

УДК 524.7+524.78

Ю. С. Шолудченко¹, И. Ю. Изотова², Л. С. Пилюгин¹¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
03022 Киев, пр. Глушкова, 6

Содержание кислорода в областях H II спиральной галактики M101 на основе спектров из цифрового обзора неба Sloan

Исследованы спектры областей H II в диске спиральной галактики M101 (NGC5457) из базы данных цифрового обзора неба SDSS (the Sloan Digital Sky Survey). Отобраны 17 областей H II, в спектрах которых наблюдается авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3 нм. Проведены измерения интенсивностей спектральных линий. Эти данные использованы для определения содержания кислорода в исследуемой выборке областей H II. Показано, что спектральные данные из SDSS, дополненные информацией о небулярной линии кислорода [O II] λ 372.7 нм, найденной при помощи недавно обнаруженной ff-зависимости между интенсивностями кислородных линий в спектрах областей H II, позволяют определить содержания кислорода, которые сравнимы по точности с содержаниями, определенными при помощи стандартного T_e -метода. Определены параметры радиального распределения содержания кислорода в диске галактики: содержание кислорода в центре галактики и величина радиального градиента.

ВМІСТ КИСНЮ В ОБЛАСТЯХ H II СПІРАЛЬНОЇ ГАЛАКТИКИ M101 НА ОСНОВІ СПЕКТРІВ З ЦИФРОВОГО ОГЛЯДУ НЕБА SLOAN, Шолудченко Ю. С., Изотова І. Ю., Пілюгін Л. С. — Досліджено спектри областей H II в диску спіральної галактики M101 (NGC5457) з бази даних цифрового огляду неба SDSS (the Sloan Digital Sky Survey). Відібрано 17 областей H II, в спектрах яких спостерігалась авроральна лінія кисню [O III] λ 436.3 нм. Проведено вимірювання інтенсивностей спектральних ліній. Ці дані було використано для визначення вмісту кисню в досліджуваних вибірці областей H II. Показано, що спектральні дані з SDSS, доповнені інформацією про небулярну лінію кисню [O II] λ 372.7 нм, знайдену за допомогою нещодавно виявленої ff-залежності між інтенсивностями кисневих ліній в спектрах областей H II, дозволяють визначити вміст кисню, що за точністю порівняний з вмістом, визначеним за допомогою стандартного T_e -методу. Визначено параметри радіального розподілу кисню в диску галактики: вміст кисню в центрі галактики і величина радіального градієнта.

THE OXYGEN ABUNDANCES IN H II REGIONS OF THE SPIRAL GALAXY M101 FROM THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY SPECTRA, by Sholudchenko Yu. S., Izotova I. Yu., Pilyugin L. S. — The spectra of H II regions in the spiral galaxy M101 disc from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) are examined. The spectra of 17 H II regions with the detected auroral oxygen line [O III] λ 436.3 nm are extracted. The intensities of the spectral lines are measured. The oxygen abundances in the H II regions are derived using these measurements. It is shown that the SDSS spectroscopic data, complemented with the information on the nebular oxygen line [O II] λ 372.7 nm derived from the recently revealed relation between intensities of oxygen lines in spectra of H II regions (f -relation), allow one to determine the oxygen abundances and exactness of these abundances is comparable to those in the classic T_e method. The parameters of the radial oxygen abundance distribution (the central oxygen abundance and the slope of the radial gradient) in the disc are estimated.

ВВЕДЕНИЕ

Химический состав является одной из фундаментальных характеристик галактики. Детальная информация о химическом составе галактики позволяет судить об истории звездообразования в галактике, об обмене веществом между разными частями галактики и между галактикой и окружающей средой. Эмиссионные спектры областей H II в галактиках поздних типов (спиральные и неправильные галактики) используются для определения содержания He, N, O, Ne, S, Cl, Ar. К сожалению, спектральные исследования областей H II выполнены лишь для нескольких десятков спиральных галактик [20]. В 2006 г. закончен обширный цифровой обзор неба SDSS (the Sloan Digital Sky Survey). Этот обзор покрывает около четверти неба и содержит спектры около миллиона объектов, включая области H II в галактиках разных морфологических типов. База спектральных данных SDSS является беспрецедентной по объему. Эта база спектральных данных использовалась для определения химического состава областей H II в ряде работ [8, 9, 14, 28]. Однако при определении химического состава областей H II в близких галактиках на основе спектральных данных SDSS возникает проблема, связанная с тем, что спектры SDSS ($\lambda\lambda = 380.0 \dots 920.0$ нм) для близких объектов (с красным смещением $z \leq 0.024$) не содержат небулярной линии кислорода [O II] λ 372.7 нм, которая используется для определения содержания иона O^+ в области H II. В работах [9, 14] для определения содержания иона O^+ в области H II использовались авроральные линии кислорода [O II] λ 732.0, 733.0 нм вместо небулярной линии кислорода [O II] λ 372.7 нм. В принципе использование авроральных линий кислорода [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм для определения содержания иона O^+ в области H II столь же оправданно как и использование линии [O II] λ 372.7 нм. В работе [14] показано, что содержания кислорода, полученные для нескольких карликовых галактик с использованием линий [O II] λ 732.0, 733.0 нм в спектрах SDSS, хорошо согласуются с содержаниями кислорода, полученными с использованием линии [O II] λ 372.7 нм.

Однако известны свидетельства того, что измеренные интенсивности авроральных линий [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм могут значительно отличаться от ожидаемых. Оценки электронной температуры t_2 в зоне O^+ [11] по отношению [O II] λ 372.7 нм/[O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм показали, что вопреки ожиданиям электронная температура t_2 практически не коррелирует с электронной температурой t_3 в зоне O^{++} . В работе [9] для большой выборки областей H II найдено, что электронные температуры t_2 и t_3

следуют в целом общему тренду, предсказываемому фотоионизационными моделями областей Н II, но разброс значений t_2 при фиксированном значении t_3 очень большой. Было высказано предположение, что этот разброс обусловлен большими ошибками в интенсивности авроральных линий кислорода [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм. Действительно, суммарная интенсивность авроральных линий кислорода [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм значительно меньше интенсивности небулярной линии кислорода [O II] λ 372.7 нм. Тем не менее, пока неясно, являются ли ошибки измерения и редукции единственной причиной отклонения измеренных интенсивностей авроральных линий кислорода [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм от «ожидаемых» [11]. Другими словами, применимость авроральных линий кислорода [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм для определения содержания иона O^+ в области Н II может быть поставлена под сомнение. С другой стороны, для областей Н II с низким содержанием металлов содержания кислорода, полученные с использованием авроральных линий [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм и небулярной линии [O II] λ 372.7 нм, хорошо согласуются между собой [14]. Дело в том, что такие области Н II имеют высокую температуру, подавляющая доля кислорода в них находится в зоне O^{++} . Вклад зоны O^+ в полное содержание кислорода сравнительно мал. Поэтому даже большая ошибка в определении содержания иона O^+ не оказывает существенного влияния на величину полного содержания кислорода. Напротив, большинство областей Н II в спиральных галактиках имеют низкую температуру, подавляющая доля кислорода в этих областях Н II находится в зоне O^+ , т. е. зона O^+ вносит основной вклад в полное содержание кислорода. Поэтому ошибка определения содержания иона O^+ оказывает существенное влияние на величину полного содержания кислорода в случае областей Н II с высоким содержанием кислорода.

Здесь мы исследуем возможность определения надежных значений содержания кислорода в областях Н II на основе спектров SDSS, в которых нет небулярной линии [O II] $\lambda\lambda$ 372.7 нм. С этой целью мы рассмотрим спиральную галактику M101. Во-первых, гигантская спиральная галактика M101 содержит свыше тысячи областей Н II, и спектры более трех десятков из них содержатся в базе спектральных данных SDSS. Во-вторых, спектральные исследования областей Н II в диске M101 проводились неоднократно [11—13, 22, 24—27, 29]. Радиальное распределение содержания кислорода в диске этой галактики установлено более или менее надежно [3, 11, 16, 20].

Мы будем использовать следующие обозначения:

$$\begin{aligned} R_2 &= I_{[O II] \lambda\lambda 372.7 + \lambda 372.9} / I_{H\beta}, \\ R_3 &= I_{[O III] \lambda\lambda 495.9 + \lambda 500.7} / I_{H\beta}, \\ R &= I_{[O III] \lambda 436.3} / I_{H\beta}, \\ R_{23} &= R_2 + R_3. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом этих обозначений параметр возбуждения P определяется как $P = R_3 / (R_2 + R_3)$.

СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В ГАЛАКТИКЕ M101

Спектральные данные. В базе спектральных данных SDSS мы нашли 18 областей Н II в диске галактики M101, в спектрах которых обнаружено и достаточно надежно измеряется авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3 нм. Для дополнительной оценки качества спектра мы использовали

Таблица 1. Список исследованных областей в диске галактики M101

Номер области Н II	Номер в SDSS	Номер в NGC, номер в списке [23]	R_G	$c(H_\beta)$
1	J140331.32+542114.5		0.20	0.73
2	J140339.85+541856.7	NGC 5461, S7	0.32	1.04
3	J140341.53+541909.2	NGC 5461, S7	0.33	0.55
4	J140332.35+541719.4		0.34	0.27
5	J140353.11+542206.4	NGC 5462, S9	0.43	0.62
6	J140253.69+541522.6		0.43	0.37
7	J140301.16+541429.3	NGC 5455, S10	0.46	0.64
8	J140357.28+542228.5		0.48	0.58
9	J140233.07+542530.4		0.54	0.36
10	J140230.58+541609.7		0.54	1.06
11	J140228.20+541633.0		0.54	0.35
12	J140220.20+542002.5		0.55	0.45
13	J140220.61+541746.3		0.58	0.35
14	J140410.99+542521.7	S12	0.67	0.00
15	J140411.24+542518.6		0.67	0.00
16	J140428.63+542352.7	NGC 5471, S13	0.81	0.56
17	J140313.72+543543.2		1.05	0.00

измеренное отношение $[O III] \lambda 500.7 \text{ нм} / [O III] \lambda 495.9 \text{ нм}$ и/или выводимое значение электронной температуры t_3 (см. ниже). В спектре объекта J140429.47+542347.2 присутствует авроральная линия кислорода $[O III] \lambda 436.3 \text{ нм}$, но полученное значение электронной температуры t_3 слишком высоко, поэтому этот объект был исключен из рассмотрения. Окончательная выборка содержит 17 областей Н II (табл. 1). В третьей графе приведено название области Н II — номер в NGC, номер в списке Сирла [23]. Нумерацию по каталогу Ходжа и др. [7] мы не использовали, так как ошибка в координатах области Н II в этом списке может превышать как размеры областей Н II, так и расстояния между ними.

Положение областей Н II из нашей выборки в диске галактики показано на рис. 1.

Интенсивности линий в спектрах этих областей Н II были измерены с помощью пакета IRAF, свободно распространяемого Национальной обсерваторией оптической астрономии. Измеренные интенсивности линий исправлены за покраснение с использованием аналитической аппроксимации кривой покраснения из работы [10]. Коэффициент экстинкции c_{H_β} определялся с использованием линий H_β и H_γ . Теоретическое отношение интенсивностей линий H_γ и H_β принималось равным 0.47 [1]. Полученные значения коэффициента экстинкции c_{H_β} приведены в табл. 1. В тех случаях, когда найденное значение коэффициента экстинкции c_{H_β} отрицательное, мы принимали $c_{H_\beta} = 0$. Интенсивности линий $[O III] \lambda 436.3 \text{ нм}$, $[O III] \lambda \lambda 495.9, 500.7 \text{ нм}$ и $[O II] \lambda \lambda 732.0, 733.0 \text{ нм}$, исправленные за покраснение и нормированные на интенсивность линии H_β , приведены в табл. 2. Эти данные лежат в основе нашего исследования.

Содержания кислорода (O/H)_{732.5}. При определении содержания кислорода в области Н II мы используем двухзонную модель распределения температуры в области Н II. Необходимые уравнения для определения содержания кислорода приведены в работе [9]. Электронная температура t_3 в зоне O^{++} определяется из выражения

$$t_3 = \frac{1.432}{\lg(R_3/R) - \lg C_T},$$

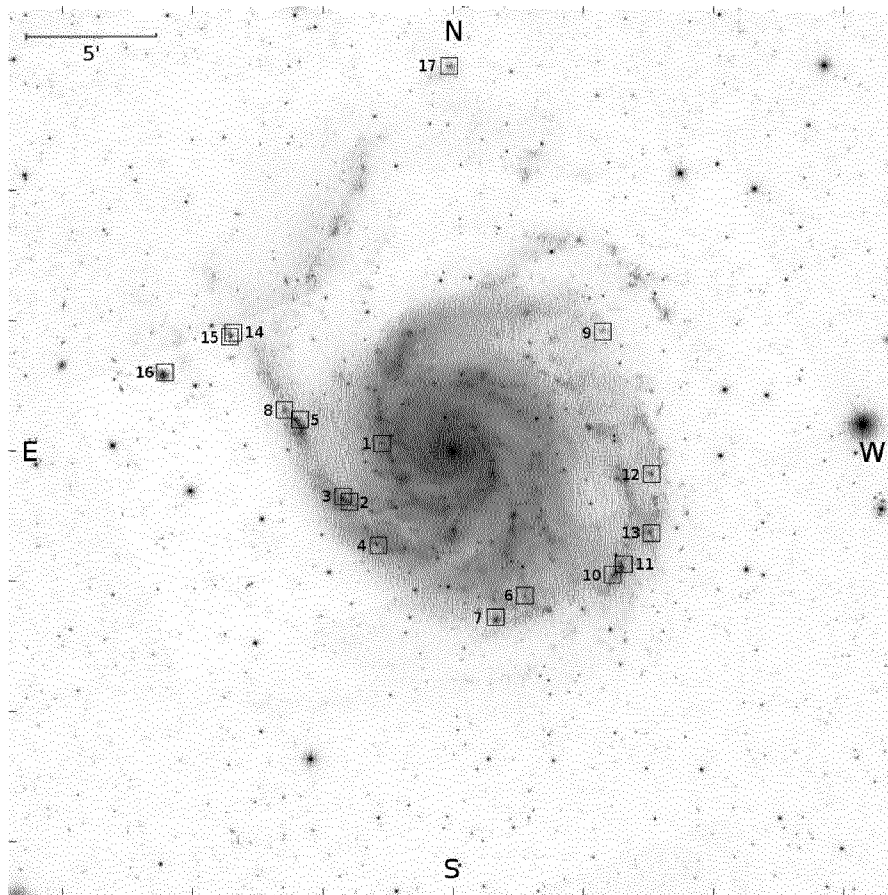


Рис. 1. Изображение спиральной галактики M101. Квадратиками помечены области Н II из нашей выборки. Номера возле квадратиков соответствуют номерам в табл. 1

Таблица 2. Характеристики исследованных областей в диске галактики M101: измеренные и исправленные за покраснение интенсивности линий, оценки содержаний кислорода и вычисленная интенсивность линии [OII] λ 372.7 нм. Интенсивности линий нормированы на интенсивность линии $H\beta$. Содержания кислорода даны в шкале $12 + \lg(O/H)$

Но- мер	[OII] λ 436.3	[OII] λ 495.9, 500.7	[OII] λ 732.0, 733.0	(O/H) $_{732.5}$	[OII] λ 372.7	(O/H) $_{372.7}$
1	0.0032 \pm 0.0008	1.395 \pm 0.006	0.0234 \pm 0.0014	8.38	2.91	8.53
2	0.0043 0.0015	1.763 0.010	0.0429 0.0025	8.57	2.69	8.50
3	0.0028 0.0011	2.350 0.013	0.0526 0.0033	9.01	1.15	8.63
4	0.0146 0.0021	3.953 0.018	0.0316 0.0044	8.41	1.90	8.39
5	0.0221 0.0012	5.367 0.015	0.0445 0.0021	8.49	1.42	8.39
6	0.0060 0.0017	3.311 0.023	0.0416 0.0051	8.79	1.16	8.56
7	0.0197 0.0006	5.127 0.008	0.0438 0.0011	8.52	1.41	8.40
8	0.0208 0.0055	4.967 0.056	0.0386 0.0077	8.44	1.61	8.37
9	0.0696 0.0068	6.321 0.069	0.0430 0.0084	8.01	3.42	8.13
10	0.0131 0.0009	4.081 0.011	0.0390 0.0014	8.53	1.57	8.43
11	0.0121 0.0039	3.037 0.031	0.0445 0.0067	8.39	2.73	8.39
12	0.0378 0.0049	4.880 0.045	0.0410 0.0062	8.12	3.23	8.22
13	0.0584 0.0040	7.058 0.049	0.0379 0.0057	8.18	2.08	8.20
14	0.0325 0.0027	4.804 0.022	0.0427 0.0048	8.20	2.83	8.25
15	0.0362 0.0012	4.366 0.013	0.0354 0.0023	8.03	3.99	8.22
16	0.0596 0.0013	5.669 0.012	0.0474 0.0017	8.02
17	0.0806 0.0069	4.921 0.098	0.0640 0.0135	7.77

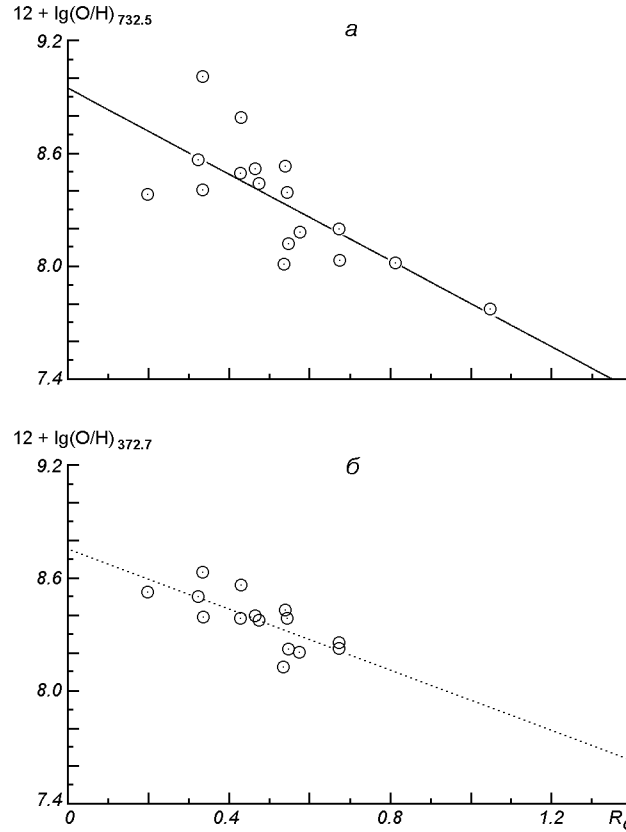


Рис. 2. Радиальное распределение содержания кислорода в диске галактики M101: а — $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{732.5}$, прямая линия — МНК-аппроксимация (2); б — $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{372.7}$, штриховая — уравнение (4)

где t_3 в единицах 10^4 К. Величина C_T дается уравнением

$$C_T = (8.44 - 1.09t_3 + 0.5t_3^2 - 0.08t_3^3)v,$$

где

$$v = \frac{1 + 0.0004x_3}{1 + 0.044x_3},$$

и

$$x_3 = 10^{-4}n_e t_3^{-1/2}.$$

Содержания ионов кислорода определяются из уравнений

$$12 + \lg(\text{O}^{++}/\text{H}^+) = \lg(R_3) + 6.200 + \frac{1.251}{t_3} - 0.551\lg t_3 - 0.014t_3$$

и

$$12 + \lg(\text{O}^+/\text{H}^+) = \lg(R_2) + 5.961 + \frac{1.676}{t_2} - 0.401\lg t_2 - 0.034t_2 + \lg(1 + 1.35x_2),$$

или

$$12 + \lg(\text{O}^+/\text{H}^+) = \lg(I_{\text{O III } \lambda 732.0 + \lambda 733.0} / I_{\text{H}\beta}) + 6.901 + \frac{2.487}{t_2} - 0.483\lg t_2 - 0.013t_2 + \lg(1 - 3.48x_2),$$

где $x_2 = 10^{-4}n_e t_2^{-1/2}$, n_e — электронная плотность в см^{-3} .

Полное содержание кислорода находится как сумма

$$\frac{\text{O}}{\text{H}} = \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} + \frac{\text{O}^{++}}{\text{H}^+}.$$

Так как мы рассматриваем только низкотемпературные области Н II, то вкладом иона O^{+++} в полное содержание кислорода можно пренебречь. Хороший индикатор мощности зоны O^{+++} — линия $\text{He}^+ \lambda 468.6$ нм [10] — в спектрах исследуемых областей Н II слаба или не обнаруживается.

Электронная температура t_2 в зоне O^+ обычно находится из соотношения, связывающего t_2 и t_3 . Мы используем соотношение из работы [21]

$$t_2 = 0.72t_3 + 0.26.$$

Используя измеренные интенсивности линий [O III] $\lambda 436.3$ нм, [O III] $\lambda\lambda 495.9, 500.7$ нм и [O II] $\lambda\lambda 732.0, 733.0$ нм и приведенные уравнения, мы определили содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$ для названной выборки областей Н II (табл. 2). Электронные концентрации, оцененные по отношению интенсивностей линий [S II]671.7/[S II]673.1, составляют 10—200 cm^{-3} . Такая электронная концентрация типична для подавляющего большинства внегалактических областей Н II [2, 30]. Поэтому при определении содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$ для нашей выборки областей Н II мы использовали стандартное предположение, т. е. принимали $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$.

Радиальное распределение содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$ в диске M101 представлено на рис. 2, а (кружки). Галактоцентрические расстояния областей Н II определены по координатам из SDSS. Значения координат центра галактики ($14^{\text{h}}03^{\text{m}}12.5^{\text{s}}$ и $54^{\circ}20'55''$), позиционного угла большой оси галактики (37°) и угла между плоскостью галактики и картинной плоскостью (18°) взяты из работы [4]. Галактоцентрические расстояния областей Н II нормированы на изофотный радиус галактики R_{25} , который принят равным $R_{25} = 14.4'$ [4]. Галактоцентрические расстояния R_G областей Н II в долях изофотного радиуса приведены в табл. 1.

Линейная МНК-аппроксимация зависимости $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$ от R_G имеет вид

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{732.5} = 8.95 \pm 0.15 - (1.14 \pm 0.26)R_G. \quad (2)$$

Среднее отклонение содержания кислорода от аппроксимационной линии составило $\Delta \lg(\text{O}/\text{H})_{732.5} = 0.20$. Намечается тенденция увеличения разброса точек с увеличением металличности (с уменьшением галактоцентрического расстояния).

Итак, содержания кислорода, полученные с использованием авроральных линий кислорода [O II] $\lambda\lambda 732.0, 733.0$ нм, показывают большой разброс вокруг аппроксимационной прямой. Это свидетельствует о том, что содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$ в некоторых областях Н II имеют низкую точность. Можно ли найти более точные содержания кислорода на основе имеющихся спектральных данных SDSS?

Содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{372.7}$ В типичном случае при определении химического состава областей Н II в спиральных галактиках исследователь сталкивается с ситуацией, когда измерены интенсивности R_2 и R_3 (1) сильных небулярных линий кислорода, а интенсивность R слабой авроральной линии кислорода лежит ниже порога обнаружения. Это препятствует применению классического T_e -метода для определения химического состава области Н II. Эта проблема была исследована в наших предыдущих работах [18, 19]. Было показано, что наблюдается однозначное соответствие между интенсивностями небулярных и авроральных линий в спектрах областей Н II. Другими словами, было показано, что интенсивность R слабой

авроральной линии кислорода может быть вычислена по измеренным интенсивностям R_2 и R_3 сильных небулярных линий.

В случае нашей выборки областей Н II мы измерили интенсивности небулярной (R_3) и авроральной (R) линий кислорода, но в спектрах SDSS небулярная линия R_2 кислорода лежит за пределами спектрального диапазона спектрографа. Если интенсивность R линии кислорода может быть вычислена по измеренным интенсивностям R_2 и R_3 , то мы вправе ожидать, что и интенсивность R_2 также может быть вычислена по измеренным интенсивностям R_3 и R . Следуя [19], мы получили соотношение

$$\lg R_2 = 3.55 - 1.11 \lg R_3 - 0.93 (\lg R_3)^2 + 1.46 \lg R + 0.119 (\lg R)^2. \quad (3)$$

Используя это уравнение, мы вычислили интенсивность линии R_2 для областей Н II из нашей выборки, кроме двух областей Н II на галактоцентрических расстояниях $R_G = 0.81$ и 1.05 . Указанные области Н II исключены по следующей причине. Уравнение (3) получено для областей Н II с высоким содержанием кислорода ($12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.20$). Содержание кислорода в области Н II на большом галактоцентрическом расстоянии заведомо ниже указанного предела, и следовательно, уравнение (3) нельзя использовать в этом случае. Применение уравнения (3) к областям Н II с низким содержанием кислорода (в случае M101 для $R_G > 0.7$) привело бы к неправильным значениям содержания кислорода в этих областях Н II и к появлению ложного изгиба в наклоне радиального распределения кислорода [17]. Вычисленные значения R_2 приведены в табл. 2. Вообще говоря, применимость уравнения (3) к областям Н II с галактоцентрическим расстоянием $R_G = 0.67$ также может вызывать сомнения, так как значения содержания кислорода в этих областях Н II (≈ 8.20) лежат вблизи границы применимости этого уравнения.

Используя вычисленные значения R_2 , мы определили значения содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{372.7}$ в областях Н II (табл. 2 и рис. 2, б). Эта зависимость содержания от R_G аппроксимируется прямой

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{372.7} = 8.75 \pm 0.10 - (0.81 \pm 0.20) R_G. \quad (4)$$

Сравнение уравнений (2) и (4) показывает, что зависимости $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$ и $(\text{O}/\text{H})_{372.7}$ от R_G формально согласуются между собой. Среднее отклонение значений $(\text{O}/\text{H})_{372.7}$ от аппроксимирующей прямой составляет $\Delta \lg(\text{O}/\text{H})_{372.7} = 0.09$, что в два раза меньше, чем для содержания $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$, т. е. содержания $(\text{O}/\text{H})_{372.7}$ существенно точнее.

Исходя из этого, в дальнейшем под $(\text{O}/\text{H})_{\text{Sloan}}$ -содержаниями мы будем подразумевать значения $(\text{O}/\text{H})_{372.7}$. Однако содержания $(\text{O}/\text{H})_{372.7}$ могут быть определены только для областей Н II высокой металличности ($12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.20$). Поэтому для областей Н II низкой металличности ($12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.20$) под $(\text{O}/\text{H})_{\text{Sloan}}$ -содержаниями будем подразумевать значения $(\text{O}/\text{H})_{732.5}$.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проверка достоверности содержаний $(\text{O}/\text{H})_{\text{Sloan}}$. Как было отмечено выше, измерения спектров областей Н II в галактике M101 проводилась неоднократно, и радиальное распределение содержания кислорода в диске этой галактики установлено более или менее надежно. Мы собрали из литературных источников [5, 6, 11—13, 15, 22, 24—27, 29] спектральные данные, которые содержат измерения авроральной линии кислорода [O III] λ 436.3 нм. В этих работах были определены и содержания кислорода

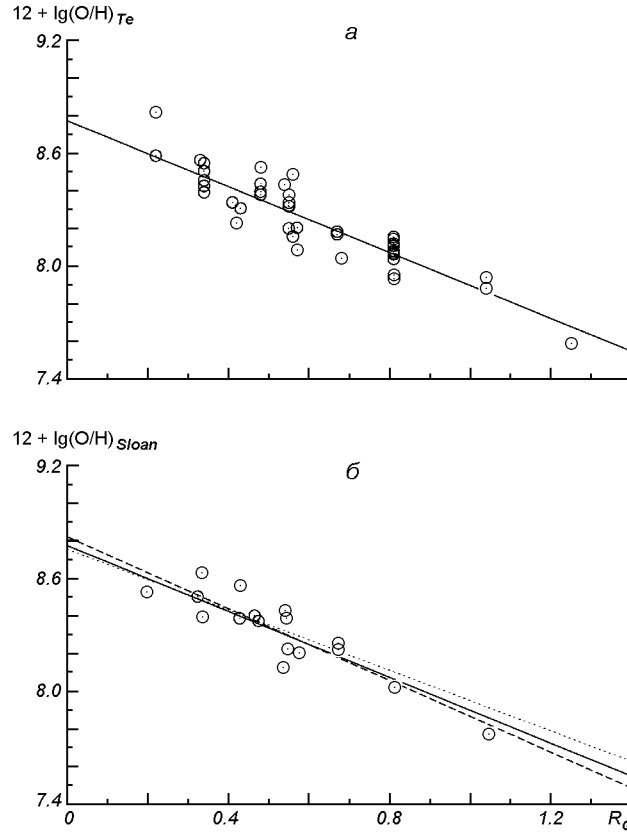


Рис. 3. Радиальное распределение содержания кислорода в диске галактики M101: а — $12 + \lg(O/H)_{Te}$, прямая линия — МНК-аппроксимация (5); б — $12 + \lg(O/H)_{Sloan}$, штриховая прямая — уравнение (6), сплошная — уравнение (5), пунктир — уравнение (4)

$(O/H)_{Te}$ при помощи T_e -метода. Массив данных $(O/H)_{Te}$, полученный на протяжении свыше 30 лет, нельзя считать однородным. Во-первых, по мере совершенствования квантовомеханических расчетов и появления новых экспериментальных данных уточняются атомные константы: вероятности переходов и параметры столкновений. Во-вторых, в разных исследованиях используются разные модели для описания распределения температуры в области H II: изотермическая модель, двухзонная модель, модель с мелко-масштабными температурными флуктуациями. Для того чтобы получить однородный массив $(O/H)_{Te}$, мы переопределили содержания кислорода, используя приведенные выше уравнения.

Радиальное распределение содержания кислорода $(O/H)_{Te}$ в диске M101 представлено на рис. 3, а. Сплошная линия показывает аппроксимационную зависимость

$$12 + \lg(O/H)_{Te} = 8.77 \pm 0.04 - (0.87 \pm 0.06)R_G, \quad (5)$$

где значения коэффициентов близки к значениям, полученным в работах [11, 16, 20]. Радиальное распределение содержания кислорода $(O/H)_{Sloan}$ в диске M101 представлено на рис. 3, б, где штриховая прямая — аппроксимация

$$12 + \lg(O/H)_{Sloan} = 8.82 \pm 0.07 - (0.95 \pm 0.12)R_G, \quad (6)$$

найденная при помощи метода наименьших квадратов. Сплошная линия показывает зависимость (5), пунктирная — зависимость (4).

Сравнение уравнений зависимостей (5) и (6) показывает, что они согласуются между собой. Следует отметить, что добавление двух точек (с галактоцентрическими расстояниями $R_G = 0.81$ и 1.05) к выборке $(O/H)_{372.7}$ приводит к большим изменениям параметров зависимости $O/H - R_G$ (ср. выражения (6) и (4)), чем различия между зависимостями (5) и (6). Разбросы точек на рис. 3, а и б сравнимы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы спектры областей Н II в диске спиральной галактики M101 (NGC5457) из базы данных цифрового обзора неба SDSS (the Sloan Digital Sky Survey). Отобраны 17 областей Н II, в спектрах которых наблюдается авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3 нм.

Определено содержание кислорода в исследуемой выборке областей Н II. Небулярная линия [O II] λ 372.7 нм отсутствует в спектрах SDSS близких объектов, что не позволяет использовать стандартный вариант классического T_e -метода для определения содержания кислорода в этих объектах. Содержание иона O^+ в области Н II было определено двумя нетрадиционными путями. 1). Для определения содержания иона O^+ в области Н II использовались авроральные линии кислорода [O II] $\lambda\lambda$ 732.0, 733.0 нм вместо небулярной линии кислорода [O II] λ 372.7 нм. 2). Интенсивность линии кислорода [O II] λ 372.7 нм была вычислена по измеренным интенсивностям линий кислорода [O III] $\lambda\lambda$ 495.9, 500.7 нм и [O III] λ 436.3 нм с использованием недавно найденной зависимости между интенсивностями кислородных линий в спектрах областей Н II (ff-relation). Найдено, что второй метод позволяет получить более точные значения содержания кислорода.

Радиальное распределение содержания кислорода в диске галактики M101 согласуется с радиальным распределением, полученном при помощи T_e -метода. Это свидетельствует о том, что спектральные данные из SDSS, дополненные информацией о небулярной линии [O II] λ 372.7 нм, найденной при помощи «ff-relation», позволяют определить содержания кислорода, сравнимы по точности с содержаниями, определенными при помощи стандартного T_e -метода.

Авторы благодарны Ю. И. Изотову за полезные обсуждения и помощь, а также рецензенту за конструктивные замечания.

Авторы благодарят международный коллектив ученых за их огромный труд по созданию уникальной базы данных SDSS, которая составила основу данного исследования.

1. *Aller L. H.* Physics of thermal gaseous nebulae. — Dordrecht: D. Reidel Publ. Company, 1984.—350 p.
2. *Bresolin F., Schaerer D., Gonzalez Delgado R. M., Stasinska G.* A VLT study of metal-rich extragalactic H II regions I. Observations and empirical abundances // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**441**, N 3.—P. 981—1004.
3. *Cedres B., Urbaneja M. A., Cepa J.* The oxygen abundance gradient in M101: The reliability of the P method // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**422**, N 2.—P. 511—514.
4. *de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corvin H. G., et al.* Third Reference Catalog of bright Galaxies. — New York: Springer, 1991.—712 p.
5. *Garnett D. R., Kennicutt R. C.* A very metal poor H II region in the outer disk of M101 // *Astrophys. J.*—1994.—**426**, N 1.—P. 123—130.

6. Garnett D. R., Shields G. A., Peimbert M., et al. Carbon in spiral galaxies from Hubble Space Telescope spectroscopy // *Astrophys. J.*—1999.—**513**, N 1.—P. 168—179.
7. Hodge P. W., Gurwell M., Goldader D., Kennicutt R. C. The H II regions of M101. I. An atlas of 1264 emission regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1990.—**73**.—P. 661—670.
8. Izotov Yu. I., Stasinska 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.
9. Izotov Yu. I., Stasinska 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.
10. Izotov Yu. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A. The primordial helium abundance from a new sample of metal-deficient blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**435**, N 2.—P. 647—667.
11. Kennicutt R. C., Bresolin F., Garnett D. R. The composition gradient in M101 revisited. II. Electron temperatures and implications for the nebular abundance scale // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 2.— P. 801—820.
12. Kennicutt R. C., Garnett D. R. The composition gradient in M101 revisited. I. H II region spectra and extinction properties // *Astrophys. J.*—1996.—**456**, N 2.—P. 504—518.
13. Kinkel U., Rosa M. R. How metal-rich are metal-rich H II regions // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**282**, N 3.—P. L37—L40.
14. Kniazev A. Y., Grebel E. K., Hao L., et al. Discovery of eight extremely metal-poor galaxies in the SLOAN Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2003.—**593**, N 2.—P. L73—L77.
15. McCall M. L., Rybski P. M., Shields G. A. The chemistry of galaxies. I. The nature of giant extragalactic H II regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—**57**, N 1.—P. 1—62.
16. Pilyugin L. S. The oxygen abundance distribution in M101 // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**373**, N 1.—P. 56—62.
17. Pilyugin L. S. The bends in the slopes of radial abundance gradients in the disks of spiral galaxies—Do they exist? // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**397**, N 1.—P. 109—114.
18. Pilyugin L. S. On the relationship between auroral and nebular oxygen line intensities in spectra of H II regions // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**436**, N 1.—P. L1—L4.
19. Pilyugin L. S., Thuan T. X., Vilchez J. M. Oxygen abundance in the most oxygen-rich spiral galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**367**, N 3.—P. 1139—1146.
20. Pilyugin L. S., Vilchez J. N., Contini T. Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**425**, N 3.—P. 849—871.
21. Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Thuan T. X. On the relation between electron temperatures in the O^+ and O^{++} zones in high-metallicity H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**370**, N 4.—P. 1928—1934.
22. Rayo J. F., Peimbert M., Torres-Peimbert S. Gradients in the physical conditions of M101 and the pregalactic helium abundance // *Astrophys. J.*—1982.—**255**, N 1.—P. 1—10.
23. Searle L. Evidence for composition gradients across the disks of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1971.—**168**, N 3.—P. 327—341.
24. Shields G. A., Searle L. The composition gradient across M101 // *Astrophys. J.*—1978.—**222**, N 3.—P. 821—832.
25. Skillman E. D. Spatial variations in the physical conditions in the giant extragalactic H II region NGC5471 // *Astrophys. J.*—1985.—**290**, N 2.—P. 449—461.
26. Smith H. E. Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1975.—**199**, N 3.—P. 591—610.
27. Torres-Peimbert S., Peimbert M., Fierro J. Physical conditions of H II regions in M101 and the pregalactic helium abundance // *Astrophys. J.*—1989.—**345**, N 1.—P. 186—195.
28. Tremonti C. A., Heckman T. M., Kaufmann G., et al. The origin of the mass-metallicity relation: insights from 53000 star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2004.—**613**, N 2.—P. 898—913.
29. van Zee L., Salzer J. J., Haynes M. P., et al. Spectroscopy of outlying H II regions in spiral galaxies: Abundances and radial gradients // *Astron. J.*—1998.—**116**, N 6.—P. 2805—2833.
30. Zaritsky D., Kennicutt R. C., Huchra J. P. H II regions and the abundance properties of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**420**, N 1.—P. 87—109.

Поступила в редакцию 26.10.06