DOI 10.15826/B978-5-7996-3848-1.26

SDSS-IV MaNGA: ИСТОЧНИКИ ИОНИЗАЦИИ ДИФФУЗНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ В ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

В. К. Постникова

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Исследуются источники ионизации диффузного газа на различных галактических высотах в 436 различных дисковых галактиках, наблюдаемых точно с ребра. Привлекаются данные финального релиза обзора MaNGA, а также теоретические модели 3MdB. Показано, что для всех исследуемых галактик поведение диффузного ионизованного газа адекватно описывается моделями фотоионизации молодыми OB-звездами и горячими проэволюционировавшими маломассивными звездами. При этом поток излучения от OB-звезд и ионизационный параметр с высотой уменьшаются, а относительный вклад горячих проэволюционировавших маломассивных звезд в ионизацию увеличивается. Также в галактиках с низким удельным темпом звездообразования (и с большими звездными массами) основным источником ионизации диффузного газа являются горячие проэволюционировавшие маломассивные звезды, тогда как в галактиках с высоким удельным темпом звездообразования (и с меньшими звездными массами) — OB-звезды.

SDSS-IV MaNGA: IONIZATION SOURCES OF DIFFUSE EXTRA-PLANAR GASEOUS MEDIUM IN DISK GALAXIES OF VARIOUS TYPES

V. K. Postnikova

Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Physics Department of Lomonosov Moscow State University

Sources of ionization of diffuse gas at different altitudes in 436 edge-on disk galaxies are explored. The MaNGA data together with theoretical 3MdB models are used. It is demonstrated that models of the gas photoionization in a combination of young OB-stars and hot low-mass evolved stars adequately describe the gas ionization state in the galaxies of all types. Moreover, the fraction of the ionizing flux from OB-stars and the ionization parameter decrease with the altitude, while the role of the ionization by the hot low-mass evolved stars increases. The difference in the contribution from these types of ionizing sources correlates with the specific star formation rate and with stellar masses of galaxies. The hot low-mass evolved stars are the principal gas ionization sources in massive galaxies with low specific star formation rate, while OB-stars dominate the gas ionization in low-mass galaxies with high specific star formation rate.

Введение

Еще в середине прошлого века было подтверждено существование в дисковых галактиках диффузного слоя теплой ионизованной газовой среды (DIG — diffuse ionized gas) с

© Постникова В. К., 2024

характерными электронными температурами порядка 10^4 K и электронными плотностями порядка 0.1 см$^{-3}$. Однако до сих пор плохо изучено, какой вклад дают различные источники в ионизацию диффузного газа на больших высотах (eDIG — extra-planar DIG). С одной стороны, согласно [1] и [2], для объяснения ионизации DIG и eDIG в галактиках с заметным звездообразованием хватает ионизирующего излучения от OB звезд в галактической плоскости. С другой стороны, согласно [1, 3–5], отношения интенсивностей запрещенных линий в отдельных галактиках требуют привлечения также горячих маломассивных проэволюционировавших звезд (HOLMES — hot, low-mass evolved stars). Ионизация ударными волнами также рассматривается в [6] как возможное объяснение излучения eDIG.

Целью данного исследования является продвижение в понимании происхождения и физики DIG на различных галактических высотах, в частности, выявление источников и изучение особенностей процесса ионизации DIG для галактик с различными звездными массами, светимостями в Hα и удельными темпами звездообразования.

Методика

В представленной работе используются данные финального релиза DR17 [7] спектрального обзора MaNGA [8] проекта SDSS-IV [9] и [10]. Основное преимущество MaNGA состоит в том, что данный обзор предоставляет пространственно-разрешенную спектроскопическую картину. Ключевая особенность данного исследования заключается в том, что благодаря возможностям DR17 MaNGA используется крупная выборка 436 галактик, наблюдаемых точно с ребра. Это позволяет избежать эффектов проекции eDIG на области звездообразования в плоскости галактики. Отбор галактик для исследования проводится посредством просмотра композитных цветных изображений SDSS и DESI Legacy Surveys [11] для всех галактик MaNGA. Обращается внимание на наличие проекции пылевой полосы на центральную область галактики, что свидетельствует, согласно [12] и [13], о наклоне плоскости галактики к лучу зрения $> 85^\circ$. Затем для кандидатов в выборку просматриваются радиоизображения обзора VLASS [14] и предоставляемые обзором MaNGA карты излучения, эквивалентных ширин и скоростей в линии Hα, а также карты скоростей звезд.

С целью улучшения отношения сигнала к шуму вся итоговая выборка спектров разделяется на бины (приблизительно равные группы с близкими значениями определенных физических величин) по высотам над плоскостью галактик, звездным массам, светимостям в Hα и удельным темпам звездообразования и затем производится сложение всех спектров в одинаковых бинах. Так, благодаря большому числу галактик в выборке мы можем извлечь из данных интенсивности эмиссионных линий вплоть до экстремальных высот. Полученные интенсивности в линиях эмиссионного спектра газа сравниваются с результатами моделирования базы данных 3MdB для случаев фотоионизации OB-звездами и HOLMES [15], а также ионизации ударными волнами [16]. Сравнение производится с помощью трех диагностических BPT-диаграмм [17–19], позволяющих эффективно дифференцировать различные по своим физическим условиям области галактик [20, 21]; рассматривается, как различные по высоте над диском области галактик различных типов ложатся в рамках BPT-диаграмм на сетки фотоионизационных и ударных моделей.

Результаты

Установлено, что для объяснения поведения DIG на любых высотах в галактиках любого типа достаточно только фотоионизационных моделей. Однако стоит отметить, что области на больших высотах в галактиках с большими звездными массами, или с высокими светимостями в Hα, или с низкими удельными темпами звездообразования ложатся на

пересечение фотоионизационных моделей с моделями ударной ионизации.

Заметим, что положение области на фотоионизационной сетке на BPT-диаграмме при фиксированной металличности определяется значением ионизационного параметра и жесткостью излучения, которая в данном случае зависит от соотношения между вкладом от OB-звезд и HOLMES в ионизацию газа. Так, проделывая процедуру интерполяции, находим, как отношение потоков от OB-звезд и HOLMES, а также ионизационный параметр меняются с высотой в различных галактиках согласно фотоионизационным моделям при пренебрежении возможным вкладом ударных волн [1].

Обсуждение и заключение

С помощью диагностических диаграмм подтверждается, что качественная модель ионизации OB-звездами и HOLMES хорошо описывает наблюдаемое поведение DIG и eDIG в галактиках всех исследуемых типов. Тем не менее пока нельзя исключать возможный вклад ударных волн на больших высотах в галактиках с высокими звездными массами или с высокими светимостями в Hα, или с низкими удельными темпами звездообразования.

Благодаря процедуре интерполяции выясняется, что для галактик всех исследуемых типов поток излучения от OB-звезд и ионизационный параметр с высотой уменьшаются, а относительный вклад HOLMES в ионизацию увеличивается. При этом наибольшая разница вклада данных источников в ионизацию газовой среды наблюдается между галактиками с различными удельными темпами звездообразования и с различными звездными массами. Так, HOLMES являются основным источником ионизации DIG в галактиках с низким удельным темпом звездообразования (и с большими звездными массами), тогда как в галактиках с активным звездообразованием (и с меньшими звездными массами) OB-звезды являются определяющим фактором ионизации DIG.

Первые результаты данного исследования, полученные с помощью меньшей выборки из 239 галактик, наблюдаемых с ребра, на основе данных релиза DR16 [22] обзора SDSS-IV MaNGA, опубликованы в статье [23].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00080). Информация о гранте доступна по адресу: rscf.ru/project/22-12-00080/. В настоящей работе используются данные проекта SDSS-IV MaNGA, доступные по адресу: `www.sdss.org/dr17/data\_access/`.

Библиографические ссылки

[1] *Flores-Fajardo N., Morisset C., Stasińska G., Binette L.* Ionization of the diffuse gas in galaxies: hot low-mass evolved stars at work // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011. — Vol. 415, № 3. — P. 2182—2192. `1104.0525`.

[2] *Haffner L. M., Dettmar R. J., Beckman J. E. et al.* The warm ionized medium in spiral galaxies // Reviews of Modern Physics. — 2009. — Vol. 81, № 3. — P. 969—997. `0901.0941`.

[3] *Jones A., Kauffmann G., D'Souza R. et al.* SDSS IV MaNGA: Deep observations of extra-planar, diffuse ionized gas around late-type galaxies from stacked IFU spectra // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 599. — P. A141. `1612.03920`.

[4] *Zhang K., Yan R., Bundy K. et al.* SDSS-IV MaNGA: the impact of diffuse ionized gas on emission-line ratios, interpretation of diagnostic diagrams and gas metallicity measurements // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Vol. 466, № 3. — P. 3217—3243. `1612.02000`.

[5] *Belfiore F., Santoro F., Groves B. et al.* A tale of two DIGs: The relative role of H II regions and low-mass hot evolved stars in powering the diffuse ionised gas (DIG) in PHANGS-MUSE galaxies // Astron. Astrophys. — 2022. — Vol. 659. — P. A26. `2111.14876`.

[6] *Collins J. A., Rand R. J.* Shocks as a Secondary Source of Ionization in Diffuse Ionized Gas Halos // Gas and Galaxy Evolution / ed. by John E. Hibbard, Michael Rupen, Jacqueline H. van Gorkom : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2001. — Vol. 240. — P. 392.

[7] *Abdurro'uf, Accetta K., Aerts C. et al.* The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 2022. — Vol. 259, № 2. — P. 35. 2112.02026.

[8] *Bundy K., Bershady M. A., Law D. R. et al.* Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory // Astrophys. J. — 2015. — Vol. 798, № 1. — P. 7. 1412.1482.

[9] *Blanton M. R., Bershady M. A., Abolfathi B. et al.* Sloan Digital Sky Survey IV: Mapping the Milky Way, Nearby Galaxies, and the Distant Universe // Astron. J. — 2017. — Vol. 154, № 1. — P. 28. 1703.00052.

[10] *York D. G., Adelman J., Anderson Jr., J. E. et al.* The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary // Astron. J. — 2000. — Vol. 120, № 3. — P. 1579—1587. astro-ph/0006396.

[11] *Dey A., Schlegel D. J., Lang D. et al.* Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys // Astron. J. — 2019. — Vol. 157, № 5. — P. 168. 1804.08657.

[12] *Bizyaev D., Kajsin S.* The Stellar Disk Thickness of Low Surface Brightness Galaxies // Astrophys. J. — 2004. — Vol. 613, № 2. — P. 886—897. astro-ph/0406498.

[13] *Mosenkov A. V., Sotnikova N. Ya., Reshetnikov V. P. et al.* Does the stellar disc flattening depend on the galaxy type? // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Vol. 451, № 3. — P. 2376–2389. 1505.03383.

[14] *Lacy M., Baum S. A., Chandler C. J. et al.* The Karl G. Jansky Very Large Array Sky Survey (VLASS). Science Case and Survey Design // Publ. Astron. Soc. Pac. — 2020. — Vol. 132, № 1009. — P. 035001. 1907.01981.

[15] *Morisset C., Delgado-Inglada G., Flores-Fajardo N.* A virtual observatory for photoionized nebulae: the Mexican Million Models database (3MdB) // Rev. Mex. Astron. Astrofis. — 2015. — Vol. 51. — P. 103—120. 1412.5349.

[16] *Alarie A., Morisset C.* Extensive Online Shock Model Database // Rev. Mex. Astron. Astrofis. — 2019. — Vol. 55. — P. 377—394. 1908.08579.

[17] *Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R.* Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1981. — Vol. 93. — P. 5—19.

[18] *Veilleux S., Osterbrock D. E.* Spectral Classification of Emission-Line Galaxies // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 1987. — Vol. 63. — P. 295.

[19] *Dopita M. A., Kewley L. J., Heisler C. A., Sutherland R. S.* A Theoretical Recalibration of the Extragalactic H II Region Sequence // Astrophys. J. — 2000. — Vol. 542, № 1. — P. 224—234.

[20] *Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S. et al.* Theoretical Modeling of Starburst Galaxies // Astrophys. J. — 2001. — Vol. 556, № 1. — P. 121—140. astro-ph/0106324.

[21] *Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti Ch. et al.* The host galaxies of active galactic nuclei // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2003. — Vol. 346, № 4. — P. 1055—1077. astro-ph/0304239.

[22] *Ahumada R., Allende Prieto C., Almeida A. et al.* The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 2020. — Vol. 249, № 1. — P. 3. 1912.02905.

[23] *Postnikova V. K., Bizyaev D.* SDSS-IV MaNGA: Ionization Sources of the Extra-planar Diffuse Ionized Gas // Astronomy Letters. — 2023. — Vol. 49, № 4. — P. 151—166. 2307.01544.