

毫米波、亚毫米波天文学的现状和进展 *

向 德 琳 黄 光 力

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008
中国科学院射电天文联合实验室)

摘 要

简要介绍了毫米、亚毫米波学科领域的发展动向,及其在解决一系列天文学前沿课题中面临的挑战。在文献 [6] 的基础上概述国际上毫米波、亚毫米波射电观测设备运转和改进的状况。分析了在学科发展的强力推动下毫米、亚毫米波技术迅猛发展,以及在现有设备成功运行的条件下,筹划和发展大型毫米波、亚毫米波综合孔径及毫米波 VLBI 的充分性和必然趋势。同时,对国际上有代表性的中等口径毫米波射电镜(美国 NRAO12m 镜)在最近 12 年中观测课题的分布和发展趋向作了统计分析,以供国内同行在充分利用和发展我们自己现有设备条件时参考。最后对国内德令哈 13.7m 毫米波镜的选题和发展前景作了讨论。

1 引 言 [1,2,4,5,10]

星际介质的毫米和亚毫米波谱的丰富程度可与太阳、恒星的夫琅和费谱线媲美(见图 1)。由星际分子云的高谱分辨率观测,可确定行星到小星系尺度范围内云的密度、温度、化学组成和同位素丰度等重要物理参量。毫米波谱手段已为天文学各领域做出令人瞩目的贡献。基于过去 20 年在毫米和红外波段的发现,我们坚信在地面上可以达到而目前尚未充分开发的波谱的最后一部分——亚毫米波段,能为天文学许多领域的发展做出更为重要的贡献。受到广泛重视的是该波段拥有一些独特的谱线,如 CI 谱线、CS 和其他高偶极矩分子较高能级的跃迁以及氯化物的谱线等。特别是银河系和其他星系的冷(10—100K)尘埃和气体云辐射,在亚毫米波段比在毫米或红外波段要强得多。更重要的是,如果亚毫米波段最短波长的观测设备可提供亚角秒级分辨率,那么我们将为取得对太阳系、恒星形成、星系结构、类星体、活动星系以及早期宇宙的进一步了解,具备了必要条件。

* 本文为 1993 年 10 月中国天文学会《射电天文学前沿》学术讨论会的邀请报告,并得到国家自然科学基金和中国科学院天文口资助
1993 年 11 月 17 日收到

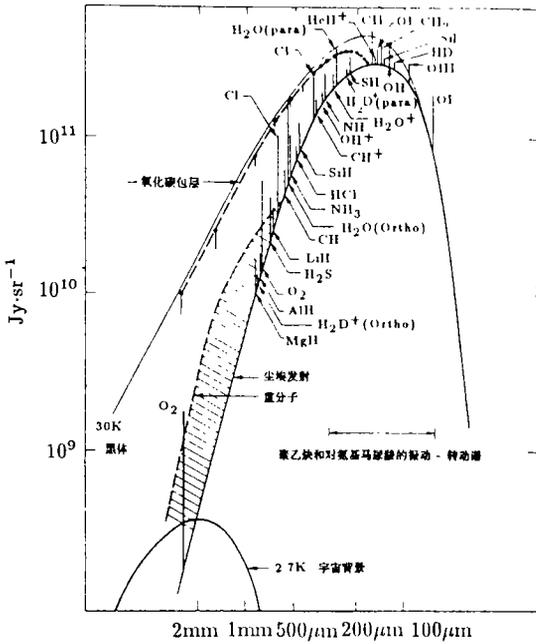


图 1 一个星际云的毫米波段谱线示意图。包括尘埃连续谱, 分子转动线和原子精细结构的发射 [8]

2 现有毫米、亚毫米波设备 [1,2,3,7,8,27]

波长 $\lambda \sim 0.3\text{--}1.3\text{mm}$ 是地面天文观测最后的前沿 (0.3mm 是大气限制波长)^[2]。早期的亚毫米波观测, 由机载或气球载平台带 1m 级望远镜所作, 分辨率 θ 仅角分的量级。后来在高而干燥的站址, 用单天线望远镜作地面观测, 可提供 $5''\text{--}10''$ 的分辨率 (在最短波长)。因此, 地面亚毫米波设备确有进一步发展的必要。以下列举若干代表性设备为例。

2.1 单天线

- (1) 地面
 - (i) 建成、运转和改进中
 - (a) 亚毫米波观测设备 (表 1)
 - (b) 毫米波望远镜 (表 2)

实际上, 天文学家总是在已有的观测条件下, 受发现新天体或现象的激励, 改进已有观测手段。新一代仪器的诞生又把学科发展推向更新的高度。射电天文学的发展也是如此, 但由于其方法和技术的特色, 更新换代较快。在 90 年代, 我们将看到一批现有毫米、亚毫米波射电观测设备的发展与改进。如即将发展的, 其工作波长短到毫米波长, 受到全球瞩目的 100m 毫米波望远镜 (GBT) 及毫米波阵 (MMA) 和亚毫米波阵 (SMA) 的建设。文中将主要介绍学科领域发展的现状, 与其有关的观测设备和令人振奋的前景。

文中还将引用和分析国际上一台具有代表性的中等口径毫米波射电镜 (美国 NRAO12 m 镜) 的 12 年实测课题的信息, 为我国同行借鉴。最后对我国 13.7m 德令哈毫米波射电镜的选题和前景作了讨论。基于国内已具备的实测条件, 充分发挥现有设备的潜力, 致力于开拓发展, 我国同行一定能够为毫米波天文学作出有价值的贡献。

表 1

简称	名 称	国别	口径	λ_{\min}	θ	站 址
CSO	(California Institute of Technology) 亚毫米波望远镜	美国	10m	0.3mm	$\geq 5'' - 10''$	Mauna Kea, Hawaii, USA
JCMT	James Clerk Maxwell 亚毫米波望远镜 UK-NL	英国 - 荷兰	15m	0.3mm	$\geq 5'' - 10''$	Mauna Kea, Hawaii, USA
Coln 3m	University of Cologne 3m 亚毫米波望远镜	西德	3m	0.3mm	$\geq 5'' - 10''$	Gornergrat, Switzerland
SEST	(Swedish-ESO) SEST 亚毫米波望远镜	瑞典 - 欧南台	15m	0.87mm	$\geq 5'' - 10''$	Chile
CSO - JCMT	CSO - JCMT 干涉仪 (由两台现有亚毫米波镜组成)	美 - 英 - 荷兰	10m + 15m 基线 $d=165m$	0.87mm	$\sim 0''.6$	Mauna Kea, Hawaii, USA

表 2

简 称	名 称	国别	口径	λ_{\min}	θ	站 址
IRAM	(Institute de Radio Astronomic Millimetrique) 30m 毫米波望远镜	法国 - 西德	30m	1.3mm	$\geq 5'' - 10''$	Pice de Veleta, Spain
Nobeyama 45m	Nobeyama 45m 毫米波望远镜 (Nobeyama Radio Obs.)	日本	45m	$\sim 1mm$	$\geq 5'' - 10''$	Nobeyama, Japan
Haystack 37m	Haystack 37m 改造 (面板精度 $\sigma=0.21mm$, $\Delta S=50mJy$ 。用可变形副面, 全封闭天线罩。温控调节。)	美国	37m	$\sim 3.5mm$		Massachusettes U.S.A.

(ii) 建造中

(a) 亚毫米波望远镜 (表 3)

(b) 毫米波望远镜 (表 4)

表 3

简称	名 称	国别	口径	λ_{\min}	θ	站 址
SMT	UA/MPI(University of Arizona/Max-Planck-Institute-fur-Radioastronomie) 10m 亚毫米波望远镜 ($\sigma \sim 0.015mm$, 1993 运转)	美国 - 西德	10m	0.35mm	$\geq 5'' - 10''$	Mt. Graham Arizona, USA (高度 3180m)

表 4

简称	名 称	国别	口径	λ_{\min}	σ	站 址
GBT	格林班克望远镜 (主面 2000 块可调面板。无遮挡孔径。全天覆盖。1991 始建, 1995 运转。)	美国	100m	2.6mm	2.8K /Jy	Green Bank, West Virginia U.S.A.

(2) 空间亚毫米波近期计划 (表 5)

表 5

简 称	名 称	国 别	口 径	备 注
SWAS	亚毫米波天文卫星 (Submillimeter Wave Astronomy Satellite)		55cm	用 Scout 火箭 1993 年发射

2.2 综合孔径

在厘米波段, 早期美国 NRAO(National Radio Astronomy Observatory) 的三元干涉仪, 英国剑桥大学的各种干涉仪系统, 以及荷兰 Westerbork 的 10 元综合孔径射电望远镜等, 极其突出地显示综合孔径优于同样总收集面积的单天线射电镜。这些先驱性设备为建设 VLA(Very Large Array) 起到了有力的驱动作用。而这台大规模的厘米波综合孔径以其对天文学的重要影响, 显示了自己巨大的成功。随着若干单天线亚毫米波望远镜的成功运转, 在毫米波、亚毫米波段着手建设孔径综合系统是合适和及时的。

表 6 为运转并扩建中的 5 台毫米波综合孔径系统 (目前分辨率达 $\sim 1''$)。

表 6

项目名称	单 位	站 址	将 扩 建 成
Berkeley $3 \times 6\text{m}$ 综合孔径	Univ. of California, USA	Hat Creak, California, USA	$9 \times 6\text{m}$ 阵 (BIMA-Berkeley-Illinois-Maryland Array) - 成为世界上最快和最灵敏的设备
OVRO $3 \times 10\text{m}$ 综合孔径	California Institute of Technology, USA	Owen's Valley, California, USA	$5 \times 10\text{m}$ 阵
IRAM $3 \times 15\text{m}$ 综合孔径	Institute de Radioastronomie Millimetrique, Germany, France	Plateau de Bure France	$4 \times 15\text{m}$ 阵
Nobeyama $5 \times 10\text{m}$ 综合孔径	Nobeyama Radio Observatory Japan	Nobeyama, Japan	$6 \times 10\text{m}$ 阵
VLBA 甚长基线天线 阵	National Radio Astronomy Observatory, USA	U.S.A. 天线分布横跨全美大陆, 从 Hawaii 到 Virgin 群岛。 控制中心: Socorro, New Mexico, USA	天线 $10 \times 25\text{m}$, $L_{\max}=8600\text{km}$ $\theta = 0.1\text{mas}$, $\lambda_{\min}=3.5\text{mm}$, (达到所有天文设备中最高分辨 率), $\Delta S = 0.16\text{mJy}(\tau = 8^{\text{h}})$ $\lambda = 7\text{mm}$ 十波段 (0.35—90cm) 1985 始建, 1988 第一天线运转, 1993 系统全面建成

3 毫米波和亚毫米波的课题领域

3.1 恒星形成和演化^[13,14,18,26]

恒星形成来源于分子云内部的引力坍缩, 原恒星周围的分子云物质使得任何光学手段都无法探测其中的过程。分子天文学是新开辟的分支学科领域, 在微波波段分子跃迁覆盖了从亚毫米波到分米波波段的发射。毫米和亚毫米波段的谱线观测则有可能穿透尘埃, 并由某些分子跃迁谱线的多普勒位移, 发现恒星形成区物质内向流和外向流的踪迹, 是目前公认研究恒星形成和演化的好手段。

原子和离子的辐射线，特别是 C^+ 和中性 C 原子的复合线，对估算星际云能量和物理性质非常重要，并与大质量恒星形成间接相关，但其作用方式（至少对 C 线而言）仍不清楚。

CO 及其他分子线的观测，将在长期内对恒星形成的理解极为关键。连续谱 ($100\mu\text{m}—3\text{mm}$) 观测还可得到更多信息，特别是对该波段河外天体的冷尘埃辐射几乎还一无所知。最后，射电连续谱尤其是较短波长的观测，作为恒星形成的最好示踪器之一，又重新引起兴趣。

当小、中等质量恒星演化到离开主星序并成为红巨星时，其质量损失率可决定恒星最终的命运，是成为白矮星，中子星，黑洞以及 / 或超新星。由 H_2O 、 SiO 、 OH 脉泽及 CO 等辐射源到恒星的距离不同，可以探测到外流气体的加速过程，由 CO/H_2 的丰度可比较精确地推出总的物质损失率。从连续谱和宽频带的观测，可了解外向流中尘埃的性质，如尘埃和气体的比例。恒星质量损失中尚未解决的主要问题是外围包层所含的质量，而亚毫米波连续谱的观测，可能是唯一适合研究该问题的手段。

前景之一是在 θ 为角秒量级，通过亚毫米波尘埃的偏振研究（这里尘埃的发射为光学薄）来测量磁场的结构。其二是揭示光度低到如在主序前或原恒星演化（光度由坍缩过程激励）过程中的云的结构。在亚毫米波可得到这种情况下尘埃的冷温度。

3.2 银河系和星系 [1,2,3,9,12,13,14]

由分子谱线可揭示分子云的旋涡结构，由尘埃发射可得到最年轻恒星的旋涡结构，遥远的 IRAS 亮星系的成像可显示其结构，高激发态谱线可研究河外星系中星际介质的性质。亚毫米波高分辨率观测可给出尘埃辐射的成像，即恒星形成时的状态，这可与代表较老星族的同步辐射，代表致密气体的分子谱线，代表弥漫气体的原子氢，以及代表星族的光学辐射相比较。这几种组成部分的比较对解释旋臂形成和演化最为有效。另外，亚毫米波跃迁典型地来自高密和高温的物质，这类辐射的高灵敏度、高分辨率的成像观测，可容易地确定高激发物质的位置，这是该波段对河外天体研究的一个重要特色。

从星系中不同分子和元素丰度的变化，可研究其结构和物理过程。在射电波段，星系中含量最丰富的氢分子不能直接观测。绝大部分的分子信息来源于丰度仅次于氢分子的

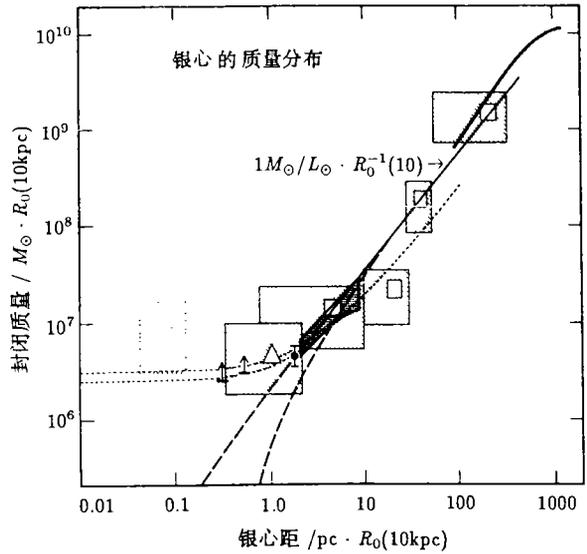


图 2 银心质量分布综合图

此图显示出采用三种示踪器 ($R \leq 1.7\text{pc}$ 的离化流线以及 OH/IR 星和恒星 $2\mu\text{m}$ 发射的速度弥散度) 估计的银心质量 (用粗虚线, 以及中心有小矩形和三角形块的大矩形块表示) 和两种银心结构模型 (由不同取值的中心点质量, 以及其核半径分别为 0.1pc 和 1pc 的星团构成) 导出一致的质量分布 (图右部细实线以及左下部两条细虚线表示)。在距银心几百 pc 到几 pc 范围, 封闭质量分布特征及测出的 $(2-3) \times 10^6 M_\odot$ 的中心点质量描述了一个可能的大质量黑洞 [12]

CO，目前已在大量不同类型星系中测量到CO的含量及其展示的星系结构。由于CO含量仅是氢分子的很小一部分(约 10^{-5})，所以还不能从CO的强度直接得到氢分子的性质。这方面仍有很多不确定的因素，要求进一步建立更细致的模型和高分辨率的CO及C I、C II的观测。

银河系中心被冷星际尘埃所遮蔽，难以在可见光及紫外波段观测到。在毫米、亚毫米和红外的多种分子谱线及连续谱观测，可得到银心大尺度($\geq 100\text{pc}$)的星际物质、银心附近最大($\approx 40\text{pc}$)的分子气体集中地和恒星形成活动区Sgr B₂的结构和性质，以及银心更细致的结构($\leq 100\text{pc}$)和性质，如温度分布、谱线流量密度、质量分布等，并提供了黑洞存在的证据。见图2^[12]。

3.3 类星体和活动星系核 ^[1,2,9,13,14,18]

毫米、亚毫米波的连续谱观测对研究活动星系核的性质具有不可忽略的意义。最重要的课题是吞并天体系统(merging system)，基底(underlying)星系(认为是类星体前兆)和核环境等。急待阐明中心强致密核的机制。因为其距离遥远，特别需要高角分辨率成像。C II $158\mu\text{m}^2P_{3/2} - 2P_{1/2}$ 超精细结构谱线在图3中显示出它的光度与CO光度

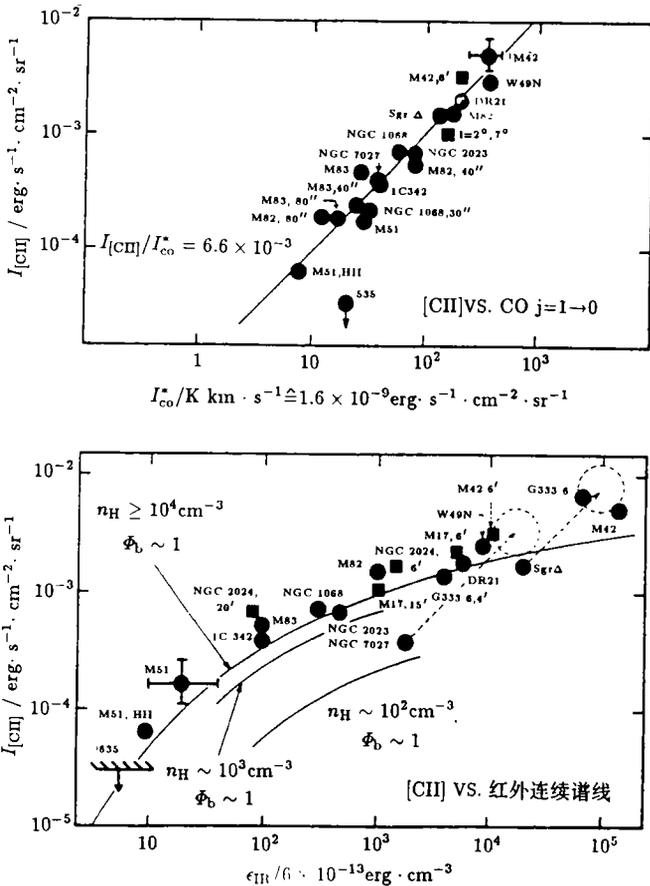


图3 C II光度与CO光度和红外总能密度的相关^[2]

以及 IR 光度间的密切相关关系。 $I_{(\text{CII})}/I_{\text{CO}}=6.6 \times 10^3$, C II 可能就是探测高红移天体系统运动学最有用的谱线工具。特别是在严重消光伴随恒星形成活动剧烈的地方。例如 $z=1-2$, C II 将红移到 $\lambda=350-400 \mu\text{m}$ 处。如果星系的实际光度大于 M82 的 100 倍, 或大于 NGC 1068 的 5 倍, 它的这种红移线即可观测到。在这个距离上, 如线分辨率高于 10kpc, 要求 θ 好于 $1''$, 就可以对这种系统成像。

最近研究结果表明, 星暴现象可能是类星体形成的先兆。类星体可嵌埋在星系中。这种基底星系可以辨认, 因其范围比类星体延展。如从图 4 可看到 M87 的光学和射电喷流嵌埋在一个椭圆星系中, 它可能就是附近的嵌埋在星系中的活动星系核的例子。如基底星系经历过星暴, 预期亚毫米波段最有助于成像, 它将显示出强光集结区的吞并现象。图 5 示出星暴星系 Arp220 对各种 z 值的红移谱, 说明在这种宇宙学距离的星系, 只要灵敏度能达到 1mJy , 以 $0''.1-1''$ 的分辨率(即 $z=2$, 线尺度在 $1-10\text{kpc}$)即可成像探测到。还要指出, 虽然在 FIR 波段辐射更强些, 但以角秒水平成像是不可可能的。

星暴星系辐射来自恒星形成中的爆发, 并以热辐射为主, 从

亚毫米辐射可测定能有效形成恒星的星际介质的总质量及其分布, 还可精确测量出热辐射的温度和总光度, 从而发现星暴星系与其他星系的差别。以非热同步辐射为主的活动星系有 BL Lac 天体和射电喧噪 (loud) 类星体, 主要研究的问题是继续监测更多的样本, 毫米、亚毫米波和 X 射线谱的相对变化及射电喷流的解释等。对兼有热和非热辐射谱特征的塞弗特星系和射电宁静类星体, 关键是在 $100\mu\text{m}$ 和毫米波长之间, 通过测量翻转点以外的谱线轮廓, 确定远红外辐射的性质, 其变化及偏振也可作为非热源的证据。

3.4 宇宙学 [13,14,15,16]

毫米、亚毫米波对观测宇宙学而言具有非常独特的意义。其中, 最重要的微波背景辐射毫无疑问是现代宇宙学的奠基石。对于微波辐射谱及其在空间分布的各向异性的研究是宇宙学的基本问题。在毫米、亚毫米波段, 大量分子谱线对宇宙的关键元素(如氘)提供了重要的线索。在很多情况下宇宙背景辐射对分子线跃迁起了激发或去激发的作用。该波段第三个也是很新的意义在于, 观测 IRAS 星系非常遥远的对应体, 其辐射大多在

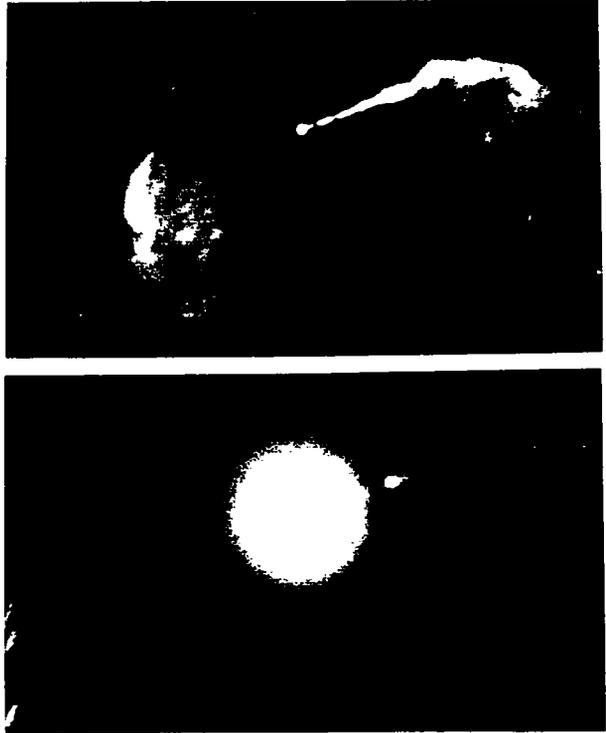


图 4 M87 系统 [2]

100 μm 附近。这些红移对应体必然是很强的毫米和亚毫米波源。在这些非常遥远的尘埃状源中,可能存在一些原星系或年轻星系。过去十年中另一个重要发现是具有有一亿光年量级的星团和空洞。从大量星系 21cm 氢线红移的观测,显示出与作过研究的最大尺度可比的结 构。利用 90 年代发展的最新设备,可能扩展到更大尺度的测量。

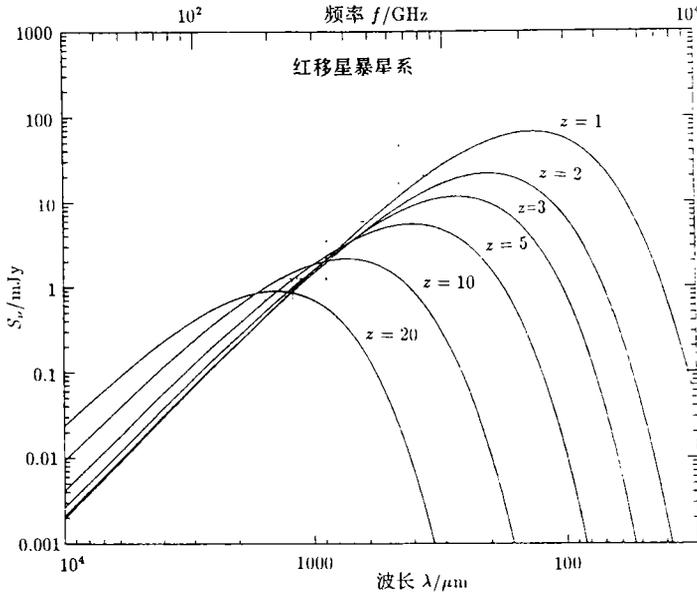


图 5 星爆星系 Arp 220 红移到各种 z 值的谱 [5]

3.5 星际化学 [11,13,14,17,20,25]

在毫米波长观测到星际分子云中丰富的分子品种,是过去 20 年天文学最重要的进展。非常引人注目的是,相当复杂的分子能够在不同星际气体的苛刻条件下幸存。在弥漫和稠密的星际云、恒星形成区、超新星爆发产生的激波物质或膨胀离化的波前、河外星系及恒星大气和拱星包层中,都已发现各种分子。其密度在 10^2-10^8cm^{-3} 之间,温度从 10 度至几千度,辐射场的强度可以变化到正常星际背景辐射的 10^5 倍。

发现和确认了大约 70 种不同的星际分子,并从化学本身进行了研究。而且可从其丰富的转动、振动及电子能级结构多方面探测其形成区域的物理条件。毫米波段分子辐射线的速度和线宽,可揭示云的物理结构及分子线激发的温度和密度。星际分子还可用来研究云的演化以至星系宇宙线的离化率(当其化学过程已经很清楚时)。

星际化学的一个目标是了解星际分子在其被观测到的各种区域存在的原因。对此已经建立包含上千种化学反应的细致模型。这些模型所得到的结论的意义,主要取决于已知化学反应率的精确程度。因为星际介质的物理条件和实验室大不相同,后者在如此低温和低密度下只有很少的化学反应率能被测量,所以星际条件下化学过程的研究,往往对分子物理和化学领域提出了新问题,并引起浓厚兴趣。

3.6 太阳系 [1,13,14,24]

由此波段可观测太阳较低层次的大气，如色球黑子变热、超米粒组织结构以及太阳振荡。太阳系其他天体都是毫米和亚毫米波辐射的强源，在更高频率不断改善接收机的灵敏度，可决定所有行星和许多小行星、卫星及彗星的大气表面和表层以下的温度分布，进而得到其表面和大气的组成和电介质的性质（由连续谱得到）。由金星和土卫六及其他天体大气中分子物质的运动学特征得出气候图。

要强调的是，新一代亚毫米波设备应当能作太阳系天体的高分辨率及成像观测，特别是对小行星及彗星。小行星的连续谱峰值落在毫米波段，而成像技术可以给出它们的表面特征。对彗星的要求是可对其气体和固体成份成像，特别是造成彗星质量损失的颗粒尺度为毫米量级。对这种颗粒研究，也许最好是能在亚毫米波段观测和成像。

4 毫米波、亚毫米波课题领域对观测设备性能的要求 [1,2,3]

4.1 毫米波段

要求摄取如太阳活动区的电影和行星短时标现象，进行亮彗星常规观测，揭示角大小与光学像可比拟的结构。作大范围分子云或河外星系的并嵌模式成图。获得分辨率达亚角秒级极高灵敏度成像。提高偏振测量能力，观测来自排成一行的颗粒的辐射和塞曼效应，研究磁场。

要求在 1.3mm 和 2.6mm 的灵敏度比现有的 2.6mm 好一个量级，达到能对椭圆星系和射电星系中的分子云气体进行观测，以及对本星系群中星系云和巨分子云复合体的多种跃迁 [3] 进行常规观测，以便研究在各种环境中分子云的形成和毁灭机制等有关问题。以亚角秒分辨率对塞弗特星系核成像，确定分子环在塞弗特现象中的作用。能进行恒星形成全过程（由核的坍缩到拱星盘的毁灭）的观测等。

具体要求，如举 BIMA(参见表 6) 为例：

(1) 成图速度：以 $0''.6-5''$ 角分辨率，单一位形 (single configuration) 一次观测同时提供 36 条基线。相对目前现有综合孔径设备成图速度提高 12 倍。

(2) 流量灵敏度：单一位形，一次观测，10 小时向源积分时间，以及 $T_{\text{sys}}(\text{SSB})=200\text{K}$ ，350K, 450K 分别对应 85, 115 和 230GHz。

灵敏度 $\Delta S(\text{mJy}/\text{beam})$

速度分辨率 ΔV	频 率 f		
	85GHz	115GHz	230GHz
830MHz*	0.39	0.65	0.90
500—0.1km·s ⁻¹	1.5—99	2.3—150	2.1—147

* 假定测量在 DSB 模式进行

(3) 亮温度灵敏度：

灵敏度 $\Delta K(K)$, $f_0=230\text{GHz}$

通道宽度 ΔV	综合波束尺度			
	6''	3''	1''.5	0''.6
830MHz*	0.00045	0.0019	0.0072	0.045
500—0.1km·s ⁻¹	0.0013—0.094	0.0054—0.35	0.021—1.4	0.13—8.9

(4) 探测能力：对银河系和河外星系各类天体

天体	跃迁	最大距离 ⁽¹⁾ D_{\max}	例	最高分辨率 ⁽²⁾ θ_{\max}	
Orion GMC $10^5 M_{\odot}$	CO, J=1-0	3Mpc	M81, M82, N253	1''.2	18pc
	尘埃	1Mpc	本星系群	1''.2	6pc
M82 星暴星系中心 1'	CO, J=1-0	120Mpc	后发星系团	1''.2	700pc
	HCO ⁺ , J=1-0	30Mpc	室女星系团	1''.2	180pc
IC342 核心中 1'	CO, J=1-0	120Mpc	后发星系团	1''.2	700pc
银河系 $10^9 M_{\odot}$ 累积盘	CO, J=1-0	130Mpc	后发星系团	6''	4000pc
Arp220	CO, J=1-0	600Mpc	长蛇星系团	1''.2	3400pc
	尘埃	600Mpc		0''.6	1700pc

注 (1) 对于 5σ 探测的最大距离。

(2) 在最大距离对应最佳角分辨率的线分辨率；当然对较近天体，线分辨率将更好些。

4.2 亚毫米波段

总体要求和具体指标相结合可举 SMA (参见 5.1) 为例。

(1) 灵敏度：一些重要的源，如河外分子云、恒星形成核和拱星盘，是以 10K 量级的气体温度来表征的。对设备的要求，其内禀亮度灵敏度在谱线模式必须达到 1K 的量级。为得到行星、原恒星和河外星系核的典型流量密度，要求设备的连续谱灵敏度至少达到几个 mJy 的量级。

(2) 角分辨率：这个指标依赖于源的距离。为了研究暗云附近的拱星盘，河外星系核盘以及原行星系统的可能尺度，最令人感兴趣的角分辨率在 0''.1 量级 (即在 100pc 距离 10AU 直径和在 3Mpc 距离 1.5pc 直径)。

(3) 谱线覆盖 (带宽)：这是在最高频率必须提供的，并由谱线宽度确定。最宽的谱线来自河外星系。例如研究来自 $z=1-2$ 的天体系统的红移，C II 辐射 (速度窗 1000 km·s⁻¹) 在 $\lambda \sim 0.35\text{mm}$ ，谱线窗 $\Delta f=3\text{GHz}$ 。另外还要求同时观测多条线的功能，提高系统效率。

(4) 偏振：如在银河系大多数天体系统中，预期尘埃发射超过几 Jy，要测到 1% 的偏振，仪器灵敏度要求达到 mJy 的量级。对目前的灵敏度，测尘埃偏振的主窗在 350GHz。为测出不同温度的尘埃的偏振，要求偏振测量能在多波段进行。

5 '90 年代新设备展望 [1-3,6,7]

由于站址高度和天线面板精度的限制，大部分现有的望远镜不能在有限期限内 $\lambda \leq 1\text{mm}$ 的波段上使用。但它们成功的运转鼓舞了更大型设备的发展。

5.1 大型新设备计划

- (1) 早期发展阶段的空间单天线计划 (表 7)(尚未批准)
 (2) 地面单天线毫米波段计划 (表 8)

表 7

简称	名 称	国别	口 径	备 注
FIRST	红外亚毫米空间望远镜 (Far-Infrared Submillimeter Space Telescope)		8m	用 Arienne 火箭约 2002 年发射
LDR	大型空间展开亚毫米波反射器 (NASA Large Deployable Reflector)	美国	20m	2000 年在空间站装配

表 8

简称	名 称	国 别	口径	备 注
LMT	大型毫米波望远镜 (Large Millimeter Telescope)	美国 - 墨西哥	50m	美国麻省大学和墨西哥合作。站址：墨西哥。126 块天线面板，可调式。 $\sigma=0.07\text{mm}$

(3) 综合孔径计划

(i) MMA：美国国家射电天文台 (NRAO) 向 NSF 提出建造 MMA (Millimetre Wavelength Array) 的方案，类似于 VLA。它的灵敏度、分辨率、速度和成像质量将要超过现有设备一个量级以上。它的主体是 $40 \times 7.5\text{m}$ 的环形阵，加之旋转倾斜的中心设备： $21 \times (3-4)\text{m}$ 焦面阵或单天线。波段 $\lambda \sim 0.87\text{mm}-1\text{cm}$ 。该设备于 90 年代在美国大型天文设备发展中排列在第三位，仅在 SIRTf (SIRTf=NASA Shuttle Infrared Telescope Facility) 和 NOAO 8m 计划之后。如获得经费，预期早于 90 年代末运转。

(ii) 日本野边山天文台 (NRO) 计划扩建 Nobeyama 阵至 $30 \times 10\text{m}$ ，届时，将与 NRAO 形成强劲对手。

(iii) SMA：Smithsonian 天体物理台提出建造 Submm Interferometer Array 用可移动天线 $6 \times 6\text{m}$ ，Y 形布局，周期改变天线配置以提供不同的角分辨率。基线 $6-465\text{m}$ 在波段 $1.3-0.3\text{mm}$ 间综合孔径成图。可同时工作于连续谱和谱线模式。采用 SIS 混频器、闭环致冷和固态本振。IF 传输用光缆。相关器用带模数元件的 XF 设计，可容易扩展基线数和灵活改变带宽和谱分辨率。系统全自动运转，观测资料可在海平面基地和麻省 Cambridge SAO 本部直接接收。SMA 后期工程将完成 $12 \times 6\text{m}$ 阵和 48 个站。

表 9 SMA 灵敏度和分辨率

λ	ΔS 或 ΔT	θ	BW 或 ΔV	d
0.87mm	2mJy (连续谱) 0.3K (谱线)	$0''.3-6''$	$2\text{GHz } 1\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	465-6m
0.35mm	200mJy (连续谱) 2K (谱线)	$0''.12-2''.5$	$2\text{GHz } 1\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	500-10m

注： $\Delta S, \Delta T$ 分别表示流量灵敏度或亮温灵敏度 θ ：角分辨率
 d ：基线 BW：连续谱带宽 ΔV ：谱线分辨率 积分时间：8 小时

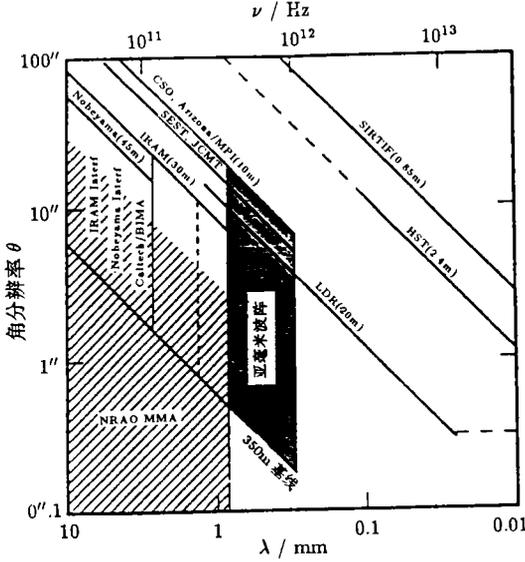


图 6 各种现存和计划中的毫米、亚毫米波望远镜及天线阵的角分辨率-波长图 [2]

图中缩写词： IRAM=Institut de Radio Astronomic Millime trique(Grenobl), MPI = Max-Plank- Institut-für- Radioastronomie (Bonn), LDR = NASA Large Deployable Reflector, ST = NASA Space Telescope, SIRTIF=NASA Shuttle Infrared Telescope Facility.

5.2 预期 90 年代毫米波、亚毫米波观测设备的能力覆盖

图 6 给出现有和计划中的主要毫米波和亚毫米波观测设备在波长 λ 和分辨率 θ 平面上的比较。两个阵 (MMA) 和 (SMA) 填充了 $\lambda-\theta$ 平面的大面积空间。特别是 SMA 亚毫米波阵的 λ 和 θ 的覆盖是任何运转中和计划中的望远镜所不能匹敌的。总之,亚毫米波天文学是继毫米波天文学之后快速成长的学科领域。但现有和计划中的观测设备的分辨率 θ 限制在 $5''-10''$ 。厘米波孔径综合系统证明已在短到 $1-2\text{mm}$ 的波长成功运转,再向短波方向延伸到地面观测的极限, 0.35mm , 技术上是可行的。而分辨率达亚角秒级。SMA 于 1991 年始建,造价 4000 万美元 (1990 年), 要求 5 年完成。这无疑是 90 年代毫米波、亚毫米波射电天文分支学科最先进的观测设备。

6 NRAO12m 毫米波镜近 12 年观测课题频数分布及动向 [1,4,10]

美国国家射电天文台 (NRAO) 的 12m 毫米波射电望远镜对毫米波天文学的早期发展起了明显的推动作用。随着 80 年代大型毫米波射电望远镜 (如 IRAM 30m 和 Nobeyama 45m) 的建成,此望远镜已退居中等口径的范畴。但在同类望远镜中,其性能指标和运转效率高居国际领先地位,得到同行公认。向全世界天文家开放,并择优接受观测申请提案的做法,使其按排的实测课题成为世界范围自由竞争条件下筛选的优秀选题。反映了毫米波实测研究领域中的前沿动向和学科发展的新鲜需要。特别是其口径与我国现有德令哈 13.7m 镜相当,其观测课题频数分布的动向就有提供我国同行借鉴的价值。

1. 12m 毫米波镜的课题分布前后六年的比较见图 7。前六年 (1980—1985) 和近六年 (1987—1992) 的课题分布形态类似。其中一半的课题总数保持稳定。后六年比前六年增加了 60%。前后六年都显示出高峰在银河系新分子跃迁的搜寻和研究,以及恒星形成的早期相;河外天体中的正常星系和活动星系等。实际上“正常星系”的大量实测内容,是在这些星系中搜寻在银河系内已发现的分子,以及利用 CO、CS 等多能级跃迁描图,配合光学和红外观测研究其旋涡结构。对活动星系的观测集中在研究星系核中强爆发的触发体及其作用,探索星暴星系和类星体的关系,相互作用星系及其中恒星形成过

程, 以及这类星系的吞并证据等。12 年中的“高峰” (探测星际分子、研究恒星形成相和活动星系等 5 种) 课题数, 占使用这个望远镜的 31 种观测课题总数的 55%。课题数下降的项目有晚型星、质量损失和拱星包层, 银河系结构和 H II 区等, 下降的比值并不大。

课题数明显增加的种类与“高峰”基本重合, 集中在银河系的星际介质、分子搜寻、暗云 / 分子云、星风、外向流、年轻天体, 及河外天体中的正常星系、活动星系和 X 射线星系。课题数增减的种类相当。增加的种类其课题数增长率为 1.4 倍, 约为总课题数相应增长率的 3 倍。可见, 星际分子和恒星早期演化相引起最大兴趣和受到最高度的重视。

2. 近六年 (1987—1992) 间 12m 镜四类大观测课题数由图 8 示出。可以看出, 各大类课题数在 6 年中基本保持稳定。相对地看, 银河系和河外天体的观测研究多于太阳系和恒星, 相差 5—6 倍。以太阳系的观测最少, 太阳本身的观测数在 6 年中始终为零。

3. 近五年 (1987—1991) 间 12m 镜的四类观测课题总数与 43m 镜, VLA, VLBI 三类设备的比较由图 9 示出。可以看出两台不同波段的单天线射电镜的观测课题总数相差无几。除恒星类毫米波 12m 镜高于厘米波 43m 镜, 但在同量级。用 VLA 观测, 四大类课题全面领先于 12m 镜。对于银河系, 前者只高于后者 1.65 倍。对其他三大类 (太阳, 恒星, 河外) 均高一个量级。在与 12 m 镜的比较中, 使用 VLBI 的频数是由观测对象的角径和距离对分辨率的需要决定的。

4. 五年间 12m 镜与另外三类设备对 31 种观测课题总数分布的比较:

(1) 与 43m 镜比较见图 10(a)。两台设备的峰值观测课题都是新分子的搜寻和研究。说明波谱学和星际化学引

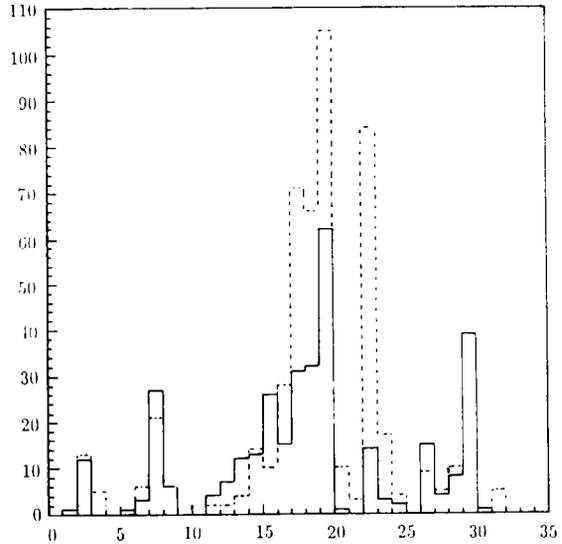


图 7 NRAO 12m 毫米波镜 1980—1992 年对 31 种观测课题的分布

横标: 课题代号; 纵标: 课题总数; 实线: 1980—1985 年课题总数; 虚线: 1987—1992 年课题总数

图 7—10 课题类别 (I—IV) 和课题代号 (1—31) 的说明

I. 太阳系: 1. 太阳 2. 行星和彗星 3. 太阳系其他天体 / 现象

II. 恒星: 4. 脉冲星 5. 恒星, X-射线源和双星 6. 行星状星云 7. 质量损失和拱星包层 8. 超新星遗迹 9. 新星和超新星 10. 天体测量和测地 11. 其他恒星 12. 恒星脉泽 (晚型星)

III. 银河系天体: 13. 银河系结构 14. 银河系中心 15. H II 区 16. 致密 H II 区 / 脉泽 / 恒星形成 17. 暗云 / 分子云 18. 风, 外向流和年轻天体 19. 分子的搜寻和研究 20. 星际介质 21. 银河系其他天体

IV. 河外天体: 22. 正常星系 23. 活动星系核和 X 射线星系 24. 射电星系和射电源 25. 射电源的 VLBI 研究 26. 射电源巡视和变源的监视 27. 星系群和星系团 28. 类星体 / BL Lac 天体 / 致密光学天体 29. 河外分子 30. 未知的 X-射线 / γ 射线源 31. 宇宙论

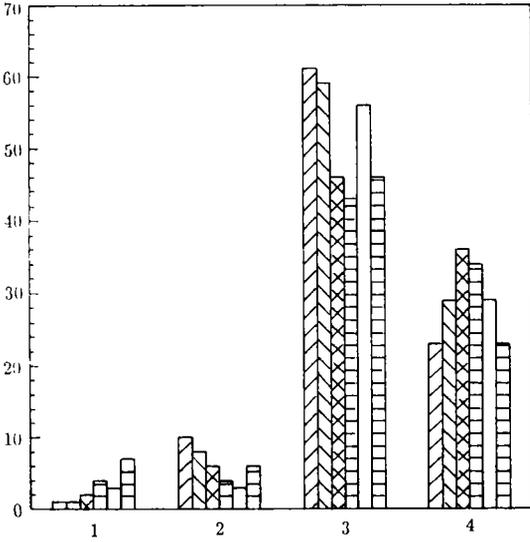


图 8 1987—1992 年间 12m 镜用于四类课题观测的动向

横标：1—4 分别表示太阳系、恒星、银河系和河外天体四类课题。各类中六条直方块以背景标识区分，按时序排列（每年一条）；纵标：课题总数

对恒星、射电源、射电星系和类星体、BL Lac 天体等的观测能力堪称无与伦比。但对分子、分子云和活动星系核的研究，自星际分子发现以来 12m 镜长期持续地处于领先的地位。未来毫米波 VLBI 的发展将在分辨率上大大提高，必然会兼具毫米波的波段优势和 VLBI 的高分辨能力。但中等口径单天线望远镜以其运转灵活、观测和后处理简单的特色，有长期独立存在的必要，不会被毫米波 VLBI 取代。预期在发展毫米波、亚毫米波天文学以及分子天体物理和分子天体化学的过程中，它们将作为毫米波 VLBI 不可缺少的预观测设备或作为直接承担大量对分辨率要求不高的有关课题的主要观测设备得到使用，并能解决目前面临的许多问题。

起人们广泛兴趣。除此之外，43m 镜课题全面下降到较低水平，包括河外新分子探测和河外星系结构的谱线示踪研究。这说明研究星系结构及恒星形成相的有关课题，使用毫米波谱线（特别是 CO）比厘米波谱线更为有效。

(2) 与 VLA 的比较 见图 10(b)。后者以其在灵敏度和分辨率上的绝对优势几乎在全部范围内的课题数大大超过 12m，有的超过 2—3 个量级。但对分子（河内、外）与分子云的研究，这台中等口径 12m 单天线望远镜总课题数却遥遥领先，特别是对分子的搜寻。表明毫米波分子谱线在波段上的独特性，其意义不容忽视。

(3) 与 VLBI 的比较 见图 10(c)。VLBI 的毫角秒的高分辨率

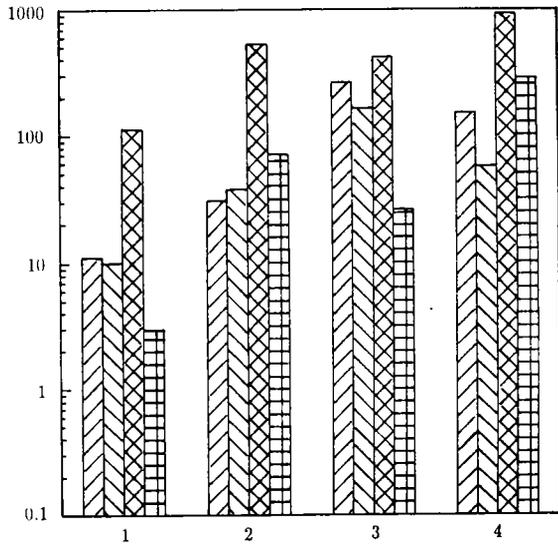
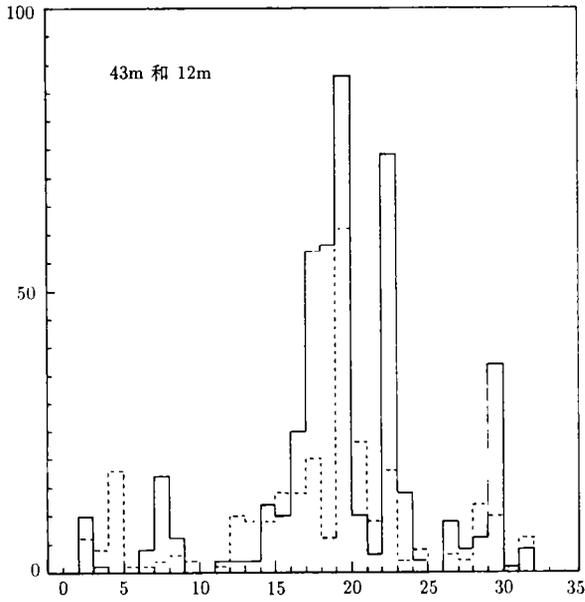
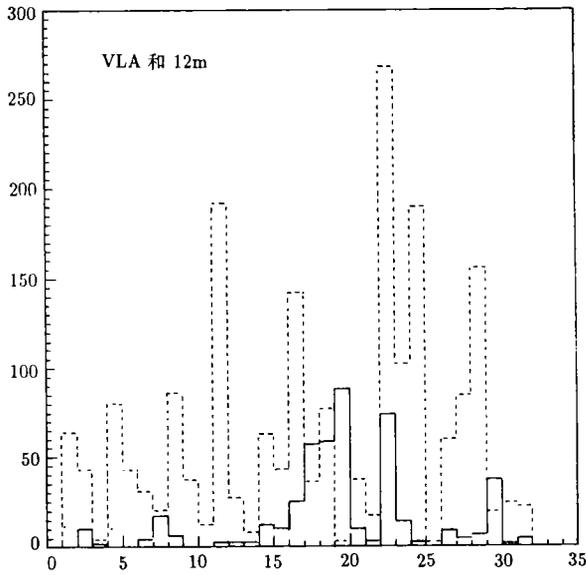


图 9 1987—1991 年间，对四类观测总课题数，12m 镜与 43m、VLA 和 VLBI 的比较

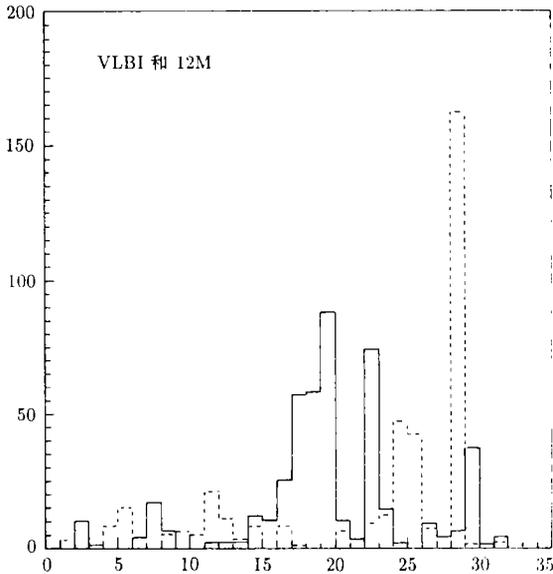
横标：1—4 表示四类课题，同上图。各类课题中四条直方块分别表示四项设备，按 12m，43m，VLA 和 VLBI 顺序排列，对应四种不同背景标识



(a)



(b)



(c)

图 10 近五年 12m 与 (a)43m (b)VLA (c)VLBI 对 31 个课题总数分布比较

横标: 课题代号; 纵标: 课题数。实线: 12m 镜 1987—1991 年观测课题总数;

虚线: 在 (a),(b),(c) 图中分别表示 43m, VLA 和 VLBI 相同时间的课题总数

7 德令哈 13.7m 毫米波镜的选题和发展前景

十多年来吸引最多天文学家投入的毫米波段课题, 在银河系中, 有新分子跃迁的搜寻和研究, 以及恒星形成早期相的研究。对前一部分工作的开展, 要取得领先地位, 需具备在国际范围最高灵敏度的接收机和迅速提供新波段的能力。NRAO 开展过大量这类工作, 取得不少好的结果。但对 13.7m 毫米波镜, 条件暂不适宜。而用 CO J=1-0 和 2-1 谱线开展恒星早期相研究, 可能较易取得结果。例如作大样本、目标引导或成图探测 (相对国外用望远镜作系统巡视)。以较少的望远镜运转时间和较高效率发现新分子外流源, 研究恒星形成区, 可超过现有同类工作。同时, 充分发挥 13.7m 镜口径相对大 ($\theta \sim 48''$) 的优势, 可即时取得一定的外向流细节, 直接研究个别源。在河外天体课题中, 有正常星系, 特殊星系 (包括活动星系和相互作用星系) 和类星体等。对正常星系的研究, 在 NRAO12m 镜上, 近六年的观测课题数是前六年的近 6 倍, 占 31 类课题总数的 16%。可见其投入人力相对大和生命力相对旺盛。大量工作是利用毫米 CO 和 CS 等多能级跃迁谱线研究其 (旋涡) 结构。这是星系分类的基础。这类课题有诸多的观测样本

供选择,观测方法和研究途径有待发展,是值得重视的有深度的课题。研究活动星系,取得强爆发监测结果,连同探寻相互作用星系间(或与类星体间)潮汐作用引起的吞并关系的证据,是这类课题的主要内容。NRAO 和 FCRAO (美国五大学射电天文台)等 12—14m 毫米波镜都取得了一系列好结果。我国同行,借鉴先例,单用 13.7m 镜,选取高光度样本,重复、对比、验证和发展前人结果,这将符合推动学科发展的需要。发挥该镜特色,大有可为。如有条件,进入毫米波 VLBI 网,在深入发展这类具有准平稳和非平稳动力学特征的特殊星系的观测研究中,更是前景甚好。

对于已经运转在 13mm 波长的条件应当充分利用。争取维持连续工作时的长期稳定性和波段反复更换时的高度重复性。这样,在水脉泽线上可完成银道面大面积的深度(如 $b = \pm 2^\circ$) 系统巡视。这是发挥该镜作大覆盖观测却需时相对少 ($\theta \sim 4'$) 特色的一项课题,避免了国外作同类工作时多用大望远镜、覆盖小、观测用时多而终致搁浅的弊病。它将提供银盘信息而无选择效应,并可获得银河系新谱线无偏巡天的完备结果(现只有 HI 和 CO 线可利用)。这对银河系恒星形成区和谱线旋臂研究有特殊意义。同时是一次普查,定可发现新水源。

13.7m 镜今后的发展:鉴于现有天线蒙皮的性能限制和目前的经济条件,运转 1.3mm 波段多半已是该镜短波端发展的极限。可望在不太远的将来靠调整面板精度来实现。进一步发展的潜力在于毫米波 VLBI 的建设。至于亚毫米波的开发,从学科发展的角度来说,势在必行。但以此镜为基础不易发展,以另行建造小型亚毫米波镜为宜。

8 结 论

毫米波、亚毫米波段的开发和深入研究,预期在 90 年代的发展将能够完成以亚角秒分辨率覆盖毫米波和亚毫米波段直到大气限制波长 $350\mu\text{m}$ 。我们期望广泛的课题可以得到阐明:如太阳系行星的大气结构,彗星结构,其他恒星系统的原恒星盘和行星形成,分子外流,暗云结构,引力拱星坍缩,星系中的旋臂结构,光学遮蔽星系核以及类星体和星系核的核周环境等。

同时,同类设备的实践历程表明,充分利用和发挥德令哈 13.7m 镜的现有能力和特色,致力于开展分子、分子云、恒星形成早期相的研究,以及星系等方面的研究,我国天文工作者完全有可能做出进入学科前列的高水平的工作。

致谢 对于美国 NRAO 台长 Dr. Paul A. Vanden Bout 提供 1987—1992 年 NRAO 四项观测设备的观测研究方案,郑兴武协助搜集 SMA 和 BIMA 研究报告,作者在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Kellermann K I, Heeschen D S. *Physics Today*, 1991 April, 40
- [2] Massonet C. Design study for the Submillimeter Interferometer Array of the Smithsonian Astrophysical Observatory, SMA Design Study USA, Feb. 1992
- [3] Welch W J, Crutcher R, Blitz L *et al.* *Astronomical studies with the Berkeley-Illinois-Maryland Array*, 1991
- [4] National Radio Astronomy Observatory, USA. *Observing summary for the Calendar Year 1987-1992*
- [5] 向德琳. *天文学进展*, 1988, 6: 129
- [6] 向德琳. *天文学进展*, 1987, 6: 31
- [7] Kellermann K I. In: Swings J P ed. *Highlights of astronomy*. Dordrecht: Reidel, 1985, 7: 879
- [8] Payne J M. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77: 993
- [9] Longair M S. In: *EsA and ASE, The scientific importance of submm observations, Proceeding of an ESA Workshop, Noordwijkerhout, The Netherland, 1982*, Paris: ESA and ASE, 1982, 219
- [10] Roberts M, Havlen R J. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1981-1986, 13-18: 308, 369, 397, 252, 319, 374
- [11] Turner B E. In: Jena P, Rao B K, Khanna S N eds. *Physics and chemistry of small clusters*. [s.l.]: Plenum Publishing Cooperation, 1987. 915
- [12] Genzel R, Townes C H. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1987, 25: 377
- [13] Wolstencroft R D, Burton W B. *Millimeter and submm astronomy*. [s.l.]: [s.n.], 1987
- [14] Watt G D, Webster A S eds. *Proceeding of the KONA Symposium, Kona, Hawaii, 1988*, [s.l.]: [s.n.], 1989
- [15] Bond J R, *et al.* *Ap. J.*, 1991, 367: 420
- [16] Masi S *et al.* *Ap. J.*, 1991, 366: L51
- [17] Yamamoto S *et al.* *Ap. J.*, 1991, 370: L103
- [18] Harris A I. *Ap. J.*, 1991, 382: L75
- [19] Barsony M *et al.* *Ap. J.*, 1991, 384: L53
- [20] Wishnow E H *et al.* *Ap. J.*, 1992, 392: L43
- [21] Sutton E C *et al.* *Ap. J. Suppl.*, 1991, 77: 255
- [22] Boreiko R T *et al.* *Ap. J.*, 1991, 369: 382
- [23] Wannier P G *et al.* *Ap. J.*, 1991, 377: 171
- [24] Poellig T L *et al.* *Ap. J.*, 1991, 381: 288
- [25] Varberg T D *et al.* *Ap. J.*, 1991, 385: 763
- [26] Seaquist E R *et al.* *Ap. J.*, 1992, 387: 624
- [27] Paul A, Vanden Bout. *Adv. Space Res.*, 1991, 110(2): 387

(责任编辑 舒似竹)

The Present Situation and Progress in Millimeter and Submillimeter Astronomy*

Xiang Delin Huang Guangli

*(The Joint Laboratory for Research of Radio Astronomy, The Chinese Academy of Sciences,
Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)*

Abstract

The field of millimeter(mm) and submillimeter(submm) astronomy, its development and tendency, as well as the challenge faced for resolving a series of forward subjects of astronomy are introduced briefly in this paper. On the basis of reference^[6], the operation and improvement of the observational devices for mm and submm radio astronomy in the world are described in broad outline. The rapid development of mm and submm technology promoted strongly by the development of the branches, and the full necessity for planning and developing large mm, submm synthesis radio telescope and mm VLBI under the condition of the successful operation of the present devices are analyzed. In the meantime, the distribution and trend of the observational subjects of a typical mm radio telescope with a moderate aperture, NRAO 12m in USA during recent twelve years are analyzed statistically, so as to give a reference for Chinese colleagues to make a full use of our own present devices. At last, the selection of the observational subjects and the prospect of 13.7m mm telescope at Delingha are discussed.