

密级 _____



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

大质量恒星形成及其初始条件

作者姓名 张传朋

指导教师 王俊杰 研究员 中国科学院国家天文台

Karl Menten 教授 德国马普射电天文研究所

学位类别 理学博士

学科专业 天体物理

培养单位 中国科学院国家天文台

2015 年 5 月

High-Mass Star Formation & Its Initial Conditions

By
Chuan-Peng Zhang

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Science

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences;
Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, Germany

May, 2015

摘 要

在本篇论文中，主要有四个研究项目，包括：红外暗云、致密冷核的碎裂和氘化、超超致密电离氢区、红外尘泡。一方面，这四个项目都属于大质量恒星早期形成与演化的范畴；另一方面，它们分别属于大质量恒星形成区不同演化阶段的典型特征。该文章的主要内容如下：

关于红外暗云的项目，我们的研究工作仍然在进展中，还没有形成明确的结论。我们主要通过利用了 IRAM 30m 望远镜对一批红外暗云进行观测（G31、G33、G34、G35、G38、G53），观测的谱线分别是： HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 。利用光学厚的 HCO^+ ，并结合光学薄的 N_2H^+ 对这批红外暗云的动力学结构进行测量后，我们发现丝状的红外暗云存在着速度梯度；我们将结合 NH_3 谱线，对这批红外暗云的温度和密度结构进行分析；还将分析红外暗云中的分子和尘埃团块的物理形态，并且研究其稳定性。

大质量恒星形成早期阶段的团块碎裂是一个非常重要的过程。在该项目中，目的是研究在大尺度和小尺度上团块、致密核和凝聚核的栖息环境，及其在不同波段不同尺度的团块碎裂特征。我们的样本共有八个大质量恒星形成区，包括：G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71。这些样本主要选自于 850 和 450 μm 的 SCAMPS 巡天项目。随后，我们利用 1.3 cm 的 VLA D 阵列、3.5 和 1.3 mm 的 PbBI BCD 阵列、870 μm 的 APEX 对其进行了跟踪观测。另外，我们还结合 4.5, 8.0, 24, 70 μm 的红外数据研究该样本的碎裂和演化阶段。通过质量-尺度关系的比较，我们认为这八个样本中的致密核、凝聚核是一批很好的大质量恒星形成的候选体。这些团块的恒星形成可能来自于附近的超致密电离氢区的触发和影响。它们的质量谱数据表明湍流可能主导着团块的碎裂过程。另外，对于分子气体氘化的研究仍在进展中。

在大质量恒星形成过程中，超超致密电离氢区的形成也是一个非常重要的阶段。谱线和连续谱的观测能够揭秘其动力学环境。在该项目中，我们给出了高分辨率的 SMA 和 VLA 超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的观测。在 1.3 mm 的 SMA 和 1.3 cm 的 VLA 观测中，我们一共探测到 25 条不同的跃迁线，其中包括 8 种不同的分子和原子的同位素，如 CO , CH_3CN , SO_2 , CH_3CCH , OCS , CS , $\text{H30}\alpha/\text{H38}\beta$, NH_3 。超超致密电离氢区中的致密核的电子温度为 $T_e^* \geq 5500 \text{ K}$,

发射测量为 $EM \approx 1.9 \times 10^9 \text{ pc cm}^{-6}$ ，电子体密度为 $n_e = 3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ，射电复合线 $H30\alpha$ 和 $H38\beta$ 的线宽是 $FWHM \approx 43.2 \text{ km s}^{-1}$ ，核本征尺度为 $\sim 3714 \text{ AU}$ 。射电复合线 $H30\alpha$ 呈现出电离外向流驱动分子外向流的证据。基于测量的 Lyman 连续谱流量，可能有一个等同于 O6.5 型的早期恒星位于该电离氢区内部。结合 3.6 cm, 2.0 cm, 1.3 cm, 1.3 mm, 0.85 mm, 0.45 mm 的连续谱数据，我们对该超超致密电离氢区中的致密核进行了能谱拟合，发现自由-自由辐射和热尘埃气体辐射在 1.3 mm 处总测量流量的贡献分别是 75% ~ 45% 和 25% ~ 55%。另外，分子包层显示出内流和外流的特征，其质量下落率和质量损失率分别为 $0.033 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 和 $5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。平均每年气体内流和外流的动量也是一致的，约为 $0.05 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ 。我们认为，物质下落占有主导地位，致密气体的包层质量在迅速的增加中，但是内部的吸积可能已经被迫停止。

通常，作为激发星，年轻的 OB 型星有着强烈的自由-自由辐射。来自于这些激发星的紫外辐射能够加热尘埃和电离气体，并且推动周围的物质向外膨胀，形成我们所说的红外尘泡。来自于演化星对尘泡壳层的辐射反馈有可能触发形成新一代的恒星。通过对尘泡 N68 的位置-速度分布图的研究，我们发现其壳层结构可能正在向外膨胀。对于尘泡 S51，通过比较分子气体和 Spitzer 8.0 μm 辐射，我们认为该尘泡位于运动学距离 3.4 kpc 处。利用 ^{13}CO 和 C^{18}O 的观测数据，尘泡 S51 的壳层结构和前端云都清晰的展现出来。另外，一个外向流和内流特征的分子云被发现于尘泡壳层结构上。该内外流可能代表了新一代的恒星形成，并且是来自于尘泡的膨胀所触发形成的。对于尘泡 N131，我们的目的是研究与其成协的恒星形成，并且推测其起源。通过多方面的分析，我们认为尘泡 N131 可能形成于一个丝状的分子云。由于该丝状云内部来自于成群的较强烈的恒星风的作用，随着物质的被动向外膨胀，强烈的恒星风碎裂了该丝状云，使其形成两段式的丝状云，中间夹着一个很大的尘泡的结构。

关键词： 大质量恒星形成，超超致密电离氢区，尘泡，红外暗云，致密冷核

Abstract

In this thesis, we investigated four projects, including infrared dark cloud, fragmentation and dueteration of dense and cold cores, hyper-compact H II region, and infrared dust bubble. They are not only the production of high-mass star formation, but typically in different evolutionary sequences of the high-mass star formation.

The project of the infrared dark cloud is still in progress. We just show our observational data here. Using IRAM 30m telescope, we obtained HCO⁺, HNC, N₂H⁺, C¹⁸O toward IRDC G31, G33, G34, G35, G38, and G53. The aims are to study their dynamics, stability, temperature, and density.

The fragmentation at the earliest phases is an important process of massive star formation. In this work, the aims are to explore the habitats of the massive clumps at large scale, and cores/condensations at small scale, and the fragmentation process at different wavelengths. Eight massive precluster clumps (G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38, and G25.71) were selected from SCUBA Massive Pre/Protocluster core Survey (SCAMPS) at 850 and 450 μm . VLA D-configuration at 1.3 cm, PbBI BCD-configuration at 3.5 and 1.3 mm, APEX at 870 μm observations were followed up, and archival infrared data at 4.5, 8.0, 24, and 70 μm were combined to study fragmentation and evolution of these eight clumps. Comparison in mass-size relation and high-mass star formation threshold indicates that the eight clumps and most of their subfragmentations are always massive star-forming candidates. The star formations of these eight clumps may be triggered by UC H II regions nearby. The derived flatter slope of mass spectrum may be indicative a turbulent dominated fragmentation. Our study for dueteration is also in progress.

The formation of hypercompact (HC) H II regions is an important stage in massive star formation. Spectral line and continuum observations can explore its dynamic conditions. We present high angular resolution observations carried out with the Submillimeter Array (SMA) and the Very Large Array (VLA) toward the HC H II region G35.58-0.03. With the 1.3 mm SMA and 1.3 cm VLA, we detected a total of about 25 transitions of 8 different species and their isotopologues (CO, CH₃CN, SO₂, CH₃CCH,

OCS, CS, H, and NH₃). G35.58-0.03 consists of an HC H II core with electron temperature $T_e^* \geq 5500$ K, emission measure $EM \approx 1.9 \times 10^9$ pc cm⁻⁶, local volume electron density $n_e = 3.3 \times 10^5$ cm⁻³, and a same width of radio recombination line FWHM ≈ 43.2 km s⁻¹ for both H30 α and H38 β at its intrinsic core size ~ 3714 AU. The H30 α line shows evidence of an ionized outflow driving a molecular outflow. Based on the derived Lyman continuum flux, there should be an early-type star equivalent to O6.5 located inside the H II region. From the continuum spectral energy distribution from 3.6 cm, 2.0 cm, 1.3 cm, 1.3 mm and 0.85 mm to 0.45 mm, we distinguished the free-free emission (25% \sim 55%) from the warm dust component (75% \sim 45%) at 1.3 mm. The molecular envelope shows evidence of infall and outflow with an infall rate 0.033 M_⊙ yr⁻¹ and a mass loss rate 5.2×10^{-3} M_⊙ yr⁻¹. The derived momentum (~ 0.05 M_⊙ km s⁻¹) is consistent between the infalling and outflowing gas per year. It is suggested that the infall is predominant and the envelope mass of dense core is increasing rapidly, but the accretion in the inner part might already be halted.

OB type stars have strong free-free radiation. The ultraviolet (UV) radiation from ionizing stars may heat dust and ionize the gas to sweep up an expanding bubble shell. This shell is causing feedback from evolved stars onto a new generation of stars. The position-velocity diagram clearly shows that N68 may be expanding outward. From a comparison of the morphology of the molecular gas and the Spitzer 8.0 μ m emission, we conclude that the dust bubble is interacting with CO at a kinematic distance of 3.4 kpc. The bubble S51 structure, carried with shell and front side, is exhibited with ¹³CO and C¹⁸O emission. Both outflow and inflow may exist in sources in the shell of bubble S51. They may represent a second generation of stars whose formation was triggered by the bubble expanding into the molecular gas. For the bubble N131, we aim to further explore the molecular clumps and star formation associated with the infrared dust bubble N131 at a higher spatial resolution than previous CO observations, and try to speculate on its origin. The bubble N131 was likely originated in a filamentary nebula, within which the strong stellar wind from a group of massive stars broke up a pre-existing filamentary nebula into the clumps AD and BC, and swept up the surrounded material onto the ringlike shell of the bubble N131.

Keywords: Massive star, HC HII, Bubble, IRDC, Dense and cold core

目 录

摘要	i
Abstract	iii
目录	v
第一章 绪论	1
1.1 恒星形成的概况	1
1.2 大质量恒星形成的初始条件	1
1.3 恒星在早期演化中不同阶段的特征	3
1.4 观测研究现状	5
1.5 关于本篇论文	7
第二章 红外暗云	9
2.1 引言	9
2.2 样本、观测和数据	9
2.3 目的和研究进展	11
2.4 小结	14
第三章 致密冷核的碎裂和氦化	15
3.1 引言	15
3.2 致密冷核的碎裂及其演化阶段	18
3.2.1 观测和数据处理	18
3.2.2 观测结果	24
3.2.3 分析	26
3.2.4 讨论	31

3.3	致密冷核的氘化、维里状态和化学	35
3.4	小结	36
第四章	超超致密电离氢区	39
4.1	引言	39
4.2	SMA 和 VLA 数据观测	42
4.2.1	SMA 观测	42
4.2.2	VLA 观测	45
4.3	G35.58-0.03 的观测结果	46
4.3.1	谱线	46
4.3.2	Moment 图	48
4.3.3	位置-速度关系	51
4.4	G35.58-0.03 的 SMA 和 VLA 的观测研究	51
4.4.1	能谱分布	51
4.4.2	电离氢区	52
4.4.3	射电复合线	55
4.4.4	转动温度	56
4.4.5	运动学特征	56
4.4.6	氨分子吸收线	61
4.5	小结	61
第五章	红外尘泡	63
5.1	引言	63
5.2	尘泡的相关观测	65
5.3	有关尘泡的研究方法与研究进展	67
5.3.1	尘泡的形态学模型	67
5.3.2	尘泡的多波段观测特征	69
5.3.3	激发星与年轻星	76
5.4	尘泡 S51 的研究结果	78

5.4.1	观测与数据	78
5.4.2	结果	81
5.5	尘泡 N68 的研究结果	82
5.5.1	观测与数据	82
5.5.2	结果	82
5.6	尘泡 N131 的研究结果 – I	83
5.6.1	观测与数据	83
5.6.2	结果	86
5.7	尘泡 N131 的研究结果 – II	87
5.7.1	观测与数据	87
5.7.2	结果	90
5.8	小结	95
第六章	总结和展望	97
附录 A	红外暗云	99
附录 B	致密冷核的碎裂和氙化	103
附录 C	超超致密电离氢区	117
附录 D	红外尘泡	121
参考文献	138
研究成果	139
简历	141
致谢	143

插 图

2.1	红外暗云 G35 在致密团块处的 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的谱线	10
2.2	红外暗云 G35 的 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的积分强度图	12
2.3	红外暗云 G35 的 HCO^+ 与 $8\ \mu\text{m}$ 的速度通道叠图	13
2.4	红外暗云 G35 的 HCO^+ 的位置-速度分布图	14
3.1	G23.44 的多波段观测成图	19
3.2	G23.97S 的多波段观测成图	20
3.3	G25.38 的多波段观测成图	22
3.4	G25.71 的多波段观测成图	23
3.5	G23.44-1 和 G23.97S 的 SED 能谱拟合分布图	25
3.6	不同波段、不同尺度的质量-尺度关系和表面密度-质量分布图	26
3.7	每个团块中, 最大质量核的质量-尺度关系和表面密度-质量分布图	27
3.8	不同波段、不同尺度的质量-转动温度关系图	28
3.9	每个团块中, 最大质量云核的形成效率分布图	30
3.10	1.3 mm BCD 阵列中所有凝聚核的质量谱	32
4.1	SMA 上下边带观测的 25 条不同跃迁的谱线	40
4.2	来自于 1.3 mm SMA 连续谱峰值处的 CO (2-1) 等分子谱线	43
4.3	来自于 1.3 mm SMA 连续谱峰值处的 $\text{H}30\alpha$ 等分子谱线	46
4.4	来自于 1.3 cm VLA 连续谱峰值处的 NH_3 等分子谱线	48
4.5	CO (2-1) 等谱线的红蓝翼积分强度等值线与 1.3 mm 等连续谱的叠图	49
4.6	NH_3 (2, 2), (3, 3) 的积分强度等值线与 1.3 cm 连续谱的叠图	50
4.7	NH_3 (2, 2), (3, 3) 的积分强度等值线与速度弥散分布的叠图	52

4.8	NH ₃ (2, 2), (3, 3) 的积分强等值线与以线强度为权重的平均速度分布的叠图	53
4.9	沿着方位角为 90°, 过 1.3 mm 连续谱峰值处的 CO (2-1) 等谱线的位置速度图	54
4.10	超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的能谱分布	58
4.11	分子 CH ₃ CN 和 CH ₃ CCH 的转动温度分布图	59
5.1	电离氢区各向同性地向星际介质膨胀的“球状”模型	68
5.2	红外尘泡 S51 的中红外辐射的三色叠图	69
5.3	尘泡 N49 的多波段轮廓和等值图	70
5.4	红外尘泡 N68 ¹³ CO (<i>J</i> = 1 - 0) 与斯皮策 8.0 μm 辐射强度分布图 ..	72
5.5	红外尘泡 S51 C ¹⁸ O (<i>J</i> = 1 - 0) 与斯皮策 3.6 μm 辐射强度分布图 ..	73
5.6	红外尘泡 N131 ¹² CO (<i>J</i> = 1 - 0) 与斯皮策 8.0 μm 辐射强度分布图 ..	75
5.7	尘泡 S51 的 GLIMPSE 3.6, 4.5 和 5.8, 8.0 μm 的双色图	77
5.8	分子 ¹³ CO 和 C ¹⁸ O 的积分强度等值线与 GLIMPSE 8.0 μm 辐射的叠图	79
5.9	尘泡 S51 中, 位置 A, B, C 处的 MALT90 巡天谱线	80
5.10	沿着尘泡 N131 两条巨型分子云方向的位置-速度图	87
5.11	红外尘泡 N131 从 3.6 μm 到 21 cm 的多波段观测	88
5.12	CO (2-1), CO (1-0), ¹³ CO (1-0) 积分强度与 24 μm 辐射的叠图	89
5.13	24 μm 和 CO (1-0) 的强度随位置的变化谱	91
5.14	CO (1-0) 的位置-速度图	92
5.15	尘泡 N131 中, 团块 A, B, ..., I 的质量分布图	94
5.16	尘泡 N131 的过去和现在	95
A.1	红外暗云 G34 的 HCO ⁺ , HNC, N ₂ H ⁺ 和 C ¹⁸ O 的积分强度图	100
A.2	红外暗云 G38 的 HCO ⁺ , HNC, N ₂ H ⁺ 和 C ¹⁸ O 的积分强度图	101
A.3	红外暗云 G53 的 HCO ⁺ , HNC, N ₂ H ⁺ 和 C ¹⁸ O 的积分强度图	102
B.1	G18.17 的多波段观测成图	104

B.2	G18.21 的多波段观测成图	105
B.3	G23.97N 的多波段观测成图	106
B.4	G23.98 的多波段观测成图	107
B.5	谱线 NH_2D 、 NH_3 (1, 1) 和 (2, 2)	108
B.6	NH_3 (1, 1) 的积分强度图与 3.5 mm 连续谱的叠图	109
B.7	NH_2D 的积分强度图与 3.5 mm 连续谱的叠图	110
C.1	^{13}CS (5-4) 等谱线的积分强度等值线与其相应的强度权重的平均速度分布的叠图	118
C.2	^{13}CS (5-4) 等谱线的积分强度等值线与其相应的速度弥散分布的叠图	119
D.1	尘泡 S51 中, 分子 ^{13}CO 以每 1.0 km s^{-1} 为通道的等值线与 GLIMPSE $8.0 \mu\text{m}$ 辐射的叠图	122
D.2	尘泡 S51 中, 分子 C^{18}O 以每 1.0 km s^{-1} 为通道的等值线与 GLIMPSE $8.0 \mu\text{m}$ 辐射的叠图	123
D.3	尘泡 S51 中, HCN 等谱线的积分强度等值线与 $T_{\text{MB}}(^{13}\text{CO})$ 等参数分布的叠图	124
D.4	尘泡 131 的 ^{12}CO 观测的通道图与 GLIMPSE $8.0 \mu\text{m}$ 的叠图	125
D.5	小沉泡 N131-A 的 NVSS 21 cm 连续谱和 IRAM CO (1-0) 谱线与 Spitzer-IRAC 三色图的叠图。	126

表 格

3.1 PdBI 观测的设置参数	17
3.2 红外数据的参数	18
4.1 G35.58-0.03 的谱线参数及高斯拟合的结果	41
4.2 G35.58-0.03 的不同波段的连续谱参数	44
4.3 CH ₃ CN 和 CH ₃ CCH 转动温度图的相关参数	47
5.1 红外尘泡 N68 周围年轻星的参数	84
5.2 与尘泡 N131 分子云相关的团块参数	85
5.3 尘泡 N131 周围 IRAS 点源的参数	86
5.4 尘泡 N131 中, 高斯团块的参数	93
B.1 450, 850, 870 μm 连续谱的团块参数	111
B.2 3.5 mm 连续谱的团块参数	112
B.2 3.5 mm 连续谱的团块参数 (续)	113
B.3 1.3 mm 连续谱的团块参数	114
B.3 1.3 mm 连续谱的团块参数 (续)	115
D.1 尘泡 N131 内部的激发星候选体	127

第一章 绪论

1.1 恒星形成的概况

恒星形成是在致密的分子云中，高密度区域经过坍缩和碎裂，经过长期演化，最终形成恒星的过程。作为天体物理学的一个分支，恒星形成的研究范畴包括作为前导的星际介质和巨分子云到恒星形成的过程，早期的原恒星和年轻星则是恒星形成的直接结果。该理论过程与行星的形成密切相关，其为天体物理学研究的另一个重要分支。恒星形成理论的研究，不能只考虑一颗单独恒星的形成，还必须统计双星系统，及大样本的初始质量函数的基本物理问题。

依据目前的恒星形成理论，分子云的核心（特别是高密度区）会因为重力不稳定，由片段的碎片开始坍缩和碎裂（一般称为自然的恒星形成），或是因为来自超新星的冲激波，或是在附近的其他能量充沛的天文学过程触发分子云中的恒星形成（一般称为触发的恒星形成）。部分的重力能量在坍缩和碎裂的过程中会以红外辐射的形式损失掉，其余的则会用于增加天体核心的温度。累积的部分物质将会形成星周盘，当温度和密度够高时，氘的核融合将会被引发，并产生向外的热辐射压，结果将使坍缩和碎裂减缓（但不会停止），而由尘埃和气体组合成的物质仍继续如雨般地落在原恒星上。在这个阶段，或许是由落入物质的角动量造成的，将会产生两极喷流。最后，在核心的氢开始燃烧成为恒星，这时，还环绕在周围的物质将开始被驱离。

原恒星的发展在赫罗图上会遵循林轨迹 (Hayashi, 1961)，原恒星会继续收缩，直到到达林边界，然后收缩会以稳定的温度继续下去直到凯尔文-赫姆霍尔兹时标。质量低于 $0.5 M_{\odot}$ 的恒星将进入主序带，稍重的原恒星，在林轨迹的终点仍将缓慢的塌缩，以接近流体静力平衡 (Henyey et al., 1955)。这种活动形式会使恒星的质量在大约一个太阳质量的附近。高质量的恒星形成过程，也有类似的演化（发展）时程表，但时间会短许多，而且也还未清楚的被定义出来。恒星后期的发展属于恒星演化研究的范畴。

1.2 大质量恒星形成的初始条件

一颗恒星的光谱型、寿命和最终状态主要取决于其质量。因此，理解恒星

形成的初始质量函数的起源问题非常重要。初始质量函数通常具有幂率谱的形式，如 $\Delta N/\Delta M \propto M^\alpha$ 。对初始质量函数形式的解释，大多以分子和尘埃辐射所揭示的团块质量谱为出发点。然而，大部分这类结构中并没有恒星形成，因为恒星主要形成于那些质量较大和密度较高的团块中。因此，只有了解那些具有大质量恒星候选体特征的团块如何形成，如何碎裂成单个恒星形成核的完整图像后，才有可能真正理解恒星形成的初始质量函数。通常我们测量得到的大质量恒星的质量谱斜率与 [Salpeter \(1955\)](#) 获得的谱指数相近，为 $\alpha = -2.35$ 。这些研究表明，与恒星形成相关的致密团块可能处于自引力状态或者是正在坍缩形成原恒星的过程中。对这些核的结构、动力学、以及分布的研究，将有助于我们更好地理解团块结构及演化和恒星形成的初始质量函数之间的关系。

大质量恒星形成并不简单的是小质量恒星形成的升级版，特别是对于大于 $20 M_\odot$ 的零龄主序星。对比大质量与小质量恒星形成，有许多不同的和复杂的物理过程。首先，在大质量恒星形成中，辐射压对来自于周围气体和尘埃的下落有着巨大的排斥作用，从而导致减少吸积率；强大的辐射压能够摧毁盘结构和源恒星包层，增加喷流的开口大小，破坏双极外向流的准直性；其次，大质量恒星实际上诞生于主序阶段，其盘结构已经被辐射压破坏，但是其仍然处于致密中性物质的包围中。观测到的双极外向流表明，可能盘结构仍然存在，但是具体形式不太清楚；另外一个特别的不同之处，就是关于原恒星团的竞争吸积学说 ([Bonnell & Bate, 2006](#); [Bonnell et al., 2001](#); [Krumholz et al., 2005](#))。竞争吸积在大质量恒星形成过程中起着重要的作用，而对于小质量恒星形成来说，直接通过金斯不稳定性的引力坍缩和湍动坍缩就能够达到形成小质量星的初始条件。二者的根本区别在于大质量恒星的吸积过程可以一直延续到其进入主序阶段以后，而小质量恒星的吸积则在其演化到主序前就停止了。另外，大质量恒星形成过程中 90% 的质量并非来自其初始团块或包层中，而是通过对距离恒星较远的物质不断的竞争吸积获得的 ([Bonnell et al., 2004](#))。然而，该理论模型仍然具有一定的局限性。最后，大质量星对触发新一代恒星形成有着关键的作用，一般来说，扩张的电离氢区、星风和超新星爆炸等天体活动，能够提供外部的压力致使周围的中性物质凝聚和坍缩，从而形成致密的物质。

一般来说，关于大质量恒星形成过程，有三种不同的学说：1、孤立核的全局坍缩模型；2、在星团中的竞争吸积模型；3、致密系统中的碰撞并合模型。关于这些理论模型，有着不同的观测证据，也存在着相互矛盾之处。团块的碎裂和坍缩过程被认为是恒星形成理论中的关键问题，它是恒星形成过程的

起点。恒星形成总是以成团的致密核形式聚集在一起，那么这些小尺度的致密团块是如何形成的呢？在引力不稳定密度扰动的最小临界质量，即金斯质量，小于团块的质量时，就会引起引力坍缩。换句话说，就是在恒星形成过程中，当分子云的热压力不足以抵抗引力时，会在引力的作用下发生坍缩。对于一个密度 ρ 均匀，温度 T 恒定的等温介质，金斯质量可以表示为：

$$M_J = \rho \lambda_J^3 = 5.57 c_s^3 / G^{3/2} \rho^{1/2}. \quad (1.1)$$

其中， λ_J 为金斯长度，可以表示为：

$$\lambda_J = \pi^{1/2} c_s (G\rho)^{-1/2}. \quad (1.2)$$

其中， $c_s = (kT/m)^{0.5}$ 为等温声速， m 为粒子平均质量。另外一个因素是团块的转动、磁场以及湍动等发生了剧烈的变化，不足以维持团块的稳定时，所导致的团块碎裂和坍缩。在转动坍缩的影响下，主要考虑的是角动量问题，漩涡密度扰动引起的引力扭矩会导致角动量的向外输送从而产生向着中央天体的质量流，最终可能碎裂成双星或者多星系统。磁场一直被认为是支撑分子云引力坍缩的重要因素之一。目前，许多相关的工作都致力于模型分析磁场支撑的最初由缓慢的双极扩散形成的分子云核演化 (Mouschovias & Ciolek, 1999; Shu et al., 1987)。随着中心部分慢慢地收缩，自引力会变得越来越重要，而且云核会在磁场方向变得越来越扁平而有可能形成盘结构。不过，详细的计算表明，云核中心附近的引力会在密度还没有增加很多时，就很快克服磁场的支撑而使云核进入动力学坍缩阶段。然而，研究表明，湍动对云核的支撑作用可能比磁场更重要，动力学坍缩则更多地是由湍动的扩散所致而非双极扩散 (Williams & Myers, 2000)。在整个坍缩过程中，磁力由于总是小于引力而并非不重要，其作用只是在某种程度上是坍缩有所减速。

1.3 恒星在早期演化中不同阶段的特征

目前，对于大质量恒星形成的观测和研究来说，最重要的手段是利用高分辨的观测，比如 SMA、JVLA、NOEMA、ALMA，对大量样本源的演化阶段进行分类研究；最重要的问题是研究其不同演化阶段的运动学、分子化学、等级演化序列、温度、光度等特征。以往的观测研究表明，大质量恒星的形成过程经历着以下几个阶段：

1、红外暗云及其镶嵌的大质量无星核 (starless core 或者 prestellar core), 其代表着恒星形成的初始条件。在大质量恒星形成的初始环境中, 存在着温度低、恒星形成不活跃的天体。其在红外辐射波段内没有明显的辐射迹象, 而在亚毫米波范围存在着致密的冷核, 这类天体一般被称为无星核。后来观测发现, 无星核一般深埋在红外暗云中, 并且以成团的形式存在着。分子谱线的观测也表明, 无星核具有较大的质量 (约为 $10^3 M_{\odot}$), 较低的温度 (约为 10 K), 较高的密度 (约为 10^6 cm^{-3})。并且呈现出气体的下落和高速外向流等恒星形成的迹象。关于这类大质量的致密冷核是如何形成的, 是通过渐渐聚集的较慢过程, 还是诸如湍流介质中激波作用下的较快速过程呢? 目前还没有很好的结论。

2、大质量原恒星, 其被大质量的包层物质包裹, 温度梯度向中心方向增加。原恒星是在星际介质中的巨分子云收缩下出现的天体, 是恒星形成过程中的早期阶段。对一个太阳质量的恒星而言, 这个阶段至少持续大约 10^5 年。它开始于分子云核心的密度增加, 结束于金牛 T 星的形成, 然后就发展进入主序带。这个阶段由金牛 T 风——一种恒星风的开始宣告结束, 标志着恒星从质量的吸积进入能量的辐射。观测显示巨型分子云总体上近似在维里平衡的状态, 星云中的重力束缚能被星云中构成分子的动能平衡。任何对云气的干扰都可能扰乱它的平衡状态, 干扰的例子可以是来自超新星的震波, 星系内旋臂的密度波, 或是与其他云气的接近或碰撞。无论扰动的来源是何种, 只要够大就可能在云气内特定的地区造成重力大于热动能的重力变化。

3、热核, 随着温度明显升高, 复杂的有几十分子从尘埃幔中蒸发出来而丰度大增。在研究致密电离氢区周围物理环境时, 发现一些致密核与热分子气体团块和水脉泽成协。这些团块具有温度高 (大于 100 K), 密度大 (约为 10^7 cm^{-3}), 尺度小 (约为 0.1 pc), 消光大 (约为 100~1000 星等) 的特征 (Hofner & Churchwell, 1996; Walmsley & Schilke, 1993), 这类团块被称为热核。我们相信, 热核是先于大质量恒星形成过程中的致密电离氢区出现的演化状态。坍缩和旋转是热核阶段常见的动力学现象, 并且在热核阶段的 IRAS 20126+4104 中发现了盘的存在证据, 这为中心的恒星形成提供了必要的质量补给 (Zhang & Ho, 1997; Zhang et al., 1998a,b)。热核中丰富的分子谱线将促进其化学演化的研究, 已经观测到一些分子在高激发态发射及丰度明显地增加, 比如 NH_3 , H_2O , H_2S , CH_4 , CH_3OH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ 等饱和分子的丰度远高于红外暗云中的典型值 (Millar, 1997; Ohishi, 1997)。

4、超超致密电离氢区 (HC III)，大质量恒星开始进入主序阶段，并且继续吸积周围的物质，UV 光子形成致密的电离包层。在大质量分子云致密核的观测中，发现一些非常致密的弱射电连续谱源，其不同于光学薄射电连续谱强的超致密电离氢区。在观测上，这类天体具有的特征是非常致密（约为 10^6 cm^{-3} ），尺度非常小（约为 0.01 pc ）(Kurtz & Franco, 2002; Kurtz, 2000a)。Keto (2003) 曾预言过这样一个阶段存在的可能性。在经典的压力驱动的电离氢区膨胀模型中考虑了恒星引力势能后，在足够小的尺度内，引力可以克服热压力而占主导地位，相关的计算表明一个新近形成的半径小于临界半径的电离氢区将受限于恒星的引力而不能进行流体动力学膨胀，从而使得吸积得以继续。此时与恒星形成密切相关的分子气体吸积流在临界半径处变为电离态。中心恒星的质量和数目也会继续增加，直到电离光子的流量足够的强，以致电离的平衡边界超过临界半径而发展为流体动力学膨胀，形成超致密电离氢区并最终膨胀成为经典的电离氢区，同时吸积也停止。

5、超致密电离氢区 (UC III)，中心星质量继续增加，电离光子越来越多，辐射压摆脱引力的束缚，开始不断的向外膨胀，并最终成为经典的电离氢区。大质量和小质量恒星形成过程中的一个重要的区别就在于前者氢燃烧之前的流体静力学阶段的寿命极短，从而使得其早期演化阶段仍深埋于母体分子云中形成一种像茧一样的结构。电离氢区作为存在这样一个阶段的证据，成为研究大质量恒星形成的重要示踪器。超致密电离氢区的观测特征为尺度小（约为 0.1 pc ），致密（约为 10^5 cm^{-3} ）的电离特征，但是会释放大量的红外辐射。为解释超致密电离氢区的形态和寿命问题，有如下几种物理模型：a、弓激波模型，b、香槟流或者尘泡模型，c、下落模型，d、光致蒸发盘模型，e、压力约束模型，f、挟带质量的星风模型。

1.4 观测研究现状

在银河系的质量分布中，大质量星占据着重要的地位，研究大质量星的形成过程是了解神秘物理现象的关键。然而，大质量星形成的初始阶段仍旧是个谜，其挑战着人类的观测和理论研究的极限。在理论研究上，关于大质量恒星形成的问题之一是辐射压与周围的尘埃及气体致密核的相互作用。研究表明，足够强大的辐射压能够阻止中心星的进一步吸积，从而抑制质量的迅速增加。另一方面，大质量星在吸积物质的同时，必定面临着如何转移内部的角动量问

题。众多的理论模型都尝试着解释角动量转移的问题，然而由于观测能力的受限，至今无法很好地确定这些模型的可靠性。

近年来国际天文观测发展迅速，一系列大型的先进观测设备相继投入使用，包括 10 米级光学望远镜、2.4 米哈勃空间望远镜、高灵敏和高空间分辨率的空间红外、紫外、X 射线和 γ 射线望远镜、地面和空间甚长基线射电望远镜等，使各波段观测能力得到了量级上的提高，开创了天文学全波段观测研究的崭新纪元。特别引人瞩目的观测设备是：1、单天线巡天项目，如 870 微米的 ATLASGAL 巡天项目，其在南天找到了大量的致密冷核，为我们研究大质量恒星最早期的阶段提供了优质的样本数据。相应的用于观测北天的 SCUBA 设备，同时在 850 微米和 450 微米进行了部分天区的巡天，其将弥补了 ATLASGAL 项目无法覆盖的缺陷，这将对整个银河系中早期恒星形成区的大样本无偏的普查研究提供一批宝贵的数据；2、空间望远镜 HERSCHEL 和 PLANCK 也具有相当强大的威力，其对整个银河系及河外星系进行了多波段的巡天工作，并且对个别天区进行了特别的观测，为我们做大质量恒星形成的研究提供了非常有价值的的数据；3、欧洲航天局（European Space Agency）耗资约 8 亿英镑的“盖亚”太空望远镜（Gaia）已于 2013 年 12 月发射升空。“盖亚”太空望远镜配备目前最大型的高感度摄录机，传感器全长 1 米。该望远镜将在外太空的 6 年间持续观察 10 亿颗行星。将通过该望远镜 80 次重复观察到行星的路径，计算出行星实际轨道，再与地球公转轨道进行三角测量。“盖亚”的一个主要任务是利用其高精度的摄像头绘制出首张银河系 3D 地图，这将为天体物理学研究中一个非常重要的物理参数“距离”给出一个比较精确的答案；4、在过去应用比较广泛的厘米波、毫米波/亚毫米波高分辨率干涉仪主要为美国的 VLA、SMA、CARMA，欧洲的 PdBI 和澳大利亚的 ATCA 等。通过这些望远镜的观测研究，我们对大质量恒星形成的观测研究已经取得了阶段性的成果。随着天文观测研究更多的需求，天文技术人员已经对由 27 面 25 米单天线组成的 VLA 射电干涉仪望远镜进行了终端和后端的升级改造，使其具有更宽的带宽和更高的灵敏度，并更名为 JVLA。另外，位于北半球的 PdBI 干涉仪由 6 面 15 米的单天线升级为 12 面镜子，其将为北天最强大的干涉仪，其更名为 NOEMA；5、目前世界上最强大的干涉仪是 ALMA 位于 5000 多米的非常干燥的 Atacama 沙漠，其由 66 台 12 米和 7 米的单天线组成，基线分布从 150 m 到 16 km，主要捕捉毫米波和亚毫米波信号，分辨率可达 0.01 角秒，为研究宇宙中分子气体、大爆炸辐射以及星际尘埃提供更精确数据，并且能够探测到

致密凝聚核最内层的结构，其将为天文学的发展进步带来无与伦比的成果；6、平方千米阵（SKA）是计划中的下一代巨型射电望远镜阵，其工作在 0.1 到 30 GHz 的波段，有效接收面积可以达到约 1 平方公里，灵敏度将比目前世界上最大的射电望远镜还要高 50 倍。平方公里阵预计能够探测到宇宙大爆炸之后第一代恒星和星系形成发出的电磁波，揭示磁场在恒星和星系演化过程中的作用，探测暗能量产生的种种效应。

1.5 关于本篇论文

大质量恒星的形成主导着银河系的结构和演化。在大质量恒星形成的理论研究和观测上，由于其演化时标非常短，对于从无星核 (starless core 或者 prestellar core) 到流体静态核 (first hydrostatic core)，再到原恒星核 (protostar) 的研究仍然知之甚少，但这是理解大质量恒星形成的关键一步。如何建立一个好的相对演化时标系统，如何突破远距离高消光的限制，如何找到合适的高密度和低温度的探针，是我们正面临和亟待解决的问题。

前面已经介绍，一般认为恒星形成经历着以下几个演化时间序列：a、分子云凝聚和成团；b、Prestellar core (与红外暗云密切相关)；c、Hot core (热核阶段)；d、Hypercompact HII region；e、Ultracompact HII region；f、Compact HII region；g、H II region；h、Evolved star；i、Bubble 膨胀/超新星爆发。这些重要的演化阶段，都是研究大质量恒星形成过程的热点问题，也是最基本的问题。在我的博士学位论文课题中，将主要围绕着：b、Prestellar core；d、Hypercompact HII region；i、Bubble 进行相关研究。我们将结合不同空间分辨率的红外数据、毫米波和亚毫米波的数据，在不同尺度上，利用不同的环境示踪分子，在不同层次上，对这些重要的恒星形成演化阶段进行解读和深入研究。

第二章 红外暗云

2.1 引言

长久以来，我们对大质量恒星形成的研究，主要针对于亮的红外源，其主要来自 IRAS 的观测数据 (Beuther et al., 2007; Zinnecker & Yorke, 2007)。然而，高质量的恒星形成起源于冷的、低光度的环境。寻找和研究低光度的原恒星，将是非常重要的工作。最近，一些巡天项目找到了被认为是大质量恒星形成的最早期阶段的样本。主要来自于两种方法：1、利用亚毫米波段的连续谱数据对一些有名的电离氢区、水脉泽和甲醇脉泽，或者红外源进行成图观测，从而发现了许多冷暗的云核 (Hill et al., 2005; Klein et al., 2005; Motte et al., 2003)；2、在高的不透明度的源中（如 ISO, MSX, SPITZER），寻找那些以吸收为主的源。这些吸收特征就是我们所说的红外暗云。在这些红外暗云中，栖息着早期的大质量冷核 (Carey et al., 2000; Rathborne et al., 2006)。与光学上的暗星云 (Dark Nebula, 例如马头星云) 类似，红外暗云也是在背景的弥散红外辐射上呈现的暗影，一般在银道面上较亮的中红外辐射 ($8\ \mu\text{m}$ 的 PAH 辐射) 背景上可以看到。 $8\ \mu\text{m}$ 附近尘埃消光较小，只有到分子云中最密集的部分可以吸收这种背景辐射，所以红外暗云代表了致密的分子云。1996 年在 ISO 对内银道面 $15\ \mu\text{m}$ 的巡天中首次发现，至今在 MSX、ISO、Spitzer 的银道面巡天中已经发现了上万个。

红外暗云有一些显著的特点，例如：因为是在背景上的消光，所以一般认为是在动力学距离的近端，平均距离为几个 kpc；多数处在旋臂上；大小在几个 pc 左右，很多具有丝状外形，能进一步分辨出团块 (clumps) 乃至核 (cores) 的结构；较低的温度 ($< 25\ \text{K}$)，较高的柱密度 ($10^{23}\text{--}10^{25}\ \text{cm}^{-2}$)，高的体密度 ($> 10^5\ \text{cm}^{-3}$)；质量在几百到上千太阳质量之间。红外暗云通常是由致密 ($10^4\text{--}10^6\ \text{cm}^{-3}$) 的分子团块构成，并且以亮的中红外辐射为背景。一般来说，大质量恒星形成的早期阶段发生在红外暗云内部。然而红外暗云在红外波段具有较高的消光特征，这对大质量恒星的早期形成带来了困难，但在其它波段是透明的。

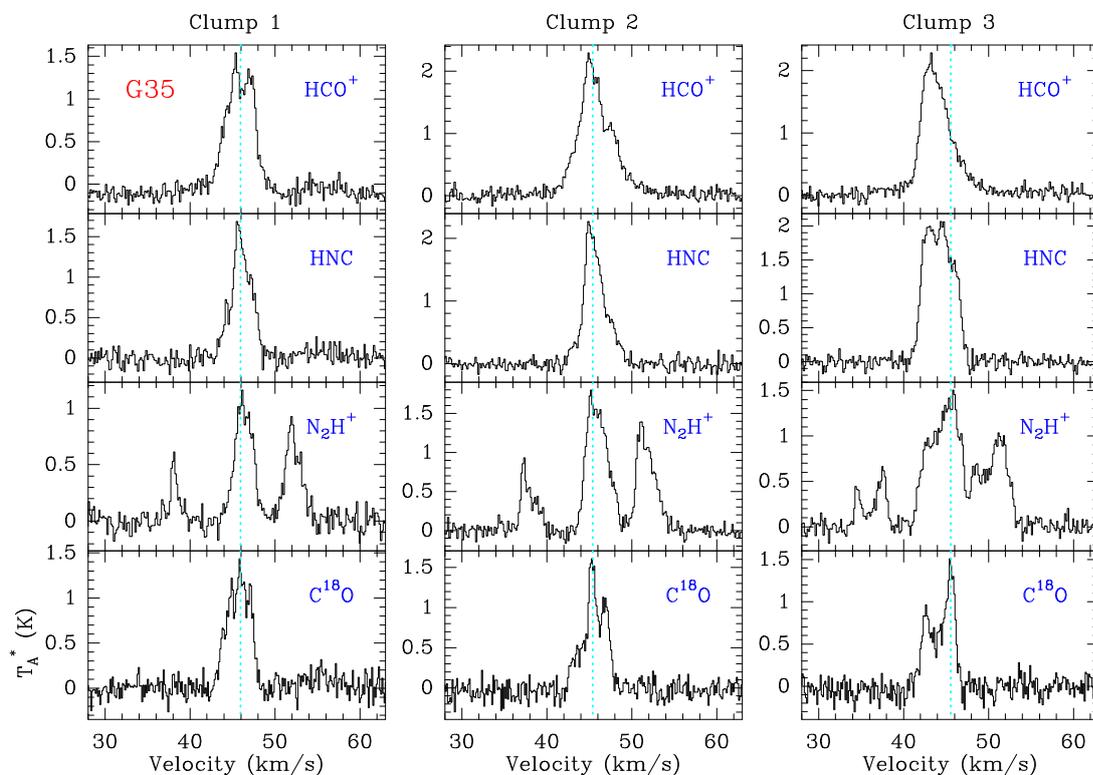


图 2.1: 红外暗云 G35 在致密团块处的 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的谱线。其中, clumps 1, 2, 3 对应的谱线来自于图 2.2 中相应的位置。绿色的虚线给出了致密团块的系统速度。

2.2 样本、观测和数据

在 Rathborne et al. (2006) 的工作中, 他们主要对 38 个红外暗云源进行了 1.2 mm 连续谱的观测和研究, 并且分辨出 140 个致密冷核, 这些冷核与 $8\ \mu\text{m}$ 峰值反相关。在形态学特征上, 这些红外暗云呈现出丝状结构和致密的团块结构。在该项目研究中, 我们从 Rathborne et al. (2006) 的红外暗云样本源表中选取了 6 个样本进行了高分辨率的分子谱线观测, 包括 MSXDC G031.97+00.07 (G31)、G033.69-00.01 (G33)、G034.43+00.24 (G34)、G035.39-00.33 (G35)、G038.95-0.47 (G38) 和 G053.11+00.05 (G53) 等。其中, 源 G31, G33, G34 和 G35 是丝状结构的, 而源 G38 和 G53 是致密的团块结构。

我们于 2013 年 12 月 25 日到 28 日和 2014 年 4 月 17 日到 20 日, 利用位于西班牙 Granada 的 IRAM 30-m 望远镜¹ 进行了 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的

¹Based on observations carried out with the IRAM 30m Telescope. IRAM is supported by INSU/CNRS (France), MPG (Germany) and IGN (Spain).

相对高分辨率的观测。我们利用了 E90 接收机，可以同时覆盖这四条谱线。快速傅立叶频谱仪的频率分辨率约为 48.8 kHz，相应的速度分辨率是 0.16 km s^{-1} 。利用 OTF 扫描模式，在横向和纵向的两个方向上对这四个源进行了扫描。另外，结合 ATLASGAL $870 \mu\text{m}$ 以及其他红外数据，对红外暗云样本进行深入地研究和分析。

关于数据处理，我们主要利用 GILDAS 和 MIRIAD 天文数据处理软件，并且结合 Python 作图工具对分子谱线和连续谱数据进行处理和分析。在初步的数据分析中，我们已经获得了一些致密核处的谱线，所有观测区域的积分强度图，并且和 8, 24, 70, $870 \mu\text{m}$ 数据进行了叠加比较（图 2.1 和 2.2）。另外，我们对这些红外暗云的速度结构做了简单的分析，制作了速度通道图和位置-速度图（图 2.3 和 2.4）。

2.3 目的和研究进展

大质量恒星在星系中扮演着重要角色：强劲的星风向星际介质中注入重元素，并可能触发新一代恒星形成；以超新星爆发结束自己的生命，产生了 Fe 以上的元素；河外星系恒星光度的大部分来自于其中的大质量恒星。但是，目前人们对大质量恒星形成过程的认识还远不像小质量恒星那样完善。通常认为，大质量恒星诞生于同样大质量并且非常密集的尘埃和气体云中，但是由于平均距离较远，周围消光严重，以及演化时标很短等种种原因，对大质量恒星形成区域的观测很困难，具体的形成过程众说纷纭。目前存在竞争吸积、单核吸积、碰撞并合等模型。

反观红外暗云代表的致密分子云，首先、它们具备低温、高密度、大质量等特点，符合大质量恒星形成的条件；其次、它们有丰富的次级结构，例如团块、核，分析这些结构发现，红外暗云正经历碎裂过程；最后、观测上已经发现位于暗云内部的原恒星核、暗云表面上的原恒星、前主序星以及镶嵌在最致密区域内的大质量恒星。因此，红外暗云很有可能代表了大质量恒星/星团形成的极早阶段。当然，还有很多需要澄清的问题，例如各级结构是处于准静态还是正在经历引力塌缩（主要是比较维里质量，根据 H_2 和 CO 的分子比重估算出氢分子的气体质量，但是维里质量存在很多不确定性），这两种状态又是如何转化的。

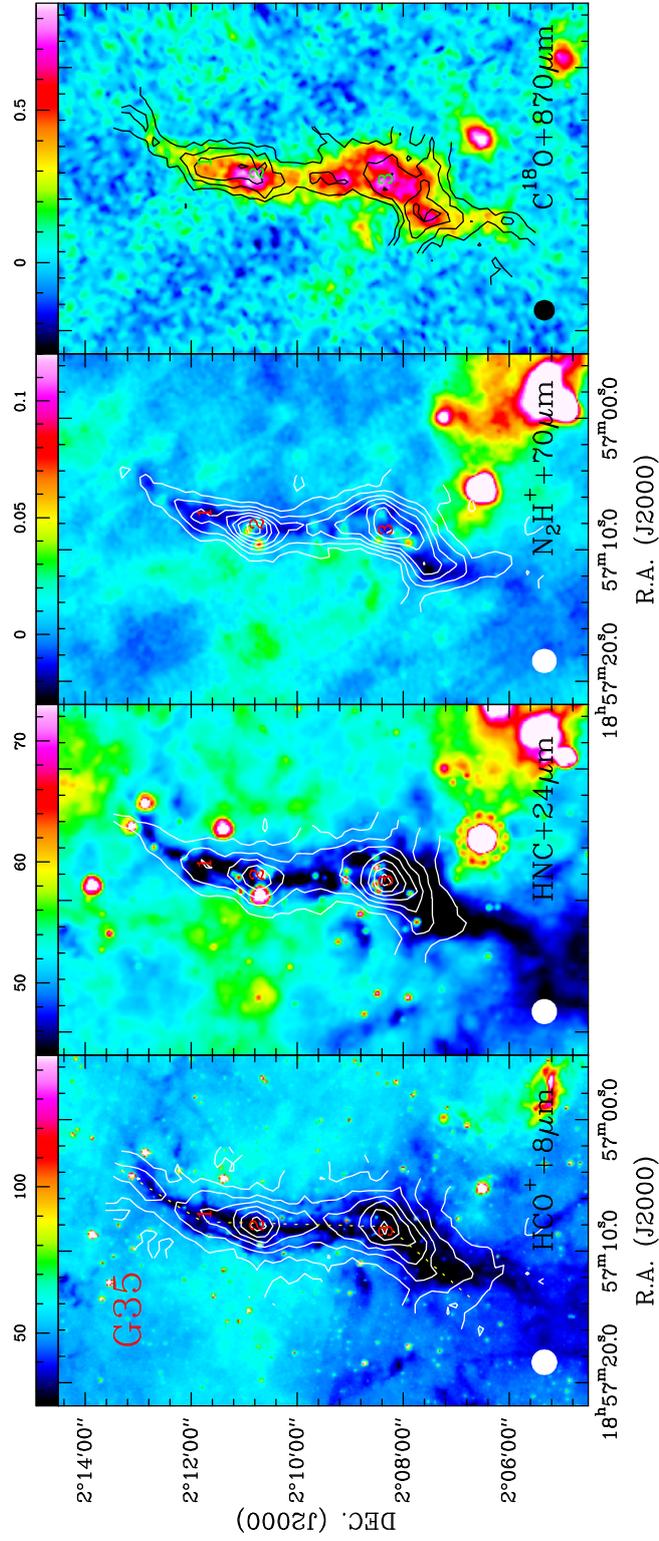


图 2.2: 红外暗云 G35 的 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的积分强度图。等值线图为分子气体辐射，背景彩图为尘埃辐射，其对应的名称标在了图中。在每个图的左下角还标注出了空间分辨率的大小。

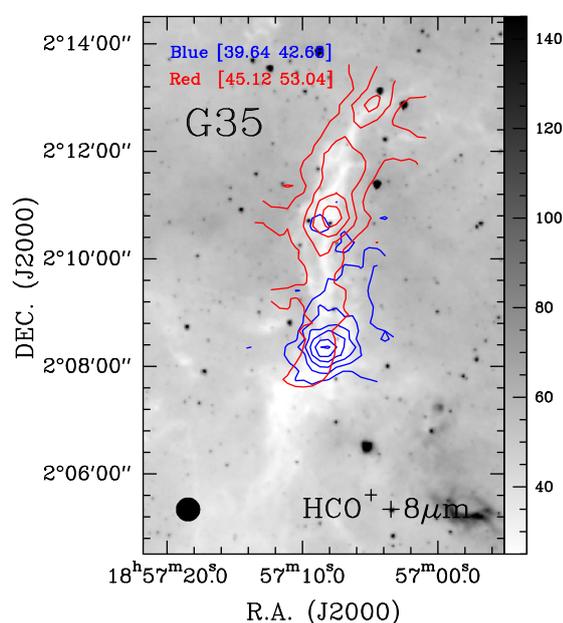


图 2.3: 红外暗云 G35 的 HCO^+ 与 $8\ \mu\text{m}$ 的速度通道叠图。红色和蓝色的等值线图分别给出了 HCO^+ 在两个不同速度区间的积分强度分布图。另外，背景图为 $8\ \mu\text{m}$ 的尘埃辐射。

利用 IRAM 30m 望远镜，我们观测了 6 个红外暗云，观测的谱线分别 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 。其中 HCO^+ 是较好的动力学探针； N_2H^+ 可以很好地示踪较冷的致密核，利用其超精细结构，可以计算出分子云的光学厚度和柱密度； C^{18}O 在较冷的环境下会迅速冻结在附近的冷尘埃颗粒上。因此，利用这几条线的特征，我们可以很好地研究红外暗云的物理和化学特征。

利用 Gaussclumps 准则，我们假设致密核是以高斯流量密度分布的，从而筛选出一些分子云致密核。并且，我们将其和 870 微米的连续谱进行比较。发现这些致密核在 870 微米峰值处有好的相关性。因此，它们是一些较冷、早期的致密核，这将为我们下一步的高分辨率研究提供好的样本。沿着丝状云的方向，我们对红外暗云进行了动力学环境的分析，发现存在着速度梯度，说明在红外暗云中可能存在着物质的流动。

关于我们的红外暗云样本，其中四个存在着红外亮核，另外两个存在红外暗核，我们将进一步比较这两者的物理和化学的区别。

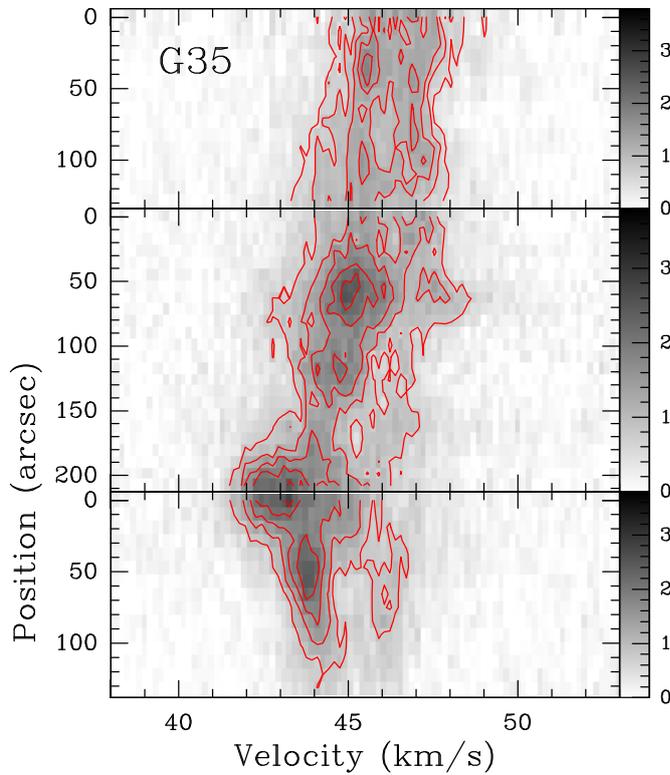


图 2.4: 红外暗云 G35 的 HCO^+ 的位置-速度分布图。其中, 抽取的位置如图 2.2 中虚线所示。

2.4 小结

该课题的研究目的主要是: 1、红外暗云的动力学特征; 2、红外亮核与红外暗核的演化特征、及其区别; 3、尘埃团块和分子云团块的稳定性; 4、寻找致密冷核, 为进一步的高分辨观测做准备。

我们主要通过利用了 IRAM 30m 望远镜对一批红外暗云进行观测 (G31、G33、G34、G35、G38、G53), 观测的谱线分别是: HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 。利用光学厚的 HCO^+ , 并结合光学薄的 N_2H^+ 对这批红外暗云的动力学结构进行测量后, 我们发现丝状的红外暗云存在着速度梯度; 我们将结合 NH_3 谱线, 对这批红外暗云的温度和密度结构进行分析; 还将分析红外暗云中的分子和尘埃团块的物理形态, 并且研究其稳定性。

第三章 致密冷核的碎裂和氦化

3.1 引言

总所周知，大质量恒星通常形成于成团的环境中，并且其中聚集着大量的小质量星。因此，了解星团的形成环境是研究大质量星形成的关键过程（例如：猎户座星团，[Hillenbrand & Hartmann \(1998\)](#)）。小质量星的形成被认为来自于致密丝状云或者盘结构的碎裂，然后可能伴随着物质的喷射从而截断其质量的增长 ([Bonnell et al., 2007](#))。对于大质量恒星的形成，有两种模型比较流行。其一，认为大质量星和星团形成于相似的分子云的碎裂，但是伴随着加速吸积的过程 ([McKee & Tan, 2002, 2003](#); [Myers, 1998](#); [Padoan & Nordlund, 2002](#))；其二，大质量星形成于低质量星的并合和竞争吸积。然而，这两种模型都有自己的局限性，他们都能合理地预测致密团块的质量分布情况，所以利用初始质量函数研究致密团块的质量分布状态将是理解大质量恒星形成过程的一个重要步骤 ([Bonnell & Bate, 2002](#); [Bonnell et al., 2001, 2004](#); [Klessen & Burkert, 2001](#))。

虽然这是事实，每个学派都有其局限性（如碎裂模型难以解释对它们的母体星群的中心大质量恒星的聚集问题；关于竞争吸积模型的要求，我们尚未观测到恒星密度的聚集，不包括辐射反馈）。每个模型都明确预测了 prestellar 核/原恒星的核质量分布方程与初始质量函数的关系 ([Bonnell et al., 2004](#); [Padoan et al., 1997](#))。分子云碎裂模型预测的是每一个 prestellar 核的质量固定在云碎裂的开始，同样和 prestellar 核质量分布函数应该反映的是最初的恒星质量函数或初始质量函数)。与此相反，吸积模型认为在原恒星阶段或者原恒星核的聚集阶段，其可以通过竞争吸积的过程聚集大量的恒星质量。几乎可以肯定，这些模型预测了原恒星的初始核质量与初始质量函数是不相关的 ([Bonnell et al., 2007](#))。

研究分子云的碎裂过程被认为是判断这两种学说的重要手段。在恒星形成的较早期阶段，团块是光学厚的，并且以自由下落时标等温地坍缩。随着不透明度和密度的增长，坍缩逐渐进入绝热的坍缩阶段 ([Shu, 1977](#))，这时质量吸积效率随之下降。大质量星附近总是伴随着低质量原恒星团的形成，如 ρ Oph、NGC2068/2071，这是总所周知的。利用单天线望远镜，我们可以很好地了解

这些天体的云核质量分布方程。对于云核质量小于 $< 5 M_{\odot}$ 的质量分布方程确实遵循初始质量函数 (Motte et al., 1998, 2001), 因此团块碎裂的假设被认为是小质量星团情况的有力依据。对于大质量星形成来说, 较强的电离辐射能够光致蒸发盘结构和原恒星的包层, 这将降低质量吸积率。因此, 大质量星的形成不仅仅是小质量星在盘吸积上的升级版。

早期大质量恒星形成的碎裂过程主要处于等温阶段。随着团块的坍缩, 密度上升, 但是金斯质量将下降, 这将导致形成许多小质量的团块。因此, 一些神秘的力量一定会阻止团块的碎裂过程, 比如辐射反馈、引力、湍流、磁场或者热效应会影响团块的碎裂状态 (Bodenheimer, 2011; Bonnell et al., 2007; Palau et al., 2014, 2013)。最近, 一些关于大质量致密核碎裂的观测研究在尝试回答这些问题。在 Cygnus X 的观测中, Bontemps et al. (2010) 利用 PdBI 在 1.3, 3.5 mm 波段进行了 5 个大质量团块的高分辨率的连续谱观测, 获得 23 个致密的碎裂致密核。这些团块有着较高的核形成效率 (37% — 100%), 由于在自引力的作用下, 它们可能处于全局坍缩阶段。大质量恒星形成区的 IRDC 18310-4 存在有碎裂的特征, 其正处于动力学坍缩状态 (Beuther et al., 2013)。Beuther & Schilke (2004) 给出了大质量原恒星团 IRAS 19410+2336 的观测, 其质量谱斜率与 Salpeter 值非常接近。在形态学上, 星团中的团块经常呈现出柱状的结构, 例如 G29.96e (Pillai et al., 2011), G28.34+p1 (Zhang et al., 2009) 和 G11.11-p1 (Wang et al., 2014, 2011)。“香肠不稳定性”模型过去常常被用来解释柱状碎裂的情形 (Chandrasekhar & Fermi, 1953)。Wang et al. (2014) 认为湍流主导着源 G11.11-p1 的碎裂和柱状坍缩过程。

在该项目中, 我们将报道八个大质量恒星形成区的 PdBI 高分辨的观测研究, 部分恒星形成区是红外宁静的, 说明其处于较早期的恒星形成阶段。对于各种天体尺度的定义, 我们将采用 Williams & Myers (2000) 的研究工作中所定义的标准, 例如团块、致密核、和凝聚核的典型半高全宽尺度分别为 ~ 1 , ~ 0.1 , ~ 0.01 pc。

表 3.1: PdBI 观测的设置参数

Source	ATLASGAL name	Phase center			3.5mm beam & rms			1.3mm beam & rms			Observational date	
		h	m	s	°	'	"	"	"	"		'' × '' ; °
CD track												
G18.17	G018.1750-0.2985	18 25 07.534	-13 14 32.75	4.75 × 2.48; 21.27	0.23	2.46 × 0.97; 19.98	1.67	Mar.25 – Apr.5, 2005				
G18.21	G018.2150-0.3419	18 25 21.558	-13 13 39.56	4.94 × 2.72; 18.23	0.20	2.47 × 0.99; 19.15	1.81	Mar.25 – Apr.5, 2005				
G23.97N	G023.9655+0.1382	18 34 28.833	-07 54 31.76	4.10 × 2.82; 21.58	0.32	1.85 × 1.07; 20.51	1.62	Mar.28 – Apr.6, 2005				
G23.98	G023.9790+0.1498	18 34 27.823	-07 53 28.76	4.23 × 2.95; 19.05	0.22	1.85 × 1.09; 20.89	1.65	Mar.28 – Apr.6, 2005				
G23.44	G023.4366-0.1828	18 34 39.253	-08 31 36.23	4.34 × 2.91; 20.48	0.25	1.89 × 1.05; 19.83	2.17	Mar.28 – Apr.6, 2005				
G23.97S	G023.9647-0.1094	18 35 22.160	-08 01 26.53	4.24 × 2.68; 21.68	0.23	1.93 × 1.01; 20.63	1.43	Mar.29 – Apr.12, 2005				
G25.38	G025.3826-0.1476	18 38 08.108	-06 46 54.93	4.18 × 2.82; 21.85	0.39	1.76 × 1.03; 21.27	1.34	Mar.29 – Apr.12, 2005				
G25.71	G025.7099+0.0448	18 38 03.184	-06 24 14.30	4.20 × 2.83; 22.82	0.26	1.89 × 1.05; 22.19	1.34	Mar.29 – Apr.12, 2005				
BCD track												
G23.44	G023.4366-0.1828	18 34 39.253	-08 31 36.23	2.20 × 1.54; 19.62	0.13	0.82 × 0.57; 17.32	0.75	Mar.14, Mar.16, 2006				
G23.97S	G023.9647-0.1094	18 35 22.160	-08 01 26.53	2.16 × 1.53; 22.87	0.13	0.83 × 0.59; 26.90	0.64	Mar.14, Mar.16, 2006				
G25.38	G025.3826-0.1476	18 38 08.108	-06 46 54.93	2.17 × 1.55; 22.66	0.20	0.78 × 0.60; 23.19	0.66	Feb.27, Mar.17, 2006				
G25.71	G025.7099+0.0448	18 38 03.184	-06 24 14.30	2.21 × 1.54; 24.73	0.16	0.83 × 0.58; 24.19	0.66	Feb.27, Mar.17, 2006				

表 3.2: 红外数据的参数

Source ^a	$S_{4.5\text{mm}}$ mJy	$S_{8.0\mu\text{m}}$ mJy	$S_{24\mu\text{m}}$ mJy	$S_{70\mu\text{m}}$ Jy	Infrared ^b	HII ^c	Dist. kpc	Ref. for dist. ^d
G18.17	1.3(0.3)	916.3(68.0)	62.8(15.5)	446.0(32.7)	quiet	no	3.73	1, 2
G18.21	10.8(0.5)	27.9(1.7)	544.4(3.5)	2.4(1.6)	quiet	no	3.60	1, 2
G23.97N	28.6(2.1)	395.9(45.5)	1161.1(36.9)	1706.2(42.1)	quiet	no	4.68	1, 2
G23.98	4.9(0.6)	167.8(6.5)	8.7(2.6)	89.2(17.4)	quiet	no	4.68	1, 2
G23.44-l	15.5(0.1)	34.3(0.2)	692.0(53.7)	179.0(14.0)	quiet	yes	5.88	3
G23.44-u	23.9(0.1)	23.6(0.2)	435.4(42.5)	126.7(11.6)	quiet	no	5.88	3
G23.97S	10.2(0.4)	5.6(0.8)	709.6(3.6)	12.9(3.8)	quiet	yes	4.70	1, 2
G25.38-l	45.7(0.5)	50.1(3.6)	252.3(38.6)	—	quiet	no	5.60	4, 5, 6
G25.38-u	7.5(0.6)	412.6(26.7)	2282.7(262.6)	1548.1(79.1)	quiet	no	5.60	4, 5, 6
G25.71-l	154.4(2.0)	272.0(8.0)	6197.1(122.6)	391.4(20.3)	quiet	yes	9.50	6, 7
G25.71-u	138.7(2.2)	2453.2(24.9)	16109.0(83.8)	220.0(15.4)	bright	yes	9.50	6, 7

^a 源名后面的“-l”、“-u”标出了该团块中的上下星团。

^b 基于阈值 $S_{24\mu\text{m}} = 3.0$ Jy 而定义的，这些源被分类为红外宁静的 infrared quiet (< 3.0 Jy)，明亮的 bright (> 3.0 Jy) 的团块。

^c 利用 1.3 cm 连续谱数据判别是否为超致密电离氢区候选体。

^d 关于距离的参考文献：¹ Wielen et al. (2012); ² Reid et al. (2009); ³ Brunthaler et al. (2009); ⁴ Anderson & Bania (2009); ⁵ Ai et al. (2013); ⁶ Urquhart et al. (2013); ⁷ Lockman (1989).

3.2 致密冷核的碎裂及其演化阶段

3.2.1 观测和数据处理

3.2.1.1 SCAMPS 源—样本选择

利用 SCUBA 大质量 Pre/Protocluster 核的巡天数据 (SCAMPS; Thompson et al. (2005)), 我们筛选出八个大质量原恒星核样本, 包括 G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71。利用 JCMT 的 $850\mu\text{m}$ 、 $450\mu\text{m}$ 的接收机, SCAMPS 项目对 32 个大质量恒星形成区进行了 $10' \times 10'$ 大视场的巡天。其目的主要是在大质量 OB 星附近寻找更加年轻的大质量恒星形成区, 因为大质量恒星通常是以群居形式存在的。然后, 利用高分辨率的观测, 如 PbBI、VLA, 对这些样本进行无偏的普查。这八个源的观测参数列在表 3.1 中。 850 、 $450\mu\text{m}$ 的数据列于表 B.1 中。

3.2.1.2 ATLASGAL 源

这八个早期的大质量恒星形成区已经被 ATLASGAL¹ 巡天项目覆盖

¹The ATLASGAL project is a collaboration between the Max-Planck-Gesellschaft, the European Southern

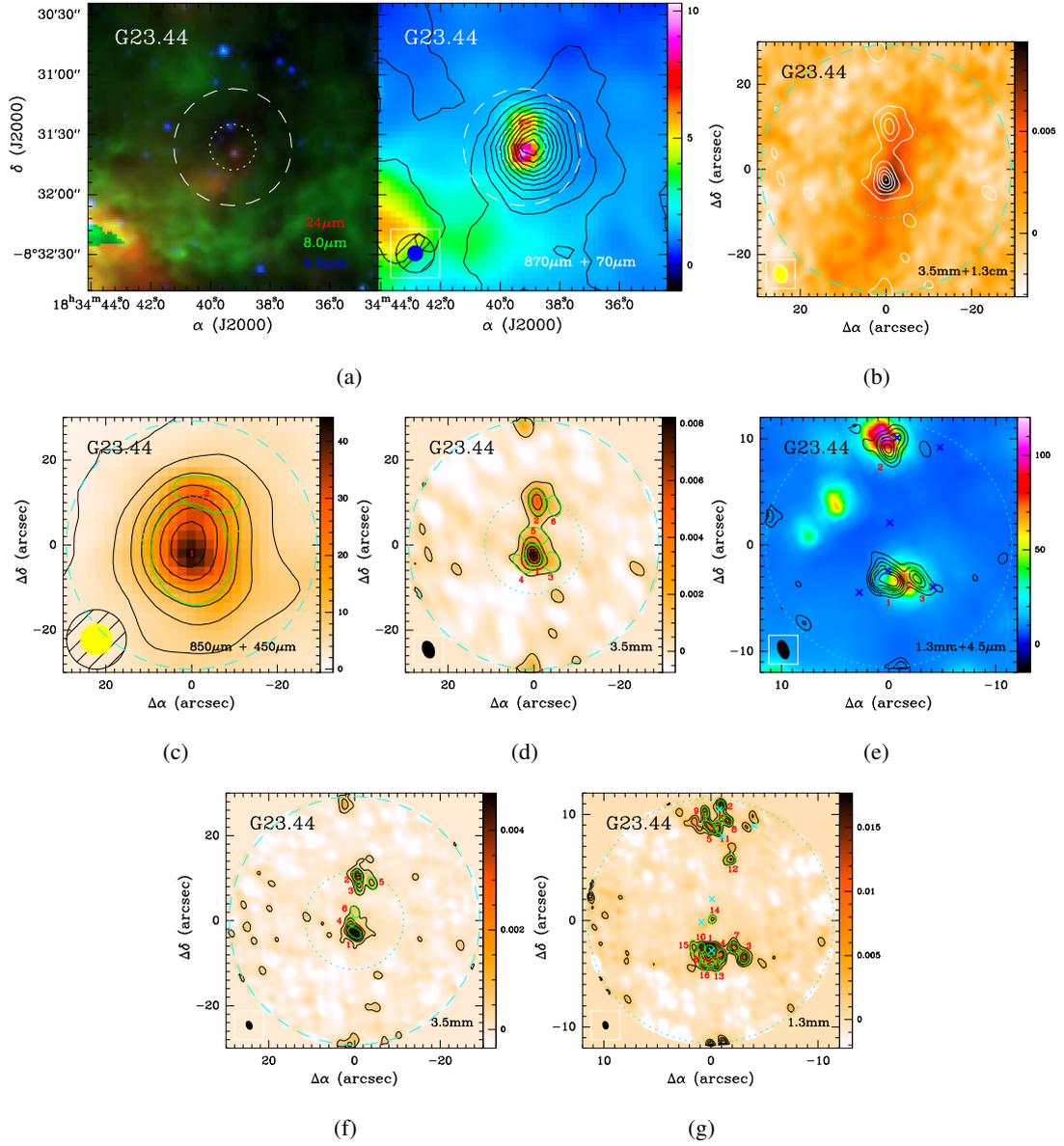


图 3.1: G23.44 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图, 其中, $4.5 \mu\text{m}$ 为蓝色, $8.0 \mu\text{m}$ 为绿色, $24 \mu\text{m}$ 为红色; $870 \mu\text{m}$ 与 $70 \mu\text{m}$ 的叠图, $870 \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ , 步长是 10σ ($\sigma = 54 \text{ mJy beam}^{-1}$)。 (b) 1.3 cm 与 3.5 mm 的叠图。 (c) $850 \mu\text{m}$ 和 $450 \mu\text{m}$ 的叠图, 其中 $850 \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ , 步长是 12σ ($\sigma = 83 \text{ mJy beam}^{-1}$)。对于 CD 阵列, (d) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 6σ ($\sigma = 0.25 \text{ mJy beam}^{-1}$), (e) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 2σ ($\sigma = 2.17 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。对于 BCD 阵列, (f) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 4σ ($\sigma = 0.13 \text{ mJy beam}^{-1}$), (g) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 2σ ($\sigma = 0.75 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。在 1.3 mm (B)CD 阵列的图上, 叉号标记出了 3.5 mm (B)CD 阵列观测的致密核位置。 $24 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} , 其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} 。

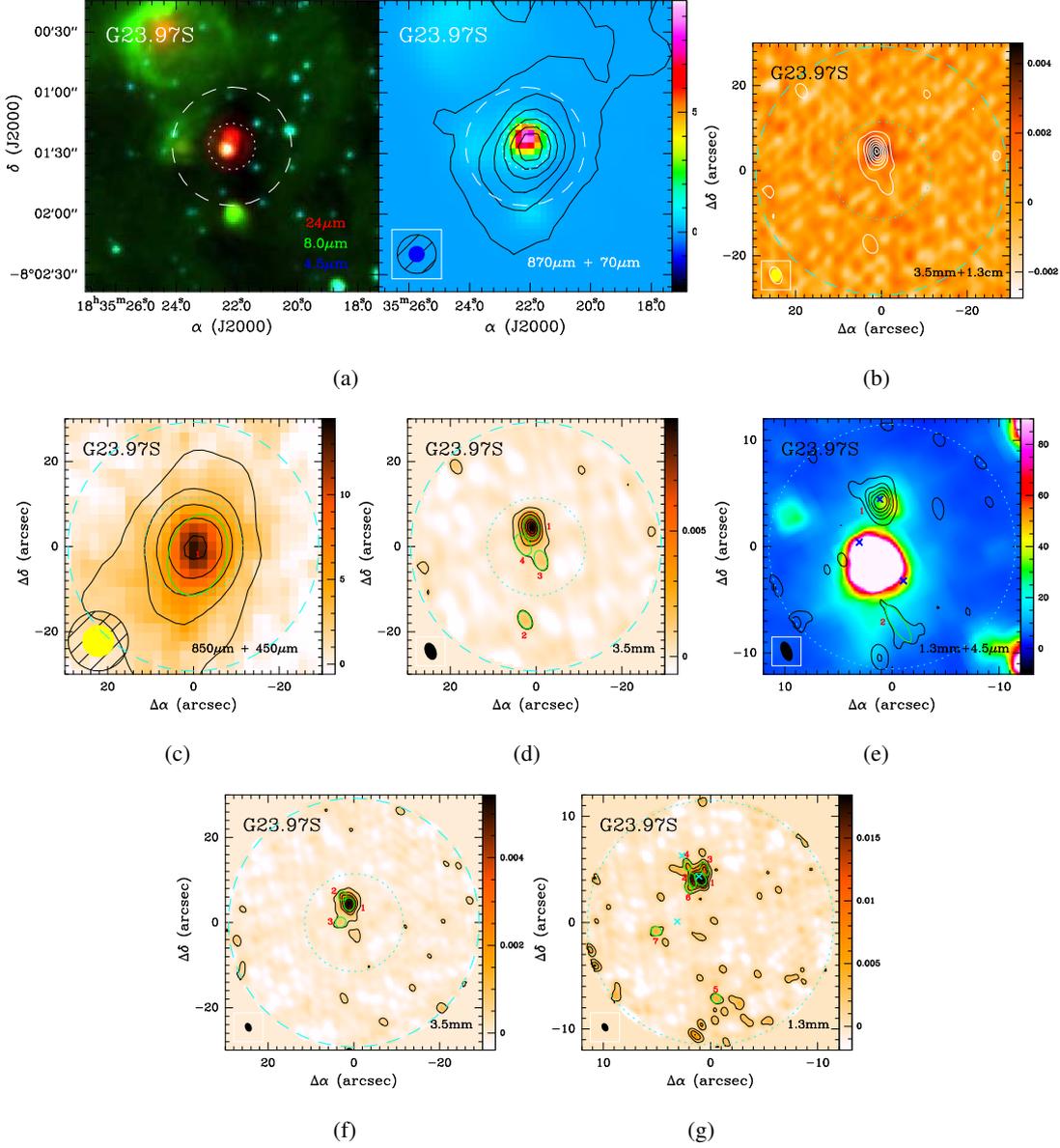


图 3.2: G23.97S 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图，其中， $4.5\ \mu\text{m}$ 为蓝色， $8.0\ \mu\text{m}$ 为绿色， $24\ \mu\text{m}$ 为红色； $870\ \mu\text{m}$ 与 $70\ \mu\text{m}$ 的叠图， $870\ \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ ，步长是 10σ ($\sigma = 54\ \text{mJy beam}^{-1}$)。 (b) $1.3\ \text{cm}$ 与 $3.5\ \text{mm}$ 的叠图。 (c) $850\ \mu\text{m}$ 和 $450\ \mu\text{m}$ 的叠图，其中 $850\ \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ ，步长是 8σ ($\sigma = 83\ \text{mJy beam}^{-1}$)。对于 CD 阵列，(d) $3.5\ \text{mm}$ 的等值线始于 3σ ，步长是 6σ ($\sigma = 0.23\ \text{mJy beam}^{-1}$)，(e) $1.3\ \text{mm}$ 的等值线始于 3σ ，步长是 5σ ($\sigma = 1.43\ \text{mJy beam}^{-1}$)，并且叠加在 $24\ \mu\text{m}$ 背景图上。对于 BCD 阵列，(f) $3.5\ \text{mm}$ 的等值线始于 3σ ，步长是 6σ ($\sigma = 0.13\ \text{mJy beam}^{-1}$)，(g) $1.3\ \text{mm}$ 的等值线始于 3σ ，步长是 4σ ($\sigma = 0.64\ \text{mJy beam}^{-1}$)，并且叠加在 $24\ \mu\text{m}$ 背景图上。在 $1.3\ \text{mm}$ (B)CD 阵列的图上，叉号标记出了 $3.5\ \text{mm}$ (B)CD 阵列观测的致密核位置。 $24\ \mu\text{m}$ 和 $70\ \mu\text{m}$ 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} ，其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} 。

Schuller et al. (2009)。ATLASGAL 巡天数据的分辨率是 $19.2''$ ，目的之一是搜寻与大质量恒星形成相关的致密冷核。ATLASGAL 项目已经被 Csengeri et al. (2014) 很好的描述。870 μm 的观测结果列于表 B.1 中。

3.2.1.3 PdBI 观测

在 3.5 和 1.3 mm 波段，我们利用 IRAM PdBI 干涉阵²，对这八个样本进行了观测。其中，单边带模式下的 3.5 mm 的接收系统调节到中心频率为 86.086 GHz；双边带模式下的 1.3 mm 的接收系统调节到中心频率为 219.560 GHz。连续谱观测的带宽为 320 MHz。在窄带接收系统下，我们同时观测到的谱线为 NH_2D (85.926 GHz), HC^{15}N (86.055 GHz), SO (86.094 GHz), H^{13}CN (86.340 GHz), C^{18}O (219.560 GHz)。

对于样本源 G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71, 在 2005 年的 3 月和 4 月份，我们首先进行了 C 和 D 阵列的观测。然而对于致密源 G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71, 在 CD 阵列下无法分辨其致密结构，因此在 2006 年的 2 月和 3 月份，对这四个源进行了 B 阵列的高分辨率观测。关于观测校准，类星体 B1741-038 被用作相位校准源，类星体 3C273 和演化星 MWC 349 被用作流量校准源。

对于 PdBI 的数据处理，我们主要利用 GILDAS³ 软件包下的 MAPPING 和 CLIC 模块对数据进行校准和洁化，该软件包是由 IRAM 开发的。我们利用无谱线的通道构造一个伪的 *uv-table*，其被用来做连续谱的成图。由于数据质量较好，我们利用“uniform”权重对所有源进行“clean”，从而获得较好的分辨率。没有任何“polygon”被引入到数据处理中，从而保证数据的无偏性。望远镜在 86.086 和 219.560 GHz 附近的主波束大小是 $58.5''$ 和 $23.0''$ 。最后对数据进行主波束校准。这些数据的相位中心、分辨率、和噪声等参数列于表 3.1 中。

3.2.1.4 VLA 观测

2005 年 11 月份，在 1.3 cm 波段，我们利用 NRAO⁴ 的甚大阵 VLA-D 阵对这八个源进行了观测。利用 2-IF 谱线相关器模式， NH_3 (1, 1) 和 (2, 2) 同时被

Observatory (ESO) and the Universidad de Chile.

²IRAM is supported by INSU/CNRS (France), MPG (Germany) and IGN (Spain).

³<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

⁴The National Radio Astronomy Observatory is a facility of the National Science Foundation operated under cooperative agreement by Associated Universities, Inc.

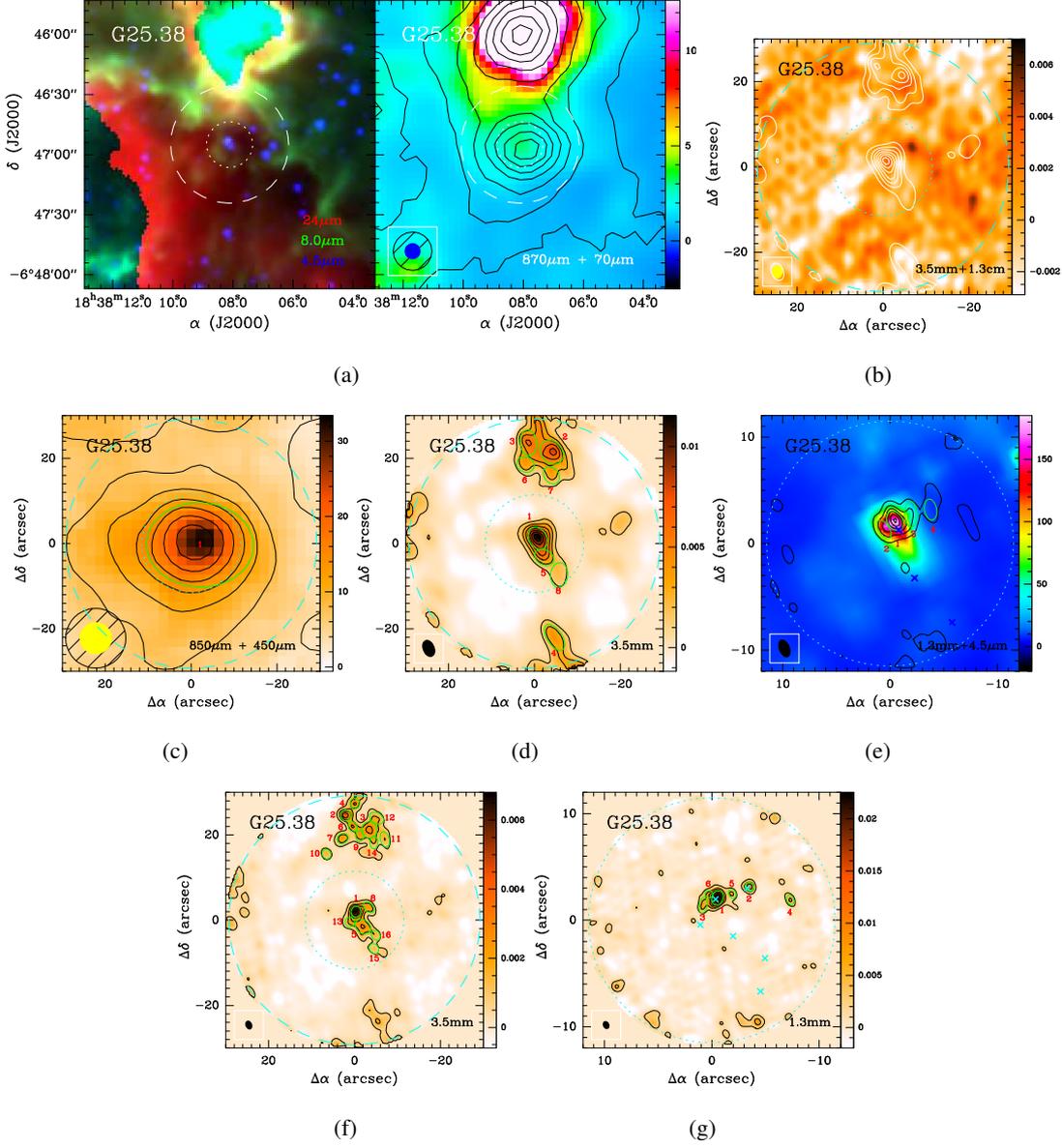


图 3.3: G25.38 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图, 其中, $4.5 \mu\text{m}$ 为蓝色, $8.0 \mu\text{m}$ 为绿色, $24 \mu\text{m}$ 为红色; $870 \mu\text{m}$ 与 $70 \mu\text{m}$ 的叠图, $870 \mu\text{m}$ 的等值线始于 5.3σ , 步长是 8.8σ ($\sigma = 61 \text{ mJy beam}^{-1}$)。 (b) 1.3 cm 与 3.5 mm 的叠图。 (c) $850 \mu\text{m}$ 和 $450 \mu\text{m}$ 的叠图, 其中 $850 \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ , 步长是 8σ ($\sigma = 83 \text{ mJy beam}^{-1}$)。对于 CD 阵列, (d) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 4σ ($\sigma = 0.39 \text{ mJy beam}^{-1}$), (e) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 6σ ($\sigma = 1.34 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。对于 BCD 阵列, (f) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 5σ ($\sigma = 0.20 \text{ mJy beam}^{-1}$), (g) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 5σ ($\sigma = 0.66 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。在 1.3 mm (B)CD 阵列的图上, 叉号标记出了 3.5 mm (B)CD 阵列观测的致密核位置。 $24 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} , 其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} 。

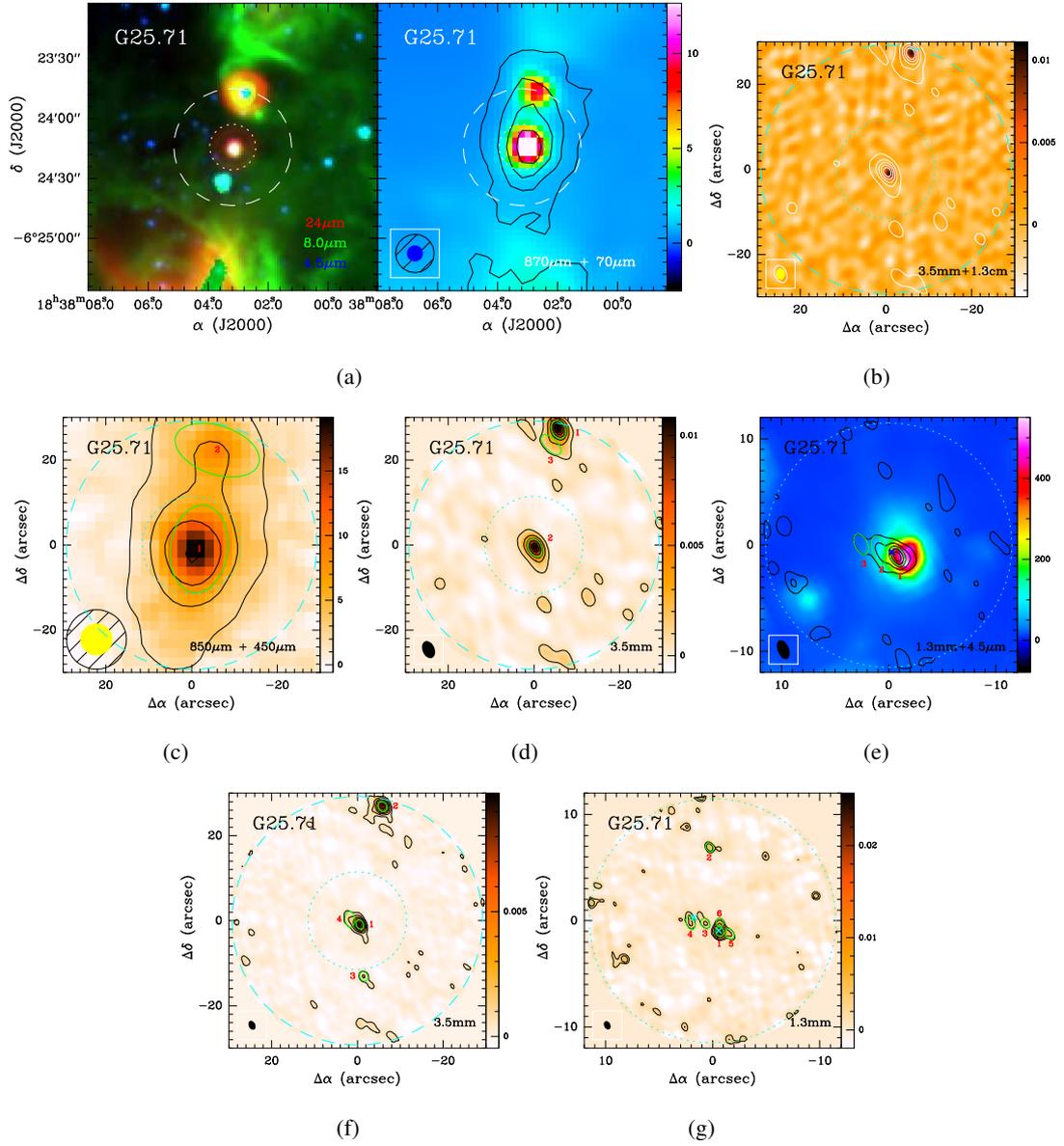


图 3.4: G25.71 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图, 其中, $4.5 \mu\text{m}$ 为蓝色, $8.0 \mu\text{m}$ 为绿色, $24 \mu\text{m}$ 为红色; $870 \mu\text{m}$ 与 $70 \mu\text{m}$ 的叠图, $870 \mu\text{m}$ 的等值线始于 5.3σ , 步长是 7σ ($\sigma = 61 \text{ mJy beam}^{-1}$)。 (b) 1.3 cm 与 3.5 mm 的叠图。 (c) $850 \mu\text{m}$ 和 $450 \mu\text{m}$ 的叠图, 其中 $850 \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ , 步长是 8σ ($\sigma = 83 \text{ mJy beam}^{-1}$)。对于 CD 阵列, (d) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 8σ ($\sigma = 0.26 \text{ mJy beam}^{-1}$), (e) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 4σ ($\sigma = 1.34 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。对于 BCD 阵列, (f) 3.5 mm 的等值线始于 $3\sigma, 7\sigma, 13\sigma, 20\sigma$, 步长是 13σ ($\sigma = 0.16 \text{ mJy beam}^{-1}$), (g) 1.3 mm 的等值线始于 $3\sigma, 5\sigma, 10\sigma$, 步长是 8σ ($\sigma = 0.66 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。在 1.3 mm (B)CD 阵列的图上, 叉号标记出了 3.5 mm (B)CD 阵列观测的致密核位置。 $24 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} , 其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} 。

看到，其带宽为 6.25 MHz，通道数为 127 个，速度分辨率为 0.617 km s^{-1} 。另外，利用无谱线的通道进行了连续谱的构造。在 1.3 cm，望远镜的主波束大小是 $2'$ 。数据最后经过了主波束效应的纠正。

关于观测校准，流量校准因子是 J1331+305，相位校准因子是 B1743-038，带通校准因子是 J1256-057。相位中心和 PdBI 观测的相位中心是一样的，参照表 3.1。最终连续谱的噪声为 $[0.4 \text{ } 0.8] \text{ mJy beam}^{-1}$ 。对于数据处理，利用 AIPS⁵ 软件，由观测获得的原始数据被转换到 MIRIAD⁶ 下进行校准和成图。

3.2.2 观测结果

3.2.2.1 大尺度的尘埃分布

在图 B.1(a), B.2(a), B.3(a), B.4(a), 3.1(a), 3.2(a), 3.3(a), 3.4(a) 中，我们给出了团块在 $870 \mu\text{m}$ 波段下的大尺度分布图，其典型的有效半径为 $R_{\text{eff}} \sim 0.5 \text{ pc}$ 。 $870 \mu\text{m}$ 的连续谱辐射常常用来示踪较冷和较致密的尘埃环境。对于这些团块， $870 \mu\text{m}$ 的峰值一般都临近于一个相关的超致密电离氢区。一般来说，超致密电离氢区的峰值和致密的毫米波辐射成协，并且有很强的连续谱辐射。超致密电离氢区的包层通常是光学厚的，该包层的光深可能标志着不同的演化阶段。在图 B.1(c), B.2(c), B.3(c), B.4(c), 3.1(c), 3.2(c), 3.3(c), 3.4(c) 中，我们给出了这些致密冷团块在 $850 \mu\text{m}$ 和 $450 \mu\text{m}$ 的叠图。在 $870, 850, 450 \mu\text{m}$ 的大尺度上，这些致密冷团块有着相似的形态学特征。它们被认为是大质量恒星形成的早期诞生地。

为了测量这些团块在不同波段的物理参数，我们利用 *Gaussclumps* 抽取出它们的峰值位置、高斯尺度、峰值流量等参数。基于这些直接获得的参数，我们还进一步计算了其它参数，包括积分流量、质量、密度等，它们被展示于表 B.1 中。在 $450 \mu\text{m}$ 拟合的高斯尺度也被以绿色的椭圆分别标记在图 B.1(c), B.2(c), B.3(c), B.4(c), 3.1(c), 3.2(c), 3.3(c), 3.4(c) 中。

3.2.2.2 小尺度的团块分布

在表 B.1 中，由 $870, 850, 450 \mu\text{m}$ 的团块尺度和质量表明，这些团块明显都是大质量恒星形成的候选体。为了进一步对这些团块进行研究，我们将利用

⁵<http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>

⁶<http://www.cfa.harvard.edu/sma/miriad/>

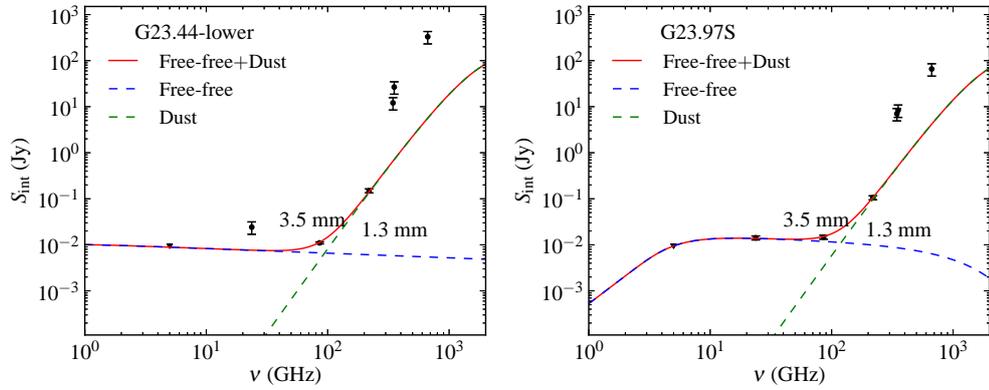


图 3.5: G23.44-1 和 G23.97S 的 SED 能谱拟合分布图, 主要结合 6 cm (CORNISH), 1.3 cm (VLA), 3.5 mm (PdBI), 1.3 mm (PdBI), 870 μm (ATLASGAL), 850 μm (SCUBA), 450 μm (SCUBA) 波段的连续谱数据。尘埃发射的谱指数被设定为 $\beta = 1.7$ 。电离气体和冷尘埃成份分别以蓝色和绿色的虚线显示。

高分辨率的观测揭开这些致密核的神秘包层。下面的数据主要来自于 PdBI-B、C、D 阵列在 3.5 mm 和 1.3 mm 的观测结果。

1、CD 阵列的观测

在图 B.1(d)(e), B.2(d)(e), B.3(d)(e), B.4(d)(e), 3.1(d)(e), 3.2(d)(e), 3.3(d)(e), 3.4(d)(e) 中, 我们给出了 3.5 mm 和 1.3 mm CD 阵列观测的高分辨的连续谱图。由 *Gaussclumps* 测量的 *FWHM* 以绿色的椭圆标记在了 3.5 mm 连续谱中, 并且用叉号标在 1.3 mm 连续谱中, 由此可以更好地对比它们的峰值位置。与 870, 850, 450 μm 相比, 在 3.5 mm 和 1.3 mm 的高分辨观测下, 大部分的大尺度结构已经丢失, 因此复杂的致密核结构得以清晰分辨。这些致密核的物理参数列于表 B.2 和 B.3 中。然而, 我们不得不承认由于缺失短基线, 所获得的连续谱流量和团块质量将被低估。

形态学上, 1.3 mm 的团块 G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71 结构总是垂直于 3.5 mm 的结构。并且, 这些致密核以串状结构分布, 这可能是由于其动力学的活跃性 (如外向流), 或者是柱状碎裂的结果 (Wang et al., 2014)。我们还发现最致密的核通常被一群低质量核围绕在中间, 这或许是竞争吸积的表现形式 (Zinnecker & Yorke, 2007)。

2、BCD 阵列的观测

在图 3.1(f)(g), 3.2(f)(g), 3.3(f)(g), 3.4(f)(g) 中, 仅仅对于团块 G23.44, G23.97S,

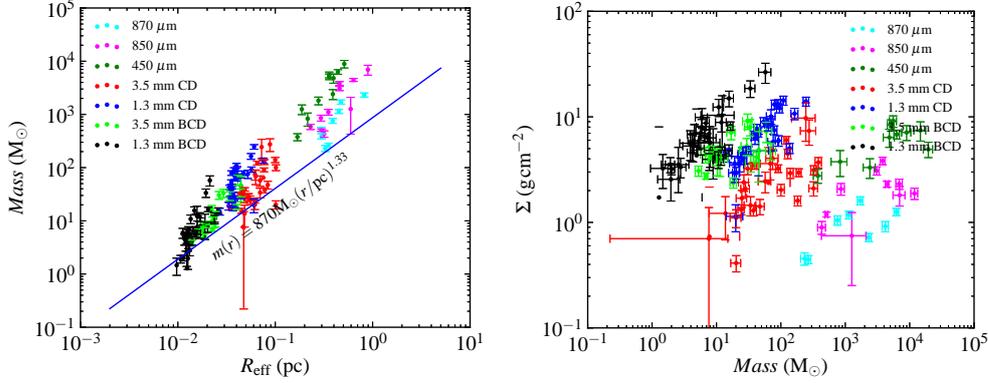


图 3.6: 不同波段、不同尺度的质量-尺度关系和表面密度-质量分布图。质量求得于 *Gaussclumps* 抽取出的 *FWHM* 内的积分强度值, 有效半径来自于公式 $r = FWHM/(2\sqrt{\ln 2})$ 。图中蓝色的线来自于 [Kauffmann & Pillai \(2010\)](#) 的工作。表面密度来自于公式 $\Sigma = Mass/R_{\text{eff}}^2$ 。

G25.38, G25.71, 我们给出了其更高分辨率的 BCD 阵列的观测。同样, 由 *Gaussclumps* 测量的 *FWHM* 以绿色的椭圆标记在了 3.5 mm 连续谱中, 并且用叉号标在 1.3 mm 连续谱中。所得到的凝聚核的物理参数列于表 B.2 和 B.3 中。在更高的分辨率下, 我们探测到更加小尺度, 更多的凝聚核。那些最致密的核很有可能是潜在的大质量恒星形成候选样本。我们将进一步调研它们的化学、动力学、光度等特征。对于那些簇拥着的中等质量云核, 我们不能确定他们是否能够形成新一代的恒星。我们将在后面的章节中对这些云核进行详细地研究。

3.2.3 分析

3.2.3.1 红外消光

大质量恒星的早期阶段应该是栖息于冷的、致密的、低光度的环境中。多波段的红外消光数据能够帮助我们揭示大质量恒星形成区的栖息地。我们将结合红外数据, 如 GLIMPSE $4.5 \mu\text{m}$, $8.0 \mu\text{m}$ ([Benjamin et al., 2003](#); [Churchwell et al., 2009](#)), MIPS GAL $24 \mu\text{m}$ ([Carey et al., 2009](#)), PACS $70 \mu\text{m}$ ([Poglitsch et al., 2010](#)), 研究这些深埋着的原恒星核。GLIMPSE $4.5 \mu\text{m}$ 辐射通常来自于演化星和场星。GLIMPSE $8.0 \mu\text{m}$ 辐射主要来源于多环芳香烃, 其与电离氢区成协。MIPSGAL 24 和 PACS $70 \mu\text{m}$ 辐射主要由暖的和冷的尘埃颗粒的辐射主导。

24 μm 辐射是较好的大质量恒星形成区的示踪者，因其很少受到非恒星形成区的干扰，常常被用来评估恒星形成的演化阶段 (Robitaille et al., 2006)。在图 B.1(a), B.2(a), B.3(a), B.4(a), 3.1(a), 3.2(a), 3.3(a), 3.4(a) 中，团块 G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38 呈现出非常弱的红外辐射，除了团块 G25.71。因此，这些团块的大多数都是低光度的样本。我们将在接下来的章节中分析其红外光度特征，它们的测光流量列于表 3.2 中。

在对源 Cygnus X 和 NGC 6334 - NGC 6357 的研究中，Motte et al. (2007) 和 Russeil et al. (2010) 发现许多低光度的原恒星核，并根据积分流量大小对其进行定义和分类，该阈值界限为 $S_{24\mu\text{m}} = 15.0 \text{ Jy}$ 。为了保持一致性，我们将遵循他们的定义标准。对于 $S_{24\mu\text{m}} < 15.0 \text{ Jy}$ 的云核，我们称其为红外宁静核 (infrared quiet)，对于 $S_{24\mu\text{m}} > 15.0 \text{ Jy}$ 的云核，我们称其为红外亮核。在我们的八个样本中，除了 G25.71-u，其它都是红外宁静核。我们相信这些红外宁静的团块都是比较早期的恒星形成样本，而那些红外亮的团块可能与超致密电离氢区相关。在后面的章节中，将着重讨论这些团块的演化阶段。

这些团块都是位于超致密电离氢区附近。在图 B.1(a), B.2(a), B.3(a), B.4(a), 3.1(a), 3.2(a), 3.3(a), 3.4(a) 中，在大尺度上，那些饱和的超致密电离氢区可能会影响我们的样本的恒星形成，并且说明它们都是以群居的形式存在的。另外，相对于我们的样本，超致密电离氢区是相对年老阶段的天体。这说明，我们的样本将可能是超致密电离氢区的一个碎裂团块。关于超致密电离氢区对新一代恒星形成的反馈作用是非常值得进一步讨论和研究的。

3.2.3.2 致密团块的筛选

在数据处理方面，存在着许多团块抽取准则和工具，例如 Clumpfind (Williams et al., 1994), SExtractor (Bertin & Arnouts, 1996), Gaussclumps (Kramer et al., 1998; Stutzki & Guesten, 1990)。它们的功能和不同之处已经在 Csengeri et al. (2014) 和 Gómez et al. (2014) 的工作中详细地描述。在此项目中，我们假设团块的流量密度是以高斯流量分布的，将利用 GILDAS 中的 Gaussclumps 命令对团块、致密核和凝聚核进行抽取。我们将仅仅考虑那些 5σ 以上的源，除了源 G23.98 在 3.5 mm 为 3σ 的阈值。

3.2.3.3 转动温度

利用 NH_3 (1, 1)、(2, 2) 间的亮温度比值，并且结合 NH_3 (1, 1) 的光学厚度，

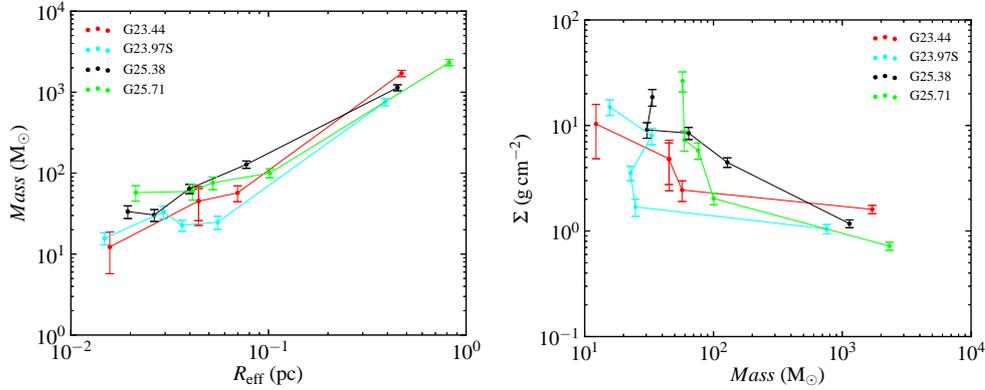


图 3.7: 每个团块中, 最大质量核的质量-尺度关系和表面密度-质量分布图, 主要包括 870 μm , 3.5 mm CD 阵列, 3.5 mm BCD 阵列, 1.3 mm CD 阵列, 1.3 mm BCD 阵列的数据。

我们可以获得其转动温度 [Ho & Townes \(1983\)](#)。光学厚度可以通过 NH_3 (1, 1) 的超精细结构拟合轻松获得。对于不同尺度, 不同波段的高斯团块来说, 我们将平均那些位于一个高斯 $FWHM$ 内的 NH_3 (1, 1)、(2, 2) 谱线, 从而获得一个平均的亮温度和光学厚度。 NH_3 与 3.5 mm CD 阵列的数据有着相似的分辨率, 则它们有着很好的可比性。对于高分辨率的 1.3 mm BCD 阵列的数据, 得到的转动温度将会受到大尺度的污染; 而对于低分辨率的 870, 850, 450 μm 数据, 获得的转动温度将丢失一些小尺度的成分。所求得的转动温度列于表 [B.1](#), [B.2](#), [B.3](#) 中。

在相对低温的情况下, 转动温度通常被直接用作近似的尘埃温度, 以此可以计算团块质量。在表 [B.1](#), [B.2](#), [B.3](#) 中, 在大尺度上的转动温度明显地低于小尺度上的转动温度。这说明, 这些团块存在一个由内向外的温度梯度, 其可能是由于内部加热而造成的结果。

3.2.3.4 辨别电离气体和冷尘埃的贡献

对于超致密电离氢区, 在 3.5 mm 波段附近所测量的连续谱流量是由气体和尘埃辐射共同构成的 ([Churchwell, 2002](#))。当一个亮的电离氢区或者红外源为背景时, 来自于电离气体的自由-自由辐射将会激增 3.5 mm 处的总流量。因此, 为了计算团块质量, 在厘米波段判断是否存在自由-自由辐射污染尘埃辐射的流量将是非常必要的。对于能谱拟合, 如果在 6 cm、1.3 cm, 我们不能探测到大于 3σ 的流量信号, 我们将利用该 3σ 的流量作为一个上限值。下面, 我

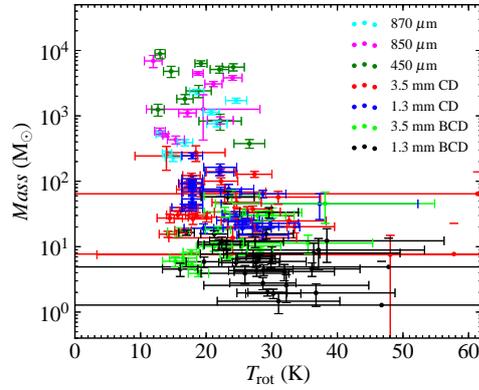


图 3.8: 不同波段、不同尺度的质量-转动温度关系图。

们将结合 6 cm (CORNISH), 1.3 cm (VLA), 3.5 mm (PdBI), 1.3 mm (PdBI), 870 μm (ATALASGAL), 850 μm (SCUBA), 450 μm (SCUBA) 连续谱数据进行能谱拟合, 从而辨别电离气体和冷尘埃的贡献。

如图 3.5 中的能谱拟合, 自由-自由辐射模型可以表达为 (Mezger & Henderson, 1967):

$$\begin{cases} S_\nu = \Omega_s B_\nu(T_e)(1 - e^{-\tau_c})(\text{Jy}) \\ \tau_c = 0.08235 \alpha(\nu, T_e) \left(\frac{\nu}{\text{GHz}}\right)^{-2.1} \left(\frac{T_e}{\text{K}}\right)^{-1.35} \left(\frac{EM}{\text{pc cm}^{-6}}\right) \end{cases}, \quad (3.1)$$

其中, S_ν 是在频率 ν 处的积分流量, Ω_s 是立体角, $B_\nu(T_e)$ 是普朗克方程, T_e 是电子温度, $\alpha(\nu, T_e) \sim 1$, EM 是发射测量。尘埃辐射模型可以表达为 (Pratap et al., 1992):

$$\left(\frac{S_\nu}{\text{Jy}}\right) = 52.36 \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \left(\frac{0.2}{\lambda_{\text{mm}}}\right)^{\beta+3} \left[\exp\left(\frac{14.4}{\lambda_{\text{mm}} T_{\text{rot}}}\right) - 1\right]^{-1} \left(\frac{D}{\text{kpc}}\right)^{-2}, \quad (3.2)$$

其中, M 是尘埃质量, β 是尘埃发射指数, T_{rot} 是尘埃温度, 其单位为 Kelvin, λ_{mm} 是波长, 其单位为 mm, D 是距离, 其单位为 kpc。在该模型中, 我们令 M, T_e, EM 为自由参数, 并设定 β 为 1.7, 利用最小平方方法进行数据拟合。对于 6 cm 数据, 我们使用其 3σ 作为上限值, 对于其它波段的数据, 我们利用 *Gaussclumps* 抽取它们的流量, 其列于表 B.1, B.2, B.3 中。相对于干涉仪数据, 来自于单天线的 870, 850, 450 μm 数据有着较低的分辨率。由于设定 $\beta = 1.7$, 并给这些单天线数据一个很小的权重, 它们将几乎不会改变能谱拟合的参数。其目的, 是为了估计不同波段的干涉仪数据在缺失短基线情况下的流量损失。

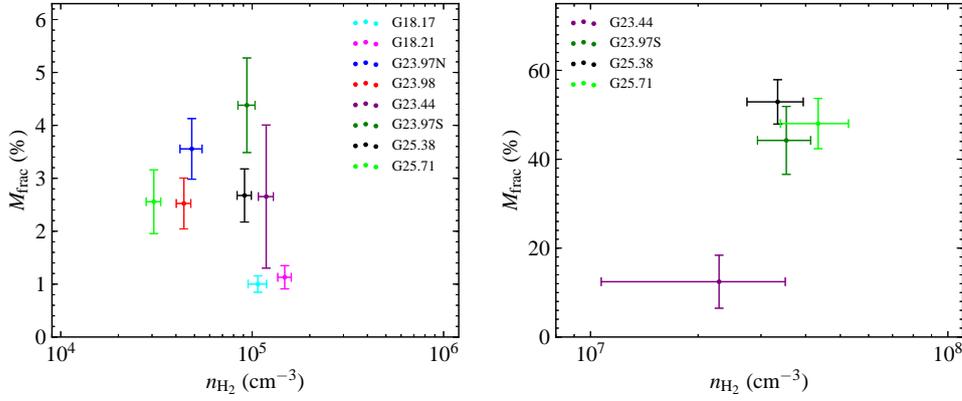


图 3.9: 最大质量云核的形成效率分布图。左图: 核形成效率 ($M_{1.3\text{mm}}/M_{870\mu\text{m}}$) 随着 $870\ \mu\text{m}$ 体密度的变化关系; 右图: 核形成效率 ($M_{1.3\text{mm}}/M_{1.3\text{mm in total}}$) 随着 $1.3\ \text{mm}$ 体密度的变化关系。

由能谱拟合可知, 在连续谱的总的测量流量中, 在 $3.5\ \text{mm}$, 来自于尘埃辐射的贡献是, 例如 41.4% 对于 G23.44 (No.1 对于 CD、BCD 阵列), 22.2% 对于 G23.97S (No.1 对于 CD 和 BCD 阵列), 其它结果列于表 B.2 中。 $1.3\ \text{mm}$ 连续谱流量也是区分尘埃成分和气体成分的关键参数。假如我们没有探测到任何的 $6\ \text{cm}$, $1.3\ \text{cm}$, $1.3\ \text{mm}$ 辐射, 我们将假设所有流量都来自于尘埃辐射。在该能谱拟合中, 通过比较干涉仪数据, 我们还了解到干涉仪在 $3.5\ \text{mm}$ 和 $1.3\ \text{mm}$ 波段处的流量丢失成分。与 $870\ \mu\text{m}$ 的能谱流量相比较, 我们得到的流量损失是 92% 到 94% 之间。在此, 我们假定了所有 $870\ \mu\text{m}$ 流量都来自于 $1.3\ \text{mm}$ 凝聚核的相同区域。

3.2.3.5 团块质量的计算

首先假设, 尘埃辐射是光学厚的, 气尘比为 100。对于所有的团块、致密核、凝聚核, 我们将采用 NH_3 (1, 1)、(2, 2) 间的转动温度作为近似的尘埃温度。在 $3.5\ \text{mm}$ 和 $1.3\ \text{mm}$, 对团块质量计算所采用的尘埃不透明度为 $0.002\ \text{cm}^2\ \text{g}^{-1}$ 和 $0.009\ \text{cm}^2\ \text{g}^{-1}$, 其中薄冰壳层的气体密度是 $10^6\ \text{cm}^{-3}$ (Ossenkopf & Henning, 1994; Pillai et al., 2011)。另外, 对于 $870, 850, 450\ \mu\text{m}$, 尘埃不透明度分别为 $0.0185, 0.0182, 0.0619\ \text{cm}^2\ \text{g}^{-1}$ (Ossenkopf & Henning, 1994)。源的总质量, 可以

利用下面的模型进行计算 (Kauffmann et al., 2008):

$$\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) = 0.12 \left(e^{14.39 \left(\frac{\lambda}{\text{mm}}\right)^{-1} \left(\frac{T_{\text{rot}}}{\text{K}}\right)^{-1}} - 1 \right) \left(\frac{\kappa_{\nu}}{\text{cm}^2 \text{g}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{S_{\nu}}{\text{Jy}} \right) \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{\text{mm}} \right)^3, \quad (3.3)$$

其中, λ 是观测的波段, T_{rot} 是转动温度, κ_{ν} 是尘埃不透明度, S_{ν} 是积分流量, D 是到太阳的距离。相应的参数列于表 B.1, B.2, B.3 中。该表中, 质量的不确定度主要来自于转动温度的误差传递结果。

另外, 对于源 G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71, 利用能谱拟合, 我们辨别了 3.5 mm 连续谱流量中尘埃辐射和自由-自由辐射的贡献。对于团块 G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98 中最大质量的云核, 我们认为它们在 3.5 mm 的连续谱流量全部来自于尘埃辐射, 由于我们没有探测到任何 6 cm 和 3 cm 的自由-自由辐射。然而, 由于缺失短基线观测, 干涉仪数据存在流量丢失的问题, 这将使得团块质量被低估。

在表 B.1 中, 870, 850, 450 μm 的质量有着稍微的差异。除了仪器误差, 在不同波段和不同分辨率下的高斯尺度也是不一样的。在该项目中, 我们将主要采用 870 μm 的数据为标准。

3.2.3.6 质量、尺度和密度的分布

在 Kauffmann & Pillai (2010) 的工作中, 他们定义了一个大质量恒星形成的阈值范围, 其为 $m(r) > 870 M_{\odot} (r/\text{pc})^{1.33}$, 其中 $m(r)$ 是团块质量, r 是有效半径 $r = FWHM / (2\sqrt{\ln 2})$, $FWHM$ 是利用 *Gaussclumps* 测量的高斯尺度。在图 3.6 中, 对于不同尺度, 不同波段的团块、致密核、凝聚核, 我们给出了它们的 *mass-size* 和 *density-mass* 关系。表面密度由公式 $\Sigma = \text{Mass}/R_{\text{eff}}^2$ 求得。为了比较, 我们在质量-尺度关系图上给出了大质量恒星形成的阈值分界线。大多数源都分布在大质量恒星形成的范围里, 这表明我们的样本都是一些优质的大质量恒星形成候选体。从 870 μm 到 1.3 mm, 分布斜率比该阈值斜率稍小, 这可能表明了不同波段的碎裂过程。而对于单个波段的数据, 其斜率小于阈值斜率。

在图 3.7 中, 对于 870 μm , 3.5 mm CD 阵列, 3.5 mm BCD 阵列, 1.3 mm CD 阵列, 1.3 mm BCD 阵列, 我们给出了每个波段和每个源中, 最大质量恒星的 *mass-size* 和 *density-mass* 关系的分布图。在图 3.7 中, 从 870 μm 到 1.3 mm, 团块碎裂的斜率逐渐变得陡峭。这可能表明随着碎裂尺度的减小, 团块的质量和

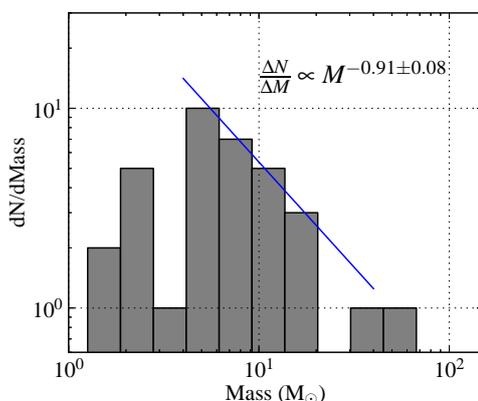


图 3.10: 1.3 mm BCD 阵列中所有凝聚核的质量谱, 所得到的质量谱的斜率为 $\alpha = -0.91 \pm 0.08$.

密度将继续保持常数, 而表面密度急剧地增加。另外, 一部分凝聚核的质量都在 $10 M_{\odot}$ 之上, 其斜率可能标志着大质量团块的坍缩过程。

3.2.4 讨论

3.2.4.1 丢失的质量

由于干涉仪缺失短基线的观测, 观测数据将存在一定的流量损失。这种情况对计算团块质量有着重要的影响。在图 3.5 中, $870 \mu\text{m}$ 处的拟合流量比测量流量低很多, 可能大部分是由于缺失短基线的缘故。如果假设所有的流量损失来自于缺失短基线, 则质量损失率约为 92.0% 到 94.6%, 其主要来自于 $870 \mu\text{m}$ 的测量和模拟数据的比较。

然而, 高分辨率的观测势必会把一个大尺度的团块分解为细小的碎片。由能谱拟合所获得的质量将对应着高分辨率下的一个很小的尺度, 而不是低分辨率下的如此大的尺度所囊括的质量。因此, 我们应该考虑到该情况。换句话说, 估计流量损失, 我们应该考虑凝聚核的形成效率。在 1.3 mm BCD 阵列下, 每个团块中最大质量的凝聚核占据了总凝聚核质量的 40.6% 和 66.3%, 这将意味着 50% 的质量可能在高分辨率下被分解出去了。基于此, 我们认为存在着约 45% 到 50% 的流量损失。

3.2.4.2 质量与温度的相关性

在图 3.8 中, 不同波段的质量-温度关系被展示。从 $870 \mu\text{m}$ 到 1.3 mm BCD

阵列, 转动温度从 10 K 上升到 50 K。来自于单天线的 $870 \mu\text{m}$ 辐射可能示踪着延展的包层环境, 而来自于干涉仪的 1.3 mm BCD 阵列的数据可能示踪着深埋的原恒星。由里向外的温度梯度表明加热源可能来自于深埋着的红外云核, 部分的来自于附近的超致密电离氢区。在每个团块中的那些最大质量的凝聚核有着较高的温度, 而附近围绕着的凝聚核有着相对低的温度。因此, 这些周围的凝聚核能够更好的示踪 prestellar 核样本。例如, 1.3 mm BCD 阵列中的 G23.44 No.2 和 G25.38 No.2 的质量都大于 $8.0 M_{\odot}$, 他们将是很好的大质量恒星形成的候选体。

3.2.4.3 不同尺度的碎裂特征

对于恒星的质量, 引力被认为有着决定性的作用。引力坍缩能够促使大质量的团块碎裂成为大量的小质量团块。热金斯质量 (M_J)、气体温度 (T)、气体体密度 (n) 有如下的关系: $M_J = 6.285 T^{1.5} n^{-0.5}$ (Palau et al., 2013)。由此可知, 一个气体温度为 18 K 的致密核, 其体密度为 10^6 cm^{-3} , 则热金斯质量仅为 $0.5 M_{\odot}$ 。因此, 在小尺度上 ($\leq 0.1 \text{ pc}$), 应该存在着未知的力, 如辐射反馈、磁场、湍流等, 通过加热气体和提升压力, 以此来阻止云核的进一步碎裂 (Krumholz, 2014)。

在大尺度的低分辨率上, 这些样本都不能被分解, 我们仅能分辨出其中的一到两个致密核成分。它们的质量为 230 到 $2323 M_{\odot}$, 这为大质量星团的形成提供了必要的质量源泉 (Blitz, 1991; Blitz & Williams, 1999)。随着分辨率的增加, 这些团块开始碎裂成更多更小更致密的结构。最大质量的致密核通常位于母体星团的中心位置, 次级大质量致密核的质量是最大质量致密核的 28% - 38%。某些团块中, 前两个最大质量的凝聚核有着相似的质量, 则它们通常会彼此远离, 比如 1.3 mm BCD 阵列观测的凝聚核 G23.44 No. 1 和 No. 2。这些碎裂的成分可以被解释为竞争吸积的结果。

一般来说, 在大尺度上, 红外辐射和毫米波连续谱有着较好的相关性。在该项目中, 在形态学上, $870, 850, 450 \mu\text{m}$ 的辐射与红外辐射成协性较好, 仅除团块 G23.97N 外。红外辐射主要来自于暖的和热的尘埃辐射, 毫米波辐射主要来自于冷尘埃。红外源核一般深埋于冷的致密核中。强的红外辐射可能示踪着原恒星 (protostar)。假如一个原恒星在团块中形成, 则我们在毫米波段所观测到的可能仅仅是其包层结构。通过比较 1.3 mm CD 阵列和 $4.5 \mu\text{m}$ 中的最大质量的凝聚核的峰值位置, 它们存在着明显的偏差, 仅除团块 G25.38 外。这是

否意味着我们在毫米波段所探测到的仅仅是深埋着的原恒星的包层结构呢？除了最大质量的凝聚核，其它凝聚核也将形成大质量恒星吗？想要回答这两个问题，了解毫米波段下的凝聚核和红外云核的关系是非常关键的。

3.2.4.4 等级演化序列

为什么大质量星通常形成于星团中呢？一个原因是大质量星的形成需要足够的质量源泉，另外一个原因是恒星形成需要满足一定的触发条件，比如来自于超致密电离氢区的辐射反馈作用。这可能会在超致密电离氢区附近形成一个等级演化序列。我们可以把这些不同阶段的天体分为以下几类：无星核 (starless cores)，原恒星核 (prestellar cores)，“Class 0/I” protostellar cores，前主序星 (pre-main sequence stars) (André et al., 2009)。大质量星的演化时标是相对短暂的，而无星核被认为是恒星形成的最早期的阶段。

我们的样本一般都是临近于一个超致密电离氢区。从它们的红外辐射上看，镶嵌于超致密电离氢区的原恒星是比较年老的天体，其属于“Class 0/I” protostellar 核阶段。由于来自于附近超致密电离氢区的辐射反馈作用，成团的恒星形成被触发或者破坏。 $24\ \mu\text{m}$ 的红外辐射可能示踪恒星形成的演化阶段。基于 $24\ \mu\text{m}$ 的测光流量的判断，我们的样本几乎都属于红外宁静的源，甚至是没有任何红外辐射的源。因此，这些样本都是一些较好的无星核或者 prestellar 核样本。

由毫米波的高分辨率观测可知，团块 G23.44, G25.38, G25.71 已经分裂成两团致密核，分别位于北部和南部。这两团致密核有着相对远的距离，每一团都围绕着一个大质量致密核。极有可能，每一团中的最大的致密核都至少能形成一颗大质量星，并且处于不同的演化阶段。这种与双星或者多星系统相类似的天体会影响单颗星的形成效率 (André et al., 2009)。这表明最大质量的致密核与星团有着千丝万缕的关系。

在前面的章节中，我们已经提及了凝聚核与红外峰值间的位置偏差。如果最大质量的凝聚核没有进一步的碎裂，它们将形成一批大质量的恒星，其不同于由红外峰值所示踪的原恒星的演化阶段。

从附近的超致密电离氢区，到深埋于红外云核中的原恒星，再到毫米波致密冷核（与红外云核有位置偏差），我们认为这是一个恒星形成的等级演化序列。来自于演化星和年轻恒星的反馈作用，比如辐射压，可能会对新一代的恒

星形成有一定的触发作用。然而，较强的辐射压也会光致蒸发超致密电离氢区附近的恒星形成介质。

3.2.4.5 核形成效率

核形成效率 (core formation efficiency) 是大质量恒星形成的一个关键指标，其表示能否聚集大量的质量成为一个很小的致密核。在对 Cygnus X 的研究中，高达 37% 甚至约 100% 的恒星形成效率已经被 (Bontemps et al., 2010) 报道。在我们的项目中，对于 1.3 mm BCD 阵列的凝聚核 G23.97S No.1, G25.38 No.1, G25.71 No.1，它们的核形成效率分别是 44%, 53%, 48%。对于凝聚核 G23.44 No.1，其恒星形成效率为 12%。另外，在 G23.44-u 星团中的部分凝聚核也可能形成大质量恒星。

在图 3.9 中的质量分数和密度的关系中，我们没有获得很好的线性关系，这可能是由于样本较少，密度较相似。但是在图 3.6 和 3.7 中，随着团块的进一步碎裂，那些碎片都有较高的表面密度。Bontemps et al. (2010) 和 Palau et al. (2013) 也发现了这个趋势，认为自引力效应可能主导着全局坍缩的过程。如果仅有自引力主导坍缩，则单个的大质量星将会形成。但是碎裂的小团块常常会形成双星或者多星系统，这表明磁场或者湍流也可能在团块坍缩中发挥一定的作用。

3.2.4.6 质量谱

理解初始质量函数 (stellar initial mass function) 的起源也是研究恒星形成的关键问题，因为它包含了一些非常基本的物理问题。大质量恒星形成的核质量函数与初始质量函数有着相似的斜率谱，它们之间可能存在着一定的物理联系。引力碎裂模型有着较窄的谱型，和陡峭的斜率，而湍流碎裂模型有较宽的谱型，和平缓的幂率谱尾 (André et al., 2009)。在图 3.10 中，我们给出了 1.3 mm BCD 阵列观测到的凝聚核的质量谱分布，其有着较高的分辨率。其中，G25.38 No.1 和 G25.71 No.1 的质量分别是 $33.5 M_{\odot}$ 和 $57.5 M_{\odot}$ ，它们位于幂率谱的尾部。这种谱型能够被解释为湍流碎裂的结果，但是仍然不能摆脱未被完全分解的可能性。

Salpeter 幂率谱的斜率为 -1.35 (Salpeter, 1955; Zinnecker & Yorke, 2007)，而核质量函数的斜率通常与之相当。大质量星常常形成于致密星团中，因此

成团气体中的竞争吸积过去常常被用来解释 Salpeter 恒星质量的分布问题 (Bonnell et al., 2001; Klessen & Burkert, 2001)。我们简单地拟合了 1.3 mm BCD 阵列的质量谱, 其质量分布于 $4 M_{\odot}$ 和 $20 M_{\odot}$ 之间。所得到的质量谱的斜率是 $\alpha = -0.91 \pm 0.08$, 它比 Salpeter 关系的斜率以及 Beuther & Schilke (2004) 工作中的大质量恒星形成的质量谱稍微平缓, 但是相似于 Bontemps et al. (2010) 的工作。对于这个平缓的质量谱, 我们认为大质量恒星形成可能被湍流碎裂主导着。然而, 由于干涉仪缺失短基线的观测, 许多低质量碎块被过滤出去了, 这也会导致稍微平缓的质量谱。因此, 一个无偏的大样本质量谱的统计工作是非常必要的。

3.3 致密冷核的氘化、维里状态和化学

关于此部分, 我们将利用由 PdBI 和 VLA 干涉仪观测获得的谱线数据对八个大质量恒星形成区 G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71 进行研究。其中主要谱线包括 85.926 GHz 的 NH_2D 、86.340 GHz 的 H^{13}CN 、86.055 GHz 的 HC^{15}N 、86.094 GHz 的 SO 、219.560 GHz 的 C^{18}O 、 NH_3 (1, 1) 和 (2, 2)。其目的是研究大质量恒星形成早期阶段的动力学、维里稳定性、化学等特征。

由于该项目仍然处于分析和文章撰写状态, 我们将不在此文中详细展开, 仅仅展示一些我们获得的初步结果, 其置于本文的附录中。

3.4 小结

在大质量恒星形成的早期阶段, 团块的碎裂是一个非常重要的过程。调研无星核与原恒星核的演化和形成将是理解初始质量函数起源的关键。然而, 就目前来说, 有很少关于此类的样本供给我们研究。那些冷的和大质量的团块倾向于碎裂成成团的恒星, 通常大质量恒星也形成于其中。对于我们的工作, 其目的是研究大尺度上大质量团块的栖息环境, 和在小尺度上致密核和凝聚核的碎裂过程。

对于八个大质量团块 (G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71), 我们给出了多波段的连续谱观测结果, 其中包括 6 cm (Cornish), 1.3 cm (VLA), 3.5 mm, 1.3 mm (PdBI), 870 μm (ATLASGAL), 850 μm , 450 μm (SCUBA)。利用 *Gaussclumps*, 我们对这些大质量团块进行分析, 在不同

尺度上抽取出其中的致密核、凝聚核。在大尺度上，那些团块的质量分布为 230 到 $2323 M_{\odot}$ ，有效半径为 $R_{\text{eff}} \sim 0.5 \text{ pc}$ ，体密度为 $n_{\text{H}_2} \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 。在小尺度上，许多凝聚核的质量都大于 $8 M_{\odot}$ ，有效半径为 $R_{\text{eff}} \sim 0.02 \text{ pc}$ ，体密度为 $n_{\text{H}_2} \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 。另外，大多数致密核及其抽取出来的碎片都位于大质量星的阈值范围内 $m(r) > 870 M_{\odot}(r/\text{pc})^{1.33}$ (Kauffmann & Pillai, 2010)。

结合 4.5, 8.0, 24, 70 μm 的红外数据，我们研究了这些样本的恒星形成活跃性和演化阶段。这些团块处于超致密电离氢区附近，然而我们的样本大多都属于红外宁静的源，表现为 $S_{24\mu\text{m}} < 15.0 \text{ Jy}$ 。附近的超致密电离氢区可能对这些宁静的红外源样本有着一定的反馈作用。我们还发现位于核心处的红外云核通常被一些 1.3 mm 的凝聚核围绕着，大多数他们都是无星核。甚至一些大质量的凝聚核与红外源峰值有着较大的位置偏差。

在 3.5 mm 波段，所测量的连续谱流量主要来自于电离气体和冷尘埃辐射。我们结合多波段的数据，利用能谱拟合工具对其进行了区分。对于团块 G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98，几乎没有来自于自由-自由辐射的贡献，而对于团块 G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71，大约有 32% ~ 96% 的流量来自于自由-自由辐射的贡献。另外，由于缺失短基线的观测，我们认为存在着 45% ~ 50% 流量损失。

样本的核形成效率的大小为 12% 到 53%，质量谱为 $\Delta N/\Delta M = M^{-0.91 \pm 0.08}$ ，其质量位于 4 到 $20 M_{\odot}$ 之间，尺度为 $R_{\text{eff}} \sim 0.02 \text{ pc}$ 。获得的质量谱斜率表示湍流主导着团块的碎裂过程。

关于致密冷核的氙化、维里状态和化学方面，我们的工作尚未完成，所以不在此文中给出结论。

第四章 超超致密电离氢区

4.1 引言

由于大质量恒星 ($> 10 M_{\odot}$) 形成具有远距离 ($> 1 \text{ kpc}$), 高消光 ($A_V > 100 \text{ mag}$), 短的演化时标等特点 (Kurtz, 2005; van der Tak & Menten, 2005), 所以其在观测上困难重重。高分辨率的毫米波观测将揭秘致密核包层的物理环境; 高分辨率的厘米波观测能够穿透厚厚的包层, 帮助我们了解栖息在内部的超致密 (ultra-compact H II region) 或者超超致密电离氢区 (hyper-compact H II region), 这些电离氢区来自于中心处的 OB 型原恒星的电离和激发周围的中性介质。

超超致密电离氢区的能谱分布, 从厘米波段到 100 GHz 附近, 通常是上升的幂率谱 ($S_{\nu} \propto \nu^{\alpha}$); 也就是说, 其反转频率 (turnover frequency) 通常会高于 100 GHz (Beuther et al., 2004; Franco et al., 2000; Galván-Madrid et al., 2009; Keto et al., 2008); 其中, 谱指数 α 能够很好地示踪电离气体的密度梯度 (Franco et al., 2000)。典型的超超致密电离氢区的特点是: 小尺度 ($< 0.03 \text{ pc}$), 高的电子密度 ($10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$), 高的辐射量度 ($> 10^8 \text{ pc cm}^{-6}$), 和较宽的射电复合线 ($\text{FWHM} > 40 \text{ km s}^{-1}$) (Beuther et al., 2007; Choi et al., 2012; Kurtz, 2000b; Sewilo et al., 2011)。相对于热核, 超超致密电离氢区通常是年老的; 相对于致密电离氢区, 超超致密电离氢区处于年轻的演化阶段 (Kurtz, 2000b)。然而, 某些超超致密电离氢区可以和热核共生存, 可能超超致密电离氢区中心处的电离星仍旧在吸积。超超致密电离氢区通过向外膨胀和扩张, 形成致密电离氢区, 最终演化成一颗大质量星。通过揭示超超致密电离氢区的形成过程, 将帮助我们了解大质量恒星形成的过程。然而, 由于超超致密电离氢区的样本较少, 导致无法很好地了解其环境特征。

通常, 大质量星的形成过程中, 伴随着内流或吸积、外向流、旋转等剧烈的动力学过程。内流和吸积过程可以为大质量星的形成提供质量保证, 而外向流能够把下落气体的角动量转移出去 (Keto, 2002, 2007)。高分辨率的亚毫米阵列 (SMA) 和厘米波段的甚大阵列望远镜 (VLA) 是帮助我们理解这些动力学过程的较好工具。

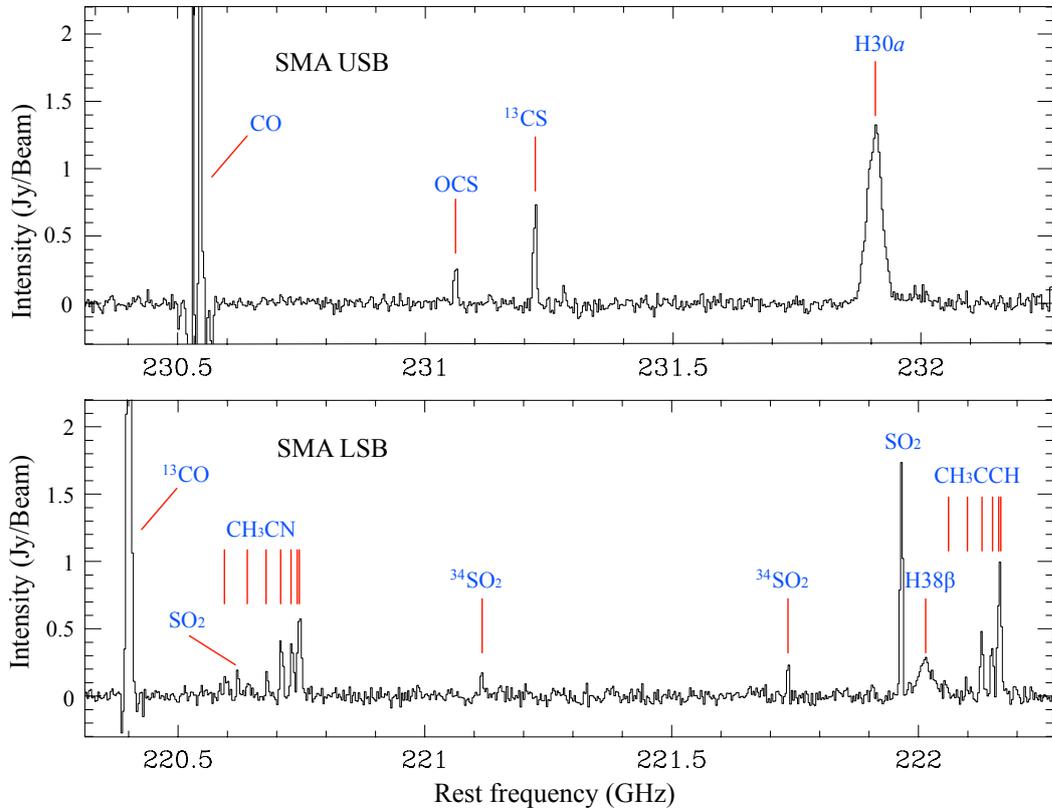


图 4.1: SMA 上下边带观测的 25 条不同跃迁的谱线, 该谱线是从 1.3 mm SMA 连续谱峰值处抽取的。该图中每谱线通道的宽度是 4.25 km s^{-1} 。

超超致密电离氢区 G35.58-0.03 位于远运动学距离 10.2 kpc 处 (Fish et al., 2003; Watson et al., 2003)。除了甲醇脉泽 (Caswell et al., 1995) 外, 水脉泽和羟基脉泽 (De Buizer et al., 2005; Fish et al., 2005; Forster & Caswell, 1989) 都已经在该源探测到。在相对低的分辨率下, VLA 2 cm, 3.6 cm 和 21 cm 的连续谱数据显示, G35.58-0.03 可能仅仅是两个临近的致密电离氢区, 一个是位于西部的 G35.578-0.030, 另一个是位于东部的 G35.578-0.031 (De Buizer et al., 2005; Kurtz et al., 1994, 1999)。另外, Plume et al. (1992), Mueller et al. (2002), Shirley et al. (2003) 和 Zhang & Wang (2013) 也对 G35.58-0.03 进行了低分辨率的观测和研究, 但是他们的工作都没有探讨该源的动力学环境, 甚至无法分辨该超超致密电离氢区。

在此项目中, 我们主要报道了 1.3 mm 的 SMA 和 1.3 cm 的 VLA 的高分辨率观测, 其分辨率分别为 $\sim 3''4$ 和 $\sim 0''3$; 然后对超超致密电离氢区 G35.58-0.03

进行了深入地研究。我们将主要从形态学、动力学和化学上对该源进行分析和探讨。该成果已经发表在国际天体物理学杂志 *ApJ* 上 (Zhang et al., 2014)。

表 4.1: G35.58-0.03 的谱线参数及高斯拟合的结果^{a b}。

Molecule	Transition	Frequency GHz	Flux Jy/beam-km/s	Velocity km s ⁻¹	FWHM km s ⁻¹	Intensity Jy beam ⁻¹
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
NH ₃	(2, 2)	23.722633	-0.02(0.01)	47.44(0.58)	2.92(1.47)	-0.007(0.001)
NH ₃	(2, 2)	23.722633	-0.16(0.01)	52.60(0.17)	4.61(0.43)	-0.033(0.001)
NH ₃	(3, 3)	23.870129	-0.04(0.03)	48.17(2.26)	5.24(3.32)	-0.008(0.006)
NH ₃	(3, 3)	23.870129	-0.12(0.04)	53.17(0.35)	4.35(0.64)	-0.026(0.006)
¹³ CO	2-1	220.39868	183.90(2.19)	52.19(0.02)	8.39(0.05)	20.60(0.37)
CH ₃ CN	12 ₆ -11 ₆	220.59444	—	—	—	—
SO ₂	56 _{5,51} -57 _{4,54}	220.61850	18.47(0.58)	52.21(0.05)	6.21(0.17)	2.79(0.09)
CH ₃ CN	12 ₅ -11 ₅	220.64110	—	—	—	—
CH ₃ CN	12 ₄ -11 ₄	220.67930	2.28(0.49)	122.80(0.50)	6.62(1.22)	0.32(0.06)
CH ₃ CN	12 ₃ -11 ₃	220.70902	5.99(0.44)	82.43(0.22)	8.01(0.53)	0.70(0.06)
CH ₃ CN	12 ₂ -11 ₂	220.73027	4.91(0.35)	53.41(0.24)	8.19(0.76)	0.56(0.06)
CH ₃ CN	12 ₁ -11 ₁	220.74302	—	—	—	—
CH ₃ CN	12 ₀ -11 ₀	220.74727	—	—	—	—
³⁴ SO ₂	22 _{2,20} -22 _{1,21}	221.11490	2.81(0.72)	52.56(0.38)	5.66(1.01)	0.47(0.06)
³⁴ SO ₂	13 _{2,12} -13 _{1,13}	221.73571	2.53(0.32)	53.02(0.23)	5.30(0.66)	0.45(0.04)
SO ₂	11 _{1,11} -10 _{0,10}	221.96520	—	—	—	—
H	38β	222.01175	12.11(0.69)	49.87(1.16)	43.18(3.05)	0.26(0.04)
CH ₃ CCH	13 ₅ -12 ₅	222.06103	—	—	—	—
CH ₃ CCH	13 ₄ -12 ₄	222.09915	0.95(0.33)	123.00(0.75)	3.99(1.11)	0.22(0.08)
CH ₃ CCH	13 ₃ -12 ₃	222.12881	5.64(0.38)	81.93(0.11)	7.44(0.60)	0.71(0.08)
CH ₃ CCH	13 ₂ -12 ₂	222.15001	4.94(0.37)	53.84(0.01)	6.55(0.10)	0.71(0.08)
CH ₃ CCH	13 ₁ -12 ₁	222.16273	—	—	—	—
CH ₃ CCH	13 ₀ -12 ₀	222.16697	—	—	—	—
CO	2-1	230.53800	284.60(1.78)	52.86(0.02)	13.53(0.05)	19.80(0.51)
OCS	19-18	231.06099	5.94(1.46)	53.20(0.20)	6.49(0.75)	0.86(0.04)
¹³ CS	5-4	231.22077	14.27(1.28)	52.52(0.11)	6.88(0.40)	1.95(0.05)
H	30α	231.90090	61.37(0.68)	45.03(0.23)	43.16(0.42)	1.34(0.05)

^(a) 所有的谱线均展示于图 4.1 中。高斯拟合线展示于图 4.2 和 4.4 中。

^(b) 转换因子: $\text{DPFU}_{1.3\text{cm}} \sim 2.5 \times 10^4 \text{ K per Jy beam}^{-1}$, $\text{DPFU}_{1.3\text{mm}} \sim 2.22 \text{ K per Jy beam}^{-1}$ 。

4.2 SMA 和 VLA 数据观测

4.2.1 SMA 观测

1.3 mm 的 SMA 观测数据来自于公开的 SMA 数据库¹ (Ho et al., 2004)。该数据被观测于 2008 年 6 月 22 日, 利用了 SMA 致密阵²。双边带接收机覆盖了 220.3 – 222.3 GHz 和 230.3 – 232.3 GHz 的带宽范围, 其频率分辨率为 ≈ 0.812 MHz, 相应的速度分辨率为 0.85 km s^{-1} 。对于上下边带的观测数据, 综合孔径的波束大小为 $3''.38 \times 3''.05$, P.A. = $76^\circ.1$ 和 $3''.53 \times 3''.19$, P.A. = $76^\circ.3$ 。在 230 GHz 附近, SMA 望远镜的主波束大小是 $\sim 55''$ 。相关的流量和亮温度的转换因子为 $\text{DPFU}_{1.3\text{mm}} \sim 2.22 \text{ K per Jy beam}^{-1}$ 。

望远镜跟踪观测的相位中心位置是: $\alpha(\text{J2000}) = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}22^{\text{s}}.533$, $\delta(\text{J2000}) = 02^\circ20'27''.50$ 。QSO 3C279 和 Uranus 源被用作望远镜观测的带通和流量校准源, QSO J1751+096 和 QSO J1830+063 源被用作天线增益校准因子。数据处理的校准和成像软件是 MIRIAD³。通过平滑非谱线发射的通道, 生成 uv 数据包, 从而构造出一个伪的连续谱数据。连续谱数据经过了自校准的处理, 谱线数据经过了增益解的处理。谱线数据将被转换到 GILDAS⁴ 格式做进一步的成像处理。从 1.3 mm 峰值处抽取出来的两个边带的谱线被展示在图 4.1 中。最终谱线数据的噪声范围是 $[40, 80] \text{ mJy beam}^{-1}$, 连续谱的噪声是 $\sim 19 \text{ mJy beam}^{-1}$ 。

¹<http://cfa-www.harvard.edu/rtdc/index-sma.html>

²The SMA is a joint project between the Smithsonian Astrophysical Observatory and the Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics and is funded by the Smithsonian Institution and the Academia Sinica.

³<http://sma-www.cfa.harvard.edu/miriad>

⁴<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

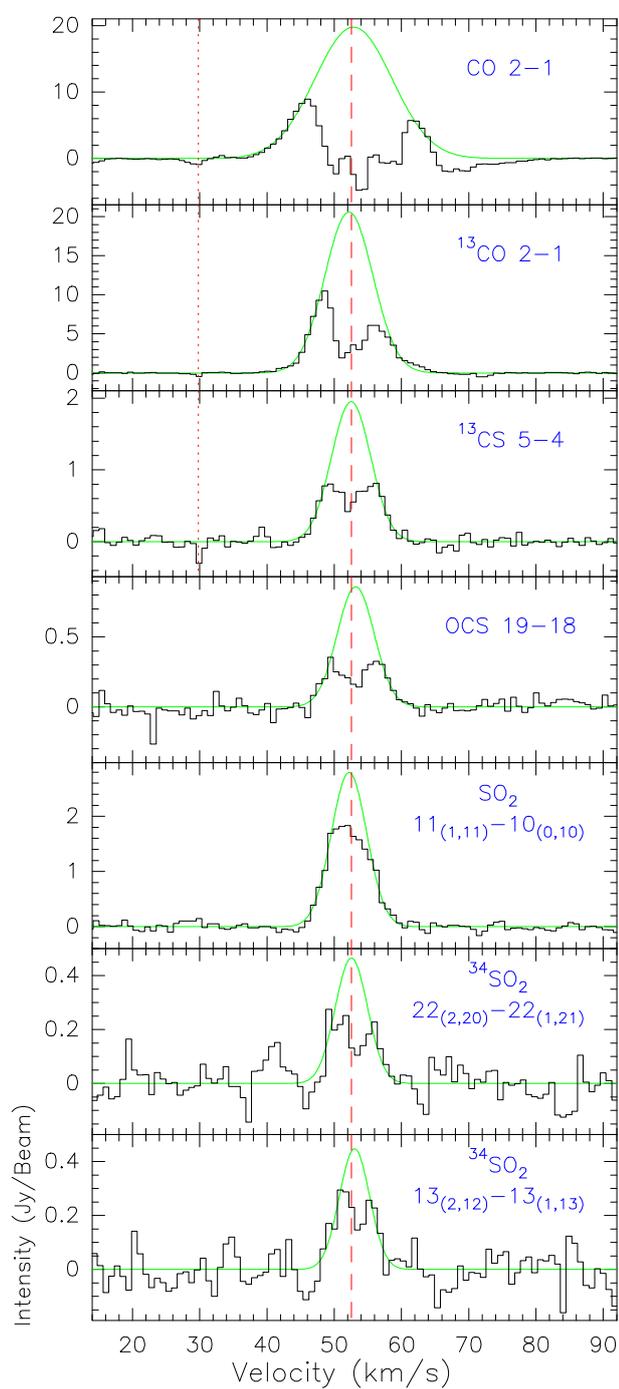


图 4.2: 来自于 1.3 mm SMA 峰值处的 CO (2-1) 等分子谱线。图中谱线的通道宽度是 0.85 km s^{-1} 。红色的长虚线标记出了超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的系统速度 ($V_{\text{sys}} = 52.5 \text{ km s}^{-1}$), 另外一条红色的短虚线标记出了谱线 CO, ^{13}CO , 和 ^{13}CS 的吸收坑, 绿色的曲线是高斯拟合线。

表 4.2: G35.58-0.03 的不同波段的连续谱参数。

Continuum	Right Ascension h m s (")	Declination ° ' " (")	Beam Size "x"; °	Deconvolved Size "x"; °	Peak Jy/beam	Total Flux Jy
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
3.6 cm ^a	18 56 22.563	2 20 27.660	2.82×2.38;-12.5	1.96×1.35;55.1	0.163(0.007)	0.234(0.004)
3.6 cm ^b	18 56 22.52	2 20 27.0	1.05×0.79	—	0.074(0.000)	0.197(0.001)
2.0 cm ^b	18 56 22.52	2 20 27.3	0.57×0.45	—	0.082(0.000)	0.242(0.001)
1.3 cm ^a	18 56 22.528	2 20 27.619	0.36×0.24;12.6	0.66×0.19;23.7	0.080(0.006)	0.255(0.015)
1.3 mm ^a	18 56 22.554	2 20 27.705	3.38×3.05;76.1	2.24×1.29;73.6	0.811(0.030)	1.056(0.017)
0.85 mm ^c	18 56 22.530	2 20 24.447	14.00×14.00; 0	18.64×14.99;-11.7	4.801(0.259)	11.712(0.201)
0.45 mm ^c	18 56 22.425	2 20 25.306	8.00×8.00; 0	11.72×10.04;-17.7	21.328(2.003)	60.701(1.550)

^(a) 来自于本项目的 SMA 和 VLA 数据 (Zhang et al., 2014)。

^(b) 来自于 Kurtz et al. (1994) 的 VLA 数据。

^(c) 来自于 JCMT 望远镜的公开数据库 (<http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/archive/>)。

4.2.2 VLA 观测

超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的 1.3 cm VLA 数据来自于公开的 NRAO VLA 数据库⁵。该观测的项目代码是 AG811，观测日期是 2009 年 3 月，观测阵列是 VLA-B 阵，观测谱线是 $\text{NH}_3 (J, K) = (2, 2)$ 和 $(3, 3)$ 反转跃迁线。望远镜跟踪观测的相位中心是 $\alpha(\text{J2000}) = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}22^{\text{s}}500$ ， $\delta(\text{J2000}) = 02^{\circ}20'27''00$ 。利用双中频相关器的谱线观测模式， $\text{NH}_3 (J, K) = (2, 2)$ 和 $(3, 3)$ 两条线同时被观测到。其中，每个相关器的带宽均是 6.25 MHz，通道数是 127 个，对应的频率分辨率为 49 kHz 和速度分辨率为 0.617 km s^{-1} 。综合孔径的分辨率大小是 $0''.36 \times 0''.24$ ，P.A. = $12^{\circ}6'$ ，VLA 天线在 23 GHz 的主波束大小是 $\sim 120''$ ，相应的流量密度和亮温度的转换因子为 $\text{DPFU}_{1.3\text{cm}} \sim 2.5 \times 10^4 \text{ K per Jy beam}^{-1}$ 。关于天线和数据校准，J1331+305 是流量校准源，J2253+161 和 J1331+305 是带通校准源，J18517+00355 是天线增益和相位校准源。在目标源的流量密度的校准中，我们获得的流量校准源 J1331+305 在 23.72 GHz 和 23.87 GHz 的流量密度分别为 2.4059 Jy 和 2.3949 Jy，相位校准源的流量密度分布为 1.0335 ± 0.0003 和 0.8688 ± 0.0004 。最终谱线数据的噪声范围是 $[1, 6] \text{ mJy beam}^{-1}$ ，连续谱的噪声是 $\sim 0.7 \text{ mJy beam}^{-1}$ 。

除此之外，3.6 cm 连续谱数据同样是取之于 VLA 数据库，其观测时间是 1998 年 12 月份，由 VLA-C 阵观测所得，项目代码为 AK477。望远镜观测的跟踪相位中心是 $\alpha(\text{J2000}) = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}23^{\text{s}}473$ ， $\delta(\text{J2000}) = 02^{\circ}20'37''76$ 。双边带观测的中心频率分别是 8.4351 (IF1)，8.4851 (IF2) GHz，带宽都是 50 MHz。类星体 B1328+307 被用作流量校准源，类星体 B1829-106 是天线增益校准源。最终的 3.6 cm 连续谱噪声是 $\sim 6.7 \text{ mJy beam}^{-1}$ 。

关于 VLA 观测数据的校准，主要利用 AIPS 软件⁶中的标准处理程序。1.3 cm 连续谱数据是由非谱线发射通道的 (u, v) 数据构造而成的。自校准的增益解被应用到谱线数据中的。校准后的数据被输出到 GILDAS 和 MIRIAD 软件中做进一步的成像处理。

⁵The National Radio Astronomy Observatory is operated by Associated Universities, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

⁶<http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>

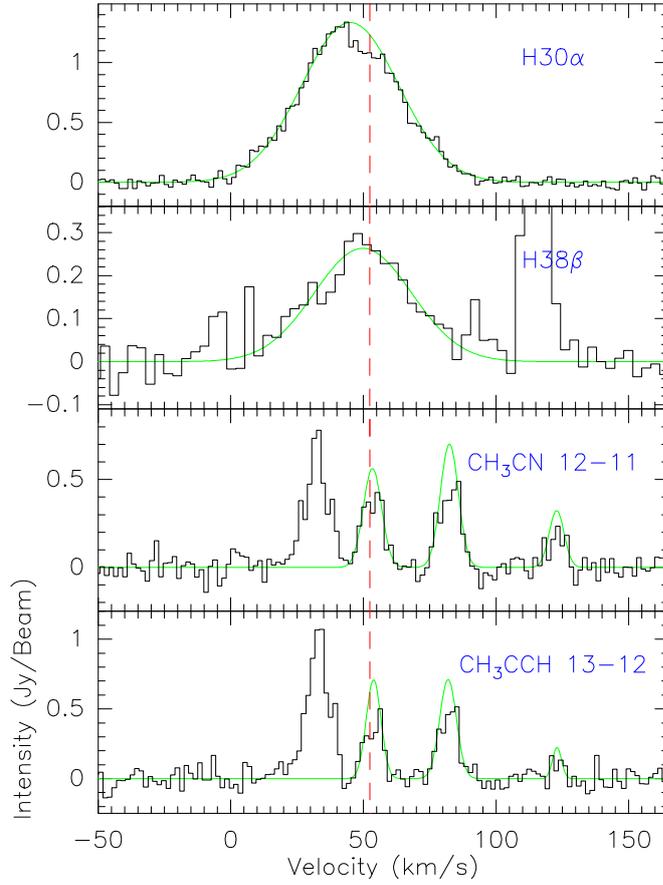


图 4.3: 来自于 1.3 mm SMA 连续谱峰值处的 H30 α , H38 β , CH₃CN 12(2)-11(2), 和 CH₃CCH 13(2)-12(2) 等分子谱线。此图的单个通道宽度为 1.70 km s⁻¹。红色虚线标出了 G35.58-0.03 的系统为 ($V_{sys} = 52.5$ km s⁻¹), 绿色的曲线为高斯拟合线。

4.3 G35.58-0.03 的观测结果

4.3.1 谱线

图 4.1 中展示出了 1.3 mm 峰值处的 4 GHz 带宽的由 SMA 观测的上下边带的谱线。该图中谱线的通道宽度是 4.25 km s⁻¹, 而本课题将利用原始的速度分辨率 0.85 km s⁻¹ 做进一步的分析研究。对于谱线的证认, 我们首先参考了源 G20.08-0.14N 的观测 (Galván-Madrid et al., 2009), 其次利用了谱线数据库 JPL

表 4.3: CH₃CN 和 CH₃CCH 转动温度图的相关参数^{a b}。

Molecule	Transition	$S\mu^2$ debye ²	E_u K	Flux Jy/beam-km/s	Intensity Jy/beam
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
CH ₃ CN	12(0)-11(0)	183.74	69	6.39(0.39)	0.67(0.09)
CH ₃ CN	12(1)-11(1)	182.46	76	4.02(0.59)	0.36(0.09)
CH ₃ CN	12(2)-11(2)	178.64	97	4.12(0.35)	0.41(0.06)
CH ₃ CN	12(3)-11(3)	172.26	133	4.44(0.44)	0.45(0.06)
CH ₃ CN	12(4)-11(4)	163.32	183	1.30(0.50)	0.18(0.06)
CH ₃ CN	12(5)-11(5)	151.84	247	0.93(0.36)	0.17(0.09)
CH ₃ CN	12(6)-11(6)	137.80	325	1.07(0.33)	0.16(0.09)
CH ₃ CCH	13(0)-12(0)	7.92	75	5.96(0.35)	0.63(0.09)
CH ₃ CCH	13(1)-12(1)	7.87	82	3.34(0.35)	0.46(0.09)
CH ₃ CCH	13(2)-12(2)	7.73	103	3.56(0.37)	0.40(0.08)
CH ₃ CCH	13(3)-12(3)	7.50	139	4.65(0.38)	0.50(0.07)
CH ₃ CCH	13(4)-12(4)	7.17	189	1.03(0.33)	0.33(0.08)
CH ₃ CCH	13(5)-12(5)	6.75	253	1.04(0.35)	0.21(0.08)

^(a) CH₃CN 的 12(0)-11(0) 和 12(1)-11(1) 跃迁线混合在一起。

^(b) CH₃CCH 的 13(0)-12(0) 和 13(1)-12(1) 跃迁线混合在一起。

(Pickett et al., 1998), CDMS (Müller et al., 2005), SPLATALOGUE⁷ 进行辨别和证认。最终, 我们共获得 8 种分子元素及其同位素中, 共包含 25 种不同的跃迁。相关的谱线参数列于表 4.1 中

图 4.2、4.3 中给出了观测的谱线 CO (2-1), ¹³CO (2-1), ¹³CS (5-4), OCS (19-18), SO₂ 11(1,11)-10(0,10), ³⁴SO₂ 22(2,20)-22(1,21), ³⁴SO₂ 13(2,12)-13(1,13), H30 α , H38 β , CH₃CN (12-11), 和 CH₃CCH (13-12) 及其高斯拟合线。由这些线的高斯拟合的平均线心速度可以估计该源的系统速度, 为 $V_{\text{sys}} \approx 52.5 \text{ km s}^{-1}$ 。这些谱线是在 1.3 mm 连续谱峰值处抽取出来的。图 4.2、4.3 中谱线的通道宽度分别是 0.85 km s^{-1} 和 1.70 km s^{-1} 。从谱线的轮廓上分析, 我们假设线心处的吸收坑来自于自吸收和流量丢失, 我们通过线翼进行高斯拟合, 恢复谱线的原始强度。谱线 CH₃CN 的 12(0)-11(0) 和 12(1)-11(1) 跃迁线重叠在一起, 以致于无法分辨和进行高斯拟合, 同样的情况也发生在 CH₃CCH 的 13(0)-12(0) 和 13(1)-12(1)

⁷<http://www.splatalogue.net/>

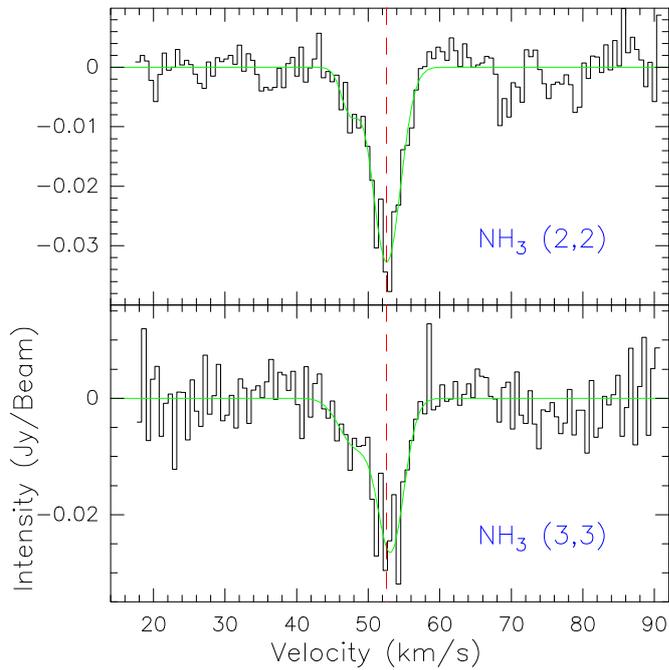


图 4.4: 来自于 1.3 cm VLA 连续谱峰值处的 NH_3 (2, 2) 和 (3, 3) 分子谱线。此图中的单个通道的宽度为 0.617 km s^{-1} 。红色虚线标记出了 G35.58-0.03 的系统速度位置，绿色曲线是高斯拟合线。

跃迁线上。相关的高斯拟合参数列于表 4.1 中。

图 4.4 中给出了 VLA 观测的谱线 NH_3 (2, 2), (3, 3) 吸收线，其位于 1.3 cm 连续谱峰值处。通道的宽度为 0.617 km s^{-1} 。由于精细结构的卫星线太弱而无法辨别，我们仅仅拟合了氨分子的主线。拟合的参数列于表 4.1 中。

4.3.2 Moment 图

图 4.5 分别展示出了 (A) CO (2-1) 积分强度等值线叠加在 1.3 mm 连续谱图上；(B) ^{13}CO (2-1) 积分强度等值线叠加在 1.3 mm 连续谱图上；(C) ^{13}CS (5-4) 积分强度等值线叠加在 $\text{H30}\alpha$ 积分强度图上；(D) SO_2 11(1,11)-10(0,10) 积分强度等值线叠加在 3.6 cm 连续谱图上。蓝色和红色的等值线分别是谱线的蓝翼和红翼的积分强度。1.3 mm 连续谱， $\text{H30}\alpha$ 复合线，3.6 cm 连续谱的峰值强度分别是 $0.811 \text{ Jy beam}^{-1}$, $61.37 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, $0.163 \text{ Jy beam}^{-1}$ 。图中白色十字标记了 1.3 cm 连续谱的峰值位置，其连续谱数据的相关坐标和综合孔径分辨率列

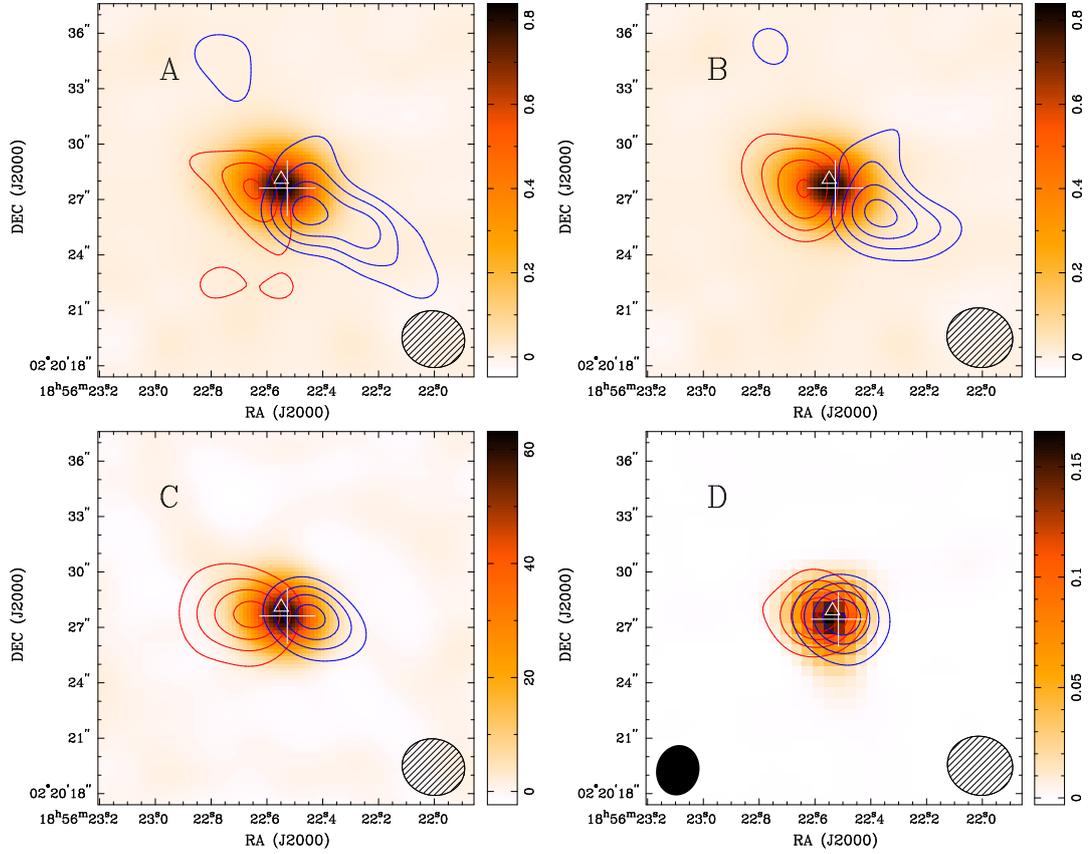


图 4.5: CO (2-1) 等谱线的红蓝翼积分强度等值线与 1.3 mm 等连续谱的叠图。(A) CO (2-1) 的积分强度等值图叠加在 1.3 mm 连续谱图像上。蓝色的等值线分别为 3, 4, 5, 6 $\times 1.70 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间是 $[45, 50] \text{ km s}^{-1}$; 红色的等值线分别为 3, 4, 5 $\times 0.79 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间为 $[59, 65] \text{ km s}^{-1}$ 。(B) ^{13}CO (2-1) 的积分强度等值图叠加在 1.3 mm 连续谱图像上。蓝色的等值线分别为 3, 4, 5, 6 $\times 0.18 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间是 $[40, 50] \text{ km s}^{-1}$; 红色的等值线分别为 3, 4, 5, 6 $\times 1.28 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间为 $[56, 66] \text{ km s}^{-1}$ 。(C) ^{13}CS (5-4) 的积分强度等值图叠加在 $\text{H}30\alpha$ 积分强度 (积分区间是 $[0, 90] \text{ km s}^{-1}$) 图像上。蓝色的等值线分别为 3, 5, 7, 9 $\times 0.41 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间是 $[46, 51] \text{ km s}^{-1}$; 红色的等值线分别为 3, 5, 7, 9 $\times 0.57 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间为 $[54, 60] \text{ km s}^{-1}$ 。(D) SO_2 11(1, 11) – 10(0, 10) 的积分强度等值图叠加在 3.6 cm 连续谱图像上。蓝色的等值线分别为 3, 5, 7, 9, 11 $\times 0.62 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间是 $[46, 51] \text{ km s}^{-1}$; 红色的等值线分别为 3, 5, 7, 9, 11 $\times 0.29 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$, 其速度积分区间为 $[54, 60] \text{ km s}^{-1}$ 。白色十字标出了 1.3 cm 连续谱的峰值位置, 白色三角形标出了水脉泽和羟基脉泽的位置。

于表 4.2 中。白色的三角形标记了水脉泽 ($\alpha(\text{J2000}) = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}22^{\text{s}}.550$, $\delta(\text{J2000}) = 02^{\circ}20'28''.100$), 羟基脉泽 ($\alpha(\text{J2000}) = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}22^{\text{s}}.540$, $\delta(\text{J2000}) = 02^{\circ}20'28''.100$) 的位置 (De Buizer et al., 2005; Forster & Caswell, 1989), 但是没有探测到甲醇脉泽 (Caswell et al., 1995)。

图 C.1 展示了 ^{13}CS (5-4) 等谱线的积分强度等值线与其相应的强度权重的平均速度分布的叠图。图 C.2 展示了 ^{13}CS (5-4) 等谱线的积分强度等值线与其相应的速度弥散分布的叠图。其中成图的分子谱线分别包括: ^{13}CS (5-4), SO_2 11(1,11)-10(0,10), CH_3CCH 13(2)-12(2), $\text{H}30\alpha$ 。

图 4.6 给出了 NH_3 (2, 2), (3, 3) 的积分强度图, 并且叠加在 1.3 cm 连续谱上。积分速度区间标注在该图的注释中。1.3 cm 连续谱的峰值大小是 $80.29 \text{ mJy beam}^{-1}$ 。图中白色的十字标注了 1.3 cm 连续谱峰值的位置。中空和黑色的三角形分别标出了水脉泽 ($\alpha(\text{J2000}) = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}22^{\text{s}}.550$, $\delta(\text{J2000}) = 02^{\circ}20'28''.100$) 和羟基脉泽 ($\alpha(\text{J2000}) = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}22^{\text{s}}.540$, $\delta(\text{J2000}) = 02^{\circ}20'28''.100$) (De Buizer et al., 2005; Forster & Caswell, 1989) 的位置。黑色的“x”标出了两个可能的致密电离氢区的位置 G35.578-0.030 (西部), G35.578-0.031 (东部) (De Buizer et al., 2005; Kurtz et al., 1994, 1999)。我们的 1.3 cm 连续谱研究显示东部的 G35.578-0.031 非常弱。事实上, G35.578-0.030 将是我们的主要研究对象。

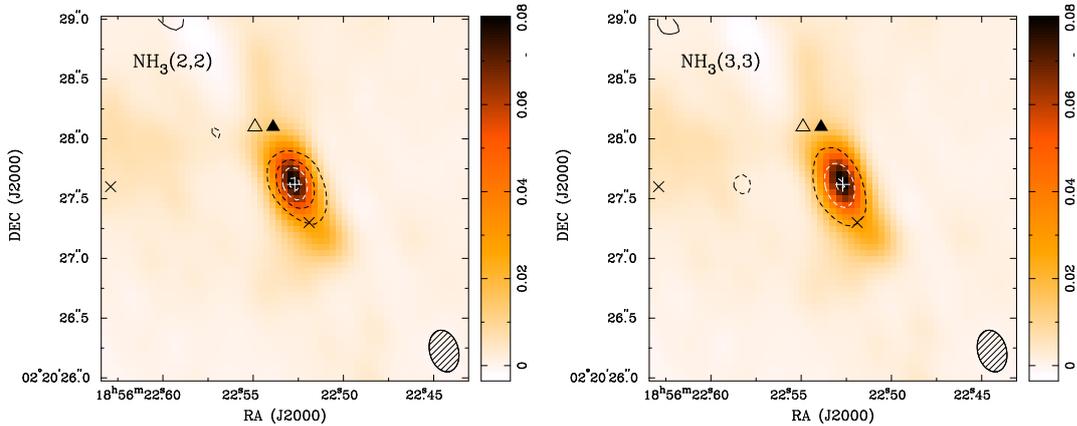


图 4.6: NH_3 (2, 2), (3, 3) 的积分强度等值线与 1.3 cm 连续谱的叠图。 NH_3 (2, 2) 线的标度分别是 -21, -15, -9, -3, $3 \times 7.64 \text{ mJy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$; NH_3 (3, 3) 的标度分别是 -15, -9, -3, $3 \times 10.99 \text{ mJy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ 。图中白色的 x 标记了 1.3 cm 连续谱的峰值位置。中空的三角形和黑色的三角形分别标出了水脉泽和羟基脉泽的位置。黑色的 x 给出了两个致密电离氢区的位置 Kurtz et al. (1994, 1999)。

图 4.8 给出了 NH_3 (2, 2), (3, 3) 的积分强度等值线, 并且叠加在其以谱线强度为权重的平均速度分布图上。图 4.7 给出了 NH_3 (2, 2), (3, 3) 积分强度等值线, 并叠加在其速度弥散分布图上。

4.3.3 位置-速度关系

沿着 1.3 mm 连续谱峰值的位置, 方位角是 90 度的方向, 图 4.9 给出了几个位置-速度分布图, 包括 CO (2-1), ^{13}CO (2-1), ^{13}CS (5-4), SO_2 11(1,11)-10(0,10), $\text{H}30\alpha$, CH_3CN 12(2)-11(2), CH_3CN 12(3)-11(3), CH_3CCH 13(2)-12(2), CH_3CCH 13(2)-12(2)。图中等值线的标度单位是 Kelvin, 其中 $\text{DPFU}_{1.3\text{mm}} \sim 2.22 \text{ K per Jy beam}^{-1}$ 。该位置-速度分布图可以帮助我们理解超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的气体动力学结构: 内流, 外向流, 和旋转。

4.4 G35.58-0.03 的 SMA 和 VLA 的观测研究

4.4.1 能谱分布

结合 3.6 cm, 2.0 cm, 1.3 cm, 1.3 mm, 0.85 mm, 0.45 mm 的连续谱数据, 图 4.10 给出了超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的能谱分布图。连续谱流量列在表 4.2 中。所涉及到的模型来自于 Shi et al. (2010) 的工作, 其中一个是电离气体的自由-自由辐射模型, 另外一个为暖的尘埃辐射模型。能谱拟合的结果表明, 25% 的 1.3 mm 连续谱流量来自于气体辐射的贡献, 75% 来自于尘埃辐射的贡献。考虑到高分辨率的 1.3 cm 连续谱来自一个小的致密核, 我们认为相对低分辨率的 1.3 mm 连续谱可能主要来自于包围超超致密电离氢区中致密核的厚尘埃包层。尘埃辐射应该产生于比自由-自由辐射更大的区域。一般来说, 短波段的辐射可以示踪盘或者包层的尘埃, 其谱指数比较陡峭, 为 $\alpha_{\text{dust}} \geq 2$; 长波辐射来自于热的射电激波相关的电离气体, 其谱型为平谱, $\alpha_{\text{gas}} \lesssim 1$ (Anglada et al., 1998; Choi et al., 2012; Reynolds, 1986)。通过能谱拟合, 我们获得的两个谱指数分别为 $\alpha_{\text{dust}} = 3.78 \pm 0.03$, $\alpha_{\text{gas}} = 0.32 \pm 0.04$, 其表明电离气体内存在一个潜在的密度梯度 (Franco et al., 2000)。另外, 考虑到电离气体对 1.3 mm 连续谱的流量贡献非常低, 通过利用谱指数 $\alpha_{\text{gas}} = 0.32 \pm 0.04$ 做线性拟合, 我们得到一个上限值为 55%。

在图 4.10 中, 0.85 mm 和 0.45 mm 的连续谱流量远高于其拟合值, 这是由于大的望远镜波束效应。然而, 1.3 cm 的连续谱数据将 G35.58-0.03 分解成两

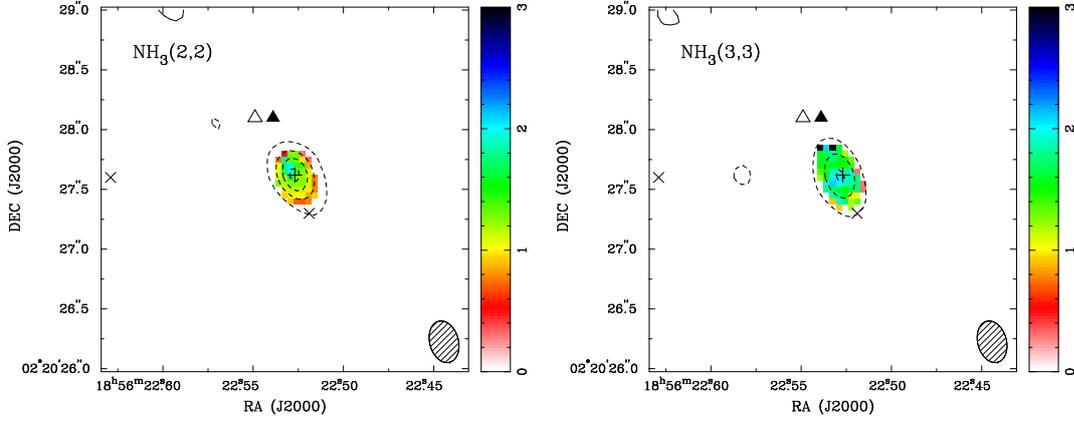


图 4.7: $\text{NH}_3(2,2)$, $(3,3)$ 的积分强度等值线与速度弥散分布的叠图。其中, 等值线和符号的标注如图 4.6 所示。

个源, 如图 4.6, 其连续谱流量较低。对于 1.3 cm 连续谱, 在 $\sim 1''.5 \times 1''.5$ 范围内, 我们利用 AIPS 软件中的“IMSTAT”命令测量到的总流量是 ~ 255 mJy, 峰值是 ~ 80.29 mJy beam^{-1} 。我们不得不承认, 由于数据分辨率差异较大, 能谱拟合的结果比较粗糙。

4.4.2 电离氢区

利用 SMA 1.3 mm 连续谱观测数据, 如图 4.5, 超超致密电离氢区 G35.58-0.03 呈现出一个致密的核; 然而, 利用 VLA 1.3 cm 连续谱数据, 如图 4.6, 该源的形态特征是沿着 23.7 度方位角的一个狭长结构。该狭长的结构与外向流的方向一致, 表明热电离气体和分子气体在相互作用。通过对 1.3 cm 观测数据进行反卷积, 我们得到该超超致密电离氢区的本征尺度为 $\theta_s = \sqrt{0''.655 \times 0''.192} \approx 0''.354$ 。假设电离气体是光学薄的, 并假设在局部热动平衡的条件下, 基于 1.3 mm 连续谱流量和 $\text{H}30\alpha$ 射电复合线的强度, 我们可以得到电子温度 T_e^* (Gordon & Sorochenko, 2002; Shi et al., 2010; Wilson et al., 2009):

$$T_e^* = \left[\left(\frac{6985}{\alpha(\nu, T_e)} \right) \left(\frac{\Delta V_{\text{H}30\alpha}}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{S_{1.3\text{mm}}^{\text{gas}}}{S_{\text{H}30\alpha}} \right) \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{1.1} \left(1 + \frac{N(\text{He}^+)}{N(\text{H}^+)} \right)^{-1} \right]^{0.87}, \quad (4.1)$$

其中, $\alpha(\nu, T_e) \sim 1$ 是一个变化缓慢的量 (Mezger & Henderson, 1967), $\frac{N(\text{He}^+)}{N(\text{H}^+)} \sim 0.096$ 被采用 (Mehringer, 1994)。 $S_{1.3\text{mm}}^{\text{gas}} = 0.811 \times 55\%$ Jy beam^{-1} 和 $S_{\text{H}30\alpha} = 1.34$ Jy beam^{-1} 分别是峰值流量密度和线强度。最终, 我们估算的电子温度为

$T_e^* = 5500$ K。由于在估算 $S_{1.3\text{mm}}$ 尘埃辐射的贡献存在着较大的不确定因素，因此电子温度的估算也存在着较大的误差。另外，因为能谱拟合的误差，1.3 mm 数据的相对低的分辨率主要示踪延展的结构，所以这个温度仅仅是该超超致密核的一个下限值。

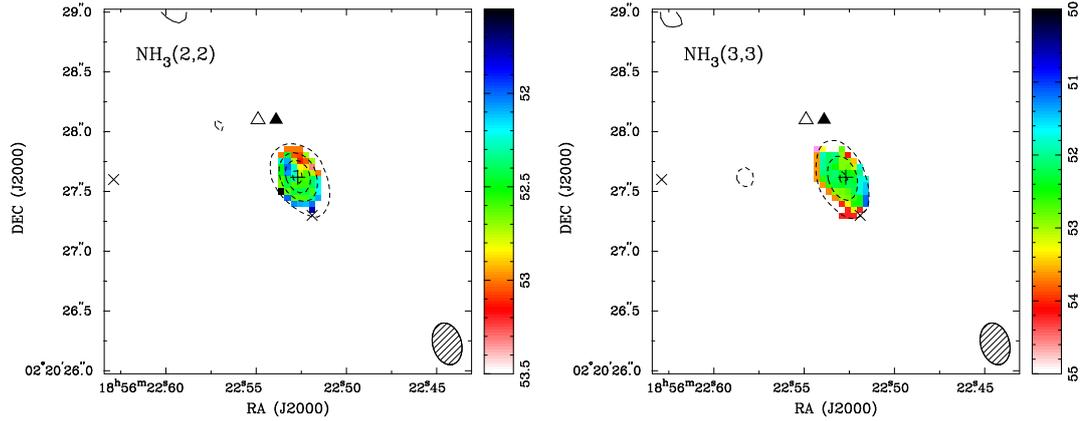


图 4.8: $\text{NH}_3(2, 2)$, $(3, 3)$ 的积分强等值线与以线强度为权重的平均速度分布的叠图。其中，等值线和符号的标注如图 4.6 所示。

辐射测量是判别超超致密电离氢区的一个重要参量。我们主要利用下面这个模型计算辐射测量 (Shi et al., 2010; Wilson et al., 2009):

$$\text{EM} = 7.1 \text{ pc cm}^{-6} \left(\frac{S_L}{\text{Jy}} \right) \left(\frac{\lambda}{\text{mm}} \right) \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{1.5} \left(\frac{\Delta V}{\text{km s}^{-1}} \right) \left(\frac{\theta_s}{\text{arcsec}} \right)^{-2}. \quad (4.2)$$

假设 $T_e \approx T_e^*$ ，则电子温度是 $T_e \sim 5500$ K。超超致密核的本征尺度是 $\theta_s \approx 0''.354$ 。H30 α 射电复合线的峰值强度是 $S_L = 1.43$ Jy，半高全宽是 $\Delta V = 43.16 \text{ km s}^{-1}$ ，观测的波段为 $\lambda = 1.3 \text{ mm}$ 。基于上述参量，我们可以计算出辐射测量为 $\text{EM} = 1.9 \times 10^9 \text{ pc cm}^{-6}$ 。利用 $\text{EM} = n_e^2 L f_V$ (其中 L , f_V 分别是光程长度和体积填充因子)，假设超超致密电离氢区致密核的尺度为 $L = 10.2 \times \tan(0''.354) \text{ kpc} = 3714 \text{ AU}$ ，填充因子是 $f_V = 1$ ，估算的电子体密度是 $n_e = 3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 。为了计算连续谱光学厚度 τ_c ，我们利用 Mezger & Henderson (1967) 的模型，如下：

$$\tau_c = 0.08235 \alpha(\nu, T_e) \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1} \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1.35} \left(\frac{\text{EM}}{\text{pc cm}^{-6}} \right). \quad (4.3)$$

假设 $\alpha(\nu, T_e) \sim 1$, 则连续谱光学厚度 $\tau_c \approx 0.015$ 。然而, 假如计算 1.3 cm 的连续谱数据, 同样利用该模型, 则得到光学厚度为 1.8。得到的上述参数表明, H30 α 是光学薄的, 可以示踪高温致密的环境。因此, 利用射电复合线研究高温致密环境将是一个比较有效的手段。

利用 Lyman 连续谱光子数和激发参数 U , 可以推算恒星类型。相关的模型如下 (Matsakis et al., 1976; Mezger et al., 1974; Panagia, 1973; Rubin, 1968):

$$N_L = 4.761 \times 10^{48} \text{s}^{-1} \alpha(\nu, T_e)^{-1} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{0.1} \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2 \left(\frac{S_\nu^{\text{gas}}}{\text{Jy}} \right) \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-0.45}, \quad (4.4)$$

$$U = 2.706 \times 10^{-16} \text{pc cm}^{-2} \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{4/15} \left(\frac{N_L}{\text{s}^{-1}} \right)^{1/3}, \quad (4.5)$$

其中, $D = 10.2 \text{ kpc}$ 是 G35.58-0.03 到太阳的距离, $\alpha(\nu, T_e) \sim 1$ 。1.3 mm 连续谱流量的上限值为 $S_\nu^{\text{gas}} = 1.056 \times 55\% \text{ Jy}$ 。在光学薄和局部热动平衡的条件下, 计算所得的光子数为 $N_L = 1.0 \times 10^{49} \text{ s}^{-1}$, 激发参数为 $U = 58.0 \text{ pc cm}^{-2}$ 。由 Panagia (1973) 的工作可知, 相应的光谱类型是 O6.5 型。

4.4.3 射电复合线

观测得到的射电复合线 H30 α 和 H38 β 的线宽 ΔV 主要由压力致宽 ΔV_P , 多普勒致宽 ΔV_D 构成。多普勒致宽 ΔV_D 包括热致宽 V_{ther} , 和动力学致宽 ΔV_{dyn} 。其中热致宽主要来自于粒子的热运动, 动力学致宽主要来自于分子云的内流、外流、旋转运动。在这个工作中, H38 β ($S_{\text{H38}\beta} \approx 0.26 \text{ Jy beam}^{-1}$) 比 H30 α ($S_{\text{H30}\alpha} \approx 1.34 \text{ Jy beam}^{-1}$) 弱很多, 但是二者有相似的线宽 ($\Delta V_{\text{H30}\alpha} \approx 43.2 \text{ km s}^{-1}$ 和 $\Delta V_{\text{H38}\beta} \approx 43.2 \text{ km s}^{-1}$)。

射电复合线 H30 α 和 H38 β 的谱线的致宽机制主要由以下模型描述 (Gordon & Sorochenko, 2002; Shi et al., 2010):

$$\Delta V = \sqrt{\Delta V_P^2 + \Delta V_D^2}, \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_D &= \sqrt{\Delta V_{\text{dyn}}^2 + \Delta V_{\text{ther}}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{\text{dyn}}}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 + 0.0458 \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)} \text{ km s}^{-1}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\Delta V_P = 3.74 \times 10^{-14} n^{4.4} \text{ km s}^{-1} \left(\frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{\lambda}{\text{mm}} \right) \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-0.1}, \quad (4.8)$$

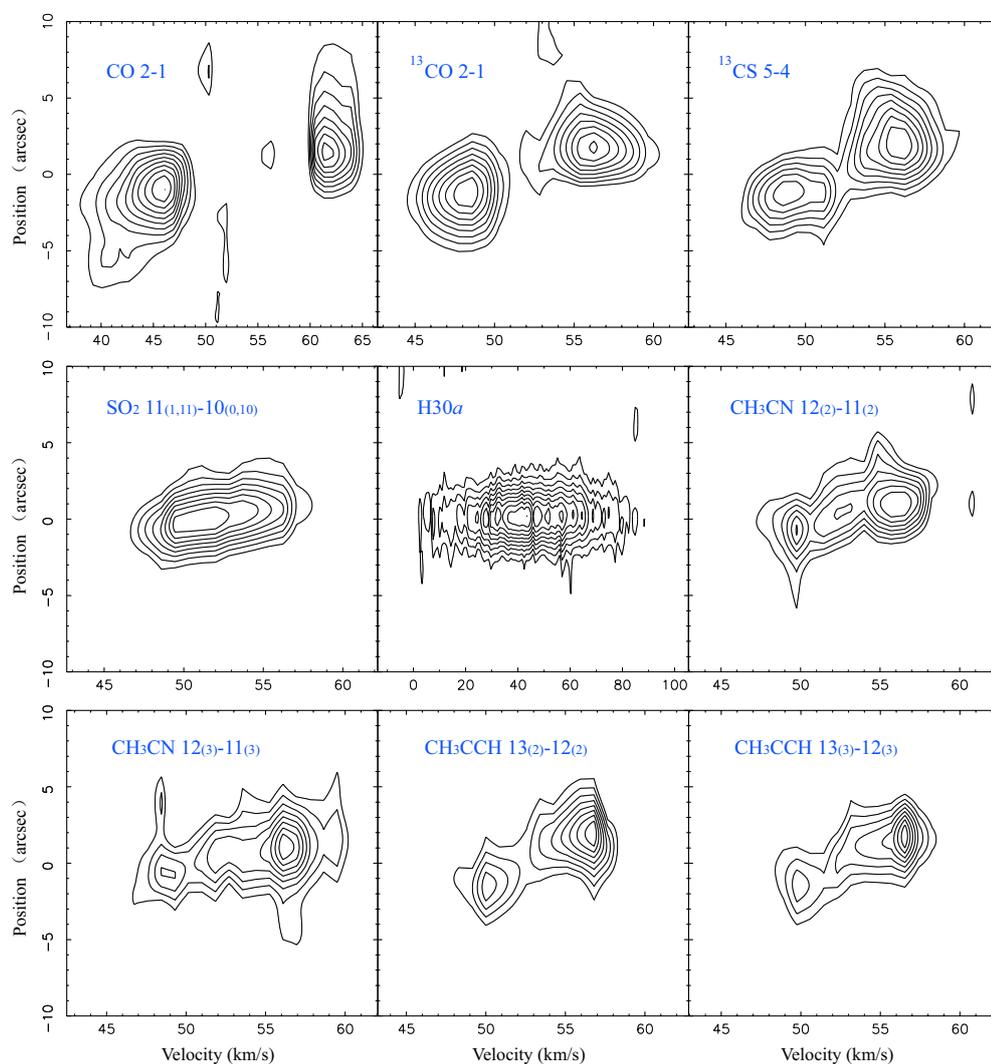


图 4.9: 沿着方位角为 90° , 过 1.3 mm 连续谱峰值处的 CO (2-1) 等谱线的位置速度图。CO (2-1) 的等值线标度分别 2.30, 4.60, 6.89, 9.19, 11.5, 13.8, 16.1, 18.4, 20.7 K; ^{13}CO (2-1) 的等值线标度分别 5.47, 8.20, 10.9, 13.7, 16.4, 19.1, 21.9, 24.6 K; ^{13}CS (5-4) 的等值线标度分别 0.616, 0.924, 1.23, 1.54, 1.85, 2.16, 2.47, 2.77 K; SO_2 11(1,11)-10(0,10) 的等值线标度分别 0.839, 1.26, 1.68, 2.10, 2.52, 2.94, 3.36, 3.78 K; $\text{H}30\alpha$ 的等值线标度分别 0.317, 0.634, 0.951, 1.27, 1.58, 1.90, 2.22, 2.54, 2.85 K; CH_3CN 12(2)-11(2) 的等值线标度分别 0.361, 0.481, 0.601, 0.721, 0.841, 0.962, 1.08 K; CH_3CN 12(3)-11(3) 的等值线标度分别 0.304, 0.456, 0.608, 0.760, 0.912, 1.06, 1.22, 1.37 K; CH_3CCH 13(2)-12(2) 的等值线标度分别 0.423, 0.635, 0.847, 1.06, 1.27, 1.48, 1.69, 1.90 K; CH_3CCH 13(3)-12(3) 的等值线标度分别 0.501, 0.751, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 K。

其中, $n = 30$ 或者 38 , 分别为 $H30\alpha$ 和 $H38\beta$ 跃迁的主量子数。对于超超致密电离氢区, 谱线致宽可以由本地电子密度 ($n_e \approx 3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) 和电子温度 ($T_e \approx 5500 \text{ K}$) 求得。在高温 $T_e = 5500 \text{ K}$ 的条件下, 热致宽大小为 $\Delta V_{ther} \sim 15.87 \text{ km s}^{-1}$ 。由于相对小的主量子数, 压力致宽贡献较小, 分别为 ($\Delta V_P(H30\alpha) = 0.02 \text{ km s}^{-1}$ 和 $\Delta V_P(H38\beta) = 0.06 \text{ km s}^{-1}$)。而动力学致宽的贡献分别是 $\Delta V_{dyn}(H30\alpha) \approx 40.14 \text{ km s}^{-1}$ 和 $\Delta V_{dyn}(H38\beta) \approx 40.16 \text{ km s}^{-1}$ 。另外, 通过速度分布图 (图 C.1) 和位置-速度图 (图 4.9), 我们发现 $H30\alpha$ 有红蓝翼的动力学特征, 其表明可能存在的内流、外流和旋转。因此射电复合线 $H30\alpha$ 既能够示踪高温环境, 又能够示踪动力学环境。

4.4.4 转动温度

假设在相同的激发温度下, 利用同一分子的多条不同转动能级的跃迁线强度可以计算转动温度 (Araya et al., 2005; Goldsmith & Langer, 1999)。 CH_3CN 和 CH_3CCH 谱线和能级参数列于表格 4.3 中。由于 CH_3CN 12(0)-11(0) 和 12(1)-11(1) 线, CH_3CCH 13(0)-12(0) 和 13(1)-12(1) 混合在一起, 无法分辨, 我们将利用其 5σ 作为误差进行拟合。通过转动温度图的方法 Qin et al. (2010), 我们获得 CH_3CN (12-11) 线的转动温度为 $\sim 143 \pm 20 \text{ K}$, CH_3CCH (13-12) 的转动温度为 $\sim 95 \pm 17 \text{ K}$, 如图 4.11。如此高的转动温度表明, CH_3CN 和 CH_3CCH 跃迁线来自于较热的气体环境。

4.4.5 运动学特征

4.4.5.1 内流

在图 4.2 中, 谱线 CO (2-1), ^{13}CO (2-1), ^{13}CS (5-4), OCS (19-18), $^{34}\text{SO}_2$ 22(2,20)-22(1,21), $^{34}\text{SO}_2$ 13(2,12)-13(1,13) 均呈现出双峰的结构, 并且蓝峰强于红峰。在某种程度上, 由于缺少短基线, 在 CO (2-1) 和 ^{13}CO (2-1) 的线心处存在着较大的流量丢失。因此, 通过谱线的红蓝翼不对称特征, 我们认为该致密核存在着内流的证据。在图 4.2 和 Figure 4.3 中, SO_2 11(1,11)-10(0,10) 和 $H30\alpha$ 的红翼相对于蓝翼均有自吸收的特征。 CO (2-1) 也有显著的蓝翼特征。在位置-速度图 4.9 中, 除了 $H30\alpha$ 线, 其他谱线都有明显的速度梯度。这些谱线的特征都说明, 围绕致密核的包层结构有着剧烈的内流活动, 这是内部原恒星核的质量增加的源泉。

高速的内流活动能够阻止电离氢区的迅速扩张。通过比较系统速度 $\sim 52.5 \text{ km s}^{-1}$ 和红移速度 $\sim 54 \text{ km s}^{-1}$ ，我们可以知道内流的速度为 $V_{\text{in}} = \sim 1.5 \text{ km s}^{-1}$ 。该红移速度来自于 CO (2-1), OCS (19-18), $^{34}\text{SO}_2$ 22(2,20)-22(1,21), 和 $^{34}\text{SO}_2$ 13(2,12)-13(1,13) 吸收坑的速度。由于 CO 线是光学厚的，而且由于在短基线丢失流量比较严重，我们将利用 1.3 mm 连续谱估算电离氢区包层的柱密度和质量。由 CH_3CN 和 CH_3CCH 的转动温度可以估计，尘埃温度的下限值约为 $\sim 95 \pm 17 \text{ K}$ 。假设尘埃颗粒半径为 $0.1 \mu\text{m}$ ，尘埃颗粒的密度为 3 g cm^{-3} ，气体尘埃的比重为 100，则氢的柱密度由以下公式得出 (Lis et al., 1991):

$$N_{\text{H}_2} = 8.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \frac{e^{h\nu/kT} - 1}{Q(\nu)\Omega} \left(\frac{S_{\nu}^{\text{dust}}}{\text{Jy}} \right) \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-3}, \quad (4.9)$$

其中， $T \sim 95 \text{ K}$ 是平均气体温度， $Q(\nu) \sim 2 \times 10^{-5}$ 是在 231 GHz 的颗粒发射参量， $S_{\nu}^{\text{dust}} = 1.056 \times 75\% \text{ Jy}$ 是 1.3 mm 峰值处热尘埃辐射流量密度， Ω 是波束立体角。最终，求得的氢柱密度为 $N_{\text{H}_2} = 1.7 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ，体密度为 $n_{\text{H}_2} = 3.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 。另外，在一个波束内的总质量可以利用 1.3 mm 连续谱流量求得，如下 (Lis et al., 1991):

$$M_{\text{H}_2} = 1.3 \times 10^4 M_{\odot} \frac{e^{h\nu/kT} - 1}{Q(\nu)} \left(\frac{S_{\nu}^{\text{dust}}}{\text{Jy}} \right) \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-3} \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2. \quad (4.10)$$

假设氢的质量比重为 $M_{\text{env}}/M_{\text{H}_2} = 1.36$ ，我们可以获得总的包层质量的上限为 $M_{\text{env}} = 538 M_{\odot}$ 。包层的下落质量可以过以下模型计算，

$$\dot{M}_{\text{in}} = 2.1 \times 10^{-11} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{V_{\text{in}}}{\text{km s}^{-1}} \right) \left(\frac{n_{\text{H}_2}}{\text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2 \left(\frac{\theta_{\text{in}}}{\text{arcsec}} \right)^2, \quad (4.11)$$

其中， $\theta_{\text{in}} = \sqrt{2''238 \times 1''285} \approx 1''696$ 定义为下落区域的半径， D 为距离， $V_{\text{in}} \sim 1.5 \text{ km s}^{-1}$ 是下落速度。则下落的速率为 $0.033 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。进一步可以知道每年的气体下落动量为 $\sim 0.050 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ 。

一般认为高效率的吸积率将是超超致密电离氢区形成大质量 OB 型星的必要条件，然而，Walmsley (1995) 认为高于临界吸积率，将会熄灭电离氢区。在此工作中，我们得到的下落率为 $0.033 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ，其可以抑制电离氢区，克服中心星的辐射压。另外，我们获得的厘米波段的氨分子线，没有吸收下落的特征。综上所述，我们认为超超致密电离氢区较内层的吸积过程可能已经停止。

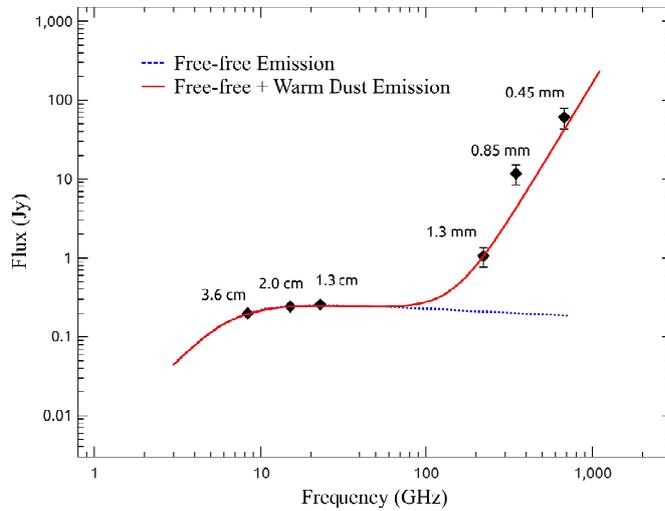


图 4.10: 超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的能谱分布,结合了 3.6 cm, 2.0 cm, 1.3 cm, 1.3 mm, 0.85 mm, 0.45 mm 的数据。它们的连续谱流量列于表 4.2 中。误差棒标记在了每个数据点上,蓝色的点线来自于自由-自由辐射成分的能谱拟合,红色的实线是自由-自由辐射和热尘埃辐射的总的拟合值。

4.4.5.2 外流

谱线 CO (2-1) 具有较宽的线翼 (~ 38 , $\sim 65 \text{ km s}^{-1}$), 如图 4.2 所示。通过位置-速度分布图 (图 4.9), 我们可以清晰地辨认致密核外围的高速气体, 然后可以利用通道图很好地展示高速气体的红蓝移成分, 如图 4.5。谱线 CO (2-1) 的高斯拟合半高全宽为 $\sim 13.53 \text{ km s}^{-1}$ 。如图 4.2、图 4.3、图 4.4, 在所有的谱线中, 线宽最窄的两条线分别是 $\text{CH}_3\text{CCH } 13(4)\text{-}12(4)$, 其半高全宽为 $\sim 3.99 \text{ km s}^{-1}$, 和 $\text{NH}_3 (3, 3)$, 其半高全宽为 $\sim 4.35 \text{ km s}^{-1}$ 。图 4.5 给出了分子 CO (2-1), $^{13}\text{CO } (2-1)$, $^{13}\text{CS } (5-4)$, $\text{SO}_2 11(1,11)\text{-}10(0,10)$ 的双极外向流积分强度分布图。利用平均速度分布图也可以清晰地看到外向流的红蓝翼成分, 如图 C.1。H30 α 射电复合线和气体的分子气体有一致的速度梯度方向, 结合图 C.1D 和图 C.1A、C.1B、C.1C, 我们认为电离气体外向流沿着分子气体外向流的同一方向正在向外抛射物质。这也是电离气体外向流驱动气体外向流的一个案例 (Klaassen et al., 2013)。如图 C.2, 在 1.3 cm 连续谱峰值处, H30 α 线具有较大的速度弥散, 这表明了外向流驱动源的速度结构。1.3 mm, 1.3 cm, 3.6 cm 连续谱与外向流的位置有着很好的相关性。水脉泽和羟基脉泽都位于连续谱峰值

附近。这表明该外向流正处于非常活跃期。在不同分子的外向流方向上，有着小的差异，如图 4.5。我们认为分子 ^{13}CS (5-4) 和 SO_2 11(1,11)-10(0,10) 外向流形态可能混入了来自内流和旋转成分的干扰。进一步来说， CO (2-1) 和 ^{13}CO (2-1) 外向流在其垂直方向的北部存在一个小的凸起的包（如图 4.5），可能也是混入了内流和旋转的成分。

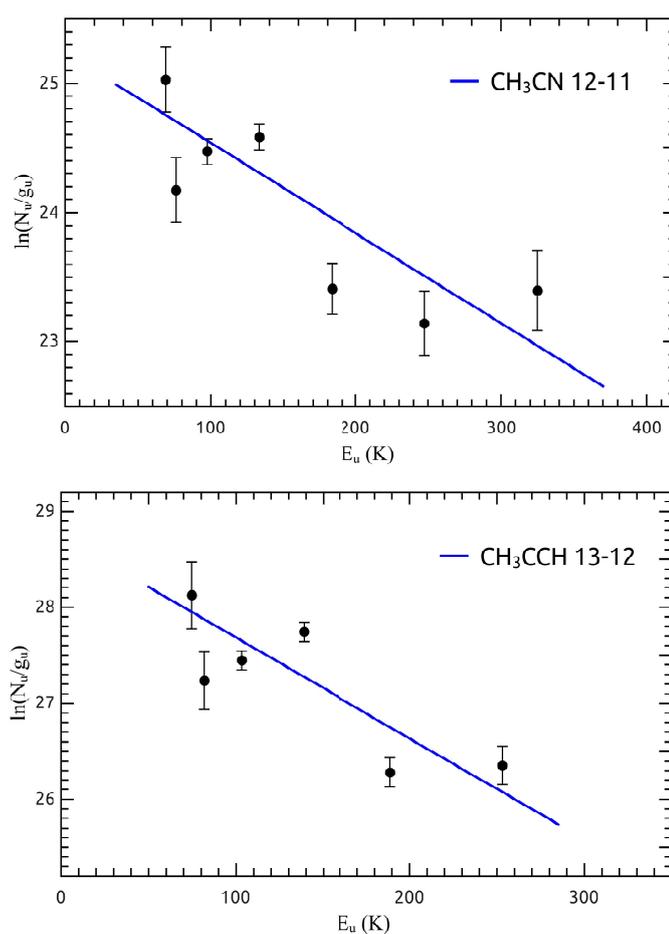


图 4.11: 分子 CH_3CN 和 CH_3CCH 的转动温度分布图。带有垂直误差棒的圆点来自观测的数据，蓝色的实线是最小平方拟合。由两种分子 CH_3CN 和 CH_3CCH 得到的转动温度分别是 $T_{\text{rot}} = 143 \pm 20$ K 和 $T_{\text{rot}} = 95 \pm 17$ K。相应的参数列于表 4.3 中。

以往的一些研究表明，示踪致密核的低速分子气体通常是光学厚的 (Goldsmith et al., 1984; Snell et al., 1984)。在局部热动平衡的条件下，我们假设谱线 ^{13}CO (2-1) 的蓝移和红移的成份都是光学薄的。同位素 ^{12}CO (2-1) 和 ^{13}CO

(2-1) 的光学厚度和主波束亮温度的比值关系可以表达为 (Myers et al., 1983):

$$\frac{T_{\text{MB}}(^{12}\text{CO})}{T_{\text{MB}}(^{13}\text{CO})} = \frac{1 - e^{-\tau^{12}}}{1 - e^{-\tau^{13}}}, \quad (4.12)$$

在此, 我们假设 $\tau^{12} = 89\tau^{13}$ (Garden et al., 1991; Lang, 1980)。另外, 激发温度 T_{ex} 由辐射转移方程可以计算:

$$\begin{cases} T_{\text{MB}} = f[J(T_{\text{ex}}) - J(T_{\text{bg}})][1 - e^{-\tau}] \\ J(T) = T_0/[e^{T_0/T} - 1] \end{cases}, \quad (4.13)$$

其中 f 是波束填充因子, $T_{\text{bg}} = 2.7 \text{ K}$ 微波背景温度, $T_0 = h\nu/k$ 对于 ^{13}CO (2-1) 的跃迁 (Wong et al., 2008)。然后, 我们利用以下模型可以计算分子 ^{13}CO (2-1) 的柱密度 $N(^{13}\text{CO})$:

$$N(^{13}\text{CO}) = 1.51 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \frac{e^{5.3/T_{\text{ex}}}}{1 - e^{-10.6/T_{\text{ex}}}} \int T_{\text{MB}} \text{d}v. \quad (4.14)$$

假设 $[\text{H}_2/^{13}\text{CO}]$ 丰度比是 8.9×10^5 (Garden et al., 1991), 则分子氢的柱密度 $N(\text{H}_2)$ 可以容易地计算出来。在一个综合波束尺寸内的气体总质量由下面的公式计算:

$$M_{\text{out}} = 4.57 \times 10^{-19} M_{\odot} \left(\frac{\theta_{\text{beam}}}{\text{arcsec}} \right)^2 \left(\frac{N(^{13}\text{CO})}{\text{cm}^{-2}} \right) \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2, \quad (4.15)$$

在此, 我们假设平均原子权重是 $\mu_g = 1.36$, 综合孔径的大小是 θ_{beam} , 距离为 $D = 10.2 \text{ kpc}$ 。则蓝移成分和红移成分的质量分别是 86 和 $70 M_{\odot}$ 。动力学时标为 $t = 3 \times 10^4 \text{ yr}$ 。总的质量损失率为 $\dot{M}_{\text{loss}} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (Goldsmith et al., 1984; Qin et al., 2008)。质量损失率 \dot{M}_{loss} 略小于质量吸积率 \dot{M}_{in} 。这表明, 中心星的包层质量仍旧在迅速地增加。

由位置-速度图 (图 4.9) 可知, 相对于系统速度 $V_{\text{sys}} \approx 52.5 \text{ km s}^{-1}$ 来说, 外向流线翼的速度为 $V_{\text{out}} \approx 10.0 \text{ km s}^{-1}$ 。基于质量损失率 $\dot{M}_{\text{loss}} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, 每年外向流气体的动量是 $\sim 0.052 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ 。该值与每年的质量吸积率 ($\sim 0.050 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$) 一致。这说明超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的动力学过程是动量守恒的, 并且外向流起着重要的转移下落物质的角动量到外层的作用, 因此中心处致密核的质量才得以保持增加。

4.4.5.3 旋转

超超致密电离氢区 G35.58-0.03 潜在的旋转轴被期望是沿着外向流的方向。如图 4.8, 沿着小范围内的 NW-SE 方向, NH_3 (2, 2) 的平均速度分布图有一个明显的速度梯度, 这就是旋转的证据。然而, NH_3 (3, 3) 没有曾显出该特征, 可能是由于数据质量的问题。利用 NH_3 的位置-速度图, 我们尽力寻找起的气体旋转证据, 但是没有找到。因此, 更高分辨率的观测可能揭秘该源的旋转运动情况。

4.4.6 氨分子吸收线

亚稳态分子 NH_3 (2, 2), (3, 3) 能级跃迁温度分别是 65 K, 125 K。它们通常能够示踪致密的气体环境 $n(\text{H}_2) \sim 10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ (Churchwell, 2002; Ho & Townes, 1983)。图 4.4 中给出了 1.3 cm 连续谱峰值处的谱线 NH_3 (2, 2), (3, 3), 其系统速度为 $V_{\text{sys}} = 52.5 \text{ km s}^{-1}$ 。图 4.6 给出了 NH_3 (2, 2), (3, 3) 的积分强度分布图, 表明在连续谱辐射源的前面存在着一个低速的 (如图 4.7) 致密结构。 NH_3 (2, 2), (3, 3) 揭示超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的动力学活性明显逊色于 G20.08-0.14N (Galván-Madrid et al., 2009), G20.08-0.14N 有着明显的吸积的运动学特征。另外, NH_3 (2, 2), (3, 3) 的精细结构的卫星线强度低于噪声水平, 以致于无法辨认出来。我们在该区域, 仅仅探测到了 NH_3 的吸收线, 没有探测到任何发射线。

4.5 小结

我们主要报道了超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的高分辨率 1.3 mm 的 SMA 观测和 1.3 cm 的 VLA 观测。结合谱线和连续谱数据, 我们对该源的动力学环境和形态学结构进行了研究, 得到的主要结果如下所述:

利用 1.3 mm 的 SMA 观测和 1.3 cm 的 VLA 观测, 我们共探测到 8 种粒子及其同位素中的 25 中不同跃迁, 其中包括: CO , CH_3CN , SO_2 , CH_3CCH , OCS , CS , H , NH_3 。我们分别对这些谱线进行了高斯拟合, 制作了 moments 0, 1, 2 图。得到的平均线心速度, 即系统速度为 $V_{\text{sys}} \approx 52.5 \text{ km s}^{-1}$ 。

G35.58-0.03 是一个超超致密电离氢区, 其电子温度为 $T_e^* = 5500 \text{ K}$, 辐射测量为 $\text{EM} \approx 1.9 \times 10^9 \text{ pc cm}^{-6}$, 电子体密度是 $n_e = 3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 射电复合线

线宽是 $\text{FWHM} \approx 43.2 \text{ km s}^{-1}$ ，致密核的本征尺度为 $\sim 3714 \text{ AU}$ 。通过 3.6 cm , 2.0 cm , 1.3 cm , 1.3 mm , 0.85 mm , 0.45 mm 的能谱拟合，我们发现， 1.3 mm 连续谱流量中的 $25\% \sim 55\%$ 来自于自由-自由辐射的贡献， $75\% \sim 45\%$ 来自于热尘埃辐射的贡献。基于 Lyman 连续谱光子数的分析，超超致密核相当于一颗 O6.5 型星。

$\text{H}30\alpha$ 、 $\text{H}38\beta$ 射电复合线有着相似的半高全宽 $\text{FWHM} \approx 43.2 \text{ km s}^{-1}$ 。该线宽大小 ΔV 主要由热电离气体的动力学或者湍动致宽 $\Delta V_{\text{dyn}} \approx 40.1 \text{ km s}^{-1}$ ，热致宽 $\Delta V_{\text{ther}} \approx 15.87 \text{ km s}^{-1}$ ，和压力致宽 $\Delta V_P \approx 0.02 \sim 0.06 \text{ km s}^{-1}$ 构成。另外， $\text{H}30\alpha$ 射电复合线可能参与了动力学活动，其谱型有着蓝移和红移的特征。因此， $\text{H}30\alpha$ 是探测电离气体驱动分子外向流的较好的探针。

致密云核的包层存在着内流和外向流的运动学证据，其中质量吸积率是 $0.033 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ，质量损失率是 $5.2 \times 10^{-3} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。高速的吸积率可能会抑制内部的电离氢区的吸积率。下落气体和向外流气体的动量是守恒的。分子 $\text{CO} (2-1)$, $^{13}\text{CO} (2-1)$, $^{13}\text{CS} (5-4)$, $\text{SO}_2 11(1,11)-10(0,10)$ 呈现出一个准直的双极分子外向流，分子 $\text{NH}_3 (2, 2)$ 速度分布图有着明显速度梯度的证据，表明潜在的旋转运动。

第五章 红外尘泡

5.1 引言

尽管目前所发现的大质量恒星的数目比较少，但是其在星际介质的物理与化学变化过程中起着关键的作用。电离氢区 (HII region)、恒星风和超新星爆发等为星际气体的演化提供了必要的动能。年轻的大质量恒星对周围的星际介质有着非常深远的影响，比如由电离氢区的膨胀所触发的恒星形成就是一个很好的模型。相关的 OB 型星一般位于电离氢区投影的内部，电离氢区主要是围绕 OB 型星的等离子体区域。来自尘泡中心处激发星 OB 型星的恒星风和电离辐射将剧烈地影响着周围的分子云，可能会触发新一代的恒星形成。射电和光学的观测已经揭示出许多这类结构和特征。这些 OB 型星一般有数百万年的年龄；相对于激发星 OB 型星来说，尘泡壳状结构处的电离氢区可能是新一代大质量恒星形成的示踪物。

在大质量恒星形成过程中，比较重要的是致密电离氢区的产生和它与周围团块的相互作用。电离氢区在膨胀过程中通过收集和挤压周围物质，于电离波前和激波波前之间形成致密壳层；该壳层因引力不稳定而碎裂形成致密团块；在满足一定密度、质量和温度等条件时，这些团块发生进一步的碎裂坍塌形成致密分子云核并最终孕育新一代恒星；这就是所谓的研究电离氢区触发周围星际介质中大质量恒星形成的收集塌缩 (collect-and-collapse) 模型 (Elmegreen & Lada, 1977)。为了验证此模型是否满足尘泡的演化过程，则需要进一步比较电离氢区的动力学年龄 (dynamical age)、尘泡的运动学时标 (kinematical time scale)、壳层中团块的碎裂时标 (fragmentation time scale) 和激发星及年轻星的年龄之间的关系。解析模型与数值模拟已经从多角度检测了收集塌缩过程，如 Whitworth et al. (1994) 的工作，它预测了裂化时标、裂化尺度、柱密度、质量和碎裂的间距。Hosokawa & Inutsuka (2006) 认为，在电离氢区触发恒星形成过程中，如果中心星质量大于 $20 M_{\odot}$ ，而周围所收集塌缩的分子壳层中的分子云气体总质量为 $10^4 - 10^5 M_{\odot}$ ，该壳层环境的数密度为 $n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$ ，则可能在壳层中触发新一代的恒星形成；他们还给出了自引力团块的质量分布情况。对于电离氢区来说，一定程度上尘埃能够吸收高能光子、释放红外辐射；虽然星

际尘埃仅仅占据总质量的 1%，但是尘埃对电离氢区的能量聚集起着重要的作用。1989 年，Wood 和 Churchwell 发现超致密电离氢区大约吸收了 42% — 99% 的电离光子 (Kurtz et al., 1994; Wood & Churchwell, 1989)。从而，此过程将抑制电离氢区的膨胀率和尺度。因此，电离氢区包层的团块密度分布起着重要的作用。

利用斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope) 开展的银道面红外巡天项目 GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire) (Benjamin et al., 2003) 和 MIPS GAL (Carey et al., 2009) 为研究电离氢区膨胀触发恒星形成提供了非常关键的数据支持。Churchwell 等人在 2006 和 2007 年利用这些红外数据编撰了 591 个具有“环状”或“轮胎状”特征的样本，即红外尘泡 (Churchwell et al., 2006, 2007)。尘泡的壳状结构在 GLIMPSE 8.0 μm 处有较强的辐射特征，这些辐射主要来自多环芳香烃 (PAHs: polycyclic aromatic hydrocarbons) 的发射线，并且示踪着光致离解区 (PDR: photo-dissociation region)。延展的 MIPS 24 μm 辐射源主要位于尘泡空腔中，这些辐射主要来自被激发星释放的 UV 光子所加热的尘埃颗粒。24 μm 的热尘埃辐射和电离氢区成协，但是通常利用射电连续谱示踪触发尘泡形成的电离氢区。

2012 年，Simpson 等人发起了名为“银河项目” (The Milky Way Project) 的由 35000 余人参与的公众科学倡议活动 (citizen science initiative)，利用 GLIMPSE 和 MIPS GAL 存档数据资料在银道面中证认出了 5106 个红外尘泡 (Simpson et al., 2012)。2012 年，Bania 等人利用 305 米的阿雷西博射电望远镜 (Arecibo Radio Telescope) 从 37 个未知电离氢区中 (其中，不乏尘泡形态特征) 观测到了射电复合线 (RRLs: radio recombination lines) (Bania et al., 2012)，这将为进一步理解尘泡的形成是否能够触发新一代的恒星形成提供更多的参考资料。这说明尘泡状的结构在银河系内是无处不在的，并且这些尘泡与星团的关系比较密切。最近，许多人都认为他们发现了尘泡触发恒星形成的迹象，他们主要利用毫米、亚毫米波数据在尘泡的壳层中寻找致密的团块或核，利用红外数据筛选与尘泡成协的年轻星 (YSOs)，并且寻找电离氢区与周围的星际介质相互作用的证据，例如尘泡 N14 (Sherman, 2012)，N22 (Ji et al., 2012; Sherman, 2012)，N49 (Deharveng et al., 2010; Watson et al., 2008; Zavagno et al., 2010)，N65 (Petriella et al., 2010)，N68 (Zhang & Wang, 2013)，N74 (Sherman, 2012)，N131 (Zhang et al., 2013)，S51 (Zhang & Wang, 2012)，CN107 (Dewangan et al., 2012) 和 CN109 (Dewangan et al., 2012) 等。

尘泡的形态结构也是最近争论的焦点。在视线方向上，我们所观测到的尘泡一般是具有二维的“轮胎状”结构。然而，由收集塌缩过程所产生的尘泡应该具有三维的球壳状结构的特征。理论上，应该呈现出具有蓝移特征的前端云和具有红移特征的后端云。因此，我们试图去寻找尘泡的前端（蓝移成分）与后端（红移成分）。然而，除了 Zhang 和 Wang 于 2012 发现的尘泡的前端云外 (Zhang & Wang, 2012)，还没有观测到同时具备明显的前后两端云的迹象。对于 Beaumont 和 Williams 于 2010 的工作，他们用 JCMT 观测了 43 个尘泡的 CO ($J = 3 - 2$) 谱线，发现这些尘泡都是环状结构，在尘泡中心没有发现红蓝移成分，并认为是因为母体分子云结构较为平坦所导致 (Beaumont & Williams, 2010)。

Watson 等人于 2008 年研究了 3 个尘泡，辨认了它们的激发星和年轻星，并从多角度发现 3 个区域可能是由尘泡触发形成的 (Watson et al., 2008)。后来，Watson 等人于 2010 年又对 46 个尘泡周围中的年轻星进行了搜索与辨别，发现仅仅 20% 的尘泡与年轻星有实质上的关系 (Watson et al., 2010)。Deharveng 等人于 2010 年利用 ATLASGAL 870 μm 的巡天数据对 102 个尘泡进行了冷尘埃环境、射电连续谱和年轻星分布的分析；他们发现 86% 的尘泡中存在电离氢区，20% 的尘泡壳层中存在大质量恒星形成的迹象 (Deharveng et al., 2010)。Thompson 等人于 2012 年对 322 个尘泡进行了统计分析，认为银河系中的大约 14% — 30% 的大质量年轻星是在尘泡的形成过程中触发的 (Thompson et al., 2012)。在 2012 年，Kendrew 等人对从“银河项目”中筛选出的 4434 个尘泡开展了一项类似的工作；他们发现尘泡随着尺度的增加，在统计上与大质量年轻星的成协性会增加；大质量年轻星和（超）致密电离氢区中的 $67\% \pm 3\%$ 看起来与红外尘泡相关；大质量年轻星中的 $22\% \pm 2\%$ 可能受到过正在膨胀的电离氢区的反馈作用 (Kendrew et al., 2012)。

5.2 尘泡的相关观测

目前，研究红外尘泡所用到的天文数据主要来自红外巡天、射电连续谱和谱线观测，其中红外巡天设备或项目主要有 GLIMPSE (Benjamin et al., 2003; Churchwell et al., 2009)、MIPSGAL (Carey et al., 2009)、2MASS (Skrutskie et al., 2006)、IRAS (Neugebauer et al., 1984)、NVSS (Condon et al.,

1998)、BGPS¹、ATLASGAL²、WISE (Mainzer et al., 2011; Wright et al., 2010)、MAGPIS³、Herschel⁴等, 射电巡天设备或项目主要有 MOPRA (Foster et al., 2011; Lo et al., 2009)、JCMT⁵、GRS (Jackson et al., 2006)、KOSMA 和 PMO⁶等。

GLIMPSE 是利用斯皮策 (Spitzer) 空间望远镜对内银河系进行的一个中红外波段的巡天项目, 主要包括斯皮策-IRAC 的 3.6、4.5、5.8 和 8.0 μm 波段的数据; IRAC 拥有较高的空间分辨率: 约在 1.5'' — 1.9'' 之间 (Fazio et al., 2004; Werner et al., 2004)。MIPSGAL 利用安装于斯皮策空间望远镜上的 MIPS (Multiband Imaging Photometer for Spitzer) 设备对几乎相同的天区进行了 24 μm 和 70 μm 巡天。同时, 这 4 个波段的 GLIMPSE 点源源表 (GPSC) 是筛选尘泡周围年轻星的主要样本。2MASS (Two Micron All Sky Survey) 在 J 、 H 、 K_s 波段对全天进行了近红外巡测, 产生的点源表是进行年轻星证认的重要数据来源。利用工作在 12、25、60 和 100 μm 的 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) 获取的远红外点源表是分析红外尘泡周围恒星形成活动的另一关键样本。由 NRAO VLA 望远镜观测获得的 1.4 GHz 连续谱巡天数据 (NVSS) 将被用来示踪与尘泡相关的背景源的连续谱环境, NVSS 巡天数据的噪声水平约为 0.45 mJy beam⁻¹。BGPS (The Bolocam Galactic Plane Survey) 是在 1.1 mm 波段对银道面 (特别是北半球) 进行了无偏的系统的连续谱巡天项目, 观测区域约 170 平方度。ATLASGAL (The APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy) 利用 APEX 望远镜在 870 μm 波段对内银河系进行了 400 多平方度的连续谱巡天项目。WISE 在 3.4、4.6、12 和 22 μm 波段对全天开展了高灵敏度的中红外巡测, 产生了高质量的图像和测光数据且都已公开, 是开展尘泡与恒星形成研究的重要数据来源; MAGPIS 利用 VLA 在 20 cm 做了银道面巡天, 其公开释放的数据是研究电离气体性质的重要资料 (如, Deharveng 等人于 2010 年便使用了大量的 MAGPIS 数据 (Deharveng et al., 2010))。工作在远红外和亚毫米波的赫歇尔空间天文台 (Herschel Space Observatory) 可以有效探测冷尘该, 揭示尘泡周围的致密核等, 是开展有关研究的利器 (如, Anderson 等人于 2012 年

¹<http://milkyway.colorado.edu/bgps/>

²<http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/div/atlasgal/>

³<http://third.ucllnl.org/gps/>

⁴<http://herschel.esac.esa.int/>

⁵<http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/archive/>

⁶<http://www.radioast.csdb.cn/>

(Anderson et al., 2012) 和 Zavagno 等人于 2010 年 (Zavagno et al., 2010) 使用赫歇尔望远镜开展的尘泡相关研究工作)。

澳大利亚 MOPRA 22 米的射电望远镜在 110 GHz 附近拥有约 33" 的空间分辨率, 观测 ^{13}CO ($J = 1 - 0$) 和 C^{18}O ($J = 1 - 0$) 分子谱线的速度分辨率约为 0.17 km s^{-1} ; MOPRA 在 90 GHz 附近的空间分辨率约为 38", 而速度分辨率约为 0.16 km s^{-1} , 可以同时观测到 8 GHz 带宽的 16 条谱线。位于夏威夷的 15 米 JCMT 射电望远镜在 330 GHz 的 ^{13}CO ($J = 3 - 2$) 跃迁频率附近拥有 14" 的空间分辨率, 相对应的速度分辨率为 0.055 km s^{-1} 。Beaumont 和 Williams 于 2010 年利用 JCMT 射电望远镜观测了 46 个尘泡样本, 并且公开了这些数据 (Beaumont & Williams, 2010)。五大学天文台 (FCRAO) 的 14 米口径射电望远镜在 ^{13}CO ($J = 1 - 0$) 跃迁频率附近拥有约 46" 的空间分辨率, 而速度分辨率约为 0.25 km s^{-1} 。五大学天文台在 ^{13}CO ($J = 1 - 0$) 的巡天数据观测范围比较广 (约 $18^\circ \leq \text{银经} \leq 56^\circ$, $-1^\circ \leq \text{银纬} \leq 1^\circ$), 是做尘泡分析和统计工作的主要样本数据⁷。紫金山天文台德令哈观测站的 13.7 米口径的毫米波望远镜 (PMO) 拥有 9 个波束的接收系统; 它可以对 ^{12}CO ($J = 1 - 0$)、 ^{13}CO ($J = 1 - 0$) 和 C^{18}O ($J = 1 - 0$) 三条分子谱线进行同时观测; 观测这些分子谱线的空间分辨率是 $52'' \pm 3''$, 速度分辨率为 0.16 km s^{-1} 。拥有 3 米口径的 KOSMA 射电望远镜⁸可以同时观测到 230 与 345 GHz 附近的分子谱线, Ji 等人已经利用该望远镜对尘泡 N22 进行了 CO ($J = 3 - 2$ 、 $J = 2 - 1$) 分子的观测研究 (Ji et al., 2012)。这些分子谱线数据主要示踪尘泡周围壳状结构中的分子团块、甚至致密核部位, 这些分子谱线探针拥有着不同的物理特征, 可以示踪不同的密度、温度和光深等物理环境, 它们将为分子气体团块的物理结构、环境等性质的研究提供必要的分析依据。

5.3 有关尘泡的研究方法与研究进展

5.3.1 尘泡的形态学模型

从目前的多波段观测情况看, 尘泡的形态学结构大多呈现出不规则甚至破裂的“环状”或者“轮胎状”的特征。电离氢区的演化模型可以很好地解释尘泡的“壳状”形态结构 (Dyson & Williams, 1997)。在图 5.1 中, Deharveng 等人

⁷<http://www.bu.edu/galacticring/>

⁸该望远镜已经移址到西藏羊八井, 并更名为 CCOSMA

于 2010 年给出了尘泡的形态学模型与结构图 (Deharveng et al., 2010), 主要由如下两个阶段构成 (Dyson & Williams, 1997):

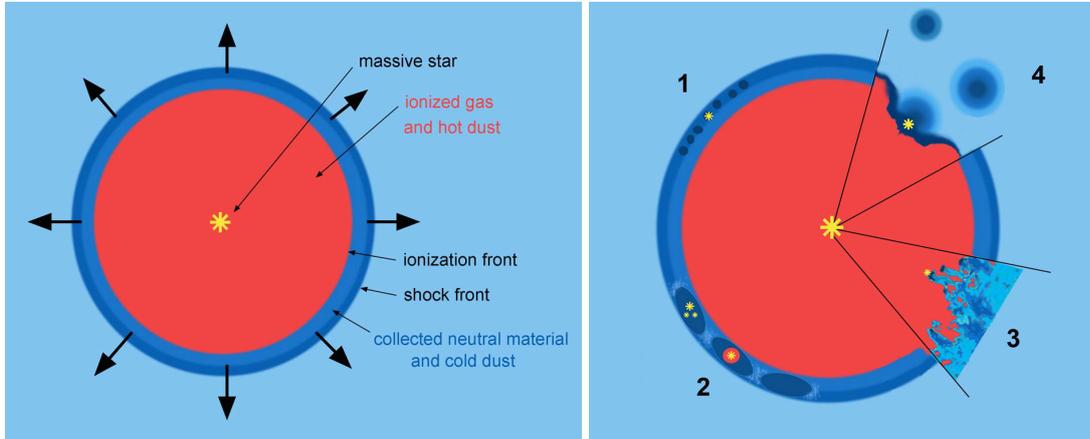


图 5.1: 电离氢区各向同性地向星际介质膨胀的“球状”模型。电离区（红色区域）被致密的中性“壳状”物质包围，该包层物质是电离区在向外膨胀并收集周围中性介质。右图：“球状”电离氢区与周围的“壳状”中性物质的相互作用图。数字 1 到 4 代表了触发恒星形成的不同过程，其中数字 1 表示小尺度的引力不稳定性；数字 2 表示大尺度的引力不稳定性，可能导致大质量的恒星形成；数字 3 表示作用在湍流介质中的电离辐射；数字 4 表示由辐射驱动，对已存在的致密团块的压缩。以上两幅图片出自于 Deharveng 等人在 2010 年的研究工作 (Deharveng et al., 2010)。

(1)、斯特隆根球 (Strömgen Sphere) 的产生。年轻的 OB 型星周围存在的电离氢区，是丹麦天文学家斯特龙根提出的。年轻的高温恒星发出的紫外线会将周围中性氢电离，在离恒星越远的地方，辐射强度越小，电离度也就越小。在距中心恒星某一距离处，辐射已不能使中性氢发生电离，形成电离氢区的边界，边界以内的区域称为斯特龙根球，边界到中心的距离称为斯特龙根半径。斯特龙根半径的大小与莱曼光子率和周围中性气体的数密度有关。观测上表明该阶段的形成时标较短，中心星可能是 O 型或早型的 B 型大质量星，也可能是由成团的恒星组成。

(2)、电离氢区的膨胀过程。由于斯特隆根球的内部相对于外部有温度较高的热电离气体（约 10^4 K）和较强的辐射压，则电离氢区的半径将会超声速地向外膨胀。在迅速地膨胀过程中，电离波前与激波波前将在中性的壳层结构附近形成。当电离气体的辐射压与周围的中性尘埃气体产生的阻力相互平衡时，电离氢区将停止膨胀。

在电离氢区的膨胀过程中，中性介质被收集和压缩到一起，形成一致密的壳层结构。随着时间的演化，该壳层的质量不断增加到几千个太阳质量，这就是新一代恒星形成的诞生地 (Hosokawa & Inutsuka, 2006)。在围绕着的电离氢区所形成的壳层中，小尺度的引力不稳定（如金斯不稳定性）将导致小质量的恒星形成，而大尺度的引力塌缩可能将形成大质量的恒星（如图 5.1）。Zavagno 等人于 2006 年与 Deharveng 等人于 2009 年分别对电离氢区 RCW 79 (Zavagno et al., 2006) 和 RCW 120 (Deharveng et al., 2009) 进行了研究，该工作详尽地解释了膨胀的电离氢区触发恒星形成的过程。然而该模型忽略了几点考虑，比如：电离氢区周围的星际介质是不均匀分布的，这将使得尘泡的壳层结构不是完美的“球壳状”结构；磁场的存在同样将会抑制收集塌缩过程，甚至减少恒星形成的效率 (Krumholz et al., 2007)；少量的大质量星所产生的辐射压可能不足以触发周围的壳层结构和恒星形成 (Krumholz & Matzner, 2009)。

5.3.2 尘泡的多波段观测特征

5.3.2.1 尘泡的红外观测

红外波段的 GLIMPSE、MIPSGAL 和 2MASS 巡天数据主要被用来分析红外尘泡周围的年轻星和暖的尘埃气体的分布。基于对 15 个红外尘泡的 $24\ \mu\text{m}$ 和 $70\ \mu\text{m}$ 波段的发射观测，Watson 等人于 2010 年发现位于光致离解区内部（即壳层环内）尘埃的平均温度的分布范围是 49 K — 113 K，平均温度是 80 K (Watson et al., 2010)。

Zhang 和 Wang 于 2012 和 2013 年 (Zhang & Wang, 2012, 2013)、Petriella 等人于 2010 年 (Petriella et al., 2010)、Paron 等人于 2011 年 (Paron et al., 2011) 等的研究工作已经给出了一些尘泡的红外辐射三色叠图，如图 5.2 是红外尘泡 S51 的三色叠图 (Zhang & Wang, 2012)。 $8\ \mu\text{m}$ （绿色图）光致离解区（PDR）的辐射主要来自多环芳香烃（PAH）的发射，其轮廓勾画出了尘泡的壳状结构。在尘泡内部，较热的尘埃和电离气体已经破坏了多环芳香烃的成分；在光致离解区，多环芳香烃辐射的激发主要来自电离氢区释放的能量 (Petriella et al., 2010; Pomarès et al., 2009)。 $24\ \mu\text{m}$ （红色图）的辐射主要出现在尘泡的内部，它主要与热的尘埃辐射相关。 $3.6\ \mu\text{m}$ （红色图）的辐射主要示踪年轻星、激发星、以及与尘泡无关的场星（field star）位置。 $870\ \mu\text{m}$ 的辐射也与红外尘泡的壳层结构有较好的相关性，可以有效示踪致密核（如图 5.3）。

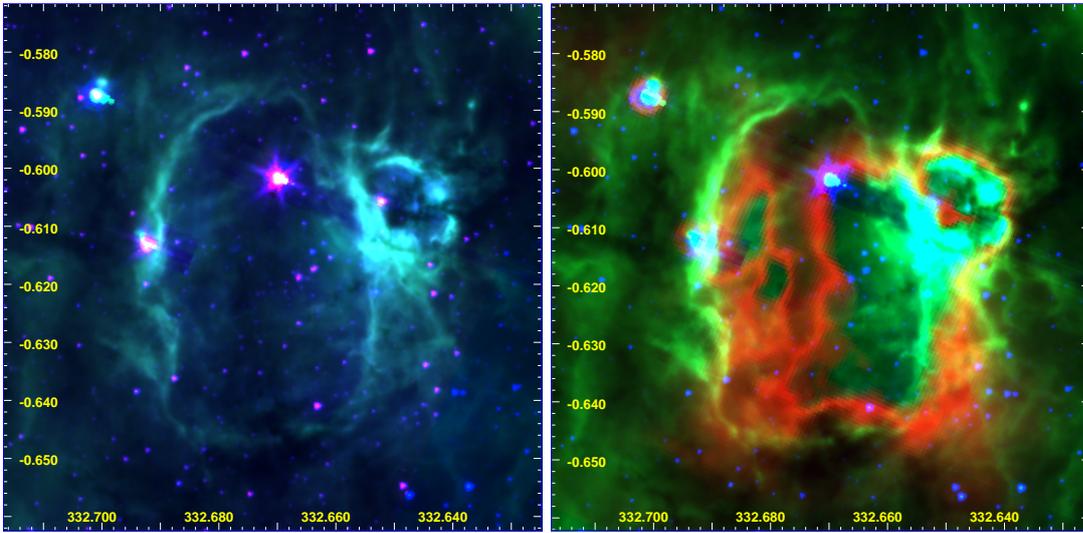


图 5.2: 红外尘泡 S51 的中红外辐射的三色叠图。左图: 斯皮策-IRAC 的三色叠图, 其中红色为 $3.6 \mu\text{m}$ 的辐射, 蓝色为 $4.5 \mu\text{m}$ 的辐射, 绿色为 $8.0 \mu\text{m}$ 的辐射; 右图: 斯皮策-IRAC 与斯皮策-MIPS 的三色叠图, 其中蓝色为 $4.5 \mu\text{m}$ 的辐射, 绿色为 $8.0 \mu\text{m}$ 的辐射, 红色为 $24 \mu\text{m}$ 的辐射, 而 $24 \mu\text{m}$ 的辐射在图像中心处是过饱和的。以上两幅图片出自于 Zhang 和 Wang 在 2012 年的研究工作 (Zhang & Wang, 2012)。

大多数红外尘泡的结构表现出不规则的形态, 甚至尘泡的壳层出现了破碎的情况, 表现为半弧状壳层结构包围着尘埃和电离气体的形态。这说明, 来自尘泡内部的 UV 辐射压比较强, 使得电离氢区的辐射冲破了壳层结构的束缚。尘泡的红外观测图像清晰地描绘了红外尘泡的这些形态学结构和物理特征。 $[5.8]/[4.5]$ 和 $[8.0]/[4.5]$ 强度比也可以很好地示踪多环芳香烃辐射轮廓分布 (Churchwell, 2008; Povich et al., 2007)。从不同波段的红外数据所示踪的不同成分 (温度、密度等) 上看, 电离氢区的膨胀触发恒星形成的模型可以解释红外观测数据的物理形态结构。比如, 红外数据可以很好地示踪 EGO (extended green object) 源和红外暗云源。EGO 是一类具有明显激波特征的天体, 可能与外向流活动有关。红外暗云是致密的冷云 (含尘埃) 吸收了背景红外辐射而出现的一种现象, 是一类尚处于大质量恒星形成早期阶段的天体。这种与早期恒星形成密切相关的天体已经在尘泡的壳状结构附近发现, 如红外尘泡 N22 (Ji et al., 2012)、N36 (Deharveng et al., 2010)、N68 (Zhang & Wang, 2013)。可以推断, 这些恒星形成区可能是由于电离氢区的膨胀触发形成的, 不过此方面的统计工作还不够充分。

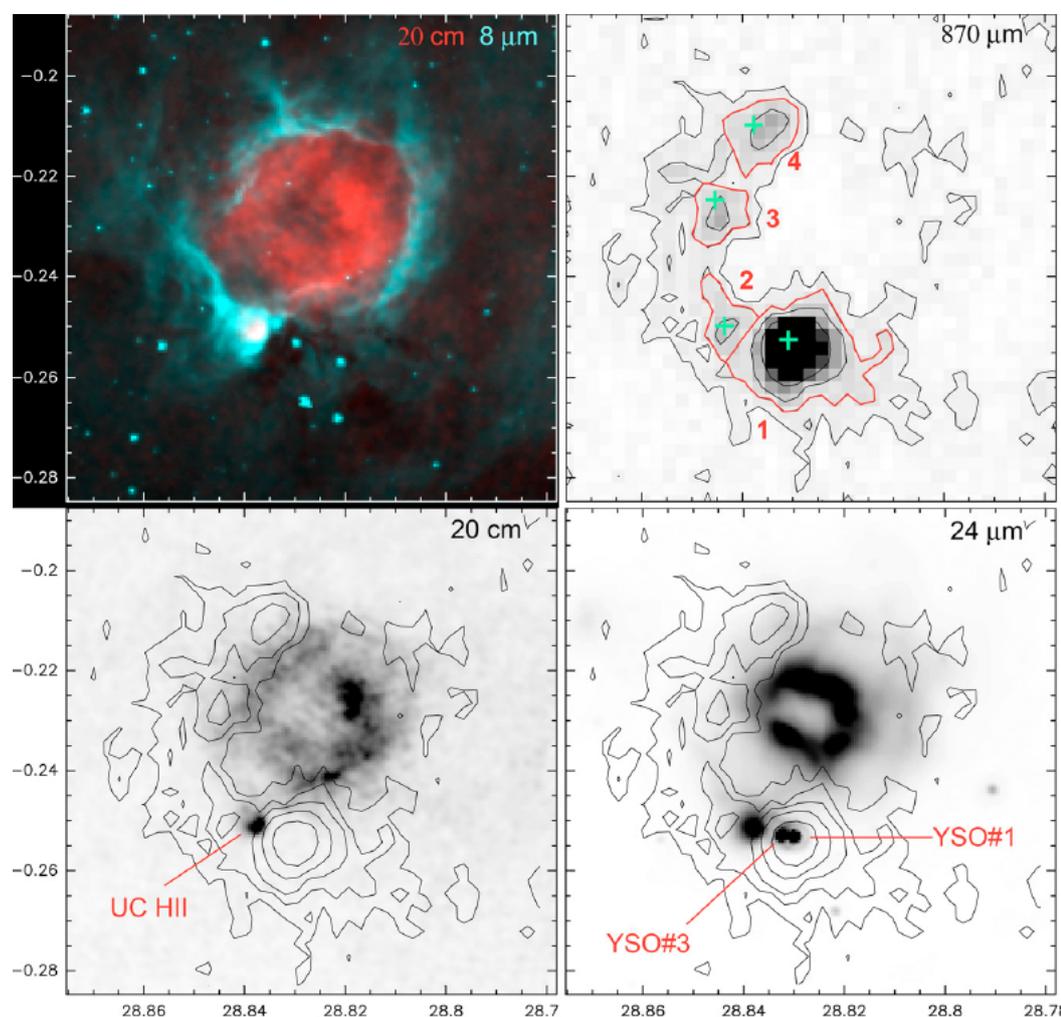


图 5.3: 尘泡 N49 的多波段轮廓和等值图。其中左上角为斯皮策-GLIMPSE $8\ \mu\text{m}$ (蓝绿色) 辐射与 $20\ \text{cm}$ (红色) 的叠图。其它三幅图中的等值图表示 $870\ \mu\text{m}$ 的辐射, 灰度图分别表示 $870\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \text{cm}$ 和 $24\ \mu\text{m}$ 的辐射。绿色十字标出了 NH_3 的位置, 同时年轻星与致密电离氢区也被标出。以上图片出自于 Deharveng 等人在 2010 年的研究工作 (Deharveng et al., 2010)。

5.3.2.2 尘泡的射电谱线观测

射电谱线观测数据主要用来示踪分子气体的辐射, 比如不同跃迁能级的 CO 、 HCO^+ 和 HCN 分子及其同位素分子等。利用分子谱线信息, 可以很好地研究尘泡的距离、温度、密度和质量等相关物理环境信息。并且可以进一步寻找与尘泡相关的恒星形成区, 甚至是正在演化的大质量年轻星。

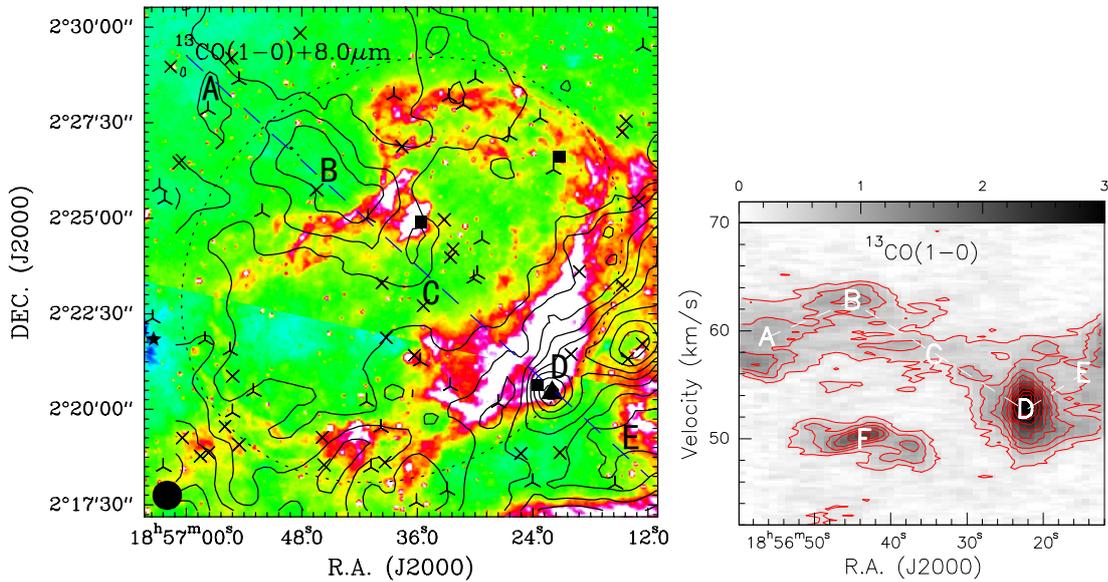


图 5.4: 左图: 红外尘泡 N68 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ (等值图) 与斯皮策 $8.0\ \mu\text{m}$ (背景灰度图) 辐射强度分布图。符号“×”和倒的“Y”状分别表示 Class I 和 II 类型的星。三角形、四边形和五角星符号分别标出了致密电离氢区、红外源和 EGO 源的位置。虚线形状的椭圆标出了尘泡 N68 的位置。左下角的小圆表示等值图的空间分辨率的大小。右图: 沿着左图中长虚线处的位置-速度图 (Position-Velocity)。该图片出自于 Zhang 和 Wang 在 2013 年的研究工作 (Zhang & Wang, 2013)。

(1)、分析分子谱线的速度成分, 挑选出与尘泡相关的成分。由于银河系的棒旋结构多条旋臂的存在, 导致在观测某些天区时, 在视线方向上有多种复杂的谱线速度成分存在。而且由于湍流运动、旋转等活动的存在, 对谱线的轮廓分析带来一定的困难。一般来说, 射电谱线观测的分子气体发射强度图与尘泡 $8\ \mu\text{m}$ 的壳状分布有很好的相关性 (Zhang & Wang, 2012, 2013; Zhang et al., 2013)。因此, 我们可以利用此关系从多种速度成分中挑选出与尘泡相关的成分。另外, 考虑到尘泡可能是球壳状结构的, 尘泡可能存在着前端和后端成分, 因此在利用此关系挑选相关成分时要非常谨慎地排查不同的速度成分。

(2)、尘泡壳层的速度结构。利用位置-速度图可以很好地展示出尘泡的壳层环境的速度结构分布图。如图 5.4 中的右图, 从 A 到 E 处有明显的速度梯度变化, 并且壳层上的 B 处和 D 处的速度弥散大于壳层之外的速度。这说明壳层上面可能有剧烈的湍流活动。还可以看出, 壳层之外的速度 (即系统速度)

分布范围表现在点 A、C 和 E 处，并且这三点的速度值有很小的差异，分布在 $\sim 58 \pm 1 \text{ km s}^{-1}$ 附近，可能这主要是由于距离的远近和湍动造成的。而蓝峰出现在壳层上的 B 处 ($\sim 63 \text{ km s}^{-1}$)，红峰出现在壳层上的 D 处 ($\sim 53 \text{ km s}^{-1}$)。因此该尘泡可能正在视向方向上以 $\sim 5 \text{ km s}^{-1}$ 的速度向外膨胀。

(3)、计算运动学距离。利用银河系旋转曲线的模型 (Fich et al., 1989) ($R_{\odot} = 8.5 \text{ kpc}$ 和 $\Theta_{\odot} = 220 \text{ km s}^{-1}$)，并利用挑选出的与尘泡相关的速度成分，估算出尘泡的运动学距离。在银道坐标的第一、四象限存在着距离模糊现象。由于在远的运动学距离处，望远镜所收集到的红外辐射理论上比较弱。所以就目前观测到的红外尘泡来说，它们普遍分布在近的运动学位置处。例如，Churchwell 等人于 2006 年的统计工作发现，在距离太阳为 4.2 kpc 处，红外尘泡的探测率最高 (Churchwell et al., 2006)。

(4)、分析尘泡的形态学结构。一般来说，在形态学结构上，尘泡在射电观测与红外观测有较好的相关性。如图 5.4、5.5 和 5.6，尘泡的壳状结构上有较强的射电辐射，而在内部形成了一个射电空腔的结构。因此，可以利用射电数据进一步计算尘泡的内外环半径，从而确定电离氢区的半径参数。尘泡的形态学结构多种多样，比如有多个尘泡壳状环交错分布在一起，相互作用 (Sherman, 2012)；丝状或者纤维状的分子云交织在尘泡环周围。这些形态学上的物理现象和特征，可能是由于电离氢区的膨胀与周围的星际介质相互作用而成的。如图 5.6，射电观测数据显示，在尘泡 N131 的东部和西部出现了两条准直细长的分子云，这可能是由于尘泡的膨胀而与周围的分子云团块相互作用而触发形成的 (Zhang et al., 2013)。而且射电干涉阵的研究发现壳层中的分子云团块的碎裂程度比附近分子云中的更强，这也是存在相互作用的证据，如 Sherman 等人于 2012 年的研究工作 (Sherman, 2012)。

(5)、寻找可能的恒星形成区。分子谱线在示踪恒星形成区时，起着重要的作用。对比光学薄与光学厚的分子谱线轮廓 (CO 、 HCO^+ 等分子)，确定光学厚的谱线是否存在自吸收、红蓝峰不对称、线翼加宽等特征，从而寻找尘泡的壳状结构上是否存在与恒星形成相关的塌缩和吸积、外向流和内向流的物理现象。一些分子 (NH_3) 是天然的温度探针，利用这些分子谱线可以很好地示踪尘泡环境中的温度值；一些分子 (HCN 、 HCO^+ 等) 可以很好地示踪致密核，这些致密核是较好的恒星形成区的候选体。射电谱线的强度分布图与致密电离氢区也有较强的相关性。研究发现，尘泡周围确实存在着致密核、致密

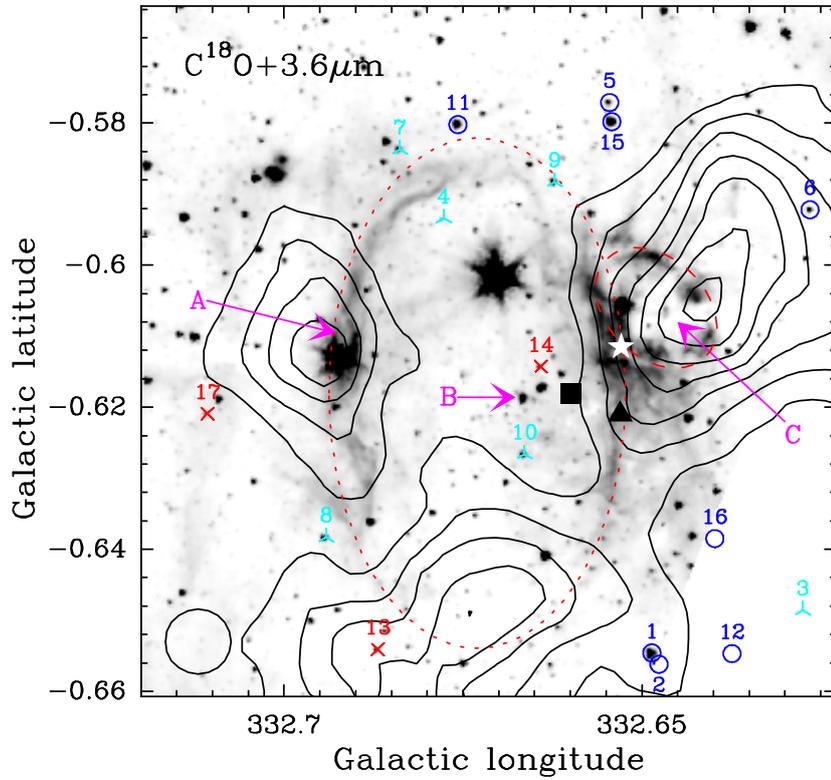


图 5.5: 红外尘泡 S51 $C^{18}O$ ($J = 1 - 0$) (等值图) 与斯皮策 $3.6 \mu m$ (背景灰度图) 辐射强度分布图。符号 “x”、倒的 “Y” 状、“O” 分别表示 Class I、II 和 III 类型的星。两个虚线形状的椭圆标出了尘泡 S51 和其附近新发现的小尘泡的位置 (G332.646-0.606)。左下角的小圆表示等值图的空间分辨率的大小。该图片出自于 Zhang 和 Wang 在 2012 年的研究工作 (Zhang & Wang, 2012)。

电离氢区、脉泽源、IRAS 源等较明显的恒星形成的现象 (Zhang & Wang, 2012, 2013; Zhang et al., 2013)。例如，尘泡 N36 附近存在着红外暗云 (IRDC: infrared dark cloud) (Deharveng et al., 2010)，而红外暗云示踪最年轻的恒星形成区；尘泡 N65 的壳状环境的致密团块中栖息着 EGO 源 G35.05+0.35 (Petriella et al., 2010)。这很可能说明，尘泡的形成可以触发新一代的恒星形成。但是，这些恒星形成区也有可能是在尘泡出现之前形成。因此，下一步，我们需要比较电离氢区的膨胀年龄、团块坍缩年龄与年轻星年龄的关系。

5.3.2.3 尘泡的连续谱观测

分析尘泡的连续谱观测数据可以研究尘泡的致密核分布情况，如利用 1.1

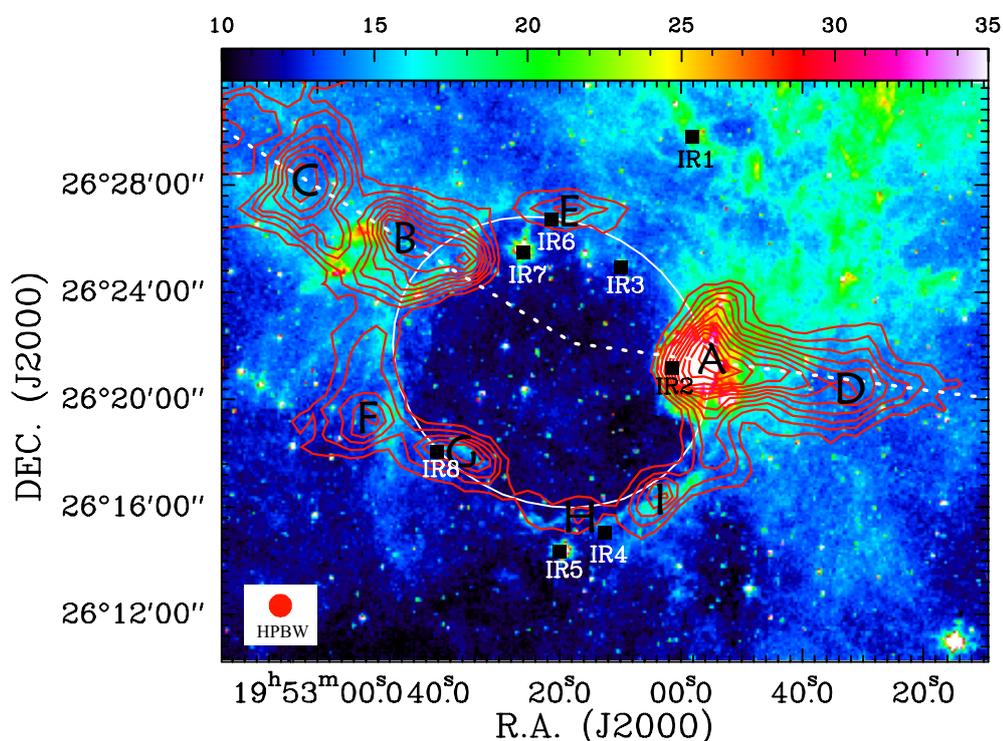


图 5.6: 红外尘泡 N131 ^{12}CO ($J = 1 - 0$) (等值图) 与斯皮策 $8.0\ \mu\text{m}$ (背景彩图) 辐射强度分布图。其中字母 A 到 I 标出了辨认的 9 个 CO 团块的分布, IR1 到 IR8 标出了尘泡附近的 8 个红外点源 (IRAS) 的位置。HPBW 给出了等值图的空间分辨率。该图片出自于 Zhang 等人在 2013 年的研究工作 (Zhang et al., 2013)。

mm 的毫米波连续谱 BGPS 的巡天数据和 $870\ \mu\text{m}$ 的亚毫米波连续谱 ATLASGAL 的巡天数据; 可以研究电离氢区的年龄, 如利用 1.4 GHz NVSS 巡天数据; 结合连续谱数据与红外数据还可以研究点源的能谱分布情况。下面将着重介绍利用 1.4 GHz NVSS 巡天数据研究电离氢区的壳层结构与年龄等特征。

在图 5.3 中, 20 cm 的连续谱发射来自 1.4 GHz NVSS 巡天数据, 它主要示踪电离氢的分布。观测研究表明, $24\ \mu\text{m}$ 的红外辐射与 20 cm 的连续谱发射有极其相似的轮廓分布图 (contour), 主要充满地分布在 $8\ \mu\text{m}$ 辐射的壳层环内部 (Deharveng et al., 2010)。而在有些尘泡的壳层环外部也有连续谱的分布, 这可能说明内部的辐射压较强, 连续谱辐射已经冲破了壳状环的束缚, 并且电离了壳状环外部的中性气体。然而, 致密电离氢区的形状奇异, 同样也有可能触发形成这类泡状结构特征的天体。另外, 观测发现一些尘泡在壳层环内部的连续谱发射处存在着空洞, 这表明壳层环内部物质的辐射已经变弱, 或者已经被中

心大质量恒星的星风吹散，如图 5.6 中的尘泡 N131 (Zhang et al., 2013)。

Mezger et al. (1974) 提出了一个通过连续谱流量强度估算莱曼关系数目的关系式 (Mezger et al., 1974):

$$\left[\frac{N_{\text{Lyc}}}{\text{s}^{-1}} \right] = 4.761 \times 10^{48} \cdot a(\nu, T_e)^{-1} \cdot \left[\frac{\nu}{\text{GHz}} \right]^{0.1} \cdot \left[\frac{T_e}{\text{K}} \right]^{-0.45} \cdot \left[\frac{S_\nu}{\text{Jy}} \right] \cdot \left[\frac{D}{\text{kpc}} \right]^2 \quad (5.1)$$

利用 20 cm 的连续谱发射数据，可以估算尘泡壳层内部激发星释放的莱曼光子数目，并且进一步估算与之等效的恒星类型。莱曼连续谱光子数和与之等效的激发星类型的关系可以在 Panagia 于 1973 年的工作中找到 (Panagia, 1973)。2010 年，Beaumont 和 Williams 发现这种方法计算出来的莱曼连续谱光子数大约低估了一半，因此计算莱曼光子数时需要增加 1 倍 (Beaumont & Williams, 2010)。多数情况下，通过这种方法得到的等效的早型 O 型星多于一颗的，甚至十几颗 (Beaumont & Williams, 2010)。这说明尘泡壳层内部的激发星可能是成团存在的。而一些情况下，所找到的激发星不足一颗 O 型星，这可能是由于尘泡壳层内部的尘埃和电离气体已经被蒸发或吹散，尘泡活动已经处于它的晚期阶段，不再继续向外膨胀。

为了获得电离氢区的年龄，我们需要利用 Dyson 和 Williams 于 1980 年的模型 (Dyson & Williams, 1980) 进行计算，公式如下：

$$t(R) = \frac{4 R_s}{7 c_s} \left[\left(\frac{R}{R_s} \right)^{7/4} - 1 \right] \quad (5.2)$$

公式中， $C_s = 10 \text{ km s}^{-1}$ 在电离气体的声速， $R_s = (3N_{\text{Lyc}}/4\pi n_0^2 \alpha_B)^{1/3}$ 是斯特龙根球的半径， N_{Lyc} 是公式 (5.1) 中得到的每秒钟辐射的莱曼光子数， n_0 是膨胀前母体分子云的初始密度， α_B 是各激发态中氢复合线的相关系数。对于壳层中团块的成团时标，我们可以利用 Whitworth 等人于 1994 年的理论模型公式 (Whitworth et al., 1994):

$$t_{\text{fragment}} = 1.56 \left(\frac{\alpha_s}{0.2} \right)^{7/11} \left(\frac{N_{\text{Lyc}}}{10^{49}} \right)^{-1/11} \left(\frac{n_0}{10^3} \right)^{-5/11} [\text{Myr}] \quad (5.3)$$

其中， α_s 是中性气体的等温声速，其他参数与公式 (5.2) 中的相同。通过莱曼连续谱流量估计年龄公式，估算团块成团塌缩的时标公式，与壳层中的年轻星年龄进行比较，可以很好地给出尘泡触发恒星形成的这一系列过程的时间序列。从目前的研究工作中看，一般团块的成团时标要大于电离氢区的膨胀年

龄，这说明团块在电离氢区对其作用之前已经存在。也有碎裂时标小于电离氢区的膨胀年龄的，如 Dirienzo 等人于 2012 年的工作 (Dirienzo et al., 2012)。然而，由于理论模型仍然存在着一定的缺陷、距离尺度不够精确、观测误差比较大，所以目前的研究结果仍然有待改善，但也不能完全否认尘泡膨胀触发恒星形成的相关模型。因此，对于更多尘泡样本的研究是很有必要的。

5.3.3 激发星与年轻星

2006、2007年，Churchwell 等人所编撰的 591 个红外尘泡主要是在电离氢区的膨胀、触发周围星际物质过程中形成的，个别几个尘泡是在超新星爆炸并触发周围星际介质中形成的 (Churchwell et al., 2006, 2007)。尘泡的主要形成机制还包括来自与大质量星的星风，到底是哪种机制占主导到现在并不清楚。因此，研究尘泡形成的激发天体是一个非常重要的研究课题。在本文工作中，我们主要考虑的是电离氢区膨胀触发尘泡形成，寻找激发星是研究尘泡主要问题。一般认为，尘泡的激发星属于大质量的 O 型或者早型的 B 型星。

对红外数据进行测光分析，是研究尘泡周围年轻星与激发星的必要手段。如图 5.7，利用 Allen 等人于 2004 年的 GLIMPSE 的双色图 (color-color) 方法 ([5.8]-[8.0] vs. [3.6]-[4.5]) 可以筛选出 Class I、Class II 和 Class III 阶段的源 (Allen et al., 2004)。其中，Class I 源主要是带有下落包层的原恒星，幂律谱为平谱；Class II 源主要是带有盘状结构的主序前星；Class III 源主要是以接近零龄主序为主的主序前星和不相关的场星 (Bachiller, 1996; Greene et al., 1994; Lada, 1987)。然而该方法没有考虑各类污染源的干扰，不能可靠地筛选出各类初始恒星体。另外，结合 2MASS 的 ($H - K$) vs. ($J - H$) 双色图模型，根据候选源在不同区域的分布，可以进一步筛选原恒星、年轻星、主序前星以及场星。并且，计算候选源的消光和距离等参数 (Bessell & Brett, 1988; Rieke & Lebofsky, 1985)。根据上述两种方法对筛选出来的年轻星和激发星，并且对各类天体的距离进行判断，选择与红外尘泡相关的候选体。然而值得注意的是，这些候选体在尘泡周围的分布，仅仅是概率上的一种统计方法，很可能这些筛选出来的候选体是与尘泡无关的场星。

筛选激发星的方法有许多种，大多数是利用红外数据进行筛选，这里我们仅仅介绍一种常用但粗略的方法 (Zhang et al., 2013)。首先是利用 Allen 等人于 2004 年 GLIMPSE 双色图 ([3.6]-[4.5] vs. [5.8]-[8.0]) 筛选出 Class III 星 (Allen

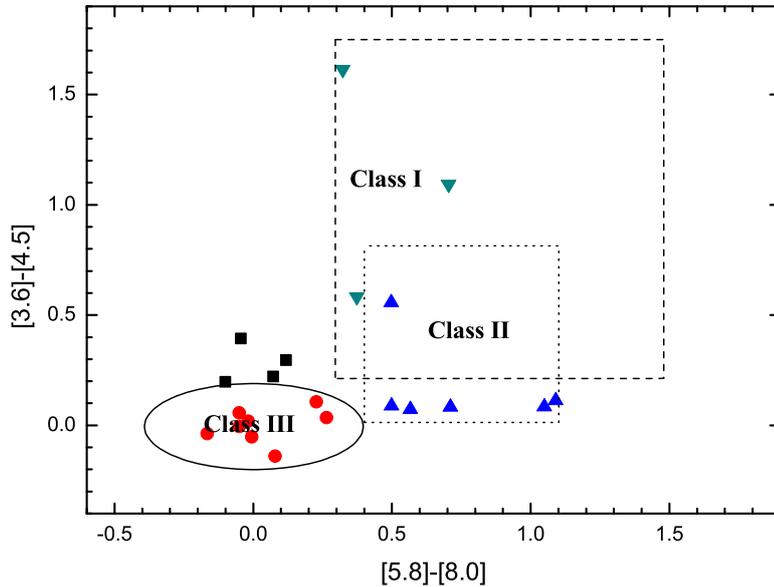


图 5.7: 尘泡 S51 的 GLIMPSE 双色图 $[5.8]-[8.0]$ vs. $[3.6]-[4.5]$ 。其中, 符号 “▼”, “▲”, “●”, “■” 分别代表了 I 型, II 型, III 型和其他类型的年轻星。这些不同的类型是由 Allen et al. (2004) 定义的不同演化阶段的年轻星。

et al., 2004); 然后再对分布在 Class III 中的星进行筛选, 主要剔除掉在距离和位置关系上与尘泡的相关性不太好的源; 最后, 利用能谱拟合 (SED) 工具 (Robitaille et al., 2007) 对筛选出来的激发星候选体进行进一步的确认, 还可以得到激发星的质量、温度、年龄、距离和盘质量等有用的参数。通过这种方法, 我们可能会发现一些尘泡的激发星是成团存在的。然而, 尽管研究方法很多, 但是值得我们深究的是, 至今没有更好的理论可以很好地确定这些激发星一定是触发尘泡形成的激发源。主要的问题是, 我们无法精确地确定遥远天体的距离。

相对激发星来说, 寻找与尘泡相关的年轻星比较容易些。通过 GLIMPSE 双色图筛选出的 Class I 和 II 星, 就是很好的年轻星样本。与筛选激发星一样, 我们可以进行距离上的判断, 然后利用能谱拟合工具, 对这些年轻星进行筛选 (Robitaille et al., 2007)。图 5.5 中展示出了 Class I 和 II 型星的分布情况, 他们主要是围绕着尘泡的壳层结构附近分布的。最后, 分析这些年轻星在尘泡周围的分布情况, 从而确定年轻星与尘泡的关系。需要注意的是, 这种方法主要是基于概率统计的原理。从对多个尘泡的研究来看, 年轻星主要分布在尘泡的壳层结构上, 这说明尘泡的壳层环境可能是恒星形成的诞生地。对于年轻星

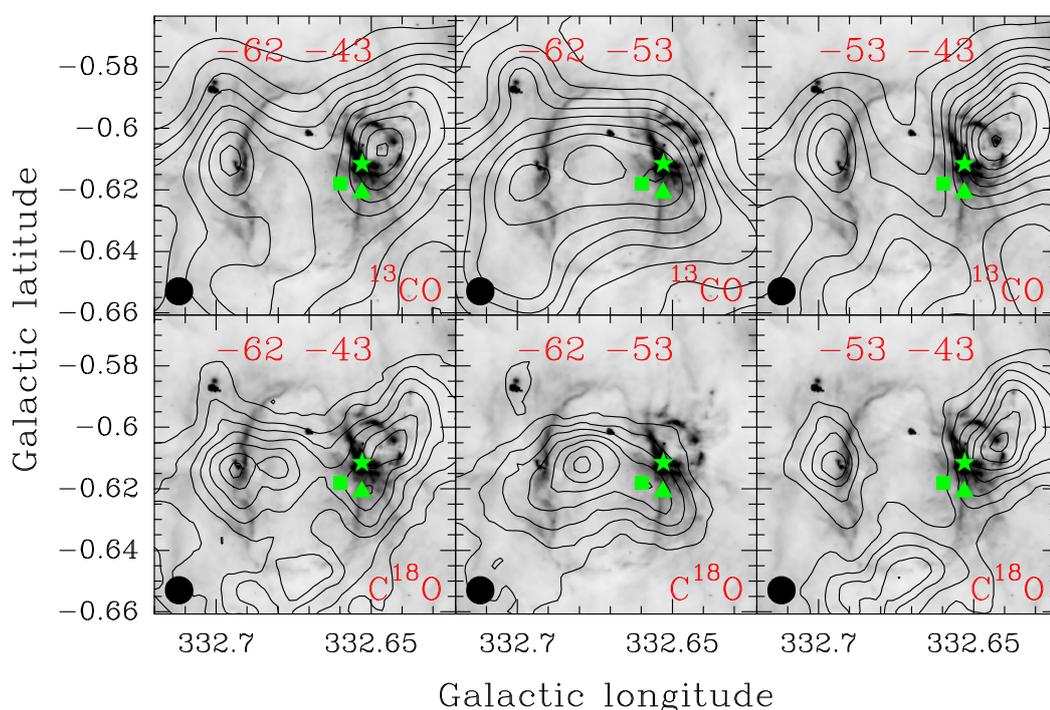


图 5.8: 分子 ^{13}CO 和 C^{18}O 的积分强度等值线与 GLIMPSE $8.0\ \mu\text{m}$ 辐射的叠图。 ^{13}CO 和 C^{18}O 的等值线刻度分别为峰值的 9% 和 12%。上面三个图的峰值分别是 123.136, 59.055, 93.380 K km s^{-1} , 下面三个图的峰值分别是 25.598, 18.456, 20.458 K km s^{-1} 。积分速度区间分别标注在每个小图上。绿色的符号“▲”, “■”, “★”分别给出了水脉泽, 羟基脉泽和红外源 16158-5055 的位置。

的搜索, 我们期待着从多波段上发现与尘泡壳层环境相成协的现象, 从而进一步理解尘泡的膨胀是否能够触发新一代的恒星形成。另外, Gutermuth 等人于 2009 年给出了更为有效的证认初始恒星体 (YSOs) 的方法 (Gutermuth et al., 2009)。他们结合 2MASS 和斯皮策的多波段红外数据使用数个颜色规则对初始恒星体的筛选进行了详细讨论。同时, 他们还考虑了各类河外和河内污染源。WISE 数据在 3.4 和 $4.6\ \mu\text{m}$ 两个波段有着比斯皮策数据更高的灵敏度, 也是可用于初始恒星体证认的优良数据, 如 Koenig 等人于 2012 年的工作 (Koenig et al., 2012)。

5.4 尘泡 S51 的研究结果

5.4.1 观测与数据

对于尘泡 S51, 我们主要分析了红外和亚毫米数据, 主要包括: 2MASS⁹ (Skrutskie et al., 2006), GLIMPSE (Benjamin et al., 2003; Churchwell et al., 2009), MIPS GAL (Carey et al., 2009), IRAS (Neugebauer et al., 1984), MALT90 (Foster et al., 2011)。

关于红外数据, 我们利用了 GLIMPSE 图像和点源源表数据, 其为来自 Spitzer-IRAC (3.6, 4.5, 5.8, 8.0 μm) 的观测, 分辨率在 1.5'' 到 1.9'' 之间 (Fazio et al., 2004; Werner et al., 2004)。MIPSGAL 与 GLIMPSE 有同样的观测区域, 其为利用 Spitzer 空间望远镜上的 MIP (24 and 70 μm) 接收机, 分辨率是 6'' at 24 μm 。

对于 110 GHz 附近的 $^{13}\text{CO } J = 1 - 0$ 和 $\text{C}^{18}\text{O } J = 1 - 0$, 澳大利亚的 Mopra 22-m 射电望远镜的波束大小是 33''。相关器为 64 MHz 的带宽, 1024 个通道, 速度分辨率是 $\sim 0.17 \text{ km s}^{-1}$ 。中心速度频率是 $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$, 其能够覆盖整个分子云的谱线发射范围。

MALT90 巡天利用了 Mopra 望远镜的 on-the-fly 观测模式, 每个亚扫描区域的大小是 $3.4' \times 3.4'$, 扫描间隔是 12''。研究尘泡 S51 所利用到的观测谱线分别是 HCN ($J = 1 - 0$), HNC ($J = 1 - 0$), HCO^+ ($J = 1 - 0$), C_2H ($N = 1 - 0, J = 3/2 - 1/2, F = 2 - 1$), N_2H^+ ($J = 1 - 0$), HC_3N ($J = 10 - 9$)。

对于 MOPRA 望远镜观测, OFF 点位于偏离银道面 $\pm 1^\circ$ 以外, 主要是为了保证 OFF 点是没有信号的位置。利用 SiO 脉泽, 每隔 1 - 1.5 小时, 做一次指向校准, 指向精度好于 10''。亮温度 T_{MB} 与天线温度 T_{A}^* 的关系为 $T_{\text{MB}} = T_{\text{A}}^* / \eta_{\nu}$, 其中 η_{ν} 是波束效率。在 86 GHz 和 110 GHz 附近, 波束效率分别为 $\eta_{86 \text{ GHz}} = 0.49$, $\eta_{110 \text{ GHz}} = 0.44$ 。该项目中的 ^{13}CO 、 C^{18}O 数据主要来自 Lo et al. (2009)。MALT90 数据主要来自其公开的数据库¹⁰。利用 GILDAS 软件包的 CLASS 和 GREG 模块进行数据处理¹¹。

⁹2MASS is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation.

¹⁰<http://atoa.atnf.csiro.au/MALT90/>

¹¹<http://iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

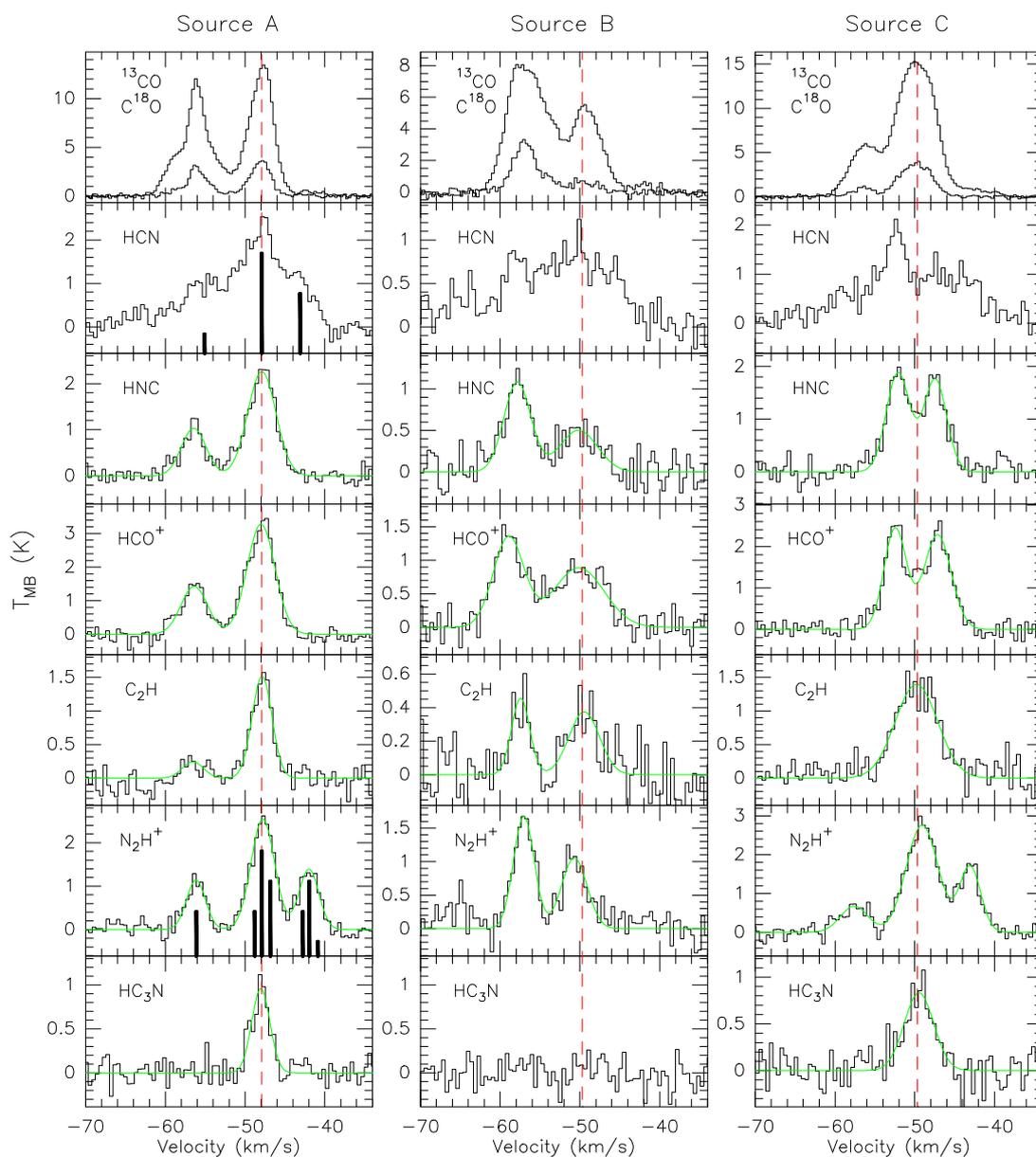


图 5.9: 尘泡 S51 中, 位置 A, B, C 处的 MALT90 谱线。其中, A, B, C 的位置在图 5.5 中标出, 他们的坐标分别是 “A” ($l=332.693, b=-0.610$), “B” ($l=332.677, b=-0.619$), “C” ($l=332.645, b=-0.608$)。图中, 红色的虚线标出了谱线 $C^{18}O$ 的峰值速度。绿色的曲线是高斯拟合线。谱线 HCN, N_2H^+ 有超精细结构, 并以黑色细线标出。

5.4.2 结果

研究红外尘泡 S51, 我们主要为了寻找尘泡的膨胀触发恒星形成的证据。该项目主要按照以下线索展开: 首先, 通过分析 ^{13}CO (图 D.1), C^{18}O (图 D.2) 的积分强度通道分布图, 我们发现该尘泡的壳层和前端云均和 $8.0\ \mu\text{m}$ 辐射成协。 $[-62.0\ -43.]$, $[-62.0\ -53.0]$, $[-53.0\ -43.0]\ \text{km s}^{-1}$ 速度成分的积分强度等值线展示于图 5.8 中。另外, 为了分析尘泡 S51 的碎裂情况, 我们利用了 MALT90 巡天的多波段的分子对该尘泡进行多种参数关系的研究 (图 D.3)。这些分子分别包括: HCN , HNC , HCO^+ , C_2H , N_2H^+ , HC_3N 。并且, 我们给出了这些分子的观测谱线, 和分析了动力学运动 (外流和内流)。其次, 我们给出了 3.6 、 4.5 、 $8.0\ \mu\text{m}$ 和 4.5 、 8.0 、 $24\ \mu\text{m}$ 的三色图, 从而分析红外分布 (图 5.2, 5.3)。最后, 我们利用 $[5.8]$ - $[8.0]$ 和 $[3.6]$ - $[4.5]$ 色指数图 (图 5.7) 和能谱分布, 进行年轻星和激发星的辨认, 其结果展示在图 5.5 中。

通过该研究项目, 我们得到的结果如下: 经过比较尘泡 S51 的分子气体和 $8.0\ \mu\text{m}$ 辐射的形态学相关性, 我们认为该尘泡的动力学距离是 $3.4\ \text{kpc}$ 。尘泡 S51 呈现出分子 ^{13}CO 和 C^{18}O 的壳层结构和前端云的结构。我们在该尘泡的壳层上发现了外向流和内流的活动特征。另外, 我们发现了一个小的尘泡结构: G332.646-0.606 ($R_{\text{in}} = 26''$, $r_{\text{in}} = 15''$, $R_{\text{out}} = 35''$, $r_{\text{out}} = 25''$), 其位于尘泡 S51 的西部边缘, 可能是尘泡 S51 触发而形成的。我们发现了一个水脉泽、一个羟基脉泽和一个红外源 $16158\text{-}5055$ 位于这两个尘泡的相交处, 说明它们在相互挤压, 或者相互作用, 将会触发新的恒星形成。一些年轻星被发现于尘泡附近沿着弧型的结构上, 他们可能代表着新一代的恒星形成, 其主要来自于尘泡 S51 的膨胀反馈作用。

5.5 尘泡 N68 的研究结果

5.5.1 观测与数据

该项目中, 我们主要利用了网络上公开的红外和毫米波数据库, 对红外尘泡 N68 进行了深入的研究。这些数据主要来自一些巡天项目, 包括: GLIMPSE (Benjamin et al., 2003; Churchwell et al., 2009), MIPS GAL (Carey et al., 2009), IRAS

(Neugebauer et al., 1984), NVSS (Condon et al., 1998), GRS¹², JCMT¹³。GLIMPSE 和 MIPS GAL 巡天已经在前面介绍过。除此之外, 我们还利用了 1.4 GHz 的连续谱巡天数据 (NVSS), 该数据主要覆盖了北天和南天到 -40 度银纬的范围。

$^{13}\text{CO J} = 1 - 0$ 来自于 14 米的五大学望远镜观测数据, 在 110 GHz 附近的波束大小是 $\sim 46''$, 采样间隔是 $22''$ 。原始数据的单位是天线温度 T_A^* 。由天线温度到主波束亮温度的转换因子, 即天线效率是 0.48。该数据的速度分辨率是 0.25 km s^{-1} (Jackson et al., 2006)。另外, 我们还利用到了 $\sim 330 \text{ GHz}$ 附近的 $^{13}\text{CO J} = 3 - 2$ 线。该数据来自 15 米的 JCMT 亚毫米波望远镜, 空间分辨率是 $\sim 14''$, 速度分辨率是 $\sim 0.055 \text{ km s}^{-1}$ 。在数据展示中, 这两个数据的分辨率分别被平滑到 0.50, 0.44 km s^{-1} 。关于数据处理, 我们主要利用 GILDAS 软件包中的 CLASS 和 GREG 模块¹⁴。

5.5.2 结果

表 5.1: 红外尘泡 N68 周围年轻星的参数。

Source	Name	R.A.(J2000)			DEC.(J2000)		
		<i>h</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>°</i>	<i>'</i>	<i>''</i>
IRAS	IRAS18538+0222	18	56	21.30	+02	26	37.00
IRAS	IRAS18538+0216	18	56	23.50	+02	20	38.00
IRAS	IRAS18540+0220	18	56	35.60	+02	24	54.00
CHII	G35.590-0.025	18	56	22.67	+02	21	14.58
EGO	G35.040-0.470	18	57	03.30	+02	21	50.00
Maser	G35.578-0.031	18	56	22.55	+02	20	28.10
UCHII	G35.578-0.031	18	56	22.64	+02	20	26.30

利用来自于 JCMT 和五大学的望远镜数据 $^{13}\text{CO J} = 1 - 0$ 和 $J = 3 - 2$, 结合

¹²This publication makes use of molecular line data from the Boston University-FCRAO Galactic Ring Survey (GRS). The GRS is a joint project of Boston University and Five College Radio Astronomy Observatory, funded by the National Science Foundation under grants AST-9800334, AST-0098562, AST-0100793, AST-0228993, & AST-0507657.

¹³The James Clerk Maxwell Telescope is operated by the Joint Astronomy Centre on behalf of the Science and Technology Facilities Council of the United Kingdom, the Netherlands Organisation for Scientific Research, and the National Research Council of Canada.

¹⁴<http://iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

1.4 GHz 的连续谱数据和 SPITZER 红外数据，我们对红外尘泡 N68 的物理环境进行了研究。主要结论如下：

分子云 $^{13}\text{CO } J = 1 - 0$ 和 $J = 3 - 2$ 的形态学与 $8.0 \mu\text{m}$ 的红外分布有着很好的成协性。从速度结构上进行分析，尘泡 N68 的壳层结构可能正在膨胀。从年轻星的分布上看，该膨胀的壳层结构正在触发新一代的恒星形成。其中，壳层结构的膨胀速度是 $\sim 5 \text{ km s}^{-1}$ 。然而，我们不清楚是否该壳层结构的膨胀来自于内部电离氢区的驱动。

我们发现两个致密核 M 和 N，它们都位于尘泡的壳层结构上，其中致密核 N 是一个超致密电离氢区 (Zhang et al., 2014)。致密核 N 与附近的水脉泽、羟基脉泽以及红外点源成协。这些都表明，尘泡的壳层结构上的恒星形成非常活跃，其是大质量恒星形成的栖息地。进一步来说，致密核 M 和 N 有待高分辨率观测的进一步研究。

另外，我们利用 GLIMPSE 和 MIPS GAL 的点源数据，分析了尘泡 N68 周围的年轻星和热尘埃气体的分布。利用双色图 [5.8]-[8.0] 和 [3.6]-[4.5] 的关系，我们辨认了 I 型和 II 型的年轻星，他们的分布都和壳层结构的光致电离氢区相关，这些可能是来自于尘泡内部电离氢区的反馈作用。这些信息也暗示着，电离氢区的向外膨胀，正在触发壳层结构上新一代的大质量恒星形成。

5.6 尘泡 N131 的研究结果 – I

5.6.1 观测与数据

关于红外数据，我们主要利用了以下的数据库，包括：GLIMPSE (Benjamin et al., 2003; Churchwell et al., 2009), MIPS GAL (Carey et al., 2009), the Two Micron All Sky Survey (2MASS)¹⁵ (Skrutskie et al., 2006), IRAS (Neugebauer et al., 1984), NVSS (Condon et al., 1998)。在前面，我们已经对这些数据做了详细的描述。

¹⁵2MASS is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation.

表 5.2: 与尘泡 N131 分子云相关的团块参数

Clump	Area (arcmin ²)	Int.T ₁₂ CO (arcmin ² ·K)	Int.T ₁₃ CO (arcmin ² ·K)	T _{ex} (max) (K)	T _{ex} (mean) (K)	N _{H₂} (max) (10 ²¹ cm ⁻²)	N _{H₂} (mean) (10 ²¹ cm ⁻²)	M _{H₂} (M _⊙)	n _{H₂} (cm ⁻³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
AD	36.59	554.34	102.31	29.15	11.54	15.39	3.36	1438	72
BC	32.23	491.05	122.32	23.17	12.42	21.10	4.71	1775	107
A	13.72	305.22	50.05	29.15	14.56	15.39	5.07	814	177
B	12.63	233.59	58.97	23.17	14.73	21.10	5.69	841	207
C	6.75	118.92	30.93	21.94	17.12	17.12	8.48	669	423
D	2.18	37.48	6.66	20.90	15.12	8.90	5.00	127	439
E	3.70	31.23	7.71	17.10	9.28	3.71	1.25	54	84
F	3.05	40.64	7.53	17.79	12.90	4.88	2.12	76	157
G	3.70	50.50	13.38	18.95	11.19	8.42	2.53	109	170
H	1.31	10.01	2.41	11.89	8.28	1.75	0.58	9	66
I	2.18	27.49	5.15	13.08	8.03	3.35	1.06	27	93

表 5.3: 尘泡 N131 周围 IRAS 点源参数。

Name	IRAS Source	R.A.(J2000)	DEC.(J2000)	F_{12}	F_{25}	F_{60}	F_{100}	L_{IR}	T_d
		<i>h m s</i>	<i>° ' "</i>	Jy	Jy	Jy	Jy	L_{\odot}	K
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
IR1	19498+2621	19 51 58.18	26 29 46.36	0.31	0.43	3.14	33.82	1855	19.47
IR2	19499+2613	19 52 01.47	26 21 09.56	5.54	22.02	216.90	322.80	40873	32.52
IR3	19500+2617	19 52 09.90	26 24 56.10	0.45	0.27	3.23	322.80	13199	13.41
IR4	19501+2607	19 52 12.62	26 15 03.28	0.44	1.12	9.84	31.69	2627	25.78
IR5	19502+2606	19 52 19.94	26 14 19.75	4.14	1.70	2.99	31.51	3717	19.56
IR6	19502+2618	19 52 21.28	26 26 41.84	0.28	0.27	2.55	53.40	2520	17.16
IR7	19503+2617	19 52 26.01	26 25 28.14	5.96	2.60	2.72	43.68	5149	18.01
IR8	19505+2610	19 52 40.28	26 18 04.06	0.30	0.22	3.38	23.33	1429	21.40

除此之外，在 2012 年 5 月，我们利用德令哈的 13.7 米毫米波望远镜¹⁶，对尘泡 N131 进行了 CO J = 1 - 0 三条同位素的同时观测。接收机为 9 波束的馈源系统，每两个馈源间隔 $\sim 180''$ 。接收系统是边带分离的模式，其中上边带可以覆盖 ^{12}CO ，下边带可以同时覆盖 ^{13}CO 和 C^{18}O 。在 $\sim 110 \text{ GHz}$ ，波束大小是 $52'' \pm 3''$ ，主波束效率是 $\sim 50\%$ 。望远镜的指向和跟踪精度好于 $5''$ 。观测中，系统温度约为 110 K，每个馈源变化幅度约为 10%。快速傅立叶变化频谱仪作为终端，总的带宽是 1GHz，通道数是 16384 个。在 110GHz 附近，相应的速度分辨率是 0.16 km s^{-1} 。

5.6.2 结果

基于德令哈 13.7 米望远镜的 CO (1-0) 观测数据，结合 GLIMPSE, MIPS-GAL, 2MASS, IRAS, 和 NVSS 毫米波数据，我们对红外尘泡 N131 进行了分析，主要结论如下：

我们发现 CO 分子云的壳状结构和 Spitzer 8.0, $24 \mu\text{m}$ 的红外辐射有着相当好的成协性。并且，有两个巨大的丝状分子云出现在尘泡 N131 的东西两侧。沿着这两条巨型分子云的方向，有着明显的速度梯度，如图 5.10。通过比较 CO 通道图（如图 D.4）与 $8.0 \mu\text{m}$ 的辐射分布，我们发现该尘泡的运动学距离是 8.6 kpc。在尘泡的内部，几乎没有 1.4 GHz 连续谱和 $24 \mu\text{m}$ 辐射，可能热尘埃和电离气体已经被恒星风吹散。7 个红外点源分布于尘泡的壳层结构上，其相关参数列于表 5.3 中。我们还辨别出 15 个激发星位于尘泡内部，说明该尘泡是由星团触发形成的。63 个年轻星候选体沿着尘泡的壳层结构和两个丝状的巨

¹⁶<http://www.dlh.pmo.cas.cn/>

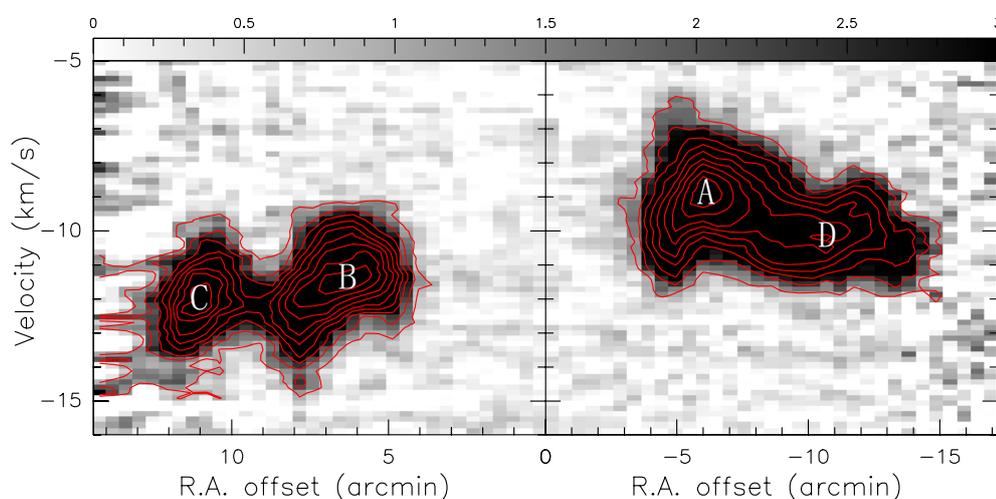


图 5.10: 沿着尘泡 N131 两条巨型分子云方向的位置-速度图, 如图 5.6 中白色的直线。坐标偏置的中心点坐标是 $R.A.(J2000) = 19^h52^m17^s.7$, $DEC.(J2000) = +26^\circ22'05''.8$ 。左右图中等值线的刻度分别是 0.97 K 到 8.72 K, 间隔为 0.97 K, 和从 1.23 K 到 11.07 K, 间隔是 1.23 K。字母 A, B, C, D 与图 5.6 中的字母一致。

型分子云分布。这充分说明, 尘泡周围的恒星形成可能是由尘泡的膨胀触发形成的。

5.7 尘泡 N131 的研究结果 – II

5.7.1 观测与数据

在前面的项目中, 我们已经利用德令哈 13.7-m 望远镜的 CO (1-0), ^{13}CO (1-0), ^{18}CO (1-0) 观测数据, 对尘泡 N131 做了详细的研究 (Zhang et al., 2013)。然而, 其分辨率不能够分辨其中的分子云团块。因此, 我们于 2014 年 4 月 17 日到 20 日, 利用位于西班牙的 IRAM 30-m 望远镜¹⁷ 进行了 CO (2-1), CO (1-0), ^{13}CO (1-0) 的相对高分辨率的观测。我们利用了新的混频接收机, E90 和 E230 带宽能够同时观测并且覆盖这三条线, 其中 E90 被调节到 [110.186 112.006] GHz, 用来观测 ^{13}CO (1-0) 线; E230 被调节到 [229.678 231.498] GHz 用来观测 CO (2-1) 线。快速傅立叶频谱仪的频率分辨率为 50 kHz。

对于 CO (2-1), CO (1-0), ^{13}CO (1-0) 的谱线观测, 望远镜的波束大小分别是

¹⁷Based on observations carried out with the IRAM 30m Telescope. IRAM is supported by INSU/CNRS (France), MPG (Germany) and IGN (Spain).

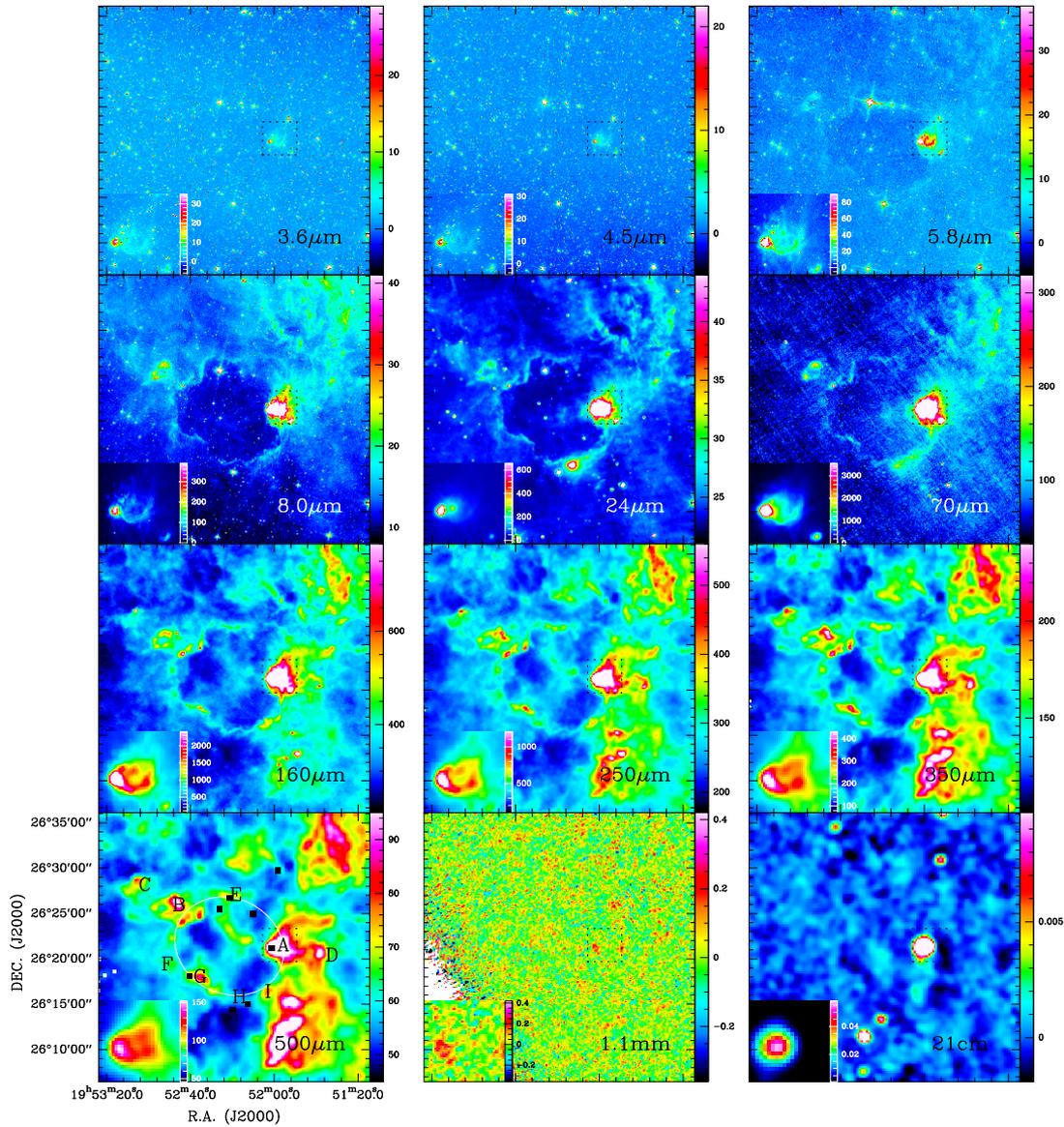


图 5.11: 红外尘泡 N131 从 $3.6 \mu\text{m}$ 到 21 cm 的多波段观测。图中，左下角是矩形虚线的放大图像。每个小图的刻度单位分别是： MJy sr^{-1} (对应于 $3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 24, 70, 160, 250, 350, 500 \mu\text{m}$), Jy beam^{-1} (对应于 $1.1 \text{ mm}, 21 \text{ cm}$)。在 $500 \mu\text{m}$ 的小图中，符号“■”，字母 (A, B, ..., D), 椭圆分别标出了红外点源，分子云团块，壳层结构的位置。

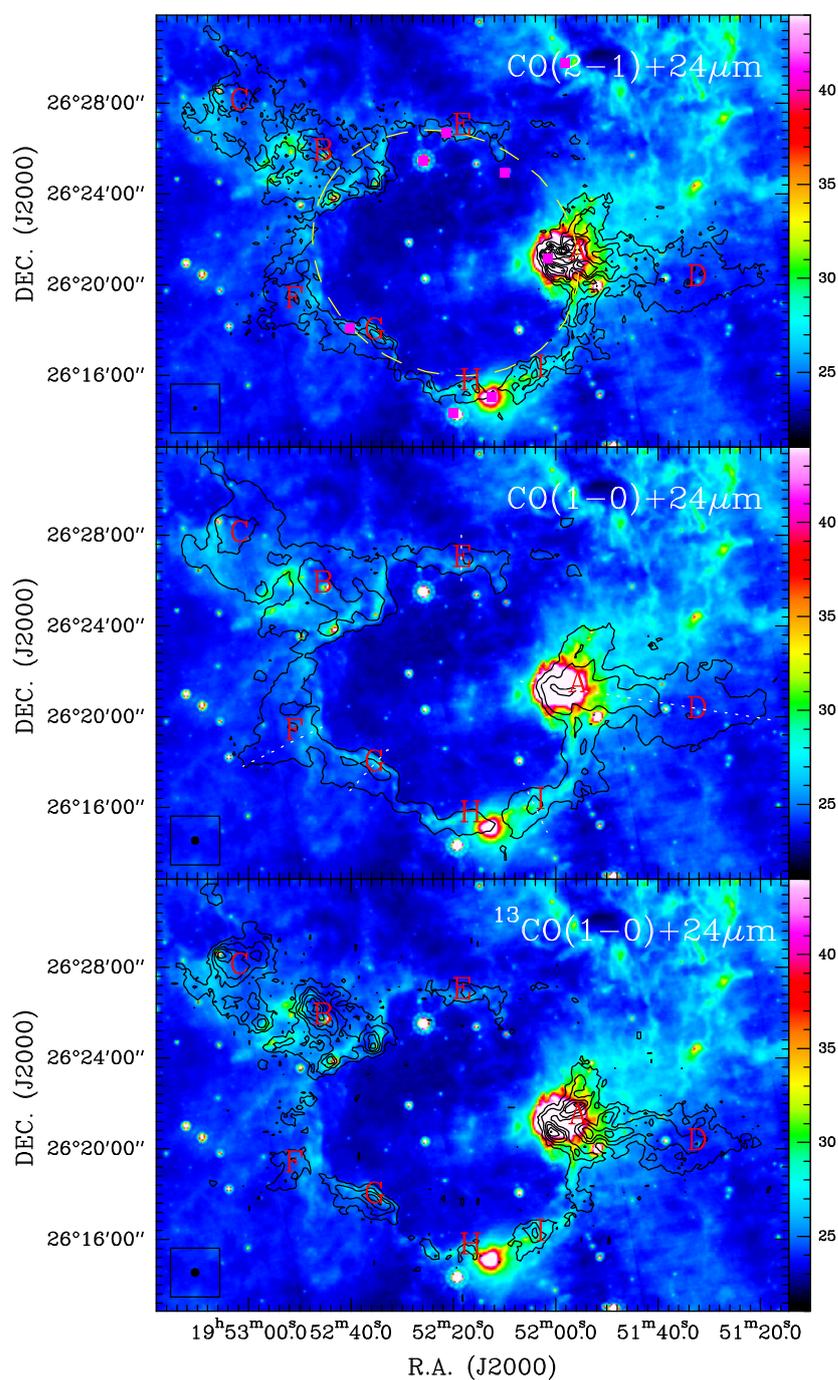


图 5.12: CO (2-1), CO (1-0), ^{13}CO (1-0) 积分强度与 $24\ \mu\text{m}$ 辐射的叠图。其中, 速度积分区间是 $[-14.5\ -6.5]\ \text{km s}^{-1}$ 。对于不同的跃迁 CO (2-1) ($\sigma = 1.7\ \text{K}(T_{\text{A}}^*)\ \text{km s}^{-1}$), CO (1-0) ($\sigma = 1.5\ \text{K}(T_{\text{A}}^*)\ \text{km s}^{-1}$), ^{13}CO (1-0) ($\sigma = 0.4\ \text{K}(T_{\text{A}}^*)\ \text{km s}^{-1}$), 等值线的刻度开始于 3σ , 步长是 5σ 。符号“■”, 字母 (A, B, ..., I), 椭圆分别标出了红外源、团块、壳层结构的位置, 彩图的刻度单位是 MJy sr^{-1} 。图中的白色虚线为图 5.13 和 5.14 的切割轨迹。

11.3", 22.5", 23.5"; 相应的主波束效率 (B_{eff}) 分别是 59%, 78%, 78%; forward 效率 (F_{eff}) 分别是 92%, 94%, 94%。主波束亮温度 (T_{mb}) 和天线温度 (T_{A}^*) 的关系为 $T_{\text{mb}} = (F_{\text{eff}}/B_{\text{eff}}) \times T_{\text{A}}^*$ 。利用 on-the-fly 观测模式, 在横向和纵向方向上对尘泡 N131 的壳层结构进行扫描, 两个方向的扫描目的是为了减少条纹效应, 并且增加采样率。考虑到有限的观测时间, 采样间隔为 9.3", 其满足 CO (1-0) 和 ^{13}CO (1-0) Nyquist 采样理论, 但是对于 CO (2-1) 稍微不足。但是横向和纵向两个方向的扫描, 弥补了一些采样不足的问题。

基于常规观测的操作步骤, 校准扫描、指向、聚焦分别在校准后进行。其中, 在每个 subscan 的开始时进行校准扫描; 每隔一个小时进行一次指向校准; 在日出和日落后的大气温度稳定后, 进行一次聚焦校准。我们期望的流量校准误差大约为 10%。数据处理软件主要是 GILDAS¹⁸ 和 MIRIAD¹⁹ 软件包。

表 5.4 中, 第 (1) 列给出了高斯团块的数目, 第 (2) 列给出了相对坐标, 其中零点坐标为 $\alpha(J2000) = 19^{\text{h}}51^{\text{m}}55^{\text{s}}.212$, $\delta(J2000) = 26^{\circ}22'21''.04$ 。第 (3) 列给出了高斯尺寸的大小, 第 (4) – (7) 列给出了半高全宽和反卷积后的半高全宽, 第 (8) 列给出了峰值柱密度, 第 (9) 列给出了团块质量, 第 (10) – (11) 列给出了 ^{13}CO (1-0) 的速度和线宽信息, 第 (12) 列给出了维里质量, 第 (13) 列给出了维里参数 $\alpha_{\text{vir}} = M_{\text{vir}}/M$ 。

5.7.2 结果

在图 5.11 中, 我们给出了红外尘泡的 3.6 μm 到 21 cm 多波段观测, 包括 GLIMPSE 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 μm (Benjamin et al., 2003; Churchwell et al., 2009), MIPS GAL 24 μm (Carey et al., 2009), PACS 70, 160 μm (Poglitsch et al., 2010), SPIRE 250, 350, 500 μm , BGPS 1.1 mm (Aguirre et al., 2011), NVSS 21 cm (Condon et al., 1998)。在图 5.12 中, 我们展示了分子 CO (2-1), CO (1-0), ^{13}CO (1-0) 的积分强度等值线与 24 μm 的叠图。在小尺度上, 团块 A 碎裂成小块, 并且分布在沿着分子团块 AD 方向的丝状结构上, 这些丝状的结构可能来自于尘泡内部星风的作用。在团块 A 的中央区域, 存在一个中空的、在东西方向上的延展结构。团块 B 也碎裂成一些小尺度的结构。通过位置-速度图法 (图 5.14), 并且对比 8.0 μm , 21 cm 和 CO 数据 (图 D.5), 我们发现团块 A 是一个典型的三维的红外沉泡 N131-A, 其有明显的前端云和后端云。

¹⁸<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

¹⁹<http://www.cfa.harvard.edu/sma/miriad/>

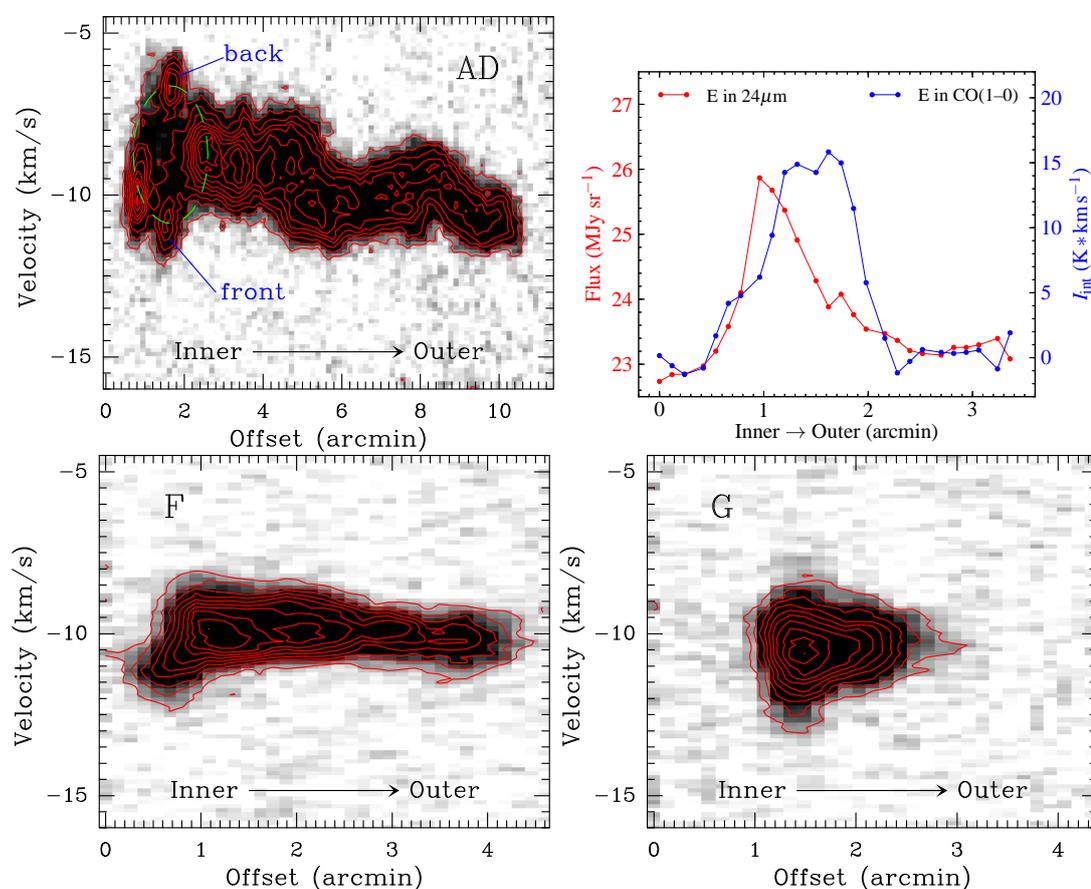


图 5.13: $24\ \mu\text{m}$ 和 CO (1-0) 的强度随位置的变化谱。其位置贯穿致密团块 AD, E, F, G, 方向为从尘泡壳层的内边缘到外边缘, 如图 5.12 中白色虚线所示。

在图 5.12 中, $24\ \mu\text{m}$ 和 CO (1-0) 分布有着非常好的成协性。利用它们的强度分布谱 (如图 5.13), 可以清晰地描绘强度在壳层结构内外边缘, 并贯穿致密核位置处的变化。从该图中, 我们可以看到, 壳层的内边缘的强度变化非常陡峭, 而外边缘强度变化非常的平滑, 这显然说明内边缘受到了来自尘泡内部恒星风的作用力。并且, 尘泡内部几乎是中空的, 大部分物质已经被输运到壳层结构上。同时, 对比红外数据与分子云的分布情况, 我们发现了三个红外暗云。

利用 *Gaussclumps* (Kramer et al., 1998; Stutzki & Guesten, 1990), 我们对尘泡 N131 相关的分子云团块进行了致密核的筛选和辨认。在此, 我们需要假设致密核流量是以高斯形状分布的。我们仅考虑峰值强度在 5σ 以上的致密核。所得的参数列于表 5.4 中。

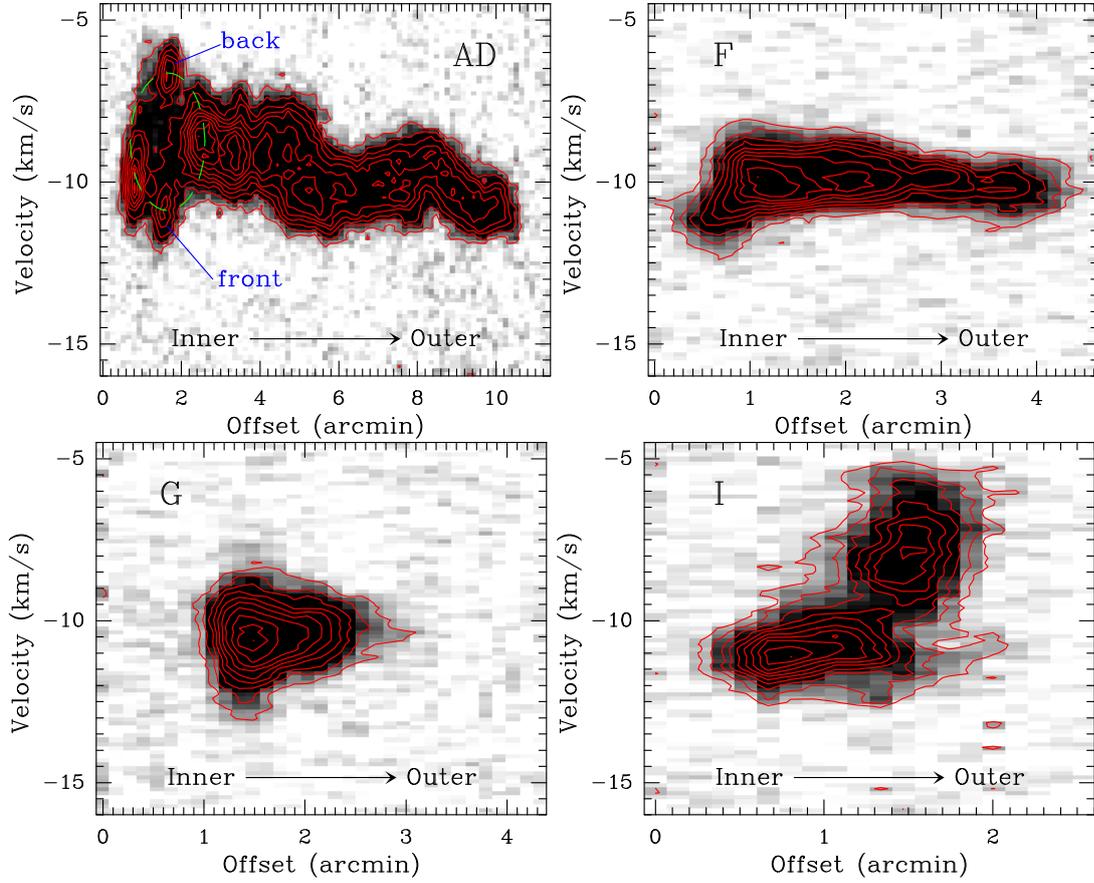


图 5.14: CO (1-0) 的位置-速度图。其位置贯穿致密团块 AD, F, G, I, 方向为从尘泡壳层的内边缘到外边缘, 如图 5.12 中白色虚线所示。其中, 绿色的椭圆标出了沉泡环状壳层的三维结构, 包括前端云和后端云。该方法来自于 Peng et al. (2010)。

另外, 我们利用 Kauffmann & Pillai (2010) 对大质量和小质量恒星候选体的分类标准, 对所抽取出来的致密核进行了分类。大质量恒星候选体的阈值范围为 $m(r) > 870M_{\odot}(r/\text{pc})^{1.33}$ 。通过此标准的判断, 我们发现几乎所有的团块都是小质量星候选体。维里理论可以判断这些分子致密核是否是稳定的, 其关系是为 $M_{\text{vir}} \approx 210 r \Delta V^2 (M_{\odot})$ (Evans, 1999)。假如 $\alpha_{\text{vir}} = M_{\text{vir}}/M < 1$, 则分子致密核是引力束缚的, 是潜在的不稳定的状态, 可能会坍缩; 假如 $\alpha_{\text{vir}} > 1$, 则致密核是非引力束缚的, 是稳定的, 可能会膨胀 (Hindson et al., 2013)。所得到的这些参数也列于表 5.4 中。我们发现, 在获得的 31 个致密核中, 12 个致密核是引力束缚的, 19 个是非引力束缚的, 并且引力束缚的致密核质量高于非引力束缚的致密核质量。

表 5.4: 尘泡 N131 中, 高斯团块的参数。

No.	Offsets ", "	Gaussian Size " × "	FWHM "	pc	Deconv. FWHM "	N_{H_2} 10^{21} cm^{-2}	M M_{\odot}	V_{br} km s^{-1}	ΔV km s^{-1}	M_{air} M_{\odot}	α_{vir}	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	(68.8, -95.9)	30.8×61.2	38.9	1.6	31.7	1.3	21.2	894	-9.98(0.01)	1.60(0.02)	521	0.58
2	(13.0, -31.5)	65.5×42.5	50.4	2.1	45.1	1.9	16.3	1160	-9.10(0.02)	2.30(0.03)	1401	1.21
3	(541.2, 128.8)	53.3×37.1	43.0	1.8	36.7	1.5	15.5	800	-11.50(0.01)	1.68(0.03)	636	0.80
4	(685.1, 224.0)	71.3×132.1	88.7	3.7	85.8	3.6	14.9	3267	-12.28(0.01)	1.90(0.03)	1684	0.52
5	(948.3, 368.2)	46.2×71.1	54.8	2.3	49.9	2.1	14.5	1217	-12.87(0.01)	1.68(0.03)	811	0.67
6	(-11.4, -88.1)	82.8×37.4	48.2	2.0	42.6	1.8	13.4	872	-8.98(0.01)	1.59(0.03)	637	0.73
7	(660.9, 88.5)	33.6×70.1	42.9	1.8	36.5	1.5	13.3	682	-11.42(0.01)	1.39(0.03)	436	0.64
8	(837.0, 192.5)	36.7×41.4	38.8	1.6	31.6	1.3	12.3	519	-12.28(0.01)	1.01(0.02)	207	0.40
9	(-75.3, -103.8)	28.8×68.2	40.0	1.7	33.0	1.4	12.0	538	-9.21(0.02)	2.23(0.04)	1042	1.94
10	(549.0, -271.9)	37.3×116.6	50.2	2.1	44.9	1.9	11.1	779	-10.73(0.01)	1.35(0.02)	478	0.61
11	(-67.2, -55.6)	36.8×25.6	29.7	1.2	19.4	0.8	10.1	251	-8.88(0.02)	1.98(0.04)	613	2.45
12	(117.0, -367.6)	54.1×53.2	53.6	2.2	48.7	2.0	8.1	648	-7.70(0.02)	1.78(0.05)	890	1.37
13	(845.3, 360.4)	72.7×107.7	88.5	3.7	85.6	3.6	8.0	1747	-11.74(0.02)	1.69(0.04)	1324	0.76
14	(4.9, -151.8)	44.5×22.7	28.6	1.2	17.7	0.7	7.5	171	-9.60(0.01)	1.24(0.03)	230	1.34
15	(4.9, 32.4)	39.1×65.6	47.5	2.0	41.8	1.7	7.2	455	-8.81(0.01)	1.23(0.03)	380	0.84
16	(285.0, 272.3)	163.4×45.0	61.3	2.6	57.0	2.4	7.0	737	-8.51(0.04)	1.72(0.08)	958	1.30
17	(-203.3, -119.7)	86.7×96.4	91.4	3.8	88.6	3.7	6.9	1618	-10.42(0.02)	1.71(0.05)	1409	0.87
18	(541.0, 168.4)	38.4×104.7	52.2	2.2	47.1	2.0	6.5	497	-11.02(0.03)	1.95(0.06)	1046	2.11
19	(780.9, 136.3)	94.3×45.0	57.4	2.4	52.8	2.2	6.3	577	-11.26(0.01)	0.88(0.04)	232	0.40
20	(-35.0, -159.7)	22.5×43.2	28.2	1.2	17.0	0.7	6.2	137	-9.27(0.01)	1.10(0.03)	179	1.30
21	(612.0, 124.4)	53.5×79.4	30.1	1.3	19.9	0.8	5.8	146	-10.99(0.02)	1.26(0.04)	252	1.73
22	(861.0, 248.3)	69.1×46.2	54.3	2.3	49.4	2.1	5.1	423	-11.62(0.02)	1.40(0.04)	561	1.33
23	(-99.1, -39.6)	37.9×28.7	32.4	1.4	23.3	1.0	5.0	145	-8.43(0.03)	1.85(0.09)	580	3.98
24	(-307.1, -127.6)	42.6×150.4	58.0	2.4	53.4	2.2	4.9	461	-10.04(0.02)	1.66(0.04)	843	1.83
25	(-11.0, -279.6)	98.6×64.4	79.7	3.3	76.5	3.2	4.8	858	-10.38(0.05)	1.95(0.11)	1591	1.85
26	(749.0, -175.7)	49.3×70.9	57.1	2.4	52.5	2.2	4.6	423	-9.89(0.03)	1.51(0.07)	688	1.62
27	(1013.0, 288.3)	65.7×69.9	65.8	2.7	61.8	2.6	4.4	530	-12.95(0.02)	1.33(0.06)	615	1.16
28	(-371.1, -127.7)	43.7×92.2	60.2	2.5	55.8	2.3	4.3	433	-9.96(0.04)	1.64(0.08)	854	1.97
29	(924.9, 312.4)	25.1×96.0	35.2	1.5	27.0	1.1	4.2	145	-11.89(0.02)	1.43(0.04)	379	2.62
30	(588.9, 208.4)	39.6×47.9	43.1	1.8	36.8	1.5	4.1	212	-11.90(0.04)	1.45(0.10)	476	2.24
31	(636.9, 272.4)	44.0×23.7	29.5	1.2	19.1	0.8	3.8	92	-12.44(0.02)	0.99(0.04)	151	1.64

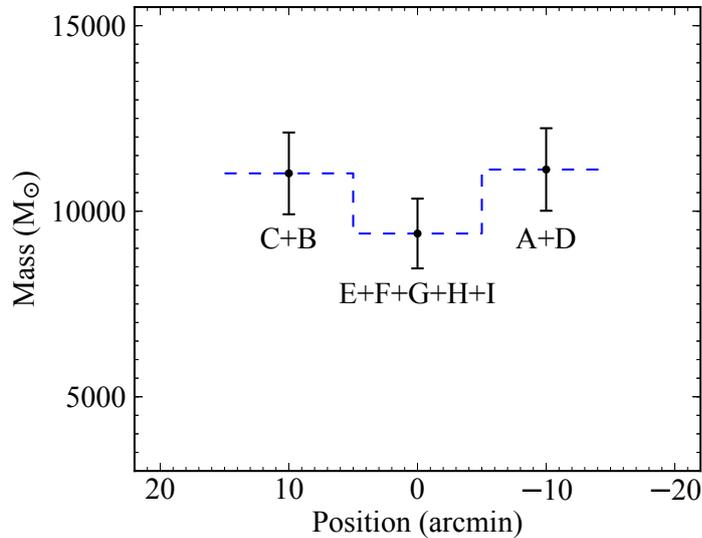


图 5.15: 尘泡 N131 中, 团块 A, B, ..., I 的质量分布图。垂直轴的坐标是质量, 我们分别给出了团块 AD, BC 和壳层结构的质量。水平坐标标出了巨型丝状云的相对长度, 零点坐标是尘泡的中心位置。图中误差棒为相应质量的 10%。

如图 5.15, 我们把尘泡 N131 相关的分子云分为两部分: 丝状的团块 AD 和 BC, 壳层结构的团块 E, F, G, H, I。假设团块 E, F, G, H, I 在尘泡形成前是一条丝状的云, 则其正好填充团块 A 和 B 的位置。在尺度上, 团块 AD 和 BC 和假象的团块 AB 有相似的长度。假如团块 AD 和 BC 和 E, F, G, H, I 有相同的质量, 则这将是证明我们的观点的一个证据。通过他们的相对质量分布的比较, 我们发现团块 AD 和 BC 和 E, F, G, H, I 确实有几乎相同的质量。

红外尘泡 N131 的形态学结构和速度分布非常有趣, 值得我们深入的探讨。然而, 该结构特征是如何形成的呢? 经过上面的一些分析, 我们认为红外尘泡的前身可能是一条丝状结构的分子云, 如图 5.16。在分子云中间, 栖息着一团 OB 型星, 激发和电离周围的中性物质, 并且折断了丝状云, 然后向外挤压他们。随着这种持续的作用力, 大约经过 10^6 yr 后, 最终形成的现在的结构。特别是, Bodenheimer et al. (1979) 给出了相似的数值模拟理论的支持。在观测上, 我们经常能够发现这种断裂的丝状云, 它们可能具有相似的触发机制, 如 500 pc 的丝状云 (Li et al., 2013) 和尘泡 N39 (Deharveng et al., 2010)。

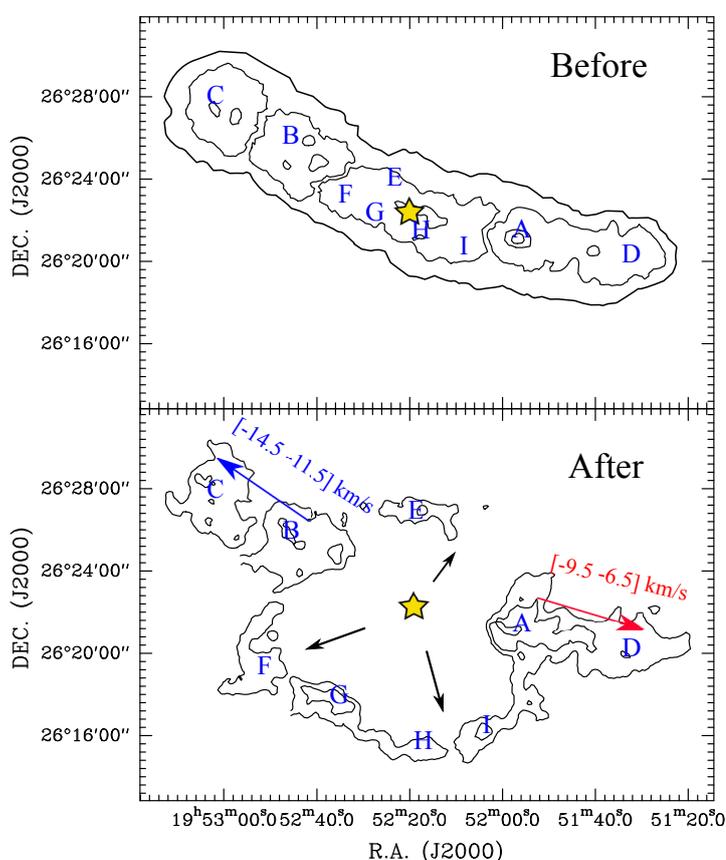


图 5.16: 尘泡 N131 的过去和现在。我们认为红外尘泡的前身可能是一条丝状结构的分子云。中心处的五角星代表着一群大质量星，为触发该尘泡膨胀的电离星。

5.8 小结

近些年来，对红外尘泡物理环境方面的研究工作比较热门。在该研究项目中，我们结合不同波段的射电和红外数据，对红外尘泡 S51、N68、N131，进行了深入的研究，得到了一些重要的研究成果。对于红外尘泡来说，普遍认为，OB 型星释放出大量的 UV 光子，UV 光子电离周围的中性星际介质演化形成膨胀的电离氢区，电离氢区在收集塌缩的作用下形成致密的壳状结构，在壳层环境中将孕育着早期的恒星形成。红外尘泡的形成与新一代的恒星形成之间有着比较密切的关系。所以，许多研究工作的焦点主要集中在寻找壳层结构的恒星形成的迹象，并且，找到了一些与尘泡相关的恒星形成迹象。比如，红外尘泡的周围分布着 IRAS 源、EGO 源，红外暗云源，致密电离氢区等，这些源都是恒星形成区的示踪体。

射电方面的观测数据非常重要，因为通过筛选射电望远镜观测到的与尘泡相关的分子谱线速度成分，可以更好地得到红外尘泡的速度结构。利用分子谱线所包含的信息，寻找恒星形成的迹象。进行射电数据的辐射强度图和位置-速度图的研究，分析尘泡的形态结构上的物理特征。而对于连续谱来说，我们很难剔除掉在视线方向上的前景源与背景源的干扰。因此，我们需要尽量利用射电数据进行速度成分上的区别对待。

在利用红外数据源表进行激发星与年轻星筛选时，由于红外数据的消光特别严重，我们可以利用概率统计方法，分析年轻星在壳层结构中的分布，推断触发恒星形成的可能性。对于激发星来说，我们依然只能通过位置关系和年龄上的判断确定最可能的激发星候选体。然而，对于我们所筛选出来的激发星与年轻星，他们是否真正的与尘泡相关，仍然是一个亟待解决的问题。

对尘泡的研究工作还存在着许多不足之处，我们期待着利用更高空间分辨率的望远镜（EVLA、ALMA 等）去观测红外尘泡的精细特征，如进一步研究尘泡的红外辐射分布、电离程度、空间结构、相互作用、速度特征等。我们仍然需要积累更多的研究样本，去理解尘泡是如何与周围的星际介质相互作用的。利用更高速度分辨率的接收系统揭示尘泡壳层上的动力学结构上的环境信息。对于更大样本的统计工作，可以利用中国科学院国家天文台西藏羊八井观测站的中德亚毫米波望远镜，以及紫金山天文台青海德令哈观测站的 13.7 米口径的毫米波望远镜来完成。

第六章 总结和展望

在本篇论文中，主要有四个研究项目，包括：红外暗云、致密冷核的碎裂和氘化、超超致密电离氢区、红外尘泡。一方面，这四个项目都属于大质量恒星早期形成与演化的范畴；另一方面，它们分别属于大质量恒星形成区不同演化阶段的典型特征。该文章的主要内容如下：

关于红外暗云的项目，我们的研究工作仍然在进展中，还没有形成明确的结论。我们主要通过利用了 IRAM 30m 望远镜对一批红外暗云进行观测，观测的谱线分别是： HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 。利用光学厚的 HCO^+ ，并结合光学薄的 N_2H^+ 对这批红外暗云的动力学结构进行测量后，我们发现丝状的红外暗云存在着速度梯度；我们将结合 NH_3 谱线，对这批红外暗云的温度和密度结构进行分析；还将分析红外暗云中的分子和尘埃团块的物理形态，并且研究其稳定性。

大质量恒星形成早期阶段的团块碎裂是一个非常重要的过程。在该项目中，目的是研究在大尺度和小尺度上团块、致密核和凝聚核的栖息环境，及其在不同波段不同尺度的团块碎裂特征。我们的样本共有八个大质量恒星形成区，包括：G18.17, G18.21, G23.97N, G23.98, G23.44, G23.97S, G25.38, G25.71。这些样本主要选自于 850 和 450 μm 的 SCAMPS 巡天项目。随后，我们利用 1.3 cm 的 VLA D 阵列、3.5 和 1.3 mm 的 PbBI BCD 阵列、870 μm 的 APEX 对其进行了跟踪观测。另外，我们还结合 4.5, 8.0, 24, 70 μm 的红外数据研究该样本的碎裂和演化阶段。通过质量-尺度关系的比较，我们认为这八个样本中的致密核、凝聚核是一批很好的大质量恒星形成的候选体。这些团块的恒星形成可能来自于附近的超致密电离氢区的触发和影响。它们的质量谱数据表明湍流可能主导着团块的碎裂过程。另外，对于分子气体氘化的研究仍在进展中。

在大质量恒星形成过程中，超超致密电离氢区的形成也是一个非常重要的阶段。谱线和连续谱的观测能够揭秘其动力学环境。在该项目中，我们给出了高分辨率的 SMA 和 VLA 超超致密电离氢区 G35.58-0.03 的观测。在 1.3 mm 的 SMA 和 1.3 cm 的 VLA 观测中，我们一共探测到 25 条不同的跃迁线，其中包括 8 种不同的分子和原子的同位素，如 CO , CH_3CN , SO_2 , CH_3CCH , OCS , CS , $\text{H30}\alpha/\text{H38}\beta$, NH_3 。超超致密电离氢区中的致密核的电子温度为 $T_e^* \geq 5500 \text{ K}$,

发射测量为 $EM \approx 1.9 \times 10^9 \text{ pc cm}^{-6}$ ，电子体密度为 $n_e = 3.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ，射电复合线 $H30\alpha$ 和 $H38\beta$ 的线宽是 $FWHM \approx 43.2 \text{ km s}^{-1}$ ，核本征尺度为 $\sim 3714 \text{ AU}$ 。射电复合线 $H30\alpha$ 呈现出电离外向流驱动分子外向流的证据。基于测量的 Lyman 连续谱流量，可能有一个等同于 O6.5 型的早期恒星位于该电离氢区内部。结合 3.6 cm, 2.0 cm, 1.3 cm, 1.3 mm, 0.85 mm, 0.45 mm 的连续谱数据，我们对该超超致密电离氢区中的致密核进行了能谱拟合，发现自由-自由辐射和热尘埃气体辐射在 1.3 mm 处总测量流量的贡献分别是 75% ~ 45% 和 25% ~ 55%。另外，分子包层显示出内流和外流的特征，其质量下落率和质量损失率分别为 $0.033 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 和 $5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。平均每年气体内流和外流的动量也是一致的，约为 $0.05 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ 。我们认为，物质下落占有主导地位，致密气体的包层质量在迅速的增加中，但是内部的吸积可能已经被迫停止。

在随后的科研工作中，我们将尽快完成该论文中所提及的尚未完成的项目，比如致密冷团块的氘化、稳定性和化学，红外暗云方面的研究，以及大质量恒星形成区中宁静核的 H_2D^+ 方面的研究。关于这几方面的课题，我们已经获得了许多高质量的观测数据，部分研究项目已经展开，期望获得高质量的研究成果。

通常，作为激发星，年轻的 OB 型星有着强烈的自由-自由辐射。来自于这些激发星的紫外辐射能够加热尘埃和电离气体，并且推动周围的物质向外膨胀，形成我们所说的红外尘泡。来自于演化星对尘泡壳层的辐射反馈有可能触发形成新一代的恒星。通过对尘泡 N68 的位置-速度分布图的研究，我们发现其壳层结构可能正在向外膨胀。对于尘泡 S51，通过比较分子气体和 Spitzer 8.0 μm 辐射，我们认为该尘泡位于运动学距离 3.4 kpc 处。利用 ^{13}CO 和 C^{18}O 的观测数据，尘泡 S51 的壳层结构和前端云都清晰的展现出来。另外，一个外向流和内流特征的分子云被发现于尘泡壳层结构上。该内外流可能代表了新一代的恒星形成，并且是来自于尘泡的膨胀所触发形成的。对于尘泡 N131，我们的目的是研究与其成协的恒星形成，并且推测其起源。通过多方面的分析，我们认为尘泡 N131 可能形成于一个丝状的分子云。由于该丝状云内部来自于成群的较强烈的恒星风的作用，随着物质的被动向外膨胀，强烈的恒星风碎裂了该丝状云，使其形成两段式的丝状云，中间夹着一个很大的尘泡的结构。

附录 A 红外暗云

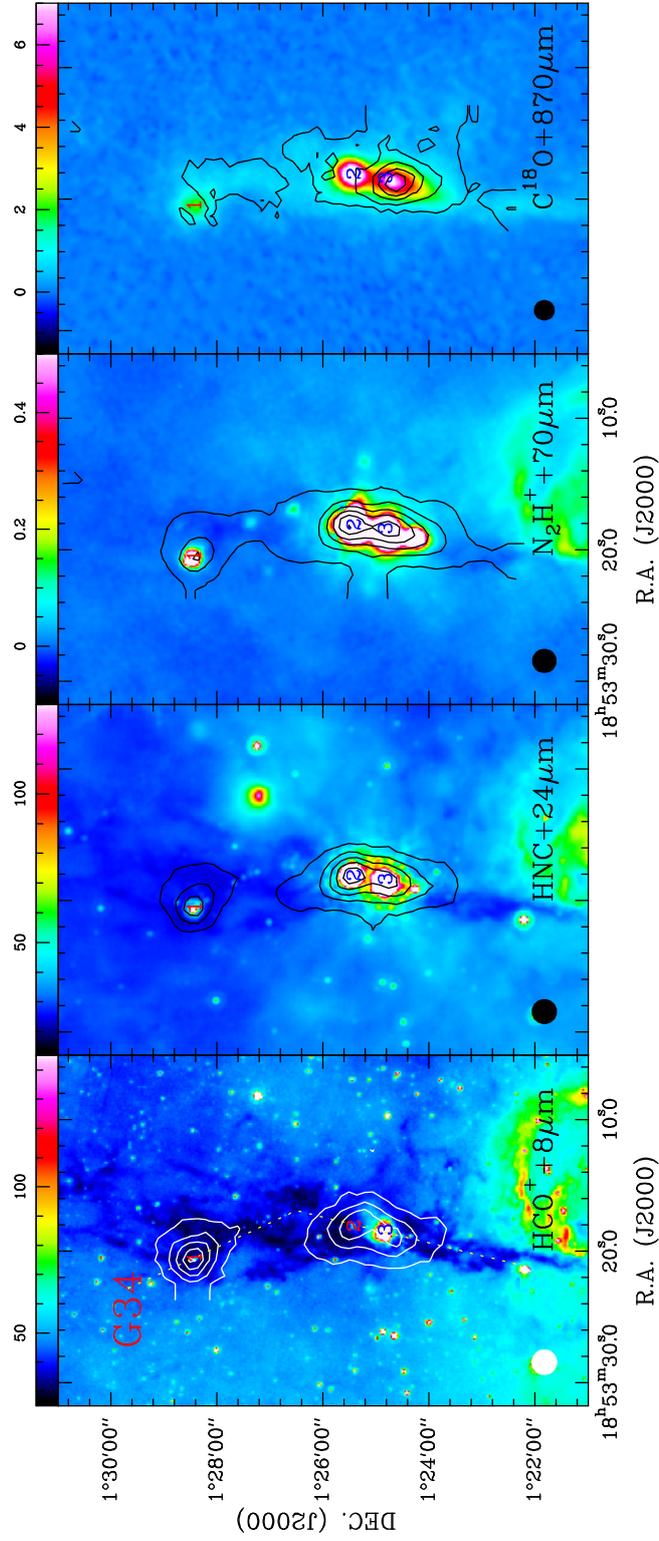


图 A.1: 红外暗云 G34 的 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的积分强度图。等值线图为分子气体辐射，背景彩图为尘埃辐射，其对应的名称标在了图中。在每个图的左下角还标注出了空间分辨率的大小。

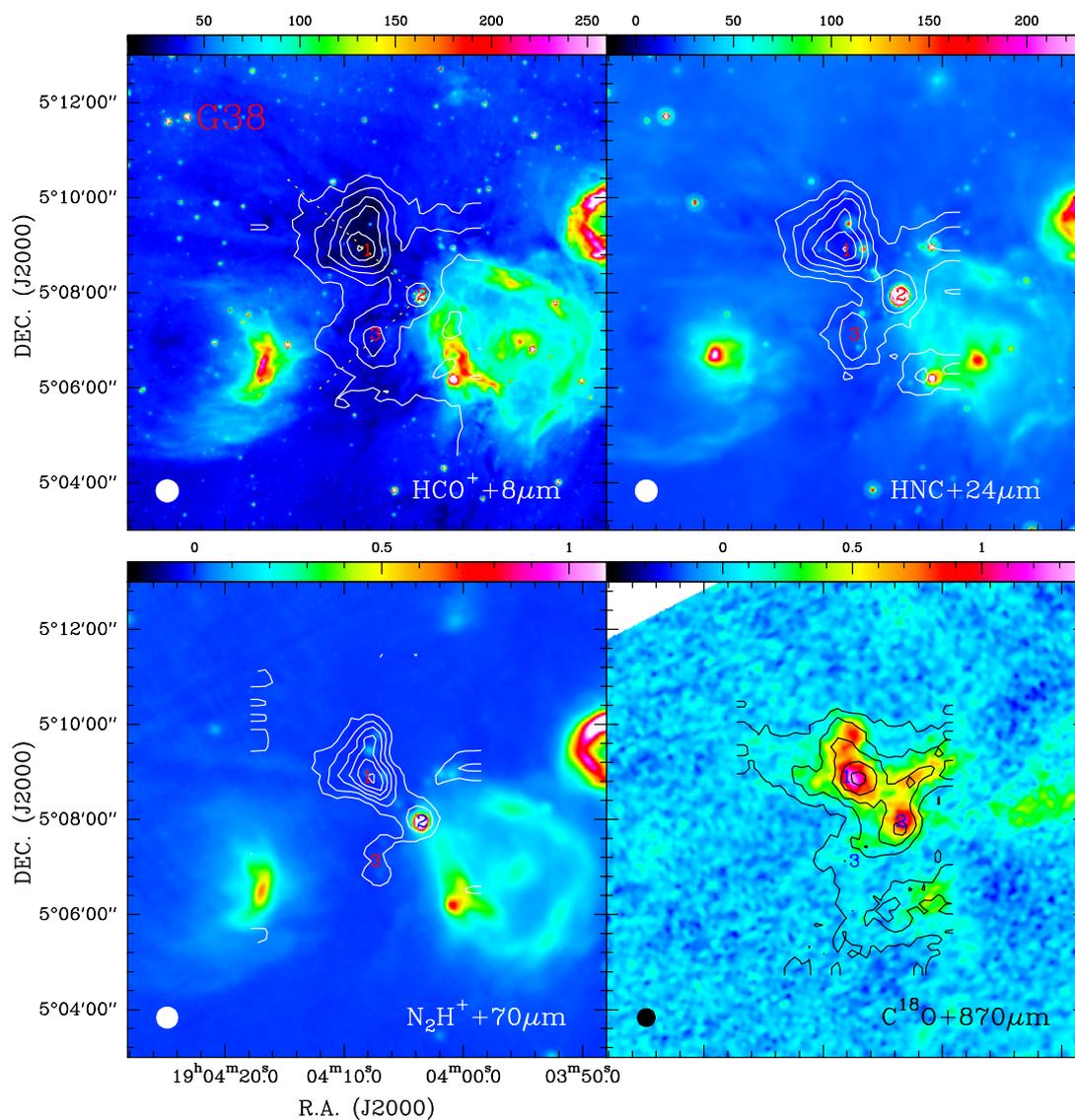


图 A.2: 红外暗云 G38 的 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的积分强度图。等值线图为分子气体辐射，背景彩图为尘埃辐射，其对应的名称标在了图中。在每个图的左下角还标注出了空间分辨率的大小。

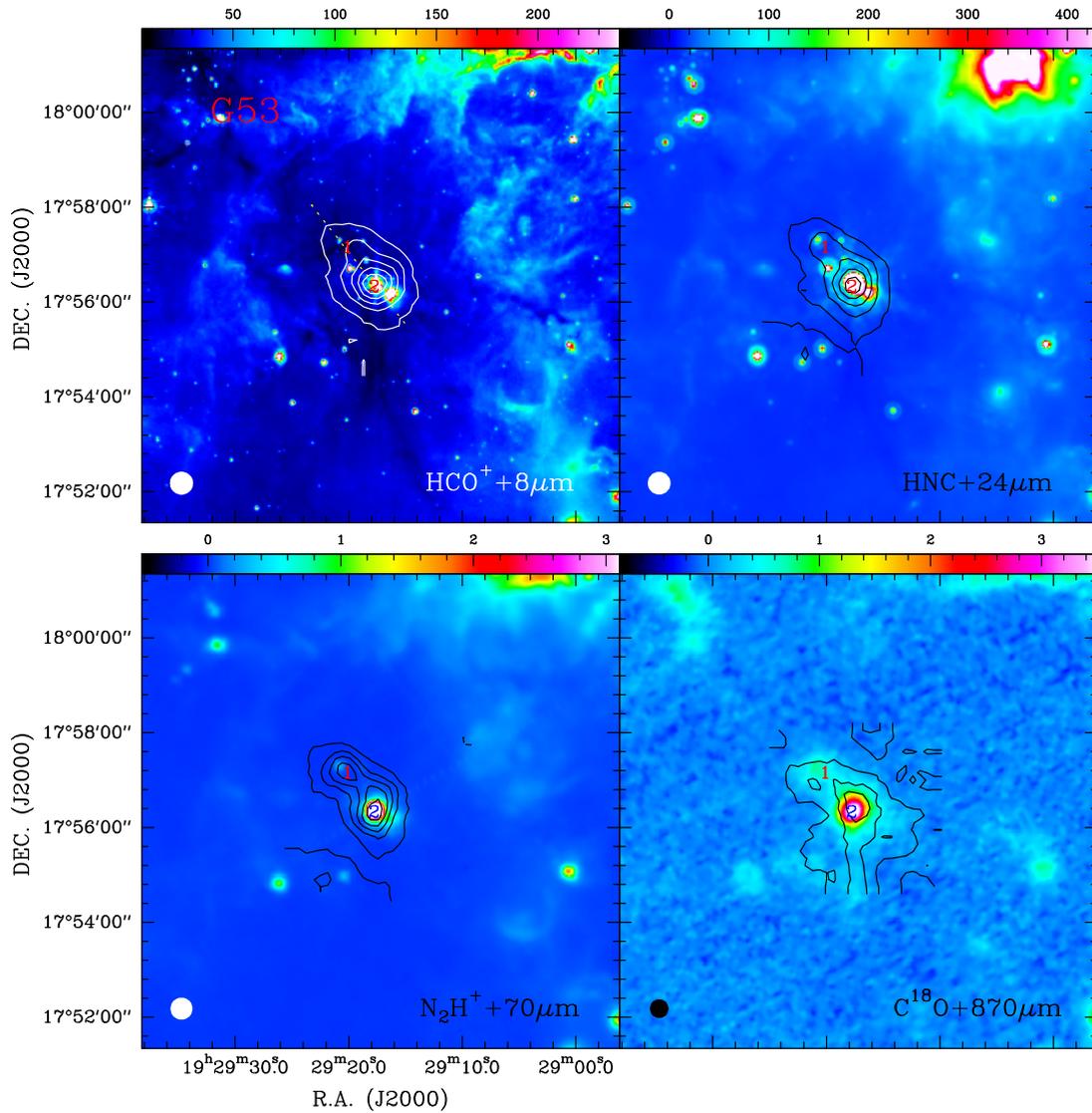


图 A.3: 红外暗云 G53 的 HCO^+ 、 HNC 、 N_2H^+ 和 C^{18}O 的积分强度图。等值线图为分子气体辐射，背景彩图为尘埃辐射，其对应的名称标在了图中。在每个图的左下角还标注出了空间分辨率的大小。

附录 B 致密冷核的碎裂和汽化

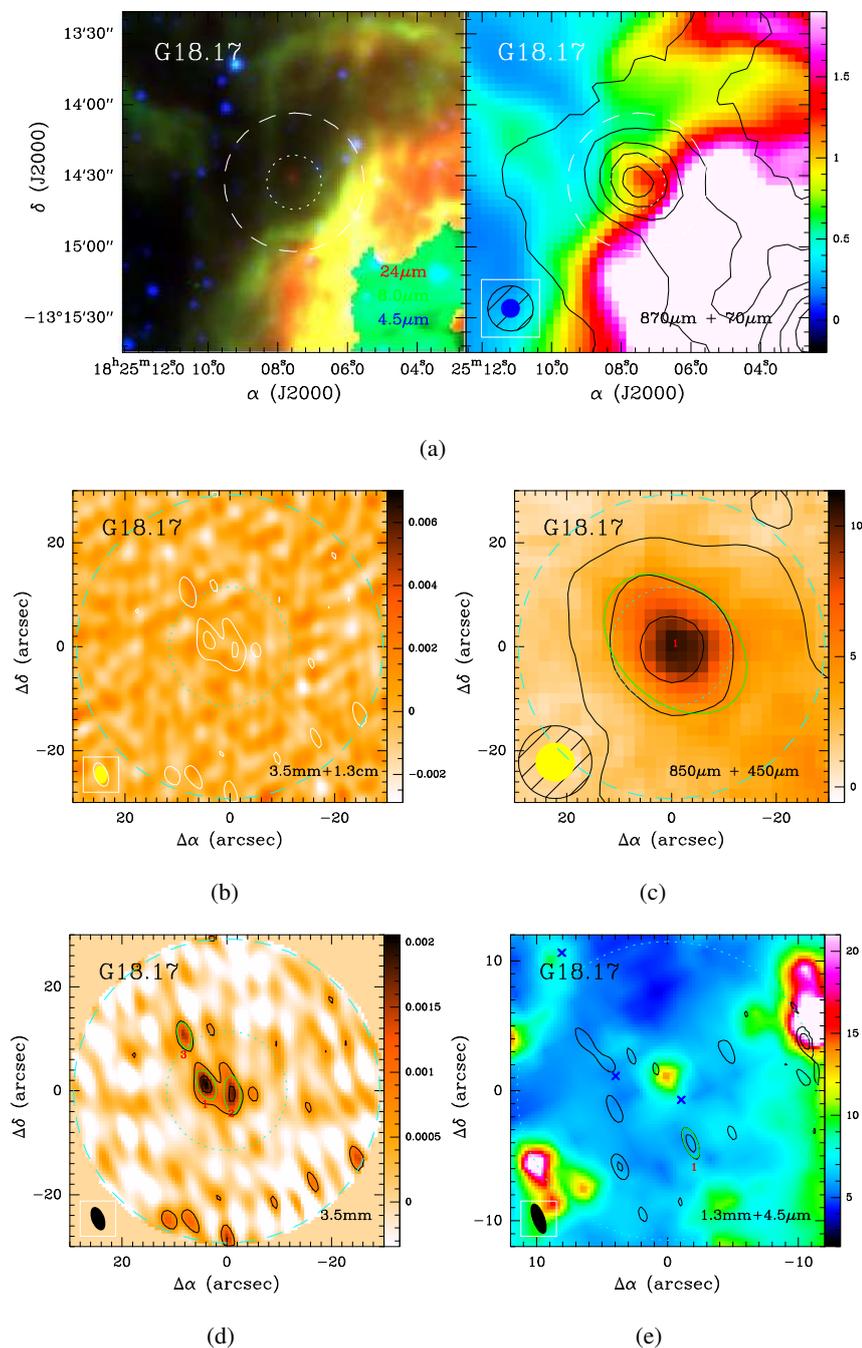


图 B.1: G18.17 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图, 其中, 4.5 μm 为蓝色, 8.0 μm 为绿色, 24 μm 为红色; 870 μm 与 70 μm 的叠图, 870 μm 的等值线始于 6σ , 步长是 8σ ($\sigma = 54 \text{ mJy beam}^{-1}$). (b) 1.3 cm 与 3.5 mm 的叠图. (c) 850 μm 和 450 μm 的叠图, 其中 850 μm 的等值线始于 6σ , 步长是 8σ ($\sigma = 83 \text{ mJy beam}^{-1}$). 对于 CD 阵列, (d) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 4σ ($\sigma = 0.23 \text{ mJy beam}^{-1}$), (e) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 2σ ($\sigma = 1.67 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 24 μm 背景图上. 在 1.3 mm CD 阵列的图上, 叉号标记出了 3.5 mm CD 阵列观测的致密核位置. 24 μm 和 70 μm 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} , 其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} .

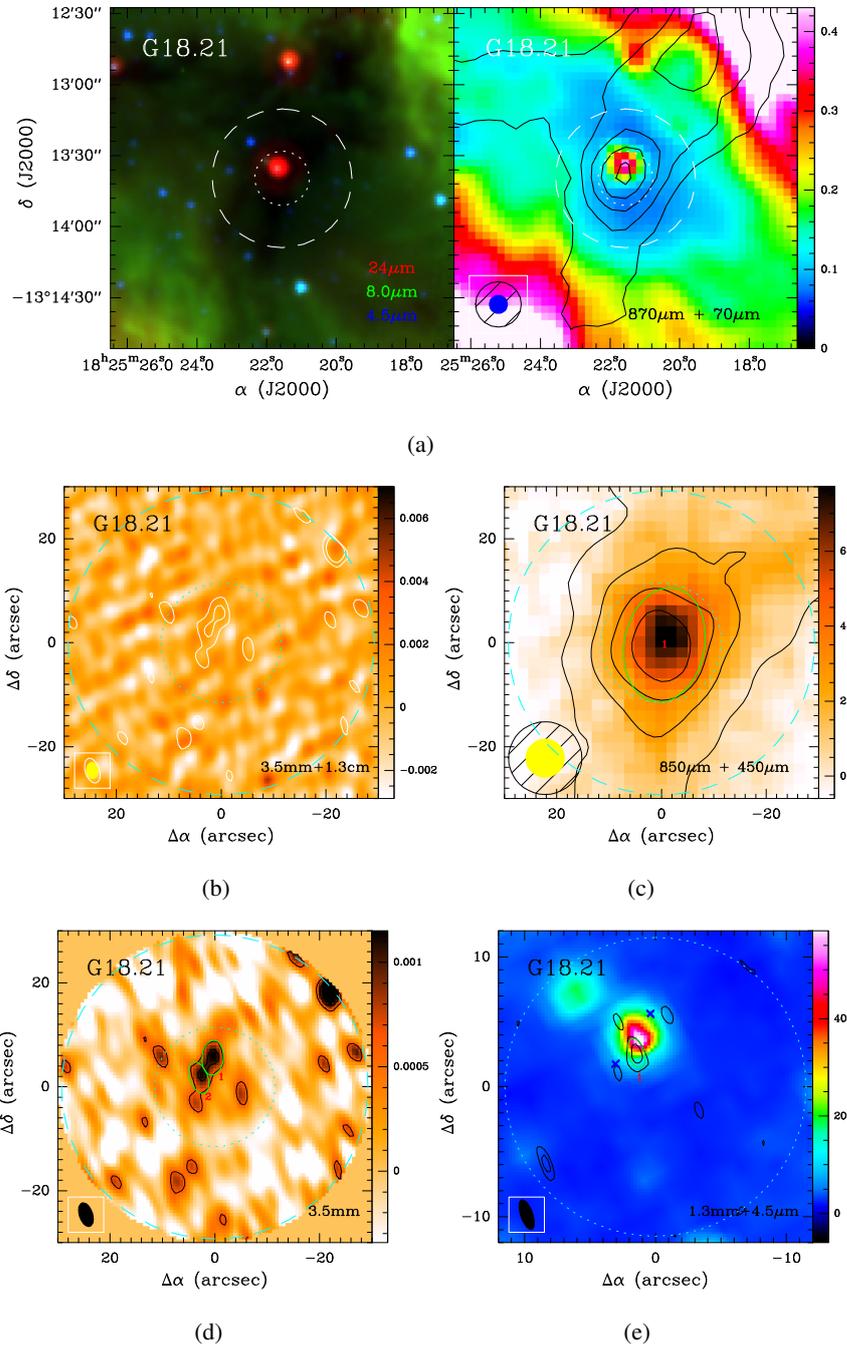


图 B.2: G18.21 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图, 其中, $4.5 \mu\text{m}$ 为蓝色, $8.0 \mu\text{m}$ 为绿色, $24 \mu\text{m}$ 为红色; $870 \mu\text{m}$ 与 $70 \mu\text{m}$ 的叠图, $870 \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ , 步长是 7σ ($\sigma = 54 \text{ mJy beam}^{-1}$)。 (b) 1.3 cm 与 3.5 mm 的叠图。 (c) $850 \mu\text{m}$ 和 $450 \mu\text{m}$ 的叠图, 其中 $850 \mu\text{m}$ 的等值线始于 1.2σ , 步长是 4.8σ ($\sigma = 83 \text{ mJy beam}^{-1}$)。对于 CD 阵列, (d) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 2σ ($\sigma = 0.20 \text{ mJy beam}^{-1}$), (e) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 2σ ($\sigma = 1.81 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。在 1.3 mm CD 阵列的图上, 叉号标记出了 3.5 mm CD 阵列观测的致密核位置。 $24 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} , 其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} 。

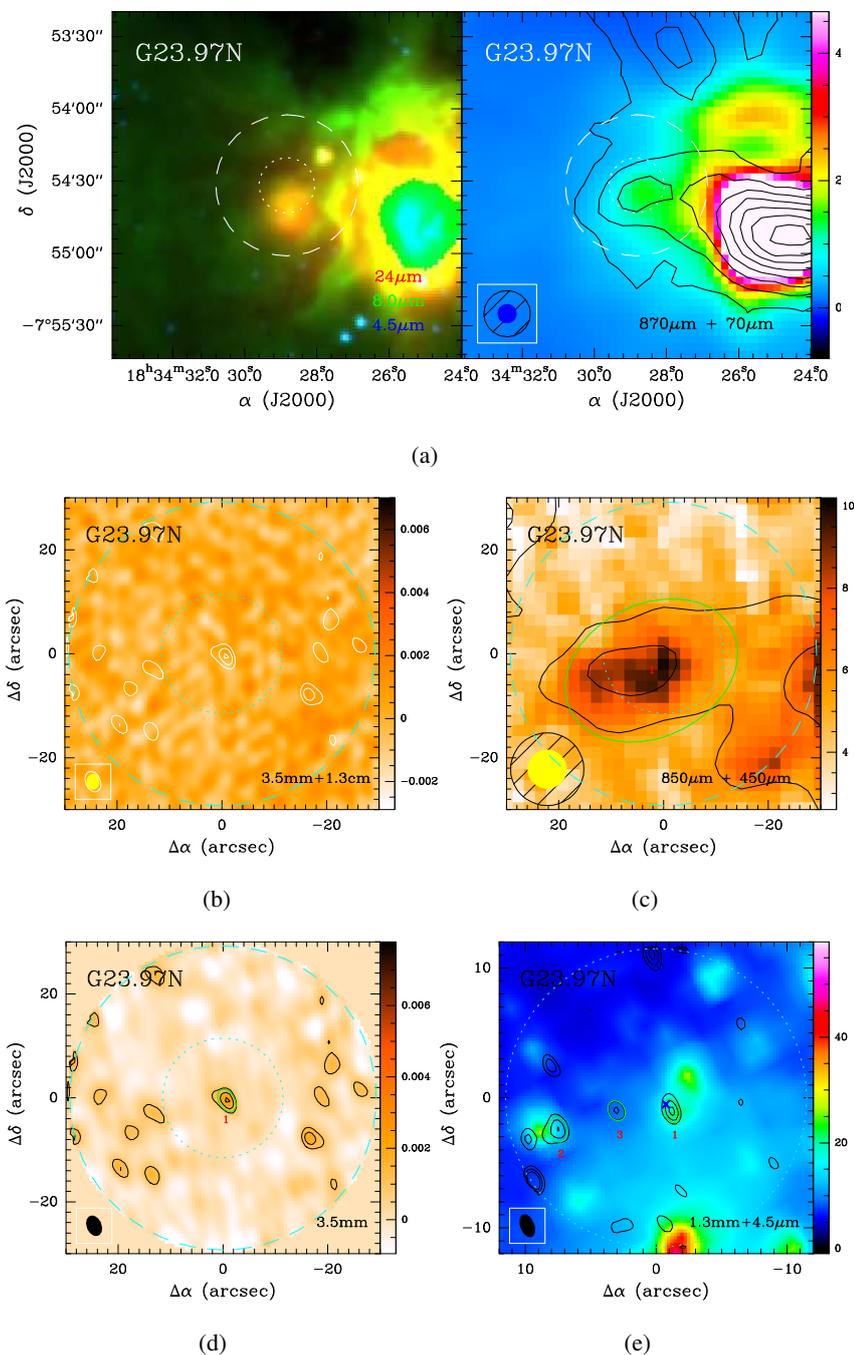


图 B.3: G23.97N 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图, 其中, 4.5 μm 为蓝色, 8.0 μm 为绿色, 24 μm 为红色; 870 μm 与 70 μm 的叠图, 870 μm 的等值线始于 6σ , 步长是 6σ ($\sigma = 54 \text{ mJy beam}^{-1}$)。 (b) 1.3 cm 与 3.5 mm 的叠图。 (c) 850 μm 和 450 μm 的叠图, 其中 850 μm 的等值线始于 3.6σ , 步长是 4.8σ ($\sigma = 83 \text{ mJy beam}^{-1}$)。对于 CD 阵列, (d) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 1.9σ ($\sigma = 0.32 \text{ mJy beam}^{-1}$), (e) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 2σ ($\sigma = 1.62 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 24 μm 背景图上。在 1.3 mm CD 阵列的图上, 叉号标记出了 3.5 mm CD 阵列观测的致密核位置。24 μm 和 70 μm 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} , 其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} 。

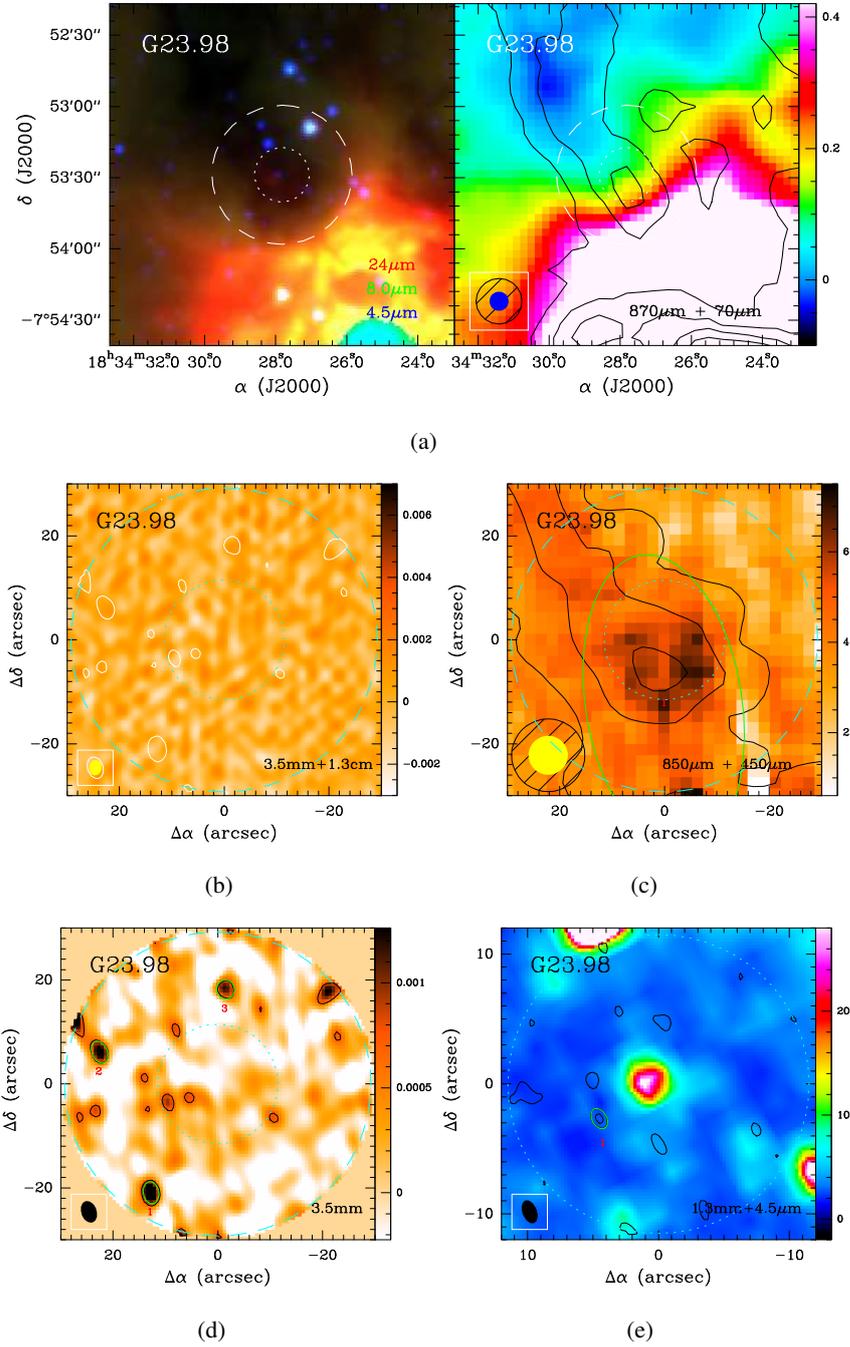


图 B.4: G23.98 的多波段观测成图: (a) RGB 三色图, 其中, $4.5 \mu\text{m}$ 为蓝色, $8.0 \mu\text{m}$ 为绿色, $24 \mu\text{m}$ 为红色; $870 \mu\text{m}$ 与 $70 \mu\text{m}$ 的叠图, $870 \mu\text{m}$ 的等值线始于 6σ , 步长是 6σ ($\sigma = 54 \text{ mJy beam}^{-1}$)。 (b) 1.3 cm 与 3.5 mm 的叠图。 (c) $850 \mu\text{m}$ 和 $450 \mu\text{m}$ 的叠图, 其中 $850 \mu\text{m}$ 的等值线始于 3.6σ , 步长是 4.8σ ($\sigma = 83 \text{ mJy beam}^{-1}$)。对于 CD 阵列, (d) 3.5 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 4σ ($\sigma = 0.22 \text{ mJy beam}^{-1}$), (e) 1.3 mm 的等值线始于 3σ , 步长是 2σ ($\sigma = 1.65 \text{ mJy beam}^{-1}$), 并且叠加在 $24 \mu\text{m}$ 背景图上。在 1.3 mm CD 阵列的图上, 叉号标记出了 3.5 mm CD 阵列观测的致密核位置。 $24 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 数据的单位分别是 MJy sr^{-1} 和 Jy pixel^{-1} , 其它数据的单位都是 Jy beam^{-1} 。

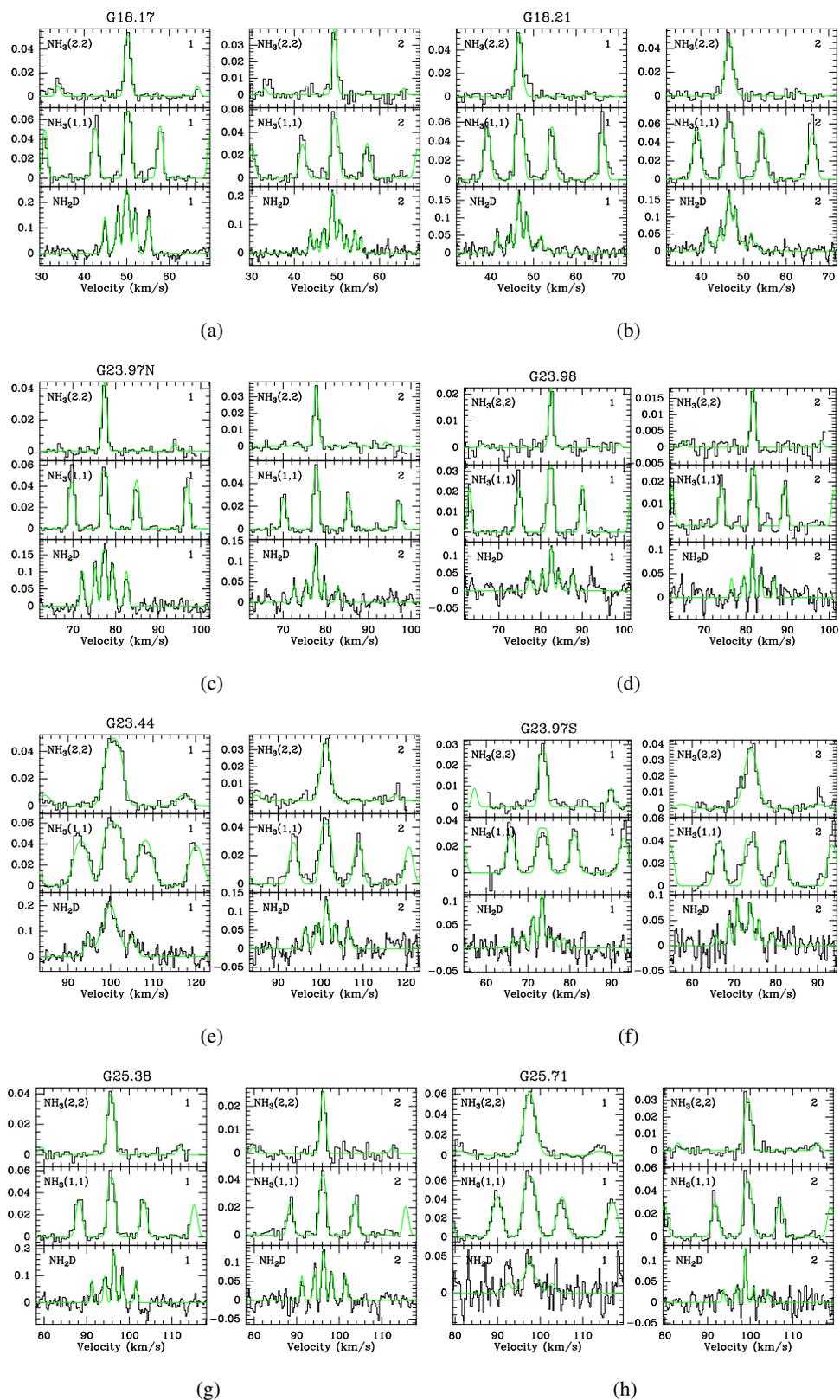
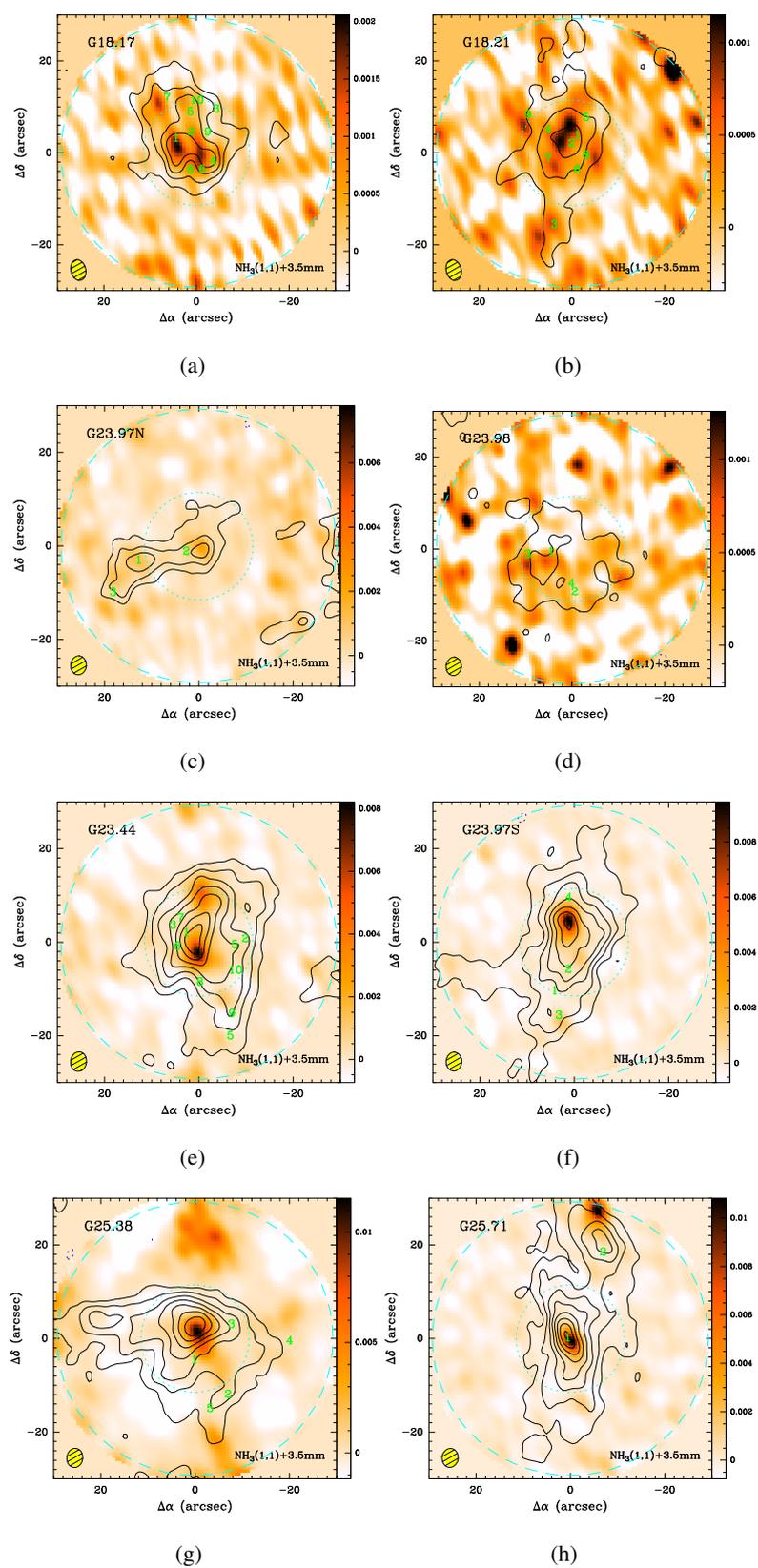


图 B.5: 谱线 NH_2D 、 $\text{NH}_3(1,1)$ 和 $(2,2)$ 。

图 B.6: $\text{NH}_3(1,1)$ 的积分强度图与 3.5 mm 连续谱的叠图。

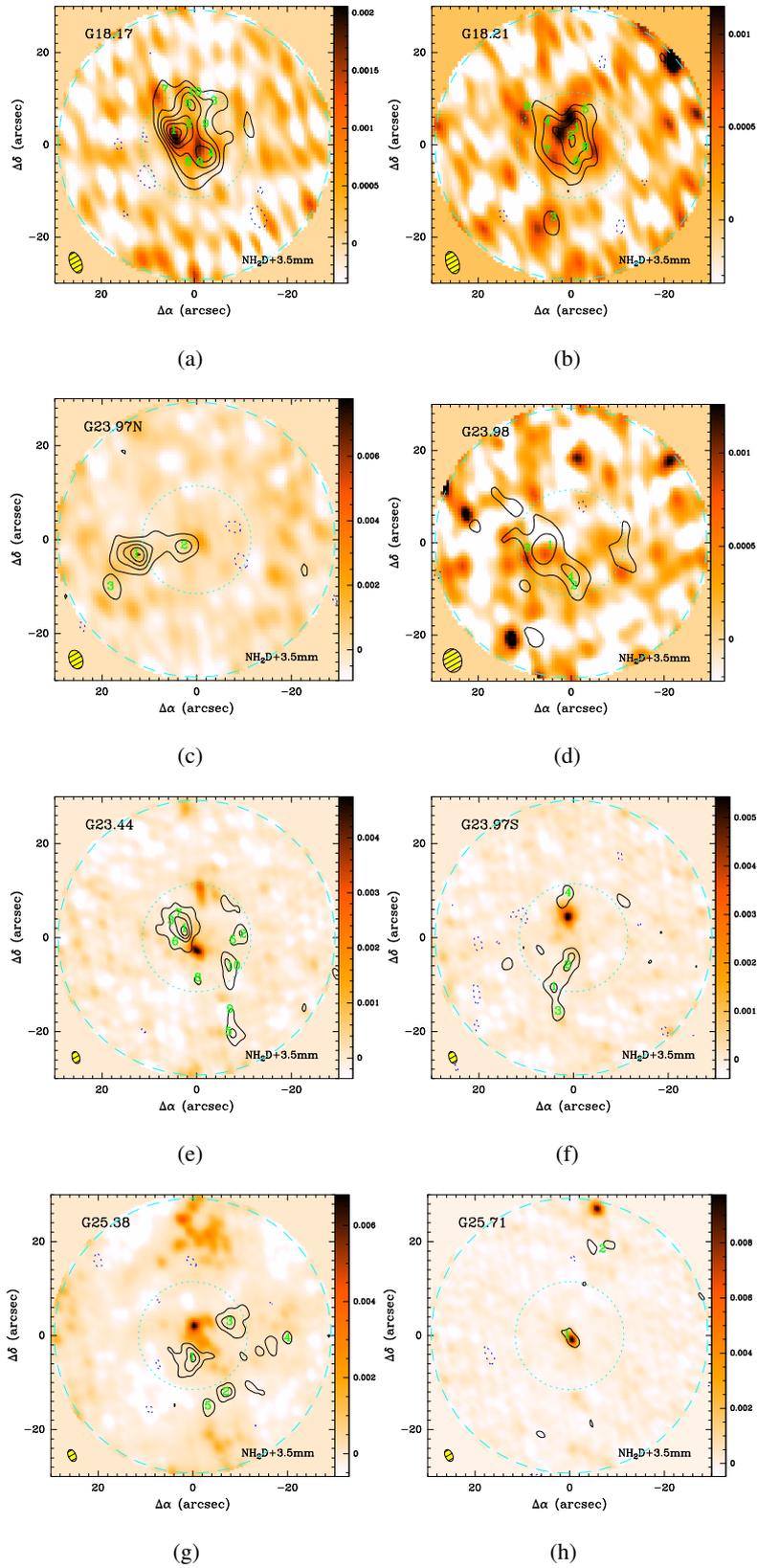


图 B.7: NH_2D 与 3.5 mm 连续谱的叠图。

表 B.1: 450, 850, 870 μm 连续谱的团块参数

Source	No.	Offsets ", "	FWHM "	R_{eff} pc	T_{rot} K	I_{peak} Jy beam $^{-1}$	S_{int} Jy	M_{ass} M_{\odot}	N_{H_2} 10^{22}cm^{-2}	Σ g cm^{-2}	n_{H_2} 10^4cm^{-3}
450 μm											
G1817	1	(-0.74, 0.55)	25.5	0.28	16.8 \pm 1.2	10.5	128.8	1814.3 \pm 300.9	59.0 \pm 9.8	4.92 \pm 0.82	61.9 \pm 10.3
G1821	1	(-0.58, -0.40)	17.9	0.19	12.7 \pm 1.0	7.8	47.3	1248.6 \pm 258.8	89.0 \pm 18.4	7.43 \pm 1.54	138.3 \pm 28.7
G2397N	1	(2.29, -3.20)	29.1	0.40	14.7 \pm 1.2	10.0	157.6	4793.4 \pm 934.0	76.4 \pm 14.9	6.38 \pm 1.24	56.2 \pm 10.9
G2398	1	(0.13, -12.17)	37.5	0.51	13.0 \pm 0.8	7.0	213.8	8894.3 \pm 1440.2	85.1 \pm 13.8	7.11 \pm 1.15	48.5 \pm 7.9
G2344	1	(-0.02, -2.10)	20.9	0.36	24.1 \pm 1.7	41.2	329.8	5560.8 \pm 695.5	108.8 \pm 13.6	9.09 \pm 1.14	88.6 \pm 11.1
G2344	2	(-3.59, 11.96)	9.9	0.17	26.6 \pm 2.3	12.1	26.5	377.0 \pm 57.1	33.1 \pm 5.0	2.76 \pm 0.42	57.1 \pm 8.6
G2397S	1	(-0.98, -1.90)	15.7	0.22	22.1 \pm 3.2	14.1	65.8	832.0 \pm 229.5	45.0 \pm 12.4	3.75 \pm 1.04	60.9 \pm 16.8
G2538	1	(-2.06, -0.30)	22.0	0.36	22.0 \pm 1.4	32.1	282.9	5123.5 \pm 626.4	99.9 \pm 12.2	8.35 \pm 1.02	81.3 \pm 9.9
G2571	1	(-1.75, -0.91)	15.9	0.44	19.2 \pm 0.9	18.7	92.5	6313.3 \pm 617.5	81.7 \pm 8.0	6.83 \pm 0.67	54.1 \pm 5.3
G2571	2	(-6.00, 22.35)	14.1	0.39	18.9 \pm 1.9	8.2	34.0	2411.0 \pm 511.1	39.6 \pm 8.4	3.31 \pm 0.70	29.6 \pm 6.3
850 μm											
G1817	1	(-0.58, -0.39)	32.3	0.35	17.2 \pm 1.3	2.1	11.7	1105.6 \pm 135.1	22.5 \pm 2.7	1.88 \pm 0.23	18.7 \pm 2.3
G1821	1	(0.32, -0.51)	21.9	0.23	13.0 \pm 0.8	1.6	4.1	585.1 \pm 65.7	27.7 \pm 3.1	2.31 \pm 0.26	35.1 \pm 3.9
G2397N	1	(10.88, -2.94)	21.9	0.30	13.8 \pm 0.4	0.9	2.4	506.3 \pm 26.7	14.2 \pm 0.8	1.19 \pm 0.06	13.9 \pm 0.7
G2398	1	(0.65, -6.65)	65.6	0.89	11.9 \pm 1.3	1.1	24.9	6919.4 \pm 1459.2	21.6 \pm 4.6	1.81 \pm 0.38	7.1 \pm 1.5
G2344	1	(0.07, -0.72)	26.6	0.46	24.0 \pm 1.4	7.2	26.7	3813.6 \pm 316.2	45.8 \pm 3.8	3.83 \pm 0.32	29.3 \pm 2.4
G2397S	1	(-0.74, -0.01)	21.5	0.29	22.2 \pm 2.0	3.3	8.4	857.2 \pm 108.8	24.8 \pm 3.1	2.07 \pm 0.26	24.6 \pm 3.1
G2397S	2	(9.60, -25.16)	23.2	0.32	15.4 \pm 1.3	0.7	2.4	431.8 \pm 60.1	10.7 \pm 1.5	0.90 \pm 0.12	9.8 \pm 1.4
G2538	1	(0.11, -0.39)	28.0	0.46	21.1 \pm 1.3	4.9	19.7	3076.3 \pm 277.1	36.9 \pm 3.3	3.08 \pm 0.28	23.5 \pm 2.1
G2571	1	(0.22, -2.80)	23.0	0.64	18.8 \pm 0.8	2.6	8.3	4446.2 \pm 289.4	27.5 \pm 1.8	2.30 \pm 0.15	12.6 \pm 0.8
G2571	2	(-6.01, 24.50)	21.5	0.59	19.5 \pm 8.7	0.8	2.5	1262.9 \pm 836.4	8.9 \pm 5.9	0.75 \pm 0.49	4.4 \pm 2.9
870 μm											
G1817	1	(2.15, 0.47)	27.5	0.30	16.8 \pm 1.2	1.9	3.9	390.4 \pm 43.4	11.0 \pm 1.2	0.92 \pm 0.10	10.7 \pm 1.2
G1821	1	(2.36, 1.64)	28.3	0.30	13.0 \pm 0.6	1.7	3.7	529.4 \pm 42.7	15.1 \pm 1.2	1.26 \pm 0.10	14.8 \pm 1.2
G2397N	1	(1.27, -2.44)	23.9	0.33	15.0 \pm 1.2	0.8	1.2	230.9 \pm 30.5	5.4 \pm 0.7	0.45 \pm 0.06	4.8 \pm 0.6
G2398	1	(0.23, -3.16)	25.9	0.35	14.0 \pm 0.7	0.7	1.3	265.3 \pm 23.2	5.3 \pm 0.5	0.45 \pm 0.04	4.4 \pm 0.4
G2344	1	(-3.76, -0.61)	27.6	0.47	24.6 \pm 1.6	5.8	12.1	1714.0 \pm 153.9	19.2 \pm 1.7	1.60 \pm 0.14	11.8 \pm 1.1
G2397S	1	(0.66, -0.59)	28.4	0.39	21.6 \pm 1.6	3.2	7.0	757.5 \pm 77.6	12.5 \pm 1.3	1.05 \pm 0.11	9.4 \pm 1.0
G2538	1	(0.78, -1.71)	27.6	0.45	20.8 \pm 1.2	3.4	7.0	1137.1 \pm 96.8	14.1 \pm 1.2	1.18 \pm 0.10	9.1 \pm 0.8
G2571	1	(-0.99, 2.06)	29.7	0.82	18.6 \pm 1.1	1.8	4.2	2323.6 \pm 204.2	8.6 \pm 0.8	0.72 \pm 0.06	3.1 \pm 0.3

表 B.2: 3.5 mm 连续谱的团块参数

Source	No.	Offsets ", "	FWHM "	R_{eff} pc	T_{rot} K	I_{peak} mJy beam $^{-1}$	S_{int}^a mJy	M_{mass} M_{\odot}	N_{H_2} 10^{23}cm^{-2}	Σ g cm^{-2}	n_{H_2} 10^6cm^{-3}
CD track											
G1817	1	(3.96, 1.14)	4.13	0.045	16.1 ± 1.6	1.99	3.44	35.6 ± 4.0	4.4 ± 0.5	3.7 ± 0.4	2.9 ± 0.3
G1817	2	(-1.05, -0.69)	4.13	0.045	18.5 ± 1.6	1.73	3.41	30.2 ± 3.0	3.8 ± 0.4	3.1 ± 0.3	2.4 ± 0.2
G1817	3	(8.06, 10.63)	3.25	0.035	16.5 ± 1.3	1.55	1.76	17.7 ± 1.5	3.5 ± 0.3	3.0 ± 0.3	2.9 ± 0.3
G1821	1	(0.39, 5.62)	4.98	0.052	14.4 ± 1.9	1.21	2.51	27.4 ± 4.2	2.5 ± 0.4	2.1 ± 0.3	1.4 ± 0.2
G1821	2	(3.06, 1.77)	4.29	0.045	14.2 ± 1.3	0.85	1.39	15.5 ± 1.7	1.9 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.2 ± 0.1
G2397N	1	(-0.74, -0.49)	3.57	0.049	17.6 ± 1.2	2.19	2.64	39.0 ± 2.9	4.1 ± 0.3	3.4 ± 0.3	2.5 ± 0.2
G2398	1	(12.74, -20.92)	3.44	0.047	57.8 ± 108.6	1.83	1.87	7.7 ± 15.0	0.9 ± 1.7	0.7 ± 1.4	0.5 ± 1.1
G2398	2	(22.55, 6.13)	3.48	0.047	48.1 ± 44.7	1.44	1.51	7.6 ± 7.3	0.8 ± 0.8	0.7 ± 0.7	0.5 ± 0.5
G2398	3	(-1.49, 18.2)	3.55	0.048	24.0 ± 9.7	1.29	1.31	13.6 ± 6.0	1.5 ± 0.6	1.2 ± 0.5	0.9 ± 0.4
G2344	1	(0.09, -2.43)	4.08	0.070	31.0 ± 6.4	7.83	11.01 ^{41.4%}	57.2 ± 12.7	2.9 ± 0.7	2.4 ± 0.5	1.2 ± 0.3
G2344	2	(-0.8, 10.11)	4.55	0.078	27.1 ± 2.9	4.65	8.46 ^{30.7%}	37.6 ± 4.3	1.6 ± 0.2	1.3 ± 0.1	0.6 ± 0.1
G2344	3	(-4.15, -3.94)	4.08	0.070	26.3 ± 5.0	1.67	2.26	33.9 ± 7.0	1.7 ± 0.4	1.5 ± 0.3	0.7 ± 0.1
G2344	4	(2.73, -4.45)	3.61	0.062	33.5 ± 6.1	1.42	1.75	20.2 ± 3.9	1.3 ± 0.3	1.1 ± 0.2	0.6 ± 0.1
G2344	5	(-0.11, 2.1)	4.89	0.084	24.7 ± 3.8	1.43	2.96	47.5 ± 7.9	1.7 ± 0.3	1.4 ± 0.2	0.6 ± 0.1
G2344	6	(-4.79, 9.2)	3.62	0.062	24.8 ± 2.5	1.29	1.52	24.3 ± 2.7	1.6 ± 0.2	1.3 ± 0.1	0.7 ± 0.1
G2397S	1	(1.13, 4.45)	4.04	0.055	32.6 ± 5.7	9.43	14.71 ^{22.2%}	24.8 ± 4.6	2.0 ± 0.4	1.7 ± 0.3	1.1 ± 0.2
G2397S	2	(2.6, -17.24)	3.25	0.044	15.7 ± 1.7	1.76	1.81	30.6 ± 3.8	3.9 ± 0.5	3.2 ± 0.4	2.5 ± 0.3
G2397S	3	(-1.07, -3.21)	3.52	0.048	18.0 ± 2.9	1.50	1.83	26.6 ± 4.7	2.9 ± 0.5	2.4 ± 0.4	1.7 ± 0.3
G2397S	4	(3.04, 0.42)	3.89	0.053	20.0 ± 2.8	1.44	2.19	28.2 ± 4.3	2.5 ± 0.4	2.1 ± 0.3	1.4 ± 0.2
G2538	1	(-0.81, 1.26)	4.74	0.077	27.4 ± 2.7	11.29	22.36 ^{44.0%}	127.9 ± 13.4	5.4 ± 0.6	4.5 ± 0.5	2.0 ± 0.2
G2538	2	(-4.01, 21.42)	5.41	0.088	18.4 ± 4.5	7.88	20.04 ^{68.3%}	274.4 ± 73.9	8.8 ± 2.4	7.4 ± 2.0	2.9 ± 0.8
G2538	3	(1.4, 23.66)	4.62	0.075	61.4 ± 69.0	5.80	11.57	64.3 ± 74.8	2.8 ± 3.3	2.4 ± 2.8	1.1 ± 1.3
G2538	4	(-4.68, -21.99)	4.44	0.072	13.9 ± 4.8	4.25	8.86	243.9 ± 96.8	11.6 ± 4.6	9.7 ± 3.9	4.7 ± 1.9
G2538	5	(-2.28, -3.24)	4.00	0.065	17.8 ± 1.3	4.13	5.85	122.4 ± 10.3	7.2 ± 0.6	6.0 ± 0.5	3.2 ± 0.3
G2538	6	(2.08, 18.57)	3.86	0.063	22.8 ± 6.3	3.37	4.32	68.4 ± 20.6	4.3 ± 1.3	3.6 ± 1.1	2.0 ± 0.6
G2538	7	(-3.94, 16.02)	3.80	0.062	19.2 ± 3.8	3.08	3.89	74.4 ± 16.1	4.8 ± 1.1	4.0 ± 0.9	2.3 ± 0.5
G2538	8	(-5.76, -7.39)	4.70	0.077	17.2 ± 1.3	2.10	4.21	91.0 ± 7.6	3.9 ± 0.3	3.2 ± 0.3	1.5 ± 0.1
G2571	1	(-5.76, 27.18)	3.66	0.101	27.8 ± 4.5	11.47	13.70 ^{49%}	20.2 ± 3.6	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.1 ± 0.0
G2571	2	(-0.27, -0.65)	3.67	0.102	22.3 ± 2.6	11.04	13.56 ^{15.8%}	100.3 ± 12.7	2.4 ± 0.3	2.0 ± 0.3	0.7 ± 0.1

表 B.2: 3.5 mm 连续谱的团块参数 (续)

G2571	3	(-4.05, 23.64)	3.61	0.100	22.3 ± 2.2	2.11	2.98	139.8 ± 15.4	3.5 ± 0.4	2.9 ± 0.3	1.0 ± 0.1
BCD track											
G2344	1	(-0.05, -2.81)	2.59	0.044	37.3 ± 15.0	4.80	10.58 ^{41.4%}	45.2 ± 19.2	5.7 ± 2.4	4.8 ± 2.0	3.8 ± 1.6
G2344	2	(-0.8, 10.48)	2.22	0.038	27.7 ± 3.3	2.89	4.69 ^{30.7%}	20.3 ± 2.6	3.5 ± 0.5	2.9 ± 0.4	2.7 ± 0.3
G2344	3	(-1.1, 7.91)	2.04	0.035	26.0 ± 2.6	1.21	1.60	24.3 ± 2.6	5.0 ± 0.5	4.2 ± 0.4	4.1 ± 0.4
G2344	4	(0.86, -0.13)	2.01	0.034	24.9 ± 3.3	1.28	1.59	25.3 ± 3.6	5.3 ± 0.8	4.5 ± 0.6	4.5 ± 0.6
G2344	5	(-4.03, 8.96)	2.21	0.038	25.0 ± 2.3	1.09	1.71	27.0 ± 2.7	4.7 ± 0.5	3.9 ± 0.4	3.6 ± 0.4
G2344	6	(-0.1, 2.04)	2.15	0.037	25.5 ± 4.4	0.82	1.23	19.0 ± 3.5	3.5 ± 0.7	2.9 ± 0.5	2.8 ± 0.5
G2397S	1	(1.09, 4.35)	2.67	0.037	29.8 ± 4.3	5.56	12.22 ^{22.2%}	22.7 ± 3.5	4.3 ± 0.7	3.5 ± 0.5	3.4 ± 0.5
G2397S	2	(2.66, 6.29)	1.96	0.027	28.6 ± 3.9	1.46	1.72	15.0 ± 2.2	5.2 ± 0.8	4.4 ± 0.6	5.7 ± 0.8
G2397S	3	(3.1, 0.1)	2.43	0.033	19.6 ± 3.0	0.81	1.45	19.1 ± 3.2	4.3 ± 0.7	3.6 ± 0.6	3.8 ± 0.6
G2538	1	(-0.34, 1.97)	2.44	0.040	28.6 ± 3.5	6.60	11.78 ^{44.0%}	64.2 ± 8.5	10.1 ± 1.3	8.5 ± 1.1	7.4 ± 1.0
G2538	2	(2.09, 24.6)	2.45	0.040	17.9 ± 1.6	4.32	7.71 ^{68.3%}	109.2 ± 10.8	17.1 ± 1.7	14.3 ± 1.4	12.5 ± 1.2
G2538	3	(-3.46, 21.19)	3.72	0.061	17.9 ± 1.6	2.87	11.87	246.2 ± 24.4	16.7 ± 1.7	14.0 ± 1.4	8.0 ± 0.8
G2538	4	(-0.1, 27.37)	2.32	0.038	17.9 ± 1.6	2.71	4.36	90.5 ± 9.0	15.8 ± 1.6	13.2 ± 1.3	12.2 ± 1.2
G2538	5	(-1.96, -1.5)	3.46	0.056	22.2 ± 2.5	2.70	9.99	163.5 ± 20.3	12.8 ± 1.6	10.7 ± 1.3	6.6 ± 0.8
G2538	6	(0.43, 21.97)	2.18	0.036	17.9 ± 1.6	2.62	3.82	79.3 ± 7.8	15.7 ± 1.6	13.1 ± 1.3	12.9 ± 1.3
G2538	7	(2.77, 19.17)	2.49	0.041	17.9 ± 1.6	2.45	4.60	95.4 ± 9.4	14.5 ± 1.4	12.1 ± 1.2	10.4 ± 1.0
G2538	8	(-3.31, 3.02)	2.34	0.038	22.2 ± 3.2	2.46	4.31	70.4 ± 10.9	12.1 ± 1.9	10.1 ± 1.6	9.2 ± 1.4
G2538	9	(-1.22, 19.79)	2.17	0.035	17.9 ± 1.6	1.75	2.59	53.6 ± 5.3	10.7 ± 1.1	8.9 ± 0.9	8.8 ± 0.9
G2538	10	(6.51, 15.51)	2.08	0.034	17.9 ± 1.6	1.57	2.05	42.5 ± 4.2	9.2 ± 0.9	7.7 ± 0.8	7.9 ± 0.8
G2538	11	(-7.06, 18.99)	2.49	0.041	17.9 ± 1.6	1.50	3.33	69.0 ± 6.8	10.5 ± 1.0	8.7 ± 0.9	7.5 ± 0.7
G2538	12	(-5.11, 23.95)	2.88	0.047	17.9 ± 1.6	1.45	3.81	78.9 ± 7.8	9.0 ± 0.9	7.5 ± 0.7	5.6 ± 0.5
G2538	13	(1.08, -0.43)	2.27	0.037	24.4 ± 2.0	1.40	2.14	31.5 ± 2.7	5.7 ± 0.5	4.8 ± 0.4	4.5 ± 0.4
G2538	14	(-4.51, 18.23)	2.21	0.036	17.9 ± 1.6	1.33	2.14	44.4 ± 4.4	8.5 ± 0.8	7.1 ± 0.7	6.9 ± 0.7
G2538	15	(-4.54, -6.68)	2.23	0.036	16.6 ± 1.9	1.16	1.76	39.7 ± 5.0	7.5 ± 0.9	6.3 ± 0.8	6.0 ± 0.8
G2538	16	(-4.95, -3.56)	2.14	0.035	17.9 ± 1.6	1.32	1.87	38.8 ± 3.8	8.0 ± 0.8	6.7 ± 0.7	6.7 ± 0.7
G2571	1	(-0.58, -0.92)	1.89	0.052	23.4 ± 3.8	9.72	10.86 ^{15.8%}	76.0 ± 13.5	7.0 ± 1.2	5.8 ± 1.0	3.9 ± 0.7
G2571	2	(-5.86, 26.88)	2.18	0.060	27.1 ± 7.2	9.20	13.10 ^{4.0%}	19.9 ± 5.7	1.4 ± 0.4	1.1 ± 0.3	0.7 ± 0.2
G2571	3	(-1.5, -13.11)	2.06	0.057	17.6 ± 1.8	1.19	1.52	92.3 ± 10.6	7.1 ± 0.8	5.9 ± 0.7	3.6 ± 0.4
G2571	4	(1.73, 0.31)	2.72	0.075	22.0 ± 2.2	1.17	2.88	136.6 ± 15.0	6.0 ± 0.7	5.0 ± 0.6	2.3 ± 0.3

^a 标出了总流量中来自尘埃辐射的贡献。

表 B.3: 1.3 mm 连续谱的团块参数

Source	No.	Offsets ", "	FWHM "	R_{eff} pc	T_{rot} K	I_{peak} mJy beam ⁻¹	S_{int} mJy	M_{mass} M_{\odot}	N_{H_2} 10^{23}cm^{-2}	Σ g cm^{-2}	\dot{m}_{H_2} 10^6cm^{-3}
CD track											
G1817	1	(-1.79, -4.01)	1.29	0.014	18.8 ± 1.6	10.81	11.01	3.9 ± 0.4	5.0 ± 0.5	4.2 ± 0.4	10.3 ± 1.1
G1821	1	(1.46, 2.6)	1.55	0.016	15.3 ± 2.0	11.61	13.72	6.0 ± 1.1	5.7 ± 1.0	4.7 ± 0.8	10.1 ± 1.8
G2397N	1	(-1.19, -0.99)	1.38	0.019	17.7 ± 1.2	12.39	13.58	8.2 ± 0.8	5.8 ± 0.5	4.8 ± 0.4	9.0 ± 0.8
G2397N	2	(7.51, -2.45)	1.67	0.023	23.4 ± 1.2	11.12	16.07	6.8 ± 0.5	3.3 ± 0.2	2.7 ± 0.2	4.2 ± 0.3
G2397N	3	(3.02, -0.99)	1.38	0.019	17.8 ± 1.5	8.64	8.66	5.2 ± 0.6	3.7 ± 0.4	3.1 ± 0.3	5.7 ± 0.6
G2398	1	(4.52, -2.66)	1.31	0.018	16.5 ± 2.1	10.05	10.07	6.7 ± 1.1	5.3 ± 0.9	4.4 ± 0.7	8.6 ± 1.5
G2344	1	(-0.07, -3.26)	2.59	0.044	38.1 ± 16.7	33.35	121.65	45.5 ± 22.8	5.8 ± 2.9	4.8 ± 2.4	3.8 ± 1.9
G2344	2	(0.03, 9.16)	2.00	0.034	27.9 ± 4.3	25.92	54.78	29.6 ± 5.4	6.3 ± 1.2	5.3 ± 1.0	5.4 ± 1.0
G2344	3	(-2.88, -3.21)	1.42	0.024	35.5 ± 9.8	18.85	28.00	11.4 ± 3.6	4.8 ± 1.5	4.0 ± 1.3	5.8 ± 1.8
G2397S	1	(1.06, 4.22)	2.15	0.029	30.1 ± 4.5	43.37	105.43	33.2 ± 5.9	9.6 ± 1.7	8.0 ± 1.4	9.5 ± 1.7
G2397S	2	(-0.6, -7.25)	1.63	0.022	15.8 ± 1.7	9.59	23.73	16.9 ± 2.5	8.5 ± 1.2	7.1 ± 1.0	11.1 ± 1.6
G2538	1	(-0.45, 2.15)	1.62	0.026	29.3 ± 4.1	42.94	65.93	30.4 ± 5.1	10.9 ± 1.8	9.1 ± 1.5	12.0 ± 2.0
G2538	2	(0.58, 1.33)	1.29	0.021	28.2 ± 2.0	16.87	18.88	9.1 ± 0.8	5.1 ± 0.4	4.3 ± 0.4	7.1 ± 0.6
G2538	3	(-1.94, 2.75)	1.45	0.024	25.5 ± 5.9	12.64	18.91	10.3 ± 2.9	4.6 ± 1.3	3.9 ± 1.1	5.7 ± 1.6
G2538	4	(-3.77, 3.19)	1.39	0.023	21.2 ± 2.7	11.89	14.75	10.1 ± 1.6	4.9 ± 0.8	4.1 ± 0.7	6.3 ± 1.0
G2571	1	(-0.81, -1.07)	1.49	0.041	23.9 ± 4.2	28.47	34.99	59.4 ± 13.0	8.7 ± 1.9	7.3 ± 1.6	6.2 ± 1.4
G2571	2	(0.91, -0.47)	1.60	0.044	22.8 ± 3.1	11.04	18.89	34.0 ± 5.8	4.3 ± 0.7	3.6 ± 0.6	2.9 ± 0.5
G2571	3	(2.57, 0.09)	1.45	0.040	21.8 ± 1.9	7.82	9.59	18.3 ± 2.0	2.8 ± 0.3	2.4 ± 0.3	2.1 ± 0.2
BCD track											
G2344	1	(0.05, -2.78)	0.92	0.016	38.4 ± 17.9	17.72	33.12	12.3 ± 6.5	12.4 ± 6.6	10.3 ± 5.5	22.9 ± 12.2
G2344	2	(-0.97, 10.89)	0.75	0.013	27.6 ± 3.0	10.08	12.57	6.9 ± 0.9	10.4 ± 1.4	8.7 ± 1.1	23.7 ± 3.1
G2344	3	(-3.09, -3.44)	1.00	0.017	36.4 ± 13.2	9.06	20.24	8.0 ± 3.3	6.8 ± 2.8	5.7 ± 2.4	11.6 ± 4.8
G2344	4	(-0.97, -3.24)	0.90	0.015	47.8 ± 75.1	9.11	16.95	4.9 ± 8.6	5.2 ± 9.0	4.3 ± 7.6	9.8 ± 17.1
G2344	5	(0.09, 8.82)	0.98	0.017	27.5 ± 4.3	7.57	21.74	11.9 ± 2.3	10.6 ± 2.0	8.9 ± 1.7	18.4 ± 3.5
G2344	6	(0.33, -3.72)	1.11	0.019	37.1 ± 16.2	8.07	23.06	8.9 ± 4.4	6.2 ± 3.1	5.1 ± 2.6	9.4 ± 4.7
G2344	7	(-2.16, -2.53)	0.93	0.016	30.0 ± 7.3	8.19	15.51	7.7 ± 2.2	7.6 ± 2.2	6.3 ± 1.8	13.8 ± 4.0
G2344	8	(-1.54, 9.44)	0.84	0.014	28.0 ± 3.2	7.31	12.15	6.5 ± 0.9	7.9 ± 1.1	6.6 ± 0.9	15.9 ± 2.2
G2344	9	(0.51, 10.26)	0.73	0.012	28.8 ± 4.5	6.65	8.54	4.4 ± 0.8	7.1 ± 1.3	5.9 ± 1.1	16.6 ± 3.1
G2344	10	(0.86, -2.51)	0.75	0.013	31.9 ± 7.6	7.13	9.08	4.2 ± 1.2	6.3 ± 1.8	5.3 ± 1.5	14.4 ± 4.0
G2344	11	(-0.7, 8.86)	0.76	0.013	27.6 ± 3.6	6.54	10.49	5.7 ± 0.9	8.5 ± 1.3	7.1 ± 1.1	18.9 ± 2.9

表 B.3: 1.3 mm 连续谱的团块参数 (续)

G2344	12	(-1.84, 5.79)	0.90	0.015	24.6 ± 2.6	5.22	9.05	5.7 ± 0.7	6.0 ± 0.8	5.0 ± 0.7	11.3 ± 1.5
G2344	13	(-0.54, -4.29)	0.72	0.012	32.2 ± 12.6	4.85	5.64	2.6 ± 1.2	4.2 ± 1.9	3.5 ± 1.6	10.0 ± 4.6
G2344	14	(-0.15, 0.14)	0.77	0.013	28.7 ± 5.0	4.12	5.33	2.8 ± 0.6	4.0 ± 0.8	3.3 ± 0.7	8.8 ± 1.9
G2344	15	(1.66, -2.46)	0.82	0.014	27.7 ± 4.3	4.23	7.93	4.3 ± 0.8	5.5 ± 1.0	4.6 ± 0.8	11.4 ± 2.1
G2344	16	(0.69, -4.3)	0.74	0.013	36.7 ± 12.0	4.04	5.04	2.0 ± 0.7	3.1 ± 1.2	2.6 ± 1.0	7.0 ± 2.7
G2397S	1	(0.94, 4.09)	1.08	0.015	29.2 ± 4.2	19.29	47.91	15.7 ± 2.7	17.9 ± 3.0	15.0 ± 2.5	35.3 ± 6.0
G2397S	2	(1.67, 3.99)	0.82	0.011	29.9 ± 5.4	9.90	18.76	6.0 ± 1.3	11.8 ± 2.5	9.9 ± 2.1	30.7 ± 6.5
G2397S	3	(0.56, 5.09)	0.86	0.012	36.1 ± 7.3	9.53	17.99	4.6 ± 1.1	8.3 ± 1.9	6.9 ± 1.6	20.4 ± 4.8
G2397S	4	(2.15, 5.37)	0.78	0.011	30.2 ± 4.2	4.64	6.15	1.9 ± 0.3	4.2 ± 0.7	3.5 ± 0.6	11.5 ± 1.9
G2397S	5	(-0.55, -7.14)	0.86	0.012	16.0 ± 2.7	4.32	6.52	4.5 ± 1.0	8.2 ± 1.9	6.8 ± 1.6	20.3 ± 4.6
G2397S	6	(2.03, 3.21)	0.71	0.010	31.0 ± 9.3	4.27	4.84	1.5 ± 0.5	3.9 ± 1.4	3.2 ± 1.2	11.6 ± 4.1
G2397S	7	(5.06, -0.8)	0.91	0.012	46.7 ± 153.2	3.86	6.74	1.3 ± 4.7	2.1 ± 7.6	1.7 ± 6.3	4.8 ± 17.7
G2538	1	(-0.53, 2.1)	1.19	0.019	29.6 ± 4.5	23.19	73.52	33.5 ± 6.0	22.3 ± 4.0	18.6 ± 3.3	33.4 ± 6.0
G2538	2	(-3.51, 3.15)	0.83	0.014	22.0 ± 3.2	11.11	16.52	10.8 ± 2.0	14.8 ± 2.7	12.4 ± 2.3	31.8 ± 5.9
G2538	3	(0.81, 1.41)	0.94	0.015	28.1 ± 2.0	6.12	14.81	7.2 ± 0.6	7.6 ± 0.7	6.4 ± 0.5	14.5 ± 1.2
G2538	4	(-7.31, 1.91)	0.76	0.012	19.7 ± 2.7	5.85	7.80	5.9 ± 1.1	9.6 ± 1.7	8.0 ± 1.4	22.5 ± 4.0
G2538	5	(-1.91, 2.48)	0.74	0.012	25.9 ± 6.7	5.93	7.33	3.9 ± 1.2	6.7 ± 2.1	5.6 ± 1.8	16.2 ± 5.1
G2538	6	(0.28, 2.46)	0.70	0.011	29.4 ± 3.0	4.08	4.35	2.0 ± 0.2	3.8 ± 0.5	3.2 ± 0.4	9.8 ± 1.2
G2571	1	(-0.66, -1.02)	0.77	0.021	23.3 ± 4.0	25.61	32.77	57.5 ± 12.4	31.7 ± 6.8	26.5 ± 5.7	43.3 ± 9.4
G2571	2	(0.27, 6.9)	0.74	0.020	17.0 ± 1.2	5.15	6.25	16.4 ± 1.5	9.8 ± 0.9	8.2 ± 0.8	14.0 ± 1.3
G2571	3	(0.67, -0.25)	0.86	0.024	23.1 ± 3.4	3.75	6.03	10.7 ± 1.9	4.7 ± 0.9	4.0 ± 0.7	5.8 ± 1.1
G2571	4	(2.06, -0.21)	0.94	0.026	21.2 ± 2.1	3.74	7.94	15.6 ± 1.9	5.8 ± 0.7	4.8 ± 0.6	6.5 ± 0.8
G2571	5	(-1.6, -1.23)	0.86	0.024	22.4 ± 3.5	3.87	6.37	11.7 ± 2.3	5.2 ± 1.0	4.3 ± 0.9	6.4 ± 1.3
G2571	6	(-0.69, -0.14)	0.73	0.020	23.2 ± 4.0	3.90	4.37	7.7 ± 1.7	4.7 ± 1.0	4.0 ± 0.9	6.8 ± 1.5

附录 C 超超致密电离氢区

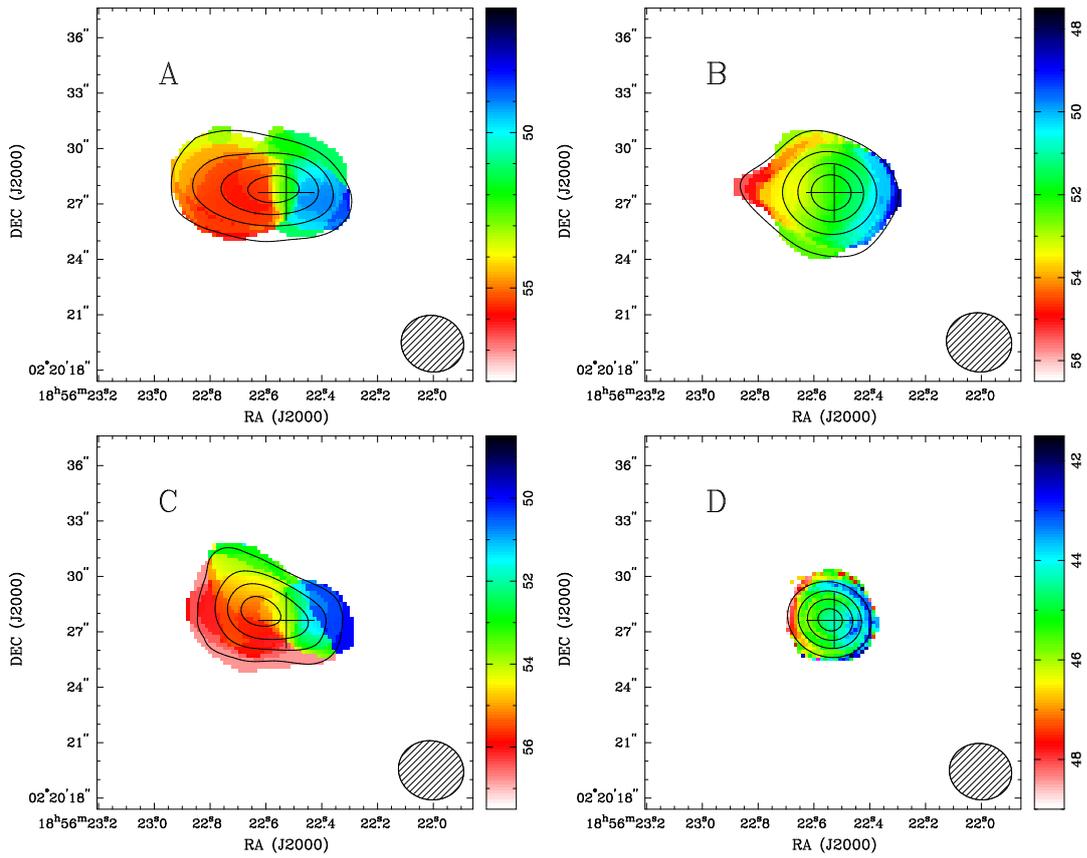


图 C.1: ^{13}CS (5-4) 等谱线的积分强度等值线与其相应的强度权重的平均速度分布的叠图。(A) ^{13}CS (5-4) 的等值刻度分别是 3, 5, 7, 9 $\times 0.87 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$; (B) SO_2 11(1,11)-10(0,10) 的等值刻度分别是 3, 11, 19, 27 $\times 0.46 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$; (C) CH_3CCH 13(2)-12(2) 的等值刻度分别是 3, 5, 7, 9 $\times 0.41 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$; (D) $\text{H}30\alpha$ 的等值刻度分别是 3, 5, 7, 9 $\times 6.32 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ 。图中黑色的十字标出了 1.3 cm 连续谱的峰值位置。彩图的刻度单位是 km s^{-1} 。

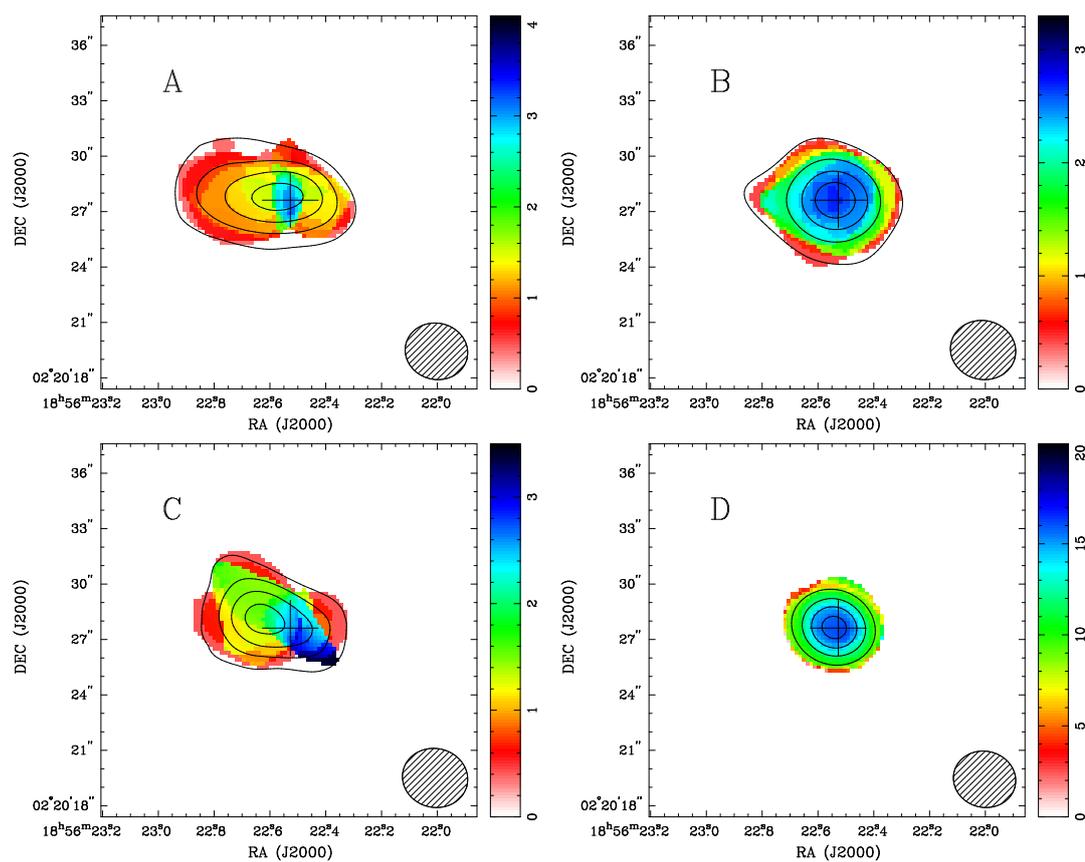


图 C.2: ^{13}CS (5-4) 等谱线的积分强度等值线与其相应的速度弥散分布的叠图。(A) ^{13}CS (5-4) 的等值刻度分别是 3, 5, 7, 9 $\times 0.87 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$; (B) SO_2 11(1,11)-10(0,10) 的等值刻度分别是 3, 11, 19, 27 $\times 0.46 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$; (C) CH_3CCH 13(2)-12(2) 的等值刻度分别是 3, 5, 7, 9 $\times 0.41 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$; (D) $\text{H}30\alpha$ 的等值刻度分别是 3, 5, 7, 9 $\times 6.32 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ 。图中黑色的十字标出了 1.3 cm 连续谱的峰值位置。彩图的刻度单位是 km s^{-1} 。

附录 D 红外尘泡

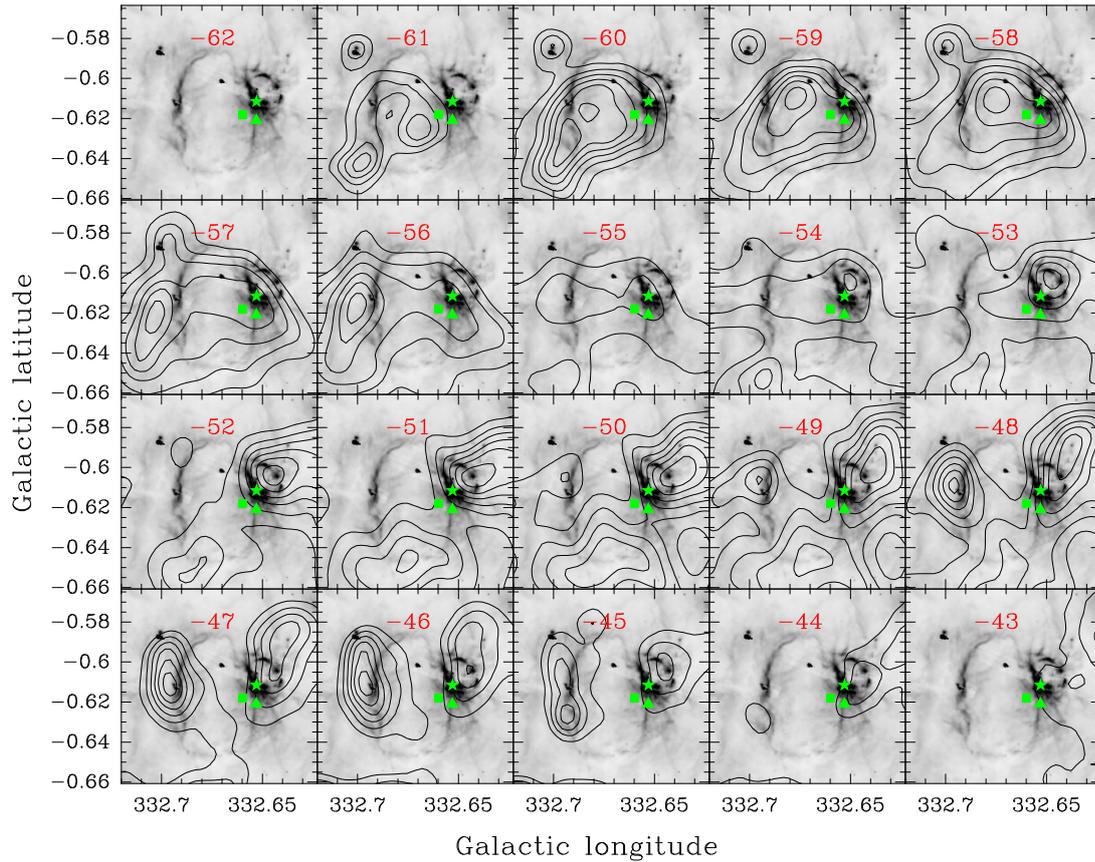


图 D.1: 尘泡 S51 中, 分子 ^{13}CO 以每 1.0 km s^{-1} 为通道的等值线与 GLIMPSE $8.0 \mu\text{m}$ 辐射的叠图。图中等值线的大小为峰值的 13%, 每个图的峰值大小分别是 0.718, 1.632, 3.584, 7.503, 9.191, 11.388, 14.901, 16.428, 10.915, 9.673, 12.091, 15.416, 16.916, 16.467, 14.378, 12.772, 6.043, 3.018, 1.535, $2.631 \text{ K km s}^{-1}$, 积分速度区间均为 $[-62 -43] \text{ km s}^{-1}$ 。其中, 绿色的符号“▲”, “■”, “★”分别标出了水脉泽, 羟基脉泽和红外源 16158-5055 的位置。

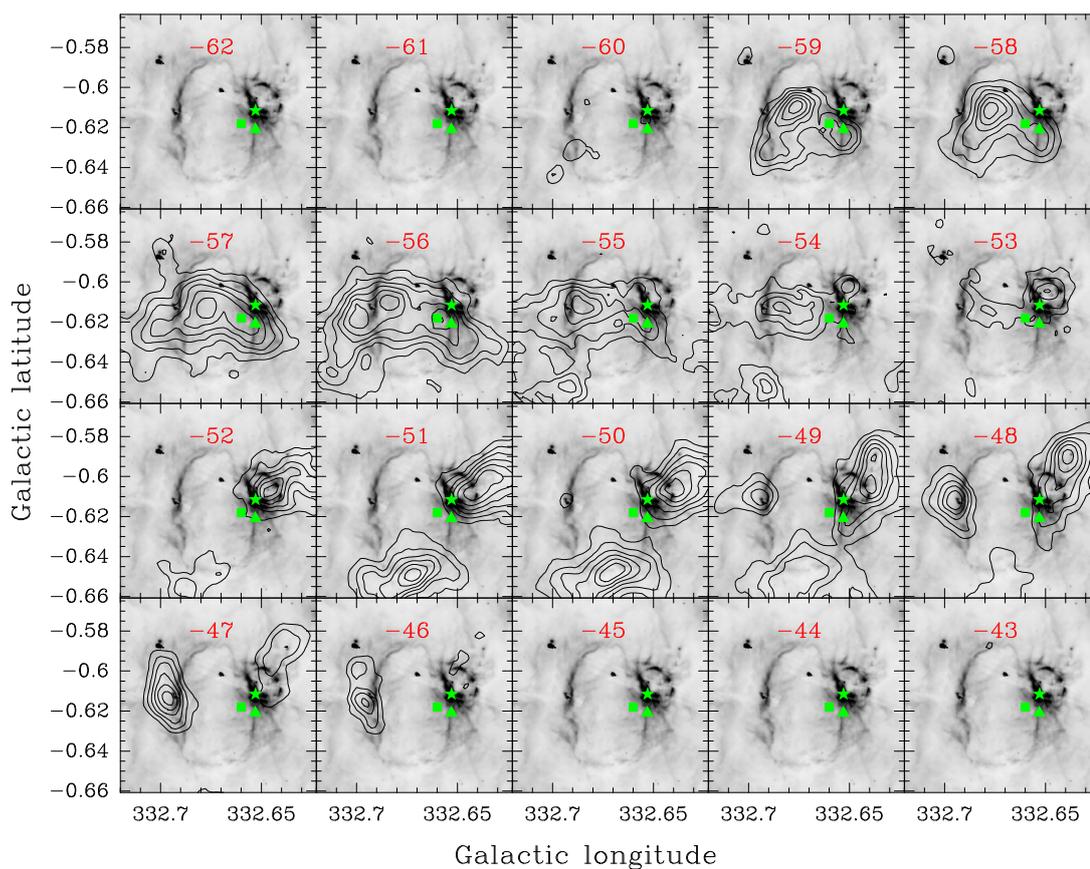


图 D.2: 尘泡 S51 中, 分子 $C^{18}O$ 以每 1.0 km s^{-1} 为通道的等值线与 GLIMPSE $8.0 \mu\text{m}$ 辐射的叠图。图中等值线的大小为峰值的 13%, 每个图的峰值大小分别是 0.518, 0.590, 0.870, 2.625, 4.342, 4.081, 3.663, 2.814, 1.627, 1.529, 2.671, 3.697, 4.914, 4.572, 4.514, 3.756, 1.524, 0.575, 0.558, $0.685 \text{ K km s}^{-1}$, 积分速度区间均为 $[-62 -43] \text{ km s}^{-1}$ 。其中, 绿色的符号“▲”, “■”, “★”分别标出了水脉泽, 羟基脉泽和红外源 16158-5055 的位置。

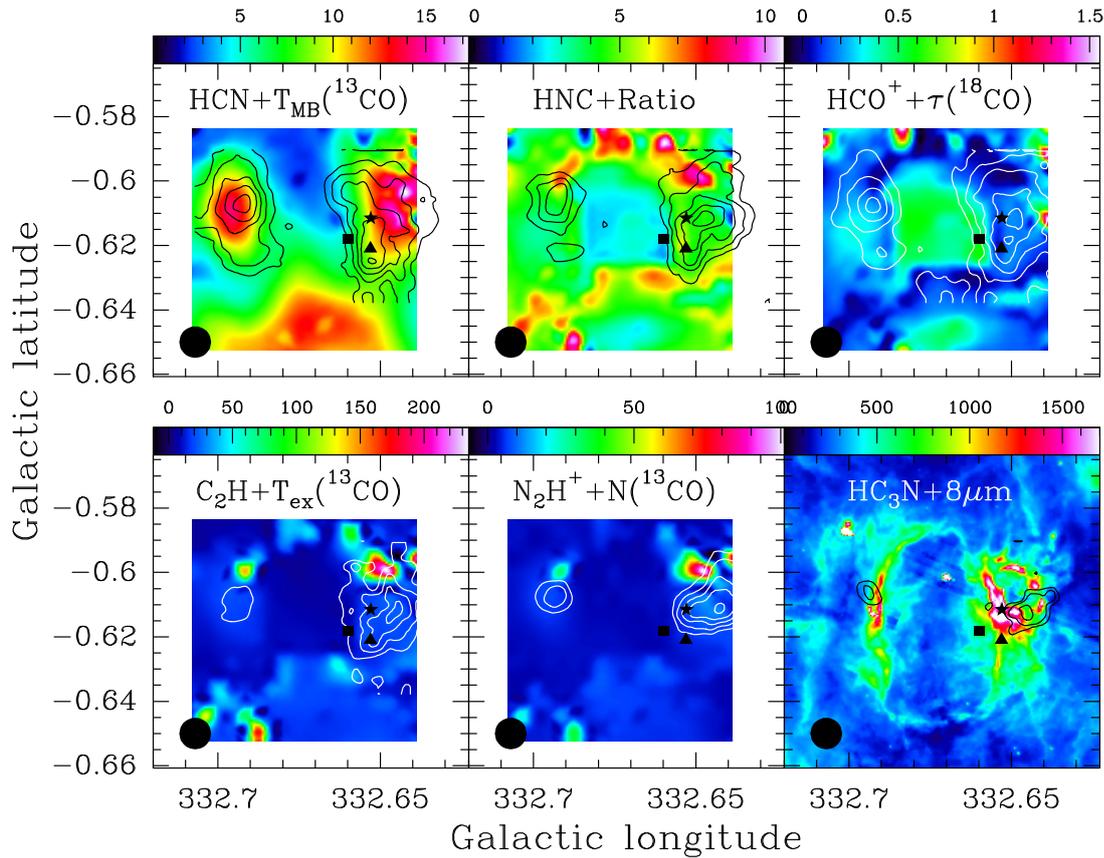


图 D.3: 尘泡 S51 中, HCN 等谱线的积分强度等值线与 $T_{\text{MB}}(^{13}\text{CO})$ 等参数分布的叠图。其中的谱线包括: HCN, HNC, HCO^+ , C_2H , N_2H^+ , HC_3N ; 参数包括: $T_{\text{MB}}(^{13}\text{CO})$, $\text{ratio} = T_{\text{MB}}(^{13}\text{CO})/T_{\text{MB}}(\text{C}^{18}\text{O})$, $\tau(^{18}\text{CO})$, $T_{\text{ex}}(^{13}\text{CO})$, $\text{N}(^{13}\text{CO})[\times 10^{16}]$, $8\ \mu\text{m}$ 。其中, 等值线的大小分别是 HCN 等谱线峰值的 12%, 13%, 12%, 16%, 14%, 15%, 它们的峰值大小分别是 9.573, 7.953, 9.781, 4.791, 10.490, 2.555 K km s^{-1} , 速度积分区间均是 ~ -53.0 to $\sim -43.0\ \text{km s}^{-1}$ 。图中, 绿色的符号“▲”, “■”, “★”分别标出了水脉泽, 羟基脉泽和红外源 16158-5055 的位置。

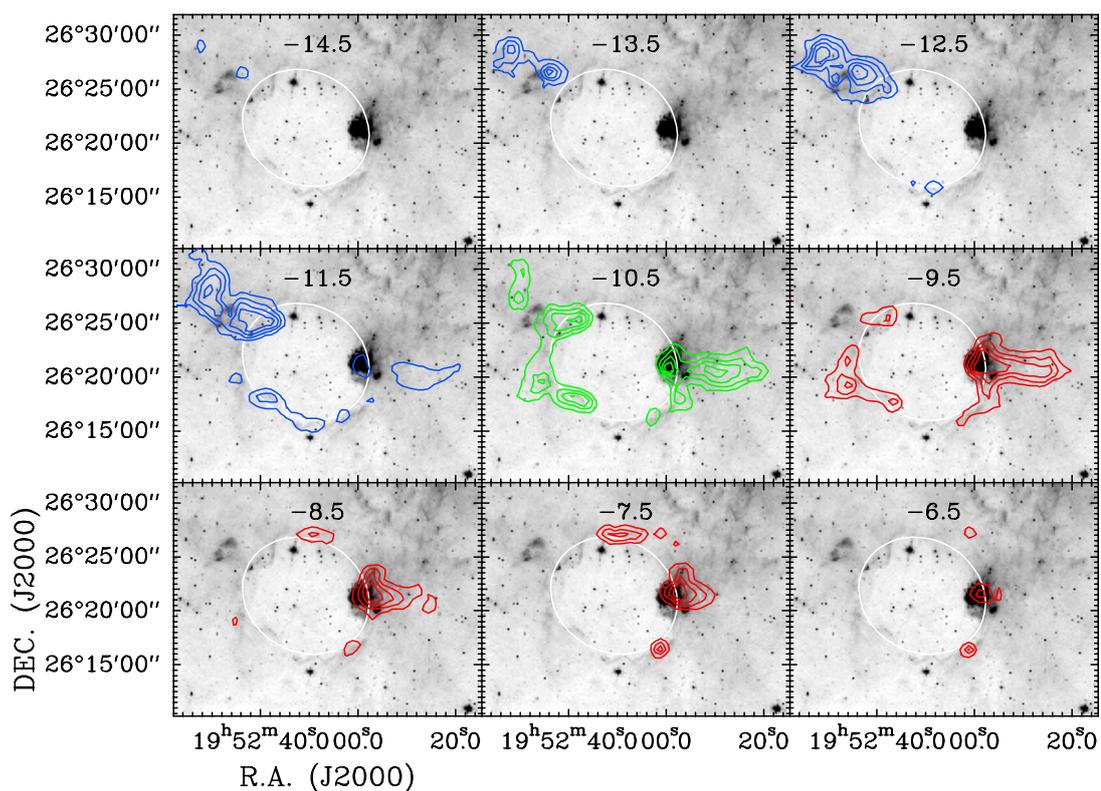


图 D.4: 尘泡 131 的 ^{12}CO 观测的通道图与 GLIMPSE $8.0\ \mu\text{m}$ 的叠图,通道间隔是 $1\ \text{km s}^{-1}$ 。图中,最低的等值线刻度及其间隔都分别是 1.59, 1.37, 1.80, 2.24, 1.96, 2.19, 2.80, 1.22, 0.95 K km s^{-1} , 速度积分区间是 $[-14.5\ -6.5]\ \text{km s}^{-1}$ 。蓝色,绿色,和红色的等值线分别标出了蓝移,系统速度,和红移的速度成份。白色的椭圆标出了尘泡 N131 的轮廓。

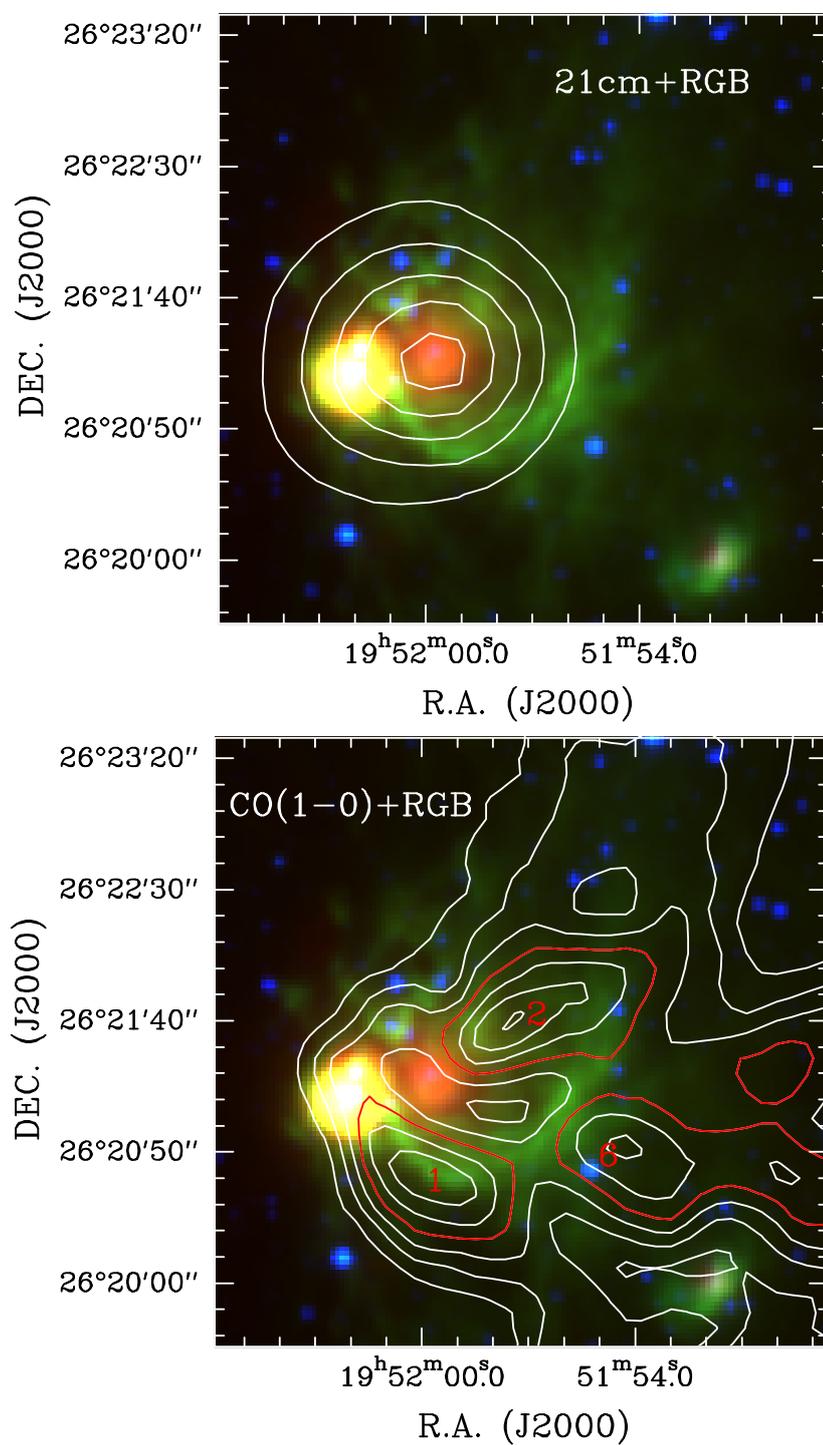


图 D.5: 小沉泡 N131-A 的 NVSS 21 cm 连续谱 (上图) 和 IRAM CO (1-0) 谱线 (下图) 与 Spitzer-IRAC 三色图的叠图。其中, $4.5 \mu\text{m}$ = 蓝色, $8 \mu\text{m}$ = 绿色, 和 $24 \mu\text{m}$ = 红色。

表 D.1: 尘泡 N131 内部的激发星候选体。

GLIMPSE Desig.	$m_{3.6}$ (mag)	$m_{4.5}$ (mag)	$m_{5.8}$ (mag)	$m_{8.0}$ (mag)	m_J (mag)	m_H (mag)	m_{K_s} (mag)	A_V (mag)	M_J (mag)	M_H (mag)	M_{K_s} (mag)	O-type star
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
G063.0696-00.3941	11.34	11.39	11.29	11.23	12.63	11.89	11.60	7.06	-4.04	-4.02	-3.86	O7V-O6.5V
G063.0819-00.3947	11.01	10.94	10.88	10.89	12.65	11.77	11.29	9.26	-4.64	-4.52	-4.42	O5.5V-O5V
G063.0918-00.3962	11.75	11.62	11.43	11.58	13.60	12.59	12.08	10.09	-3.91	-3.85	-3.72	O7.5V
G063.0958-00.4059	11.75	11.82	11.65	11.67	13.70	12.51	12.08	10.29	-3.88	-3.97	-3.75	O7.5V-O7V
G063.0962-00.3644	11.59	11.54	11.51	11.42	13.04	12.07	11.70	8.76	-4.11	-4.14	-3.95	O7V-O6.5V
G063.1020-00.4375	11.55	11.60	11.48	11.43	13.51	12.32	11.87	10.45	-4.12	-4.18	-3.98	O7V-O6V
G063.1050-00.4143	12.16	12.16	11.96	12.26	14.20	12.95	12.53	10.51	-3.43	-3.57	-3.32	O9V-O8.5V
G063.1080-00.4197	10.82	10.90	10.71	10.71	12.61	11.49	11.05	10.01	-4.89	-4.93	-4.74	O4V-O4V
G063.1118-00.4060	10.73	10.65	10.60	10.46	12.31	11.37	10.94	9.05	-4.92	-4.89	-4.74	O4V-O4V
G063.1127-00.4278	12.18	12.16	11.86	12.00	14.11	12.89	12.45	10.51	-3.53	-3.62	-3.40	O9V-O8.5V
G063.1138-00.4385	12.23	12.13	12.08	11.99	14.02	12.95	12.54	9.58	-3.35	-3.40	-3.21	O9.5V-O9V
G063.1143-00.3893	11.09	11.13	11.02	11.04	12.43	11.57	11.26	7.81	-4.44	-4.47	-4.29	O5.5V-O5V
G063.1168-00.4392	10.70	10.79	10.61	10.62	12.57	11.44	11.02	9.94	-4.90	-4.97	-4.77	O4V-O3V
G063.1187-00.4133	12.00	11.97	11.73	11.93	13.91	12.71	12.25	10.55	-3.74	-3.81	-3.60	O8V-O7.5V
G063.1251-00.4258	10.71	10.73	10.54	10.57	12.56	11.43	11.00	10.03	-4.94	-5.00	-4.80	O4V-O3V

参考文献

- Aguirre, J. E., Ginsburg, A. G., Dunham, M. K., et al. 2011, *ApJS*, 192, 4
- Ai, M., Zhu, M., Xiao, L., & Su, H.-Q. 2013, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 13, 935
- Allen, L. E., Calvet, N., D'Alessio, P., et al. 2004, *ApJS*, 154, 363
- Anderson, L. D. & Bania, T. M. 2009, *ApJ*, 690, 706
- Anderson, L. D., Zavagno, A., Deharveng, L., et al. 2012, *A&A*, 542, A10
- André, P., Basu, S., & Inutsuka, S. 2009, *The formation and evolution of prestellar cores*, ed. G. Chabrier (Cambridge University Press), 254
- Anglada, G., Villuendas, E., Estalella, R., et al. 1998, *AJ*, 116, 2953
- Araya, E., Hofner, P., Kurtz, S., Bronfman, L., & DeDeo, S. 2005, *ApJS*, 157, 279
- Bachiller, R. 1996, *ARA&A*, 34, 111
- Bania, T. M., Anderson, L. D., & Balser, D. S. 2012, *ApJ*, 759, 96
- Beaumont, C. N. & Williams, J. P. 2010, *ApJ*, 709, 791
- Benjamin, R. A., Churchwell, E., Babler, B. L., et al. 2003, *PASP*, 115, 953
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- Bessell, M. S. & Brett, J. M. 1988, *PASP*, 100, 1134
- Beuther, H., Leurini, S., Schilke, P., et al. 2007, *A&A*, 466, 1065
- Beuther, H., Linz, H., Tackenberg, J., et al. 2013, *A&A*, 553, A115
- Beuther, H. & Schilke, P. 2004, *Science*, 303, 1167
- Beuther, H., Zhang, Q., Greenhill, L. J., et al. 2004, *ApJ*, 616, L31
- Blitz, L. 1991, in *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, Vol. 342, *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, ed. C. J. Lada & N. D. Kylafis, 3

- Blitz, L. & Williams, J. P. 1999, in NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C, Vol. 540, NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C, ed. C. J. Lada & N. D. Kylafis, 3
- Bodenheimer, P., Tenorio-Tagle, G., & Yorke, H. W. 1979, *ApJ*, 233, 85
- Bodenheimer, P. H. 2011, *Principles of Star Formation*
- Bonnell, I. A. & Bate, M. R. 2002, *MNRAS*, 336, 659
- Bonnell, I. A. & Bate, M. R. 2006, *MNRAS*, 370, 488
- Bonnell, I. A., Bate, M. R., Clarke, C. J., & Pringle, J. E. 2001, *MNRAS*, 323, 785
- Bonnell, I. A., Larson, R. B., & Zinnecker, H. 2007, *Protostars and Planets V*, 149
- Bonnell, I. A., Vine, S. G., & Bate, M. R. 2004, *MNRAS*, 349, 735
- Bontemps, S., Motte, F., Csengeri, T., & Schneider, N. 2010, *A&A*, 524, A18
- Brunthaler, A., Reid, M. J., Menten, K. M., et al. 2009, *ApJ*, 693, 424
- Carey, S. J., Feldman, P. A., Redman, R. O., et al. 2000, *ApJ*, 543, L157
- Carey, S. J., Noriega-Crespo, A., Mizuno, D. R., et al. 2009, *PASP*, 121, 76
- Caswell, J. L., Vaile, R. A., Ellingsen, S. P., Whiteoak, J. B., & Norris, R. P. 1995, *MNRAS*, 272, 96
- Chandrasekhar, S. & Fermi, E. 1953, *ApJ*, 118, 116
- Choi, M., Lee, J.-E., & Kang, M. 2012, *ApJ*, 747, 112
- Churchwell, E. 2002, *ARA&A*, 40, 27
- Churchwell, E. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 390, *Pathways Through an Eclectic Universe*, ed. J. H. Knapen, T. J. Mahoney, & A. Vazdekis, 63
- Churchwell, E., Babler, B. L., Meade, M. R., et al. 2009, *PASP*, 121, 213
- Churchwell, E., Povich, M. S., Allen, D., et al. 2006, *ApJ*, 649, 759
- Churchwell, E., Watson, D. F., Povich, M. S., et al. 2007, *ApJ*, 670, 428
- Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W., et al. 1998, *AJ*, 115, 1693

- Csengeri, T., Urquhart, J. S., Schuller, F., et al. 2014, *A&A*, 565, A75
- De Buizer, J. M., Radomski, J. T., Telesco, C. M., & Piña, R. K. 2005, *ApJS*, 156, 179
- Deharveng, L., Schuller, F., Anderson, L. D., et al. 2010, *A&A*, 523, A6
- Deharveng, L., Zavagno, A., Schuller, F., et al. 2009, *A&A*, 496, 177
- Dewangan, L. K., Ojha, D. K., Anandarao, B. G., Ghosh, S. K., & Chakraborti, S. 2012, *ApJ*, 756, 151
- Dirienzo, W. J., Indebetouw, R., Brogan, C., et al. 2012, *AJ*, 144, 173
- Dyson, J. E. & Williams, D. A. 1980, *Physics of the interstellar medium*
- Dyson, J. E. & Williams, D. A. 1997, *The physics of the interstellar medium*
- Elmegreen, B. G. & Lada, C. J. 1977, *ApJ*, 214, 725
- Evans, II, N. J. 1999, *ARA&A*, 37, 311
- Fazio, G. G., Hora, J. L., Allen, L. E., et al. 2004, *ApJS*, 154, 10
- Fich, M., Blitz, L., & Stark, A. A. 1989, *ApJ*, 342, 272
- Fish, V. L., Reid, M. J., Argon, A. L., & Zheng, X.-W. 2005, *ApJS*, 160, 220
- Fish, V. L., Reid, M. J., Wilner, D. J., & Churchwell, E. 2003, *ApJ*, 587, 701
- Forster, J. R. & Caswell, J. L. 1989, *A&A*, 213, 339
- Foster, J. B., Jackson, J. M., Barnes, P. J., et al. 2011, *ApJS*, 197, 25
- Franco, J., Kurtz, S., Hofner, P., et al. 2000, *ApJ*, 542, L143
- Galván-Madrid, R., Keto, E., Zhang, Q., et al. 2009, *ApJ*, 706, 1036
- Garden, R. P., Hayashi, M., Hasegawa, T., Gatley, I., & Kaifu, N. 1991, *ApJ*, 374, 540
- Goldsmith, P. F. & Langer, W. D. 1999, *ApJ*, 517, 209
- Goldsmith, P. F., Snell, R. L., Hemeon-Heyer, M., & Langer, W. D. 1984, *ApJ*, 286, 599
- Gómez, L., Wyrowski, F., Schuller, F., Menten, K. M., & Ballesteros-Paredes, J. 2014, *A&A*, 561, A148

- Gordon, M. A. & Sorochenko, R. L., eds. 2002, *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 282, Radio Recombination Lines. Their Physics and Astronomical Applications
- Greene, T. P., Wilking, B. A., Andre, P., Young, E. T., & Lada, C. J. 1994, *ApJ*, 434, 614
- Gutermuth, R. A., Megeath, S. T., Myers, P. C., et al. 2009, *ApJS*, 184, 18
- Hayashi, C. 1961, *PASJ*, 13, 450
- Heney, L. G., Lelevier, R., & Levée, R. D. 1955, *PASP*, 67, 154
- Hill, T., Burton, M. G., Minier, V., et al. 2005, *MNRAS*, 363, 405
- Hillenbrand, L. A. & Hartmann, L. W. 1998, *ApJ*, 492, 540
- Hindson, L., Thompson, M. A., Urquhart, J. S., et al. 2013, *MNRAS*, 435, 2003
- Ho, P. T. P., Moran, J. M., & Lo, K. Y. 2004, *ApJ*, 616, L1
- Ho, P. T. P. & Townes, C. H. 1983, *ARA&A*, 21, 239
- Hofner, P. & Churchwell, E. 1996, *A&AS*, 120, 283
- Hosokawa, T. & Inutsuka, S.-i. 2006, *ApJ*, 648, L131
- Jackson, J. M., Rathborne, J. M., Shah, R. Y., et al. 2006, *ApJS*, 163, 145
- Ji, W.-G., Zhou, J.-J., Esimbek, J., et al. 2012, *A&A*, 544, A39
- Kauffmann, J., Bertoldi, F., Bourke, T. L., Evans, II, N. J., & Lee, C. W. 2008, *A&A*, 487, 993
- Kauffmann, J. & Pillai, T. 2010, *ApJ*, 723, L7
- Kendrew, S., Simpson, R., Bressert, E., et al. 2012, *ApJ*, 755, 71
- Keto, E. 2002, *ApJ*, 580, 980
- Keto, E. 2003, *ApJ*, 599, 1196
- Keto, E. 2007, *ApJ*, 666, 976
- Keto, E., Zhang, Q., & Kurtz, S. 2008, *ApJ*, 672, 423
- Klaassen, P. D., Galván-Madrid, R., Peters, T., Longmore, S. N., & Maercker, M. 2013, *A&A*, 556, A107

- Klein, R., Posselt, B., Schreyer, K., Forbrich, J., & Henning, T. 2005, *ApJS*, 161, 361
- Klessen, R. S. & Burkert, A. 2001, *ApJ*, 549, 386
- Koenig, X. P., Leisawitz, D. T., Benford, D. J., et al. 2012, *ApJ*, 744, 130
- Kramer, C., Stutzki, J., Rohrig, R., & Corneliussen, U. 1998, *A&A*, 329, 249
- Krumholz, M. R. 2014, ArXiv e-prints
- Krumholz, M. R. & Matzner, C. D. 2009, *ApJ*, 703, 1352
- Krumholz, M. R., McKee, C. F., & Klein, R. I. 2005, *Nature*, 438, 332
- Krumholz, M. R., Stone, J. M., & Gardiner, T. A. 2007, *ApJ*, 671, 518
- Kurtz, S. 2005, in *IAU Symposium, Vol. 227, Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, ed. R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, & M. Walmsley, 111–119
- Kurtz, S., Churchwell, E., & Wood, D. O. S. 1994, *ApJS*, 91, 659
- Kurtz, S. & Franco, J. 2002, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, vol. 27, Vol. 12, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, ed. W. J. Henney, J. Franco, & M. Martos, 16–21
- Kurtz, S. E. 2000a, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, vol. 27, Vol. 9, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, ed. S. J. Arthur, N. S. Brickhouse, & J. Franco, 169–176
- Kurtz, S. E. 2000b, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, vol. 27, Vol. 9, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, ed. S. J. Arthur, N. S. Brickhouse, & J. Franco, 169–176
- Kurtz, S. E., Watson, A. M., Hofner, P., & Otte, B. 1999, *ApJ*, 514, 232
- Lada, C. J. 1987, in *IAU Symposium, Vol. 115, Star Forming Regions*, ed. M. Peimbert & J. Jugaku, 1–17
- Lang, K. R. 1980, *Astrophysical Formulae. A Compendium for the Physicist and Astrophysicist*.
- Li, G.-X., Wyrowski, F., Menten, K., & Belloche, A. 2013, *A&A*, 559, A34
- Lis, D. C., Carlstrom, J. E., & Keene, J. 1991, *ApJ*, 380, 429

- Lo, N., Cunningham, M. R., Jones, P. A., et al. 2009, MNRAS, 395, 1021
- Lockman, F. J. 1989, ApJS, 71, 469
- Mainzer, A., Bauer, J., Grav, T., et al. 2011, ApJ, 731, 53
- Matsakis, D. N., Evans, II, N. J., Sato, T., & Zuckerman, B. 1976, AJ, 81, 172
- McKee, C. F. & Tan, J. C. 2002, Nature, 416, 59
- McKee, C. F. & Tan, J. C. 2003, ApJ, 585, 850
- Mehring, D. M. 1994, ApJS, 91, 713
- Mezger, P. G. & Henderson, A. P. 1967, ApJ, 147, 471
- Mezger, P. G., Smith, L. F., & Churchwell, E. 1974, A&A, 32, 269
- Millar, T. J. 1997, in IAU Symposium, Vol. 178, IAU Symposium, ed. E. F. van Dishoeck, 75–88
- Motte, F., Andre, P., & Neri, R. 1998, A&A, 336, 150
- Motte, F., André, P., Ward-Thompson, D., & Bontemps, S. 2001, A&A, 372, L41
- Motte, F., Bontemps, S., Schilke, P., et al. 2007, A&A, 476, 1243
- Motte, F., Schilke, P., & Lis, D. C. 2003, ApJ, 582, 277
- Mouschovias, T. C. & Ciolek, G. E. 1999, in NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C, Vol. 540, NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C, ed. C. J. Lada & N. D. Kylafis, 305
- Mueller, K. E., Shirley, Y. L., Evans, II, N. J., & Jacobson, H. R. 2002, ApJS, 143, 469
- Müller, H. S. P., Schlöder, F., Stutzki, J., & Winnewisser, G. 2005, Journal of Molecular Structure, 742, 215
- Myers, P. C. 1998, ApJ, 496, L109
- Myers, P. C., Linke, R. A., & Benson, P. J. 1983, ApJ, 264, 517
- Neugebauer, G., Habing, H. J., van Duinen, R., et al. 1984, ApJ, 278, L1
- Ohishi, M. 1997, in IAU Symposium, Vol. 178, IAU Symposium, ed. E. F. van Dishoeck, 61–74

- Ossenkopf, V. & Henning, T. 1994, *A&A*, 291, 943
- Padoan, P. & Nordlund, Å. 2002, *ApJ*, 576, 870
- Padoan, P., Nordlund, A., & Jones, B. J. T. 1997, *MNRAS*, 288, 145
- Palau, A., Estalella, R., Girart, J. M., et al. 2014, *ApJ*, 785, 42
- Palau, A., Fuente, A., Girart, J. M., et al. 2013, *ApJ*, 762, 120
- Panagia, N. 1973, *AJ*, 78, 929
- Paron, S., Petriella, A., & Ortega, M. E. 2011, *A&A*, 525, A132
- Peng, T.-C., Wyrowski, F., van der Tak, F. F. S., Menten, K. M., & Walmsley, C. M. 2010, *A&A*, 520, A84
- Petriella, A., Paron, S., & Giacani, E. 2010, *A&A*, 513, A44
- Pickett, H. M., Poynter, R. L., Cohen, E. A., et al. 1998, *J. Quant. Spec. Radiat. Transf.*, 60, 883
- Pillai, T., Kauffmann, J., Wyrowski, F., et al. 2011, *A&A*, 530, A118
- Plume, R., Jaffe, D. T., & Evans, II, N. J. 1992, *ApJS*, 78, 505
- Poglitsch, A., Waelkens, C., Geis, N., et al. 2010, *A&A*, 518, L2
- Pomarès, M., Zavagno, A., Deharveng, L., et al. 2009, *A&A*, 494, 987
- Povich, M. S., Stone, J. M., Churchwell, E., et al. 2007, *ApJ*, 660, 346
- Pratap, P., Snyder, L. E., & Batrla, W. 1992, *ApJ*, 387, 241
- Qin, S.-L., Wang, J.-J., Zhao, G., Miller, M., & Zhao, J.-H. 2008, *A&A*, 484, 361
- Qin, S.-L., Wu, Y., Huang, M., et al. 2010, *ApJ*, 711, 399
- Rathborne, J. M., Jackson, J. M., & Simon, R. 2006, *ApJ*, 641, 389
- Reid, M. J., Menten, K. M., Zheng, X. W., et al. 2009, *ApJ*, 700, 137
- Reynolds, S. P. 1986, *ApJ*, 304, 713
- Rieke, G. H. & Lebofsky, M. J. 1985, *ApJ*, 288, 618

- Robitaille, T. P., Whitney, B. A., Indebetouw, R., & Wood, K. 2007, *ApJS*, 169, 328
- Robitaille, T. P., Whitney, B. A., Indebetouw, R., Wood, K., & Denzmore, P. 2006, *ApJS*, 167, 256
- Rubin, R. H. 1968, *ApJ*, 154, 391
- Russeil, D., Zavagno, A., Motte, F., et al. 2010, *A&A*, 515, A55
- Salpeter, E. E. 1955, *ApJ*, 121, 161
- Schuller, F., Menten, K. M., Contreras, Y., et al. 2009, *A&A*, 504, 415
- Sewilo, M., Churchwell, E., Kurtz, S., Goss, W. M., & Hofner, P. 2011, *ApJS*, 194, 44
- Sherman, R. A. 2012, *ApJ*, 760, 58
- Shi, H., Zhao, J.-H., & Han, J. L. 2010, *ApJ*, 710, 843
- Shirley, Y. L., Evans, II, N. J., Young, K. E., Knez, C., & Jaffe, D. T. 2003, *ApJS*, 149, 375
- Shu, F. H. 1977, *ApJ*, 214, 488
- Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. 1987, *ARA&A*, 25, 23
- Simpson, R. J., Povich, M. S., Kendrew, S., et al. 2012, *MNRAS*, 424, 2442
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. 2006, *AJ*, 131, 1163
- Snell, R. L., Scoville, N. Z., Sanders, D. B., & Erickson, N. R. 1984, *ApJ*, 284, 176
- Stutzki, J. & Guesten, R. 1990, *ApJ*, 356, 513
- Thompson, M. A., Gibb, A. G., Hatchell, J. H., Wyrowski, F., & Pillai, T. 2005, in *ESA Special Publication*, Vol. 577, *ESA Special Publication*, ed. A. Wilson, 425–426
- Thompson, M. A., Urquhart, J. S., Moore, T. J. T., & Morgan, L. K. 2012, *MNRAS*, 421, 408
- Urquhart, J. S., Thompson, M. A., Moore, T. J. T., et al. 2013, *MNRAS*, 435, 400
- van der Tak, F. F. S. & Menten, K. M. 2005, *A&A*, 437, 947
- Walmsley, C. M. & Schilke, P. 1993, *Observations of Hot Molecular Cores*, ed. T. J. Millar & D. A. Williams, 37

- Walmsley, M. 1995, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, Vol. 1, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, ed. S. Lizano & J. M. Torrelles, 137
- Wang, K., Zhang, Q., Testi, L., et al. 2014, *MNRAS*, 439, 3275
- Wang, K., Zhang, Q., Wu, Y., & Zhang, H. 2011, *ApJ*, 735, 64
- Watson, C., Araya, E., Sewilo, M., et al. 2003, *ApJ*, 587, 714
- Watson, C., Hanspal, U., & Mengistu, A. 2010, *ApJ*, 716, 1478
- Watson, C., Povich, M. S., Churchwell, E. B., et al. 2008, *ApJ*, 681, 1341
- Werner, M. W., Roellig, T. L., Low, F. J., et al. 2004, *ApJS*, 154, 1
- Whitworth, A. P., Bhattal, A. S., Chapman, S. J., Disney, M. J., & Turner, J. A. 1994, *MNRAS*, 268, 291
- Wienen, M., Wyrowski, F., Schuller, F., et al. 2012, *A&A*, 544, A146
- Williams, J. P., de Geus, E. J., & Blitz, L. 1994, *ApJ*, 428, 693
- Williams, J. P. & Myers, P. C. 2000, *ApJ*, 537, 891
- Wilson, T. L., Rohlfs, K., & Hüttemeister, S. 2009, *Tools of Radio Astronomy* (Springer-Verlag)
- Wong, T., Ladd, E. F., Brisbin, D., et al. 2008, *MNRAS*, 386, 1069
- Wood, D. O. S. & Churchwell, E. 1989, *ApJS*, 69, 831
- Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, *AJ*, 140, 1868
- Zavagno, A., Anderson, L. D., Russeil, D., et al. 2010, *A&A*, 518, L101
- Zavagno, A., Deharveng, L., Comerón, F., et al. 2006, *A&A*, 446, 171
- Zhang, C. P. & Wang, J. J. 2012, *A&A*, 544, A11
- Zhang, C.-P. & Wang, J.-J. 2013, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 13, 47
- Zhang, C.-P., Wang, J.-J., & Xu, J.-L. 2013, *A&A*, 550, A117
- Zhang, C.-P., Wang, J.-J., Xu, J.-L., Wyrowski, F., & Menten, K. M. 2014, *ApJ*, 784, 107

Zhang, Q. & Ho, P. T. P. 1997, *ApJ*, 488, 241

Zhang, Q., Ho, P. T. P., & Ohashi, N. 1998a, *ApJ*, 494, 636

Zhang, Q., Hunter, T. R., & Sridharan, T. K. 1998b, *ApJ*, 505, L151

Zhang, Q., Wang, Y., Pillai, T., & Rathborne, J. 2009, *ApJ*, 696, 268

Zinnecker, H. & Yorke, H. W. 2007, *ARA&A*, 45, 481

研究成果

发表文章:

Zhang, C.-P., Wang, J.-J., et al. 2015, A&A, prep.

《The dynamics and chemistry of the infrared dark clouds G34, G35, G38, and G53》

Zhang, C.-P., Wyrowski, F., Pillai, T., Csengeri, T., Karl, M. M., Wang, J.-J., Thompson, M. A., Gibb, A. G., Hatchell, J. H., & Pestalozzi, M. R. 2015, A&A, prep.

《Unveiling the initial conditions of high-mass star formation II. Dynamics, stability, and chemistry》

Zhang, C.-P., Csengeri, T., Wyrowski, F., Pillai, T., Karl, M. M., Wang, J.-J., Thompson, M. A., Gibb, A. G., Hatchell, J. H., & Pestalozzi, M. R. 2015, A&A, prep.

《Unveiling the initial conditions of high-mass star formation I. Fragmentation and evolution》

Zhang, C.-P., Li, G.-X., Wyrowski, F., Wang, J.-J., Yuan, J.-H., Xu, J.-L., Gong, Y., Yeh, C., & Menten, K. M. 2015, A&A, under review

《N131: A dust bubble born from the disruption of a gas filament》

Zhang, C.-P., Wang, J.-J., Xu, J.-L., Wyrowski, F., & Menten, K. M. 2014, ApJ, 784, 107

《Submillimeter Array and Very Large Array Observations in the Hypercompact H II Region G35.58-0.03》

Xu, J.-L., Wang, J.-J., Ning, C.-C., & **Zhang, C.-P.** 2014, RAA, 14, 47

《Multi-wavelength study of triggered star formation around 25 H II regions》

Zhang, C. P., & Wang, J. J. 2013, IAU Symposium, 292, 65

《Triggered Star Formation from Bubbles S51, N68, and N131》

Zhang, C.-P., Wang, J.-J., & Xu, J.-L. 2013, A&A, 550, A117

《Molecular clumps and star formation associated with the infrared dust bubble N131》

Zhang, C.-P., & Wang, J.-J. 2013, RAA, 13, 47

《Star formation associated with the infrared dust bubble N68》

Zhang, C. P., & Wang, J. J. 2012, A&A, 544, A11

《Multiwavelength study of the infrared dust bubble S51》

申请观测:

PI: **Zhang, C.-P.**, Effelsberg 100m, #7-15, 26.7h

《Probing a hierarchical temperature structure of the bubble N131》

PI: **Zhang, C.-P.**, JCMT 15m, #M15AI79, 3.0h

《N131: A dust bubble born from the disruption of a filament?》

PI: **Zhang, C.-P.**, JCMT 15m, #M15AI69, 24.0h

《H₂D⁺ in Massive Infrared Quiet Cores》

PI: **Zhang, C.-P.**, TAP-CSO 10.4m, 2015, 2 full nights

《H₂D⁺ in massive infrared quiet cores》

PI: **Zhang, C.-P.**, Effelsberg 100m, #107-13, 14.0h (backup)

《Molecular clumps triggered by the infrared dust bubble N131》

PI: **Zhang, C.-P.**, IRAM 30m, #167-13, 25.5h

《Molecular clumps triggered by the infrared dust bubble N131》

PI: **Zhang, C. P.**, 德令哈13.7m, #12A007, 10.0h

《红外尘埃 Bubble 的多波段观测研究》

简 历

基本情况

张传朋，男，籍贯：河南省新乡县，已婚。

教育状况

2013年9月至2015年4月，德国波恩马普射电天文研究所，博士研究生（中欧联合培养-马普项目），专业：天体物理学；

2012年8月至2015年6月，中国科学院国家天文台、中国科学院大学，博士研究生，专业：天体物理学；

2008年8月至2011年6月，中国科学院新疆天文台、中国科学院大学，硕士研究生，专业：天体物理学；

2006年9月至2008年6月，廊坊师范学院，本科，专业：物理学教育；

2004年9月至2008年6月，河北师范大学，本科（自学考试），专业：数学教育；

2003年9月至2006年6月，衡水学院，专科，专业：数学教育。

获奖情况

2013至2014学年，教育部博士研究生国家奖学金；

2013至2014学年，中国科学院大学“三好学生标兵”称号；

2013至2014学年，中国科学院中欧联合培养博士研究生奖学金；

2012至2013学年，中国科学院大学“三好学生”称号。

工作经历

2011年7月至2012年8月，中国科学院国家天文台。

研究兴趣

红外尘泡、红外暗云、致密冷核的碎裂和氦化、超超致密电离氢区。

联系方式

通讯地址：北京市朝阳区大屯路甲20号 国家天文台 A226

邮编：100012

电子邮箱：zhangchuanp08@mailsucas.ac.cn

致 谢

记得很小的时候，整天拖着板凳当马骑，跟在邻家大哥哥的屁股后面当小兵。那个时候乡下的夜晚，可以很清楚地看到漫天的星星和神秘的银河，其实那个时候根本不知道什么是银河。某天，大哥哥指着天上的星星，讲了一个吓人的故事；我边听边数着天上的星星，身上却起着鸡皮疙瘩。那是我记忆中的第一次数星星；而如今，我终究踏上了这条“数星星”的科研不归路。

曲曲折折，磕磕绊绊，青春早已逝去，终于该为自己的学生时代画上一个久违的句号。回想起来，中考落榜，高考再落榜，考博还落榜，一把鼻涕一把泪。我承认我很笨，特别是嘴笨，而且遇到考试就紧张。无论怎样，我相信勤能补拙，我算是一个勤奋的学生吧！

2011年上半年，也就是在我硕士毕业之前的几个月，是我的学术生涯最艰难和最痛苦的阶段，令我终身难忘。那个时候，种种原因，没有 paper，考博失利，看不到未来，一切都是昏天暗地的。最终，硕士学位延期申请，差点没有拿到硕士毕业证。但是令人欣慰的是，王俊杰老师给了我一个机会，允许我留在中德亚毫米波望远镜项目组，让我先工作再考博。或许是前面经历的挫折太多，后来老天开始眷顾我，自从2012年5月份考中博士研究生之后，让我在博士研究生学习阶段的科研工作是这样的顺利。

特别感谢王俊杰老师对我在生活上的照顾和科研上的指导，并且送我到德国马普射电天文研究所学习和交流，特别感谢 Karl Menten 教授接收我在马普射电天文研究所进行学习，让我在国外两年的学习和生活中获得了巨大的“财富”；特别感谢 Friedrich Wyrowski 老师为我提供天文数据，认真和耐心地指导我进行科学研究工作；特别感谢 Timea Csengeri 悉心手把手地教我 PdBI 的数据处理；特别感谢 Thushara Pillai 耐心地和我讨论，为我修改 proposal，提供一些非常有用的 idea。

感谢在波恩的小伙伴们陪我打乒乓球、逛街、购物、聊天、旅游和讨论学术问题，特别是龚 Yan、李广兴、柳正伟、柳丽杰、Cosmos、胡波、Liu Kuo、Zhu Wei-Wei、Selena、Rosie Chen、Denise Kellar、石慧、刘俊、吴元伟、Lee Ke-Jia、张波。

感谢在中德亚毫米波望远镜项目组一起度过美好时光的徐金龙、刘晓兰、刘妍、吕金泉、刘东亮、李楠、喻耐平、徐刚、何丽萍、李建玲、李建斌。非常感谢徐金龙与我在科研上的合作，感谢刘晓兰代我做进展报告，感谢刘妍代我处理一些繁琐的手续。

特别感谢父亲张庆喜和母亲朱金美多年来对我的支持和勉励，让我学会了什么是责任、勤奋和感恩。

特别感谢爱哭、爱闹、爱吵架的老婆李晓培对我学业的理解和支持，特别是在经济上为我解决后顾之忧，您辛苦了！

值此论文完成之际，谨在此向多年来给予我关心和帮助的亲人、老师、同学和朋友表示衷心的感谢！

谨把本文献给我最爱的老婆，最亲的父母！