

СВОЙСТВА КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

С. В. БОЖОКИН

Санкт-Петербургский государственный технический университет

COSMIC DUST PROPERTIES

S. V. BOZHOKIN

The main processes of the origin of dust and its physical properties are presented. The influence of dust on the processes of self infrared radiation and on interstellar light absorption is discussed. Different processes of the origin and evolution of dust are considered.

Рассмотрены происхождение космической пыли, ее состав и физические свойства. Обсуждается влияние космической пыли на процессы собственного инфракрасного излучения пыли и межзвездного поглощения света. Описываются возникновение и эволюция космической пыли.

ВВЕДЕНИЕ

Многие люди с восторгом любуются прекрасным зрелищем звездного неба, одного из величайших творений природы. В ясном осеннем небе хорошо заметно, как через все небо пролегает слабо светящаяся полоса, называемая Млечным Путем, имеющая неправильные очертания с разной шириной и яркостью. Если рассматривать Млечный Путь, образующий нашу Галактику, в телескоп, то окажется, что эта яркая полоса распадается на множество слабо светящихся звезд, которые для невооруженного глаза сливаются в сплошное сияние. В настоящее время установлено, что Млечный Путь состоит не только из звезд и звездных скоплений, но также из газовых и пылевых облаков [1–3].

Огромные межзвездные облака из светящихся разреженных газов получили название газовых диффузных туманностей. Одна из самых известных — туманность в созвездии Ориона, которая видна даже невооруженным глазом около средней из трех звездочек, образующих “меч” Ориона. Газы, ее образующие, светятся холодным светом, переизлучая свет соседних горячих звезд. В состав газовых диффузных туманностей входят главным образом водород, кислород, гелий и азот. Такие газовые или диффузные туманности служат колыбелью для молодых звезд, которые рождаются так же, как некогда родилась наша Солнечная система. Процесс звездообразования непрерывен, и звезды продолжают возникать и сегодня.

В межзвездном пространстве наблюдаются также диффузные пылевые туманности. Эти облака состоят из мельчайших твердых пылинок. Если вблизи пылевой туманности окажется яркая звезда, то ее свет рассеивается этой туманностью и пылевая туманность становится непосредственно наблюдаемой (рис. 1). Газовые и пылевые туманности могут вообще поглощать свет звезд, лежащих за ними, поэтому на снимках неба они часто видны как черные зияющие провалы на фоне Млечного Пути. Такие туманности называют темными. На небе южного полушария есть одна очень большая темная туманность, которую мореплаватели прозвали Угольным мешком. Между газовыми и пылевыми туманностями нет четкой границы, поэтому часто

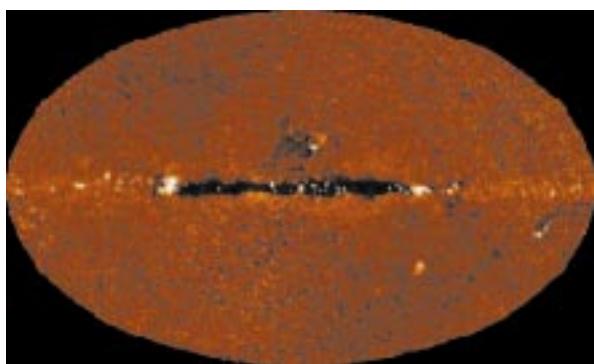


Рис. 1. Изображение галактики, заполненной космической пылью

они наблюдаются совместно как газопылевые туманности.

Диффузные туманности являются лишь уплотнениями в той крайне разреженной межзвездной материи, которая получила название межзвездного газа. Межзвездный газ обнаруживается лишь при наблюдениях спектров далеких звезд, вызывая в них дополнительные линии поглощения. Ведь на большом протяжении даже такой разреженный газ может поглощать излучение звезд. Возникновение и бурное развитие радиоастрономии позволили обнаружить этот невидимый газ по тем радиоволнам, которые он излучает. Огромные темные облака межзвездного газа состоят в основном из водорода, который даже при низких температурах излучает радиоволны на длине 21 см. Эти радиоволны беспрепятственно проходят сквозь газ и пыль. Именно радиоастрономия помогла нам в исследовании формы Млечного Пути. Сегодня мы знаем, что газ и пыль, перемешанная с большими скоплениями звезд, образуют спираль, ветви которой, выходя из центра Галактики, обвивают ее середину, создавая нечто похожее на каракатицу с длинными щупальцами, попавшую в водоворот.

В настоящее время огромное количество вещества в нашей Галактике находится в виде газопылевых туманностей. Межзвездная диффузная материя сконцентрирована сравнительно тонким слоем в экваториальной плоскости нашей звездной системы. Облака межзвездного газа и пыли загораживают от нас центр Галактики. Из-за облаков космической пыли десятки тысяч рассеянных звездных скоплений остаются для нас невидимыми. Мелкая космическая пыль не только ослабляет свет звезд, но и искажает их спектральный состав. Дело в том, что когда световое излучение проходит через космическую пыль, то оно не только ослабляется, но и меняет цвет. Поглощение света космической пылью зависит от длины волны, поэтому из всего оптического

спектра звезды сильнее поглощаются синие лучи и слабее – фотоны, соответствующие красному цвету. Этот эффект приводит к явлению покраснения света звезд, прошедших через межзвездную среду.

Для астрофизиков огромное значение имеет изучение свойств космической пыли и выяснение того влияния, которое оказывает эта пыль при изучении физических характеристик астрофизических объектов. Межзвездное поглощение и межзвездная поляризация света, инфракрасное излучение областей нейтрального водорода, дефицит химических элементов в межзвездной среде, вопросы образования молекул и рождение звезд – во всех этих проблемах огромная роль принадлежит космической пыли, рассмотрению свойств которой и посвящена данная статья.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

Космические пылинки возникают в основном в медленно истекающих атмосферах звезд – красных карликов, а также при взрывных процессах на звездах и бурном выбросе газа из ядер галактик. Другими источниками образования космической пыли являются планетарные и протозвездные туманности, звездные атмосферы и межзвездные облака. Во всех процессах образования космических пылинок температура газа падает при движении газа наружу и в какой-то момент переходит через точку росы, при которой происходит конденсация паров веществ, образующих ядра пылинок. Центрами образования новой фазы обычно являются кластеры. Кластеры представляют собой небольшие группы атомов или молекул, образующие устойчивую квазимолекулу. При столкновениях с уже сформировавшимся зародышем пылинки к нему могут присоединяться атомы и молекулы, либо вступая в химические реакции с атомами пылинки (хемосорбция), либо достраивая формирующуюся кластер. В наиболее плотных участках межзвездной среды, концентрация частиц в которых $n \geq 10^6 \text{ см}^{-3}$, рост пылинки может быть связан с процессами коагуляции, при которых пылинки могут слипаться друг с другом, не разрушаясь при этом. Процессы коагуляции, зависящие от свойств поверхности пылинок и их температур, идут только в том случае, когда столкновения между пылинками происходят при низких относительных скоростях соударений.

На рис. 2 показан процесс роста кластеров космической пылинки с помощью присоединения мономеров. Получающаяся при этом аморфная космическая пылинка может представлять собой кластер атомов, обладающий фрактальными свойствами [4–7]. Фракталами называются геометрические объекты: линии, поверхности, пространственные тела, имеющие сильно изрезанную форму и обладающие свойством самоподобия.

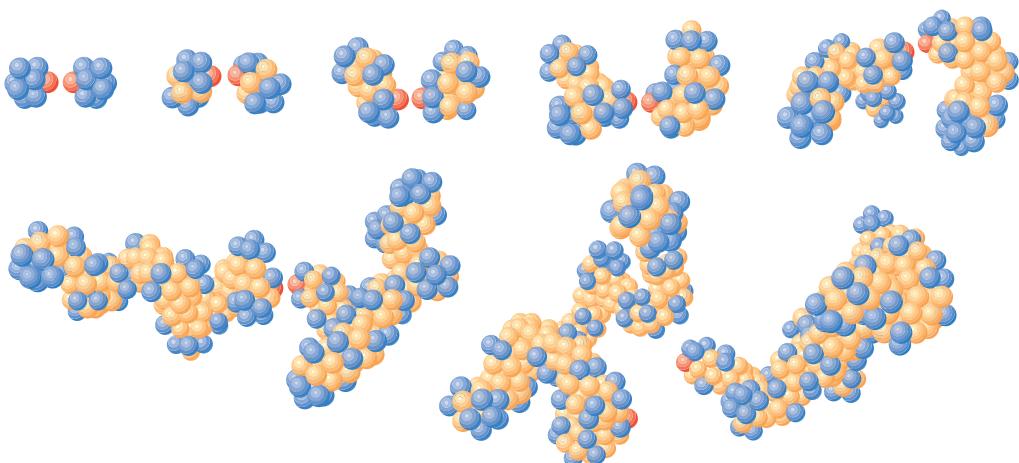


Рис. 2. Создание космической пылинки с помощью коагуляции атомных кластеров

Самоподобие означает неизменность основных геометрических характеристик фрактального объекта при изменении масштаба. Например, изображения многих фрактальных объектов оказываются очень похожими при увеличении разрешения в микроскопе. Фрактальные кластеры представляют собой сильно разветвленные пористые структуры, образующиеся в сильно неравновесных условиях при объединении твердых частиц близких размеров в одно целое. В земных условиях фрактальные агрегаты получаются при релаксации паров металлов в неравновесных условиях, при образовании гелей в растворах, при коагуляции частиц в дымах. Модель фрактальной космической пылинки показана на рис. 3. Отметим, что процессы коагуляции пылинок, происходящие в протозвездных облаках и газопылевых дисках, значительно усиливаются при турбулентном движении межзвездного вещества.

Ядра космических пылинок, состоящие из тугоплавких элементов, размером в сотые доли микрона

образуются в оболочках холодных звезд при плавном истечении газа или во время взрывных процессов. Такие ядра пылинок устойчивы ко многим внешним воздействиям.

Потоки газа, давление излучения выносят пылинки в межзвездную среду, где они остывают до температуры $T_d \approx 10-20$ К. При этом на пылинку намерзает оболочка из "грязного" льда — молекул H_2O и молекул других соединений. Время роста оболочек составляет величину порядка 10^{10} лет. За это время пылинка может попасть в зону ионизованного водорода, в горячий корональный газ, в оболочку новой или сверхновой звезды, в спиральную ударную волну или ударную волну иного происхождения, где такая ледяная оболочка может испариться. За время такого путешествия процессы разрушения и создания ледяной оболочки пылинки могут многократно повторяться и в зависимости от этих процессов формируются состав пылинок и их распределение по размерам. Основным механизмом разрушения пылевых частиц является процесс выбивания поверхностных молекул при бомбардировке пылинки либо частицами окружающего газа, либо космическими лучами.

Космическая пыль возникает во многих космических объектах, где происходит быстрый отток вещества, сопровождаемый охлаждением. Она проявляется по инфракрасному излучению горячих звезд Вольфа–Райе с очень мощным звездным ветром, планетарных туманностей, оболочек сверхновых и новых звезд. Большое количество пыли существует в ядрах многих галактик (например, M82, NGC253), из которых идет интенсивное истечение газа. Наиболее ярко влияние космической пыли проявляется при излучении новой звезды. Через несколько недель после максимума блеска

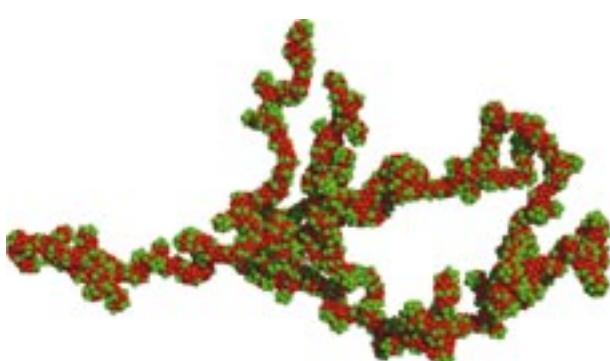


Рис. 3. Фрактальная модель космической пылинки [5]

ФИЗИКА

новой в ее спектре появляется сильный избыток излучения в инфракрасном диапазоне, вызванный появлением пыли с температурой около $T_d \approx 1000$ К. Дальнейшая эволюция спектра показывает разлет и охлаждение возникшей пылевой оболочки.

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

Микроскопические звездные пылевые частицы составляют примерно 0,05% массы всей Галактики, однако их роль в процессах эволюции ее вещества очень велика. Пылинки представляют собой мелкие кристаллические или аморфные образования, состоящие из силикатов, графита и, возможно, окислов металлов, покрытые сверху оболочкой из намерзших газов. В настоящее время нет единого мнения о химическом составе, форме и размерах пылинок. Перечислим основные модели, которые используются в астрофизике для объяснения свойств космической пыли.

Модель ледяных частиц

Согласно этой модели, пылевые частицы представляют собой ледяные частицы, состоящие из тугоплавкого ядра и оболочки из легких элементов. Все космические пылинки можно условно разделить на два класса: мелкие (их радиус меньше 0,01 мкм) и крупные частицы, которых примерно в тысячу раз меньше, чем мелких. В этой модели предполагается, что в крупные частицы вкраплены атомы магнитных элементов, которые придают пылинкам парамагнитные свойства. Такие частицы могут быть частично ориентированы в магнитном поле.

Модель MRN

В 1977 году Матис, Рампл и Нордсик (J. Mathis, W. Rumpl, K. Nordsieck. The Size Distribution of Interstellar Grain // *Astrophys. J.* 1977. Vol. 217. P. 425) выдвинули модель космической пыли, состоящей из смеси графитовых и силикатных сферических частиц. В рамках этой модели им удалось объяснить кривую межзвездного поглощения света с длинами волн $\lambda = 1100 - 10000$ Å. Частицы обоих сортов перемешаны почти поровну и имеют степенное распределение по радиусу пылинок a с некоторым степенным показателем $n(a) \approx 1/a^q$, где показатель степени $q \approx 3,5$, а радиусы пылинок лежат в диапазоне $0,005 < a < 0,25$ мкм.

Модель оксидных пылинок

Модель оксидных пылинок представляет собой смесь мелких ($a < 0,01$ мкм) частиц, состоящих из двухатомных окислов MgO, SiO, CaO, FeO.

Следует отметить, что существует большая неопределенность при определении состава космических пылинок. В отличие от газа, для которого характерны спектры излучения или поглощения с множеством линий, позволяющих однозначно идентифицировать атомы, ионы и молекулы и, таким образом, определить содержание элементов и их соединений, твердые тела обладают непрерывным спектром с малым количеством размытых полос, делающих идентификацию неоднозначной. Важную информацию о составе пылинок может дать наблюдаемый в межзвездной среде дефицит многих элементов, особенно металлов, по сравнению с составом солнечной атмосферы. Этот дефицит элементов в газовой фазе межзвездной среды обычно связывают с тем, что данные элементы ушли на образование космических пылинок.

Налипание на космические пылинки электронов из межзвездного газа и фотоионизация пылинок ультрафиолетовым излучением приводят к тому, что пылинки оказываются электрически заряженными и их электрический заряд может достигать величин порядка десятка элементарных зарядов. Существующий на космической пылинке электрический заряд (сила Лоренца) привязывает эту пылинку к межзвездному магнитному полю, которое всегда присутствует в галактиках. Для характерных электрических зарядов и масс космических пылинок радиус Лармора при их движении по спирали в межзвездном магнитном поле с индукцией $B \approx 3 \cdot 10^{-6}$ Гс равен 0,03 пк. Напомним, что в астрономии единица длины 1 парсек соответствует величине 1 пк = $3,0587 \cdot 10^{18}$ см, что примерно равняется расстоянию, которое проходит световой луч за 3,26 года. Таким образом, ларморовский радиус оказывается много меньше характерных размеров большинства образований межзвездной среды, поэтому космические пылинки оказываются сцепленными с магнитным полем.

Заметим, что обнаружение углеродных цепочек в космосе в сочетании с возможностью лабораторного подтверждения их межзвездного происхождения привело физиков к неожиданному открытию. Было обнаружено, что гигантская молекула, состоящая из 60 атомов углерода C_{60} , названная фуллереном, и представляющая новую форму существования углерода [8], не только существует, но и способна образовываться самопроизвольно. Напомним, что под фуллеренами понимают пространственно сферически замкнутую структуру с sp^2 -гибридизацией атомов углерода, где каждый атом углерода связан с тремя ближайшими соседями. Пространственная структура фуллера, состоящего из 60 атомов углерода C_{60} , напоминает структуру футбольного мяча, состоящего из 12 правильных пятиугольников и 20 правильных шестиугольников, в вершины которых помещены атомы углерода. Так, в 1982 году

ФИЗИКА

В. Кретмер и Д. Хафман (*Kratschmer W., Fostirooulos K., Huffman D.R. // Nature. 1990. Vol. 347. P. 354*) обнаружили загадочные особенности в спектре ультрафиолетового излучения угольной пыли, которая получается в углеродной дуге при моделировании межзвездной пыли (см. [9]).

ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ПЫЛЬЮ

Конечно, космические пылинки приводят к ослаблению света звезд, рассеивая и поглощая их излучение. Межзвездное поглощение света проявляется в виде раздвоения Млечного Пути, которое вызвано поглощением света космической пылью, расположенной вблизи галактической плоскости. В оптическом диапазоне длин волн величина ослабления обратно пропорциональна длине волн и из-за этого возникает явление покраснения цвета звезд. В направлении большинства звезд в Галактике на кривой межзвездного поглощения выделяется ярко выраженный пик вблизи длины волн $\lambda \approx 2200 \text{ \AA}$. При интерпретации наблюдений межзвездного поглощения света чаще всего используется модель одно- или многослойных сферических пылинок. В настоящее время физики разрабатывают теорию оптических свойств космических пылинок, поверхность которых имеет сложную фрактальную структуру.

Энергия поглощенного фотона преобразуется в тепловое движение частиц пылинки. При этом происходит излучение пылинок в непрерывном спектре, причем их спектр в общих чертах подобен планковскому и находится в инфракрасном диапазоне длин волн. При анализе инфракрасного излучения (ИК) Галактики излучение космической пыли играет огромную роль. Достаточно сказать, что инфракрасная светимость пыли составляет примерно 30% полной светимости звезд Галактики. Так, например, основная часть ультрафиолетового излучения молодых звезд перерабатывается в инфракрасное излучение пыли.

Обладая большой способностью к излучению, космическая пыль является главным охладителем межзвездной среды, а значит, непосредственно способствует процессам звездообразования. Температура является одной из важнейших характеристик пылевой частицы. Равновесную температуру пылевых частиц рассчитывают из условия баланса процессов нагрева и охлаждения. Температуру космической пылинки T_d можно оценить следующим образом. Известно, что эффективной температурой звезды T_* называется температура абсолютно черного тела, мощность излучения которого с единицы поверхности равна мощности излучения данной звезды. Используя это определение и закон Стефана–Больцмана, можно выразить светимость звезды L через радиус звезды R_* и эффективную температуру ее поверхности T_* соотношением

$$L = 4\pi R_*^2 \sigma T_*^4,$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана, равная $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-4}$. Если пылинка, имеющая радиус a , представляет собой абсолютно черное тело и находится на расстоянии r от звезды, то температура поверхности пылинки T_d может быть оценена из условия баланса

$$4\pi a^2 \sigma T_d^4 = 4\pi R_*^2 \sigma T_*^4 \frac{\pi a^2}{4\pi r^2},$$

который выражает равенство энергии, падающей на пылинку, и энергии, которую испускает пылинка.

По температуре все пылинки можно условно разделить на три класса. Основная масса пыли является холодной: $T_d \approx 15–20 \text{ К}$. Такая пыль заполняет весь диск Галактики, конденсируясь в крупных молекулярных облаках, и нагревается лишь рассеянным излучением всех звезд. Эта компонента вносит примерно 30% в инфракрасную светимость пыли. Вторая группа космической пыли имеет температуру $T_d \approx 30–40 \text{ К}$, и эта пыль нагревается от соседства с горячими О- и В-звездами, с этой пылью связана половина ИК-излучения Галактики. Эта пыль излучает в диапазоне $\lambda < 100 \text{ мкм}$ и служит хорошим индикатором областей звездообразования. Третьей группой является горячая пыль, имеющая температуру $T_d \approx 250–500 \text{ К}$. Такая пыль встречается в протяженных атмосферах звезд-гигантов спектрального класса М и делает такие звезды источниками мощного ИК-излучения.

Наблюдаемое явление межзвездной поляризации света указывает на то, что форма пылинок отлична от сферической. Это происходит из-за того, что магнитный момент пылинки, который обусловлен тем, что в состав космической пыли входят металлы, обладающие парамагнетизмом, ориентируется вдоль силовых линий межзвездного магнитного поля.

СИНТЕЗ МОЛЕКУЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЫЛИНОК

Известно, что в космосе обнаружено уже около сотни различных молекул, среди которых много молекул, которые являются органическими соединениями. Сам по себе это нетривиальный факт, поскольку при сверхнизких температурах и плотностях, наблюдающихся в межзвездной среде, химические реакции практически не идут. Лишь квантовая химия может принципиально разрешить этот парадокс. Оказывается, даже при низкой температуре 5–10 К химические реакции не прекращаются: они продолжаются внутри и на поверхности пылинок. Атомы, адсорбируясь на поверхности пылинки при столкновениях с ней, обладают некоторой

ФИЗИКА

подвижностью и могут вступать в химические реакции с другими атомами и молекулами. Причем эти реакции происходят с помощью квантово-механического подбарьерного перехода, для которого участникам реакции не требуется большой энергии. Таким образом, поверхность космической пыли является прекрасным катализатором для формирования молекул из атомов. Из наиболее легких элементов (Н, С, N, O) при сверхнизких температурах синтезируются прежде всего уксусная кислота и мочевина. В последующем образующаяся молекула может оторваться от поверхности космической пылинки. Любопытно, что во многих схемах предбиологической эволюции рассматривается взаимодействие именно этих соединений.

В настоящее время радиоастрономы показали, что огромные темные межзвездные облака содержат многие сложные молекулы (метанол, окись углерода, формальдегид, этанол, синильную кислоту, муравьиную кислоту и др.). Молекулярная радиоастрономия позволила идентифицировать все эти молекулы по их вращательным спектрам в микроволновой области. Молекулы играют важную роль в коллапсе межзвездных облаков, приводящем к образованию звезд. В результате гравитационного притяжения межзвездные облака коллапсируют и нагреваются, а выделяющаяся при этом энергия испускается за счет вращательных переходов (главным образом молекул СО). Этот процесс вызывает дальнейший коллапс облака, приводящий в конечном итоге к таким давлениям и температурам, при которых формируются новые звезды и планеты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение свойств космической пыли в настоящее время стало самостоятельной областью современной астрофизики. Физика сверхмалых частиц – космических пылинок является наукой, объединяющей основные идеи физики атомного ядра, физики сверхмалых кластеров и физики твердого тела. Особый интерес при этом уделяется изучению свойств аморфных космичес-

ких пылинок, имеющих сложную форму. Космическая пыль играет огромную роль при объяснении многих астрофизических явлений: межзвездного поглощения света, межзвездной поляризации, инфракрасного излучения, охлаждения межзвездной среды. На поверхности космических пылинок могут происходить химические реакции формирования молекул из атомов. Процессы взаимодействия газа, пыли и излучения, физические характеристики пылинок, процессы их эволюции – вот далеко не полный перечень тех вопросов, решение которых поможет астрофизикам объяснить многие интересные наблюдательные данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хабер Х. Звезды. М.: Слово, 1989. 48 с.
2. Бочкин Н.Г. Основы физики межзвездной среды. М.: Изд-во МГУ, 1991. 352 с.
3. Вошинников Н.В. Межпланетная и межзвездная среда // Итоги науки и техники. Исследование космического пространства. ВИНИТИ, 1986. Т. 25. С. 98.
4. Золотухин И.В. Фракталы в физике твердого тела // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 7. С. 108–113.
5. Жиков В.В. Фракталы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 12. С. 109–117.
6. Вишик М.И. Фрактальная размерность множеств // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 1. С. 122–134.
7. Wright E.L. Fractal Dust Grain around R CrB Stars // Astrophys. J. 1989. Vol. 346. P. L89.
8. Мастеров В.Ф. Физические свойства фуллеренов // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1. С. 92–99.
9. Крото Г. Симметрия, космос, звезды и C₆₀ // Успехи физ. наук. 1998. Т. 168, № 3. С. 342.

Рецензент статьи А.М. Черепашук

* * *

Сергей Валентинович Божокин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры “Теоретическая физика” Санкт-Петербургского государственного технического университета. Область научных интересов – астрофизика, биофизика. Автор более 40 статей и двух книг.