

*Вадим Бедняков,
Максим Назаренко*

О скрытой материи, космическом углероде и условиях возникновения жизни на Земле

Ипостаси темной материи

Согласно выводам современных космологов, наша Вселенная образовалась в результате Большого Взрыва. Три основных составляющих этой модели — расширение Вселенной, синтез легких элементов за первые несколько минут ее существования и наблюдаемое в космосе микроволновое фоновое излучение, возникшее в момент формирования атомов (рекомбинации) спустя примерно 300 тысяч лет после Большого Взрыва, — имеют под собой прочный экспериментальный фундамент.

Сегодня уже мало кого удивляет тот факт, что окружающее нас вещество, образованное из барионов (то есть протонов и нейтронов) и электронов, которое в космологии называется барионной материей, составляет лишь 4 — 5% от полной плотности вещества во Вселенной. Эта барионная материя, образовавшаяся на стадии раннего синтеза легких ядер, сосредоточена ныне в галактиках и их скоплениях, в звездах и планетных системах, в меж-

звездной пыли и других астрономических объектах. При этом всего вещества во Вселенной должно быть как минимум в 5 раз больше. Вся совокупность наблюдений и анализа в космологии приводит к заключению о существовании огромного количества неизлучающей, невидимой глазу и недоступной изощренным астрономическим приборам скрытой, или темной (небарионной) материи, имеющей загадочное происхождение.

В настоящее время ситуация еще более усложнилась, поскольку получены веские свидетельства существования другой экзотической формы — «темной энергии», которую чаще всего соотносят с энергией вакуума или знаменитой «космологической постоянной» Эйнштейна (см. Главную тему «З-С», 8/06), хотя рассматриваются и иные модели темной энергии. В них, однако, не предполагается, что темная энергия способствует кластеризации вещества.

Пожалуй, именно небарионная темная материя играла особенно важную роль в формировании структур различного масштаба во Вселенной. Если бы этой темной материи не существовало, то, как считают ученые, реально наблюдаемые структуры в расширяющейся Вселенной просто не

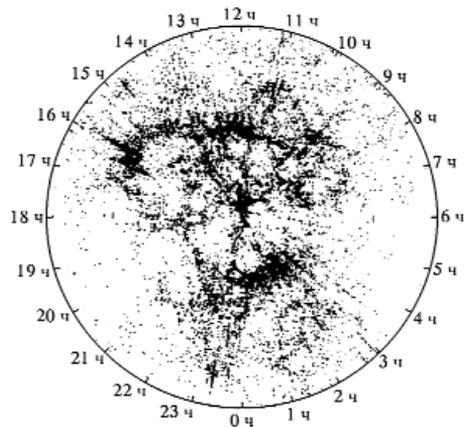
* В. Бедняков — доктор физико-математических наук, Объединенный институт ядерных исследований; М. Назаренко — кандидат физико-математических наук, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики.

успели бы возникнуть. Практически невозможно без небарионной темной материи согласовать эпоху испускания фонового микроволнового излучения со временем формирования наблюдаемых ныне крупномасштабных структур во Вселенной. Так что, по видимому, первоначально появились гравитационные «ямы» — сгустки темной материи. Дальнейшая кластеризация вокруг них обычной материи сделала эти структуры видимыми.

Предполагается, что существуют как минимум два особых вида небарионной темной материи — это горячая и холодная темная материя. Первая состоит из релятивистских частиц, например из нейтрино, с массами около 1 электронвольт (эВ). Подобные частицы движутся так быстро, что любые возникшие флуктуации в их среде со временем полностью исчезнут.

Образование крупных космических структур возможно только при участии холодной темной материи — некой субстанции, которая сама не излучает и не отражает электромагнитные волны ни в каком из возможных диапазонов. Она, вероятнее всего, представляет собой скопление неких очень тяжелых нерелятивистских частиц с массами как минимум порядка гигаэлектронвольт (ГэВ), проявляющих себя лишь путем гравитационного воздействия на другие, хорошо видимые астрономические тела. Примерно 90% вещества крупных галактик находится в их темных (невидимых) гало. Эти частицы уже на ранней стадии могли служить зародышами для конденсации вещества. Обусловленные ими флуктуации плотности начали формироваться задолго до эпохи рекомбинации атомов (например, всего через несколько мгновений после Большого Взрыва).

Именно холодная темная материя порождает тот гравитационный потенциал, под влияние которого барионные структуры попадают сразу после рекомбинации. Первыми при этом образуются структуры типа шаровых скоплений звезд и малых галак-



Распределение галактик в прилежащей к нам части Вселенной, полученное путем измерения красного смещения. Млечный Путь расположен в центре

тик. Таким образом, без небарионной холодной материи невозможно было бы само существование Вселенной в современном ее виде, а значит, и формирование Солнечной системы и планеты Земля.

Примечательно, что в рамках современной Стандартной модели физики нет подходящего кандидата на роль частиц холодной небарионной темной материи. Для решения этой проблемы нужно выйти за ее пределы. Поиск явлений за рамками Стандартной модели — магистральное направление современных исследований физики элементарных частиц. Ради этого создаются уникальные коллайдеры и детектирующие системы, проводятся прецизионные эксперименты и астрофизические наблюдения.

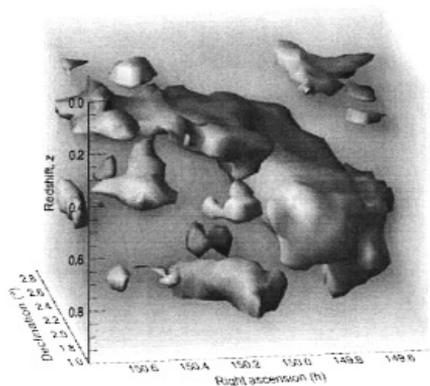
Подобными частицами могут быть пока гипотетические, слабо взаимодействующие массивные нейтральные частицы (их называют WIMP-частицы — weakly interacting massive particle). В рамках современных суперсимметричных теорий известен наиболее перспективный кандидат на эту роль — нейтралино. Оказалось, что ее свойства таковы, что реликтовая плотность нейтралино вполне соответствует недостающей плотности вещества во Вселенной.

Обнаружение WIMP-частиц — задача не из легких. В основе их поиска с помощью расположенного на Земле детектора лежит измерение энергии взаимодействия частиц темной материи с ядрами мишени. К сожалению, вероятность таких событий очень мала. Так, в зависимости от той или иной модели суперсимметрии она варьируется от 10 до 10^{-7} событий в сутки в одном килограмме вещества детектора, а энергия, выделенная при этом, не превышает 100 кэВ. Так что детекторы, нацеленные на поиск подобных частиц, должны обладать низким энергетическим порогом регистрации (значительно ниже 100 кэВ, на уровне 1 — 2 кэВ), а также их надо очень надежно защищать от фоновых процессов (радиоактивности, космических лучей и т.п.). И наконец, чтобы действительно отличить взаимодействие частиц темной материи от фоновых процессов, нужно выявить специфические особенности (сигнатуры) именно такого взаимодействия.

К настоящему времени коллаборация DAMA (Dark Matter) после семи лет измерений сумела обнаружить свидетельства взаимодействия частиц темной материи на Земле. Проведенные измерения дали область допустимых значений масс WIMP-частиц темной материи — 50 — 100 ГэВ/с².

В декабре 2009 года в рамках другого поискового эксперимента Cryogenic Dark Matter Search (CDMS) было анонсировано первое экспериментальное наблюдение двух событий — возможных кандидатов на так называемые WIMP. Еще одно событие было зарегистрировано в аналогичном эксперименте EDELWEISS.

Эксперименты CDMS и EDELWEISS используют в качестве регистрирующей аппаратуры германиево-кремниевые детекторы, охлажденные до предельно низкой (гелиевой) температуры и помещенные в магнитное поле. Установки расположены в глубоких шахтах для максимального уменьшения возможного фона. Взаимодействие частиц регистрируется по тепловыделению и заряду.



Трехмерная реконструкция распределения темной материи, полученная коллаборацией Hubble Space Telescope

Достоверность идентификации, однако, не превышает 75 процентов. Для проверки полученного результата эти коллаборации планируют уже в 2010 году провести модернизацию установок и, увеличив количество германия в детекторах, продолжить измерения.

Одной из ипостасей темной материи также является барионная темная материя. К этому виду относят астрономические объекты, состоящие из обычных протонов и нейтронов (то есть барионов). Вот только эти объекты по тем или иным причинам значительно слабее обычного испускают или отражают электромагнитное излучение, а потому их трудно обнаружить традиционными методами. Барионная темная материя, вообще говоря, не является в полной мере темной (скрытой). Степень ее «скрытости» несколько ниже, чем у «настоящей» темной материи, которая пока проявила себя только гравитационно. Барионную материю все же можно заметить, хоть и с большим трудом, с помощью современных астрономических приборов. В ее состав обычно включают образовавшийся на ранней стадии гелий (совместно с водородом), холодные газовые облака, расположенные в межгалактическом пространстве, галактики с понижен-

ной поверхностной яркостью, черные дыры и их остатки, тусклые звезды, называемые красными карликами, планеты, напоминающие Юпитер, а также некоторые объекты промежуточной массы — коричневые карлики (см. «3-С», 5/05, 12/09). Однако все эти объекты дают очень маленький вклад в полную плотность вещества во Вселенной.

С одной стороны, как говорилось, сегодня нельзя представить развитие Вселенной, Солнечной системы и самой Земли без небарионной темной материи. С другой стороны, те формы жизни, которые существуют на Земле, невозможно вообразить без сложных органических молекул, содержащих углерод, а эти молекулы обнаружены в темных областях космического пространства и составляют одну из компонент барионной темной материи. Именно этот специальный и «немногочисленный» класс барионной темной материи, по представлениям авторов, играет важнейшую роль в вопросе о возможности возникновения жизни в целом и на планете Земля в частности. Содержащие углерод субстанции находили в диффузных темных облаках, в поверхностных слоях некоторых звезд, в плотных звездобразующих областях, в протопланетных дисках, в кометах, небольших планетах, метеоритах и частицах межзвездной пыли. В чем-то эти органические фрагменты схожи между собой, в чем-то различны.

За последнее время мы узнали много нового об эволюции органических молекул в космосе. Новые результаты наземных и космических наблюдений, лабораторные эксперименты, новые методы моделирования позволяют значительно продвинуться в понимании этого вопроса. Безусловно, проблему происхождения жизни нельзя свести только к физике и астрофизике — здесь кроются только необходимые, но никак не достаточные условия для ее зарождения (абиогенеза). Специалистам по органической химии, биофизике, биохимии, биологии, теории сложных и самоорганизующихся систем и т.п. предстоит, в

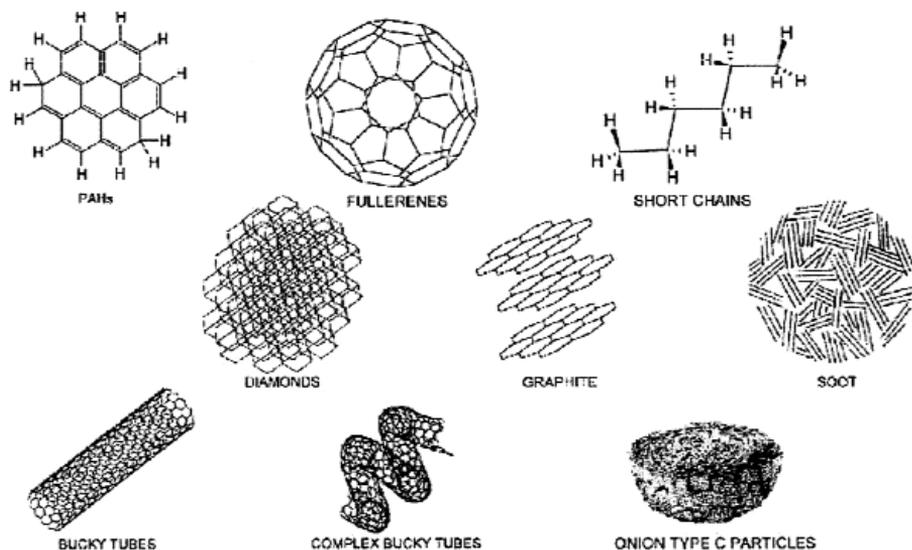
свою очередь, ответить на наиболее важные, ключевые вопросы в этой комплексной проблеме — найти уже достаточные условия и действительные причины возникновения жизни. Мы же, в свою очередь, хотим обратить внимание на то, что важнейшую роль в данном процессе на планете Земля сыграла эта своеобразная форма материи — барионная темная материя.

Космический «темный» углерод и жизнь

Живые системы далеки от равновесных. Они поглощают энергию в любых доступных им формах и могут изменяться, приспосабливаясь к изменяющимся внешним условиям. Проблема возможного возникновения подобных систем — или, иными словами, жизни — на Земле или где-либо еще во Вселенной составляет основу современной астробиологии. В рамках этой науки считается, что жизнь может быть широко распространена в космосе, поскольку спонтанно возникает там и тогда, где формируются необходимые для нее условия. Жизнь в той форме, что нам пока известна, является продуктом различных химических реакций углерода.

Углерод ^{12}C , будучи основным продуктом «перегорания» гелия, — четвертый по распространенности элемент во Вселенной и второй по распространенности изотоп из тех, что формируются внутри звезд. Он — основная составляющая органической материи.

Как показали наблюдения, органические вещества и их компоненты достаточно широко распространены в космосе, причем не только в нашей Галактике, но и далеко за ее пределами. Так, основная часть углерода в темных межзвездных облаках (по-видимому, не менее 50%) находится в твердой форме — в виде углеродсодержащих гранул достаточно большого размера (~ 0,1 мкм). Другая часть углерода (до 30%) может представлять собой газообразные молекулы С и СО, а также, возможно, находится во



Примеры различных типов углеродосодержащих материалов, которые с большой вероятностью присутствуют в межзвездном пространстве и в Солнечной системе

льдах из CO и CO₂. Основная часть оставшихся 20% углерода присутствует в виде молекул, содержащих углерод. Достаточно большие и сложные органические молекулы (толины), образующиеся при воздействии ультрафиолетового света на простые органические молекулы, вероятно, входят в состав компонент темной барионной материи, обнаруженных на кометах и других космических телах, находящихся на окраине Солнечной системы. Считается, что толины являются химическими предшественниками жизни.

В настоящее время астрономы зарегистрировали уже не один десяток из так называемых экзопланетарных систем, на которых в принципе могли создаваться условия для возникновения жизни. Поэтому логичен вопрос о том, могут ли органические вещества в неизменном виде достигнуть тех планетных систем, где готова возникнуть жизнь.

Ответ на этот вопрос зависит от того, каким изменениям органические материалы подвергаются в космосе. Так, когда они попадают в плотные

облака, происходит их коагуляция (объединение мелких частей в более крупные), образуются сложные соединения в виде льда. Ультрафиолетовое облучение и нагревание (например, от ближайшей звезды) могут и далее модифицировать органическое вещество, прежде чем оно попадает в состав комет или планет. Учитывая эту обработку «внешней средой», естественно ожидать, что органика, обнаруженная в разных астрономических объектах, будет сильно различаться как по свойствам, так и по составу и распространенности.

Так, многоциклические ароматические углеводороды в метеоритах значительно меньше, чем в межзвездной среде, а те, в свою очередь, еще меньше тех, что обнаружены в протопланетных туманностях. Органика в кометах также отличается от той, что найдена в межпланетных частицах пыли и метеоритах. Все это свидетельствует о заметной трансформации вещества по мере формирования планет, а также по мере того, как метеориты и частицы межпланетной пыли добираются до Земли.

Но есть и много схожего. Поразительно, но линии излучения в области 3,4 микрометра для органических материалов, обнаруженных в рассеянной (диффузной) межзвездной среде

и метеоритах, почти полностью совпадают. Имеется также необъяснимое сходство в составе и распространенности льда в протозвездных областях и кометах. Не ясно, является ли это случайным совпадением или же, попадая в область формирования комет, лед по каким-то причинам сохраняет свою неизменную форму.

Помимо углерода, для возникновения жизни в том виде, как мы ее понимаем, требуется твердокаменная планета типа Земли с водой в жидкой фазе на ее поверхности или под поверхностью. Кстати говоря, для поиска именно таких планет организована космическая миссия *Darwin*, конечная цель которой — обнаружение жизни на планетах вне Солнечной системы. Подобные планеты не могут располагаться слишком близко или далеко от родной звезды; они должны двигаться по круговой орбите. Далее, нужны биогенные химические элементы: водород, углерод, кислород и азот, а также некоторое количество других (кальций, сера, фосфор и т.п.).

На Земле необходимые для жизни водород и кислород содержатся в воде, а вот появление углерода и азота небиологического происхождения можно объяснить лишь космическими причинами. Каков же механизм образования органической материи в межзвездном пространстве?

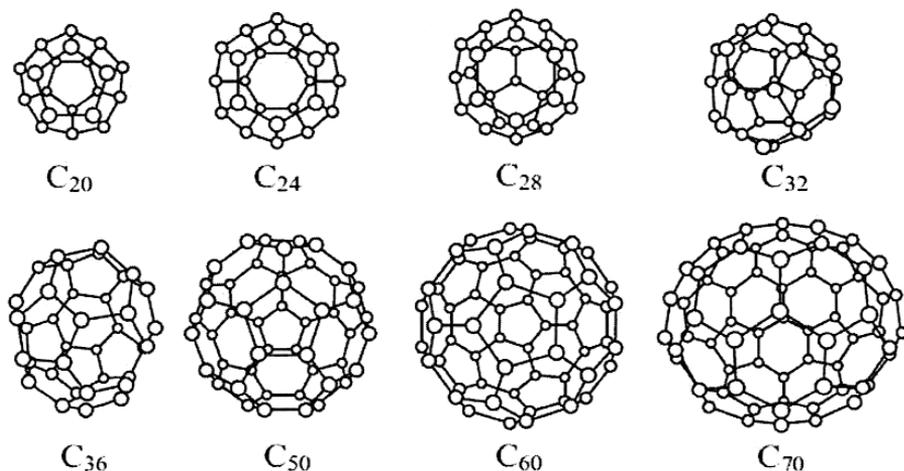
Практически все химические элементы, кроме водорода, гелия и лития, появились в процессе ядерного синтеза внутри звезд. Так, углерод возникал при слиянии трех альфа-частиц в ядрах массивных звезд, когда основная часть их водорода успевала превратиться в гелий. Эти звезды, в конце концов, превращались в сверхновые. При взрывах последних огромное количество элементов, в том числе углерод, выбрасывалось в космическое пространство. Там появлялись, например, длинные углеродные цепочки, пополняя состав тех плотных облаков и туманностей, из которых рождались звезды и планеты.

Распространенность космического углерода — важный критерий в вопросе о наличии живых организмов

во Вселенной. Скажем, на Солнце на 106 атомов водорода приходится 355 ± 50 атомов углерода, в ближайшем межзвездном пространстве — 225 ± 50 атомов С. Примерно 20% космического углерода находится в виде газообразного СО и еще несколько процентов в виде льда в плотных облаках. Интригующим остается вопрос, где же и в каком виде искать недостающий космический углерод. Астрономические наблюдения позволяют предположить, что основная его часть может быть «спрятана» в виде полициклических ароматических углеводородов (15%) и в форме макромолекулярного углерода в гранулах (до 50%). Другие органические компоненты (в значительно меньшем количестве) — углеродные цепочки, алмазы и фуллерены — можно найти в диффузных межзвездных облаках. Углеродсодержащая пыль в космическом пространстве весьма разнообразна; она содержит аморфный углерод, уголь, сажу, углеродный конденсат, алмазы, фуллерены и другие углеродные компоненты. Таким образом, можно определенно считать, что фундаментальные строительные блоки жизни (по крайней мере, той, что существует на Земле) должны быть широко распространены в Солнечной системе, на других планетных системах Млечного Пути, а также и в других галактиках.

После формирования планет (примерно 4,6 миллиарда лет назад) наша Солнечная система, включая Землю, в течение нескольких сотен миллионов лет подвергалась довольно интенсивной бомбардировке различными космическими телами. Жизнь на нашей планете возникла либо во время этой бомбардировки, либо почти сразу после ее окончания (примерно 3,9 миллиарда лет назад). Эту бомбардировку можно в известной степени считать фактором «нелинейного воздействия», повлекшим за собой дальнейшее бурное развитие жизни на Земле.

Основным средством доставки сюда органических молекул, вероятно, были кометы, метеориты и межпла-

Семейство фуллеренов C_{20} — C_{70}

нетная пыль. Поток органической материи, переносимый на Землю подобным путем, мог достигать 10^{11} килограммов в год, что в несколько порядков превышает скорость «производства» этих молекул на Земле. Модельные оценки говорят о том, что с момента образования Солнечной системы на нашу планету доставлено огромное количество — 10^{20} – 10^{26} граммов — углерода и твердых камнеобразных материалов. Последние содержат добиологические компоненты, которые при соответствующих условиях вполне могли внести свой весомый вклад в зарождение жизни. Так, в комете Галлея обнаружены микроскопические гранулы, содержащие углерод, водород, кислород и азот. Более того, кометы могли бы доставить на Землю углеродсодержащие молекулы, которые способны войти в состав аминокислот и других элементов нуклеиновых кислот и протеинов. Кометы могут даже напрямую «контактировать» с далеким космосом и доставлять на Землю органические материалы, которые уже входили в состав живых существ на какой-нибудь планетной системе типа Солнечной и были выброшены в межзвездную среду после взрыва сверхновой.

Пока самые важные этапы зарождения жизни скрыты «во мгле пространства и времени». Радиоастрономы,

впрочем, показали, что огромные темные межзвездные облака, входящие в состав барионной темной материи, содержат множество органических молекул (метан, оксид углерода, формальдегид, этанол, синильная кислота, муравьиная кислота и др.). По-видимому, все они уже существовали в нашей Галактике задолго до зарождения жизни на Земле. Как доказано, такие биомолекулы, как аминокислоты, вполне могли достигать поверхности нашей планеты в ранний период ее истории благодаря метеоритам. Лабораторные эксперименты свидетельствуют, что эти сложные молекулы способны выдержать значительные тепловые и механические перегрузки при столкновении комет, метеоритов и других космических тел с Землей.

Специализированные лабораторные исследования сыграли и играют ключевую роль как в обнаружении углеродсодержащих молекул в космосе, так и в понимании происходящих с ними изменений под действием различного рода космических факторов. Главная задача наземных экспериментов — это получение в лабораторных условиях космических образцов, содержащих углерод, и анализ их свойств в зависимости от их химического состава и структуры. Другая важнейшая задача состоит в воспроизведении процессов синтеза органичес-

ких материалов в космосе. Почти вся современная астрохимия может легко оказаться областью бесконтрольных и бесплодных спекуляций, если не будет надежных данных для анализа и интерпретации результатов астрономических экспериментов.

Следующий этап в исследовании органических соединений состоит в том, чтобы изучить характеристики различных реакций (скорости их протекания и т.п.), которые, как ожидается, способны формировать и разрушать эти вещества в условиях космического пространства. Последние достижения в этой области включают в себя измерения и анализ таких характеристик молекулярных процессов, как зависимость скорости фоторасщепления от температуры, соотношения процессов рекомбинации и фоторасщепления и тому подобное, протекающих под действием различных радиационных полей. Продолжают изучаться процессы образования сложных органических соединений во льдах под действием ультрафиолета. Наконец, за последнее десятилетие технология анализа материала метеоритов и комет продвинулась очень далеко, и теперь мы можем исследовать образцы размером менее микрометра.

...Подытоживая сказанное, стоит отметить, что вряд ли можно придумать более фундаментальную задачу, чем проблема происхождения жизни на Земле. Представляется разумным, что в рамках современной концепции образования Вселенной, берущей свое начало от Большого Взрыва, необходимы две важнейшие формы весьма экзотического содержания — это небарионная и барионная темная материя во Вселенной. Без одной из них (например, в форме слабозаимодействующих нейтральных массивных частиц) невозможно само существование окружающего нас мира в целом. Те же формы жизни, что имеют место на Земле, не могут быть представлены без сложных углеродсодержащих молекул и их комплексов, элементы которых имеют космическое происхождение и представляют



Полимерный внутренне-структурированный микрогель диаметром 80 нм. Эти гели нашли свое применение в качестве удобного и перспективного материала в медицине — например, в сфере целевой доставки лекарств. Незначительные изменения характеристик растворителя позволяют этому гелю открываться или закрываться, тем самым высвобождая или захватывая соответствующее активное вещество

собой одну из компонент барионной темной материи.

Тот факт, что жизнь возникла на Земле удивительно рано, рассматривается некоторыми исследователями как подтверждение гипотезы о «беспроblemности» ее зарождения, а значит, жизнь — не такая уж редкость во Вселенной. Последнее утверждение не противоречит тому, что жизнь могла быть легко доставлена на Землю из космоса, например, с помощью комет, а, может быть, даже в капсулах-фуллеренах.

Таким образом, приобретает особую актуальность всестороннее исследование свойств и характеристик сложных углеродных молекулярных комплексов. Это обусловлено проблемой происхождения жизни, широким спектром органических молекул в космосе, наличием скрытой (не обнаруженной пока) темной фракции космического углерода, а также ростом интереса к углеродным микро- и наноструктурам (фуллерены, нанотрубки и т.п.).