

文章编号: 1000-8349(2006)01-0043-11

演化晚期恒星星周包层的 $21\mu\text{m}$ 特征

张 可¹, 姜碧涛¹, 李爱根^{2,3}

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 3. Department of Physics and Astronomy, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA)

摘要: $21\mu\text{m}$ 特征是指在一些富碳的原行星状星云的红外光谱中波长约 $20\mu\text{m}$ 处观测到的一个较宽的发射谱带特征, 它是目前星周包层物质研究的热点问题。到目前为止, 一共有 12 个原行星状星云被证认为 $21\mu\text{m}$ 特征源。此外, 还有两个中心是沃尔夫拉叶星的行星状星云也有可能是 $21\mu\text{m}$ 特征源。这 12 个原行星状星云源的 $21\mu\text{m}$ 特征都有相似的谱线轮廓, 峰值都位于 $20.1\mu\text{m}$ 。这些源的中心星都是富碳的 F 或 G 型超巨星, 贫金属 (却有丰富的慢中子过程元素), 有很强的红外色余。在过去 10 年中, 人们提出了大量 $21\mu\text{m}$ 特征载体的候选物质, 主要有: 氢化足球烯 (C_{60}H_m , $m = 0\sim 60$)、多环芳香烃 (PAH)、氢化无定形碳 (HAC)、纳米金刚石颗粒、合成含碳大分子、氨基化合物 (特别是尿素)、铁的氧化物 (如: $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4 和 FeO)、 SiS_2 、纳米 TiC 团簇、掺杂的 SiC 颗粒、表面覆盖 SiO_2 幔的 SiC 颗粒等。但所有这些候选物质都还没有得到确认。概述了 $21\mu\text{m}$ 特征的出现及其后续的相关研究, 介绍了 $21\mu\text{m}$ 特征源的共同特征, 比较详细地探讨了人们已提出的该特征载体的候选物质。

关键词: 天体物理学; $21\mu\text{m}$ 特征; 综述; 星周包层物质; 渐近巨星支; 后渐近巨星支; 恒星星周包层
中图分类号: P155.1⁺2 **文献标识码:** A

1 引 言

1989 年, 著名华裔天体物理学家 Kwok 等人^[1] 发现 4 个 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) 源的低分辨率光谱 (Low Resolution Spectrometer, LRS) 都在 $21\mu\text{m}$ 处存在一个未被证认过的发射特征。这些源的光谱都显现出双峰的能量分布形式, 表明它们拥有已经分离了的尘埃包层, 很可能处于渐近巨星支 (AGB) 和行星状星云 (PN) 中间的演化阶段, 即原行星状星云 (Proto-Planetary Nebulae, PPNe) 或后渐近巨星支 (post-AGB) 阶段。由于这一特征在 AGB 和 PN 阶段都没有观测到, 于是 Kwok 等人猜测, 这种红外特征起源于某种在 AGB 末

收稿日期: 2005-06-15; 修回日期: 2005-08-15

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (10473003)

期产生而在 PN 阶段被摧毁的分子。

1995 年, Omont 等人^[2]利用柯伊伯机载天文台对 5 个(包括后来证认的 1 个) $21\ \mu\text{m}$ 特征源进行了观测; 而 Kwok 等人^[3]和 Justtanont 等人^[4]通过地面观测也证认出了 4 个新的 $21\ \mu\text{m}$ 特征源。这些工作都进一步证实了 $21\ \mu\text{m}$ 特征的存在。同年, Hrivnak^[5]仔细分析了这些源的可见光谱, 发现它们具有很多共同特点。

上述这些光谱观测都是低分辨率的, 后来 Kwok 等人^[6]利用红外空间天文台 (Infrared Space Observatory, ISO) 的高分辨率光谱证认出了 12 个 $21\ \mu\text{m}$ 特征源。随后, Volk 等人^[7]对这些高分辨率的 ISO 资料进行了仔细分析, 第一次得到了 $21\ \mu\text{m}$ 特征的精确峰值波长和半高全宽的大小, 另外他们还发现这 12 个源的 $21\ \mu\text{m}$ 特征的光谱轮廓惊人地一致。

到此为止, 人们对 $21\ \mu\text{m}$ 特征仍然是疑云重重。这个神秘的特征到底是由什么物质导致的? 它真的只存在于 PPNe 这个短暂的阶段? 如果确实如此, 它生存的环境到底发生了什么样的改变, 才使得它在 PN 阶段不复存在? Kwok 认为这是天体化学领域最令人困惑的谜团之一。十几年来, 人们对 $21\ \mu\text{m}$ 特征进行了大量的探讨。

本文第 2 部分将简要描述 $21\ \mu\text{m}$ 特征, 介绍到目前为止所知的 12 个 $21\ \mu\text{m}$ 特征源以及它们的共同特征; 第 3 部分讨论已经提出的多种 $21\ \mu\text{m}$ 特征载体的候选物质; 最后, 在第 4 部分提出了一些将来可能的工作方向。

2 $21\ \mu\text{m}$ 特征源的共同特点

2.1 $21\ \mu\text{m}$ 特征

1989 年首次发现 $21\ \mu\text{m}$ 特征时, Kwok 等人^[1]使用的是 IRAS 的低分辨率光谱(分辨率为 $20\sim 60$), 他们当时判断峰值大约在 $21\ \mu\text{m}$ 处, 因此这个发射特征被称为 $21\ \mu\text{m}$ 特征。10 年后, Volk 等人^[7]利用 ISO 的短波光谱仪数据进行了重新分析(见图 1)。这次光谱覆盖了

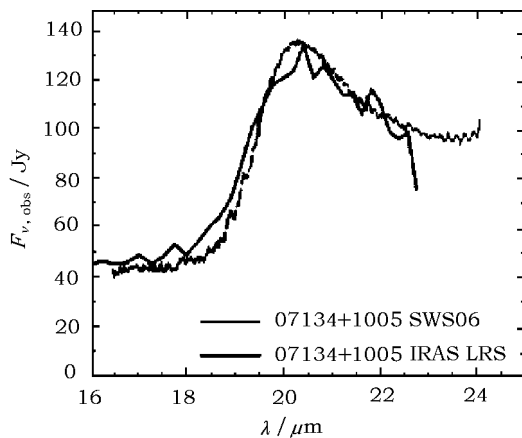


图 1 最强的 $21\ \mu\text{m}$ 特征源 IRAS 07134+1005 的 IRAS 光谱与 ISO 光谱的对照比较^[7]

$2\sim 45\ \mu\text{m}$ 的波长范围, 其中 $16.5\sim 24\ \mu\text{m}$ 波段的分辨率达到了 2000。考虑到所有的 $21\ \mu\text{m}$ 源的光谱中都存在可能源于尘埃的强连续谱, 因此必须从光谱中扣除连续谱才能得到准确的特征轮廓。于是, Volk 等人分别对 $16.5\sim 19.0\ \mu\text{m}$ 和 $22.5\sim 24.0\ \mu\text{m}$ 两段连续谱进行了 5 次多项式函数拟合, 扣除连续谱后得到了 $21\ \mu\text{m}$ 特征的轮廓(如图 2 所示)。最后他们得出如下结论:

(1) 所有源都有非常相似的固有轮廓, 少量偏移可能是由连续谱部分拟合的不确定性导致的;

(2) 在扣除连续谱后, 所有源的峰值都在相同的位置, 即 $\lambda_{\text{max}} = 20.1\ \mu\text{m}$;

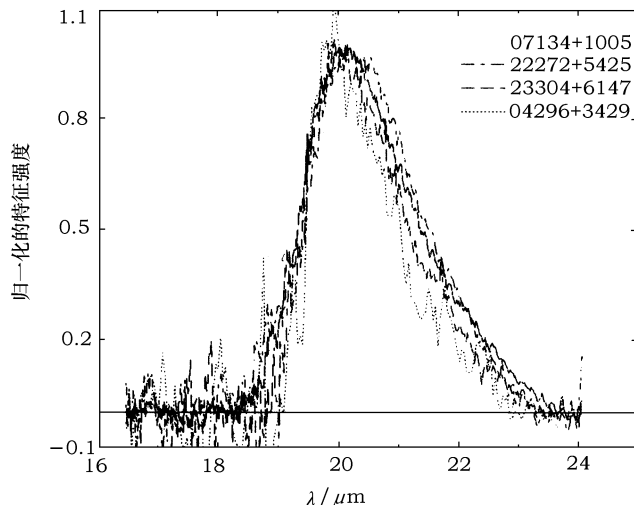


图 2 4 个源的 ISO 光谱扣除连续谱部分之后的光谱轮廓比较 [7]

(3) 整个谱带轮廓光滑, 没有发现任何源于分子吸收带或发射带的亚结构。

虽然上述源的峰值波长并不在 $21\mu\text{m}$ 处, 但习惯上大家仍然把这个特征称为 $21\mu\text{m}$ 特征。从谱线轮廓上可以看出, 整个轮廓并非完全对称, 在蓝端上升较快, 而红端有一个尾巴式的拖曳, 半高全宽约为 $2.2\sim 2.3\mu\text{m}$ 。一般来说, 谱线强度大一点, 这个特征也会宽一点。在最强的 $21\mu\text{m}$ 特征源 IRAS 07134+1005 中, 其 $21\mu\text{m}$ 特征辐射的能量占此源整个红外辐射能量的 8% [8], 而其他源则为 0~7% 不等。

2.2 $21\mu\text{m}$ 特征源的共同特点

到目前为止, 已在 12 个 PPNe 中证认出 $21\mu\text{m}$ 特征 [6], 详见表 1。Hony 等人 [9] 宣布, 他们在两个中心是沃尔夫拉叶星的行星状星云光谱中也发现了 $21\mu\text{m}$ 特征; Volk 等人 [10] 发现两个极端演化的碳星光谱在 $20\mu\text{m}$ 处有微弱的发射, 他们认为这个发射有可能是 $21\mu\text{m}$ 特征。但 Clément 等人 [11] 重新分析了其中一颗碳星的 ISO 光谱后, 认为其中并不存在 $21\mu\text{m}$ 特征, 而另一颗也值得怀疑。因此, 最近发现的 4 个源到目前为止还没有得到普遍承认, 大部分文献也对此提出疑问, 所以我们这里仍只讨论 12 颗 PPNe 源。

$21\mu\text{m}$ 特征源的共同特点如下:

(1) 都处于 PPNe 阶段。恒星演化到 AGB 末期时, 它的部分质量会随着星风抛射出去, 在它的周围形成浓厚的气体和尘埃组成的包层。随着进一步演化, 包层会因膨胀而逐渐变薄, 恒星将会露出它炽热的中心星。我们讨论的 PPNe 阶段 (或称 Post-AGB 阶段) 就已经露出中心星。这些 PPNe 的星周包层离开中心星大约有 10^4 个中心星半径之远, 因此尘埃温度都较低, 一般低于 250 K。

(2) 都是富碳的, 即它们的中心星表面 C/O 比例接近或高于 1:1 [1];

(3) 都是贫金属的, 但光谱中同时也发现有丰富的慢中子过程产生的元素 [14];

(4) 都有很强的红外色余 [1];

(5) 光谱型均为 F 或 G 型 [5]。

如表 1 所示, 在 $21\mu\text{m}$ 源光谱中, 经常还会出现 $30\mu\text{m}$ 特征和 PAH 特征。 $30\mu\text{m}$ 特征

表 1 21 μm 源及其共同特征^[6]

名 称	21 μm	30 μm	光谱型	光学特征	PAH ^注 特征	分子线
02229+6208	中等		G8-K00-Ia	C ₂ , C ₃		CO
04296+3429	强		G0Ia	C ₂ , C ₃ , CN	3.3, 3.4~3.5, 7.7, 11.3	CO, HCN
05113+1347	中等		G8Ia	C ₂ , C ₃ , CN	3.3, 11.3	CO
07134+1005	非常强	中等	F5I	C ₂ , CN	3.3, 6.9	CO, HCN
16594-4656	强					CO
19500-1709	非常弱		F3I			CO, HCN
20000+3239	弱	非常强	G8Ia	C ₂ , CN	7.7, 11.3	CO, HCN
AFGL 2688	非常弱	中等	F5Iae	C ₂ , C ₃ , CN	3.3, 3.4~3.5	CO, HCN
22223+4327	中等		G0Ia	C ₂ , C ₃ , CN		CO, HCN
22272+5435	强	非常强	G5Ia	C ₂ , C ₃	3.3, 3.4~3.5	CO, HCN
22574+6609	中等				7.7, 11.3	CO
23304+6147	非常强	非常强	G2Ia	C ₂ , C ₃ , CN	7.7, 11.3	CO, HCN

注: PAH 为多环芳香烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)。

是指在 AGB 到 PN 阶段的一些恒星光谱 30 μm 处出现的很强的发射特征 (ISO 的高分辨率光谱分辨出它其实是 26 μm 处的较窄发射特征和 30 μm 处的较宽发射特征混合而成的)。它辐射出大量的能量, 通常会占到 PPNe 整个红外辐射能量的 20%, 这说明它的载体由丰度较高的元素组成, 目前比较流行的观点认为它的载体是 MgS。PAH 特征一般是指红外光谱中的 3.3、6.2、7.7、8.6、11.3 μm 发射特征, 这些特征在 21 μm 源的光谱中经常可以看到。Kwok 等人^[12] 曾用 5 种滤光片 (覆盖 11.3、21 μm 及其临近波段) 拍摄了两个 21 μm 源的图像。他们发现不同波段的图像形态没有显著的改变, 这意味着 11.3、21 μm 特征来源于同一时间被抛射出且已混合在一起的物质, 或者是从 AGB 中抛射出的物质经过了化学演化形成的。不同发射特征强度变化关系如表 2 所示。

表 2 从 AGB 到 PN 阶段恒星红外发射特征强度比较^[13]

红外特征 / μm	起 源	碳星	PPNe	PN
3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3	芳香族键的拉伸和弯曲	否	是	很强
宽 21		否	很强	否
宽 30		是	是	是

3 21 μm 特征载体的候选物质

十几年来, 人们对产生 21 μm 特征的物质进行了不断的讨论。他们综合考虑 21 μm 本身特征及其源的特点, 提出这种物质应该满足的一些基本要求: 首先, 21 μm 特征只以发射的形式存在, 还没有在吸收带中被观测到; 其次, 它的半宽相当宽, 大于 2 μm , 这说明这个特征不可能是原子发射线; 最后, 要考虑这种物质在富碳环境下能否产生或者存在, 如果只在 PPNe 中存在, 还必须解释特征的载体物质是如何在 AGB 阶段末期产生出来又是如何在 PN 阶段消失的。

目前, 人们认为 $21\mu\text{m}$ 的候选物质大致可以分为 3 类: 有机分子和单质晶体、氧化物、碳和硅的化合物。

3.1 有机分子和单质晶体

3.1.1 有机分子

考虑到尘埃的温度低, 而 $21\mu\text{m}$ 源又都是富碳的, 有机分子成为最早提出的候选物质。

早在 1990 年, Buss 等人^[15] 就认为, $21\mu\text{m}$ 源光谱中的 $3.3\mu\text{m}$ 、 $6.2\mu\text{m}$ 两处的红外发射特征来源于 PAH, $6\sim 9\mu\text{m}$ 之间的平台和 $12\mu\text{m}$ 的发射带则源于氢化无定形碳 (Hydrogenated Amorphous Carbon, HAC), 因此 $21\mu\text{m}$ 特征可能也由某种类似的有机分子产生。

Webster^[16] 计算了两种足球烯 (C_{60}H_m , $m = 0\sim 60$) 模型, 他认为一个混合的 C_{60}H_m 发出的辐射会产生大量的发射谱线, 这些谱线混合成较宽的发射特征, 其中一个就位于 $19\sim 23\mu\text{m}$ 之间。这与 1989 年 Kwok 等人发现的 $21\mu\text{m}$ 特征相符, 而且还可以解释一些未被证认的红外发射特征。但后来发现这种物质的 $21\mu\text{m}$ 特征的位置与天文上证认出的 $21\mu\text{m}$ 特征峰值并不吻合。

Papoular^[17] 于 2000 年模拟的几种含碳大分子的红外吸收光谱可以用来解释 $21\mu\text{m}$ 源红外光谱的主要特征。他提出光谱中的 $30\mu\text{m}$ 特征是由分子中的 OH (羟基) 导致的; 而 20 、 $26\mu\text{m}$ 特征则是由氧键和替代了 5 环碳原子的氧原子导致的。在包含这三种类型氧原子的大分子中加入 S、N 等杂质原子, 就可以得到与 ISO 观测相符的光谱。遗憾的是, 这种分子在解释 $26\sim 35\mu\text{m}$ 波段的光谱轮廓时并不令人满意。

此外还有一些含碳有机物, 但是它们与天文上观测到的 $21\mu\text{m}$ 特征轮廓不太吻合。Sourisseau 等人^[18] 提出, 尿素 ($\text{OC}(\text{NH}_2)_2$) 混合有机碳颗粒 (提供连续谱部分)、SiC (提供 $11.3\mu\text{m}$ 特征) 在一个冷的延展星周包层环境下, 可以重现两个最著名的 $21\mu\text{m}$ 源 (IRAS 22272、IRAS 07134) 的能谱。Buss 等人^[15] 和 Justtanont 等人^[4] 都认为 $21\mu\text{m}$ 特征的载体应该是 PAH 分子。Grishko 等人^[19] 发现 HAC 光谱中有位于 $21\mu\text{m}$ 处的发射特征。但现在一般认为 PAH 和 HAC 是 $21\mu\text{m}$ 附近产生连续谱的主要物质^[20]。

3.1.2 单质晶体

除有机分子外, 单质的晶体也被认为是可能的载体。

Hill 等人^[21] 研究了实验室中掺氮杂质和用快中子激发的纳米金刚石颗粒的中红外发射带, 发现这种颗粒在 $20\sim 22\mu\text{m}$ 间有发射特征, 而且在 $8\sim 10\mu\text{m}$ 间有更强的发射特征。他们认为可能是掺杂和激发使得金刚石颗粒的结构产生了缺陷, 导致这些红外发射带的出现。于是, 他们推测这种纳米金刚石颗粒有可能就是产生 $21\mu\text{m}$ 特征的物质。

3.2 氧化物

氧化物主要是指铁的氧化物和硅的氧化物, 这里主要讨论铁的氧化物, 硅的氧化物将在硅的化合物部分讨论。

3.2.1 铁的高价氧化物

1990 年, Cox^[22] 通过 IRAS 12 、 $25\mu\text{m}$ 流量与 IRAS/LRS 光谱的比较, 发现在 10 个 HII 区源中都有接近 $21\mu\text{m}$ 的峰值, 发射带宽约为 $5\mu\text{m}$ 。该发射带的辐射能量相当多, 大约占了整个 HII 区红外辐射的 20%。从这种特征在 HII 区中存在的广泛性和它本身的强度, Cox 提出候选者应该是一种较丰富元素组成的物质, 很可能是铁的氧化物。通过光谱比较, 他

认为可能是 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 Fe_3O_4 (见图 3)。

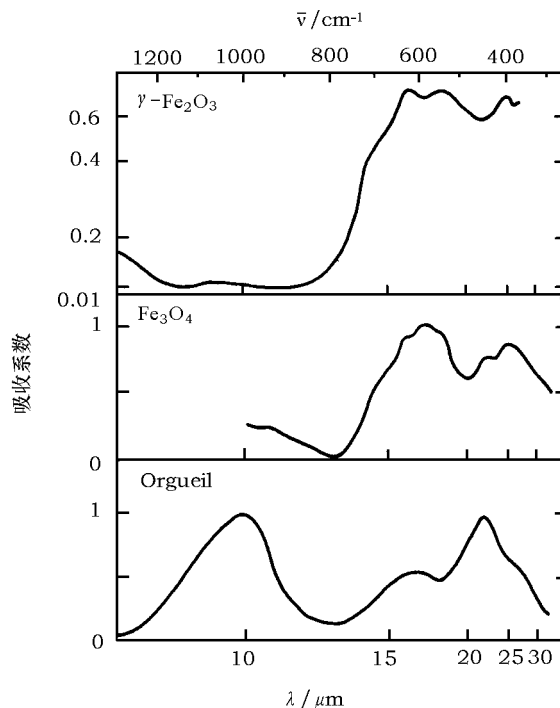


图 3 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 Fe_3O_4 的吸收系数随波长的变化^[22]

其中 Orgueil 为石灰质陨石 (代表天文环境中形成的 Fe_3O_4)。

Oudmajer 和 de Winter^[23] 在 1995 年重新分析了这些 HII 区源的 IRAS 光谱, 发现这些 $21\ \mu\text{m}$ 特征是因为虚假的光谱边缘造成的, 实际的趋势并非如此。后来 ISO 观测也没发现 HII 区有类似特征。这样, HII 区的可能性基本上被排除了。对于铁的高价氧化物本身来说, 它们很可能在富碳的环境下被还原, 因此作为候选物质的可能性很小。

3.2.2 FeO

铁的氧化物在经历了长时间的冷遇之后, 2004 年 Posch 等人^[24] 又提出了 FeO 作为候选物质的可能性。作为一种中间价态的氧化物, FeO 可以被进一步氧化为高价氧化物, 也可以被还原为铁原子, 因此它只能存在于一个窄范围的物理环境和化学条件下。这与 $21\ \mu\text{m}$ 特征目前只在 PPNc 短暂阶段中出现是一致的。FeO 不在 PN 中存在可以解释为 PN 中大部分分子都已经被电离, 而且存在高密度的 UV 光子, FeO 会被还原为铁原子。那么为什么 FeO 在富碳或富氧的 AGB 星中也不存在呢? 这可能是因为这个阶段的星周尘埃温度比 PPNc 要高, 当温度升高时氧停留在铁原子上的几率降低了, 形成 FeO 的可能性减少; 此外也有 FeO 颗粒大小的限制。Roberts^[25] 于 1961 年、Fehlner 等人^[26] 于 1970 年曾指出, 即使在很低的温度下, FeO 也可以在 Fe 的表面快速形成。但要在低温下使尘埃颗粒包含足够的 FeO 成分, Fe 颗粒必须非常小, 大约每个颗粒最多包含 1000 个原子, 半径约为 $2\ \text{nm}$ 。这要求虽然听起来实在太苛刻, 但与 TiC 颗粒 (将在碳化物部分讨论, 要求不多于 125 个原子) 相比已经

是很宽松了。

Posch 等人利用球状 FeO 颗粒的吸收系数, 在不同温度下与天文上的 $21\mu\text{m}$ 特征进行了拟合, 发现温度在 $120\sim 155\text{K}$ 时, 两者吻合得很好, 见图 4。

但 FeO 也并非完美无缺。考虑到 $21\mu\text{m}$ 特征源都是贫金属的, 能否产生足够多的小颗粒铁也是一个很大的问题。此外, 如果尘埃的温度低于 100K , FeO 的 $21\mu\text{m}$ 光谱处的能量就显得太少了, 不足以解释天文上观测到的现象。而根据实验室测量结果, 当温度高于 250K 时, FeO 的光谱半宽又会太宽而且峰值蓝移太多, 也与观测不符。同样, FeO 在 PPNe 的产生和存在也还没有一个十分合理的解释。

3.3 碳、硅化合物

在富碳环境下, C 和 Si 都是较为丰富的元素, 因此它们的化合物产生 $21\mu\text{m}$ 特征的可能性也相当大。尤其是近年来, 有关的讨论主要都集中在这些化合物上, 其中最热门的是 TiC、SiC 等物质。

3.3.1 SiS_2

1993 年 Goebel^[27] 在分析 IRAS 光谱的基础上, 把 $21\mu\text{m}$ 特征归结为 SiS_2 。从光谱上看, 这种物质有两个红外发射带。对于球状颗粒的 SiS_2 , 其两个特征峰值分别位于 16.8 、 $19.8\mu\text{m}$ 处, 其中后一个发射带的半宽为 $1.6\mu\text{m}$ 。这些特点与后来得到的 $21\mu\text{m}$ 特征不符^[28]。如果使用连续椭球分布模型 (Continuous Distribution of Ellipsoids, CDE)^[29], 也就是假设 SiS_2 颗粒不是球形而是椭球状 (其颗粒长半径与短半径之比为一连续分布函数), 则与观测的矛盾会减少 ($\lambda = 20.2\mu\text{m}$, $FWHM = 1.8\mu\text{m}$)。但关键是 $16.8\mu\text{m}$ 处的发射特征在观测上并不存在。如果要减小 $16.8\mu\text{m}$ 处的强度, 除非温度远低于 100K , 但这样的低温是很难满足的。考虑到以上矛盾, SiS_2 基本上可以被排除。

3.3.2 TiC

2000 年, von Helden 等人^[30] 提出将 TiC 团簇 (Titanium Carbide clusters, 每个颗粒包含 $27\sim 125$ 个原子) 作为候选物质。他们在实验室中测到了这种 TiC 纳米颗粒的红外光谱在 $20.1\mu\text{m}$ 处有一个显著的发射特征, 这个特征的轮廓与天文上观测到的 $21\mu\text{m}$ 特征几乎完全一致 (见图 5)。而且在默其森陨石 (Murchison Meteorites) 中发现过中心是纳米尺度的 TiC、表面覆盖着几微米厚石墨的小球状颗粒^[31], 通过同位素分析确认这种颗粒诞生于 AGB 阶段的恒星中。von Helden 等人用观测特征的强度估计了总共所需的 TiC 颗粒质量, 并认为 TiC 是在 PPNe 阶段前的短暂时间 (约 100yr) 内在星风中形成的, 它将在 PPNe 阶段形成 $21\mu\text{m}$ 特征。

2001 年, Henning 和 Mutschke^[32] 发现了 bulk TiC (即比较大的 TiC 颗粒) 的光谱, 但

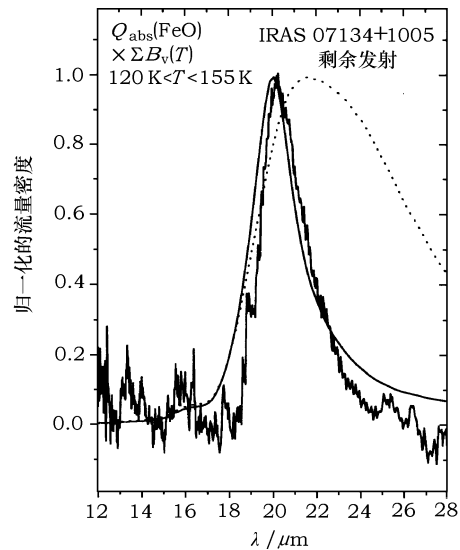


图 4 归一化的 FeO 光谱与观测的 $21\mu\text{m}$ 特征光谱的比较^[26]

图中实线是对球状颗粒的拟合, 点线是连续椭球分布模型 (CDE)^[29]。

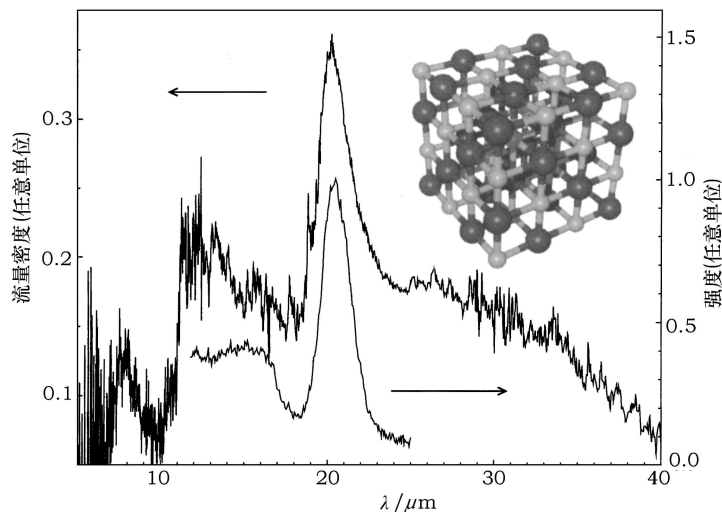


图5 天文上观测到的 $21\ \mu\text{m}$ 特征 (上面部分) 与实验室 TiC 光谱轮廓的比较^[30]

其中右上方是纳米 TiC 颗粒的结构。

没有在相应位置发现 $21\ \mu\text{m}$ 特征。值得注意的是, 这与 von Helden 等人^[30] 的结果并不矛盾, 因为纳米 TiC 与 bulk TiC 的性质不完全一样。在纳米尺度这样的小颗粒中, 传导电子与颗粒边界的碰撞增加, 使得介电函数的虚数部分增大, 其红外发射特征可能就会与大颗粒有显著差别 (参见文献 [33])。

TiC 纳米颗粒谱特征的准确位置和它近乎完美的轮廓拟合使它得到了普遍认同, 但也有人随后提出了质疑, 主要疑点在于 Ti 这种稀有元素的丰度问题。Hony 等人^[20] 提出, 像 TiC 这样的尘埃颗粒, 红外的发射能量来自于它在紫外和可见波段吸收的能量。要使能量平衡, 除非在 PPNe 中形成大量的令人难以置信的 TiC 或 TiC 颗粒, 否则无法在紫外、可见光区域具备强大的吸收能力。Chigai 等人^[34] 将 PPNe 中的 Si/Ti 丰度比与 $11\ \mu\text{m}$ (SiC) 和 $21\ \mu\text{m}$ 特征强度作了比较之后也认为, TiC 的可用总量不够。由于这一结论基于太阳系的 Ti/Si 丰度比, 因此还不是定论。Li^[35] 则根据 Kramers-Kronig 关系^[36] 的限制进一步指出, 不管 TiC 颗粒在紫外、可见光区域的吸光能力有多强, 即使包层中的 Ti 全部形成 TiC 纳米颗粒, 仍然不够所需总量的 1%。

因此, 虽然 TiC 纳米颗粒模型非常吸引人, 但仍然被排除。

3.3.3 SiC

SiC 是富碳星周包层的常见尘埃颗粒, 目前它有两种类型被认为是 $21\ \mu\text{m}$ 特征的候选物质: 掺杂的 SiC 颗粒 (doped-SiC) 和外面覆盖 SiO_2 幔的 SiC 颗粒 (SiC core- SiO_2 mantle particles)。

(1) 掺杂的 SiC 颗粒

2004 年, Speck 和 Hofmeister^[37] 报道了他们对 SiC 红外吸收谱的实验结果。他们发现在某种条件下, SiC 不仅显现出已知的 $11\ \mu\text{m}$ 特征, 同时还存在第二个吸收带, 其峰值大约

在 $20\sim 21\mu\text{m}$ 处。但这个特征只在 $\beta\text{-SiC}$ (立方晶体结构) 和纳米 SiC 颗粒的光谱中出现, 它可能是由于 $\beta\text{-SiC}$ 颗粒中掺杂了 N 或 C 杂质引起的。Speck 和 Hofmeister 还发现, 如果把大小为 $1\mu\text{m}$ 、温度在 $50\sim 60\text{K}$ 的 SiC 颗粒光谱叠加在一个 $100\sim 200\text{K}$ 的黑体辐射上, 其发射特征与天文上观测到的特征相符。他们认为最好的候选者是包含 C 杂质、温度约为 100K 、大小为 $1\mu\text{m}$ 的 $\beta\text{-SiC}$ 和纳米 SiC 颗粒。如果真是这样, $21\mu\text{m}$ 特征的出现就不是因为形成了新的尘埃物质, 而是由于周围环境的改变造成的, 即 AGB 和 PN 周围的环境可能不利于观察到 $21\mu\text{m}$ 特征, 而 PPN 阶段的尘埃温度、快速星风中的尘埃演化为观测 $21\mu\text{m}$ 特征提供了最佳条件。

需要提到的是, SiC 本身最强的红外共振带位于 $11.3\mu\text{m}$ 处, 而典型的 $21\mu\text{m}$ 特征源中的 $21\mu\text{m}$ 特征要比 $11.3\mu\text{m}$ 特征强得多。如果认为两个特征的载体都是 SiC 颗粒, 就必须考虑它们之间的相互制约问题。2005 年, Jiang 等人^[38] 根据 SiC 的光学常数, 计算了这两个红外发射特征的强度。结果显示, 如果要使两个特征的强度比与观测一致, 那么需要的 $21\mu\text{m}$ 共振带就太强了, 这与现有的实验数据不符。由此可见, SiC 入选的可能性也值得怀疑。

(2) 覆盖 SiO_2 幔的 SiC 颗粒

2004 年, Posch 等人^[24] 提出将外面覆盖 SiO_2 包层的 SiC 颗粒作为 $21\mu\text{m}$ 特征的候选物质。由于颗粒大小、形状的不同, SiC 纳米颗粒会有一个位于 $10.8\sim 12.4\mu\text{m}$ 之间的强红外共振带。但如果 SiC 颗粒的表面被部分氧化后, 它的光谱会在 9 、 $21\sim 22\mu\text{m}$ 处产生额外的发射带。这个发射带可能是 SiO_4 四面体的伸缩所致。当尘埃温度在 120K 左右时, 这种表面覆盖 SiO_2 幔的 SiC 颗粒的光谱在 $20\mu\text{m}$ 处存在一个强发射特征, 与观测谱相符 (见图 6); 而 $11\mu\text{m}$ 处发射特征的削弱可以用尘埃温度低导致黑体谱峰值红移来解释。

问题是, 在此温度下, SiC 的 $20\mu\text{m}$ 发射特征的半宽只有 $1.9\mu\text{m}$, 比观测小了 $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$ 。如果使用 CDE 模型^[29] 的话, 半宽会宽一些。但麻烦在于, 无论如何改变尘埃温度和 CDE 模型, 光谱的红端下降处都有一个与观测不符的平台。

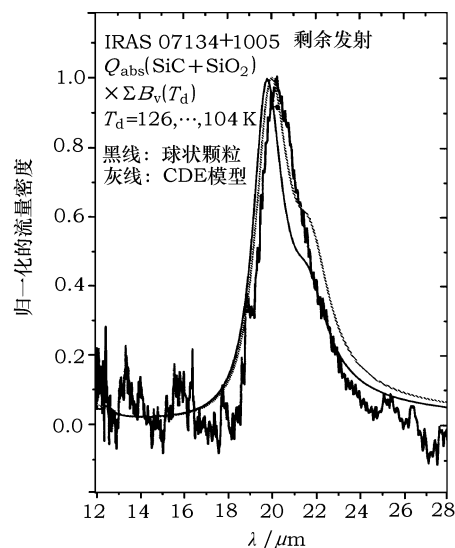


图 6 归一化后的 SiC+ SiO_2 颗粒模型的发射谱^[24] 这里假设了 IRAS 07134+1005 的尘埃壳层密度分布服从 $1/r^2$ 规律, 而温度分布则是由辐射平衡规律推出来的。

4 展 望

到目前为止, 所有已提出的 $21\mu\text{m}$ 特征的候选物质都不能完全满足条件, 还有待于进一步讨论。当然, 实验室工作会起到关键作用, 因为新物质的提出和对原有候选者的检验都依赖于实验; 另一方面, 需要对现有物质进行检验, 从各方面的限制条件着手, 对它们进行讨论。前面所提到的用 Ti 丰度来排除 TiC 就是个成功的例子; 而对于 SiC, 也已经通过现有数据对

其 21 μm 处的共振强度进行了强有力的限制。

此外,有必要寻找更多的 21 μm 源。已经证认的源大多是根据最初的 4 个源的共同特点,对可能的目标进行筛选,然后再进行高分辨率光谱分析后证认的。这样做的确目标性强,大大提高了证认的几率,但也不免在源的特征中加入一些人工挑选的因素。因此,后续工作中,应当扩大范围,在更多类型的源中寻找 21 μm 特征。

21 μm 特征源的光谱中,还有一系列其他显著的光谱特征,如 30 μm 特征; 3.3、6.2、7.7、8.6、11.3、12.7 μm 特征等。它们有些已经被证认,有些和 21 μm 特征一样仍是未解之谜。这些特征不仅出现在 PPNe 中,在 PN 和富碳星中也有发现^[13]。讨论所有这些特征的共同特点^[12],对分析它们和 21 μm 特征的候选物质具有重要意义。同时利用这些物质的辐射性质和一些已知源的天体物理参数,可以建立模型来重构这些源的红外光谱,并由此获得 PPNe 演化阶段的更多信息。

参考文献:

- [1] Kwok S, Volk K, Hrivnak B J. *ApJ*, 1989, 345: L51
- [2] Omont A, Moseley S H, Cox P *et al.* *ApJ*, 1995, 454: 819
- [3] Kwok S, Hrivnak B J, Geballe T R. *ApJ*, 1995, 454: 394
- [4] Justtanont K, Barlow M J, Skinner C J *et al.* *A&A*, 1996, 309: 612
- [5] Hrivnak B J. *ApJ*, 1995, 438: 341
- [6] Kwok S, Volk K, Hrivnak B J. *IAU Symp.*, 1999, 191: 297
- [7] Volk K, Kwok S, Hrivnak B J. *ApJ*, 1999, 516: L99
- [8] Hrivnak B J, Volk K, Kwok S. *ApJ*, 2000, 535: 275
- [9] Hony S, Waters L B F M, Tielens A G G M. *A&A*, 2001, 378: L41
- [10] Volk K, Xiong G-Z, Kwok S. *ApJ*, 2000, 530: 408
- [11] Clément D, Mutschke H, Klein R *et al.* *ApJ*, 2005, 621: 985
- [12] Kwok S, Volk K, Hrivnak B J. *ApJ*, 2002, 573: 720
- [13] Kwok S. *Nature*, 2004, 430: 985
- [14] van Winckel H, Reyniers M. *A&A*, 2000, 354: 135
- [15] Buss R H Jr, Cohen M, Tielens A G G M *et al.* *ApJ*, 1990, 365: L23
- [16] Webster A. *MNRAS*, 1995, 277: 1555
- [17] Papoular R. *A&A*, 2000, 362: L9
- [18] Sourisseau C, Coddens G, Papoular R. *A&A*, 1992, 254: L1
- [19] Grishko V I, Tereszchuk K, Duley W W *et al.* *ApJ*, 2001, 558: L129
- [20] Hony S, Tielens A G G M, Waters L B F M *et al.* *A&A*, 2003, 402: 211
- [21] Hill H G M, Jones A P, d'Hendecourt L B. *A&A*, 1998, 336: L41
- [22] Cox P. *A&A*, 1990, 236: L29
- [23] Oudmaijer R D, de Winter D. *A&A*, 1995, 295: L43
- [24] Posch Th, Mutschke H, Andersen A. *ApJ*, 2004, 616: 1167
- [25] Roberts W M. *Trans. Faraday Soc.*, 1961, 57: 99
- [26] Fehlner F P, Mott N F. *Oxid Met.*, 1970, 2: 59
- [27] Goebel J H. *A&A*, 1993, 278: 226
- [28] Kraus G F, Nuth J A III, Nelson R N. *A&A*, 1997, 328: 419
- [29] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, New York: Wiley, 1983: 353
- [30] von Helden G, Tielens A G G M, van Heijnsbergen D *et al.* *Science*, 2000, 288: 313

- [31] Bernatowicz T J, Cowsik R, Gibbons P C *et al.* ApJ, 1996, 472: 760
- [32] Henning Th, Mutschke H. Spectrochim. Acta., 2001, 57: 815
- [33] Li A. ASP Conf. Ser., 2004, 309: 417
- [34] Chigai T, Yamamoto T, Kaito C *et al.* ApJ, 2003, 587: 771
- [35] Li A. ApJ, 2003, 599: L45
- [36] Purcell E M. ApJ, 1969, 158: 433
- [37] Speck A K, Hofmeister A M. ApJ, 2004, 600: 986
- [38] Jiang B W, Zhang K, Li A. ApJ, 2005, 630: L77

The 21 Micron Feature in the Circumstellar Envelopes Around Highly Evolved Stars

ZHANG Ke¹, JIANG Bi-wei¹, LI Ai-gen^{2,3}

(1. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, 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: The origin of the so-called 21 micron feature which is prominent in the infrared (IR) spectra of some carbon-rich proto-planetary nebulae (PPNe) has been a mystery since its first detection in 1989. So far, this feature has been detected in 12 PPNe (and possibly in two planetary nebulae associated with Wolf-Rayet central stars). This feature has a similar intrinsic spectral shape and peaks at the same wavelength ($20.1\ \mu\text{m}$) in all PPNe sources. These sources have quite uniform properties: they are mostly metal-poor, carbon-rich F and G supergiants with IR excesses and overabundant s-process elements. A large number of candidate carriers for this feature have been proposed in the past decade, including hydrogenated fullerenes, polycyclic aromatic hydrocarbon, hydrogenated amorphous carbon, diamonds, synthetic carbonaceous macromolecules, amides (especially urea), iron oxides ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , FeO), SiS_2 , titanium carbide nanoclusters, doped SiC , and SiC core- SiO_2 mantle particles. But none of them has been widely accepted. In this paper we review the observational characteristics of this feature and the proposed candidate materials.

Key words: astrophysics; 21 micron feature; review; circumstellar matter; AGB; post-AGB; stars