



Астрофизика

Телескоп БТА в поиске проявлений звездного нуклеосинтеза

В.Г. КЛОЧКОВА,
доктор физико-математических наук
САО РАН

Никто в Институте этого не понимал, но все знали это настолько твердо, что понимать и не пытались.

“Понедельник начинается в субботу”
А. и Б. Стругацкие

Первичный газ в ранней Вселенной представлял собой смесь водорода и гелия с примесью легких элементов (Li, Be, B). Позже, в ходе эволюции и взрывов массивных звезд первого поколения, началось формирование ядер более тяжелых химических элементов (C, O, Ne, Mg, Si и Fe). Однако все богатое разнообразие химических элементов в настоящее время “создано”



за счет последующего наслаивания результа-

тов звездного нуклеосинтеза (совокупности процессов ядерного горения, происходящих в недрах звезд различных масс и обеспечивающих синтез ядер химических элементов, для нескольких звездных популяций). В данном контексте предметом нашего рассмотрения будет синтез химических элементов тяжелее железа.

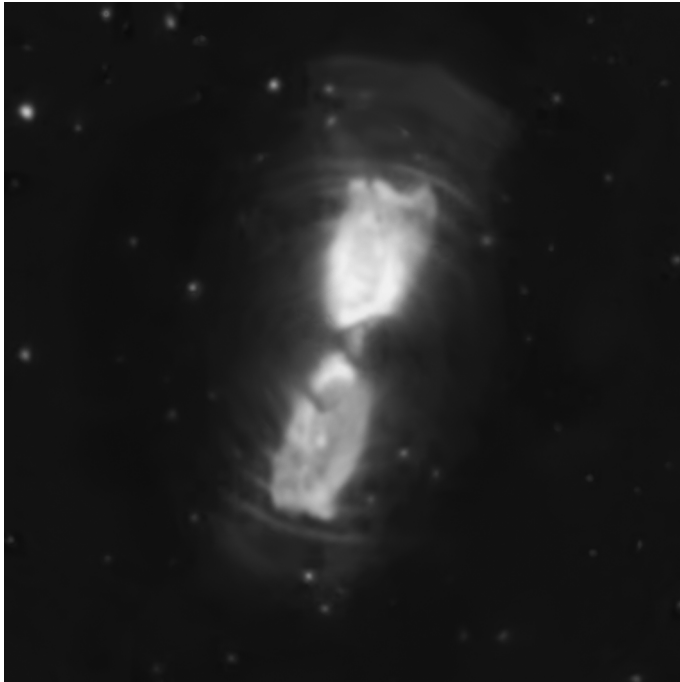
ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД
ВБЛИЗИ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ
ВЕТВИ ГИГАНТОВ

В последнее время особый интерес астрофизиков (как теорети-

© Ключкова В.Г.

ков, так и наблюдателей) вызывают звезды на асимптотической ветви гигантов (AGB): на этой эволюционной стадии наблюдаются звезды массой менее $8 M_{\odot}$ (после

выгорания в ядрах гелия). Этот пристальный интерес объясняется тем, что именно в недрах звезд, находящихся на столь кратковременном промежутке, как AGB-стадия



Инфракрасный источник IRAS17150–3224. Изображение наблюдений получено в 1997 г. с помощью широкоугольной камеры Космического телескопа Хаббла в видимом и ИК-диапазонах. Иерархия деталей различного масштаба (дуги и джеты) с различающимися скоростями молекулярных облаков, дуг и джетов представляет собой вещество, потерянное звездой за счет звездного ветра. Фото NASA.

(ее характерная продолжительность несколько тысяч лет), создаются физические условия для синтеза ядер металлов и выноса свежесформированных продуктов ядерных реакций на поверхность звезды. Получается, что AGB звезды — это своеобразный “завод” по производству металлов, который обогащает межзвездную среду галактик. Основным технологическим процессом производства тяжелых ядер является нейтронизация ядер железа и ядер более тяжелых металлов.

Напомним основные представления о звездах на стадии AGB. Пройдя несколько последовательных этапов эволюции за счет смены термоядер-

ных источников, эти звезды наблюдаются в виде холодных красных сверхгигантов высокой светимости, активно теряющих вещество за счет звездного ветра. Темп потери массы может достигать $4 \times 10^{-5} M_{\odot}$ в год, что обеспечивает формирование околозвездной протяженной газопылевой оболочки. В этой фазе звезда за короткое (в эволюционной временной шкале) время теряет до 40–80% своей массы, “поставляя” в околозвездную среду вещество, обогащенное тяжелыми металлами, синтезированными самой звездой. Дальнейший жизненный путь звездного остатка с массой около $0,6 M_{\odot}$ считается финалом эволюции звезды, он завершает ее пере-

ход в фазу планетарной туманности, а затем — в энергетически пассивное состояние остывающего белого карлика.

Основные представления о природе планетарных туманностей как заключительной стадии эволюции звезд промежуточных масс (примерно $3-8 M_{\odot}$) были сформулированы более полувека назад И.С. Шкловским (см. статью Л.М. Гиндилиса в этом номере журнала). Именно тогда, до формирования ядерной астрофизики как отдельного направления, Шкловским были сделаны выводы о связи между красными гигантами (сверхгигантами), планетарными туманностями и белыми карликами; о дискретном характере образования расширяющейся оболочки вследствие отделения внешних слоев красного гиганта; об эволюции звездного ядра, приводящей к образованию белого кар-

лика. В последующие десятилетия были развиты наземные и внеатмосферные методы наблюдений в оптическом, инфракрасном, субмил-

лиметровом и радиодиапазонах, и накоплены многочисленные наблюдательные данные, которые позволили более детально изучить эволюцию звезд малых и промежуточных масс.

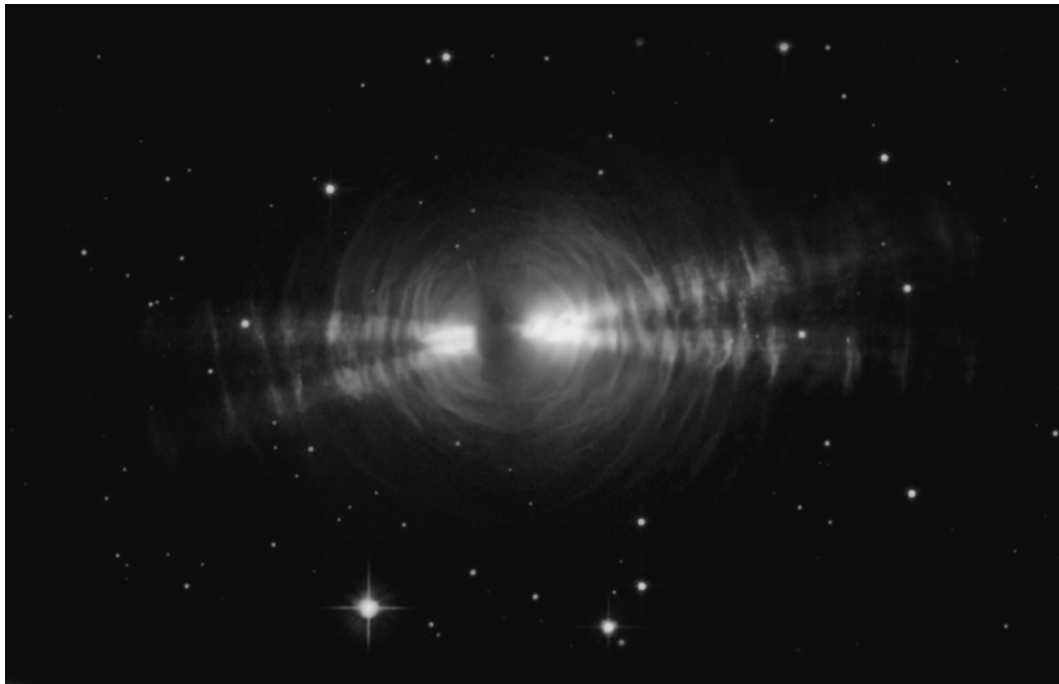
Туманность RAFG 2688, окружающая postAGB-звезду V1610 Лебедя. Звезда входит в небольшую подгруппу postAGB-звезд, в атмосферах которых (по наблюдениям на БТА) найдены большие избытки углерода и тяжелых металлов. На снимке видны мощные джеты и дуги, образовавшиеся за счет нескольких эпизодов сброса массы на AGB и postAGB. Центральная звезда закрыта от наблюдателя мощным пылевым баром. Изображение получено в октябре 2002 г. с широкоугольной камерой Космического телескопа Хаббла. Фото NASA.

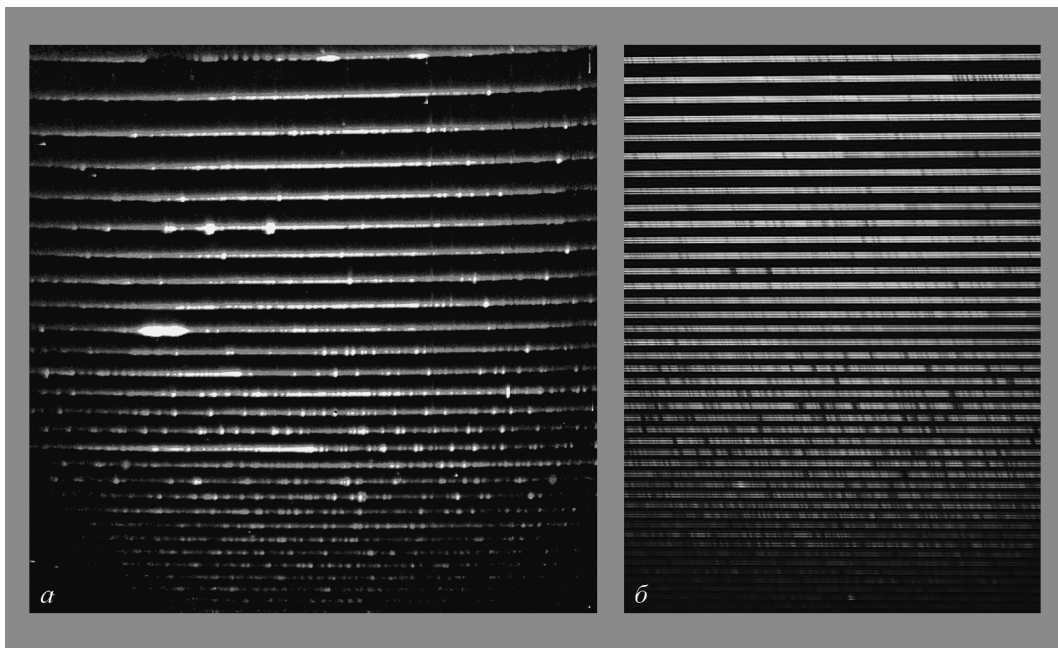
Выврожденное углеродно-кислородное ядро AGB-сверхгиганта окружено двумя тонкими и попеременно энергетически активными слоями с неустойчивым горением водорода и гелия. Данная конфигурация звезды неустойчива; теория предсказывает достаточно эффективное перемешивание и вынос за счет проникающей конвекции в атмосферу звезды вещества, переработанного в ядерных реакциях, которые сопровождают указанные процессы вы-

деления энергии. Важными элементами строения звезды являются слои с мощной конвекцией. За счет проникновения конвекции в слои, содержащие вещество, обогащенное тяжелыми металлами, оно окисляется на поверхности звезды. Этот вынос вещества, обусловленный многократно повторяющимся чередованием тонких энергетически активных слоев водорода и гелия, принято называть третьим перемешиванием.

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОБОЛОЧКИ AGB-ЗВЕЗД

В рассмотрении проявлений нуклеосинтеза нам помогут некоторые детали формирования и осо-





бенностей строения околозвездных оболочек. Звездный ветер на стадии AGB обычно обладает сферической симметрией, что и определяет преимущественно сферическую форму медленно расширяющихся оболочек у этих звезд. Однако их ближайшие потомки – звезды на стадии после AGB (далее в тексте – postAGB звезды) – это объекты, центральная звезда которых окружена, как правило, несферической оболочкой сложной структуры. Качественно новый уровень понимания структуры и динамики оболочек вокруг далеко проэволюционировавших звезд обеспечивают их наблюдения с помощью Космического телескопа Хаббла. Именно наблюдения

с этим телескопом выявили биполярную структуру и джеты у многих объектов, ранее наблюдавшихся как точечные. По мере накопления детальных изображений выяснилось, что в оболочках многих postAGB звезд замечены образования в виде дуг, которые указывают на то, что потеря их вещества происходила в ходе нескольких эпизодов усиления ветра. Дуги – это проекция фрагментов сферических оболочек, оставшихся после эволюции звезды на AGB. Хорошим примером являются неоднородные изображения ИК-источников IRAS17150–3224 и RAFGL 2688, полученные с широкоугольной камерой космического телескопа.

Теоретическое изучение эволюции звезд

Эшельные спектры, полученные на БТА: а – FG Стрелы в интервале длин волн 4700–8550 Å. В центре кадра мощная эмиссия в D-линиях NaI. Ниже, через пять порядков, хорошо видна сильная эмиссионная полоса Свана 5165 Å молекулы C₂; б – красного сверхгиганта R Жирафа в интервале длин волн 3550–6980 Å. Две узкие эмиссии в нижней половине кадра – линии нейтрального водорода H_δ и H_γ. Две сильные абсорбции на 13-м порядке сверху – это D-линии NaI.

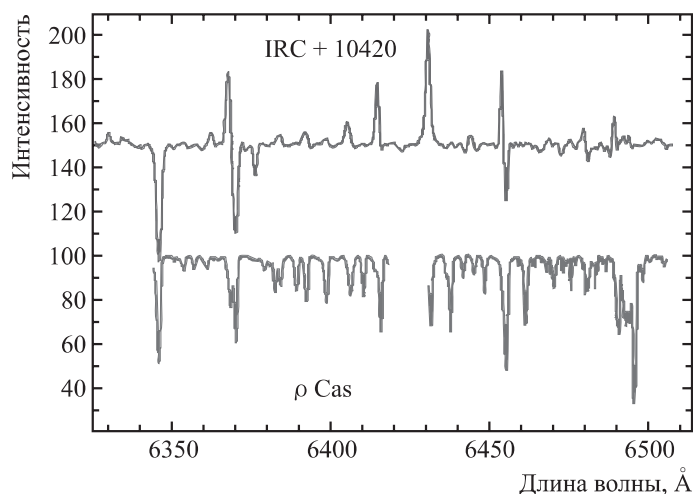
вблизи AGB затруднено из-за непростой структуры этой системы, включающей, по крайней мере, две компоненты: продолжающую свою эволюцию центральную звезду и остывающую оболочку, которая может иметь довольно непростую

Фрагменты спектров двух желтых гипергигантов V1302 Орла (кривая красного цвета) и ρ Кассиопеи. Наблюдения выполнены автором на БТА с эшелльным спектрографом НЭС.

конфигурацию. Много неясностей остается в понимании звездного ветра, а также процесса конвекции, а, следовательно, и выноса вещества на поверхность звезды. Сформировалось представление о том, что, наряду с исходной массой звезды, темп ее потери в ходе эволюции относится к важнейшим параметрам и определяет не только окончательную массу звезды после фазы AGB, но и ее внутреннюю структуру, а также временные шкалы эволюции звезды на заключительных фазах, а также степень изменения химического состава поверхностных слоев.

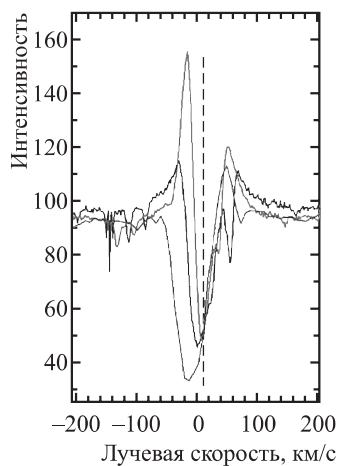
СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ AGB

Мощные околозвездные оболочки AGB-звезд излучают в ИК-области и создают таким образом избытки ИК-потока, вследствие чего распределение энергии в спектрах этих звезд становятся двугорбыми. Важный этап в исследованиях звезд с большими избытками инфракрасного потока обеспечила космическая обсерватория "IRAS" (1983). За



время работы обсерватории ИК-телескоп "просмотрел" почти 95% всей небесной сферы. Одним из результатов этого обзора стало выделение ИК-источников на высоких широтах Галактики, представляющих собой околозвездные оболочки с температурами от 200 до 1000 К. Впоследствии часть этих объектов была отождествлена со звездами высокой светимости, предположительно на эволюционной стадии postAGB. Существование пылевых оболочек сильно подавляет излучение звезд в видимой области спектра, поэтому лишь небольшая часть выделенных объектов доступна спектроскопическим наблюдениям в оптическом диапазоне с высоким разрешением. После выделения нового типа далеко проэволюционировавших звезд с большими избытками ИК-потока на многих крупных телеско-

пах мира выполняются программы спектроскопии postAGB и AGB звезд с целью изучения особенностей их аномальных спектров, кинематического состояния истекающих атмосфер и протяженных околозвездных оболочек. Это делается, прежде всего, для изучения процесса звездного нуклеосинтеза, сопровождаемого выносом переработанного вещества в атмосферу звезд. На 6-м телескопе БТА в сочетании с современными эшелльными спектрографами (отличается от классических тем, что его оптическая схема содержит дополнительный диспергирующий узел, позволяющий компактно разместить изображение спектра высокого разрешения на поверхности ПЗС-матрицы), под руководством автора также выполняется такого рода наблюдательная программа, что позволило получить несколько



Переменность профиля спектра в линии H_{α} для нескольких моментов наблюдений postAGB-звезды V5112 в Стрельце. Спектры получены автором в 1996–2012 гг. на БТА с эшелльным спектрографом НЭС.

принципиально новых результатов, касающихся особенностей спектров, их переменности, а также химического состава звездных атмосфер и оболочек.

Спектры поздних сверхгигантов (класса F, G) на стадии AGB и postAGB позволяют оценить содержание легких элементов и тяжелых металлов, синтезируемых в процессах нейтронизации ядер железа. Сложность теоретического изучения звездного нуклеосинтеза состоит в том, что эффективность синтеза и выноса свежих ядер на поверхность звезды зависит от большого числа факторов: исходной мас-

сы звезды, ее металличности, параметров истечения вещества, деталей процесса нуклеосинтеза и перемешивания. Поэтому, помимо классической проблемы исследования химического состава звезд на нетривиальных стадиях эволюции, самостоятельный интерес представляет и возможность изучения процессов обмена веществом между звездной атмосферой и околозвездной пылевой оболочкой, а также поиск механизмов, объясняющих аномалии химического состава атмосфер звезд, окруженных пылевыми оболочками.

Для решения перечисленных задач на БТА с эшелльным спектрографом НЭС выполняются спектральные наблюдения с высоким разрешением ($R = 60\,000$), что позволяет разделять слабые и близко расположенные спектральные линии, используемые для изучения химического состава атмосфер и оболочек. Для наблюдений слабых объектов программы используется спектрограф PFES в первичном фокусе БТА, обеспечивающий необходимое для нашей задачи качество спектров для объектов с $V \leq 14,5^m$ при спектральном разрешении $R = 15\,000$.

Для определения основных параметров моделей атмосфер звезд (эффективной температуры, ускорения силы тяжести) и для расчетов химиче-

ского состава используются теоретические сетки моделей звездных атмосфер. В первой же нашей работе, посвященной определению химического состава postAGB-звезд, в атмосфере одного из объектов программы — сверхгиганте ζ У Малого Пса (оптический компонент ИК-источника IRAS07134 + 1005) — были обнаружены большие избытки углерода и тяжелых металлов (Y, Ba, La, Eu). Впоследствии мы назвали ζ У Малого Пса каноническим postAGB-объектом, обладающим всеми признаками, характерными для звезд на данной стадии эволюции. Большой избыток ИК-потока делает двугорбым распределение ее энергии; характер переменности блеска звезды свойствен пульсирующим переменным; сверхгигант обладает протяженной околозвездной оболочкой, проявляющейся в оптическом спектре полосами молекулы C_2 , и измененный в ходе эволюции химический состав атмосферы.

Последующие исследования, проведенные в 1995–2015 гг. на БТА, а также на нескольких крупных оптических телескопах мира зарубежными астрономами, позволили сделать ряд новых выводов. Оказалось, что среди звезд с большими избытками ИК-излучения (помимо AGB- и postAGB-звезд) присутствуют массивные звезды высокой

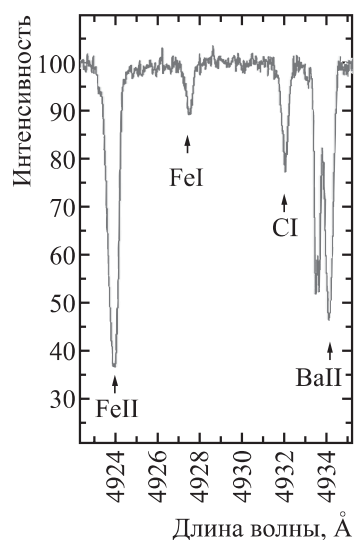
светимости с протяженными и структурированными околовзвездными оболочками. Наиболее известным объектом, который много лет рассматривали как звезду на стадии postAGB, является звезда V1302 в созвездии Орла, обладающая рядом особенностей. Долгое время эволюционный статус этого сверхгиганта, ассоциированного с мощным источником ИК-излучения IRC + 10420, был неясен. Совокупность наблюдаемых свойств звезды позволяла рассматривать объект как звезду на стадии postAGB или же как очень массивную звезду, прошедшую стадию красного сверхгиганта. Очевидно, что в зависимости от принятого статуса (а, следовательно, и светимости объекта), оценка его удаленности от наблюдателя может различаться в несколько раз.

Сведения, полученные в последние десятилетия в ходе различных наблюдательных экспериментов, не оставляют сомнений в принадлежности V1302 Орла к крайне редко наблюдаемым объектам – желтым гипергигантам (самые мощные и яркие звезды массой 100–250 M_{\odot} и размером до 1708 R_{\odot} , одновременно самые редкие и короткоживущие). Более того, V1302 Орла, светимость которой составляет $L \approx 5 \times 10^5 L_{\odot}$, рассматривается теперь как наиболее бесспорный

в Галактике массивный объект (с исходной массой 20–40 M_{\odot}) с рекордным темпом потери вещества, находящийся на кратковременном эволюционном переходе – от массивных красных сверхгигантов к звездам типа Вольфа – Райе. Спектр V1302 Орла насыщен сложными эмиссионными профилями линий; в то же время спектр родственной звезды – желтого гипергиганта ρ Кассиопеи – преимущественно абсорбционный (в нем преобладают линии поглощения). Решающий аргумент, подтверждающий для V1302 Орла статус массивной звезды с предельно высокой светимостью, был получен на основе спектральных данных БТА: мы смогли впервые определить химический состав ее атмосферы и обнаружить значительный избыток азота, служащий признаком массивной звезды.

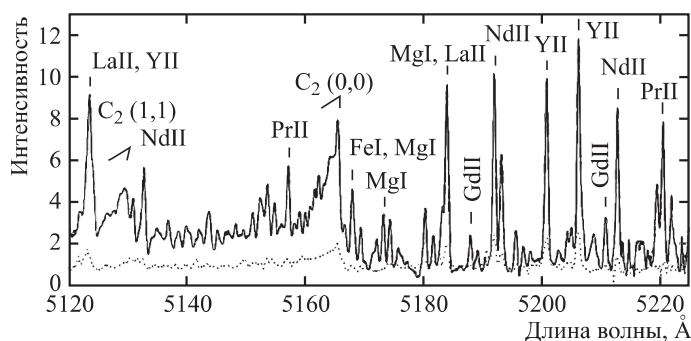
Еще один из объектов программы – сверхгигант V510 в созвездии Кормы – наглядный пример спектральной мимикрии. Светимость этой postAGB-звезды едва достигает уровня светимости сверхгиганта, в то же время параметры ее ветра близки к параметрам ветра гипергигантов. В спектре V510 Кормы аномально сильны абсорбции ионов иттрия и других тяжелых металлов. Все абсорбционные компоненты смещены в коротковолновую область спектра,

что указывает на истечение звездного вещества. Околосвездная оболочка сверхгиганта проявляется в оптическом спектре, в частности, в виде молекулярных полос углеродсодержащих молекул C_2 и CN. Линия H_{α} имеет абсорбционно-эмиссионный профиль, эмиссия в нем многократно превышает уровень непрерывного спектра звезды, что говорит о наличии мощного звездного ветра. Различия скоростей, измеренных по различным деталям в пределах одного спектра, достигают 100 км/с, в основном за счет вза-



Фрагмент спектра postAGB-звезды V5112 в созвездии Стрельца, содержащий линию BaII ($\lambda = 4934 \text{ \AA}$), расщепленную на три компонента, при этом сильная абсорбция FeII не содержит оболочечных компонентов. Спектр получен автором на БТА с эшелевым спектрографом НЭС.

Фрагмент спектра FG Стрелы вблизи минимума блеска звезды 19 июня 1998 г., насыщенный сильными эмиссиями молекулы C_2 и редкоземельных металлов. Точками нанесен спектр 11 июля 1998 г. спустя 20 сут после минимума. Спектры получены автором на БТА с эшелльным спектрографом PFES.



расщепленных абсорбций BaII формируются в слоях структурированной оболочки звезды, расширяющихся со скоростями 20 и 30 км/с. Присутствие компонентов тяжелых металлов в оболочке указывает на эффективный перенос в нее вещества, “наработанного” в предшествующий этап эволюции звезды.

Таким образом, в результате многолетнего спектрального мониторинга на БТА обнаружен канал, по которому идет обогащение межзвездной среды тяжелыми металлами структурированной оболочки звезды на стадии postAGB; однако лишь у трех из этих postAGB-звезд тяжелые металлы обнаружены в околосветных оболочках.

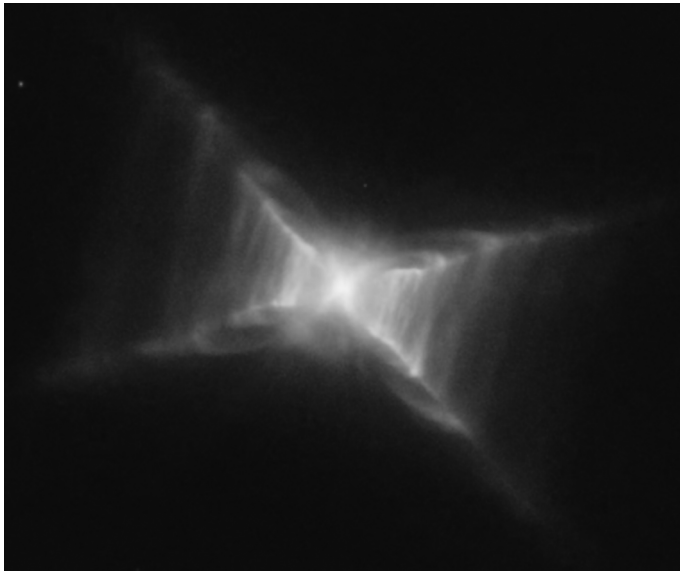
ОСОБЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ СЕМЕЙСТВА POSTAGB-ЗВЕЗД

В заключение остановимся на некоторых редких типах звезд, наблюдаемых на стадии postAGB: это малочисленная группа тесных двойных систем с большим дефицитом водо-

рода в атмосфере. В настоящее время известны только четыре (!) звезды этого типа, причем все они имеют очень близкие эффективные температуры — около 10 тыс. кельвинов. Предполагается, что сверхгигант-postAGB в составе этих двойных систем находится в фазе горения гелия в слое, окружающем вырожденное углеродно-кислородное ядро. Время жизни гелиевого сверхгиганта — всего около 10 тыс. лет, это и объясняет тот факт, что астрономы крайне редко встречают эти звезды. Интерес к тесным двойным системам с большим дефицитом водорода вызван тем (согласно современным представлениям), что они считаются предшественниками сверхновых SNIa. Главными особенностями прототипа этих тесных двойных (к примеру, у сверхгиганта ν Стрельца, имеющего спектральный класс $Sp = A2Ia$), являются сильная и переменная эмиссия в линии H_{α} и большой избыток ИК-излучения. По спектрам, полученным на БТА (с привлече-

нием данных из архива 2-м телескопа обсерватории Пик дю Миди, Франция), определен детальный химический состав атмосферы сверхгиганта в системе ν Стрельца: пониженное на пять порядков содержание водорода и многократные избытки тяжелых металлов в атмосфере; спектр звезды насыщен линиями атома Ni — содержание азота повышено на порядок. Таким образом, химический состав атмосферы этой звезды кардинально изменен в ходе ее собственной эволюции.

Завершим статью рассмотрением свойств наблюдаемой особенной звезды FG Стрелы. Предельно интересной является история изменения ее поверхностного химического состава: еще в 1960-е гг. содержание химических элементов в ее атмосфере мало отличалось от солнечного, но уже спустя 10 лет в спектре звезды усилились линии редкоземельных металлов. Проведенный анализ подтвердил избыток тяжелых ме-



Планетарная туманность HD44179 в созвездии Единорога. Яркий компонент в центре является спектрально-двойной post-AGB-звездой массой $0,57 M_{\odot}$ и светимостью $6000 L_{\odot}$, эффективная температура – $7750 K$. Изображение получено в 2011 г. с помощью широкоугольной камеры Космического телескопа Хаббла. Фото NASA.

таллов, накопленных в ходе реакций нейтронизации и вынесенных на поверхность звезды. На 6-м телескопе БТА спектральные наблюдения FG Стрелы выполнялись многократно, начиная с 1980 г. Особенно важны наблюдения, выполненные после фотометрического минимума 2000 г., когда блеск звезды составлял около 15^m ; в этой фазе эволюции спектр звезды насыщен эмиссионными полосами молекулы C_2 , эмиссиями ионов тяжелых металлов LaII, NdII, YII, Lall, PrII. В итоге из полувековых наблюдений FG Стрелы найдено изменение химического состава атмосферы.

Самая замечательная особенность FG Стрелы – быстрое изменение ее параметров во времени. Европейские астрономы Ван Джендерен и Гаутчи, собрав фотометрические данные за 100 лет наблюдений, восстановили ход эволюции FG Стрелы – от звезды класса O3 с максимально возможной для нормальной звезды температурой (в 1880 г.) – до K2 (в 1992 г). Таким образом, на протяжении жизни двух поколений астрономов-наблюдателей, звезда “пересекла” диаграмму Герцшпрунга – Рассела. Подобное поведение, которое наблюдается у немногочисленных родственных объектов, называют “новым рождением” (“born again

burning”). Очень горячая звезда (по сути ядро планетарной туманности) вместо того, чтобы “двигаться” к фазе остывающего белого карлика и завершить свой жизненный путь, возвращается в состояние AGB в результате вспышки в гелиевом слоевом источнике.

Итак, главным результатом наших наблюдений на БТА нескольких десятков AGB- и post AGB-звезд является обнаружение эволюционных избытков тяжелых металлов в протяженных атмосферах малой доли этих звезд.

Абсолютно новым результатом является обнаружение обогащения тяжелыми металлами околозвездных оболочек у трех звезд.