

文章编号: 1000-8349(2007)03-0226-10

# 星际红外消光律

高 健, 姜碧涛

(北京师范大学 天文系, 北京 100875)

**摘要:** 该文综述了星际尘埃在红外波段的消光律。现有的观测表明, 在  $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$  范围内的星际消光可以近似用幂律函数来拟合, 而对  $5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$  范围内的星际消光争论比较多, 但现在已明确该范围内消光律是随视线方向的变化而变化, 这与以往认为在整个  $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$  范围内星际消光为各处一致的结论是相左的。在  $8 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 30 \mu\text{m}$  范围内的消光主要由硅酸盐在  $9.7 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$  处的吸收特征所决定, 其中  $9.7 \mu\text{m}$  处的吸收所引起的消光强度 (相对可见光波段消光) 在太阳邻近弥漫星云和银心方向有较大变化, 其原因仍有争论; 同时, 由脂肪族碳氢化合物的 C-H 键伸缩振动引起的在  $3.4 \mu\text{m}$  处的谱特征强度和  $9.7 \mu\text{m}$  硅酸盐谱特征类似, 在太阳邻近弥漫星云和银心方向有较大变化。在  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  以上的远红外范围, 由于观测的限制, 人们主要利用尘埃红外辐射理论来间接研究消光率, 不同尘埃模型给出的红外辐射明显地不同, 对  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  的红外观测将提高该范围内消光律的准确性。

**关键词:** 天体物理学; 星际消光; 综述; 星际介质; 红外; 硅酸盐

**中图分类号:** P129      **文献标识码:** A

## 1 引 言

星际空间中充斥着总量占星系质量约 10% 的气体 (原子、分子和离子) 和尘埃 (固体微粒), 遥远恒星发出的电磁辐射被星际尘埃吸收和散射, 使得星光强度减弱, 这便是我们所熟知的星际消光。电磁散射理论告诉我们, 固体微粒对波长与其尺寸相当的电磁波散射和吸收最为显著。由于星际尘埃具有从几 Å 到几  $\mu\text{m}$  的尺寸分布<sup>[1]</sup>, 它们对星光的吸收和散射随波长的变化而有明显地不同, 如可见光和紫外波段的消光比红外波段的强, 从而导致星际红化。

星际消光随波长的分布, 习惯被称为“消光曲线”或“消光律”。对消光律的研究在两方面具有重要的意义: 1) 只有了解了消光律才能够正确地还原天体真实的能谱分布或者测光结果; 2) 通过对消光律的理论研究能够得到有关星际尘埃的尺寸分布、化学成分、几何结构等信息<sup>[1-3]</sup>。紫外和可见光波段的消光律因其重要性 (因为星际消光在可见光、紫外波段比

---

收稿日期: 2006-05-23; 修回日期: 2007-01-15

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (10603001)

红外强很多) 已经得到了大量的研究, 同时结果也较为清晰: 1) 消光的强度在远紫外随波长的倒数 ( $\lambda^{-1}$ ) 陡峭地加强; 2) 在波长为 2 175 Å 处有较大的驼峰; 3) 从可见光波段到远紫外的消光是随环境的变化而变化的 (见图 1(a))。Gardelli 等人<sup>[4]</sup> 在 1989 年的研究表明, 紫外和可见光波段的消光随环境的变化可以用单参量  $R_V$  ( $R_V \equiv A_V/E(B-V)$ ) 的函数来表征,  $A_\lambda$  表示 V 波段的消光,  $E(\lambda_1 - \lambda_2)$  表示  $(\lambda_1 - \lambda_2)$  的色余。从图 1(b) 可以看出在紫外和可见光波段, 不同的  $R_V$  值对应的消光曲线在这 2 个波段内区别较大, 说明不同的视线方向上 (对应着不同的星际环境), 紫外和可见光波段的消光律有着明显地不同<sup>[4-7]</sup>。其结果是利用 Fitzpatrick 修正后的公式<sup>[10]</sup> 计算而得到的。值得注意的是,  $R_V$  作为一个单参量描述从近红外到远紫外的整个消光曲线似乎并不普适, 对个别天区有偏差, 如 HD210121 方向上的高银纬分子云天区的测量结果与  $R_V=2.1$  的解析消光曲线有明显的差异<sup>[11]</sup>。

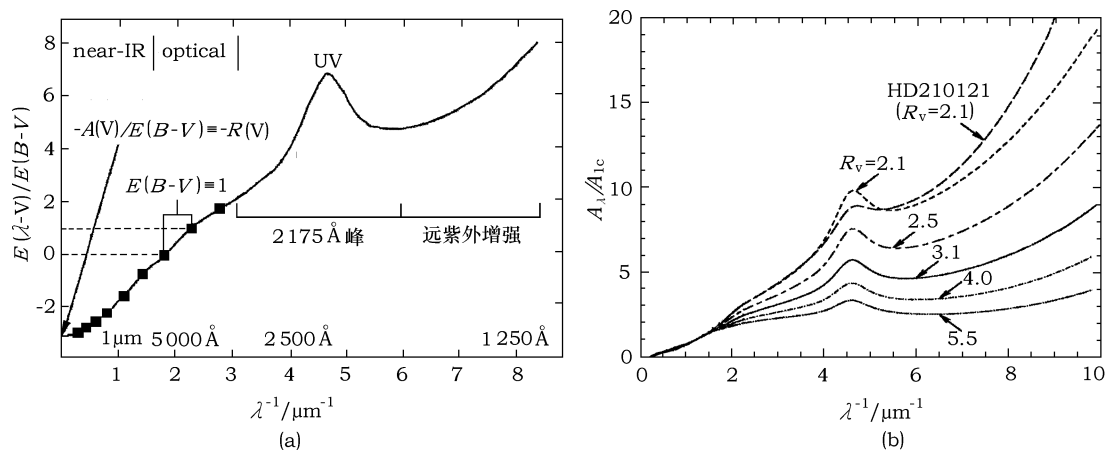


图 1 紫外和可见光波段消光曲线及其变化<sup>[6,9]</sup>

(a) 银河系平均消光律 ( $R_V=3.1$ )<sup>[9]</sup>; (b) 显示了不同的  $R_V$  值对应的不同消光曲线<sup>[6]</sup>

要获得星际消光的绝对值比较难, 因为要对观测源的内禀能谱分布和距离都有准确的测定。但是测定  $A_\lambda$  随波长  $\lambda$  的变化 (选择消光) 相对而言更容易一些, 由于它不依赖于距离的测量, 一般可以通过比对方法 (即将 2 个具有相同光谱型、一个受到消光而另一个没有受到消光的恒星能谱进行比对) 的方法测定天体的色余来得到<sup>[8]</sup>。实际中对消光律的描述可以用  $E(\lambda - V)/E(B - V)$ 、 $A_\lambda/E(B - V)$ 、 $A_\lambda/A_V$ 、 $A_\lambda/E(J - K)$ 、 $A_\lambda/A_K$ 、 $A_\lambda/A_I$  同波长  $\lambda$  的关系给出 (后 3 者主要用于红外波段):

其物理内涵实际是一样的, 如:

$$\frac{E(\lambda - V)}{E(B - V)} = \frac{A_\lambda - A_V}{A_B - A_V} = \left( \frac{A_\lambda}{A_V} - 1 \right) R_V,$$

或

$$\frac{A_\lambda}{E(B - V)} = R_V \left( \frac{A_\lambda}{A_V} \right).$$

本文之前, 已经有很多关于星际消光研究的专著和综述论文。Spitzer<sup>[12]</sup> 在 1978 年的专著中已经系统地介绍了星际尘埃和星际物理过程的基础知识。也可参阅文献 [6,9,13-16]。

## 2 红外消光律

相对紫外和可见光波段而言, 红外波段的消光还不是很清楚。IRAS (Infrared Astronomical Satellite) 发射之后 20 多年里, 随着红外探测技术和红外空间天文的发展, 红外观测资料得到了迅速增加: ISO(红外空间天文台)、MSX (Midcourse Space Experiment) 卫星、Spitzer 空间红外望远镜和 AKARI(Astro-F 红外卫星) 等红外空间任务的顺利实施, 以及地面近红外巡天项目(如 DENIS(Deep Near Infrared Survey)、2MASS(Two Micron All Sky Survey), 都为开展红外消光律的研究提供了大量高质量的观测数据。但红外波段的消光比紫外和可见光波段要弱得多(见图 1), 而且卫星的观测也大多局限在几个波段。ISO 主要在波长为  $7 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$  的 2 个波段作测光观测; MSX 也只在 B1( $4.29 \mu\text{m}$ ,  $4.22\sim 4.36 \mu\text{m}$ )、B2( $4.35 \mu\text{m}$ ,  $4.24\sim 4.45 \mu\text{m}$ )、A( $8.28 \mu\text{m}$ ,  $6.8\sim 10.8 \mu\text{m}$ )、C( $12.13 \mu\text{m}$ ,  $11.1\sim 13.2 \mu\text{m}$ )、D( $14.65 \mu\text{m}$ ,  $13.5\sim 15.9 \mu\text{m}$ )、E( $21.34 \mu\text{m}$ ,  $18.2\sim 25.1 \mu\text{m}$ ) 6 个波段上有观测; 波长大于  $30 \mu\text{m}$  的红外观测则只在 Spitzer 空间红外望远镜上天后才开始增多; IRAS 在  $60 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$  也有观测。目前对中红外消光律仍然有很大的争论, 缺乏完整的红外消光曲线, 因此对中红外和远红外波段的消光律还需要更多的探索, 特别是需要尽快弥补我们在远红外波段观测的不足。另外, 红外消光是否随视线方向(不同的星际环境)而变化的问题也是值得探讨的。

红外波段的消光包括连续谱消光和特征谱消光, 其大致趋势如图 2 所示<sup>[6]</sup>。本文按照  $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 30 \mu\text{m}$  和  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  这 4 个波段分别进行讨论。

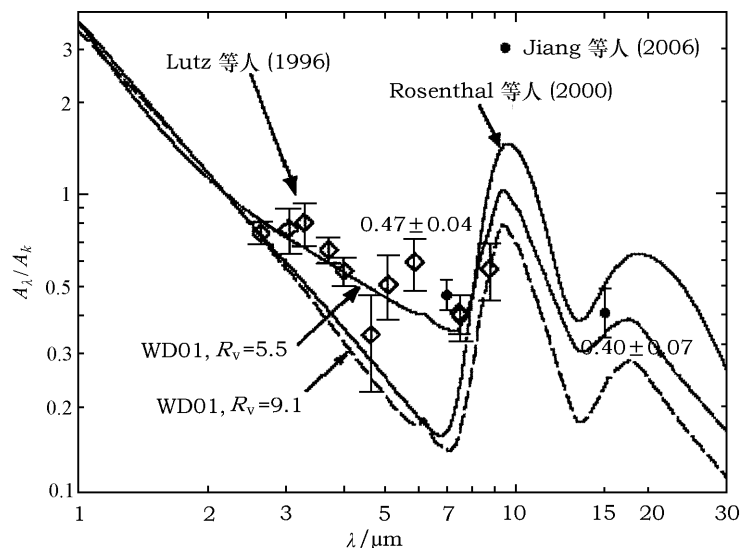


图 2 红外波段消光曲线<sup>[6]</sup>

### 2.1 $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$ 波段

现有的观测表明, 在  $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$  的波段内, 消光主要源于连续谱消光, 并且按照幂律谱的形式随波长下降, 即

$$A_\lambda \propto \lambda^{-\beta}, \quad 1.6 < \beta < 1.8.$$

在很长一段时间内, 人们得到的谱指数  $\beta$  在 1.6~1.8 之间, 如  $\beta \approx 1.61$  [20]、 $\beta \approx 1.70$  [21]、 $\beta = 1.85$  [22]、 $\beta = 1.75$  [13]、 $\beta \approx 1.8$  [23]、 $\beta \approx 1.8$  [24]、 $\beta \approx 1.70$  [25,26]、 $\beta = 1.65$  [27]。因而人们认为在  $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$  范围内的消光律是普适的, 不随星际环境而改变 [13,6,20,28]。但最近, Nishiyama 等人 [29] 却对此提出了质疑, 他们的结果可以很好地用谱指数为  $1.99 \pm 0.02$  的幂律函数来拟合, 因此, 他们认为这个波段内的消光曲线也是随着环境而改变。

## 2.2 $5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$ 波段

虽然 Nishiyama 等人 [29] 得到的结果偏大, 但因为大多数  $\beta$  值都比较接近,  $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$  的消光律的争论并不太多。对于  $5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$  范围内的消光律, 争论就热烈得多。Draine [13] 认为消光在这部分将随波长的增加按照  $A_\lambda \propto \lambda^{-1.75}$  的规律减小 (直到受硅酸盐吸收特征影响的  $6 \mu\text{m}$ )。Lutz 等人 (1996) [18] 仔细分析了 ISO 的 SWS (Short Wavelength Spectrometer) [30] 光谱仪在银心附近的观测, 利用 H 原子的复合线强度比计算了银心 Sgr A\* 方向上的消光。他们发现在  $3 \sim 8 \mu\text{m}$  波段内的消光并不像 Draine [13] 模型期望的那样随波长增加按  $A_\lambda \propto \lambda^{-1.75}$  的规律减少, 而是显得较为平坦 (见图 2), 尤其缺少模型预计在  $7 \mu\text{m}$  左右出现的极小值; 并且和银河系的平均  $R_V = 3.1$  所代表的消光曲线也不一致, 却与  $R_V = 5.5$  对应的消光曲线吻合 [1] (见图 2)。Lutz [31] 于 1999 年进一步证实了他们的结果。与此不同, 利用猎户座分子云  $\text{H}_2$  分子的振转谱线和 H 原子的复合谱线, Bertoldi 等人 [25] 和 Rosenthal 等人 [26] 得到的结果却与 Draine [13] 得到的理论比较吻合。同样 Hennebelle 等人 (2001) 的结果 [32] 也和 Draine 的理论 [13] 比较一致。2005 年, GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire) 巡天项目利用 Spitzer 红外空间望远镜对银道面的 2 个天区进行了观测, Indebetouw 等人 [27] 所得到的  $3 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$  的消光结果却与 Lutz 等人得到的结果一致 (见图 3)。

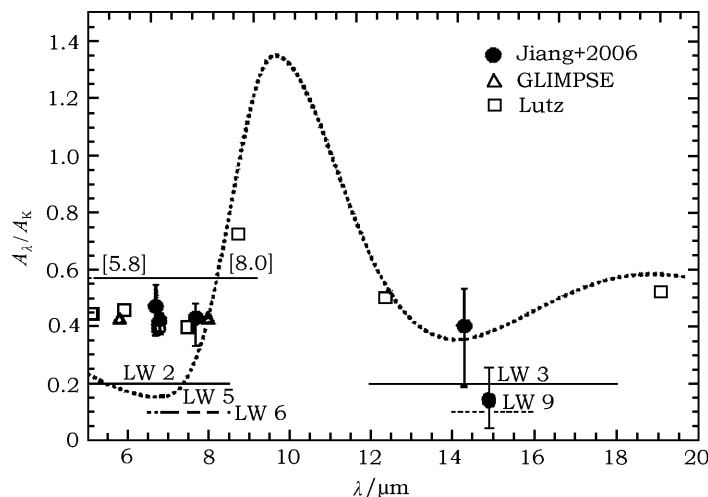


图 3 红外消光结果比较图 [19]

利用 ISOGAL (ISO 的一个重点项目, 对银道面内的 200 多个天区在  $7 \mu\text{m}$  和  $15 \mu\text{m}$  进行成像观测 [33]) 和近红外巡天 2MASS (在 J、H、Ks 3 个波段的全天测光巡天观测 [34]) 的相关数据, Jiang 等人 [19] 得到了 129 个银道面天区在  $7 \mu\text{m}$  附近的消光结果, 发现  $A_{7\mu\text{m}}/A_{Ks}$

不是常数,而是呈现出高斯分布,其峰值在 0.47 左右,与 Lutz 等人得到的结果<sup>[18]</sup>比较吻合(见图 3);而且,  $A_{7\mu\text{m}}/A_{\text{Ks}}$  在不同天区,即不同的视线方向呈现出变化,意味着这个波段的消光律很有可能随视线方向而变化<sup>[19,35]</sup>。

这些结果表明对于  $5\mu\text{m} \leq \lambda \leq 8\mu\text{m}$  范围内的消光律还没有统一的认识,除了研究方法不同可能带来的误差以外,也可能意味着红外消光曲线随环境的不同而有变化,从而暗示引起中红外消光的星际尘埃的分布和成分可能是不均匀的。尘埃尺寸分布的变化一定起到了作用, Draine<sup>[6]</sup>发现,用  $R_V=5.5$  的星际尘埃模型可以解释 Lutz 观测到的  $3\sim 8\mu\text{m}$  范围内的平坦消光曲线(见图 2)。红外波段的波长比星际尘埃的典型尺度(约为  $0.1\mu\text{m}$ )大得多,而尘埃消光最有效的波长是与尘埃大小相当的波长  $\lambda \approx 2\pi r$  ( $r$  为球形尘埃颗粒的半径),因此致密区域内尘埃尺度的小幅度增大不会对红外消光产生明显的影响。Jiang 等人<sup>[19]</sup>并没有发现  $A_{7\mu\text{m}}/A_{\text{Ks}}$  在相对致密天区方向的系统性增加,也没有发现随银经或者银纬的系统性变化。

### 2.3 $8\mu\text{m} \leq \lambda \leq 30\mu\text{m}$ 波段

在  $8\sim 30\mu\text{m}$  的波段内,连续消光进一步减弱,重要性越来越小,但是特征谱消光却很强,主要是中心波长在  $9.7\mu\text{m}$  和  $18\mu\text{m}$  的 2 处特征。观测表明:在冷的富氧恒星的外流物质中有  $9.7\mu\text{m}$  和  $18\mu\text{m}$  特征,而在冷的富碳恒星的外流物质中却没有。一般认为这 2 个谱特征是由于硅酸盐的吸收造成的,富氧恒星的外流物质大部分是致密的硅酸盐尘埃,而富碳恒星中的 O 原子与 C 原子结合形成 CO,不能形成硅酸盐<sup>[6]</sup>。 $9.7\mu\text{m}$  特征是由 Si-O 键的伸缩振动引起的, $18\mu\text{m}$  特征是由 O-Si-O 键的弯曲振动引起的。 $9.7\mu\text{m}$  处的消光特征轮廓宽而没有精细特征,产生这样的消光特征表明星际空间中的硅酸盐大多是以非结晶硅酸盐的形式存在的<sup>[6,37]</sup>,因为结晶硅酸盐具有有序的晶格结构,在  $9\sim 40\mu\text{m}$  较宽的范围内有许多尖锐且很窄的特征线,如在  $10\mu\text{m}$  附近的吸收谱窄而尖锐,其峰值波长约为  $11.3\mu\text{m}$ ;而非结晶的硅酸盐在  $9.7\mu\text{m}$  附近有宽而“光滑”的吸收特征,没有精细特征<sup>[42]</sup>。Li 和 Draine<sup>[38]</sup>建立的尘埃模型表明在星际空间中最多有 5% 的硅酸盐是以晶体形式存在的,其他的主要是非结晶的硅酸盐; Demyk 等人<sup>[39]</sup>对 2 个原恒星的研究也表明,最多有 2% 的硅酸盐是以晶体形式存在的。Kemper 等人<sup>[40]</sup>认为星际空间的结晶硅酸盐最多为 0.4%<sup>[40]</sup>,但最近他们发现结果有问题,现将结晶硅酸盐的质量比上限改为约小于等于 2%。然而也有研究者认为结晶硅酸盐的比例可以更多,如 Bowey 和 Adamson<sup>[41]</sup>认为星际中的硅酸盐大部分是以结晶形式存在的。

一般来说, $8\sim 30\mu\text{m}$  波段内由于硅酸盐的吸收所产生的这 2 个消光谱特征在强度和轮廓 2 个方面都显示了随着视线方向的变化。

对于  $9.7\mu\text{m}$  的硅酸盐特征有较多的观测,结果表明,在不同的星际环境或者不同的视线方向上, $9.7\mu\text{m}$  特征轮廓的 FWHM(Full Width Half Maximum, 半峰全宽)有所不同。一般来说,弥漫星际介质区域中的  $9.7\mu\text{m}$  特征比致密分子云区域的要窄一些。分子云中产生的硅酸盐吸收特征,可用较宽的 Trapezium 年轻恒星型轮廓来拟合;而在弥漫星云视线方向上,则可用较窄的  $\mu\text{Cep}$  晚期恒星型轮廓比较好地拟合<sup>[6,13,43]</sup>。Roche 和 Aitken<sup>[44,45]</sup>认为在弥漫星云中,对应银心视线方向上,硅酸盐的吸收产生的消光轮廓与仙王座 M 型超巨星  $\mu\text{Cep}$  星周包层尘埃产生的发射轮廓类似,其  $FWHM \approx 2.4\mu\text{m}$ <sup>[13,46]</sup>;另一方面,致密分子云中的  $9.7\mu\text{m}$  谱特征相对更宽,其轮廓与猎户座四边形中年轻恒星周围尘埃的发射轮廓很接近,

其  $FWHM \approx 3.4 \mu\text{m}$  [13,47]。但是, 也有例外的情况, 如 Rieke 和 Lebofsky [20] 发现银心方向弥漫星云的  $9.7 \mu\text{m}$  谱特征的  $FWHM \approx 3.2 \mu\text{m}$ , 比 Roche 和 Aitken [45] 得到的  $\mu\text{Cep}$  型轮廓要宽得多; Pegourie 和 Papoular [48] 在致密分子云视线方向上得到的硅酸盐谱特征轮廓的  $FWHM \approx 2.2 \mu\text{m}$ , 比 Roche 和 Aitken [45] 在弥漫星云方向上得到的  $\mu\text{Cep}$  型轮廓还要窄 ( $FWHM \approx 2.4 \mu\text{m}$ ) [13]。这表明硅酸盐吸收特征的轮廓随环境的变化规律是不确定的 [13]。

除轮廓以外,  $9.7 \mu\text{m}$  特征的强度也随视线方向而变化。观测表明在银心附近和太阳系附近弥漫星云方向上, 光学波段的消光与  $9.7 \mu\text{m}$  处的光学厚度的比率 ( $A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$ ) 相差了近 2 倍 (见表 1)。 $A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$  的变化表明应该将硅酸盐同其他引起可见光和红外消光的尘埃成分区别开来。Roche 和 Aitken [45] 认为这种现象是由于银心附近富碳星 (产生碳颗粒) 较少而富氧恒星 (产生硅酸盐) 较多引起的。但是由脂肪族碳氢化合物中的 C-H 键伸缩振动引起的  $3.4 \mu\text{m}$  处的谱特征也有这样的观测现象 (见表 1), 因此以银心方向上碳星减少来解释  $A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$  的变化的观点又变得值得商榷了。不管原因是什么, 这样的观测现象意味着硅酸盐尘埃颗粒在弥漫星际介质中的分布可能是不均匀的。

表 1 9.7  $\mu\text{m}$  和 3.4  $\mu\text{m}$  处的谱特征

	$A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$	$A_V/\tau_{3.4\mu\text{m}}$	参考文献
银心方向	$8 \pm 3$		[53]
	9		[45]
		$150 \pm 20$	[54]
太阳附近的弥漫星云	18.5		[44]
	$18.5 \pm 2$		[6]
		$250 \pm 40$	[54]
		$240 \pm 40$	[55]

研究  $18 \mu\text{m}$  特征的轮廓和强度主要基于对银心的消光观测 [49] 和尘埃的红外发射观测 [13]。Volk 和 Kwok [50] 估计 AGB 恒星周围的尘埃  $A_{18\mu\text{m 峰值}}/A_{9.7\mu\text{m 峰值}} \approx 0.5$ 。对于银心方向, McCarthy 等人 [49] 得到的结果是  $\tau_{18\mu\text{m}}/\tau_{9.7\mu\text{m}} \geq 0.6$ , Whittet [51] 得到的结果为  $\tau_{18\mu\text{m}}/\tau_{9.7\mu\text{m}} \approx 0.4$ 。 $18 \mu\text{m}$  处特征的确定相对比较困难, 因为在该轮廓范围内消光较小, 很难从连续背景中凸现出来 [52]。

#### 2.4 $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$ 范围

在  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  范围内, 通常由于消光值太小而无法直接测量得到。例如, 在银心视线方向上, 可见光波段的消光  $A_V$  约为  $30 \sim 35 \text{ mag}$ ,  $E(J-K)$  约为  $5 \text{ mag}$ , 而在  $30 \mu\text{m}$  处的消光估计仅仅约为  $0.3 \text{ mag}$ 。而且星际尘埃自身红外辐射的峰值也在这个波段内, 因此难以通过观测来研究这部分的消光律。虽然窄的吸收特征也能够被测量出来, 但是连续消光的确定却极为困难。目前的研究基本上是利用不同温度的星际尘埃的红外发射来估计星际介质在这个波段内的光学厚度, 以此推断相应的消光律, 但这又要求了解尘埃的温度。同时对于成团的分子云, 确定分子云的柱密度也是非常困难的 [13]。

由于这个波段内的消光与尘埃模型密切相关, 而现在提出的尘粒模型还不能统一, 因此对于  $30 \mu\text{m}$  直到  $100 \mu\text{m}$  范围内的消光律仍然还不明确。有关星际尘埃颗粒在远红外的发射

的模型比较多, 如 Draine 和 Lee 的石墨 - 硅酸盐模型<sup>[56]</sup>、Rowan-Robinson 模型<sup>[57]</sup>、Desert-Boulanger 和 Puget 模型<sup>[58]</sup>、Li 和 Greenberg 模型<sup>[3]</sup>、Li 和 Draine 模型<sup>[59-61]</sup>等。这些模型大多都考虑石墨、硅酸盐成分, 最近的模型加入了部分 PAHs(多环芳香烃)成分, 如 Desert-Boulanger 和 Puget 模型<sup>[58]</sup>、硅酸盐 - 石墨 - PAHs 模型<sup>[1,60,61,64]</sup>。

随着 Spitzer 空间望远镜和 AKARI 卫星的上天, 它们在  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  范围的观测将弥补我们在远红外数据的不足, 从而为星际介质尘粒模型提供更多的观测信息, 也将促进  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  范围内红外消光律的研究。

## 2.5 红外消光中的其他特征

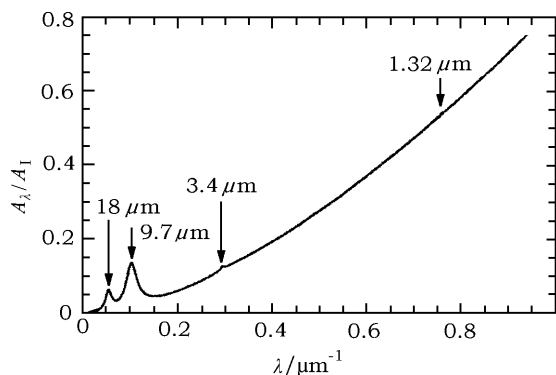


图 4 消光曲线在红外波段的主要特征<sup>[37]</sup>

星际红外消光中除了有  $9.7 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$  处 2 个由于硅酸盐吸收引起的非常显眼的谱特征外, 还有其他的谱特征(见图 4): 由脂肪族碳氢化合物 C-H 键的伸缩振动引起的  $3.4 \mu\text{m}$  特征<sup>[54,55]</sup>, 由水冰中 O-H 键的伸缩振动引起的  $3.1 \mu\text{m}$  特征<sup>[37]</sup>等。

水冰中 O-H 键的伸缩振动引起的  $3.1 \mu\text{m}$  特征一般只在致密分子云方向上出现<sup>[6,37]</sup>。Whittet 等人<sup>[21]</sup>发现在金牛座暗星云方向,  $3.1 \mu\text{m}$  特征的光学厚度大约为

$$\Delta\tau_{3.1\mu\text{m}} \approx \begin{cases} 0 & A_V \leq 3.3 \text{ mag} \\ 0.093(A_V - 3.3) & A_V > 3.3 \text{ mag} \end{cases}$$

他认为这说明在  $A_V > 3.3 \text{ mag}$  区域内的尘埃颗粒具有固体冰幔, 而在  $A_V \leq 3.3 \text{ mag}$  区域内的尘埃没有。而且  $3.1 \mu\text{m}$  处谱特征经常伴有  $\text{H}_2\text{O}$  引起的一些其他较弱的特征(如  $6 \mu\text{m}$  处), 并且可能会伴有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}$  等引起的吸收特征<sup>[6,42]</sup>。

由脂肪族碳氢化合物 C-H 键的伸缩振动引起的  $3.4 \mu\text{m}$  处的特征一般只在弥散星际介质区中出现, 和水冰中 O-H 键的伸缩振动引起的  $3.1 \mu\text{m}$  特征相反(一般只在致密分子云方向上出现)<sup>[6]</sup>。另外,  $3.4 \mu\text{m}$  处的特征与硅酸盐 Si-O 键的伸缩振动引起的  $9.7 \mu\text{m}$  处的特征类似, 在不同的视线方向上也有着不同的强度,  $A_V/\tau_{3.4\mu\text{m}}$  在银心方向和太阳系附近弥漫星云方向的比值也相差了近 2 倍(见表 1)。Sandford 等人<sup>[62]</sup>认为  $\tau_{3.4\mu\text{m}}$  在银心方向的增强表明了朝银心方向 C 的丰度可能会增加,  $A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$  变化并不一定是银心附近氧星多而碳星少的缘故。 $3.4 \mu\text{m}$  消光特征与  $9.7 \mu\text{m}$  消光特征随视线方向类似的变化规律以及它们在银心方向上与可见光波段消光  $A_V$  的不相关, 说明需要分别考虑相当一部分引起可见光波段消光的成分同 C-H 和 Si-O 成分<sup>[62]</sup>。 $A_V/\tau_{3.4\mu\text{m}}$  和  $A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$  类似的变化规律也让研究者考虑 C-H 和 Si-O 的分布是否相关, 并以此为根据来改进已有的星际尘埃模型, 考虑为硅酸盐核 + 有机分子幔的颗粒模型<sup>[3,63]</sup>。如果  $9.7 \mu\text{m}$  的特征具有偏振性, 则  $3.4 \mu\text{m}$  的特征也会有偏振性, 因此偏振观测可以有效地检验硅酸盐核 + 有机分子幔的尘粒模型<sup>[65]</sup>。

有关红外消光谱特征的研究将大大增加我们对于星际介质尘埃组成成分的了解, 促进星际介质颗粒模型的建立和检验。有关星际介质颗粒模型的综述, 可以参见文献 [5,6,14,15,66,67]。

### 3 结 论

综上所述, 虽然人们对紫外、可见光波段的星际消光已有较为清晰的认识, 但对于红外波段的消光, 由于观测限制还存在比较多的争论。星际消光的研究已经对星际介质的研究提供了大量信息, 有利于星际尘埃模型作进一步的改进。随着 Spitzer 红外空间望远镜和 AKARI 观测的逐渐增多, 结合地面已有的众多近红外巡天数据 (DENIS, 2MASS), 红外消光中争论较多的问题将会逐渐得到解决:

1) 更多的观测将有利于人们得到连续的、完整的红外消光曲线,  $5\sim 8\ \mu\text{m}$  的消光律将进一步确定; 同时也为研究星际红外消光是否随星际环境的变化而变化提供更多天区的观测资料。

2) 研究红外消光中的谱特征将为星际尘埃的研究提供更多的信息。 $A_V/\tau_{3.4\mu\text{m}}$  和  $A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$  在不同视线方向上不同的原因也需要进一步的解释, 以更好地了解银河系中星际物质的分布, 完善星际尘埃模型。

3) 研究波长大于  $30\ \mu\text{m}$  范围内的星际消光需要更多的红外观测, 同时也需要更好的星际尘埃模型。只有正确认识星际尘埃在这部分的红外发射, 才能真正清楚这部分波段内的星际消光。

**致谢** 作者感谢审稿人提出的非常仔细的建设性意见; 姜碧沅感谢教育部“新世纪优秀人才支持计划”和“高等学校博士学科点专项科研基金”的资助。

#### 参考文献:

- [1] Weingartner J C, Draine B T. ApJ, 2001, 548: 296
- [2] Mathis J S, Rumpl W, Nordsieck K H. ApJ, 1977, 217: 425
- [3] Li A, Greenberg J M. A&A, 1997, 323: 566
- [4] Cardelli J A, Glayton G C, Mathis J S. ApJ, 1989, 345: 245
- [5] Draine B T. Proceedings of the Dusty and Molecular Universe: a Prelude to Herschel and ALMA, Wilson A ed. Netherlands: ESA Publications Division, 2005: 251
- [6] Draine B T. ARA&A, 2003, 41: 241
- [7] Savage B D, Mathis J S. ARA&A, 1979, 17: 73
- [8] Fitzpatrick E L, Massa D. ApJ, 1986, 307: 286
- [9] Cardelli J A. ASP Conf. Ser., 1994, 58: 24
- [10] Fitzpatrick E L. PASP, 1999, 111: 63
- [11] Jenniskens P, Desert FX. A&AS, 1994, 106: 39
- [12] Spitzer L Jr. Physical Processes in the Interstellar Medium, New York: John Wiley, 1978
- [13] Draine B T. Infrared Spectroscopy in Astronomy, Pro. 22nd Eslab Symposium, Noordwijk: European Space Agency, 1989: 93
- [14] Mathis J S. ASP Conf. Ser., 1990, 12: 63
- [15] Draine B T. ASP Conf. Ser., 1994, 58: 227
- [16] Draine B T. Origin and Evolution of the Elements, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004: 317
- [17] Fitzpatrick E L, Massa D. ApJ, 1988, 328: 734



- [18] Lutz D, Feuchtgruber H, Genzel R, et al. *A&A*, 1996, 315: L269
- [19] Jiang B W, Gao J, Omont A, et al. *A&A*, 2006, 446: 551
- [20] Rieke G H, Lebofsky M J. *ApJ*, 1985, 288: 618
- [21] Whittet, D C B. *Dust in the Universe*, Bailey M, Williams D A eds. Cambridge: Cambridge Univ. press, 1988: 25
- [22] Clayton G C, Mathis J S. *ApJ*, 1994, 422: 336
- [23] Martin P G, Whittet D C B. *ApJ*, 1990, 357: 113
- [24] Whittet D C B, Martin P G, Fitzpartrick E L , et al. *ApJ*, 1993, 408: 573
- [25] Bertoldi F, Timmermann R, Rosenthal D , et al. *A&A*, 1999, 346: 267
- [26] Rosenthal D, Bertoldi F, Drapatz S. *A&A*, 2000, 356: 705
- [27] Indebetouw R, Mathis J S, Babler B L , et al., *ApJ*, 2005, 619: 931
- [28] Koornneef J. *A&A*, 1983, 128: 84
- [29] Nishiyama S, Nagata T, Kusakabe N , et al. *ApJ*, 2006, 638: 839
- [30] de Graauw Th, Haser L N, Beintema D , et al. *A&A*, 1996, 315: L49
- [31] Lutz D. In: Cox P, Kessler M F eds. *The Universe as Seen by ISO, ESA*, 1999: 623
- [32] Hennebelle P, Perault M, Teyssier D, Ganesh S. *A&A*, 2001, 365: 598
- [33] Omont A, Gilmore G, Alard C , et al. *A&A*, 2003, 403: 975
- [34] Skrutskie M, Schneider S, Stiening R , et al. *The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys*, Garzon F, Epchtein N, Omont B, et al. eds. Netherlands: Kluwer, 1997: 187
- [35] Jiang B W, Omont A, Ganesh S, et al. *A&A*, 2003, 400: 903
- [36] Smith C H, Wright C M, Aitken D K, et al. *MNRAS*, 2003, 312: 327
- [37] Draine B T. *Physics of the Interstellar Medium and Intergalactic Medium*, San Francisco: Astro. Soc. Pac., 1995: 133
- [38] Li A, Draine B T. *ApJ*, 2001, 550: L213
- [39] Demyk K, Jones A P, Dartois E, et al. *A&A*, 1999, 349: 267
- [40] Kemper F, Vriend W J, Tielens A G G M. *ApJ*, 2004, 609: 826
- [41] Bowey J E, Adamson A J. *MNRAS*, 2002, 334: 94
- [42] 李墨萍, 赵刚, 李爱根. *天文学进展*, 2006, 24: 260
- [43] Bowey J E, Adamson A J, Whittet D C B. *MNRAS*, 1998, 298: 131
- [44] Roche P F, Aitken D K. *MNRAS*, 1984, 208: 481
- [45] Roche P F, Aitken D K. *MNRAS*, 1985, 215: 425
- [46] Russell R W, Soifer B T, Forrest W J. *ApJ*, 1975, 198: L41
- [47] Gillett F C, Forrest W J, Merrill K M, et al. *ApJ*, 1975, 200: 609
- [48] Pegourie B, Papoular R. *A&A*, 1985, 142: 451
- [49] McCarthy J F, Forrest W J, Briotta D A , et al. *ApJ*, 1980, 242: 965
- [50] Volk K, Kwok S. *ApJ*, 1988, 331: 435
- [51] Whittet D C B. *Dust in the Galactic Environment*, The Graduate Series in Astronomy, Bristol: IOP Publishing, 1992: 147
- [52] Mathis J S. *ApJ*, 1998, 497: 824
- [53] Becklin E E, Matthews K, Neugebauer G, et al. *ApJ*, 1978, 220: 831
- [54] Pendleton Y J, Sandford S A, Allamandola L J, et al. *ApJ*, 1994, 437: 683
- [55] Sandford S A, Allamandola L J, Tielens A G G M, et al. *ApJ*, 1991, 371: 607
- [56] Draine B T, Lee H M. *ApJ*, 1984, 285: 89
- [57] Rowan-Robinson M. *MNRAS*, 1986, 219: 737
- [58] Desert F X, Boulanger F, Puget J L. *A&A*, 1990, 237: 215
- [59] Draine B T, Li A. *ApJ*, 2001, 551: 807
- [60] Li A, Draine B T. *ApJ*, 2002, 572: 232
- [61] Li A, Draine B T. *ApJ*, 2002, 576: 762

- [62] Sandford S A, Pendleton Y J, Allamandola L J. ApJ, 1995, 440: 697
- [63] Sandford S A. ASP Conf. Ser., 1996, 97: 29
- [64] Li A, Draine B T. ApJ, 2001, 554: 778
- [65] Li A, Greenberg J M. ApJ, 2002, 577: 789
- [66] Dorschner J. ASP Conf. Ser., 1996, 104: 487
- [67] Li A. Journal of Physics: Conference Series, 2005, 6: 229

## Interstellar Extinction in the Infrared

GAO Jian, JIANG Bi-wei

(*Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstract:** Due to the strong radiation of terrestrial atmosphere, and being much weaker than the ultraviolet and visual interstellar extinction, the infrared extinction is much more difficult to measure and has raised less attention. However, with the development of infrared astronomy, the infrared extinction is very important at recovering the intrinsic energy distribution of celestial objects and inferring the characteristics of the interstellar dust. An overview of our current understanding of the interstellar extinction at infrared wavelengths is presented. The interstellar extinction in the  $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$  wavelength range can be well approximated by a power law  $A_\lambda \propto \lambda^{-\beta}$  with  $1.6 \leq \beta \leq 1.8$ , which is generally accepted to be universal, although the evidence for its variation in different line-of-sights is found as well. In the  $5\text{--}8 \mu\text{m}$  range the interstellar extinction is controversial. The theoretical modelling and some observations imply a pronounced minimum around  $7 \mu\text{m}$ , while more observations by both the ISO and Spitzer infrared space telescopes show that the interstellar extinction in this range has no significant difference with the wavelength. In addition, it possibly varies from one line-of-sight to another, in contrast to our previous understanding of a “universal” extinction law in the infrared ( $0.7 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$ ). In the  $8\text{--}30 \mu\text{m}$  region the interstellar extinction is dominated by the smooth, featureless  $9.7 \mu\text{m}$  and  $18 \mu\text{m}$  amorphous silicate absorption bands; the  $9.7 \mu\text{m}$  silicate extinction strength (relative to optical extinction,  $A_V/\tau_{9.7\mu\text{m}}$ ) shows considerable variation from the local diffuse ISM to Galactic center. The  $9.7 \mu\text{m}$  silicate extinction profile also shows variations in different line-of-sights. The  $3.4 \mu\text{m}$  C–H stretching feature of aliphatic hydrocarbon dust has a similar behavior as the  $9.7 \mu\text{m}$  silicate feature. In the  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  far-infrared region, the interstellar extinction is mainly inferred from modelling the far-infrared emission of interstellar grains. However, considerable differences exist among different grain models; future observations in the  $\lambda \geq 30 \mu\text{m}$  region will be helpful to constrain the extinction in this long wavelength range.

**Key words:** astrophysics; interstellar extinction; review; ISM; infrared; silicate