

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 17

ФЕВРАЛЬ, 1981

ВЫПУСК 1

УДК 524.5

К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Л. С. ПИЛЮГИН, Г. С. ХРОМОВ

Поступила 24 июня 1980

Принята к печати 11 декабря 1980

С учетом основных уверенно известных фактов о планетарных туманностях и новых данных об эволюции туманностей и их ядер пересмотрены представления о механизме образования этих объектов. Существующая эмпирика противоречит теоретическим механизмам образования планетарных туманностей вследствие длительного истечения вещества, либо последовательности малых выбросов. Более реалистичной является гипотеза о одновременном отделении достаточно массивной туманности. Оно может происходить баллистическим образом при кратковременных мощных вспышках гелиевого слоевого источника в прееволюционировавших красных гигантах умеренной массы или на другой нестационарной стадии эволюции звезды. После отделения части оболочки в виде эмбриональной планетарной туманности, ядерные источники энергии в звезде деградируют и она, уже будучи ядром планетарной туманности, светится за счет гравитационного сжатия маломассивной остаточной оболочки к внутризвездному изотермическому ядру.

1. *Введение.* Проблема происхождения планетарных туманностей в последние годы привлекает большое внимание; ей посвящены десятки работ различных авторов. Идеология, методика и результаты этих исследований, как правило, плохо согласуются. Многочисленные теоретические работы страдают от чрезмерной идеализации явления, так же, как от неполного, выборочного использования эмпирического материала.

Процесс возникновения планетарной туманности и ее ядра из предшествующего им астрономического объекта еще не наблюдался непосредственно. Поэтому мы вынуждены моделировать его, исходя из сведений об эволюции уже сформировавшейся системы «планетарная туманность — ядро» и общих, известных сейчас свойств галактического множества этих объектов. Попытаемся кратко подытожить основные надежно установлен-

ные факты, существенные с точки зрения проблемы образования планетарных туманностей.

Средняя планетарная туманность представляет собой газовую оболочку нормального химического состава с полной массой $\sim 0.1 M_{\odot}$, не претерпевающей заметных изменений за время существования туманности. Оболочка расширяется в окружающее пространство с характерной скоростью 20—40 км/с. Скорость расширения в индивидуальном объекте монотонно возрастает от внутренней к внешней границе туманности на величину, примерно равную самой средней скорости расширения. Систематических отклонений поля этих скоростей от сферической симметрии, или зависимости средней скорости расширения от возраста туманности не наблюдается — при современной полноте и точности фактических сведений о внутренней динамике планетарных туманностей.

В работе [1] показано, что как абсолютные значения, так и градиенты скоростей расширения планетарных туманностей легко объясняются в рамках теории изотермического разлета газового облака в пустоту, построенной В. С. Имшенником [2]. Следовательно, реликтовые скорости расширения, сохранившиеся от эпохи отделения туманности от ее ядра, должны быть малы: скажем, менее 10 км/с.

Примерно в 1% случаев наблюдаются туманности с двойными оболочками. Следовательно, иногда выброс массивной оболочки может повторяться на интервале времени порядка 10—20 тысяч лет. Однако пока еще нет возможности ответить на существенный вопрос о том, обладает ли явление планетарной туманности общим свойством повторяемости.

Ядро планетарной туманности претерпевает значительные изменения за время жизни его газовой оболочки (около 20 000 лет): температура ядра средней планетарной туманности возрастает от, примерно, 50 до более чем 100 000 К, радиус уменьшается от 10 до $0.01 R_{\odot}$, а болометрическая светимость убывает от $3 \cdot 10^5$ до $\sim 3 L_{\odot}$ [3, 4].

На рис. 1 показано положение ядер планетарных туманностей на диаграмме Герцшпрунга—Рессела по данным нашей работы [4], дополненным сведениями о температурах и светимостях ядер самых старых объектов предельно низкой поверхностной яркости из [5]. Картина напоминает скорее эволюционную последовательность, нежели сосредоточение разнородных объектов в некоторой области в плоскости $T_* - L_*$.

Приведенный вариант диаграммы Герцшпрунга—Рессела для ядер планетарных туманностей существенно отличается от прежних, послуживших основой для многочисленных теоретических работ на тему о происхождении планетарных туманностей и дальнейшей эволюции их ядер. На рис. 2 он сопоставлен с двумя другими, наиболее популярными диаграммами, полученными Ситоном [6] и О'Деллом [7]. Заметим, что примененная нами методика определения температур, светимостей и расстояний

до планетарных туманностей содержит меньшее число допущений, нежели использованная в работах [6, 7], и потому — более надежна.

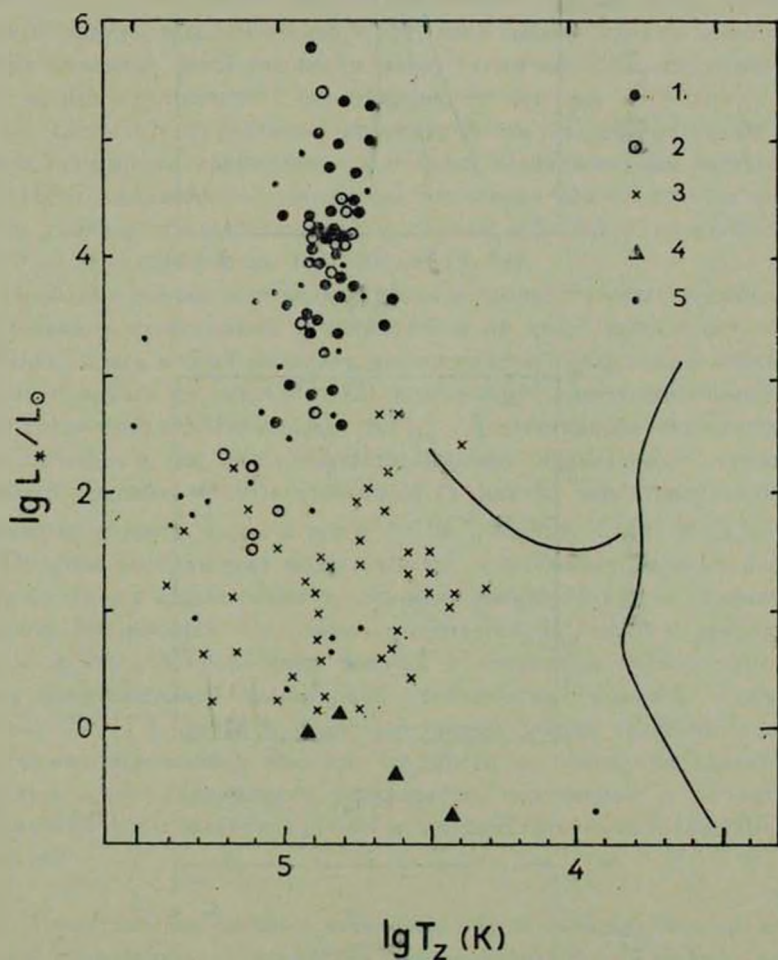


Рис. 1. Положение ядер планетарных туманностей на диаграмме Герцшпрунга — Рессела. Схематически показан ход главной последовательности и горизонтальной ветви согласно [6]. 1 — Ядра с уверенно определенными «гелиевыми» занстровскими температурами $T_Z(\text{He II})$ [3]. 2 — Ядра с неуверенно определенными $T_Z(\text{He II})$ [3]. 3 — Ядра старых планетарных туманностей с оценками [7], температур из [5]. 4 — Наиболее горячие и яркие белые карлики. 5 — Ядра с грубо оцененными $T_Z(\text{He II})$ [3].

Скорость эволюции ядер вдоль трека, представленная на рис. 1, 2а, резко переменна во времени; первоначальное уменьшение светимости в е-раз происходит всего лишь примерно за 200 лет. Важно и то, что ядра

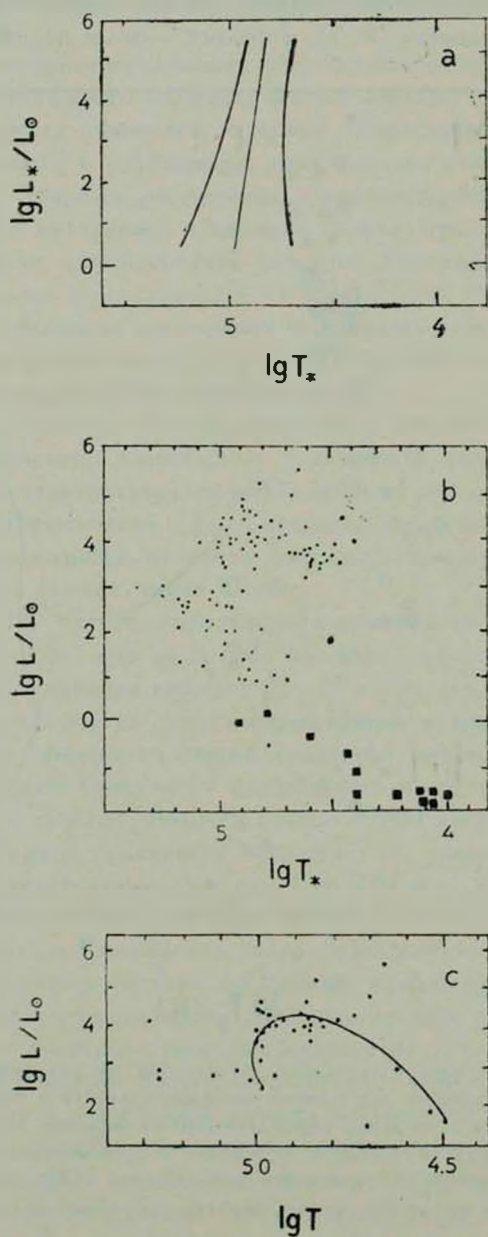


Рис. 2. Сравнение нашего варианта диаграммы Герцшпрунга—Рессела для ядер планетарных туманностей с данными других авторов. а — Схематический вид диаграммы на рис. 1. б — Диаграмма из работы [7]. в — Диаграмма из работы [6].

старых планетарных туманностей существенно отличаются от белых карликов: они значительно горячее и ярче.

Прямых оценок масс ядер не существует. Среди них встречаются двойные звезды (см., например, [8]), хотя многие ядра — заведомо одиночные объекты. Двойственность ядер, таким образом, по-видимому, не имеет прямого отношения к образованию туманности.

По своим пространственно-кинематическим характеристикам планетарные туманности принадлежат к старому галактическому населению типа I. Их ближайшими современными аналогами в этом смысле являются звезды главной последовательности классов В8—А5 с начальными массами 2—4 $M_{\odot}$ и возрастом 10^8 — 10^9 лет [9, 10].

Проблема поиска и отождествления непосредственных звездных предшественников планетарных туманностей и их ядер привлекает большое внимание. Здесь можно выделить два господствующих направления. Представители одного из них ([11, 12] и др.) ищут протопланетарные туманности среди звезд со спектрами ВQ []. Другое направление основывается на гипотезе о том, что предшественниками планетарных туманностей являются красные гиганты классов М, S или С, характеризующиеся непрерывным сбросом массы в темпе $\sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ ([13] и др.).

Простые соображения подсказывают, что оба направления в принципе имеют дело с существенно различными эмбриональными стадиями планетарных туманностей. Проблема осложняется отсутствием предварительной теоретической проработки вопроса о вероятных внешних характеристиках эмбриональной планетарной туманности, крайней сложностью спектров ВQ []-звезд и недостаточностью общих сведений о долгопериодических переменных. Все эти трудности не позволяют сделать обоснованную оценку надежности результатов, получаемых в рамках обоих направлений исследования проблемы предшественников планетарных туманностей.

2. Теоретические схемы и некоторые общие свойства механизма образования планетарных туманностей. Подавляющее большинство современных теоретических работ на тему об образовании планетарных туманностей основывается на первоначально предложенной И. С. Шкловским [14] гипотезе о том, что они возникают из внешних оболочек красных гигантов небольшой массы. За последние два десятка лет теоретические воззрения на механизм отделения туманности от ее будущего ядра претерпели значительные изменения.

Первой была исследована гипотеза о сбросе оболочки в результате прохождения ударной волны, возникающей в момент вспышки гелиевых реакций, или движущейся за счет рекомбинаций за фронтом волны [14—16]. Теоретические результаты оказались противоречивыми с точки зрения

массы отделяющейся оболочки. Впоследствии, в работах [17, 18] было убедительно показано, что импульсное динамическое возмущение, сопровождающее начало гелиевых реакций в вырожденном ядре красного гиганта, не способно привести к отделению оболочки сколько-нибудь заметной массы.

В последующие годы в этой сложной теоретической проблеме сложились два основных направления. В рамках первого из них исследуется гипотеза о плавном отделении оболочки маломассивного гиганта вследствие возрастания светимости его ядра (см. [19—22] и др.). При должной комбинации многочисленных параметров моделей, как правило, удавалось получить сброс достаточно массивной оболочки, дополнительно ускоряющейся световым давлением «разгорающегося» ядра туманности. В некоторых моделях сбросу оболочки предшествовали пульсации. Вопрос о причинах увеличения светимости ядра не рассматривался.

Второе направление сформировалось на основе теоретического вывода о том, что в оболочке красного гиганта могут возникнуть ионизационная и, как следствие, пульсационная неустойчивости [23—25]. Поскольку этот механизм пригоден также для объяснения долгопериодической переменности, возникла гипотеза об образовании планетарных туманностей из звезд такого типа.

Различные аспекты проявления ионизационной и пульсационной неустойчивости в моделях красного гиганта небольшой массы рассматриваются в многочисленных работах (см., например, [26—28]). Основная трудность, с которой встречается этот весьма сложный механизм, состоит в том, что возникающая пульсационная неустойчивость теоретически не приводит к сбросу достаточно массивной оболочки; в «лучшем» случае получается последовательность малых выбросов.

Таким образом, теория предоставляет разнообразные возможности для объяснения причин и способов отделения оболочки красного гиганта, могущей стать эмбрионом планетарной туманности. Сложные теоретические модели, включающие по несколько произвольно подбираемых параметров, открывают широкие возможности для формального согласования теоретических результатов с теми или иными отдельно выбранными фактическими данными. Поэтому окончательное суждение о реалистичности какого-либо теоретического результата можно основывать только на всестороннем анализе доступной эмпирики.

Проведем общее обсуждение такого рода, опираясь на сводку главных фактических данных о планетарных туманностях и их ядрах, содержащейся в предыдущем разделе этой работы.

Наиболее уязвимой для критики оказывается теоретическая концепция об образовании планетарных туманностей из долгопериодических переменных вследствие непрерывного истечения или серии малых выбросов.

вещества оболочки красного гиганта. Против этой теоретической схемы можно привести ряд общих аргументов:

1. Пространственное распределение и кинематика галактических планетарных туманностей разительно отличаются от аналогичных свойств долгопериодических переменных, если рассматривать последние как единый класс объектов: система планетарных туманностей значительно более уплощена, а их средние пекулярные скорости в направлении, перпендикулярном галактической плоскости, в несколько раз меньше [4, 9, 10].

2. Непрерывное и длительное истечение вещества неспособно сформировать компактную, упорядоченную околосветную оболочку, подобную планетарной туманности. Напомним, что внешний край планетарной туманности представляет собой физическую границу газового облака, а в их внутренних областях не наблюдается течений, направленных от ядра к оболочке. Требование «остановить» потоки вещества, формирующие эмбриональную планетарную туманность, влечет за собой гипотезу о существовании тормозящей их межзвездной материи значительной плотности. При этом размеры и средние плотности планетарных туманностей окажутся в зависимости от локальной плотности межзвездной среды, а эмпирические взаимосвязи между поверхностными яркостями планетарных туманностей и различными характеристиками их ядер (см., например, [3]) не смогут существовать.

В работе [1] показано, что структура внешнего края типичных планетарных туманностей соответствует профилям плотности на внешней границе свободно расширяющегося облака газа. Этого также не могло бы быть, если бы туманность формировалась в результате торможения со стороны межзвездной среды.

Непрерывное истечение, таким образом, способно в лучшем случае объяснить гигантские предельно слабые гало вокруг некоторых планетарных туманностей. В этом случае эпоха интенсивного оттока вещества оболочки звезды должна предшествовать отделению планетарной туманности.

3. В планетарных туманностях отсутствуют какие-либо морфологические особенности, характерные для процесса накопления вещества оболочки вследствие серии малых выбросов. Исходя из самых общих соображений, трудно предположить, чтобы последовательные выбросы хотя бы и малых, но ощутимых долей внешней оболочки красного гиганта не имели бы систематических различий в скорости. Если бы скорости выбрасываемых оболочек уменьшались с ростом их числа, «взрослые» планетарные туманности имели бы волнообразную внутреннюю структуру. В противоположном случае в туманности должно было бы возникнуть уплотнение вблизи внутренней границы. Ни того, ни другого в действительности не наблюдается.

4. При непрерывном истечении вещества, или в процессе постепенного накопления оболочки вследствие последовательных выбросов, центральная звезда новорожденной туманности должна длительное время сохранять свойства красного гиганта. Ее излучение неспособно ионизовать оболочку до окончания эпохи потери массы, последующего разогрева и превращения в нормальное ядро молодой планетарной туманности.

Нетрудно показать, что холодная неионизованная оболочка с массой порядка $0.1 M_{\odot}$ при радиусе $10^3 R_{\odot}$ окажется гравитационно неустойчивой, причем критическая длина волны джинсовской неустойчивости $\lambda_c = 6 \cdot 10^7 (\gamma T/\mu p)^{1/2}$ см будет того же порядка, что и радиус оболочки. Скорость развития гравитационной неустойчивости [29] $t \simeq (G\rho)^{-1/2}$ оказывается порядка $3 \cdot 10^8$ с. Следовательно, сравнительно массивная нейтральная оболочка, помещенная в окрестность холодной звезды, должна была бы быстро распасться на немногочисленные плотные глобулы, и чего-либо подобного планетарной туманности не могло бы возникнуть.

Механизм образования планетарной туманности вследствие единичного мощного выброса («баллистический» по терминологии [30]) естественным образом свободен от трудностей, указанных в разделах 2, 3 предыдущего обсуждения. Он не привязывает планетарные туманности к одному специфическому классу нестационарных звезд, и потому возражение раздела 1 также отпадает.

Естественно предположить, что после единовременного отделения оболочки звезда сразу же переходит в состояние горячего ядра планетарной туманности, способного быстро ионизовать ее. После этого туманность уже не сможет сжаться под действием самогравитации и потому отпадает и трудность, обсужденная в разделе 4.

Баллистический механизм, однако, встречается со своей специфической проблемой. Требование малости реликтовых скоростей расширения означает, что этот механизм во всех случаях должен действовать с очень высокой точностью для того, чтобы ко времени ухода сброшенной оболочки на расстояние порядка $10^4 R_{\odot}$ ее скорость обязательно была бы ≥ 10 км/с. Та же трудность свойственна гипотезе разгона планетарной туманности свежим давлением излучения ее ядра.

Изложенные выше доводы, основанные на фактических данных и простейших физических соображениях, показывают, что большинство теоретических работ на тему об образовании планетарных туманностей недостаточны для объяснения этого явления. По-видимому, их следует рассматривать и оценивать главным образом в аспекте собственных потребностей теории внутреннего строения и эволюции звезд.

3. О вероятном механизме образования планетарных туманностей. Попытаемся построить теоретическую схему образования планетарной

туманности, способную наилучшим образом объяснить всю совокупность эмпирических данных.

Нет оснований пересматривать исходную концепцию [14] об образовании планетарных туманностей из красных гигантов небольшой массы. С уменьшением радиуса звезды все труднее представить себе механизм сравнительно плавного отделения значительной части ее оболочки. С другой стороны, необходимость «стыковки» ядер старых планетарных туманностей с белыми карликами, вытекающая из близости этих звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рессела, заставляет считать, что массы ядер — невелики.

Полученный нами уточненный эволюционный трек для ядер планетарных туманностей (рис. 1, 2а) характеризуется катастрофическим монотонным падением светимости ядра, при относительно малых изменениях его температуры и уменьшением радиуса звезды до $10^{-2} R_{\odot}$. Столь малые радиусы типичны для изотермических вырожденных ядер в моделях красных гигантов. Характерное время этой эволюции (~ 200 лет) сравнимо с тепловым временем звезды $t_{th} = GM^2/R_*L_*$ [31], которое при массе $\sim 1.2 M_{\odot}$, начальном радиусе $10 R_{\odot}$ и светимости $10^5 L_{\odot}$ равно примерно 60 годам.

Быструю эволюцию такого типа проще всего объяснить гравитационным сжатием маломассивной оболочки звезды к ее изотермическому ядру при отсутствии ядерного энерговыделения. Обращаясь к результатам работы [3], нетрудно показать, что за время жизни средней планетарной туманности энергетическая отдача ее ядра составляет около $2 \cdot 10^{46}$ эрг. Для производства такого количества энергии при сжатии оболочки звезды к изотермическому ядру с массой $\sim 1.2 M_{\odot}$ при радиусе $\sim 0.03 R_{\odot}$ достаточно, чтобы масса оболочки составляла всего лишь $0.02 M_{\odot}$.

Таким образом, есть основания считать, что в ядрах планетарных туманностей не действуют обычные источники звездной энергии. Их «выключение» должно быть связано с отделением туманности, т. е. потерей звездой части массы.

Из трех рассмотренных ранее механизмов отделения планетарной туманности, по-видимому, следует предпочесть единовременный сброс массивной оболочки, свободный от многих трудностей, присущих гипотезам постепенного накопления вещества в окрестностях звезды — предшественника планетарной туманности и ее ядра.

С учетом этих предварительных замечаний, процесс образования туманности можно представить следующим образом: допустим, что светимость в недрах звезды, на внутренней границе ее оболочки, возрастает. Оболочка соответственно расширяется до некоторого предельного радиуса, отвечающего максимуму светимости. Если к этому моменту скорость

внешних слоев оболочки окажется больше местной скорости отрыва, то часть ее будет сброшена в виде эмбриональной планетарной туманности. Звезда, потерявшая часть своей массы, уже не может сохранить ядерные источники энергии, начинает сжиматься и светиться за счет гравитационного сжатия.

Требование малости реликтовых скоростей расширения планетарных туманностей налагает определенные условия на массу, радиус и скорость увеличения светимости звезды. Подробное исследование этих взаимосвязей возможно только на моделях конкретных нестационарных звезд. Этому будет посвящена наша следующая работа. Однако уже можно высказать предположения насчет вероятных общих свойств звезд — предшественников планетарных туманностей и причин, вызывающих постулированные нами колебания светимости.

Согласно современным представлениям, поздние стадии эволюции звезд умеренных масс характеризуются возникновением двойного слоевого источника энергии. Водородный и, особенно, гелиевый слоевые источники — нестационарны. Согласно расчетам [32], развитый гелиевый слоевой источник подвержен кратковременным колебаниям, при которых энерговыделение может возрастать более чем на порядок величины за время в несколько десятков лет. Существенно, что в эпохи вспышек гелиевого слоевого источника подавляется энерговыделение в водородном слоевом источнике. Тем самым создаются благоприятные условия как для отделения оболочки звезды, так и для последующей деградации ядерных источников энергии.

Если в процессе гравитационного сжатия ядра планетарной туманности ядерные источники в нем все же восстановятся, то звезда стабилизируется, вновь превратится в красный гигант, и отделение оболочки сможет повториться. При условии, что все это произойдет менее чем за 20 000 лет, возникнет двухоболочечная планетарная туманность, малое число которых мы наблюдаем в действительности.

Еще одной важной особенностью предлагаемого механизма образования планетарной туманности является неизбежность выпадания на ее ядро некоторой доли первоначально отделившейся оболочки. Это происходит вследствие малости скорости отделения и того, что последующее расширение новорожденной туманности под действием внутреннего давления должно происходить в обе стороны по радиусу. Возникающая аккреция способна объяснить природу сложных эмиссионно-абсорбционных спектров ядер молодых планетарных туманностей (см. [33]) и породить разнообразные высокоэнергетические процессы вблизи поверхности ядер.

ON THE ORIGIN OF PLANETARY NEBULAE

L. S. PILYUGIN, G. S. KHROMOV

The basic well-established data on the planetary nebulae and their nuclei together with the data on their evolution are used to revise the problem of their origin. It is shown that the empirics does contradict the popular theoretical schemes of the formation of the planetary nebulae by means of the long-term mass loss from the central stars, or by the series of minor ejections from them. The more realistic one is the hypothesis of the one-time single ejection of the massive nebula. Such an ejection may happen in the "ballistic" way at one of the short powerful flares of the helium shell source in the evolved red giant of the moderate mass, or on another non-stationary evolutionary stage. The ejection of part of the stellar envelope as the embryonic planetary nebula results in the degradation of the thermonuclear energy sources in the star. The star, being transformed into the nuclei of the young planetary nebula, keeps up its radiation by the gravitational contraction of the residual low-massive envelope to its internal isothermic core.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Хромов, Астрон. ж., 53, 1202, 1976.
2. В. С. Ишеник, ДАН СССР, 131, 1287, 1960.
3. Л. С. Пилыгин, Г. С. Хромов, Астрон. ж., 56, 237, 1979.
4. Г. С. Хромов, Астрофизика, 15, 445, 1979.
5. G. O. Abell, Ap. J., 144, 259, 1966.
6. M. J. Seaton, M. N., 132, 113, 1966.
7. C. R. O'Dell, Ap. J., 138, 67, 1963.
8. A. Acker, in "Planetary Nebulae", ed. Y. Terzian, Dordrecht—Boston, 1978, p.209.
9. М. Н. Куоса, Г. С. Хромов, Астрофизика, 15, 105, 1979.
10. Г. С. Хромов, Астрофизика, 15, 269, 1979.
11. D. Crampton, J. Grigar, L. Kohoutek, R. Viotti, Astrophys. Lett., 6, 5, 1970.
12. F. Ciatti, A. Mammano, Astron. Astrophys., 38, 435, 1975.
13. B. Zuckermann, in "Planetary Nebulae". ed. Y. Terzian, Dordrecht—Boston, 1978, 305.
14. И. С. Шкловский, Астрон. ж., 33, 315, 1956.
15. С. А. Каплан, И. А. Климишин, Астрон. ж., 36, 410, 1959.
16. S. Sakashita, Y. Tanaka, Progr. of Theor. Phys., 27, 127, 1962.
17. D. E. Osterbrock, in "Stellar Evolution" N. Y. Plenum Press, 1966, p. 381.
18. R. Harm, M. Schwarzschild, Ap. J., 150, 961, 1967.
19. D. J. Faulkner, Ap. J., 162, 513, 1970.
20. A. Finzi, R. A. Wolf, Astron. Astrophys., 11, 418, 1971.
21. G. S. Kutter, W. A. Sparks, Ap. J., 192, 447, 1974.
22. P. E. Stry, Ap. J., 196, 559, 1974.
23. L. B. Lusy, A. J., 72, 813, 1967.

24. *I. W. Roxburgh*, *Nature*, 215, 838, 1967.
25. *B. Paczynski, J. Zolkowski*, *Acta Astronomica*, 18, 255, 1968.
26. *D. A. Keely*, *Ap. J.*, 161, 657, 1970.
27. *R. Smith, W. Rose*, *Ap. J.*, 176, 395, 1972.
28. *P. R. Wood*, *Ap. J.*, 190, 606, 1974.
29. *С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер*, *Межзвездная среда*, ГИФМЛ, М., 1963.
30. *G. Abell, P. Goldreich*, *P. A. S. P.*, 78, 232, 1966.
31. *Р. Тейлер*, *Строение и эволюция звезд*, Мир, М., 1973.
32. *R. Härm, M. Schwarzschild*, *Ap. J.*, 200, 324, 1975.
33. *Г. С. Хромов*, *Письма АЖ*, 5, 195, 1979.