

Эволюция углеродных частиц от стадии звёзд асимптотической ветви гигантов до планетарных туманностей: наблюдения, эксперименты, теория

М.С. Мурга

Представлен обзор исследований, посвящённых эволюции углеродных частиц на этапах от оболочек звёзд асимптотической ветви гигантов до планетарных туманностей. Тема эволюции углеродных частиц освещена с нескольких сторон: обобщены наблюдательные данные; рассмотрены механизмы формирования ароматических молекул и их кластеризации; описаны условия образования углеродных частиц в оболочках звёзд и условия, в которых они дальше эволюционируют в протопланетарных и планетарных туманностях; приведены результаты экспериментов по созданию аналогов межзвёздной пыли и анализ их характеристик и, наконец, представлены возможные эволюционные сценарии для углеродных частиц. Особое внимание уделено молекулам фуллерена, так как они играют важную роль в построении целостной картины эволюции. Их наличие и неоднородное распределение указывают на то, что в зависимости от условий формирование углеродных частиц может протекать по двум ветвям: через планарные и через непланарные ароматические молекулы.

Ключевые слова: углеродные частицы, эволюция пыли, полициклические ароматические углеводороды, фуллерены, межзвёздная среда, оболочка звёзд асимптотической ветви гигантов, планетарные туманности

PACS numbers: 82.33.Vx, 82.50.Nr, 95.30.Wi, 97.10.Fy, 98.38.Jw

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.12.039614>

Содержание

1. Введение (1017).
2. Наблюдательные данные об углеродных частицах в звёздах асимптотической ветви гигантов, протопланетарных и планетарных туманностях (1019).
 - 2.1. Основные наблюдательные особенности.
 - 2.2. Проявления эволюционных процессов.
3. Физические условия в зонах формирования и эволюции пыли (1028).
4. Формирование и эволюция углеродных частиц: современные теоретические представления и эксперименты (1029).
 - 4.1. От C_2H_2 к пыли.
 - 4.2. Влияние кислорода на образование и эволюцию полициклических ароматических углеводородов, фуллеренов и пыли.
5. Астрохимические экспериментальные исследования аналогов межзвёздной пыли (1035).
 - 5.1. Лабораторный синтез аналогов межзвёздной пыли.
 - 5.2. Оптические свойства аналогов межзвёздной пыли.

6. Обсуждение и заключение (1040).
Список литературы (1043).

1. Введение

Межзвёздная пыль является важным компонентом межзвёздной среды (МЗС), участвующим во многих физических и химических процессах. Пыль устанавливает энергетический баланс среды посредством фотоэлектрического эффекта и ионизационный баланс через рекомбинацию электронов и ионов. Поверхность пыли служит подложкой и в некоторых случаях катализатором для химических реакций, благодаря чему химический состав МЗС обогащается молекулами, образование которых в газовой фазе происходит неэффективно. Межзвёздная пыль поглощает, рассеивает, поляризует и переизлучает свет звёзд, а также является строительным материалом для формирования планет. Наименьшие (наноразмерные) компоненты пыли, ароматические углеводороды, являются представителями сложных органических соединений и биомолекул и, соответственно, имеют астробиологическое значение. Таким образом, изучение межзвёздной пыли, особенно углеродной, от молекул с одним ароматическим кольцом и наночастиц до крупных конгломератов микронных размеров, является важной задачей для развития многих областей астрономии.

Межзвёздная пыль бывает двух типов: углеродная и силикатная [1]. Согласно современным моделям, размеры пыли находятся в диапазоне от $\sim 4 \text{ \AA}$ до нескольких микрон [1, 2], при этом подавляющее количе-

М.С. Мурга^(1,2)

⁽¹⁾ Институт астрономии РАН,
ул. Пятницкая 48, 119017 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира 19, 620062 Екатеринбург, Российская Федерация
E-mail: murga@inasan.ru

Статья поступила 24 октября 2023 г.,
после доработки 29 ноября 2023 г.

ство мелких пылинок ($\lesssim 50 \text{ \AA}$) — углеродные. На данный момент неизвестно, в какой степени пылинки однородны по составу. В одних моделях силикатные и углеродные пылинки существуют раздельно [1, 3], в других моделях — пылинки состоят одновременно из силикатного и углеродного материалов. К примеру, в модели "Themis" [4] углеродные пылинки могут быть чисто углеродными, хотя структура углеродного материала неоднородна, а силикатные пылинки покрыты углеродной мантией, т.е. неоднородны по химическому составу. В работе [5] предложена модель, в которой пылинки с размерами $\lesssim 50 \text{ \AA}$ являются однородными по составу, большие же пылинки представляют собой конгломераты из углеродных и силикатных пылинок меньшего размера. Авторы полагают, что такие пылинки формируются в МЗС за счёт столкновений и слипаний.

Вне зависимости от модели одним из компонентов пыли являются мелкие углеродные частицы, так как на их наличие указывает ряд наблюдений. Во-первых, инфракрасные (ИК) спектры эмиссионных туманностей содержат широкие полосы на длинах волн от 3 до $\sim 20 \text{ мкм}$, которые соответствуют колебательным переходам молекул полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), фуллеренов, наноразмерных частиц аморфного углерода и других углеродных частиц [6–10]. Во-вторых, особенность кривой поглощения на длине волны 2175 \AA совпадает со скачком в поглощении многих видов углеродных частиц [11–14]. В-третьих, практически вдоль любого луча зрения проявляются диффузные полосы поглощения. Пять из них были достоверно ассоциированы с молекулами фуллерена C_{60}^+ [15, 16], и предполагается, что другие полосы также соответствуют углеродосодержащим молекулам [17–19]. В астрономической литературе терминологически принято относить наноразмерные частицы и макромолекулы к пылинкам. Далее в этой статье и для макромолекул и для крупных пылинок будет использоваться термин "частицы", так как такой термин устоялся в физической и химической литературе, связанной с изучением углеводородов. Термин "пыль" будет использоваться как обобщённое название всех частиц в астрономическом контексте.

Тогда как сам факт наличия углеродных частиц в МЗС не подвергается сомнению, информация об их размере, структуре и составе не так однозначна. Исключением являются упомянутые выше молекулы фуллерена, которые идентифицированы как по колебательным переходам в ИК-диапазоне, так и по электронным переходам в оптическом диапазоне [9, 15, 20]. Также по вращательным переходам были обнаружены молекулы бензонитрила и цианоафталина [21, 22].

Считается, что основным источником углеродных частиц являются звёзды асимптотической ветви гигантов (АВГ), в которых содержание углерода превышает содержание кислорода, т.е. $C/O > 1$ [23]¹. В этих звёздах протекает "углеродная химия". Масса углеродных звёзд на главной последовательности варьируется от $\sim 1,5$ до $\sim 4M_{\odot}$ [26], но при низкой металличности звёзды с массой от $\sim 1M_{\odot}$ могут быть углеродными [27, 28]. Также при низкой металличности возрастает относительное количество углеродных звёзд, что видно при сравнении количества углеродных планетарных туман-

ностей (ПТ) в нашей Галактике и Магеллановых Облаках (МО) [29].

Отметим, что при $C/O < 1$ весь углерод расходуется на образование молекулы CO и протекает "кислородная химия". Наблюдаются также звёзды, где одновременно присутствуют продукты "углеродной и кислородной химии" [30]. Причина возникновения таких звёзд однозначно не установлена, одной из возможных причин является эффективное "зачерпывание" вещества из углеродных слоёв звезды на самых последних стадиях её жизни, когда уже было сформировано некоторое количество "кислородной" пыли (силикатной) в оболочке [30]. После этого события в оболочке начинает протекать "углеродная химия", и реакции и механизмы формирования углеродных частиц, скорее всего, схожи с теми, что действуют в углеродных звёздах, поэтому в данной работе делается акцент именно на "углеродной химии", в которой отсутствуют пылинки, характерные для "кислородной химии".

Стадия звезды АВГ заканчивается, когда прекращается горение гелия и водорода в оболочках, окружающих ядро звезды. Тогда происходит преобразование звезды в белый карлик, сопровождающееся её нагревом, и образование ПТ. На этапе преобразования звезды она находится на стадии пост-АВГ, и в литературе такие объекты ещё называют протопланетарными туманностями (ППТ). В данной работе будет использоваться термин "ППТ". Основным отличием между ППТ и ПТ является значение эффективной температуры (T_{eff}) центрального источника: у ППТ центральный источник относительно холодный и не способен ионизировать газ, тогда как в центре ПТ находится горячий источник с T_{eff} вплоть до 200000 К, ионизирующий окружающее вещество. Граница T_{eff} центрального источника, по которой можно делить объекты на ПТ и ППТ, находится в пределах от 20000 до 30000 К. Выше этой границы начинают проявляться линии ионизированного водорода и кислорода [31]. В ППТ и ПТ в оболочке, сброшенной звездой, появляется "фотодиссоциационная" область (ФДО), т.е. область, куда проникают ультрафиолетовые (УФ) кванты с энергией в диапазоне до 13,6 эВ. Такие кванты способны диссоциировать молекулы и частицы, сформировавшиеся на стадии звезды АВГ, а также инициировать множество других химических реакций. Так как в ППТ ещё отсутствует область ионизированного водорода, то можно считать, что ФДО занимает всю область от центрального источника до глубины проникновения фотонов. В ПТ ФДО располагается за фронтом ионизации водорода. Область ионизированного водорода со временем расширяется, и ФДО расширяется соответственно.

На сегодняшний день сформирована общая картина образования углеродных частиц в оболочках звёзд АВГ и картина их дальнейшей эволюции последовательно на стадиях ППТ, ПТ и, наконец, в МЗС. Данная картина основана на лабораторных исследованиях (в частности, процессов горения) и теоретических моделях [2, 32, 33]. Согласно этой картине, непосредственно в оболочках звёзд формируются частицы, структура которых представляет собой смесь ароматических колец, соединённых между собой алифатическими связями. Упорядоченная решётка в таких частицах отсутствует, их природа близка к аморфному углероду. Затем образовавшиеся частицы подвергаются воздействию УФ-поля излучения, а также

¹ Углеродная пыль может также образовываться в остатках сверхновых звёзд и МЗС [24, 25].

ударных волн, в результате чего структура меняется, становясь упорядоченной и ароматической. Реструктуризация сопровождается частичным разрушением пылинок, и в газовую фазу могут поступать различные углеводородные молекулы, включая ПАУ и фуллерены [34]. Далее в диффузной МЗС будут сосуществовать свободно летающие ПАУ и фуллерены, и частицы из структурированного аморфного углерода, которые могут содержать небольшое относительное количество алифатических связей.

Формирование ПАУ, фуллеренов и нанотрубок исследуется в физических и химических лабораториях благодаря их широкому применению в промышленности и современных технологиях. Кроме того, вопрос об уменьшении выброса ПАУ и сажи как продуктов неполного сгорания активно изучается ввиду того, что они считаются опасными для здоровья человека. Для контроля количества этих вредных частиц поэтапно исследуется процесс и механизмы их формирования. С точки зрения астрономии процесс формирования углеродных частиц также интересен, так как его детальное понимание позволит объяснить наблюдательные данные об углеродных частицах в космосе и описать их характеристики (структуру, размеры, свойства). Несмотря на разные цели, астрономы, физики и химики заинтересованы в исследовании процесса формирования, роста и трансформации углеродных частиц.

В теории эволюции межзвёздных углеродных частиц существуют "незакрытые" вопросы. Один из таких вопросов — чувствительность процессов формирования углеродных частиц к условиям среды, в частности, к параметрам, зависящим от металличности. По наблюдениям можно судить о том, что содержание ПАУ снижается при низкой металличности [35, 36], снижается и общее содержание пыли [37], но при этом увеличивается относительное содержание молекул фуллерена [38, 39]. Зачастую корреляцию между содержанием ПАУ и металличностью объясняют более эффективным разрушением ПАУ при низкой металличности [40, 41]. Но в некоторых работах, напротив, приводятся доводы в пользу недостаточно эффективного образования ПАУ в таких условиях [42].

В настоящем обзоре детально рассматриваются основные аспекты, касающиеся формирования и эволюции углеродных частиц (эксперименты, условия формирования углеродных частиц в оболочках звёзд АВГ, наблюдения углеродных частиц в объектах, имеющих непосредственное отношение к их формированию, существующие гипотезы и модели), проводится анализ имеющихся данных и их сопоставление, даётся оценка существующим моделям. Особое внимание уделяется молекулам фуллеренов как индикаторам того, что формирование пыли может протекать, как минимум, по двум разным эволюционным ветвям. Обсуждаются различные факторы, которые могут влиять на то, по какой ветви идёт формирование в тех или иных объектах.

2. Наблюдательные данные об углеродных частицах в звёздах асимптотической ветви гигантов, протопланетарных и планетарных туманностях

Основные наблюдательные данные об углеродных частицах получают по ИК-спектрам, весьма разнообразным у

ППТ и ПТ. Эти спектры представляют собой комбинацию теплового континуума с пиком на длине волны около 30–40 мкм и ряда эмиссионных полос, наличие, положение и интенсивность которых меняются от объекта к объекту и внутри конкретного объекта. По спектрам можно выделить общие свойства некоторых объектов и проследить их эволюционную связь. Ниже рассмотрены основные особенности спектров и дана информация об их природе и вариативности. Дополнительно приводится информация, полученная по оптическим и ИК показателям цвета.

2.1. Основные наблюдательные особенности

2.1.1. Ароматические полосы. Эмиссионные полосы на длинах волн 3,3, 6,2, 7,7, 8,6, 11,2, 12,7, 16,4 мкм и ряд других менее интенсивных полос наблюдаются в большом количестве космических объектов разных типов [1, 43–46]. Эти полосы соответствуют колебательным переходам в соединениях, содержащих ароматические (бензольные) кольца. Принято считать, что такими соединениями являются ПАУ [47]. Каждая из полос отвечает за определённый тип колебаний (растяжение и изгиб связей C–H, C–C и C–C–C в плоскости или вне плоскости молекулы) либо за их комбинацию. Наблюдаемые ИК-спектры космических объектов не соответствуют спектру ни одной из конкретных частиц ПАУ, но могут быть описаны суммарным спектром ансамбля из нескольких десятков ПАУ [48, 49]. Отношения потоков в полосах ($I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}$) варьируются в зависимости от условий, отражая изменения в составе и/или характеристиках набора ПАУ, отвечающего за появление полос [50–52]. В частности, отношение потоков $I_{3,3}/I_{11,2}$ коррелирует со средним размером ансамбля ПАУ, а отношение $I_{6,2}/I_{11,2}$ коррелирует с ионизационным состоянием данного ансамбля [51, 52].

В спектрах ПТ могут наблюдаться все основные полосы ПАУ, но точное положение, ширина и яркость полос относительно друг друга меняются по мере эволюции ПТ. "Классический" ИК-спектр, наблюдаемый во многих объектах МЗС, с полосами на длинах волн 3,3, 6,2, 7,7, 8,6, 11,2, 12,7, 16,4 мкм проявляется в зрелых ПТ, тогда как спектры ППТ и молодых ПТ могут выглядеть иначе. В работе [45] было проведено разделение объектов МЗС по классам *A*, *B*, *C* по положению полос в диапазоне длин волн от 6 до 9 мкм. На рисунке 1 (левая часть спектра) приведены репрезентативные ИК-спектры этих классов. В спектрах класса *A* (объекты IRAS 01005+7910, IRAS F04540–6721, IRAS 05537–7015) наблюдаются полоса на 6,22 мкм, дублет полос на 7,7 мкм с доминирующей составляющей на 7,6 мкм и "плечом" на 7,8–7,9 мкм и, наконец, полоса на 8,6 мкм. В спектрах класса *B* (IRAS 05185–6806) полоса на 6,22 мкм смещена к $\sim 6,24$ мкм, в дублете полос на 7,7 мкм составляющая на 7,6 мкм становится "плечом" для доминирующей составляющей на 7,8 мкм, а полоса на 8,6 мкм смещена в красную сторону вплоть до 8,7 мкм. Спектры класса *C* (объект IRAS 13416–6243 на рис. 1) демонстрируют полосу на 6,3 мкм вместо 6,22 мкм в классе *A*, дублет на 7,7 мкм не разрешён на полосы и наблюдается как единая широкая полоса с пиком на $\approx 8,2$ мкм с широким красным крылом вплоть до $\sim 9,3$ мкм, на котором может быть замечен небольшой пик на 8,7 мкм.

Класс *A* может наблюдаться у широкого круга объектов: области Н II, отражательные туманности, ПТ,

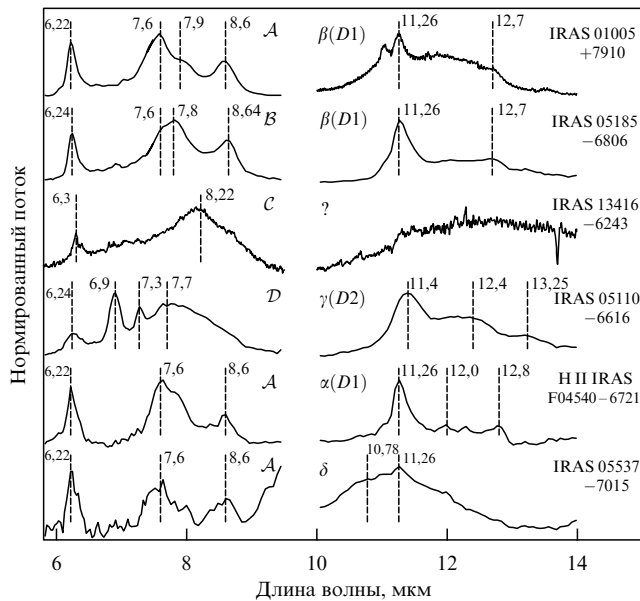


Рис. 1. Классы ИК-спектров на примере ППТ IRAS 01005+7910, IRAS 05185–6806, IRAS 13416–6243, IRAS 05110–6616, IRAS 05537–7015, и области H II IRAS F04540–6721. Объекты разделены по классам *A–D* по диапазону 6–9 мкм, по классам α – δ — по диапазону 11–14 мкм. Спектры объектов взяты из архивов космических телескопов "ISO" (IRAS 13416–6243) и "Spitzer" (остальные объекты), для них проведена процедура вычитания фона.

ППТ и звёзды Ae/Be Хербига; можно сказать, что это самый распространённый тип ИК-спектров. Класс *B* распространён среди ПТ, ППТ и звёзд Ae/Be Хербига. А вот класс *C* был сначала найден только для ППТ, но позже был пополнен звёздами АВГ и Ae/Be Хербига [53–56].

Объекты класса *C* имеют относительно низкую эффективную температуру центрального источника (несколько тысяч кельвинов), тогда как в объектах классов *A* и *B* источники излучения горячее. Считается, что за появление спектров класса *C* ответственны частицы, которые ещё не были подвержены воздействию УФ-излучения, поэтому в данных частицах присутствуют алифатические связи, имеющие меньшие энергии диссоциации по сравнению с ароматическими [53, 57]. Таким образом, эти частицы имеют смешанную ароматическо-алифатическую структуру, аналогичную структуре гидрогенизированного аморфного углерода (ГАУ) с высокой относительной долей водорода. При формировании в таких частицах доминируют алифатические связи и нерегулярная структура, но под воздействием УФ-излучения и/или ударных волн происходит их дегидрогенизация, и структура становится более регулярной с большой долей ароматических колец. В результате указанного процесса алифатические полосы эмиссии угасают, уступая место ароматическим [2, 58]. Согласно работе [59], мелкие пылинки ($\lesssim 200$ Å) могут испытывать реструктуризацию по всему объёму, тогда как крупные пылинки меняются только внутри поверхностных слоёв. Учитывая эволюционный статус и характеристики объектов классов *A–C*, а также многочисленные эксперименты с частицами ГАУ и другими аналогами, был предложен сценарий, согласно которому эволюция протекает от объектов класса *C* через класс *B* к классу *A* [60–62].

Набор ПАУ, суммарным спектром которого могут быть описаны спектры класса *A*, включает в себя преимущественно ПАУ малых размеров, а набор для класса *B* — ПАУ больших размеров [63]. Шэннон и др. [63] предполагают, что существует эволюционная связь между классами *B* и *A*: объекты класса *B* могут переходить в объекты класса *A* при воздействии внешних факторов (излучение, ударные волны) и сопутствующем разрушении крупных ПАУ. Для спектров класса *C* подходящего набора ПАУ найти не удалось.

В работе [64] был введён ещё один класс спектров — *D* (объект IRAS 05110–6616 на рис. 1). В спектрах этого класса наблюдается более широкая полоса на 6,24 мкм и одна широкая полоса с центром примерно на 7,7 мкм. Дополнительно, в отличие от классов *A*, *B*, *C*, присутствует полоса на 6,9 мкм и иногда встречается полоса на 7,3 мкм, которые ассоциируются с колебаниями алифатических связей (см. ниже). Полоса на 6,9 мкм наблюдается и в спектрах класса *B*, но в них она смещена ближе к 6,8 мкм. В работе [65] было показано, что спектр класса *D* можно получить путём линейной комбинации спектров классов *B* и *C*, но только в диапазоне длин волн 7–9 мкм, тогда как спектр в диапазоне 11–14 мкм таким способом не воспроизводится. Для спектров класса *D*, так же как и для класса *C*, подобрать набор ПАУ не удалось.

Спектры в диапазоне длин волн 11–14 мкм предложено разделять по другим классам. В работе [64] разделение проводится по классам α , β , γ , δ . Спектры объектов данных классов представлены на рис. 1 (правая часть). В спектре класса α (область H II IRAS F04540–6721) отчётливо видны полосы на 11,3, 12,0 и 12,8 мкм, локальный континуум под этими полосами небольшой. В спектрах класса β (IRAS 01005+7910, IRAS 05185–6806) полоса на 11,3 мкм является более широкой, полосы на 12,0 и 12,7 мкм либо видны неотчётливо, либо не выделяются, а локальный континуум более заметен. В спектрах класса γ (IRAS 05110–6616) локальный континуум ещё больше, и вместо полосы на 12,7 мкм видны полосы на $\approx 12,3$ –12,4 и 13,3 мкм. И, наконец, спектры класса δ (IRAS 05537–7015) имеют большой локальный континуум от 10 до 12–13 мкм с полосой на 11,3 мкм и иногда полосой на $\approx 10,5$ –11 мкм.

В работе [66] спектры объектов в диапазоне 11–14 мкм были разделены на классы D1, D2 и "big 11". Спектры классов D1 и D2 являются ПАУ-подобными: локальный континуум растянут от $\sim 10,5$ до ~ 13 –14 мкм с центром около 12 мкм, на котором "сидят" эмиссионные полосы (объекты IRAS 01005+7910, IRAS 05185–6806, IRAS 05110–6616 и IRAS F04540–6721 на рис. 1). Между классами D1–D2 и α – δ из работы [64] можно провести сопоставление: класс D1 включает в себя классы α и β , а класс D2 — это класс γ . Объекты со спектрами, соответствующими классу δ , не являются ПАУ-подобными: локальный континуум расположен на длинах волн от ~ 10 до ~ 12 –13 мкм с центром на 11,3 мкм, на него могут накладываться эмиссионные полосы, но их интенсивность значительно ниже интенсивности самого континуума (IRAS 05537–7015 на рис. 1). Слоан и др. [66] относят такие спектры к группе "big 11"; о ней будет рассказано ниже.

Провести прямое сопоставление между классами *A–D* и α – δ не представляется возможным, так как два объекта одного класса по диапазону 6–9 мкм могут относиться к разным классам по диапазону 11–14 мкм,

что видно по рис. 1. К примеру, объект IRAS 01005+7910 относится к классу \mathcal{A} и β , а объект IRAS 05537–7015 относится также к классу \mathcal{A} по диапазону 6–9 мкм, но к классу δ по диапазону 11–14 мкм.

Спектры класса δ наблюдаются преимущественно у ППТ, и объекты классов β и γ также, как правило, имеют относительно холодный центральный источник, тогда как объекты класса α нагреты горячим источником. Имеют ли что-то общее частицы, ответственные за возникновение особенностей в спектрах разных объектов, точно сказать нельзя. Не исключено, что, как и в случае "эволюционной" последовательности спектров от класса \mathcal{C} к классу \mathcal{A} , можно проследить изменение углеводородного материала при переходе от класса δ к α . В отличие от хорошо изученных диапазонов на длинах волн 3–4 и 6–9 мкм, теоретических и экспериментальных данных для диапазона 11–14 мкм представлено значительно меньше, что не позволяет делать более строгих выводов об источнике полос в этом диапазоне.

2.1.2. Алифатические полосы. Полосы на длинах волн 3,4, 6,9, 7,3 мкм возникают в результате переходов, вызванных колебаниями алифатических связей C–H в углеводородных частицах [2, 8, 65]. Пока однозначно не установлено, какие конкретно соединения отвечают за возникновение этих полос в МЗС. В литературе предложено множество вариантов: насыщенные водородом ПАУ [67, 68], ПАУ с метиловыми и метиленовыми функциональными группами [69, 70], частицы ГАУ [2, 71, 72], смешанные алифатическо-ароматические органические частицы (МАОН) [10], уголь [73].

Алифатическая полоса на 6,9 мкм наблюдается в объектах класса \mathcal{D} . Могут ли объекты этого класса быть вписаны в эволюционный сценарий $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{A}$, представленный выше? С одной стороны, наличие в спектрах данного класса полосы на 6,9 мкм указывает на наибольшее количество алифатических связей по сравнению с другими классами, т.е. класс \mathcal{D} является как бы начальным этапом эволюции частиц, предшествующим объектам класса \mathcal{C} . С другой стороны, спектры класса \mathcal{D} могут быть получены путём линейной комбинации спектров классов \mathcal{B} и \mathcal{C} , и в таком случае класс \mathcal{D} — это промежуточное звено между \mathcal{B} и \mathcal{C} . Но полоса на 6,9 мкм не наблюдается в спектрах класса \mathcal{C} , тогда как она должна присутствовать в более "молодом" материале. Йенсен и др. [65] предположили, что объекты классов \mathcal{C} и \mathcal{D} не связаны эволюционно и представляют собой разные ответвления в процессе формирования пылинок. Напомним, что, в отличие от классов \mathcal{A} и \mathcal{B} , для спектров классов \mathcal{C} и \mathcal{D} набор ПАУ найти не удалось, таким образом, частицы указанных классов имеют природу, отличную от изолированных ПАУ в газовой фазе [63]. Вероятно, частицы классов \mathcal{C} и \mathcal{D} могут представлять собой разные типы "астросажи" с разной структурой, разными углеводородными доменами и их расположением относительно друг друга, что приводит к различным оптическим свойствам.

Важным индикатором степени "алифатичности" частиц является полоса на 3,4 мкм, которая должна быть ярче, чем полосы на 6,9 и 7,3 мкм [61]. Спектрографы телескопа "Spitzer"² не покрывали указанный диапазон

длин волн, тогда как большинство выводов сделано именно на данных этого телескопа. Информация об указанном диапазоне была получена на других телескопах, таких как космические телескопы "ISO"³ и "Akari"⁴, а также на наземных телескопах, к примеру, на телескопе UKIRT⁵. Полоса на 3,4 мкм была найдена как в поглощении, так и в эмиссии. В работе [7] проведены наблюдения ППТ CRL 618, в спектре которой зафиксировано поглощение в этой полосе, что подразумевает наличие носителей этой полосы в веществе, выброшенном звездой на стадии АВГ. В тех же спектрах видна полоса на 3,3 мкм, но в эмиссии, что говорит о разных пространственных положениях носителей полос на 3,3 и 3,4 мкм.

В работе [74] представлены наблюдения полосы на 3,4 мкм в эмиссии. Показано, что отношение интенсивности алифатической полосы на 3,4 мкм, $I_{3,4}$, к интенсивности ароматической полосы на 3,3 мкм, $I_{3,3}$, увеличивается по мере увеличения T_{eff} до ≈ 50000 К, а потом остаётся примерно на одном уровне. Вместе с этим $I_{3,3}$ по отношению к общей ИК-интенсивности убывает при увеличении температуры вплоть до $T_{\text{eff}} \approx 50000$ К, а затем возрастает. Авторы предполагают, что на первом этапе до $T_{\text{eff}} \approx 50000$ К наблюдения отражают разрушение ПАУ, ответственных за излучение на 3,3 мкм, тогда как по мере расширения области Н II излучение от звезды доходит до более далёких областей и возбуждает большее количество ПАУ, но разрушение уже не происходит с той же эффективностью в связи с большим расстоянием от звезды и большим объёмом пыли при том же количестве ионизирующих квантов. На основании того, что $I_{3,4}/I_{3,3}$ возрастает, авторы делают вывод о том, что ПАУ в областях, отдалённых от звезды, более насыщены водородом и присоединяют группы с алифатическими связями. Остаётся неясным, почему рост $I_{3,4}/I_{3,3}$ останавливается и почему разрушение алифатических связей не отражается на поведении полосы на 3,4 мкм. Картина осложняется наблюдениями, представленными в работе [75], в которой показано, что отношение $I_{3,4}/I_{3,3}$ уменьшается по мере отдаления от звезды, т.е. при расширении ФДО и увеличении T_{eff} должно наблюдаться уменьшение $I_{3,4}/I_{3,3}$, а не увеличение, как в работе [74]. Для получения более аргументированных и согласованных выводов требуются наблюдения всех основных ароматических и алифатических полос одновременно, а также теоретические вычисления того, как должны меняться отношения полос по мере расширения ФДО и разрушения ПАУ и других углеродных частиц.

2.1.3. Полосы фуллеренов. Молекулы фуллеренов (C_{60} , C_{70}^+ , C_{70}) имеют несколько колебательных переходов, основные из которых приходятся на длины волн 7,0, 8,5, 17,4 и 18,9 мкм [9]. Зачастую эти переходы (за исключением полосы на 18,9 мкм) пересекаются с полосами ПАУ, что накладывает ограничение на оценку интенсивностей полос как ПАУ, так и фуллеренов.

Фуллерены обнаружены на сегодняшний день в 24 ПТ [76], что составляет всего лишь около нескольких процентов от всех углеродных ПТ. Морфология ПТ, содержащих фуллерены, (далее C_{60} -ПТ) может быть

³ <https://www.cosmos.esa.int/web/iso>.

⁴ <https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/past/akari.html>.

⁵ <https://about.ifa.hawaii.edu/ukirt/about-us/>.

² <https://www.spitzer.caltech.edu/>.

разной. Заметно их неоднородное распределение по металличности: их процентное содержание растёт при уменьшении металличности, что установлено при сравнении численности C_{60} -ПТ в Галактике, Большом и Малом Магеллановых Облаках (БМО и ММО) [29]. Галактические C_{60} -ПТ также имеют пониженную металличность [39]. Элементный состав C_{60} -ПТ соответствует начальной массе звезды в диапазоне от $\approx 1,5-2,5M_{\odot}$, при этом пониженное содержание аргона в них предполагает, что такие звёзды относятся к старому населению [39]. Сравнение ПТ с C_{60} и без них показало, что их элементные составы схожи, исключение может составлять азот [39, 76]. В работе [76] показано, что в C_{60} -ПТ железо в значительной степени находится в пыли, а не в газе. Примечательно, что в двух ПТ, где наблюдаются самые мощные полосы фуллеренов, Тс 1 и Sast2-3, содержание углерода в газе меньше, чем у другой C_{60} -ПТ, IC 418, полосы фуллеренов в которой слабы. Отношение C/O меньше в Тс 1, чем в IC 418. Отсука и др. [77] отмечают, что содержание углерода в C_{60} -ПТ меньше, чем в ПТ без C_{60} для выборки ПТ в ММО, однако выборка очень ограничена. С другой стороны, содержание углерода в газе Галактических C_{60} -ПТ и ПТ без C_{60} сравнимы, из чего Отсука и др. [76] делают вывод, что содержание углерода, в том числе относительно кислорода, не влияет на содержание фуллеренов и что, скорее, на формирование фуллеренов оказывают влияние свойства центральной звезды.

Кроме того что фуллерены встречаются чаще при пониженной металличности, они наблюдаются только в ПТ с относительно низкой T_{eff} центральной звезды ($\approx 30000-50000$ К) и ППТ, т.е. в объектах с низким состоянием ионизации [38, 39, 76]. Таким образом, фуллерены наблюдаются только в относительно молодых ПТ и ППТ. Причина, по которой фуллерены не наблюдаются в зрелых ПТ, не ясна. Одним из объяснений может быть то, что полосы фуллеренов становятся не видны на фоне излучения пыли и ПАУ при облучении мощным УФ источником с $T_{\text{eff}} \gtrsim 50000$ К.

Ками и др. [78] исследовали пространственное распределение излучения пыли, ионизированного газа и фуллеренов в ПТ Тс 1. Согласно данному исследованию, три этих компонента находятся на разных расстояниях от звезды. Наиболее близко к звезде располагается крупная пыль и, вероятно, ПАУ, далее — ионизированный водород H II, и уже на границе между областью H II и ФДО находятся фуллерены. Таким образом, фуллерены видны там, где поле излучения ниже того, где наблюдаются пыль и ПАУ.

В работе [39] было проведено сравнение отношения потоков в полосах на 3,3 и 11,2 мкм, $I_{3,3}/I_{11,2}$, в C_{60} -ПТ и ПТ без C_{60} , и показано, что данное отношение ниже для C_{60} -ПТ. Это может указывать на то, что средний размер ПАУ в них меньше по сравнению с ПТ без C_{60} . Спектр C_{60} -ПТ соответствует спектру класса A.

Обнаружение фуллеренов и неоднородность их распределения среди ПТ порождают ряд вопросов об эволюции углеродных частиц, в частности, в чём именно заключается принципиальная разница сценариев их формирования при разных металличностях. Именно фуллерены могут быть некой лакмусовой бумагой для определения сценария, по которому происходило формирование углеродных частиц в конкретном объекте и при каких условиях.

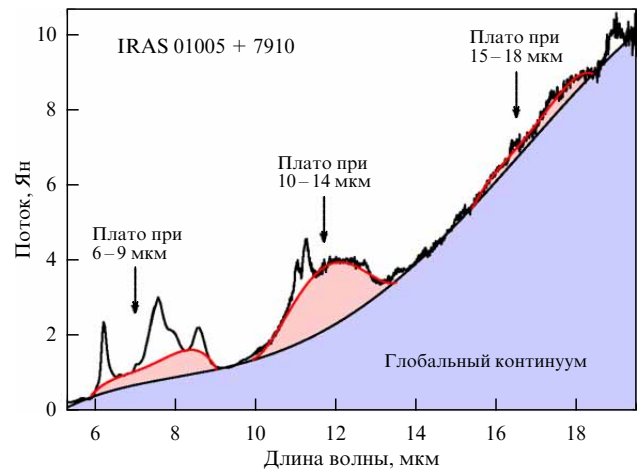


Рис. 2. ИК-спектр ППТ IRAS 01005+7910. Синим цветом изображён глобальный континуум, красным цветом — локальные континуумы на длинах волн 6–9, 10–14 и 15–18 мкм. (Спектр взят из архива космического телескопа "Spitzer".)

2.1.4. Локальные континуумы на длинах волн $\sim 8, 12$ и 17 мкм. Эмиссионные полосы, описанные выше, "сидят" на неких подложках или, другими словами, на небольших локальных континуумах (в литературе их часто называют "плато"). Эти плато являются широкими (приблизительно несколько мкм), и их центры приходятся на длины волн $\sim 8, 12$ и 17 мкм. На рисунке 2 показан спектр ППТ IRAS 1005+7910, на котором выделены синим цветом глобальный континуум от теплового излучения крупной пыли и красным цветом — три локальных континуума, растянувшихся приблизительно от 6 до 9 мкм, от 10 до 14 мкм и от 15 до 18 мкм.

Плато наблюдаются не только в ППТ/ПТ, но и в других объектах МЗС, хотя их величина и форма могут меняться от объекта к объекту. В отличие от эмиссионных полос, которые можно отнести если не к конкретной молекуле, то хотя бы к определённого типа колебаний, плато, вероятно, могут быть объяснены комбинацией различных колебаний. Частицы, в которых происходят колебания, могут быть далеко не планарными, а являться объёмными трёхмерными ПАУ-кластерами, частицами ГАУ или МАОН [57, 79–81]. Жоблин и др. [57] отмечают, что эти плато коррелируют с наличием алифатической полосы на 6,9 мкм, что подтверждает связь с некими алифатическими структурами. По мере эволюции ПТ алифатические полосы постепенно пропадают, и величина плато также уменьшается [57, 75]. Ароматические полосы, напротив, с возрастом ПТ становятся доминирующими в спектрах среднего ИК-диапазона.

Плато на 8 и 12 мкм присутствуют в спектрах C_{60} -ПТ. Например, в спектре ППТ IRAS 01005+7910 (см. рис. 2) на длине волны 18,9 мкм видна широкая полоса, схожая с теми, которые соответствуют полосе C_{60} в C_{60} -ПТ, что указывает на наличие фуллеренов. Одновременное наличие плато и полос фуллеренов дало основания предполагать, что фуллерены являются результатом фотодиссоциации частиц ГАУ [38, 82], однако плато встречаются среди ПТ гораздо чаще, чем полосы фуллеренов, поэтому если связь между ГАУ и фуллеренами существует, то она не прямая и должны быть дополнительные факторы, влияющие на процесс образования фуллеренов из ГАУ.

2.1.5. Особенность на длине волны 11,3 мкм. В спектрах углеродных звёзд АВГ, ППТ и ПТ наблюдается особенность на длине волны 11,3 мкм [66, 83]. На ранних этапах эволюции звезды АВГ эта полоса сильная и узкая, но по мере эволюции и увеличения непрозрачности оболочки звезды полоса становится более широкой и плоской [84]. Яркость полосы ниже для звёзд с низкой металличностью [28]. Для Галактических объектов данная особенность пропадает на стадии ППТ и редко проявляется на стадии ПТ. Однако она распространена и является довольно мощной в ПТ МО [64, 66, 83]. Она может сосуществовать вместе с широкими ароматическими полосами, но при этом её яркость уменьшается при увеличении жёсткости поля излучения [83]. Яркость особенности на 11,3 мкм также антикоррелирует с яркостью полос фуллерена [66].

В большинстве исследований такая особенность ассоциируется с частицами карбида кремния (SiC) [84, 85]. Это объясняет уменьшение яркости данной особенности в звёздах с пониженной металличностью, так как в них содержание кремния меньше. Для звёзд Галактики яркость особенности SiC коррелирует с содержанием горячей пыли [86]. Предполагается, что в оболочках звёзд Галактики частицы SiC формируются прежде углеродных частиц, так как SiC имеет более высокую температуру конденсации. При остывании оболочки после образования частиц SiC начинается конденсация углеродных частиц, которые могут оседать на частицы SiC и образовывать углеродную мантию [87, 88]. К концу стадии звезды на АВГ и ППТ ядра из SiC уже покрыты такой мантией, из-за чего они не проявляют себя в эмиссионных спектрах. Угасание особенности на 11,3 мкм связывают также с самопоглощением [89]. В ПТ в условиях мощного УФ-излучения часть углеродной мантии может быть десорбирована, в результате чего особенность на 11,3 мкм может появиться снова.

Несколько другая картина складывается для звёзд АВГ, ППТ и ПТ в МО. Помимо того что яркость особенности на 11,3 мкм в звёздах АВГ в МО меньше, чем в Галактике, она появляется в более "красных" по

ИК-показателям цвета звёздах и с более низкой температурой пыли по сравнению с Галактикой [86, 88]. В ППТ/ПТ МО эта особенность широкая и мощная [64, 66, 83], её называют ещё "big 11". Считается, что данная особенность в ППТ/ПТ МО возникает в результате суммарного излучения ПАУ и SiC [64, 66]. Наличие сильной особенности SiC в ППТ/ПТ МО противоречит вышеизложенной последовательности конденсации частиц (SiC \rightarrow C), а также тому, что особенность должна быть едва видна ввиду низкого содержания кремния. В работах [66, 88] предполагается, что при низкой металличности температура конденсации SiC ниже, чем у углеродных частиц вследствие низкой концентрации, поэтому сначала образуются углеродные частицы, а потом на углеродное ядро оседает мантия из SiC, которая может быть смешана с углеродными частицами, также продолжающими образовываться. В работе [90] исследовано влияние металличности на температуру конденсации SiC и графита и показано, что значения обеих температур конденсации действительно меньше при меньшей металличности, но численно установлено, что первыми всё же образуются частицы SiC, и далее на эти первые зародыши начинают оседать одновременно и углеродные частицы, и частицы SiC.

В работах [64, 82, 91] авторы демонстрируют, что необходимо анализировать форму особенности "big 11" в конкретных ПТ, так как её вид может указывать на её природу. Рассмотрим примеры ИК-спектров разных объектов в окрестности особенности на 11,3 мкм, представленные на рис. 3а. Для каждого объекта профиль наблюдаемой особенности был подогнан параболической функцией с целью демонстрации общего вида без шума и накладываемых линий. На рисунке 3б приведены только полученные параболические функции.

Классический вид особенности на 11,3 мкм в спектре звёзд показан на примере звезды MSX SMC 159 (ММО). В ППТ МО эта особенность выглядит похожим образом, что показано на примере ППТ SMP LMC 058 (БМО) из выборки в работе [66]. Если не обращать внимания на полосу на длине волны $\approx 10,5$ мкм, соответствующей

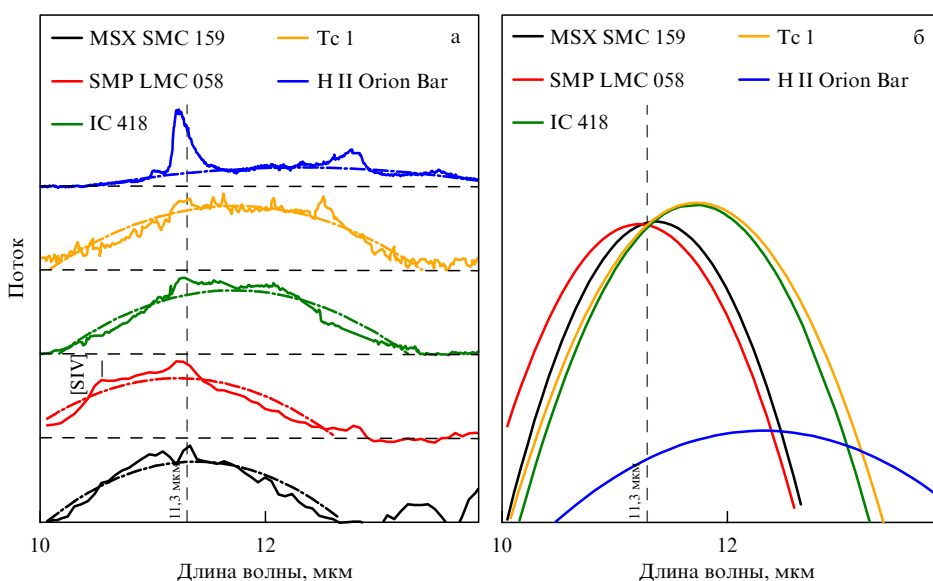


Рис. 3. (а) ИК-спектры в окрестности особенности на 11,3 мкм для объектов с вычтенным фоном континуума (снизу вверх): звезда АВГ MSX SMC 158, ПТ SMP LMC 058 (БМО), ПТ IC 418 и Tc 1 (обе — Галактика), ФДО вокруг H II области в Orion Bar. Спектры MSX SMC 158, SMP LMC 058, IC 418 взяты из архива телескопа "Spitzer", спектр Orion Bar взят из архива телескопа "ISO", а спектр Tc 1 адаптирован из работы Бернарда-Саласа и др. (2012 г.) [82]. (б) Параболические функции, полученные подгонкой к наблюдательным данным на рис. а.

линии [S IV], то видно, что в данном объекте особенность на 11,3 мкм очень близка к той, которая наблюдается в звёздах АВГ, так как параболические функции, подобранные для SMP LMC 058 и MSX SMC 159, практически совпадают. Особенность в SMP LMC 058 имеет небольшой выделяющийся пик на $\sim 11,3$ мкм, более узкий, чем основная полоса. На указанную длину волны приходится один из колебательных переходов ПАУ. Слоан и др. [66] сделали вывод, что вклад от SiC в эту особенность составляет около 90%, а остальная часть — вклад от ПАУ, о чём свидетельствует полоса на 11,3 мкм.

Спектры Галактических ПТ представлены на примере объектов IC 418 и Tc 1. В них наблюдается широкая полоса в диапазоне длин волн от 10 до 14 мкм, но видно, что особенность сдвинута в сторону больших длин волн с небольшим пиком на $\sim 11,3$ мкм. В результате детального анализа этой полосы в спектрах Галактических ПТ, в том числе в IC 418, Отсука и др. [39] высказали предположение, что особенность спектра в указанном диапазоне в них объясняется тепловой эмиссией пыли и имеет какое-то отношение скорее к ПАУ, а не к SiC, т.е. материал SiC плотно покрыт мантией и не проявляет себя. Бернард-Салас и др. [82] сделали вывод, что в случае Tc 1 и ряда других ПТ данная особенность также не связана с SiC, а скорее, вызвана эмиссией частиц ГАУ, спектры которых содержат широкие особенности на этих длинах волн [2, 92]. Аналогичной точки зрения придерживаются авторы работ [10, 93], где для объяснения полосы на 11,3 мкм предлагаются частицы MAON, в целом схожие с ГАУ-частицами по структуре. В свою очередь, Осава и др. [94] продемонстрировали спектр Галактической ПТ G095.2+00.7, в котором присутствует мощная полоса "big 11", но отсутствует полоса на 3,4 мкм, которая свидетельствовала бы о наличии каких-либо гидрогенизированных частиц. Но, во-первых, их спектры на 2,5–5 мкм и на 5–14 мкм получены на разных приборах с существенно разными характеристиками, в том числе и по пространственному разрешению, поэтому нет абсолютной уверенности, что мы видим спектры одного и того же объекта (в смысле его пространственного размера). Во-вторых, дегидрогенизированные ГАУ могут создавать плато на 10–14 мкм, но не имеют полосы на 3,4 мкм [2]. Таким образом, в Галактических ПТ особенность на 11,3 мкм схожа с локальным континуумом на ~ 12 мкм, о котором говорилось выше, и частицы, ответственные за её возникновение, в таком случае аналогичны.

Для сравнения на рис. 3 приведён спектр ФДО Orion Vag как пример объекта с ИК-спектром, типичным для эмиссионных туманностей. В спектре присутствует широкая особенность в диапазоне длин волн от 10 до 14 мкм, но она намного шире и плосче, чем те, которые проявляются в спектрах звёзд АВГ, ППТ и ПТ. Подобные спектры с таким локальным континуумом могут быть объяснены суммарным спектром набора ПАУ [49], эмиссией ПАУ-кластеров, упомянутых выше частиц ГАУ или иных углеродных частиц [57, 95].

На текущий момент можно резюмировать, что особенность на 11,3 мкм в звёздах АВГ с большой вероятностью связана с частицами SiC, но данная особенность в спектрах ПТ (особенно Галактических) может быть связана с углеродными частицами, а не с SiC либо с частицами, включающими и углеродный материал, и SiC. Для точного детального анализа и оценки вкладов от каждого из материалов необходимо знать точные оптические константы материалов этих частиц. В лите-

ратуре представлены оптические константы для кристаллических форм SiC, α -SiC и β -SiC [96, 97], и аморфной формы SiC [98]. Модельный спектр частиц из β -SiC (с учётом их формы и распределения по размеру) наиболее близок к наблюдаемому в звёздах АВГ, и вдобавок в метеоритах большая часть SiC содержится именно в такой форме [84, 97]. Оптические константы для частиц ГАУ и ПАУ-кластеров, с которыми связывают континуум с центром на 12 мкм, также представлены в литературе [59, 81], но модельные спектры частиц ГАУ не описывают в точности данный диапазон длин волн (см. рис. 7 в работе [82]). Более того, как отмечалось выше, при высокой металличности по мере эволюции звезды АВГ частицы SiC покрываются углеродной мантией, а при низкой металличности SiC и углерод конденсируются одновременно. Параметры и свойства таких смешанных частиц (размеры, форма, пористость, оптические константы) не определены, поэтому точный анализ наблюдений и оценка содержания вклада того или иного компонента на настоящий момент затруднены. Корректный анализ спектров мог бы привести к альтернативным выводам о природе особенности полосы на 11,3 мкм в ППТ/ПТ и её связи с другими особенностями ИК-спектров.

2.1.6. Особенность на длине волны 21 мкм. Особенность на длине волны 21 мкм наблюдается довольно редко и только на стадии ППТ [91]. Согласно работе [99], она выявлена в 31 источнике суммарно в Галактике и МО, при этом она слабее в объектах МО, что указывает на зависимость от металличности. Примечательно, что её положение практически не варьируется от объекта к объекту. Пример спектра с особенностью на 21 мкм показан на рис. 4.

В работе [66] выявлено, что все объекты, содержащие особенность на 21 мкм, принадлежат классу D в диапазоне 7–9 мкм, и большинство из них — классу D2 в диапазоне 11–14 мкм. В их спектрах отчётливо проявляются плато на 8 и 12 мкм, и плато доминируют относительно полос эмиссии в Галактических объектах, но уступают по яркости полосам в ППТ МО. В спектрах объектов с особенностью на 21 мкм присутствуют алифатические полосы на 6,9 и 7,3 мкм и полосы на 15,8 и 17,1 мкм, которые предположительно возникают в ре-

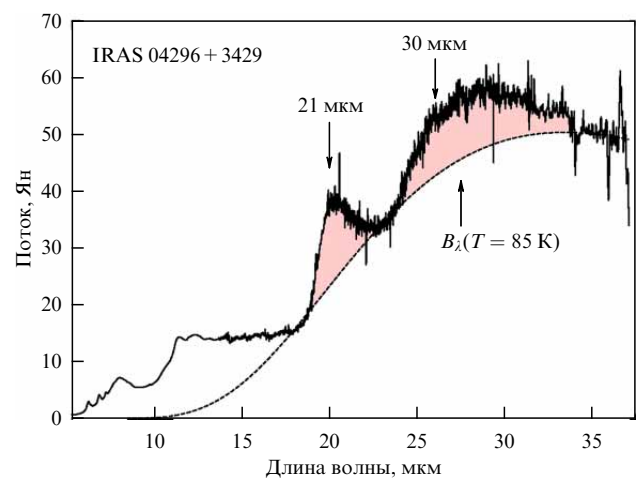


Рис. 4. ИК-спектр ППТ IRAS 04296+3429. Штриховой линией проведена функция Планка, соответствующая температуре 85 К. Розовым цветом выделены особенности на 21 и 30 мкм. (Спектр взят из архива телескопа "Spitzer".)

зультате колебаний связей в алкинах (углеводородах с тройной связью). Отметим, что все объекты класса *D* относительно холодны, центральные источники имеют спектральные классы F или G. Вероятно, носители особенности на 21 мкм могут существовать или проявлять себя только в условиях такого облучения [64].

В дополнение к тому, что спектры с особенностью на 21 мкм содержат плато на 8 и 12 мкм, в них присутствует особенность на 30 мкм (см. ниже) [66], но далеко не все объекты с особенностью на 30 мкм содержат особенность на 21 мкм.

На данный момент нет устоявшегося мнения о носителе особенности на 21 мкм. Вольк и др. [99] собрали перечень предложенных в литературе вариантов, и среди них есть наноалмазы [100], частицы карбида титана [101], оксиды железа [102] и многие другие. Однако исходя из ассоциации спектров с особенностью на 21 мкм с частицами с алифатическими связями, а также учитывая эволюционный статус объектов с этой особенностью, наиболее логичным кажется предположение, что за возникновение отвечают некие сложные углеводороды, включающие ароматические и алифатические связи и имеющие частично аморфную и частично ароматическую структуру [99]. Появление особенности на 21 мкм на промежуточной и короткой стадии эволюции звезды даёт основания предполагать, что она отражает какое-то промежуточное состояние пылинок при переходе от аморфного состояния к ароматическому [66]. В работе [108] удалось детектировать небольшую особенность на 21 мкм в спектре частиц ГАУ, но для установления однозначной связи с ГАУ требуются дополнительные измерения. Необходимы и теоретические расчёты спектров объёмных частиц со сложной ароматическо-алифатической структурой, что представляет собой сложную и неоднозначную задачу.

2.1.7. Особенность на длине волны 30 мкм. На длине волны 30 мкм наблюдается очень широкая особенность, природа которой не установлена однозначно. Она показана на рис. 4 на том же спектре, что и особенность на 21 мкм. Для того чтобы особенность на 30 мкм была чётче видна, на рисунке проведён континуум от теплового излучения пыли, подогнанный функцией Планка с температурой пыли 85 К, над ним возвышается особенность на 30 мкм. Эта особенность может появляться как на стадии звёзд АВГ, так и в ППТ и ПТ. Она встречается чаще, чем особенность на 21 мкм, но присутствует далеко не во всех объектах. Гладковски и др. [103] отметили, что форма особенности меняется при переходе от звёзд АВГ и ППТ к ПТ. Яркость особенности на 30 мкм больше для звёзд АВГ Галактики и меньше для звёзд МО, что указывает на зависимость от металличности [86], но такая тенденция пропадает, если рассматривать ППТ и ПТ [103]. В звёздах Галактики особенность появляется на разных эволюционных стадиях звезды, включая те, когда температура пыли имеет свои максимальные значения (> 900 К), тогда как в БМО и ММО она появляется только при уменьшении температуры пыли до 900 и 700 К соответственно [103]. Яркость увеличивается по мере остывания пыли до ≈ 400 К, т.е. чем "краснее" объект, тем ярче особенность на 30 мкм. Как только температура пыли падает до ≈ 400 К и происходит максимальная потеря массы, яркость этой особенности значительно уменьшается или пропадает совсем, возможно, в связи с самопоглощением. Но на стадии ППТ особенность появляется вновь, и её яркость достигает высоких значений.

Положение пика особенности на 30 мкм варьируется от объекта к объекту в пределах от ≈ 26 до ≈ 33 мкм [103]. Среднее значение длины волны пика составляет около 29 мкм для звёзд АВГ и ППТ и около 30–31 мкм для ПТ. В работе Хони и др. [104] сделано предположение, что такое смещение связано с изменением температуры частиц или их формы. В свою очередь Гладковски и др. [103] считают, что сдвиг является следствием изменения структуры и свойств самого материала, вызванного воздействием УФ-поля излучения, но не изменения температуры. Положение пика имеет большую длину волны в ПТ МО, т.е. эти изменения должны быть более эффективными в МО.

Считается, что сульфид магния (MgS), возможно совместно с сульфидами железа и кальция, ответственен за возникновение данной особенности [87, 105]. Жуковска и Гаиль [106] показали, что конденсация и формирование отдельных частиц MgS происходит неэффективно и что эти частицы с большей вероятностью конденсируются на поверхности уже имеющихся пылинок, а именно SiC. Такой сценарий может быть подкреплён тем, что особенность на 30 мкм антикоррелирует с особенностью на 11,3 мкм (SiC), описанной выше, т.е. её яркость для звёзд АВГ увеличивается тогда, когда яркость особенности SiC уменьшается [88, 106].

Хотя предположение о MgS широко принято среди исследователей, выдвигаются и другие предположения. К примеру, Отсука и др. [39] показали, что излучение в континууме и величина особенности на 30 мкм коррелируют, и, таким образом, носитель должен быть один и тот же, а именно углеродные частицы. В работах [39, 107] показано, что особенность можно описать графитовыми пылинками, а в работе [108] предложены частицы аморфного углерода. Главное преимущество предположений об углеродном носителе — это то, что такое предположение не противоречит отсутствию корреляции между яркостью особенности и металличностью в ПТ, но пока нет однозначных данных о резонансе углеродных материалов на соответствующих длинах волн и его вариации при изменении температуры.

2.1.8. Континуум. Общепринято, что за возникновение ИК-континуума в звёздах АВГ, ППТ и ПТ ответственны частицы из аморфного углерода или ГАУ [87, 109–114], так как именно аморфный углерод удовлетворяет наблюдаемой зависимости коэффициента излучения от длины волны (на больших длинах волн) — $k \propto \lambda^{-1}$. Графитовые частицы тоже предлагаются для описания континуума, но для графитовых частиц такая зависимость имеет другой характер — $k \propto \lambda^{-2}$ согласно работе [115]. Меньшиков и др. [87] отмечают, что пылинки в ПТ должны быть неоднородными по составу, пористыми и рыхлыми, а также иметь несферическую форму. С точки зрения этих авторов, невозможно объяснить наблюдения только графитовым материалом, тогда как конгломераты, содержащие аморфный углерод, карбид кремния и сульфид магния, могут объяснить ИК-спектры, включая континуум, особенности на 11,3 и 30 мкм.

2.1.9. Поток в фотометрических полосах и показатели цвета. Фотометрические показатели цвета широко используются для исследования всех этапов эволюции звёзд АВГ — от поздних стадий горения до ПТ. Задействованы оптические показатели цвета, например, в системе *UBV*, и ИК, однако ИК-показатели цвета являются более информативными, в особенности для поздних стадий звёзд АВГ, так как в оптике подобные

объекты слишком слабые из-за окружающей их толстой пылевой оболочки. По диаграммам цвет–светимость, составленным по каталогу 2MASS в фотометрической системе *JHK*, можно, во-первых, разделить кислородные и углеродные звёзды, а во-вторых, установить на каком этапе эволюции с точки зрения производства пыли находится звезда, так как при увеличении потери массы звёзды и производства пыли светимость звёзд (например, в фильтре *K*) уменьшается, тогда как показатели цвета (например, *J–K*) возрастают. Однако зачастую присвоение звезде той или иной характеристики на основе системы *JHK* бывает неоднозначным. С появлением телескопа "Spitzer" специально для анализа звёзд АВГ и ППТ была разработана новая цветовая система в ИК-диапазоне — "манчестерская" [116]. В данной системе используются четыре полосы с центральными длинами волн на 6,4, 9,3, 16,5 и 21,5 мкм. Измерение потоков в указанных полосах производится по спектрам. "Манчестерские" показатели цвета, [6,4]–[9,3] и [16,5]–[21,5], используются для определения характеристик объектов и их классификации. Показатель цвета [6,4]–[9,3] у звёзд указывает на то, что доминирует в спектре — звёздная фотосфера или пыль, или, другими словами, служит мерой оптической толщины оболочки, а также мерой темпа производства пыли [117]. Показатель цвета [16,5]–[21,5] характеризует температуру пыли. По анализу "манчестерских" показателей цвета большой выборки звёзд АВГ было выявлено, что темпы производства пыли сравнимы для звёзд с низкой и высокой металличностью, за исключением отдельных звёзд с экстремально низкой металличностью ($[Fe/H] < -1,0$), для которых темп производства пыли ниже [28, 117]. Это противоречит результатам теоретического моделирования, согласно которым пыль производится при низкой металличности менее эффективно, чем при высокой [28].

Измерения в стандартных фотометрических полосах телескопа "Spitzer" на 3,6, 4,5, 5,8, 8,0, 24 мкм также используются для анализа. По показателям цвета [8]–[24] и [4,5]–[8] можно чётко разделить звёзды АВГ и ППТ, так как у последних оболочка уже начала удаляться и остывать, что приводит к увеличению этих показателей цвета. В то же время показатели цвета в ближнем ИК (например, *J–K*) уменьшаются, так как центральные источники становятся менее закрытыми пылью.

Слоан и др. [66] выявили, что ПТ, содержащие C_{60} , но не содержащие ПАУ, имеют узкий диапазон ИК-показателей цвета от ближнего ИК (K_s –[3,6]) до среднего ([8]–[24]), тогда как ПТ с C_{60} и ПАУ имеют более широкий диапазон. Возможно, это указывает на то, что условия, при которых наблюдаются фуллерены, отличны от условий, при которых наблюдаются ПАУ. В той же работе [66] показано, что C_{60} -ПТ являются более голубыми объектами по оптическим показателям цвета ([U–V], [B–V]), чем все остальные ППТ/ПТ, несмотря на то что ИК-показатели цвета указывают на значительное содержание пыли. В работе [66] делается вывод, что пыль и фуллерены пространственно разделены в таких объектах, т.е. пыли мало на луче зрения, на котором наблюдаются фуллерены. Авторы работы [66] выдвигают гипотезу, что разногласие между оптическими и ИК-показателями цвета может возникать из-за наличия диска в ПТ. Диск в ПТ может появляться, когда в центре находится двойная звезда [118]. Если диск виден наблюдателю "плашмя", то на луче зрения меньше поглощения, и оптические показатели цвета ниже по сравнению с ситуацией, когда диск виден "с ребра".

Дополнительно в положении "плашмя" наблюдаются фуллерены, которые по каким-то причинам пространственно расположены во внутренних частях этого диска, тогда как во внешних частях находятся пыль и ПАУ. Однако авторы указывают на то, что невысокое пространственное разрешение ИК-наблюдений не позволяет разделить разные части диска.

В работе Отсука и др. [77] показано, что в C_{60} -ПТ Lin 49 и ряде других C_{60} -ПТ в действительности наблюдается избыток светимости в центральной области в полосах ближнего ИК, указывающий на наличие плотной подструктуры вокруг центральной звезды — диска. В отличие от Слоан и др. [66], которые связывают возможность наблюдения фуллеренов с геометрическим положением диска, авторы работы [77] предполагают, что условия в диске (высокие плотность и температура) благоприятствуют формированию фуллеренов.

Объекты с особенностью на 21 мкм занимают противоположное фуллеренам положение на диаграмме [U–V]–[B–V] и являются "красными" объектами. Остальные ПТ и ППТ находятся между этими двумя типами. Температура объектов с особенностью на 21 мкм очень низка, средняя величина составляет около 7000 К, и они больше скрыты пылью, чем другие типы ППТ/ПТ, что указывает на их ранний эволюционный статус и, соответственно, наиболее начальное состояние пыли в них [66].

Болометрические величины C_{60} -ПТ пересекаются с объектами, где наблюдается особенность "big 11" и набор разных других особенностей, в том числе ПАУ, тогда как объекты с особенностями, подобными ПАУ (но не классические особенности ПАУ), и 21 мкм (за исключением ПТ класса D2) являются более яркими [66]. Разделение на группы по яркости, вероятно, указывает на общую природу внутри каждой группы.

2.2. Проявления эволюционных процессов

В данном разделе приведена дополнительная информация о поведении ИК-особенностей и их связи между собой, а также представлено резюме по имеющимся наблюдениям в виде схематической иллюстрации, по которой можно делать выводы об эволюции пыли от звёзд АВГ до ПТ (рис. 5). Вероятно, наибольший интерес представляет короткая стадия эволюции — ППТ и молодые ПТ, где наблюдается большое разнообразие ИК-спектров. На рисунке 5 намечены возможные взаимосвязи и эволюционные переходы между ИК-особенностями, хотя эти взаимосвязи не всегда однозначны, поэтому в некоторых случаях они отмечены штриховыми линиями.

На стадии звезды АВГ количество пыли, оценённое по показателям цвета, не зависит от металличности [117, 119]. С другой стороны, полосы ацетилена (C_2H_2) (самого первого прекурсора ПАУ и пыли), приходящиеся на длины волн $\approx 7,5$ и $13,7$ мкм, интенсивнее в объектах МО, чем в Галактических объектах [28]. Полосы, ассоциируемые с SiC (11,3 мкм) и MgS (30 мкм), напротив, слабее в звёздах МО. На дальнейших стадиях эволюции особенность на 30 мкм не зависит от металличности [103], а особенность SiC, наоборот, проявляется сильнее в объектах с низкой металличностью. Если для звёзд АВГ наблюдается антикорреляция между интенсивностями полос SiC и MgS, то для ППТ и ПТ эта корреляция отсутствует, но интенсивность полосы SiC уменьшается при увеличении жёсткости поля излучения. Для объяснения такой тенденции предполагают два сценария: 1) разрушение носителей данной полосы [82]; 2) уменьшение

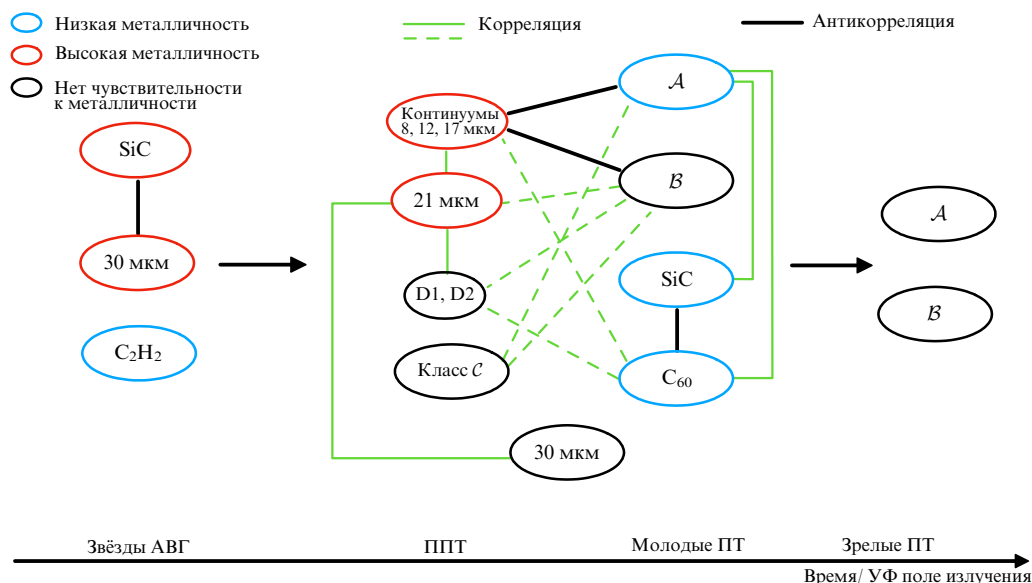


Рис. 5. Схематическое изображение наблюдательных особенностей на разных эволюционных стадиях от звезды АВГ до зрелой ПТ и связи между ними, отслеживаемые по наблюдениям. Красным цветом выделены особенности, которые более часто или более сильно проявляются в объектах высокой металличности, а синим — в объектах с низкой металличностью. Сплошные зелёные линии обозначают наличие корреляции между двумя особенностями, а чёрные сплошные — антикорреляции. Зелёные штриховые линии также обозначают наличие корреляций, но эти корреляции требуют дополнительных исследований.

температуры носителей полосы в связи с расширением оболочки и удалением от центрального источника [94]. Отметим, что процессы остывания и разрушения носителей полосы на 11,3 мкм могут происходить одновременно и оказывать совместное действие на наблюдаемое поведение данной полосы, таким образом, сценарии не исключают друг друга. Первый сценарий может быть дополнительно использован в поддержку гипотезы об образовании молекул фуллерена при воздействии УФ-излучения на SiC [120] с учётом того факта, что интенсивность полос фуллерена антикоррелирует с интенсивностью полосы SiC [39]. Гипотеза о связи между SiC и фуллеренами кажется весьма перспективной, так как оба этих компонента проявляются в большей степени в ППТ/ПТ с низкой металличностью. Более того, Отсука и др. [39] показали, что средний размер ПАУ в C₆₀-ПТ меньше, чем в ПТ без C₆₀, и спектры C₆₀-ПТ соответствуют классу А, а свою очередь Слоан и др. [66] отмечают, что большинство объектов с особенностью "big 11", т.е. предположительно с частицами SiC, тоже относятся к классу А. Добавим, что Сандстром и др. [121] провели исследования ИК-характеристик МЗС МО и пришли к выводу, что ПАУ в МО в среднем меньшего размера, чем в высокометаллических галактиках, и последнее связано не с разрушением, а с особенностями формирования. Таким образом, есть косвенные свидетельства того, что SiC и фуллерены могут быть связаны, но однозначных выводов о том, какая это связь и на каком этапе эволюции она формируется, сделать невозможно.

Согласно работе [66] большинство объектов с особенностью на 21 мкм (самые холодные и молодые среди ППТ/ПТ) делятся на две разные группы: группа, в которой спектр в диапазоне длин волн 11–14 мкм соответствует классу D1, и группа, в которой спектр соответствует классу D2. Объекты с особенностью на 21 мкм класса D2 обладают наиболее "голубыми" цветами, что указывает на большую прозрачность по сравнению с другими объектами. По мере эволюции ПТ

разветвляются на несколько типов по разным особенностям. Одним из характерных признаков деления является наличие или отсутствие фуллеренов. Вспомним, что объекты, содержащие фуллерены, также являются более "голубыми". Сложно сказать, имеют ли объекты с фуллеренами и с особенностью на 21 мкм эволюционную связь, но необходимо это иметь в виду. Объекты с особенностью на 21 мкм коррелируют с наличием континуумов на 8, 12 и 17 мкм. Видимо, наличие таких особенностей отражает "незрелое" состояние углеродных частиц, так как данные особенности проявляются только на начальных стадиях эволюции ППТ/ПТ. Далее, одновременно с возникновением полос ПАУ/фуллеренов и ростом их интенсивности, эти особенности исчезают или становятся менее заметными [91].

Объекты классов С и D являются предшественниками классов А и В, и, как предполагают авторы работы [62], частицы, ответственные за возникновение спектров С и D, представляют собой нечто среднее между мелкими пылинками и свободно летающими ПАУ, при этом частицы в объектах класса D, вероятно, имеют более выраженную ароматическую структуру, т.е. представляют собой комплекс из ПАУ. Йенсен и др. [65] предполагают, что классы С и D являются разными разветвлениями в эволюции пыли, а Карпентер и др. [61], в свою очередь, указывают на разветвление эволюции углеродных частиц — графитоподобную ("стопки" из планарных ПАУ) и фуллереноподобную.

В объектах класса В встречается полоса на 6,9 мкм, поэтому скорее всего такие объекты происходят от объектов класса D. Шеннон и др. [63] считают, что объекты класса А — это следующая стадия после класса В, появляющаяся при воздействии разрушающих факторов, в результате которого средний размер ПАУ становится меньше. Как бы там ни было, на конечном этапе эволюции, т.е. на поздних стадиях ПТ и в МЗС, ИК-спектры соответствуют классам А или В, тогда как всё разнообразие ИК-особенностей, наблюдающееся на ранних стадиях эволюции, пропадает.

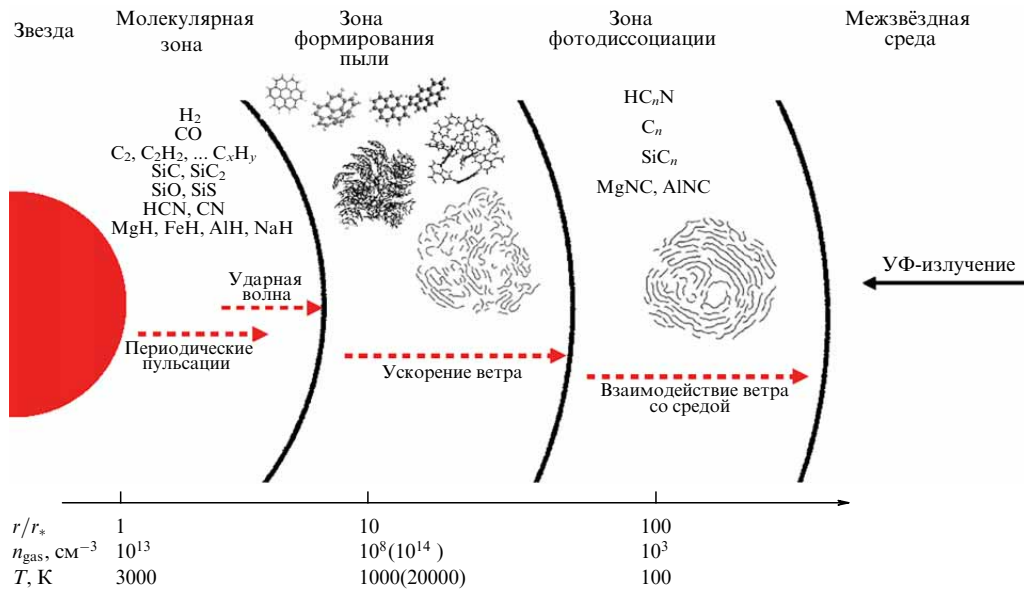


Рис. 6. Схематическое изображение оболочки углеродной звезды на стадии АВГ.

3. Физические условия в зонах формирования и эволюции пыли

Рассмотрим условия в оболочках звёзд АВГ, на поздних стадиях которых происходит формирование пыли, и эволюцию этих звёзд, заканчивающуюся стадией ПТ. На стадии звезды АВГ происходит горение гелия и водорода в оболочках, окружающих ядро звезды. На рисунке 6 схематически изображена оболочка звезды с делением на различные зоны по физическим параметрам и химическому составу. На рисунке указаны средние значения плотности (n_{gas}) и температуры (T) газа в зависимости от расстояния от звезды, выраженного в радиусах звезды⁶ (r_*).

Ближний к звезде слой (в пределах нескольких радиусов звезды) является зоной формирования молекул. В ней формируется множество молекул, включая H_2 , CO , C_2 , C_2H_2 , CN , HCN , SiC_2 , SiS , CS и др. Следующая зона — зона формирования пыли, где формируются твёрдые макрочастицы: SiC , ПАУ, аморфный углерод, MgS . Наблюдения с высоким разрешением совместно с теоретическими расчётами указывают на то, что зона формирования пыли находится на расстояниях до $\approx 20r_*$ [122]. По разным оценкам давление в оболочках звёзд находится в интервале 10^{-6} – 10 атм, плотность — 10^8 – 10^{13} cm^{-3} , и температура — 500 – 2000 К [123–127]. Наконец, за зоной формирования пыли следует обширная зона, постепенно переходящая в МЗС, в которой молекулы и пылинки, вынесенные звёздным ветром, подвергаются УФ-излучению МЗС, т.е. ФДО. В этой зоне присутствуют различные углеродные (C_n), полииновые (HC_nN) и цианополииновые цепочки (HC_nN), а также SiC_n , MgCN и другие молекулы, являющиеся продуктами фотореакций. Родительские звёзды на стадии АВГ слишком холодны для излучения в УФ-диапазоне, поэтому в ближних к звезде слоях такие молекулы не формируются.

Зона формирования пыли неоднородна по физическим характеристикам в пространстве и времени. Плотность и температура значительно падают при переходе от внутренних границ к внешним, при этом периодиче-

ские ударные волны, вызванные тепловыми пульсациями звезды, приводят к нестабильности условий. Согласно работе [23], при прохождении ударной волны температура в зоне формирования пыли может достигать ≈ 20000 К и плотность более 10^{14} cm^{-3} (что указано на рис. 6 в скобках для данной зоны), затем происходит остывание и адиабатическое расширение. Ударные волны могут значительно влиять на образование пыли. Их влияние подтверждают как теоретические исследования [124], так и наблюдения, из которых следует, что увеличение продолжительности и амплитуды пульсаций звезды приводит к увеличению количества пыли [117]. Несмотря на то что на фронте ударных волн образующаяся пыль (в частности, молекулы ПАУ) может быть разрушена, она снова образуется при последующем остывании. Ударные волны и связанные с ними динамические процессы могут приводить к образованию сгустков в зоне формирования пыли, что делает её ещё более неоднородной по характеристикам [128].

На сформировавшиеся в околозвёздной оболочке пылинки начинает действовать давление излучения от звезды. Пылинки эффективно поглощают и рассеивают излучение и начинают выталкиваться этим излучением во внешние слои. Передавая свой импульс частицам газа, пыль увлекает их за собой. В результате таких процессов происходит ускорение оболочки звезды и последующая потеря массы. Тепловые пульсации совместно с ускорением оболочки приводят к отрыву оболочки от звезды. Связь между темпом потери массы и разными параметрами звезды (масса, светимость, температура, избыток углерода, металличность) неоднозначна [129]. Одним из параметров, влияющих на темп потери массы, является эффективная температура звезды, при уменьшении которой темп потери массы увеличивается [130, 131]. Также определяющими параметрами являются масса и светимость звезды [130]. Вахтер и др. [130] полагают, что эмпирическая корреляция между темпом потери массы и периодом пульсаций возникает из-за связи период–светимость.

Вахтер и др. [132] и Камминг и др. [133] пришли к выводу, что темп потери массы практически не зависит от металличности звезды. Более того, Вентура и др. [134] сделали вывод о том, что и объём производства углерод-

⁶ За радиус звезды берётся радиус конвективной оболочки.

ной пыли не зависит от металличности. Вместе с этим Вахтер и др. [132] указывают на то, что, в отличие от сравнимых темпов потери массы для солнечной металличности, БМО и ММО, скорости звёздных ветров для указанных объектов разных металличностей ниже в несколько раз. Дополнительно Маттссон и др. [24] выдвигает предположение, что может существовать порог плотности элементов, конденсирующихся в пылинки, ниже которого их формирование происходит неэффективно. Такие теоретические заключения согласуются с наблюдательными данными. Выше мы указывали, что Слоан и др. [117] выявили эмпирическую связь между темпом потери массы и параметрами пульсации, но не с металличностью, за исключением звёзд с экстремально низкой металличностью [28].

В некоторых моделях предполагается, что скорость ветра пропорциональна избытку углерода по отношению к кислороду, а также отношению массы пыли к массе газа [112, 129], но эта связь не видна по наблюдениям. Хофнер [128] полагает, что широкий диапазон параметров наблюдаемых звёзд, таких как, например, масса, возраст, начальный химический состав, приводит к размыванию потенциальной корреляции, поэтому отсутствие наблюдательной корреляции объяснимо. Но, ввиду того что объём сформировавшейся пыли при низкой металличности всё же меньше [135], ускорение ветра должно происходить медленнее.

Когда заканчивается горение водорода и гелия в слоевых источниках, звезда переходит на стадию ППТ. Слои, в которых происходило горение, начинают ускоренно сжиматься, и T_{eff} постепенно повышается при неизменной светимости. При появлении области ионизированного водорода ППТ переходит в ПТ. Для большинства ПТ характерна "двухоболочечная" структура. Оболочки возникают в результате действия разных процессов: ионизации и звёздного ветра. Меллемма [137] обозначил такие оболочки буквами I и W (сокр. от англ. "ionization" и "wind" соответственно). На рисунке 7 приведено изображение ПТ NGC 2022, где указаны эти оболочки и другие зоны, характерные для ПТ. Основная масса, потерянная звездой на фазе АВГ, образует плотную внешнюю оболочку, которую ещё называют гало. Данная оболочка отдаляется от звезды со скоростью $\sim 10-15 \text{ км с}^{-1}$ [138]. Интенсивное излучение от центрального источника, проникая в гало, ионизирует находящееся там вещество. На границе взаимодействия излучения с нетронутым веществом создаются условия для ударной волны и соответствующего ударного фронта. За фронтом ударной волны присутствует ФДО, куда проникают фотоны с энергией менее 13,6 эВ, что может провоцировать реструктуризацию углеродных частиц и множество фотореакций. Фронт ударной волны, а вместе с ним фронт фотоионизации отдаляются от звезды со временем, расширяя внутреннюю область Н П, а также уплотняя и разогревая вещество гало вблизи фронта. Взаимодействие излучения и вещества гало определяет структуру молодых ПТ.

По мере эволюции и нагрева центрального источника начинает развиваться быстрый ($> 1000 \text{ км с}^{-1}$), но разреженный звёздный ветер, ускоряющийся за счёт поглощения и рассеяния излучения тяжёлыми элементами [139]. Создаётся вторая ударная волна, распространяющаяся внутрь области Н П. За фронтом этой ударной волны в результате термализации энергии мощной обратной ударной волны достигается очень высокая температура, $\sim 10^6-10^7 \text{ К}$, и среда излучает в рентгеновском диапазоне. Тепловое давление в области Н П, с одной

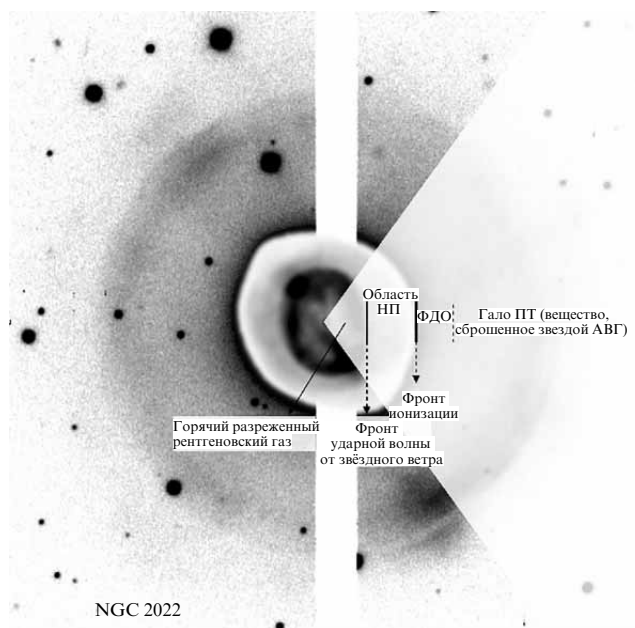


Рис. 7. Изображение ПТ NGC 2022 в линии [O III] с указанием основных зон, характерных для ПТ. (Изображение было получено на Телескопе новой технологии (NTT, Чили) в работе [136] и предоставлено Романо Корради.)

стороны, выталкивает и ускоряет вещество в наружных областях, а с другой стороны, тормозит его во внутренних областях, что приводит к уплотнению вещества на фронте ударной волны звёздного ветра. Тогда ПТ обретает вид классической "двухоболочечной" структуры. "Двухоболочечная" структура относительно стабильна и исчезает только либо на фазе остывания центрального источника и рекомбинации вещества ПТ, либо если W-оболочка догоняет I-оболочку [140]. Скорость расширения I-оболочки растёт сначала быстро, от ≈ 10 до $\approx 35 \text{ км с}^{-1}$ на стадиях ПТ до $T_{\text{eff}} \approx 50000 \text{ К}$, и далее медленнее, достигая $40-45 \text{ км с}^{-1}$ при $T_{\text{eff}} \approx 100000 \text{ К}$ [141]. Ускорение оболочки, по всей видимости, связано с градиентом плотности вещества в гало, а это подразумевает, что темпы выброса вещества нарастают к концу стадии основной потери массы. Скорость расширения W-оболочки, напротив, сначала практически неизменна и находится на уровне $< 10 \text{ км с}^{-1}$, а позже начинает расти вплоть до $30-40 \text{ км с}^{-1}$ из-за большого давления внутри оболочки, и данная скорость может превысить скорость I-оболочки [141]. В низкометаллических ПТ скорость расширения внешней I-оболочки выше, чем для ПТ солнечной металличности, из-за большей электронной плотности, тогда как скорость расширения внутренней W-оболочки, напротив, меньше, так как скорость ветра регулируется количеством тяжёлых элементов [142].

4. Формирование и эволюция углеродных частиц: современные теоретические представления и эксперименты

4.1. От C_2H_2 к пыли

Основа теории формирования углеродных частиц в оболочках звёзд заимствована во многом из теорий горения, базирующихся на экспериментах, проводимых

при стандартных условиях горения, хотя условия в оболочках звёзд отличаются от тех, которые достигаются в лабораториях. В газе оболочек звёзд среди малоатомных углеводородов доминируют молекулы ацетилена, поэтому именно эти молекулы считаются первыми прекурсорами пыли. Последовательность процессов, которая ведёт к образованию пыли, приблизительно следующая: ацетилен \rightarrow бензол, полиины \rightarrow ПАУ, наночасти, фуллерены \rightarrow ПАУ-кластеры \rightarrow пылинки (сажа). Ниже будут описаны этапы данной последовательности, хотя в литературе предложены альтернативные последовательности роста пылинок [143].

4.1.1. Бензольное кольцо. Молекулы ацетилена участвуют в цепочке химических реакций, ведущих к образованию ароматического кольца — молекулы бензола (C_6H_6). В литературе предложено несколько путей: рекомбинация пропаргила ($C_3H_3^+$) [144], последовательность реакций диссоциации водорода и присоединения ацетилена (НАСА — Hydrogen Abstraction–Acetylene Addition) [145] и реакция между 1,3-бутадиенилом (C_4H_6) и ацетиленом [146]. Все три реакции могут протекать одновременно с разной эффективностью как в оболочках звёзд, так и в лабораторных реакторах, что ведёт к неоднозначности определения основного канала [147]. Согласно работе [124], в оболочках звёзд доминирующей среди указанных реакций является рекомбинация пропаргила, но с экспериментальной точки зрения, в отличие от НАСА, данный механизм практически не изучен. Помимо указанных выше, предложены и другие механизмы образования бензола, например, образование бензольных колец на поверхности частиц карбида кремния в качестве подложки и катализатора [148]. Катализатором для образования бензола могут служить сами молекулы ПАУ. То есть, сформировавшись, молекула ПАУ порождает себе подобные, на чём основан карбокатализ [149]. Формирование бензольного кольца с участием катализаторов распространено в промышленности, но рассмотрение этих реакций в астрохимии — новое направление, и значение каталитических реакций для астрохимии пока недооценено, но высока вероятность их эффективного протекания в оболочках звёзд и других объектах МЗС.

Черничаро [150] считает, что образование бензола происходит не только в оболочке звезды на стадии АВГ, но и далее в ППТ, когда появляется УФ-излучение, инициирующее множество других химических реакций. Среди них — полимеризация полиинов (углеродных цепочек типа HC_nH), наблюдающихся в ППТ наряду с бензолом. Крестинин и др. [151] на основе экспериментов с полиинами полагают, что объединение полиинов ведёт не столько к образованию бензольных колец, как к образованию ПАУ и более сложных макромолекул из бензола/ПАУ, соединённых между собой алифатическими связями, и сажи. Шершнефф [124] считает, что такой механизм может быть эффективен для звёзд R СтВ, богатых водородом. В свою очередь, Вудс [152] для условий ППТ предложил модель, согласно которой бензол может появляться в результате цепочки ион-молекулярных реакций, включающей диссоциацию HCO^+ , ассоциативные реакции ацетилена с $C_2H_3^+$ и $C_4H_3^+$ и др. Далее будет считаться, что основное формирование ароматических молекул и пыли происходит на стадии звезды АВГ.

4.1.2. ПАУ с двумя и более кольцами. Как только в среде появились бензольные кольца, начинают протекать про-

цессы роста ПАУ и их кластеризации. Термин "рост" предполагает образование химических связей между периферийными атомами углерода в молекуле ПАУ и другими молекулами (линейными углеводородами или ароматическими), в результате чего происходит увеличение плоскости искомой молекулы. Под "кластеризацией" подразумевается процесс объединения двух или нескольких ПАУ за счёт образования между ними химических или физических связей. Объединение может происходить при любых взаимных расположениях ПАУ, и, таким образом, этот процесс ведёт к появлению объёмных структур [153].

Рост ПАУ может происходить за счёт механизма НАСА. Существуют варианты протекания этого механизма, "классическим" из которых является следующая цепочка (рис. 8а):

- дегидрогенизация бензола и образование фенила ($C_6H_5^+$);
- присоединение ацетилена;
- дегидрогенизация;
- присоединение ацетилена;
- замыкание кольца или, другими словами, циклизация, сопровождающаяся очередной дегидрогенизацией.

Дальнейшее последовательное присоединение молекул ацетилена должно приводить к образованию молекул антрацена и фенантрена (обе $C_{14}H_{10}$), однако эксперименты и квантово-механические расчёты показывают, что присоединение происходит следующим образом: новое кольцо как бы надстраивается над нафталином и соединяет оба его кольца, при этом кольцо получается не шести-, а пятичленным (рис. 8б) [154, 155]. Такая молекула называется аценафталином ($C_{12}H_8$). Пятичленные кольца впоследствии ведут к искривлению плоскости ПАУ, и, следовательно, классический сценарий НАСА не ведёт к образованию крупных планарных ПАУ.

Альтернативный путь образования нафталина — конденсация двух фенилов и образование бифенила и дальнейшие дегидрогенизация, присоединение ацетилена и циклизация (рис. 8в). В данном случае третье кольцо будет шестичленным, и конечная молекула — фенантрен. Последующие дегидрогенизация и присоединение ацетилена ведут к четырёхколенной молекуле — пирену ($C_{16}H_{10}$). Этот путь был подтверждён квантово-механическими расчётами и экспериментально [156, 157]. По сути такой механизм можно отнести к механизму НАСА, поскольку осуществляется та же последовательность реакций.

Схожим с НАСА механизмом является механизм НАВА (Hydrogen Abstraction–Vinylacetylene Addition), к бензолу после абстракции атома водорода присоединяется молекула винилацетилена (C_4H_4) [158]. Изначально эти две молекулы создают ван-дер-ваальсов комплекс, который впоследствии претерпевает изомеризацию, переходит в устойчивое состояние и образует молекулу нафталина (рис. 8г). Благодаря тому что образование комплекса фенил–винилацетилен проходит безбарьерно, данный механизм работает даже при низких температурах, соответствующих условиям молекулярных облаков [158]. Таким образом, НАВА является более универсальным механизмом, чем НАСА. Более того, в отличие от НАСА, благодаря механизму НАВА может происходить дальнейший рост ПАУ с шестичленными кольцами, т.е. после нафталина возможно образование антрацена, фенантрена, фенацена ($C_{18}H_{12}$), трифенилена ($C_{18}H_{12}$), гелицена ($C_{18}H_{12}$) и других ПАУ [157, 159]. На рисунке 8г приведены пути к фенацену и трифенилену. Эксперименты, в которых отслеживается

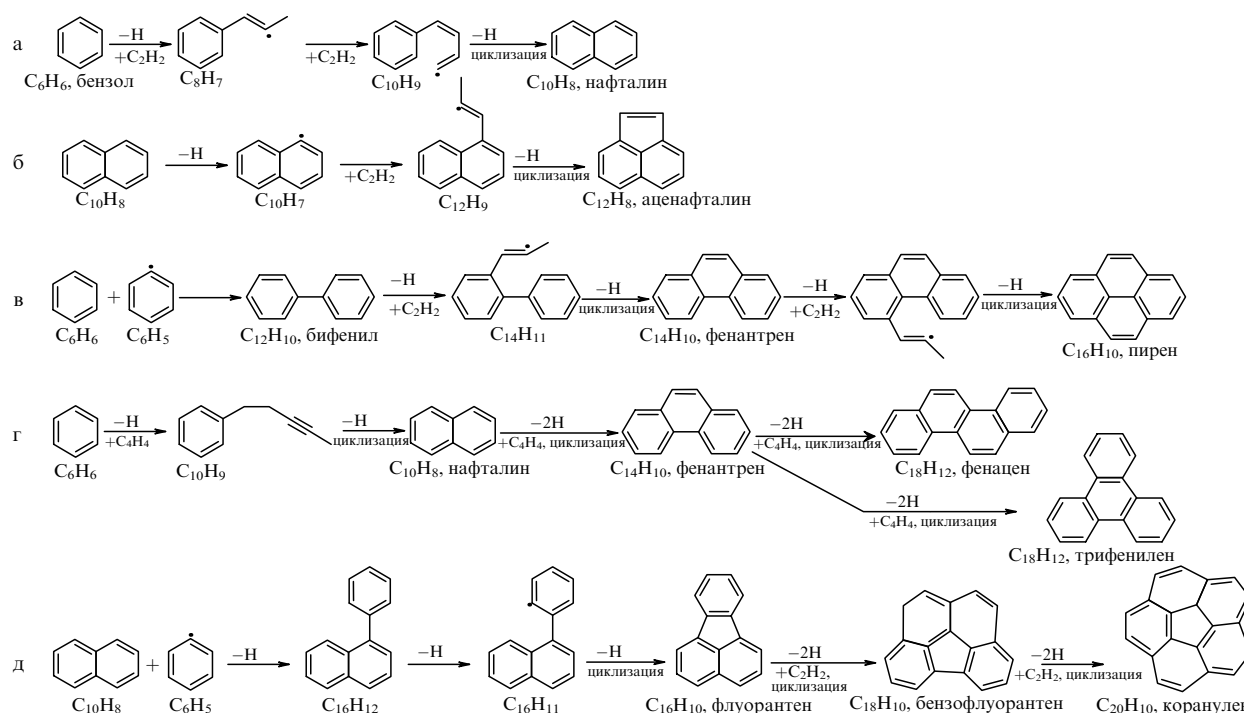


Рис. 8. Примеры цепочек реакций, ведущих к росту ПАУ: (а) цепочка НАСА, ведущая от бензола к нафталину; (б) цепочка НАСА, ведущая от нафталина к аценафталину; (в) цепочка реакций НАСА, ведущая от бензола и фенила последовательно через бифенил к фенантрону и пирену; (г) цепочка реакций НАВА, ведущая от бензола через нафталин к фенацену и трифенилену; (д) цепочка реакций РАС, ведущая от нафталина к флуорантену, и далее цепочка реакций НАСА, ведущая к бензофлуорантену и коранулену.

действие рассматриваемого механизма, проводились в реакторах как при высоких температурах, соответствующих оболочкам звёзд АВГ [160], так и при экстремально низких температурах, около 10 К [158].

Конкурирующим механизмом для НАСА и НАВА является механизм РАС (Phenyl Addition-dehydroCyclization), заключающийся в последовательных реакциях присоединения фенила, дегидрогенизации и замыкания ароматического кольца [161, 162]. Фенил может присоединиться к двум атомам углерода молекулы бифенила, и после нескольких реакций дегидрогенизации смыкается новое кольцо в центре между тремя начальными и образуется молекула трифенилена ($C_{18}H_{12}$). Если же фенил присоединяется к молекуле нафталина, та же последовательность реакций ведёт к образованию флуорантена ($C_{16}H_{10}$), у которого центральное кольцо — пятичленное (рис. 8д). Оба пути были отслежены экспериментально [161, 163]. Если молекула трифенилена является прекурсором планарных ПАУ, то молекула флуорантена ведёт к образованию объёмных молекул и частиц, включая молекулы фуллерена, о чём будет сказано ниже. Надо отметить, что факторы, определяющие, какой из механизмов: НАСА, НАВА или РАС — доминирует в зоне образования пыли, неизвестны.

Рассмотренные реакции способствуют росту ПАУ из более мелких составляющих (так называемый механизм "bottom-up"), тогда как ПАУ могут быть образованы в МЗС при разрушении или трансформации более крупных частиц (механизм "top-down"). Мерино и др. [125] провели эксперимент, в котором поверхность карбида кремния, покрытая тонким слоем графита, подвергалась бомбардировке водородным пучком в условиях, имитирующих оболочку звезды АВГ. В результате были зафиксированы молекулы бензола и ПАУ, откуда сделан вывод, что на поверхности SiC образуется не только бензольное кольцо (как в работе [148]), но также и ПАУ.

Скотт и др. [34] зафиксировали ПАУ среди продуктов диссоциации частиц ГАУ. Таким образом, механизмы "top-down" можно рассматривать как дополнительный источник ПАУ.

4.1.3. Фуллерены. Молекулы фуллерена зачастую присутствуют среди продуктов горения углеводородов одновременно с ПАУ и сажей. В работах [164, 165] отмечается, что фуллерены с большей вероятностью образуются при низких давлениях. В литературе выдвигается несколько теорий, как и при каких условиях происходит образование этих молекул, но далеко не все они применимы к космическим условиям. Так же как и в случае с ПАУ, механизмы образования можно разделить на две категории: "bottom-up" и "top-down".

Начнём с механизмов "bottom-up". В промышленности фуллерены получают из углеродных паров при высокой температуре. Углеродный пар может быть создан разными способами: нагрет и испарение графитовых стержней, лазерная абляция графитовых пластин, электродуговой разряд между графитовыми электродами, горение углеводородов. Подразумевается, что в перечисленных методах фуллерены собираются из мелких составляющих, но как именно происходит процесс сборки, не определено. Данк и др. [166] предложили механизм сборки, названный "Closed Network Growth" (CNG) (дословно с англ. "рост закрытой сети"). Согласно данному механизму сначала появляются наименьшие фуллерены ($N_C = 24, 28$), а потом эти фуллерены растут путём присоединения атомарного углерода и молекул диатомного углерода, т.е., по сути, первые образовавшиеся фуллерены катализируют рост высших фуллеренов. В последующих работах Данк и др. [167] показали, что такой процесс должен протекать в условиях оболочек звёзд в присутствии водорода и/или кислорода. Более того, они показали, что помимо чистых фуллеренов в

условиях оболочек звёзд, а также в остатках сверхновых высока вероятность образования металлофуллеренов.

В работах Данка и др. [166, 167] предложена только общая концепция, но необходима детализация цепочки химических реакций, протекающих в процессе сборки фуллеренов. Выше уже было показано, что механизм РАС может привести к образованию молекулы флуорантена ($C_{16}H_{10}$). Флуорантен может вырасти до коранулена ($C_{20}H_{10}$) по пути механизма НАСА, т.е. в результате последовательности реакций отрыва водорода и присоединения ацетиленов (рис. 8д). Эта цепочка реакций исследована и теоретически, и экспериментально [168]. В работе [169] численно продемонстрирован дальнейший путь от коранулена до "наночашки" $C_{40}H_{10}$. Такая наночашка имеет полусферическую форму, обладает той же структурой и геометрией, как и молекула фуллерена C_{60} , и составляет 2/3 от C_{60} . Авторы работы [169] полагают, что наночашка является прекурсором фуллерена. Основным механизмом роста $C_{20}H_{10}$ до $C_{40}H_{10}$ является НАВА. Сначала происходит формирование молекулы пентакоранулена $C_{40}H_{20}$ за счёт пяти последовательных реакций присоединения молекул винилацетиленов, сопровождающихся дегидрогенизацией, и далее молекула пентакоранулена испытывает несколько циклов дегидрогенизации и циклизации, в результате чего образуется наночашка $C_{40}H_{10}$. Таким образом, в работе [169] представлена поэтапная схема механизма "bottom-up" образования прекурсора фуллерена C_{60} , который может реализовываться в оболочках углеродных звёзд АВГ, однако оценку эффективности этого сценария ещё предстоит сделать.

Хоманн [170] предложил несколько иной путь формирования фуллеренов для плазм с низким давлением. Согласно данному механизму сначала происходит "сшивка" двух плоских ПАУ за счёт образования одной связи между двумя периферийными кольцами. Затем между этими кольцами образуется вторая связь и замыкается новое кольцо, которое оказывается пятичленным. Далее происходит последовательная цепочка реакций НАСА и циклодегидрогенизации, за счёт чего образуются новые кольца, преимущественно пятичленные. Увеличение количества пятичленных колец ведёт к более сильному искривлению молекулы и её постепенному сворачиванию в фуллерен.

В астрономических работах большую популярность приобрели идеи альтернативных механизмов формирования фуллеренов — "top-down". Они важны для расширения потенциальных источников фуллеренов и моделирования эволюции углеродных частиц как в звёздных оболочках, так и за их пределами. Механизмы "top-down" подкрепляются, в первую очередь, экспериментами, в которых фуллерены образуются в результате разрушения более крупных частиц. В работе [171] в качестве таких частиц использовался монослой графена, подвергавшийся облучению из электронной пушки. Этот процесс отслеживался с помощью электронного микроскопа. На снимках в режиме реального времени были видны изменения структуры графенового слоя и его преобразование в фуллерен. В работе Жен и др. [172] вместо графена были взяты молекулы ПАУ, $C_{66}H_{26}$ и $C_{78}H_{26}$, облучаемые лазером УФ-диапазона. Продукты диссоциации фиксировались с помощью масс-спектрометра, и среди продуктов были молекулы фуллерена C_{60} и C_{70} . В эксперименте [34] внешнему воздействию (УФ-излучению) подвергались волокна ГАУ, и на масс-спектрометре среди продуктов диссоциации было зафиксировано множество различных ПАУ (нафталин, $C_{10}H_8$, антрацен, $C_{14}H_{10}$ и др.) и фуллерены C_{60} и C_{70} .

На основании результатов этих экспериментов выдвинуто несколько сценариев формирования фуллеренов и разработано несколько моделей: Мицелотта и др. [173] предложили модель формирования фуллеренов из ГАУ, в работах [174, 175] разработаны модели формирования фуллеренов из ПАУ. Однако вероятно, что механизмы "bottom-up" и "top-down" сосуществуют в космических объектах одновременно с вариацией вклада каждого из них в зависимости от конкретных физических условий.

4.1.4. Макрочастицы (пыль). Следующим этапом после формирования и роста ПАУ и/или фуллеренов является этап их кластеризации и образования макрочастиц. Во время первых стадий горения при различных условиях могут наблюдаться следующие частицы: 1) полиины, положительно заряженные и нейтральные (диаметр d порядка 1 нм); 2) ПАУ и графены в широком диапазоне размеров, также положительно заряженные и нейтральные ($d \sim 1$ нм); 3) фуллерены ($d \sim 1$ нм); 4) наноразмерные зародыши сажи или ПАУ-кластеры ($d \sim 1-6$ нм), в которых отсутствует регулярная структура; впоследствии эти зародыши становятся ядрами частиц сажи и, вероятно, также межзвёздной пыли; 5) частично зрелые частицы ($d \sim 1-6$ нм), в которых присутствуют слоистые графитоподобные структуры; 6) первичные наночастицы со зрелой, наиболее регулярной структурой ($d > 6$ нм) [143]. Макрочастицами считаются частицы из пунктов 4 и далее. Отметим, что отношение водорода к углероду достигает высоких значений у самых незрелых частиц (пункт 4) и составляет около 0,7, а потом данное отношение падает по мере созревания сажи [143].

При формировании сажи ПАУ в качестве прекурсоров являются более предпочтительными, чем алифатические углеводороды, что выяснено при измерении выхода сажи при различных составах топлива [176]. Пока идентификация крупных ПАУ была затруднена, считалось, что в сажеобразовании участвуют только ПАУ, состоящие всего из нескольких (2–5) ароматических колец [177], но с развитием технических возможностей стало очевидно, что в процессе горения присутствуют крупные ПАУ вплоть до 80–100 атомов углерода [178], и все они могут образовывать кластеры, хотя, возможно, формирование кластеров из более крупных ПАУ занимает больше времени, и, соответственно, они более редки [179]. В отличие от образования ПАУ, моделирование и экспериментальное отслеживание процесса их кластеризации более затруднено, несмотря на большое количество исследований в этом направлении [180–182]. Остаётся неясным, как именно образуются ПАУ-кластеры, или, другими словами, первичные зародыши сажи. Димеры и кластеры, образовавшиеся за счёт только физических (ван-дер-ваальсовых) связей, нестабильны, и темп обратной реакции превышает темпы прямой реакции.

Чашеподобные ПАУ являются поляризованными, и, как следствие, соединения с ними обладают большими энергиями связи, чем соединения с планарными ПАУ. При условии, что чашеподобные ПАУ присутствуют или даже преобладают в среде, процесс их кластеризации может быть доминирующим при росте пыли [187]. Однако и в данном случае темп сажеобразования слишком низкий для объяснения объёма образуемой сажи.

Так как темпы физической кластеризации и роста сажи за счёт химических реакций, например, по пути механизма НАСА, не достигают требуемых значений [143, 188], стал исследоваться вопрос о комбинации этих про-

цессов. Предполагается, что при образовании физического ПАУ-кластера между ПАУ должен возникнуть некий химический мост, за счёт которого данный кластер стабилизируется.

Компактные ПАУ (например, коронен), формирующиеся при горении, в нейтральной форме не являются химически активными, но реакции между их радикалами могут быть очень эффективными. ПАУ, потерявшие один атом водорода, становятся высокореактивными согласно квантово-механическим расчётам [183]. Эти ПАУ могут образовывать димеры как с такими же радикалами, так и с не радикалами ПАУ [184, 185] (рис. 9а). ПАУ с пятичленными кольцами являются более активными для образования димеров, чем обычные ПАУ [186]. Френклах и Мебель [182] предложили "Е-мост", представляющий собой две связи между двумя свободными периферийными атомами углерода в ПАУ, и при таком мосте обязательно наличие периферийного пятичленного кольца. В качестве моста могут выступать алифатические связи между ароматическими молекулами [189–191], что считается наиболее приближенным вариантом для оболочек звёзд. ПАУ с алкильными группами и алифатическими мостами были обнаружены экспериментально как в реакторах горения с атмосферным давлением [192], так и в астрохимических экспериментах, в которых выявлено наличие одновременно ароматических и алифатических связей в образовавшихся частицах [193]. При таком формировании ПАУ-кластеров образующиеся частицы характеризуются высоким отношением Н/С, что важно для оболочек звёзд, так как в них содержание водорода является высоким. Предполагается, что главную роль в образовании алифатических мостов играют метильные группы, присоединённые к ПАУ, отрыв атома водорода от которых ведёт к возникновению активного радикала. Молекулы ПАУ могут быть связаны и посредством молекул ацетиленов и полиацетиленовых цепочек [194, 195]. Отметим также, что стабильность алифатически связанных ПАУ возрастает, если в ПАУ есть пятичленные кольца [196].

Согласно работе [182] "Е-мост" кинетически стабилен, в отличие от одиночных алифатических мостов и других типов соединений (например, зигзагообразного), однако, вероятно, в условиях оболочек звёзд алифатические мосты всё же могут выживать. В работе [173] представлена модель образования и эволюции наноразмерных ароматических кластеров, представляющих собой, можно сказать, ПАУ-кластеры, образованные за счёт алифатических связей (рис. 9б). Авторы предполагают, что такие

частицы служат прекурсорами для межзвёздных фуллеренов, так как при взаимодействии с УФ-излучением они теряют наиболее слабые алифатические связи и постепенно образуют закрытую фуллереноподобную форму. Более обширную модель, основанную на той же идее формирования первичных частиц сажи из ПАУ за счёт соединения их алифатическими связями, представил Джонс в цикле работ [59, 197, 198].

Образовавшиеся пылинки, согласно моделям Джонса и Мицелотты [59, 173, 197, 198], имеют высокие отношения Н/С и гибридизации связей sp^3/sp^2 . Далее эти пылинки эволюционируют под воздействием УФ-поля излучения в ППТ и ПТ. Структура трансформируется, переходя из хаотического аморфного состояния с малым количеством ароматических островков в более упорядоченную структуру с преимущественно ароматическими связями. Такой переход отслеживается по отношению интенсивностей полос на 3,3 и 3,4 мкм [58]. При протекании данного процесса от пылинок могут отделяться различные фрагменты, включая свободно летающие ПАУ и фуллерены [34]. Несмотря на общий механизм образования, строительные блоки частиц при низкой и солнечной металличности будут, скорее всего, разными. Отношение между количеством непланарных (пятичленных) ПАУ и планарных (шестичленных) ПАУ, вероятно, будет выше в первом случае, что ведёт, главным образом, к возможности формирования фуллеренов.

После образования первичных частиц сажи, обладающих формой, близкой к сферической, начинается процесс агрегации и коагуляции этих частиц, в результате чего формируются несферические конгломераты. Эффективность такого процесса в значительной степени зависит от частоты столкновения частиц, т.е. от концентрации. Следовательно, в условиях звёздных оболочек, вероятно, он протекает не столь эффективно, как в реакторах горения, но, как отмечалось в работе [87], частицы пыли должны быть несимметричными для объяснения наблюдательных характеристик в ПТ, поэтому допустимо, что крупные пылинки представляют собой несимметричные конгломераты из первичных частиц сажи с высокой степенью фрактальности, аналогичные тем, которые наблюдаются в лабораториях (рис. 9в).

4.2. Влияние кислорода на образование и эволюцию полициклических ароматических углеводородов, фуллеренов и пыли

Выявление факторов, которые существенно влияют на конечные продукты, получаемые в экспериментах, важно

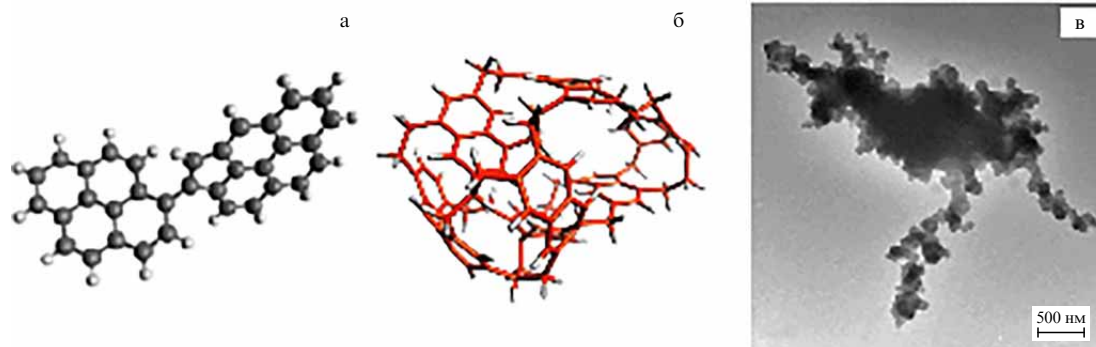


Рис. 9. (а) Модельное изображение ПАУ-кластера, образованного за счёт алифатического моста. (Перепечатано с соответствующим разрешением из статьи Менона и др. [191]. Авторские права 2020 г. Американского химического общества.) (б) Модельное изображение ароматической частицы. (Иллюстрация взята из работы Мицелотты и др. (2012 г.) [173] с разрешения AAS.) (в) Изображение частицы сажи, сделанное с помощью микроскопа. (Взято из работы Ли и др. (2009 г.) [199] с разрешения AGU.)

для установления причины неоднородного распределения фуллеренов и ПАУ по ППТ/ПТ с разными характеристиками, в частности, металличностью. По результатам экспериментов отмечается, что такие факторы, как температура, давление, начальный состав газа, влияют как на количество ПАУ, фуллеренов и пыли, так и на структуру пыли (см. раздел 5, а также работы [164, 165, 200]). Одним из ключевых элементов в составе газа для процесса горения является кислород. В экспериментальных работах неоднократно отмечалось значимое влияние кислорода на ход горения и конечные продукты, в том числе на формирование молекул фуллерена [165, 201]. При химическом моделировании оболочек звёзд АВГ, как правило, считается, что весь кислород заключён в СО, поэтому в реакциях углеродной химии он не участвует [202]. Однако Шершнефф [23] полагает, что атомарный кислород может появляться в газе за счёт столкновительной диссоциации СО при прохождении периодических ударных волн. В некоторых работах (например, [23, 203]) кислород включён в сетку химических реакций моделей оболочек звёзд АВГ, благодаря чему удаётся объяснить формирование наблюдаемых в этих условиях молекул воды. Не исключено, что, помимо реакций формирования воды, кислород участвует и в реакциях углеродной химии, ведущих к образованию ПАУ, фуллеренов и пыли. В подавляющем числе астрохимических экспериментов влияние кислорода тоже не обсуждается, хотя он может присутствовать среди реагентов. В качестве исключения можно отметить эксперименты [60, 61] (см. раздел 5), в которых указано, что кислород не входит в конечный состав сажи. В настоящем разделе влияние кислорода на формирование углеродных частиц рассмотрено более детально, чтобы подчеркнуть его потенциально весомую роль в данном процессе в оболочках звёзд АВГ, тогда как в разделе 5, посвящённом астрохимическим экспериментам, роль кислорода рассматриваться не будет.

Функция кислорода в горении углеводородов не установлена однозначно. В литературе имеются многосторонние сведения о его влиянии, по которым можно судить о сложности этого влияния. Во-первых, кислород влияет на образование ПАУ. В работе [182] делается вывод о том, что при накачке реакторов горения кислородом происходит окисление ПАУ и уменьшение их размеров. В работе [204] подчёркивается, что учёт кислородной химии необходим для корректного описания результатов экспериментов с его добавлением. Тогда как в отсутствие кислорода рост ПАУ происходит за счёт присоединения ацетилена (механизм НАСА), в присутствии кислорода присоединение ацетилена конкурирует с присоединением кислорода. Присоединение кислорода ведёт к образованию гетерогенных (с кислородом) пятичленных колец в ПАУ, которые могут участвовать в химических реакциях отличным образом от гомогенных ПАУ. Авторы [204] выдвигают предположение, что изогнутые ПАУ (с пятичленными кольцами) с большей вероятностью образуют димеры по сравнению с их плоскими аналогами. По мнению авторов, структура и форма ПАУ являются более важными факторами для димеризации и дальнейшей кластеризации, чем их размер. Лиу и др. [205], напротив, утверждают, что кислородосодержащие ПАУ могут значительно влиять на химию ПАУ, но не на процесс инициации кластеризации и сажеобразования. Того же мнения придерживаются Френкля и др. [188], считающие, что кислород не может быть ключевым элементом для процесса кластеризации ПАУ.

Возможно, кислород не является ключевым для инициации процесса кластеризации ПАУ, но он оказывает существенное влияние на количество и структуру образуемой сажи. В работе [206] экспериментально показано, что добавление кислорода в топливо в умеренных количествах приводит к тому, что образование сажи начинается при более низких температурах ($\lesssim 2000$ К) по сравнению с пиролизом, однако при более высоких температурах добавление кислорода, наоборот, подавляет сажеобразование. Особенно сильно воздействие кислорода проявилось в ацетиленовом газе. Увеличение объёма сажи и более быстрое её появление при добавлении кислорода в топлива наблюдалось и в работе [207].

В эксперименте, проведённом в работе [208], частицы меньших размеров и меньший объём сажи были сформированы при добавлении кислорода, несмотря на то что при этом количество прекурсоров ароматических молекул (например, ацетилена) и малых ароматических ПАУ было больше. Таким образом, большее количество ацетилена и малых ПАУ не гарантирует большего количества крупных частиц.

Далее, в работе [209] было показано экспериментально, что добавление кислорода до определённого уровня приводит к увеличению объёма сажи, а потом, наоборот, подавляет сажеобразование. В работе [210] также отслежена немонотонность зависимости выхода сажи в зависимости от количества добавляемого кислорода, сначала наблюдается рост, а потом — спад. Авторы полагают, что добавление кислорода нарушает баланс между процессами роста ПАУ и сажеобразования, при этом неожиданные обратные эффекты при протекании данных процессов могут возникать при определённых концентрациях кислорода. Дополнительно отметим, что добавление кислорода в топливо ведёт к более богатому составу продуктов его распада, т.е. различных прекурсоров сажи, вследствие чего увеличивается многогранность путей образования сажи [210].

Рассмотрим, как кислород может оказывать влияние на синтез фуллеренов. Баум и др. [164] продемонстрировали, что количество синтезируемых фуллеренов зависит от количества кислорода: при отношении $C/O \approx 1$ достигается максимальное число фуллеренов C_{60} , а при изменении C/O в ту или другую сторону число фуллеренов падает. Схожим образом ведут себя мелкие ПАУ с числом атомов углерода $N_C \lesssim 30$, тогда как количество более крупных ПАУ, напротив, возрастает. Похожая антикорреляция между количеством ПАУ и фуллеренов/чашеподобных структур наблюдалась в экспериментах, представленных в работе [165], в которых структура углеродных частиц менялась в зависимости от высоты пламени — сначала формировались изогнутые молекулы и фуллереноподобная сажа, а после достижения пика числа фуллеренов вместо изогнутых начинали формироваться планарные молекулы. Хебжен и др. [165] полагают, что при большем количестве кислорода происходит окисление фуллеренов и это негативно сказывается на их количестве, но благоприятствует росту ПАУ за счёт окисления и освобождения периферийных связей для присоединения ацетилена. Дополнительно Хебжен и др. [165] экспериментально установили, что фуллерены более эффективно формируются при пониженных давлениях, причём их абсолютное количество, как и количество сажи, может уменьшаться, но их количество по отношению к саже возрастает.

Наконец, кислород может оказывать различное влияние на продукты горения в зависимости от того, в какой форме он присутствует: в атомарной или молекулярной.

Согласно исследованию [201], повышение уровня атомарного кислорода в исходном газе приводит к образованию планарных структур, тогда как в присутствии молекулярного кислорода увеличивается число фуллеренов и фуллереноподобной сажи. При минимальных количествах атомарного и молекулярного кислорода наблюдаются чашеподобные структуры, при увеличении количества атомарного кислорода и до достижения некоторого его уровня доминируют планарные ПАУ, и эти ПАУ крупные. Но при дальнейшем увеличении количества атомарного кислорода размеры образующихся ПАУ уменьшаются.

Резюмируя результаты экспериментов, можно заключить: 1) содержание кислорода влияет на размер, форму и количество образующихся ПАУ; 2) содержание кислорода определяет появление чашеподобных молекул и фуллеренов; 3) зависимость количества образующихся частиц сажи немонотонная, с одной стороны, в малых количествах кислород благоприятствует образованию сажи, с другой стороны, при достижении определённого уровня образование сажи подавляется. Напрямую результаты описанных экспериментов нельзя адаптировать к условиям зоны формирования пыли, однако они дают основания полагать, что кислород играет немаловажную роль при формировании углеродных частиц в ней, так же как и в лаборатории. Следовательно, необходимы теоретические и экспериментальные исследования формирования углеродных частиц с учётом функции кислорода как одного из факторов, влияющих на конечные продукты, наблюдаемые в звёздах АВГ, ППТ и ПТ, а также позже в МЗС.

В данном разделе была рассмотрена роль кислорода, однако возможно, что другие химические элементы могут оказывать влияние на образование ПАУ, фуллеренов и пыли. Металлокатализаторы, широко используемые в промышленности, присутствуют в оболочках звёзд АВГ, но их функция не рассматривается в астрохимии, тогда как, к примеру, никель способствует скручиванию планарных ПАУ в фуллерены, согласно работе [211]. С учётом не столь высокого относительного количества тяжёлых элементов возникают сомнения, что они могут играть существенную роль в химической эволюции углеродных частиц и других молекул. Однако даже одиночные атомы внутри углеродных частиц могут быть важны, как показывают исследования в направлении одноатомного катализа [212, 213], поэтому оценка влияния катализаторов на формирование и рост углеродных частиц требует не меньшего внимания, чем оценка влияния кислорода.

5. Астрохимические экспериментальные исследования аналогов межзвёздной пыли

5.1. Лабораторный синтез аналогов межзвёздной пыли

Условия в оболочках звёзд можно сопоставить с реакторами горения, с той разницей, что основной химический элемент в оболочках — водород, а плотность и давление ниже нормальных и тех, которые создаются обычно в лабораторных реакторах. Именно эти факторы: химический состав газа и давление — являются критически важными для структуры образующихся частиц. К примеру, в работе [214] отмечено, что увеличение содержания водорода ведёт к увеличению ПАУ среди продуктов, тогда как доля фуллеренов уменьшается, таким образом, богатые водородом оболочки не благоприятствуют образованию фуллеренов. Опреде-

ляющую роль в формировании той или иной структуры имеет давление, при повышенных его значениях происходит формирование регулярной графитовой структуры, а при экстремально высоких значениях — алмазоподобной структуры [215–217]. Также давление влияет и на размер образующихся частиц. Так, при уменьшении давления от 10 до 3 атм диаметр образовавшихся первичных частиц сажи уменьшился от 47 до 17 нм [218]. Не менее важным параметром является и температура [219].

Как уже было указано выше, в оболочках звёзд давление составляет 10^{-6} – 10 атм, плотность — 10^8 – 10^{13} см $^{-3}$ и температура — 500–2000 К [123–127]. Для получения астрохимически релевантных результатов проводятся специализированные эксперименты, в которых создаются условия, максимально приближенные к условиям оболочек звёзд и нацеленные на производство аналогов межзвёздной пыли (АМП). К сегодняшнему дню применялось много различных техник, их перечень был представлен в работе [61] и дополнительном материале к работе [220]. В этот перечень входят: лазерная абляция, горение, пиролиз, пылевая плазма, конденсация газа. Ниже будут рассмотрены результаты астрохимических экспериментов с использованием разных методов.

Ковачевич и др. [221] провели эксперимент по изучению формирования пыли в реакторе при возникновении разряда радиочастотного диапазона в газе из ацетилена, аргона, азота или кислорода. Давление в реакторе устанавливалось на уровне 10^{-4} атм, температура — комнатная (около 290–300 К). В возникшей плазме сформировались частицы, в ИК-спектрах которых присутствуют алифатические полосы на 3,4, 6,9, 7,3 мкм. Предполагается, что рост частиц происходил за счёт полимеризации малоатомных углеводородов ($C_{2n}H_m$), включая бензольные кольца.

В работе [222] были проведены эксперименты с лазерной абляцией и лазерным пиролизом углеродных материалов с разным набором значений давления и температуры. Эти эксперименты можно разделить на две категории: высокотемпературные с $T > 3500$ К и давлением 10^{-3} – 10^{-2} атм и низкотемпературные с $T \approx 1000$ – 1700 К и давлением $\approx 0,7$ атм. В качестве прекурсоров использовались графитовые электроды (для абляции) и углеводороды (C_2H_2 , C_2H_4 , C_6H_6). Продукты лазерной абляции/лазерного пиролиза осаждались на подложку, и проводился их анализ при помощи электронной и масс-спектрографии, хроматографических методов и спектрометра. В высокотемпературном режиме были получены мелкие (несколько нанометров) частицы фуллереноподобной сажи, в основе структуры которых лежат молекулы сферической формы, соединённые алифатическими или ван-дер-ваальсовыми связями. В низкотемпературном режиме были получены более крупные по размеру частицы графитоподобной сажи (несколько десятков нанометров), а также ряд различных ПАУ. Авторы предполагают, что первый режим соответствует остаткам сверхновых звёзд или звёздам Вольфа–Райе, а низкотемпературный режим — оболочкам звёзд АВГ. Действительно, в зоне конденсации пыли вокруг звёзд АВГ температура в среднем не превышает 2000 К, но, как было показано в работе [23], температура может достигать 20000 К при прохождении ударных волн, поэтому не исключено, что фуллерены и фуллереноподобная сажа формируются как раз в моменты прохождения ударных волн, а ПАУ и графитоподобная сажа — в остальное время.

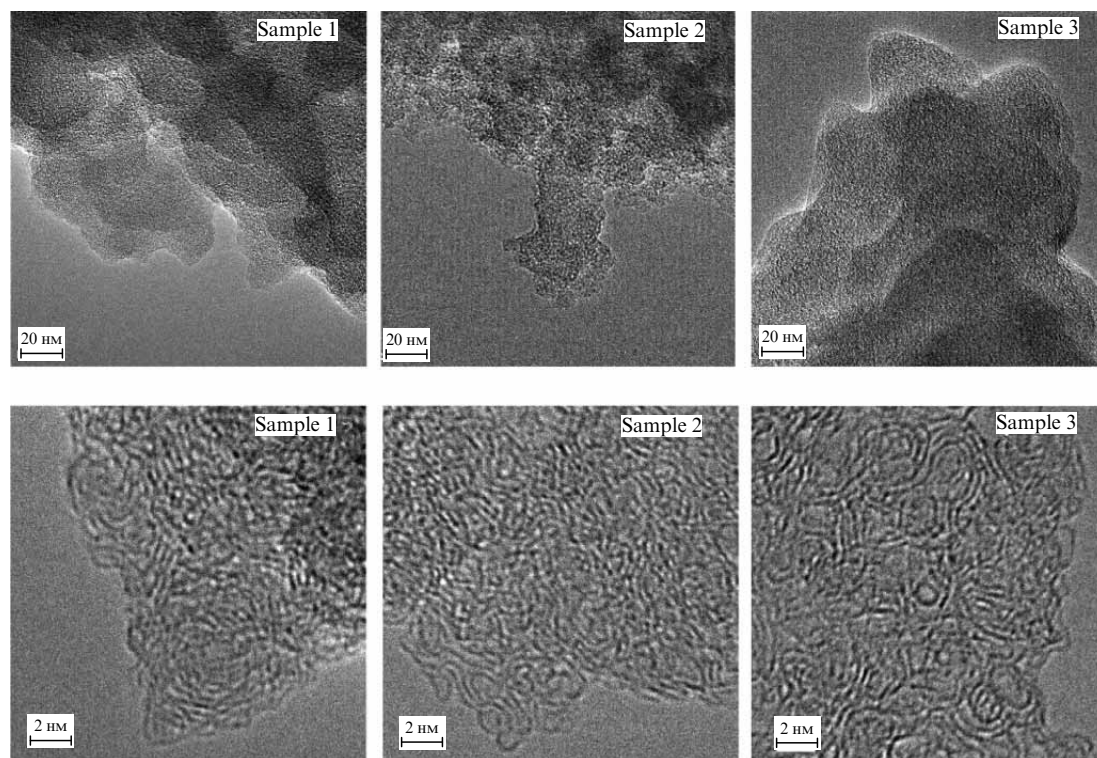


Рис. 10. Снимки образцов АМП с электронного микроскопа высокого разрешения. (Рисунок взят из работы Карпентера и др. (2012 г.) [61] с разрешения А&А.)

Биннер и др. [223] провели эксперимент по пиролизу газа ацетилена. Давление и температура в камере поддерживались на уровне 10^{-5} атм и 1800 К соответственно. Полученные частицы представляли собой комплексы из ароматических колец, соединённых между собой алифатическими связями. Несмотря на преимущественно аморфную структуру, в частицах встречались графитовые вкрапления, состоящие из нескольких графеновых слоёв. В ИК-спектрах этих частиц проявлялись как ароматические, так и алифатические полосы. Авторы предполагают, что полученные частицы — промежуточный этап в эволюции пыли на пути к ароматизации.

В качестве примера экспериментов по горению углеводородов в астрофизических условиях можно привести эксперимент, проведённый в работе [60]. В нём создавались условия с температурой около 2000 К и давлением от 2×10^{-2} до 10^{-1} атм. В качестве прекурсоров использовались ненасыщенные углеводороды (C_2H_2 , C_2H_4 , C_3H_6), которые смешивались с кислородом в такой пропорции, что отношение C/O варьировалось в диапазоне от 0,5 до 2. После реактора горения газ поступал в осадительную камеру, где давление было около 10^{-3} атм, температура — комнатная. Продукты горения осаждались на подложку, и проводилась ИК-спектроскопия полученных АМП (более 50 различных экземпляров). Основные результаты этой работы таковы: 1) ацетилен является наиболее подходящим прекурсором для образования пыли; 2) соотношение между интенсивностями полос на 3,3 и 3,4 мкм, т.е. между числом ароматических и алифатических связей, отчётливо коррелирует с положением полосы на 6,2 мкм. Центральная длина волны полосы на 6,2 мкм наблюдается на $\approx 6,3$ мкм у наименее ароматических образцов и сдвигается к 6,2 мкм у наиболее ароматических образцов. Несмотря на то что в работе [60] не проводился структурный анализ образцов, по ИК-спектрам можно заключить, что полученные час-

тицы представляют собой смесь ароматических молекул, соединённых алифатическими связями. Данный эксперимент согласуется с предположением о том, что объекты класса C содержат в основном пылинки с большой долей алифатических связей, тогда как объекты классов A и B , напротив, содержат пылинки с преимущественно ароматическими связями. Авторы отмечают, что наличие кислорода в начальной смеси газа не повлияло на финальные спектры, т.е. полосы, соответствующие связям между углеродом и кислородом, практически не наблюдались.

Карпентер и др. [61] провели похожий эксперимент на той же установке, что и в работе [60], варьируя начальный состав смеси (C_2H_4/C_3H_6), относительную пропорцию с кислородом ($C/O = 1,1, 1,4, 1,6$) и давление (от $\approx 10^{-2}$ до $\approx 8 \times 10^{-2}$ атм). Были получены три образца АМП, которые можно сопоставить с тремя разными типами/стадиями объектов. По снимкам с высоким разрешением (рис. 10) эти образцы выглядят как: 1) Sample 1 — материал с наименьшим количеством изогнутых и скрученных субструктур и наибольшим количеством планарных ароматических молекул, плохо связанных между собой, отношение sp^3/sp^2 низкое и составляет $\approx 0,1$; 2) Sample 3 — материал с наибольшим количеством непланарных, скрученных и изогнутых ароматических субструктур, хорошо связанных между собой алифатическими мостами; субструктуры имеют преимущественно изогнутую или квазисферическую форму, имеется множество дефектов в виде не шестичленных колец в ароматических молекулах, составляющих субструктуру, или на периферии этих молекул, где они соединены алифатическими мостами; отношение sp^3/sp^2 высокое и имеет значение ≈ 9 ; 3) Sample 2 — материал с промежуточными характеристиками между Sample 1 и Sample 3. Отметим, что частицы Sample 1 получены при максимальном значении C/O , равном 1,6, а Sample 3 — при

минимальном значении, равном 1,1. В работе [61] отмечается, что в процессе формирования пыли, по всей видимости, происходит разветвление эволюционных путей: на путь, ведущий к ПАУ, и путь, ведущий к фуллеренам. При этом "фуллереновый" путь может в конечном счёте, помимо производства фуллеренов, привести к образованию частиц со спектральными свойствами классов *A* и *B* в результате трансформаций и образования/роста планарных ПАУ на поверхности. В работе [222] такое разветвление происходило в зависимости от температуры, но в работе [61] было показано, что разветвление может произойти при вариации состава газа и давления. Разница между образцами заключается в извилистости и изогнутости молекул и в том, как они соединены между собой. Выше отмечалось, что димеры и кластеры изогнутых молекул более стабильны, и связи в этих кластерах имеют другие характеристики. Вероятно, такой материал может быть более устойчивым к внешним воздействиям. Структура образующихся частиц нерегулярная, но она не является чисто аморфной, так как состоит из ароматических молекул. Авторы работы [61] указывают, что при формировании пыли должна существовать и отдельная ветвь с частицами аморфного углерода.

В работе [224] представлены результаты эксперимента на установке COSMIC⁷, предназначенной специально для имитации процесса формирования и роста АМП. В эксперименте создавался импульсный газовый разряд в подготовленной газовой смеси с аргоном в качестве газа-носителя, в результате чего генерировалась сверхзвуковая плазменная струя с условиями, близкими к астрофизическим. В этой струе происходило формирование различных углеродных молекул и частиц. Регистрация и идентификация образовавшихся частиц производилась с помощью спектрометра высокого разрешения и времяпролётной масс-спектропии. В работе были использованы различные смеси в качестве начальных, включая смеси отдельно из алканов, алкинов, алкенов, моноциклических ароматических молекул (например, бензол), ПАУ и комбинации таких смесей. В результате оказалось, что, во-первых, конечные продукты сильно отличаются при разных прекурсорах, а во-вторых, рост частиц наблюдается только в случае смесей из ненасыщенных углеводородов и моноциклических ароматических колец, в то время как при использовании смесей из ПАУ (например, нафталин) молекулярного роста частиц не происходило. Таким образом, экспериментально показано, что частицы растут за счёт удлинения цепочек, образования ароматики и взаимодействия наименьших ароматических молекул и ненасыщенных углеводородов. Малоатомные углеводороды инициируют реакции роста углеродных частиц, тогда как ПАУ могут служить в качестве строительных блоков для кластеризации, но не инициируют их рост.

Недавно была создана установка Stardust [220], где, в отличие от экспериментов по горению или с газовым разрядом, напрямую создаются астрофизические условия зоны конденсации пыли. Данная установка состоит из нескольких модулей, направленных на изучение разных условий. Модуль для изучения оболочек звёзд АВГ содержит четыре последовательно соединённые камеры, имитирующие путь атомов/молекул от внутренних областей оболочки к внешним: 1) камера, куда впрыски-

вается начальная газовая смесь и где начинаются агрегация и рост молекул и частиц; 2) диагностическая камера, содержимое которой подвергается измерениям; 3) печная камера, где достигаются температуры, сопоставимые с температурой в зоне формирования пыли; 4) ускорительная камера, где сформировавшиеся частицы подвергаются ускорению аналогично тому, как это происходит в оболочках звёзд АВГ. Химический состав в каждой камере можно контролировать и создавать требуемые соотношения между элементами. На сегодняшний день установка Stardust, несомненно, является наиболее приближённой к астрофизическим условиям, и результаты, полученные на ней, представляют особый интерес.

В работе [220] представлены результаты эксперимента на установке Stardust, в котором создавались условия, соответствующие околозвёздным оболочкам, — низкое давление и среда, богатая водородом. Концентрация газа в разных камерах устанавливалась от $\approx 10^8$ до 10^{12} см⁻³. Начальная газовая смесь включала в себя водород (H₂) и углерод, отношение между концентрациями водорода и углерода было $\approx 10^2$, что ниже наблюдательной оценки данного отношения в оболочках звёзд, составляющей $\approx 10^3 - 10^4$ [122, 225], но близко к нему. Температура в камерах не превышает 1000 К. Согласно результатам эксперимента, в такой среде формируются частицы аморфного углерода и алифатические углеродные цепочки, тогда как ароматические молекулы и фуллерены формируются неэффективно. На той же установке Санторо и др. [193] провели следующий эксперимент, дополняющий предыдущий. Был изменён начальный состав газа, который на этот раз, помимо водорода и углерода, включал ацетилен. Среди продуктов были найдены полиины, ароматические молекулы (бензол, толуол, нафталин и др.), гидрогенизированные и негидрогенизированные углеродные кластеры и, наконец, наноразмерные частицы. Последние представляли собой некую сложную структуру, состоящую из малых ароматических островков, соединённых алифатическими и олефиновыми связями. Таким образом, добавление ацетилена в начальный состав газа существенно сказало на результатах.

Интересный способ получения АМП был недавно предложен в работе [62]. В этом эксперименте были смешаны молекулярный водород и различные углеродные частицы, включая графиты, фуллерены, нанотрубки и др. Далее смесь подвергалась процессу, схожему с помолкой. В результате были получены частицы, спектры которых аналогичны спектрам ранее полученных АМП и спектрам классов *C* и *D*. Авторы подчёркивают, что такой процесс определён не происходит в МЗС, однако данная методика может быть использована для относительно простого получения АМП для их дальнейшего анализа и изучения, например, для изучения их взаимодействия с УФ-излучением.

Резюмируя результаты экспериментов по синтезу АМП, можно заключить, что в условиях оболочек звёзд АВГ формируются частицы с преимущественно аморфной структурой, внутри которой присутствуют ароматические островки, как планарные, так и не планарные, и эти островки связаны между собой алифатическими или олефиновыми связями. В зависимости от условий формирования (температура, давление, химический состав исходного газа) частицы могут отличаться друг от друга соотношением между количеством связей *sp*, *sp*², *sp*³, долей водорода по отношению к углероду в них, размерами, структурой и другими характеристиками.

⁷ <https://www.nasa.gov/ames/spacescience-and-astrobiology/cosmic-facility>.

Все вышеописанные эксперименты относятся к углеродным частицам, но в оболочках звёзд АВГ формируются ещё частицы SiC и, вероятно, MgS. Как отмечалось выше, предполагается, что вследствие разных значений температуры конденсации пылинки неоднородны по составу: при солнечной металличности сначала происходит конденсация SiC, и эти частицы становятся ядром пылинок, затем конденсируется углерод и углеродные молекулы, создавая углеродную оболочку с аморфной структурой, и, наконец, пылинки покрываются оболочкой из MgS. При пониженной металличности частицы SiC конденсируются одновременно с углеродом. Насколько известно автору, экспериментов, имитирующих конденсацию SiC, углерода и MgS в оболочках звёзд, не проводилось, но астрохимические эксперименты с частицами SiC проводились, как уже отмечалось ранее. Мерино и др. [125] взяли за основу подготовленные частицы карбида кремния, покрытые графеновым слоем, и подвергли их бомбардировке атомами водорода. Авторы считают, что созданный процесс имитирует возможную эволюцию пылинок во внешних слоях оболочки, в которой молекулы водорода были диссоциированы внешним УФ-полем излучения. В работе [125] экспериментально выявлено, что в результате такой бомбардировки на поверхности карбида кремния происходит перколяция графенового слоя и формирование отдельных молекул ПАУ. Далее эти ПАУ могут десорбировать в газовую фазу под воздействием УФ-поля излучения.

Другой эксперимент с частицами SiC провели Бернал и др. [120]. В этом эксперименте карбид кремния подвергался нагреву до температуры ~ 1300 К под давлением $\sim 10^{-11}$ атм и облучению ионами ксенона с энергией 150 кэВ. Подразумевалось, что такое воздействие аналогично воздействию ударных волн в околозвёздной оболочке. Нагрев и бомбардировка привели к значительным изменениям кристаллической структуры частиц. В поверхностных слоях сформировались графеновые пластины, а также полусферические и квазисферические структуры с пяти- и семичленными кольцами. Размеры непланарных структур составляли около 0,7 нм, что очень близко к размеру молекулы C₆₀. Из этого эксперимента следует, что под воздействием ударных волн или излучения структура частиц SiC трансформируется в графеновую или фуллереноподобную структуру. Логично предположить, что интенсивность особенности на 11,3 мкм должна уменьшаться с возрастом ППТ/ПТ, если SiC присутствует на поверхности пыли и его структура разрушается. Эту корреляцию ещё предстоит найти в наблюдениях, тогда как корреляция между I_{11,3} и мощностью УФ-излучения, как указывалось выше, уже найдена.

5.2. Оптические свойства аналогов межзвёздной пыли

Оптические свойства АМП из аморфного углерода были получены как экспериментально, так и теоретически [59, 60, 108, 110, 111, 197, 198, 221, 226–228]. Как было рассмотрено выше, АМП могут отличаться друг от друга соотношением между количеством связей sp, sp², sp³, долей водорода по отношению к углероду в них, размерами, формой и другими характеристиками, зависящими от условий формирования (температура, давление, химический состав газа при формировании). Оптические свойства большинства из предложенных в литературе вариантов АМП могут быть применены для описания континуума и особенностей спектров в среднем ИК-диапазоне. В целом, спектры АМП демонстрируют

хорошее согласие между собой и с наблюдениями. Однако в спектрах АМП могут возникать дополнительные особенности, однозначной идентификации которых в спектрах космических объектов на сегодняшний день нет. К примеру, спектры частиц, исследованных в работе [108], наряду с особенностями на 21, 27 и 33 мкм, которые можно идентифицировать в спектрах ППТ/ПТ, демонстрируют ряд особенностей на длинах волн более 40 мкм, которые не наблюдаются. Следовательно, поиск АМП, спектры которых будут максимально близки к спектрам ППТ/ПТ, продолжается.

В современных расчётах синтетических спектров звёзд АВГ, ППТ и ПТ принимают разные варианты оптических свойств углеродных частиц, в частности, аморфного углерода. Например, в работе [89] использовались свойства, предложенные в работе [230], в работе [231] были взяты свойства из работы [110], в работе [113] — из работы [111]. Нет возможности определить стандарт для оптических свойств, так как они все варьируются при изменении каких-либо параметров. На рисунке 11 показано несколько вариантов представленных в литературе оптических свойств для АМП и ПАУ в виде фактора эффективности поглощения Q_{abs} . Отдельно рассмотрены диапазон длин волн от 3 до 15 мкм, включающий основные ИК-полосы, для частиц с радиусом 5 Å (рис. 11а) и диапазон от 20 до 100 мкм, отражающий свойства в континууме, для частиц с радиусом 100 Å (рис. 11б).

В серии работ [2, 59, 197, 198] были представлены оптические свойства частиц ГАУ с разной степенью гидрогенизированнойности (другими словами, ароматизированности или отношения sp³/sp²) для разных размеров частиц в широком диапазоне длин волн. Отношение sp³/sp² влияет и на интенсивность и положение ИК-полос, и на показатели цвета. Из рисунка 11а видно, что функция Q_{abs} для частиц ГАУ с низким отношением Н/С (и sp³/sp²) похожа на функцию Q_{abs} для ПАУ: присутствуют характерные ароматические полосы на 3,3, 6,2, 7,7, 11,2, 12,6 мкм. Частицы ГАУ с высоким Н/С (и sp³/sp²) имеют иную функцию Q_{abs} : основными полосами являются алифатические полосы на 3,4, 6,9 и 7,3 мкм. У функции Q_{abs} для частиц ГАУ из работы [2] отсутствует широкая особенность около 8 мкм, наблюдающаяся в объектах классов C и D. Спектр частиц Sample 1 демонстрирует наличие ароматических полос на 3,3, 6,2, 8,6 мкм и алифатических полос на 6,9 и 7,3 мкм, в спектре частиц Sample 2 полосы на 3,3, 8,6, 6,9 и 7,3 мкм становятся менее интенсивными, а полоса на 6,2 мкм сдвигается к 6,3 мкм, но появляются полосы на 3,4 и 8 мкм. В спектре частиц Sample 3 полоса на 3,3 мкм пропадает, тогда как полоса на 3,4 мкм становится интенсивной, полосы на 6,3 и 8,6 мкм ещё более ослабевают, а широкая особенность на 8 мкм усиливается. Полосы на 6,9 и 7,3 мкм присутствуют, но они слабее, чем в спектре частиц Sample 1. Появляются дополнительные полосы на $\approx 5,8$ и 6,8 мкм, возможно, имеющие какое-то отношение к непланарной природе доменов материала. Интересно, что полосы на 11–12 мкм значительно интенсивнее у частиц Sample 1, т.е. у частиц с большим количеством планарных ароматических частиц внутри, тогда как в спектрах частиц Sample 2 и Sample 3 в этом диапазоне доминирует континуум, полосы проявляются слабее.

Материал частиц Sample 3 в работе [61] содержит много изогнутых ароматических молекул, а отношение sp³/sp² и, соответственно, количество алифатических связей высоки. По представленным спектрам Sample 3

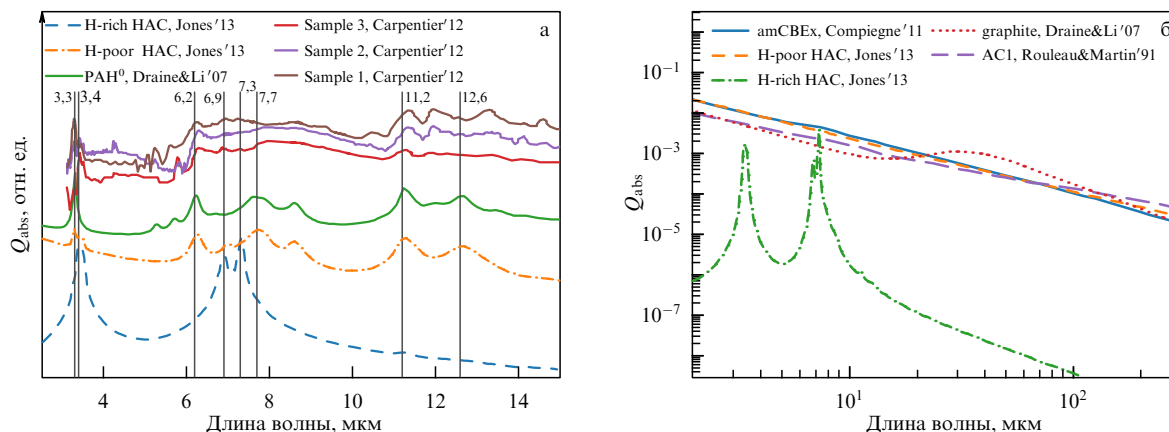


Рис. 11. Зависимость фактора эффективности поглощения различных углеродных частиц от длины волны. (а) Приведены Q_{abs} для гидрогенизированных (синяя линия) и дегидрогенизированных (оранжевая линия) частиц ГАУ из работы Джонс и др. (2013 г.) [59], ПАУ из работы Дрейна и Ли (2007 г.) [1] (зелёная линия), частиц Sample 3, Sample 2, Sample 1 из работы Карпентер и др. (2012 г.) [61] (красная, коричневая, фиолетовая линии). Факторы эффективности приведены в произвольных единицах и смещены относительно друг друга. (б) Приведены Q_{abs} для аморфного углерода (amCBEx) из работы Компьен и др. (2009 г.) [111, 229] (синяя линия), гидрогенизированных (зелёная линия) и дегидрогенизированных (оранжевая линия) частиц ГАУ из работы Джонс и др. (2013 г.) [59], частиц графита из работы Дрейна и Ли (2007 г.) [1] и частиц аморфного углерода из работы Руле и Мартина (1991 г.) [110]. Радиусы частиц составляют 5 Å (а) и 100 Å (б).

нет возможности однозначно судить о признаках фуллеренов, так как нет данных на длинах волн 17–20 мкм, куда попадают их специфические полосы на 17,4 и 18,9 мкм, а также не видна более слабая полоса на 7,0 мкм, как правило, проявляющаяся в фуллереносодержащих объектах. Дьюли и др. [71, 232] в своих спектрах частиц аморфного углерода, полученных путём лазерной абляции графита, обнаружили полосы, соответствующие ИК-переходам в фуллеренах, близкие наблюдаемым в ПТ Тс I [9], тогда как сами фуллерены как отдельные молекулы зафиксированы не были. Авторы считают, что в полученных ими частицах содержатся "протофуллерены", т.е. непланарные фуллереноподобные структуры, из которых при внешнем воздействии на образец (например, УФ-излучением) могут сформироваться фуллерены. Таким образом, частицы аморфного углерода с фуллереноподобной структурой могут быть ответственными за возникновение полос фуллерена, в то время как самих молекул фуллерена нет. В эксперименте [71] осаждение частиц аморфного углерода, образовавшихся при абляции графита, проводилось в газах H_2 , He , C_2H_2 , C_2H_4 и в вакууме. Спектры осевших частиц отличаются друг от друга интенсивностью и положением полос. Авторы полагают, что отличие в положении и интенсивности полос в спектрах лабораторных частиц и космических объектов может возникать из-за очевидного различия в условиях формирования частиц аморфного углерода.

Похожий вывод о существенном влиянии состава газа делают авторы работы [233], в которой частицы аморфного углерода были получены методом лазерной абляции графита в газах H_2/N_2 , H_2/O_2 , H_2/CO и NH_3 . Добавление кислорода ведёт к подавлению полосы на 3,4 мкм, значительно уменьшению количества ароматических доменов и увеличению количества связей sp^3 . Важно, что полоса на 3,4 мкм подавляется при наличии кислорода при температуре 300 °С, но появляется при том же составе газа при температуре 500 °С. Следовательно, температура оказывает сильное влияние на спектр образцов, так же как химический состав газа, что необходимо учитывать при моделировании синтетических спектров пыли в космических объектах. В спектрах частиц, полученных в газах с кислородом и азотом,

могут появляться дополнительные полосы, соответствующие переходам C–N и C–O, которые, в свою очередь, могут быть обнаружены в ИК-спектрах космических объектов.

На рисунке 11б представлены факторы эффективности поглощения для более крупных частиц в длинноволновой части спектра (от 20 до 300 мкм). Показана функция Q_{abs} для частиц amCBEx, изначально вычисленная в работе [111] и экстраполированная в сторону больших размеров в работе [229]. Частицы amCBEx представляют собой частицы ГАУ с высоким отношением sp^3/sp^2 , полученные в лаборатории путём сжигания бензола в воздухе при нормальных условиях. Функция Q_{abs} для amCBEx практически не имеет особенностей, за исключением небольшого скачка возле $\sim 8-10$ мкм. Функция Q_{abs} для дегидрогенизированных ГАУ из работы [2] выглядит похоже на функцию для amCBEx. Функция Q_{abs} для AC 1 была рассчитана в работе [110] для частиц, сформированных в дуговом разряде между двумя электродами аморфного углерода [234]. Значения этой функции немного отклоняются от значений предыдущих функций Q_{abs} , а также скачок Q_{abs} на $\sim 8-10$ мкм заметен более явно, чем для amCBEx. Функция Q_{abs} для графитовых частиц, рассчитанная в работе [115], в целом согласуется с функциями для уже рассмотренных частиц, однако для графитов характерна особенность возле ~ 30 мкм, которая должна проявляться в наблюдаемых спектрах. Как было упомянуто выше, Отсука и др. [39] выдвинули гипотезу о том, что особенность на 30 мкм в ППТ/ПТ может быть связана с графитами, так как интенсивность этой особенности коррелирует с континуумом, однако данная гипотеза требует проверки. Возможно, графитовые частицы могут присутствовать как часть частиц из ГАУ, наподобие того как они присутствуют в саже, но для таких частиц требуются дополнительные вычисления.

Наконец, на рис. 11б показана функция Q_{abs} для ГАУ с высоким содержанием водорода из работы [2]. Значения этой функции значительно отличаются (на несколько порядков меньше) от значений всех остальных функций, и вдобавок в данном случае присутствуют широкие полосы на длинах волн ~ 3 и ~ 8 мкм. Джонс и др. [2] отмечает, что для гидрогенизированных частиц, т.е. для

"незрелой" пыли, характерна низкая излучательная способность, вследствие чего пыль, во-первых, будет менее яркой в длинноволновой ИК-области спектра, а во-вторых, будет горячее, и, соответственно, пик излучения будет смещён в более коротковолновую область. Наряду с этим авторы отмечают, что вместе с уменьшением излучательной способности при росте sp^3/sp^2 будет уменьшаться избыток цвета $E(B-V)$, т.е. "незрелая" пыль будет более прозрачной в оптическом диапазоне. Одновременно будет увеличиваться экстинкция в УФ-диапазоне. Экстинкция в ИК-диапазоне практически не чувствительна к sp^3/sp^2 . В работе [2] показаны синтетические спектры пыли при разных отношениях sp^3/sp^2 . Примечательно то, что "незрелая" пыль имеет пик излучения около 20–30 мкм из-за высоких температур таких пылинок. Разумеется, исходя из сравнения этих синтетических спектров и спектров ППТ/ПТ невозможно сделать выводы, но наличие наблюдательных особенностей на 21 мкм и 30 мкм и теоретическое предсказывание особенностей примерно на тех же длинах волн для "незрелых" пылинок даёт основание предполагать, что совпадение может быть не случайным. Для проверки такого предположения необходимо провести детальное моделирование спектров пыли в условиях ППТ/ПТ с оптическими свойствами, предложенными в работах [2, 59, 197, 198].

6. Обсуждение и заключение

В данном разделе сделано резюме по вышеизложенному материалу и описаны возможные эволюционные сценарии и процессы для углеродных частиц при разных металличностях. Выше были рассмотрены: 1) наблюдательные данные об углеродных частицах в звёздах АВГ, ППТ и ПТ; 2) условия формирования пыли в оболочках звёзд АВГ и эволюция этих объектов до ПТ; 3) механизмы формирования ароматических молекул и крупных углеродных частиц; 4) лабораторные исследования по созданию АМП; 5) оптические свойства АМП. С наблюдательной точки зрения эволюция пыли протекает поразному в зависимости от металличности, а именно, при низкой металличности формируется меньше пыли, меньше относительная доля ПАУ, но больше относительная доля фуллеренов. Дополнительно есть косвенное

указание на то, что средний размер ПАУ меньше при низкой металличности и при наличии фуллеренов. Присутствие фуллеренов в узком наборе объектов в совокупности с другими наблюдениями указывает, что образование пыли может разветвляться и идти, как минимум, по двум сценариям в зависимости от условий. Важно выяснить, какие факторы влияют на то, по какой ветви будет идти эволюция. В частности, вызывает интерес ответ на вопрос, почему содержание ПАУ и фуллеренов зависит от металличности. Что именно происходит поразному в этих объектах: формирование или разрушение?

Во многих работах выдвигаются аргументы в пользу того, что формирование пыли и ПАУ происходит одинаково при низкой и высокой металличности и что пониженное содержание ПАУ при низких металличностях обусловлено разрушением. Разрушение, а именно "top-down" механизмы, предлагаются и как источник фуллеренов. Но действие только этих механизмов не может объяснить факт, что фуллерены распределены неоднородно по объектам с разной металличностью, так как эти механизмы не предполагают зависимости от металличности. В то же время процесс формирования углеродных частиц и их конечная структура существенно зависят от многих параметров, связанных с металличностью. Совместное действие механизмов формирования пыли, зависящих от металличности, и "top-down" механизмов могут привести к наблюдаемой картине распределения ПАУ и фуллеренов при разных металличностях.

На рисунке 12 приведена общая схема разветвления эволюционных путей пылинок при разных металличностях. Безусловно, чётких границ между средами нет: скорее всего, обе ветви эволюции могут протекать одновременно и в одном и том же объекте, однако при низкой металличности выше вероятность протекания эволюции по "нижней" ветви (с фуллеренами), соответственно, должны доминировать молекулы/частицы этого пути, а при высокой металличности выше вероятность "верхней" ветви с более крупными и планарными ПАУ.

Схема на рис. 12 основана отчасти на результатах работы [61], в которой сделан вывод о том, что различие в условиях формирования ведёт к различию структуры материала частиц и элементов этой структуры. В одних условиях протекают реакции с образованием шестичлен-

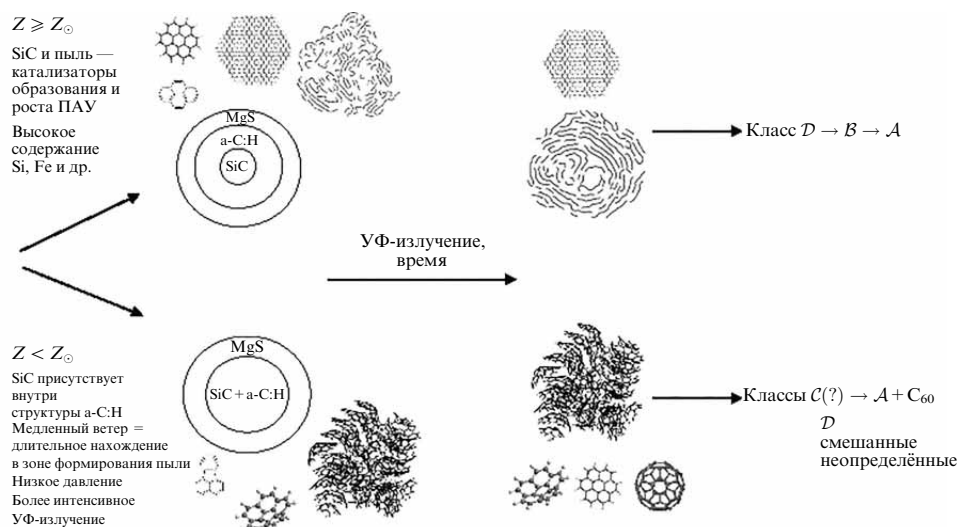


Рис. 12. Общая картина разветвления сценариев эволюции пыли при разных металличностях.

ных колец и, как следствие, планарных ПАУ. В данном случае, согласно работе [61], отношение sp^3/sp^2 является наименьшим по сравнению с другими частицами. Изначально структура может быть нерегулярной, но под воздействием УФ-излучения происходит фотодиссоциация связей, структура частиц упорядочивается, и в ней появляются графитоподобные вкрапления. Одновременно с реструктуризацией в газовую фазу с поверхности частиц могут поступать различные фрагменты в виде малоатомных углеводородов и отдельных ПАУ. При других условиях протекают реакции с образованием пятичленных колец и изогнутых ПАУ и формируется фуллереноподобная структура материала частиц (частицы Sample 3 в работе [61]). Отношение sp^3/sp^2 и количество дефектов в структуре высоки. При воздействии УФ-излучения на частицы с такой структурой предположительно должно происходить отделение и поступление в газовую фазу изогнутых ПАУ и фуллеренов. Структура частиц Sample 2 представляет собой нечто среднее между структурами частиц Sample 1 и Sample 3. В ней присутствуют одновременно планарные и непланарные структуры. Подчеркнём, что материал всех этих частиц состоит из ароматических молекул, соединённых алифатическими связями, различие заключается в размерах и форме таких молекул и в количестве/длине связей между ними.

Основываясь на сопоставлении ИК-спектров этих частиц и космических объектов, авторы работы [61] делают вывод, что спектр частиц Sample 1 соответствует переходной стадии от класса *B* к классу *A*, спектр частиц Sample 2 — переходной стадии от класса *C* к классу *B*, а спектр частиц Sample 3 — классу *C*. Автор склоняется к тому, что спектр частиц Sample 1 можно отнести к классу *D* (и *D1* на 11–14 мкм), ещё не введённому к дате опубликования работы [61]. Впоследствии из частиц Sample 1 могут высвободиться отдельные ПАУ с относительно крупными размерами, т.е. спектр частиц Sample 1 (*D*) эволюционирует в спектр класса *B* и при последующем разрушении в спектр класса *A*. Спектр частиц Sample 3, как и предполагают авторы работы [61], близок к спектрам класса *C*, которые встречаются довольно редко. Спектр частиц Sample 2 — это суперпозиция спектров частиц Sample 1 и Sample 3, но данные частицы — не эволюционная стадия перехода от частиц Sample 3 к частицам Sample 1. Возможно, что объекты, содержащие частицы, похожие по структуре на частицы Sample 3 и Sample 2 (т.е. с изогнутыми ПАУ), могут наблюдаться и как объекты класса *D*, и как объекты, не попадающие под классификацию, так как их структура может быть сильно неоднородна и в ней могут присутствовать элементы из Sample 1 (с планарными ПАУ).

Для образцов Sample 1–Sample 3 отсутствуют ИК-спектры на длинах волн 20–40 мкм, поэтому нельзя сделать вывод о том, могут ли в их спектрах появляться особенности на 21 и 30 мкм. Гришко и др. [108] удалось зафиксировать полосы в спектрах частиц ГАУ вблизи указанных длин волн, поэтому, вероятно, в спектрах Sample 1–Sample 3 они тоже могут появляться. Непредсказуемое появление особенности на 21 мкм, а также непродолжительный период времени, когда она может наблюдаться, говорят о том, что состояние материала частиц должно быть определённым, нестабильным и чувствительным к УФ-излучению. Так как наиболее чувствительным к УФ-излучению являются наиболее гидрогенизированные частицы, то можно предположить, что эти частицы сформировались по сценарию с планарными ПАУ и с высоким Н/С. Относительно особенности на

30 мкм, помимо гипотезы о графитах, заслуживает проверки гипотеза о том, что данная особенность создаётся частицами также с высокой долей водорода, у которых ИК-активность ниже, чем у частиц со зрелой структурой, вследствие чего они горячее. Их тепловое излучение может накладываться на излучение более зрелых частиц, с которыми они пространственно разделены.

Авторы работы [78] выдвигают гипотезу, что фуллерены наблюдаются в момент пересечения быстрого и медленного ветров от звезды на стадии перехода звезды АВГ в ПТ. По мнению авторов, в период конденсации пыли была сформирована фуллереноподобная пыль и, возможно, какое-то количество самих фуллеренов. Далее медленно движущаяся пылевая оболочка распространялась в направлении от звезды, не проявляя излучение фуллеренов, но когда быстрый ветер от звезды, развившийся позже, догнал эту оболочку, он привёл к разрушению пыли (поэтому её там не наблюдается) и формированию фуллеренов. Отсука и др. [39] отметил, что во всех S_{60} -ПТ есть признаки мощных ветров, поэтому не исключено, что ветер играет немаловажную роль в формировании фуллеренов. Помимо ветра разрушающим фактором может служить ионизирующее УФ-излучение, фронт которого распространяется внутри сброшенной оболочки звезды. Но какой бы ни был разрушающий фактор, для эффективного формирования фуллеренов при разрушении пыли необходимо, чтобы эта пыль была "подходящей", т.е. фуллереноподобной.

Суммируем возможные факторы, которые могут влиять на формирование углеродных частиц.

Содержание карбида кремния. Одним из заметных наблюдательных отличий при разных металличностих является интенсивность полосы SiC, которая на стадии звезды АВГ ярче для объектов Галактики, а на стадиях ППТ/ПТ — для объектов МО. Дополнительно, интенсивность полосы SiC антикоррелирует с интенсивностью полосы фуллерена. Лейзенринг и др. [90] численно показали, что при низкой металличности снижаются температуры конденсации и SiC, и C, из-за чего SiC и C могут конденсироваться и оседать на поверхность одновременно. Возможно, такой процесс конденсации оказывает влияние на структуру углеродного материала и размеры ПАУ. Вследствие того что пылинки при низкой металличности оказываются покрыты не углеродной оболочкой, а смешанной из SiC и углерода, при воздействии УФ-излучения происходит десорбция элементов этой оболочки, в том числе малых ПАУ, чашеобразных ПАУ или фуллеренов.

Поверхность частиц SiC может служить катализатором для образования и роста ПАУ [148]. В условиях солнечной металличности и выше, где SiC конденсируется прежде начала конденсации углеродных частиц, частицы SiC могут служить подложкой для ускоренного образования и роста ПАУ. При низких значениях металличности содержание кремния, во-первых, меньше в абсолютном количестве, а во-вторых, конденсация SiC происходит с задержкой и частично перекрывается с конденсацией углерода и углеродных частиц. Таким образом, образование и рост углеродных молекул происходит при наличии меньшей доступной площади поверхности SiC. Это ведёт к тому, что количество образуемых ПАУ и пыли в целом может быть меньше, чем при солнечной металличности. Важность гетерогенных реакций, происходящих как на поверхности SiC, так и на поверхности углеродородного материала, пока детально не исследована, однако в литературе обсуждается их значение для образования ароматических моле-

кул [235], поэтому данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Скорость ветра. Если считать, что в низкометаллических звёздах ветер более медленный, то формирующиеся молекулы ПАУ находятся дольше в зоне формирования пыли, чем в звёздах с высокой металличностью. Цепочка реакций, ведущая к формированию молекулы $C_{40}H_{10}$ ("наночапки") из пентакоранулена включает в себя несколько циклов реакций дегидрогенизации и циклизации [169], для которых необходима энергия (см. раздел 4.1.3). С одной стороны, эта энергия может быть доступна, если молекула находится в зоне формирования пыли. Можно предположить, что такая цепочка циклов может успеть произойти за счёт задержки молекул на более продолжительное время в зоне с высокой температурой в звёздах с низкой металличностью по сравнению со звёздами с высокой металличностью. С другой стороны, дегидрогенизация и циклизация пентакоранулена не обязательно происходит в зоне формирования пыли. Эти реакции могут происходить под воздействием УФ-излучения уже на стадии ППТ или даже ПТ, когда центральный источник начинает нагреваться и генерировать УФ-кванты. В таком случае нахождение прекурсора фуллера вблизи звезды также будет повышать вероятность протекания требуемой цепочки дегидрогенизации и циклизации, и более медленные ветры у низкометаллических звёзд могут снова стать ключевым фактором для образования фуллеренов. Добавим, что источником УФ-излучения может быть внешнее поле излучения. Тогда важно, чтобы это излучение могло проникнуть к образовавшимся молекулам. В таком случае менее плотная оболочка либо более прозрачная для УФ-излучения оболочка способствовали бы более эффективному проникновению. Для удовлетворения указанных условий необходимо, чтобы меньшее количество пыли формировалось при пониженной металличности, или пыль должна обладать меньшей поглощательной способностью в УФ-диапазоне (см. ниже). Оба этих условия могут выполняться при низкой металличности, таким образом, повышенное поле излучения в зоне нахождения прекурсоров фуллеренов может объяснять их более частую встречаемость при низкой металличности. Добавим, что то же УФ-излучение может инициировать и более быструю диссоциацию образовавшейся пыли, т.е. механизмы "top-down".

Низкая эффективность поглощения в УФ-диапазоне частиц с фуллереноподобной структурой. Из наблюдений следует, что объекты, содержащие фуллерены, являются более "голубыми" в оптических показателях цвета [66], при этом их ИК-цвета не отличаются от других объектов. Джонс и др. [2] представили оптические свойства для пылинок ГАУ с разной степенью гидрогенизации. Согласно данной работе, частицы ГАУ с высоким отношением sp^3/sp^2 и низкой степенью ароматизированности создают меньший избыток цвета в оптическом диапазоне, $E(B-V)$, по сравнению с частицами с низким отношением sp^3/sp^2 . Частицы Sample 3, полученные в работе [61], характеризуются высоким отношением sp^3/sp^2 и обладают большим количеством дефектов, которые характерны для ГАУ с высоким отношением sp^3/sp^2 из работы [2]. Хотя частицы, предлагаемые в работе [2], не являются аналогом частиц с фуллереноподобной структурой, но в ряде работ [38, 82, 173] выдвигается гипотеза, что именно такие частицы порождают фуллерены в ПТ. Вероятно, что материал с фуллереноподобной структурой может быть более прозрачным в оптическом диапазоне, так же как и наиболее неупорядоченный материал в работе [2]. Для проверки

этой гипотезы необходимы лабораторные измерения и теоретические вычисления оптических свойств материала с фуллереноподобной структурой.

Давление и отношение C/O. Давление и относительное содержание углерода к кислороду оказывают существенное влияние на размеры, форму и количество продуктов горения с экспериментальной точки зрения. Количество фуллеренов и малых ПАУ по отношению к объёму сажи увеличивается по мере уменьшения давления, тогда как абсолютный объём сажи уменьшается. Фуллерены образуются в определённом диапазоне значений C/O, выше или ниже которых их образования не происходит. Аналогично ведут себя мелкие ПАУ ($N_C \lesssim 30$), тогда как крупные ПАУ, наоборот, растут при увеличении доли кислорода. Оба этих экспериментальных результата согласуются с наблюдениями фуллеренов и ПАУ в космических объектах. Во-первых, фуллерены с большей вероятностью образуются при низких металличностях, при которых давление и концентрация в оболочках звёзд ниже. Во-вторых, содержание углерода (относительно водорода и кислорода) в C_{60} -ПТ ниже, чем в ПТ без C_{60} , а в ПТ с наиболее интенсивными полосами C_{60} содержание углерода ниже, чем в остальных C_{60} -ПТ. Более того, для низкометаллических сред большинство ИК-спектров можно отнести к классу А, т.е. ПАУ в них в среднем меньшего размера, чем в высокометаллических средах.

Катализаторы. Как говорилось выше, кислород оказывает влияние на формирование углеродных молекул и сажи. Помимо кислорода немаловажную роль могут играть и другие элементы, такие как железо или никель. Учитывая, что большая часть железа находится внутри пыли [76], то, вероятно, могут происходить каталитические реакции с его участием или с участием других тяжёлых элементов. Различие в содержании тяжёлых элементов при разных металличностях может приводить к различию в эффективности протекания этих каталитических реакций. Однако на сегодняшний день каталитические реакции в астрохимии мало исследованы, поэтому фактор влияния катализаторов пока остаётся открытым.

Чтобы выяснить, какие именно факторы и в какой степени влияют на то, по какому пути пойдёт образование углеродных молекул и пыли, необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования, в том числе моделирование химико-динамической эволюции звёзд, согласованное с теорией формирования пыли при разных параметрах звёзд, а также с учётом переноса излучения. Повторим, что ключевыми параметрами может быть содержание кислорода, содержание тяжёлых элементов и зёрен нуклеации, в частности SiC, скорость отхождения оболочки и соответствующее этому время нахождения ароматических молекул и зародышей пыли в зоне формирования пыли, наличие ветров с большими скоростями и др.

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензенту за внимательное прочтение статьи, ценные замечания и предложения; Д.З. Вибе (Институт астрономии РАН) за мотивацию к работе и полезные замечания к материалу; Ю.А. Фадееву (Институт астрономии РАН) за дискуссии и помощь в освоении материалов по эволюции звёзд АВГ; Е.О. Пенцаку (Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского) за ознакомление с экспериментальной базой для исследований углеродных материалов. Автор очень признательна Роману Корради за предоставление изображения ПТ NGC 2022, получен-

ного на Телескопе новой технологии (NTT, Чили). В работе использовались архивные наблюдательные данные с космической обсерватории "Spitzer" (<https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>) и "ISO" (<https://www.cosmos.esa.int/web/iso/access-the-archive>).

Работа по разделам 1–3 выполнена в рамках госзадания FFWN-2024-0003, по разделам 4–6 — в рамках госзадания FEUZ-2020-0038.

Список литературы

- Draine B T, Li A *Astrophys. J.* **657** 810 (2007); astro-ph/0608003
- Jones A P et al. *Astron. Astrophys.* **558** A62 (2013); arXiv:1411.6293
- Weingartner J C, Draine B T *Astrophys. J.* **548** 296 (2001); astro-ph/0008146
- Jones A P et al. *Astron. Astrophys.* **602** A46 (2017); arXiv:1703.00775
- Hensley B S, Draine B T *Astrophys. J.* **948** 55 (2023); arXiv:2208.12365
- Allamandola L J, Tielens A G G M, Barker J R *Astrophys. J. Suppl.* **71** 733 (1989)
- Chiar J E et al. *Astrophys. J.* **507** 281 (1998)
- Chiar J E et al. *Astrophys. J.* **537** 749 (2000); astro-ph/0002421
- Cami J et al. *Science* **329** 1180 (2010)
- Kwok S, Zhang Y *Nature* **479** 80 (2011)
- Schnaiter M et al. *Astrophys. J.* **498** 486 (1998)
- Li A, Draine B T *Astrophys. J.* **554** 778 (2001); astro-ph/0011319
- Steglich M et al. *Astrophys. J. Lett.* **712** L16 (2010); arXiv:1002.3529
- Mishra A, Li A *Astrophys. J.* **809** 120 (2015); arXiv:1507.06599
- Campbell E K et al. *Nature* **523** 322 (2015)
- Campbell E K, Holz M, Maier J P *Astrophys. J. Lett.* **826** L4 (2016)
- Maier J P, Walker G A H, Bohlender D A *Astrophys. J.* **602** 286 (2004)
- Salama F et al. *Astrophys. J.* **728** 154 (2011)
- Omout A, Bettinger H F, Tönshoff C *Astron. Astrophys.* **625** A41 (2019); arXiv:1903.11955
- Berné O et al. *Astron. Astrophys.* **605** L1 (2017); arXiv:1706.06803
- McGuire B A et al. *Science* **359** 202 (2018); arXiv:1801.04228
- McGuire B A et al. *Science* **371** 1265 (2021); arXiv:2103.09984
- Cherchneff I *Astron. Astrophys.* **545** A12 (2012); arXiv:1111.6809
- Mattsson L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **440** 1562 (2014); arXiv:1403.0502
- Matsuura M et al. *Astrophys. J.* **800** 50 (2015); arXiv:1411.7381
- García-Hernández D A, Górný S K *Astron. Astrophys.* **567** A12 (2014); arXiv:1404.5158
- Karakas A, Lattanzio J C *Publ. Astron. Soc. Australia* **24** 103 (2007); arXiv:0708.4385
- Sloan G C et al. *Astrophys. J.* **752** 140 (2012); arXiv:1204.5754
- García-Hernández D A, in *IAU General Assembly, Meeting 29, August 2015*, id 2254847; arXiv:1511.06165; *Proc. IAU* **11** (A29B) E5 (2015) <https://doi.org/10.1017/S1743921317000357>
- Perea-Calderón J V et al. *Astron. Astrophys.* **495** L5 (2009); arXiv:0902.1049
- Kwitter K B, Henry R B C *Publ. Astron. Soc. Pacific* **134** 022001 (2022); arXiv:2110.13993
- Chiar J E et al. *Astrophys. J.* **770** 78 (2013)
- Dartois E C — *J. Carbon Res.* **5** (4) 80 (2019) <https://doi.org/10.3390/c5040080>
- Scott A, Duley W W, Pinho G P *Astrophys. J. Lett.* **489** L193 (1997)
- Draine B T et al. *Astrophys. J.* **663** 866 (2007); astro-ph/0703213
- Khramtsova M S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **431** 2006 (2013); arXiv:1302.4837
- Rémy-Ruyer A et al. *Astron. Astrophys.* **563** A31 (2014); arXiv:1312.3442
- García-Hernández D A et al. *Astrophys. J.* **760** 107 (2012); arXiv:1210.0216
- Otsuka M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **437** 2577 (2014); arXiv:1310.7711
- Gordon K D, Clayton G C *Astrophys. J.* **500** 816 (1998); astro-ph/9802003
- Madden S C et al. *Astron. Astrophys.* **446** 877 (2006); astro-ph/0510086
- Galliano F, Dwek E, Charnial P *Astrophys. J.* **672** 214 (2008); arXiv:0708.0790
- Sloan G C et al. *Astrophys. J.* **474** 735 (1997)
- Hony S et al. *Astron. Astrophys.* **370** 1030 (2001); astro-ph/0103035
- Peeters E et al. *Astron. Astrophys.* **390** 1089 (2002); astro-ph/0205400
- Boersma C et al. *Astron. Astrophys.* **511** A32 (2010)
- Allamandola L J, Hudgins D M, Sandford S A *Astrophys. J. Lett.* **511** L115 (1999)
- Rosenberg M J F, Berné O, Boersma C *Astron. Astrophys.* **566** L4 (2014); arXiv:1405.5383
- Andrews H et al. *Astrophys. J.* **807** 99 (2015)
- Croiset B A et al. *Astron. Astrophys.* **590** A26 (2016); arXiv:1603.02577
- Boersma C, Bregman J, Allamandola L J *Astrophys. J.* **858** 67 (2018)
- Maragkoudakis A, Peeters E, Ricca A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **494** 642 (2020); arXiv:2003.02823
- Sloan G C et al. *Astrophys. J.* **664** 1144 (2007); arXiv:0705.0905
- Keller L D et al. *Astrophys. J.* **684** 411 (2008); arXiv:0809.2389
- Acke B et al. *Astrophys. J.* **718** 558 (2010); arXiv:1006.1130
- Smolders K et al. *Astron. Astrophys.* **514** L1 (2010); arXiv:1004.1967
- Joblin C et al. *Astron. Astrophys.* **490** 189 (2008); arXiv:0809.1532
- Mennella V et al. *Astron. Astrophys.* **367** 355 (2001)
- Jones A P *Astron. Astrophys.* **542** A98 (2012); arXiv:1511.01684
- Pino T et al. *Astron. Astrophys.* **490** 665 (2008)
- Carpentier Y et al. *Astron. Astrophys.* **548** A40 (2012)
- Dartois E et al. *Astron. Astrophys.* **637** A82 (2020); arXiv:2004.02993
- Shannon M J, Boersma C *Astrophys. J.* **871** 124 (2019); arXiv:1812.02178
- Matsuura M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **439** 1472 (2014); arXiv:1401.0728
- Jensen P A et al. *Astron. Astrophys.* **665** A153 (2022)
- Sloan G C et al. *Astrophys. J.* **791** 28 (2014); arXiv:1406.7034
- Wagner D R, Kim H, Saykally R J *Astrophys. J.* **545** 854 (2000)
- Sandford S A, Bernstein M P, Materese C K *Astrophys. J. Suppl.* **205** 8 (2013)
- Joblin C et al. *Astrophys. J.* **458** 610 (1996)
- Yang X J et al. *Astrophys. J.* **776** 110 (2013); arXiv:1309.1993
- Duley W W, Hu A *Astrophys. J.* **761** 115 (2012); arXiv:1210.3222
- Gadallah K A K, Mutschke H, Jäger C *Astron. Astrophys.* **544** A107 (2012)
- Papoular R et al. *Astron. Astrophys.* **270** L5 (1993)
- Ohsawa R et al. *Publ. Korean Astron. Soc.* **32** 87 (2017)
- Goto M et al. *Astrophys. J.* **589** 419 (2003); astro-ph/0301311
- Otsuka M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **482** 2354 (2019); arXiv:1810.01703
- Otsuka M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **462** 12 (2016); arXiv:1607.00936
- Cami J et al. *Galaxies* **6** 101 (2018)
- Bregman J D et al. *Astrophys. J.* **344** 791 (1989)
- Kwok S, Volk K, Bernath P *Astrophys. J. Lett.* **554** L87 (2001)
- Rapacioli M, Joblin C, Boissel P *Astron. Astrophys.* **429** 193 (2005)
- Bernard-Salas J et al. *Astrophys. J.* **757** 41 (2012); arXiv:1207.5794
- Bernard-Salas J et al. *Astrophys. J.* **699** 1541 (2009); arXiv:0905.1124
- Pitman K M et al., in *Silicon Carbide — Materials, Processing and Applications in Electronic Devices* (Ed. M Mukherjee) (London: IntechOpen, 2011) p. 258, <https://doi.org/10.5772/24352>
- Speck A K, Barlow M J, Skinner C J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **288** 431 (1997)
- Sloan G C et al. *Astrophys. J.* **645** 1118 (2006); astro-ph/0603607
- Men'shchikov A B et al. *Astron. Astrophys.* **368** 497 (2001)
- Lagade E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **376** 1270 (2007); astro-ph/0611071
- Speck A K et al. *Astrophys. J.* **691** 1202 (2009); arXiv:0810.2599
- Leisenring J M, Kemper F, Sloan G C *Astrophys. J.* **681** 1557 (2008); arXiv:0803.3067
- Stanghellini L et al. *Astrophys. J.* **671** 1669 (2007); arXiv:0709.0488
- Gadallah K A K, Mutschke H, Jäger C *Astron. Astrophys.* **528** A56 (2011)
- Kwok S *Front. Astron. Space Sci.* **9** 893061 (2022)
- Ohsawa R et al. *Astrophys. J. Lett.* **760** L34 (2012); arXiv:1211.2385
- Pino T et al. *Astron. Astrophys.* **490** 665 (2008)
- Pegourie B *Astron. Astrophys.* **194** 335 (1988)
- Pitman K M et al. *Astron. Astrophys.* **483** 661 (2008); arXiv:0803.1210

98. Larruquert J I et al. *J. Opt. Soc. Am. A* **28** 2340 (2011) <https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.002340>
99. Volk K, Sloan G C, Kraemer K E *Astrophys. Space Sci.* **365** 88 (2020)
100. Hill H G M, Jones A P, D'Hendecourt L B *Astron. Astrophys.* **336** L41 (1998)
101. von Helden G et al. *Science* **288** 313 (2000)
102. Cox P *Astron. Astrophys.* **236** L29 (1990)
103. Gladkowski M et al. *Astron. Astrophys.* **626** A92 (2019); arXiv:1903.04072
104. Hony S, Waters L B F M, Tielens A G G M *Astron. Astrophys.* **390** 533 (2002); [astro-ph/0204330](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0204330)
105. Nuth J A et al. *Astrophys. J. Lett.* **290** L41 (1985)
106. Zhukovska S, Gail H P *Astron. Astrophys.* **486** 229 (2008); arXiv:0803.2994
107. Jiang B W et al. *Proc. IAU 9* (S297) 219–222 (2013); arXiv:1307.4014
108. Grishko V I et al. *Astrophys. J. Lett.* **558** L129 (2001)
109. Martin P G, Rogers C *Astrophys. J.* **322** 374 (1987)
110. Rouleau F, Martin P G *Astrophys. J.* **377** 526 (1991)
111. Zubko V G et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **282** 1321 (1996)
112. Andersen A C, Höfner S, Gautschi-Loidl R *Astron. Astrophys.* **400** 981 (2003); [astro-ph/0210282](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210282)
113. Srinivasan S et al. *Astron. Astrophys.* **524** A49 (2010); arXiv:1009.2681
114. Ueta T et al. *Astron. Astrophys.* **565** A36 (2014); arXiv:1403.2494
115. Draine B T, Lee H M *Astrophys. J.* **285** 89 (1984)
116. Zijlstra A A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **370** 1961 (2006); [astro-ph/0602531](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0602531)
117. Sloan G C et al. *Astrophys. J.* **686** 1056 (2008); arXiv:0807.2998
118. Kwok S, Hrivnak B J, Su K Y L *Astrophys. J. Lett.* **544** L149 (2000)
119. Matsuura M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **382** 1889 (2007); arXiv:0709.3199
120. Bernal J J et al. *Astrophys. J. Lett.* **883** L43 (2019)
121. Sandstrom K M et al. *Astrophys. J.* **744** 20 (2012); arXiv:1109.0999
122. Fonfría J P et al. *Astrophys. J.* **673** 445 (2008); arXiv:0709.4390
123. Lederer M T et al. *Memorie Soc. Astron. Italiana* **77** 1008 (2006)
124. Cherchneff I *Astron. Astrophys.* **526** L11 (2011); arXiv:1012.5076
125. Merino P et al. *Nat. Commun.* **5** 3054 (2014)
126. McCarthy M C, Gottlieb C A, Cernicharo J J. *Mol. Spectrosc.* **356** 7 (2019)
127. Tielens A G G M *Front. Astron. Space Sci.* **9** 908217 (2022); arXiv:2206.01548
128. Höfner S, Olofsson H *Astron. Astrophys. Rev.* **26** 1 (2018)
129. Mattsson L, Wahlin R, Höfner S *Astron. Astrophys.* **509** A14 (2010); arXiv:0909.1513
130. Wachter A et al. *Astron. Astrophys.* **384** 452 (2002)
131. Eriksson K et al. *Astron. Astrophys.* **566** A95 (2014); arXiv:1404.7515
132. Wachter A et al. *Astron. Astrophys.* **486** 497 (2008); arXiv:0805.3656
133. Cummings J D et al. *Astrophys. J.* **818** 84 (2016); arXiv:1601.03053
134. Ventura P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **424** 2345 (2012); arXiv:1205.6216
135. van Loon J T *Astron. Astrophys.* **354** 125 (2000); [astro-ph/9912053](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9912053)
136. Corradi R L M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **340** 417 (2003)
137. Mellema G *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **277** 173 (1995); [astro-ph/9506033](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9506033)
138. Schönberner D *J. Phys. Conf. Ser.* **728** 032001 (2016)
139. Krtićka J, Kubát J, Krtićková I *Astron. Astrophys.* **635** A173 (2020) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937150>
140. Perinotto M et al. *Astron. Astrophys.* **414** 993 (2004)
141. Schönberner D et al. *Astron. Nachrichten* **335** 378 (2014); arXiv:1404.0391
142. Schönberner D et al. *Astron. Astrophys.* **523** A86 (2010); arXiv:1009.0999
143. Martin J W, Salamanca M, Kraft M *Prog. Energy Combust. Sci.* **88** 100956 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100956>
144. Miller J A, Melius C F *Combust. Flame* **91** 21 (1992)
145. Frenklach M, Feigelson E D *Astrophys. J.* **341** 372 (1989)
146. Cole J A et al. *Combust. Flame* **56** 51 (1984)
147. Kaiser R I, Hansen N J. *Phys. Chem. A* **125** 3826 (2021)
148. Zhao T Q et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18** 3489 (2016)
149. Gordeev E G, Pentsak E O, Ananikov V P *J. Am. Chem. Soc.* **142** 3784 (2020)
150. Cernicharo J et al. *Astrophys. J. Lett.* **546** L123 (2001)
151. Крестинин А В и др. *Кинетика и катализ* **41** 102 (2000); Krestinin A V et al. *Kinet. Catal.* **41** 90 (2000)
152. Woods P M et al. *Astrophys. J.* **574** L167 (2002)
153. Dong G, Huttinger K *Carbon* **40** 2515 (2002)
154. Kislov V V et al. *J. Chem. Theory Comput.* **1** 908 (2005) <https://doi.org/10.1021/ct0500491>
155. Parker D S N et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* **54** 5421 (2015)
156. Yang T et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* **56** 4515 (2017)
157. Zhao L et al. *Nat. Astron.* **2** 413 (2018)
158. Parker D S N et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **109** 53 (2012)
159. Zhao L et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **22** 22493 (2020)
160. Zhao L et al. *J. Phys. Chem. Lett.* **9** 2620 (2018)
161. Shukla B et al. *J. Phys. Chem. A* **112** 2362 (2008)
162. Xiong S et al. *Comput. Theor. Chem.* **985** 1 (2012)
163. Zhao L et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* **58** 17442 (2019)
164. Baum Th et al. *Berichte Bunsenges. phys. Chem.* **96** 841 (1992) <https://doi.org/10.1002/bbpc.1992096702>
165. Hebgren P et al. *Proc. Combust. Inst.* **28** 1397 (2000)
166. Dunk P W et al. *Nat. Commun.* **3** 855 (2012)
167. Dunk P W et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110** 18081 (2013)
168. Zhao L et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23** 5740 (2021)
169. Tuli L B et al. *Nat. Commun.* **14** 1527 (2023)
170. Homann K-H *Angew. Chem. Int. Ed.* **37** 2434 (1998)
171. Chuvilin A et al. *Nature Chem.* **2** 450 (2010)
172. Zhen J et al. *Astrophys. J. Lett.* **797** L30 (2014); arXiv:1411.7230
173. Micelotta E R et al. *Astrophys. J.* **761** 35 (2012); arXiv:1207.5817
174. Berné O, Tielens A G G M *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **109** 401 (2012); arXiv:1111.0839
175. Murga M S, Akimkin V V, Wiebe D S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **517** 3732 (2022); arXiv:2210.11156
176. Das D et al. *Combust. Flame* **190** 349 (2018)
177. Wang H *Proc. Combust. Inst.* **33** 41 (2011)
178. Jacobson R S et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* **59** 4484 (2020)
179. Kholghy M R, Kelesidis G A, Pratsinis S E *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20** 10926 (2018)
180. Richter H, Howard J B *Prog. Energy Combust. Sci.* **26** 565 (2000)
181. D'Anna A *Proc. Combust. Inst.* **32** 593 (2009)
182. Frenklach M et al. *Combust. Flame* **188** 284 (2018)
183. Chen T *Astrophys. J.* **866** 113 (2018)
184. Howard J B *Symp. Int. Combust.* **23** 1107 (1991) [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80371-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80371-1)
185. Mao Q et al. *J. Phys. Chem. A* **122** 8701 (2018)
186. D'Anna A et al. *Combust. Flame* **127** 1995 (2001)
187. Bowal K, Martin J W, Kraft M *Carbon* **182** 70 (2021)
188. Frenklach M, Mebel A M *Phys. Chem. Chem. Phys.* **22** 5314 (2020)
189. Frenklach M *Phys. Chem. Chem. Phys.* **4** 2028 (2002)
190. Elvati P, Violi A *Proc. Combust. Inst.* **34** 1837 (2013)
191. Menon A et al. *J. Phys. Chem. A* **124** 10040 (2020)
192. Adamson B D et al. *J. Phys. Chem. A* **122** 9338 (2018)
193. Santoro G et al. *Astrophys. J.* **895** 97 (2020); arXiv:2005.02902
194. Mao Q, van Duin A C T, Luo K H *Carbon* **121** 380 (2017)
195. Yuan H et al. *Chem. Eng. Sci.* **195** 748 (2019)
196. Krueger R A, Blanquart G *Combust. Flame* **217** 85 (2020)
197. Jones A P *Astron. Astrophys.* **540** A1 (2012); arXiv:1511.01673
198. Jones A P *Astron. Astrophys.* **540** A2 (2012); arXiv:1511.01682
199. Li W, Shao L J. *Geophys. Res. Atmos.* **114** D09302 (2009) <https://doi.org/10.1029/2008JD011285>
200. Burlakova V E, Novikova A A *Fullerenes Nanotubes Carbon Nanostruct.* **25** 483 (2017)
201. Leon G et al. *Carbon* **182** 203 (2021)
202. Dhanoa H, Rawlings J M C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **440** 1786 (2014); arXiv:1304.6622
203. Agúndez M, Cernicharo J *Astrophys. J.* **650** 374 (2006); [astro-ph/0605645](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0605645)
204. Elvati P, Dillstrom V T, Violi A *Proc. Combust. Inst.* **36** 825 (2017)
205. Peng L et al. *Combust. Flame* **209** 441 (2019)
206. Frenklach M, Ramachandra M, Matula R A *Symp. Int. Combust.* **20** 871 (1985) [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(85\)80576-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(85)80576-2)
207. Camacho J, Lieb S, Wang H *Proc. Combust. Inst.* **34** 1853 (2013)
208. Salamanca M et al. *Exp. Thermal Fluid Sci.* **43** 71 (2012)
209. Merchan-Merchan W, McCollam S, Pugliese J F C *Fuel* **156** 129 (2015)
210. Serwin M, Karatas A E *Combust. Flame* **229** 111413 (2021)
211. Lebedeva I V et al. *J. Phys. Chem. C* **116** 6572 (2012)
212. Yang X-F et al. *Acc. Chem. Res.* **46** 1740 (2013)

213. Guo J et al. *RSC Adv.* **12** 9373 (2022)
214. de Vries M S et al. *Geochim. Cosmochim. Acta* **57** 933 (1993)
215. Onodera A et al. *J. Appl. Phys.* **69** 2611 (1991)
216. Karatas A, Gülder Ö L *Prog. Energy Combust. Sci.* **38** 818 (2012)
217. Commodo M et al. *Combust. Flame* **219** 13 (2020)
218. Amin H M F, Bennett A, Roberts W L *Proc. Combust. Inst.* **37** 1161 (2019)
219. Gail H P, Sedlmayr E *Astron. Astrophys.* **132** 163 (1984)
220. Martínez L et al. *Nat. Astron.* **4** 97 (2020)
221. Kovačević E et al. *Astrophys. J.* **623** 242 (2005)
222. Jäger C et al. *Astrophys. J.* **696** 706 (2009); arXiv:0903.0775
223. Biennier L et al. *Carbon* **47** 3295 (2009)
224. Contreras C S, Salama F *Astrophys. J. Suppl.* **208** 6 (2013)
225. Cernicharo J *Astrophys. J. Lett.* **608** L41 (2004)
226. Jäger C, Mutschke H, Henning T *Astron. Astrophys.* **332** 291 (1998)
227. Dartois E et al. *Astron. Astrophys.* **423** L33 (2004)
228. Dartois E et al. *Astron. Astrophys.* **432** 895 (2005)
229. Compiègne M et al. *Astron. Astrophys.* **525** A103 (2011); arXiv:1010.2769
230. Hanner M S "Infrared Observations of Comets Halley and Wilson and Properties of the Grains: summary of workshop sponsored by the National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. and held at Cornell University, Ithaca, New York, August 10–12, 1987", in *NASA Conf. Publication, Summary of a Workshop, Cornell Univ., Ithaca, New York, August 10–12, 1987* (Ed. M S Hanner) (Washington: NASA, 1988)
231. Gómez-Llanos V et al. *Astron. Astrophys.* **617** A85 (2018); arXiv:1806.10248
232. Hu A, Duley W W *Astrophys. J.* **672** L81 (2008)
233. Grishko V I, Duley W W *Astrophys. J.* **568** 448 (2002)
234. Bussoletti E et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **70** 257 (1987)
235. Faccinnetto A et al. *Combust. Flame* **158** 227 (2011)

Evolution of carbon particles from the stage of asymptotic giant branch stars to planetary nebulae: observations, experiments, and theory

M.S. Murga^(1,2)

⁽¹⁾ Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, ul. Pyatnitskaya 48, 119017 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,

ul. Mira 19, 620062 Ekaterinburg, Russian Federation

E-mail: murga@inasan.ru

We review research into the evolution of carbon particles at stages from the envelopes of asymptotic giant branch stars to planetary nebulae. The evolution of carbon particles is discussed from several standpoints: observational data are summarized; the formation mechanisms and clustering of aromatic molecules are considered; conditions for the formation of carbon particles in the envelopes of stars and for their subsequent evolution in protoplanetary and planetary nebulae are described; results of experiments on creating equivalents of interstellar dust and analyzing their characteristics are presented; and, finally, possible evolutionary scenarios for carbon particles are presented. Particular attention is paid to fullerene molecules, which are important for constructing a comprehensive picture of the evolution. Their presence and nonuniform distribution suggest that, depending on the conditions, the formation of carbon particles can follow two paths: via planar or nonplanar aromatic molecules.

Keywords: carbon particles, dust evolution, polycyclic aromatic hydrocarbons, fullerenes, interstellar medium, envelopes of asymptotic giant branch stars, planetary nebulae

PACS numbers: 82.33.Vx, 82.50.Hp, 95.30.Wi, 97.10.Fy, 98.38.Jw

Bibliography — 235 references

Received 24 October 2023, revised 29 November 2023

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (10) 1017–1045 (2024)

Physics–Uspekhi **67** (10) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.12.039614>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.12.039614>