

УГЛЕРОДНАЯ ВСЕЛЕННАЯ: ТИПЫ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ, МЕХАНИЗМЫ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ

М. С. Мурга

Институт астрономии Российской академии наук

Данная работа посвящена обзору основных аллотропных форм углерода, которые наиболее вероятно присутствуют в межзвездной среде: полициклические ароматические углеводороды, фуллерены, нанотрубки, графиты, аморфный углерод и алмазы. Кратко рассмотрены механизмы их формирования в лабораторных и космических условиях. Описаны основные отличительные признаки аллотропов, по которым их отождествляют в космическом пространстве. Дана информация об объектах, где разные аллотропы наблюдаются.

CARBON UNIVERSE: TYPES OF CARBONACEOUS GRAINS, MECHANISMS OF THEIR FORMATION AND THEIR ABUNDANCE

M. S. Murga

Institute of astronomy of Russian academy of sciences

This work is devoted to a review of the main allotropic carbon forms which the most likely present in the interstellar medium: polycyclic aromatic hydrocarbons, fullerenes, nanotubes, graphite, amorphous carbon and diamond. Mechanisms of their formation in laboratory and space conditions are considered. The distinguishing features of the allotropes which help to identify them in space are described. Information on the objects where different allotropes are observed is given.

Введение

Углерод — один из самых распространенных элементов на Земле и в космосе. Он обладает уникальным свойством образовывать множество соединений с разными составными компонентами, структурой, характеристиками. Ни один другой элемент подобным свойством не обладает. Благодаря этой особенности углерода, мы имеем множество органических соединений, в том числе и таких сложных, как белки, и даже ДНК/РНК. Атомарный углерод является результатом термоядерного горения гелия в звездах, покинувших главную последовательность и имеющих массу более $\approx 0.5M_{\odot}$. Углерод вступает в реакции с другими элементами, образуя богатое химическое разнообразие, наблюдаемое в межзвездной среде (МЗС). Одной из самых заметных углеродсодержащих молекул является молекула CO, но помимо нее есть молекулы HCO, CH₃OH, C₂H, CN, C₄H и много других. В оболочках звезд, богатых углеродом, на поздних стадиях эволюции образуются углеродные частицы, которые астрономы называют пылью.

О наличии межзвездной пыли астрономы знают довольно долго. Первооткрывателем можно считать Вильяма Гершеля (XVIII в.), который видел «дыры» в небе, хотя он и не предполагал, что эти дыры — не что иное, как пыль. А вот уже в 1847 г. Струве высказал предположение о некоей материи между нами и звездами. По мере развития наблюдательной техники, физической теории и экспериментальных данных, развивались и продолжают развиваться наши представления о пыли. Если еще 70 лет назад ученые делали только первые догадки о том, из чего же состоит пыль, то в наши дни состав и количество пыли при тех или

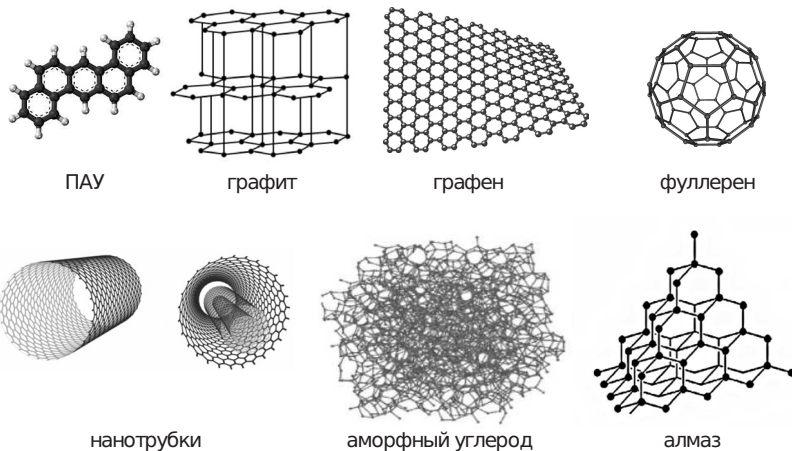
инных условиях описывается относительно точными количественными моделями. Несмотря на прорыв в данном направлении в последние пару десятилетий, у нас по-прежнему нет возможности непосредственного изучения межзвездной пыли, а современные технические возможности тоже имеют пределы, поэтому эти модели отягощены рядом неопределенностей. Одна из неопределенностей — это то, в каком аллотропном состоянии находится вещество межзвездной углеродной пыли. Термин «аллотропия» означает способность одного и того же атома образовывать несколько различных молекул или веществ. Интересным свойством углеродных аллотропов является то, что при определенном внешнем воздействии один вид аллотропов может преобразовываться в другой. Это же свойство позволяет синтезировать редкие и дорогие виды аллотропов из более доступных. В данной лекции будут описаны возможные варианты углеродных аллотропов и о признаках наличия их в МЗС.

Основные типы углеродных частиц

Количество различных зафиксированных аллотропных форм углерода растет экспоненциально. Часть из них найдена в природе (например, алмаз, графит, фуллерен, см. рисунок), другая часть синтезирована в лабораториях для развития новых технологий (графдин, стеклообразный углерод и др.), и довольно обширная доля аллотропов пока существует только гипотетически в расчетах теоретиков (пентаалмаз, Т-углерод и др.). Систематизация данных об аллотропах углерода представляет собой отдельную задачу, так как в современном научном мире с огромным числом ежедневных публикаций сложно отследить все предложенные формы, которые при этом не пересекаются друг с другом. В России была создана специальная база данных SACADA [1], в которой собрано максимальное количество различных аллотропов (> 500). Эта база данных пополняется непрерывно, и сотрудники ведут тщательное слежение за появлением в литературе работ по новым аллотропным формам, чтобы избежать пересечения. Не исключено, что искусственно синтезированные или даже существующие только теоретически формы углерода могут существовать и в МЗС. Однако в данной статье будут описаны только те, которые либо уже найдены в МЗС, либо присутствуют там с большой долей вероятности по косвенным признакам.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Как следует из названия, основной молекул ПАУ являются бензольные, или ароматические, кольца. Число колец и «узор» из них может варьироваться от одной молекулы к другой, однако они остаются в одной плоскости. Периферийные атомы углерода соединены с атомами водорода. Атомы углерода в ПАУ имеют sp^2 -гибридизацию, электронная структура является резонансной, и, соответственно, электроны ПАУ делокализованы. Благодаря делокализованной электронной структуре, когда электроны создают единое облако для всей молекулы, термодинамическая стабильность ПАУ считается относительно высокой. ПАУ являются канцерогенными молекулами, и снижение их количества в воздухе, почве, продуктах питания и т. д. является приоритетной задачей человечества, однако для астрофизиков эти молекулы представляют особый интерес, так как они участвуют во многих процессах (нагрев газа фотоэлектронами [2], формирование молекулы H_2 [3] и, вероятно, сложной органики [4] и др.).

Графит. Многослойная конструкция из пластин, состоящих из бензольных колец, носит название графита. Это наиболее стабильная форма углерода при нормальных условиях. Обладает регулярной кристаллической структурой, хотя могут встречаться разные конфигурации, отличающиеся относительными положениями бензольных колец в вертикальной плоскости. Благодаря уникальным физическим свойствам (электропроводность, мягкость, стойкость к плавке и др.) широко используется в производстве. Если отщипнуть одну пластину от графита, то эта пластинка будет называться графеном. За получение и идентификацию графена [5] А. Гейм и К. Новоселов были удостоены Нобелевской премии в 2010 г. Трудность получения одного слоя графита заключается в его высокой геометриче-



Основные аллотропные формы углерода

ской нестабильности, такая структура старается свернуться в более стабильные структуры, фуллерены и нанотрубки. Графен интенсивно изучается в науке и инженерии, так как является перспективным материалом для нанoeлектроники и других технологий.

Фуллерены. Эти молекулы имеют закрытую шарообразную структуру, состоящую из набора шестичленных, а также пятичленных и семичленных бензольных колец. Самая известная и стабильная молекула фуллерена — C_{60} — в точности повторяет геометрию классического футбольного мяча. Наименьший потенциально возможный фуллерен содержит всего 20 атомов, тогда как крупные фуллерены состоят из несколько сот атомов. Фуллерен C_{20} нестабилен. Считается, что фуллерен является стабильным, если ни одно из пятичленных колец в нем не контактирует с другим таким же кольцом. Наименьший фуллерен, удовлетворяющий этому правилу, — C_{60} . За получение фуллеренов в лаборатории (1985 г.) [6] была вручена еще одна Нобелевская премия (1996 г.) ученым Г. Крото, Р. Керл и Р. Смолли. Начиная с этого открытия, можно сказать, что началась «углеродная эра», когда поиск, изучение и применение всевозможных углеродных аллотропов стали передовым направлением в материаловедении, нанoeлектронике и других областях. Атомы в молекуле фуллерена находятся в sp^2 -гибридизации, при этом связи между атомами чередуются между одинарными и двойными, длина связей также меняется. В отличие от ПАУ, электроны в молекулах фуллерена локализованы, то есть не являются общими для всей молекулы. Фуллерены хорошо растворяются, не теряя структуры, очень активны в реакциях присоединения, при этом физические и химические свойства могут меняться в зависимости от того, какие атомы присоединены к их поверхности. Среди уникальных свойств фуллеренов стоит отметить возможность поместить внутрь молекулы какие-либо другие атомы, то есть фуллерены могут выступать в качестве своеобразных легковесных контейнеров. Применение фуллеренов расширяется фактически каждый день, и, вероятно, в скором будущем они будут присутствовать в нашей жизни повсеместно.

Нанотрубки. Этот вид аллотропов представляет собой свернутый в цилиндрическую трубку графен. Нанотрубки могут быть как одностенными, так и многостенными. В зависимости от того, каким образом свернута трубка, могут наблюдаться разные свойства

трансляционной и вращательной симметрии. Трубки очень прочны на растяжение, обладают высокой теплопроводностью и некоторые из них являются хорошими электропроводниками.

Аморфный углерод. Основным отличительным свойством аморфного углерода (а-С) является его неупорядоченная структура, обладающая свойством только ближнего порядка и не распространяющаяся на средний и дальний порядки. Атомы в аморфном углероде находятся в sp^3 -гибридизации. В структуру могут входить ароматические кольца, при этом кольца располагаются под разными углами относительно друг друга и могут создавать подкластеры внутри частицы, но «узор» композиции из колец и атомов, не входящих в кольцо, не повторяется, то есть нет правила их расположения. Так как атомы ароматических колец обладают sp^2 -гибридизацией, то материал аморфного углерода можно характеризовать отношением числа sp^3 -гибридизаций к числу sp^2 -гибридизаций, или, другими словами, ароматизированностью. В отличие от ароматических колец, электроны в которых делокализованы, у аморфной структуры электроны локализованы, что приводит к возможности протекания каких-либо локальных процессов (присоединение каких-либо атомов, диссоциация). В аморфном углероде могут присутствовать оборванные связи с локализованными электронами, к которым может присоединяться водород. Поэтому аморфный углерод часто встречается в гидrogenизированной форме (а-С:Н или ГАУ), такой как сажа или битум. Если аморфный углерод присутствует в МЗС, то наиболее вероятно находится в гидrogenизированной форме, хотя доля атомов водорода может быть низкой.

Алмаз. Структура алмаза такова, что каждый атом является вершиной правильного тетраэдра с основанием из соседних четырех атомов. Атомы углерода имеют sp^3 -гибридизацию. В нормальных условиях термодинамически метастабилен, но при нагревании переходит в графит. Известен как самый твердый и упругий минерал в природе, а также как материал с очень высокой теплопроводностью и как полупроводник с очень широкой шириной запрещенной зоны. Красоту игры цветов на алмазе, а точнее на его обработанной версии — бриллианте, создает уникальная комбинация свойств показателя преломления, прозрачности и дисперсии показателя преломления. За это алмаз считается одним из самых дорогих и драгоценных камней в мире. Но алмаз используется не только для украшений. Большое значение алмаз имеет в промышленности в качестве материала для сверхпрочных ножей или сверл, в ядерной отрасли, в микроэлектронике.

Механизмы формирования

Формирование и рост углеродных частиц ассоциируется с высокими температурами. Даже в повседневной жизни мы регулярно сталкиваемся и даже сами производим множество ПАУ: сгорание топлива, жарка мяса, курение — другими словами, если есть дым, то есть ПАУ. Оболочки звезд — это, в действительности, большие печки. Реакции образования бензольного кольца и дальнейшего роста ПАУ в них, вероятно, протекают эффективно. Считается, что бензольное кольцо (или фенил радикал) может сформироваться в плотном и горячем газе оболочек звезд в реакции молекул ацетилена (C_2H_2) с винилацетиленом (C_4H_4) либо в реакциях с участием двух радикалов пропаргила (C_3H_3) [7]. Эти реакции протекают в условиях низкого (по лабораторным меркам) давления и температурах около 1 000—1 500 К. После формирования первого бензольного кольца необходимы реакции роста. Наиболее вероятно рост происходит за счет последовательной потери атома водорода и присоединения молекулы ацетилена (механизм НАСА) [8]. Альтернативными способами являются прямая полимеризация бензольных колец либо реакции объединения фенил радикала с полиинами (например, C_4H_2).

В работе [9] была предпринята попытка составить модель с известными реакциями формирования ПАУ. В результате было найдено, что ПАУ при плотностях оболочек звезд асимптотической ветви гигантов (АВГ) могут эффективно формироваться только в довольно узком температурном окне от 900 до 1100 К. Остывание оболочки происходит быстро, и, таким образом, промежуток времени, когда могут формироваться ПАУ, называется коротким. Добавление ветра от звезды и ударных волн увеличило температурное окно формирования ПАУ до 1700 К, но все же до сих пор модели не могут предсказать наблюдаемого количества пыли.

Помимо реакций образования ПАУ при высокой температуре, существуют альтернативные сетки реакций, которые протекают при низкой температуре вплоть до 10 К. Среди них можно привести в пример безбарьерную реакцию между фенилрадикалом (C_6H_5) и винил-ацетиленом [10]. Таким образом, ПАУ — это не только печки и высокие температуры, они могут быть сформированы и в холодных молекулярных облаках.

Значительную роль в развитии картины формирования ПАУ играют лабораторные эксперименты, связанные с горением или пиролизом (нагрев до высоких температур в условиях отсутствия воздуха). Но большинство экспериментов проводят при высоких давлениях на уровне 0.1 атм и выше, тогда как в обочках звезд АВГ давление варьируется от 10^{-6} до 0.1 атм. В экспериментах, как правило, нагреву подвергается смесь газа из малоатомных углеводородов (ацетилен, этилен, бензол и др.), в результате чего получают сажу (или аморфный углерод), ПАУ и графиты, фуллерены и нанотрубки. Выход конкретного продукта зависит от созданных условий. В эксперименте [11], проведенном при давлениях от 3 до 30 атм, было показано, что в газе из молекул ацетилена и этилена при температуре около 1000 К формируются преимущественно ПАУ, при повышении температуры до 1500—1700 К основным продуктом оказывается сажа, но ПАУ также присутствуют в смеси продуктов. Если же температура в камере устанавливалась 3500 К и более, то продуктами горения становились фуллерены и фуллереносодержащая сажа. То есть основным регулятором исходного продукта являлась температура. Другие эксперименты указывают, что добавление в углеводородный газ кислорода или насыщение водородом также сказывается на состав исходных продуктов, при этом необходимости высокой температуры для формирования фуллерена при изменении состава газа нет [12, 13]. Если в среде повышено содержание атомарного кислорода, то такая среда благоприятствует росту ПАУ, если же повысить содержание молекулярного кислорода, то в такой среде будут формироваться фуллерены.

Формируемые частицы сажи или аморфного углерода под воздействием внешних факторов (излучение, ударные волны, высокие температуры) могут перейти в более устойчивую, графитовую форму, при этом переходе в газовую фазу могут поступить как малоатомные углеводороды, так и ПАУ и фуллерены [14].

Формирование нанотрубок и фуллеренов в лаборатории происходит идентично: в дуговом разряде между графитовыми электродами, путем лазерной абляции графитовых стержней или с помощью пиролиза углеводородов. Как правило, фуллерены и многостенные нанотрубки формируются одновременно, после чего производят выделение требуемого вида. Одностенные нанотрубки образуются при наличии металлических катализаторов, таких как никель, кобальт, медь и др. ПАУ могут перейти в форму фуллеренов при воздействии потока заряженных частиц или ультрафиолетового излучения [15].

Зная, как формируются вышеуказанные аллотропы в лаборатории, можно сделать вывод, что формирование этих типов аллотропных частиц может происходить в оболочках звезд АВГ на поздних стадиях на разных расстояниях от звезды или в разные моменты времени. Однако состав и доминирующие компоненты продуктов будут зависеть от химического состава родительской звезды. Различия в спектрах звезд постасимптотической ветви гигантов и планетарных туманностей явно свидетельствуют об этом. Так, например,

фуллерены наблюдаются в основном в низкометаллических планетарных туманностях [16], тогда как наиболее высокое содержание ПАУ связывают со средами с высокой металличностью [17].

Алмазы могут быть получены из аморфного углерода, графита и фуллеренов, но это преобразование требует высоких давлений (порядка 10^5 атм) и высоких температур ($\gtrsim 1200$ К). Такие значения давления недостижимы в оболочках звезд АВГ. На Земле такие условия достигаются в глубоких слоях на глубинах около 150 км, где алмазы медленно формируются из имеющегося там углерода. Эти же условия создаются в лабораториях, где выращиваются синтетические алмазы. В МЗС условия для образования алмазов из аморфного углерода или графита также могут быть удовлетворены. Для этого требуется столкновения углеродных частиц на высоких скоростях (> 10 км/с). Такие столкновения возможны в остатках сверхновых звезд после прохождения ударной волны, а также при формировании планетных систем, когда уже не пылинки, а фактически каменные глыбы сталкиваются друг с другом со скоростями 10–100 м/с. В результате столкновения вдоль площади соприкосновения пылинок как раз создаются условия повышенного давления и температуры, которые близки к необходимому для образования алмазов. Изотопный состав алмазов, найденных в метеоритах (повышенное содержание ксенона), указывает, что их формирование происходило в остатках сверхновых звезд [18], что подтверждает вышесказанное предположение об их формировании.

Распространенность различных видов углеродных частиц

Пыль повсеместна в МЗС, но ее распределение неоднородно, как неоднородны ее характеристики, такие как размеры и, если говорить об углеродной пыли, композиция аллотропных модификаций. Несмотря на отсутствие возможности непосредственно исследовать межзвездную пыль, по косвенным признакам мы можем судить о том, в каком же виде углеродная пыль присутствует в МЗС.

Единственная модификация углерода, о наличии которой в МЗС известно точно, — это молекулы фуллерена C_{60} и C_{70} . Фуллерен идентифицирован по инфракрасным (ИК) эмиссионным полосам на длинах волн 17.4 и 18.9 мкм практически во всех типах объектов, в которых есть источник ультрафиолетового излучения, способного возбудить колебательные переходы: планетарные туманности, области фотодиссоциации, отражательные туманности и др. [19, 20]. Также фуллерен проявляет себя в поглощении в полосах на длинах волн 9577 и 9632 Å, которые соответствуют электронным переходам в молекуле C_{60} . Эти две полосы соответствуют одним из диффузных межзвездных полос (DIB), источник которых неизвестен и является вопросом обширных дискуссий. Пожалуй, эти две полосы являются уникальным случаем, когда об источнике DIB не спорят. Но все же молекулы фуллерена не так повсеместны, по крайней мере в количестве, необходимом для обнаружения. Среди всех углеродных планетарных туманностей, найденных в Млечном Пути и имеющих спектральные наблюдения в ИК-диапазоне, только в $\approx 5\%$ из них идентифицирован фуллерен [21]. Таким образом, его формирование протекает в оболочках звезд АВГ не одинаково, и пока нет однозначного объяснения, почему одни звезды произвели большое количество фуллерена, а другие не сделали этого.

Так как формирование нанотрубок происходит аналогично фуллеренам, то очень вероятно, что нанотрубки также присутствуют в МЗС, однако пока они не найдены. У нанотрубок нет таких же уникальных и сильных полос, связанных с колебательными переходами, но это утверждение пока неточно, так как необходимы теоретические расчеты колебательных и электронных спектров и экспериментальные данные о нанотрубках разной геометрии, толщины и длины, а также с замещенными атомами.

О наличии в МЗС ПАУ можно судить по ИК-спектрам объектов с повышенным полем излучения. Основные ИК-переходы ПАУ происходят в результате колебаний связей C—H и C—C. В зависимости от типа связи и колебания (растяжение или сгибание, в плоскости или вне плоскости молекулы) длина волны перехода меняется. Наиболее заметные ИК-полосы наблюдаются на 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.2, 12.6 мкм. Но есть множество других, более слабых полос, наличие которых указывает на особенности в ПАУ или частицах, ответственных за излучение в этих полосах. Несмотря на то, что ИК-спектр имеет приблизительно одинаковый внешний вид для всех объектов, можно отметить множество вариаций. Например, центральные длины волн полос на 6.2 и 7.7 мкм могут варьироваться в диапазонах от 6.20 до 6.30 мкм и от 7.6 до 8.2 мкм, соответственно [22]. Такие изменения в положениях полос могут возникать в результате замещения атомов углерода в ПАУ атомами азота либо в результате влияния негармонических осцилляций при высокой температуре [23, 24]. Помимо того, что меняются сами полосы, меняется их вклад в полную светимость в ИК-диапазоне и отношение светимости этих полос к излучению в дальнем ИК-диапазоне, за которое ответственные крупные пылинки, то есть меняется численное содержание ПАУ относительно крупной пыли. Известно, что содержание ПАУ в низкометаллических галактиках в несколько раз ниже, чем в высокометаллических [25], тогда как внутри одной галактики содержание ПАУ приблизительно равномерное. Примечательно, что в планетарных туманностях, как правило, наблюдаются либо фуллерены, либо ПАУ. Лишь в единичных случаях (туманность Тс 1) наблюдаются полосы, свойственные обоим углеродным формам. По всей видимости, формирование идет по сценарию образования либо объемных молекул, либо планарных. Детальное изучение химического состава и физических характеристик планетарных туманностей пока не привело к какому-то однозначному выводу о причине такого разделения туманностей по содержанию ПАУ и фуллеренов.

Наиболее точной идентификацией ПАУ можно считать совпадение девяти теоретически рассчитанных вращательных переходов бензонитрила с наблюдениями [26]. К сожалению, этот метод неприменим к большинству ПАУ в МЗС, во-первых, из-за отсутствия или слабого дипольного момента, а во-вторых, из-за их размера, так как считается, что в МЗС ПАУ должны включать не менее 40 атомов, а расчет вращательных переходов таких крупных молекул очень ресурсоемкий и, возможно, на сегодняшний день невозможен. Открытие бензонитрила было возможно только благодаря тому, что эта молекула имеет относительно высокий дипольный момент, а также находится в молекулярном облаке, то есть скрыта от разрушающего ультрафиолетового излучения.

Слабые ИК-полосы, о которых упоминалось выше, дают дополнительную информацию об их «хозяевах». К примеру, по соседству с широкой полосой на длине волн 3.3 мкм, соответствующей колебанию ароматической (sp^2) связи C—H в плоскости молекулы, часто наблюдается менее широкая полоса на длине волн 3.4 мкм, возникновению которой способствуют колебания алифатической (sp^3) связи C—H. Эта связь может присутствовать в ПАУ, если к ней присоединены дополнительные атомы водорода, то есть если крайние атомы углерода вместо одного атома водорода присоединяют по два атома. В этом случае резонансная структура ароматического кольца пропадает, что влияет на спектр молекулы. Но, кроме насыщенных водородом ПАУ, эта полоса может появляться в ГАУ. О наличии ГАУ в МЗС можно также судить по слабым ИК-полосам на длинах волн 6.85 и 7.25 мкм [27]. Стоит отметить, что ИК-полосы «сидят» на подложке или плаги, природа которого неизвестна, но предполагается, что ГАУ- или ПАУ-кластеры могут отвечать за его возникновение [28, 29]. Все признаки ГАУ относятся к объектам, где ультрафиолетовое поле излучения умеренное. В протопланетарных туманностях вышеуказанные алифатические особенности проявляются достаточно уверенно, тогда как в планетарных туманностях могут не наблюдаться совсем. Есть предположение, что они наблюдаются только в молодых планетарных туманностях и со временем пропадают. В этом случае очевидно отслежива-

ется переход аморфного углерода в ароматические частицы. Такой же переход отчетливо виден, например, в области фотодиссоциации Orion Bar, где вдали от источника излучения отношение полос на 3.4 и 3.3 мкм имеет максимальное значение и по мере приближения к источнику уменьшается, что свидетельствует о разрушении носителей этой полосы.

Перейдем к наблюдениям алмазов. Несмотря на множество попыток найти алмазы в МЗС, на сегодняшний день только в трех объектах (два протопланетных диска и оболочка одной звезды) имеется указание на их наличие [30, 31]. Алмазы найдены во многих метеоритах, и, судя по аномальному обилию ксенона в составе этих алмазов, они были сформированы не в Солнечной системе, а при взрывах сверхновых звезд. Найденные алмазы гидрогенизированы на поверхности. Как показывают лабораторные измерения, колебательные переходы связей C—H попадают в диапазон длин волн от 3.4 до 3.5 мкм. По ним и были идентифицированы алмазы в космических объектах. Однако было выяснено, что метеоритные алмазы отличаются по спектру от земных, и наблюдаемые ИК-полосы в трех алмазосодержащих объектах не в точности соответствуют метеоритным алмазам, и для точного совпадения размеры алмазов должны быть более 50 нм [32]. В модели пыли, предложенной в работе [33], сделана оценка содержания наноалмазов в МЗС, согласно которой доля углерода, заключенного в наноалмазах, составляет менее 7 %, при этом указано, что подавляющая часть из них находится в составе крупных пылинок и поэтому не проявляет своих уникальных эмиссионных свойств. В тех же объектах, в которых алмазы идентифицированы, они были подвержены жесткому рентгеновскому излучению в результате вспышки. Таким образом, пока вопрос об обилии и распространенности алмазов в космическом пространстве является открытым. Возможно, обзорные наблюдения в ИК-диапазоне либо сопоставление электронных спектров с полосами межзвездных диффузных полос поможет расширить знания об алмазах в МЗС.

В составе метеоритов, помимо алмазов, обнаружены ПАУ, фуллерены, аморфный углерод и многое другое [34–36]. Эти находки дают основание предполагать, что наши представления об углеродном аллотропном составе, основанные на наблюдениях МЗС, близки к правде. Однако дальнейшая более точная идентификация сложных молекул остается актуальной задачей астрохимии.

Заключение

В данной работе был проведен небольшой обзор о наиболее часто встречающихся на Земле и в космосе аллотропных формах углерода. Показано, что углеродный мир богат и интересен. Рассказано о том, как те или иные типы углеродных частиц могут сформироваться в космическом пространстве и какие частицы и каким образом можно наблюдать в МЗС. Несмотря на значимый прогресс в исследовании углеродных частиц (эксперименты, теоретические вычисления, новейшие наблюдения), наши знания об эволюции углеродных частиц в космосе пока остаются неполными, поэтому исследование этого вопроса продолжается и будет продолжаться в ближайшем будущем.

Библиографические ссылки

- [1] *Hoffmann Roald, Kabanov Artyom A., Golov Andrey A., Proserpio Davide M.* Homo Citans and Carbon Allotropes: For an Ethics of Citation // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2016. — Vol. 55, № 37. — P. 10962–10976. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/anie.201600655>.
- [2] *Habart E., Verstraete L., Boulanger F. et al.* Photoelectric effect on dust grains across the L1721 cloud in the rho Ophiuchi molecular complex // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 373. — P. 702–713. [astro-ph/0104150](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200114150).

- [3] *Boschman L., Cazaux S., Spaans M. et al.* H₂ formation on PAHs in photodissociation regions: a high-temperature pathway to molecular hydrogen // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 579. — P. A72. 1504. 08276.
- [4] *Allamandola L. J.* PAHs and Astrobiology // *EAS Publications Series* / ed. by C. Joblin, A. G. G. M. Tielens : *EAS Publications Series.* — 2011. — Vol. 46. — P. 305–317.
- [5] *Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al.* Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // *Science.* — 2004. — Vol. 306, № 5696. — P. 666–669. <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.1102896>.
- [6] *Kroto H. W., Heath J. R., Obrien S. C. et al.* C₆₀: Buckminsterfullerene // *Nature.* — 1985. — Vol. 318, № 6042. — P. 162–163.
- [7] *Cherchneff Isabelle, Barker John R., Tielens Alexander G. G. M.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Formation in Carbon-rich Stellar Envelopes // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 401. — P. 269.
- [8] *Frenklach Michael, Feigelson Eric D.* Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Circumstellar Envelopes // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 341. — P. 372.
- [9] *Frenklach Michael, Feigelson Eric D.* Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Circumstellar Envelopes // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 341. — P. 372.
- [10] *Parker D. S. N., Zhang F., Kim Y. S. et al.* Low temperature formation of naphthalene and its role in the synthesis of PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) in the interstellar medium // *Proceedings of the National Academy of Science.* — 2012. — Vol. 109, № 1. — P. 53–58.
- [11] *Jäger C., Huisken F., Mutschke H. et al.* Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Carbonaceous Solids in Gas-Phase Condensation Experiments // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 696, № 1. — P. 706–712. 0903.0775.
- [12] *Weilmünster P., Keller A., Homann K.-H.* Large molecules, radicals, ions, and small soot particles in fuel-rich hydrocarbon flames: Part I: positive ions of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAH) in low-pressure premixed flames of acetylene and oxygen // *Combustion and Flame.* — 1999. — Vol. 116, № 1. — P. 62–83.
- [13] *Leon Gustavo, Martin Jacob W., Bringley Eric J. et al.* The role of oxygenated species in the growth of graphene, fullerenes and carbonaceous particles // *Carbon.* — 2021. — Vol. 182. — P. 203–213.
- [14] *Scott A., Duley W. W., Pinho G. P.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Fullerenes as Decomposition Products of Hydrogenated Amorphous Carbon // *Astrophys. J. Lett.* — 1997. — Vol. 489. — P. L193.
- [15] *Chuvilin Andrey, Kaiser Ute, Bichoutskaia Elena et al.* Direct transformation of graphene to fullerene // *Nature Chemistry.* — 2010. — Vol. 2, № 6. — P. 450–453.
- [16] *Otsuka Masaaki, Kemper F., Cami J. et al.* Physical properties of fullerene-containing Galactic planetary nebulae // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 437, № 3. — P. 2577–2593. 1310.7711.
- [17] *Khramtsova M. S., Wiebe D. S., Boley P. A., Pavlyuchenkov Ya. N.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 431, № 2. — P. 2006–2016. 1302.4837.
- [18] *Blake D. F., Freund F., Krishnan K. F. M. et al.* The nature and origin of interstellar diamond // *Nature.* — 1988. — Vol. 332, № 6165. — P. 611–613.
- [19] *Sellgren Kris, Werner Michael W., Ingalls James G. et al.* C₆₀ in Reflection Nebulae // *Astrophys. J. Lett.* — 2010. — Vol. 722, № 1. — P. L54–L57. 1009.0539.

- [20] *Cami Jan, Bernard-Salas Jeronimo, Peeters Els, Malek Sarah Elizabeth.* Detection of C₆₀ and C₇₀ in a Young Planetary Nebula // Science. — 2010. — Vol. 329, № 5996. — P. 1180.
- [21] *Garcia-Hernandez Domingo Antbal.* Dust and molecules in extra-galactic planetary nebulae // IAU General Assembly. — 2015. — Vol. 29. — P. 2254847. 1511.06165.
- [22] *Peeters E., Hony S., Van Kerckhoven C. et al.* The rich 6 to 9 μm spectrum of interstellar PAHs // Astron. Astrophys. — 2002. — Vol. 390. — P. 1089–1113. astro-ph/0205400.
- [23] *Ricca A., Boersma C., Peeters E.* The 6.2 μm PAH Feature and the Role of Nitrogen: Revisited // Astrophys. J. — 2021. — Vol. 923, № 2. — P. 202.
- [24] *Chakraborty Shubhadip, Mulas Giacomo, Rapacioli Mathias, Joblin Christine.* Anharmonic infrared spectra of thermally excited pyrene (C₁₆H₁₀): A combined view of DFT-based GVPT2 with AnharmonicCaOs, and approximate DFT molecular dynamics with demonNano // Journal of Molecular Spectroscopy. — 2021. — Vol. 378. — P. 111466. 2102.06582.
- [25] *Draine B. T., Dale D. A., Bendo G. et al.* Dust Masses, PAH Abundances, and Starlight Intensities in the SINGS Galaxy Sample // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 663, № 2. — P. 866–894. astro-ph/0703213.
- [26] *McGuire Brett A., Burkhardt Andrew M., Kalenskii Sergei et al.* Detection of the aromatic molecule benzonitrile (c-C₆H₅CN) in the interstellar medium // Science. — 2018. — Vol. 359, № 6372. — P. 202–205. 1801.04228.
- [27] *Memella Vito.* Dust Evolution from the Laboratory to the Interstellar Medium // Journal of Physics Conference Series : Journal of Physics Conference Series. — 2005. — Vol. 6. — P. 197–202.
- [28] *Rapacioli M., Joblin C., Boissel P.* Spectroscopy of polycyclic aromatic hydrocarbons and very small grains in photodissociation regions // Astron. Astrophys. — 2005. — Vol. 429. — P. 193–204.
- [29] *Papoular R.* On the carbonaceous carriers of infrared plateau and continuum emission // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — Vol. 434, № 1. — P. 862–869. 1306.3445.
- [30] *Guillois O., Ledoux G., Reynaud C.* Diamond Infrared Emission Bands in Circumstellar Media // Astrophys. J. Lett. — 1999. — Vol. 521, № 2. — P. L133–L36.
- [31] *Jones A. P.* Nano-diamonds in proto-planetary discs. Life on the edge // Astron. Astrophys. — 2022. — Vol. 665. — P. A21. 2206.13474.
- [32] *Jones A. P., d'Hendecourt L. B., Sheu S. Y. et al.* Surface C-H stretching features on meteoritic nanodiamonds // Astron. Astrophys. — 2004. — Vol. 416. — P. 235–241.
- [33] *Jones A. P., Ysard N.* A derivation of nano-diamond optical constants. Here be nano-diamonds // Astron. Astrophys. — 2022. — Vol. 657. — P. A128. 2111.04492.
- [34] *McKay David S., Gibson Jr., Everett K., Thomas-Keprta Kathie L. et al.* Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001 // Science. — 1996. — Vol. 273, № 5277. — P. 924–930.
- [35] *Sandford Scott A., Aléon Jérôme, Alexander Conel M. O. 'D. et al.* Organics Captured from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft // Science. — 2006. — Vol. 314, № 5806. — P. 1720.
- [36] *Sabbah Hassan, Carlos Mickaël, Jenniskens Peter et al.* Detection of Cosmic Fullerenes in the Almahata Sitta Meteorite: Are They an Interstellar Heritage? // Astrophys. J. — 2022. — Vol. 931, № 2. — P. 91. 2208.10122.