

AGB 星的 ISO 观测

姜 碧 沅

(中国科学院北京天文台 北京 100012)

(中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

摘 要

概述了 IRAS 升空以来在 AGB 星研究方面的进展和发现的问题, 比较详细地报告了 60cm 空间红外望远镜 ISO 携带的探测器及其性能, 以及它的成像和光谱观测对研究 AGB 星的演化的影响, 尤其是对 AGB 星星周包层的化学环境的研究的重要作用。

关键词 恒星: AGB 星 — 恒星: 星周包层 — 红外: 恒星 — 空间天文: 红外

分类号: P172

1 前 言

1998 年 4 月 8 日, ISO (Infrared Space Observatory, 红外空间天文台) 耗尽了携带的液氮之后, 仍然继续了一个多月的观测, 最终于 5 月 16 日停止了天文观测, 至此, ISO 完成了长达 30 个月的空间观测^[1]。此后两三年内, ISO 的数据将向全世界的天文学家全面公开, 可以预计, 在今后的几年里, 以 ISO 数据为基础的研究将会成为天文学的热点之一。

由于地球大气的吸收、散射和发射, 在地面能进行的红外观测只局限于很少几个近红外窗口, 要获得更多红外波段的天文信息, 就必须进行空间红外观测, 最早的红外空间观测可以追溯到 18 世纪末。而现代的红外天文观测兴盛于本世纪 60、70 年代, 大量高空气球及飞机载运的红外望远镜或探测器被投入使用。

1983 年 1 月 23 日由美英荷联合发射的第一颗红外天文卫星 IRAS (InfraRed Astronomical Satellite)^[2] 具有划时代的意义。其主体是一个口径 57cm 的望远镜, 主要从事巡天工作。在 10 个月的空间飞行过程中, 它扫描了将近 98% 的天空, 另外的 2% 天区由于液氮的耗尽而未能完成。IRAS 取得的点源数据主要包括两个方面: 一是在 12、25、60 和 100 μm 四个波段的宽带测光结果, 另一个是 12 μm 亮源的 7~23 μm 的低分辨率光谱。IRAS 的成功极大地推动了红外天文在从太阳系至宇宙大尺度的各个层次的发展, 时至今日, IRAS 源仍然是天文学家研究的热点目标。

IRAS 在恒星研究方面的重要成就之一是探测到了大量处于演化晚期的中小质量恒星 — AGB (Asymptotic Giant Branch, 渐近巨星支) 星。由于大量的质量流失, 这些恒星具有冷而

厚的气体 / 尘埃星周包层, 其温度大约为 $1000 \sim 200\text{K}$, 可见波段的光深可达几十甚至上百星等, 而红外辐射强烈, 与 IRAS 的观测波段吻合。虽然在 IRAS 之前的一些红外巡天观测中, 这类演化晚期恒星也是主要研究对象, 但在 IRAS 之后才真正形成了系统研究这类天体的热潮。世界各地的天文学家开始就各自感兴趣的有关 AGB 星的课题进行丰富多彩的研究, 中国在这方面的研究也始于 IRAS 之后。不过, IRAS 在这个领域的主要成果恐怕要算发现了大量的 AGB 星, 提出了许多问题。但它并没有给出问题的答案, 虽然后续的大量地面观测使 IRAS 发现的一些问题得到部分的解决。由于 AGB 星本身的物理特性, 只有在中远红外波段观测才能进行充分的研究, ISO 也就应运而生了。

2 ISO 概况

在 IRAS 发射升空之前的 1979 年, ISO 计划就已经提出来了, 在 IRAS 发射的同年即 1983 年由欧洲空间局 ESA(Europe Space Agency) 批准列入计划。经过欧洲空间局 12yr 的努力以及 NASA(美国航空航天局) 和 ISAS(日本宇宙科学研究所) 的参与, ISO 于 1995 年 11 月 16 ~ 17 日午夜由 Ariane (阿丽安娜)-4 火箭发射升空, 进入预定轨道。

ISO^[3] 的主体是一个口径为 60cm 的 R-C 式望远镜, 比 IRAS 的望远镜口径只大 3cm, 但由于在 IRAS 发射之后红外技术的快速发展, 尤其是高灵敏度探测器的研制成功, 使得 ISO 的功能及性能都比 IRAS 有许多提高。钱忠钰^[4] 曾就 IRAS 和 ISO 的基本性能参数及望远镜结构方面进行了较为详细的比较。这里只就几个重要参数 (后来某些参数有变化) 和基本情况进行说明。

ISO 携带 4 台观测仪器: ISOCAM(照相机), ISOPHOT(光度计), ISOSWS(短波光谱仪), ISOLWS(长波光谱仪)。它们的主要功能及性能列于表 1。

表 1 ISO 的主要仪器的功能和性能

仪器名称	功能	波段 / μm	分辨率	参考文献
ISOCAM	成像	2.5 ~ 18	1.5'', 3'', 6'', 12''	[5]
	分光	2.5 ~ 18	> 30	
ISOPHOT	测光	2.5 ~ 240		[6]
	偏振	(14 个滤光片)		
	成像	50 ~ 235 (11 个滤光片)	43.5'' 或 89.4''	
	分光	2.5 ~ 5 6 ~ 12	< 100 < 100	
ISOSWS	光栅分光	2.38 ~ 45.2	1000 ~ 2000	[7]
	F-P 干涉分光	11.4 ~ 44.5	≈ 25000	
ISOLWS	光栅分光	43 ~ 94.6	0.29 μm	[8]
		94.6 ~ 196.9	0.60 μm	
	F-P 干涉分光	47 ~ 70 70 ~ 196.6	8100 ~ 8500 6800 ~ 9700	

注: 因为灵敏度受波长、分辨率、积分时间等因素的复杂影响, 未将其列入表中。有兴趣者可从参考文献中得到有关信息。

与 IRAS 相比, ISO 有以下几方面的优势: (1) 更宽的波段范围, 从近红外 ($2.4\mu\text{m}$) 到远红外 ($240\mu\text{m}$); (2) 更高的空间分辨率; (3) 更多的功能, 增加了偏振观测功能; (4) 更高

的灵敏度,相应波段的测光灵敏度约为 IRAS 的 100 倍。此外,ISO 的实际工作寿命为 30 个月,比发射前预计的 18 个月长了整整一年,是 IRAS 寿命的 3 倍,堪称红外空间天文的长寿之旅。另外,ISO 的观测模式不是像 IRAS 那样巡天观测,而是对天文学家提出的目标进行定点观测,很像地面观测的模式,能有的放矢地解决天文学家提出的问题。ISO 的观测模式是与其使命相应的,因为 IRAS 和以前的红外空间观测大多是巡天,并已经取得了一定的基础,应该也可能进行精细观测。

在长达 30 个月的运行中,ISO 一共对 26200 个科学目标进行了观测,另外还有约 4000 次定标观测,花在这 30000 次观测上的时间总共约为 11500h,望远镜的其他时间用于初始阶段的状态测试和观测之间的目标和仪器的切换。四台仪器所占时间比例为^[9]: ISOCAM 28%, ISOPHOT 30%, ISOSWS 24%, ISOLWS 18%。

3 有关 AGB 星的观测提案

AGB 星是处于演化晚期的中小质量恒星,它们已经燃烧完了中心的氢,形成了 C-N-O 简并核,因小质量 AGB 星在赫罗图上的位置接近红巨星支而得名^[10]。AGB 星演化的最终结局依赖于恒星质量和质量流失过程等因素而分别演变成白矮星或行星状星云。由于强烈星风形成的冷而厚的星周包层吸收中心星的辐射,AGB 星观测上的显著特征是在红外波段的强烈再发射,同时也使中心星变得光学厚甚至光学不可见。因此,经典的光学观测不再是合适的研究手段,而红外和射电观测变得尤为重要。由于 AGB 星是演化晚期的恒星,星风将大量经过核反应的物质驱散到星际介质中,充当星际介质成分演化的主要来源(比如宇宙原初元素锂的丰度在演化过程中的变化主要应归因于 AGB 星的星风)。所以,AGB 星的研究不仅涉及恒星晚期的演化,也与星际介质演化有关。

IRAS 的成功使得 AGB 星成为一个研究热点。根据 IRAS 测光结果得到的中远红外色指数^[11],比较容易挑选出 AGB 星候选体,因为它们拥有冷而厚的气体或尘埃包层,红外色余非常大。从 IRAS 低分辨率光谱^[12]来看,人们发现 $9.7\mu\text{m}$ 的硅酸盐特征和 $11.3\mu\text{m}$ 的石墨特征分别在富氧和富碳 AGB 星中比较普遍地存在。从 IRAS 色指数能够挑选出 AGB 星,对其进行了大量的地面后续观测(例如,针对富碳和富氧星族的近红外测光研究^[13]、更大量的在射电波段进行的分子谱线观测)。这些观测旨在弄清楚星风的机制和规律、星周包层的结构及化学组成,并且取得了一定的成果^[14]: AGB 星的质量流失率范围大致在 10^{-8} 到 $10^{-4}M_{\odot}\cdot\text{yr}^{-1}$; 星周包层的直径为 10^{14}cm 到 10^{18}cm , 其径向膨胀终极速度约为 $5\sim 25\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; 富氧和富碳 AGB 星在银河系中的分布有所不同; 在 AGB 星的星周包层中观测到了 40 多种分子的谱线。成绩虽然卓著,但以下几个基本的问题仍没有得到满意的答案:

(1) AGB 星的质量流失规律。质量流失是 AGB 星的主要特征,它直接影响到 AGB 星演化的终极结局。有人认为 AGB 阶段的质量流失是静态的,不随时间而变化,但随恒星质量的增加而增加^[15]; 有人认为 AGB 阶段的质量流失并非静态的,而是随着恒星在 AGB 阶段的演化逐渐增加,直到在 AGB 的最后阶段形成观测到的超星风,约 $10^{-4}M_{\odot}\cdot\text{yr}^{-1}$ ^[16]; 还有人认为质量流失是间歇性的,AGB 星在流失一部分质量后由于某种原因星风停止,演化一段时间后又重新开始流失质量^[17]。

(2) AGB 星星周包层的气体或尘埃的成分。AGB 星的星周包层向星际介质扩散,是星

际介质中难熔性介质的主要来源。IRAS 虽然搭载了光谱仪, 却因分辨率太低和红端截止波长 ($23\mu\text{m}$) 太短只能观测到凝固温度相对较高的尘埃成分, 无法探测凝固温度较低的尘埃成分。实际上, IRAS 色指数表明很多 AGB 星的星周包层是很冷的, 中远红外的观测才能获取其特性信息。

(3) 从 AGB 星到行星状星云的形态转变过程。从现有的观测手段来看, AGB 星一般是球对称的, 而行星状星云则呈现丰富多彩的非球对称形态, 包括蝶形、纺锤形等。如果 AGB 星是行星状星云的前身星^[18], 则必定有某种机制改变 AGB 星的球对称形态, 应该存在某个阶段可以观测到 AGB 星或 post-AGB 星 (处于 AGB 之后行星状星云之前演化阶段的天体) 对球对称形态的偏离。但因为大多数 AGB 星离我们都比较远, IRAS 的低空间分辨率和相对较蓝的截止波长不能提供这方面的明显证据。

在 IRAS 之后、ISO 之前, 还发射过一颗非专用于宇宙学的红外天文卫星即空间红外望远镜 IRTS (InfraRed Telescope in Space)^[19], 其空间分辨率不高 (低于 $8'$), 对展源天体虽能进行较好的研究, 但对点源恒星则难以得到很好的观测结果。ISO 的设计和它所搭载的仪器则非常适合对点源的观测。当然, ISO 不是专为 AGB 星设计的空间天文台, 它的观测对象包括太阳系天体、恒星、星际介质、星系、星系团等天文学家感兴趣的几乎所有天体, 而它对 AGB 星的观测目的主要就是为了解决以上三个问题或寻求解决的途径和方法。

ISO 的观测时间首先分“保证时间”和“公开时间”两部分, 保证时间占总时间的三分之一, 被 ESA 所含欧洲国家、美国和日本的几个与 ISO 望远镜或仪器有关联的代表组所瓜分, 这些组所提的观测方案无需经过任何审查、而且拥有观测优先权; 公开时间占总时间的三分之二, 面向上述国家的所有天文学家, 观测提案由评委会审查、在公平竞争的基础上分配时间, 但不能保证所有观测均能兑现。在 ISO 分配给恒星部分的保证时间中有关 AGB 星和行星状星云的观测提案占 42%, 是这个领域中所占比例最高的。这表明 ISO 的功能非常适合 AGB 星的研究。虽然公开时间的观测提案与保证时间的提案不能重复, 但观测主题基本一致, 而且保证时间的提案皆由各个领域的专家领衔提出, 它们基本上反映了研究的主流和热点问题。下面是这些提案的主要课题:

第一类, 也是最多的一类, 研究星周包层的尘埃成分, 如 Rouan 提出通过偏振成像观测弄清楚尘埃颗粒的成分和星周包层的磁场结构; Barlow 希望利用远红外光谱证认尘埃的成分; de Jong 试图通过一系列从 AGB 星到行星状星云天体的光谱分析了解这个演化过程中尘埃成分的变化。实际上, 许多公开时间的提案出于同样的目的, 只是选择的观测对象与保证时间的观测对象不同, 观测手段则集中于光谱分析。

第二类, 研究 AGB 阶段的质量流失规律, 如 Heske 试图通过跟踪 H_2O 分子在 AGB 阶段的变化探索星风的历史; Izumiura 设想通过 ISOPHOT 在远红外波段对 AGB 星的直接成像、分析星周包层密度和温度的结构来反演质量流失规律。麦哲伦云中的 AGB 星因为距离可以当成已知数而倍受青睐。因为从红外能谱分布可以推算质量流失率, 从距离和视光度可以得知恒星光度甚至质量, 这些天体就成为研究质量流失率随光度、质量变化规律的对象。Trams 计划观测麦哲伦云中不同年龄、不同光度的 AGB 星; Tanabe 计划观测麦哲伦云的星团中的 AGB 星, 因为这些 AGB 星具有相似的年龄。

还有一些提案倾向于研究与 AGB 星相关的非常具体的某些问题。Barlow 提出拍摄 OH 脉泽源的高分辨率光谱并通过光谱分析计算 H_2O 分子的丰度, 寻找 H_2O 分子分解为 OH、

产生 OH 脉泽的直接证据,用以检测已被普遍接受的 OH 脉泽的红外辐射抽运机制。大量的公开时间提案都是基于某一较为可靠的观测事实或理论、对特定对象进行某一波段某一方式的专门观测,但基本上可以划属以上两大类研究领域。

4 初步成果

ISO 的大部分观测数据尚在处理中,流量定标和数据处理程序还在不断改进和提高,但由于 ISO 的数据传输是与观测同步的,现在已经得到了一些初步结果。1996 年 11 月, *Astronomy and Astrophysics* 卷 315 用了一期的版面,以快捷的 Letter 形式刊登基于 ISO 观测的部分研究结果,由此可窥 ISO 成果的一斑。自那以后,还有过以 ISO 为主题的会议及在杂志上零散发表的文章,1998 年 *Astrophysics and Space Science* 卷 255 是会议 ISO's View on Stellar Evolution 的文集。其中不乏与 AGB 星有关的一些结果。因为 ISO 观测结束不久,已公布的 AGB 星的初步结果都是比较直接的,集中于光谱和成像两个方面。

在光谱方面,ISO 发现了星周包层的许多分子和分子线,主要有:(1)在典型富碳 AGB 星 IRC+10216 中观测到了 CO(从 $J = 14 \sim 13$ 到 $J = 39 \sim 38$) 和 HCN($J = 18 \sim 17$ 到 $J = 48 \sim 47$) 的旋转跃迁族线,因为这些分子线产生于星周包层的最内层的热而密的气体,只有 ISO 覆盖的远红外波段才是最合适的观测范围^[20]。富碳 AGB 星和行星状星云的光谱呈现比较完整的 PAH(多环芳香烃)谱系^[21],比以前了解的更为丰富。(2)在富氧 AGB 星和红巨星中,除了 $9.7\mu\text{m}$ 和 $18\mu\text{m}$ 之外,还有一些其它相对较窄的硅酸盐发射带,使得历来为人们所接受的“天文硅酸盐”模型面临重新考虑的命运^[22]。(3)在富氧 AGB 星中发现了一些 CO_2 、 H_2O 和 OH 的发射线。Justtanont 等人^[23]在几颗 AGB 星的 ISOSWS 高分辨率光谱中观测到了 13.48 、 13.87 、 14.97 、 15.40 和 $16.28\mu\text{m}$ 处的发射线,证认为 CO_2 分子的旋转—振动跃迁发射。对典型富氧 AGB 星 NML Cyg 的光谱进行分析则测到了 $2.7\mu\text{m}$ 和 $6.2\mu\text{m}$ 的 H_2O 吸收线, $4.26\mu\text{m}$ 的 CO_2 吸收线和 $3 \sim 3.5\mu\text{m}$ 之间的 OH 带^[24]。

成像方面在 J 型碳星 Y CVn 的 $60\mu\text{m}$ 和 $90\mu\text{m}$ 图像中, Izumiura 等人^[25]发现了分层的星周包层,暗示着 AGB 星的质量流失是分阶段的,而不是静态不变的。

在 AGB 星的 ISO 光谱中,还有为数不少的较宽的带,极可能起源于星周包层中的尘埃颗粒。但是由于尘埃颗粒的光谱非常复杂,对它们的证认是不容易的,AGB 星星周包层中的尘埃颗粒成分还有待于进一步的观测和更重要的实验室数据,可以肯定的是 ISO 的光谱中包含有丰富多样的尘埃颗粒光谱。已经有人从 ISO 的观测结果提出研究 AGB 星星周包层成分的“矿物学”这个名词。

随着进一步的数据分析和模型拟合,将会有更多的关于星周包层成分和结构以及星风机制的结果。

5 未来红外空间计划

ISO 的观测刚刚结束,新的红外天文空间计划已经紧锣密鼓地开张了,其中适合于恒星研究的代表性项目包括:由日本研制、将于 2002 年发射的 IRIS^[26](Infra Red Imaging Surveyor, 红外成像巡天器),口径为 0.70m ,顾名思义 IRIS 将着重于成像巡天;由美国研制、将于 2001

年发射的 SIRTf^[27] (Space InfraRed Telescope Facility, 空间红外望远镜设备), 口径 0.85m, 主要工作于 3 ~ 180 μ m, 进行光谱和测光观测; 由欧洲研制、计划于 2006 年发射的远红外和亚毫米空间望远镜 FIRST (Far InfraRed and Submillimeter Space Telescope)^[28], 口径达 3m, 进行测光、成像和光谱各方面的工作。与这些卫星计划并驾齐驱的, 还有美国宇航局的机载平流层红外天文台 SOFIA (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy)^[29], 口径 2.5m, 将搭载在波音 747 飞机上, 在某种意义上这是柯伊伯 (Kuiper) 机载天文台的继续。可以说空间红外天文方兴未艾, AGB 星研究的热潮在相当一段时间内还将持续下去。ISO 在空间红外天文方面有着承前启后的作用。

参 考 文 献

- 1 Southworth R. ISO INFO, 1998, 13: 1
- 2 Beichman C A et al. IRAS Catalogues and Atlases Explanatory Supplement, Washington DC: US Government Printing Office, 1985
- 3 Kessler et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L27
- 4 钱忠钰, 天文学进展, 1991, 9: 238
- 5 Cesarsky C J et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L32
- 6 Lemke D et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L46
- 7 De Graauw Th et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L49
- 8 Clegg P E et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L38
- 9 Prusti T. ISO INFO, 1998, 13: 2
- 10 Iben I, Renzini A. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1983, 21: 271
- 11 Van der Veen W, Habing H J. Astron. Astrophys., 1988, 195: 125
- 12 Olnon F, Raimond E. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1986, 65: 607
- 13 Eptchein N et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1987, 71: 39
- 14 Habing H J. Astron. Astrophys. Rev., 1996, 7: 97
- 15 Bedijn P J. Astron. Astrophys., 1987, 186: 136
- 16 Busso M et al. Astron. Astrophys., 1996, 311: 253
- 17 Zijlstra A A et al. Astron. Astrophys., 1992, 265: L5
- 18 Kwok S. Ap. J., 1982, 258: 280
- 19 Murakami H. Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. 1997, 124: 16
- 20 Cernicharo J et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L201
- 21 Beintema D A et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L369
- 22 Waters L B F M et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L361
- 23 Justtanont K et al. Astron. Astrophys., 1998, 330: L17
- 24 Justtanont K et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L217
- 25 Izumiura H et al. Astron. Astrophys., 1996, 315: L221
- 26 Matsumoto T. Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1997, 124: 454
- 27 Throson H A. Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1997, 124: 449
- 28 Genzel R. Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1997, 124: 465
- 29 Erickson E F. Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. 1997, 124: 415

AGB stars seen by ISO

Jiang Biwei

(Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(National Astronomical Observatories, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

This paper reports the progress in ISO (Infrared Space Observatory) project and puts emphasis on its influence on the study of AGB stars. Because AGB stars lose mass in large scale and become mostly optically thick, infrared observations can be used to exhibit the gas/dust components of the circumstellar envelopes. Furthermore, the circumstellar envelope of AGB stars is a very important source for the evolution of interstellar medium, and a clear understanding of the AGB stars' circumstellar envelope will help investigate the evolution of cosmic abundances. ISO spent quite a lot of time on observations of AGB stars with various methods including imaging, spectroscopy, polarimetry and photometry with higher resolution, better sensitivity and wider wavelength coverage than those of the first infrared astronomical satellite IRAS. Though this space infrared observatory finished its mission just in May 1998, already some useful results have been published. Detached shell structure of AGB stars seen from ISO photo-imaging implies non-continuous mass loss process. Compared with previous observations obtained from IRAS and ground telescopes, ISO reveals more complete spectrum of some molecules such as HCN, CO and PAH. In addition, ISO discovers many new lines, some of which have been identified, while many of which are yet to be identified. In particular, the dust features are abundant in the spectra of AGB stars. In the upcoming years, more laboratory work is needed and a good understanding of the mass loss and circumstellar components of AGB stars can be expected.

Key words stars: AGB—stars: circumstellar envelope—infrared: stars—space astronomy: infrared