ГОЛУБЫЕ КАРЛИКОВЫЕ ГАЛАКТИКИ НИЗКОЙ МЕТАЛЛИЧНОСТИ

Н. Г. Гусева

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27
e-mail: guseva@mao.kiev.ua

Даны характеристики подкласса карликовых галактик с эмиссионными линиями – голубых карликовых галактик (ГКГ). Рассматривается проблема поиска галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов. Обсуждается проблема поиска молодых галактик в Локальной Вселенной, определение химического состава ГКГ, что позволяет тестировать современные фотоионизационные модели H II областей и модели химической эволюции галактик. Описан класс объектов, т. н. галактики Вольфа–Райе (WR), особенности массивного звездного населения в наиболее бедных металлами галактиках. Рассматриваются источники жесткого ионизирующего излучения в эмиссионных галактиках низкой металличности.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема формирования галактик – одна из основных проблем астрофизики и много усилий было потрачено на поиск первичных галактик. Определением "первичных галактик" может служить молодой возраст системы, в которой в настоящий момент происходит первая мощная вспышка звездообразования. Одним из кандидатов на роль таких галактик являются голубые карликовые галактики (ГКГ) с низким содержанием тяжелых элементов, поскольку это химически непроэволюционировавшие системы с большим количеством нейтрального водорода, низким уровнем астрации (отношение количества образовавшихся звезд к количеству газа в галактике), с мощной звездообразовательной активностью в настоящее время. Поиск и исследование таких галактик в Локальной Вселенной представляет большой интерес для астрофизики и космологии, в первую очередь потому, что космологические модели с холодной материей (CDM модели) предсказывают, что карликовые галактики малой массы все еще могут формироваться в настоящую эпоху. К тому же, несмотря на то, что к настоящему времени открыто большое количество галактик на красных смещениях $z > 3$ [37, 43], все еще не ясно, являются ли эти галактики действительно первичными? В спектрах всех галактик на больших z наблюдаются сильные абсорбционные линии тяжелых элементов, что свидетельствует о том, что эти системы сильно проэволюционировали в предыдущие эпохи звездообразования. Кроме того, малая яркость и малые размеры очень удаленных объектов не позволяют изучить их детально. Альтернативная возможность – это детальное исследование звездообразования и химического обогащения межзвездной среды в самых близких к нам ГКГ низкой металличности, которая в близких галактиках иногда меньше, чем в галактиках на больших z. Близость этих галактик позволяет изучать их в существенно больших деталях, что нельзя сделать для слабых галактик на больших красных смещениях. К тому же, в иерархической модели формирования галактик большие галактики образовались в процессе слияния меньших структур. Такие галактики, которые служат строительным материалом для формирования больших галактик, очень слабые и имеют малые размеры, чтобы их можно было наблюдать на больших расстояниях и изучать детально.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОЛУБЫХ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК

Карликовые галактики с эмиссионными линиями характеризуются наличием интенсивной вспышки звездообразования. Их спектры демонстрируют крутой подъем континуума в голубую область спектра, на который накладываются сильные разрешенные и запрещенные эмиссионные линии, создаваемые в сверхгигантских H II областях, ионизируемых излучением массивных звезд (рис. 1).

Массовая доля тяжелых элементов Z в этих галактиках, полученная по интенсивностям эмиссионных линий, находится в пределах $1/50-1/3$ от солнечного значения. ГКГ – это системы с большой массовой долей нейтрального газа. Наибольшая плотность нейтрального газа H I на луче зрения $N(\mathrm{H\,I}) = 7 \cdot 10^{21}\,\text{см}^{-2}$ получена для одной из наиболее детально изученных галактик с эмиссионными линиями SBS 0335-052E. На рис. 2 и 3 представлены спектры этой галактики в широком диапазоне длин волн. Эта уникальная галактика с одним из самых низких содержаний тяжелых элементов, была

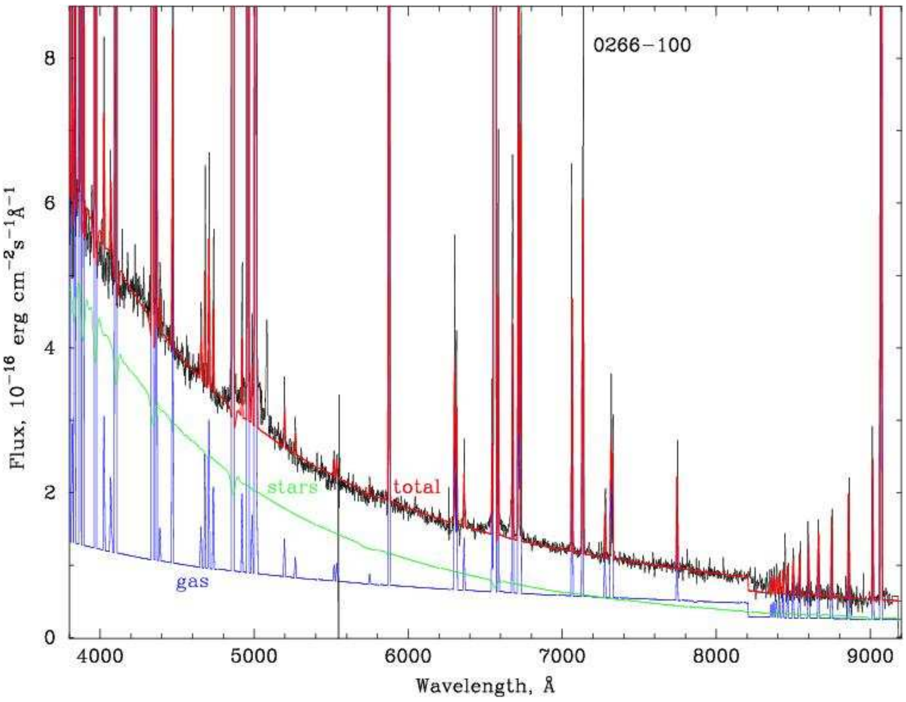

Рис. 1. Голубая компактная карликовая галактик из Обзора SDSS

открыта нами 20 лет назад в наблюдениях на 6-м телескопе САО (Россия) [15, 16]. С тех пор было проведено большое количество наблюдений этой галактики на самых крупных телескопах. В 1997 г. был открыт второй западный компонент в H I облаке вокруг SBS 0335-052, названный SBS 0335-052W с наименьшим из известных до сих пор содержанием тяжелых элементов [38, 40]. H I карта этой галактики, полученная на телескопе VLA (Very Large Array), показывает, что 2 пика интенсивности в H I облаке, 60 кпк $\times$ 60 кпк в диаметре, совпадают с двумя галактиками SBS 0335-052E и SBS 0335-052W малых размеров по сравнению с облаком нейтрального водорода. Масса нейтрального газа общего для галактик SBS 0335-052E и SBS 0335-052W газового облака во много раз больше массы звездного населения, что свидетельствует в пользу вероятной молодости этих галактик.

Массивные звезды в ГКГ по своим свойствам занимают промежуточное положение между галактиками с солнечной металличностью и галактиками с отсутствием тяжелых элементов, в которых образуются первые звезды. Поэтому карликовые галактики с эмиссионными линиями представляют собой прекрасную близкую к нам лабораторию для изучения содержания различных химических элементов, а также изучения жесткой ионизирующей радиации по наблюдениям химических элементов высокой степени ионизации в межзвездной среде с большим дефицитом металлов. Эти галактики являются также наилучшими объектами для определения первичного гелия, одного из важнейших параметров для выбора космологических моделей, изучения молодого массивного звездного населения, его взаимодействия с межзвездной средой в окружении, близком к первичному.

ГАЛАКТИКИ С ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Известно большое количество определений содержания тяжелых элементов в эмиссионных карликовых галактиках, в основном содержания кислорода. И хотя все они имеют содержание кислорода меньше солнечного, количество известных галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов с $12 + \lg \mathrm{O/H} < 7.6$ (или $Z < Z_{\odot}/20$) очень мало (рис. 4).

Со времени открытия в 1970 г. хорошо известной ГКГ I Zw 18 [41] долгое время оставался незаполненным пробел в содержании тяжелых элементов между $Z = Z_{\odot}/50$ (I Zw 18) и голубыми карликовыми галактиками с содержанием тяжелых элементов порядка $Z_{\odot}/15$ – $Z_{\odot}/20$. В дальнейшем в обзорах FBS и SBS (Первый и Второй Бюраканские обзоры), KISS (KPNO (Kitt Peak National Observatory) International Spectroscopic Survey), Гамбург/САО Обзор, Case Обзор и др. были найдены галактики с содержанием кислорода $12 + \lg \mathrm{O/H} < 7.6$. Невзирая на то, что галактики с эмиссионными линиями,

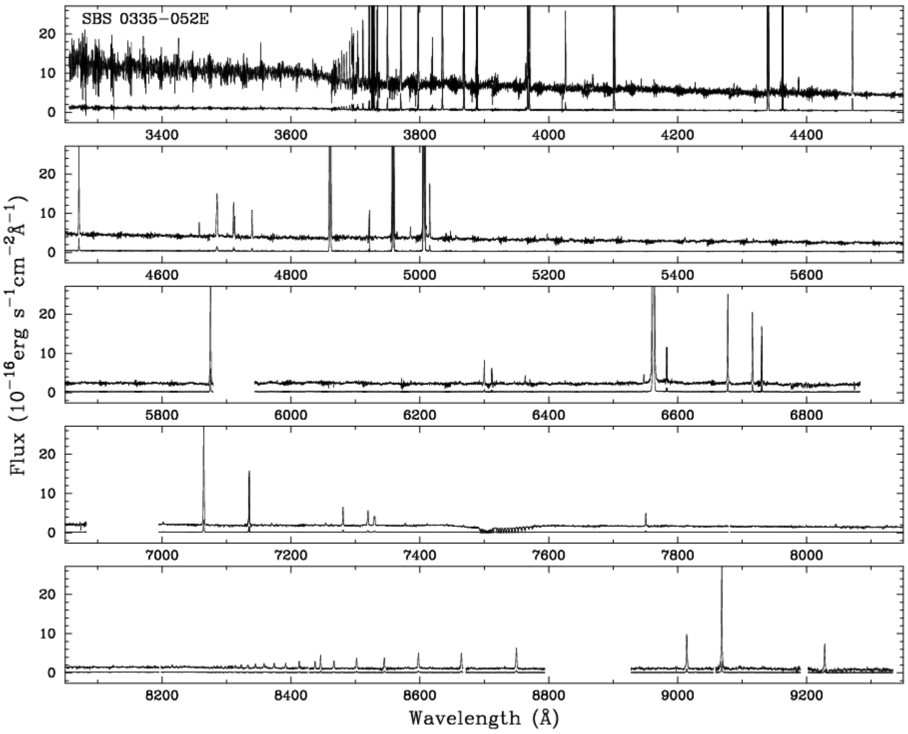

Рис. 2. Спектр галактики SDSS 0335-052E, полученный на 8-м телескопе VLT/UVES (ESO). Содержание кислорода $12 + \lg \mathrm{O/H} = 7.27$

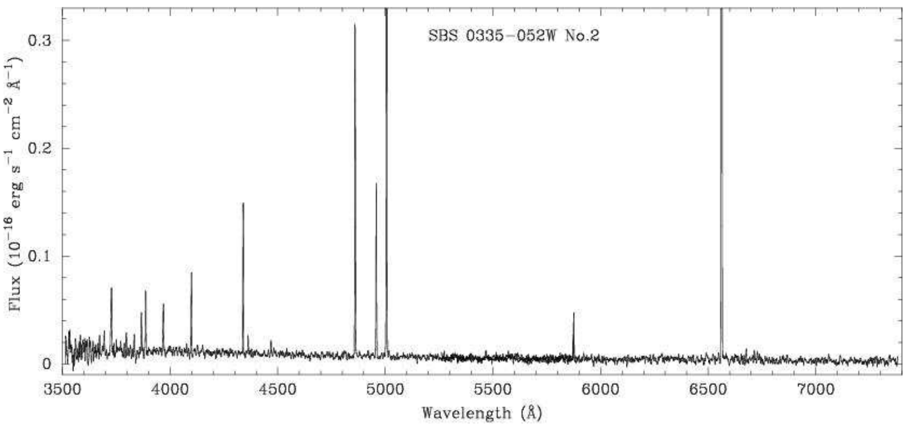

Рис. 3. Спектр галактики SDSS 0335-052W, полученный на 8-м телескопе VLT/FORS (ESO). Содержание кислорода $12 + \lg \mathrm{O/H} = 7.01$

к которым принадлежит класс ГКГ, легко найти в спектральных обзорах благодаря присутствию в их спектрах ярких эмиссионных линий, количество таких галактик в Локальной Вселенной остается очень малым и составляет по разным оценкам от 0.1 до 2% от всех известных эмиссионных галактик. До последнего времени были известны только несколько галактик с экстремально низкой металличностью (содержание кислорода $12 + \lg \mathrm{O/H} < 7.3$) (XMDG, extremely metal deficient galaxies), в их числе I Zw 18 и SBS 0335-052. Чтобы увеличить статистику таких галактик, мы предприняли поиск кандидатов в XMDG в основном среди галактик из SDSS [1], а также Обзора 2dFGRS (Two-Degree Fields Galaxy Redshift Survey) и др. Мы проанализировали более 1 млн спектров из SDSS – наиболее амбициозного обзора из всех обзоров, которые созданы до настоящего времени. В результате этой работы создана выборка

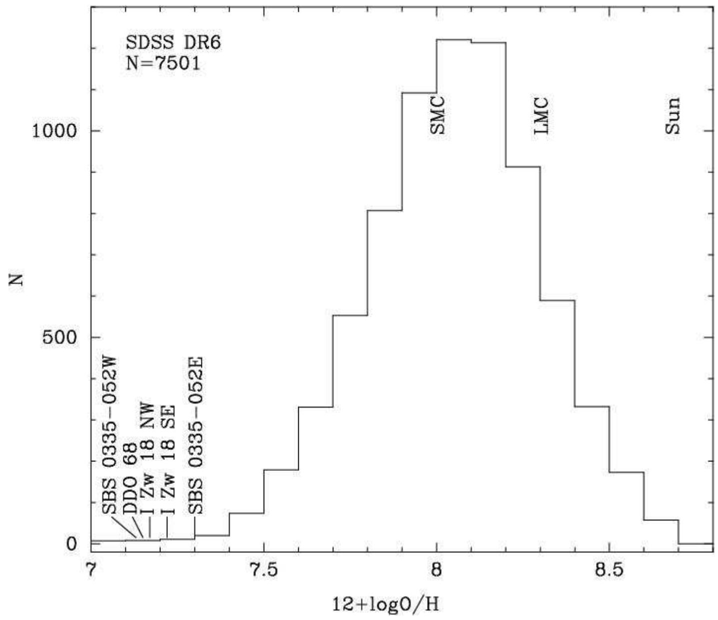

Рис. 4. Распределение количества галактик из Обзора SDSS в зависимости от содержания кислорода 12 + lg O/H

∼15 тыс. эмиссионных галактик низкой металличности. Отобранные кандидаты затем наблюдаются на больших телескопах для уточнения определения содержаний элементов. Это в первую очередь 3.6-м телескоп Объединенной Европейской Обсерватории (ESO), 8-м VLT (Very Large Telescope, ESO), 4-м телескоп Kitt Peak (USA), 3.5-м телескоп APO (Apalachi Point Observatory, USA), а также 10-м Keck (USA), 6.5-м MMT (Multiple Mirror Telescope, USA) и др. Эта выборка является базовой для дальнейшего поиска галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов, исследования проблемы происхождения и эволюции химических элементов, дальнейшего уточнения значения первичного гелия и др. Усилия последних лет привели к открытию нескольких новых XMDG с 12 + lg O/H $<$ 7.3, тем самым увеличив общее количество таких галактик до $>$ 10. В таблице 1 мы представляем общий список известных XMDG с 12 + lg O/H $<$ 7.3.

Как видно из таблицы 1 количество известных XMDGs все еще остается очень малым, но именно такие галактики представляют наибольший космологический интерес, поскольку среди всех локальных объектов именно в таких галактиках содержание элементов и физические условия наиболее близки к тем, которые должны быть в первичных галактиках. На протяжении более чем 30 лет галактика I Zw 18 оставалась эмиссионной галактикой с наибольшим дефицитом тяжелых элементов среди всех известных эмиссионных галактик и поэтому – наиболее вероятным кандидатом в молодые галактики в Локальной Вселенной. Только совсем недавно были найдены новые XMDGs с содержанием кислорода близким или даже ниже, чем в I Zw 18. Мы [24] нашли, что содержание кислорода в SBS 0335-052W 12 + lg O/H = 7.12 ± 0.03, что делает эту галактику рекордной по дефициту металлов среди всех известных эмиссионных галактик. Пустильник с соавторами [39], изучая эмиссионную галактику DDO 68, нашли, что содержание кислорода в ней равно 12 + lg O/H = 7.21 ± 0.03, что только немногим больше, чем у галактики I Zw 8. Недавно мы [25] определили содержание кислорода 7.17 ± 0.09 и 7.26 ± 0.03 в двух галактиках J0113+0052 и J2104-0035 соответственно. Обе эти галактики были найдены в SDSS Обзоре.

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГКГ

Химический состав галактик является фундаментом для понимания звездного нуклеосинтеза и эволюции галактик. Из теории известно, что кислород в H II областях является первичным элементом и вырабатывается массивными звездами с массой $M > 10 M_{\odot}$. Другие элементы α-процессов, также наблюдаемые в областях звездообразования, такие как неон, аргон, сера, вырабатываются как в процессе гидростатического горения, так и во взрывном нуклеосинтезе в одних и тех же массивных звездах. Поэтому полученные нами для ГКГ отношения Ne/O, Ar/O и S/O [7, 9, 17] не зависят от содержания кислорода, что соответствует теории звездного нуклеосинтеза. Ситуация с азотом более сложная и

Таблица 1. Список галактик с содержанием кислорода $12 + \lg \mathrm{O/H} < 7.3$ ($Z = Z_{\odot}/40$)

галактика	12 + lg O/H	телескоп
SBS 0335-052 E 1+2	7.22 ± 0.01	VLT/FORS
SBS 0335-052 E 2	7.15 ± 0.02	VLT/FORS
SBS 0335-052 E 1+2	7.27 ± 0.01	VLT/UVES
SBS 0335-052 W 1	7.21 ± 0.07	VLT/FORS
SBS 0335-052 W 2	7.01 ± 0.07	VLT/FORS
SBS 0335-052 W 4	6.87 ± 0.05	VLT/FORS
DDO 68	7.14 ± 0.03	MMT
I Zw 18 SE	7.22 ± 0.02	MMT
I Zw 18 NW	7.17 ± 0.01	MMT
J2104-0035 N	7.26 ± 0.03	3.6-м ESO
J2104-0035 1	7.26 ± 0.01	VLT/FORS
J2104-0035 3	7.09 ± 0.08	VLT/FORS
J2104-0035 4	7.05 ± 0.17	VLT/FORS
J0113+0052 1	7.24 ± 0.05	MMT
J0113+0052	7.17 ± 0.09	3.6-м ESO
J0113+0052	7.15 ± 0.23	SDSS
J1414-0208	7.28 ± 0.32	3.6-м ESO
g0405204 3	7.25 ± 0.04	VLT/FORS
g0405204	7.34 ± 0.09	3.6-м ESO

составляет предмет многочисленных дискуссий. Основные процессы нуклеосинтеза хорошо понятны – азот вырабатывается в CNO-цикле, в котором перерабатывается кислород и углерод на протяжении горения водорода в звездах. Однако, остается до конца не понятным, какие звезды в основном отвечают за производство азота. Синтез вторичного азота может протекать в звездах любых масс, но считается, что первичный азот обычно (но не всегда) синтезируется звездами средних масс (первичные элементы – это элементы, синтез которых в звездах не зависит от начального химического состава звезд). Наблюдения эмиссионных галактик дают возможность легко определить содержание многих элементов для галактик до красных смещений $z \sim 0.4$ по спектральным наблюдениям в оптическом диапазоне длин волн. Наиболее точный метод определения содержаний элементов базируется на прямом методе определения электронной температуры по отношениям линий [O III] 436.3/[O III] 500.7 нм. В этом случае содержание ионов определяется непосредственно по интенсивностям эмиссионных линий. Как правило, слабую линию [O III] 436.3 нм можно с хорошей точностью измерить только в бедных металлами эмиссионных галактиках, где H II области имеют высокую температуру из-за слабого охлаждения металлами. Поскольку ГКГ низкой металличности – это наименее химически проэволюционировавшие галактики, они представляют наилучшую возможность для тестирования химической эволюции галактик. С созданием Обзора SDSS, содержащего гигантское количество галактик, которые наблюдались однородным способом, появилась прекрасная возможность существенно увеличить статистику получаемых зависимостей и увеличить их точность. Сначала были получены содержания таких элементов как O, He, N, Ne, S, Cl, Ar, Fe для Early Data Release Обзора SDSS [23], затем для Data Release 3 (DR3) Обзора SDSS [26]. В настоящее время на базе DR7 SDSS нами создан каталог галактик с эмиссионными линиями, который содержит 15 000 галактик. На рис. 5 представлены зависимости логарифмов отношений элементов N/O, Ne/O, S/O, Cl/O, Ar/O и Fe/O от обилия кислорода $12 + \lg \mathrm{O/H}$ для всей выборки галактик (*левая сторона*, 15 000 галактик) и для галактик выборки с наиболее точными определениями содержаний элементов (*правая сторона*, 360 галактик). Галактики из Обзора SDSS представлены серыми точками, для сравнения черными точками обозначены галактики из наших выборок, наблюдения для которых проведены на самых крупных телескопах мира, в частности для задачи определения первичного гелия. Подчеркнем, что использование всех данных для существенного увеличения статистики, как это часто делается, может приводить к обнаружению артефактов, как в данном случае (рис. 5, *левая сторона*): нефизичные тренды получены для Ne, S и Ar (серые точки). В то же время, уточнённые зависимости (рис. 5, *правая сторона*) позволяют тестировать существующие фотоионизационные модели H II областей и изучать наиболее важные физические процессы в этих областях. Так, в работе [26] проанализировано влияние роли диэлектронной рекомбинации на распределение ионов серы, хлора и аргона. Скорости процессов диэлектронной рекомбинации для этих элементов плохо известны, но их можно оценить из наблюдений H II областей. Изучение больших выборок H II областей позволяет также уточнить происхождение разных элементов, роль пыли в определении содержания элементов. Полученное отношение содержаний

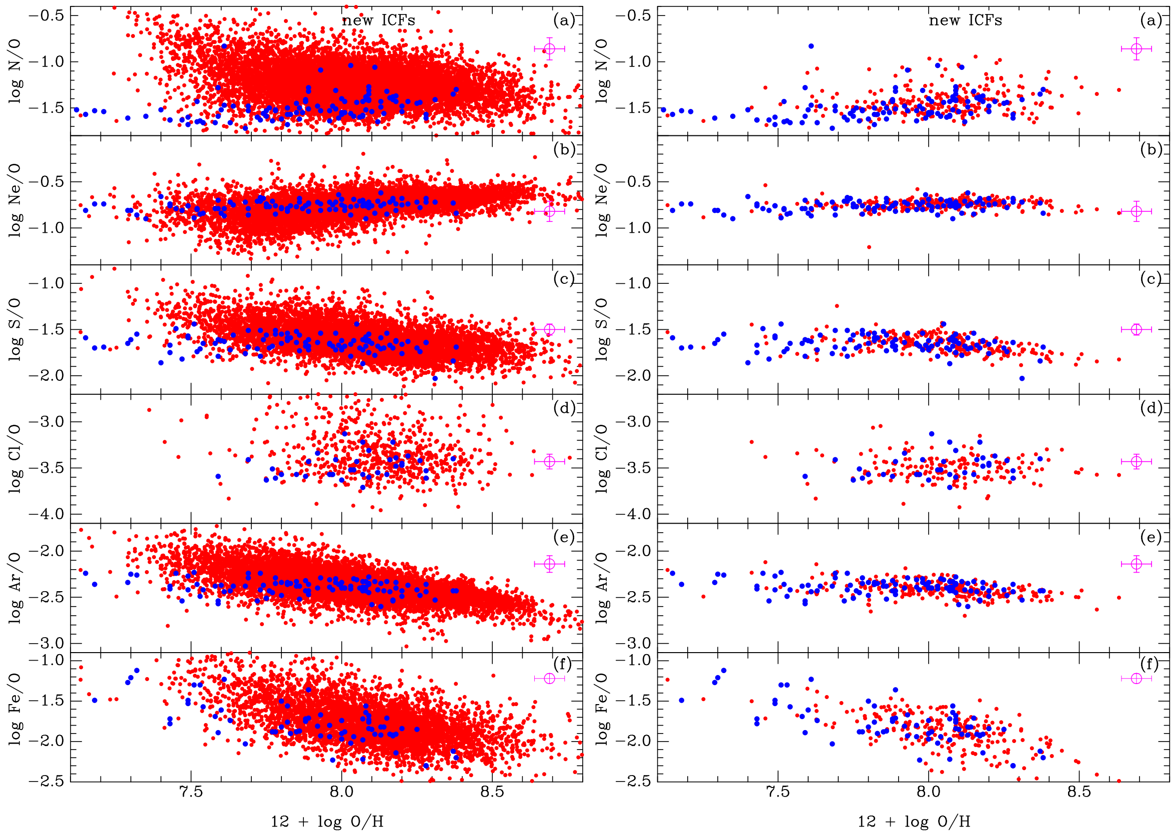

Рис. 5. Распределение отношений обилий различных тяжелых элементов в зависимости от обилия кислорода. *Левая сторона*: использована вся выборка галактик с эмиссионными линиями из SDSS (всего 15 000 галактик); *правая сторона*: из всей выборки в 15 000 галактик из SDSS отобрано 360 галактик со спектрами высокого качества

элементов Ne/O, S/O, Cl/O, Ar/O (рис. 5 *правая сторона,* $b-e$), не показывает существенных трендов относительно содержания кислорода. Наиболее надежно определяется отношение Ne/O, и получено, что оно слегка увеличивается с увеличением O/H (на 0.1 dex). Это можно объяснить связыванием ∼20% кислорода в пылевые гранулы. В H II областях с низкой металличностью кислород совсем не связан в пыль. Средние значения отношений содержаний Ne/O, S/O и Cl/O в H II областях по данным нашей выборки (рис. 5 *правая сторона,* b, c, d) согласуется с соответствующими отношениями для Солнца. С другой стороны, среднее значение отношения содержаний Ar/O в H II областях получено меньше, чем для Солнца. Это может свидетельствовать о том, что содержание аргона на Солнце определено с существенными ошибками. Отношение содержаний Fe/O (рис. 5 *правая сторона,* f) ниже в сравнении с солнечным отношением, что свидетельствует о связанности железа в пылевые гранулы. В галактиках с большой металличностью свыше 90% железа связано в пылевых гранулах. В то же время, в галактиках с низкой металличностью не наблюдается существенного связывания железа. Мы также нашли доказательства разрушения пыли на шкале времени в несколько миллионов лет. Не были найдены галактики с lg N/O <-1.6 (рис. 5 *правая сторона,* a). Это значит, что химическая эволюция эмиссионных галактик с низкой металличностью отличается от DLAs (damped Lyα systems) на больших красных смещениях. Наши данные свидетельствуют об увеличении N/O с увеличением $EW(\mathrm{H}_\beta)$. Мы интерпретируем это как доказательство постепенного обогащения H II областей азотом в процессе эволюции массивных звезд, которые образовались в последней вспышке звездообразования. Значение наблюдаемого эффекта согласуется с тем значением, которое ожидается по современным теоретическим моделям для массивных звезд.

ЗВЕЗДНОЕ НАСЕЛЕНИЕ

Определение возраста ГКГ. Со времени открытия ГКГ считалось, что в них в данный момент происходит одна из первых вспышек звездообразования. Эти представления были основаны на

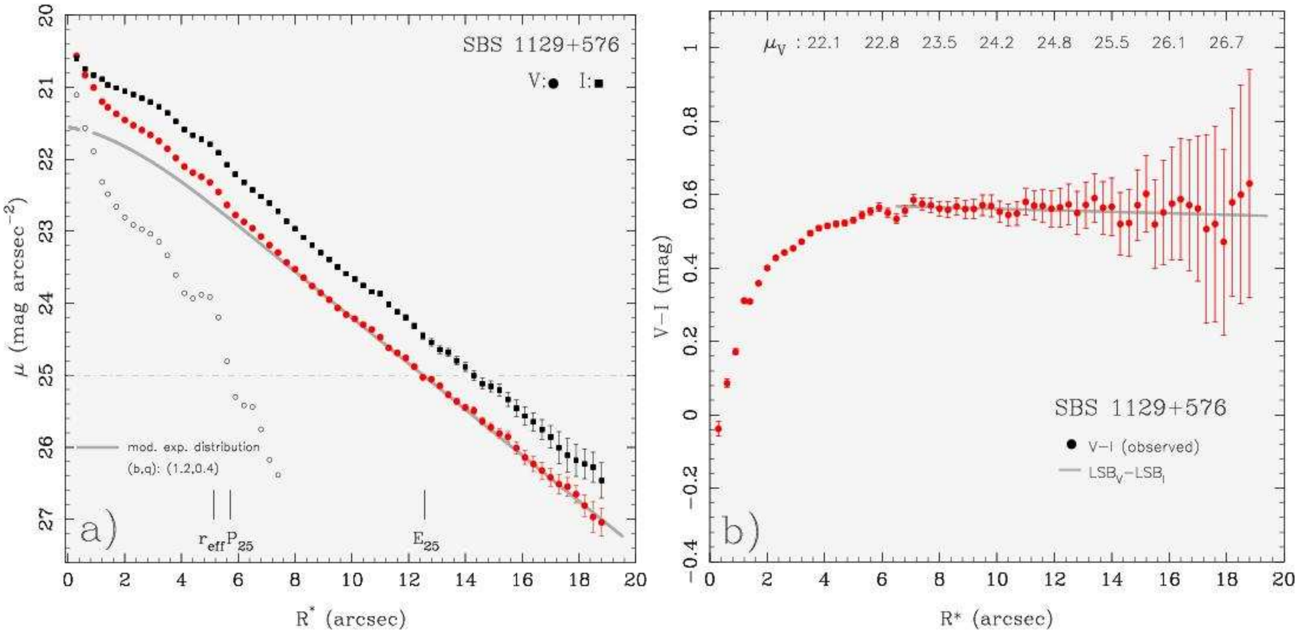

Рис. 6. Голубая карликовая галактика SBS 1129+576. Распределение усредненной поверхностной яркости (a) и показателя цвета $V-I$ (b) вдоль радиуса галактики

спектральных и фотометрических наблюдениях, в первую очередь, на голубых интегральных цветах ГКГ, дефиците тяжелых элементов по сравнению с солнечным и большом количестве нейтрального водорода. Дальнейшие многоцветные фотометрические исследования (см., например, [35]) показали, что основная часть ГКГ (>95%) кроме молодых областей звездообразования, содержат также протяженную диффузную подложку звездного населения низкой поверхностной яркости (LSB, low surface brightness), имеющую красный цвет, соответствующий поздним K- и M-звездам. Молодые области звездообразования в ГКГ, например в детально исследованных нами галактиках SBS 0335-052, SBS 0940+544, Mrk 59, Mrk 71, SBS 1415+437, SBS 1442+4250, SBS 1129+576 и др. (спектральные наблюдения с длинной щелью) [10–14, 33], имеют большие эквивалентные ширины эмиссионной линии H_β ($EW(H_\beta) \sim 15$–50 нм), что соответствует возрасту области звездообразования не более ∼4 млн лет. При этом излучение старого звездного населения, если оно есть, значительно слабее сильной эмиссии молодых звезд и ионизированного газа. Поэтому, более перспективным для обнаружения возможного старого звездного населения является исследование протяженной подложки внешних частей галактик, где вклад излучения газа и молодых звезд намного меньше. Только у малой части ГКГ с экстремально низкой металличностью внешние протяженные оболочки остаются голубыми до больших галактоцентрических расстояний (рис. 6). Эти галактики все еще остаются претендентами на роль двойников первичных галактик на больших красных смещениях. Оценки возраста звездного населения голубых внешних подложек в ряде галактик [10, 12–14, 33] проводились разными спектральными и фотометрическими методами, в первую очередь двумя методами, очень слабо зависящими от экстинкции: 1) метод, основанный на эволюции эквивалентных ширин небулярных бальмеровских эмиссионных линий с возрастом вспышки звездообразования, 2) метод, основанный на эволюции эквивалентных ширин звездных линий поглощения бальмеровской серии. Поскольку оценка возраста любым методом зависит от принятой истории звездообразования, были рассмотрены сценарии с мгновенной вспышкой звездообразования, протяженное звездообразование и непрерывное звездообразование с постоянным и переменным темпом. Третий метод основан на согласовании теоретического спектрального распределения энергии (СРЭ), полученного методом популяционного синтеза, с наблюдаемым распределением энергии в спектрах галактик. При этом было учтено переменное по галактике газовое излучение от гигантских областей H II, поскольку газовое излучение дает существенное дополнение к излучению звездной подложки, изменяя интегральные цвета. Линии излучения и газовый континуум необходимо вычесть до того, как проводить анализ цветов, сравнивая их с модельными цветами звездного населения соответствующего возраста. Межзвездное поглощение также очень искажает цвета. Распределение наблюдаемых цветов $V-I$ очень хорошо согласуется с цветами, полученными методом эволюционного популяционного синтеза, сверткой

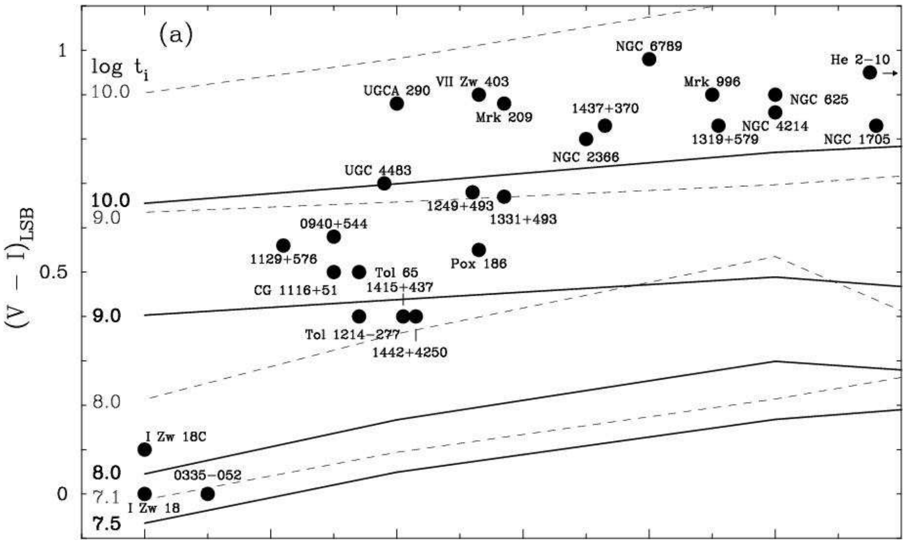

Рис. 7. Зависимость показателя цвета $(V-I)_{LSB}$ звездной подложки низкой поверхностной яркости внешних частей галактики от содержания кислорода в детально исследованных ГКГ. Пунктирными линиями показаны теоретические зависимости, рассчитанные для мгновенной вспышки звездообразования, сплошными линиями – теоретические зависимости для постоянного звездообразования

теоретических СРЭ с соответствующими полосами пропускания для разных фильтров (4-й метод). На основании этих методов были получены верхние оценки возраста старого звездного населения в детально исследованных галактиках, которые в среднем на порядок меньше возраста Вселенной. В итоге мы создали выборку из 27 неправильных эмиссионных карликовых галактик низкой металличности, для которых измерены $V-I$ цвета звездной подложки низкой поверхностной яркости внешних частей галактики $(V-I)_{LSB}$. Получен четкий тренд для звездного LSB-компонента: чем меньше металличность галактики, тем голубее ее LSB-компонент (рис. 7). Этот тренд невозможно объяснить только эффектом металличности без учета эффекта возраста звездного населения. Галактики с наибольшим дефицитом металлов имеют меньший взвешенный по светимостям возраст. Однако, все эти интегральные методы не являются прямыми. Окончательный вывод о существовании старого звездного населения можно сделать, разрешив внешнюю звездную подложку низкой поверхностной яркости на отдельные звезды. Полученная по последним наблюдениям [2] на HST/ACS-камере диаграмма показатель цвета – звездная величина (CMD) для SBS 1415+437 показала наличие множества звезд ветви красных гигантов (RGB). Возраст этой галактики определен в пределах от 2 до 10 млрд лет в зависимости от принятой металличности. Однако, для галактики I Zw 18 даже специально поставленные наблюдения (25 оборотов HST вокруг Земли, один оборот $\sim 1.56^h$ наблюдений) не позволили с уверенностью выделить ветвь RGB [46]. Если некоторые звезды и можно отнести к RGB по их положению на CMD-диаграмме, то их количество на много порядков меньше количества RGB, обычно наблюдаемых в ГКГ, а цвет голубее. Предположительная точка обрыва ветви вероятных красных гигантов (TRGB) дает возраст наиболее старых звезд в главном компоненте I Zw 18 около 1.2 млрд лет, а в C-компоненте, по-видимому, 1.5–2 млрд лет, что существенно меньше возраста Вселенной.

Звездное население ГКГ. Карликовые галактики низкой металличности со звездообразованием – единственные объекты в Локальной Вселенной, где можно наблюдать массивные звезды низкой металличности. Это дает возможность изучать свойства массивных звезд, их взаимодействие с межзвездной средой, химическое обогащение среды, а также тестировать модели эволюции массивных звезд с экстремально низкой металличностью. ГКГ характеризуются высоким темпом звездообразования на коротких временных шкалах, т. н. вспышками звездообразования продолжительностью около 10 млн лет и разделенных более длинными спокойными периодами в несколько миллиардов лет. Одна из наиболее ярких черт ГКГ – наличие мощных очагов звездообразования, ассоциирующихся с одним или несколькими компактными и яркими сверхскоплениями (SSCs, super-star clusters). В 1997 г. авторы статьи [45] по наблюдениям на HST WFPC2 получили изображение ГКГ SBS 0335-052 в V и I фильтрах и нашли, что все звездообразование в этой галактике сосредоточено в шести SSCs с возрастами меньше 25 млн лет, внутри очень компактных областей $\sim 2''$ или 520 пк в размере. Часто SSCs выстраиваются вдоль одного направления с наблюдаемым систематическим изменением поглощения и цвета. В ГКГ SBS 0335-052, как и во многих других детально изученных галактиках это объясняется распространяющейся волной звездообразования (см., например, [36]), что доказано систематическим изменением возраста областей звездообразования с положением в галактике. Полное количество звезд, ответственное за ионизацию межзвездной среды в ГКГ, может достигать 10^2–10^5 [8] (для сравнения, в нашей Галактике максимальное количество наиболее массивных звезд в H II областях – порядка десяти). Такое большое количество массивных звезд может ионизировать 10^5–$10^7\,M_\odot$ межзвездного газа. Эти массивные звезды могут также существенно влиять на динамику газа. Звездный ветер от массивных звезд и вспышки сверхновых приводят к движению газа с большими скоростями, превышающими 1000 км/с, что наблюдается в интегральных спектрах ГКГ в виде широких и очень широких эмиссионных линий. Например, в галактике Mrk 71 найдена широкая эмиссия с $FWHM \sim 4$ нм, что соответствует скорости 2400 км/с. Присутствие WR-звезд в ГКГ низкой металличности можно было ожидать, поскольку наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне показали наличие звездных линий Si IV 139.4 нм и 1403 нм с профилями P Cygni в интегральных спектрах этих галактик, что предполагает большое количество горячих массивных звезд со звездным ветром.

Галактики Вольфа–Райе. Наиболее массивные звезды быстро эволюционируют, достигая стадии WR-звезд. Галактики с чертами WR в их спектрах были известны давно, начиная с 1976 г. [3]. Отдельные WR-звезды наблюдались только в нашей Галактике и в некоторых галактиках Локальной Группы. WR-звезды в более далеких объектах детектируются непрямым методом в интегральных спектрах галактик. Остерброк, Кохен и Конти [5, 34] ввели понятие WR-галактик, определив их как галактики, в интегральных спектрах которых наблюдаются широкие звездные эмиссионные линии. Наиболее часто это линии N III 464.0 нм, C IV 465.8 нм, He II 468.6 нм и C IV 580.8 нм [8]. Впервые WR-звезды разных подтипов WN7 и WC4 в WR-галактиках с наиболее низкой металличностью были обнаружены в ГКГ I Zw 18 [18, 27]. Позже нами были найдены WR-звезды в галактике SBS 0335-052 [19], однако, только линии Si III и N II вблизи голубой WR-особенности, предполагая присутствие очень поздних азотных WR-звезд (WN10–WN11). В этом заключается отличие от WR-населения, наблюдаемого в I Zw 18.

Открытие WR-звезд в наиболее бедных металлами галактиках I Zw 18 ($Z_\odot/50$ [18, 27]) и SBS 0335-052 ($Z_\odot/40$ [19]) свидетельствует о том, что светимость голубой WR-особенности не становится равной нулю при таких низких металличностях, как того требовали модели эволюционного популяционного синтеза. Систематический поиск WR-галактик привел к созданию большой однородной выборки, отобранной из большой выборки ГКГ низкой металличности. Для этой выборки проведены наблюдения с большим отношением сигнал/шум, в основном, на 4-м и 2.1-м телескопах обсерватории Китт Пик (США) [8]. Модели предсказывают, что интенсивность широких WR-особенностей и относительное количество WR-звезд увеличивается с увеличением металличности (рис. 8). Следовательно, если массивные звезды со звездным ветром присутствуют в очень бедных металлами галактиках, то широкие особенности в их спектрах предположительно должны быть очень слабыми, стремящимися к нулю при металличностях $Z < Z_\odot/40$ [29, 32, 42]. Действительно, в более ранних работах (например [30]) получено, что WR-черты обнаружены только в галактиках с содержанием кислорода $12 + \lg \mathrm{O/H} > 7.9$. Сейчас известно большое количество WR-галактик с низкими металличностями вплоть до $Z_\odot/50$, что позволяет изучать свойства массивного звездного населения в настолько бедном металлами окружении, которое невозможно наблюдать в галактиках Локальной Группы.

Поскольку WC-звезды – это сильно проэволюционировавшие массивные звезды и только наиболее массивные звезды после стадии WN становятся WC-звездами, отношение $N(\mathrm{WC})/N(\mathrm{WN})$ особенно чувствительно к эволюционному сценарию и параметрам звездообразования (НФМ, длительность вспышки звездообразования и др.). Зависимость относительного количества WR-звезд разных подтипов $N(\mathrm{WC})/N(\mathrm{WN})$ от металличности в WR-галактиках хорошо моделируется вспышечным характером звездообразования и находится в основном в хорошем согласии с предсказаниями эволюционных популяционных моделей [42]. Зависимость отношения $N(\mathrm{WC})/N(\mathrm{WN})$ от металличности для галактик нашей выборки очень отличается от зависимости для случая протяженного сценария звездообразования, полученной эмпирически по наблюдениям отдельных WR-звезд в галактиках Локальной Группы [31].

Зависимость относительного количества WR-звезд всех типов к количеству всех массивных звезд $N(\mathrm{WN{+}NC})/N(\mathrm{O{+}WR})$ и наблюдаемые эквивалентные ширины широких голубых и красных особенностей $EW(\lambda\,465.0$ нм) и $EW(\lambda\,580.8$ нм) хорошо согласуются с предсказаниями эволюционных моделей популяционного синтеза [42] для металличностей больше, чем $\sim 1/10$ от солнечного. При этом нами получено отсутствие согласия для галактик с экстремально низкой металличностью, для которых $N(\mathrm{WC})/N(\mathrm{WN})$, $EW(\lambda\,465.0$ нм) и $EW(\lambda\,580.8$ нм), полученные из наблюдений, в несколько раз больше по сравнению с теорией. Полученные разногласия привели к необходимости пересмотра существующих моделей. В результате Медером и его группой было предложено и учтено в моделях вращение звезд, что позволило существенно уменьшить разногласия [28].

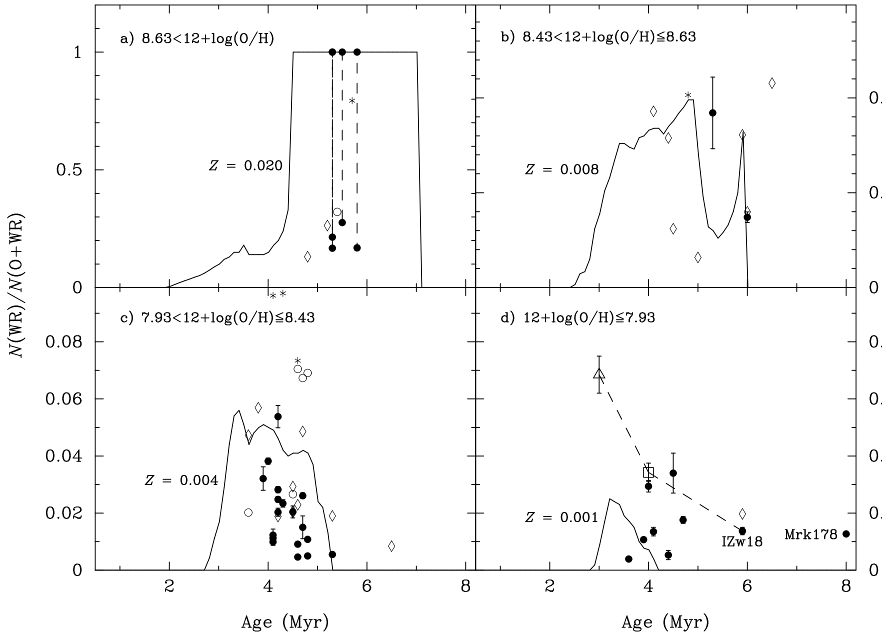

Рис. 8. Зависимость отношения количества всех звезд Вольфа–Райе ко всем массивным звездам N(WR)/N(O+WR) от возраста вспышки звездообразования для разных интервалов металличности (a– d). Сплошной линией нанесены теоретические модели [42] для мгновенный вспышки звездообразования

ЖЕСТКОЕ ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ЭМИССИОННЫХ ГАЛАКТИКАХ НИЗКОЙ МЕТАЛЛИЧНОСТИ

В проблеме формирования галактик одним из основных является вопрос, как формируются галактики из первичного газа и как они взаимодействуют с окружающей средой? Поскольку в ранней Вселенной еще нет тяжелых элементов, термодинамика газа в основном контролируется охлаждением молекулярным водородом, и первые звезды III типа Населения ожидаются очень массивными и горячими. Их эффективная температура порядка 10^5 K, поэтому они должны иметь очень жесткую ионизирующую радиацию с энергией фотонов больше 4 Ryd (54.4 эВ). Такие первые звезды должны быть очень эффективными в ионизации водорода и гелия, и в спектрах первичных галактик ожидаются сильные эмиссионные линии He II. Таким образом, жесткая радиация является основным свойством первичных галактик на больших красных смещениях. Наилучшими объектами для изучения жесткой ионизирующей радиации в Локальной Вселенной остаются ГКГ очень низкой металличности. Жесткость ионизирующей радиации в эмиссионных галактиках низкой металличности, как известно, увеличивается с уменьшением металличности (см., например, [4]). Подтверждением этого служит тот факт, что сильная небулярная эмиссионная линия He II 468.6 нм часто наблюдается именно в спектрах эмиссионных галактик низкой металличности, с потоками, которые увеличиваются с уменьшением металличности ионизированного газа [8]. Кроме эмиссии He II в спектрах некоторых галактик наблюдаются также эмиссионные линии тяжелых элементов высокой ионизации. В работах [6, 20] впервые обнаружена эмиссионная линия высокой ионизации [Fe V] 422.7 нм в галактиках Tol 1214-277 и SBS 0335-052E. Наличие этой линии так же, как и линии He II 468.6 нм, требует присутствия ионизирующей радиации с энергией фотонов выше 4 Ryd (рис. 9). Еще больше впечатляет открытие Изотовым с соавторами [20] эмиссии в линиях [Fe VI] – [Fe VII] в галактике SBS 0335-052E, что значит, что эта галактика содержит интенсивную радиацию с энергиями фотонов, превышающими ∼7 Ryd (∼100 эВ), то есть энергию мягкого рентгеновского излучения. Позже [21] были открыты линии [Ne V] 334.6 нм, 342.6 нм в спектре галактики Tol 1214-277 (наблюдения на 3.6-м телескопе (ESO)). Присутствие этих линий свидетельствует о наличии радиации с энергией фотонов выше 7.1 Ryd, что соответствует ионизирующему рентгеновскому излучению со светимостью $L_x = 10^{37}$–10^{40} эрг/с. Такая жесткая радиация подтверждена открытием эмиссионных линий [Ne V] и [Fe VI] – [Fe VII] в новом спектре, полученном на 8-м телескопе VLT (ESO) для галактики Tol 1214-277 [22]. В работе [44] исследована большая выборка галактик низкой металличности и найдены 4 галактики с эмиссией [Ne V], 15 галактик с эмиссией [Fe V] и 465 галактик с эмиссией He II. Авторы сделали вывод о том, что существует общий тренд для эмиссии в [Ne V], [Fe V] и He II с увеличением значений абсолютных интенсивностей этих линий при меньших металличностях. Однако, полученный большой разброс в

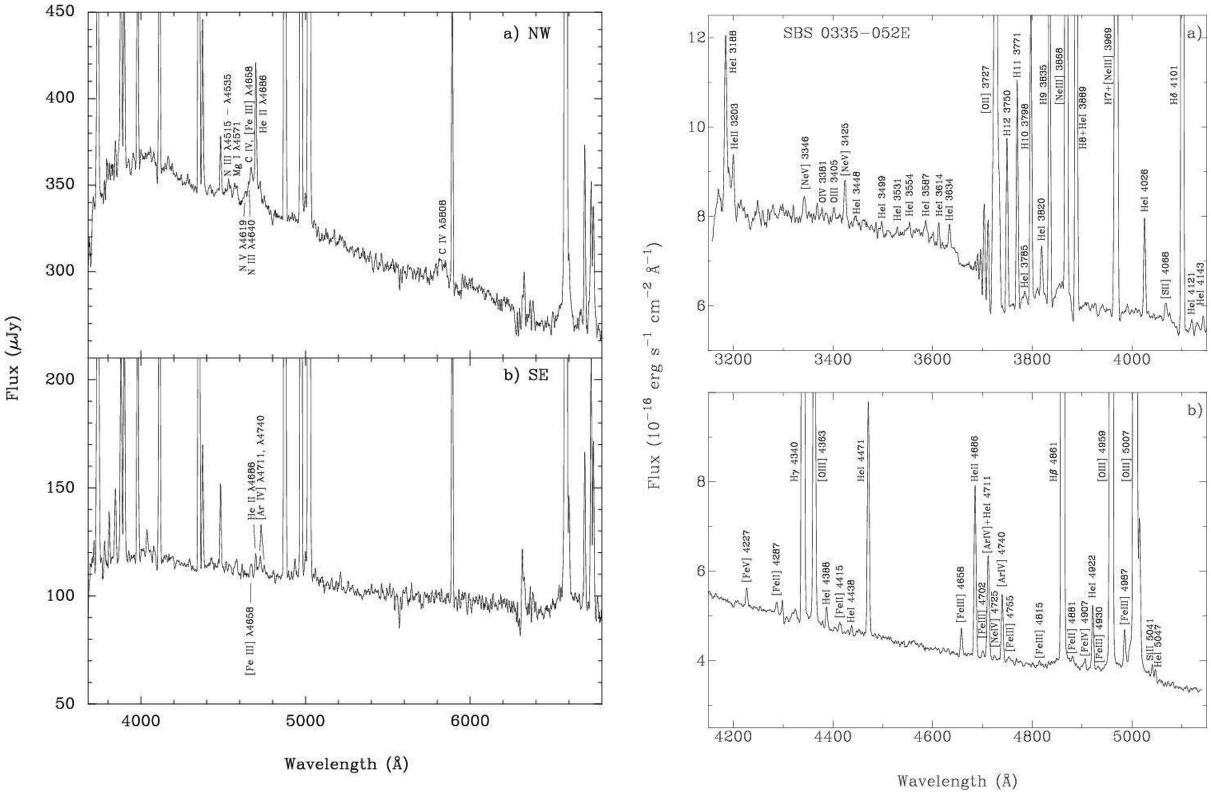

Рис. 9. *Левая сторона:* спектр галактики I Zw 18, полученный на 6.5-м телескопе MMT (Multiple Mirror Telescope, USA) [18]: NW-компонент (*a*) и SE-компонент галактики (*b*). В NW-компоненте наблюдаются широкие особенности в голубой $\lambda\,465.0$ нм и красной $\lambda\,580.0$ нм областях спектра. *Правая сторона:* эмиссионные линии высокой ионизации He II 468.6 нм (4 Ryd), [Fe V] 422.7 нм (4 Ryd), [Ne V] 334.6, 342.5 нм (7 Ryd) в галактике SBS 0335-052E с низким содержанием тяжелых элементов [44], голубой (*a*) и красный (*b*) части спектра

зависимостях означает, что металличность не является единственным параметром, контролирующим жесткость ионизирующей радиации.

Жесткость ионизирующей радиации с энергией фотонов больше 4 Ryd не зависит от возраста вспышки звездообразования, измеряемого по $EW(\mathrm{H}_\beta)$. Получено четкое отсутствие эмиссии He II в очень молодых вспышках 3–4 млн лет с $EW(\mathrm{H}_\beta) > 30$ нм. Это значит, что массивные звезды главной последовательности (ГП) и даже их потомки не являются источниками ионизации. Сильная линия He II наблюдается в областях с $EW(\mathrm{H}_\beta)$ $\sim$5–30 нм, можно предположить, что менее массивные звезды и их потомки также дают вклад в ионизацию гелия. Современные фотоионизационные модели звезд ГП и WR-звезд не могут объяснить наблюдаемые параметры эмиссии He II.

Рентгеновская светимость рентгеновских двойных больших масс (HMXBs), наблюдаемая в нескольких ГКГ с низкой металличностью, в принципе может объяснить эмиссию [Ne V]. Однако, однозначной корреляции не получено. Наиболее вероятным источником эмиссии [Ne V] являются быстрые радиационные ударные волны со скоростями $\sim$450 км/с, движущиеся сквозь плотную межзвездную среду с электронной плотностью в несколько сотен см$^{-3}$. Эти ударные волны создаются в процессе эволюции массивных звезд с массами $\sim 50-100\,M_\odot$, рождающихся в очень компактных и плотных SSCs. Более мягкое ионизирующее излучение, ответственное за эмиссию в линии He II, вероятно, ассоциируется с менее массивными проэволюционировавшими звездами или с радиационными ударными волнами, которые двигаются сквозь менее плотную межзвездную среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование голубых карликовых галактик (ГКГ) позволяют решить ряд интересных проблем астрофизики и космологии, в частности, с большой точностью получить содержание первичного гелия, найти галактики с экстремально низким содержанием тяжелых элементов, близким к первичному. Получить распределение содержаний разных химических элементов от металличности в широком диапазоне металличностей, что позволяет тестировать фотоионизационные модели H II областей и модели химической эволюции галактик. Только в ГКГ можно наблюдать массивное звездное население, включая звезды Вольфа–Райе (WR) и SSCs (super-star clusters) в окружении, близком к первичному, исследовать взаимодействие этих звезд с межзвездной средой.

Работа выполнена при частичной поддержке совместной программой НАН Украины и Национального космического агентства Украины "Космомикрофизика".

[1] *Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agúros M. A., et al.* The seventh data release of the Sloan digital sky survey // Astrophys. J. – 1991. – **377**, N 1. – P. 115–125.

[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] *Allen D. A., Wright A. E., Goss W. M.* The dwarf emission galaxy He2-10 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1976. – **177**, N 1. – P. 91–97.

[4] *Campbell A., Terlevich R., Melnick J.* The stellar populations and evolution of H II galaxies. I. High signal-to-noise optical spectroscopy // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1986. – **223**, N 2. – P. 811–825.

[5] *Conti P. S.* Wolf–Rayet galaxies – an introduction and a catalog // Astrophys. J. – 1991. – **377**, N 1. – P. 115–125.

[6] *Fricke K. J., Izotov Y. I., Papaderos P., et al.* An imaging and spectroscopic study of the very metal-deficient blue compact dwarf galaxy Tol 1214-277 // Astron. J. – 2001. – **121**, N 1. – P. 169–181.

[7] *Guseva N. G., Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Kniazev A. Y.* Spectrophotometry with low and moderate spectral resolution for the blue compact galaxies // Bull. Spec. Astrophys. Obs. – 1996. – **41**, N 1. – P. 41–51.

[8] *Guseva N. G., Izotov Y. I., Thuan T. X.* A spectroscopic study of a large sample of Wolf–Rayet galaxies // Astrophys. J. – 2000. – **531**, N 2. – P. 776–803.

[9] *Guseva N. G., Chaffee F. H., Izotov Y. I., et al.* Low-metallicity blue compact dwarf galaxies discovered in the Hamburg/SAO spectral survey // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. – 2000, N 3. – P. 106–107.

[10] *Guseva N. G., Izotov Y. I., Papaderos P., et al.* The evolutionary status of the low-metallicity blue compact dwarf galaxy SBS 0940+544 // Astron. and Astrophys. – 2001. – **378**, N 2. – P. 756–776.

[11] *Guseva N. G., Papaderos P., Izotov Y. I., et al.* Pox 186: An ultracompact galaxy with dominant ionized gas emission // Astron. and Astrophys. – 2004. – **421**, N 2. – P. 519–528.

[12] *Guseva N. G., Papaderos P., Izotov Y. I., et al.* Spectroscopic and photometric studies of low-metallicity star-forming dwarf galaxies. I. SBS 1129+576 // Astron. and Astrophys. – 2003. – **407**, N 1. – P. 75–90.

[13] *Guseva N. G., Papaderos P., Izotov Y. I., et al.* Spectroscopic and photometric studies of low-metallicity star-forming dwarf galaxies. II. HS 1442+4250 // Astron. and Astrophys. – 2003. – **407**, N 1. – P. 91–104.

[14] *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.

[15] *Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Guseva N. G., Stepanian J. A.* SBS 0335-052 – the most heavy element deficient blue compact dwarf galaxy // Special Astrophysical Observatory. – 1989. – Preprint N **30**. – P. 1–9.

[16] *Izotov Y. I., Guseva N. G., Lipovetskii V. A., et al.* Spectrophotometry of 83 BCDG candidates from the Second Byurakan Survey // Astron. and Astrophys. Transactions.. – 1993. – **3**, N 1. – P. 197–236.

[17] *Izotov Y. I., Guseva N. G., Lipovetskii V. A., et al.* Unusually low heavy-element abundance found in the blue compact dwarf galaxy SBS 0335-052 // Nature. – 1990. – **343**, N 1. – P. 238–240.

[18] *Izotov Y. I., Foltz C. B., Green R. F., et al.* I ZW 18: A New Wolf–Rayet Galaxy // Astrophys. J. Lett. – 1997. – **487**, N 1. – P. L37–L41.

[19] *Izotov Y. I., Chaffee F. H., Foltz C. B., et al.* Helium abundance in the most metal-deficient blue compact galaxies: I Zw 18 and SBS 0335-052 // Astrophys. J. – 1999. – **527**, N 2. – P. 757–777.

[20] *Izotov Y. I., Chaffee F. H., Schaerer D.* Deep spectroscopy of the low-metallicity blue compact dwarf galaxy SBS 0335-052 // Astron. and Astrophys. – 2001. – **378**, N 1. – P. L45–L48.

[21] *Izotov Y. I., Noeske K. G., Guseva N. G., et al.* Discovery of the high-ionization emission line [Ne V] 3426 in the blue compact dwarf galaxy Tol 1214-277 // Astron. and Astrophys. – 2004. – **415**, N 1. – P. L27–L30.

[22] *Izotov Y. I., Papaderos P., Guseva N. G., et al.* Deep VLT spectroscopy of the blue compact dwarf galaxies Tol 1214-277 and Tol 65 // Astron. and Astrophys. – 2004. – **421**, N 2. – P. 539–554.

[23] *Izotov Y. I., Stasińska G., Guseva N. G., Thuan T. X.* Abundance patterns in the low-metallicity emission-line galaxies from the Early Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // Astron. and Astrophys. – 2004. – **415**, N 1. – P. 87–94.

[24] *Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G.* SBS 0335-052W: The lowest metallicity star-forming galaxy known // Astrophys. J. – 2005. – **632**, N 1. – P. 210–216.

[25] *Izotov Y. I., Papaderos P., Guseva N. G., et al.* Two extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // Astron. and Astrophys. – 2006. – **454**, N 1. – P. 137–141.

[26] *Izotov Y. I., Stasińska G., Meynet G., et al.* The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // Astron. and Astrophys. – 2006. – **448**, N 3. – P. 955–970.

[27] *Legrand F., Kunth D., Roy J.-R., et al.* Detection of WR stars in the metal-poor starburst galaxy I Zw 18 // Astron. and Astrophys. – 1997. – **326**, N 1. – P. L17–L20.

[28] *Maeder A.* Massive Star Populations and Chemical Abundances from New Models with Rotation // Astron. and Astrophys. – 1991. – **242**, N 1. – P. 93.–111.

[29] *Maeder A.* The relative numbers of Wolf–Rayet stars in galaxies with active star formation. The metallicity effect // Astron. and Astrophys. – 1991. – **242**, N 1. – P. 93.–111.

[30] *Masegosa J., Moles V., del Olmo* Massive star formation in H II galaxies – the presence of Wolf–Rayet stars // Astron. and Astrophys. – 1991. – **244**, N 2. – P. 273–279.

[31] *Massey P., Johnson O.* Evolved massive stars in the Local Group. II. A new survey for Wolf–Rayet stars in M33 and its implications for massive star evolution: evidence of the "Conti Scenario" in action // Astrophys. J. – 1998. – **505**, N 3. – P. 793–827.

[32] *Meynet G.* Wolf–Rayet population syntheses for starburst galaxies // Astron. and Astrophys. – 1995. – **298**, N 2. – P. 767–789.

[33] *Noeske K. G., Guseva N. G., Fricke K. J., et al.* The cometary blue compact dwarf galaxies Mkn 59 and Mkn 71. A clue to dwarf galaxy evolution? // Astron. and Astrophys. – 2000. – **361**, N 1. – P. 33–52.

[34] *Osterbrock D. E., Cohen R. D.* Two galaxies with Wolf–Rayet features in their spectra // Astrophys. J. – 1982. – **261**, N 1. – P. 64–69.

[35] *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. – 1996. – **120**, N 2. – P. 207–215.

[36] *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.

[37] *Papovich C., Dickinson M., Ferguson H. C.* The stellar populations and evolution of Lyman break galaxies // Astrophys. J. – 2008. – **677**, N 2. – P. 1100–1119.

[38] *Pustil'nik S. A., Brinks E., Thuan T. X., et al.* VLA H I Line Observations of the extremely metal-poor blue compact dwarf galaxy SBS 0335-052 // Astron. J. – 2001. – **121**, N 3. – P. 1413–1424.

[39] *Pustil'nik S. A., Kniazev A. Y., Pramskij A. G.* Study of DDO 68: nearest candidate for a young galaxy? // Astron. and Astrophys. – 2005. – **443**, N 1. – P. 91–102.

[40] *Pustil'nik S. A., Lipovetsky V. A., Izotov Y. I., et al.* Detection of a second optical component in the H I cloud of the young dwarf galaxy SBS 0335-052: New observations with the 6-m telescope // Astron. Lett. – 1997. – **23**, N 3. – P. 308–311.

[41] *Sargent W. L. W., Searle L.* Isolated Extragalactic H II Regions // Astrophys. J. – 1970. – **162**, N 1. – P. L155–L172.

[42] *Schaerer D, Vacca W. D.* New models for Wolf–Rayet and O star populations in young starbursts // Astrophys. J. – 1998. – **497**, N 2. – P. 618–632.

[43] *Steidel C. C., Giavalisco M., Pettini M., et al.* Spectroscopic confirmation of a population of normal star-forming galaxies at redshifts $Z > 3$ // Astrophys. J. – 1996. – **462**, N 1. – P. L17–L32.

[44] *Thuan T. X., Izotov Y. I.* High-ionization emission in metal-deficient blue compact dwarf galaxies // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2005. – **161**, N 2. – P. 240–270.

[45] *Thuan T. X., Izotov Y. I., Lipovetsky V. A.* Hubble Space Telescope observations of the blue compact dwarf SBS 0335-052: a probable young galaxy // Astrophys. J. – 1997. – **477**, N 2. – P. 661–679.

[46] *Якобчук 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. – P. 432–446.