



星际空间中的碳尘埃

陈秀慧¹, 李爱根², 向福元¹, 杨雪娟¹, 钟建新^{1*}

1. 湘潭大学物理与光电工程学院, 湘潭 411105;

2. 美国密苏里大学物理和天文学系, 哥伦比亚 65211, 美国

*联系人, E-mail: jxzhong@xtu.edu.cn

收稿日期: 2016-07-22; 接受日期: 2016-10-17; 网络出版日期: 2017-04-28

国家自然科学基金(编号: 11473023, 11273022, U1531108)、美国自然科学基金(编号: NSF AST-1311804)、美国国家航空航天局基金(编号: NNX13AE63G)和湖南省研究生科研创新项目(编号: CX2015B213)资助

摘要 碳是宇宙中仅次于氢、氦、氧的第4丰富的元素. 在恒星演化晚期形成的碳元素, 进入星际空间以后, 以离子、原子、分子以及固体尘埃微粒的多种形式存在. 含碳有机复杂分子是生命起源的基本物质. 碳质尘埃是星际尘埃的主要成分之一, 其红外光谱是探测各种天体环境物理和化学条件的重要指针. 碳质尘埃如石墨、纳米金刚石、多环芳香烃、富勒烯、氢化非结晶碳等尘埃微粒是星际尘埃的重要研究对象, 在星际空间广泛存在, 它们是星际消光2175 Å 驼峰、星际红外辐射谱带、星际弥散吸收带等光谱特征的最可能载体. 本文主要介绍星际碳质尘埃的天文观测及其物理化学特性. 近年来, 石墨烯、碳纳米管逐渐进入人们的视野, 本文亦将讨论与此相关的天文观测和理论模型的最新进展.

关键词 星际碳尘埃, 星际消光, 星际红外辐射, 星际弥散带

PACS: 98.38.Am, 98.38.Cp, 98.58.Ay, 98.58.Ca, 98.35.Bd

星际尘埃是星际介质的重要组成部分, 其重要影响主要表现在以下5个方面: (1) 通过吸收紫外和可见光, 并且在红外波段辐射出来, 星际尘埃决定了富含尘埃的天体(如年轻恒星、演化晚期恒星、星系等)的外形(Appearance); (2) 通过光电效应产生的电子与气体碰撞, 从而加热星际气体; (3) 星际尘埃是恒星和行星系统的基石(Building Blocks); (4) 星际尘埃表面是氢分子(H₂)和其他简单、复杂分子形成的舞台; (5) 通过吸收和散射星光, 显著减弱了尘埃所处的紫外辐射场, 从而“屏蔽”了简单和复杂分子的光解, 保证了其

生存(Survival), 为恒星和行星系统的形成提供了前提条件. 尽管星际尘埃的质量仅占银河系星际介质总量的1%, 其红外辐射的能量却超过了近邻宇宙中电磁辐射总能量的50%. 星际尘埃大部分是晚期恒星如渐近巨星支(Asymptotic Giant Branch, AGB)星和超新星抛射出的物质, 追溯其来源和形成机制及其物理化学特性, 有助于了解星际环境和恒星的演化过程.

碳是宇宙中仅次于氢、氦、氧的第4丰富的元素, 其丰度通常取为太阳光球丰度, 大约为400 ppm (1 ppm指的是每100万个氢原子对应一个碳原子). 自20世纪90

引用格式: 陈秀慧, 李爱根, 向福元, 等. 星际空间中的碳尘埃. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 089501
Chen X H, Li A G, Xiang F Y, et al. Interstellar carbon dust (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 089501, doi: 10.1360/SSPMA2016-00343

年代中期以来,人们倾向于认为星际碳丰度低于太阳光球丰度,甚至仅为225 ppm^[1].就分子而言,超过75%的星际和星周的分子都是碳质分子.碳质尘埃的多种同素异形体,如石墨(Graphite)、纳米金刚石(Nanodiamonds)、碳化硅(SiC)、非结晶碳(Amorphous Carbon,包括氢化非结晶碳Hydrogenated Amorphous Carbon, HAC)、多环芳香烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Molecules, PAHs)、富勒烯(以C₆₀, C₇₀为代表)以及石墨烯和碳纳米管(Carbon Nanotubes)等被认为是星际尘埃的重要组成部分,这些尘埃物质被认为是星际消光2175 Å驼峰、星际红外辐射谱带、星际弥散吸收带等光谱特征的最可能载体.

本文将对星际碳质尘埃的研究现状主要包括种类、丰度、物理和化学特性等进行分析,并将碳质尘埃的光谱特征与天文观测结果进行对比,探究二者之间的联系.此外,对星际空间中的碳质尘埃研究中存在的困难以及前景进行评述.

1 碳与星际尘埃

星际消光(Extinction)和红化(Reddening)为星际空间中固态碳尘埃的存在提供了重要依据,这是因为,硅酸盐本身不足以产生观测消光量;另外,星际气体碳的丰度,只占星际碳总含量的40%–60%(取决于星际碳丰度的取值^[2]),这意味着还有约1/2的碳以固态尘埃的形式存在于星际空间.

碳在星际介质的演化过程中起着重要的作用,主要表现在碳质尘埃是弥散星际云中主要的光电子(Photoelectrons)供应者,通过光电子加热星际气体;而碳原子(CI)、一次碳离子(CII)和三次碳离子(CIV)等的辐射谱线是冷却星际气体的主要途径,对这些谱线的研究可以获得这些气体的密度和温度.类似的,由于氢气的碰撞激发引起CO的转动跃迁,使得CO成为宇宙中分子气体的重要示踪物.

对于天文光谱中许多未被证认的,无处不在的分子和固体特征,人们的理解是这些光谱特征往往和碳质尘埃有关.近年来,实验和理论的研究让人们对于宇宙中的C元素的存在形式有了更好的了解,包括PAHs、C链分子、C团簇,以及碳质尘粒(C₆₀、石墨烯、碳纳米管等)在星际空间的存在、起源、演化及其物理、化学和光谱特征,更是近年来星际介质物理

的热点.图1列举了星际空间中几种碳的物质结构.

碳在形成物质时,其最外层4个价电子具有sp, sp², sp³ 3种杂化态,能够以脂肪族、烯族、芳香族、炔烃4种结构存在^[4].3种杂化作用分别形成了线性链、石墨化结构和金刚石结构,并且不同杂化态的结合能够形成其他的碳物质,如图2所示.

宇宙中有大量的星际吸收、辐射光谱特征,这些特征与某种特定的尘埃或分子载体有关.迄今为止,尚有许多在星际空间普遍存在的谱征载体没有被证认,这些谱征往往与碳有关.这些未被证认的光谱特征主要是:(1)星际2175 Å消光驼峰,这是星际空间最强的吸收光谱特征;(2)星际弥散带(Diffuse Interstellar Bands, DIBs),这些从近紫外延伸至近红外,叠加在星际消光曲线上的微弱吸收带,共有超过400条,被认为

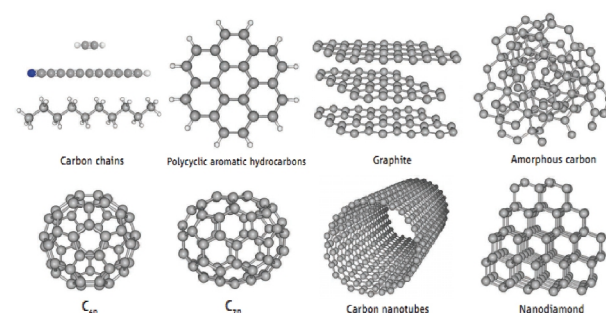


图1 星际空间中碳的同素异形体^[3]
Figure 1 Carbon allotropes in space [3].

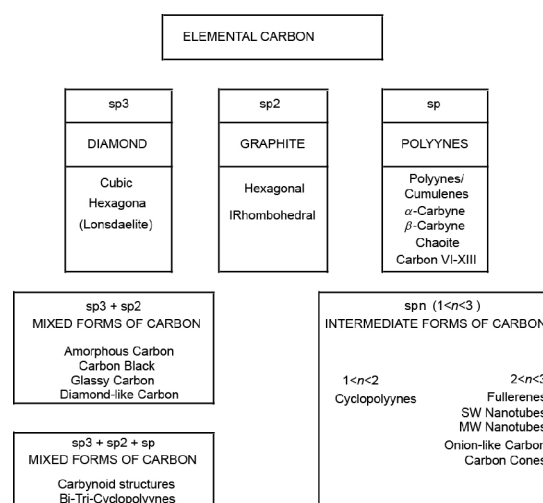


图2 各种杂化态下的碳^[5]
Figure 2 Carbon with various hybridization states [5].

起源于星际介质^[6]; (3) 波长位于3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3和12.7 μm 的一系列无处不在、分立的红外辐射谱带, 因为其载体未被确定而得名“未被认证的红外谱带”(Unidentified Infrared [UIR] Emission Bands)^[7], 这些谱带在包括星爆星系、HI区、原行星状星云、行星状星云、反射星云、银河系弥散星际介质中被广泛观测到, 通常被认为是芳香族碳氢物质(Aromatic Hydrocarbon Materials)的特征^[8,9].

2 碳质尘埃与天文观测

我们可以通过对星际消光、偏振和红外辐射等的研究分析来了解星际尘埃的化学组成、形状、尺寸等相关信息, 在此过程中, 碳质尘埃表现出很大的可探索性.

2.1 2175 Å消光驼峰

50多年前, Stecher^[10]在消光曲线的紫外端2175 Å (4.6 μm^{-1} , 5.7 eV)附近发现一条很强的宽吸收带, 其半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)约为1 μm^{-1} . 2175 Å消光峰的主要特征是半高全宽随着观测环境的改变而变化, 而中心波长几乎保持不变.

从2175 Å被发现至今, 关于其载体的认证工作一直具有争议. 其载体候选者中, 有石墨^[11,12]、石墨化洋葱状物质^[13]、氢化非结晶碳^[14]、多环芳香烃分子^[15,16]等. 然而还没有一种物质能够很好地解释中心峰波长基本不随天体环境而改变这一观测事实. 目前较为广泛接受的观点是, 2175 Å消光驼峰的载体是芳香含碳物质, 类似于PAHs或者这一类物质的混合物^[15,16].

2.1.1 石墨与2175 Å消光驼峰

Stecher^[10]早在50多年前就指出, 石墨可能是2175 Å消光特征的载体. 但是, 石墨的问题是, 虽然增大石墨尺寸可以使得2175 Å消光特征增宽, 但其中心波长随尺寸的改变而改变, 这与观测不符. 近些年, Jäger等人^[17]通过实验测量指出, 一定量直径在6 nm左右的球状石墨颗粒可以解释紫外2175 Å消光特征, 然而, 星际空间中大量统一尺寸的石墨颗粒可能性极小. 另外, 有人随后提出了石墨化洋葱状物质, 以及核幔模型(硅酸盐或石墨作为核, PAHs作为覆盖物), 在一定程度上有助于解决特征宽度与峰值波长这一问题. 值得指出的是, 约25%的碳以石墨化颗粒存在于星际

空间^[18], 石墨及其衍生物在星际空间的物质演化中扮演着很重要的角色, 其 π - π^* 电子跃迁必定会在紫外波段产生吸收光谱特征.

2.1.2 PAHs和2175 Å消光驼峰

关于PAHs和紫外2175 Å消光驼峰联系的研究一直在进行中. 多年来, 由于受实验条件的限制, 具有星际尺寸(至少大于40个碳原子)的PAH分子的电子跃迁谱难以获取, 导致研究进展缓慢. 直到最近, 实验条件的改善使得人们可以在实验室测定中等尺寸(30个碳原子)到大尺寸(超过40个碳原子)的PAH分子的吸收光谱. 结果表明, 中性 $\text{C}_{30}\text{H}_{14}$ 和 $\text{C}_{42}\text{H}_{18}$ 在2175 Å附近呈现出很强的吸收特征^[19], 并且 $\text{C}_{42}\text{H}_{18}$ 的阳离子跟产生3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3和12 μm 红外辐射特征的PAH分子在尺寸上大致相当. 因此, PAHs可作为2175 Å消光峰载体的重要研究对象之一. Tielens^[20]认为, 宇宙空间~10%的碳以PAHs的形式存在, 其总的截面(Cross Section)约为 $10^{-21} \text{cm}^2/\text{H}^{[21]}$, Li和Draine^[16]的星际尘埃模型认为15%的星际碳为PAHs.

当谈及PAHs时, 常会将石墨与之联系起来. 从结构上看, 当石墨的层数较少时, 氢化作用将其转化成了PAHs. 关于PAHs的来源有一种解释是, 低速星际激波引起的尘埃与尘埃之间的碰撞, 导致大量碳质尘埃碎裂, 形成小的碎片^[22], 这其中包含了PAH团簇. 当这些小的团簇(包含约300个C原子)暴露在强烈的星际紫外光照之下时, 被蒸发形成PAH分子^[23], 而更大的PAH团簇在紫外光照下十分稳定.

2.1.3 富勒烯和2175 Å消光驼峰

实验显示 C_{60} 富勒烯约在2175 Å有特征吸收^[24], 然而由于 C_{60} 富勒烯在星际尘埃和分子云中的含量很少^[25], 因此很难对2175 Å消光峰作出解释. Moutou等人^[26]得出结论在反射星云NGC7023中, 最多有0.27%的C以 C_{60} 的形式存在, 最多0.26%的C包含在 C_{60}^+ 中. 近几年的观测结果表明, C_{60} 存在于广阔的恒星和星际环境中^[27], 大约有0.1%–1.5%的星际碳以 C_{60} 形式存在. Rubin等人^[28]在猎户座星云中检测到 C_{60} , Roberts等人^[29]在几个年轻恒星天体(Young Stellar Object, YSO)、Herbig Ae/Be恒星HD 97300的原行星尘埃盘、post-AGB星HR 4049和HD 5296这些天体环境下探测到了 C_{60} 分子. Cataldo和Iglesias-Groth^[30]发现氢化富勒烯(Fulleranes) $\text{C}_{60}\text{H}_{36}$ 在2175 Å也有一吸收峰, 氢化富勒烯也是可能

的载体候选者之一.

2.1.4 氢化非结晶碳和2175 Å消光驼峰

Mennella等人^[14]结合对碳材料的电子性质研究和星际颗粒在紫外光照下的实验模拟, 提出氢化非结晶碳(HAC)可能对2175 Å消光驼峰有所贡献. Gadallah等人^[31,32]对HAC是否可作为2175 Å消光峰的有效贡献者进行了研究, 的确, HAC在一定量的紫外光照下于2175 Å附近会有一个光谱峰^[31,33], 然而, 产生这一消光峰所需的碳丰度远高于星际尘埃中所含的碳丰度, 因此, HAC能否成为2175 Å消光峰的载体还有待进一步研究.

2.2 星际弥散带

星际弥散带自90多年前被观测发现以来^[34], 引起了天文界和分子光谱界的广泛关注. 这些从近紫外到近红外的吸收带已被证明是来自星际空间而非恒星本身或者星周^[35,36]. 迄今, 银河系和河外星系已有超过400条DIBs被观测到^[37].

关于DIBs载体的证认工作一直是天文学研究领域的热点和难点. PAHs、碳链、富勒烯、碳纳米管和石墨烯等物质及其电离对应体被认为可能是DIBs的载体物质. Foing和Ehrenfreund^[38]认为9577和9632 Å弥散带可能来自于C₆₀⁺. 目前被较为普遍接受的观点是DIBs是由气相分子和离子自由基的电子跃迁引起, Maier等人^[39,40]将碳链及其衍生物如HC_nH, C_{2n}, C_nH, HC_nH⁺, (C_n)⁻作为重点研究对象, 也有一些研究者把PAHs^[41-43]及其离子作为DIBs载体的研究对象. 此外, 关于碳纳米管的电子跃迁能的计算, 结果表明一些碳纳米管的电子跃迁均在星际弥散带的光谱范围内^[44-47]. 遗憾的是到目前为止, 还没有碳纳米管的电子跃迁谱所处波长准确符合某些弥散带特征. 关于碳纳米管是否能够成为星际弥散带以及别的未证认光谱特征的载体, 也将成为新的热点课题. 表1^[48,49]列出作为DIB可能载体的物质及其含量.

2.3 3.4 μm红外吸收特征

3.4 μm吸收特征于20世纪70年代在弥散星际介质中被发现^[50], 一般认为是脂肪族(Aliphatic)碳氢化合物的C-H伸缩模式导致了这一特征, 然而, 对于3.4 μm吸收特征的载体及其丰度并未得到完全证认^[51], 另外, 在

表1 DIB载体的丰度. 表格译自文献^[48]

Table 1 Abundances of DIB carrier candidates. Table was translated from ref. ^[48]

| 物质 | 丰度(相比H) | Fc^a | 方法 |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| PAHs | 10^{-7} | 2×10^{-1} | IR辐射 |
| C ₆₀ ^{b)} | 6×10^{-11} | 10^{-5} | IR辐射 ^{c)} |
| CH | 5×10^{-8} | 10^{-4} | 光学吸收 |
| C2 | 3×10^{-8} | 10^{-4} | 光学吸收 |
| C ₃ H ₂ | 10^{-9} | 3×10^{-6} | (亚)毫米辐射 |
| 碳链 ^{d)} | $\ll 4 \times 10^{-7} / N_c$ | $\ll 10^{-3}$ | 红外辐射上限 |

a) 包含在载体中的碳元素丰度; b) 靠近恒星位置的富勒烯丰度更高; c) NGC 7023反射星云中离中心恒星距离35"处的丰度, 靠近恒星测得的丰度更高^[49]; d) IR辐射决定的碳链的综合含量的上限, N_c 是每个碳氢链的碳原子平均数目

致密分子云中却没有观测到这一吸收特征. Sandford等人^[52]认为该3.4 μm吸收特征的起源是短的饱和碳链(约占C丰度的4%), Greenberg等人^[53]认为是尘埃的冰壳层在紫外光照下产生的含碳有机物的残余物(Organic Residue), Duley等人^[54]认为是氢化非结晶碳(约占C丰度的20%–25%).

在可能产生3.4 μm星际脂肪碳氢吸收特征的物质中, 氢化非结晶碳(a-C:H或HAC)^[54-56]是最佳的候选者之一. 值得指出的是, HAC的红外光谱具有明显的芳香族(3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 μm特征)和脂肪族(3.4, 6.85, 7.25 μm)混合光谱特征, 这些特征在天文观测中也被广泛地观测到, 并为研究星际碳质尘埃的组成和演化提供了信息. 例如, Gadallah等人^[31]发现HAC能够产生类似于弥散星际介质中的3.4 μm特征, 此外还有6.85和7.25 μm吸收特征, 在紫外光照下, HAC还能产生与2175 Å消光特征类似的吸收驼峰. 3.4, 6.85和7.25 μm吸收分别由脂肪族碳氢物质的CH伸展模式、CH₃变形模式和CH₂变形模式引起^[57-59]. 紫外光辐射对HAC会产生影响^[56], 使其脱氢进而脂肪化程度降低, 在3.3, 6.2, 7.7, 8.6和11.3 μm波长处的芳香特征增强, 表2作了相关说明. Jones等人^[60]建立的理论模型认为HAC中包含了PAH芳香团簇, Scott等人^[61]的实验显示, 在星际空间中, HAC的碎裂可能是PAH和富勒烯分子的来源.

通过研究星际3.3与3.4 μm吸收特征的强度比, 可以确定星际脂肪碳氢尘埃的芳香性与脂肪性之比^[62,63]. Chair等人^[64]认为弥散星际介质中的3.4 μm特征的吸收载体以芳香性为主, 但Dartois等人^[65]则认为应以脂

表 2 弥散星际介质中的碳氢化合物的芳香族和脂肪族模式的拟合参数^[64]**Table 2** Fitting parameters of the diffuse ISM hydrocarbon features ^[64]

| 模式 | 中心波长 (μm) | FWHM $\Delta\nu$ (cm^{-1}) | 吸收强度 ($\times 10^{-18} \text{ cm group}^{-1}$) | 柱密度 ($\times 10^{18} \text{ group cm}^{-2}$) |
|---|------------------------|---------------------------------------|--|--|
| CH_3 (sp^3) 非对称 | 3.376 | 47.2 | 24.3 | 0.27 |
| CH_2 (sp^3) 非对称 | 3.420 | 42.8 | 15.2 | 0.44 |
| CH_3 (sp^3) 对称 | 3.474 | 41.0 | 23.7 | 0.21 |
| CH_2 (sp^3) 对称 | 3.520 | 40.4 | 14.8 | 0.19 |
| CH (sp^2) ^{a)} | 3.289 | 81.8 | 2.58 | 1.44 |
| CC (sp^2) ^{b)} | 6.19, 6.25 | 15, 40 | 0.275 ^{c)} | 8.19 |

a)只代表芳香族模式的值; b) 分别代表烯烃和芳香族模式的值, 吸收强度仅代表芳香族吸收带, 柱密度代表使用芳香族吸收强度得到的2种吸收带的柱密度总和; c) 代表CC模式吸收强度的单位是 cm atom^{-1}

肪性占统治地位. Yang等人^[62,63]进行了详细对比分析后, 支持Dartois等人^[65]的结果, 认为主要分歧在于所采用的特征强度不一致.

2.4 星际红外辐射

了解星际物质成分的另一途径是通过对星际红外辐射的分析, 如许多天体环境中在3.3, 6.2, 7.7, 8.6和11.3 μm 发现了很强的辐射特征. 此外, 在少数环境的3.43和3.53 μm 等波长附近也发现了较强的辐射. 自1989年以来, 在十几个post-AGB阶段的恒星星周包层观测到一个很强的峰值波长为21 μm 、FWHM为2 μm 的辐射特征, 以及自1973年以来, 在富碳AGB星、post-AGB星、行星状星云等晚期恒星演化的各个阶段, 均观测到比21 μm 特征更强的峰值波长位于30 μm 的尘埃辐射特征. 所有这些红外辐射光谱特征, 往往都与碳质尘埃有关.

2.4.1 3.43, 3.53 μm 辐射

1987年Lewis等人^[66]在分析陨石时发现了尺寸为2 nm的金刚石颗粒, 丰度约400 ppm, 是陨石中最丰富的物质成分, 经同位素分析表明, 这些纳米金刚石属于前太阳尘埃(Pre-solar), 来自星际空间, 起源于恒星演化晚期. 尽管在星际介质中少有这类纳米金刚石的红外辐射特征, 在少数几个天体环境中观测到3.43, 3.53 μm 辐射特征(见图3)^[67], 对应以氢终止的(H-terminated)纳米金刚石.

理论计算显示^[70], 3.43 μm 谱带由 CH_2 伸缩模式产生, 3.53 μm 谱带由 CH 伸缩模式产生. Pirali等人^[71]的研究结果表明, 尺寸为几个纳米的氢化金刚石(Diamondoids)(即以 sp^3 杂化形式存在并且完全氢化的金刚石),

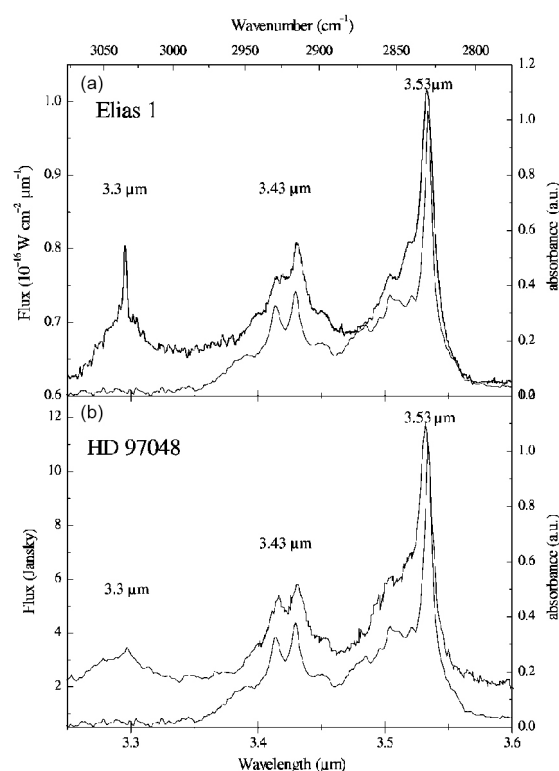


图 3 (a) Elias 1^[71]和(b) HD 97048 (Herbig Ae/Be星^[68])的辐射谱, 以及纳米金刚石在温度为300 K的吸收谱^[67,69]

Figure 3 (a) Spectroscopic comparison between the emission spectra of Elias 1 ^[71] and (b) HD 97048 (Herbig Ae/Be star ^[68]) and the absorbance spectra of diamond nano-crystals measured at 300 K ^[67,69].

其实验光谱能够较好地拟合恒星Elias 1和HD 97048的3.43, 3.53 μm 红外辐射谱. 此外, 他们还得出星际3.47 μm 吸收特征是由更小尺寸的氢化金刚石产生的结论.

2.4.2 3.3, 6.2, 7.7, 8.6和11.3 μm 红外辐射谱带

几乎在所有的星际天体环境中, 均能观测到3.3, 6.2, 7.7, 8.6和11.3 μm 这几个很明显的红外辐射谱

带^[72-78], 即前文提到的UIR, 并伴随有一些稍弱的带. 由此可知, 产生这些红外辐射谱带的物质是星际尘埃很重要的组成部分.

起初对这些UIR的证认结论为PAH的分子振动模式(见图4)引起了这些红外辐射谱特征^[8,9,79]. 其中, 3.3 μm —C—H拉伸模式(Stretching), 6.2和7.7 μm —C—C拉伸模式, 8.6 μm —C—H平面内扭曲(Bending)模式, 11.3 μm —平面外扭曲模式. 这些PAHs的尺寸从几十个C延伸到几百个C, 包括了分子、团簇和纳米尺寸颗粒. 前文提到星际空间PAH分子中的碳元素含量不超过星际碳元素总量的10%–15%, 与此同时存在一定量的PAH团簇和纳米颗粒. 由于PAH一般尺寸很小, 可以被光子加热至高温, 短波段的光子将PAH加热后使其在红外波段辐射能量. 一般来说, 星际空间中产生红外辐射的物质是高度芳香化的, 然而还没有任何一种PAH在星际空间得到证认^[80], 关于PAH能否成为真实的UIR载体还有待进一步研究, 与此同时脂肪族团簇或者官能团以及脂肪族的碳氢化合物也有可能成为UIR载体^[81,82].

2.4.3 SiC的11.3 μm 辐射特征

许多碳星的光谱中都观测到了SiC的11.3 μm 辐射特征^[83], 令人遗憾的是, 在星际空间中并未观测到SiC的11.3 μm 特征. 在碳星抛射物和陨石中发现了SiC, 通过同位素分析得知陨石中的SiC来自星际空间. 星际空间中的SiC可能形成于晚期富碳恒星的星周包层, 演化过程中被星风吹到星际空间中, 或者通过超新星爆发释放至星际空间. SiC的11.3 μm 特征是由Si—C键的伸缩模式引起. Whittet等人^[84]根据星际消光的11.3 μm 吸收特征得出星际空间SiC丰度值最多为星际硅酸盐中硅含量的5%. 然而, 可能由于碳星包层太厚、碳化硅在富氧环境下被氧化以及星际空间PAHs的辐射特征遮掩一部分SiC的辐射, 导致未在星际空间中观测到SiC并且低估了SiC含量. 另外, 也有可能是超新星爆发产生的激波, 使得SiC尘埃被破坏而导致估算的SiC含量低于实际含量^[85].

2.4.4 21和30 μm 辐射

早在1989年, Kwok等人^[86]研究红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS)的低分辨率光谱数据时, 在4个post-AGB星中发现在21 μm 附近有一个强

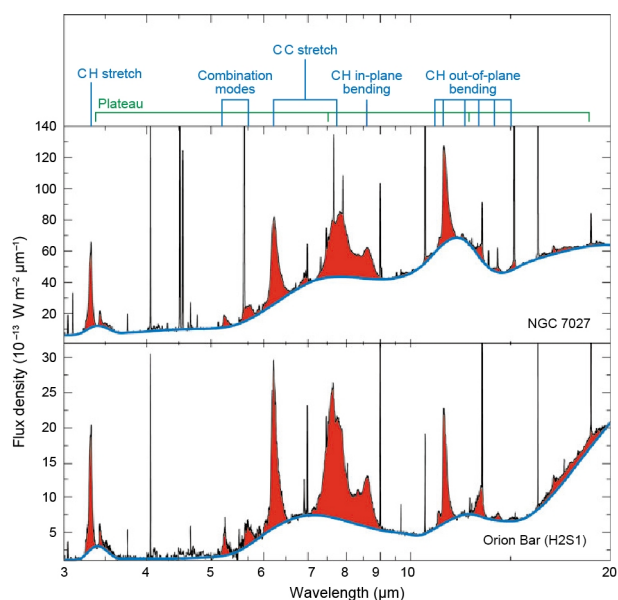


图4 (网络版彩图)猎户座星云的光离解区和行星状星云NGC 7027的中红外辐射特征. 图的顶端是PAH分子引起红外辐射特征的各种振动模式, 从左至右依次是C—H伸缩模式、混合模式、C—C伸缩模式、C—H平面内弯曲模式、C—H平面外弯曲模式. 图中可以看到由于PAHs团簇的存在产生了宽的平台^[21].

Figure 4 (Color online) The mid-infrared spectra of the photodissociation region in the Orion Bar and in the planetary nebulae NGC 7027 dominated by a rich set of emission features. These features are labeled with the vibrational modes of polycyclic aromatic hydrocarbon molecules at the top. From left to right are respectively C—H stretch mode, combination modes, C—C stretch mode, C—H in-plane bending mode, and C—H out-of-plane bending mode. There are broad plateau features produced by PAHs clusters^[21].

发射特征, 之后在其他的源中也发现了21 μm 特征. 值得注意的是, 在不同的源中, 21 μm 特征轮廓的中心峰保持在20.1 μm , 半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为2.2–2.3 μm , 无细节特征^[87], 因此可以推断这些21 μm 发射特征来源于同一载体^[88]. 关于21 μm 特征的载体证认, PAH、富勒烯和含碳大分子等都被视作21 μm 特征的载体, 然而由于这些物质的光谱与观测结果有较大差异, 尚无法确认21 μm 特征的载体物质, 需要更多的实验和理论研究进一步证认.

在演化晚期碳星的各个时期均能观测到中心波长在30 μm 附近的尘埃辐射, 在早期发现21 μm 特征的源中均观测到30 μm 特征, 因此这两个特征的载体物质可能存在着相似性和关联性^[89], 但最近的研究发现21, 30 μm 和PAH发射光谱强度互不相关, 表明这三者的载体可能没有关联^[90,91]. 观测证据显示只有在富碳

的天体环境中才出现 $30\ \mu\text{m}$ 特征^[92,93], 因此其载体极有可能是碳质物质. 在脂肪族/芳香族混合的非定形纳米颗粒这种结构中引入O, S, N等杂质元素, 可能产生UIR以及 21 和 $30\ \mu\text{m}$ 辐射.

2.5 星际光谱特征及其载体的相关关系

星际 $2175\ \text{\AA}$ 消光驼峰与DIBs和UIR红外发射谱带及其载体之间的相关性已有许多研究. 星际 $2175\ \text{\AA}$ 驼峰和DIBs都是叠加在星际消光曲线上的吸收光谱特征. Xiang等人^[6]收集了145个观测目标星的一些主要DIBs的等值宽度 EW_{DIB} , 同时也收集或计算得到了这些天体的 $2175\ \text{\AA}$ 消光驼峰的等值宽度 EW_{2175} . 他们发现 $EW_{\text{DIB}}/E_{\text{B-V}}$ 与 EW_{2175} 不相关. 他们指出, $2175\ \text{\AA}$ 消光驼峰可能起源于大尺寸的PAH分子或团簇, 而DIBs由小尺寸的气相PAH分子或离子的吸收所产生^[6].

Boulanger等人^[94]分析了Chamaeleon分子云里10个区域的 $2175\ \text{\AA}$ 消光驼峰和IRAS $12\ \mu\text{m}$ 宽带测光数据, 发现这两者之间相关性比较好. 一般认为, IRAS是1983年上天的红外天文卫星, 其 $12\ \mu\text{m}$ 辐射是由UIR载体(如PAH)的单光子加热引起的^[16]. 这从侧面支持了PAH分子是 $2175\ \text{\AA}$ 消光驼峰可能载体的假说^[16].

Cox等人^[95]分析了小麦哲伦云星际介质的DIB强度与Spitzer空间红外望远镜的IRAC红外阵列相机 $8\ \mu\text{m}$ 测光强度的相关性. Spitzer/IRAC $8\ \mu\text{m}$ 辐射比IRAS的 $12\ \mu\text{m}$ 辐射更能代表UIR, 因为前者涵括UIR的 6.2 , 7.7 和 $8.6\ \mu\text{m}$ 光谱特征, 而后者主要是包括了UIR的 $11.3\ \mu\text{m}$ 辐射. Cox等人发现, DIBs弱的区域, 其Spitzer/IRAC $8\ \mu\text{m}$ 红外辐射也弱. 这在一定程度上支持了DIB与UIR均由PAH产生的假说. 当然, 也可能只是表明DIB载体跟UIR载体对环境的依赖类似而已.

最后, 在极端的星际物理条件下, 几种可能的载体之间也可能相互转化: Scott等人^[61]提出HAC可以转化成fullerene和PAHs, Berné和Tielens^[49]指出PAH可以转化成fullerene (见第4节).

3 星际富勒烯、石墨烯和碳纳米管

随着纳米物理与化学的进展, 富勒烯、石墨烯和碳纳米管在星际空间是否存在逐渐成了星际物理与化学的新热点. 碳的这3种同素异型体, 在紫外和可见光波段有明显的吸收特征, 在中红外有强的振动模式,

这使得人们可以从星际吸收和星际红外辐射的光谱特征来研究这3类碳质尘埃.

3.1 星际富勒烯

1985年, 为了了解长碳链在碳星周环境中的形成过程以及在星际环境下的生存, Kroto等人^[96]在实验室发现了 C_{60} . 20世纪末, C_{60} 和 C_{70} 以及更大的富勒烯在Allende陨石中被发现^[97]. C_{60} 在 7.0 , 8.5 , 17.4 和 $18.9\ \mu\text{m}$ 处有比较强的振动模式, 而 C_{70} 在 12.6 , 14.9 , 15.6 , 17.8 , 18.7 和 $21.8\ \mu\text{m}$ 处有较强的振动模式^[98]. 2010年, 星际富勒烯 C_{60} 和 C_{70} 的这些振动谱首次在行星状星云Te1的Spitzer/IRS光谱中被探测到^[99]. 随后, Sellgren等人^[100]在反射星云NGC 2023和NGC 7023中也探测到 C_{60} 的红外发射光谱. 其后的几年时间在许多星际环境(如行星状星云^[101]、原行星状星云^[102]、Herbig Ae/Be星和年轻恒星天体等)以及星系尺度上(如大小麦哲伦云的行星状星云^[98])相继发现了星际富勒烯(包括 C_{60} , C_{70} 以及 C_{60}^+ , C_{70}^+ 等). C_{60} 是迄今为止在星际空间中探测到的最大分子(星际PAH分子可能比 C_{60} 更大, 但不知道其明确化学结构). 尽管 C_{60} 最多只占星际碳的1%, 它在星际空间的形成、演化将增进我们对星际物理和化学过程的理解.

富勒烯 C_{60} 在 7.0 , 8.5 , 17.4 和 $18.9\ \mu\text{m}$ 的红外辐射特征, 其相对光谱强度随着所处物理环境(如星光强度和光子能量)的改变而有不同, 因此, 通过研究这些谱带的强度比, 可以揭示 C_{60} 所处天区的物理条件.

目前, 关于富勒烯的来源的讨论尚未达到共识(见图5^[49,101,103,104]).

一般地, C_{60} 须在贫氢环境下才能形成, 因为在氢存在的情况下, 化学反应过程更倾向于产生PAHs. 天文观测确实发现, 在贫氢环境下的行星状星云Te1的红外谱并未发现芳香族红外谱带. 不过, García-Hernández等人^[101]通过观测发现在含氢的行星状星云中也存在 C_{60} . Sellgren等人^[100]证实 C_{60} 和产生芳香族红外谱带的载体, 如PAHs可以共存, García-Hernández等人^[105]随后对RCB(北冕R)星中 C_{60} 的探寻结果也支持了这一结论. García-Hernández等人^[106]认为 $30\ \mu\text{m}$ 特征与富勒烯的形成过程相关. 他们认为产生这一特征的物质可能是HAC分解时的产物, 即形成富勒烯之前的某种物质. 不同的环境下, C_{60} 的状态不同, Cami等人^[99]和García-Hernández等人^[101]认为 C_{60} 是固态的, Sellgren等

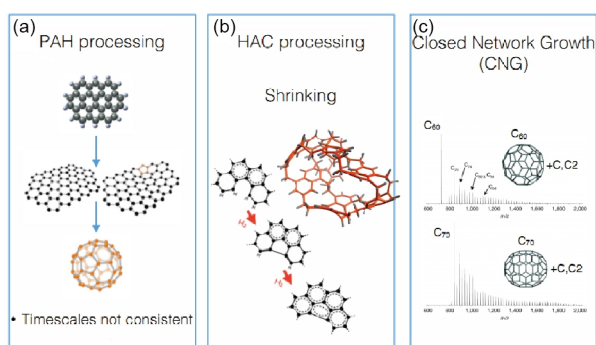


图 5 (网络版彩图) 3种可能形成富勒烯的途径. (a) Berné和Tielens^[49]提出的PAH-石墨烯-富勒烯的过程, 然而Micelotta等人^[103]认为这一过程在时间尺度上与实际情况并不一致, 超过了NGC 7023的存活时间; (b) García-Hernández等人^[101]提出的HAC在紫外光照下脱氢形成富勒烯, Micelotta等人^[103]提出大的“芳香-脂肪”团簇是星际富勒烯的前身; (c) 封闭的碳网状物通过加原子C和C₂生长形成富勒烯^[104]. 图(a)-(c)分别改编自文献^[49,103,104]

Figure 5 (Color online) Three possible routes to form fullerenes. (a) The route of PAH-Graphene-C₆₀ is proposed by Berné and Tielens^[49]. Micelotta et al.^[103] think that the timescale of this path is longer than the life time of NGC 7023; (b) García-Hernández et al.^[102] suggest that fullerenes may be formed by the dehydrogenation of HAC, Micelotta et al.^[103] suggest that the specific derivative structures of HAC which is named “arophat-ic” cluster maybe the precursor of cosmic fullerenes; (c) the growth of fullerenes through a closed network growth mechanism by incorporation of atomic carbon and C₂^[104]. (a)-(c) Adapted from refs.^[49,103,104], respectively.

人^[100]认为在NGC 7023中的C₆₀为气态.

随着C₆₀在更多的天体环境中被探测到, 人们可以更好地研究其与芳香族红外辐射特征以及21和30 μm特征的关系. 此外, 富勒烯经过氢化反应, 产生一种被氢化的富勒烯物质, 即fullerena. Cataldo和Iglesias-Groth^[30]研究发现, 最稳定的fullerena C₆₀H₃₆在2175 Å有较强的吸收峰, 这说明被氢化的富勒烯有可能对星际消光曲线上的2175 Å驼峰作出解释.

3.2 星际石墨烯

在探测到星际富勒烯的同时, García-Hernández等人^[98]发现了平面C₂₄(一种石墨烯原型). 他们发现, 在16个具有C₆₀的麦哲伦云行星状星云的Spitzer/IRS红外光谱中, 在6.6, 9.8和20 μm处有显著的发射光谱特征, 这些谱征被证认为石墨烯的前身C₂₄的红外振动. 2012

年Berné和Tielens^[49]提出星际空间中C₆₀的起源的一种可能性, 认为星际空间中的PAH分子在紫外光子照射下, 发生光反应, PAH失去边缘的氢, 形成了石墨烯, 随后在某些物理机制作用下发生卷曲变形, 最终产生了C₆₀或C₇₀等富勒烯, 如图6所示. 该过程可描述为



其中PAH*是被紫外光子振动激发后能够稳定通过红外光子辐射的PAH分子, PAH_{-H}是脱氢后的PAH自由基. 如果经过这一过程后的PAH被完全脱氢, 变成了单层C原子组成的六角蜂窝状平面二维分子, 即为石墨烯.

计算和实验结果表明, 石墨烯在紫外波段有一较强的吸收峰^[107,108], 这一吸收峰靠近星际消光曲线的2175 Å紫外消光驼峰, 如图7所示. Chen等人¹⁾通过研究石墨烯的紫外吸收和红外辐射光谱, 估算出星际空间中石墨烯的C丰度为~5 ppm.

与C₆₀的7.0, 8.5, 17.4和18.9 μm辐射特征类似, 石墨烯C₂₄的6.6, 9.8和20 μm辐射特征的相对光谱强度也

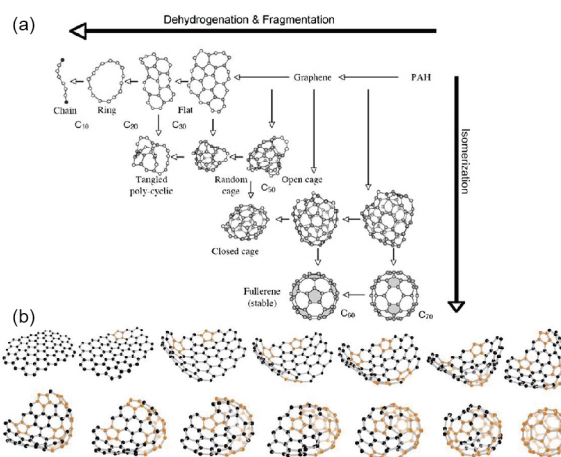


图 6 (网络版彩图) (a) 在UV光子作用下, PAH脱氢、碎裂和异构化形成各种碳物质, 其中脱氢可以形成石墨烯; (b) 石墨烯形成C₆₀的13个步骤. 图来自文献^[49]和Cadars (www.laurecadars.com)

Figure 6 (Color online) (a) The chemical evolution of PAHs in the ISM under the influence of UV photons combines the effects of dehydrogenation and fragmentation with those of isomerization, for instance, graphene can be formed through dehydrogenation of PAHs; (b) schematic illustration of conversion of graphene into C₆₀ in 13 steps. Taken from ref.^[49] and Cadars (www.laurecadars.com).

1) Chen X H, Li A, Zhang K, et al. On graphene in space. 2016, in preparation.

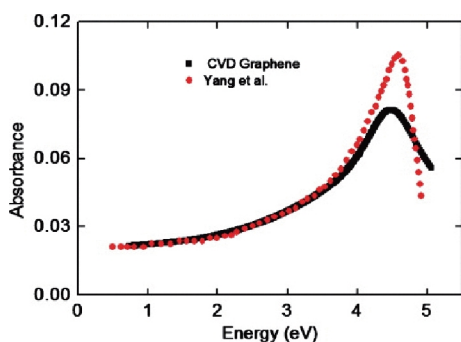


图7 (网络版彩图) 石墨烯的光学吸光率(红色代表Yang等人^[107]的第一性原理计算所得结果, 黑色代表Nelson等人^[108]采用分散模型所得结果)

Figure 7 (Color online) Optical absorbance of graphene (red dots are from first principle calculation by Yang et al. ^[107], black line is calculated from dispersion model values ^[108]).

随着所处物理环境(如星光强度和光子能量)的改变而有不同, 因此, 通过研究这些谱带的强度比, 也可以揭示C₂₄所处天区的物理条件.

3.3 星际碳纳米管

1991年, 碳纳米管的出现^[109]引起了科学界的广泛关注. 碳纳米管为一种由六角碳环构成的柱状结构, 根据碳六边形沿轴向的不同取向可以将其分成锯齿形、扶手椅型和螺旋型3种, 其中螺旋型的碳纳米管具有手性, 而锯齿形和扶手椅型碳纳米管没有手性, 不同的纳米管结构带来了其光学性质的变化. 20世纪就有研究者^[110]提出一定直径和硬度的管状PAHs (Tubular PAHs)能够避免在星际空间被光离解, Zhou等人^[44]认为短的管状PAHs有可能存在于星际空间中, 他们的研究表明, 管状PAHs(包括中性分子和阳离子)与C₆₀直径相同时, 在可见光和近红外波段呈现出强烈的光学跃迁, 与DIBs载体的光学性质有所契合. Barone等人^[46,47]通过密度泛函理论计算得到碳纳米管的光谱在DIBs的光谱范围内, 因此, Sarre^[111]提出碳纳米管可能成为DIBs载体.

4 碳质尘埃间的联系与转化

在星际环境中, 各种碳质尘埃之间的联系与转化, 对了解星际空间中的物理化学过程极为有益.

在实验室中可以通过石墨烯制得碳链^[112], 碳链在极强的电子束辐射作用下具有很好的稳定性. 单键、

三键交替存在的碳链的烟灰(Soot)在不同条件下, 会形成不同的物质. 在有足够的氢存在时, 产物为PAHs; 无氢则产生富勒烯^[5].

在星际辐射场中, 碳链并不稳定, 能量高于6 eV的光子就能使其光离解, 这是在星际介质中没有观察到更大的碳链分子的原因之一^[113]. 例如, 在富碳的AGB星的外流(Outflow)中, PAHs被认为是将乙炔转化成高度石墨化烟灰的主要中介^[114-116].

在上述环境中, 如果温度更高, 则在形成烟灰的过程中会伴随着富勒烯结构的物质生成^[117,118]. 另一种生成富勒烯的方式是, 在行星状星云中通过高速的、蒸发的碳质尘粒之间的碰撞产生了富勒烯^[98]. 同时, Berné和Tielens^[49]在解释星际空间中的富勒烯来源问题时, 提出通过PAHs被完全脱氢形成石墨烯, 石墨烯破碎或者异构化形成了五元环, 进而产生了富勒烯. 然而, NGC 7023的观测结果显示这个过程并不十分有效率, 因此经过这一路线形成富勒烯似乎不是行星状星云的富勒烯的主要来源. 另外, Micelotta等人^[103]推测行星状星云中可以通过HAC纳米颗粒的光化学过程形成富勒烯. 富勒烯的生成充分体现了星际碳质尘埃间的相互联系与转换.

体现星际碳质尘埃间的相互联系和转换的另一个例子是: 在纳米尺寸的Fe的催化作用下, PAH和纳米石墨颗粒在合适的条件下可以被转化成碳纳米管^[119-121]. 然而如果在反应过程中Fe未及时出现, 这些物质将会被转化成管状PAHs. 当然, 前一种情况是普遍存在的^[122], 但不能排除管状PAHs存在的可能性. 管状PAHs是与碳纳米管具有关联性的物质, 无疑可能成为天文工作的又一研究对象.

这些不同类型的碳质尘埃之间的关联与转化将对研究各类星际未证认的光谱特征提供重要线索.

5 总结与展望

碳是宇宙中第4丰富的元素, 碳质尘埃的多种同素异形体被认为是星际尘埃的重要组成, 而星际尘埃的红外辐射能量超过了近邻宇宙中电磁辐射总能量的50%, 这说明碳尘埃的研究格外重要. 我们的分析给出了如下结论以及这些碳尘埃潜在的价值.

(1) 碳元素的存在形式包括气体碳(占40%–60%)和固体碳. 其中后者包括石墨、PAHs、HAC、富勒

烯、C链分子、C团簇等。(2) 2175 Å消光驼峰载体被认为是某种芳香含碳物质; DIB的可能载体是PAHs、碳链、富勒烯、碳纳米管、石墨烯等或其电离对应体; 3.4 μm红外吸收的载体则是脂肪族碳氢物质, 尽管其准确结构尚待证认; 3.43, 3.53 μm辐射的载体基本可以肯定是纳米金刚石; 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 μm这一系列的“UIR”红外辐射特征很可能是PAH分子的振动谱。所有这些, 都与碳尘埃有关。诸多光谱特征, 都为

碳尘埃的天文观测提供了助力, 碳尘埃因此表现出了很大的可探测性。(3) 富勒烯、石墨烯和碳纳米管成为星际物理与化学的新的热点。例如, 被氢化的富勒烯亦有可能对星际消光曲线的2175 Å驼峰做出解释, 而石墨烯的电子吸收紫外光谱靠近紫外消光驼峰。碳纳米管亦可能是某些DIBs的载体。(4) 星际环境中, 不同的碳尘埃相互转化, 对研究各类星际未证认的光谱特征提供重要线索。

致谢 对刘芳的有益建议表示感谢。

参考文献

- 1 Snow T P, Witt A N. Interstellar depletions updated: Where all the atoms went. *Astrophys J*, 1996, 468: L65–L68
- 2 Cardelli J A, Meyer D M, Jura M, et al. The abundance of interstellar carbon. *Astrophys J*, 1996, 467: 334–340
- 3 Ehrenfreund P, Foing B H. Fullerenes and cosmic carbon. *Science*, 2010, 329: 1159–1160
- 4 Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. *Mater Sci Eng-R-Rep*, 2002, 37: 129–281
- 5 Cataldo F. From elemental carbon to complex macromolecular networks in space. In: *Astrobiol Future Perspect*. Berlin: Springer Netherlands 2005. 305: 97–126
- 6 Xiang F Y, Li A, Zhong J X. A tale of two mysteries in interstellar astrophysics: The 2175 Å extinction bump and diffuse interstellar bands. *Astrophys J*, 2011, 733: 91, arXiv: 1210.6597
- 7 Geballe T R. Spectroscopy of the unidentified infrared emission bands. *ASP Conf Ser*, 1997, 122: 119–128
- 8 Allamandola L J, Tielens A G G M, Barker J R. Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons—The infrared emission bands, the excitation/emission mechanism, and the astrophysical implications. *Astrophys J Suppl Ser*, 1989, 71: 733–775
- 9 Puget J L, Léger A. A new component of the interstellar matter: Small grains and large aromatic molecules. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1989, 27: 161–198
- 10 Stecher T P. Interstellar extinction in the ultraviolet. *Astrophys J*, 1965, 142: 1683–1684
- 11 Stecher T P, Donn B. On graphite and interstellar extinction. *Astrophys J*, 1965, 142: 1681–1682
- 12 Aannestad P A. On graphite and the variations in the ultraviolet extinction curve. *Astrophys J*, 1992, 386: 627–634
- 13 Wright E L. The ultraviolet extinction from interstellar graphitic onions. *Nature*, 1988, 336: 227–228
- 14 Mennella V, Colangeli L, Bussoletti E, et al. A new approach to the puzzle of the ultraviolet interstellar extinction bump. *Astrophys J*, 1998, 507: L177–L180
- 15 Joblin C, Leger A, Martin P. Contribution of polycyclic aromatic hydrocarbon molecules to the interstellar extinction curve. *Astrophys J*, 1992, 393: L79–L82
- 16 Li A, Draine B T. Infrared emission from interstellar dust. II. The diffuse interstellar medium. *Astrophys J*, 2001, 554: 778–802
- 17 Jäger C, Henning T, Schlögl R, et al. Spectral properties of carbon black. *J Non-Cryst Solids*, 1999, 258: 161–179
- 18 Draine B T. Interstellar dust. In: McWilliam A, Rauch M, eds. *Origin and Evolution of the Elements, from the Carnegie Observatories Centennial Symposia*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 317
- 19 Steglich M, Bouwman J, Huisken F, et al. Can neutral and ionized polycyclic aromatic hydrocarbons be carriers of the ultraviolet extinction bump and the diffuse interstellar bands? *Astrophys J*, 2011, 742: 2, arXiv: 1108.2972
- 20 Tielens A G G M. The molecular universe. *Rev Mod Phys*, 2013, 85: 1021–1081
- 21 Tielens A G G M. Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2008, 46: 289–337
- 22 Jones A P, Tielens A G G M, Hollenbach D J. Grain shattering in shocks: The interstellar grain size distribution. *Astrophys J*, 1996, 469: 740–764
- 23 Rapacioli M, Calvo F, Joblin C, et al. Formation and destruction of polycyclic aromatic hydrocarbon clusters in the interstellar medium. *Astron Astrophys*, 2006, 460: 519–531
- 24 Krätschmer W, Huffman D R. Fullerenes: New forms of crystalline carbon. *Carbon*, 1992, 30: 1143–1147

- 25 Ehrenfreund P, Irvine W, Becker L, et al. Astrophysical and astrochemical insights into the origin of life. *Rep Prog Phys*, 2002, 65: 1427–1487
- 26 Moutou S, Sellgren K, Verstraete L, et al. Upper limit on C₆₀ and C₆₀⁺ features in the ISO-SWS spectrum of the reflection nebula NGC 7023. *Astron Astrophys*, 1999, 347: 949–956
- 27 Li Q, Li A G, Jiang B W, et al. Interstellar C₆₀ (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 821–832 [李琼, 李爱根, 姜碧涛, 等. 星际 C₆₀. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 821–832]
- 28 Rubin R H, Simpson J P, O’Dell C R, et al. Spitzer reveals what is behind orion’s bar. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 410: 1320–1348, arXiv: [1008.2736](#)
- 29 Roberts K R G, Smith K T, Sarre P J. Detection of C₆₀ in embedded young stellar objects, a Herbig Ae/Be star and an unusual post-asymptotic giant branch star. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 421: 3277–3285, arXiv: [1201.3542](#)
- 30 Cataldo F, Iglesias-Groth S. On the action of UV photons on hydrogenated fullerenes C₆₀H₃₆ and C₆₀D₃₆. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 400: 291–298
- 31 Gadallah K A K, Mutschke H, Jäger C. UV irradiated hydrogenated amorphous carbon (HAC) materials as a carrier candidate of the interstellar UV bump at 217.5 nm. *Astron Astrophys*, 2011, 528: A56
- 32 Gadallah K A K, Mutschke H, Jäger C. UV-irradiated hydrogenated amorphous carbons (HACs) as carriers of the interstellar UV bump. In: Stehlé C, Joblin C, d’Hendecourt L, eds. European Conference on Laboratory Astrophysics. Les Ulis: EDP Sciences, 2012. 389–393
- 33 Schnaiter M, Henning T, Mutschke H, et al. Infrared spectroscopy of nano-sized carbon grains produced by laser pyrolysis of acetylene: Analog materials for interstellar grains. *Astrophys J*, 1999, 519: 687–696
- 34 Heger M L. Further study of the sodium lines in class B stars. *Lick Obs Bull*, 1922, 10: 141–145
- 35 Merrill P W. Stationary lines in the spectrum of the binary star Boss 6142. *Astrophys J*, 1936, 83: 126–128
- 36 Hobbs L M, York D G, Snow T P, et al. A catalog of diffuse interstellar bands in the spectrum of HD 204827. *Astrophys J*, 2008, 680: 1256–1270, arXiv: [0804.2094](#)
- 37 Xiang F Y, Liang S L, Li A G. Diffuse interstellar absorption bands. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52: 489–501 [向福元, 梁顺林, 李爱根. 星际弥散吸收带. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39: 481–493]
- 38 Foing B H, Ehrenfreund P. New evidences for interstellar C₆₀⁺. *Astron Astrophys*, 1997, 317: L59–L62
- 39 Maier J P, Walker G A H, Bohlender D A. On the possible role of carbon chains as carriers of diffuse interstellar bands. *Astrophys J*, 2004, 602: 286–290
- 40 Maier J P, Boguslavskiy A E, Ding H, et al. The gas phase spectrum of cyclic C₁₈ and the diffuse interstellar bands. *Astrophys J*, 2006, 640: 369–372
- 41 Tan X, Bernstein L, Cami J, et al. On estimating interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon abundances with calculated oscillator strengths. *Astrophys J*, 2011, 728: 62
- 42 Gredel R, Carpentier Y, Rouillé G, et al. Abundances of PAHs in the ISM: Confronting observations with experimental results. *Astron Astrophys*, 2011, 530: A26, arXiv: [1102.3775](#)
- 43 Pino T, Carpentier Y, Féraud G, et al. Electronic spectroscopy of PAHs. In: Joblin C, Tielens A G G M, eds. PAHs and the Universe. Les Ulis: EDP Sciences, 2011. 46: 355–371
- 44 Zhou Z, Sfeir M Y, Zhang L, et al. Graphite, tubular PAHs, and the diffuse interstellar bands. *Astrophys J*, 2006, 638: L105–L108
- 45 Weisman R B, Bachilo S M. Dependence of optical transition energies on structure for single-walled carbon nanotubes in aqueous suspension: An empirical kataura plot. *Nano Lett*, 2003, 3: 1235–1238
- 46 Barone V, Peralta J E, Scuseria G E. Optical transitions in metallic single-walled carbon nanotubes. *Nano Lett*, 2005, 5: 1830–1833
- 47 Barone V, Peralta J E, Wert M, et al. Density functional theory study of optical transitions in semiconducting single-walled carbon nanotubes. *Nano Lett*, 2005, 5: 1621–1624
- 48 Tielens A G G M. Diffuse interstellar bands: The way forward. *Proc IAU*, 2013, 9: 399–411
- 49 Berné O, Tielens A G G M. Formation of buckminsterfullerene (C₆₀) in interstellar space. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 401–406, arXiv: [1111.0839](#)
- 50 Adamson A J, Whittet D C B, Duley W W. The 3.4 μm interstellar absorption feature in Cyg OB2 No.12. *Mon Not R Astron Soc*, 1990, 243: 400–404
- 51 Pendleton Y J, Allamandola L J. The organic refractory material in the diffuse interstellar medium: Mid-infrared spectroscopic constraints. *Astrophys J Suppl S*, 2002, 138: 75–98
- 52 Sandford S A, Pendleton Y J, Allamandola L J. The galactic distribution of aliphatic hydrocarbons in the diffuse interstellar medium. *Astrophys J*, 1995, 440: 697–705

- 53 Greenberg J M, Li A, Mendoza-Gomez C X, et al. Approaching the interstellar grain organic refractory component. *Astrophys J*, 1995, 455: L177
- 54 Duley W W, Scott A D, Seahra S, et al. Integrated absorbances in the 3.4 μm CH_n band in hydrogenated amorphous carbon. *Astrophys J*, 1998, 503: L183–L185
- 55 Duley W W. Infrared absorption due to hydrogenated amorphous carbon in the diffuse interstellar medium. *Astrophys J*, 1994, 430: L133–L135
- 56 Mennella V, Brucato J R, Colangeli L, et al. C–H bond formation in carbon grains by exposure to atomic hydrogen: The evolution of the carrier of the interstellar 3.4 micron band. *Astrophys J*, 2002, 569: 531–540
- 57 Whittet D C B, Boogert A C A, Gerakines P A, et al. Infrared spectroscopy of dust in the diffuse interstellar medium toward cygnus OB2 No. 12. *Astrophys J*, 1997, 490: 729–734
- 58 Chiar J E, Tielens A G G M, Whittet D C B, et al. The composition and distribution of dust along the line of sight toward the galactic center. *Astrophys J*, 2000, 537: 749–762
- 59 Chiar J E, Adamson A J, Pendleton Y J, et al. Hydrocarbons, ices, and “XCN” in the line of sight toward the galactic center. *Astrophys J*, 2002, 570: 198–209
- 60 Jones A P, Duley W W, Williams D A. The structure and evolution of hydrogenated amorphous carbon grains and mantles in the interstellar medium. *Q J Roy Astron Soc*, 1990, 31: 567–582
- 61 Scott A, Duley W W, Pinho G P. Polycyclic aromatic hydrocarbons and fullerenes as decomposition products of hydrogenated amorphous carbon. *Astrophys J*, 1997, 489: L193–L195
- 62 Yang X J, Glaser R, Li A, et al. The carriers of the interstellar unidentified infrared emission features: Constraints from the interstellar C–H stretching features at 3.2–3.5 μm . *Astrophys J*, 2013, 776: 110, arXiv: 1309.1993
- 63 Yang X J, Li A, Glaser R, et al. The C–H stretching features at 3.2–3.5 μm of polycyclic aromatic hydrocarbons with aliphatic sidegroups. *Astrophys J*, 2016, 825: 22, arXiv: 1608.06704
- 64 Chiar J E, Tielens A G G M, Adamson A J, et al. The structure, origin, and evolution of interstellar hydrocarbon grains. *Astrophys J*, 2013, 770: 78
- 65 Dartois E, Geballe T R, Pino T, et al. IRAS 08572+3915: Constraining the aromatic versus aliphatic content of interstellar HACs. *Astron Astrophys*, 2007, 463: 635–640
- 66 Lewis R S, Ming T, Wacker J F, et al. Interstellar diamonds in meteorites. *Nature*, 1987, 326: 160–162
- 67 Guillois O, Ledoux G, Reynaud C. Diamond infrared emission bands in circumstellar media. *Astrophys J*, 1999, 521: L133–L136
- 68 Van V V, Kerckhoven C, Tielens A G G M, et al. The peculiar 3.43 and 3.53 μm emission features toward HD 97048 and Elias 1. In: Cox P, Kessler M F, eds. *The Universe as Seen by ISO*. Noordwijk: ESA Special Publications, 1999. 427: 421–423
- 69 Chang H C, Lin J C, Wu J Y, et al. Infrared spectroscopy and vibrational relaxation of CH_2 and CD_2 stretches on synthetic diamond nanocrystal surfaces. *J Phys Chem*, 1995, 99: 11081–11088
- 70 Oomens J, Polfer N, Pirali O, et al. Infrared spectroscopic investigation of higher diamondoids. *J Mol Spectrosc*, 2006, 238: 158–167
- 71 Pirali O, Vervloet M, Dahl J E, et al. Infrared spectroscopy of diamondoid molecules: New insights into the presence of nanodiamonds in the interstellar medium. *Astrophys J*, 2007, 661: 919–925
- 72 Peeters E, Hony S, Van Kerckhoven C, et al. The rich 6 to 9 μm spectrum of interstellar PAHs. *Astron Astrophys*, 2002, 390: 1089–1113
- 73 Mattila K, Lemke D, Haikala L K, et al. Spectrophotometry of UIR bands in the diffuse emission of the Galactic disk. *Astron Astrophys*, 1996, 315: L353–L356
- 74 Hony S, Van Kerckhoven C, Peeters E, et al. The CH out-of-plane bending modes of PAH molecules in astrophysical environments. *Astron Astrophys*, 2001, 370: 1030–1043
- 75 Armus L, Charmandaris V, Bernard-Salas J, et al. Observations of ultraluminous infrared galaxies with the infrared spectrograph on the spitzer space telescope. II. The IRAS bright galaxy sample. *Astrophys J*, 2007, 656: 148–167
- 76 Lutz D, Sturm E, Tacconi L J, et al. PAH emission and star formation in the host of the $z^{2.56}$ cloverleaf QSO. *Astrophys J*, 2007, 661: L25–L28, arXiv: 0704.0133
- 77 Sellgren K, Uchida K I, Werner M W. The 15–20 μm Spitzer spectra of interstellar emission features in NGC 7023. *Astrophys J*, 2007, 659: 1338–1351
- 78 Galliano F, Madden S C, Tielens A G G M, et al. Variations of the mid-IR aromatic features inside and among galaxies. *Astrophys J*, 2008, 679: 310–345, arXiv: 0801.4955
- 79 Léger A, Puget J L. Identification of the “unidentified” IR emission features of interstellar dust? *Astron Astrophys*, 1984, 137: L5–L8
- 80 Li M P, Li A. Interstellar PAHs (in Chinese). In: *10000 Selected Problems in Sciences: Astronomy*. Beijing: Science Press, 2010. 346–351 [李墨萍, 李爱根. 星际空间的多环芳香烃. 10000个科学难题·天文学卷. 北京: 科学出版社, 2010. 346–351]

- 81 Kwok S, Zhang Y. Mixed aromatic-aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features. *Nature*, 2011, 479: 80–83
- 82 Li A, Draine B T. The carriers of the interstellar unidentified infrared emission features: Aromatic or aliphatic? *Astrophys J*, 2012, 760: L35, arXiv: [1210.6558](#)
- 83 Blanco A, Borghesi A, Fonti S, et al. Circumstellar emission from dust envelopes around carbon stars showing the silicon carbide feature. *Astron Astrophys*, 1998, 330: 505–514
- 84 Whittet D C B, Duley W W, Martin P G. On the abundance of silicon carbide dust in the interstellar medium. *Mon Not R Astron Soc*, 1990, 244: 427–431
- 85 Liu F, Li A G, Xiang F Y, et al. Interstellar SiC grains (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 079501 [刘芳, 李爱根, 向福元, 等. 星际碳化硅SiC尘埃. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 079501]
- 86 Kwok S, Volk K M, Hrivnak B J. A 21 micron emission feature in four proto-planetary nebulae. *Astrophys J*, 1989, 345: L51–L54
- 87 Kwok S, Volk K, Hrivnak B J. On the origin of the 21 micron feature in post-AGB Star. In: Le Bertre T, Lèbre, Waelkens C, eds. *IAU Symp Asymptotic Giant Branch Stars*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific Publisher, 1999. 191: 297–302
- 88 Zhang K, Jiang B W. The mysterious 21 μm dust feature (in Chinese). In: *10000 Selected Problems in Sciences: Astronomy*. Beijing: Science Press, 2010. 355–357 [张可, 姜碧涛. 神秘的21 μm 尘埃特征. *10000个科学难题·天文学卷*. 北京: 科学出版社, 2010. 355–357]
- 89 Jiang B W, Zhang K. The 30 μm emission feature in carbon-rich stars (in Chinese). In: *10000 Selected Problems in Sciences: Astronomy*. Beijing: Science Press, 2010. 358–359 [姜碧涛, 张可. 富碳恒星中的30 μm 尘埃特征. *10000个科学难题·天文学卷*. 北京: 科学出版社, 2010. 358–359]
- 90 Mishra A, Li A, Jiang B W. A tale of three mysterious spectral features in carbon-rich evolved stars: the 21 μm , 30 μm , and “unidentified infrared” emission features. *Astrophys J*, 2015, 802: 39, arXiv: [1507.06596](#)
- 91 Mishra A, Li A, Jiang B W. On the relation between the mysterious 21 μm emission feature of post-asymptotic giant branch stars and their mass-loss rates. *Astrophys J*, 2016, 825: 68, arXiv: [1605.03166](#)
- 92 Hrivnak B J, Volk K, Kwok S. A Spitzer study of 21 and 30 μm emission in several galactic carbon-rich protoplanetary nebulae. *Astrophys J*, 2009, 694: 1147–1160, arXiv: [0902.0077](#)
- 93 Kwok S, Zhang Y. Unidentified infrared emission bands: PAHs or MAONs? *Astrophys J*, 2013, 771: 5, arXiv: [1304.7629](#)
- 94 Boulanger F, Prevot M L, Gry C. The contribution of small particles to the extinction curve. *Astron Astrophys*, 1994, 284: 956–970
- 95 Cox N L J, Cordiner M A, Ehrenfreund P, et al. Interstellar gas, dust and diffuse bands in the SMC. *Astron Astrophys*, 2007, 470: 941–955
- 96 Kroto H W, Heath J R, O’Brien S C, et al. C_{60} : Buckminsterfullerene. *Nature*, 1985, 318: 162–163
- 97 Becker L, Bunch T E, Allamandola L J. Higher fullerenes in the Allende meteorite. *Nature*, 1999, 400: 227–228
- 98 García-Hernández D A, Iglesias-Groth S, Acosta-Pulido J A, et al. The formation of fullerenes: Clues from new C_{60} , C_{70} , and (possible) planar C_{24} detections in magellanic cloud planetary nebulae. *Astrophys J*, 2011, 737: L30, arXiv: [1107.2595](#)
- 99 Cami J, Bernard-Salas J, Peeters E, et al. Detection of C_{60} and C_{70} in a young planetary nebula. *Science*, 2010, 329: 1180–1182
- 100 Sellgren K, Werner M W, Ingalls J G, et al. Confirmation of C_{60} in the reflection nebula NGC 7023. *EAS Publ Ser*, 2011, 46: 209–214
- 101 García-Hernández D A, Manchado A, García-Lario P, et al. Formation of fullerenes in H-containing planetary nebulae. *Astrophys J*, 2010, 724: L39–L43, arXiv: [1009.4357](#)
- 102 Zhang Y, Kwok S. Detection of C_{60} in the protoplanetary nebula IRAS 01005+7910. *Astrophys J*, 2011, 730: 126, arXiv: [1102.2985](#)
- 103 Micelotta E R, Jones A P, Cami J, et al. The formation of cosmic fullerenes from aroplatic clusters. *Astrophys J*, 2012, 761: 35, arXiv: [1207.5817](#)
- 104 Dunk P W, Kaiser N K, Hendrickson C L, et al. Closed network growth of fullerenes. *Nat Commun*, 2012, 3: 855
- 105 García-Hernández D A, Rao N K, Lambert D L. Are C_{60} molecules detectable in circumstellar shells of R Coronae Borealis stars? *Astrophys J*, 2011, 729: 126, arXiv: [1101.2253](#)
- 106 García-Hernández D A, Villaver E, García-Lario P, et al. Infrared study of fullerene planetary nebulae. *Astrophys J*, 2012, 760: 107, arXiv: [1210.0216](#)
- 107 Yang L, Deslippe J, Park C H, et al. Excitonic effects on the optical response of graphene and bilayer graphene. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 186802, arXiv: [0906.0969](#)
- 108 Nelson F J, Kamineni V K, Zhang T, et al. Optical properties of large-area polycrystalline chemical vapor deposited graphene by spectroscopic ellipsometry. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 253110
- 109 Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, 354: 56–58
- 110 Allain T, Leach S, Sedlmayr E. Photodestruction of PAHs in the interstellar medium. I. Photodissociation rates for the loss of an acetylenic group. *Astron Astrophys*, 1996, 305: 602–615
- 111 Sarre P J. Organic compounds as carriers of the diffuse interstellar bands. *IAU*, 2008, 4: 49–56

- 112 Jin C, Lan H, Peng L, et al. Deriving carbon atomic chains from graphene. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 205501
- 113 Tulej M, Kirkwood D A, Pachkov M, et al. Gas-phase electronic transitions of carbon chain anions coinciding with diffuse interstellar bands. *Astrophys J*, 1998, 506: L69–L73
- 114 Cherchneff I, Barker J R, Tielens A G G M. Polycyclic aromatic hydrocarbon formation in carbon-rich stellar envelopes. *Astrophys J*, 1992, 401: 269–287
- 115 Jäger C, Huisken F, Mutschke H, et al. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and carbonaceous solids in gas-phase condensation experiments. *Astrophys J*, 2009, 696: 706–712, arXiv: 0903.0775
- 116 Cherchneff I. The inner wind of IRC+10216 revisited: New exotic chemistry and diagnostic for dust condensation in carbon stars. *Astron Astrophys*, 2012, 545: A12, arXiv: 1111.6809
- 117 Pope C J, Marr J A, Howard J B. Chemistry of fullerenes C₆₀ and C₇₀ formation in flames. *J Phys Chem*, 1993, 97: 11001–11013
- 118 Jäger C, Mutschke H, Henning T, et al. Spectral properties of gas-phase condensed fullerene-like carbon nanoparticles from far-ultraviolet to infrared wavelengths. *Astrophys J*, 2008, 689: 249–259, arXiv: 0903.0759
- 119 Moiala A, Nasibulin A G, Kauppinen E I. The role of metal nanoparticles in the catalytic production of single-walled carbon nanotubes—a review. *J Phys Condens Matter*, 2003, 15: S3011–S3035
- 120 Wagg L M, Hornyak G L, Grigorian L, et al. Experimental gibbs free energy considerations in the nucleation and growth of single-walled carbon nanotubes. *J Phys Chem B*, 2005, 109: 10435–10440
- 121 Ichihashi T, Fujita J I, Ishida M, et al. *In situ* observation of carbon-nanopillar tubulization caused by liquidlike iron particles. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 215702
- 122 Croat T K, Bernatowicz T, Amari S, et al. Structural, chemical, and isotopic microanalytical investigations of graphite from supernovae. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 4705–4725

Interstellar carbon dust

CHEN XiuHui¹, LI AiGen², XIANG FuYuan¹, YANG XueJuan¹ & ZHONG JianXin^{1*}

¹ School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

² Department of Physics and Astronomy, University of Missouri, Columbia 65211, USA

Carbon is the fourth most abundant element in the Universe after hydrogen, helium and oxygen. Synthesized at the late evolutionary stage of stars, carbon is ejected from stars through mass loss of asymptotic giant branch stars and explosion of supernovae and then enters the interstellar medium in the form of ions, atoms, molecules and solid dust particles. Carbon-containing complex organic molecules are essential for the origins of life, and carbonaceous dust is a major component of interstellar grains whose infrared absorption and emission spectra provide a powerful diagnosis of the physical and chemical conditions of astrophysical regions where the dust is found. Carbonaceous dust materials such as graphite, nanodiamonds, polycyclic aromatic hydrocarbon molecules, fullerene, and hydrogenated amorphous carbon are ubiquitously present in the interstellar space and are the most promising candidate carriers of the unidentified 2175 Å extinction bump, the unidentified infrared emission bands at 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, and 11.3 μm, and the mysterious diffuse interstellar absorption bands. Here we focus on the observational properties of interstellar carbonaceous grains and their physical and chemical characteristics. Also discussed are graphene and carbon nanotubes which may be present in the interstellar space.

interstellar carbonaceous dust, interstellar extinction, interstellar infrared emissions, diffuse interstellar bands

PACS: 98.38.Am, 98.38.Cp, 98.58.Ay, 98.58.Ca, 98.35.Bd

doi: 10.1360/SSPMA2016-00343