

УДК [524.316.7.022+524.37+524.3-54]:520.84/85

## БИПОЛЯРНАЯ ТУМАННОСТЬ AFGL 2688 В СИСТЕМЕ POST-AGB ЗВЕЗДЫ V1610 CYG

© 2023 В. Г. Клочкова<sup>1\*</sup>, В. Е. Панчук<sup>1</sup>, М. В. Юшкин<sup>1</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 6 июня 2023 года; после доработки 17 июня 2023 года; принята к публикации 23 июня 2023 года

Представлен обзор результатов фотометрических и спектроскопических наблюдений туманности AFGL 2688 в системе post-AGB звезды V1610 Cyg. Помимо анализа опубликованных результатов, учтены новые спектральные наблюдения звезды, проведенные авторами на БТА в 2002–2022 гг. Получены новые представления о кинематике газа и пыли в лепестках туманности. Совокупность опубликованных данных, выполненных в широком диапазоне длин волн, позволяет рассматривать AFGL 2688 в качестве прототипа туманностей у звезд, находящихся на стадии post-AGB. Сделано предположение об изменении химического состава центральной звезды. Обсуждаются перспективы исследования объекта в оптическом диапазоне.

Ключевые слова: звезды: AGB и post-AGB — методы: спектроскопия, спектрополяриметрия — протопланетарные туманности: отдельные: AFGL 2688

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эволюционный переход от стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) к стадии планетарной туманности (PN) характеризуется как сменой режима потери вещества, так и сменой уровня симметрии наблюдаемых изображений. Давно известная (Curtis, 1918; Khromov and Kohoutek, 1968) асферическая морфология PN интерпретируется как результат взаимодействия медленно движущейся (около  $10 \text{ км с}^{-1}$ ) плотной оболочки, сброшенной на стадии AGB, и высокоскоростной (порядка  $1000 \text{ км с}^{-1}$ ) менее плотной оболочки, теряемой на стадии post-AGB (Kwok et al., 1978; Balick, 1987; Habing et al., 1989). Часть молодых PN демонстрирует биполярную структуру (Aaquist and Kwok, 1991), что позволяет сделать предположение о формировании осевой симметрии еще на стадии post-AGB. Биполярность может быть связана с гравитационным взаимодействием в двойной системе (Morris, 1987). У нескольких протопланетарных туманностей (PPN) двойственность обнаружена и изучена (Kluska et al., 2022).

Наблюдения с высоким угловым разрешением и расширение диапазона длин волн (включая инфракрасный, субмиллиметровый и миллиметровый диапазоны) привели к обнаружению многокомпонентных оболочек, что в ряде случаев заставляет

отказаться от модельных приближений с высоким уровнем симметрии.

Потеря вещества на стадии AGB сопровождается формированием газопылевой оболочки. На последних фазах эволюции вблизи AGB темп потери массы приближается к значениям порядка  $10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ , так что звезды становятся невидимыми в оптическом и частично в ближнем инфракрасном диапазонах. При выходе из стадии AGB происходит фундаментальная смена режима потери массы, состоящая в переходе от сферически-симметричного (в первом приближении) истечения к осесимметричному или точечно-симметричному. В то время как темп потери массы снижается до уровня  $10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ , скорости истечения существенно увеличиваются. Накапливается все больше доказательств того, что во время самой последней фазы эволюции AGB и во время фазы после AGB эволюция протекает в очень короткие сроки, которые в крайних случаях сопоставимы со сроком активной деятельности астронома-наблюдателя (Engels, 2005).

Наблюдения туманности AFGL 2688, получаемые с постоянно увеличивающимся пространственным и спектральным разрешением, выявляют множество новых особенностей. Чисто радиальные модели истечения для экваториальной зоны поставлены под сомнение. Загадку представляет также большое расстояние между центральной

\*E-mail: Valentina.R11@yandex.ru

звездой и спутником (присутствие двойной системы уже не оспаривается). Судя по наукометрическим показателям, интерес к объекту снижается: максимум публикаций — более 150 — приходится на период 1999–2003 гг., а в аналогичном временном интервале 2019–2023 гг. опубликовано всего 50 работ. Доля наземной оптической спектроскопии минимальна вследствие трудоемкости процесса наблюдений и обработки. Если в радиолнии  $^{12}\text{CO } J = 1-0$  картирование туманности на 45-м антенне занимало 60 минут (Kawabe et al., 1987), то современная оптическая спектроскопия высокого разрешения становится информативной только в результате многочасовых экспозиций (Klochkova et al., 2004).

Далее упоминаем не только основные работы по изучению непосредственно источника AFGL 2688 и центральной звезды V1610 Cyg, но и публикации, позволяющие оценить его место в небогатой пока статистике сходных объектов и звезд, находящихся на соседних стадиях эволюции. Кроме исторически первого обозначения, данная туманность в публикациях разных лет упоминается в аббревиатурах: AFGL 2688, RAFGL 2688, GRL 2688, Egg nebula, IRAS R21003+3629 и т.д.

## 2. СТРУКТУРА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОТОМЕТРИЯ И ПОЛЯРИМЕТРИЯ

Источник, оптическое изображение которого считали парой компактных голубых галактик на расстоянии 30 Мпк (Carozzi et al., 1974), в результате полетов ракет AFGL оказался в категории наиболее ярких объектов в среднем (10 и 20 мкм) ИК-диапазоне (Neu, 1975). В двухмикронном обзоре неба TMS (Neugebauer and Leighton, 1969) источник отсутствует. Первые оптические наземные изображения AFGL 2688 получили название «Egg nebula» (Neu, 1975). Туманность сформирована двумя эллиптическими лепестками (lobes), вытянутыми в меридиональном направлении, с высокой степенью линейной поляризации. Различие в яркости северного и южного лепестков вначале объяснялось поглощением излучения южного лепестка в периферийной зоне экваториального диска, наклоненного к картинной плоскости. Однако из-за небольшого угла наклона оси к картинной плоскости следовала значительная протяженность пылевого диска (до 3000 а.е. (Klochkova et al., 2002)), имеющего слишком большие массу и момент вращения. Монотонное изменение интенсивности излучения вдоль осей лепестков моделировалось путем подбора распределения плотности пылевой компоненты над диском, в результате такого моделирования удавалось объяснить и отклонения формы изображения от эллиптичности — так называемые «рожки» (Morris, 1981). Klochkova et al.

(2004) отмечали, что модели многократного рассеяния на пылинках не объясняют высокой степени поляризации изображений лепестков, обнаруженной в оптическом диапазоне (Neu, 1975).

Поляриметрическое картирование биполярных туманностей AFGL 2688 и M 1-92 («Minkowski's Footprint» — «След Минковского») в широкой полосе 4500–7000 Å выполнено в работе Schmidt et al. (1978). Значения линейной поляризации слабого южного лепестка AFGL 2688 и более яркого северного значимо различаются — 60% и 50% соответственно. У туманности M 1-92 относительные яркости лепестков различаются сильнее, существенно различаются и значения линейной поляризации (40% у слабого SE-лепестка и 10% у более яркого NW-лепестка). Это наводит на предположение (статистики пока нет) о связи между яркостью лепестка и долей рассеянного света, то есть о преобладании процессов однократного рассеяния и низкой оптической толщине по рассеянию. В этом случае наблюдаемое потемнение к краям лепестков необходимо интерпретировать уже не изменением оптической плотности, а геометрией подсветки. Наличие шипов (spikes) на периферии лепестков, позже определяемых как рожки (horns) в работе (Morris, 1981), указывало не просто на то, что рассеивающие лепестки являются освещенными участками гораздо большего однородного облака, а скорее на то, что наблюдаемая структура обусловлена вариациями плотности столба рассеивающих пылинок (Schmidt et al., 1978). В пользу этого предположения свидетельствуют и наши спектроскопические наблюдения двадцатилетней давности (Klochkova et al., 2004), когда было показано, что область свечения туманности в резонансном дублете Na I намного шире конуса, охватывающего северный лепесток. Степень линейной поляризации увеличивается с длиной волны (Michalsky et al., 1976). В то же время круговая поляризация остается постоянной, что ставит под сомнение идею об ориентации несферических частиц в магнитном поле, высказанную Vandermann and Kemp (1973).

Наблюдения в узкой полосе, центрированной на линию молекулярного водорода 2.121 мкм, выявили квадрупольную структуру туманности: кроме двух эмиссионных сгустков N и S, совпадающих с положениями оптических лепестков, существуют еще два — E и W, лежащие в плоскости пылевого тора по обе стороны от центрального объекта (Smith et al., 1990). Наличие последней пары сгустков объяснялось взаимодействием вещества, выбрасываемого в экваториальной плоскости, с газопылевым тором или диском, а различие лучевых скоростей сгустков E и W объяснялось вращением этого тора. Однако возникла проблема с объяснением механизма вращения тора на больших расстояниях от звезды, причем необходимо было

согласовать модель вращающегося тора с низкой турбулентной скоростью вещества, измеренной по линиям CO —  $0.5 \text{ км с}^{-1}$ .

Наблюдения Latter et al. (1993) в широких полосах *I*, *J*, *H*, *K* и в линии  $\text{H}_2$  выявили фрагментированную структуру, совпадающую с положениями оптических лепестков туманности. Изображения в *K*-полосе показывают также эмиссию, исходящую из экваториального пылевого кольца, скрывающего звезду. Низкорасположенные колебательно-вращательные уровни  $\text{H}_2$  могут возбуждаться за фронтом ударной волны с кинетической температурой выше 1000 К. Обращаем внимание на то, что области, излучающие в линиях  $\text{H}_2$ , располагаются на одном и том же расстоянии от центрального источника как в полярных, так и в экваториальных направлениях, тогда как модельные распределения плотности пыли (и, возможно, газа) в этих направлениях существенно различаются.

На телескопе UKIRT в избранных длинах волн окон прозрачности 10 и 20 мкм были получены дифракционно-ограниченные изображения трех ИК-источников (Noga et al., 1995). Изображения всех трех PPN показывают яркий центральный точечный источник и более слабый протяженный источник, простирающийся на несколько угловых секунд. Протяженный источник среднего ИК-диапазона у AFGL 2688 вытянут в том же направлении, что и основные оптические лепестки.

Наземные изображения, полученные на UKIRT в широких полосах ИК-диапазона (1.2–19 мкм) и линии  $\text{H}_2 \text{ S}(1) 1-0$  (2.122 мкм), легли в основу модели широких биполярных конусов (Skinner et al., 1997), ось которых имеет позиционный угол уже  $60^\circ$ , а не  $15^\circ$ , как у лепестков туманности, видимых в оптическом диапазоне, и угол раскрытия конусов составляет  $90^\circ$ , а не  $20^\circ$ , как предполагалось ранее. В линии  $\text{H}_2$  были обнаружены еще два сгустка, причем положение этих деталей ассоциируется с положением быстрых областей низкой ионизации, наблюдаемых у четверти ярких и компактных PN (Balick, 1987). Отклонения от осевой симметрии как оптического изображения, так и модели туманности, объясняются избирательным экранированием оптического излучения пылевыми облаками, расположенными вблизи F-сверхгиганта. С моделью широких конусов согласуются интерферометрические изображения в оптически тонкой линии  $^{13}\text{CO}$  (Yamamura et al., 1995). При этом были выявлены сферически симметричная центральная конденсация и протяженная фрагментированная оболочка, то есть наличие дисковой структуры не подтверждено.

Субсекундные ( $0''.75$ ) оптические изображения выборки PPN были получены на стабилизированной камере высокого разрешения HRCam теле-

скопа CFHT (Hrivnak et al., 1999). Из 13 объектов разрешены 9 с размерами до  $3''$ . С учетом ранее опубликованных данных сделан вывод, что асферическая морфология обычно существует на ранних стадиях перехода между фазами асимптотической ветви гигантов и планетарной туманности. Большинство PPN имеют эллиптическую (или биполярную) форму.

Наблюдения AFGL 2688 на интерферометре IRAM в линии CO  $J=2-1$  выявили два преимущественных направления, в которых происходят коллимированные высокоскоростные выбросы газа из центрального источника (Cox et al., 2000). Первое направление ориентировано вдоль линии север-юг (N-S) и совпадает с положением оптической оси лепестков туманности, второе ориентировано вдоль линии восток-запад (E-W), близко к так называемой экваториальной плоскости. В каждом из направлений отождествляется несколько (три-четыре) дискретных биполярных выброса. Положения сгустков, излучающих в линии CO, совпадают с положением областей, излучающих в линии  $\text{H}_2$ , что поддерживает гипотезу о возникновении этих эмиссий в результате взаимодействия коллимированных выбросов с оболочкой, потерянной на стадии AGB. Если предположить, что все E-W выбросы находятся в экваториальной плоскости, поле скоростей в линии  $\text{H}_2$  можно описать комбинацией радиального расширения и вращения (Kastner et al., 2001).

На фотополариметре ISOPHOT космической обсерватории ISO (Kessler et al., 1996) в фильтрах 120 и 180 мкм были получены сканы двух углеродных post-AGB объектов: AFGL 2688 и AFGL 618 (Speck et al., 2000). Оба объекта показали яркий центральный источник и протяженные (до  $400''$ ) оболочки с интенсивностями 10% от центрального пика. В предположении о постоянной скорости расширения возраст оболочек составляет порядка  $10^5$  лет. На шкале несколько десятков тысяч лет наблюдаются эпизодические вариации темпа потери массы, что согласуется с теорией термических пульсаций (thermal pulses) на стадии AGB.

По результатам поляриметрии изображений AFGL 2688, полученных на камере NICMOS космического телескопа им. Хаббла (далее в тексте — HST), определено положение центрального светящегося объекта, не наблюдаемого непосредственно на длинах волн короче 2 мкм (Weintraub et al., 2000). Центральный объект (звезда) находится в пределах темной (в оптическом диапазоне) полосы, разделяющей туманность пополам, на расстоянии в  $0''.55$  (или приблизительно 550 а.е., принимая расстояние до AFGL 2688  $d = 1$  кпк) к юго-западу от инфракрасного пика, который ранее был обнаружен на южной оконечности северного

полярного лепестка. Поляриметрические данные и данные прямых изображений указывают на то, что инфракрасный пик, непосредственно обнаруженный на NICMOS, указывает на протяженный самосветящийся источник, скорее всего, являющийся отдаленным компаньоном в системе F-звезды. С учетом наклонов оси симметрии и плоскости пылевого тора расстояние между звездой и ИК-компаньоном оценивается приблизительно в 900 а.е. Это разделение на несколько порядков больше, чем предполагалось (см., например, работы Morris (1987); Soker (1998)) для центральной двойной системы, которая могла бы спровоцировать формирование экваториального диска и последующее биполярное истечение.

Полученные Klochkova et al. (2000a) на БТА оптические спектры не содержат признаков ионизованного газа, а ИК-спектры в работе Hrivnak et al. (1994) не содержат рекомбинационных линий водорода. Радиоспектры слишком крутые (спектральный индекс 2.6) для теплового механизма излучения ионизованного газа (Juga et al., 2000) — для околозвездных оболочек вокруг углеродных звезд спектральный индекс составляет 1.1. Наблюдения на VLA на длинах волн 1.3, 2 и 2.6 см позволили впервые получить изображение диска, позиционный угол которого оказался равен  $53^\circ$ , что существенно отличается как от стандартной модели (Latter et al., 1993), в которой диск с позиционным углом  $105^\circ$  ориентирован перпендикулярно оптическим лепесткам, так и от модели широких биполярных конусов (Skinner et al., 1997), согласно которой диск имеет позиционный угол  $150^\circ$ . Для объяснения высокой степени поляризации излучения в оптике и ближнем ИК-диапазоне необходимо наличие пылинок малых размеров  $0.04 \leq a_0 \leq 0.08$  мкм (Juga et al., 1995). Но для объяснения излучения пылевого диска, обнаруженного в сантиметровом диапазоне на VLA, необходимы пылинки больших размеров. Спектр в сантиметровом и миллиметровом диапазонах моделируется степенным распределением пылинок по размерам, с показателем 3.5 и максимальным диаметром «пылинок»  $a_C > 0.5$  см! Предполагается, что пылинки малых размеров сосредоточены в отражательных лепестках туманности, а крупные частицы находятся в плотном пылевом диске с позиционным углом  $53^\circ$  (Juga et al., 2000).

Моделирование пылевой оболочки AFGL 2688 с использованием усовершенствованного алгоритма многократного рассеяния (Yusef-Zadeh et al., 1984) выполнено в работе Lopez and Perrin (2000). Широкополосный спектр и форма туманности в оптическом и в ИК-диапазонах не могут быть объяснены без привлечения пылинок больших размеров (с радиусом, по крайней мере, до 8 мкм).

Спектр в оптике и до  $\lambda \approx 3$  мкм описывается «серой» экстинкцией, следовательно, частицы также должны быть большими. Биполярная структура видна до  $\lambda = 5$  мкм, то есть рассеяние происходит на пылинках с размерами, сравнимыми с длиной волны. Масса пылинок в оболочке составляет  $4.4 \times 10^{-8} d^2 M_\odot$ , при расстоянии  $d = 1000$  пк —  $4.4 \times 10^{-2} M_\odot$ . С соотношением «газ/пыль», принимаемым для межзвездной среды ( $158 \pm 13$ ), полная масса оболочки без учета ухода вещества из объема туманности составит  $7 M_\odot$ . Эмпирическая кинематическая модель построена по наблюдениям, выполненным на ИК-спектрографе Phoenix в линии  $H_2$  (Kastner et al., 2001).

В работе Su et al. (2001) по изображениям, полученным на HST в фильтре  $F814W$ , оценивается влияние эффекта ориентации изображений на статистику биполярных туманностей. Результаты изучения большого количества изображений (Soker and Rappaport, 2001) послужили основой для продвижения двух механизмов отклонения от осевой симметрии PN. Первый сценарий включает относительно близкие двойные системы с эксцентричными орбитами (где работает потеря массы или массоперенос с изменением расстояния между спутниками на эксцентричной орбите). Во втором — отклонение от осевой симметрии является результатом изменяющегося во времени направления вектора звезды, теряющей массу, или проявлением струй. Доля PN, неосесимметричная морфология которых формируется в двойных системах, оценивалась методом популяционного синтеза. Ожидается, что 25% эллиптических и 30–50% биполярных PN приобретают неосесимметричную структуру в результате взаимодействия в двойных системах.

При наблюдениях с высоким угловым разрешением, выполненных на камере-спектрографе (IRCS) телескопа Subaru в полосах  $L'$  (3.8 мкм) and  $M'$  (4.7 мкм) (Goto et al., 2002), выявлено несколько концентраций в северном и южном лепестках AFGL 2688. Сравнение спектрального распределения энергии (SED) соседних областей показало, что точечный источник не является самосветящимся, как предполагалось, а представляет собой плотный пылевой сгусток, отражающий тепловое излучение центральной звезды в области 3 мкм. Измерения линейной поляризации, проведенные на обсерватории ISO в близком ИК-диапазоне, показали, что в интервале 2–4.5 мкм поляризация, индуцируемая пылинками, не зависит от длины волны (Kastner et al., 2002). Это означает, что рассеяние преобладает над тепловым излучением, а частицы пыли имеют характерные размеры менее 1 мкм.

Изображения трех биполярных PPN (включая AFGL 2688) получены в далеком ИК-диапазоне

(70 и 160 мкм) на MIPS телескопа Spitzer (Do et al., 2007). После учета функции рассеяния центрального источника у двух объектов протяженные (на расстоянии до  $100''$ ) оболочки не обнаружены. Для AFGL 2688 получено ограничение на темп потери массы  $2.1 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ . Этот результат находится в противоречии с обнаружением двух пылевых оболочек у AFGL 2688, по наблюдениям на ISO (Speck et al., 2000). У третьего объекта (IRAS 16342–3814) такая оболочка обнаружена, но для исключения влияния галактических циркусов требуется увеличение поля наблюдений до  $400''$ .

Новая схема классификации изображений кандидатов в PPN предложена Sahai et al. (2007). Анализ хорошо разрешенных геометрических структур показал, что разнообразие асферической морфологии у PPN качественно аналогично тому, что выявлено ранее для молодых PN. Обнаружены ореолы, окружающие асферические формы. Распределение поверхностной яркости в этих ореолах свидетельствует о постоянном темпе потери массы с постоянной скоростью, однако имеются примеры переменного темпа потери массы. Как и в обзорах молодых PN, среди PPN не найдены объекты с оболочками круглой формы. Сходство морфологии изображений молодых PN и PPN свидетельствует о том, что первичное формирование PN происходит из-за быстрого радиационного ветра горячей центральной звезды на более ранних стадиях эволюции.

Попытка изучения структуры пылевых оболочек PPN предпринята для 18 проэволюционировавших объектов (эллиптических — SOLE и биполярных — DUPLEX), наблюдаемых в поляризованном свете на NICMOS HST (Ueta et al., 2007). Точечная симметрия является преобладающей поляриметрической характеристикой изображения, обусловленной азимутальным градиентом плотности в околосредной среде. Среди этих точечно-симметричных туманностей выделено три детальных морфологических типа по их характеристикам поляризации. В то время как азимутальный градиент плотности меняется на противоположный выше и ниже экваториальной плоскости в оптически более толстых биполярных туманностях, в оптически более тонких эллиптических туманностях изменения градиента нет. Экваториальная плоскость системы, определяемая интегральным углом поляризации, не обязательно ортогональна оси биполярной структуры, наблюдаемой по данным общей интенсивности.

Магнитные поля являются важным, но в значительной степени неизвестным компонентом планетарных туманностей. Они были обнаружены в богатой кислородом асимптотической ветви гигантов (AGB) и звездах post-AGB и могут играть

определенную роль в формировании их туманностей. В работе Sabin et al. (2007) представлены результаты субмиллиметровых поляриметрических наблюдений на камере SCUBA (Holland et al., 1999) четырех биполярных планетарных туманностей и звезд post-AGB, включая две богатые кислородом и две богатые углеродом туманности, для определения геометрии магнитного поля по ориентации пылевых частиц. Три из четырех источников (NGC 7027, NGC 6537 и NGC 6302) показывают четко выраженное тороидальное магнитное поле, ориентированное вдоль их экваториального тора или диска. В случае NGC 6302 также могут быть видны линии поля вдоль биполярного оттока. Объект AFGL 2688 имеет сложную структуру поля, где одна часть поля совпадает с тором, в то время как другая приблизительно совпадает с полярным оттоком. Объект также демонстрирует заметную асимметрию в своей магнитной структуре.

В работе Siódmiak et al. (2008) была предпринята попытка классифицировать post-AGB объекты по наличию туманностей той или иной формы. Из 33 объектов у 15 были обнаружены туманности, изображения которых разделяются на две группы: раздвоенные и одиночные (DUPLEX and SOLE). Остальные 18 объектов классифицированы как звезды на стадии post-AGB без туманностей. Авторы считают, что AGB-звезды с высокой исходной массой имеют тенденцию становиться раздвоенными объектами после AGB, а AGB-звезды со средней массой предшественника имеют тенденцию оставаться одиночными объектами после AGB.

Наблюдения с высоким угловым разрешением были выполнены на VLA в диагональных переходах (1,1), (2,2) и (3,3) молекулы аммиака  $\text{NH}_3$  (Dinh-V-Trung et al., 2009). Фазовый центр совпадал с положением пика эмиссии в континууме по данным наблюдений Cox et al. (2000). Пространственное распределение и кинематика излучения во всех трех линиях показывают четыре различных компонента, которые согласованы с полярным и экваториальным направлениями. Морфология и скорости движения вещества, излучающего в линиях  $\text{NH}_3$ , в точности повторяют картину, наблюдаемую в линиях молекулярного водорода (Sahai et al., 1998) и CO (Cox et al., 2000).

Объекты, находящиеся на кратковременных стадиях эволюции, могут показывать различные типы фотометрической переменности. Одной из результативных программ фотометрического мониторинга PPN является программа, выполняемая на телескопе диаметром  $D = 0.4$  м (Hrivnak et al., 2010), впоследствии распространенная на другие телескопы меньших размеров. Продолжительность мониторинга обеспечила получение новых результатов: все из 12 углеродных ( $\text{C/O} > 1$ )

объектов оказались переменными, с доминирующими периодами пульсаций от 38 (спектральный класс F3) до 150 суток (G8). Короткие периоды встречаются у более горячих звезд, что согласуется с теоретическими ожиданиями для объектов на стадии post-AGB. Объекты имеют холодные (200 K) отделившиеся пылевые оболочки, а из опубликованных моделей следует, что интенсивная потеря массы закончилась 400–2000 лет назад. Однако в теории, где период пульсаций связывается со скоростью потери массы, считается, что при сокращении периода до 100 суток интенсивная потеря массы прекращается. Авторы приходят к выводу, что после продления временных рамок для ранних фаз эволюции post-AGB эволюция периодов отдельных объектов в реальном времени может быть обнаружена на протяжении двух–трех десятилетий. В работе Hrivnak et al. (2022) к программе мониторинга post-AGB привлекаются результаты программы автоматического обзора сверхновых, таким образом, продолжительность мониторинга увеличена практически вдвое. Сделана попытка обнаружить переменность доминирующих периодов. Для звезд с более высокой температурой (7250 и 8000 K) обнаружено два случая с переменностью, которая согласуется с эволюцией углеродных звезд в нижней части диапазона масс (1.5–2  $M_{\odot}$ ). Медленные монотонные изменения яркости наиболее вероятно связать с изменением непрозрачности пылевой компоненты.

Четырехцветные изображения AFGL 2688, полученные на HST в 2009 году, сравнивались с архивными данными в близких фильтрах (Balick et al., 2012). Обнаружены изменения структуры лепестков, расширившихся на 2.5%. Ансамбль колец переместился радиально на 0''07 за 6.65 года. Кольца выбрасывались каждые 100 лет в течение примерно четырех тысячелетий, пока 250 лет назад не образовались лепестки. Лучи лежат внутри геометрически противоположных конусов, с углами раскрытия около 30°. Сопоставляя результаты с данными наблюдений в линии  $^{12}\text{CO}$ , установлено, что кольца выбрасывались со скоростью приблизительно 18 км с<sup>-1</sup>, с небольшими ее вариациями. Двумерная модель рассеяния пыли воспроизводит основные геометрические детали и спектральное распределение. Сделан вывод, что масса и импульс ветров на стадии AGB увеличивались с течением времени.

### 3. СПЕКТРЫ И СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЯ

В этом разделе остановимся на результатах спектроскопии AFGL 2688 и центральной звезды V1610 Cyg, полученных в оптическом, инфракрасном и радио-диапазонах, привлекая данные по некоторым родственным объектам.

По результатам спектрофотометрического картирования и спектрополяриметрии лепестков туманности Cohen and Kuhl (1980) предложили феноменологическую схему формирования наблюдаемой туманности AFGL 2688: сферически симметричное вещество, теряемое проэволюционировавшей звездой, сталкивается с ранее образовавшимся тороидом, в результате чего появляется биполярная структура.

Картину лучевых скоростей, измеренных по деталям оптических спектров, невозможно расшифровать без данных радиоспектроскопии. Наблюдения в радиолиниях, для которых туманность является как оптически тонкой, так и оптически толстой, позволяют уверенно измерить скорость движения центра масс системы и оценить скорость расширения оболочки при некоторых модельных упрощениях. Скорости движения центра масс помогают как в оценке расстояния до объекта, так и в анализе кинематических характеристик вещества (звездного и околозвездного), определяемых по оптическим спектрам.

Инфракрасные источники, сгруппированные по морфологии (два конуса с пылевой перемычкой), были исследованы на длине волны 2.6 мм в линии  $J = 1-0$  молекулы  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  (Lo and Bechis, 1976). Обнаруженная только у AFGL 2688 и AFGL 618 линия с параболическим профилем интерпретирована как оптически толстая эмиссия в однородной расширяющейся оболочке с угловыми размерами, уступающими проекции диаграммы направленно-сти 11-м телескопа NRAO.

Утверждение, что AFGL 2688 «is a very carbon-rich star», сформировалось в результате первых наблюдений в радио- (Zuckerman et al., 1976) и оптическом (Crampton et al., 1975; Cohen and Kuhl, 1977) диапазонах. В миллиметровом диапазоне вывод последовал из сравнения со спектрами углеродной звезды IRC+10216, то есть из сравнения спектров околозвездных оболочек. В оптическом диапазоне спектр центральной звезды классифицирован как F5 Ia, с присутствием полос молекул  $\text{C}_2$  и  $\text{C}_3$ . Снижение степени линейной поляризации в трех колебательных полосах электронной системы  $a^3\Pi_g - X^3\Pi_u$  молекулы  $\text{C}_2$  обнаружено впервые Cohen and Kuhl (1977) по спектрам с разрешением 7 Å. Наблюдения в диапазоне 3820–3920 Å с разрешением  $R = 4000$  подтвердили наличие полос  $\text{C}_3$  (Somerville and Bellis, 1989).

Линия нейтрального углерода C I субмиллиметрового диапазона (492 GHz) наблюдалась на 3-м телескопе IRTF (высота  $h = 4$  км) и 1-м телескопе бортовой обсерватории КАО ( $h = 13$  км) (Beichman et al., 1983). Из семи объектов программы линия C I обнаружена только у AFGL 2688, что, с привлечением наблюдений в линиях  $^{12}\text{CO}$  и  $^{13}\text{CO}$ ,

позволило определить относительное содержание C I/CO. Вывод Zuckerman et al. (1976) о том, что объект имеет высокое отношение C/O, подтвердился.

Двухпиковая форма линий молекул  $C_4H$ ,  $C_2H$ ,  $C_3N$  и  $SiC_2$ , обнаруженных на IRAM, интерпретировалась Lucas et al. (1986) либо как пространственно разрешаемая сферическая оболочка, либо как неразрешаемый диск, наблюдаемый с ребра. Скорость расширения составляет  $17 \text{ км с}^{-1}$ . В результате сравнения интенсивностей линий разных молекул со спектром объекта IRC+10216 также подтвержден вывод Weichman et al. (1983) об экстремальном избытке углерода ( $C/O > 4$ ).

При переходе звезды от стадии AGB к post-AGB изменяются как скорость истечения, так и темп потери массы. Например, у звезды с массой  $0.6 M_{\odot}$  скорость истечения от  $15 \text{ км с}^{-1}$  на стадии AGB возрастет до  $60 \text{ км с}^{-1}$  на стадии post-AGB. У звезд высокой светимости ветер хорошо описывается теорией истечения вещества под действием давления излучения (Pauldrach et al., 1988). Согласно теории, скорость звездного ветра на бесконечности ( $v_{\infty}$ ) увеличивается пропорционально скорости убегания с поверхности звезды ( $v_{\text{esc}}$ ). При эволюции на стадии post-AGB светимость звезды практически не изменяется, что приводит к быстрому увеличению радиуса звезды  $r$  с ростом эффективной температуры,  $r \propto T_{\text{eff}}^2$ . Скорость убегания с поверхности звезды  $v_{\text{esc}} \propto r^{-0.5}$ , следовательно, скорость звездного ветра пропорциональна эффективной температуре  $T_{\text{eff}}$ . Детальные расчеты показывают, что у звезд на стадии post-AGB скорость истечения  $v \propto T_{\text{eff}}^{1.2}$  (Pauldrach et al., 1988). Поэтому можно ожидать, что скорость быстрого ветра в оболочке AFGL 2688 может превосходить скорость медленного ветра в 4–5 раз.

Первые оценки лучевой скорости центра масс  $v_{\text{LSR}}$  объекта AFGL 2688 относительно местного стандарта покоя (LSR) и скорости расширения оболочки сделаны Zuckerman et al. (1976):

$$v_{\text{LSR}} = -30 \pm 1 \text{ км с}^{-1} \text{ по } H^{12}CN,$$

$$v_{\text{LSR}} = -29.5 \pm 1 \text{ км с}^{-1} \text{ по } H^{13}CN,$$

$$v_{\text{LSR}} = -31.3 \pm 2 \text{ км с}^{-1} \text{ по } CS.$$

Оценки скорости расширения сделаны по ширине линий и равны 25.5, 28.0 и  $24 \text{ км с}^{-1}$  соответственно. В итоге среднее значение скорости LSR центра масс системы AFGL 2688 было принято равным  $v_{\text{sys}} = -30 \text{ км с}^{-1}$  (для перехода к гелиоцентрической скорости от LSR в цитируемой работе для AFGL 2688 была принята поправка  $-16 \text{ км с}^{-1}$ ), средняя скорость расширения молекулярной оболочки  $v_{\text{exp}} = 26 \text{ км с}^{-1}$ .

В работе Kawabe et al. (1987) представлены результаты картографических наблюдений биполярной туманности AFGL 2688 в линии  $^{12}CO$  с высоким пространственным разрешением. Ближе к центру туманности линия показывает крылья с полной шириной  $85 \text{ км с}^{-1}$ . На коротковолновом крыле видна узкая и глубокая полоса поглощения при скорости, смещенной на  $20 \text{ км с}^{-1}$  от системной скорости. Центральное компактное ядро, вытянутое перпендикулярно биполярной оси, и высокоскоростное излучение с коротковолновым смещением, распределенное вдоль оптических лепестков, указывают на расширяющийся диск молекулярного газа и быстрый звездный ветер. Особенности поглощения позволяют предположить, что расширяющаяся холодная поглощающая оболочка окружает относительно теплую молекулярную оболочку. Поглощающая оболочка имеет температуру возбуждения ниже примерно на 5 К и оптическую глубину более 1.2 в линии CO  $J = 1-0$  и расширяется со скоростью  $20 \text{ км с}^{-1}$ . Размер этой оболочки превышает примерно 0.6 пк, а ее масса превышает 0.016–0.044 от массы Солнца. Kawabe et al. (1987) предложили схему объекта (см. рис. 6 в указанной работе), содержащую структурные элементы, признаваемые и в настоящее время. Высокая степень поляризации оптических лепестков объяснялась как результат отражения от внутренних стенок полостей, образованных ветром в полярных направлениях.

Определение соотношения изотопов углерода и кислорода в атмосферах проэволюционировавших гигантов сталкивается с проблемой учета эффекта насыщения измеряемых абсорбций. Звезды с большим темпом потери массы «предоставляют» исследователям возможность измерять соотношение изотопов по спектрам околозвездных оболочек. В работе Wannier and Sahai (1987) были измерены линии нескольких молекул, что позволило, в частности, определить соотношение изотопов углерода в оболочке AFGL 2688 ( $^{12}C/^{13}C = 20$ ).

Truong-Bach et al. (1990) выполнили картирование туманности с угловым разрешением  $23''$  и  $12''$  в линиях CO (переходы  $J = 1-0$  и  $J = 2-1$  соответственно), отклонений от сферической симметрии не обнаружено. Спектр перехода  $J = 2-1$ , полученный при положении диаграммы антенны на центре ИК-источника, показывает узкую абсорбцию  $v_{\text{LSR}} = -55 \text{ км с}^{-1}$ , имеющую ширину  $4 \text{ км с}^{-1}$ . Эта деталь видна и в спектре областей, отстоящих на  $6''$  от центра источника (на таком расстоянии расположены и оптические лепестки). В линии  $J = 1-0$ , где угловое разрешение ниже ( $23''$ ), эта деталь не видна. Однако в своей работе Truong-Bach et al. (1990) приводят результаты более ранних наблюдений, выполненных в

1986–1987 гг. с диаграммами  $7''$  и  $15''$ , когда узкая абсорбция наблюдалась.

Спектроскопия туманности AFGL 2688 была проведена Jaminet et al. (1992) в 10 переходах девяти молекул с различным изотопным составом. В линиях субмиллиметрового диапазона наблюдаются две компоненты оболочки, принадлежащие холодному, оптически плотному медленному ветру, и теплому, оптически тонкому быстрому ветру. Медленный ветер компактный и сферически симметричный. Быстрый ветер несколько расширен и асимметричен — содержит две биполярные компоненты в направлениях N–S и E–W. Вдоль оси N–S эмиссия смещена в коротковолновую сторону на севере и в длинноволновую — на юге. Вдоль оси E–W эмиссия смещена в коротковолновую сторону на востоке и в длинноволновую — на западе. В предположении о непрерывности и равномерности, темп потери массы в быстром ветре составляет  $2 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ . Важнейшим результатом является тот факт, что в медленном ветре отношение обилий изотопов углерода  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 20$ , тогда как в быстром ветре  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 5$ . Отношение обилий HCN/CO в быстром ветре меньше, чем в медленном ветре.

Профили линий пяти вращательных переходов молекулы CO (включая два перехода  $^{13}\text{CO}$ ) и одного перехода молекулы HCN были зарегистрированы на субмиллиметровой обсерватории CSO (Young et al., 1992). В отличие от предыдущих работ, в новых наблюдениях уверенно прослеживаются широкие крылья линий до значений скоростей, отстоящих на  $100 \text{ км с}^{-1}$  от системной скорости, что свидетельствует об истечении вещества с большими скоростями, чем предполагалось ранее. В линии перехода  $^{12}\text{CO } J = 3-2$  наблюдаются компоненты, указывающие на три значения скорости ветра. Оптически толстая низкоскоростная компонента, центрированная на значение  $-33.3 \text{ км с}^{-1}$ , показывает скорость истечения  $18.0 \text{ км с}^{-1}$ . Компонента средней скорости обрывается на значении  $-73 \text{ км с}^{-1}$  на коротковолновой части указанного перехода, скорость истечения примерно  $40 \text{ км с}^{-1}$ . Пологий профиль третьей, высокоскоростной компоненты наблюдается в интервале скоростей от  $-160$  до  $50 \text{ км с}^{-1}$ , скорость истечения составляет  $100 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$ .

Спектры среднего разрешения были получены в диапазоне  $3-4 \text{ мкм}$  на семиканальном охлаждаемом приемнике CGS2 телескопа UKIRT для трех post-AGB объектов, включая AFGL 2688 (Geballe et al., 1992). Эмиссии на  $3.4-3.5 \text{ мкм}$  наблюдаются у объектов, имеющих, кроме детали на  $3.3 \text{ мкм}$ , сильную (также неотжествленную) деталь на  $1921 \text{ мкм}$ . У AFGL 2688 21-микронная деталь

отсутствует, а эмиссия  $3.3 \text{ мкм}$  ослаблена. Сделано предположение, что AFGL 2688 находится в состоянии перехода между фазой « $21 \text{ мкм}$ » и «нормальной» фазой, где эмиссия  $3.3 \text{ мкм}$  доминирует, детали на  $3.4$  и  $3.6 \text{ мкм}$  ослаблены, а деталь  $21 \text{ мкм}$  отсутствует.

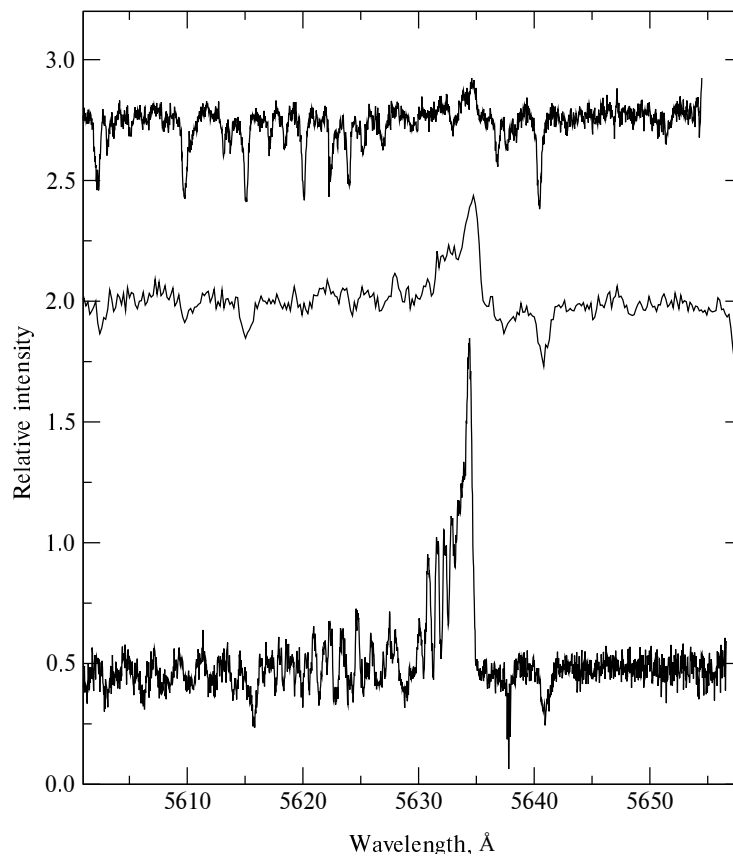
Угол наклона оптической оси туманности к картинной плоскости ( $5^{\circ}-15^{\circ}$ ), используемый при интерпретации спектроскопических наблюдений в ИК- и радио-диапазонах, получен в модели изотропного рассеяния, удовлетворяющей соотношению потоков в ИК-полосах и распределению интенсивности вдоль лепестков (Latter et al., 1993). Второй аргумент в пользу небольшого значения этого угла следовал из предположения об ортогональности главной оси туманности и плоскости пылевого диска (тора), наблюдаемого практически с ребра. При интерпретации результатов спектроскопии в оптическом диапазоне на небольшое значение этого угла наводит и сравнение спектров объектов, имеющих различную степень экранирования центральной звезды пылевой перемычкой (рис. 1).

На 30-м телескопе IRAM в полосах  $1, 2$  и  $3 \text{ мм}$ , и в полосах  $0.8$  и  $1 \text{ мм}$  на 10.4-м субмиллиметровом телескопе CSO выполнены наблюдения молекул CO,  $^{13}\text{CO}$ , SiO, SiC<sub>2</sub>, CN, HCN, HNC, HCO<sup>+</sup>, CS и HC<sub>3</sub>N (Bachiller et al., 1997). В плане исследования эволюционных эффектов выборка состояла из двух PPN (AFGL 2688 и GRL 618), молодой PN (NGC 7027) и четырех проэволюционировавших PN (NGC 6720, M4-9, NGC 6781 и NGC 7293). Наблюдения подтвердили, что химический состав оболочек объектов отличается как от химического состава межзвездной среды, так и от химического состава оболочек звезд на стадии AGB. При эволюции от PPN к PN содержание SiO, SiC<sub>2</sub>, CS, HC<sub>3</sub>N уменьшается, вплоть до того, что у развитых PN линии этих молекул не наблюдаются. Содержание молекул CN, HNC и HCO<sup>+</sup>, наоборот, у PN сильно возрастает. В проэволюционировавших туманностях отношения концентраций составляют CN/HCN = 9, HNC/HCN = 0.5 и HCO<sup>+</sup>/HCN = 0.5, что соответственно на  $1, 2$  и  $3$  порядка выше, чем в оболочке прототипа AGB-звезды IRC+10216.

Скорость центра оболочки уточнена ( $v_{\text{LSR}} = -34 \text{ км с}^{-1}$ ) в результате интерферометрических наблюдений (с разрешением  $1''$ ) в линии CO  $J = 2-1$  (Cox et al., 2000). По ширине эмиссионного пика оценена скорость расширения молекулярной оболочки  $v_{\text{exp}} = -19.7 \text{ км с}^{-1}$ .

Vujarabab et al. (2001) исследовали эмиссию в линиях CO для 37 post-AGB звезд с добавлением двух желтых гипергигантов и молодой PN. Общая масса туманности часто достигает приблизительно





**Рис. 1.** Эмиссионные профили полосы (0,1) системы Свана молекулы  $C_2$  в спектрах объектов с различной степенью экранирования центральной звезды. Объекты из работ Klochko et al. (2000a; b; 1999), сверху вниз: IRAS 23304+6147, IRAS 04296+1429, AFGL 2688

$1 M_{\odot}$ , а скорость потери массы, из-за которой (предположительно, на последних стадиях фазы AGB) возникла туманность, имела типичные значения около  $10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ . Исходя из формы ядра линии, для AFGL 688 принята системная скорость  $v_{\text{sys}} = -35 \text{ км с}^{-1}$  и скорость расширения для медленной составляющей  $15 \text{ км с}^{-1}$ .

На спутнике ISO с использованием дифракционного спектрометра и спектрометра с интерферометром Фабри–Перо (FP) в далеком ИК-диапазоне выполнены наблюдения 24 проэволюционировавших объектов, преимущественно PPN, и нескольких PN и AGB для сравнения. Решалась задача определения роли механизмов фотодиссоциации и ударных волн. Только у пяти из 12 объектов с избытком углерода ( $C/O > 1$ ) было обнаружено, по крайней мере, по одной линии из набора следующих элементов и ионов: [O I], [C II], [S II], [Si II], [S I], [Fe I], [Fe II], [Ne II] и [N II] (Fong et al., 2001). В совокупности из 12 объектов, имеющих избыток кислорода ( $C/O < 1$ ) (Castro-Carrizo et al., 2001), получено, что эмиссии указанных атомов и ионов наблюдаются, только когда эффективная температура звезды

$T_{\text{eff}} \geq 10^4 \text{ К}$ . Сделан вывод, что линии низкого возбуждения формируются в зонах фотодиссоциации. Кинематика такого газа сравнима со скоростями расширения, измеренными по линиям молекул. Авторы считают, что фотодиссоциация, а не ударные волны, доминирует в эволюции околосредной оболочки, превращая первоначально молекулярные гигантские AGB-оболочки в атомарный газ, обнаруженный в протопланетарных и планетарных туманностях.

Наблюдения в линии C I (492 GHz), выполненные для четырех PN и PPN, показали, что отношение C I/CO увеличивается с эволюцией объектов, в направлении к стадии PN (Hasegawa and Kwok, 2003).

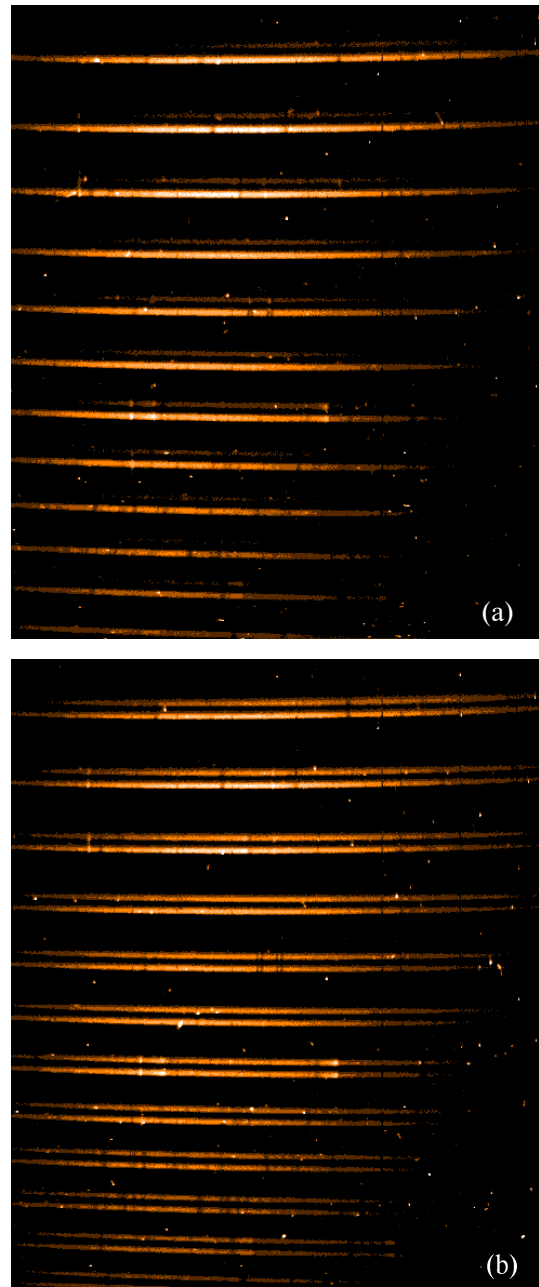
По наблюдениям на 30-м телескопе IRAM для выборки компактных PN были определены содержания шести типов молекул (Josselin and Bachiller, 2003). Содержание некоторых молекул, таких как  $\text{HCO}^+$  и CN, оказалось выше, чем в оболочках AGB и даже в межзвездной среде. Таким образом, химический состав молекулярных оболочек в компактных PN оказывается промежуточным между составом PPN (таких как AFGL 2688) и хорошо развитых PN.

В работе Klochkova et al. (2004) использованы измерения линейной поляризации центра северного лепестка AFG L 2688, выполненные на эшелле-спектрографе PFES (Panchuk et al., 1997) первичного фокуса БТА. Примеры изображений эшелле-спектров, полученных при различных значениях позиционного угла  $P2$ , приведены на рис. 2.

В спектре лепестка обнаружены многочисленные абсорбционные линии атмосферы F-сверхгиганта, которые при вычислении степени поляризации исчезают. Это означает, что основной поляризующий фактор находится вне атмосферы сверхгиганта. Степень поляризации в континууме и в фотосферных линиях составляет в среднем 52%. Обнаружены многочисленные эмиссионные колебательные полосы электронной системы Свана ( $a^3\Pi_g - X^3\Pi_u$ ) молекулы  $C_2$ . При вычислении степени поляризации на местах этих полос наблюдаются минимумы (см. рис. 2 в статье Klochkova et al. (2004)). Этот эффект проявляется и на спектрограмме рис. 3, полученной В. Л. Афанасьевым на универсальном фокальном редукторе SCORPIO (Afanasiev and Moiseev, 2005) с более низким спектральным разрешением.

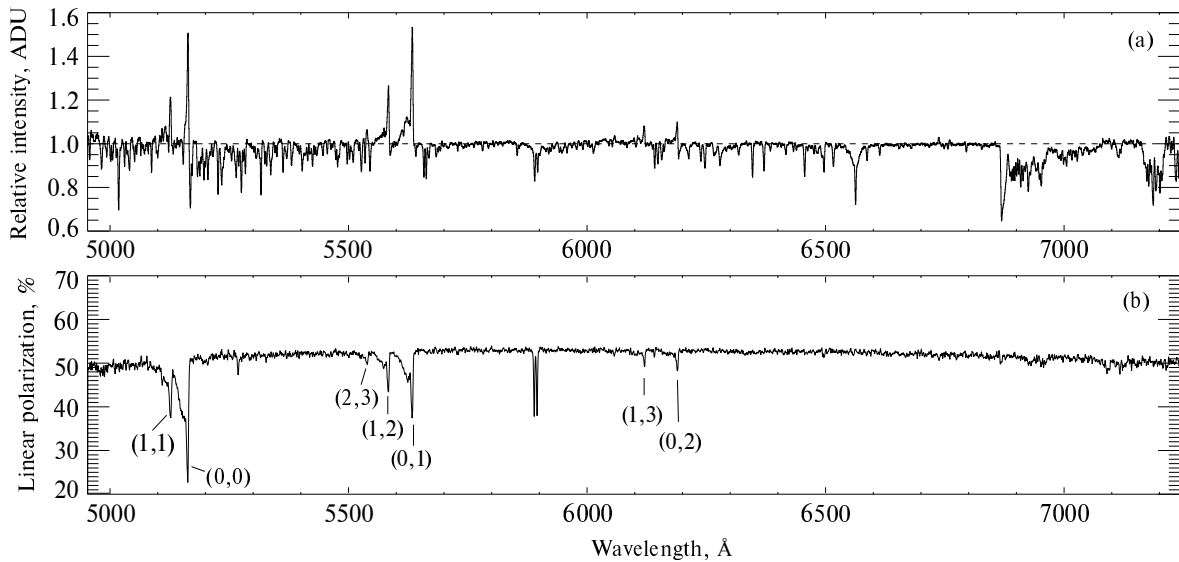
Это означает, что основной поляризующий фактор находится между атмосферой сверхгиганта и областью формирования эмиссионных полос  $C_2$ . В распределении степени поляризации от длины волны были выявлены и другие детали — эмиссионно-абсорбционные профили резонансного дублета натрия и понижение степени поляризации в области ядра линии  $Na\alpha$ . Различия в профилях резонансного дублета, полученных Cohen and Kuhl (1977) для северного и южного лепестков при низком спектральном разрешении, объясняется в работе Klochkova et al. (2004). Здесь приведем только профили, полученные на спектрографе НЭС (Panchuk et al., 2017), при  $R = 60\,000$  (рис. 4).

В оптическом диапазоне поверхностная яркость лепестков достаточно низкая:  $15^m0$  на квадратную секунду для яркой части северного лепестка и  $16^m5$  на квадратную секунду для яркой части южного лепестка. Реконструкция НЭС позволяет нам получать спектры высокого разрешения и для южного лепестка туманности. Это открыло возможность уточнения геометрии оптической составляющей объекта и кинематики газа и пыли в лепестках (Yushkin et al., 2019). Например, уверенно определяемая (см. рис. 4) разность лучевых скоростей эмиссионных составляющих профиля дублета  $Na\ I$ , измеренных для северного и южного лепестков ( $10\text{ км с}^{-1}$ ), свидетельствует об относительных движениях светящегося газа вдоль оси биполярной структуры. В предположении сохранения осевой симметрии и постоянства скорости движения вдоль оси лепестков получаем,

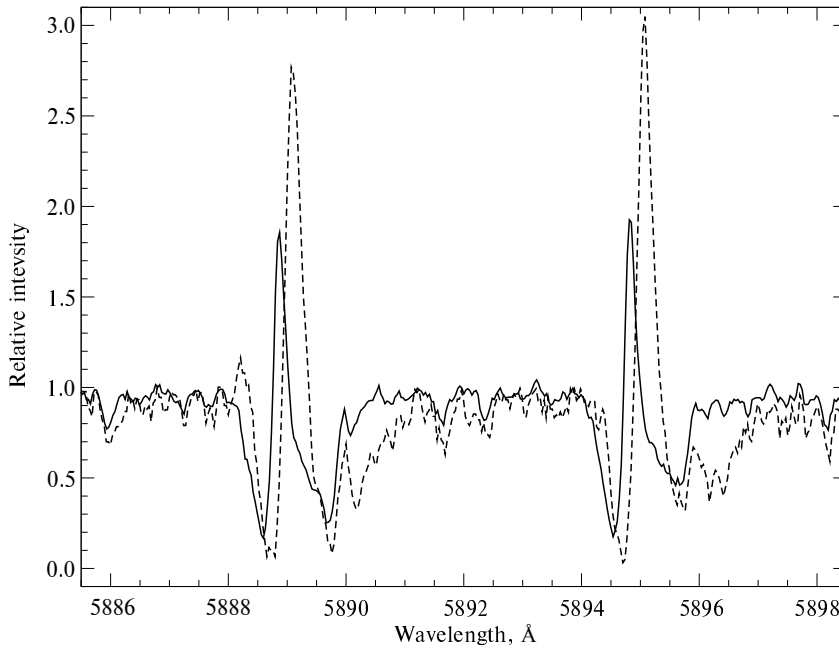


**Рис. 2.** Изображения эшелле-спектров северного лепестка туманности AFG L 2688, полученные на эшелле-спектрополяриметре первичного фокуса БТА (Panchuk et al., 2001) при двух значениях позиционного угла:  $P2 = 110^\circ$  (a) и  $P2 = 160^\circ$  (b). Формат матрицы ПЗС  $1K \times 1K$ , спектральное разрешение  $R = 15\,000$ , диапазон длин волн 490–680 нм.

что области формирования эмиссий  $Na\ I$  движутся вдоль оси наружу, с проекцией скорости на луч зрения  $5\text{ км с}^{-1}$ . Соотношение интенсивностей эмиссионных компонент дублета позволяет судить о плотности атомов  $Na\ I$  в объеме лепестка. Отношение интенсивностей компонент резонансного дублета равно 2, если верхние уровни возбужда-



**Рис. 3.** Спектр (a) и степень поляризации (b), полученные В. Л. Афанасьевым от северного лепестка AFGL 2688 на универсальном фокальном редукторе SCORPIO-2. Отмечены квантовые числа колебательных переходов системы Свана ( $a^3\Pi_g - X^3\Pi_u$ ) молекулы  $C_2$ .

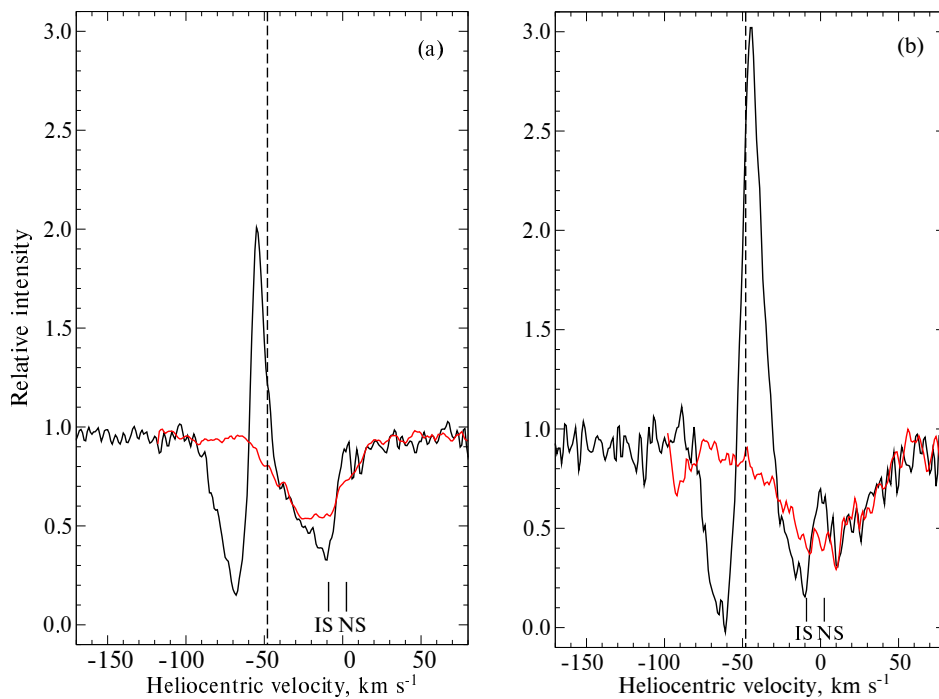


**Рис. 4.** Область резонансного дублета D Na I в спектрах северного (сплошная линия) и южного (штриховая линия) лепестков (Yushkin et al., 2019). Спектрограф НЭС,  $R = 60\,000$ .

ются пропорционально их статистическим весам и отсутствует самопоглощение. При увеличении концентрации атомов Na I резонансное рассеяние излучения в линиях может существенно изменить величину отношения интенсивностей  $D_2/D_1$ . Например, наблюдения свечения ночной атмосферы Земли (Fishkova, 1983) показали, что отношение интенсивностей  $D_2/D_1 = 2$  достигается на средних широтах только в летние месяцы, а в другие сезоны

содержание натрия увеличивается настолько, что имеет место самопоглощение в линиях, выравнивающее интенсивности эмиссий. Теория резонансного рассеяния дает близкие оценки содержания натрия в мезосфере (в среднем  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) как по суммарной интенсивности компонент, так и по их отношению (Chamberlain, 1961).

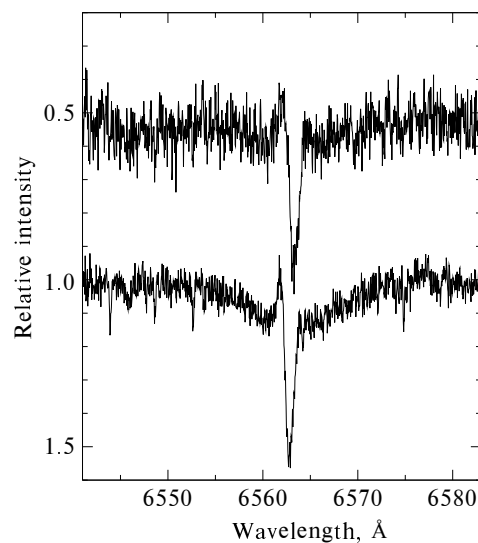
Разность скоростей, измеренных для северного и южного лепестков по отдельным деталям слож-



**Рис. 5.** Средний (по двум линиям дублета) профиль линии Na I (черным) и средний (по линиям близкой интенсивности) профиль линий металлов (красным): (а) — в спектре северного лепестка (lobe) туманности, (б) — в спектре южного лепестка (lobe) туманности (Yushkin et al., 2019). IS и NS — положения межзвездной абсорбции и ионосферной эмиссии соответственно.

ного профиля дублета натрия, значимо различается: по синесмещенным абсорбциям P Cygni профиля  $5 \text{ km s}^{-1}$ , по эмиссиям  $10 \text{ km s}^{-1}$ . По красносмещенным широким абсорбциям Na I разность такая же, как и по линиям металлов, формирующихся в атмосфере сверхгиганта (рис. 5). Ширина этих абсорбций свидетельствует о значительных макротурбулентных движениях в атмосфере.

Более того, в хорошо накопленном спектре северного лепестка выделены три группы абсорбций атмосферы сверхгиганта: симметричные, синесмещенные и красносмещенные асимметричные абсорбции (рис. 1 в работе Yushkin et al. (2019)). Этот новый эффект предстоит разобрать в отдельной публикации. Впервые химический состав атмосферы сверхгиганта был определен Klochkova et al. (2000a) по спектрам среднего разрешения ( $R = 15\,000$ ). Избыток углерода и азота в сочетании с избытком элементов *s*-процесса позволяют классифицировать AFGL 2688 как объект на стадии post-AGB. Позже Sánchez Contreras et al. (2008) и Ishigaki et al. (2012) определили химический состав по спектрам более высокого разрешения. Мы не стали переопределять химический состав по нашим спектрам с  $R = 60\,000$ , поскольку природа значительного уширения и асимметрии атмосферных абсорбций (оказывающих существенное влияние на точность определения содержания химических элементов) остается неясной.



**Рис. 6.** Профиль  $H\alpha$  в спектрах V1610 Cyg, полученных в различные ночи на БТА со спектрографом НЭС (спектральное разрешение  $R = 60\,000$ ).

Профиль линии  $H\alpha$ , типичный для сверхгигантов на стадии post-AGB, показывает переменность (см. рис. 1 в работе Klochkova et al. (2000a) и рис. 6 данной работы).

В результате рассеяния на пылевой компоненте северного лепестка степень поляризации меняется

от 50% в континууме до 35% внутри профиля линии (рис. 5 в статье Klochkova et al. (2000a)). Для южного лепестка степень поляризации мы не измеряли. Положение минимума в степени поляризации смещено относительно ядра абсорбции  $H\alpha$  на  $8 \pm 5 \text{ км с}^{-1}$ , угол поляризации в пределах ошибок постоянный. Присутствие эмиссионной компоненты, искажающей крылья линии, не сказывается на изменении степени поляризации. Это означает, что эмиссия формируется до рассеяния на пылевой компоненте лепестков, то есть вблизи звезды. Klochkova et al. (2000a) рассмотрели три возможные причины деполяризации излучения, наблюдаемой в области линии  $H\alpha$ .

Инфракрасный триплет кислорода  $O I \lambda 7774$  в спектре V1610 Cyg не содержит признаков эмиссии (рис. 7), что позволяет по эквивалентной ширине абсорбции  $W_\lambda(O I) = 2.1 \text{ \AA}$  определить светимость звезды  $M_V \approx -7^m$  с использованием калибровки Kovtyukh et al. (2012). Эта оценка соответствует светимости звезд на стадии post-AGB (для сравнения см. оценки этого параметра в работах Klochkova and Chentsov (2004); Klochkova and Tavalzhanskaya (2019)).

На рис. 8 и рис. 9 приводим фрагменты спектров в области наиболее интенсивных эмиссионных полос системы Свана молекулы  $C_2$ . Структуру коэффициента поглощения в трех электронных системах полос молекулы  $C_2$  можно найти на рис. 7 работы Panchuk and Klochkova (2023). На рис. 9 выполнено сравнение профилей эмиссионных полос со спектром F-сверхгиганта  $\phi$  Cas (F0 Ia), имеющего столь же широкие (как у центральной звезды объекта AFGL 2688) абсорбции. Видно, что в тех участках спектра, где у сверхгиганта наблюдаются сильные абсорбции, интенсивность эмиссионных линий  $C_2$  ослаблена. Это позволяет утверждать, что одним из механизмов, возбуждающих свечение вращательных линий  $C_2$ , является флуоресценция. Расчеты коэффициентов молекулярного поглощения, выполненные в приближении большого населенности для  $T = 2520 \text{ К}$  (Panchuk and Klochkova, 2023), показали, что интенсивность полосы (1,0)  $\lambda 4737.1$  должна занимать промежуточное положение между интенсивностями полос (0,0)  $\lambda 5165.2$  и (0,1)  $\lambda 5635.5$ , но это не наблюдается. Следовательно, и соотношение интенсивностей кантов полос (где зависимость от температуры ослаблена) свидетельствует в пользу гипотезы флуоресценции.

Klochkova et al. (2002; 2004) приводят аргументы в пользу механизма флуоресценции, формирующего эмиссии молекулы  $C_2$  в спектре AFGL 2688.

На 13.7-м радиотелескопе (Park et al., 2008) в микроволновом СВЧ-диапазоне (85–116 GHz — окно прозрачности 3 мм) у AFGL 2688 обнаружено

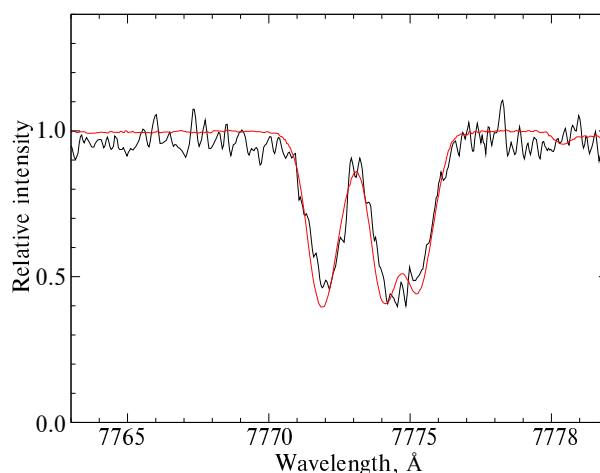
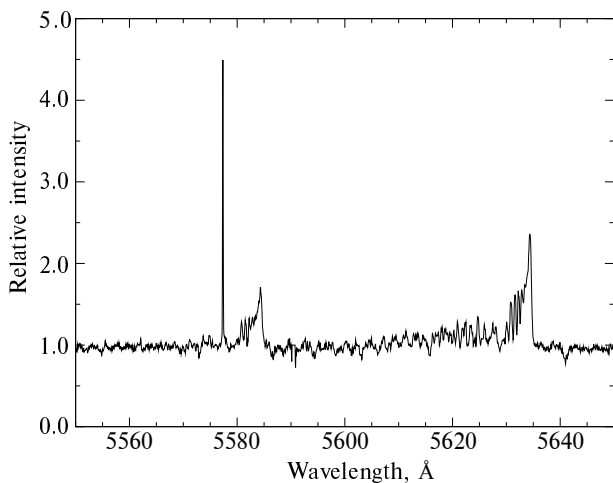


Рис. 7. Профиль инфракрасного триплета  $O I \lambda 7774$  в спектре северного лепестка туманности (НЭС,  $R = 60\,000$ ). Красным — фрагмент спектра сверхгиганта  $\phi$  Cas (F0 Ia).

восемь углеродосодержащих молекул с различным изотопным составом ( $H^{13}CN$  и  $^{13}CO$ ). В результате сравнения с параметрами оболочки и химическим составом IRC+10216 — прототипа звезды на стадии AGB, сделан вывод, что химическая эволюция околозвездной оболочки AFGL 2688 происходит в соответствии со сценарием, приведенным в статье Bachiller et al. (1997).

Связь избытка элементов s-процесса и интенсивности эмиссионного пика на 21 мкм, обнаруженная у объектов на стадии post-AGB в конце 1990-х независимо Klochkova (1997) и Decin et al. (1998), пока не находит объяснений. В работе Cerrigone et al. (2011) по данным наблюдений на камере IRAC (Fazio et al., 2004) телескопа Spitzer выделено еще три объекта южного неба с деталью на длине волны 20.4 мкм. Моделирование распределения энергии (SED) этих объектов явилось очередной попыткой определить носитель признака 21 мкм. Предполагается, что наличие детали на 21 мкм связано с углеродными соединениями, имеющими ароматическое кольцо, или даже с более крупными молекулами, которые могут образовываться из таких соединений (Volk et al., 1999). Кроме полициклических ароматических гидроркарбонатов (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons — PAHs), на роль носителей признака 21 мкм претендовали крупные скопления или гидрированные зерна аморфного углерода (Buss et al., 1990), гидрированные фуллерены (Webster, 1995) и даже алмазоподобные материалы (Justtanont et al., 1996).

Существует группа двойных звезд на стадии post-AGB, которые демонстрируют заметный избыток излучения в ближнем инфракрасном диапа-



**Рис. 8.** Фрагмент спектра AFGL 2688 в области полос (0,1)  $\lambda$  5635.5 и (1,2)  $\lambda$  5585.5 последовательности системы Свана молекулы  $C_2$ . Узкая эмиссия — запрещенная линия ионосферного кислорода [O I]  $\lambda$  5577.

зоне (NIR). Как предполагается, избыток возникает из-за горячей пыли в очень компактных, возможно, вращающихся дисках. В работе Vujagabal et al. (2013) 24 объекта этого типа наблюдались на миллиметровых волнах в линиях CO. Полученные профили сравнивались как с теоретическими, так и с наблюдаемыми, полученными для вращающихся дисков. Типичные значения массы диска находятся в диапазоне  $10^{-3}$ – $10^{-2} M_{\odot}$ , что примерно на два порядка ниже (общей) массы стандартного объекта PPN. Низкоскоростные потоки обнаружены у восьми объектов с умеренными скоростями расширения около  $10 \text{ km s}^{-1}$ , у стандартных PPN встречаются скорости примерно  $100 \text{ km s}^{-1}$ .

Yushkin et al. (2019), используя наблюдения северного и южного лепестков туманности, обнаружили узкие эмиссионные линии, формирующиеся в объеме, где градиент лучевой скорости отсутствует. Lorenzo et al. (2021) наблюдения на Herschel/NIFI в субмиллиметровых линиях  $^{12}\text{CO}$  у девяти PPN и девяти PN дополнили спектрами CO с низким вращательным числом  $J$ , полученными с помощью 30-м телескопа IRAM и взятыми из литературы. Для быстрых ветров PPN обнаружены высокие кинетические температуры, достигающие 75–200 К. Высокоскоростной газ в выборке PN более холодный, с температурами 25–75 К, и находится в состоянии более низкого возбуждения.

На 30-м телескопе IRAM в полосах 2 и 3 мм выполнен спектроскопический обзор AFGL 2688 (Qiu et al., 2022). Обнаружено 196 линий, принадлежащих 38 молекулам с различным изотопным составом, 153 перехода были выявлены для этого

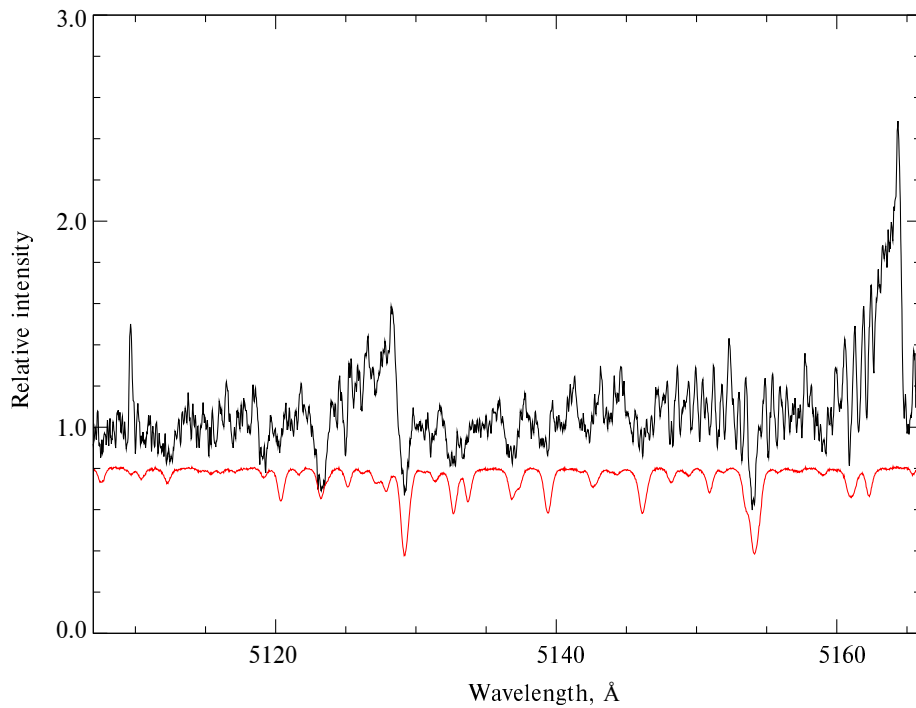
объекта впервые. С привлечением уже опубликованных данных составлен унифицированный каталог. Содержание молекул в AFGL 2688 не может быть объяснено стандартной моделью околозвездной оболочки. Qiu et al. (2022) считают объект ключевым в 21-микронной загадке (корреляции содержания элементов  $s$ -процесса в атмосфере центральной звезды и присутствие эмиссионного пика в газопылевой оболочке). Так как металлосодержащие молекулы в оболочках post-AGB объектов уже обнаружены, не исключено, что 21-микронный пик обязан молекулам, содержащим, кроме углеводородов, и тяжелые элементы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качественные признаки и численные результаты значительной части упомянутых наблюдений AFGL 2688 в целом соответствуют картине эволюционной стадии post-AGB. Однако масса звезды, высокая светимость, скорости истечения, плотность газа, характеристики пыли, полученные из наблюдений в различных диапазонах, еще не связаны в непротиворечивую картину. Например, оценки массы потерянного вещества в некоторых случаях превышают исходную массу звезды, даже в предположении, что вещество не выходило за пределы наблюдаемого объема. Форма и наклоны центральных газопылевых структур, обнаруженных в различных диапазонах, различаются. Неконцентрические дуги, сформированные на стадии AGB, свидетельствуют об эпизодических этапах сброса фрагментов оболочек. Гипотеза формирования звездной пыли, выдвинутая для объяснения наличия частиц тяжелых металлов в серебристых (postilucens) облаках (Hemenway et al., 1972), получила развитие при интерпретации результатов фотометрических и поляриметрических наблюдений холодных звезд высокой светимости (см. рис. 3 в работе Polyakova (1984)). Если холодные пятна сосредоточены вблизи экваториальной плоскости, как и ожидается для магнитных холодных пятен, это приведет к увеличению скорости потери массы на экваторе. Интенсивным формированием пыли над пятнами можно объяснить отклонения от сферической симметрии на последних стадиях AGB.

Гипотеза двойственности центрального объекта требует дополнительных наблюдений, а ширина спектральных линий не позволяет надеяться на продуктивность доплеровского мониторинга. Ширина спектральных линий также не позволяет оценить соотношение изотопов в атмосфере звезды, но из длинноволновых наблюдений следует, что в быстром и медленном ветре соотношение изотопов углерода, что называется, изменилось «на наших глазах». Механизмы для создания колеблющихся струйных потоков предполагают наличие тесной





**Рис. 9.** Фрагмент спектра AFGL 2688 в области полос (0,0) и (1,1) диагональной последовательности системы Свана молекулы  $C_2$ . Красным — фрагмент спектра сверхгиганта  $\phi$  Cas (F0 Ia).

двойной системы. Наиболее перспективными являются модели, в которых истечения приводятся в действие аккреционным диском (Soker, 1996) или коллимируются звездным тороидальным магнитным полем за счет магнитогидродинамического эффекта (Garcia-Segura, 1997). В первом случае ось истечения вещества может изменяться из-за прецессии и колебания аккреционного диска, деформирующегося под воздействием излучения центральной звезды (Livio and Pringle, 1997), но моделирование этого эффекта выполнено лишь для случая PN с горячей звездой в центре. Во втором случае прецессия оси вращения звезды при взаимодействии в двойной системе может изменять направление истечения.

Наземная оптическая спектроскопия лепестков AFGL 2688 (Yushkin et al., 2019) не позволяет получить отдельно спектры струй и диффузного вещества между струями, но выявила новые кинематические особенности вещества лепестков в целом. Оказалось, что скорость истечения пыли, измеренная по красному смещению фотосферных линий в спектрах северного и южного лепестка, составляет  $v_{\text{dust}} = 43.4 \text{ км с}^{-1}$ ; скорость истечения молекулярного вещества, измеренная по эмиссиям  $C_2$ , составляет  $v_{\text{mol}} = 27.0 \text{ км с}^{-1}$ ; а скорость истечения атомарного газа, измеренная по линиям дублета Na I, составляет  $v_{\text{atm}} = 16.4 \text{ км с}^{-1}$ . Причем

ошибка измерения скорости по одной спектральной линии в данном случае не превышает  $1 \text{ км с}^{-1}$ .

Оптические спектры AFGL 2688 позволяют оценить, установилось ли равновесие на вращательных уровнях молекулы  $C_2$ . Для этого используем аналогию с поведением вращательных линий  $C_2$  в спектрах комет. В атмосферах комет молекулы  $C_2$  являются продуктом диссоциации молекул  $C_2H_2$  через промежуточную молекулу  $C_2H$ , затем молекулы  $C_2$  также фотодиссоциируют под действием солнечного излучения. Расстояние зоны, в которой достигается статистическое равновесие для  $C_2$ , от области образования этих молекул определяется характерным временем установления равновесия (10 минут) и скоростью истечения из ядра кометы (приблизительно  $1 \text{ км с}^{-1}$ ). Суммируя расстояния от зон образования молекул  $C_2H_2$  и  $C_2H$ , можно оценить расстояние максимума концентрации  $C_2$  от ядра кометы. Lambert et al. (1990) выполнили анализ вращательной структуры полосы (0,0) системы Свана молекулы  $C_2$  в спектре кометы Галлея. В больцмановском приближении получены два значения вращательной температуры: около 3000 К для уровней с  $J > 15$  и 190 К для  $J < 15$ . Сделан вывод, что флуоресценция хорошо описывает уровни с большими квантовыми числами  $J$ , а свежесформированные молекулы с малыми  $J$  еще не успевают достичь флуоресцентного равновесия. Если столкновительные процессы так же

эффективны, как и флуоресценция, то линии имеют низкую вращательную температуру, отражающую кинетическую температуру газа. Gredel et al. (1989) показали, что условие баланса столкновительных и радиационных процессов в атмосферах комет достигается при плотностях частиц около  $10^{10}$ .

Условия в оболочках PPN отличаются от моделей голов комет по следующим позициям. Во-первых, существуют два фактора фотодиссоциации — излучение центральной звезды и УФ-облучение от МЗС. Во-вторых, скорости истечения на порядок выше, но роль этого фактора незначительна (расстояние, которое свежие молекулы проходят до зоны статистического равновесия, может находиться в пределах проекции ширины щели спектрографа на лепесток туманности). На рис. 9 видно, что распределение интенсивностей вращательных линий в голове полосы (0,0) напоминает распределение интенсивностей на рис. 1 работы Lambert et al. (1990), то есть в случае AFGL 2688 также можно ожидать два значения вращательной температуры.

Перспективу спектроскопических наблюдений AFGL 2688 на БТА связываем с эпизодическим мониторингом спектральных деталей, которые, по нашим предыдущим наблюдениям на НЭС, показали переменность. Надежды возлагаем и на новый эшелле-спектрополяриметр ESPriF (Panchuk et al., 2020), находящийся на стадии испытаний спектроскопической моды.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на 6-м телескопе САО РАН поддержаны Министерством Науки и Высшего Образования РФ. В работе использованы сведения из астрономических баз данных SIMBAD, SAO/NASA ADS и Gaia DR3.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Мы благодарим за финансовую поддержку Российский Научный Фонд (грант № 22-12-00069, <https://rscf.ru/project/22-12-00069/>).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. B. Aaquist and S. Kwok, *Astrophys. J.* **378**, 599 (1991).
2. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
3. R. Bachiller, T. Forveille, P. J. Huggins, and P. Cox, *Astron. and Astrophys.* **324**, 1123 (1997).
4. B. Balick, *Astron. J.* **94**, 671 (1987).
5. B. Balick, T. Gomez, D. Vinković, et al., *Astrophys. J.* **745** (2), article id. 188 (2012).
6. L. W. Bandermann and J. C. Kemp, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **162**, 367 (1973).
7. C. A. Beichman, J. Keene, T. G. Phillips, et al., *Astrophys. J.* **273**, 633 (1983).
8. V. Bujarrabal, J. Alcolea, H. Van Winckel, et al., *Astron. and Astrophys.* **557**, id. A104 (2013).
9. V. Bujarrabal, A. Castro-Carrizo, J. Alcolea, and C. Sánchez Contreras, *Astron. and Astrophys.* **377**, 868 (2001).
10. J. Buss, R. H., M. Cohen, A. G. G. M. Tielens, et al., *Astrophys. J.* **365**, L23 (1990).
11. N. Carozzi, P. Chamaroux, and R. Duflot, *Astron. and Astrophys.* **33**, 113 (1974).
12. A. Castro-Carrizo, V. Bujarrabal, D. Fong, et al., *Astron. and Astrophys.* **367**, 674 (2001).
13. L. Cerrigone, J. L. Hora, G. Umana, et al., *Astrophys. J.* **738** (2), article id. 121 (2011).
14. J. W. Chamberlain, *Physics of the aurora and airglow* (New York, Academic Press, 1961).
15. M. Cohen and L. V. Kuhl, *Astrophys. J.* **213**, 79 (1977).
16. M. Cohen and L. V. Kuhl, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **92**, 736 (1980).
17. P. Cox, R. Lucas, P. J. Huggins, et al., *Astron. and Astrophys.* **353**, L25 (2000).
18. D. Crampton, A. P. Cowley, and R. M. Humphreys, *Astrophys. J.* **198**, L135 (1975).
19. H. D. Curtis, *Publications of Lick Observatory* **13**, 55 (1918).
20. L. Decin, H. Van Winckel, C. Waelkens, and E. J. Bakker, *Astron. and Astrophys.* **332**, 928 (1998).
21. Dinh-V-Trung, P. J. Chiu, and J. Lim, *Astrophys. J.* **700** (1), 86 (2009).
22. T. Do, M. Morris, R. Sahai, and K. Stapelfeldt, *Astron. J.* **134** (4), 1419 (2007).
23. D. Engels, *Memorie della Soc. Astron. Italiana* **76**, 441 (2005).
24. G. G. Fazio, J. L. Hora, L. E. Allen, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154** (1), 10 (2004).
25. L. M. Fishkova, *The night airglow of the Earth mid-latitude upper atmosphere* (Izdatel Metsniereba, Tbilisi, 1983).
26. D. Fong, M. Meixner, A. Castro-Carrizo, et al., *Astron. and Astrophys.* **367**, 652 (2001).
27. G. Garcia-Segura, *Astrophys. J.* **489**, L189 (1997).
28. T. R. Geballe, A. G. G. M. Tielens, S. Kwok, and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **387**, L89 (1992).
29. M. Goto, N. Kobayashi, H. Terada, and A. T. Tokunaga, *Astrophys. J.* **572** (1), 276 (2002).



30. R. Gredel, E. F. van Dishoeck, and J. H. Black, *Astrophys. J.* **338**, 1047 (1989).
31. H. J. Habing, P. te Lintel Hekkert, and W. E. C. J. van der Veen, *Proc. IAU Symp. No. 131*, Ed. by S. Torres-Peimbert (Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1989), p. 359.
32. T. I. Hasegawa and S. Kwok, *Astrophys. J.* **585** (1), 475 (2003).
33. C. L. Hemenway, D. S. Hallgren, and D. C. Schmalberger, *Nature* **238** (5362), 256 (1972).
34. W. S. Holland, E. I. Robson, W. K. Gear, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **303** (4), 659 (1999).
35. J. L. Hora, L. K. Deutsch, W. F. Hoffmann, and G. G. Fazio, *Astrophys. and Space Sci.* **224** (1-2), 361 (1995).
36. B. J. Hrivnak, S. Kwok, and T. R. Geballe, *Astrophys. J.* **420**, 783 (1994).
37. B. J. Hrivnak, P. P. Langill, K. Y. L. Su, and S. Kwok, *Astrophys. J.* **513** (1), 421 (1999).
38. B. J. Hrivnak, W. Lu, W. C. Bakke, and P. J. Grimm, *Astrophys. J.* **939** (1), id. 32 (2022).
39. B. J. Hrivnak, W. Lu, R. E. Maupin, and B. D. Spitzbart, *Astrophys. J.* **709** (2), 1042 (2010).
40. M. N. Ishigaki, M. Parthasarathy, B. E. Reddy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **425** (2), 997 (2012).
41. P. A. Jaminet, W. C. Danchi, G. Sandell, and E. C. Sutton, *Astrophys. J.* **400**, 535 (1992).
42. E. Josselin and R. Bachiller, *Astron. and Astrophys.* **397**, 659 (2003).
43. M. Jura, S. P. Balm, and C. Kahane, *Astrophys. J.* **453**, 721 (1995).
44. M. Jura, J. L. Turner, S. Van Dyk, and G. R. Knapp, *Astrophys. J.* **528** (2), L105 (2000).
45. K. Justtanont, M. J. Barlow, C. J. Skinner, et al., *Astron. and Astrophys.* **309**, 612 (1996).
46. F. D. Kahn and K. A. West, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **212**, 837 (1985).
47. J. H. Kastner, J. Li, R. Siebenmorgen, and D. A. Weintraub, *Astron. J.* **123** (5), 2658 (2002).
48. J. H. Kastner, D. A. Weintraub, I. Gatley, and L. Henn, *Astrophys. J.* **546** (1), 279 (2001).
49. R. Kawabe, M. Ishiguro, T. Kasuga, et al., *Astrophys. J.* **314**, 322 (1987).
50. M. F. Kessler, J. A. Steinz, M. E. Anderegg, et al., *Astron. and Astrophys.* **315** (2), L27 (1996).
51. G. S. Khromov and L. Kohoutek, *Proc. IAU Symp. No. 34*, Ed. by D. E. Osterbrock and C. R. O'dell (Dordrecht, D. Reidel Pub. Co., 1968), p. 227.
52. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
53. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **48** (4), 301 (2004).
54. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, Preprint No. 168, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs, Nizhny Arkhyz, 2002).
55. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and A. S. Miroshnichenko, *Astronomy Reports* **48** (4), 288 (2004).
56. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 439 (2000a).
57. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astronomy Letters* **26**, 88 (2000b).
58. V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk, and K. Volk, *Astron. and Astrophys.* **345**, 905 (1999).
59. V. G. Klochkova and N. S. Tavolzhanskaya, *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 277 (2019).
60. J. Kluska, H. Van Winckel, Q. Coppée, et al., *Astron. and Astrophys.* **658**, id. A36 (2022).
61. V. V. Kovtyukh, N. I. Gorlova, and S. I. Belik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423** (4), 3268 (2012).
62. S. Kwok, C. R. Purton, and P. M. Fitzgerald, *Astrophys. J.* **219**, L125 (1978).
63. D. L. Lambert, Y. Sheffer, A. C. Danks, et al., *Astrophys. J.* **353**, 640 (1990).
64. W. B. Latter, J. L. Hora, D. M. Kelly, et al., *Astron. J.* **106**, 260 (1993).
65. M. Livio and J. E. Pringle, *Astrophys. J.* **486** (2), 835 (1997).
66. K. Y. Lo and K. P. Bechis, *Astrophys. J.* **205**, L21 (1976).
67. B. Lopez and J. M. Perrin, *Astron. and Astrophys.* **354**, 657 (2000).
68. M. Lorenzo, D. Teyssier, V. Bujarrabal, et al., *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A164 (2021).
69. R. Lucas, A. Omont, S. Guilloteau, and Nguyen-Q-Rieu, *Astron. and Astrophys.* **154**, L12 (1986).
70. J. J. Michalsky, R. A. Stokes, and P. A. Ekstrom, *Astrophys. J.* **203**, L43 (1976).
71. M. Morris, *Astrophys. J.* **249**, 572 (1981).
72. M. Morris, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **99**, 1115 (1987).
73. G. Neugebauer and R. B. Leighton, *Two-micron sky survey; a preliminary catalog*, (Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1969).
74. E. P. Ney, *Sky and Telescope* **49**, 21 (1975).
75. V. E. Panchuk and V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 172 (2023).
76. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017).
77. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, et al., Preprint No. 159, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs, Nizhny Arkhyz, 2001).
78. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, et al., *INASAN Science Reports* **5** (6), 361 (2020).
79. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bulletin Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1997).
80. J. A. Park, S.-H. Cho, C. W. Lee, and J. Yang, *Astron. J.* **136** (6), 2350 (2008).
81. A. Pauldrach, J. Puls, R. P. Kudritzki, et al., *Astron. and Astrophys.* **207**, 123 (1988).
82. T. A. Polyakova, *Astrophysics* **21** (1), 428 (1984).
83. J.-J. Qiu, Y. Zhang, J.-S. Zhang, and J.-i. Nakashima, *Astrophys. J. Suppl.* **259** (2), id. 56 (2022).
84. L. Sabin, A. A. Zijlstra, and J. S. Greaves, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **376** (1), 378 (2007).
85. R. Sahai, M. Morris, C. Sánchez Contreras, and M. Claussen, *Astron. J.* **134** (6), 2200 (2007).

86. R. Sahai, J. T. Trauger, A. M. Watson, et al., *Astrophys. J.* **493** (1), 301 (1998).
87. C. Sánchez Contreras, R. Sahai, A. Gil de Paz, and R. Goodrich, *Astrophys. J. Suppl.* **179** (1), 166 (2008).
88. G. D. Schmidt, J. R. P. Angel, and E. A. Beaver, *Astrophys. J.* **219**, 477 (1978).
89. N. Siódmiak, M. Meixner, T. Ueta, et al., *Astrophys. J.* **677** (1), 382 (2008).
90. C. J. Skinner, M. Meixner, M. J. Barlow, et al., *Astron. and Astrophys.* **328**, 290 (1997).
91. G. M. Smith, R. T. Geballe, G. Sandell, and C. Aspin, *Proc. Kona Symp. No. 158*, Ed. by G. D. Watt and A. S. Webster (Dordrecht, Kluwer, 1990), p. 29.
92. N. Soker, *Astrophys. J.* **468**, 774 (1996).
93. N. Soker, *Astrophys. J.* **496** (2), 833 (1998).
94. N. Soker and S. Rappaport, *Astrophys. J.* **557** (1), 256 (2001).
95. W. B. Somerville and J. G. Bellis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **240**, 41P (1989).
96. A. K. Speck, M. Meixner, and G. R. Knapp, *Astrophys. J.* **545** (2), L145 (2000).
97. K. Y. L. Su, B. J. Hrivnak, and S. Kwok, *Astron. J.* **122** (3), 1525 (2001).
98. Truong-Bach, D. Morris, Nguyen-Q-Rieu, and S. Deguchi, *Astron. and Astrophys.* **230**, 431 (1990).
99. T. Ueta, K. Murakawa, and M. Meixner, *Astron. J.* **133** (4), 1345 (2007).
100. K. Volk, S. Kwok, and B. J. Hrivnak, *Astrophys. J.* **516** (2), L99 (1999).
101. P. G. Wannier and R. Sahai, *Astrophys. J.* **319**, 367 (1987).
102. A. Webster, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **277**, 1555 (1995).
103. D. A. Weintraub, J. H. Kastner, D. C. Hines, and R. Sahai, *Astrophys. J.* **531** (1), 401 (2000).
104. I. Yamamura, T. Onaka, F. Kamijo, et al., *Astrophys. J.* **439**, L13 (1995).
105. K. Young, G. Serabyn, T. G. Phillips, et al., *Astrophys. J.* **385**, 265 (1992).
106. F. Yusef-Zadeh, M. Morris, and R. L. White, *Astrophys. J.* **278**, 186 (1984).
107. M. V. Yushkin, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *ASP Conf. Ser.*, **518**, 203 (2019).
108. B. Zuckerman, D. P. Gilra, B. E. Turner, et al., *Astrophys. J.* **205**, L15 (1976).

## Bipolar Nebula AFGL 2688 in the V1610 Cyg Post-AGB Star System

V. G. Klochkova<sup>1</sup>, V. E. Panchuk<sup>1</sup>, and M. V. Yushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

We present a survey of the results of photometric and spectroscopic observations of a nebula AFGL 2688 in the post-AGB star system V1610 Cyg. Apart from the analysis of the published results, our new spectroscopic observations of the star at the BTA over 2002–2022 are also given consideration. We gained new insights about the kinematics of gas and dust in the lobes of the nebula. The totality of published data, registered in a wide range of wavelengths, allows us to consider AFGL 2688 as a prototype nebula for the stars undergoing the post-AGB stage. An assumption on the variation of the chemical composition of the central star is made. We discuss the prospects for studying the object in the optical range.

*Keywords:* stars: AGB and post-AGB—techniques: spectroscopic, polarimetric—protoplanetary nebulae: individual: AFGL 2688