评述

星际碳化硅SiC尘埃

刘芳^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

*联系人, E-mail: jxzhong@xtu.edu.cn

收稿日期: 2016-03-07; 接受日期: 2016-03-14; 网络出版日期: 2016-06-03

国家自然科学基金资助项目(编号: 11273022, 11473023, U1531108)

摘要 碳化硅(SiC)尘粒是宇宙尘埃的重要成分之一, 亚微米尺寸的SiC颗粒在11.3 μm 波长附近有非常显著的晶格振动带. 早在20世纪60年代, Friedemann等人就预言了SiC尘粒可以冷凝在富碳恒星的质量流失喷出物中. 随后, 通过11.3 μm 的光谱特征, 在碳星的星周包层检测到了SiC尘埃. 另外, 通过原始陨石中同位素异常发现前太阳(Presolar) SiC尘粒最终确立了SiC在星际介质中的存在. 然而, 令人困惑的是, 在星际空间中并未观测到SiC的11.3 μm 吸收特征. 本文主要介绍SiC的光学性质、SiC在天体环境中的观测特征, 从而推断SiC在星际空间的丰度上限, 并对其在星际空间中的演化进行理论分析.

关键词 碳化硅, 11.3 μm 特征, 碳星, 红外光谱

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

在浩瀚的星系宇宙中, 除了恒星、行星、彗星等各种天体之外, 在恒星与恒星之间, 还存在一种由气体和微小的固体颗粒组成的物质即星际介质. 这些固体尘埃颗粒虽然只占星系星际物质总质量的约百分之一, 但是在星系演化、恒星和行星系统的形成, 乃至生命的起源中都有着极为重要的作用. 自从1930年Trumpler^[1]通过星际选择消光(Selective Extinction)首次证实宇宙空间存在星际尘埃以来, 经过几十年的研究, 人们对星际尘埃特性的认识越来越明晰和深刻. 目前, 对于星际尘埃的化学成分, 普遍认为是由无定型(Amorphous)硅酸盐尘粒和某种形式的含碳尘粒(Carbonaceous Dust)组成. 确认星际硅酸盐的存在是根

据其9.7 μm Si-O拉伸模式和18 μm O-Si-O扭曲模式形成的星际吸收光谱, 以及气体中的重元素Si, Fe, Mg的丰度远低于宇宙平均丰度. 关于含碳化合物, 人们提出由多种物质组成, 包括无定型碳、金刚石、石墨、SiC和有机耐熔质(Organic Refractory)等^[2]. 本文主要研究介绍碳化物中的SiC.

对SiC尘粒的研究可以追溯到20世纪60年代, Friedemann^[3]和Gilman^[4]根据热力学平衡计算, 曾预言过SiC尘粒形成于富碳恒星的质量流失喷出物中. 事实上, 更早的时候, Wildt^[5]已经指出SiC形成于碳星星周包层. 关于恒星周围SiC存在的更早的确切证据来源于Hackwell^[6], Treffers和Cohen^[7]的天文观测红外

引用格式: 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

Liu F, Li A G, Xiang F Y, et al. Interstellar SiC grains (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 079501, doi: 10.1360/SSPMA2016-00141

光谱. 他们发现碳星光谱有一个相当广泛的特征, 这一现象通常被解释为波长位置在横向和纵向光学声子频率之间的小尺寸(亚微米级)SiC的发射. 对于星际SiC成分确认的直接证据则是源于对原始陨石(Primitive Meteorites)中SiC微粒的同位素分析^[8-10]. 从其¹²C/¹³C比值分析得出某些SiC与太阳系有很大的差异, 却类似于碳星中观察到的比值^[11].

自从SiC的存在被证实之后, 星际介质中SiC的观测特征再度受到广泛关注. 然而, 半个世纪以来, 至今都还没有在星际空间中明确观测到SiC的红外光谱.

SiC作为恒星演化晚期的重要产物, 与硅酸盐和碳尘埃一样, 会被抛射入星际空间, 参与星际介质的演化, 其本身也会经历一系列物理、化学演化, 并可能在此过程中会引起自身性质的改变. 因此, SiC尘粒在演化过程中的物理化学变化对研究星系甚至宇宙的化学演化有着重要的作用.

本文第1部分介绍了SiC的基本理化特征; 第2部分陈述了在各种天体环境中已发现的SiC的观测特征, 并给出从观测资料可以得到的有关SiC尘粒的天体矿物学信息; 第3部分简要讨论了星际空间中SiC的丰度, 并根据其形成及演化因素对该丰度作出解释; 最后, 在文章的第4部分列出了SiC尘粒研究中存在的问题, 对其未来的发展作出展望.

1 SiC的基本性质

碳化硅的分子式为SiC, 分子量为40.07, 由29.955%的碳(C)和70.045%的硅(Si)组成, SiC的密度为3.16–3.2 g/cm³. 在电子特性方面, SiC多型体是带隙很宽的半导体, $E_g=2.39\text{--}3.33\text{ eV}$ ^[12]. 因此, 纯净SiC的红外光谱的特点是除声子吸收区(10–13 μm)之外具有透过性. 在掺杂物(如氮)浓度较高的情况下, 小尺寸碳颗粒可以通过表面等离子体激元的激发也在10–13 μm 波长范围显示强烈的红外吸收^[13].

对SiC结晶结构的研究, 揭示出它有许多不同结晶类型. SiC是一种典型的以共价键结合的化合物, 其晶格的基本结构单元是相互穿插的SiC₄和CSi₄四面体. 从理论上讲, 碳化硅均由SiC四面体堆积而成, 所不同的只是堆积方式不一样. 四面体共边形成平面层, 并以顶点与下一叠层四面体相连形成三维结构. 1912年, Baumhauer^[14]首次发现了SiC的立方、菱方和

六角三种基本结构, 并由此结构形成了 α 和 β 两种晶型. β -SiC的晶体结构为立方晶系, Si和C分别组成面心立方晶格; α -SiC存在着4H, 15R和6H等100余种多型体. 图1^[15]给出 α -SiC和 β -SiC的晶体结构. 在SiC的多型体之间存在着一定的热稳定性关系. 在温度低于1600°C时, 碳化硅以 β -SiC形式形成. 当高于1600°C时, β -SiC缓慢转变成 α -SiC的各种多型体. 4H-SiC在2000°C左右容易生成; 15R和6H多型体均需在2100°C以上的高温才容易生成; 对于6H-SiC, 即使温度超过2200°C, 也是非常稳定的.

SiC的化学稳定性与其氧化特性有密切关系. SiC本身很容易氧化, 但它氧化之后形成了一层二氧化硅(SiO₂)薄膜, 阻碍了继续氧化的进程, 从而对SiC起到一定的保护作用. 在空气中, SiC于800°C时就开始氧化, 但很缓慢; 随着温度升高, 氧化速度急速加快. SiC的氧化速度, 在氧气中比在空气中快1.6倍; 氧化速度随着时间的推移而减慢. 如果以时间推移对氧化的数量描图, 可以得到典型的抛物线图形. 这反映出二氧化硅保护层对SiC氧化速度的阻碍作用. 在后文(见第3节)我们将讨论星际空间富氧环境下SiC的氧化.

在光学性质方面, 亚微米尺寸SiC颗粒在10 μm 到13 μm 波长范围显示了非常显著的晶格振动带. Speck等人^[16]研究了SiC的实验室光谱. 发现不同类型SiC的介电函数不应该造成声子带在外形上的差异. 但是, Henning和Mutschke^[17]发现因为微粒形状和聚集状态的影响, 以及由于掺杂物(如氮)导致电导率的引进, 从而使SiC的实验室光谱产生了一定程度的差异.

作为例子, 图2给出4种SiC颗粒的实验室红外光谱, 其中有3种属于 β 类型. 很明显, 这些样本产生的声子谱带外形各不相同, 但其中一种 β -SiC的光谱与 α -SiC相似. 具有双峰特征的光谱是由一种具有特殊形

图1 α -SiC(a)图和 β -SiC(b)的晶体结构^[15]
Figure 1 Crystal structure of α -SiC and β -SiC ^[15].

图2 嵌入KBr的不同SiC微粒的红外吸收光谱^[17]. 其中实线表示来自对SiH₄和C₂H₂进行气相热解产生的 β -SiC, 短划线表示工业 β -SiC, 点划线表示晶须 β -SiC, 短划点线表示工业 α -SiC. 为了清晰可见, 对曲线作了部分垂直移动

Figure 2 IR absorption spectra of different SiC particulates embedded in KBr. β -SiC from gas pyrolysis of SiH₄ and C₂H₂ (solid line), commercial β -SiC (Alpha Johnson) (dashed line), β -SiC whiskers (dotted line), and commercial α -SiC (dash-dotted line). For clarity, the curves have been shifted vertically ^[17].

态(晶须或针状)的SiC粉末产生的, 而峰值在11 μm 的SiC光谱是由包含自由载流子在内的SiC物质产生, 这些自由载流子很可能是由含氮杂质产生的, 它使表面等离子体激发, 并与声子相互作用, 从而使得声子谱带的最大值向更短波长移动.

根据理论计算, SiC的光谱形状和峰值位置与颗粒的外形分布有着显著的联系. 图3^[18]给出的是不同类型不同形状的SiC颗粒的理论计算光谱. 从图中可以看出, 球形颗粒产生的谱带外形比较尖锐, 波长范围也比较小; 而连续分布的椭球体(Continuous Distribution of Ellipsoids, CDE)颗粒产生的谱带外形比较舒缓平坦, 且波长跨度也比较大. 其中CDE在稍大波长处第二峰值上的差异是由微粒的各向异性引起的. 很显然, 光谱形状对于SiC的晶体类型没有明显的依赖性. 但是, 杂质对谱带形状有一定的影响, 并且使峰值位置发生一定的移动. 图4给出了不同尺寸不规则形状的 α -SiC的光谱, 其最明显的特点在于随着SiC颗粒尺寸的减小, 较大波长处(12.8 μm)的吸收峰逐步消失.

2 天体物理环境中碳化硅的观测证据

2.1 碳星环境中的SiC

观测表明, 几乎所有的碳星光谱都显示有11.3 μm

区域的发射特征, 从而证实11.3 μm 发射特征是由于SiC颗粒冷凝在碳星的星周包层. 从历史上讲, SiC是从碳星的红外光谱特征中识别出来的第一种尘埃类型. 1969年, Gilman和Friedemann基于对化学平衡的计算预测了碳星大气中SiC的存在; 1972年, 11.3 μm 特征谱正式被Hackwell观测; 随后, Treffers和Cohen分析了特征谱的轮廓. Goebel等人^[19]辨别了天文观测SiC光谱与粉末样品实验室测量光谱的对照.

进而, 含碳陨石(Carbonaceous Meteorites)中前太阳SiC (Presolar SiC)微粒的同位素异常有力地支持了SiC粒子在富碳渐近巨星支(AGB)星中的形成.

实验室SiC光谱特征的中心波长基本稳定集中在11.3 μm ^[18], 但银河系源的IRAS/LRS天文光谱数据^[19]显示其峰值波长在11.15 μm 到11.7 μm 之间变化. 另一方面, Irene等人^[20]分析了176个明亮的红外碳星的IRAS光谱, 发现大部分源的光谱特征都集中在波长为(11.15 $\pm$ 0.10) μm 处, 其半峰全宽FWHM $\approx$ (1.60 $\pm$ 0.15) μm . 对于这种中心波长发生移动的现象, Speck等人^[21]认为与尘埃微粒的尺寸分布有关.

在图5中, 展示了具有很强的SiC发射特征的T Draconis(天马座)碳星的ISO光谱. 图中除SiC特征以外的其余部分的光谱可能是由氢化无定型碳(Hydrogenated Amorphous Carbon)产生的^[22]. SiC一度也被认为是富碳原行星状星云的21 μm 发射特征的载体, 但其有效性被Jiang等人^[23,24]否决了.

Baron等人^[25]和Papoular^[26]根据SiC发射特征的强度将恒星分类, 并认为其中一些发射特征谱与Borghesi等人^[27]对 α -SiC粉末测得的大量吸收光谱非常一致. Pégourie^[28]也发现 α -SiC的实验室光谱与碳星的观测光谱最为相似. Groenewegen^[29]研究了21个碳星的IRAS/LRS光谱, 结果显示大多数碳星光谱都与 α -SiC最为拟合, 只有极个别(如IRAS 20396+4757和IRAS 03229+4721)显示了 β -SiC的特征. Chan和Kwok^[30]认为恒星在由光学到红外碳星的演化过程中SiC也可以从 α -SiC演变为 β -SiC.

尽管根据实验室粉末样品比照发现星周11.3 μm 特征似乎是由于 α -SiC微粒引起, Dorschner等人^[31]和Borghesi等人^[27]注意到特征谱的峰值波长、形状和宽度对样品的制备过程很敏感. 由Choyke和Palik^[32]基于对大量 α -SiC测量而制成的SiC光学常数表与那些由粉末样本测量出的完全不同^[33]. 正如Bohren和Huffman^[34]

图3 不同类型不同形状的小尺寸SiC颗粒的理论计算光谱^[18]. 实线代表球形颗粒, 点线代表连续分布的椭球颗粒(CDE), 虚线代表某种附加条件的连续分布椭球颗粒(CDE)

Figure 3 Calculated absorption cross section per unit volume C/V for small SiC grains of different shapes and polytypes. Profiles for spherical grains are given by solid lines, the CDE according to Bohren & Huffman (1983) by dotted lines, and a CDE with higher probability for less elongated grains (Ossenkopf et al. 1992) by dashed lines [18].

图4 不同尺寸SiC的光谱^[18]. <0.5 μm (实线); 0.5–1 μm (点线); 1–2 μm (虚线); >2 μm (虚-点线)

Figure 4 Infrared band profiles of different size fractions of the product AJ- α (which is dominated by 6H α -SiC): <0.5 μm (solid line); 0.5–1 μm (dotted line), 1–2 μm (dashed line) and >2 μm (dash-dotted line) [18].

图5 T Draconis(天马座)碳星的ISO光谱^[17]

Figure 5 ISO spectrum of the carbon star T Draconis [17].

讨论的一样, 小尺寸SiC共振特征谱的轮廓对尘埃的尺寸、结构和化学组成以及环绕的介质很敏感. 这说明SiC微粒的发射特征与碳星周包层尘埃的形成过程密切相关.

另外, α -SiC在 $\lambda_L=10.3\ \mu\text{m}$ 处有一个纵向振动模式, 而在 $\lambda_T=12.6\ \mu\text{m}$ 处有一个横向振动模式. 对IRAS/LRS光谱分类的统计分析显示 $11.3\ \mu\text{m}$ 特征的变化与SiC的表面模式光谱特性密切相关. 例如, 小尺寸的球形 α -SiC颗粒在 $10.75\ \mu\text{m}$ 处有强烈的吸收特征而在 $11.3\ \mu\text{m}$ 处却没有. 特征谱带的形状、强度、数目和峰值位置受到尘粒的外形、杂质组分及周围介质的影响. 以下讨论SiC尘粒的组分.

根据尘埃的核幔模型(Core-Mantle Model)和化学平衡计算, 星周SiC尘粒可能由碳核(Core)和SiC幔(Mantle)组成, 其单位体积的吸收截面如图6^[35]所示, 碳核的半径为 $0.01\ \mu\text{m}$, SiC幔占尘埃总体积的10%到90%. 随着SiC体积比率的增加, 吸收谱的峰值和谷值分别出现在 λ_L 和 λ_T 附近, 特征峰值向长波方向移动到 $10.75\ \mu\text{m}$, 并且强度增加. 然而, 在 $C/O=1.5$ 的碳星周包层, SiC幔的体积比率并不会超过0.05. 因此, 由这种颗粒类型产生的发射谱十分微弱, 特征仅仅只出现在与晶格振动模式一致的波长附近, 并与观察到的碳星发射特征完全不同. 与此相反的一种情况是SiC尘粒由SiC核和碳幔组成, 此情形的单位体积的吸收截面如图7所示, 其中碳幔的体积比率从10%到90%. 其中图7(a)和(b)的SiC核的半径分别为 $0.01\ \mu\text{m}$ 和 $0.1\ \mu\text{m}$.

这种核-幔类型粒子的光谱特点是具有单一吸收峰, 只有当SiC核大于 $0.05\ \mu\text{m}$ 时, 在SiC的横向晶格振动模式波长处会出现第二特征峰. 但是, 随着碳幔体积比率的增加, 峰值波长向长波方向移动、吸收强度降低、谱带宽度变宽, 且第二特征被逐步抑制直到完全消失. 通过比较发现, 这类微粒所产生的光谱与观察到的碳星的 $11.3\ \mu\text{m}$ 特征是类似的. 并且在吸收峰值 $\lambda_p=11.2\ \mu\text{m}$ 附近碳幔的体积分数为 $f_c=0.3$ (f_c 表示碳幔在尘埃颗粒中所占的体积分数), 在 $11.4\ \mu\text{m}$ 处 $f_c=0.5$ ^[35].

图6 碳核-SiC壳层核幔模型单位体积的吸收横截面. SiC的体积比率从0.1到0.9, 碳核的半径为 $0.01\ \mu\text{m}$. 其光学常数取自无定型碳^[35,36]

Figure 6 Absorption cross sections per unit volume of core-mantle type grains consisting of a carbon core of radius $0.01\ \mu\text{m}$ and a SiC mantle whose volume fractions range from 0.1 to 0.9^[35,36].

图7 碳核SiC壳层核幔模型单位体积的吸收截面^[35]. SiC核的体积比率从10%到90%, 碳核的半径为 $0.01\ \mu\text{m}$ (a) 和 $0.1\ \mu\text{m}$ (b), 其物质成分是无定型碳

Figure 7 Absorption cross sections per unit volume of core-mantle type grains consisting of a SiC core and a carbon mantles whose volume fraction range from 0.1 to 0.9. The radius of SiC core is (a) $0.01\ \mu\text{m}$ and (b) $0.1\ \mu\text{m}$ ^[35].

2.2 陨石中的SiC

陨石是来自地球外的天体标本, 可以分为球粒陨石(Chondrites)、非球粒陨石(Achondrites)、石铁陨石(Lithosiderite)和铁陨石(Siderolite)四大类. 其中, 球粒陨石有一个非常重要的特点, 即其化学成分与太阳在某种程度上有一定的相似. 正因为如此, 有人便推测球粒陨石与太阳系的起源可能很有关系. 从其化学成分来看, 有一种说法是认为球粒陨石和太阳都是由太阳星云直接凝聚而成的.

20世纪60至70年代以来, 在陨石中发现了多种元素存在同位素异常现象^[37]. 由于测量和分离技术的进步, 直到20世纪80年代中期, 才最终确定这些异常主要携带在一些细粒的含碳物质中(如石墨、SiC等), 这些物质被称为前太阳尘粒(Presolar Grains). SiC因其分离过程较简单且存在于多种陨石中, 因而成为研究最为广泛的前太阳物质. 1987年, Bernatowicz等人^[8]确立了陨石中前太阳SiC的存在. 根据主要元素和微量元素的同位素测量发现, 大多数前太阳SiC来源于晚型的富碳恒星, 部分前太阳SiC尘粒也可追溯到II型超新星^[38].

研究发现, 通过化学方法从陨石中提取出来的SiC为带有点凹陷的自行行状(Euhedral Shapes), 而原初SiC的表面较光滑^[39](如图8), 这也表明了化学分离过程中SiC的表面结构遭到破坏. Bernatowicz等人^[40]研究了81种原始陨石颗粒, 发现有60%的微粒都被一种非晶物质所覆盖, 有可能是有机相. 不同的陨石中SiC的尺

寸分布有所不同, 在莫奇森(Murchison)陨石中, SiC的平均尺寸为 $0.5\ \mu\text{m}$, 最高可达 $20\ \mu\text{m}$, 但是大于 $10\ \mu\text{m}$ 的非常罕见, 90%以上的颗粒尺寸在 $0.3\text{--}3\ \mu\text{m}$ 之间^[41,42]. 这种分布比在其他陨石中发现的SiC平均尺寸要大很多^[41,43].

虽然合成的SiC有多种晶体结构, 但是前太阳SiC似乎只有3C和2H两种晶型^[15,44]. 早在1992年, Virag等人^[45]就对大量前太阳SiC的晶体结构做了研究, 结果发现莫奇森陨石中三分之二的SiC具有立方晶体结构, 属于 β -SiC, 其余的显示六角或菱方结构, 属于 α -SiC. 但是, 研究还发现其中 α -SiC有正常的同位素组成, 可能并不是来自于前太阳物质. 1998年, Daulton等人^[46]进一步研究发现大尺寸的前太阳SiC多为 β -SiC, 而小尺寸的前太阳SiC则是 β -SiC和 α -SiC的混合体.

关于陨石SiC的光谱分析, Andersen等人^[47]测量了从莫奇森陨石中分离的陨石SiC $2.5\text{--}16.5\ \mu\text{m}$ 的红外光谱. 测量样本是两个从100 g的原始莫奇森陨石上切割下来的块状物, 质量分别为26.8 g(样本I)和10.0 g(样本II), 分别在 180°C 和 80°C 的温度下, 经过相同的化学提取过程, 最终获得了不同尺寸大小的前太阳SiC. 两样本的光谱如图9^[47]所示, 其光谱外形有着明显的差异, 这种差异可能是由于微粒的尺寸不同所引起.

2.3 大、小麦哲伦云中的SiC

大、小麦哲伦云是银河系的两个伴星系, 是南天银河附近两个肉眼清晰可见的云雾状天体. 麦哲伦云

图8 来自莫奇森陨石的SiC的二次电子图像^[39]. (a) 表面结构是点蚀面, 归因于化学提取过程中的结构破坏, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值为55(太阳比值为89); (b) 有光滑的表面结构, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值为39

Figure 8 Secondary electron images of SiC grains from the Murchison meteorite. (a) The pitted surface structure is common for SiC grains, and most likely due to the harsh chemical treatments during the extraction from meteorites. The $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio of this grain is 55 (solar=89); (b) a SiC grain with a smooth surface. The $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio of this grain is 39 ^[39].

图9 (a)和(b)分别为来自于样本I和样本II的前太阳SiC的红外光谱图^[47]. (a) (样本I)在10.3–12.6 μm 之间显示了明显的小颗粒SiC吸收特征, 且特征中心在11.3 μm 处, 图中8.2 μm 和8.6 μm 处的特征分别是由–CF和–CF₂引起的; (b) (样本II)没有类似SiC的特征谱线, 但是在纵向晶格振动模式处有透射光谱的最大值, 而在更大波长处的光谱趋于平坦

Figure 9 Infrared spectra of persolar SiC grains from the Murchison meteorite. Figure (a) (Sample I) shows the expected broad absorption feature of small SiC grains between 10.3 μm and 12.6 μm . The center of the band is located at about 11.3 μm . The peaks around 8.2 and 8.6 μm are due to –CF and –CF₂; In Figure (b) (Sample II), there is apparently no similar SiC band. Instead one observes a maximum of the transmission spectrum more or less at the place of the longitudinal lattice vibration mode. At longer wavelengths the spectrum is flat ^[47].

属于距离银河系最近的星系之列, 使得人们能周密地分析它们的成员天体, 因而它们是重要的天文观测对象, 也是星系天体物理资料的重要来源.

与银河系源类似, 大多数麦哲伦云中的碳星也在11.3 μm 附近显示出强烈的SiC发射特征^[7]. 如图10^[48]给出大麦哲伦云中碳星5–36 μm 波长范围的光谱图, 从图中可以得知麦哲伦云中普遍存在SiC, C₂H₂和MgS(注: MgS作为26 μm 或30 μm 发射特征的载体, 尚有争议, 见文献^[49]). 同样, 麦哲伦云中SiC尘粒发射特征的中心波长也与尘埃的自身属性有关^[21]. Zijlstra等人^[50]和Lagadec等人^[51]通过研究还发现, 由于C₂H₂的吸收波长和SiC的发射波长有重叠部分, SiC特征的红端受到抑制, 从而导致SiC特征的中心波长朝短波方向移动. 当色指数[6.4]–[9.3]≥0.4时, 银河系碳星SiC特征的中心波长随着[6.4]–[9.3]值的增大而增大. 小麦哲伦云中碳星SiC中心波长尽管变化不明显, 但是也遵循着相同的变化趋势. 在大麦哲伦云中, 当[6.4]–[9.3]=0.5到1.5时, SiC特征中心波长稳定在11.1 μm 到11.2 μm . 造成SiC特征中心波长差异的原因是SiC的自吸收和C₂H₂的吸收^[48].

3 星际SiC

SiC存在于碳星抛射物中是已经被天文观测和陨石实验检测所确认的事实. SiC形成于晚型富碳恒星

的星周包层并由星风吹散到星际空间, 或者由超新星爆发产生并喷射到星际空间. 如果星际介质中当前尘埃总质量的50%^[52]来源于碳星的抛射, 而且相当分量的硅在碳星星风中以SiC形式存在, 那么, SiC应该是星际尘埃的重要组成成分. 但是, 如前所述, 令人困惑的是, 人们却从未在星际空间观测到SiC的光谱特征.

SiC和硅酸盐在10 μm 红外光附近都有鲜明的光谱特征, 分别由Si–C键和Si–O键的拉伸振动产生. 硅酸盐的特征集中在9.7 μm , 在星际介质的吸收光谱, 富氧恒星星周包层的吸收光谱和发射光谱都已被广泛观测到^[53,54]. SiC光谱特征集中在11.3 μm , 迄今为止, 为富碳恒星星周包层所特有.

图11展示了由Roche和Aitken^[55]得到的光谱分辨率为0.23 μm 的沿银心视线的10种源的7.5–13.5 μm 的UKIRT和AAT光谱. 从图中我们可以很明显的看到硅酸盐的9.7 μm 发射. 但是, 该观测也明确表明在这些光谱中没有很强的SiC特征.

1990年, Whittet等人^[56]针对银心视线的这10个源, 并根据SiC尘埃的吸收规律计算了星际空间中SiC的丰度值, 计算结果表明: SiC微粒中的Si比硅酸盐中的Si少了超过一个数量级. 如果假定所有的硅原子都在SiC和硅酸盐中, 他们发现星际空间中存在于SiC中的硅原子少于5%.

Whittet等人给出的星际SiC丰度是根据SiC的光谱特性估算而来的, 那么, 所有那些能够影响SiC光谱特

图10 大麦哲伦云中碳星5–36 μm 波长范围的光谱图^[48]. 图中竖直虚线分别标示出了 C_2H_2 (7.5 μm 和13.8 μm)吸收特征、 SiC (11.3 μm)和 MgS (26 μm)发射特征的中心波长

Figure 10 Spectra of carbon-rich AGB stars observed in the LMC ranging from 5 to 36 μm . The dashed lines indicate the positions of the C_2H_2 absorption features at 7.5 and 13.8 μm , the SiC emission features at 11.3 μm , and the MgS emission feature at 26 μm ^[48].

征的因素(如尺寸、形状、组分)也会对 SiC 的观测丰度造成一定程度的影响. 因此, SiC 的低丰度观测值与其自身的微粒大小、形状及其周围环境中的杂质都有着密不可分的联系.

SiC 的检测含量低可能也与其在星际空间中所处的环境有关. 前面我们提到 SiC 产生于富碳恒星的星周包层, 并由星风吹散到星际空间. Frenklach等人^[57]认为: 如果碳星周围的包层足够厚, 那么 SiC 在经由包层吹散到星际空间的途中可能会有一部分陷在恒星的星周包层里, 从而在一定程度上抑制了喷发到星际空间的 SiC 的观测特征.

另外一种因素可能来自星际尘粒在星际空间的破坏机制^[58]. 对于 SiC , 在富碳恒星中形成后, 被抛射到星际空间, 继而在富氧星际环境中 SiC 表面受氧原子轰击, 从而被氧化. 实际上, 尽管固态 SiC 有很好的

图11 银心视线源7.5–13.5 μm 的光谱^[56]. 为了清晰可见, 对光谱做了适当的垂直移动. 预期的 SiC 特征的中心波长和宽度分别用实线和虚线标出

Figure 11 The 7.5–13.5 μm spectra of Galactic Centre Sources. Individual spectra have been shifted vertically for display. The central wavelength and width (FWHM) of the predicted SiC feature are marked by solid and dashed lines ^[56].

耐热性和抗辐射性,但是,在富氧介质中它的化学性质很不稳定.因此,很有可能星际介质中SiC的含量并不是本来就如此之低,而是部分SiC可能在富氧环境中经氧化而被破坏掉了;另外,也有可能是超新星爆发产生的激波,使得SiC尘埃被破坏了.

4 总结和展望

自从1969年Friedemann和Gliman发现SiC可以在冷星的大气中形成之后,天文界对星际SiC的研究就从未间断过.SiC是富碳恒星中含量居于第二位的含碳物质.SiC在11.3 μm 附近可以产生红外发射或吸收,人们正是根据它的这一光谱特征来对其进行研究的.目前,已经在很多天体环境(如富碳恒星)都观察到了SiC.人们有充分的理由相信在星际空间中SiC的存在.但是,令人沮丧的是,人们至今仍然未在星际空间确

显观测到SiC的吸收光谱.由于SiC尘粒参与了星际介质的演化过程,所以对SiC含量的研究就显得尤为重要.Whittet等人根据SiC的吸收特征计算出来的SiC丰度不超过5%,但是,根据以下几点,我们有理由认为实际上星际空间中SiC的含量可能并不止于5%:

(1) 虽然亚微米级的SiC在红外波段能够产生尖锐的特征线,但是微米级的SiC尘粒产生的吸收谱宽而弱,星际空间可能有相当量微米级SiC,只是没法被观测到.

(2) 纳米级SiC在11.3 μm 处产生发射特征,但由于C-H平面外的扭曲模式,多环芳香烃(PAH)也在11.3 μm 处产生较强的发射,从而可能掩盖了纳米SiC的发射特征.

(3) 星际SiC在星际富氧环境中表面可能形成SiO₂,从而“掩盖”其11.3 μm 吸收特征.

参考文献

- 1 Trumpler R J. Absorption of light in the galactic system. *Publ Astron Soc Pac*, 1930, 42: 214–227
- 2 Li M P, Zhao G, Li A G, et al. Interstellar dust: Current status and perspectives (in Chinese). *Prog Astron*, 2006, 24: 260–276 [李墨萍, 赵刚, 李爱根, 等. 星际尘埃研究现状与进展. *天文学进展*, 2006, 24: 260–276]
- 3 Friedemann C. Evolution of silicon carbide particles in the atmospheres of carbon stars. *Physica*, 1969, 41: 139–143
- 4 Gilman R C. On the composition of circumstellar grains. *Astrophys J*, 1969, 155: L185–L187
- 5 Wildt R. Kondensation in Sternatmosphären. *Veroeffentlichungen der Universitaets-Sternwarte zu Goettingen*, 1933, 6: 345–354
- 6 Hackwell J. Long wavelength spectrometry and photometry of M, S and C-stars. *Astron Astrophys*, 1972, 21: 239–248
- 7 Treffers R, Cohen M. High-resolution spectra of cool stars in the 10-and 20-micron regions. *Astrophys J*, 1974, 188: 545–552
- 8 Bernatowicz T, Fraundorf G, Ming T, et al. Evidence for interstellar SiC in the Murray carbonaceous meteorite. *Nature*, 1987, 330: 728–730
- 9 Ming T, Anders E, Hoppe P, et al. Meteoritic silicon carbide and its stellar sources, implications for galactic chemical evolution. *Nature*, 1989, 339: 351–354
- 10 Zinner E, Ming T, Anders E. Large isotopic anomalies of Si, C, N and noble gases in interstellar silicon carbide from the Murray meteorite. *Nature*, 1987, 330: 730–732
- 11 Bernatowicz T J, Zinner E K, Amari S, et al. Interstellar grains within Interstellar grains. *Astrophys J*, 1991, 373: L73–L76
- 12 Lambrecht W R, Limpitumong S, Rashkeev S, et al. Electronic band structure of SiC polytypes: A discussion of theory and experiment. *Phys Status Solidi B*, 1997, 202: 5–33
- 13 Kwok S, Volk K, Bidelman W P. Classification and identification of IRAS sources with low-resolution spectra. *Astrophys J Suppl Ser*, 1997, 112: 557–584
- 14 Baumhauer H. VII. Über die Krystalle des Carborundums. *Z Kristallogr-Crystalline Materials*, 1912, 50: 33–39
- 15 Daulton T, Bernatowicz T, Lewis R, et al. Polytype distribution of circumstellar silicon carbide: Microstructural characterization by transmission electron microscopy. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 4743–4767
- 16 Speck A, Hofmeister A, Barlow M. The SiC problem: Astronomical and meteoritic evidence. *Astrophys J Lett*, 1999, 513: L87–L90
- 17 Henning T, Mutschke H. Formation and spectroscopy of carbides. *Spectrochim Acta A*, 2001, 57: 815–824
- 18 Mutschke H, Andersen A, Clément D, et al. Infrared properties of SiC particles. *Astron Astrophys*, 1999, 345: 187–202
- 19 Goebel J, Cheeseman P, Gerbault F. The 11 micron emissions of carbon stars. *Astrophys J*, 1995, 449: 246–257
- 20 Irene R, Little M. Carbon stars with silicate dust in their circumstellar shells. *Astrophys J*, 1986, 307: L15–L19
- 21 Speck A K, Thompson G D, Hofmeister A M. The effect of stellar evolution on SiC dust grain sizes. *Astrophys J*, 2005, 634: 426–435

- 22 Bagnulo S, Doyle J, Andretta V. Observations and modelling of spectral energy distributions of carbon stars with optically thin envelopes. *Mon Not R Astron Soc*, 1998, 296: 545–563
- 23 Jiang B W, Zhang K, Li A. On silicon carbide grains as the carrier of the 21 μm emission feature in post-asymptotic giant branch stars. *Astrophys J Lett*, 2005, 630: L77–L80
- 24 Zhang K, Jiang B W, Li A. On the carriers of the 21 μm emission feature in post-asymptotic giant branch stars. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 396: 1247–1256
- 25 Baron Y, Papoular R, Jourdain de Muizon M, et al. An analysis of the emission features of the IRAS low-resolution spectra of carbon stars. *Astron Astrophys*, 1987, 186: 271–279
- 26 Papoular R. The multiple IR signatures of C-rich sources in the IRAS low-resolution spectra. *Astron Astrophys*, 1988, 204: 138–146
- 27 Borghesi A, Bussoletti E, Colangeli L, et al. Laboratory study of SiC submicron particles at IR wavelengths—a comparative analysis. *Astron Astrophys*, 1985, 153: 1–8
- 28 Pégourié B. Optical properties of alpha silicon carbide. *Astron Astrophys*, 1988, 194: 335–339
- 29 Groenewegen M. Dust shells around infrared carbon stars. *Astron Astrophys*, 1995, 293: 463–478
- 30 Chan S, Kwok S. Evolution of infrared carbon stars. *Astron Astrophys*, 1990, 237: 354–368
- 31 Dorschner J, Friedemann C, Gürtler J. Silicon carbide and the infrared excess of carbon stars. *Astron Nachr*, 1977, 298: 279–283
- 32 Choyke W, Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids. New York: Academic Press, 1985. 587
- 33 Spitzer W, Kleinman D, Walsh D. Infrared properties of hexagonal silicon carbide. *Phys Rev*, 1959, 113: 127–132
- 34 Bohren C F, Huffman D. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: John Wiley & Sons, 1983
- 35 Kozasa T, Dorschner J. Formation of SiC grains and the 11.3 μm feature in circumstellar envelopes of carbon stars. *Astron Astrophys*, 1996, 307: 551–560
- 36 Etoh O. Optical Properties of Carbon from the Far Infrared to the Far Ultraviolet. Tucson: The University of Arizo, 1983
- 37 Lewis R S, Amari S, Anders E. Interstellar grains in meteorites: II. SiC and its noble gases. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 471–494
- 38 Clayton D D, Nittler L R. Astrophysics with presolar stardust. *Annu Rev Astron Astr*, 2004, 42: 39–78
- 39 Lodders K, Amari S. Presolar grains from meteorites: Remnants from the early times of the solar system. *Chem Erde-Geochem*, 2005, 65: 93–166
- 40 Bernatowicz T J, Messenger S, Pravdivtseva O, et al. Pristine presolar silicon carbide. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 4679–4691
- 41 Huss G R, Hutcheon I D, Wasserburg G. Isotopic systematics of presolar silicon carbide from the Orgueil (CI) chondrite: Implications for solar system formation and stellar nucleosynthesis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 5117–5148
- 42 Russell S S, Ott U, Alexander C M D, et al. Presolar silicon carbide from the Indarch (EH4) meteorite: Comparison with silicon carbide populations from other meteorite classes. *Meteorit Planet Sci*, 1997, 32: 719–732
- 43 Gao X, Amari S, Messenger S, et al. Survey of circumstellar grains in the unique carbonaceous chondrite Acfer 094. *Meteorit Planet Sci*, 1996, 31: A48
- 44 Daulton T, Bernatowicz T, Lewis R, et al. Polytype distribution in circumstellar silicon carbide. *Science*, 2002, 296: 1852–1855
- 45 Virag A, Wopenka B, Amari S, et al. Isotopic, optical, and trace element properties of large single SiC grains from the Murchison meteorite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 1715–1733
- 46 Daulton T, Lewis R, Amari S. Polytype variations in presolar silicon carbide grains: Microstructural characterization by transmission electron microscopy. *Meteorit Planet Sci*, 1998, 33: A37–A38
- 47 Andersen A, Jager C, Mutschke H, et al. Infrared spectra of meteoritic SiC grains. *Astron Astrophys*, 1999, 343: 933–938
- 48 Leisenring J M, Kemper F, Sloan G C. Effects of metallicity on the chemical composition of carbon stars. *Astrophys J*, 2008, 681: 1557–1573
- 49 Zhang K, Jiang B W, Li A. On Magnesium sulfide as the carrier of the 30 μm emission feature in evolved stars. *Astrophys J*, 2009, 702: 680–685
- 50 Zijlstra A A, Matsuura M, Wood P R, et al. A spitzer mid-infrared spectral survey of mass-losing carbon stars in the Large Magellanic Cloud. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 370: 1961–1978
- 51 Lagadec E, Zijlstra A A, Sloan G C, et al. Spitzer spectroscopy of carbon stars in the Small Magellanic Cloud. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 376: 1270–1284
- 52 Jura M, Kleinmann S. Dust-enshrouded asymptotic giant branch stars in the solar neighborhood. *Astrophys J*, 1989, 341: 359–366
- 53 Whittet D C B. The observed properties of interstellar dust in the infrared. In: *Dust in the Universe*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1988. 25–55
- 54 Whittet D C B. The Composition of dust in stellar ejecta. In: *Interstellar Dust*. Berlin: Springer Netherlands, 1989. 455–466
- 55 Roche P F, Aitken D K. An investigation of the interstellar extinction-II. Towards the mid-infrared sources in the Galactic centre. *Mon Not R Astron Soc*, 1985, 215: 425–435

- 56 Whittet D C B, Duley W, Martin P. On the abundance of silicon carbide dust in the interstellar medium. *Mon Not R Astron Soc*, 1990, 244: 427–431
- 57 Frenklach M, Carmer C, Feigelson E. Silicon carbide and the origin of interstellar carbon grains. *Nature*, 1989, 339: 196–198
- 58 Seab C. Grain destruction and growth. In: *Dust in the Universe* Cambridge. New York: Cambridge University Press, 1988. 303–326

Interstellar SiC grains

LIU Fang¹, 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*

Silicon carbide (SiC) is one of the major components of cosmic dust. Small silicon carbide dust particles show a prominent lattice vibrational band at $\sim 11.3\ \mu\text{m}$. In the 1960s, Friedemann et al. (1969) first predicted that SiC condenses in carbon-rich stellar ejecta. Later, SiC was detected in the circumstellar envelopes around evolved C stars through the $11.3\ \mu\text{m}$ spectral feature. The existence of SiC in the interstellar medium (ISM) was established through the detection of presolar SiC grains in primitive meteorites based on the isotopic anomaly. However, the $11.3\ \mu\text{m}$ absorption feature of SiC is surprisingly not seen in the ISM. This work mainly introduces the optical properties of silicon carbide, the observed characteristics of silicon carbon in a series of astrophysical environment, and abundance of silicon carbide in interstellar space and the underlying physics.

silicon carbon, $11.3\ \mu\text{m}$ emission features, carbon stars, infrared

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

doi: [10.1360/SSPMA2016-00141](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00141)