СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В ГАЛАКТИКАХ ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ

И. А. Зинченко[1], Л. С. Пилюгин[2], Т. Х. Туан[3]

[1] *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко*
03022 Киев, пр. Глушкова 6
e-mail: igorzinchenko@gmail.com

[2] *Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины*
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27
e-mail: pilyugin@mao.kiev.ua

[3] *Университет штата Вирджиния, 400325, Шарлотсвилл, Вирджиния, США*
e-mail: txt@virginia.edu

Исследована выборка галактик высокой светимости с эмиссионными спектрами из цифрового обзора неба Sloan (SDSS, Sloan Digital Sky Survey). Определено содержание кислорода в 93 галактиках на основе 116 SDSS-спектров. Так как авроральная линия дважды ионизованного кислорода [O III]λ436.3 нм не измеряется в спектрах объектов из нашей выборки, то необходимое для определения электронной температуры отношение интенсивностей небулярных и авроральных линий вычисляется при помощи ff-соотношения. Полученные содержания кислорода в SDSS-галактиках высокой светимости на $\sim 0.2 \div 0.5$ dex ниже максимально достижимой величины. Это обусловлено тем, что наша выборка SDSS-галактик содержит только богатые газом галактики, в которых протекают мощные вспышки звездообразования. Эквивалентное число O7 V звезд, возбуждающих свечение областей H II в нашей выборке SDSS-галактик, на два-три порядка превышает число звезд, возбуждающих свечение ярчайших областей H II в близких галактиках.

ВВЕДЕНИЕ

В результате проведения спектральных обзоров получены спектры большого числа галактик с эмиссионными линиями. Измеренные интенсивности сильных линий в этих спектрах используются для определения обилий кислорода в галактиках и для исследования зависимости светимость – металличность. Найденное значение содержания кислорода в галактике зависит от используемой калибровки. Средние значения содержания кислорода в галактиках высокой светимости, найденные Тремонти и др. [10] и Эрб и др. [1] с использованием одних и тех же SDSS-спектров при помощи разных калибровок, отличаются примерно в три раза.

В работах [4, 5] было показано, что существует соотношение между интенсивностями авроральных и небулярных линий (flux-flux, ff-соотношение) в спектрах областей H II. При помощи ff-соотношения можно вычислить интенсивность авроральной линии по измеренным интенсивностям небулярных линий в спектре области H II. С использованием вычисленной интенсивности авроральной линии электронная температура в области H II может быть найдена при помощи классического метода. Использование ff-соотношения для определения содержания кислорода в областях H II дает два очевидных преимущества по сравнению с другими калибровками. Во-первых, в основе ff-соотношения нет каких-либо предположений, так как это соотношение связывает непосредственно измеряемые величины и устанавливается чисто эмпирически на основе набора "калибровочных точек", т. е. областей H II, в спектрах которых измерены авроральные и небулярные линии. Точность ff-соотношения зависит только от количества и качества калибровочных точек. Во-вторых, найденные таким способом содержания кислорода согласуются с содержаниями кислорода, найденными классическим T_e-методом.

В работах [6, 7] ff-соотношение использовалось для определения содержания кислорода в близких спиральных галактиках. Было найдено, что содержания кислорода в центрах некоторых спиральных галактик высокой светимости достигает максимально достижимой величины, которая примерно в два раза выше содержания кислорода на Солнце. В данной работе мы продолжим исследование содержания кислорода в галактиках высокой светимости.

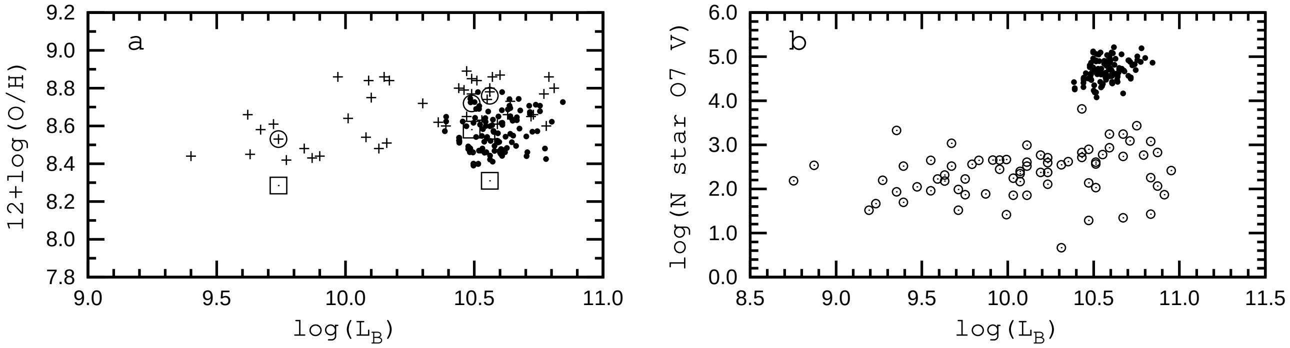

Рис. 1. *a* – Зависимость светимость – металличность. Зачерненные кружки – содержания $(\mathrm{O/H})_{\mathrm{ff}}$ в SDSS-галактиках. Светлые кружки – содержания $(\mathrm{O/H})_{T_e}$ в центрах спиральных галактик M 33, M 51 и M 101. Светлые квадратики – содержания $(\mathrm{O/H})_{T_e}$ в дисках M 33, M 51 и M 101 на галактоцентрическом расстоянии 0.5 изофотного радиуса. Крестики – содержания $(\mathrm{O/H})_{\mathrm{ff}}$ в центрах близких спиральных галактик из [7]. *b* – Эквивалентное количество ионизующих звезд O7 V. Зачерненные кружки – области H II в SDSS-галактиках, светлые кружки – среднее значение для трех ярчайших областей H II в близких галактиках (данные из [2])

СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В ГАЛАКТИКАХ ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ

В базе спектральных данных SDSS [11] мы выбрали 93 галактики высокой светимости с эмиссионными спектрами (116 спектров). Спектры SDSS покрывают интервал длин волн от 380.0 нм до 920.0 нм. Поэтому спектры близких объектов (с красными смещениями меньшими $z \sim 0.02$) не содержат небулярной линии кислорода [O II]λ372.7 нм, которая используется для определения содержания иона O^+ в области H II. В спектрах галактик высокой светимости интенсивность авроральной линии кислорода [O III]λ436.3 нм ниже порога обнаружения. Поэтому только объекты, в спектрах которых небулярная линия кислорода [O II]λ372.7 смещается в красную сторону из-за красного смещения настолько, что попадает в спектральный интервал SDSS, включены в наш список.

При определении содержания кислорода в области H II мы используем двухзонную модель распределения температуры в области H II. Так как авроральная линия дважды ионизованного кислорода [O III]λ436.3 нм не измеряется в спектрах исследуемых объектов, то диагностическое отношение интенсивностей $\mathrm{Q}_{3,\mathrm{O}}$ = [O III]λ495.9+λ500.7/[O III]λ436.3 вычисляется при помощи ff-соотношения. Содержания кислорода, найденные с использованием ff-соотношения, мы будем обозначать как $(\mathrm{O/H})_{\mathrm{ff}}$-содержания. Положения исследованных нами SDSS-галактик на диаграмме светимость – металличность показаны зачерненными кружками на рис. 1, *a*.

Радиальное распределение обилия кислорода в дисках трех близких спиральных галактик установлено достаточно надежно на базе областей H II, обилия кислорода $(\mathrm{O/H})_{T_e}$ в которых определены классическим T_e-методом. Светлыми кружками на рис. 1, *a* показаны содержания кислорода в центрах галактик NGC 598, NGC 5194 и NGC 5457. Светимости галактик взяты из [8]. Светлыми квадратиками на рис. 1, *a* показаны содержания кислорода в галактиках NGC 598, NGC 5194 и NGC 5457 на галактоцентрическом расстоянии, равном половине фотометрического радиуса галактики R_{25}. На рис. 1, *a* видно, что $(\mathrm{O/H})_{\mathrm{ff}}$-содержания в выборке SDSS-галактик соответствуют $(\mathrm{O/H})_{T_e}$-содержаниям в гигантских спиральных галактиках NGC 5457 (на галактоцентрических расстояниях от $\sim 0.1R_{25}$ до $\sim 0.4R_{25}$) и NGC 5194 (на галактоцентрических расстояниях от $\sim 0.1R_{25}$ до $\sim 0.8R_{25}$). Это можно рассматривать как косвенное подтверждение реалистичности найденных $(\mathrm{O/H})_{\mathrm{ff}}$ содержаний в исследованных галактиках.

Крестиками на рис. 1, *a* показаны $(\mathrm{O/H})_{\mathrm{ff}}$-содержания в центрах близких спиральных галактик [7]. Из рис. 1, *a* следует, что существует максимальное содержание кислорода ($12+\lg(\mathrm{O/H}) \sim 8.9$) в центрах спиральных галактик высокой светимости ($\lg L_B > 10.0$). В работе [7] предложена следующая интерпретация этого факта. В центральных частях некоторых галактик высокой светимости газ практически исчерпан (полностью перешел в звезды), и содержание кислорода в центральных частях этих галактик достигло максимально достижимой величины. Так как максимально достижимая величина содержания кислорода в системе не зависит от массы системы, а определяется только долей массы газа, перешедшей в звезды, то это приводит к появлению плато на диаграмме светимость – металличность. Из рис. 1, *a* видно, что содержания кислорода в нашей выборке SDSS-галактик высокой светимости на $\sim 0.2 \div 0.5$ dex ниже максимально достижимой величины. Содержание кислорода на $\sim 0.2 \div 0.5$ dex ниже максимально достижимой величины имеет место в системе, в которой доля газа составляет $\sim 15\% \div 40\%$ от массы системы.

Прямых измерений количества газа в рассматриваемых SDSS-галактиках нет. Представление о содержании газа в галактике можно получить косвенным путем. Поток ионизующего излучения от скопления звезд, возбуждающих свечение области H II, принято характеризовать эквивалентным количеством звезд спектрального класса O7, находящихся на главной последовательности (V класс светимости). Число квантов, ионизующих атомы водорода, от звезды O7 V равно $N_{Lc} = 5.62 \cdot 10^{48}$ с$^{-1}$ [3]. Один ионизующий квант от звезды приводит к образованию 0.157 квантов в линии H$_\beta$ в спектре туманности. Используя измеренные потоки в линии H$_\beta$ в SDSS-спектрах, мы вычислили эквивалентное количество ионизующих звезд O7 V для каждого объекта, $N_{\mathrm{O7\,V}}$. Полученные значения $N_{\mathrm{O7\,V}}$ представлены на рис. 1, *b* зачерненными кружками. В работе [2] приведены потоки в линии H$_\alpha$ от ярчайших областей H II в близких спиральных и неправильных галактиках. Вычисленные значения $N_{\mathrm{O7\,V}}$ для ярчайших областей H II в близких галактиках представлены на рис. 1, *b* светлыми кружками. Поток в линии H$_\alpha$ от голубой компактной карликовой галактики SBS 0335-052 E [9] свидетельствует о том, что свечение газа в этой галактике возбуждается $\sim 10^4$ звезд O7 V. Из рис. 1, *b* следует, что число звезд, возбуждающих свечение излучающих областей в нашей выборке SDSS-галактик, на два-три порядка превышает число звезд, возбуждающих свечение ярчайших областей H II в близких галактиках и на порядок превышает число звезд, возбуждающих свечение газа в SBS 0335-052 E. Этот факт свидетельствует о том, что наша выборка SDSS-галактик содержит только галактики, в которых протекают мощные вспышки звездообразования и образуются звездные сверхскопления, возбуждающие сверхгигантские области H II. Очевидно, что активное звездообразование протекает (и сопутствующие гигантские области H II образуются) только при наличии достаточного количества газа. Таким образом, отсутствие в нашей выборке галактик с содержаниями кислорода, близкими к максимально достижимой величине, естественным образом объясняется селекцией при формировании выборки галактик.

Участие Л. П. в конференции было финансировано в рамках программы “КосмоМикроФизика” Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины.

[1] *Erb D. K., Shapley A. E., Pettini M., et al.* The mass – metallicity relation at Z > 2 // Astrophys. J. – 2006. – **644**, N 2. – P. 813–828.

[2] *Kennicutt R. C. (Jr)* Properties of H II region populations in galaxies. I. The first-ranked H II regions // Astrophys. J. – 1988. – **334**, N 1. – P. 144–158.

[3] *Martins F., Schaerer D., Hillier D. J.* A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars // Astron. and Astrophys. – 2005. – **436**, N 3. – P. 1049–1065.

[4] *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.

[5] *Pilyugin L. S.* On the electron temperature determination in high-metallicity H II regions // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – **375**, N 2. – P. 685–690.

[6] *Pilyugin L. S., Thuan T. X., Vílchez J. M.* Oxygen abundances in the most oxygen-rich spiral galaxies // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2006. – **367**, N 3. – P. 1139–1146.

[7] *Pilyugin L. S., Thuan T. X., Vílchez J. M.* On the maximum value of the cosmic abundance of oxygen and the oxygen yield // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – **376**, N 1. – P. 353–360.

[8] *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**, N 3. – P. 849–871.

[9] *Pustilnik S. A., Pramskij A. G., Kniazev A. Y.* SBS 0335-052 E and W: implications of new broad-band and H$_\alpha$ photometry // Astron. and Astrophys. – 2004. – **425**, N 1. – P. 51–65.

[10] *Tremonti C. A., Heckman T. M., Kauffmann G., et al.* The origin of the mass-metallicity relation: insight from 53000 star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // Astrophys. J. – 2004. – **613**, N 2. – P. 898–913.

[11] *York D. G., Adelman J., Anderson J. E., et al.* The Sloan Digital Sky Survey: technical summary // Astron. J. – 2000. – **120**, N 3. – P. 1579–1587.