

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 14

МАЙ, 1978

ВЫПУСК 2

УДК 524.5

МИКРОСТРУКТУРЫ В ПЛАНЕТАРНОЙ ТУМАННОСТИ NGC 7293

С. Б. ВЛАДИМИРОВ, Г. С. ХРОМОВ

Поступила 28 декабря 1977

Отпечаток известного снимка планетарной туманности NGC 7293, сделанного Р. Минковским, использован для получения картин эквидисперсии двух участков внутренней границы кольца этого объекта. Исследована морфология радиальных волокон и малых конденсаций, наблюдающихся в NGC 7293.

Обнаружено, что в типичном случае волокна представляют собою несколько конденсаций, объединенных слабой оболочкой неправильных очертаний. Волокна не имеют продолжений в ярком кольце туманности и не связаны со структурой ее внешнего края. Внутри кольца заметны многочисленные микроконденсации, являющиеся остатками волокон.

Волокна и конденсации в NGC 7293 могут быть реликтовыми образованиями, оставшимися от эпохи ионизации туманности. Они обнажаются при оттоке газа с ее внутренней поверхности и затем быстро рассеиваются. Оценены характерные размеры волокон и конденсаций, их относительная плотность и время жизни.

Введение. Около 10 лет назад Б. А. Воронцов-Вельяминов [1] обратил внимание на многочисленные радиальные волокна, видимые на лучших фотографиях южной планетарной туманности NGC 7293. Это оживило интерес к проблеме микроконденсаций в планетарных туманностях, существованием которых и ранее пытались объяснить некоторые неувязки в интерпретации спектров этих объектов.

Образования, подобные волокнам в NGC 7293, не могут быть особенностью только этого объекта. Несомненно, что нечто аналогичное должно существовать и в других планетарных туманностях. Лишь сравнительная близость NGC 7293 при достаточной поверхностной яркости предопределила открытие тонких радиальных структур именно в этом объекте.

В последние годы появилось несколько работ, посвященных интерпретации волокон в NGC 7293. Примечательно, что фактической основой этих исследований служила одна единственная фотография туманности в лучах

H. и [N II], полученная Р. Минковским на 5-метровом телескопе при очень хороших изображениях. До сего времени мы не имеем ни столь же высококачественных новых фотографий NGC 7293, ни четкого представления о спектрах ее волокон.

Последнее — не удивительно, так как из-за слабости и тонкости волокон получение их спектров представляет очень сложную задачу. Впрочем, есть основания считать, что волокна не имеют радикальных спектральных отличий от наиболее ярких частей NGC 7293.

До получения новых фотографий волокон NGC 7293 и соответствующих спектрофотометрических данных, можно попытаться полнее использовать морфологическую информацию, содержащуюся в вышеупомянутой фотографии Р. Минковского.

Эквиденситы NGC 7293. Нанлучшей основой морфологического исследования протяженных объектов являются картины изофот. Получить такую картину с должным разрешением для объекта очень больших угловых размеров путем непосредственного измерения негатива — довольно трудно. Поэтому, в случае NGC 7293, мы воспользовались методикой эквиденсит, которая в последние годы успешно применялась на астрономической обсерватории Софийского университета. Существенным достоинством метода является, в частности, возможность достижения предельного контраста.

Для получения эквиденсит NGC 7293 использовался отпечаток с фотографии Минковского, любезно присланный по нашей просьбе директором обсерваторий Хейла д-ром Х. Бэбкоком. Первичные копии с отдельных участков отпечатка получались с объективом «Тессар» 1:4.5/21 см на эмульсии ОРВО МО-1 с увеличением в несколько раз. Неравномерность освещения отпечатка далеко отнесенным источником света не превышала 0.08%. С каждой из первичных копий было получено по 15 контрастных отпечатков на эмульсии ОРВО FU-5 с различными экспозициями. Они использовались для построения эквиденсит, согласно методике, описанной в [2]. Толщины эквиденсит в масштабе оригинального негатива оказались около 10 мкм.

На этом пути, однако, встретились свои трудности. Во-первых, пластинка Р. Минковского, как выяснилось, не имела фотометрической калибровки. В результате, наши эквиденситы также не могли быть привязаны к шкале интенсивностей. Во-вторых, с морфологической точки зрения, смещение изображений в линиях H. и [N II] приводит к неоднозначностям: интенсивность линии H. определяется практически лишь плотностью среды, в то время как интенсивность красных запрещенных линий N II, очень ярких в NGC 7293, зависит как от плотности, так и от состояния ионизации азота. Наконец, используя только один отпечаток с единственного негатива, мы не застрахованы от появления ложных деталей, вызванных зер-

ном или дефектами эмульсии. Все это снижает возможности метода, делая результаты сугубо качественными.

На рис. 1b и 1c приведены полученные нами картины эквиденсиг двух наиболее интересных областей кольца NGC 7293. Рис. 1a помогает понять, какие части изображения туманности представлены на двух предыдущих.

Структура волокон и микроконденсации. Полученные картины весьма сложны для понимания, как и любая достаточно полная морфологическая информация. Кроме того, следует помнить о неизбежных эффектах проективного наложения деталей, поскольку туманность полностью прозрачна в оптике. Например, именно проекцией мы склонны объяснять существование двух концентрических внутренних границ туманности, отчетливо видимых на рис. 1b и, несколько менее явно, — на рис. 1c.

Протяженные волокна обычно распадаются на две или более конденсаций, заключенных в общую слабую оболочку. В голове каждого волокна со стороны ядра туманности всегда имеется конденсация.

Поверхностная яркость волокна либо возрастает при приближении к основной структуре туманности — и тогда волокно сливается с ней, либо падает, и тогда наблюдается изолированное волокно, или просто отдельная конденсация со слабым ореолом.

Волокна не имеют отчетливого продолжения в более плотных частях туманности. Связи волокон со структурой внешнего края туманности проследить не удастся. Вблизи внешней границы туманности подобные вытянутые образования вообще не наблюдаются. Волокна можно считать радиальными лишь в первом приближении; на самом деле они достаточно нерегулярны и не всегда ориентированы строго по радиусу объекта.

По-видимому, волокна являются особенностью, свойственной лишь внутренней границе основной структуры туманности. Правда, в значительно меньшем количестве и при меньшем контрасте волокна наблюдаются и в кольце NGC 7293. Однако в этом случае нет уверенности, что они действительно принадлежат основной структуре туманности, а не проецируются на нее. Сама основная структура достаточно неоднородна, но характерный масштаб неоднородностей в ней значительно больше, а их контраст — меньше.

Наряду с некоторым количеством сравнительно ярких изолированных конденсаций и волокон, не вливающих в основную структуру туманности, у ее внутренней границы и вблизи ядра заметны многочисленные слабые «микроконденсации». Они напоминают выродившиеся волокна, оболочки которых слишком слабы и потому не видны.

Характерные угловые размеры конденсаций в волокнах и ярких изолированных конденсаций составляют (с небольшим разбросом) 2.5. Микроконденсации имеют несколько меньшие размеры — порядка 1.5—2". Длины

типичных волокон — около $10''$. Таким образом, относительные поперечники и длины волокон соответственно равны 0.003 и 0.012 от среднего внешнего диаметра NGC 7293 ($850''$). Естественно, что в планетарных туманностях меньшего углового размера подобные образования просто неразличимы.

Надежно оценить плотность вещества в конденсациях и их оболочках по их относительной поверхностной яркости не удастся — прежде всего из-за отсутствия фотометрических калибровок. По грубым прикидкам, плотность наиболее ярких конденсаций превышает среднюю плотность основной структуры NGC 7293 не более чем на порядок величины. Окончательный ответ на это вопрос могут дать только спектральные наблюдения.

О природе и происхождении волокон и микроконденсаций. Естественно всего предположить, что волокна и конденсации в них образовались вследствие неустойчивости типа Релея—Тейлора при прохождении ионизационного фронта через холодную нейтральную молодую планетарную туманность. Подобный процесс рассмотрел Каприотти [3], показавший, что в результате действительно могут образовываться конденсации.

Попытка представить волокна как области тени, где из-за экранирующего воздействия головной конденсации ионизация понижена [4], едва ли обоснована. Во всяком случае против этой гипотезы говорят сравнительно нерегулярные очертания волокон, существование в них нескольких соосных конденсаций и отсутствие продолжения волокон в более плотные части туманности.

Не наблюдается явных признаков обдувания волокон и изолированных конденсаций в NGC 7293 звездным ветром от ее ядра. Действительно, в этом случае мы, вероятнее всего, видели бы более упорядоченные радиальные структуры, а головы конденсаций всегда имели бы резко выраженный внешний край.

В равной степени нет четких признаков того, что волокна погружены в достаточно плотный очень горячий и потому невидимый газ, который, гипотетически, мог бы заполнять внутренность планетарной туманности. В этом случае боковые границы волокон были бы более резкими, а сами волокна имели бы форму капель, с яркой и плотной конденсацией в голове и утончающимся хвостом.

Таким образом, мы возвращаемся к наиболее естественному объяснению, что волокна и конденсации в NGC 7293 есть реликтовые образования, оставшиеся от эпохи постепенной ионизации туманности. С точки зрения физических условий в них, это, вероятнее всего, полностью ионизованные структуры, примерно той же плотности и возбуждения, что и наиболее яркие части туманности.

Легко понять, что такие образования должны расширяться в окружающее их пространство под действием внутреннего давления. Следовательно, со временем волокна ослабевают и рассеиваются, а наиболее плотные их части—конденсации превращаются в небольшие и слабые изолированные сгустки вещества, подобные многочисленным микроконденсациям во внутренней части кольца NGC 7293.

Можно попытаться оценить время жизни волокон, воспользовавшись, например, теорией изотермического разлета газового облака, развитой в работе В. С. Имшеника [5]. Считая, что расстояние до NGC 7293 равно 44 пс (наша оценка), получаем, что характерный размер конденсаций в волокнах составляет примерно $1.5 \cdot 10^{15}$ см. Их поверхностная яркость близка к поверхностной яркости плотных частей основной структуры туманности. Поверхностная яркость изолированных слабых микроконденсаций во внутренней части кольца NGC 7293 должна быть примерно на 1—1.5 порядка величины ниже, а их размер — примерно тот же.

Предполагая, что микроконденсации образовались из рассеявшихся конденсаций в волокнах, мы с помощью теории [5], можем оценить время, необходимое для того, чтобы поверхностная яркость такой конденсации упала в 10—30 раз. При различных предположениях о начале эпохи быстрого расширения волокон это время оказывается порядка десятков и сотен лет, т. е. в любом случае волокна и конденсации в них должны быть сравнительно короткоживущими образованиями. Повторение снимка Р. Минковского (на том же инструменте и с той же комбинацией «пластинка—фильтр») может дать однозначный ответ на вопрос о правильности развитых нами представлений и оценок.

Вывод о кратковременности существования волокон в наблюдаемой фазе приходит в противоречие со значительно более длительной шкалой существования самой туманности. Кроме того, нужно понять, почему они наблюдаются только на внутренней границе туманности.

В одной из наших прежних работ [6] мы попытались показать, что отделение планетарной туманности от ее ядра происходит с очень небольшой скоростью. Интенсивное расширение туманности начинается после завершения ее ионизации, когда она разлетается в окружающее пространство со скоростью порядка скорости звука в ионизованном газе. Соответствующий отток газа происходит и в направлении ядра туманности, с ее внутренней границы.

Поскольку туманность представляет собою тороидальное образование, разреженный газ скапливается внутри кольца. Там он частично аккрецируется ядром, а частично вытекает через незаполненные полярные области тора. Таким путем образуются характерные периферические структуры планетарных туманностей [7].

На фотографии NGC 7293, полученной на 3.6-метровом телескопе Европейской южной обсерватории, отчетливо видно облако слабо светящегося и, вероятно, разреженного газа, заполняющего внутренность кольца NGC 7293. Любопытно, что это облако имеет примерно круговые очертания, не смыкается с ярким кольцом туманности и имеет депрессию в радиусе около 40" вокруг ядра. Было бы крайне интересно получить спектр этого образования, оценить его плотность и степень возбуждения. Возможно, что этот газ замедляет расширение микроконденсаций, несколько стабилизируя их и увеличивая время жизни.

При прохождении ионизационного фронта через молодую планетарную туманность первоначально существовавшие в ней неоднородности (возникшие, скажем, вследствие гравитационной неустойчивости медленно расширяющейся холодной и нейтральной туманности) усиливаются, вытягиваются и фрагментируются, сохраняя относительно малую первоначальную радиальную скорость. Заметим в этой связи, что недавняя попытка выявить расширение системы волокон в NGC 7293 по их собственным движениям не удалась [8].

По мере газодинамического расширения туманности во вне и постепенного оттока газа с ее внутренней поверхности, конденсации обнажаются, образуя волокна. Оказавшись в несравненно менее плотной среде, они начинают расширяться и вскоре исчезают. Микроконденсации во внутренних областях кольца NGC 7293 отмечают, таким образом, прошлые положения ее внутренней границы. Конденсации вблизи внешней границы туманности, естественно, отсутствуют, если только туманность не очень молода. Вообще, степень однородности планетарных туманностей должна увеличиваться с их возрастом. В старых объектах, типа туманностей Эйбелла, малые конденсации вероятнее всего отсутствуют.

Зная линейный размер конденсаций и предполагая, что их характерная плотность на порядок величины выше средней плотности туманности, а общее число, скажем, 10^3 , получаем, что в них сосредоточено лишь около 1/1000 доли полной массы туманности. Влияние их на интегральный спектр объекта, таким образом, весьма проблематично.

Авторы работы благодарят директора обсерваторий Хейла проф. Х. Беккока и д-ра Р. Веста за любезно присланные ими отпечатки с оригинальных негативов NGC 7293.

Астрономическая обсерватория
Софийского университета
Астрономический совет
АН СССР

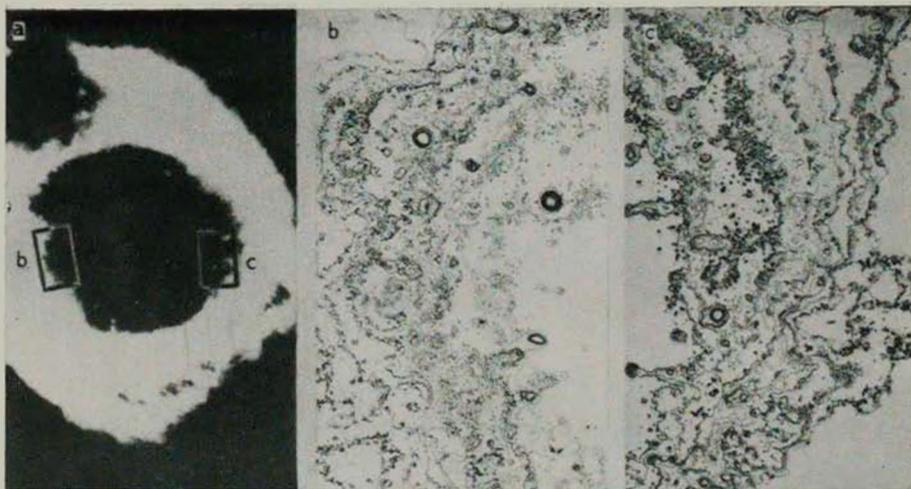


Рис. 1. Эквиваленты планетарной туманности NGC 7293: а) — Расположение двух участков изображения NGC 7293, для которых получены картины эквивалент. б) — Картина эквивалент северного участка внутренней границы кольца туманности. в) — Картина эквивалент южного участка внутренней границы кольца туманности.

К ст. С. Б. Владимирова, Г. С. Хромова

MICROSTRUCTURES IN THE PLANETARY NEBULA NGC 7293

S. B. VLADIMIROV, G. S. KHROMOV

The print from the famous R. Minkowski's plate of the NGC 7293 was used to produce the equidensities of the two inner parts of the ring of this nebula. The morphology of the radial filaments and small condensations in NGC 7293 was studied.

It is found that typically the filaments consist of several small condensations enveloped in the faint irregular shell. The filaments do not protrude into the bright ring of the nebula and show no connection with the structure of its outer border. Within the ring numerous micro-condensations are visible which are the remnants of the older filaments.

The filaments and condensations in NGC 7293 may be considered as the relict formations from the epoch of the ionization of the nebula. They are uncovered during the outflow of gas from the inner surface of the nebular structure and then rapidly dissipate. The characteristic scale of the filaments and condensations, their relative density and life-time are estimated.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. A. Vorontsov-Velyamnov, *Planetary Nebulae*, Dordrecht-Holland, 1968, p. 256.
2. С. Б. Владимиров, *Астрон. цirk.*, № 977, 5, 1977.
3. E. R. Capriotti, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege*, 6 Ser. 5, 447, 1973.
4. D. Blerkom, van, *T. T. Arny*, M. N., 156, 91, 1972.
5. В. С. Ижменник, *ДАН СССР*, 131, 1287, 1960.
6. Г. С. Хромов, *Астрон. ж.*, 53, 1202, 1976.
7. G. S. Khromov, *L Kohoutek*, *Planetary Nebulae*, Dordrecht-Holland, 1968, p. 227.
8. S. Grandt, *P. A. S. P.*, 85, 200, 1973.