

УДК 524.77-355/36; 524.523-355/36

СПЕКТРОСКОПИЯ ОБЛАСТЕЙ Н II В СПИРАЛЬНОЙ ГАЛАКТИКЕ ПОЗДНЕГО ТИПА NGC 6946

© 2013 А. С. Гусев^{1*}, Ф. Х. Сахибов², С. Н. Додонов³

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

²University of Applied Sciences of Mittelhessen, Friedberg, 61169 Germany

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 25 августа 2012 года; принята в печать 2 октября 2012 года

Представлены результаты спектроскопии 39 областей Н II в спиральной галактике NGC 6946. Спектральные наблюдения проведены на 6-м телескопе БТА САО РАН с помощью фокального редуктора SCORPIO в многощелевом режиме с дисперсией 2.1 Å/px и спектральным разрешением 10 Å. Получены оценки поглощения для 39 областей Н II. Для 30 областей Н II методом “сильных линий” (NS-калибровка) определены электронные температуры, содержание кислорода и азота. Построены радиальные градиенты О/Н и N/Н.

Ключевые слова: галактики: химический состав—галактики: межзвёздная среда—галактики: спиральные—галактики: индивидуальные: NGC 6946

1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является частью нашего исследования по определению физических параметров областей Н II и изучению процессов звездообразования в спиральных и неправильных галактиках на основе спектроскопических и фотометрических данных. В работе [1] мы проанализировали результаты спектроскопических наблюдений областей Н II в шести спиральных галактиках. Галактика NGC 6946, для которой была получена наибольшая выборка объектов, обладает рядом особенностей, требующих отдельного обсуждения. Поэтому, анализ результатов спектральных наблюдений областей Н II в ней был выделен нами в отдельную статью.

Близкая спиральная галактика позднего типа NGC 6946, развернутая почти “плашмя” к земному наблюдателю, активно исследуется уже более полувека. Многочисленные области Н II, большое количество зафиксированных сверхновых делают её удобным объектом для изучения процессов звездообразования в современную эпоху. При этом обработка и интерпретация спектроскопических данных представляет серьезную проблему [2], поскольку NGC 6946 расположена на низкой галактической широте ($b = 11^\circ 7' [3]$). Учет влияния

Млечного Пути требует особой тщательности при обработке наблюдений.

Спектральные исследования областей Н II в галактиках несут информацию о химическом составе и его изменении с галактоцентрическим расстоянием в дисках. Несмотря на то, что существует большое количество спектральных наблюдений областей Н II в других галактиках [4–10], в NGC 6946 они были проведены только для девяти областей Н II [11, 12]. Ряд работ был посвящен детальным исследованиям отдельных крупных комплексов Н II, расположенных в периферийных частях диска галактики: четыре близкорасположенных комплекса в восточной части галактики изучены с помощью панорамной спектроскопии в [13], спектроскопические исследования звездного комплекса на западе были проведены в работах [14, 15]. В 1992 году в работе [16] опубликованы оценки химсостава для 166 областей Н II в NGC 6946, основанные на спектрофотометрии четырех эмиссионных линий ($H\alpha$, $H\beta$, $[N II]$ и $[O III]$), проведенной с помощью узкополосных интерференционных фильтров. Использованный при этом метод “сильных линий” для калибровки содержания кислорода не дает однозначной оценки истинного содержания кислорода и азота (см. [17–19]). Так как все линии калибровались отдельно, то систематическая недооценка или переоценка потоков в различных линиях, отмеченная в работе [16],

*E-mail: gusev@sai.msu.ru

ведет к систематическим ошибкам в относительных интенсивностях, что и видно на диагностической ВРТ-диаграмме [20], приведенной в работе [16], где у значительного числа областей Н II оказалась нетепловая природа эмиссионных линий. Поэтому относительные интенсивности линий водорода, кислорода, азота и серы, измеренные в настоящей работе по анализу единой спектрограммы, покрывающей диапазон от 3200 до 7000 Å, для 30 объектов в NGC 6946 являются существенным дополнением к выборке из девяти областей Н II, полученной ранее в работах [11, 12].

Важную особенность галактики отметили Босма и др. [21], наблюдавшие ее в линии 21 см. Они обнаружили большие неравномерности в пространственном распределении Н I и в поле скоростей. Была выделена 121 полость нейтрального водорода; их размеры доходят до 2.5 кпк. Более 4% Н I по массе имеет скорость более чем на 50 км/с отличающуюся от круговой на данном расстоянии от центра. Большие отклонения от круговых скоростей объясняются присутствием первой моды (наряду со второй) спиральной волны плотности, которые проявляются при Фурье-анализе двумерного поля скоростей [22]. Таким образом, NGC 6946 — изолированная спиральная галактика с классической структурой, но пекулярным распределением нейтрального газа — является чрезвычайно интересным объектом для исследования физических параметров областей Н II и особенностей процесса звездообразования.

Основные характеристики галактики: тип, координаты α_{2000} , δ_{2000} , видимая звездная величина m_B , абсолютная звездная величина $M_B^{0,i}$, исправленная за галактическое поглощение и поглощение за наклон NGC 6946, наклон i , позиционный угол PA, радиальная скорость V , радиус по изофоте 25^m в B -полосе R_{25}^c , расстояние d , галактическое поглощение $A(B)_{Gal}$ и поглощение $A(B)_i$, вызванное наклоном NGC 6946, — представлены в Таблице 1. Расстояние d в таблице приведено согласно [23], остальные параметры брались из базы данных HyperLeda [3]. Отметим, что в отличие от большинства исследователей, мы используем радиус R_{25}^c по изофоте 25^m , исправленной за галактическое поглощение и поглощение за наклон NGC 6946. Учитывая большое поглощение Галактики в направлении NGC 6946, исправленная величина R_{25}^c на 40% больше величины R_{25} , не исправленной за поглощение. Поэтому все галактоцентрические расстояния в шкале R_{25}^c , полученные в настоящей работе, могут отличаться от данных других авторов, использующих значение R_{25} . Далее в тексте мы опускаем индекс c , подразумевая везде исправленную за поглощение величину R_{25} (см. Таблицу 1).

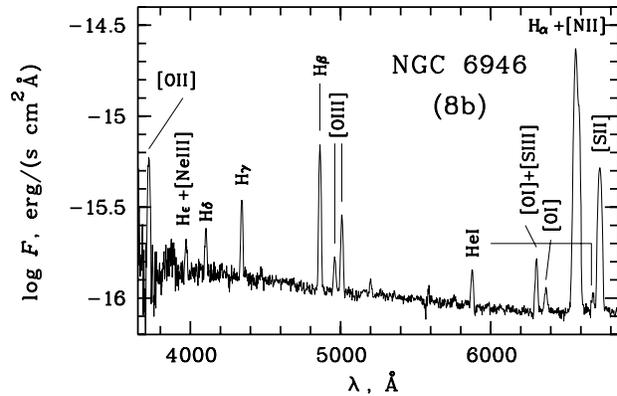


Рис. 1. Спектр “b” области 8 галактики.

В данной работе мы не рассматривали области Н II с линиями поглощения в спектре. Такие области исключались нами из дальнейшего исследования (например, знаменитый [14, 15, 24, 25] гигантский пекулярный звездный комплекс на западе галактики).

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

2.1. Наблюдения

Спектральные наблюдения были проведены в 2007 г. на 6-м телескопе БТА САО РАН с помощью фокального редуктора SCORPIO (детальное описание прибора см. в [26]) в многощелевом режиме. В качестве приемника использовалась ПЗС-камера EEV 42-40. Размер матрицы составляет 2048×2048 px, что обеспечивает поле зрения $6'$ при масштабе изображения $0''.178$ на пиксель. В многощелевом режиме SCORPIO имеет 16 подвижных щелей, расположенных в фокальной плоскости и перемещаемых в поле $2'.9 \times 5'.9$. Размер щелей — $1''.5 \times 18''$, расстояние между центрами соседних щелей — $22''$. Журнал спектральных наблюдений на БТА приведен в Таблице 2.

При наблюдениях использовалась гризма VPHG550G с дисперсией 2.1 Å/px и спектральным разрешением 10 Å . Данная гризма позволяет регистрировать излучение в диапазоне $3100\text{--}7300 \text{ Å}$, причем границы диапазона меняются в зависимости от положения щели. Спектральный диапазон гризмы позволяет получить в одном спектре линии от $[\text{O II}] \lambda 3727+3729 \text{ Å}$ до $[\text{S II}] \lambda 6717+6731 \text{ Å}$ (Рис. 1).

Выбор областей Н II для спектральных наблюдений проводился по изображениям галактики в фильтрах B и $H\alpha$, полученных ранее на 1.5-м телескопе Майданакской обсерватории (Узбекистан) с угловым разрешением около $1''$ (данные

Таблица 1. Основные характеристики NGC 6946

Тип	α_{2000}	δ_{2000}	m_B	$M_B^{0,i}$	i	PA	V	R_{25}^c	R_{25}^c	d	$A(B)_{Gal}$	$A(B)_i$
SABc	20 ^h 34 ^m 52 ^s .75	+60° 09' 13".6	9 ^m 75	-20 ^m 68	31°	62°	46 km/s	7.74	13.28 kpc	5.9 Mpc	1 ^m 48	0 ^m 04

Таблица 2. Журнал спектральных наблюдений

Дата	Набор положения щелей	Экспозиция, с	Качество изображений, arcsec	Воздушная масса
06.09.2007	1	900 × 6	1.2	1.08
	2	900 × 6	1.2	1.57
07.09.2007	3	900 × 8	1.6	1.19

не опубликованы). Были выбраны яркие (одновременно в B и в $H\alpha$) области с угловыми размерами от 2 до 5", расположенные в широком диапазоне галактоцентрических расстояний. Для каждого из трех наборов позиций расположения щелей (сетов) было получено от шести до восьми 15-минутных экспозиций (Таблица 2). После каждой экспозиции позиции щелей смещались вправо—влево вдоль щели с шагом 20 рх. Это позволило получать спектры нескольких близких областей Н II на одной щели. Вместе с тем из-за смещений суммарное время экспозиции для ряда индивидуальных областей Н II оказалось меньше, чем общее время экспозиции, указанное в Таблице 2.

Для проведения стандартной обработки и калибровки данных в начале и конце каждого сета наблюдений NGC 6946 были получены изображения с нулевой экспозицией (bias), плоского поля, спектры гелий-неон-аргоновой лампы и звезды сравнения.

2.2. Обработка данных

Дальнейшая обработка проводилась в ГАИШ МГУ по стандартной процедуре с использованием системы обработки изображений ESO MIDAS. Основные этапы обработки включали в себя: устранение следов космических лучей; определение и исправление данных за ток смещения (bias) и плоское поле; перевод в шкалу длин волн, используя спектр He-Ne-Ag лампы; нормировку потоков по интенсивности центральной (восьмой) щели; вычитание фона; перевод инструментальных потоков в абсолютные, используя данные наблюдений спектрофотометрических звезд-стандартов и коррекцию за атмосферное поглощение; интегрирование двумерных спектров в выбранных

апертурах для получения одномерных спектров индивидуальной области Н II; сложение спектров для каждой области. Пример полученного спектра приведен на Рис. 1.

При переходе к одномерным спектрам мы интегрировали двумерные спектры в апертурах, соответствующих площадкам, где яркие эмиссионные линии областей Н II были различимы над уровнем шума. Размер апертуры приблизительно соответствует диаметру индивидуальной области Н II вдоль позиционного угла щели.

Для измерения потоков в эмиссионных линиях был предварительно определен и вычтен из спектров континуум. В качестве спектрофотометрического стандарта использовалась звезда BD +25°4655 [27]. Для расчета коэффициента атмосферной экстинкции и исправления за атмосферное поглощение наряду с данными наблюдений BD +25°4655 использовались результаты астроклиматических измерений [28]. Для разделения потоков блендированных эмиссионных линий они (дублеты или триплеты) одновременно описывались двумя или тремя гауссианами.

Всего нами были получены спектры 39 областей Н II (Рис. 2). Области, наблюдаемые дважды, помечены в Таблицах 3, 4, 5 буквами "a" и "b" для первого и второго полученного спектра, соответственно.

Ошибки измерений интенсивностей линий включают несколько составляющих. Первый источник ошибок связан с пуассоновской статистикой фотонов в потоке линии. Вторая составляющая вызвана погрешностью определения уровня континуума под эмиссионной линией и дает основной вклад в суммарную ошибку для одиночных линий. Третий источник ошибок связан

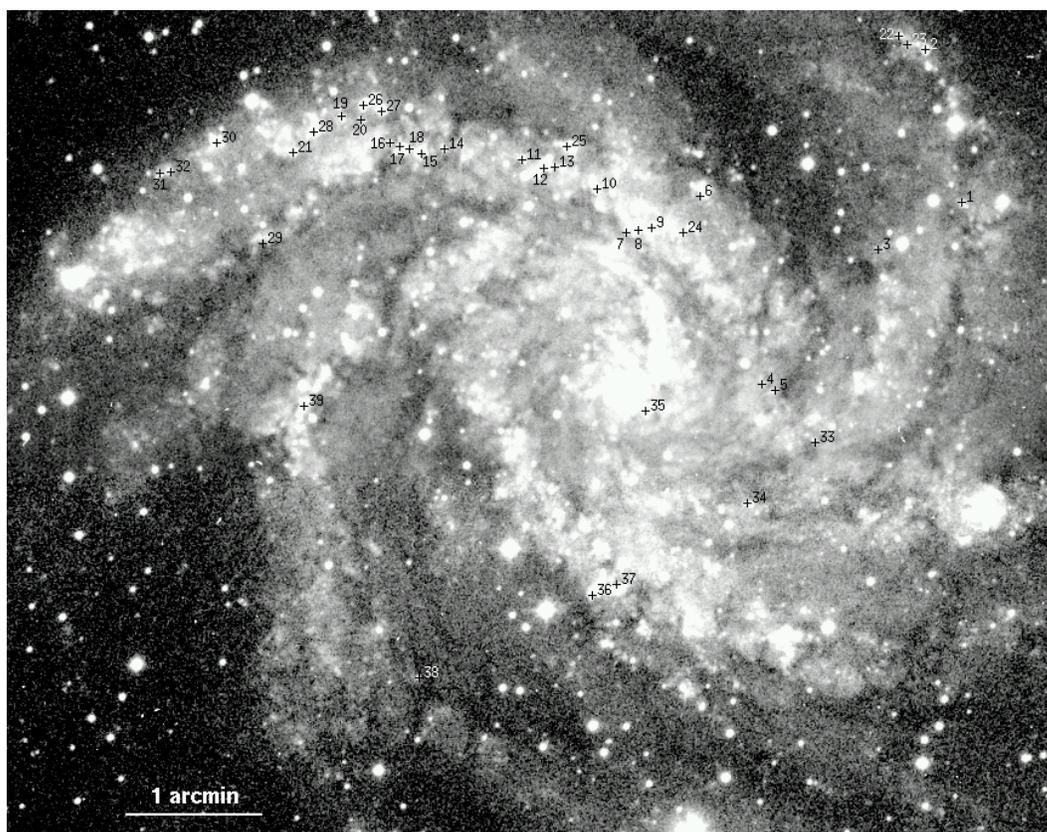


Рис. 2. Изображение галактики в полосе B . Отмечены положения областей Н II. Цифры соответствуют порядковому номеру области в Таблице 3. Север —верху, восток — слева.

с точностью определения кривой спектральной чувствительности; он значителен (более 1%) в коротковолновой области спектра для длин волн $\lambda < 4000 \text{ \AA}$. Последний источник погрешностей, важный для блендируемых линий, возникает из-за ошибок аппроксимации бленд гауссианами. Полная ошибка интенсивности линии определялась путем квадратичного суммирования всех компонент ошибок. Данные полные ошибки были затем корректно переведены в ошибки вычисляемых параметров по стандартным формулам.

Отметим, что абсолютные значения потоков в эмиссионных линиях, полученных для одной и той же области Н II, могут заметно отличаться от сета к сету. Это вызвано как изменением качества изображения, так и погрешностями наведения щели на объект. Необходимо также учитывать, что угловые размеры наблюдаемых областей Н II в 2–3 раза превышают ширину щели, а сами области могут иметь сложную внутреннюю структуру. По этим причинам абсолютные значения потоков, полученных для областей Н II, наблюдавшихся дважды, могут сильно отличаться друг от друга (см. Таблицу 3), в то время как отношения потоков линий

для данных областей практически везде совпадает в пределах ошибок (Таблица 4).

Эквивалентные ширины (EW) эмиссионных линий $H\alpha$ и $H\beta$ оценивались нами по спектрам областей Н II с учетом континуума (Рис. 1). Такие спектры строились путем вычитания из спектра области Н II спектра окружающей подложки диска галактики. Это позволяет нам исключить вклад звезд и газа диска NGC 6946 в излучение, приходящее из области Н II, а также снимает проблему учета вклада экстрапланарного диффузного ионизированного газа Галактики, подробно рассмотренную в работе [2]. Для некоторых областей Н II полученный уровень континуума оказался очень мал (близок к 0), в результате чего значения EW получились нереально высокими, а погрешности оценок — большими. Такие данные не включены в Таблицу 3.

В Таблице 3 мы приводим координаты, де-проецированные галактоцентрические расстояния r , эквивалентные ширины линий $H\alpha$ и $H\beta$ и неисправленные за поглощение потоки $F(H\beta)$ областей Н II.

Таблица 3. Параметры областей Н II, эквивалентные ширины линий Н α , Н β и потоки в линии Н β

Область Н II	Сет	Номер по [16], [11], [12]	Координаты, arcsec	r , кpc	EW(Н β), +	EW(Н α), +	F (Н β), $10^{-16}\text{erg}/(\text{s}\times\text{cm}^2)$
1	1	116	79.7 N, 146.5 W	5.34	—	—	6.63 ± 0.38
2	1	143, 5	146.9 N, 130.5 W	6.51	81.4 ± 3.4	519.0 ± 24.7	84.06 ± 1.33
3	1	—	58.9 N, 110.0 W	3.99	14.9 ± 5.4	106.5 ± 30.1	1.23 ± 0.20
4	1	—	0.3 S, 58.8 W	1.75	27.0 ± 3.5	105.6 ± 8.5	5.97 ± 0.23
5a	1	—	2.7 S, 64.6 W	1.91	15.8 ± 5.0	80.5 ± 13.9	1.85 ± 0.24
5b	2	—	2.7 S, 64.6 W	1.91	9.6 ± 1.7	61.2 ± 6.8	3.61 ± 0.33
6	1	149	82.6 N, 31.6 W	2.95	9.5 ± 0.4	92.2 ± 3.8	21.03 ± 0.60
7	1	—	66.3 N, 1.2 E	2.14	1.1 ± 0.4	37.2 ± 8.8	0.30 ± 0.07
8a	1	1	67.7 N, 4.1 W	2.21	27.9 ± 2.1	151.1 ± 11.4	8.86 ± 0.23
8b	2	1	67.7 N, 4.1 W	2.21	84.0 ± 4.3	645.8 ± 38.3	92.95 ± 1.52
9	1	150	68.5 N, 10.2 W	2.28	102.1 ± 6.0	939.3 ± 77.3	33.02 ± 0.54
10	1	10	85.5 N, 14.0 E	2.75	15.0 ± 0.8	117.7 ± 5.5	22.97 ± 0.65
11	1	—	98.6 N, 46.8 E	3.32	61.8 ± 8.6	577.0 ± 80.3	29.52 ± 0.84
12	1	8	94.9 N, 37.5 E	3.13	18.9 ± 0.8	173.9 ± 9.0	20.31 ± 0.43
13	1	6	95.4 N, 32.4 E	3.12	49.1 ± 5.7	264.3 ± 28.2	13.50 ± 0.40
14	1	24	103.4 N, 81.0 E	3.87	158.5 ± 25.9	997.9 ± 160.3	24.82 ± 0.45
15a	1	25	101.0 N, 91.4 E	3.98	103.9 ± 30.3	771.1 ± 273.9	13.75 ± 0.38
15b	2	25	101.0 N, 91.4 E	3.98	85.0 ± 19.7	525.6 ± 93.9	21.21 ± 0.67
16	1	29	106.1 N, 105.0 E	4.34	136.0 ± 53.2	664.4 ± 134.7	19.44 ± 0.58
17	1	28	104.2 N, 101.0 E	4.22	50.2 ± 4.6	385.0 ± 26.7	17.14 ± 0.37
18	2	26	103.1 N, 96.7 E	4.12	44.3 ± 4.2	179.7 ± 11.9	27.25 ± 0.65
19	1	16	117.8 N, 126.3 E	5.00	113.2 ± 13.7	1055.1 ± 107.0	23.54 ± 0.43
20	1	—	116.2 N, 118.0 E	4.81	—	—	10.67 ± 0.36
21	1	19	101.8 N, 147.6 E	5.14	107.7 ± 21.7	570.4 ± 55.1	48.75 ± 1.11
22	2	146	153.0 N, 118.8 W	6.44	113.9 ± 22.8	304.3 ± 14.4	17.37 ± 0.46
23	2	145	149.3 N, 122.5 W	6.41	73.6 ± 9.0	333.7 ± 28.6	16.56 ± 0.38
24	2	151	66.3 N, 23.8 W	2.35	8.5 ± 3.0	30.4 ± 3.5	4.00 ± 0.87
25	2	5	104.5 N, 27.1 E	3.38	39.7 ± 2.7	416.9 ± 35.1	39.02 ± 0.88
26	2	15	122.3 N, 116.7 E	4.92	27.5 ± 1.2	158.5 ± 6.5	26.38 ± 0.49
27	2	14	119.9 N, 108.7 E	4.72	92.8 ± 8.7	691.4 ± 47.4	59.51 ± 1.03
28	2	17	110.6 N, 138.6 E	5.10	7.1 ± 1.2	113.0 ± 15.4	4.05 ± 0.34
29	2	—	61.8 N, 161.2 E	4.95	13.3 ± 2.1	114.8 ± 12.5	9.55 ± 0.65
30	2	39, 4, A	105.8 N, 181.2 E	6.00	83.9 ± 3.4	560.4 ± 15.1	144.84 ± 2.28

Таблица 3. (Продолжение)

Область Н II	Сет	Номер по [16], [11], [12]	Координаты, arcsec	r , kpc	EW(H β), +	EW(H α), +	F (H β), 10^{-16} erg/(s \times cm 2)
31	2	—	92.5 N, 206.3 E	6.47	31.4 ± 4.2	315.8 ± 56.9	9.68 ± 0.35
32	2	—	93.3 N, 201.5 E	6.35	13.8 ± 1.1	131.5 ± 7.5	8.55 ± 0.31
33	3	—	25.7 S, 82.0 W	2.47	59.8 ± 29.6	292.1 ± 95.9	8.90 ± 0.86
34	3	—	52.6 S, 52.4 W	2.16	23.0 ± 1.3	208.5 ± 15.3	33.43 ± 0.78
35	3	163	12.1 S, 7.6 W	0.43	6.1 ± 0.7	38.4 ± 2.3	6.39 ± 0.46
36	3	78	92.9 S, 15.9 E	3.10	14.7 ± 0.8	117.2 ± 5.7	42.23 ± 1.12
37	3	—	88.1 S, 5.5 E	2.88	6.9 ± 1.9	83.7 ± 13.0	2.83 ± 0.36
38	3	—	129.1 S, 92.4 E	5.29	—	—	4.63 ± 0.16
39	3	49, 3	9.7 S, 142.8 E	4.30	56.2 ± 3.3	399.9 ± 21.1	81.34 ± 1.46

В Таблице 4 приведены нормированные на H β и исправленные за межзвездное поглощение света относительные интенсивности линий [O II] λ 3727+3729 Å, [O III] λ 5007 Å, [N II] λ 6584 Å и [S II] λ 6717+6731 Å. Учет экстинкции в эмиссионных линиях излучения газа проведен по наблюдаемым величинам бальмеровского декремента в спектрах исследованных объектов. Использовались теоретическое отношение линий H α /H β из работы [29] для случая В: рекомбинации при электронной температуре 10^4 К, и аналитическая аппроксимация [30] закона меж-

звездного покраснения Витфорда. Эквивалентная ширина водородных линий поглощения $EW_a(\lambda)$ принималась нами равной 2 Å для всех объектов. Согласно [11], данное значение является средним для областей Н II. Для линий других химических элементов $EW_a(\lambda) = 0$.

При определении ошибок исправленных за межзвездное поглощение света относительных интенсивностей линий, представленных в Таблице 4, учитывались ошибки интенсивности соответствующей линии, линии H β и коэффициента поглощения c (H β).

Таблица 4. Коэффициенты поглощения c (H β), исправленные за покраснение потоки эмиссионных линий (в единицах I (H β)) и отношение линий серы [S II] λ 6717 Å / [S II] λ 6731 Å

Обл. Н II	c (H β)	[O II] λ 3727+3729 Å	[O III] λ 5007 Å	[N II] λ 6584 Å	[S II] λ 6717+6731 Å	[S II] λ 6717 Å / [S II] λ 6731 Å
1	1.26 ± 0.12	—	0.11 ± 0.03	0.47 ± 0.12	0.54 ± 0.11	1.49 ± 0.44
2	1.80 ± 0.04	—	0.79 ± 0.03	1.29 ± 0.11	0.76 ± 0.05	1.20 ± 0.18
3	0.54 ± 0.34	—	—	1.29 ± 0.67	1.02 ± 0.51	2.54 ± 1.31
4	0.19 ± 0.09	—	—	1.04 ± 0.17	0.47 ± 0.09	4.80 ± 3.69
5a	0.83 ± 0.28	—	—	0.96 ± 0.44	0.45 ± 0.21	—
5b	0.68 ± 0.21	—	—	0.74 ± 0.28	—	—
6	0.90 ± 0.07	—	0.35 ± 0.04	0.97 ± 0.13	0.56 ± 0.07	1.55 ± 0.33
7	1.57 ± 0.72	—	—	3.31 ± 3.10	—	—
8a	0.60 ± 0.07	—	0.21 ± 0.03	0.83 ± 0.12	0.65 ± 0.07	1.20 ± 0.26
8b	0.95 ± 0.05	1.68 ± 0.21	0.29 ± 0.01	0.85 ± 0.10	0.65 ± 0.04	1.02 ± 0.17
9	1.11 ± 0.05	1.23 ± 0.20	0.21 ± 0.01	0.52 ± 0.08	0.51 ± 0.03	1.09 ± 0.21

Таблица 4. (Продолжение)

Обл. H II	$c(H\beta)$	[O II] $\lambda 3727+3729 \text{ \AA}$	[O III] $\lambda 5007 \text{ \AA}$	[N II] 6584 \AA	[S II] $\lambda 6717+6731 \text{ \AA}$	[S II] $\lambda 6717 \text{ \AA}$ / [S II] $\lambda 6731 \text{ \AA}$
10	0.96 ± 0.07	—	0.04 ± 0.02	1.73 ± 0.20	0.62 ± 0.07	1.56 ± 0.31
11	0.92 ± 0.07	—	0.07 ± 0.02	2.03 ± 0.21	0.67 ± 0.07	0.95 ± 0.16
12	1.12 ± 0.06	—	—	0.80 ± 0.10	0.55 ± 0.05	1.87 ± 0.49
13	1.38 ± 0.07	—	0.24 ± 0.03	1.97 ± 0.22	0.82 ± 0.10	1.38 ± 0.31
14	1.57 ± 0.05	—	0.19 ± 0.02	0.81 ± 0.09	0.46 ± 0.04	1.62 ± 0.32
15a	1.06 ± 0.07	—	0.35 ± 0.04	0.92 ± 0.12	0.83 ± 0.09	1.18 ± 0.21
15b	1.01 ± 0.07	—	0.33 ± 0.04	0.68 ± 0.10	0.29 ± 0.04	1.18 ± 0.28
16	1.76 ± 0.07	—	0.20 ± 0.03	1.09 ± 0.13	0.51 ± 0.06	1.34 ± 0.24
17	1.81 ± 0.06	—	0.22 ± 0.02	1.26 ± 0.12	0.50 ± 0.04	1.12 ± 0.17
18	0.63 ± 0.06	—	0.27 ± 0.03	0.52 ± 0.08	0.71 ± 0.06	1.64 ± 0.30
19	1.40 ± 0.05	—	0.53 ± 0.02	0.69 ± 0.07	0.38 ± 0.03	1.26 ± 0.17
20	1.07 ± 0.07	—	0.63 ± 0.05	1.02 ± 0.13	1.21 ± 0.13	1.21 ± 0.17
21	1.06 ± 0.05	1.04 ± 0.27	0.31 ± 0.02	0.73 ± 0.08	0.54 ± 0.04	1.43 ± 0.18
22	2.15 ± 0.06	—	1.09 ± 0.06	0.53 ± 0.07	0.21 ± 0.02	2.59 ± 0.66
23	1.27 ± 0.06	—	0.63 ± 0.04	1.76 ± 0.17	0.80 ± 0.07	1.59 ± 0.29
24	0.18 ± 0.45	—	—	1.25 ± 0.82	1.24 ± 0.91	2.04 ± 0.94
25	1.20 ± 0.06	—	0.19 ± 0.02	0.70 ± 0.09	0.61 ± 0.05	1.83 ± 0.38
26	0.75 ± 0.05	—	0.74 ± 0.03	0.61 ± 0.07	0.64 ± 0.05	1.46 ± 0.24
27	1.08 ± 0.04	—	0.95 ± 0.03	0.44 ± 0.05	0.36 ± 0.03	1.47 ± 0.24
28	1.19 ± 0.19	—	1.83 ± 0.27	0.96 ± 0.29	1.28 ± 0.37	1.85 ± 0.56
29	0.85 ± 0.15	—	—	0.93 ± 0.22	0.90 ± 0.22	1.70 ± 0.45
30	1.11 ± 0.04	0.92 ± 0.11	2.02 ± 0.05	0.52 ± 0.05	0.51 ± 0.03	1.46 ± 0.18
31	0.59 ± 0.08	—	1.24 ± 0.08	0.76 ± 0.11	0.90 ± 0.11	1.36 ± 0.19
32	1.25 ± 0.08	—	1.56 ± 0.11	0.82 ± 0.12	0.93 ± 0.11	1.49 ± 0.22
33	0.78 ± 0.19	—	0.36 ± 0.08	1.57 ± 0.44	0.90 ± 0.28	2.19 ± 0.95
34	1.04 ± 0.06	—	0.19 ± 0.03	1.09 ± 0.12	0.45 ± 0.05	1.55 ± 0.35
35	1.57 ± 0.17	—	—	1.80 ± 0.45	0.74 ± 0.21	3.10 ± 1.98
36	0.65 ± 0.07	1.72 ± 0.43	0.08 ± 0.02	0.67 ± 0.10	0.61 ± 0.06	1.44 ± 0.28
37	0.77 ± 0.29	—	—	0.70 ± 0.33	0.49 ± 0.25	1.87 ± 1.58
38	0.25 ± 0.08	—	0.26 ± 0.05	0.92 ± 0.13	0.38 ± 0.06	0.97 ± 0.29
39	1.25 ± 0.05	—	0.15 ± 0.01	0.88 ± 0.08	0.71 ± 0.04	1.46 ± 0.19

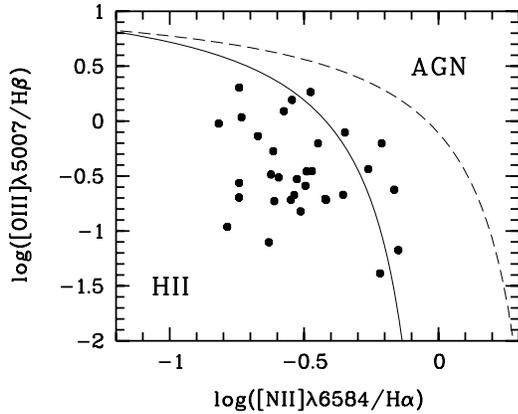


Рис. 3. BPT-диаграмма для областей Н II, изученных в настоящей работе (черные кружки). Сплошная линия, отделяющая классические области Н II от объектов с нетепловым эмиссионным спектром (AGN), вычислена согласно работе [31]. Пунктирная линия — кривая из работы [32].

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Содержание химических элементов

Рассмотрим положение наших объектов на диагностической BPT-диаграмме (Рис. 3). На рисунке видно, что все объекты находятся в области, где эмиссионные линии возникают в результате теплового излучения, то есть все объекты являются классическими областями Н II. Исходя из этого, все объекты были приняты для дальнейшего анализа содержания химических элементов.

Ряд эмпирических соотношений, связывающих относительные интенсивности эмиссионных линий с содержанием и температурой излучающего газа, был предложен в разное время многими исследователями (см. обзоры [18, 19]). Выделим среди них две недавние калибровки, используемые для определения металличности в областях Н II. Обе (ON-калибровка [33] и NS-калибровка [34]) интерпретируют относительные интенсивности сильных эмиссионных линий (O^{2+} , O^+ и N^+ в случае ON-калибровки или O^{2+} , N^+ и S^+ в случае NS-калибровки) в терминах относительного содержания кислорода и азота и электронной температуры. Так как относительные интенсивности $[O II] \lambda 3727+3729 \text{ \AA} / H\beta$ были измерены с большими ошибками или же во многих объектах вообще не измерены, мы выбрали NS-калибровку для определения металличности и электронной температуры газа в исследуемых областях Н II.

Поскольку интенсивности линии $[O III] \lambda 4959 \text{ \AA}$ были измерены нами лишь для половины областей Н II, а интенсивности линии $[N II] \lambda 6548 \text{ \AA}$ определены с очень большими погрешностями,

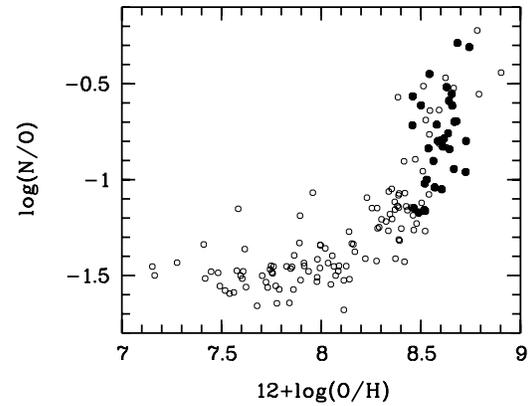


Рис. 4. Диаграмма O/H–N/O. Белые кружки — выборка хорошо исследованных областей Н II в ближайших галактиках из [33], черные кружки — объекты, изученные в настоящей работе.

при расчете содержания кислорода, азота и электронной температуры мы использовали соотношения $[O III] \lambda 4959+5007 \text{ \AA} = 1.33 [O III] \lambda 5007 \text{ \AA}$ и $[N II] \lambda 6548+6584 \text{ \AA} = 1.33 [N II] \lambda 6584 \text{ \AA}$ (следуя [35]).

NS-метод применим для областей с низкой плотностью. К сожалению, линии дублета серы $[S II] \lambda 6717 \text{ \AA}$ и $[S II] \lambda 6731 \text{ \AA}$ блендируются в наших спектрах и разделяются с неудовлетворительной точностью, поэтому мы не смогли определить уверенно плотности исследуемых объектов. Тем не менее, для всех исследованных Н II-областей $[S II] \lambda 6717 \text{ \AA} / [S II] \lambda 6731 \text{ \AA} \gtrsim 1$ (Таблица 4), что соответствует значениям плотности $N_e \lesssim 300 \text{ cm}^{-3}$. Таким образом, оценки показывают, что все наши объекты имеют низкие плотности, что является типичным для гигантских областей Н II, наблюдаемых в других галактиках [4, 9, 36, 37].

Полученные с помощью NS-калибровки оценки металличности и электронной температуры в исследуемых объектах приведены в Таблице 5. Для NS-калибровки использованы спектры областей Н II с надежными оценками электронной температуры [34]. Поэтому оценки металличности находятся в хорошем согласии с оценками, которые дает классический T_e -метод (см. Рис. 4). Из диаграммы O/H–N/O (Рис. 4) видно, что исследованные нами объекты в NGC 6946 находятся в пределах полосы, занимаемой наиболее надежно исследованными областями Н II в других галактиках. Это согласие является указанием на реальность полученных оценок металличности в исследованных объектах.

Таблица 5. Содержание кислорода, азота и значения электронной температуры в областях Н II

Области Н II	r/R_{25}	$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	$12 + \log(\text{N}/\text{H})$	$t_{\text{NS}}, 10^4 \text{ K}$
1	0.40	8.73 ± 0.04	7.77 ± 0.05	0.64 ± 0.01
2	0.49	8.46 ± 0.01	7.74 ± 0.02	0.81 ± 0.01
6	0.22	8.58 ± 0.02	7.87 ± 0.03	0.72 ± 0.01
8a	0.17	8.62 ± 0.02	7.83 ± 0.03	0.69 ± 0.01
8b	0.17	8.59 ± 0.01	7.79 ± 0.03	0.72 ± 0.01
9	0.17	8.67 ± 0.03	7.73 ± 0.05	0.68 ± 0.01
10	0.21	8.74 ± 0.05	8.43 ± 0.02	0.58 ± 0.02
11	0.25	8.68 ± 0.03	8.40 ± 0.01	0.61 ± 0.01
13	0.23	8.54 ± 0.02	8.09 ± 0.03	0.71 ± 0.01
14	0.29	8.67 ± 0.02	7.97 ± 0.02	0.66 ± 0.01
15a	0.30	8.54 ± 0.02	7.70 ± 0.03	0.75 ± 0.01
15b	0.30	8.68 ± 0.02	7.98 ± 0.04	0.67 ± 0.01
16	0.33	8.64 ± 0.02	8.05 ± 0.03	0.67 ± 0.01
17	0.32	8.63 ± 0.02	8.11 ± 0.03	0.67 ± 0.01
18	0.31	8.60 ± 0.02	7.55 ± 0.04	0.72 ± 0.01
19	0.38	8.60 ± 0.01	7.80 ± 0.03	0.73 ± 0.01
20	0.36	8.52 ± 0.02	7.36 ± 0.05	0.79 ± 0.01
21	0.39	8.61 ± 0.01	7.78 ± 0.02	0.71 ± 0.01
22	0.48	8.56 ± 0.02	7.66 ± 0.05	0.78 ± 0.01
23	0.48	8.46 ± 0.01	7.89 ± 0.03	0.79 ± 0.01
25	0.25	8.64 ± 0.02	7.80 ± 0.03	0.68 ± 0.01
26	0.37	8.52 ± 0.01	7.50 ± 0.03	0.80 ± 0.01
27	0.36	8.57 ± 0.01	7.53 ± 0.03	0.78 ± 0.01
28	0.38	8.53 ± 0.05	7.53 ± 0.12	0.87 ± 0.02
30	0.45	8.47 ± 0.02	7.32 ± 0.04	0.88 ± 0.01
31	0.49	8.49 ± 0.02	7.32 ± 0.04	0.84 ± 0.01
32	0.48	8.52 ± 0.02	7.36 ± 0.05	0.85 ± 0.01
33	0.19	8.50 ± 0.05	7.89 ± 0.09	0.75 ± 0.02
34	0.16	8.66 ± 0.02	8.10 ± 0.02	0.66 ± 0.01
36	0.23	8.73 ± 0.03	7.93 ± 0.02	0.63 ± 0.01
38	0.40	8.66 ± 0.03	8.05 ± 0.04	0.67 ± 0.01
39	0.32	8.64 ± 0.01	7.88 ± 0.02	0.67 ± 0.01

3.2. Сравнение результатов с данными предыдущих исследований

Мы сравнили полученные нами оценки относительной интенсивности эмиссионных линий областей Н II в галактике с результатами [11, 12]. Четыре объекта нашей выборки (один из которых наблюдался дважды) совпадают с областями Н II из списка [11], один из этих объектов исследовался также в работе [12] (Таблица 3). По причинам, указанным во Введении, мы не стали сравнивать наши результаты с данными спектродиметрии [16]. На Рис. 5 в качестве примера приведено сравнение относительных потоков в линии [O III] λ 5007 Å для совпадающих объектов, полученных нами и в [11, 12]. Рисунок показывает удовлетворительное согласие между ними.

Отличия между нашими результатами и полученными в работах [11, 12], превышающие для некоторых объектов ошибки измерений, могут быть вызваны тем, что угловые размеры областей Н II в близкой NGC 6946, как правило, больше ширины щели при проведении спектроскопических наблюдений. Разные авторы получают спектры различных частей области Н II со слегка отличающимся химическим составом. Отметим также проблему, связанную с отождествлением областей Н II в данной звездной системе: NGC 6946 является примером галактики с практически полным отсутствием крупных звездных комплексов. Её спиральные ветви представляют собой цепочки тесно расположенных областей Н II. Разное качество изображения при наблюдениях может привести к различию в определении того, что считать индивидуальной областью Н II.

3.3. Градиент металличности, электронная температура

Вариации металличности в областях Н II в зависимости от их галактоцентрического расстояния отражают химическую эволюцию дисковых галактик. Для исследования градиента металличности в галактическом диске требуется выборка областей Н II, относительно равномерно распределенных по галактоцентрическим расстояниям. Такие выборки областей Н II с измеренным химическим составом имеются для ограниченного числа (около 50) близких галактик (см. обзоры [38–40]). Исследованная в данной работе выборка из 30 объектов была использована нами для определения градиента металличности в диске NGC 6946.

Как правило, изучению радиального распределения содержания азота в галактиках уделяется меньшее внимание по сравнению с исследованиями градиента O/H. Однако, знание радиального

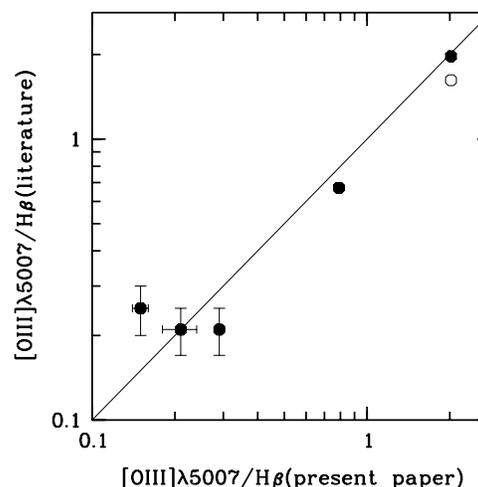


Рис. 5. Сравнение относительных потоков в линии кислорода [O III] λ 5007 Å, полученных в настоящей работе, с данными [11] (черные кружки) и [12] (белый кружок) для общих объектов. Ошибки измерений, не превышающие размеры значков на рисунке, не показаны.

градиента N/H представляется важным для изучения химической эволюции галактик. Для значений $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \gtrsim 8.3$ в газовом диске начинает доминировать вторичный азот. Его обилие увеличивается более быстрыми темпами, чем содержание кислорода [41]. В результате, изменение содержания азота с расстоянием от центра галактики имеет большую амплитуду, чем изменение содержания кислорода, и может быть определено с хорошей точностью, несмотря на то, что потоки в азотных линиях измеряются, как правило, с большими погрешностями, чем в линиях кислорода. Кроме того, сравнительный анализ градиентов O/H и N/H в галактике может дать информацию о времени задержки появления азота в межзвездной среде относительно кислорода [42–45]. Поэтому, мы определяем в работе радиальные градиенты как кислорода, так и азота.

Обычно радиальные распределения металличности описываются следующими выражениями:

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 12 + \log(\text{O}/\text{H})_0 + C_{\text{O}/\text{H}} \times (r/R_{25}), \quad (1)$$

где $12 + \log(\text{O}/\text{H})_0$ — экстраполированное на центр относительное содержание кислорода, $C_{\text{O}/\text{H}}$ — величина градиента радиального падения относительного содержания кислорода в единицах dex/ R_{25} , r/R_{25} — галактоцентрическое расстояние в единицах галактического радиуса, измеренного по изофоте $25^m/\square''$ [4, 6, 39]. Аналогично описывается радиальное распределение относительного

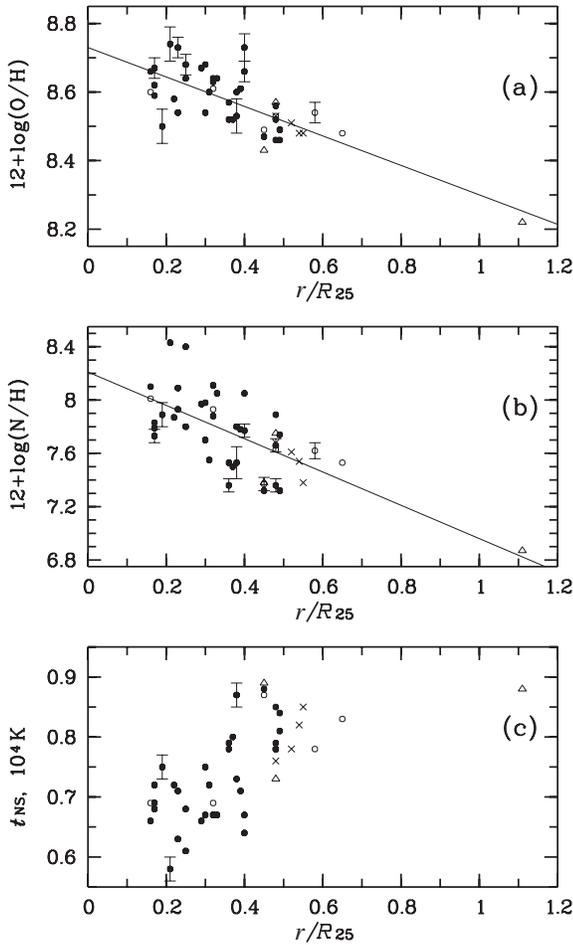


Рис. 6. Графики радиального распределения относительного содержания кислорода (а), азота (б) и значений электронной температуры t_{NS} (с) в диске NGC 6946. Белые кружки — объекты, измеренные в работе [11], белые треугольники — в работе [12], косые крестики — в работе [13], черные кружки — объекты, исследованные в настоящей работе. Для значений, определенных с точностью хуже чем ± 0.02 dex (а), ± 0.04 dex (б) и ± 100 K (с), показаны бары ошибок. Прямые линии — радиальный градиент содержания кислорода и азота.

содержания азота:

$$12 + \log(N/H) = 12 + \log(N/H)_0 + C_{N/H} \times (r/R_{25}). \quad (2)$$

Рисунки 6а, 6б показывают радиальное распределение относительного содержания кислорода и азота в диске NGC 6946, соответственно. Видно, что реальный разброс металличности при фиксированном радиусе превышает ошибки измерения химсостава. Этому разбросу подвержены также объекты из работ [11, 12]: один из объектов выборок [11, 12] идентифицируется с объектом 30 из нашей выборки и имеет тот же химсостав.

Численные значения искомым коэффициентов в

выражениях (1) и (2) определялись методом наименьших квадратов для всех объектов, приведенных на Рис. 6. Мы получили следующие значения коэффициентов:

$$12 + \log(O/H)_0 = 8.73 \pm 0.02,$$

$$C_{O/H} = -0.43 \pm 0.06 \text{ dex}/R_{25},$$

$$12 + \log(N/H)_0 = 8.21 \pm 0.08,$$

$$C_{N/H} = -1.25 \pm 0.19 \text{ dex}/R_{25}.$$

Из Рис. 6 видно, что радиальные распределения содержания кислорода и азота описываются единой регрессионной моделью на протяжении всего диска NGC 6946. Распределение содержания азота меняется быстрее по сравнению с радиальным распределением кислорода.

В галактике наблюдается рост электронной температуры областей Н II с удалением от центра галактики (Рис. 6с). Подобная зависимость наблюдается и для областей Н II в Галактике [46–49]. Зависимость “температура–металличность”, для областей Н II в NGC 6946 хорошо объясняется теоретическими моделями [50].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рисунки 6а, 6б показывают большую дисперсию положения объектов относительно регрессионной модели радиального градиента химического состава. Это согласуется с результатами предыдущих исследований [11–13] для общих и близкорасположенных объектов. Авторы [11, 12], исследовавшие содержание химических элементов в комплексе MRS 4 (+182, +103) = FGW 6946A (соответствует комплексу 30 из нашего списка), получили значения металличности, совпадающие в пределах ошибок с нашими (Рис. 6). На конце северной спиральной ветви (восточная часть галактики) расположен гигантский звездный комплекс, исследованный в работе [13] как комплекс Knot A. Оценки содержания кислорода и азота в данном комплексе, полученные в [13], оказались схожими ($12 + \log(O/H) = 8.48 \pm 0.01$, $12 + \log(N/H) = 7.38 \pm 0.01$) с оценками O/H и N/H, полученными в настоящей работе для ближайших к Knot A областей 31 и 32 (Рис. 2, 6, Таблица 5).

Большая дисперсия обусловлена скорее всего условиями наблюдений областей Н II в данной галактике. NGC 6946 — галактика достаточно близкая, и туманности в ней имеют относительно большие угловые размеры. В случае, если в щель спектрографа проваливалась только центральная часть туманности, где азот дважды ионизован, то

использованная здесь NS-калибровка приводит к заниженному содержанию кислорода. В случае, если в щель спектрографа попала периферийная часть туманности, где дважды ионизованный азот отсутствует, то NS-калибровка дает завышенное содержание кислорода. Для того, чтобы проверить достоверность полученных оценок содержания кислорода, мы проверили положение исследованных объектов на других диаграммах.

Исходя из обычного предположения, что в областях Н II с похожими интенсивностями сильных эмиссионных линий должны быть примерно одинаковые физические условия и химический состав, мы сравнили на Рис. 7 положение объектов, исследованных в данной работе (черные кружки), с выборкой калибровочных областей [33] (черные точки). Серыми точками показаны области Н II, для которых содержание кислорода было определено недавно предложенным С-методом [51]. Параметр

$$X_{23} \equiv \log R_{23} \equiv \log\left(\frac{[\text{O II}] \lambda 3727 + 3729 \text{ \AA} + [\text{O III}] \lambda 4959 \text{ \AA} + [\text{O III}] \lambda 5007 \text{ \AA}}{\text{H}\beta}\right)$$

был определен нами для пяти областей Н II в NGC 6946, в которых удалось измерить линию $[\text{O II}] \lambda 3727 + 3729 \text{ \AA}$ (Таблица 4), как

$$\log\left(\frac{[\text{O II}] \lambda 3727 + 3729 \text{ \AA}}{+1.33[\text{O III}] \lambda 5007 \text{ \AA}}\right) / \text{H}\beta.$$

На Рис. 8 проверена связь между электронной температурой и содержанием кислорода в исследованных областях, свидетельствующая о том, что электронная температура в туманности существенным образом зависит от охлаждения газа путем излучения в линиях кислорода. Здесь, как и на Рис. 6с видна заметно заниженная электронная температура для объекта из выборки [12]. Так как этот объект находится далеко на краю диска галактики ($R/R_{25} > 1$), то учет или не учет этого объекта может влиять на выбор величины радиального градиента химсостава в галактике. Без учета этого объекта градиент становится чуть более пологим, $-0.39 \pm 0.08 \text{ dex}/R_{25}$, в случае радиального распределения кислорода и чуть более крутым, $-1.30 \pm 0.22 \text{ dex}/R_{25}$, в случае радиального распределения азота.

Диаграмма “светимость—центральная металличность”, была построена в работе [52]. Содержание кислорода и азота в [52] и в настоящей работе были определены с помощью методов, которые согласуются со шкалой металличности, основанной на T_e -методе, поэтому они могут быть сравнены. На Рис. 9 показано положение полученной здесь оценки центральной металличности

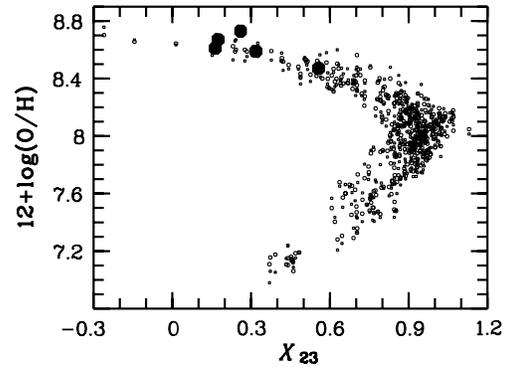


Рис. 7. Диаграмма X_{23} —O/H для выборки областей Н II по данным [33] (точки), [51] (серые точки) и пяти объектов, исследованных в настоящей работе (черные кружки).

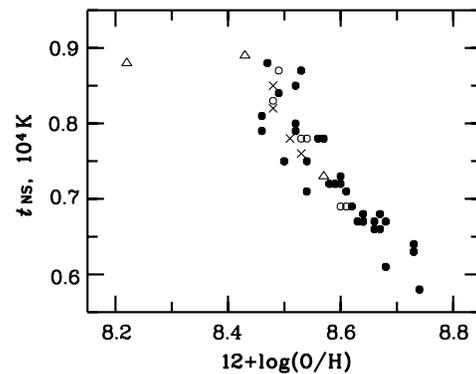


Рис. 8. Зависимость величины электронной температуры от относительного содержания кислорода в областях Н II. Обозначения те же, что и на Рис. 6.

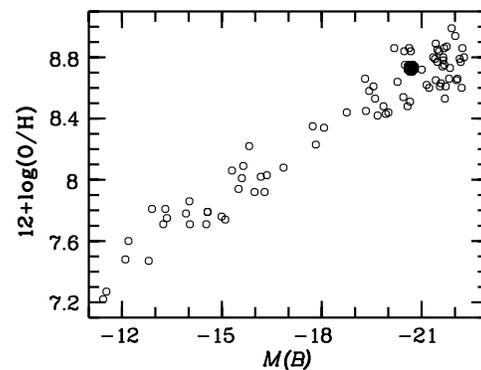


Рис. 9. Диаграмма “светимость — центральная металличность”. Белые кружки — данные [52] (с добавлением результатов [1]), черный кружок — положение NGC 6946 по данным настоящей работы.

в NGC 6946 по сравнению с другими галактиками. Из графика видно, что полученная в данной работе центральная металличность типична для галактики данной светимости.

5. ВЫВОДЫ

С помощью прибора SCORPIO в многощелевом режиме проведена спектроскопия 39 областей Н II в галактике NGC 6946. Для этих областей получены оценки поглощения.

Для 30 областей Н II методом “сильных линий” определены электронные температуры, содержание кислорода и азота. Построены радиальные градиенты O/H, N/H и электронной температуры. Радиальное падение обилия кислорода и азота составило

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = (8.73 \pm 0.02) - (0.43 \pm 0.06)r/R_{25}$$

и

$$12 + \log(\text{N}/\text{H}) = (8.21 \pm 0.08) - (1.25 \pm 0.19)r/R_{25}.$$

БЛАГОДАРНОСТИ

А.С.Г. благодарит А. Ю. Князева (Южно-Африканская астрономическая обсерватория) за консультации по обработке спектральных данных, В. Л. Афанасьева и А. В. Моисеева (САО РАН) на помощь в проведении наблюдений на БТА и ценные советы, А. И. Засова, Б. П. Артамонова (ГАИШ МГУ) и Л. С. Пилюгина (ГАО НАНУ) за плодотворное обсуждение результатов. В работе использованы данные электронной базы данных HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr>). Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 08-02-01323, 10-02-91338 и 12-02-00827). Наблюдения на 6-м телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт 14.518.11.7070).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. S. Gusev, L. S. Pilyugin, F. Sakhilov, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **424**, 1930 (2012).
2. Yu. N. Efremov, V. L. Afanasiev, O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 304 (2011).
3. G. Paturel, C. Petit, Ph. Prugniel, et al., *Astronom. and Astrophys.* **412**, 45 (2003).
4. D. Zaritsky, R. C. Kennicutt, and J. P. Huchra, *Astrophys. J.* **420**, 87 (1994).
5. J.-R. Roy, J. Belley, Y. Dutil, and P. Martin, *Astrophys. J.* **460**, 294 (1996).
6. L. van Zee, J. J. Salzer, M. P. Haynes, et al., *Astronom. J.* **116**, 2805 (1998).
7. D. R. Dutil and J. -R. Roy, *Astrophys. J.* **516**, 62 (1999).
8. R. C. Kennicutt, F. Bresolin, and D. R. Garnett, *Astrophys. J.* **591**, 801 (2003).
9. F. Bresolin, D. Schaerer, R. M. Conzález Delgado, and G. Stasińska, *Astronom. and Astrophys.* **441**, 981 (2005).
10. F. Bresolin, W. Gieren, R. -P. Kudritzki, et al., *Astrophys. J.* **700**, 309 (2009).
11. M. L. McCall, P. M. Rybski, and G. A. Shields, *Astrophys. J. Suppl.* **57**, 1 (1985).
12. A. M. N. Ferguson, J. S. Gallagher, and R. F. G. Wyse, *Astronom. J.* **116**, 673 (1998).
13. R. García-Benito, A. Díaz, G. F. Hagele, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **408**, 2234 (2010).
14. Yu. N. Efremov, S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, et al., *Astronom. and Astrophys.* **389**, 855 (2002).
15. Yu. N. Efremov, V. L. Afanasiev, E. J. Alfaro, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **382**, 481 (2007).
16. J. Belley and J. -R. Roy, *Astrophys. J. Suppl.* **78**, 61 (1992).
17. L. S. Pilyugin, *Astronom. and Astrophys.* **399**, 1003 (2003).
18. S. L. Ellison, D. R. Patton, L. Simard, and A. W. McConnachie, *Astronom. J.* **135**, 1877 (2008).
19. Á. R. López-Sánchez and C. Esteban, *Astronom. and Astrophys.* **517**, A85 (2010).
20. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
21. R. Boomsma, T. A. Oosterloo, F. Fraternali, et al., *Astronom. and Astrophys.* **490**, 555 (2008).
22. Ф. Х. Сахибов, диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук (МГУ, Москва, 2004).
23. I. D. Karachentsev, M.E. Sharina, and W.K. Huchtmeier, *Astronom. and Astrophys.* **362**, 544 (2000).
24. P. W. Hodge, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **79**, 297 (1967).
25. B. G. Elmegreen, Yu. N. Efremov, and S. Larsen, *Astrophys. J.* **535**, 748 (2000).
26. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005).
27. J. B. Oke, *Astronom. J.* **99**, 1621 (1990).
28. Т.А. Карташева, Н.М. Чунакова, *Изв. САО* **10**, 44 (1978).
29. D. E. Osterbrock, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (University Science Books, Mill Valley, CA, 1989).
30. Y. I. Izotov, T. X. Thuan, and V. A. Lipovetsky, *Astrophys. J.* **435**, 647 (1994).
31. L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland, et al., *Astrophys. J.* **556**, 121 (2001).
32. G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **346**, 1055 (2003).
33. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **720**, 1738 (2010).
34. L. S. Pilyugin and L. Mattsson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **412**, 1145 (2011).

35. P. J. Storey and C. J. Zeippen, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **312**, 813 (2000).
36. R. C. Kennicutt, *Astrophys. J.* **287**, 116 (1984).
37. L. Gutiérrez and J. E. Beckman, *Astrophys. J.* **710**, L44 (2010).
38. D. R. Garnett, *Astrophys. J.* **581**, 1019 (2002).
39. L. S. Pilyugin, J. M. Vílchez, and T. Contini, *Astronom. and Astrophys.* **425**, 849 (2004).
40. J. Moustakas, R. C. Kennicutt, C. A. Tremonti C.A., et al., *Astrophys. J. Suppl.* **190**, 233 (2010).
41. R. B. C. Henry, M. G. Edmunds, and J. Kóppen, *Astrophys. J.* **541**, 660 (2000).
42. A. Maeder, *Astronom. and Astrophys.* **264**, 105 (1992).
43. L. B. van den Hoek and M. A. T. Groenewegen, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 305 (1997).
44. B. E. J. Pagel, *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1997).
45. L. S. Pilyugin and T. X. Thuan, *Astrophys. J. Lett.* **726**, L23 (2011).
46. E. Churchwell, L. F. Smith, J. Mathis, et al., *Å* **70**, 719 (1978).
47. R. Paladini, R. D. Davies, and G. DeZotti, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **347**, 237 (2004).
48. C. Quireza, R. T. Rood, T. M. Bania, et al., *Astrophys. J.* **653**, 1226 (2006).
49. D. S. Balsa, R. T. Rood, T. M. Bania, and L. D. Anderson, *Astrophys. J.* **738**, 27 (2011).
50. R. H. Rubin, *Astrophys. J. Suppl.* **57**, 349 (1985).
51. L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, and L. Mattsson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **424**, 2316 (2012).
52. L. S. Pilyugin, T. X. Thuan, and J. M. Vílchez, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **376**, 353 (2007).

Spectroscopy of H II Regions in the Late-Type Spiral Galaxy NGC 6946

A. S. Gusev, F. H. Sakhibov, S. N. Dodonov

We present the results of spectroscopy of 39 H II regions in the spiral galaxy NGC 6946. The spectral observations were carried out at the 6-m BTA telescope of the SAO RAS with the SCORPIO focal reducer in the multi-slit mode with the dispersion of 2.1 Å/px and spectral resolution of 10 Å. The absorption estimates for 39 H II regions were obtained. Using the “strong line” method (NS-calibration) we determined the electron temperature, and the abundances of oxygen and nitrogen for 30 H II regions. The radial gradients of O/H and N/H were constructed.

Keywords: *galaxies: abundances—galaxies: interstellar medium—galaxies: spiral—galaxies: individual: NGC 6946*