

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 319 (2018), 149 – 152

UDC 524.386

L.A. Pavlova, L.N. Kondratyeva

Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan
E mail: lapavlova44@mail.ru, lu_kondr@mail.ru

**MECHANISMS FOR FORMING THE INHOMOGENEOUS
STRUCTURE OF PLANETARY NEBULAE**

Аннотация. The inhomogeneous distribution of gas in planetary nebulae manifests in the form of numerous jets, globules and filaments. Details of the heterogeneous structure are found not only in extended, sufficiently evolved objects, but also in young compact objects whose dynamic age does not exceed 1000 years. The problem of the formation of heterogeneity in the early stages of the planetary nebulae evolution is relevant in recent years. The interaction of the hot high-speed wind of the central star with the substance ejected at the stage of the "red" giant under the influence of a slow but powerful wind is considered as a possible mechanism.

In this case, the formation of jets and globules occurs under the shock waves that accompany the stellar wind. The central sources in some planetary nebulae are binary stellar systems. The processes of mass exchange between stellar components can also lead to the formation of an inhomogeneous shell structure.

In this paper, we consider the results of modern methods for studying planetary nebulae, including observations on space telescopes, which allow to evaluate the reality and effectiveness of the proposed mechanisms for the formation of heterogeneous structures.

Key words: planetary nebulae, mechanisms of forming the inhomogeneous structures.

УДК 524.386

Л.А. Павлова, Л.Н. Кондратьева

Астрофизический Институт им Фесенкова, Алматы, Казахстан

**МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ
ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ**

Аннотация. Неоднородное распределение газа в планетарных туманностях проявляется в форме многочисленных джетов, глобул и волокон. Детали неоднородной структуры обнаружены не только в протяженных, достаточно проэволюционировавших объектах, но и в молодых компактных оболочках, динамический возраст которых не превышает 1000 лет. Проблема формирования неоднородности на ранних этапах эволюции планетарных туманностей является актуальной на протяжении последних лет. В качестве возможного механизма рассматривается взаимодействие горячего высокоскоростного ветра центральной звезды с веществом, выброшенным на стадии «красного» гиганта под действием медленного, но мощного ветра. В этом случае образование джетов и глобул происходит под действием ударных волн, которые сопровождают звездный ветер. Центральные источники в некоторых планетарных туманностях являются двойными звездными системами. Процессы обмена массами между звездными компонентами также могут приводить к формированию неоднородной структуры оболочки.

В данной работе рассматриваются результаты современных методов исследований планетарных туманностей, включая наблюдения на космических телескопах, которые позволяют оценить реальность и эффективность предполагаемых механизмов образования неоднородных структур.

Ключевые слова: планетарные туманности, механизмы формирования структуры оболочки.

Введение

Неоднородная структура планетарных туманностей является предметом изучения теоретиков и экспериментаторов. Одно время предполагалось, что полярные джеты, крупномасштабные глобулы и биполярные структуры формируются при взаимодействии остаточного звездного ветра красного гиганта и горячего ветра центральной звезды. Однако, как показало исследование большой группы молодых объектов, оболочки с динамическим возрастом <2000 лет уже демонстрируют полный набор неоднородностей, обнаруживаемых в больших туманностях [1]. Таким образом, получается, что неоднородности формируются на еще более ранних стадиях эволюции планетарных туманностей, при низкой температуре центральной звезды и до появления быстрого звездного ветра. Последние годы поиск и анализ неоднородностей в структуре молодых планетарных туманностей стали излюбленной темой многих исследователей [2– 8]. Выдвинуто предположение о роли аккреционного диска, как источника биполярных выбросов [4,5]. Современные наблюдения планетарных туманностей на космических телескопах, полученные с высоким разрешением, дают новую информацию для создания новых моделей, описывающих формирование и эволюцию этих объектов.

В 1983г Сан Квок [1] предложил модель взаимодействующих ветров для объяснения структуры планетарных туманностей. Согласно модели горячий высокоскоростной ветер центральной звезды взаимодействует с веществом, выброшенным на стадии «красного» гиганта под действием медленного, но мощного звездного ветра. В результате формируется внешняя граница оболочки. Детали неоднородности в распределении газа в туманности, а именно джеты, глобулы, возможно, возникают при прохождении ударных волн, которые в свою очередь являются источником излучения, наблюдаемого в рентгеновской области.

В некоторых случаях неоднородная структура туманности формируется, благодаря процессам обмена массами между компонентами двойной звездной системы в центре туманности. К настоящему времени туманности с двойными центральными источниками составляют 12 – 15% от их общего числа.

Зоны низкой ионизации обнаружены на изображениях многих планетарных туманностей. Газ в этих зонах имеет такую же электронную температуру, как и соседние области но отличаются низкой электронной плотностью. Современные методы наблюдений позволили установить, что в зонах низкого возбуждения «работает» ударный механизм ионизации, в то время как основная масса оболочки ионизируется ультрафиолетовыми квантами центрального источника.

Результаты современных наблюдений на космических телескопах

На космическом телескопе Гершеля выполнялись фотометрические и спектральные наблюдения в далеком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах спектра. Были получены изображения 18 планетарных туманностей и спектрограммы всех звезд, эволюционирующих от Асимптотической ветви красных гигантов до стадии планетарных туманностей [10]. Полученные данные позволяют, кроме всего прочего, оценить физическое состояние и химический состав вещества в окрестностях исследуемых объектов.

Огромное значение для исследования структуры туманностей играют изображения, получаемые с высоким разрешением на телескопе Хаббла. Так, именно на этом телескопе были выполнены наблюдения десяти компактных планетарных туманностей, и в них впервые были обнаружены многочисленные мелкие детали неоднородной структуры: дуги, двумерные кольца, торы и гало [11]. На основе полученных данных было высказано предположение о том, что подобные неоднородные структуры присущи большинству планетарных туманностей и формируются они на ранних стадиях эволюции. Полагая, что причиной образования неоднородностей может быть взаимодействие раннего ветра красного гиганта и более позднего ветра центральной звезды, авторы отмечают, что должно быть несколько стадий быстрого звездного ветра, разных по длительности и по направлению. По крайней мере, подобное предположение способно объяснить наблюдаемое различие в возрасте разных деталей структуры в пределах одной оболочки [12, 13].

Во многих планетарных туманностях наблюдаются так называемые «hot bubbles» - центральные полости, заполненные горячим газом [14]. Они формируются под действием

быстрого звездного ветра, нагретого ударной волной. Звездный ветер выталкивает из центра вещество, выброшенное на стадии красного гиганта. Подобные зоны должны быть «видны» в рентгеновском диапазоне. Действительно, наблюдения туманности NGC 3234, выполненные на телескопе XMM-Newton, зарегистрировали мягкое диффузное X-Ray излучение с температурой $2.35 \cdot 10^6$ К и светимостью $2 \cdot 10^{30}$ эрг/сек (для $D=0.55$ кпс), которое образуется в центральной зоне, в «hot bubbles». Анализ химического состава плазмы - источника диффузного рентгеновского излучения для разных туманностей свидетельствует о том, что оно действительно создается горячим звездным ветром, но присутствуют следы остаточного газа холодной оболочки. Возможно, это плотные образования, сформировавшиеся в коллимирующих потоках или волокна, образовавшиеся в процессе дополнительных выбросов фрагментов газа из центральной звезды

В некоторых планетарных туманностях обнаружено жесткое рентгеновское излучение, приходящее от центральной звезды. Его источником может быть корональная эмиссия от невидимой компоненты двойной звезды или ударная волна, возникающая в быстром звездном ветре.

Достаточно редкое событие в эволюции планетарных туманностей – повторный сброс оболочки зарегистрировано в двух объектах. Старая, сильно проэволюционировавшая туманность A30, стала знаменитой после того, как около ее центральной звезды была обнаружена плотная оболочка нового поколения, практически лишенная водорода [15]. Оценки ее динамического возраста: 850 ± 200 лет, получены по изменению углового размера, известной скорости расширения, и расстояния [16]. Сложная структура этой оболочки хорошо просматривается на снимках, полученных на телескопе Хаббла. Многочисленные джеты указывают на движение газовых фрагментов от центра к периферии. Рентгеновское излучение объекта можно разделить на две компоненты: точечный источник в направлении на центральную звезду и протяженный, соответствующий положению новой оболочки. Взаимодействие современного звездного ветра с веществом вторичной оболочки приводит к ударному нагреву плазмы, которая является источником диффузного X-ray излучения. Происхождение рентгеновского излучения центральной звезды пока непонятно.

На изображениях многих планетарных туманностей, полученных, в том числе, на телескопе Хаббла, просматриваются зоны низкой ионизации в виде глобул. Исследования показали, что газ в этих зонах имеет такую же электронную температуру, как и соседние области, но отличаются низкой электронной плотностью. Современные методы наблюдений позволили установить, что в зонах низкого возбуждения «работает» ударный механизм ионизации, в то время как основная масса оболочки ионизируется ультрафиолетовыми квантами центрального источника [17].

Анализ последних данных, полученных для центральных звезд планетарных туманностей в разных спектральных диапазонах, проведен в работе [18]. Исследования показывают, что около 12-15% , по некоторым оценкам, до 30% центральных звезд являются двойными. Орбитальные периоды для этих тесных двойных систем, в основном меньше одного дня. Намечается связь между двойственностью центрального источника (положением плоскости орбиты) и пространственной ориентацией оболочки. Взаимодействие между компонентами центральной звездной системы может приводить к формированию биполярных форм оболочек, а также к появлению дополнительных структурных неоднородностей.

Заключение

Проблема неоднородной структуры планетарных туманностей, в том числе на ранних стадиях эволюции, очень актуальна и требует своего решения. Соответствующие механизмы, ответственные за формирование неоднородностей, должны учитываться для создания более совершенных моделей реальных объектов. Один из подобных механизмов – взаимодействие горячего и холодного звездных ветров, находит свое подтверждение при наблюдениях в рентгеновском диапазоне. Более того, для того, чтобы объяснить присутствие в туманности глобул и джетов разного возраста, требуется пульсирующий режим работы быстрого звездного ветра.

Также удалось установить, что туманности с двойными центральными звездами могут отличаться формой и химическим составом оболочки. Также, вполне возможно, что их эволюция несколько отличается от эволюции остальных планетарных туманностей.

Работа выполнена при поддержке программы целевого финансирования BR05236322 Министерства Образования и науки РК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kwok S. Morphological Structures of Planetary Nebulae// PASA. 2010. V. 27. P. 174. DOI: [10.1071/AS09027](https://doi.org/10.1071/AS09027).
- [2] Sahai R., Morris M., Contreras C., Claussen M. Understanding the immediate progenitors of planetary nebulae// IAUS. 2012. V. 283. –P. 180. DOI: [10.1017/S1743921312010915](https://doi.org/10.1017/S1743921312010915).
- [3] Sahai R., Morris M., Villars G. Young planetary nebulae: Hubble space telescope imaging and a new morphological classification system//AJ. 2011. V.141. – P.134. DOI: [10.1088/0004-6256/141/4/134](https://doi.org/10.1088/0004-6256/141/4/134).
- [4] Bright S., De Marco O., Chesneau O., et al. Observing Compact Disks Inside Pre-Planetary Nebulae with the Very Large Telescope Interferometer// AAS. 2012. – V.283. – P. 115..DOI: [10.1017/S1743921312010800](https://doi.org/10.1017/S1743921312010800).
- [5] Velázquez P., Raga A., Riera A., et al. Multipolar young planetary nebulae modelled as a precessing and orbiting jet with time-dependent ejection velocity// MNRAS. 2012. V. 419. –P. 3529. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19991](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19991).
- [6] Miszalski B., Boffin H., Corradi R. Carbon dwarf wearing a Necklace: first proof of accretion in a post-common-envelope binary central star of a planetary nebula with jets// MNRAS. 2013. V. 428. - L39. DOI: [10.1093/mnras/sts011](https://doi.org/10.1093/mnras/sts011).
- [7] Gledhill T. M.; Forde, K. P. A fast bipolar H₂ outflow from IRAS 16342-3814: an old star reliving its youth // MNRAS. 2012. V. 421. – P. 346. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.20309.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20309.x).
- [8] Guillén, P., Vázquez R., Miranda L., et al. Multiple outflows in the planetary nebula NGC 6058// MNRAS. 2013. V. 432. – P. 2676. DOI: [10.1093/mnras/stt612](https://doi.org/10.1093/mnras/stt612).
- [9] Kwok S. From red giants to planetary nebulae// ApJ, 1982. V. 258. - P. 280.
- [10] Griet C, Van de Steene Herschel observations of planetary nebulae//Proceedings IAU Symp. 2016. No 323. DOI: [10.1017/S1743921317001971](https://doi.org/10.1017/S1743921317001971).
- [11] Hsia C., Chau W., Zhang Y., et al. Hubble Space telescope observations and geometric models of compact multipolar planetary nebulae// ApJ. 2014. V. 787. P. 25. doi: [10.1088/0004-637X/787/1/25](https://doi.org/10.1088/0004-637X/787/1/25)
- [12] Ottl S., Kimeswenger S., Zilstra A. Ionization structure of multiple-shell planetary nebulae. NGC 2438 // A&A. 2014. V. 565. – P. 87. DOI: [10.1051/0004-6361/201323205](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323205).
- [13] Aller A., Miranda L., Olguin L., et al. On the Origin of Morphological Structures of Planetary Nebulae // MNRAS. 2015. – V. 446. – P.317. DOI: [0.1093/mnras/stu2106](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2106).
- [14] Ruiz N., Guerrero M. Physical structure of the planetary nebula NGC 3242 from the hot bubble to the nebular envelope// AJ. 2011. V. 142. - P.91. DOI: [10.1088/0004-6256/142/3/91](https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/3/91).
- [15] Jacoby G. Unusual structure of the planetary nebulae Abell 30 and Abell78//PASP, 1979, V. 91, P. 754.
- [16] Guerrero M., Ruiz N., Hamann W., et al. Rebirth of X-Ray emission from the born-again planetary nebula A30// ApJ. 2012. V. 755 - P. 129. DOI: [10.1016/j.icarus.2012.09.025](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.025).
- [17] Akras S., Gon D., Low-ionization structures in planetary nebulae. Physical, kinematic and excitation properties// MNRAS. 2016. V. 455. - P. 930. DOI: [10.1093/mnras/stv2139](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2139).
- [18] Hillwig T., Jacoby G., Jones D., et al. Binarity in the central stars of planetary nebulae and its relation to stellar evolution// ASPC. 2017. No 509.

УДК 524.386

Л.А. Павлова, Л.Н. Кондратьева

«В.Г.Фесенков атындағы Астрофизика институты» ЕЖПС, Алматы, Қазақстан

ПЛАНЕТАРЛЫҚ ТУМАНДАРДЫҢ БІРКЕЛКІ ҚҰРЫЛЫМЫН ҚАЛЫПТАСТЫРУ МЕХАНИЗМДЕРІ

Аннотация. Планетарлық тумандардағы газдың біркелкі бөлінуі көптеген ағындар, глобулдер және талшықтар түрінде көрінеді. Гетерогенді құрылымның егжей-тегжейлері кеңейтілген, жеткілікті дамыған объектілерде ғана емес, сонымен қатар динамикалық жас 1000 жылдан асатын жас ықшам қабықтарда да кездеседі. Планетарлық тумандардың эволюциясының ерте кезеңдерінде біртектілікті қалыптастыру мәселесі соңғы жылдары өзекті болып табылады. Мүмкін болатын тегісі ретінде орталық жұлдыздың жылдамдығы жоғары жылдамдықты желдің баяу, бірақ күшті желдің әсерінен «қызыл» гигант кезеңінде шығарылған затпен өзара әрекеттесуі қарастырылады. Бұл жағдайда жұлдыздар мен глобулдардың пайда болуы жұлдызды желмен жүретін соққы толқындарының әсерінен өтеді. Кейбір планетарлық тумандардағы орталық көздер екі жұлдыздық жүйе болып табылады. Жұлдыздың құрамдас бөліктері арасындағы жаппай алмасу процестері біркелкі емес қабық құрылымын қалыптастыруға әкелуі мүмкін.

Осы мақалада планетарлық тумандарды зерттеудің заманауи әдістерінің, соның ішінде ғарыштық телескоптардағы байқаудың, біркелкі емес құрылымдардың пайда болуына ұсынылған механизмдердің шынайылығы мен тиімділігін бағалауға мүмкіндік беретін нәтижелерін қарастырамыз

Түйін сөздер: планетарлық тумандықтар, қабықшаның құрылымын қалыптастыру механизмдері.

Информация об авторах:

Павлова Л.А. - Кандидат Физ.-мат. Наук Астрофизический Институт им. Фесенкова, lapavlova44@mail.ru;
Кондратьева Л.Н. – Кандидат Физ.-мат. Наук Астрофизический Институт им. Фесенкова lu_kondr@mail.ru