

红外天文学 导论

郝允祥 陈增生 周克平



北京大学出版社出版

红外天文学导论

郝允祥 陈培生 周克平 编著

北京大学出版社

新登字（京）159号

红外天文学导论

郝允祥 陈培生 周克平 编著

责任编辑：郭佑民

*

北京大学出版社出版发行

（北京大学校内）

北京市经伟印刷厂印刷

新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 11.125印张 285千字

1993年5月第一版 1993年5月第一次印刷

印数：0001—1000册

ISBN 7-301-01999-8/P·28

定价：10.35元

内 容 简 介

本书对近代迅速发展的红外天文学作了系统的介绍。主要内容除了红外天文学的基本知识和发展概况之外,具体讨论了进行天体红外探测的技术问题,详细地综述了在红外波段对天体进行研究所取得的天文学成果。由于国外在红外天文学领域工作十分活跃,本书内容主要取材于国外的研究工作成果。但是,对我国天文工作者,包括作者在内的一些研究工作也作了适当的介绍。

本书可作为天体物理学专业、红外物理与技术专业的本科生和研究生的教学参考书,也可供以上专业和物理专业的研究人员参考。

目 录

| | |
|--|------|
| 第一章 概论 | (1) |
| § 1.1 红外天文学发展简史 | (1) |
| § 1.2 红外天文探测的特点及意义 | (5) |
| § 1.3 地球大气对红外天文探测的影响 | (10) |
| § 1.3.1 与天体红外辐射有关的地球大气的特性 | (11) |
| § 1.3.2 红外光度学系统及红外大气消光 | (18) |
| § 1.4 热辐射 | (20) |
| § 1.4.1 黑体辐射 | (20) |
| § 1.4.2 非黑体辐射 | (28) |
| 第二章 红外天文观测仪器和方法 | (30) |
| § 2.1 红外探测器 | (30) |
| § 2.1.1 红外探测器的分类和基本工作原理 | (30) |
| § 2.1.2 红外探测器的主要参数 | (40) |
| § 2.1.3 天文红外探测工作常用的探测器 | (44) |
| § 2.1.4 致冷技术 | (48) |
| § 2.2 红外天文观测中的基本噪声 | (51) |
| § 2.3 红外天文观测的基本技术 | (58) |
| § 2.3.1 红外辐射的调制 | (58) |
| § 2.3.2 常用的红外光学材料和红外滤光片 | (62) |
| § 2.3.3 红外望远镜的光学设计问题 | (66) |
| § 2.3.4 天体的红外光度测量及典型的红外光度计 结构 | (68) |
| § 2.4 红外天文的新探测方法 | (73) |
| § 2.4.1 红外光谱仪 | (74) |

| | | |
|------------|-----------------------|--------------|
| § 2.4.2 | 红外光斑干涉术 | (83) |
| § 2.4.3 | 红外偏振测量技术 | (89) |
| § 2.4.4 | 红外阵列探测器和红外成像 | (91) |
| § 2.4.5 | 高空与大气外红外天文观测 | (95) |
| § 2.4.6 | IRAS 红外天文卫星 | (101) |
| 第三章 | 天体的红外研究 | (104) |
| § 3.1 | 太阳系 | (104) |
| § 3.1.1 | 太阳 | (104) |
| § 3.1.2 | 行星及其卫星, 小行星 | (113) |
| § 3.1.3 | 彗星 | (137) |
| § 3.2 | 恒星形成区 | (151) |
| § 3.2.1 | 分子云 | (162) |
| § 3.2.2 | 球状体和暗星云 | (169) |
| § 3.2.3 | 双极流 | (178) |
| § 3.2.4 | H II 区 | (183) |
| § 3.2.5 | 河外星系中的恒星形成区 | (194) |
| § 3.2.6 | 典型的恒星形成区——猎户座星云 | (198) |
| § 3.3 | 恒星 | (203) |
| § 3.3.1 | 早型发射线星 | (206) |
| § 3.3.2 | 红巨星 | (212) |
| § 3.3.3 | 双星系统 | (241) |
| § 3.3.4 | 新星和超新星 | (255) |
| § 3.4 | 银河系 | (262) |
| § 3.4.1 | 银道面的弥漫红外发射 | (264) |
| § 3.4.2 | 银心的红外观测和研究 | (271) |
| § 3.5 | 河外星系 | (280) |
| § 3.5.1 | 正常星系 | (281) |
| § 3.5.2 | 特殊星系 | (286) |
| § 3.5.3 | 星系中红外发射的辐射机制 | (296) |
| § 3.6 | 宇宙背景辐射 | (300) |

| | |
|-------------------------|-------|
| § 3.6.1 红外背景辐射 | (301) |
| § 3.6.2 宇宙微波背景辐射 | (307) |
| § 3.7 红外标准星表及红外源表 | (316) |
| 参考资料 | (340) |

第一章 概 论

§ 1.1 红外天文学发展简史

红外天文学以至整个红外物理和技术的起源,都要追溯到 19 世纪初英国著名天文学家 W. Herschel 对太阳的观测。1800 年他用着色的玻璃滤光片作为减弱太阳光的工具以便观测太阳时保护自己的眼睛。他发现虽然各种着色玻璃滤光片都能减弱日光,但透过滤光片的热量却相差很大。为了找到既能减光又能降低热量的滤光片,他开始研究太阳的光热效应,即用一个玻璃棱镜将太阳光分成光谱,用水银温度计在不同光谱区测量温度。他发现当温度计向红端移动时,热效应不断增加。他企图找出热效应的极大位置,可是将温度计移到光谱红端的尽头,温度还在继续增加,而找出的温度最大位置,竟在红端以外很远的地方。现在我们都很清楚,虽然太阳光谱的能量分布并不是在红外波段最大,其辐射峰值应在光谱的黄绿区,然而由于玻璃棱镜在红外区色散远远小于可见区,温度计放在红外区时接收到更大带宽的辐射,所以呈现出温度计指示最高。无论如何,Herschel 的试验事实揭示了一个伟大的发现:在太阳光谱的红外一侧存在着强烈的“看不见的光线”,这就是后来人们广泛称之为的红外线。

Herschel 在太阳光谱中发现了红外线,但是,对太阳红外光谱进行认真的观测迟至 1927 年才开始进行,直到 1956 年才勉强延伸到 $24\mu\text{m}$ 的波长区进行研究。

红外线发现之后,在天文学中的早期应用应该列举 1869 年 L. Rosse 的工作,他用温差热电偶在 90cm 的反光镜上测量了月

球的热辐射。在此之后,本世纪 20 年代初期,美国天文学家 E. Pettit 和 S. B. Nicholson 等人开始了对行星和一些明亮恒星的红外观测。1949 年苏联在近红外区的成像观测中发现银河中心方向人马座附近的一个星云,它与人马座星云的红外亮度一样亮,而可见光却看不到。

在红外线发现后的一个半世纪里,虽然有一些诸如上述的天文探测工作,但是总的说来进展是不大的。这和无线电波发现后射电天文学的迅猛发展形成了鲜明的对比。无线电波虽然远远迟于红外线的发现,但是在数十年的时间内,射电天文学已是成果累累。例如,60 年代的四大天文发现——类星体、脉冲星、星际分子和微波背景辐射,都是射电天文手段获得的。红外天文探测发展迟缓的原因是红外技术长期进展不大,很长一段时间人们找不到灵敏度足够高的探测器。另外,在必要的空间技术可资利用之前,天文探测不可能超越大气层,大气对红外的吸收和散射以及大气本身的热发射也成为天文红外探测的重要限制。

二次世界大战期间,与军事目的相联系的红外技术在秘密状态中进行着,至 60 年代初,红外技术无论在进展程度上或是在技术应用的公开化上都形成重要的变革。低温致冷的光电导红外探测器的出现,各种完备的空间技术以及其它有关技术的发展,形成了近代红外天文学的技术基础。

60 年代中期有几项对红外天文学兴起起了促进作用的观测事实。

1965 年,美国加州理工学院的 G. Neugebauer 等人用他们自己的一架 1.5m 口径的塑料镀铝面的望远镜,在威尔孙山对天空进行了 $2.2\mu\text{m}$ 波长的红外巡天观测。在 75% 的天区中,发现了大约 20 000 个红外源,其中大于 40Jy 通量密度的有 5 600 个 ($1\text{Jy} = 10^{-30}\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}$),这和我们肉眼可以看到的可见星数大体相同。但红外探测的这些星空和肉眼所见的星空大为不同,红外巡天

的 5 600 个亮星中,约有 70%是肉眼看不到的,同样也约有 70%的肉眼看到的亮星也是那架 1.5m 的红外“眼”观察不到的。这是一个不平常的重大发现。

还有两个在 60 年代中期的发现值得一提。1966 年, E. Becklin 和 G. Neugebauer 在猎户座四边形成星系的北方约 1' 处发现了色温度只有 600K 的红外天体(被定名为 BN 天体),次年,在 BN 天体以南约 12" 的地方,由 D. E. Kleinmann 和 F. J. Low 发现了一个低温的红外展源,这就是著名的 KL 源。由于后来又在这些红外源附近发现了羟基和水分子源,使这一区域成为人们关注的形成恒星的摇篮。

早在 60 年代初,黄授书就预言存在红外星,至 60 年代中期,这种预言得以证实。红外天文探测的热情从而受到进一步的激励。

为克服地球大气对观测的妨碍,70 年代以来,利用高空气球,火箭、飞机和人造卫星等带着配置各种红外探测器的望远镜在高空和大气外开展了许多红外天文观测工作。

第一个由飞机运载的红外天文望远镜直径为 30cm。机载红外望远镜最重要的工作应数美国 NASA 的 Kuiper 机载天文台。它是一架安装在 C-141 大型军用运输机上的 0.9m 口径的望远镜,有很好的跟踪精度。

最早用火箭进行红外观测的是 1969 年由美国康奈尔大学和国家研究实验室(NRL)完成的。这是一只带有 16cm 低温致冷望远镜的探空火箭,在 5—1 000 μm 范围进行红外观测试验。在火箭红外观测中最值得一提的是美国空军地球物理实验室(AFGL)70 年代的工作。在一台 16.5cm 口径的由超临界氦致冷的望远镜焦平面上布置了多元探测器,对约 79%的天区进行了 4, 11, 19.8 和 27.4 μm 的巡天观测。该装置在 11 μm 波段的极限探测通量密度为 100Jy,经过 9 次,每次 300s 的观测,共探测到近 4 000 个红外源。对这些红外源分析一下可以看到,随着波长的延伸,探测到的红外

源与不用望远镜肉眼可看到的目视星的重复率越来越小。例如在 $4\mu\text{m}$ 探测到的约2500个源中,目视星只有约600个,占24%,在 $11\mu\text{m}$ 探测到的1440源中只有220个目视星,占15%,而在 $20\mu\text{m}$ 探测到的约870个源中目视星只有70余个,只占8.5%。如果取等数量的目视最亮星与红外最亮星比较,对于 $4\mu\text{m}$ 的红外星与目视星重合约有10%,对于 $11\mu\text{m}$ 为5%,而对于 $20\mu\text{m}$ 则只有2%。红外星空的图像随波长的延伸,其与目视天空的差异是越来越显著的。

最早的球载红外望远镜是1969年建造的,用一个口径25cm的仪器对银河中心进行 $100\mu\text{m}$ 的观测。后来有许多球载仪器进行红外观测,望远镜口径从20cm到1m。最有代表性的是美国Goddard空间飞行中心的球载1m望远镜,在镜的焦平面上放置了多元探测器。

80年代最激动人心的红外天文工作就算红外天文卫星(IRAS)了,虽然比原计划(70年代末投入使用)推迟了一些,但还是在1983年春天发射后正常工作了。这是由美、荷、英三国联合的项目。望远镜口径57cm,工作温度2—5K,飞行在900km高的太阳同步轨道上工作了10个月。在这10个月中对全天的96%的天区进行了12,25,60, $100\mu\text{m}$ 的观测,得到了包括25万个点源的表,一个有2万个小面元(<8 弧分)的表,一个低分辨率光谱表,一个包括1万个小行星的表和一个全天红外亮度图。各种源的定位精度优于20弧秒。随着对IRAS提供的红外天文资料的发掘,已经、并将继续大大丰富人类关于天文学的知识宝库。

现在世界上差不多有40架大中型望远镜在做红外天文观测工作。最有代表性的是美国1982年建造的由六面1.8m镜合成的综合孔径为4.5m的MMT;设在夏威夷蒙那克亚(Mauna Kea)山上的美国NASA的3.1m镜;法、加、美联合的3.6m和英国的3.8m红外望远镜;设在澳大利亚的3.9m镜;欧南台在智利和西

班牙的两台 3.6m 镜等。目前在美、日和西欧各国,均有进一步发展大型光学和红外望远镜的计划,例如有数个建造 7—10m 镜的计划,日本也有个研制 7m 镜的打算,而欧洲则将在智利建造由四个 8m 镜合成孔径为 16m 的巨型望远镜。

我国的红外天文学工作起始于 70 年代中期。最初,紫金山天文台、北京师范大学开始做了些红外探测的准备,1981 年北京师范大学、云南天文台等单位在云南天文台 1m 望远镜上实现了红外观测的手段并陆续取得一批观测成果。上海天文台也于 1982 年进行过高空气球的红外试观测工作。1985 年北京天文台和南京天文仪器厂合作建造了一台专用的 1.2m 红外望远镜。

§ 1.2 红外天文探测的特点及意义

红外线是位于可见光和微波之间的电磁频谱的一部分,其波长为 $0.75\text{—}1000\mu\text{m}$ 。通常将 $\lambda < 2.5\mu\text{m}$ 称为近红外波段, $\lambda > 25\mu\text{m}$ 称为远红外波段,其间为中红外波段。也有时将 $\lambda < 25\mu\text{m}$ 称近红外, $\lambda > 25\mu\text{m}$ 称为远红外。

由于红外波段在短波方向上与可见光相邻,在长波方向上与射电波衔接,因此红外天文学的发展将天文学的至今两个最为重要的分支——光学天文学和射电天文学连结起来了。加上近二三十年来发展的紫外, X 射线和 γ 射线天文学,使天体物理发展为电磁波的全波探测,导致了“全波天文学”的产生,使人们对宇宙的认识有了更加广泛更加全面的基础。

天体的红外探测在天文学领域中有其特殊重要的作用,这主要是由于以下三个原因导致的:(1)宇宙中的低温物质(例如 4000K 以下)能量辐射的大部分在红外区。(2)红外辐射比之可见光而言较少地受到星际物质的吸收和散射,因而较为人们所探测。(3)各种分子的振动谱线主要在 2—30 μm 近中红外区,而转

动谱线主要落在远红外区。不少原子和离子的发射线也在红外波长上。

因此红外天文学的发展已经或将使在天文学中占重要地位的下述问题得到解答：

一、太阳系内幕的进一步揭开，一些行星和彗星内能源的本质以及太阳系天体的起源。

由于太阳系中除太阳外的各种天体：行星、卫星、彗星、小行星以及行星际物质都是强红外源，它们反射小部分太阳投射的能量同时又将大部分吸收，从而引起本身温度的升高，使之向外主要发射红外线。利用对这些天体的红外探测已成功地确定出大行星的温度范围是从 700K(水星)到 50K(海王星、冥王星)之间。同时确定了各大行星及其主要卫星的反照率以及大行星的大气结构。利用从 $0.8\mu\text{m}$ 到 $10\mu\text{m}$ 的红外光谱已证认出这些天体的化学组成和丰度。例如木星大气就是由包括 H_2 , CH_4 , NH_3 , He 和 H_2O 等在内的十多种分子所组成。而土星大气则由 H_2 , HD , CH_4 和 CH_3D 等 8 种分子构成。对其他地外行星的红外观测表明，这些行星大气的主要分子为 CH_4 和 H_2 ，而各个卫星主要成分为 CH_4 ，在冥王星上则有固态的 CH_4 。这些行星和卫星的红外光谱资料对太阳系的早期演化和形成提供了宝贵的信息。此外，通过 1985—1986 年对哈雷彗星及过去对其他彗星的红外观测，已发现存在 1.4 , 1.9 和 $2.7\mu\text{m}$ 的水发射线以及 $10\mu\text{m}$ 的硅酸盐发射，这对弄清太阳系诞生以来一直存在至今而无多大变化的彗星的物理化学性质显然有不可忽视的作用。另外 IRAS 所发现的近万个小行星和黄道尘埃带也将大大丰富人们对太阳系组成和演化的认识。

二、恒星诞生的细节，恒星早期从气尘物质凝缩而成的过程及今后的演化。

恒星是由散布在宇宙中的星际气尘物质通过引力凝缩在一起而形成的。有关恒星形成的理论模型虽然已有多种，但这些模型的

正确与否只有通过红外观测和射电观测才能进行验证。例如一种普遍被采纳的模型认为,在恒星形成前的阶段,星际分子云(半径为几十光年,氢分子密度约为 $10^3/\text{cm}^3$,温度 $T \approx 10\text{K}$)由于自引力作用处于不稳定状态。在有外界冲击波的影响和内部因分子云冷却以及引力逆方向的热运动压力作用下,将引起分子云的收缩。在收缩过程中分子云发生分裂,每一个裂片就形成星胚。这种星胚的温度仅有几十度(K),它主要在远红外发出微弱辐射。经过数十万年的收缩演化,这些星胚的温度升高,并开始形成类似恒星的核,同时发生较强的辐射,被核所吸收的星际尘埃就在核附近沉积形成包裹核心的气壳,这类气壳大小约为数十个天文单位(一天文单位 $= 1.5 \times 10^8 \text{km}$),而温度大致为 $500-1000\text{K}$,这时它们主要放出近中红外辐射。由于这个气壳的红外辐射压力,从外部落向气壳的物质被抑制在外面形成一个外气尘壳,这个壳的直径大约为 0.3 光年,其中尘埃温度约为 $50-100\text{K}$,主要发出远红外辐射。但当自引力塌缩继续进行,使这些壳层中的大部分物质落积核中后,由于氢的核聚合反应,星云形成的星胚此时变成一颗放射灿烂光辉的恒星,这样早期恒星就形成了。在恒星形成早期,由于恒星发射出紫外线和可见光,使星周气体电离而形成电离氢区,这些被电离的氢随星周物质向外扩张而产生冲击恒星周围分子云的冲击波,在这个冲击波的作用下,在分子云中诞生第二代恒星星胚。

从上述恒星形成的各个不同阶段不难看出,红外辐射是其主要辐射手段,因此对这类天体进行红外探测也最能了解其演化过程。

事实上最新的红外观测已发现了不仅在银河系中的一些区域,例如猎户座大星云中,金牛座和蛇夫座中的分子云中都有大量恒星形成的区域,而且在一些河外星系中,例如大小麦哲伦云中都有大量恒星正在形成。

三、恒星晚期演化的特征。从中找出恒星生命终结前的踪迹。

大多数(尤其是质量大的)恒星在演化晚期,由于其内部氢核聚变反应的不断进行,使其核心逐渐变为氦核,同时消耗大量能量,从而使其核心部分进一步收缩。这种收缩释放出的引力能一部分使核心温度进一步升高,以恢复力学平衡,另一部分则使外部膨胀,表面积增大,表面温度降低。这样恒星将向外部抛射大量气尘物质,形成带有拱星尘埃壳层的晚型红巨星。这样的晚型红巨星表面温度仅达2 000—4 000K,拱星气尘壳最远形成在离恒星 10^{14-16} cm 范围上,其温度仅有 600—800K。有的红巨星还带有 OH、H₂O 或 SiO 分子脉泽发射。对这类晚型星的红外观测表明,除了含有 H、C、O 和 He 等元素外,它们大多富含重金属元素,且大多数在 10 μ m 处有硅酸盐特征。观测也表明其脉泽发射与红外辐射是密切相关的,有可能红外辐射为其脉泽发射提供了能源机制。通过红外观测弄清了这类恒星的质量损失机制,同时了解到这些星周围的气尘壳层的分布大多不呈球对称而是呈盘状分布。这就为天体物理中的所谓双极流结构的形成提供了重要依据,也为这些晚型星的进一步向行星状星云或爆发新星的演化提供了线索。

四、银河系中气尘物质的总分布以及银河中心的结构。

银河系是由恒星、气体和尘埃组成的一个旋涡星系,它的中心离太阳约 10 千秒差距。在我们观测银心的方向上,由于大量气尘物质的存在,使可见光度的衰减至少有 100 亿倍(25^m),而在红外(2 μ m),光度的衰减只有 10 倍($2^m \cdot 5$)。较之可见光观测来说,红外观测是穿透“万里埃”的犀利武器,它成为弄清银河系结构的重要手段。

早期的观测表明,在银心方向除了有一个大的沿银道面的红外扩展源外,在射电人马座 A 附近群集了一堆红外点源。最近的观测表明许多处于银心的红外源在 2.3—2.5 μ m 波段存在具有晚型特征的 CO 吸收带,且银心的尘埃热发射在 12—25 μ m 处达到

极大值。用以上结果对过去只从光学观测得到的银道位置进行了修正,表明银道应向南移大致 1.6 度。

另外,用红外法布里光谱仪探明了银心附近有电离气体存在,而且这些气体绕正交于银河转轴的轴在旋转,为了维持这种旋转,有人认为在银心附近存在大质量的集中,其中心点很可能是黑洞。

总之,为彻底弄清银河系特别是银心的结构,红外观测是必不可少的。

五、一些河外天体及特殊星系强红外辐射的来源以及宇宙论基本常数的确定。

由于近年来观测手段的改进,红外天文对于河外天体研究的前景展现出一系列富有意义的甚至是惊人的结果。从邻近星系的形成,其核心的性质,直到基本宇宙参数的测定都证明红外观测有其基本的重要性。例如,红外实测资料的重要应用之一是检验各类恒星组成星系的综合模型。由于发现 $2.3\mu\text{m}$ 的 CO 发射在晚巨星上强而在晚矮星上并不存在,结果是椭圆星系应主要由巨星而不是早期认为的由矮星组成,这样就导致了星系的主要参量之一——质光比的修正。星系红外观测的另一个重要方面是关系宇宙模型的基本物理量——减速因子的确定。对于遥远的星系,由于红移量很大,因而用红外观测特别有利。通过对各种红移量的星系从可见光到红外区视亮度及色指数的测量,可以以很高的精度求得减速因子的值,从而用以确定宇宙边界关闭与否。

进一步的研究表明,一些河外天体和特殊星系,例如类星体 3C273, 3C279, 塞佛特星系 NGC253 以及一些蝎虎 BL 天体都有强的红外发射。另一些河外天体则在红外表现为有超高亮度,我们称之为红外星系,例如 ARP220, NGC6240, NGC1068 等。其中 NGC1068 在 $50\text{--}300\mu\text{m}$ 的光度比在其他一切波长上的总和强 100 倍! 最近的研究表明,尽管在上述各类天体中红外辐射都很强,但其能源机制并不完全相同。对这些天体红外辐射本质的研究

是现代天文学最富生命力的领域之一。在星系红外辐射方面最新的成就便是红外类星体的发现,这一发现将为揭开宇宙演化之谜作出贡献。

六、宇宙背景辐射的能量分布及其本质。星际分子的发现和其分布,运动情况的研究。

现代宇宙论认为我们的宇宙是在一次大爆炸以后形成的。而宇宙微波辐射的 2.7K 黑体能谱则是支持这一学说的最强有力的一个证据,然而这一辐射的峰值在远红外与微波交叉的波段。无疑,红外波段 2.7K 宇宙背景辐射的探测将为这个问题的彻底解决作出举足轻重的贡献。

另外,现代天文学主要利用射电观测手段发现在星际间存在五六十种分子,特别是存在 OH, H₂O, SiO 和 CH₃OH 分子微波激射。分子天文学作为现代天文学的一个分支已经形成。然而由于各种分子的振动谱线大多落在 2—30 μ m 范围内,分子转动谱线又多在远红外区,加上红外辐射有可能成为一些分子微波激射的泵源,因此,红外天文学的进一步发展会对分子天文学作出重要贡献。

§ 1.3 地球大气对红外天文探测的影响

天体的红外辐射通过地球大气层的实际传输过程是很复杂的,由于辐射与大气的相互作用,不仅因吸收和散射导致辐射受到衰减,还会因大气本身的热发射、折射和大气湍流产生的天空噪声对天体辐射有着很大的影响。正由于大气的以上特征,使在地面上进行的红外天文观测,只能被限制在几个“窗口”中进行,因而出现了相应的红外光度学系统。

本节拟先讨论地球大气的特征,然后就其对红外天文学观测的影响及红外光度学系统作一个介绍。