

文章编号: 1000-8349(2007)02-0132-15

# 天体物理环境中的硅酸盐尘粒

李墨萍<sup>1</sup>, 赵刚<sup>1</sup>, 李爱根<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 3. 美国密苏里大学物理和天文学系 哥伦比亚, 密苏里 65211)

**摘要:** 硅酸盐尘粒是宇宙尘埃的主要成分之一, 它广泛存在于许多天体物理环境中, 其特性随环境而变化。由于近年来观测数据的不断增加和红外光谱质量的逐步提高, 宇宙空间中的硅酸盐尘粒正受到越来越多的关注。该文详细地介绍了在各种天体环境(星际空间、演化晚期恒星的星周尘埃包层、绕年轻恒星和主序星的星周尘埃盘、彗星的彗发和行星际空间)中的硅酸盐尘粒的观测特征, 并分别对其物理和化学性质进行了综合比较。观测已经证实在星际尘埃演化的前身(演化晚期恒星的星周尘埃包层)和其遗迹(彗星)均有可观数量的结晶硅酸盐存在。但是至今还没有在其中间态(弥散星际介质)找到结晶硅酸盐存在的证据。这一尚未解决的难题突出了结晶态硅酸盐在天体物理研究中的重要意义。

**关键词:** 天体物理学; 硅酸盐尘粒; 综述; 星际尘埃; 演化晚期恒星的星周尘埃包层; 绕年轻恒星和主序星的星周尘埃盘; 彗星的彗发; 行星际尘埃

**中图分类号:** P155.2; P185.9      **文献标识码:** A

## 1 引 言

尘埃的矿物学组成包含了尘埃产生和演化的重要信息, 在一定程度上反映了尘埃的天体环境的物理化学性质及尘埃本身的演化过程。硅酸盐尘粒是宇宙尘埃的主要成分, 它普遍存在于各种天体环境中。观测结果显示在星际空间、演化晚期恒星的星周尘埃包层、年轻恒星周围的原行星盘、绕主序星的碎片盘、HII 区、彗星和行星际空间里都存在硅酸盐尘粒。通过研究硅酸盐尘粒的光谱学, 人们可以对其天体环境的物理化学性质和演化历史有更深刻的了解。

星际硅酸盐尘粒的研究历史可以追溯到 20 世纪 60 年代。1963 年, Kamijo<sup>[1]</sup> 首次提出了纳米尺寸的 SiO<sub>2</sub> 尘粒可以在冷 M 型星的大气中凝聚, 然后随着恒星大气的星风质量流失喷发到星际空间。在 20 世纪中期, 星际尘埃主流理论认为星际尘埃的主要成分是“脏冰”<sup>[2]</sup>。

**收稿日期:** 2006-03-24; **修回日期:** 2006-05-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (10433010,10521001,10403006)

而 Kamijio<sup>[1]</sup> 认为这些尘粒可以提供形成星际“脏冰”的凝聚核。Gilman<sup>[3]</sup> 对尘埃凝聚进行理论计算, 得出在富氧的冷巨星周围的尘粒主要是硅酸盐(如  $\text{Al}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  等)。天文观测最早在 M 型星的发射谱中探测到硅酸盐的特征线<sup>[4,5]</sup>。紧接着在猎户座星云的 Trapezium 区<sup>[6]</sup>、彗星的发射谱<sup>[7]</sup>、沿银心方向<sup>[8]</sup>、BN(Becklin-Neugebauer) 天体和 KL(Kleinmann-Low)<sup>[9]</sup> 星云方向的吸收谱中也探测到硅酸盐的存在。最近, Spitzer 空间望远镜 (SST) 对一个红移  $z \approx 2.3$  的 ULIRGS (极亮红外星系) FSC 10214+4724 进行了观测, 得到其  $10 \mu\text{m}$  硅酸盐发射特征谱<sup>[10]</sup>。这是首次在 ULIRGS 中观测到硅酸盐的中红外特征线, 对人们理解 ULIRGS 的高光度是由星暴还是活动星系核产生将具有重要意义。

宇宙丰度学研究表明硅酸盐中主要的金属离子是  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  或两者皆有。从图 1 可以看出: 在有序的(结晶)晶格结构中, 硅酸根离子可以与其他硅酸根离子共用其 O 原子, 形成不同化学分类的硅酸盐; 在无序(非结晶)结构中, 被共享的 O 原子的数目对每个硅酸根离子都不同; 非结晶硅酸盐只在  $10 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$  存在宽的光滑特征带, 而结晶硅酸盐在  $9 \sim 40 \mu\text{m}$  有许多尖锐的发射特征。结晶硅酸盐有两种基本的化学分类: Mg-Fe 辉石  $\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}\text{SiO}_3$  (其中  $0 \leq x \leq 1$ ), 包括两种极端物质顽辉石  $\text{MgSiO}_3$  和铁辉石  $\text{FeSiO}_3$ ; 橄榄石  $\text{Mg}_{2x}\text{Fe}_{2-2x}\text{SiO}_4$ , 包括镁橄榄石  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  和铁橄榄石  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 。辉石有 2 种不同的结晶结构: 正辉石和斜辉石。

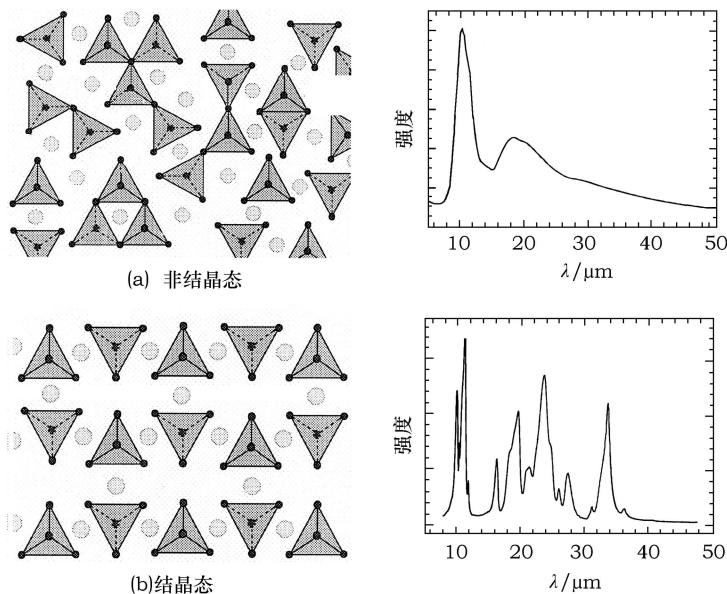


图 1 无序的(非结晶态)和有序的(结晶态)硅酸盐的原子结构和典型的红外发射光谱<sup>[11]</sup>

Si 酸根离子中 4 个 O 原子围绕一个硅原子, 大圆圈代表金属离子

硅酸盐和其他一些含碳的尘埃是宇宙空间物质的基本成分。硅酸盐尘粒会经历一系列不同的物理、化学环境变化过程, 这个过程可能导致其本身性质的改变。和所有其他的宇宙尘埃一样, 硅酸盐尘粒参加星际介质的循环演化, 经历了从演化晚期红巨星的星周包层到星际弥散云和致密云, 再到恒星形成区分子云的演化过程。因此, 硅酸盐尘粒在演化过程中的物理化学变化对研究整个星系的化学演化具有重要作用。

本文第 2 章详细介绍了各种天体物理环境中硅酸盐的观测特征, 并给出从观测资料可以得到的有关硅酸盐尘粒的天体矿物学信息; 第 3 章讨论硅酸盐的两种晶格结构 (非结晶态和结晶态) 的形成及其特性, 并对它们所揭示的在天体物理研究中的意义作简要阐述; 最后, 在第 4 章列出了在硅酸盐尘粒研究中存在的问题, 对其未来的发展做出展望。

## 2 各种天体环境中硅酸盐尘粒的观测证据

下面分别介绍在各种天体环境中硅酸盐尘粒的观测特征。

### 2.1 星际空间的硅酸盐

早在 20 世纪 70 年代, 在许多视线方向的星际吸收谱中就观测到 2 条很强的红外特征线, 中心波长分别为  $9.7 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$ 。到目前为止, 人们还不完全清楚产生这些特征的物质的精确组成和结构。一般认为是硅酸盐中 Si-O 拉伸振动模式和 O-Si-O 扭曲振动模式产生了这 2 条特征谱带 (如图 2 所示)。另外, 人们仅在冷的富氧恒星 (其星风抛射物可能凝聚形成硅酸盐) 的质量喷流中观测到  $10 \mu\text{m}$  发射特征, 在富碳恒星 (其 O 原子首先与 C 原子结合形成稳定的 CO 分子, 而不能形成硅酸盐分子) 的外流中却没有观测到。这进一步证实了  $10 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$  星际红外特征是某种硅酸盐产生的。最近, 在活动星系核的尘埃环中也观测到很强的硅酸盐吸收或发射谱。这些光谱的中心波长比在银河系观测到的硅酸盐谱线要长很多, 一般在  $10.5\sim 11.5 \mu\text{m}$ ; 其谱线轮廓也显得宽一些。

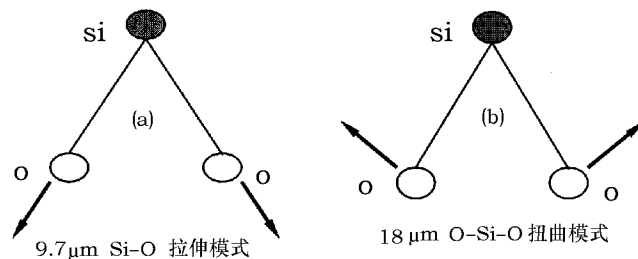


图 2 硅酸盐中 Si-O 拉伸振动模式和 O-Si-O 扭曲振动模式示意图

实验室测量得出, 结晶硅酸盐在  $10 \mu\text{m}$  光谱上有几条尖锐且很窄的特征线 (如  $11.3 \mu\text{m}$  特征), 而非结晶硅酸盐的谱形宽且光滑。在星际空间中观测到的硅酸盐带较宽且比较光滑 (没有子结构), 这说明星际空间的硅酸盐大部分是非结晶结构。Chiar 和 Tielens<sup>[12]</sup> 利用 ISO SWS (Infrared Space Observatory Short Wavelength Spectrometer) 对 4 颗消光较严重的 C 型 WR (Wolf-Rayet) 星进行近红外到中红外的光谱观测, 以此来研究弥散星际介质中硅酸盐的化学组成, 从图 3 可以看出在  $10 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$  硅酸盐有明显的吸收特征线。Li 和 Draine<sup>[13]</sup> 基于红外辐射估算弥散星际介质中尘埃尺寸  $a < 0.1 \mu\text{m}$  的结晶硅酸盐的质量百分比最多不会超过 5%; 最近 Kemper 等人<sup>[14]</sup> 得到了更为苛刻的结果, 他们通过分析银心视线 Sgr A\* 的消光谱, 认为弥散星际介质中结晶硅酸盐的上限为 1.1%。必须指出, 许多观测都表明银心方向不仅存在弥散星际云, 也存在许多致密星际云。Kemper 等人假设得到的光谱都是弥散星际介质的贡献, 这可能导致低估了弥散星际云中结晶硅酸盐含量<sup>[15]</sup>。

另一方面, Bowey 和 Adamson<sup>[16]</sup> 通过叠加由 8 种结晶硅酸盐组成的混合物的吸收谱拟合出沿 Cyg OB2-12 视线的  $10\ \mu\text{m}$  吸收谱形。由此他们认为星际硅酸盐大部分是结晶态的, 这对认为星际硅酸盐主要由非结晶态构成的主流理论提出了挑战, 但其结论还需要通过拟合其他天区的发射谱来验证。然而, 除非这 8 种结晶硅酸盐具有相同的温度, 否则它们发射谱的叠加肯定不能解释普遍观测到的  $10\ \mu\text{m}$  光滑发射谱<sup>[17]</sup>。这 8 种不同化学组分的硅酸盐由于紫外 / 可见光的吸收能力不同, 在红外的发射也不同, 不可能具有相同的温度。因此, 虽然这 8 种结晶硅酸盐组成的混合物可以拟合沿 Cyg OB2-12 方向的  $10\ \mu\text{m}$  吸收谱, 却不能拟合在其他天区观测到的发射谱。

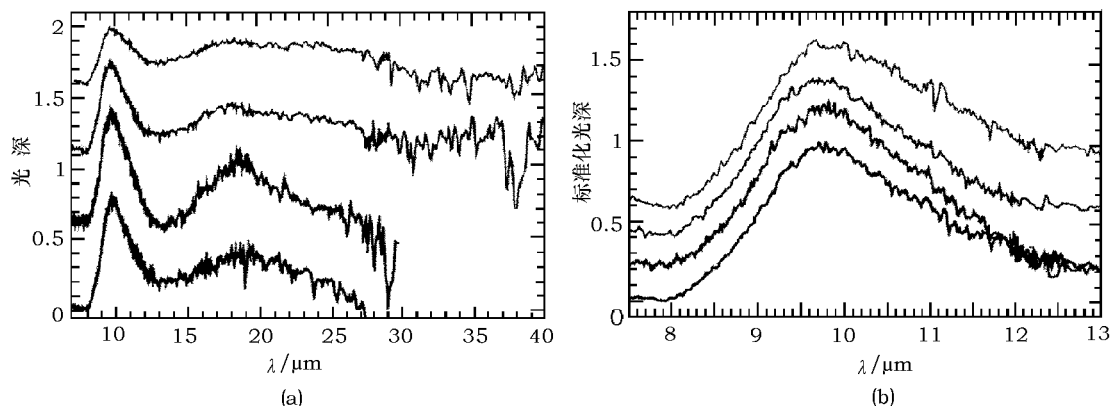


图 3 4 颗 C 型 WR 星光深吸收谱<sup>[12]</sup>

由上至下依次为: WR104、WR112、WR118 和 WR98a。(a): 波长范围  $7\sim 40\ \mu\text{m}$ ,

4 个光谱做了上下偏移使其分开, 可以明显看出星际介质中的  $10\ \mu\text{m}$  和  $18\ \mu\text{m}$  光滑非结晶硅酸盐带;

(b):  $7.5\sim 13\ \mu\text{m}$  的硅酸盐特征, 以  $\tau_{9.7} = 1.0$  归一化, 相邻光谱偏移为  $0.2$

星际硅酸盐低结晶度与演化晚期恒星星周包层发现的结晶物质的比例 (一般为  $10\%\sim 20\%$ , 最高可达到  $75\%$ )<sup>[18]</sup> 形成鲜明对比。通常认为, 演化晚期恒星通过红巨星、超巨星的星风质量流失或者新星和超新星爆发等方式提供了星际尘埃的大部分质量。为什么这些结晶硅酸盐进入星际空间后就变成非结晶态呢? 现在人们仍无法解释星际介质中结晶硅酸盐含量超低的观测结果。有趣的是, SST 最近在 12 个极亮红外星系中观测到了结晶硅酸盐的发射谱<sup>[19]</sup>。

星际空间中, Trapezium 区硅酸盐发射谱的半峰全宽  $\text{FWHM} \approx 3.45\ \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>, 而  $\mu\ \text{Cep}$  的半峰全宽  $\text{FWHM} \approx 2.3\ \mu\text{m}$ <sup>[21]</sup>。因此硅酸盐的光谱特性在宇宙中并不是统一的。在充满弥散星际云的视线,  $9.7\ \mu\text{m}$  吸收线可以用较窄的  $\mu\ \text{Cep}$  谱形拟合<sup>[22,23]</sup>; 而在分子云中, 用较宽的 Trapezium 轮廓拟合较好<sup>[20]</sup>。邻近太阳系弥散星际介质中  $9.7\ \mu\text{m}$  硅酸盐吸收特征强度与可见光消光量之比近似为  $(\Delta\tau_{9.7\mu\text{m}}/A_V \approx 1/18.5)$ 。这个值要求接近太阳丰度的 Si、Fe 和 Mg 凝结在非结晶硅酸盐尘粒中<sup>[24]</sup>。Snow 和 Witt<sup>[25]</sup> 认为由于 B 型星很年轻, 它的丰度更能代表宇宙学丰度, 并以 B 型星的丰度作为标准丰度。这样星际元素丰度仅为太阳丰度的  $60\%\sim 70\%$ 。那么, 这么少量的 Si、Fe 和 Mg 原子如何能形成足够量的硅酸盐, 从而在  $9.7\ \mu\text{m}$  产生这个量的吸收呢? Mathis<sup>[26]</sup> 指出只有当尘粒呈疏松多孔状态, 且约有大于  $25\%$  的体积为真空时能以太阳丰度的  $60\%\sim 70\%$  的 Si、Fe 和 Mg 丰度产生比例为  $\Delta\tau_{9.7\mu\text{m}}/A_V \approx 1/18.5$  的  $9.7\ \mu\text{m}$  吸收。但最近 Li<sup>[27]</sup> 对此理论提出了挑战, 他从 Kramers-Kronig 关系出发, 提出无

论多孔尘埃的疏松度取多大, 若以 B 型星丰度作为参考丰度, 仍不能解释观测到的银河系消光, 且这个结论不依赖于尘埃的尺寸和形状。

在一些星际区域观测到 9.7  $\mu\text{m}$  和 18  $\mu\text{m}$  硅酸盐吸收谱的偏振特性。观测到的偏振曲线大多光滑, 无子结构, 从另一角度证明了星际硅酸盐绝大部分是非结晶态的。只有 AFGL 2591(年轻恒星天体周围的分子云) 在其 9.7  $\mu\text{m}$  宽偏振谱上叠加有 11.2  $\mu\text{m}$  的窄特征线, 通常认为这个 11.2  $\mu\text{m}$  子带是结晶硅酸盐造成的, 但至今不能很好地解释这一现象<sup>[28]</sup>。

## 2.2 演化晚期恒星星周包层中的硅酸盐

演化晚期恒星是指经历了主序阶段并离开主序后的演化阶段的恒星, 它们包括 AGB 星、post-AGB 星、行星状星云、超新星等。Gilman<sup>[3]</sup> 通过对尘埃凝聚的理论计算提出在冷的 M 型巨星的尘埃包层中应该存在硅酸盐尘粒, 这是最早从理论上指出了在天体物理环境中存在硅酸盐。由于演化晚期恒星提供了星际尘埃的大部分质量, 研究演化晚期恒星星周尘埃包层的矿物学组成对我们了解恒星和星系的演化有重要意义。

根据质量大小, 可将演化晚期恒星分为 2 类: 低质量的演化晚期恒星, 处于 AGB 阶段, 具有慢速的向外扩张的星风; 经过红超巨星阶段的大质量恒星, 具有类似于 AGB 星的星风。AGB 星星周尘埃的性质可以代表演化晚期恒星星周尘埃包层的性质。根据 C/O 元素之比, AGB 星可以分为富氧 M 型星 (C/O < 1)、富碳 C 型星 (C/O > 1) 和 C/O  $\approx$  1 的 S 型星。在冷的演化晚期恒星的外层大气中凝结形成的尘埃类型取决于其周围气体的 C/O 比值。当 C/O > 1 时, 所有的 O 原子趋向于与 C 原子结合形成非常稳定的 CO 分子, 然后形成含 C 的尘埃; 当 C/O < 1 时, 所有的 C 原子形成 CO 分子后, 剩余的 O 原子将形成硅酸盐和各种氧化物。值得注意的是, 红超巨星都是富氧的环境。

在具有低质量流失率 ( $\dot{M} < 10^{-7} M_{\odot}/\text{a}$ ) 的 M 型巨星中, 主要的尘埃是简单金属氧化物<sup>[29,30]</sup>, 光谱显示非结晶硅酸盐不是其主要成分 (如图 4(a))。因为形成硅酸盐尘粒要求固体与气体之间的相互作用, 而在其低密度的星风中不可能发生这种情况。

在具有中等和高质量损失率的富氧恒星星风中含量最丰富的尘埃是硅酸盐尘粒 (如图 4(b,c))。直接从气态凝聚形成各向同性的硅酸盐尘粒似乎不太可能, 因为这要求首先形成凝聚核。ISO 首次在高质量流失率的 AGB 星的外流中探测到结晶硅酸盐, 这是 ISO 在本领域的一项突破性发现<sup>[31]</sup>。结晶硅酸盐的丰度比非结晶硅酸盐的含量要小得多, 一般只占总的硅酸盐的 10%~15%, 只在少数特殊情况下结晶硅酸盐才占主导地位。在 AGB 星外流中结晶和非结晶硅酸盐虽具有不同的性质但能共存的现象需要用尘埃晶核形成理论来解释: 结晶硅酸盐是 Mg 丰 Fe 贫的, 而非结晶硅酸盐含有某种形式的 Fe; 结晶态和非结晶态的硅酸盐分别具有不同的温度, 是独立的尘埃类型。这两个疑问有待今后的工作作出合理解释。

虽然从能量分配角度来看, 结晶晶格结构是硅酸盐最可能存在的状态 (因为它是能量最低的状态), 但宽且光滑的红外光谱说明大部分的硅酸盐尘粒是非结晶结构。一种可能的解释是, 非结晶硅酸盐的结晶化过程需要达到一定的高温才能发生。当温度高于 1 000 K, 结晶过程的时间尺度是几秒到几小时, 而当温度低于 900 K 时间尺度会变为几年甚至大于哈勃时标。如果硅酸盐尘粒的凝结比结晶化尺度快很多, 形成的硅酸盐就应是非结晶态的。这意味着如果硅酸盐在 900 K 以下的温度形成或快速冷却, 将会是非结晶硅酸盐。另一种理论解释是硅酸盐首先以结晶形态形成, 随后其结晶结构遭到破坏。

尽管在大多数情况下, 在星周尘埃壳层中结晶硅酸盐含量很少, 仍有一些特殊的演化晚期恒星具有非常高的结晶硅酸盐丰度。这些特殊天体通常都有一个盘状的尘埃分布<sup>[32]</sup>。由于尘埃盘的温度远低于非结晶硅酸盐的凝结温度, 那么在低温环境中结晶硅酸盐是如何形成的? Molster 等人<sup>[32]</sup> 提出低温结晶过程可以解释这些特殊天体过高的硅酸盐结晶度。

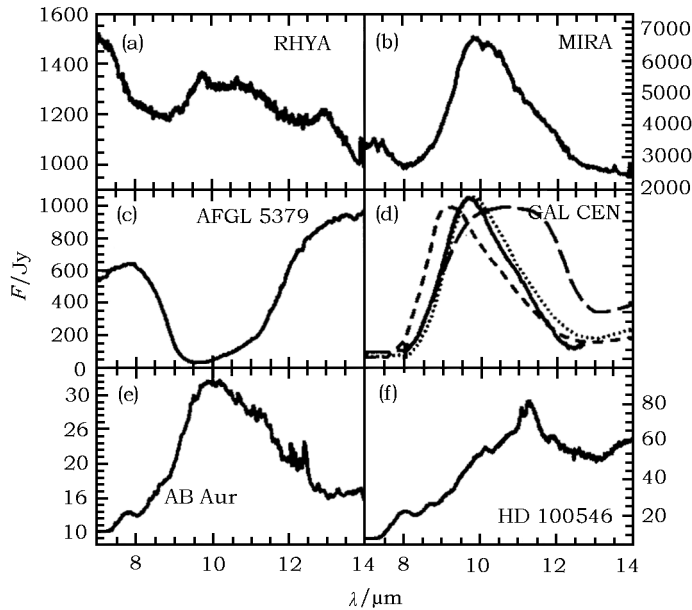


图 4 对各类天体物理环境观测的  $10 \mu\text{m}$  非结晶硅酸盐带<sup>[31]</sup>

(a) R HYA, 具有低质量流失率的 AGB 星, 简单氧化物和少量非结晶硅酸盐产生  $10\mu\text{m}$  带; (b) AGB 星 MIRA, 很强的非结晶硅酸盐带与星际介质中观测到的谱形非常相似; (c) AFGL 5379, 具有高质量损失率的 AGB 星, 显示了很强的非结晶硅酸盐吸收; (d) 沿银心方向的  $10 \mu\text{m}$  硅酸盐吸收谱 (实线) 与实验室测得的尺寸分别为  $0.1 \mu\text{m}$  和  $2 \mu\text{m}$  的非结晶橄榄石; 和小尺寸辉石的光谱进行比较; (e) Herbig Ae/Be 星 AB Aur; (f) Herbig Ae/Be 星 HD 100546, 发射谱上出现很强的结晶硅酸盐特征, 这是一颗硅酸盐结晶度很高的年轻恒星。

许多研究致力于利用实验室测得的各种硅酸盐的折射率拟合非结晶硅酸盐的天文观测光谱。研究发现冷的演化晚期恒星周围的硅酸盐可以用  $[\text{Mg,Fe}]_2\text{SiO}_4$  的光谱来拟合<sup>[33]</sup>。在富氧 AGB 星的  $10 \mu\text{m}$  和  $20 \mu\text{m}$  光谱区, 峰值位置和这 2 个特征带的带宽有一个延展 (如图 4)。这些变化部分归因于其他尘埃成分 (如简单氧化物等) 的出现, 部分是由于尘埃成分的改变。演化晚期恒星周围的非结晶硅酸盐具有橄榄石理想配比, 这也是许多模型在分析尘埃盘硅酸盐矿物学时事先假定含有非结晶橄榄石的依据。

### 2.3 绕主序前年轻恒星和主序星尘埃盘中的硅酸盐

在分子云内部的恒星形成过程中, 部分周围环绕的气体和尘埃落入中心天体参与了恒星的形成, 其他部分则变成周围的旋转尘埃盘, 最终形成行星、星子等。因此通过分析年轻恒星光体 (YSOs) 周围的尘埃盘的性质可以提供恒星、行星系统形成的信息。尤其是结晶硅酸盐与恒星形成中的能量过程密切相关, 研究星周尘埃盘硅酸盐尘粒的矿物学组成, 对了解恒星形成区的物理和化学演化至关重要。

ISO 的高分辨率、宽波段覆盖 (2.4~200  $\mu\text{m}$ ) 的光谱为探测绕年轻恒星天体周围尘埃盘的矿物学组成提供了更详尽和精确的资料。在沿着嵌入恒星形成区的 YSOs 方向观测的 ISO 光谱显示, 9.7  $\mu\text{m}$  和 18  $\mu\text{m}$  硅酸盐带是最深的宽吸收特征, 且它们非常光滑。Demyk 等人<sup>[34]</sup>用中空的  $\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}\text{SiO}_3$  和某种含 Al 硅酸盐的混合物解释原恒星致密云的 9.7  $\mu\text{m}$  和 18  $\mu\text{m}$  吸收光谱, 得出弥散星际介质中结晶硅酸盐所占质量百分比的上限为 2%。但是, Li 等人<sup>[35]</sup>指出文献 [34] 在拟合过程中所采用的附加吸收率假设在物理上是不正确的, 因而对结果会有影响。

在靠近热星的致密云中, 尘埃颗粒可以达到几百 K 的高温, 从而在红外波段发射光子, 其发射谱显示出硅酸盐特征带。尽管人们认为发射谱大多由小尺寸非结晶颗粒产生, 但一些特殊特征线也引起人们注意, 例如 Onaka 和 Okada<sup>[36]</sup> 在  $\lambda \approx 65 \mu\text{m}$  处的特征线被认为是由透辉石 (含 Ca 的结晶硅酸盐) 产生的。

从光谱观测结果可以知道, 在年轻恒星天体周围存在着大量的硅酸盐。Meeus 等人<sup>[37]</sup>对与分子云分离的年轻中等质量星 (即 Herberg Ae/Be 星<sup>[38]</sup>) 进行了大样本巡天, 揭示了硅酸盐发射至少占该源总发射的 70%。一些天体的发射谱只有 10  $\mu\text{m}$  和 18  $\mu\text{m}$  非结晶硅酸盐带, 而有一些则出现较窄的固态发射带。HD 100546 显示有至少 8 个由  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  产生的发射特征<sup>[39,40]</sup>(见图 4(f))。在 Herbig Ae 星星周盘证认出的物质包括  $\text{MgSiO}_3$ 、含水硅酸盐和  $\text{SiO}_2$  等<sup>[41,42]</sup>。相对于非结晶橄榄石, 结晶物质所占的质量百分比为 5%~10%。

不同观测源中的硅酸盐 10  $\mu\text{m}$  谱形存在差别, 它们与弥散星际介质的谱形相差很大。如图 4 所示, 一些硅酸盐的 10  $\mu\text{m}$  发射谱, 峰值位置逐渐向长波方向偏移。在一些观测源中没有呈现 10  $\mu\text{m}$  谱带, 这可能是由于缺少小尺寸 (小于几  $\mu\text{m}$ ) 硅酸盐尘粒或者由于温度太低不足以产生发射特征。最近许多研究分析了 HD 100453 的 SWS 光谱, 结果说明两种效应可能都起作用: 在较长波段 (大于 30  $\mu\text{m}$ ) 探测到大尺寸 (约 2  $\mu\text{m}$ ) 结晶镁橄榄石的发射特征, 而在约 11  $\mu\text{m}$  却没有探测到特征线。

ISO 的 PHOT-S 仪器观测了低质量 T Tauri 星周围尘埃盘的硅酸盐发射<sup>[43,44]</sup>。尽管光谱质量不高, 但仍可以从光谱中看出由橄榄石和辉石组成的亚微米尺寸颗粒的非结晶硅酸盐特征线。在一些源中, 有迹象表明出现 11.3  $\mu\text{m}$  结晶镁橄榄石和 8.6  $\mu\text{m}$   $\text{SiO}_2$  特征, 但进一步证认需要较高信噪比和分辨率的光谱观测。

ISO 的观测数据显示年轻恒星天体的结晶硅酸盐丰度高于一些研究确定的星际介质中的结晶度。通过详细分析年轻 Herberg Ae/Be 星 HD 100546 的 ISO 光谱<sup>[40,45]</sup>, 人们发现结晶硅酸盐是占主导地位的小尺寸尘粒, 其丰度甚至高于小尺寸非结晶硅酸盐。这颗星有些特殊, 大部分 YSOs 的结晶硅酸盐质量百分比没有这么高。年轻恒星星周环境的结晶硅酸盐含量相对星际介质比较高, 这意味着某种结晶化形成过程曾在盘上发生, 可能是在原行星盘退火中形成的。观测发现在盘上温度较低的外围区域也存在结晶硅酸盐, 人们推测其在靠近中心恒星的高温区退火中形成, 由于某种径向混合过程而转移到该地, 具体转移混合机制仍不清楚<sup>[46,47]</sup>。

Telesco 和 Knacke<sup>[48]</sup>首次在主序星  $\beta$  Pic 周围的碎片盘观测到硅酸盐尘粒的 10  $\mu\text{m}$  发射特征, 证实了硅酸盐是主序星星周尘埃盘的主要组成物质。 $\beta$  Pic 是一颗具有侧向尘埃盘的主序星, 它代表了太阳系早期的状态。1993 年, Knacke 等人<sup>[49]</sup>分析了  $\beta$  Pic 星周尘埃盘的 10  $\mu\text{m}$  发射谱, 发现其包含很多子结构, 这意味着部分硅酸盐以结晶态形式存在。 $\beta$  Pic

的硅酸盐特征谱与一些彗星  $10\ \mu\text{m}$  发射谱非常相似, 这个结果有力地支持了彗星提供  $\beta\ \text{Pic}$  周围尘埃盘的尘粒的说法。最近, Subaru 对年轻的主序星  $\beta\ \text{Pic}$  进行了高空间分辨率的光谱观测, 尘埃的发射谱上有  $9.7\ \mu\text{m}$  非结晶硅酸盐和  $11.2\ \mu\text{m}$  结晶硅酸盐特征<sup>[50]</sup>。Okamoto 等人<sup>[50]</sup>通过拟合 Subaru 观测到的  $10\ \mu\text{m}$  红外特征带, 发现小尺寸非结晶硅酸盐集中在 3 个轨道, 半径分别为  $6.4\ \text{AU}$ 、 $16\ \text{AU}$ 、 $30\ \text{AU}$ ; 大尺寸非结晶硅酸盐和结晶硅酸盐集中在中心星附近。他们推测可能存在 3 个绕  $\beta\ \text{Pic}$  的由彗星和星子组成的星子带, 彗星子碰撞产生的亚微米和微米尺寸的硅酸盐尘粒不断补充到系统中, 以弥补碎片盘上由于辐射压造成的小尺寸硅酸盐的减损。为维持系统的动力学平衡, 可能在轨道半径  $12\ \text{AU}$  处存在一个绕  $\beta\ \text{Pic}$  的行星。Okamoto 等人的推论有待后续的研究。

另外, 值得注意的是, Li 和 Greenberg<sup>[51]</sup>基于彗星提供  $\beta\ \text{Pic}$  尘埃源的假设, 用中空的星际硅酸盐核——有机耐熔质壳层(在温度较低的外围轨道具有附加的冰壳层)的尘埃理论模型, 很好地解释了观测到的结晶、非结晶硅酸盐红外发射谱。

## 2.4 彗发中的硅酸盐尘粒

彗星是存在于太阳系边缘的尘埃颗粒和冰的混合物。通常认为自从太阳系诞生, 彗星形成以后没有经历巨大的演变过程, 因此彗星的矿物学组成基本可以代表原太阳星云的物质组成, 彗星物质也包含了原太阳星云在形成彗星的位置的物理环境信息。研究彗星红外光谱是确定彗星矿物学组成和分析彗星之间差异的常用且有效的方法。在光学薄的彗发中小尺寸硅酸盐尘粒将产生  $10\ \mu\text{m}$  和  $16\sim 25\ \mu\text{m}$  发射谱特征。由 Si-O 拉伸振动模式引起的  $10\ \mu\text{m}$  特征正好位于  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  大气窗口, 地面的光谱观测可以得到许多彗星在这一区间的光谱<sup>[52,53]</sup>。其中大约一半的彗星呈现很强的结晶硅酸盐发射特征。

从哈雷彗星 (1P/Halley) 的较高信噪比的光谱可以看出: 探测到的  $11.2\sim 11.3\ \mu\text{m}$  峰明确表明富 Mg 的结晶橄榄石、贫 Fe 的非结晶橄榄石和辉石混合构成 1P/Halley 彗发硅酸盐<sup>[52,54]</sup>。

对海尔波谱彗星 C/1995 O1(Hale-Bopp) 的观测为硅酸盐矿物学研究提供了新的线索, 它呈现了所有曾经观测过的彗星中最强的硅酸盐特征<sup>[54-57]</sup>。从图 5<sup>[58]</sup>可以看到其  $10\ \mu\text{m}$  光谱具有几个分立的峰: 分别在波长  $\lambda \approx 9.2\ \mu\text{m}$ 、 $10.0\ \mu\text{m}$ 、 $11.2\ \mu\text{m}$  时有极大值; 在  $10.5\ \mu\text{m}$ 、 $11.9\ \mu\text{m}$  有小结构; 其  $\lambda \approx 11.2\ \mu\text{m}$  橄榄石峰与 Halley 彗星观测的结果类似;  $11.9\ \mu\text{m}$  处的突起也是结晶橄榄石产生的;  $9.2\ \mu\text{m}$  处的极大值可能是辉石尘粒引起的, 计算得到的非结晶辉石的发射率与观测的 Hale-Bopp 光谱具有相似的形状;  $\lambda \approx 10\ \mu\text{m}$  附近较宽的极大值可能是非结晶橄榄石的贡献; 而  $10\sim 11\ \mu\text{m}$  相对平坦的顶部和  $10.5\ \mu\text{m}$  处的结构最有可能由结晶辉石产生。

基于以上对光谱特征的分析, Wooden 等人<sup>[54]</sup>用至少 5 种不同成分的 Mg 丰硅酸盐模拟彗星光谱, 分别是非结晶辉石、非结晶橄榄石、结晶橄榄石、结晶正辉石和结晶斜辉石。该模型结合结晶橄榄石和辉石的实验室光谱, 用 Mie 理论<sup>[59]</sup>计算非结晶橄榄石和辉石的发射率, 来拟合  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  地面观测光谱及该彗星在离太阳  $2.8\ \text{AU}$  远处的 SWS 光谱。为了解释彗星在距离太阳  $1\ \text{AU}$  和  $2.8\ \text{AU}$  处得到的彗星光谱形状的差别, 他们假设存在一类温度较低的大尺寸 Mg 丰结晶辉石尘粒, 其热发射在距太阳  $1\ \text{AU}$  附近才能被观测到。这些尘粒在  $9.3\ \mu\text{m}$  处由尖锐的峰, 并且在  $\lambda \approx 10.5\ \mu\text{m}$  存在子结构。Wooden 等人<sup>[54]</sup>估计这些 Mg 丰辉石尘粒占彗发小尺寸尘粒的至少 90%; Galdemard 等人<sup>[60]</sup>也提出用橄榄石和辉石之间的温度差异



解释 Hale-Bopp 光谱; 基于星际尘埃的彗星模型, Li 和 Greenberg<sup>[61]</sup> 也很好解释了所观测到的 Hale-Bopp 光谱。

Wooden 等人<sup>[54]</sup> 的模型的困难是需要解释如何避免小尺寸结晶辉石尘粒与其他吸收物质的热接触, 以此保证它们的温度比其他硅酸盐低。或者也可以解释为在较大的日心距离处, 亚微米尺寸的硅酸盐尘粒被有机耐熔质壳层覆盖, 在近日距离的位置, 有机物包层快速升华, 出现光薄的硅酸盐发射<sup>[62]</sup>。因为辉石发射特征并没有 11.2  $\mu\text{m}$  橄榄石特征峰显著, 所以辉石可能更容易被有机包层掩盖。这要求 Hale-Bopp 彗发中的辉石尘粒独立存在, 这不符合当前普遍认同的观点: 彗星的彗发是硅酸盐和含碳物质混合物的多孔聚合物颗粒<sup>[63,64]</sup>。

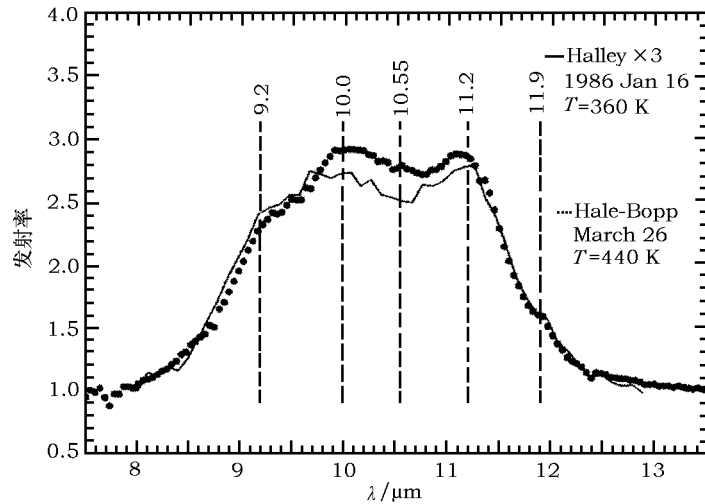


图 5 Hale-Bopp 彗星 (点线) 和 P/Halley 彗星 (实线) 的硅酸盐发射特征<sup>[58]</sup>

2 个光谱都扣除了图示温度下黑体辐射的贡献, 并且使 Halley 的强度增大 3 倍

ISO 观测 Hale-Bopp 的 2~45  $\mu\text{m}$  光谱, 发现在波长大于 16  $\mu\text{m}$  的波段存在几条较宽的发射特征, 这些特征线几乎都是由富 Mg 结晶橄榄石的扭曲振动模式引起<sup>[55,65,66]</sup>。

几乎所有对 Hale-Bopp 彗星光谱的解释都包含非结晶态和结晶态的橄榄石和辉石, 但它们的相对丰度或质量百分比却不能准确确定。目前存在一些困难使我们无法精确定量分析各种成分的相对丰度。一方面, 实验室测量不能给出物质的定量质量吸收系数<sup>[67]</sup> (即不能给出准确的质量消光系数), 另外特征线的强度依赖于尘粒尺寸; 另一方面, 广泛应用于计算小尺寸球状颗粒散射和发射的 Mie 理论并不能用于模拟结晶橄榄石的特征峰, 因为橄榄石在共振峰波长附近的光学常数与尘粒形状有关, 而且影响很大<sup>[57]</sup>。最后, 即使得到了精确的发射率, 热发射还取决于温度, 彗发硅酸盐尘粒的温度由吸收太阳辐射和红外发射冷却之间的能量平衡决定, 温度与尘粒尺寸、Mg/Fe 值、吸收物质的热接触等很多因素有关。很多相关的工作都认为尘埃具有相同的温度, 把这个温度作为自由参量, 而这在物理上是不正确的。Li 等人<sup>[68]</sup> 讨论了温度效应对模拟彗星红外光谱和分析彗发硅酸盐矿物学的影响。

各种研究得出 Hale-Bopp 彗星硅酸盐的结晶度在 30%~90% 间变化。Li 和 Greenberg<sup>[61]</sup> 通过拟合 Hale-Bopp 的 3~20  $\mu\text{m}$  红外发射谱, 指出结晶硅酸盐的含量约为 10%~30%。Wooden

等人得出辉石是 Hale-Bopp 硅酸盐的主要成分, 结晶橄榄石仅占 20% 或更少<sup>[58]</sup>。从其他长周期彗星 10  $\mu\text{m}$  光谱推出的硅酸盐矿物组成与 Hale-Bopp 类似, 但不同彗星的光谱存在较大差异。Colangeli 等人<sup>[69,70]</sup> 认为各种硅酸盐尘粒相对含量的变化或 Mg/Fe 比值的变化导致差异。Hayward 等人<sup>[56]</sup> 则认为光谱差别可能反映了尘粒尺寸分布和温度的变化。

在 Kuiper 带形成的短周期彗星中硅酸盐 10  $\mu\text{m}$  发射谱很弱, 出现很弱的宽发射带且非常光滑。短周期彗星中强硅酸盐特征线的消失可以用 Oort 云和 Kuiper 带彗星形成环境的差异导致缺失小尺寸颗粒的现象解释<sup>[65]</sup>。短周期彗星在靠近太阳的位置在辐射压的作用下释放部分彗尘, 小尺寸多孔颗粒被驱逐出太阳系(小尺寸尘粒即使在产生大部分热发射时, 仍可能仅占尘埃总质量的很小一部分)。尽管如此, 有的短周期彗星中仍发现结晶硅酸盐, 如 ISO 观测的彗星 103P/Hartley 2 的光谱上有 11.3  $\mu\text{m}$  特征线<sup>[71,72]</sup>。Li 和 Greenberg<sup>[73]</sup> 用多孔的彗发尘埃模型计算短周期木星族彗星 P/Borrelly (1994I) 的热发射谱, 发现当疏松度  $P = 0.85$  时, 用多孔的硅酸盐核——无定形碳壳层尘埃模型可以很好地拟合观测。Hanner<sup>[74]</sup> 用实心非结晶硅酸盐和碳尘粒的混合物拟合 P/Borrelly 的热发射谱。这两种独立成分组成的混合物产生的硅酸盐特征在短波方向太低, 而在长波方向存在一个发射峰, 不能很好地拟合 Borrelly 的硅酸盐发射特征。

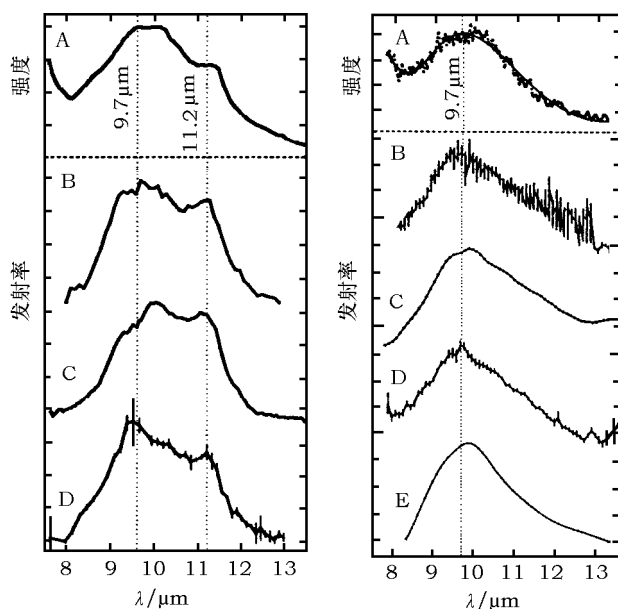


图 6 含 GEMS 丰富的 IDP 和一些 GEMS 的 10  $\mu\text{m}$  Si-O 拉伸带与天体硅酸盐之间比较<sup>[76]</sup>

(a) 球粒状 IDP L2008V42A (A), Halley 彗星 (B), Hale-Bopp 彗星 (C), 晚期 Herbig Ae/Be 星 HD 163296(D);  
 (b) IDP L2011\*B6 中的 GEMS(A), 分子云 Elias 16(B), Trapezium 分子云 (C), 主序前 T Tauri YSO DI Cephei (D), 主序后 M 型超巨星  $\mu$ -Cephei (E)

## 2.5 IDPs(行星际尘埃) 中的硅酸盐

人们一般认为在大气平流层收集到的 IDPs 来自小行星和彗星。IDPs 中的 CP(球粒状多孔物质) 非常类似于彗发尘埃, 因为它们也有易遭受破坏的微米级结构、高碳丰度和 Mg 丰的硅酸盐成分。通过实验室分析 CP IDPs 可以使人们对太阳星云颗粒的凝聚历史有更深刻的理解。

Bradley [75] 在 CP IDPs 中发现一类非结晶硅酸盐尘粒, 称其为 GEMS(Glass with embedded metal and sulfides)。GEMS 的物理特性类似于在星际和星周空间普遍存在的非结晶硅酸盐尘粒。GEMS 的红外吸收光谱在  $10\ \mu\text{m}$  和  $18\ \mu\text{m}$  有 Si-O 拉伸模式和 O-Si-O 扭曲模式引起的特征带。Bradley 等人 [76] 将实验室测量得到的 CP IDPs 中 GEMS 的红外吸收光谱与在其他天体环境观测到的硅酸盐的  $10\ \mu\text{m}$  带进行比较。Bradley 等人 [76] 发现由顽辉石、镁橄榄石和 GEMS 组成的 IDPs 的  $10\ \mu\text{m}$  Si-O 拉伸带的精细结构和带宽都与太阳系彗星、主序前 Herbig Ae/Be 星非常相似; 一些 GEMS 具有宽且光滑的 Si-O 拉伸带, 光谱形状类似于在星际分子云和年轻恒星天体周围观测到的红外光谱谱形(见图 6)。他们认为迄今为止没有任何一种天然的或合成的硅酸盐可以如此好地拟合天体非结晶硅酸盐的谱形。如果 GEMS 确实是天体非结晶硅酸盐, 那么 GEMS 也就是人们长期以来寻找的构建太阳系的基础物质。这意味着, 在太阳星云塌缩之前, 太阳系大部分的重元素凝结在这些尘粒中。由 GEMS、顽辉石和其他非结晶硅酸盐组成的 IDPs 的  $10\ \mu\text{m}$  Si-O 拉伸特征与太阳系彗星和一些星周硅酸盐的  $10\ \mu\text{m}$  特征相似。与陨石相比, 在大气平流层收集到的含 GEMS 丰富的 IDPs 更能代表前太阳星云尘埃。因而, IDPs 中的硅酸盐尘粒是可供实验室研究的距离最远的天体物质。

## 3 结晶态和非结晶态的硅酸盐在天体物理学中的意义

硅酸盐尘粒是宇宙尘埃的主要组成成分, 普遍存在于太阳系中。从化学结构上看, 硅酸盐由硅酸根离子 ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ) 和某种金属离子(如  $\text{Mg}^{2+}$  或  $\text{Fe}^{2+}$ ) 以晶格结构结合。有序的晶格结构组成的称为结晶硅酸盐, 它产生许多尖锐的光谱特征线, 如  $11.3\ \mu\text{m}$  特征; 以无序晶格结构存在的称为非结晶硅酸盐, 它的光谱谱形在  $10\ \mu\text{m}$  和  $18\ \mu\text{m}$  有宽且光滑的特征(如图 1 所示)。

形成时的温度决定了硅酸盐尘粒的形态——结晶态或非结晶态。如果形成时的温度高于某一特定温度 ( $T_{\text{glass}} \approx 800\ \text{K}$ ), 形成结晶态硅酸盐, 这是能量分配上最理想的晶格结构。如果硅酸盐在较低的温度凝结, 尘粒凝固成非结晶态。另外, 当非结晶硅酸盐尘粒达到一定的高温 ( $T_{\text{anneal}} \approx 1\ 300\ \text{K}$ ), 也可以退火形成结晶态硅酸盐, 或者气化后在温度  $T > T_{\text{glass}}$  时重新凝结形成结晶硅酸盐。因此, 结晶硅酸盐在一定程度上包含了天体环境中发生的高能事件的信息。另一方面, 宇宙射线的轰击和尘粒之间的碰撞会破坏有序的晶格结构, 使结晶硅酸盐非结晶化。

由于 ISO 的成功运行取得的宽波段、高分辨率光谱, 和实验室对硅酸盐颗粒光学常数的精确测量, 人们在许多天体物理环境中发现了结晶硅酸盐。在具有较高质量流失率的演化晚期恒星的星周壳层中存在可观数量的结晶硅酸盐, 其质量百分比约占 10%~15%。在彗星的彗发, 行星际介质和年轻恒星周围的尘埃盘上都探测到结晶硅酸盐的存在。依据星际尘埃的循环演化理论, 演化晚期恒星将物质以巨星、红巨星质量流失或者超新星爆发的方式抛入星际

空间, 星际介质再次凝聚形成新的恒星、彗星、陨石等。人们在硅酸盐尘粒的前身 (演化晚期恒星) 及其遗迹 (年轻恒星、彗星、行星际尘埃等) 都找到结晶硅酸盐, 在尘埃演化的中间态——弥散星际介质中理应存在一定丰度的结晶硅酸盐。然而, 人们至今没有找到弥散星际介质中结晶硅酸盐存在的确切证据。

基于弥散星际介质没有硅酸盐发射谱的观测特性, Li 和 Draine<sup>[13]</sup> 估计了结晶硅酸盐的质量百分比上限是 5%; Demyk 等人<sup>[34]</sup> 分析了 2 颗原恒星致密云的吸收谱, 得到结晶硅酸盐的含量应该小于 2%; 最近 Kemper<sup>[14]</sup> 通过分析沿银河系中心方向的消光谱, 认为在弥散星际介质中结晶硅酸盐所占百分比小于 2.2%, 当加入 1.1% 的结晶硅酸盐, 模型与观测符合得最好。但是, Demyk 等人拟合过程中所采用的附加吸收率假设在物理上不正确, 对结果会有影响<sup>[35]</sup>; 而 Kemper 等人假设得到的光谱都是来自弥散星际介质的贡献, 这可能是低估了弥散星际云中结晶硅酸盐含量的原因<sup>[15]</sup>。

星际介质中结晶硅酸盐含量的上限远远低于观测发现的演化晚期恒星周围 10%~20% 的比例。一种解释是星际介质中高能颗粒的非结晶化过程的时间尺度小于 10 Ma, 远远短于尘埃遭到破坏的时间尺度, 抛入星际介质的结晶硅酸盐又通过某种机制非结晶化了; 另一种可能性是其他源 (如超新星 SN) 产生的非结晶硅酸盐的速率远高于以前, 大量抛入星际空间的非结晶硅酸盐稀释了 post-AGB 星的结晶硅酸盐比例, 使星际介质中的结晶度低于原先的结晶度。

弥散星际介质中没有观测到结晶硅酸盐的事实表明年轻恒星星周和绕主序星的碎片盘、彗星和行星际介质中的结晶硅酸盐不是直接来自原弥散星际云, 而是在其形成过程中凝聚形成。然而, 彗星在其演化的大部分时间处于远离中央恒星的温度较低的轨道上, 而形成结晶硅酸盐需要很高的温度。那么, 彗星的彗发中结晶硅酸盐的来源是什么? 这个问题长久以来存在很多争议。有的模型用太阳星云中的湍流径向混合作为彗发中结晶硅酸盐的来源<sup>[77]</sup>, 即尘埃颗粒在靠近原太阳时经历了热过程, 随后被径向传递至温度较低的彗星形成区。Harker 和 Desch<sup>[78]</sup> 提出硅酸盐尘粒在长周期彗星所在的轨道上被引力不稳定性产生的激波退火, 形成了结晶硅酸盐。至今, 人们仍不能解释彗星中结晶硅酸盐的来源。有人认为在彗星形成前, 星际尘埃达到高温使非结晶硅酸盐结晶化; 另一种理论认为形成彗星后, 硅酸盐尘粒完成了从非结晶到结晶态的转化。Greenberg 等人<sup>[64]</sup> 考虑了彗星中形成结晶硅酸盐的两种途径: 如果星际尘埃在太阳星云中被预先加热, 则 10  $\mu\text{m}$  发射谱可以用结晶度为 15% 的尘埃模型拟合; 另一方面, 如果非结晶的硅酸盐核外有结晶硅酸盐壳层, 这种尘埃模型不能解释观测到的 10  $\mu\text{m}$  结构。因此, 这两种结晶化过程极有可能都起作用。

结晶硅酸盐的丰度一直是硅酸盐天体矿物学领域的未解之谜。由于它与恒星系统形成和星系演化密切相关, 近年来已成为星际尘埃领域的热点课题。

## 4 结束语

该文对各种天体物理环境中的硅酸盐观测证据做了具体介绍, 并系统地给出了目前我们所掌握的对这些环境中硅酸盐物理和化学性质的认识, 也讨论了一些特殊天体的硅酸盐矿物学组成 (如 Herbig Ae/Be 星 HD 100546、年轻主序星  $\beta$  Pic、Halley 彗星、Hale-Bopp 彗星

等)。由于结晶硅酸盐是尘粒经历了热演化过程形成的,它反映了尘粒形成过程的热历史,所以结晶硅酸盐含量的研究显得尤为重要。虽然结晶硅酸盐在红外波段产生一系列尖锐的特征线,但由于其含量一般较少,通常这些谱线很弱,需要高信噪比、高分辨率的望远镜观测才能研究。自从 ISO 的成功运行和实验室对各种硅酸盐矿物质光谱的精确测量技术的提高,人们在这一领域已取得很大进展。现今观测证实星际尘埃演化的前身(演化晚期恒星的星周尘埃包层)和其遗迹(彗星),均有可观数量的结晶硅酸盐存在。但是这不能合理地解释,为何人们至今还没有在其中间态(弥散星际介质)中找到结晶硅酸盐存在的确切证据。这成为硅酸盐天体矿物学领域迫切需要解决的问题。已成功发射的 Spitzer 空间望远镜的主要任务之一就是研究各种天体环境中尘埃的物理化学特性。随着各种先进观测设备的出现、实验室条件的改进和对固体物质的物理化学性质理论的完善,这些未解决的问题将被逐步攻克。

**致谢** 本文作者李爱根博士感谢中国科学院王宽诚科研奖金的支持。

### 参考文献:

- [1] Kamijio F. PASJ, 1930, 15: 440
- [2] Li A. Journal of Physics: Conference Series, 2005, 6: 229
- [3] Gilman R C. ApJ, 1969, 155: L185
- [4] Woolf N J, Ney E P. ApJ, 1969, 155: L181
- [5] Knacke R F, Gaustad J E, Gillett F C, et al. ApJ, 1969, 155: L189
- [6] Stein W A, Gillett F C. ApJ, 1969, 155: L197
- [7] Maas R W, Ney E P, Woolf N J. ApJ, 1970, 160: L101
- [8] Hackwell J A, Gehrz R D, Woolf N J. Nature, 1970, 227: 822
- [9] Gillett F C, Forrest W J. ApJ, 1973, 179: 483
- [10] Teplitz H I, Armus L, Soifer B T, et al. ApJ, 2006, 638: L1
- [11] Molster F, Kemper C. Space Science Review, 2005, 119: 3
- [12] Chiar J E, Tielens A G G M. ApJ, 2006, 637: 774
- [13] Li A, Draine B T. ApJ, 2001, 550: L213
- [14] Kemper F, Vriend W J, Tielens A G G M. ApJ, 2004, 609: 826
- [15] Li M P, Zhao G, Li A. On the Crystallinity of Silicate Dust in the Interstellar Medium, MNRAS, 2007 (be submitted)
- [16] Bowey J E, Adamson A J. MNRAS, 2002, 334: 94
- [17] Draine B T. ARA&A, 2003, 41: 241
- [18] Molster F J, Waters L B F M, Tielens A G G M, et al. A&A, 2002, 382: 241
- [19] Spoon H W W, Tielens A G G M, Armus L, et al. ApJ, 2006, 638: 759
- [20] Gillett F C, Forrest W J, Merrill K M, et al. ApJ, 1975, 200: 609
- [21] Russell R W, Soifer B T, Forrest W J. ApJ, 1975, 198: L41
- [22] Roche P F, Aitken D K. MNRAS, 1984, 208: 481
- [23] Bowey J E, Adamson A J, Whittet D C B. MNRAS, 1998, 298: 131 [21]
- [24] Li A. "Penetrating Bars Through Masks of Cosmic Dust", The Warm, Cold and Very Cold Dusty Universe, Johannesburg, Block D L, Freeman K eds. South Africa: Kluwer Academic Publisher, 2004: 535
- [25] Snow T P, Witt A N. ApJ, 1996, 468: L65
- [26] Mathis J S. ApJ, 1996, 472: 643
- [27] Li A. ApJ, 2005, 622: 965
- [28] Aitken D K, Roche P F, Smith C H, et al. MNRAS, 1988, 230: 629
- [29] Cami J. Ph. D. thesis, University of Amsterdam, The Netherlands, 2002
- [30] Posch T, Kerschbaum F, Mutschke H, et al. A&A, 2002, 393: L7

- [31] Molster F J, Waters L B F M. *Astromineralogy*, 2003, 609: 121
- [32] Molster F J, Yamamura I, Waters L B F M et al. *Nature*, 1999, 401: 563
- [33] Demyk K, Carrez P, Leroux H, et al. *A&A*, 2001, 368: L38
- [34] Demyk K, Jones A P, Dartois E, et al. *A&A*, 1999, 349: 267
- [35] Li A, Greenberg J M, Zhao G. *MNRAS*, 2002, 334: 840
- [36] Onaka T, Okada Y. *ApJ*, 2003, 585: 872
- [37] Meeus G, Waters L B F M, Bouwman J, et al. *A&A*, 2001, 365: 476
- [38] Waters L B F M, Waelkens C. *ARA&A*, 1998, 36: 233
- [39] Waelkens C, Waters L B F M, de Graauw Th, et al. *A&A*, 1996, 315: L245
- [40] Malfait K, Waelkens C, Waters L B F M, et al. *A&A*, 1998, 332: L25
- [41] Malfait K, Waelkens C, Bouwman J, et al. *A&A*, 1999, 345: 181
- [42] Bouwman J, Meeus G, de Koter A, et al. *A&A*, 2001, 375: 950
- [43] Natta A, Meyer M R, Beckwith S V W. *ApJ*, 2000, 534: 838
- [44] Gürtler J, Schreyer K, Henning Th, et al. *A&A*, 1999, 246: 205
- [45] Bouwman J. Ph. D thesis, The Netherlands: University of Amsterdam, 2001
- [46] Harker D E, Desch S J. *ApJ*, 2002, 565: L109
- [47] Bockelée-Morvan D, Gautier D, Hersant F, et al. *A&A*, 2002, 384: 1107
- [48] Tesco C M, Knacke R F. *ApJ*, 1991, 372: L29
- [49] Knacke R F, Tesco C M, Hackwell J A, et al. *ApJ*, 1993, 418: 440
- [50] Okamoto Y K, Kataza H, Honda M, et al. *Nature*, 2004, 431: 660
- [51] Li A, Greenberg J M. *A&A*, 1998, 331: 291
- [52] Hanner M S, Lynch D K, Russell R W. *ApJ*, 1994, 425: 274
- [53] Hanner M S, Gehrz R D, Harker D E, et al. *Earth, Moon and planet*, 1999, 79: 247
- [54] Wooden D H, Harker D E, Woodward C E et al. *ApJ*, 1999, 517: 1034
- [55] Crovisier J, Leech K, Bockelée-Morvan D, et al. *Science*, 1997, 275: 1904
- [56] Hayward T L, Hanner M S, Sekanina Z. *ApJ*, 2000, 538: 428
- [57] Hanner M S, Gehrz R D, Harker D E, et al. *Earth, Moon and Planet*, 1997, 79: 247
- [58] Hanner M S. *Astromineralogy*, 2003, 609: 171
- [59] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, New York: Wiley, 1983
- [60] Galdemard P, Lagage P O, Dubreuil D, et al. *Earth, Moon and Planet*, 1999, 78: 271
- [61] Li A, Greenberg J M. *ApJ*, 1998, 498: L83
- [62] Li A, Greenberg J M. *A&A*, 1997, 323: 566
- [63] Greenberg J M, Li A. *Space Science Reviews*, 1999, 90: 149
- [64] Greenberg J M, Li A, Yamamoto T, et al. *ASP Conference Series*, 1996, 104: 497
- [65] Brucato J R, Colangeli L, Mennela V, et al. *P&SS*, 1999, 47: 773
- [66] Colangeli L, Brucato J R, Ferrini L, et al. *Adv. Space Res.*, 1999, 23: 1243
- [67] Koike C, Shibai H, Tsuchiyama A. *MNRAS*, 1993, 264: 654
- [68] Li M P, Zhao G, Li A. *ApJ*, 2004, 613: L145
- [69] Colangeli L, Mennela V, Rotundi A, et al. *A&A*, 1995, 293: 927
- [70] Colangeli L, Mennela V, Rotundi A, et al. *A&A*, 1996, 312: 643
- [71] Crovisier J, Encrenaz T, Lellouch E, et al. *In the Universe seen by ISO*, 1999, 427: 161
- [72] Crovisier J, Brooke T Y, Leech K, et al. *ASPCS*, 2000, 196: 109
- [73] Li A, Greenberg J M. *A&A*, 1998, 338: 364
- [74] Hanner M S, Lynch D K, Russell R W, et al. *Icarus*, 1996, 124: 344
- [75] Bradley J P. *Science*, 1994, 265: 925
- [76] Bradley J P, Keller L P, Snow T P, et al. *Science*, 1999, 285: 1716
- [77] Bockelée-Morvan D, Gautier D, Huré J M, et al. *A&A*, 2002, 384: 1107
- [78] Harker D E, Desch S J. *ApJ*, 2002, 565: L109

## Silicate Dust in Astrophysical Environments

LI Mo-ping<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>1</sup>, LI Ai-gen<sup>1,2,3</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Department of Physics and Astronomy, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA)

**Abstract:** Silicate grains, one of the major cosmic dust species, are ubiquitously seen in various astronomical environments through their vibrational absorption or emission bands: Si-O stretching at about  $9.7 \mu\text{m}$  and O-Si-O bending at about  $18 \mu\text{m}$ . Their physical and chemical properties vary with local environments, as revealed through the variations in the spectral shapes, relative intensities, and peak wavelengths of the silicate bands, both amorphous and crystalline. With the advent of both ground-based and space-borne infrared telescopes and the rapid accumulation of high-quality observational data, astronomical silicates have been receiving much attention in recent years. In this review, we summarize the observational characteristics of silicate grains in the interstellar medium, dust torus around Active Galactic Nuclei, protoplanetary dust disks around pre-main sequence stars, debris disks around main sequence stars, circumstellar envelopes around evolved stars, cometary coma, and interplanetary space. Their physical and chemical properties in different astronomical regions are studied on a comparison basis, with special attention paid to crystalline silicates: whereas crystallinity is prevalent at the beginning (i.e. circumstellar envelopes around evolved stars) and end (i.e. cometary dust) of dust grains' life cycle, no crystallinity is found in the intermediate phase (i.e., in the diffuse interstellar medium). The astrophysical implications of the presence and absence of crystalline silicates in certain astrophysical regions are discussed.

**Key words:** astrophysics; interstellar dust; review; silicate grains; circumstellar envelope around evolved stars; dust disks around young stars; cometary coma; interplanetary dust particles