет больший возраст — 1.5—2 млрд лет. Таким образом, расстояние до I Zw 18, полученное с помощью TRGB, получилось равным $D \approx 11...14$ Мпк.

Для независимой проверки полученных результатов мы определили расстояния по TRGB до BCD-галактик NGC 2366, NGC 4068, UGC 6456 и SBS1415+437 и нашли абсолютные звездные величины голубых и красных сверхгигантов, а также ярчайших AGB-звезд в этих галактиках. Полагая, что эти звезды имеют такую же светимость и в I Zw 18, мы нашли, что расстояние до нее, определенное по BL-звездам ($M_{I,\text{BL}} = -8.1...-8.4^m$) равно $D = 11...12.6$ Мпк, а по RSG-звездам — 12.6...14.5 Мпк, что согласуется с нашими оценками по TRGB. Исследование ярчайших AGB-звезд показало, что в рассмотренных галактиках их абсолютная величина колеблется от -6.1 до -6.6^m , причем они особенно ярки в SBS 1415+437 ($M_I = -6.5^m$). Применяя этот результат к I Zw 18, мы получили расстояние до нее по AGB-звездам, которое оказалось больше других наших оценок и составило $D = 13.2...16.6$ Мпк.

1. Aloisi A., Tosi M., Greggio L. The star formation history of I Zw 18 // *Astron. J.*—1999.—118, N 1.—P. 302—322.
2. Aloisi A., van der Marel R. P., Mack J., et al. Do young galaxies exist in the local universe? Red giant branch detection in the metal-poor dwarf galaxy SBS 1415+437 // *Astrophys. J.*—2005.—631, N 1.—P. L45—L48.
3. Cannon J. M., Skillman E. D., Garnett D. R., Dufour R. J. Dust in I Zw 18 from Hubble Space Telescope narrowband imaging // *Astrophys. J.*—2002.—565, N 2.—P. 931—940.
4. Da Costa G. S., Armandroff T. E. Standard globular cluster giant branches in the $(M_I, (V-I)_0)$ plane // *Astron. J.*—1990.—100, N 1.—P. 162—181.
5. Davidson K., Kinman T. D., Friedman S. D. High resolution spectroscopy and direct imaging of the dwarf galaxy I Zw 18 // *Astron. J.*—1989.—97, N 6.—P. 1591—1599.
6. Dolphin A. E. WFPC2 stellar photometry with HSTphot // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2000.—112, N 776.—P. 1383—1396.
7. Drozdovsky I. O., Schulte-Ladbeck R. E., Hopp U., et al. The stellar content of NGC 6789, a blue compact dwarf galaxy in the Local Void // *Astrophys. J.*—2001.—551, N 2.—P. L135—L138.
8. Dufour R. J., Esteban C., Castaneda H. O. Evidence for a physically associated companion galaxy to I Zw 18 // *Astrophys. J.*—1996.—471, N 2.—P. L87—L90.
9. Dufour R. J., Garnett D. R., Skillman E. D., Shields G. A. IZw18: The new results from HST imagery and spectroscopy // *From Stars to Galaxies / Eds C. Leitherer, U. Fritze-von Alvensleben, J. Huchra.* — San Francisco, 1996.—ASP 98.—P. 358—365.
10. Dufour R. J., Hester J. J. Extended emission and star formation in I Zw 18 // *Astrophys. J.*—1990.—350, N 1.—P. 149—154.
11. French H. B. Galaxies with spectra of giant H II regions // *Astrophys. J.*—1980.—240, N 1.—P. 41—59.
12. Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C. Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: from 0.15 to 7 M_{\odot} , and from $Z = 0.0004$ to 0.03 // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—2000.—141, N 3.—P. 371—383.
13. Hunter D. A., Thronson H. A. Jr. The massive stars of I Zw 18 as seen in Hubble Space Telescope // *Astrophys. J.*—1995.—452, N 1.—P. 238—252.

14. Izotov Y. I., Thuan T. X. Reexamining helium abundance of I Zw 18 // *Astrophys. J.*—1998.—**497**, N 1.—P. 227—237.
15. Izotov Y. I., Thuan T. X. Heavy-element abundances in blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1999.—**511**, N 2.—P. 639—659.
16. Izotov Y. I., Thuan T. X. Hubble Space Telescope observations of the cometary blue compact dwarf galaxy UGC 4483: a relatively young galaxy? // *Astrophys. J.*—2002.—**567**, N 2.—P. 875—891.
17. Izotov Y. I., Thuan T. X. Deep Hubble Space Telescope ACS observations of I Zw 18: a young galaxy in formation // *Astrophys. J.*—2004.—**616**, N 2.—P. 768—782.
18. Kinman T. D., Davidson K. Spectroscopic observations of 10 emission-line dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1981.—**243**.—P. 127—139.
19. Krist J., Hook R. The tiny tim user's guide: Version 6.3. — Norwalk: STScI.—2004.
20. Lee M. G., Freedman W. L., Madore B. F. The tip of the red giant branch as a distance indicator for resolved galaxies // *Astrophys. J.*—1993.—**417**, N 2.—P. 553—559.
21. Lequeux J., Peimbert M., Rayo J. F., et al. Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**80**.—P. 155—166.
22. Lynds R., Tolstoy E., O'Neil E. J. Jr., Hunter D. A. Star formation in and evolution of the blue compact dwarf galaxy UGC 6456 determined from Hubble Space Telescope images // *Astron. J.*—1998.—**116**, N 1.—P. 146—162.
23. Mendez B., Davis M., Moustakas J., et al. Deviations from the Local Hubble Flow. I. The tip of the red giant branch as a distance indicator // *Astron. J.*—2002.—**124**, N 1.—P. 213—233.
24. Momany Y., Held E. V., Saviane I., et al. HST/ACS observations of the old and metal-poor Sagittarius dwarf irregular galaxy // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**439**, N 1.—P. 111—127.
25. Ostlin G. Hubble Space Telescope/NICMOS observations of I Zw 18: A population of old asymptotic giant branch stars revealed // *Astrophys. J.*—2000.—**535**, N 2.—P. L99—L102.
26. Pagel B. E. J., Simonson E. A., Terlevich R. J., Edmunds M. G. The primordial helium abundance from observations of extragalactic HII regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—**255**, N 2.—P. 325—345.
27. Petrosian A. R., Boulesteix J., Comte G., et al. An interferometric study of the blue compact dwarf galaxy IZW 18 // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**318**, N 2.—P. 390—404.
28. Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M. Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds // *Astrophys. J.*—1998.—**500**, N 2.—P. 525—553.
29. Schulte-Ladbeck R. E., Crone M. M., Hopp U. "Baade's red sheet" resolved into stars with HST in the blue compact dwarf galaxy VII Zw 403 // *Astrophys. J.*—1998.—**493**, N 1.—P. L23—L26.
30. Schulte-Ladbeck R. E., Hopp U., Greggio L., Crone M. M. A near-infrared stellar census of blue compact dwarf galaxies: NICMOS detection of red giant stars in the Wolf-Rayet galaxy Markarian 178 // *Astron. J.*—2000.—**120**, N 4.—P. 1713—1730.
31. Searle L., Sargent W. L. W. Inferences from the composition of two dwarf blue galaxies // *Astrophys. J.*—1972.—**173**, N 1.—P. 25—33.
32. Silverman B. W. Density estimation for statistics and data analysis. — London: Chapman and Hall, 1986.—175 p.
33. Skillman E. D., Kennicutt R. C. Jr. Spatially resolved optical and near-infrared spectroscopy of I Zw 18 // *Astrophys. J.*—1993.—**411**, N 2.—P. 655—666.
34. van Zee L., Westpfahl D., Haynes M., Salzer J. The complex kinematics of the neutral hydrogen associated with I Zw 18 // *Astron. J.*—1998.—**115**, N 3.—P. 1000—1015.
35. Zwicky F. Compact galaxies and compact parts of galaxies. II // *Astrophys. J.*—1966.—**143**.—P. 192—202.

Поступила в редакцию 06.07.06