

УДК 524.724-36

АНДРОМЕДА IV: НОВАЯ ГАЛАКТИКА С ОЧЕНЬ НИЗКОЙ МЕТАЛЛИЧНОСТЬЮ В МЕСТНОМ ОБЪЕМЕ

© 2008 С. А. Пустильник¹, А. Л. Теплякова¹, А. Ю. Князев^{2,1}, А. Н. Буренков¹¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия²Южно-Африканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, ЮАР

Поступила в редакцию 27 декабря 2007 г.; принята в печать 12 января 2008 г.

And IV является карликовой галактикой с низкой поверхностной яркостью (LSB), на расстоянии 6.1 Мпк, расположена на небе близко к галактике М 31. В этой работе представлены результаты спектроскопии на 6-м телескопе САО (БТА) двух ярчайших HII-областей в And IV. В обеих зарегистрирована линия [OIII] λ 4363 Å, что позволило определить содержание кислорода в них классическим T_e -методом. Их параметры $12+\log(O/H)$ равны 7.49 ± 0.06 и 7.55 ± 0.23 . Сравнение с оценками по двум наиболее надежным полуэмпирическому и эмпирическому методам показывает хорошее согласие с прямыми определениями O/H. Для абсолютной величины And IV в B-полосе $M_B = -12.6$ полученная величина O/H хорошо соответствует “стандартному” соотношению между O/H и L_B , найденному для карликовых иррегулярных галактик Местного Обьема. And IV является новым представителем немногочисленной группы богатых газом галактик с очень низкой металличностью межзвездной среды. Очень большой диапазон M (массы водорода) для LSB галактик с близкими металличностями и светимостями указывает на ограниченность простых моделей химической эволюции для этого класса галактик.

1. ВВЕДЕНИЕ

Галактики с очень низкой металличностью были открыты более 35 лет назад. Первой и наиболее экстремальной среди них была галактика I Zw 18 [1]. Так же как и подавляющее большинство известных на сегодня примерно 60-ти галактик поздних типов с содержанием кислорода в межзвездной среде $12+\log(O/H)\leq 7.65$ (или $Z(ISM)\leq Z_\odot/10$),¹ называемых также extremely Metal-Deficient, или XMD-галактиками (смотри, например [3]), она является голубой компактной галактикой (BCGs). Это маломассивные галактики с интенсивно протекающей вспышкой звездообразования (ЗО), выделяются по спектрам с сильными эмиссионными линиями, типичными для HII-областей. Они составляют незначительную часть маломассивных галактик поздних типов в местной Вселенной (несколько процентов). В свою очередь, только ~2% всех известных BCGs являются XMD BCG (например, [4], [5]). Основным интерес к этой малой группе связан с тем, что по своим свойствам они похожи на предсказываемые молодые галактики на больших красных смещениях.

Некоторые из XMD BCG сами могут быть довольно молодыми галактиками, у которых возраст самых старых видимых звезд не превышает 1–2 млрд. лет. К ним относятся Tol 65 [6], SBS 0335–052 E,W [7, 8], и DDO 68 DDO68 [9, 10]. Однако большинство XMD BCG, вероятно, являются более старыми объектами, связанными с более спокойными прародительскими галактиками, такими как карликовые иррегулярные (DIG) и карликовые галактики низкой поверхностной яркости (LSB). Конкретные варианты возможных эволюционных сценариев для XMD BCG можно прояснить их детальными многоволновыми исследованиями.

Среди XMD-объектов известно около полутора десятков DIG и LSB карликовых галактик. Большинство из них расположены в Местной и ближайших группах или в общем поле внутри Местного Обьема ($D < 10$ Мпк). К ним относятся Leo A и GR 8 [11], Sextans A и B [12, 13], UGC 4483 [14], DDO 53 [15], UGCA 292 [16], SDSS J1215+5223 [5] и ESO489–G56 [17]. Все эти XMD-галактики находятся на расстояниях от 0.7 до 5 Мпк. Имеются также четыре XMD LSBD-галактики с расстояниями от 6.5 до 25 Мпк. Преимущественно небольшие расстояния перечисленных DIG и LSBD-галактик (в сравнении с типичными расстояниями до известных XMD BCG) обусловлены эффектами

¹ Величина $12+\log(O/H)$ для Солнца, согласно [2], принята равной 8.66.

селекции. На сегодня возможно получить спектры хорошего качества и оценить отношение О/Н для довольно “скромных” НII-областей только для тех галактик, которые расположены на достаточно близких расстояниях.

Благодаря близости, такие галактики можно детально изучать во многих диапазонах длин волн. Поэтому происхождение их очень низкой металличности может быть понято лучше, и тогда аналогичные вопросы могут быть поставлены и для более далеких XMD BCG. На сегодня известно всего девять XMD LSB-галактик. Из них только четыре находятся на расстояниях ближе ~ 6 Мпк. Поэтому открытие еще одного подобного объекта будет полезно для изучения их групповых свойств и возможных различий как проявления различных эволюционных сценариев или различий в начальных условиях и окружении. В этой работе мы докладываем о том, что And IV, карликовая LSB-галактика Местного Объема с необычно высоким отношением $M(\text{H I})/L_B \sim 13$ [18], является еще одной XMD-галактикой.

And IV, открытая более 30-ти лет назад ван ден Бергом [19], находится на небе близко к галактике M 31 (на $41.9'$ от ее центра), и в течение долгого времени ее природа оставалась неопределенной. По результатам фотометрии на HST ее индивидуальных звезд в работе Фергюсон и др. ([20], далее ФГВ) она была отождествлена как фоновая карликовая галактика, не связанная с M 31. Для интегральной величины в B -полосе $B_{\text{tot}} = 16.6$ и расстоянии до And IV в 6.1 Мпк (ФГВ; [21]) ее абсолютная величина $M_B = -12.6$. При центральной поверхностной яркости в V -полосе $\mu_V^0 = 23.3 \text{ mag arcsec}^{-2}$ [20] эта галактика должна быть классифицирована как карликовая LSB-галактика. Из-за близости яркой звезды ($\sim 10^m$) к основному телу галактики ее изучение затруднено. ФГВ получили изображения And IV в фильтре $\text{H}\alpha$ и отождествили в ней шесть НII-областей. Для 4-х из этих областей они получили спектры на 4.2-м телескопе WHT, покрывающие диапазон от 3700 до 7200 Å. Для трех наиболее ярких областей (N 3, 4 и 6 по обозначениям ФГВ) с помощью так называемого эмпирического калибратора R_{23} они оценили содержание кислорода О/Н. Оно оказалось близким во всех областях, и его средняя величина $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.90$. Мы повторили анализ этих спектров, добавив к списку эмиссионных линий, представленных в работе ФГВ, слабую линию [OIII] $\lambda 4363$ Å, видимую на графиках спектров для НII-областей N 3 и 4. Получившееся содержание О/Н, рассчитанное классическим T_e -методом, оказалось примерно вдвое ниже (хотя с довольно большими ошибками), по сравнению с тем, что дали ФГВ. Для того, чтобы прояснить истинную

величину металличности And IV и улучшить точность оценки О/Н в этой галактике, мы получили спектры ее НII-областей с 6-м телескопом CAO (БТА).

Статья состоит из следующих частей. В разделе 2 описаны наблюдения, полученные данные и их обработка. В разделе 3 мы представляем результаты обработки и анализа, а в разделе 4 обсуждаем And IV как новую XMD-галактику и формулируем наши выводы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

2.1. Наблюдения

Спектральные наблюдения с длинной щелью были проведены в ночи 12 января 2007 г. и 12 января 2008 г. на мультимодовом инструменте SCORPIO [22], установленном в первичном фокусе БТА. Использовалась гризма VPHG550G с ПЗС-приемником EEV 42–40 с числом пикселей $2\text{K} \times 2\text{K}$. Эта комбинация давала возможность зарегистрировать диапазон $2.1 \text{ \AA pixel}^{-1}$ $3500\text{--}7500 \text{ \AA}$ с масштабом поперек щели $2.1 \text{ \AA pixel}^{-1}$ и шириной инструментального профиля FWHM 12 \AA . С учетом бинирования масштаб вдоль щели был $0''.357 \text{ pixel}^{-1}$, при полной протяженности объекта $6'$. При наблюдениях 12.01.07 длинная щель (шириной $1.0''$) была ориентирована вдоль направления, соединяющего две ярчайшие НII-области в And IV (N 3 и 4), что соответствовало позиционному углу $\text{PA} = -26^\circ$. Параллактический угол в течение времени экспозиции менялся от 60° до 67° , а зенитные расстояния — в интервале от 38° до 52° . Было получено шесть 15-минутных экспозиций при качестве изображений FWHM $2.5\text{--}2.9''$. При наблюдениях 12.01.08 длинная щель проходила только через ярчайшую НII-область N 3 при позиционном угле $\text{PA} = -132.5^\circ$. Параллактический угол в течение времени экспозиции менялся в диапазоне от 63.0° до 58.6° и зенитное расстояние — в интервале от 48° до 56° . В последнем случае ориентация щели была достаточно близка к направлению атмосферной дисперсии, так что ее эффект был несущественен. Были получены четыре 15-минутных экспозиции при качестве изображений FWHM $1.3''$. Обе ночи были фотометрическими. Для привязки по длине волны экспозиции спектра объекта сопровождалась (до и после) спектром сравнения от He–Ne–Ag лампы. Для проведения стандартной обработки двумерных спектров были получены также изображения кадра смещения (баеса) и плоского поля. В течение ночи наблюдались также спектрофотометрические

стандарты Feige 110, G191B2B и Feige 34 из работы [23], использованные для получения кривых спектральной чувствительности и калибровки по потоку.

2.2. Обработка

К полученным данным была применена стандартная последовательность обработки длинно-целевых спектров с использованием IRAF²⁾ и MIDAS³⁾. Она включала следующие шаги. Следы космических частиц с двумерных спектров удалялись с помощью MIDAS. С помощью IRAF пакета CCDRED был вычтен баес и проведена коррекция за плоское поле. После этого двумерный спектр был переведен в шкалу длин волн и из него вычтен спектр ночного неба. Затем, используя данные по спектрофотометрическим стандартам, двумерные спектры были переведены в шкалу абсолютных потоков. После этого, используя континуум от ярчайшей HII-области, все спектры были “выпрямлены”. Наконец, на каждом двумерном спектре была выделена меньшая по длине щели подобласть, центрированная на максимум континуума в спектре и все шесть (в январе 2007 г.) или четыре (в январе 2008 г.) спектра были суммированы без весов для получения двумерного спектра полной экспозиции. Одномерные спектры центральных частей исследованных HII-областей были извлечены простым суммированием 18 и 6 строк вдоль щели (~6.3" и 2.1") для области N 3, соответственно для наблюдений в январе 2007 и 2008 г., и 9 строк (~3.1") — для области N 4. Эти размеры соответствовали областям, где “главная” линия [OIII]λ4363, необходимая для определения электронной температуры T_e , была заметна над уровнем шума. Значительные отличия в размере извлеченной центральной части для области N 3 связаны с двумя факторами. Во-первых, как видно из HST-снимка в работе ФГВ, эта область имеет значительную вытянутость в направлении примерно север-юг и протяженность 4.5" × 2.5". В первом случае длинная щель была ориентирована приблизительно вдоль большой оси, а во втором — вдоль малой. Во-вторых, размер звездного кружка рассеяния для этих наблюдений отличался очень значительно (~2.7" в сравнении с 1.3").

²⁾IRAF: the Image Reduction and Analysis Facility распространяется Национальной обсерваторией оптической астрономии (NOAO), управляемой Ассоциацией университетов для исследований в астрономии (AURA) в рамках кооперативного соглашения с Национальным научным фондом США (NSF).

³⁾MIDAS — сокращение для Munich Image Data Analysis System — пакета для обработки астрономических данных, разработанного в Южной европейской обсерватории (ESO).

Все эмиссионные линии были измерены с использованием программ на командном языке MIDAS, детально описанных в работе [24]. Эти программы определяют уровень континуума, проводят робастную оценку шума и вписывают в отдельные линии после вычитания континуума гауссовский профиль. В блендированные (при данном спектральном разрешении) эмиссионные линии, в зависимости от состава бленд, одновременно вписывались две или три гауссовские компоненты. Ошибки интенсивностей одиночных линий включали следующие составляющие. Первая связана с пуассоновской статистикой числа фотонов в потоке в линии. Вторая компонента связана с проведением уровня континуума под эмиссионной линией. Она дает основной вклад в ошибки измерения потоков слабых линий. Для потоков линий, входящих в бленды, имеется дополнительная ошибка, возникающая из-за вписывания гауссиан. Наконец, ошибки, связанные с вариациями кривой спектральной чувствительности, дают дополнительную погрешность в относительных интенсивностях линий. Для наблюдений в январе 2007 г. полуамплитуда вариаций кривой спектральной чувствительности по всему рабочему диапазону ($\lambda > 3650 \text{ \AA}$) не превышала 1%, а в январе 2008 г. — 0.5%. Для определения полной ошибки интенсивности линии все компоненты суммировались квадратично. Эти полные ошибки были корректно переведены в ошибки всех вычисляемых параметров.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Интенсивности линий и содержания элементов

В табл. 1 приведены относительные интенсивности всех эмиссионных линий, использованных для определения содержаний элементов в HII-областях N 3 и 4 галактики And IV. Кроме того, в ней приведены рассчитанные величины коэффициента поглощения $S(H\beta)$ и эквивалентных ширин (EWs) бальмеровских абсорбций и измеренный поток в эмиссионной линии $H\beta$. Одномерные спектры этих областей показаны на рис. 1 и 2. Поглощение в этих областях невелико: $S(H\beta) \lesssim 0.1-0.2$, что согласуется с величиной, ожидаемой при прохождении света через Галактику. Низкая величина поглощения характерна также для большинства галактик с очень низкой металличностью.

Для вычисления содержаний элементов O, Ne, N в HII-областях And IV мы использовали стандартный метод, описанный Аллером [25], и следовали процедурам, описанным детально Пэйджелом и др. [26] и Изотовым и др. [27]. Содержания элементов и физические параметры определялись

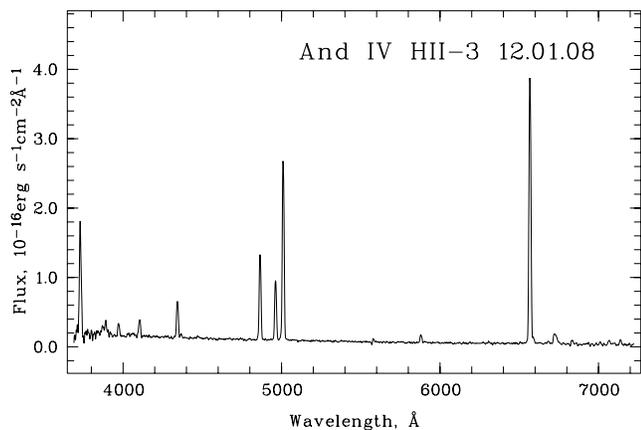
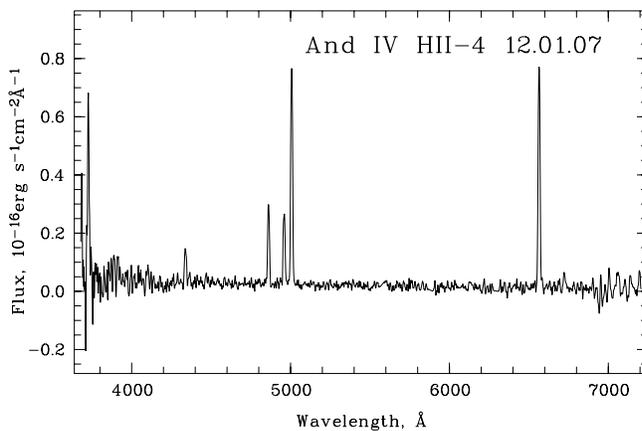
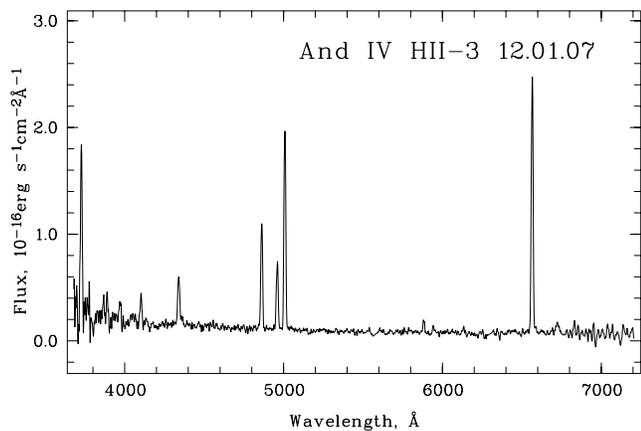


Рис. 1. Спектры НII-области N 3.

Рис. 2. Спектр НII-области N 4.

ки к типичным значениям для XMD BCGs [30], что, по-видимому, указывает на общие закономерности обогащения тяжелыми элементами в обоих типах галактик и достаточно близкие начальные функции масс звезд в области больших и промежуточных масс.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

4.1. Сравнение O/H с другими определениями

в рамках классической двухзонной модели НII-области [28], как описано в деталях в наших недавних статьях [13, 24, 29]. Рассчитанные электронные температуры T_e и плотности N_e , также как и содержания кислорода, азота и неона, даны в табл. 2. Оценки O/H , полученные для области N 3 в январе 2007 г. и январе 2008 г., характеризуются параметром $12+\log(O/H)$, равным 7.40 ± 0.11 и 7.56 ± 0.08 , а для области N 4 — 7.55 ± 0.23 . Взвешенное среднее по двум независимым измерениям O/H в области N 3 (полученное по O/H и его ошибке в табл. 2) равно параметру $12+\log(O/H)=7.49\pm 0.06$. Значение O/H для области N 4, хотя и имеет значительно большую ошибку, хорошо согласуется со средним O/H для области N 3. Полученная величина O/H позволяет классифицировать эту карликовую LSB-галактику как один из самых низкометаллических объектов, известных в Местном Объеме. Полученные для НII-области N 3 средневзвешенные отношения содержаний N/O ($\log(N/O)=-1.78\pm 0.15$) и Ne/O ($\log(Ne/O)=-0.77\pm 0.12$) в пределах ошибок близ-

Отношение сигнал/шум в слабой линии $[OIII]\lambda 4363 \text{ \AA}$, необходимой для определения электронной температуры в НII-области, в полученных нами спектрах невелико ($\sim 2-5$). Поэтому независимые возможности получить оценки O/H и сравнить их с величиной O/H , определенной прямым методом, безусловно, представляют интерес. Имеется несколько эмпирических методов, использующих для оценки O/H интенсивности сильных линий кислорода и других элементов. Обзор этих методов с оценкой их точности дан в недавней работе [31]. Кроме того, Изотов и Туан [32] предложили полуэмпирический метод, в котором электронная температура T_e оценивается по сумме интенсивностей сильных линий кислорода с использованием соотношения, найденного в [33] сопоставлением наблюдательных данных по большой выборке BCG и большой сетке моделей НII-областей. После того, как T_e оценена, дальнейшие вычисления содержаний элементов проводятся так же, как в классическом методе. Изотов и Туан [32] сравнили для своей выборки (около 12-ти низкометаллических НII-областей в 8-ми галактиках) определения O/H прямым методом, несколькими эмпирическими и их полуэмпирическим методом. Наименьшие различия с результатами, полученными прямым методом, дали их полуэмпирический метод ($\text{rms}=0.06 \text{ dex}$)

Таблица 1. Интенсивности линий и физические параметры HII-областей N 3 и N 4 в галактике And IV

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ион	HII-3, 12.01.07		HII-3, 12.01.08		HII-4	
	$F(\lambda)/F(H\beta)$	$I(\lambda)/I(H\beta)$	$F(\lambda)/F(H\beta)$	$I(\lambda)/I(H\beta)$	$F(\lambda)/F(H\beta)$	$I(\lambda)/I(H\beta)$
3727 [O II]	1.744±0.156	1.723±0.165	1.419±0.079	1.669±0.097	2.166±0.274	2.427±0.321
3869 [Ne III]	0.173±0.048	0.170±0.048	0.139±0.046	0.160±0.054	...	...
3889 He I + H8	0.144±0.027	0.167±0.042	0.192±0.049	0.242±0.064	...	...
3967 [Ne III] + H7	0.089±0.019	0.114±0.039	0.116±0.008	0.157±0.016	...	...
4101 H δ	0.198±0.028	0.217±0.039	0.184±0.011	0.227±0.018	0.287±0.085	0.311±0.116
4340 H γ	0.489±0.040	0.501±0.046	0.448±0.015	0.494±0.019	0.459±0.074	0.484±0.132
4363 [O III]	0.062±0.015	0.062±0.015	0.043±0.008	0.046±0.009	0.094±0.050	0.098±0.053
4471 He I	...	...	0.019±0.006	0.020±0.007	...	...
4861 H β	1.000±0.077	1.000±0.079	1.000±0.027	1.000±0.028	1.000±0.098	1.000±0.146
4959 [O III]	0.664±0.055	0.656±0.055	0.699±0.055	0.680±0.020	0.936±0.097	0.925±0.096
5007 [O III]	2.132±0.053	2.059±0.052	2.132±0.053	2.059±0.052	3.050±0.268	3.000±0.266
5876 He I	0.101±0.023	0.100±0.023	0.074±0.007	0.064±0.006	...	...
6548 [N II]	0.015±0.013	0.015±0.014	0.008±0.006	0.006±0.005	0.003±0.017	0.002±0.015
6563 H α	2.430±0.183	2.408±0.200	3.426±0.082	2.793±0.074	3.122±0.275	2.744±0.267
6584 [N II]	0.050±0.026	0.049±0.026	0.027±0.027	0.022±0.023	0.019±0.036	0.017±0.032
6717 [S II]	0.104±0.017	0.103±0.017	0.101±0.009	0.081±0.008	0.166±0.040	0.144±0.036
6731 [S II]	0.036±0.014	0.035±0.014	0.087±0.010	0.070±0.008	0.022±0.033	0.019±0.029
C(H β), dex	0.00±0.10		0.25±0.03		0.16±0.11	
EW(abs), \AA	1.65±1.78		2.30±1.01		0.35±11.6	
$F(H\beta)^a$	14.51±1.43		16.88±0.29		3.62±0.25	
EW(H β), \AA	136±7		150±7		108±8	

^a В единицах 10^{-16} эрг/(см²·с).

и эмпирическая формула, предложенная в работе [31] (rms=0.07 dex):

$$12 + \log(O/H) = 6.486 + 1.401 \log(R_{23}),$$

где

$$R_{23} = (I(3727) + I(4959) + I(5007))/I(H\beta).$$

Эти результаты мы и используем для сравнения с прямыми определениями. Оценки для параметра $12 + \log(O/H)$, полученные для двух наблюдений области N 3 (январь 2007 г. и январь 2008 г.) и обл. 4 полуэмпирическим методом, дают соответственно следующие величины: 7.48, 7.49 и 7.76. Оценки тех же параметров по эмпирической формуле из [31] дают следующие величины: 7.36, 7.39 и 7.61. Таким образом, для HII-области N 3 полуэмпирические оценки O/H для обоих сетов наблюдений (7.48, 7.49) очень близки к средневзвешенной величине,

определенной прямым методом по этим же спектрам (7.49). Оценки по эмпирической формуле из [31] для области N 3 хорошо сходятся между собой для двух сетов, но дают O/H систематически ниже на ~ 0.1 dex. Для области N 4 оба метода дают значимо более высокие значения O/H (7.76 и 7.61), которые, однако, согласуются с прямой оценкой (7.55), учитывая ее большую ошибку 0.23 dex. Таким образом, оценка O/H с помощью наиболее надежных полу- и эмпирических методов, подтверждает, что область N 3 имеет очень низкую металличность. Для области N 4 имеющиеся данные не противоречат очень низкому значению O/H, хотя не исключено, что оно выше, чем для области N 3, на ~ 0.10 – 0.15 dex.

Мы можем аналогично использовать данные спектральных наблюдений этих областей из работы ФГВ. Во-первых, на графиках спектров HII-

Таблица 2. Содержания O, N и Ne в HII-областях N 3 и 4 галактики And IV

	N 3, 12.01.07	N 3, 12.01.08	N 4
$T_e(\text{OIII})(10^3 \text{ K})$	19.38 ± 2.79	16.02 ± 1.54	19.89 ± 6.51
$T_e(\text{OII})(10^3 \text{ K})$	15.50 ± 2.08	14.22 ± 1.30	15.65 ± 4.72
$N_e(\text{SII})(\text{cm}^{-3})$	10 ± 10	316 ± 288	10 ± 10
$\text{O}^+/\text{H}^+(\times 10^{-5})$	1.356 ± 0.476	1.757 ± 0.453	1.856 ± 1.429
$\text{O}^{++}/\text{H}^+(\times 10^{-5})$	1.183 ± 0.396	1.905 ± 0.459	1.709 ± 1.272
$\text{O}/\text{H}(\times 10^{-5})$	2.538 ± 0.620	3.662 ± 0.645	3.654 ± 1.906
$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	7.40 ± 0.11	7.56 ± 0.08	7.55 ± 0.23
$\text{N}^+/\text{H}^+(\times 10^{-6})$	0.343 ± 0.159	0.178 ± 0.146	...
ICF(N)	1.872	2.084	...
$\log(\text{N}/\text{O})$	-1.60 ± 0.23	-1.99 ± 0.36	...
$\text{Ne}^{++}/\text{H}^+(\times 10^{-5})$	0.213 ± 0.089	0.323 ± 0.134	...
ICF(Ne)	2.146	1.992	...
$\log(\text{Ne}/\text{O})$	-0.74 ± 0.21	-0.77 ± 0.20	...

областей N 3 и 4, представленных в статье ФГВ, видна слабая, но измеримая линия [OIII] λ 4363 Å. Мы оценили ее интенсивность по этим графикам, основываясь на относительной амплитуде этой линии и близкой к ней линии H γ . Для того, чтобы провести по этим данным вычисление содержаний элементов классическим T_e -методом подобно тому, как это делалось для наших спектров, мы пересчитали скорректированные за $S(\text{H}\beta)$ интенсивности линий в области N 3 (для которой $S(\text{H}\beta)$ в работе ФГВ больше 0) к измеренным относительным потокам. Для удобства читателя пересчитанные потоки в линиях в области N 3, а также для области N 4 даны в табл. 3 вместе с оцененными нами величинами относительных потоков в линии [OIII] λ 4363 Å. Результаты наших вычислений физических условий и содержаний элементов приведены в табл. 4.

Величины O/H для HII-областей N 3 и 4, выведенные по этим данным прямым T_e -методом, равны соответственно 7.63 ± 0.14 и 7.72 ± 0.16 . Оценки по полуэмпирическому методу [32] дают для этих областей близкие значения O/H, на уровне 7.64 и 7.70, а по эмпирической формуле из [31] мы снова получаем O/H систематически ниже: 7.48 и 7.57 соответственно. Таким образом, все наши оценки величины O/H по спектрам HII-областей N 3 и 4 из работы ФГВ согласуются в пределах погрешностей

с результатами, полученными в наших наблюдениях. При этом имеется указание на то, что O/H в области N 4 несколько выше.

Сравнение относительных интенсивностей линий обеих HII-областей, измеренных в нашей работе и в статье ФГВ, показывает общее согласие, за исключением величины $I(\text{H}\alpha)$ в январе 2007 г. и $I([\text{OII}]\lambda 3727)$ в области N 3. $I(\text{H}\alpha)$ оказалась несколько ниже теоретической величины, однако можно считать, что это различие находится в пределах ошибок. Наша оценка $I([\text{OII}]\lambda 3727)$ оказывается несколько меньше, чем у ФГВ. Скорее всего, это связано с выделением разных частей области N 3 в нашей работе и в работе ФГВ. Эффект дифференциальной атмосферной рефракции (см., например [34]) был несущественен. В январе 2008 г. при изображениях звезд FWHM=1.3'' ориентация щели была близка к оптимальной для минимизации этого эффекта. При наблюдениях в январе 2007 г. ориентация щели была почти перпендикулярна направлению атмосферной рефракции, но для ширины щели в 1.0'' и среднем FWHM=2.7'' эффект дифференциальной рефракции практически замыкается.

Таким образом, суммируя сравнение наших прямых определений O/H в двух ярчайших HII-областях And IV с их наиболее надежными прямыми оценками, а также с оценками, полученными

Таблица 3. Интенсивности линий в галактике And IV III, в областях N 3 и N 4 согласно Фергюсон и др. (2000) при значениях $C(H\beta)$ и $EW(abs)$, полученных нами

$\lambda_0(\text{\AA})$ Ион	III-область N 3		III-область N 4	
	$F(\lambda)/F(H\beta)$	$I(\lambda)/I(H\beta)$	$F(\lambda)/F(H\beta)$	$I(\lambda)/I(H\beta)$
3727 [O II]	2.280±0.248	2.627±0.311	1.810±0.196	1.846±0.217
4101 H δ	0.290±0.034	0.312±0.047	0.300±0.034	0.306±0.044
4340 H γ	0.450±0.046	0.478±0.054	0.490±0.054	0.495±0.058
4363 [O III]	0.045±0.014	0.048±0.015	0.061±0.025	0.062±0.025
4861 H β	1.000±0.111	1.000±0.112	1.000±0.111	1.000±0.112
4959 [O III]	0.620±0.065	0.614±0.065	1.060±0.115	1.056±0.115
5007 [O III]	2.060±0.227	2.028±0.224	3.050±0.337	3.038±0.337
6548 [N II]	0.033±0.010	0.029±0.009	0.027±0.010	0.026±0.010
6563 H α	3.240±0.361	2.782±0.338	2.860±0.322	2.791±0.342
6584 [N II]	0.100±0.014	0.086±0.012	0.080±0.012	0.078±0.013
6717 [S II]	0.110±0.014	0.093±0.013	0.130±0.016	0.127±0.017
6731 [S II]	0.080±0.012	0.068±0.011	0.090±0.013	0.088±0.014
$C(H\beta)$, dex	0.20±0.14		0.03±0.15	
$EW(abs)$, \AA	0.00±2.73		1.20±11.66	
$F(H\beta)^a$	8.8		4.5	
$EW(H\beta)$, \AA	171		684	
V_{rad} , км/с	244±15		250±13	

^a В единицах 10^{-16} эрг/(см²·с).

Таблица 4. Содержания O и N в III-областях N 3 и N 4 галактики And IV, вычисленные нами на основе данных из ФГВ из табл. 3

	N 3	N 4
$T_e(OIII)(10^3 \text{ K})$	16.64±2.75	15.27±2.98
$T_e(OII)(10^3 \text{ K})$	14.49±2.28	13.88±2.57
$N_e(SII)(\text{cm}^{-3})$	45±226	10±10
$O^+/H^+(\times 10^{-5})$	2.535±1.117	2.028±1.083
$O^{++}/H^+(\times 10^{-5})$	1.684±0.670	3.196±1.623
$O/H(\times 10^{-5})$	4.219±1.318	5.224±1.952
$12+\log(O/H)$	7.63±0.14	7.72±0.16
$N^+/H^+(\times 10^{-6})$	0.679±0.207	0.673±0.247
ICF(N)	1.664	2.576
$\log(N/O)$	-1.57±0.19	-1.48±0.23

по спектрам этих областей из работы ФГВ, мы делаем вывод о том, что все они хорошо согласуются с нашими определениями. Эмпирическая формула из [31], по-видимому, дает в этих областях систематически заниженные значения O/H на величину ~ 0.1 dex. С учетом большой разницы в точности определения O/H для областей N 3 и 4 (7.49 ± 0.06 и 7.55 ± 0.23 соответственно) мы принимаем для дальнейшего параметр $12+\log(O/H)$ равным 7.49 ± 0.06 .

4.2. Соотношение светимость—металличность и свойства And IV

Так как And IV оказалась новой XMD LSB карликовой галактикой, интересно проверить, насколько хорошо она вписывается в известную зависимость металличность—светимость (L—Z) для DIG и близких галактик, найденную в работе [12]. Усовершенствованная версия соотношения L—Z для B-полосы, которая учитывает все доступные данные для DIG в Местном Объеме, представлена в работе [35]. Похожее соотношение L—Z

Таблица 5. Сравнительные параметры галактик And IV и ESO 489-56

Параметр	And IV	ESO 489-56	Ссылки
B_{tot}	16.60	16.08	[21, 43]
A_B	0.27	0.28	[42]
$V_{\text{hel}}(\text{km s}^{-1})$	234	491	[40, 41]
Distance (Mpc)	6.1	5.0	[21]
M_B	-12.6	-12.63	[21, 43]
$12+\log(O/H)$	7.49	7.49	эта работа, [17]
$M(\text{HI})(10^8 M_{\odot})$	1.8	0.16	[18, 41]
$M(\text{HI})/L_B (M_{\odot}/L_{\odot})$	13	0.85	[18, 41]

для независимой выборки DIG было получено в работе [36]. Еще одно подобное соотношение для этого типа галактик внутри объема с радиусом 5 Мпк получено в работе [11]. Все три соотношения весьма близки между собой. Однако формула из работы [36] имеет наименьшее среднеквадратичное отклонение (0.15 dex) и поэтому мы в дальнейшем используем ее

$$12 + \log(O/H) = 5.65 - 0.149 \times M_B$$

для того, чтобы сравнить параметры, полученные для And IV.

Для абсолютной величины And IV $M_B = -12.60$ [21] величина O/H , ожидаемая по зависимости $L-Z$, должна быть 7.53. Величина O/H , полученная в работе ФГВ на 0.37 dex (или $2.5 \times \text{r.m.s.}$) больше, чем ожидаемая. Наша величина $12+\log(O/H)=7.49 \pm 0.06$ согласуется с соотношением $L-Z$ очень хорошо.

Изотов и др. [37] предложили усовершенствованные формулы для вычисления содержания элементов в HII -областях, которые учитывают последние изменения в оценках атомных параметров ионов. Это приводит к небольшим систематическим различиям с результатами стандартной модели, используемой в этой работе. В частности, для O/H эта разница изменяется приблизительно линейно от +0.05 dex до +0.005 dex для T_e в диапазоне от 10000 до 20000 K, т.е. новые формулы дают немного более высокие величины O/H . Так как многие последние определения O/H (например [32]) приведены в новой шкале, для корректного сравнения мы приводим эту величину и для And IV. Для этого к нашей величине O/H надо добавить ~ 0.01 dex. Таким образом, в новой шкале And IV с $12+\log(O/H)=7.50 \pm 0.06$ входит в пятерку самых низкометаллических DIG/LSBD в Местном Объеме.

4.3. And IV и разнообразие свойств LSB-галактик

Возвращаясь к одному из пунктов Введения о возможности изучать разнообразие свойств и эволюционных сценариев карликовых галактик в Местном Объеме, стоит отметить значительные отличия в свойствах And IV от других XMD LSB-галактик. В частности, в табл. 5 мы сравниваем глобальные характеристики And IV и другой близкой XMD LSB карликовой галактики ESO 489-56 (AM 0624-260). Обе галактики имеют очень близкие величины O/H и M_B , однако их водородные массы $M(\text{HI})$ различаются в 11 раз. Соответственно, отношения $M(\text{HI})/L_B$ для обеих LSB-галактик отличаются в 15 раз.

В моделях химической эволюции LSB-галактики обычно трактуются как объекты с самым низким темпом звездообразования. Это связывают с очень низкой поверхностной плотностью вещества и неэффективной самогравитацией дисков в таких объектах. Из-за низкого темпа звездообразования энергосодержание незначительно, и вновь образованные тяжелые элементы должны удерживаться в родительской галактике. Таким образом, ожидается, что химическая эволюция LSB-галактик должна хорошо описываться моделью “closed-box”, в которой металличность межзвездной среды тесно связана с массовой долей газа. Хотя хороших данных по металличностям LSB-галактик для сравнения их с моделями эволюции пока недостаточно, в некоторых работах по таким объектам (например [38]) значимых отклонений от предсказаний модели “closed-box” не обнаружено. Приведенный выше пример показывает, что среди ближайших LSB-галактик такая тесная связь отсутствует. К аналогичному выводу приходят Галас и др. [39] по результатам изучения большой выборки LSB-галактик в ближнем ИК-диапазоне. Это означает, что для понимания химической эволюции даже “наиболее простых” галактик требуются

более совершенные модели, которые учитывают дополнительные существенные факторы.

4.4. Выводы

- С помощью прибора SCORPIO на БТА получены спектры с достаточно хорошим отношением С/Ш для двух ярчайших НII-областей LSBД-галактики Местного Объема And IV, расположенной на расстоянии ~ 6.1 Мпк.
- Содержания кислорода в НII-областях N 3 и 4, определенные классическим T_e -методом, согласуются друг с другом. Параметр $12+\log(O/H)$ (в старой шкале) равен 7.49 ± 0.06 и 7.55 ± 0.23 соответственно. Наиболее надежные полуэмпирический и эмпирический методы оценки O/H дают величины, близкие к посчитанным прямым методом. В новой шкале принятая металличность And IV равна $12+\log(O/H)=7.50$. Этот объект является еще одной редкой LSBД-галактикой в Местном Объемe с очень низкой металличностью ($Z \lesssim Z_{\odot}/14$).
- При сопоставлении глобальных параметров And IV и другой XMD LSB-галактики в Местном Объемe, ESO 489-56, имеющих очень близкие металличности и светимости, выявляется их огромная разница по массе НI, что указывает на трудности простых моделей химической эволюции LSB-галактик.

БЛАГОДАРНОСТИ

С. А. Пустильник и А. Л. Теплякова признательны за поддержку этой работы грантом РФФИ N 06-02-16617. Авторы выражают благодарность И. Д. Караченцеву, обратившему их внимание на интересную галактику And IV. Авторы также благодарны рецензенту Н. Г. Гусевой за полезные замечания и советы, которые позволили улучшить первоначальный вариант статьи. В работе использована информация из внегалактической базы данных NED (NASA/IPAC Extragalactic Database), которая управляется Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с НАСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Searle and W. L. W. Sargent, *Astrophys. J.* **173**, 25 (1972).
2. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, et al., *Astron. Astrophys.* **417**, 751 (2004).
3. D. Kunth and G. Östlin, *Astron. Astrophys. Rev.* **10**, 1 (2000).
4. S. Pustilnik, A. Kniazev, A. Ugryumov, and A. Pramskij, *Astrophys. Space Sci.* **284**, 795 (2003a), arXiv: astro-ph/0301089.
5. A. Y. Kniazev, E. K. Grebel, L. Hao, et al., *Astrophys. J.* **593**, L73 (2003).
6. P. Papaderos, K. J. Fricke, T. X. Thuan, et al., *Astron. Astrophys.* **352**, L57 (1999).
7. P. Papaderos, Y. I. Izotov, K. J. Fricke, et al., *Astron. Astrophys.* **338**, 43 (1998).
8. S. A. Pustilnik, A. G. Pramskij, A. Y. Kniazev, *Astron. Astrophys.* **425**, 51 (2004b).
9. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, A. G. Pramskij, *Astron. Astrophys.* **443**, 91 (2005).
10. S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, A. Y. Kniazev, *Astron. Lett.* accepted (2007), arXiv: astro-ph/0712.4007.
11. L. van Zee, E. Skillman, and M. Haynes, *Astrophys. J.* **637**, 269 (2006).
12. E. D. Skillman, R. C. Kennicutt, and P. W. Hodge, *Astrophys. J.* **347**, 875 (1989).
13. A. Y. Kniazev, E. Grebel, S. A. Pustilnik, et al., *Astron. J.* **130**, 1558 (2005).
14. Y. I. Izotov and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **567**, 875 (2002).
15. S. Pustilnik, A. Zasov, A. Kniazev, et al., *Astron. Astrophys.* **400**, 841 (2003b).
16. L. van Zee, *Astrophys. J.* **543**, L31 (2000).
17. J. Ronnback and N. Bergvall, *Astron. Astrophys.* **302**, 353 (1995).
18. J. N. Chengalur, A. Begum, I. D. Karachentsev, et al., arXiv:astro-ph/0711.2154 (2007).
19. S. van den Bergh, *Astrophys. J.* **171**, L31 (1972).
20. A. M. N. Ferguson, J. S. Gallagher, and R. F. G. Wyse, *Astron. J.* **120**, 821 (2000).
21. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. Huchtmeier, and D. I. Makarov, *Astron. J.* **127**, 2031 (2004).
22. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 193 (2005).
23. R. C. Bohlin, *Astron. J.* **111**, 1743 (1996).
24. A. Y. Kniazev, S. A. Pustilnik, E. Grebel, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **153**, 429 (2004).
25. H. L. Aller, *Physics of Thermal Gaseous Nebulae* (Dordrecht, Reidel, 1984).
26. B. E. J. Pagel, E. A. Simonson, R. J. Terlevich, and M. G. Edmunds, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **255**, 325 (1992).
27. Y. I. Izotov, T. X. Thuan, and V. A. Lipovetsky, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **108**, 1 (1997).
28. G. Stasińska, *Astron. Astrophys. Suppl.* **83**, 501 (1990).
29. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, A. G. Pramskij, et al., *Astron. Astrophys.* **419**, 469 (2004a).
30. Y. I. Izotov, and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **511**, 639 (1999).
31. S. Y. Yin, Y. C. Liang, F. Hammer, et al. *Astron. Astrophys.* **462**, 535 (2007).
32. Y. I. Izotov and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **665**, 1115 (2007).

33. G. Stasińska and Y. I. Izotov, *Astron. Astrophys.* **397**, 71 (2003).
34. A. V. Filippenko, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **94**, 715 (1982).
35. H. Lee, M. L. Mac Call, R. L. Kingsburgh, et al., *Astron. J.* **125**, 146 (2003).
36. L. van Zee and M. Haynes, *Astrophys. J.* **636**, 214 (2006).
37. Y. I. Izotov, G. Stasińska, G. Meynet, et al., *Astron. Astrophys.* **448**, 955 (2005).
38. R. K. de Naray, S. S. McGaugh, and W. G. J. de Block, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **355**, 877 (2004).
39. G. Galaz, J. J. Dalcanton, L. Infante, and E. Treister, *Astron. J.* **124**, 1360 (2002).
40. R. Braun, D. Thilker, and R. A. M. Walterbos, *Astron. Astrophys.* **406**, 829 (2003).
41. S. A. Pustilnik and J.-M. Martin, *Astron. Astrophys.* **464**, 859 (2007).
42. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Douglas, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
43. S. A. Pustilnik, A. Yu. Kniazev, A. L. Tepliakova, в печати (2008).

ANDROMEDA IV: A NEW LOCAL VOLUME VERY METAL-POOR GALAXY

S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, A. Y. Kniazev, A. N. Burenkov

And IV is a low surface brightness (LSB) dwarf galaxy at a distance of 6.1 Мpc, projecting close to M 31. In this paper the results of spectroscopy of the And IV two brightest HII regions with the SAO 6-m telescope (BTA) are presented. In spectra of both of them the faint line [OIII] λ 4363 Å was detected and this allowed us to determine their O/H by the classical T_e method. Their values for $12+\log(O/H)$ are equal to 7.49 ± 0.06 and 7.55 ± 0.23 , respectively. The comparison of the direct O/H calculations with the two most reliable semi-empirical and empirical methods shows the good consistency between methods. For And IV absolute blue magnitude, $M_B = -12.6$, our value for O/H corresponds to the 'standard' relation between O/H and L_B for dwarf irregular galaxies (DIGs). And IV appears to be a new representative of the extremely metal-deficient gas-rich galaxies in the Local Volume. The very large range of $M(HI)$ for LSB galaxies with close metallicities and luminosities indicates that simple models of LSBG chemical evolution are too limited to predict such striking diversity.