

УДК 524.78

Л. С. Пилюгин¹, А. В. Тугай²¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
пр. Глушкова 6, Киев, 03022**Оптические эмиссионные линии в спектрах объектов с рентгеновскими источниками в галактике M 101**

В спиральной галактике M 101 найдены семь объектов с эмиссионными линиями, положения которых совпадают с рентгеновскими источниками в пределах $10''$. Из них пять являются областями H II, один — звездообразным источником вблизи центра галактики, еще один — далекой галактикой, которая проектируется на диск M 101. Эмиссионная линия H α в спектрах трех областей H II является узкой. Эмиссионная линия H α в спектрах двух областей H II содержит широкий компонент, вклад которого составляет около 12 % и 2 % в поток в линии H α . Наблюдаемые профили запрещенных линий [O III] 500.7 нм и [S II] $671.7 + 673.1$ нм в спектрах всех рассмотренных областей H II не имеют широких компонентов. Это свидетельствует о том, что наличие рентгеновского источника внутри или вблизи области H II оказывает относительно слабое влияние на оптический эмиссионный спектр области H II либо не сказывается вообще.

ОПТИЧНІ ЕМІСІЙНІ ЛІНІЇ У СПЕКТРАХ ОБ'ЄКТІВ З РЕНТГЕНІВСЬКИМИ ДЖЕРЕЛАМИ В ГАЛАКТИЦІ M101, Пилюгин Л. С., Тугай А. В. — У спіральній галактиці M 101 знайдено сім об'єктів з емісійними лініями, положення яких збігаються з рентгенівськими джерелами у межах $10''$. З них п'ять — це області H II, один об'єкт є рентгенівським джерелом поблизу центра галактики, і ще один — далекою галактикою, яка проектується на диск M 101. Емісійна лінія H α у спектрах трьох областей H II є вузькою. Емісійна лінія H α в спектрах двох областей H II містить широку складову, внесок якої складає приблизно 12 % і 2 % від потоку в лінії H α . Спостережувані профілі заборонених ліній [O III] 500.7 нм і [S II] $671.7 + 673.1$ нм у спектрах всіх розглянутих областей H II не мають широких складових. Це свідчить про те, що наявність рентгенівського джерела всередині чи поблизу області H II мало впливає на оптичний емісійний спектр області H II або не впливає зовсім.

OPTICAL EMISSION LINES IN SPECTRA OF OBJECTS WITH X-RAY SOURCES IN THE GALAXY M 101, by Pilyugin L. S., Tugay A. V. — We found seven emission line objects in the spiral galaxy M 101 which coincide with X-ray sources within a 10'' box. Five of them are H II regions, one is a stellar-like source near the galactic centre, and one is a distant galaxy projected onto the M 101 disk. The H α emission line in the spectra of three H II regions is thin. The profile of the H α emission line in the spectra of two H II regions shows a wide component the contribution of which to the H α flux is 12 % and 2 %. No wide components are detected in the observed profiles of the forbidden lines [O III] 500.7 nm and [S II] 671.7 + 673.1 nm in the spectra of all the HII regions under consideration. This testifies that the presence of an X-ray source inside or near an H II region has no significant (if any) influence on the optical emission lines in the H II region spectra.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика областей H II базируется на предположении о том, что единственным источником возбуждения туманности является фотоионизация атомов коротковолновым тепловым излучением массивных горячих звезд. Это утверждение выполняется для областей H II, связанных с одиночными звездами. Многие области H II связаны не с одиночными звездами, а с областями звездообразования. Кенникатт [11] измерил потоки в линии H α от ярчайших областей H II в близких спиральных и неправильных галактиках. Поток ионизирующего излучения от скопления звезд, возбуждающих свечение области H II, принято характеризовать эквивалентным количеством звезд спектрального класса O7, находящихся на главной последовательности (класс светимости — V). В ярчайших областях H II в близких спиральных и неправильных галактиках эквивалентное количество ионизирующих звезд составляет 100 — 1000 звезд O7 V. Спектры большого количества областей H II в далеких галактиках получены в рамках цифрового обзора неба Sloan (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) [19]. SDSS-спектры получены с фиксированной апертурой (круглая диафрагма с диаметром 3''). Чем дальше галактика, тем большая часть галактики попадает в диафрагму. При красном смещении $z = 0.07$ измеряется излучение от области с диаметром около 4 кпк. Эквивалентное количество ионизирующих звезд в гигантских областях H II (или комплексах областей H II), найденное по SDSS-спектрам, может составлять 10^4 — 10^5 звезд O7 V [2, 15].

В случае гигантских областей H II нетепловые источники излучения (например остатки вспышек сверхновых, ультраяркие рентгеновские источники) могут делать вклад в возбуждение области H II. Действительно, процесс звездообразования в области звездообразования может длиться десятки миллионов лет (несколько последовательных эпизодов или вспышек звездообразования). Если возраст области

звездообразования превышает время жизни массивных звезд, то такая область звездообразования будет содержать не только массивные звезды (образовавшиеся в последних вспышках звездообразования), но и остатки вспышек сверхновых (продукт эволюции массивных звезд, образовавшихся в первых вспышках звездообразования). Ультрарярые рентгеновские источники (ULX) обычно связаны с молодыми звездными скоплениями [20].

Признаком наличия нетеплового источника возбуждения туманности может служить наличие рентгеновского излучения. В данном исследовании мы рассмотрим области Н II в гигантской спиральной галактике М 101, положения которых совпадают с положениями рентгеновских источников. Влияние нетеплового источника возбуждения туманности может проявляться в оптическом спектре туманности двояким образом. Во-первых, в профилях оптических эмиссионных линий могут появляться широкие компоненты. Во-вторых, соотношения между интенсивностями разных линий могут искажаться и не будут соответствовать фотоионизационным моделям. Поиск этих эффектов и является предметом данного исследования.

ОБЛАСТИ Н II С РЕНТГЕНОВСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ

Оптические спектры большого количества областей Н II измерены в гигантской спиральной галактике М 101, находящейся на расстоянии 6.7 Мпк [16]. SDSS-спектры областей Н II использовались для установления радиального распределения в диске галактики М 101 [3] и для тестирования калибровочных соотношений для определения содержания кислорода и азота и электронной температуры [13]. Оптические эмиссионные спектры 68 объектов в галактике М 101 взяты из спектральной базы данных Цифрового обзора неба Sloan (DR7) [4]. Положения этих объектов в картинной плоскости показаны кружками на рис. 1. Координаты 108 рентгеновских источников взяты из работ [8, 9]. Положения рентгеновских источников в картинной плоскости показаны точками на рис. 1.

В рамках цифрового обзора неба Sloan спектры получены с круглой диафрагмой диаметром 3 [19]. Точность положения рентгеновских источников составляет порядка 2 [9]. Учитывая то, что размер диафрагмы часто меньше углового размера области Н II в диске галактики М 101, мы включили в список для рассмотрения спектры, для которых на расстоянии меньше 10' от положения центра диафрагмы имеется рентгеновский источник. В спиральной галактике М 101 найдены семь объектов с эмиссионными линиями, положения которых совпадают с рентгеновскими источниками в пределах 10'. Этот предел соответствует линейному расстоянию 0.33 кпк в картинной плоскости при расстоянии около 6.7 Мпк до галактики М 101. Следует отметить, что пространственное расстояние между центром области, для которой получен оптический спектр, и рентгеновским источником

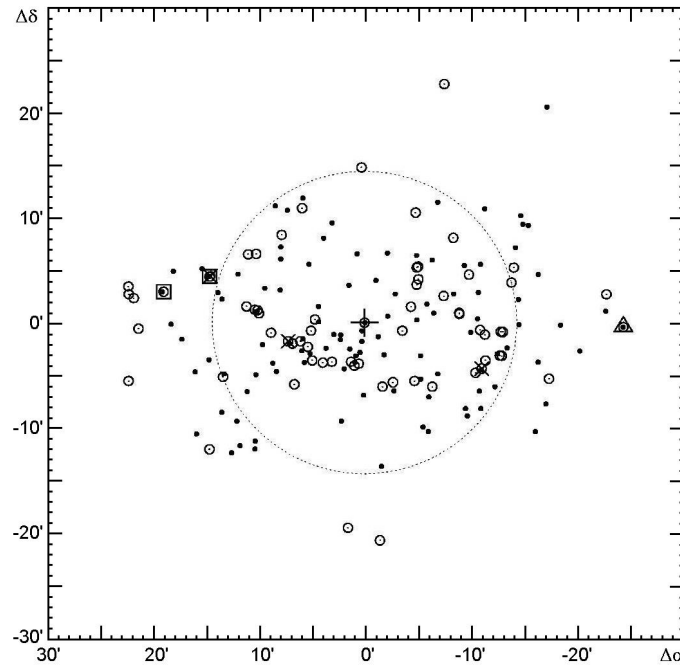


Рис. 1. Распределение объектов с эмиссионными линиями (кружки) и рентгеновских источников (точки) по изображению спиральной галактики М 101. Символами указаны объекты с эмиссионными линиями, положения которых совпадают в пределах $10''$ с положениями рентгеновских источников. Прямой крестик — звездообразный объект вблизи центра галактики, треугольник — далекая галактика, проектирующаяся на М 101, квадратики — области Н II с широким компонентом в линии Н, косые крестики — области Н II с узкой эмиссионной линией Н. Пунктиром показана изофотная граница галактики

может заметно превышать расстояние между ними в картинной плоскости. Расстояние между ними в картинной плоскости можно рассматривать как нижний предел пространственного расстояния. Угол между картинной плоскостью и плоскостью галактики М 101 сравнительно мал [7]. Поэтому два объекта, которые находятся близко друг от друга в картинной плоскости, расположены близко и в диске галактики. Однако расстояние между ними по лучу зрения может быть равным толщине диска галактики М 101.

Таким образом, расстояния между объектами, найденные как расстояния между ними в картинной плоскости, не являются бесспорными. Пять объектов являются областями Н II. Один объект является звездообразным источником вблизи центра галактики. Один объект является далекой галактикой, которая проектируется на диск галактики М 101. Список объектов с эмиссионными линиями, положения которых совпадают с рентгеновскими источниками в пределах $10''$, приведен в таблице.

Как отмечалось выше, нетепловой источник возбуждения туманности может приводить к появлению двух эффектов в оптическом спектре туманности: 1) в профилях оптических эмиссионных линий могут появляться широкие компоненты, 2) соотношения между ин-

Список объектов с эмиссионными линиями в М 101 с рентгеновскими источниками (d — расстояние между центром участка туманности, для которого получен оптический спектр, и рентгеновским источником)

Номер SDSS	Номер спектра SDSS	Номер UMXX [9]	d	Примечание
J140341.53 + 541909.3	1323 52797 011	J140341.2 + 541902	8.70	Н II
J140312.52 + 542056.2	1323 52797 012	J140312.4 + 542056	2.10	звездообразный
J140410.98 + 542521.8	1323 52797 016	J140411.6 + 542521	4.81	Н II
J140134.57 + 542031.2	1323 52797 045	J140134.7 + 542031	1.90	галактика
J140428.62 + 542352.8	1324 53088 234	J140429.1 + 542353	7.02	Н II
J140228.20 + 541633.1	1324 53088 271	J140228.4 + 541625	8.47	Н II
J140411.23 + 542518.7	1325 52762 350	J140411.6 + 542521	2.48	Н II

тенсивностями разных линий могут искажаться и будут отличаться от соотношений, которые наблюдаются в областях Н II, возбуждаемых коротковолновым излучением горячих звезд. Рассмотрим сначала профили эмиссионных линий в наших областях Н II. Эмиссионная линия Н в спектрах трех областей Н II (спектры SDSS 1323 52797 011, 1323 52797 016, 1324 53088 271) является узкой и не показывает особенностей (рис. 2, *a*–*в*).

Эмиссионная линия Н в спектрах двух областей Н II содержит широкую составляющую (рис. 2, *г*–*д*). Вклад широкой составляющей в поток в линии Н составляет около 12 % для спектра SDSS 1324 53088 234 и около 2 % для спектра SDSS 1325 52762 350. Наблюдаемые профили запрещенных линий [O III] 500.7 и [S II] 671.7 + 673.1 нм в спектрах SDSS 1324 53088 234 и SDSS 1325 52762 350 вообще не имеют широких компонентов (рис. 3).

Наличие широкого компонента в линии Н в спектре SDSS 1324 53088 234 отмечалось и ранее [14]. Следует отметить, что спектр SDSS 1324 53088 234 относится к области Н II NGC 5471. Эта область Н II содержит остаток гиперновой, который детально исследован в работе [17]. Было найдено, что линии серы [S II] 671.7 + 673.1 нм усилены в трех областях с размерами 50—70 пк. Тот факт, что наблюдаемые профили этих линий в спектре SDSS 1324 53088 234 не имеют широких компонентов (рис. 3), свидетельствует о том, что вклад излучения остатка гиперновой мал по сравнению с излучением области Н II в той части туманности, для которой получен спектр SDSS 1324 53088 234.

Спектры SDSS 1323 52797 016 и SDSS 1325 52762 350 получены для двух участков одной и той же гигантской области Н II. Вклад широкого компонента в поток в линии Н составляет около 2 % в спектре SDSS 1325 52762 350. Широкий компонент не обнаружен в спектре SDSS 1323 52797 016.

В работе [1] исследованы восемь туманностей, связанных с ультраяркими рентгеновскими источниками, включая одну туманность в диске М 101. Были получены спектры туманностей в окрестности

ультраяркого рентгеновского источника. Авторы пришли к выводу, что во всех туманностях есть следы ударного возбуждения. Один из наиболее мощных ультраярких рентгеновских источников в диске галактики М 101 находится на расстоянии около 20'' от центра диафрагмы спектра SDSS 1325 52762 345. В этом спектре есть линия He II 468.6 нм. Наблюдаемые профили линии H β и запрещенных ли-

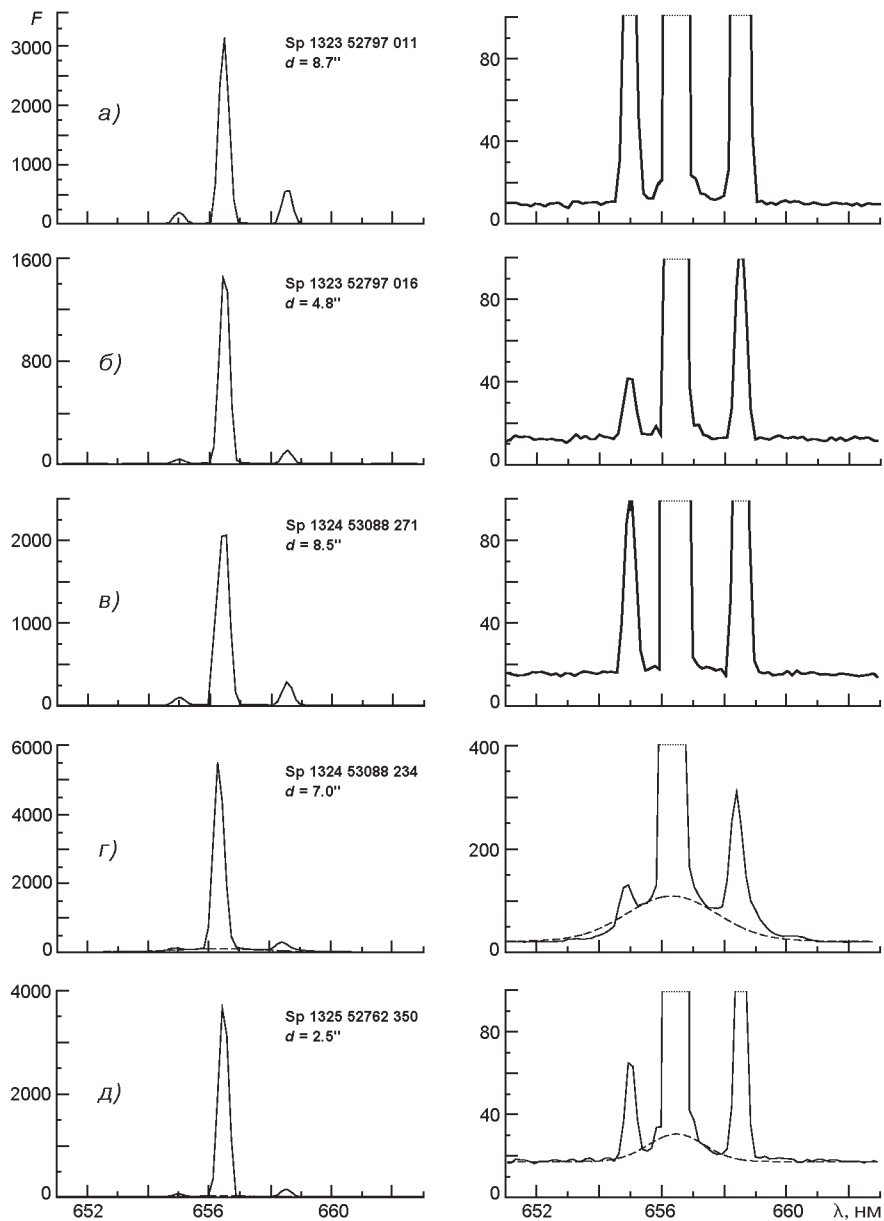


Рис. 2. Наблюдаемые профили эмиссионной линии H β в спектрах пяти областей H II в галактике М 101. Справа — те же спектры в увеличенном масштабе, d — расстояние между центром участка туманности, для которого получен оптический спектр, и рентгеновским источником. Сплошная линия — наблюдаемые профили, штриховая — вклад широкого компонента

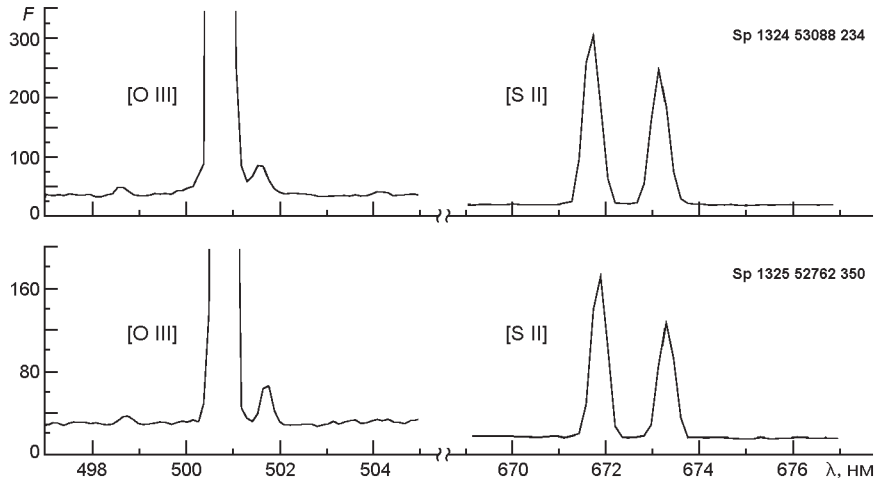


Рис. 3. Наблюдаемые профили запрещенных линий [O III] 500.7 и [S II] 671.7 + 673.1 нм в спектрах (SDSS 1324 53088 234, 1325 52762 350) областей H II в галактике M 101

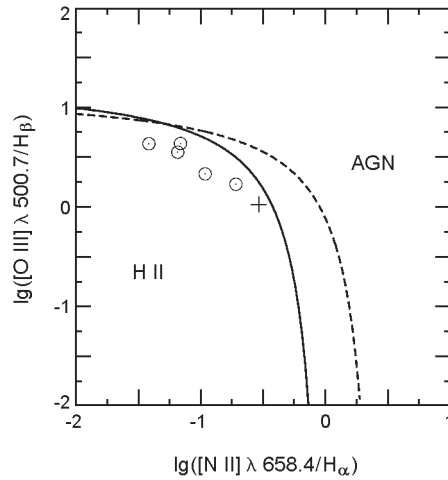
ний [O III] 500.7 и [S II] 671.7 + 673.1 нм в спектре SDSS 1325 52762 345 не имеют широких компонентов. Это говорит о том, что влияние ультраяркого рентгеновского источника проявляется только в ближайшей его окрестности. Спектр гигантской области H II, внутри или вблизи которой находится ультраяркий рентгеновский источник, определяется ионизирующим излучением теплового источника.

Рассмотрим теперь возможное влияние нетеплового источника возбуждения туманности на соотношения между интенсивностями разных эмиссионных линий. Это влияние может проявляться в том, что интенсивности линий могут искажаться и не будут соответствовать фотоионизационным моделям.

Согласно исследованию [5] положение объекта на некоторых диаграммах можно использовать для того, чтобы разделить области H II, источником ионизации которых является коротковолновое тепловое излучение звезд, и другие объекты с эмиссионными линиями, которые возбуждаются нетепловыми источниками ионизации или ударными волнами (следуя общепринятой практике, такие объекты будем называть активными ядрами галактик). Диаграмма [O III] 500.7/H — [N II] 658.4/H широко применяется для разделения фотоионизационных областей H II и активных ядер галактик. Положения галактик с эмиссионными линиями на диаграмме [O III] 500.7/H — [N II] 658.4/H образуют фигуру, напоминающую летящую «чайку» (seagull) [18]. Фотоионизационные области H II образуют левое крыло «чайки», а активные ядра галактик образуют правое крыло.

Однако точное положение кривой, разделяющей фотоионизационные области H II и активные ядра галактик, пока не установлено [10, 12, 18]. В работе [12] получено следующее уравнение кривой, разделяющей положения активных галактических ядер и фотоионизацион-

Рис. 4. Классификационная диаграмма $[\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H} - [\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}$ для разделения фотоионизационных областей H II и активных ядер галактик. Кружки — исследованные области H II в галактике M 101. Крестик — область H II в галактике M 101 вблизи ультраяркого рентгеновского источника. Сплошная линия — граничная кривая из работы [10], штриховая линия — граничная кривая из работы [12]



ных областей H II на диаграмме $[\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H} - [\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}$:

$$\lg \frac{[\text{O III}] \lambda 500.7}{\text{H}} = \frac{0.61}{\lg \frac{[\text{N II}] \lambda 658.4}{\text{H}}} - 1.19. \quad (1)$$

Эта кривая показана на рис. 4 пунктирной линией.

Кауфманн и др. [10] нашли иное положение кривой, разделяющей положения активных галактических ядер и фотоионизационных областей H II на диаграмме «чайка»:

$$\lg \frac{[\text{O III}] \lambda 500.7}{\text{H}} = \frac{0.61}{\lg \frac{[\text{N II}] \lambda 658.4}{\text{H}}} - 1.3. \quad (2)$$

Эта кривая показана на рис. 4 сплошной линией. Найденная в работе [18] кривая, разделяющей положения активных галактических ядер и фотоионизационных областей H II на диаграмме «чайка», близка к кривой (2). Исследованные области H II в галактике M 101 представлены на рис. 4 кружками. Крестиком показана область H II в галактике M 101 вблизи ультраяркого рентгеновского источника (SDSS-спектр 1325 52762 345). Видно, что все области H II лежат на диаграмме в зоне фотоионизационных областей H II. Другими словами, наличие рентгеновского излучения не приводит к существенному изменению интенсивностей узких оптических линий.

Ю. И. Изотов и Туан [6] исследовали четыре карликовые галактики, в спектрах которых эмиссионные линии имеют широкие компоненты, обусловленные наличием дополнительного нетеплового источника ионизации. Они пришли к заключению, что узкие эмиссионные линии образуются главным образом в зоне, ионизованной коротковолновым излучением горячих звезд. Вклад возможного нетеплового компонента в узкие линии мал, т. е. наличие дополнительного не-

теплового источника ионизации не вносит существенных искажений в интенсивности узких эмиссионных линий. Наши результаты согласуются с этим выводом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В близкой спиральной галактике М 101 найдены семь объектов с эмиссионными линиями, положения которых совпадают с рентгеновскими источниками в пределах $10''$ (в пределах 0.33 кпк в проекции на картинную плоскость). Пять объектов являются областями Н II. Один объект является звездообразным источником вблизи центра галактики. Один объект является далекой галактикой, которая проектируется на диск М 101.

Эмиссионная линия Н в спектрах трех областей Н II является узкой и не показывает особенностей. Эмиссионная линия Н в спектрах двух областей Н II содержит широкий компонент, вклад которого составляет соответственно 12 и 2 % в значения потоков в линии Н. Наблюдаемые профили запрещенных линий [O III] 500.7 нм и [S II] $671.7 + 673.1$ нм в спектрах всех рассмотренных областей Н II не имеют широких компонентов.

Это свидетельствует о том, что наличие рентгеновского источника внутри или вблизи области Н II оказывает относительно слабое влияние на водородные линии и не влияет на запрещенные линии в оптическом спектре области Н II. Это оправдывает применение (по крайней мере в первом приближении) методов, базирующихся на предположении о том, что единственным источником возбуждения туманности является фотоионизация атомов коротковолновым тепловым излучением массивных горячих звезд, при исследовании гигантских областей Н II. Однако ввиду малочисленности исследований областей Н II эти выводы являются предварительными и должны быть подтверждены (или опровергнуты) на основе более обширной выборки областей Н II.

Авторы благодарны С. Н. Фабрике (САО РАН) за полезные обсуждения, а также рецензенту за конструктивные замечания. Работа была частично финансирована в рамках программы «КосмоМикроФизика» Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины.

1. Аболмасов П. К., Фабрика С. Н., Шолухова О. Н., Афанасьев В. Л. Спектроскопия оптических объектов, отождествленных с ультраяркими рентгеновскими источниками // *Астрофиз. бюллетень САО РАН*.—2007.—**62**.—С. 44—60.
2. Пилюгин Л. С., Зинченко И. А., Туан Т. Х. Содержание кислорода в гигантских Н II галактиках // *Кинематика и физика небес. тел.*—2010.—**26**, № 5.—С. 3—25.
3. Шолудченко Ю. С., Изотова И. Ю., Пилюгин Л. С. Содержание кислорода в областях Н II спиральной галактики на основе спектров из цифрового обзора неба Sloan // *Кинематика и физика небес. тел.*—2007.—**23**, № 4.—С. 230—240.

4. *Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agueros M. A., et al.* The seventh data release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2009.—**182**.—P. 543—558.
5. *Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R.* Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1981.—**93**.—P. 5—19.
6. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* Active galactic nuclei in four metal-poor dwarf emission-line galaxies // *Astrophys. J.*—2008.—**687**.—P. 133—140.
7. *Jarrett T. H., Chester T., Cutri R., et al.* The 2MASS large galaxy atlas // *Astron. J.*—2003.—**125**.—P. 525—554.
8. *Jenkins L. P., Roberts T. P., Warwick R. S., et al.* An XMM—Newton view of M 101 — I. The luminous X-ray source population // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**349**.—P. 404—424.
9. *Jenkins L. P., Roberts T. P., Warwick R. S., et al.* An XMM—Newton view of M 101. II. Global X-ray source properties // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—**357**.—P. 401—419.
10. *Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., et al.* The host galaxies of active galactic nuclei // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**346**.—P. 1055—1077.
11. *Kennicutt R. C.* Properties of H II region populations in galaxies. I. The first-ranked H II regions // *Astrophys. J.*—1988.—**334**.—P. 144—158.
12. *Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S., et al.* Theoretical modeling of starburst galaxies // *Astrophys. J.*—2001.—**556**.—P. 121—140.
13. *Pilyugin L. S., Mattsson L.* Abundance determination in H II regions from SDSS spectra without the [O II] 3727 + 3729 line // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**412**.—P. 1145—1150.
14. *Pilyugin L. S., Thuan T. X.* The oxygen abundance of nearby galaxies from Sloan digital sky survey spectra // *Astrophys. J.*—2007.—**669**, N 1.—P. 299—314.
15. *Pilyugin L. S., Vílchez J. M., Cedrés B., Thuan T. X.* The electron temperatures of SDSS high-metallicity giant extragalactic H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**403**.—P. 896—905.
16. *Pilyugin L. S., Vílchez J. M., Contini T.* Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**425**.—P. 849—869.
17. *Rosie Chen C.-H., Chu Y.-H., Gruendl R., et al.* A critical examination of hypernova remnant candidates in M 101. II. NGC 5471B // *Astron. J.*—2002.—**123**, N 5.—P. 2462—2472.
18. *Stasińska G., Cid Fernandes R., Mateus A., et al.* Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies. III. How to distinguish AGN hosts // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**371**.—P. 972—982.
19. *York D. G., Adelman J., Anderson J. E., et al.* The Sloan Digital Sky Survey: technical summary // *Astron. J.*—2000.—**120**.—P. 1579—1587.
20. *Zezas A., Fabbiano C., Rots A. H. Murray S. S.* Chandra observations of “the Antennae” galaxies (NGC4038/4039). III. X-ray properties and multiwavelength associations of the X-ray source population // *Astrophys. J.*—2002.—**577**.—P. 710—725.

Поступила в редакцию 31.03.11