

УДК 524.7

Т. Н. ЯкобчукГлавная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27**Звездное население голубой компактной карликовой галактики SBS 1415+437**

Представлены результаты фотометрического исследования звездного населения голубой компактной карликовой галактики SBS 1415+437 по архивным данным наблюдений на Космическом телескопе Хаббла. Полученная диаграмма показатель цвета — звездная величина для звезд достигает 29^m в полосах V и I и содержит молодые звезды главной последовательности, голубые и красные сверхгиганты, а также более старое проэволюционировавшее население ветви красных гигантов и асимптотической ветви гигантов. По точке обрыва ветви красных гигантов (TRGB) найден модуль расстояния $m - M = 30.65 \pm 0.08^m$, что соответствует расстоянию до галактики $D = 13.5 \pm 1.0$ Мпк. Самые молодые звезды концентрируются к яркой области H II в юго-западной части SBS 1415+437 и распределены неравномерно, тогда как старое население занимает наибольшую площадь, формирует гало галактики и его распределение более равномерно. Пространственное распределение молодых звезд также указывает на то, что в последние 50 млн лет звездообразование в галактике распространялось с северо-востока на юго-запад со средней скоростью около 60 км/с. Найдено, что TRGB SBS 1415+437 имеет очень голубой цвет: $(V - I)_{TRGB} \approx 1.30$. Если принять, что галактика первоначально имела очень низкую металличность (наша фотометрическая оценка $[Fe/H] = -2.4$), то ее возраст оказывается не меньшим, чем возраст шаровых скоплений Галактики (~ 10 млрд лет). Если металличность SBS 1415+437 практически не изменялась в ходе эволюции и равнялась $[Fe/H] = -1.3$ (оценка по эмиссионным линиям ионизированного газа), то возраст галактики не превышает 2 млрд лет.

ЗОРЯНЕ НАСЕЛЕННЯ БЛАКИТНОЇ КОМПАКТНОЇ КАРЛИКОВОЇ ГАЛАКТИКИ SBS 1415+437, Якобчук Т. М. — Представлено результати фотометричного дослідження зоряного населення блакитної компактної карликової галактики SBS 1415+437 за архівними даними спостережень на Космічному телескопі Хаббла. Отримана діаграма показник кольору — зоряна величина для зір досягає 29^m у смугах V та I і містить молоді зірки головної послідовності, блакитні та червоні надгіганти, а також старе населення гілки червоних гігантів і асимптотичної гілки гігантів. За точкою обриву гілки червоних гігантів знайдено модуль відстані $m - M = 30.65 \pm 0.08^m$, що відповідає відстані до галактики $D = 13.5 \pm 1.0$ Мпк.

Наймолодші зорі концентруються до яскравої області H II у південно-західній частині SBS 1415+437 і розподілені нерівномірно, тоді як старе населення займає найбільшу площу, формує гало галактики та його розподіл рівномірніший. Просторовий розподіл молодих зір також вказує на те, що в останні 50 млн років зореутворення в галактиці поширювалось із північного сходу на південний захід із середньою швидкістю близько 60 км/с. Найдено, що точка обриву вітки червоних гігантів SBS 1415+437 має дуже блакитний колір: $(V - I)_{\text{TRGB}} \approx 1.30$. Якщо прийняти, що галактика при утворенні мала дуже низьку металічність (наша фотометрична оцінка $[Fe/H] = -2.4$), то її вік виявляється не меншим, ніж вік кулястих скупчень Галактики (~ 10 млрд років). Якщо металічність SBS 1415+437 практично не змінювалась у ході еволюції і дорівнювала $[Fe/H] = -1.3$ (оцінка за емісійними лініями іонізованого газу), то її вік не перевищує 2 млрд років.

STELLAR POPULATIONS OF THE BLUE COMPACT DWARF GALAXY SBS 1415+437, by Yakobchuk T. M. — We present a photometric study of stellar populations in the blue compact dwarf (BCD) galaxy SBS 1415+437 from the archival Hubble Space Telescope data. The resulting color-magnitude diagram (CMD) for stars reaches about 29^m in V and I filters and reveals not only a young stellar population of main sequence and blue and red supergiants but also an older evolved population of red giant and asymptotic giant branch stars. From the tip of the red giant branch (TRGB) a distance modulus was found to be $m - M = 30.65 \pm 0.08^m$, which corresponds to a distance $D = 13.5 \pm 1.0$ Mpc. The youngest stars concentrate to the bright H II region in the south-western part of SBS 1415+437 and show a clumpy distribution, while the older populations occupy the largest area, form the halo of the galaxy and distributed more evenly. Spatial distribution of young stars also shows an evidence for propagating star formation in the last 50 Myr from the northeast to the southwest with an average velocity of about 60 km/s. The TRGB of SBS 1415+437 has very blue color with $(V - I)_{\text{TRGB}} \approx 1.30$, which gives different age estimates for the galaxy depending on the assumed metallicity: 1) if we assume that the galaxy initially had a very low metallicity ($[Fe/H] = -2.4$ from the photometric estimate in this work), its age appears to be no less than the ages of Galactic globular clusters (about 10 Gyr); 2) if the metallicity of SBS 1415+437 remained almost the same through the evolution and was equal to that taken from the emission lines of ionized gas ($[Fe/H] = -1.3$), the age of the galaxy does not exceed 2 Gyr.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема образования и эволюции галактик является одной из ключевых в современной астрофизике. Очевидно, что первые галактики формировались в условиях, значительно отличающихся от тех, которые мы наблюдаем в Локальной Вселенной. Однако, поскольку возможности современных телескопов, работающих в различных участках спектра, недостаточны для детального изучения предельно далеких галактик на космологических красных смещениях, большой интерес представляет поиск и исследование близких галактик, которые по своим свойствам им подобны. В большой мере это может относиться к голубым компактным карликовым галактикам (BCD), которые характеризуются очень низким содержанием тяжелых элементов (от $Z_{\odot}/3$ до $Z_{\odot}/50$ [14]), большой массой нейтрального газа (более $10^8 M_{\odot}$ [38]) и активным звездообразованием ($0.01 - 10 M_{\odot}/\text{год}$ [34]). Много лет активно дискутируется вопрос о том, являются ли BCD-галактики действительно молодыми галактиками, образовавшими свои первые

звезды недавно, или же это старые галактики, в которых сейчас наблюдается сильная вспышка звездообразования [3, 14, 16, 26, 27]. Так, у более чем 95 % BCD-галактик, исследованных в работе [20], наблюдается внешняя красная оболочка низкой яркости (LSB), указывающая на звездообразование в прошлом. Дальнейшие наблюдения подтвердили этот результат [18, 25, 33]. После запуска Космического телескопа Хаббла (HST) LSB-компоненты многих BCD-галактик были разрешены на звезды ветви красных гигантов (RGB) [5, 8, 15, 29, 31, 32, 35], что непосредственно свидетельствует о возрасте не менее 1-2 млрд лет. Тем не менее, до недавнего времени было известно по крайней мере несколько BCD-галактик, а именно I Zw 18 ($Z_{\odot}/50$), SBS 0335-052E ($Z_{\odot}/41$), SBS 0335-052W ($Z_{\odot}/50$) и SBS 1415+437 ($Z_{\odot}/21$), возраст которых по голубому цвету LSB и низкому обилию химических элементов оценивался равным не более 100 млн лет [12, 13, 24, 36]. Первые наблюдения I Zw 18 [12] и SBS 1415+437 [36] на HST также подтверждали этот результат. Надо заметить, что детальные исследования этих галактик осложняются их большой удаленностью (12—15 Мпк для I Zw 18 и SBS 1415+437 и 55 Мпк для SBS 0335-052). Последующие глубокие HST-наблюдения I Zw 18 на ACS (Advanced Camera for Surveys) камере в спектральных полосах V и I [16] все же показали наличие в галактике, кроме звезд главной последовательности (MS, возраст менее 30 млн лет), голубых и красных сверхгигантов (BL и RSG, возраст менее 100 млн лет), также и более старого звездного населения асимптотической ветви гигантов (AGB) с возрастом до 500 млн лет. Единой точки зрения о наличии RGB-звезд пока нет [1, 2, 16, 23, 39]. Анализ диаграмм показатель цвета — звездная величина (CMD) I Zw 18 показывает, что в районе предполагаемой RGB наблюдается очень мало точек, так что нельзя однозначно определить расстояние по точке обрыва ветви красных гигантов (TRGB). Последние наблюдения, проведенные с целью определить расстояние независимо с помощью цефеид, также не дают удовлетворительного результата [9]. Важным аргументом в пользу молодости I Zw 18 может быть тот факт, что для нее не зарегистрировано гало [1, 16], в отличие от всех известных BCD, разрешенных на звезды. Как видно, несмотря на большой прогресс в понимании эволюционного статуса BCD-галактик, их изучение по-прежнему представляет большой интерес, и необходимы дальнейшие исследования этих объектов.

Галактика SBS 1415+437 (=CG 389) по морфологическим признакам была классифицирована как кометарная BCD с очень яркой гигантской областью H II [37]. Расстояние к ней было найдено равным $D = 11.2$ Мпк [36]. Из спектральных наблюдений было получено, что содержание кислорода в галактике составляет всего $12 + \lg(O/H) = 7.59 \pm 0.01$ ($Z = Z_{\odot}/21$) [14] — одно из самых низких среди известных BCD. На основе спектральных данных MMT (Multiple Mirror Telescope) и фотометрических данных HST/WFPC2 (Wide Field and Planetary Camera 2) в работе [36] рассматривался эволюционный статус SBS 1415+437. Был сделан вывод, что SBS 1415+437 является молодой галактикой с возрастом около 100 млн лет. Однако использованные V - и I -изображения были недостаточно глубокими (1800 с в V -полосе и 4400 с в I -полосе), чтобы зарегистрировать на CMD старые RGB-звезды. Кроме того, при оценке возраста использовалась модель мгновенной вспышки звездообразования, которая дает только нижний предел возраста звездного населения. В более поздних исследованиях по эквивалентным ширинам эмиссионных линий H_{α} , H_{β} и абсорбционных линий H_{γ} и H_{δ} , а также по распределениям энергии в спектре и распределению показателя цвета $V - I$ вдоль спектральной щели, ориентированной вдоль ярких областей H II, было найдено, что в галактике доминирует

молодое звездное население с возрастом не более 250 млн лет, а масса звезд, образовавшихся в промежутке между 2.5 и 10 млрд лет, составляет не более 1/20 массы звезд с возрастом менее 250 млн лет [11]. Последние наблюдения [3] на HST/ACS-камере впервые дали возможность разрешить LSB-компонент SBS 1415+437 на отдельные звезды. Полученная диаграмма показатель цвета — звездная величина показала наличие множества RGB-звезд и стала доказательством того, что эта галактика не может быть моложе 1.3 млрд лет (точный возраст зависит от выбранной металличности и учета внутреннего пылевого поглощения света). По количеству RGB звезд в работе [3] делается вывод, что большая часть массы звезд галактики ($\approx 80\%$) сосредоточена именно в этом проэволюционировавшем населении.

Цель нашей работы — с помощью пакета DOLPHOT [7] провести более глубокую и точную фотометрию звезд в галактике SBS 1415+437, используя архивные изображения [3], аналогичным способом определить расстояние до нее, но с использованием старых звезд гало галактики и с расчетом ошибки найденного значения. Кроме того, мы исследуем пространственное распределение различных звездных населений, чего не делалось в работе [3].

НАБЛЮДЕНИЯ И ФОТОМЕТРИЯ

Наблюдения SBS 1415+437 проводились в рамках программы HST GO 9361 (автор заявки А. Алоизи [3]). Галактика наблюдалась на камере ACS, на ПЗС-матрице WFC2 (Wide Field Channel 2) с полем зрения $202'' \times 102''$ ($0.05''/\text{пкл}$) в широкополосных фильтрах F606W и F814W (которым отвечают полосы V и I в системе Джонсона — Коузинс). Полное время экспозиции составило 20160 с в каждом фильтре (по восемь орбит в каждом фильтре). Для удаления следов космических частиц на каждой орбите делалось по две экспозиции в каждом фильтре. Данные наблюдений были получены из архива HST после автоматической стандартной обработки OTFR с использованием последних на момент запроса калибровочных файлов. На рис. 1 представлено просуммированное по всем орбитам изображение SBS 1415+437 в V -полосе. Галактика имеет вытянутую форму с яркой областью H II в юго-западной части. Вдоль тела галактики заметно множество точечных источников, которые являются яркими звездами. Кроме того, в поле зрения попало много фоновых галактик (с наиболее яркой из них в направлении на север), а также звезда Галактики (на изображении слева).

Для фотометрических измерений использовался модуль пакета DOLPHOT [7], предназначенный для обработки данных, полученных на ACS-камере. Для измерений были взяты только прокалиброванные, очищенные от космических частиц, просуммированные изображения (16 файлов в V - и I -полосах). На предварительном этапе для каждого изображения исключались дефектные пиксели матрицы и строилось изображение фона. Далее весь набор изображений обрабатывался одновременно, с учетом смещений и поворотов между ними. Для определения звездных величин в ACS-модуле DOLPHOT используются функции рассеяния точки (PSF), полученные с помощью пакета Tiny Tim [17], моделирующего распределение яркости звезды по изображению. Процедура включает в себя апертурные коррекции и поправку за эффективность передачи зарядов в ПЗС-матрицах. Для большинства параметров, задаваемых в DOLPHOT, были взяты стандартные значения, но после ряда тестов были выбраны более оптимальные значения параметров: размер фотометрической апертуры $3''$, внутрен-

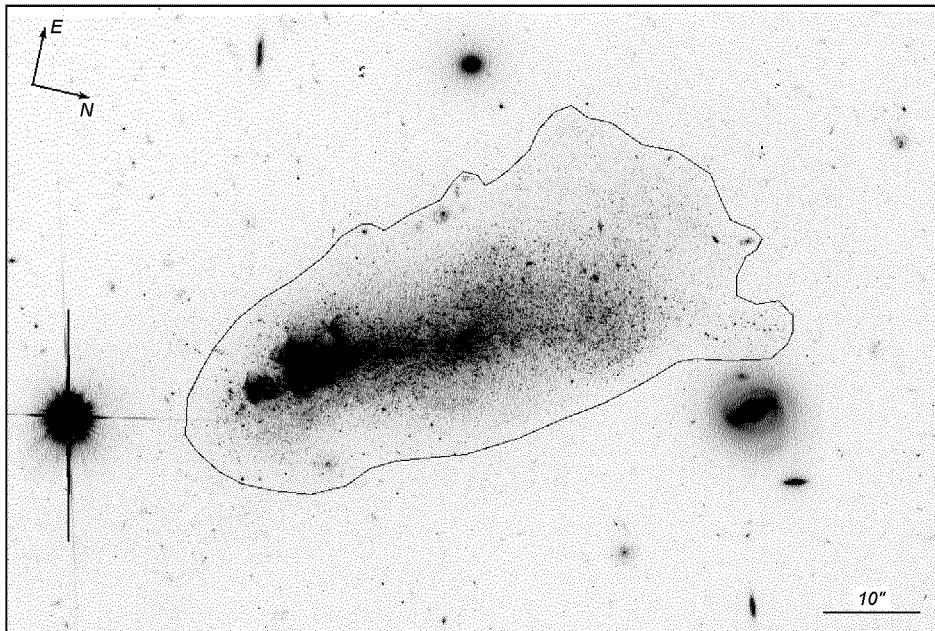


Рис. 1. Изображение BCD-галактики SBS 1415+437, полученное на камере HST/ACS в V -полосе. Внутренняя граница гало отмечена сплошной линией

ний и внешний радиусы области вокруг звезды для измерения фона — $5''$ и $15''$, размер PSF $5''$. Всего одновременно в полосах V и I было зарегистрировано около 26 тыс. объектов (около 21 тыс. в работе [3]). Для минимизации числа ложных объектов из полученного списка были удалены звезды с отношением сигнал/шум менее 5, ошибкой определения звездной величины более 0.2^m и резкостью более 0.25, после чего в окончательном списке осталось 14814 звезд. Все найденные звездные величины были исправлены за поглощение света Галактикой, значения которого были взяты из работы [28].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ

На рис. 2 представлена диаграмма показатель цвета — звездная величина для звезд галактики SBS 1415+437, которая почти на 3^m глубже, чем в работе [36], и достигает 29^m в полосах V и I . На диаграмме хорошо выделяются звездные эволюционные последовательности самого разного возраста, но главной особенностью, как уже отмечалось в работе [3], является обнаружение густо населенной RGB. Кроме RGB и расположенной выше асимптотической ветви гигантов (AGB), на диаграмме хорошо видны главная последовательность (MS) и последовательности голубых (BL) и красных (RSG) сверхгигантов. В целом вид диаграммы говорит о длительной истории звездообразования в галактике SBS 1415+437 и чередовании периодов высокой и низкой активности звездообразования.

Для определения расстояния использовался метод TRGB. Этот метод имеет надежную эмпирическую и физическую основу. Теоретически было показано, что TRGB отмечает на диаграмме показатель цвета — звездная величина стадию резкого возгорания гелия в недрах маломассивных звезд.

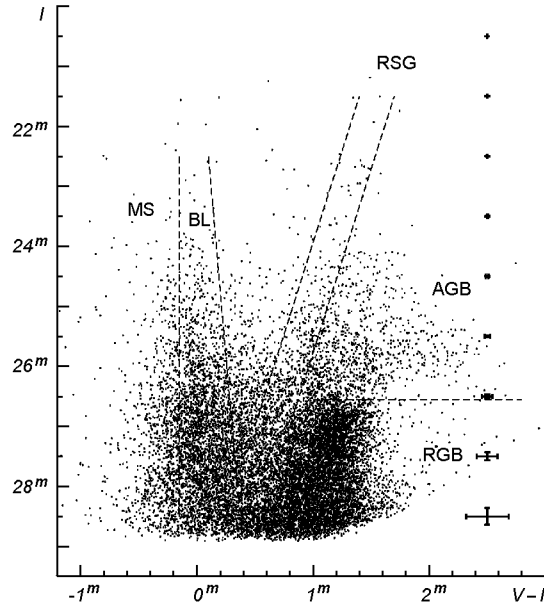


Рис. 2. Диаграмма показатель цвета — звездная величина для галактики SBS 1415+437. Линиями показаны положения звезд главной последовательности (MS), голубых (BL) и красных (RSG) сверхгигантов, асимптотической ветви гигантов (AGB) и красных гигантов (RGB). Справа показаны средние ошибки фотометрии

Этому явлению отвечает наблюдаемый резкий обрыв функции светимости RGB. Важно, что при этом абсолютная звездная величина I , соответствующая точке обрыва, изменяется всего лишь в пределах 0.1^m для звезд RGB с возрастом от 2 до 15 млрд лет и металличностью $-2.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.7$. Следуя работе Ли и др. [19], модуль расстояния можно найти как $(m - M)_I = I_{\text{TRGB}} - M_{I,\text{TRGB}}$, где I_{TRGB} — видимая звездная величина TRGB, а $M_{I,\text{TRGB}} = M_{\text{bol,TRGB}} - BC_I$ — абсолютная I -величина TRGB. Болومترическая звездная величина TRGB зависит от металличности как $M_{\text{bol,TRGB}} = -0.19[\text{Fe}/\text{H}] - 3.81^m$, а болومترическая поправка определяется по показателю цвета как $BC_I = 0.881 - 0.243(V - I)_{\text{TRGB}}$. Металличность находится из эмпирической формулы $[\text{Fe}/\text{H}] = -12.64 + 12.6(V - I)_{-3.5} - 3.3(V - I)_{-3.5}^2$, где $(V - I)_{-3.5}$ — показатель цвета TRGB при абсолютной величине $I = -3.5^m$.

Благодаря высокой точности фотометрии и длительной экспозиции точка обрыва RGB хорошо заметна на диаграмме для SBS 1415+437 и лежит примерно на 2^m выше нижней границы диаграммы. Для определения расстояния были использованы только звезды гало галактики, чтобы исключить влияние на TRGB лежащих рядом на диаграмме более молодых RGB- и RSG-звезд. Границы гало выбирались условно по изофотам с таким расчетом, чтобы получить надежную статистику и одновременно исключить молодые звезды центральных областей (рис. 1). На рис. 3, а показана диаграмма показатель цвета — звездная величина, полученная для гало SBS 1415+437, на которой четко доминирует RGB. Точное измерение положения TRGB проводилось с помощью гладких кривых распределения плотности точек по показателю цвета и звездной величине I [1]. По максимуму производной от функции светимости RGB (рис. 3, б) имеем $I_{\text{TRGB}} = 26.73 \pm 0.07^m$. Показатель цвета, найденный в интервале $I_{\text{TRGB}} \pm 0.1^m$,

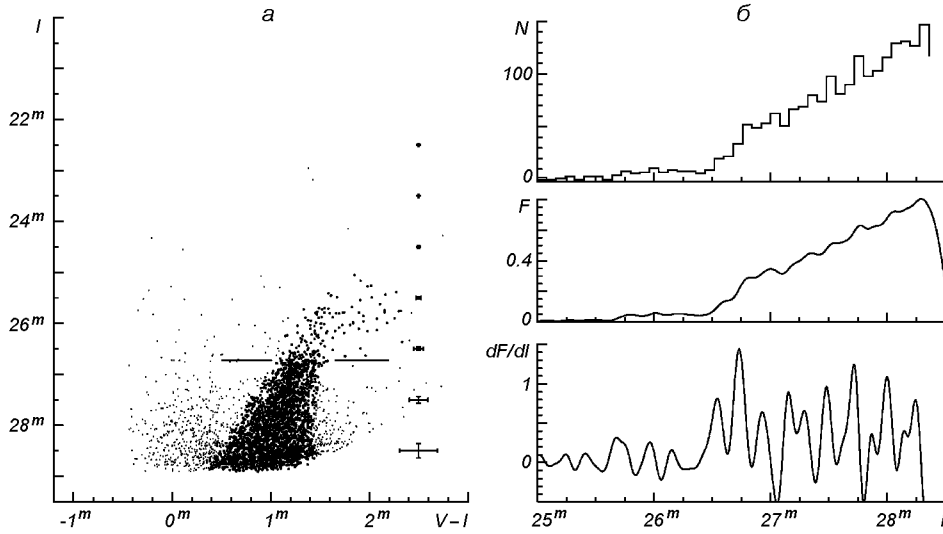


Рис. 3. Диаграмма показатель цвета — звездная величина для гало SBS 1415+437 (а), а также распределение количества N звезд по звездным величинам I и гладкая функция светимости F (б), построенные по звездам, обозначенным большими точками на диаграмме. Звездная величина, соответствующая максимуму производной dF/dI , равна $I_{TRGB} = 26.73^m$. Средний показатель цвета для точек в области TRGB равен $V - I = 1.29^m$

равен $(V - I)_{TRGB} = 1.29 \pm 0.03^m$. Аналогично $(V - I)_{-3.5} = 1.17 \pm 0.04^m$. Все ошибки измерений были получены согласно работе [22]. Используя приведенные выше формулы, находим модуль расстояния $m - M = 30.65 \pm 0.08^m$, металличность при этом $[Fe/H] = -2.41 \pm 0.22$, а $M_{I,TRGB} = -3.92 \pm 0.04^m$. В результате, расстояние до галактики SBS 1415+437 равно $D = 13.5 \pm 1.0$ Мпк, что согласуется с оценкой $D \approx 13.6$ Мпк [3].

ЗВЕЗДНЫЕ НАСЕЛЕНИЯ SBS 1415+437

Пространственное распределение. Как видно из рис. 2, галактика SBS 1415+437 содержит звездные населения самых разных поколений. Об активно текущем звездообразовании свидетельствует наличие гигантской области H II, тогда как по звездному населению LSB можно судить о прежних этапах звездообразования в галактике. Пространственное распределение звезд различных типов представлено на рис. 4. Как видно, молодые MS-звезды располагаются главным образом вдоль центральной части тела галактики, причем их плотность увеличивается с приближением к самой яркой области H II. Звезды BL и RSG с возрастом от 10—20 до 250 млн лет занимают больший объем, чем звезды MS, и образуют своеобразный «хвост кометы», расширяющийся в северо-восточном направлении. Распределение AGB-звезд более равномерно в центральной части по сравнению с распределением более молодых звезд; при удалении от центра их плотность быстро уменьшается. Наконец, самое многочисленное старое RGB-население занимает наибольшую площадь. Необходимо отметить, что практически полное отсутствие RGB-звезд в центральной части галактики обусловлено чисто наблюдательными эффектами. Поскольку здесь содержится много ионизированного газа и пыли и высока плотность молодых ярких MS- и BL/RSG-

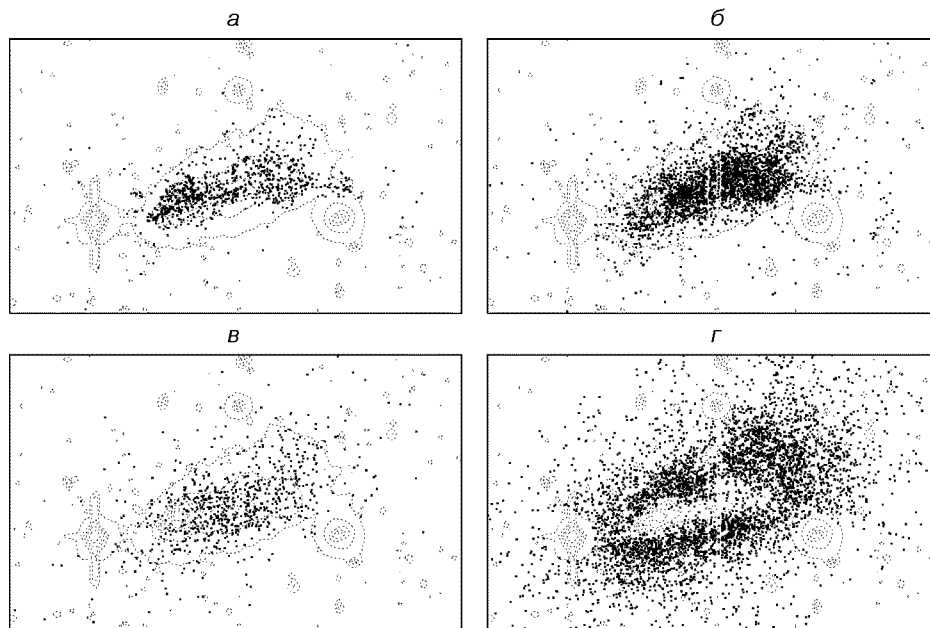


Рис. 4. Пространственное распределение: звезд главной последовательности (а), голубых и красных сверхгигантов (б), звезд асимптотической ветви гигантов (в), красных гигантов (г). Отсутствие красных гигантов в центральной части галактики объясняется наблюдательными эффектами, в частности вызвано высоким уровнем фона и большой плотностью ярких молодых звезд в этой области

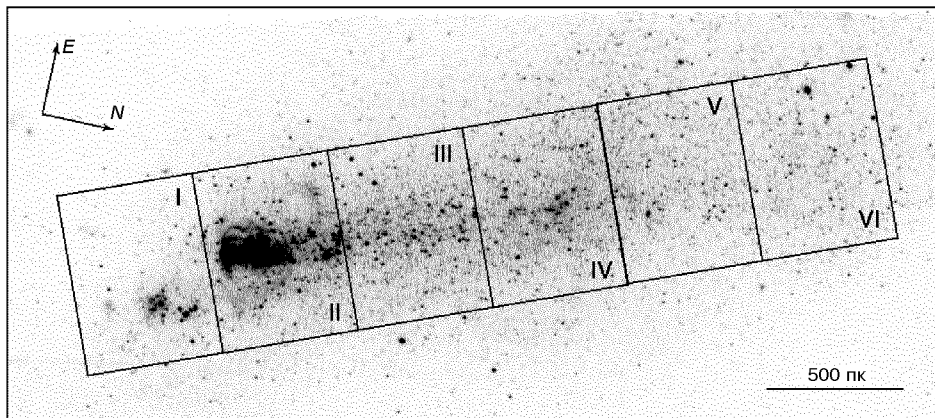


Рис. 5. Увеличенное изображение центральной части галактики SBS 1415+437 в I-полосе

звезд, на их фоне более слабые RGB-звезды при фотометрии просто не регистрируются. В целом распределение звезд различных типов в SBS 1415+437 является довольно характерным для BCD-галактик, которые наблюдались на HST [5, 8, 15, 30, 35].

Молодое звездное население. На рис. 5 представлено увеличенное изображение центральной части галактики SBS 1415+437, которую мы

разбили на шесть равных областей, центры которых попадают на линию с позиционным углом 48° , как и в работе [11]. Размер одной области составляет 640×480 пк. На рис. 6 приведены диаграммы $(V - I) - M_I$ для выбранных областей, на которые наложены звездные изохроны с металличностью $Z = 0.001$ ($Z_\odot/20$) [4, 10]. Каждая изохрона определяет положение на диаграмме звездного населения одного возраста (в логарифмической шкале). Диаграмма для области I состоит в основном из звезд двух компактных звездных скоплений [36], главная последовательность достигает здесь $M_I \approx -6^m$, есть несколько ярких голубых и красных сверхгигантов. Наблюдаются и звезды RGB, но они пространственно не коррелируют с молодым населением и распределены по всей выбранной области практически равномерно. На диаграмме области II, которая содержит самую яркую зону Н II, MS достигает $M_I \approx -7.5^m$, здесь видно много ярких сверхгигантов с $M_I > -8^m$ возрастом до 5 млн лет. Заметно, что из-за высокой плотности ярких звезд и свечения ионизованного газа полнота выборки с увеличением абсолютной звездной величины здесь падает явно быстрее, чем в других областях. Диаграммы для областей III—VI весьма похожи между собой, и описывающие их изохроны показывают тенденцию к постепенному увеличению возраста молодого звездного населения от области III к VI от 25 до 56 млн лет. Подобная тенденция была замечена также и в работе [36]. Если принять, что длина выбранной центральной части равна 3000 пк, и разница в возрасте областей I и VI составляет около 50 млн лет, можно найти, что недавнее звездообразование в галактике SBS 1415+437 распространялось с северо-востока на юго-запад со средней скоростью около 60 км/с.

Старое звездное население. По найденному значению показателя цвета $(V - I)_{-3.5}$ для RGB-звезд гало можно оценить металличность SBS 1415+437, которая равна $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.41 \pm 0.22$, что соответствует $Z \lesssim 0.0001$. Эта фотометрическая оценка металличности на порядок меньше оценки, полученной ранее из спектральных наблюдений областей Н II ($Z = 0.001$).

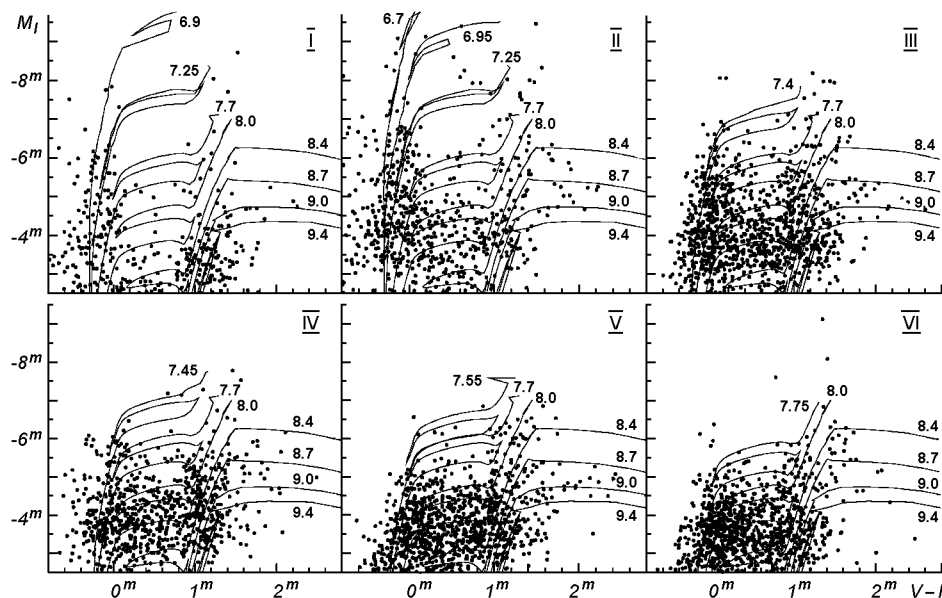


Рис. 6. Диаграммы показатель цвета — звездная величина для звезд областей, заданных на рис. 5. Линии — изохроны с металличностью $Z = 0.001$, цифры у кривых — логарифмы возраста по данным [4, 10]

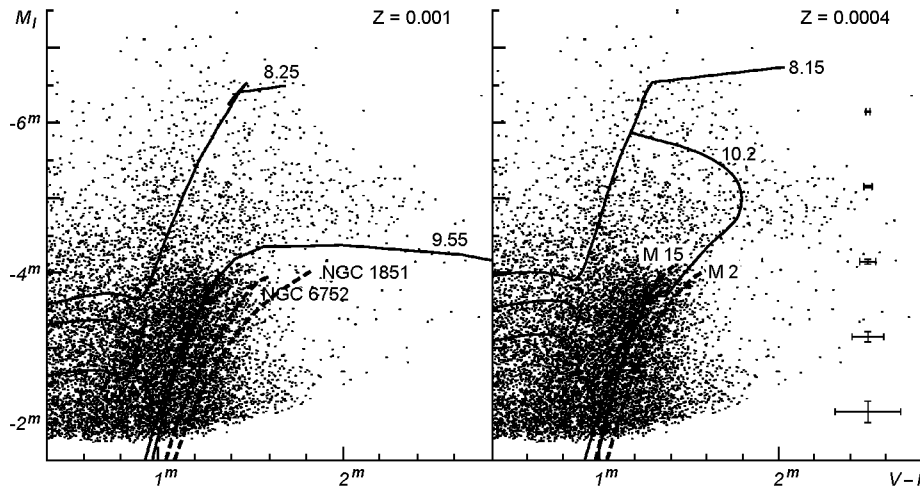


Рис. 7. Диаграммы показатель цвета — звездная величина ($V - I$) — M_I для RGB/AGB-звезд SBS 1415+437. Сплошные линии — изохроны с металличностью $Z = 0.0004$ и 0.001 [4, 10], которые наилучшим образом описывают наблюдаемые RGB. Цифры у кривых — логарифмы возраста. Пунктир — для RGB шаровых скоплений M2 ($Z = 0.0005$), M 15 ($Z = 0.0001$), NGC 1851 ($Z = 0.001$) и NGC 6752 ($Z = 0.0006$) [6]

Напомним, однако, что использованная зависимость $[Fe/H]$ от показателя цвета $(V - I)_{-3.5}$ является эмпирической, и была установлена по кривым RGB шаровых скоплений, возраст которых не менее 10 млрд лет, а металличность составляет $-2.2 < [Fe/H] < -0.7$ [6]. Получается, что металличность RGB звезд SBS 1415+437 меньше, чем у самых бедных на металлы шаровых скоплений Галактики, и в процессе эволюции, по-видимому в результате обогащения межзвездной среды, она увеличилась более чем на порядок. С другой стороны, принимая во внимание неоднозначность зависимости «возраст — металличность», очень голубой цвет RGB SBS 1415+437 можно объяснить и металличностью $Z = 0.001$, но тогда возраст RGB заведомо меньше 10 млрд лет. Подобная неопределенность уже отмечалась и в других работах [15, 35]. В действительности, вероятно, имеет место и тот, и другой случай, но реальный вклад каждого из них оценить непросто. Подробный анализ с помощью теоретических изохрон осложняется еще и тем, что все известные наборы изохрон не описывают наблюдаемые кривые RGB шаровых скоплений и имеют систематические отклонения по цвету [6, 15, 16, 21, 35]. На рис. 7 представлены диаграммы показатель цвета — звездная величина для SBS 1415+437, на которые наложены изохроны, рассчитанные для металличностей $Z = 0.001$ и 0.0004 [4, 10]. Изохроны для $Z = 0.0001$ мы не приводим, так как они совсем не описывают наблюдаемые диаграммы: даже для возраста 16 млрд лет их показатель цвета в районе TRGB равен всего $V - I = 1.20$. По подобранным изохронам для $Z = 0.001$ находим, что возраст RGB-звезд SBS 1415+437 получается равным 3.5 млрд лет, тогда как в случае $Z = 0.0004$ — 16 млрд лет. На рис. 7 пунктирными линиями показаны также RGB шаровых скоплений M2 ($Z = 0.0005$), M 15 ($Z = 0.0001$), NGC 1851 ($Z = 0.001$) и NGC 6752 ($Z = 0.0006$). Как видно, все они, за исключением M 15, проходят правее RGB SBS 1415+437 и имеют больший наклон по вертикали. Мы провели сравнение RGB наблюдаемых шаровых скоплений с соответствующ-

щими изохронами для 10 млрд лет и нашли, что разница показателей цвета TRGB между ними составляет от 0.2^m ($Z = 0.0001$) до 0.5^m ($Z = 0.001$). При использовании женевского набора изохрон возникает аналогичная ситуация, только их показатель цвета систематически более «красный» [15, 35]. Все же можно попытаться оценить возраст SBS 1415+437 с помощью качественного сравнения изохрон и усредненных наблюдаемых кривых RGB шаровых скоплений. Усредненная наблюдаемая кривая RGB для шарового скопления NGC 1851 ($Z = 0.001$) лежит на 0.45^m правее RGB SBS 1415+437 при $M_I = -4.0$. Изохроны, рассчитанные для $Z = 0.001$, такую разницу в цвете могут объяснить различием в возрасте более чем на порядок. Изохроны для $Z = 0.004$ «краснее» RGB NGC 1851 при $t = 10$ млрд лет и лежат не так плотно на диаграмме. Они дают различие в возрасте примерно в пять раз. Из этого можно предположить, что если изначальная металличность SBS 1415+437 мало отличалась от $Z = 0.001$, то ее возраст не превышает 2 млрд лет.

В заключение заметим, что использованные в работе новые изохроны включают сложную AGB-фазу эволюции звезд [4]. Как видно из рис. 7, они неплохо описывают положение AGB-звезд SBS 1415+437 на диаграмме, в частности теоретический максимум светимости AGB в районе $M_I \approx -6.5^m$ совпадает с наблюдаемым и отвечает минимальному возрасту AGB от 140 до 180 млн лет, в зависимости от выбранной металличности. Вообще же новые изохроны предсказывают обратную зависимость светимости AGB-звезд от возраста, однако после 2 млрд лет их кривые вырождаются и уже не позволяют однозначно определить возраст AGB. Поэтому AGB-звезды не могут помочь независимо разрешить проблему возраста SBS 1415+437, хотя в перспективе могут использоваться как альтернативный индикатор расстояния (см. также [1]).

ВЫВОДЫ

На основе архивных данных наблюдений, проведенных на Космическом телескопе Хаббла, проведен фотометрический анализ звездного населения в голубой компактной карликовой галактике SBS 1415+437. Были проведены фотометрические измерения изображений в полосах V и I , и построена диаграмма показатель цвета — звездная величина, достигающая 29^m . Найдено, что диаграмма для SBS 1415+437 содержит звезды разного возраста, включая как молодые звезды главной последовательности, голубые и красные сверхгиганты, так и старые звезды ветви красных гигантов и звезды асимптотической ветви гигантов. Это свидетельствует о непрерывном звездообразовании в этой галактике по крайней мере в последние 2 млрд лет. По точке обрыва ветви красных гигантов $I_{TRGB} = 26.73 \pm 0.07^m$ получен модуль расстояния $m - M = 30.65 \pm 0.08^m$, что соответствует расстоянию $D = 13.5 \pm 1.0$ Мпк. Анализ самого молодого звездного населения центральной части галактики показал, что его возраст постепенно уменьшается с северо-востока к юго-западу от 50 до 5 млн лет (по теоретическим изохронам). Средняя скорость распространения недавнего звездообразования при этом близка к 60 км/с.

По цвету населения красных гигантов SBS 1415+437 найдено, что ее металличность равна $[Fe/H] = -2.41 \pm 0.22$, то есть на порядок меньше значения -1.3 , которое было определено из спектральных наблюдений областей H II. Несоответствие можно объяснить по-разному. В первом случае следует полагать, что первоначальная металличность SBS 1415+437 действительно была очень низкой, и тогда ее возраст должен быть не меньшим, чем возраст шаровых скоплений Галактики, то есть около

10 млрд лет. С другой стороны, можно предположить, что металличность SBS 1415+437 практически не изменялась в ходе эволюции, и тогда ее возраст составляет не более 2 млрд лет. Не исключено, что в действительности реализуется промежуточный случай.

1. Яковчук Т. Н., Изотов Ю. И. Галактика I Zw 18: определение возраста и расстояния по наблюдениям на Космическом телескопе Хаббла // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 6.—С. 432—446.
2. Aloisi A., Annibali F., Mack J., et al. A New Deep HST/ACS CMD of I Zw 18: Evidence for Red Giant Branch Stars // Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies / Ed. R. F. Peletier, A. Vazdekis. — Cambridge: Univ. press, 2007.—(astro-ph/0702216).
3. 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.
4. Cioni M.-R. L., Girardi L., Marigo P., Habing H. J. AGB stars in the Magellanic Clouds. II. The rate of star formation across the LMC // Astron. and Astrophys.—2006.—448, N 1.—P. 77—91.
5. Crone M. M., Schulte-Ladbeck R. E., Hopp U., Greggio L. A compact population of red giants in the blue compact dwarf galaxy UGCA 290 // Astrophys. J.—2000.—545, N 1.—P. L31—L34.
6. 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.
7. Dolphin A. E. WFPC2 stellar photometry with HSTphot // Publ. Astron. Soc. Pacif.—2000.—112, N 776.—P. 1383—1396.
8. 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.
9. Fiorentino G., Marconi M., Clementini G., et al. Very metal poor Classical Cepheids: variables in IZw18 // Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies / ed. R. F. Peletier, A. Vazdekis. — Cambridge: Univ. press, 2007.—(astro-ph/0703679).
10. Girardi L., Bertelli G., Bressan A., et al. Theoretical isochrones in several photometric systems. I. Johnson-Cousins, HST/WFPC2, HST/NICMOS, Washington, and ESO Imaging Survey filter sets // Astron. and Astrophys.—2002.—391, N 1.—P. 195—212.
11. Guseva N. G., Papaderos P., Izotov Y. I., et al. Spectroscopic and photometric studies of low-metallicity star-forming dwarf galaxies. III. SBS 1415+437 // Astron. and Astrophys.—2003.—407, N 1.—P. 105—120.
12. Hunter D. A., Thronson H. A. The massive stars of I Zw 18 as seen in Hubble Space Telescope // Astrophys. J.—1995.—452, N 1.—P. 238—252.
13. Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Chaffee F. H., et al. SBS 0335-052, a probable nearby young dwarf galaxy: evidence pro and con // Astrophys. J.—1997.—476, N 2.—P. 698—711.
14. Izotov Y. I., Thuan T. X. Heavy-element abundances in blue compact galaxies // Astrophys. J.—1999.—511, N 2.—P. 639—659.
15. 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.
16. 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.
17. Krist J., Hook R. The Tiny Tim User's Guide, Version 6.3 // Norwalk: STScI.—2004.
18. Kunth D., Maurogordato S., Vigroux L. CCD observations of blue compact galaxies. — A mixed bag of morphological types // Astron. and Astrophys.—1988.—204, N 1.—P. 10—20.
19. 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.
20. Loose H.-H., Thuan T. X. The morphology and structure of blue compact dwarf galaxies from CCD observations // Star-forming Dwarf Galaxies / Eds D. Kunth, T. X. Thuan, J. Tran Tranh Van (Gif-sur-Yvette: Editions Frontieres).—1985.—73.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Papaderos P., Izotov Y. I., Fricke K. J., et al. On the age of the nearby blue compact dwarf galaxy SBS 0335-052 // Astron. and Astrophys.—1998.—338, N 1.—P. 43—55.

25. Papaderos P., Loose H.-H., Thuan T. X., Fricke K. J. Optical structure and star formation in blue compact dwarf galaxies. I. Observations and profile decomposition // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1996.—120 N 2.—P. 207—228.
26. 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.
27. 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.
28. Schulte-Ladbeck R. E., Hopp U., Crone M. M., Greggio L. A stellar population gradient in VII Zw 403: implications for the formation of blue compact dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1999.—525, N 2.—P. 709—719.
29. 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.
30. Schulte-Ladbeck R. E., Hopp U., Greggio L., et al. A near-infrared stellar census of blue compact dwarf galaxies: the Wolf-Rayet galaxy I Zw 38 // *Astron. J.*—2001.—121, N 6.—P. 3007—3025.
31. Searle L., Sargent W. L. W. Inferences from the composition of two dwarf blue galaxies // *Astrophys. J.*—1972.—173.—P. 25—33.
32. Searle L., Sargent W. L. W., Bagnuolo W. G. The history of star formation and the colors of late-type galaxies // *Astrophys. J.*—1973.—179.—P. 427—438.
33. Telles E., Terlevich R. The VRI colours of H II galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—286, N 1.—P. 183—208.
34. Thuan T. X. Observations and models of blue compact dwarf galaxies // *Massive Stars in Starbursts* / Ed. C. Leitherer, et al. — Cambridge: Univ. press, 1991.—P. 183.
35. Thuan T. X., Izotov Y. I. The HST study of the stellar populations in the cometary dwarf irregular galaxy NGC 2366 // *Astrophys. J.*—2005.—627, N 2.—P. 739—753.
36. Thuan T. X., Izotov Y. I., Foltz C. B. The young age of the extremely metal-deficient blue compact dwarf galaxy SBS 1415+437 // *Astrophys. J.*—1999.—525, N 1.—P. 105—126.
37. Thuan T. X., Izotov Y. I., Lipovetsky V. A. Heavy element abundances in a new sample of low-metallicity blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1995.—445, N 1.—P. 108—123.
38. Thuan T. X., Martin G. E. Blue compact dwarf galaxies. I. Neutral hydrogen observations of 115 galaxies // *Astrophys. J.*—1981.—247, N 1.—P. 823—848.
39. Tosi M., Aloisi A., Mack J., Maio M. IZw18, or the picture of Dorian Gray: the more you watch it, the older it gets // *Galaxies over the Hubble time* / Eds F. Combes, J. Palous. — Cambridge: Univ. press, 2006.—(astro-ph/0609659).

Поступила в редакцию 17.05.07