



北京大学

PEKING UNIVERSITY

本科生毕业论文

题目： 对 71 个 Planck 冷团块的
CO(1-0) 成图研究

姓 名： 孟繁一

学 号： 00946063

院 系： 元培学院

专 业： 物理学

研究方向： 天体物理

导 师： 吴月芳 教授

二〇一三年六月

对 71 个 Planck 冷团块的 CO(1-0) 成图研究

孟繁一 物理学

导师：吴月芳 教授

摘要

本文介绍了对 Taurus/Perseus/California 三个分子云复合体中 71 个 Planck 冷团块气体成分的成图研究。我们利用中国科学院紫金山天文台青海观测站的 13.7 m 毫米波望远镜进行了 ^{12}CO 、 ^{13}CO 以及 C^{18}O 分子的 $J = 1 - 0$ 转动跃迁谱线观测。全部 71 个 Planck 冷团块都被探测到有 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 和 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 的辐射，其中 55 个被探测到有 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 的辐射。通过空间分布和线心速度的验证，我们证认出 Taurus 分子云复合体 (TMC)、Perseus 分子云复合体 (PMC) 和 California 分子云复合体 (CMC) 中分别有 34 个、24 个和 13 个 Planck 冷团块。在这些冷团块中，共证认出 38 个云核 (Core)，其中 TMC、PMC 和 CMC 分别有 19、3 和 16 个云核。对于这些云核，我们通过观测数据计算了观测参量：线心速度 (V_{lsr})、天线温度 (T_{A})、谱线宽度 (FWHM)。通过这些观测参量我们计算出了各个云核的物理参量。在局部热动平衡 (LTE) 假设下应用辐射传方程，我们得到激发温度 (T_{ex})、气体柱密度 (N_{H_2})。同时我们还计算了云核的热速度弥散 (σ_{Therm})、非热速度弥散 (σ_{NT}) 以及三维速度弥散 (σ_{3D})。根据对云核成图的椭圆高斯拟合，我们得到了云核的几何尺度 (R)，从而计算出气体数密度 (n_{H_2})、LTE 质量 (M_{LTE})、Jeans 质量 (M_J) 和 virial 质量 (M_{vir})。

根据这些物理参量，我们发现 84% 的云核有： $\sigma_{\text{NT}} > \sigma_{\text{Therm}}$ ，而 TMC 中 84% 的云核和 CMC 中 69% 的云核的柱密度概率分布函数 (PDF) 呈对数正态分布 (K-S 检验中 $p > 0.05$)，表明在我们的样本中湍动的支配地位。大多数

(TMC 中的 90%、CMC 中的 60%) 云核的 M_{vir} 和 M_J 大于 M_{LTE} , 表明云核无明显的重力塌缩迹象. 通过对比此气体观测结果和 Planck 获得的尘埃连续谱辐射数据, 我们发现 60% 云核的气体温度低于其尘埃温度. 同时, CO 分子的丰度在正常范围之内. 经过查找成协源, 90% 的团块被证实无成协物. 根据这些计算与分析, 我们发现这些 Planck 团块还没处于恒星形成前, 分子云中的致密核未充分演化的早期形态. 本研究揭示了它们的物理状态和动力学性质.

关键词: 恒星形成, 分子云, 分子谱线

CO (1-0) Mapping Study of 71 Planck Cold Clumps

FANYI MENG Physics

Directed by PROF. YUEFANG WU

Abstract

A mapping study towards 71 Planck Cold Clumps was made with $^{12}\text{CO}(1-0)$, $^{13}\text{CO}(1-0)$ and $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ lines, at the 13.7 m telescope of Purple Mountain Observatory. For all the clumps, $^{12}\text{CO}(1-0)$ and $^{13}\text{CO}(1-0)$ emissions were detected, while for 55 of them, $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ emissions were detected. Of the 71 Clumps, 34 are in Taurus Molecular Complex, 24 in California Molecular Complex and 13 are in Perseus Molecular Complex. In the 76 velocity components, 38 cores are found in 27 clumps, 19 cores are in TMC, 16 in CMC and 3 are in PMC. We acquired the observational parameters such as V_{lsr} , T_A and FWHM of lines. Physical parameters including T_{ex} , N_{H_2} , σ_{Therm} , σ_{NT} , σ_{3D} were calculated.

We found that 84% of the cores have σ_{NT} larger than σ_{Therm} and 84% cores in TMC and 69% cores in CMC have N_{H_2} lognormal probability distribution function. These suggest the dominance of turbulence in our cores. Most cores (90% in TMC and 69% in CMC) are found with M_{vir} and M_J larger than M_{LTE} , indicating these cores are neither going to collapse nor gravitationally bound. To compare with the dust properties revealed by Planck ECC catalog, we investigated the coupling of gas and dust components. We found 60% of the cores are with dust temperature higher than gas temperature. The objects associated with our sources are checked, for 90%

of the core, no associated objects are found within distance of $55''$ to their centers. These facts suggest that our samples represent the very early stage of prestellar cores. This research reveals the physical properties and kinematic characteristics of molecular cores which are in their early evolutionary stages.

Keywords: Star Formation, Molecular Cloud, Molecular Spectrum

目录

第一章 引言	1
1.1 冷暗云与恒星形成	1
1.2 Planck 团块	2
1.3 研究区域	3
1.3.1 Taurus 分子云复合体	3
1.3.2 Perseus 分子云复合体	3
1.3.3 California 分子云复合体	4
1.4 研究目标与方法	4
第二章 观测方法与数据处理	7
2.1 观测设备	7
2.2 观测源表	7
2.3 数据处理	10
第三章 观测结果与参量计算	11
3.1 结果综述	11
3.2 观测参量	12
3.3 物理参量	15
3.3.1 激发温度	18
3.3.2 柱密度	18
3.3.3 速度弥散	20
3.3.4 云核参量	21

第四章 分析与讨论	23
4.1 谱线轮廓	23
4.2 云核内的湍动	24
4.3 云核的重力稳定性	27
4.4 气体 -尘埃耦合	29
4.5 CO 丰度	30
4.6 团块的成协源情况	30
第五章 总结与展望	33
5.1 本文总结	33
参考文献	35
附录 A 云核中心光谱	41
附录 B 各团块积分强度图	43
致谢	45

第一章 引言

1.1 冷暗云与恒星形成

暗云 (Dark Cloud), 也称为分子云 (molecular cloud), 是主要由 H_2 分子 (其质量分数占绝对优势) 组成的在光学波段暗的一类星际介质. 其在光学波段的消光 $A_V > 1^m$, 故被称为“暗”云^[1]. 需要指出的是, 这种消光并非由其气体成分造成, 而是由其中的尘埃颗粒对光学波段的电磁波产生吸收造成的. 由于尘埃的这种吸收作用, 造成了对外界辐射的良好屏蔽, 使得分子云本身能够保持较低的温度 (例如典型的致密结构温度在 $10 - 20\text{ K}$ ^[2]), 这是我们称其为“冷暗云” (Cold Dark Cloud) 的原因.

分子云呈现“层级状”结构^[3], 通常将其分为分子云 (Cloud)、团块 (Clump)、云核 (Core) 三个层次^[1,4]:

分子云: 质量一般为 $10^3 - 10^4 M_\odot$, 尺度为 $2 - 15\text{ pc}$, 平均数密度为 $50 - 500\text{ cm}^{-3}$, 速度弥散为 $2 - 5\text{ km s}^{-1}$ ^[1]. 典型的分子云有 Taurus、Perseus 以及 Orion 等.

团块: 质量一般为 $50 - 500 M_\odot$, 尺度为 $0.3 - 3\text{ pc}$, 平均数密度为 $10^3 - 10^4\text{ cm}^{-3}$, 速度弥散为 $0.3 - 3\text{ km s}^{-1}$ ^[1]. 典型的团块有 B213、L1709 等^[1].

云核: 质量一般为 $0.5 - 5 M_\odot$, 尺度为 $0.03 - 0.2\text{ pc}$, 平均数密度为 $10^4 - 10^5\text{ cm}^{-3}$, 速度弥散为 $0.1 - 0.3\text{ km s}^{-1}$ ^[1]. 典型的云核有 L1544、L1498 以及 B68 等^[1].

分子云是恒星形成的摇篮. 此观点由 Bart J. Bok 于 1946 年首次提出^[5], 并在之后的半个多世纪被包括红外和毫米波波段在内的观测所证实^[1,6]. 虽然前人对分子云核中的恒星形成做过相当多的研究, 但由于之前的选源主要在光学或者红外波段, 从而选出的源大都是已经有明显的恒星形成活动的区域, 使得人们很难对星前核 (prestellar core) 进行系统的观测, 从而不易研究恒星形成的早期状况. 基于此, 我们亟需一批更长波段 (例如毫米 - 亚毫米波段) 系统地选出的源, 从

而研究恒星 (甚至是云核) 形成早期阶段的物理状态. 幸运的是, Planck 空间望远镜提供了这样的研究样本.

1.2 Planck 团块

欧洲航天局于 2009 年 5 月发射 Planck 空间望远镜, 其工作波段为: 30、44 和 70 Hz (以上由 LFI 接收机实现); 100、143、217、353、545 和 857 Hz (以上由 HFI 接收机实现)^[7]. Planck 的早期结果系统地提供了丰富的银河系内冷团块样本: C3PO (Cold Core Catalogue of Planck Objects) 星表包含 10,873 个冷云核^[8,9]. 在 C3PO 表中, 915 个可靠探测 ($\text{SNR} > 15$ 且 $T_{\text{ECC}} < 14 \text{ K}$) 的源被归入其子表 ECC (Planck Early Release Cold Cores Catalogue)^[8,9].

对于 Planck 冷团块中尘埃的物理性质, Planck Collaboration 进行了细致研究, 从而揭示了 C3PO 中的冷团块的柱密度 $N_{\text{H}_2} \approx 0.1 - 1.6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, 并且尘埃温度在 10 K 到 15 K 之间^[9]. 这些研究利用三个 HFI 接收机频率 (353、545、857 Hz) 测得的流量, 同时结合 IRAS 3000 GHz 波段的数据得出相应结果^[9,10].

除了 Planck Collaboration 对于 Planck 冷团块尘埃成分的研究之外, 对其气体成分的单点观测也已经取得成果. 利用中国科学院紫金山天文台青海观测站的 13.7 m 毫米波望远镜, Wu et al (2012) 完成了对 674 个 ECC 源的 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 三谱线单点观测, 并且得出了其动力学温度 (T_k)、气体柱密度 (N_{H_2}) 以及速度弥散 (σ) 等物理参量^[11]. 利用同样的设备, Liu et al (2012) 等对 Orion 分子云复合体中的 51 个 Planck 冷团块做了 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 三谱线成图观测^[12]. 本文作为同系列的研究, 对 Taurus、Perseus、California 三个分子云复合体中的 71 个 Planck 冷团块同样做了 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 三谱线成图观测.

1.3 研究区域

1.3.1 Taurus 分子云复合体

Taurus 分子云复合体 (Taurus Molecular Complex, 下文简称 TMC) 是典型的小质量恒星形成区, 同时也是距离我们最近 ($D \approx 140$ pc) 的巨分子云^[13]. 因此, 在分辨率有限的情况下, TMC 是理想的小质量恒星形成研究样本.

对于 TMC, 人们已经有大量的分子谱线观测结果. 针对 TMC 和 Ophiuchus 中的 90 个“微小光学不透明体” (small visual opaques), Myers (1983), Myers and Benson (1983) 进行了 ^{13}CO 和 C^{18}O 的观测, 并且得出其中的云核几何尺度为 $0.1 - 0.3$ pc, 质量为 $4 - 30 M_{\odot}$ 以及激发温度 $T_{\text{ex}} \sim 10$ K^[14,15]. 在同一系列的成果中, Meyers et al 对云核的亚音速湍动、CO 外向流、形态等也进行了研究^[16-18].

在 TMC 中, 人们发现了丰富的气体动力学过程和多个演化阶段的特征. 分子外向流首次在大质量恒星形成区被发现, 但由于距离过远其并不能被很好地被分辨^[19]. 而之后在 TMC 中 L1551 被证认为有分子外向流, 并且红瓣 (red-lobe) 和蓝瓣 (blue-lobe) 能够良好地被分辨^[20]. 截至 2003 年 2 月发现的 400 个分子外向流中, 有 11% 在 TMC 中^[21]. 不仅分子外向流, 人们在 TMC 中也发现了丰富的分子内向流: 例如对 T Tau 双星系统^[22] 和 L 1544 的研究^[23]. 和恒星形成密切相关的盘状结构也在 TMC 中被证认出来: 例如在 HL Tau 周围发现的盘状结构^[24] 以及 DM Tau^[25]. 综上, TMC 包含从 class 0 到 class III 全部恒星形成阶段的源. 这些不同演化阶段的源的特征是恒星形成理论, 例如 Shu et al (1987) 提出的“恒星形成四个阶段”理论^[6] 的观测基础.

1.3.2 Perseus 分子云复合体

Perseus 分子云复合体 (Perseus Molecular Complex, 下文简称 PMC) 同样是著名的恒星形成区, 其中有中等质量原恒星被证认^[26]. 一般认为, PMC 的情形介于以 TMC 为代表的小质量恒星形成区和以 Orion 巨分子云为代表的大质量恒星形成区之间^[27]. 对于 PMC, 人们亦有大量研究.

结合亚毫米和中红外资料, 在 PMC 中已有 49 个深嵌埋 (deeply embedded) 年轻星体 (young stellar objects, 下文简称 YSO) 被证认^[28]. 而在毫米波段, 针

对 PMC 人们也已经进行过多次 CO 观测^[29-31].

PMC 的距离为 235 ± 18 pc^[26].

1.3.3 California 分子云复合体

有别于 TMC 和 PMC, 在 2009 年之前, California 分子云复合体 (California Molecular Complex, 下文简称 CMC) 并没有获得足够的重视. 对于 CMC 的开创性工作是 Lada et al 在 2009 年作出的, 其得出了 CMC 的距离为 450 ± 23 pc, 空间延伸达 80 pc, 总质量约为 $10^5 M_{\odot}$ ^[32]. CMC 有着和 Orion 巨分子云相似的距离、质量和形态, 但是其恒星形成活跃程度对比 Orion 巨分子云要低得多^[26,32].

近期, 一项对于 CMC 区域的成图研究给出了含有 78 个源的星表^[33]. 其中有 60 个“致密源”在 70 μm 的波段上被证认, 所用数据来自 Herschel 的 PACS 和 SPIRE 设备^[33]. 而另外 18 个“冷致密源”则是用的 Bolocam 1.1 mm 波段的数据^[33].

由于 CMC 展示出了相对年轻的演化特征, 其可以作为研究冷云核早期演化的理想样本. 除了上述的研究, 我们仍然迫切需要对 CMC 做更高分辨率的毫米波观测, 以更全面而深入地揭示其中冷云核的物理特性.

1.4 研究目标与方法

不同于对尘埃的连续谱观测, 观测和研究团块和云核的气体谱线可以对其物理性质、动力学特征、稳定性等方面作深入分析.

我们采用最常用的气体成分探针: CO. 本研究选用了其三种同位素分子并观测其最低两个转动能级间的跃迁辐射: $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$.

我们通过对 TMC、PMC 和 CMC 中的 Planck 冷团块 (特别是团块中的气体云核) 的气体成分谱线成图观测, 可以得出这些团块和其中的云核的:

1. 激发温度 (T_{ex})、热速度弥散 (σ_{Therm})、气体柱密度 (N_{H_2})、数密度 (n_{H_2}) 等物理性质和物质组成.
2. 本地静止标准速度 (V_{lsr})、谱线轮廓、非热速度弥散 (σ_{NT})、三维速度弥散 (σ_{3D}) 等动力学特征.

3. 云核的几何尺度 (R)、LTE 质量 (M_{LTE})、Jeans 质量 (M_J) 和 virial 质量 (M_{vir}) 等云核特有的参量. 这些参量往往和云核的稳定性以及恒星形成密切相关.

根据这些参量, 我们进行了如下分析:

1. 通过分析谱线轮廓探究其中是否有分子外向流、内流等剧烈的气体运动过程.
2. 通过比较 σ_{Therm} 和 σ_{NT} , 以及检验云核的柱密度概率分布函数 (PDF) 来分析热压力、湍动和重力三者在云核中起的作用.
3. 通过比较云核的 M_{LTE} 、 M_J 和 M_{vir} 讨论云核的稳定性.
4. 通过比较我们得出的气体成分的温度 T_k 和从 ECC 源表提供的尘埃温度 T_D 揭示这些云核中气体和尘埃的耦合状况.
5. 通过比较我们得出的 CO 柱密度和从 ECC 源表提供的流量等数据计算出的 (由尘埃观测导出的) N_{H_2} , 我们可以得出 CO 丰度在这些云核中的情况, 同时也可以检验我们计算 (有气体谱线观测导出的) N_{H_2} 时采用的 CO 丰度值是否合理.
6. 通过查找与我们的云核成协的源, 来验证 Planck 团块和其中的云核是否是星前核 (prestellar core).

通过这些分析和讨论, 我们一方面可以揭示与验证 Planck 冷团块的物理性质和演化阶段. 另一方面, 我们可以通过这些样本, 系统地总结典型恒星形成区中年轻云核的物理性质、动力学状态、物质组成等基本情况, 使得我们了解恒星形成的早期阶段特征.

值得一提的是, 虽然 TMC 和 PMC 已经被较多地研究过, 人们之前并没有对 CMC 足够重视, 本研究是国际上最早对 CMC 进行的有针对性的毫米波观测之一, 首次揭示了 CMC 中年轻冷云核的典型性质.

第二章 观测方法与数据处理

2.1 观测设备

观测设备为中国科学院紫金山天文台青海观测站 13.7 m 望远镜. 观测时间为 2011 年 1 月至 5 月. 观测的谱线为 $J = 1 \rightarrow 0$ 的 ^{12}CO , ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线. 观测模式为 OTF (On-The-Fly 模式). 观测时的设备参数如表 2.1.

表 2.1: 设备参数

天线波束宽度	$56'' \times 55''$ (频率为 92.8 GHz 时)
主波束效率	$\sim 50\%$
指向精度	好于 $4''$
光谱分辨率	对于 $^{12}\text{CO}(1-0)$: 0.16 km s^{-1} 对于 $^{13}\text{CO}(1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$: 0.17 km s^{-1}
T_A^* 均方根噪声	对于 $^{12}\text{CO}(1-0)$: 0.2 K 对于 $^{13}\text{CO}(1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$: 0.1 K
OTF 扫描速率	$20'' \text{ s}^{-1}$

2.2 观测源表

所有完成观测的源的源名和坐标参见表 2.2, 有 3 个源由于参考位置不合适, 为了保证数据的可靠性, 被排除出后续讨论, 其源名之后有 “*” 为记. 我们将在后续研究中重新选取合适的参考位置进行重新观测.

本研究的选源无任何倾向性, 即随机从 Wu et al. (2012) 的 674 源中选了在 TMC、PMC 和 CMC 范围内的^[11].

表 2.2: 观测源表

源名	Glom deg	Glat deg	RA(J2000) (h m s)	DEC(J2000) (d m s)	RA(B1950) (h m s)	DEC(B1950) (d m s)	区域	†
G153.34-08.00	153.34715	-8.0086632	03 48 42.73	+44 08 46.62	03 45 14.92	+43 59 37.01	CMC	N
G154.68-15.34	154.68748	-15.346058	03 30 35.18	+37 31 28.11	03 27 21.01	+37 21 14.40	PMC	N
G155.52-08.93	155.52245	-8.9326496	03 54 34.60	+42 03 48.96	03 51 09.75	+41 55 01.08	CMC	N
G156.53-08.63	156.53319	-8.6306944	03 59 41.99	+41 38 26.63	03 56 17.21	+41 29 57.92	CMC	N
G156.90-08.49	156.90672	-8.4986649	04 01 38.87	+41 29 43.41	03 58 14.09	+41 21 22.06	CMC	Y
G156.92-09.72	156.9287	-9.7264977	03 57 26.44	+40 33 29.15	03 54 03.85	+40 24 52.02	CMC	N
G157.10-08.70	157.10448	-8.7061596	04 01 41.53	+41 12 37.45	03 58 17.25	+41 04 16.29	CMC	Y
G157.12-11.56	157.12645	-11.567412	03 51 59.15	+39 01 55.10	03 48 39.82	+38 52 57.79	CMC	N
G157.19-08.81	157.19237	-8.8193874	04 01 38.24	+41 04 05.05	03 58 14.22	+40 55 43.68	CMC	N
G157.58-08.89	157.58788	-8.8948917	04 02 54.80	+40 45 04.96	03 59 31.18	+40 36 48.44	CMC	Y
G157.60-12.17	157.60985	-12.177292	03 51 49.54	+38 15 38.76	03 48 31.47	+38 06 40.89	CMC	N
G157.91-08.23	157.91747	-8.2347422	04 06 32.28	+41 01 15.73	04 03 07.73	+40 53 13.02	CMC	Y
G158.20-20.28	158.20311	-20.284357	03 29 19.31	+31 33 54.87	03 26 13.37	+31 23 37.03	PMC	Y
G158.22-20.14	158.22508	-20.145231	03 29 47.61	+31 39 49.38	03 26 41.50	+31 29 33.16	PMC	Y
G158.24-21.80	158.24706	-21.803167	03 25 13.67	+30 19 30.39	03 22 09.71	+30 08 58.61	PMC	Y
G158.37-20.72	158.37889	-20.722431	03 28 41.99	+31 06 59.39	03 25 36.68	+30 56 39.43	PMC	Y
G158.40-21.86	158.40086	-21.863445	03 25 35.50	+30 11 29.55	03 22 31.67	+30 00 59.01	PMC	Y
G159.01-08.46	159.0161	-8.4609509	04 09 55.13	+40 06 54.78	04 06 31.79	+39 59 05.11	CMC	Y
G159.03-08.32	159.03807	-8.3289795	04 10 28.53	+40 11 46.78	04 07 04.98	+40 03 59.25	CMC	Y
G159.14-08.76	159.14793	-8.7627697	04 09 20.14	+39 48 21.73	04 05 57.40	+39 40 29.83	CMC	Y
G159.16-05.58	159.16991	-5.5854774	04 21 08.38	+42 04 14.47	04 17 40.18	+41 57 08.54	CMC	N
G159.21-20.12	159.21385	-20.125366	03 33 17.90	+31 06 48.54	03 30 12.10	+30 56 44.50	PMC	Y
G159.65-19.68	159.65331	-19.688967	03 36 04.66	+31 12 02.60	03 32 58.46	+31 02 08.29	PMC	Y
G159.67-05.71	159.67528	-5.7166719	04 22 32.37	+41 37 15.79	04 19 04.87	+41 30 15.43	CMC	N
G159.82-10.48	159.82909	-10.484298	04 05 49.63	+38 05 19.15	04 02 30.19	+37 57 13.88	CMC	N
G160.35-06.37	160.35643	-6.3731093	04 22 34.71	+40 40 40.18	04 19 08.95	+40 33 40.04	CMC	N
G160.51-16.84	160.51024	-16.840801	03 47 34.31	+32 53 12.17	03 44 24.67	+32 43 58.95	PMC	Y
G160.51-17.07	160.51024	-17.074787	03 46 51.18	+32 42 28.95	03 43 41.85	+32 33 13.12	PMC	Y
G160.53-09.84	160.53221	-9.8400545	04 10 37.94	+38 05 04.82	04 07 17.99	+37 57 18.02	CMC	Y
G160.53-19.72	160.53221	-19.72859	03 38 58.11	+30 39 04.72	03 35 52.31	+30 29 20.65	PMC	N
G160.62-16.70	160.6201	-16.704443	03 48 22.46	+32 55 21.25	03 45 12.68	+32 46 10.96	PMC	Y
G161.08-21.78	161.08153	-21.783081	03 34 51.38	+28 43 51.87	03 31 48.37	+28 33 53.36	PMC	N

续下页

接上页

源名	Glou deg	Glat deg	RA(J2000) (h m s)	DEC(J2000) (d m s)	RA(B1950) (h m s)	DEC(B1950) (d m s)	区域	†
G161.21-08.72	161.21336	-8.725029	04 17 02.75	+38 24 57.50	04 13 41.57	+38 17 35.66	CMC	Y
G162.24-09.04	162.24608	-9.0459471	04 19 33.27	+37 28 03.29	04 16 13.43	+37 20 51.37	CMC	N
G162.46-08.70	162.46581	-8.7061596	04 21 32.60	+37 33 04.74	04 18 12.44	+37 26 00.67	CMC	Y
G162.86-05.24	162.86131	-5.2482533	04 35 48.53	+39 38 08.62	04 32 23.40	+39 32 01.70	CMC	N
G163.32-08.42	163.32274	-8.4232397	04 25 31.80	+37 08 19.15	04 22 11.95	+37 01 30.96	CMC	Y
G164.13-08.85	164.13573	-8.8571377	04 26 43.25	+36 15 25.18	04 23 24.76	+36 08 41.79	CMC	Y
G164.57-24.48	164.57518	-24.480778	03 38 12.61	+24 36 13.41	03 35 14.17	+24 26 26.86	TMC	Y
G164.75-24.19	164.75096	-24.194195	03 39 34.02	+24 42 59.94	03 36 35.34	+24 33 18.21	TMC	Y
G164.81-05.67	164.81688	-5.6791844	04 40 47.51	+37 53 40.02	04 37 25.07	+37 47 53.55	TMC	N
G164.92-12.65	164.92674	-12.654734	04 16 04.53	+33 03 27.18	04 12 51.94	+32 56 01.81	TMC	N
G166.99-15.34	166.99217	-15.346058	04 13 42.01	+29 44 26.31	04 10 34.35	+29 36 51.83	TMC	N
G168.00-15.69	168.00291	-15.694481	04 15 40.46	+28 48 00.55	04 12 33.93	+28 40 33.81	TMC	Y
G168.13-16.39	168.13475	-16.393131	04 13 47.56	+28 13 22.16	04 10 41.95	+28 05 48.10	TMC	Y
G169.76-16.15	169.76073	-16.159975	04 19 25.47	+27 15 16.21	04 16 20.77	+27 08 04.27	TMC	Y
G169.82-19.39	169.82664	-19.392105	04 09 12.03	+24 58 39.00	04 06 10.93	+24 50 47.28	TMC	Y
G169.98-18.97	169.98045	-18.977402	04 10 57.74	+25 09 42.12	04 07 56.29	+25 01 57.19	TMC	Y
G170.13-16.06	170.13426	-16.062908	04 20 50.61	+27 03 29.08	04 17 46.07	+26 56 22.76	TMC	Y
G170.26-16.02	170.2661	-16.024094	04 21 21.47	+26 59 29.26	04 18 16.99	+26 52 24.97	TMC	Y
G170.57-07.85	170.57372	-7.8580132	04 50 38.52	+32 07 05.91	04 47 24.92	+32 02 00.48	TMC	N
G170.88-10.92	170.88133	-10.920865	04 40 32.71	+29 55 42.61	04 37 22.97	+29 49 55.56	TMC	Y
G171.43-17.36	171.43065	-17.367682	04 20 19.19	+25 15 38.94	04 17 17.04	+25 08 30.63	TMC	Y
G171.51-10.59*	171.51854	-10.598125	04 43 32.45	+29 39 25.68	04 40 22.93	+29 33 50.96	TMC	Y
G172.13-16.93	172.13377	-16.938259	04 23 43.24	+25 03 07.38	04 20 41.16	+24 56 12.56	TMC	N
G172.83-05.17	172.8369	-5.1733398	05 07 09.50	+31 59 19.44	05 03 55.27	+31 55 23.51	TMC	Y
G172.85-14.74	172.85887	-14.747349	04 33 03.17	+25 58 33.47	04 29 59.36	+25 52 16.07	TMC	Y
G172.92-16.74	172.92479	-16.743393	04 26 34.88	+24 36 58.52	04 23 33.20	+24 30 15.13	TMC	Y
G172.94-05.49	172.94676	-5.491785	05 06 15.78	+31 42 39.02	05 03 02.03	+31 38 39.30	TMC	Y
G173.07-17.89	173.0786	-17.896084	04 23 13.65	+23 44 29.43	04 20 13.27	+23 37 32.71	TMC	Y
G173.45-05.43	173.45213	-5.4355769	05 07 52.92	+31 20 25.45	05 04 39.67	+31 16 32.63	TMC	N
G173.60-17.89	173.60594	-17.896084	04 24 40.82	+23 21 57.79	04 21 40.84	+23 15 06.86	TMC	N
G173.91-16.25	173.91356	-16.25709	04 30 55.66	+24 13 14.78	04 27 54.26	+24 06 48.88	TMC	Y
G174.06-15.81	174.06737	-15.810754	04 32 50.26	+24 23 55.66	04 29 48.54	+24 17 37.46	TMC	Y
G174.39-13.43	174.39696	-13.439694	04 41 46.05	+25 40 35.79	04 38 42.19	+25 34 53.96	TMC	Y
G174.70-15.48	174.70457	-15.481486	04 35 40.77	+24 08 34.46	04 32 39.23	+24 02 27.81	TMC	Y
G174.81-15.15*	174.81444	-15.152741	04 37 05.01	+24 16 21.02	04 34 03.25	+24 10 20.08	TMC	N

续下页

接上页

源名	Glom deg	Glat deg	RA(J2000) (h m s)	DEC(J2000) (d m s)	RA(B1950) (h m s)	DEC(B1950) (d m s)	区域	†
G175.16-16.74	175.166	-16.743393	04 32 42.66	+22 59 28.59	04 29 42.75	+22 53 09.94	TMC	Y
G175.58-16.60*	175.58348	-16.607105	04 34 16.84	+22 46 21.58	04 31 17.14	+22 40 09.30	TMC	N
G175.97-20.38	175.97899	-20.38381	04 22 57.43	+20 02 28.95	04 20 01.62	+19 55 31.30	TMC	Y
G176.46-21.10	176.46239	-21.101789	04 21 54.04	+19 13 48.81	04 18 59.24	+19 06 46.99	TMC	Y
G177.60-20.58	177.60497	-20.582909	04 26 29.82	+18 45 06.57	04 23 35.40	+18 38 23.09	TMC	Y
G177.89-20.16	177.89061	-20.165098	04 28 34.65	+18 48 48.70	04 25 40.07	+18 42 13.56	TMC	Y
G177.97-09.72	177.9785	-9.7264977	05 04 17.30	+25 11 00.36	05 01 13.18	+25 06 52.61	TMC	Y

†: 表示有 (Y) 无 (N) IRAC/MIPS 成协物.

2.3 数据处理

为了处理观测数据, 我们使用了 IRAM 提供的 GILDAS 软件包^[34] 和 SMA 提供的 MIRIAD 软件包^[35]. OTF 的数据在处理前被转换为间隔为 $30''$ 的三维数据矩阵 (3-D data cube).

在观测时, 成图范围为 $20' \times 20'$, 但是我们发现, 由于成图范围只是对于 9 波束接收机阵列中的中心接收机而言的, 在图的边缘时信噪比会显著降低. 于是我们为了保证数据质量舍弃了边缘的数据, 只保留了 $14' \times 14'$ 的范围.

第三章 观测结果与参量计算

3.1 结果综述

我们观测的 71 个源的空间分布如图 3.1.

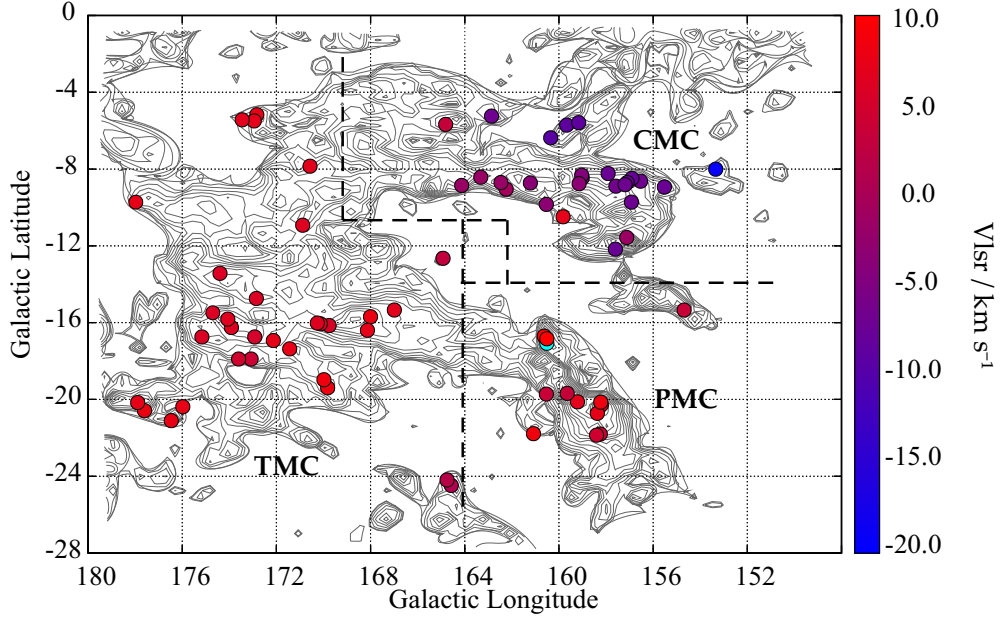


图 3.1: 源的空间分布. 背景灰度图来自 1.2 m 望远镜 ^{13}CO 巡天的积分强度图^[36], 点的颜色代表相应源的几何中心位置的 V_{lsr} . 虚线表示 TMC、PMC、CMC 三个区域的分界, 根据 [26].

我们在下文以“团块”称这我们观测的源, 这是沿用了 Planck Collaboration 使用的“冷团块”的称呼^[9]. 不仅如此, 由于我们的成图区域是 $14' \times 14'$, 对于 TMC、PMC 和 CMC 来说, 成图的尺度分别为 0.6×0.6 pc、 0.9×0.9 pc、和 1.7×1.7 pc. 这样的成图尺度恰好符合第1.1节中关于团块尺度 ($0.3 \sim 3$ pc) 的界定.

对于 71 个团块我们全部探测到了 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 和 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 发射线, 而对于其中的 55 个, 我们探测到了 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 发射信号. 在 5 个 Planck 团块中, 我们发现了双重速度成分: 我们检视了每个团块几何中心处的谱线, 在这 5 个源中发现了双重的发射峰; 之后为了验证, 对于两个峰分别作积分强度图, 发现明显分离的辐射区域, 从而将其认证为双重速度成分. 为了方便和明确, 在下文, 我们将这 10 个速度成分视作单独的团块.

我们绘制了全部团块 (不同速度成分速度成分视为独立团块) $^{12}\text{CO}(1-0)$ 和 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 的积分强度图. 在本研究中, 我们将主要关注云核的性质, 是故我们要在团块中证认云核. 证认标准为: 在积分强度图中强度为局部峰值的 60% ^{13}CO 之等值线需完全包括在成图区域内. 这样, 我们很好地区分了云核和其所在的团块. 同时, 由于这样定义的云核有清晰的界限, 使得我们可以对其进行较为精确的椭圆高斯拟合.

为了明确, 我们将制定了云核的命名规则: Planck 冷团块名称 +a (线心速度小的速度成分) 或 b (线心速度大的速度成分) 或为空 (无双重速度成分) +C(云核) + 云核编号.

在所有 76 个团块中, 27 个含有云核. 在这 27 个团块其中, 我们证认出了总计 38 个云核. 其中, 19 个云核在 TMC 中、16 个云核在 CMC 中, 而 PMC 只有 3 个云核. 由于 PMC 中云核过少, 我们在后面使用统计方法的分析讨论中将不涉及之.

在附录A中, 我们出示了每个云核中心位置的光谱; 在附录B中, 我们出示了每个团块的积分强度图.

3.2 观测参量

通过对谱线的高斯拟合, 我们得到了观测参量: V_{lsr} 、 T_A 和 FWHM. 每个云核中心处的观测参量如表 3.1. 对于全部 38 个云核、TMC 和 CMC, 我们分别对这些观测参量做了统计. 统计结果如表 3.2.

我们发现 TMC 中的云核比之 CMC 中的云核有着较小的平均 $\Delta V(12)$ 、 $\Delta V(13)$ 和 $\Delta V(18)$. 但是, TMC 中云核的平均 $T_A(12)$ 、 $T_A(13)$ 和 $T_A(18)$ 均比 CMC 中云核的相应平均值大.

表 3.1: 观测参量

云核名称	v_{lsr} (12) (km/s)	FWHM (12) (km/s)	Ta (12) (K)	v_{lsr} (13) (km/s)	FWHM(13) (km/s)	Ta(13) (K)	v_{lsr} (18) (km/s)	FWHM (18) (km/s)	Ta (18) (K)	谱线轮廓 [†]
G153.34-08.00C1	-19.14(0.02)	2.03(0.04)	3.22(0.13)	-19.06(0.01)	1.26(0.03)	1.82(0.07)	18.98(0.07)	1.14(0.17)	0.27(0.06)	CMC
G153.34-08.00C2	-19.13(0.02)	1.57(0.04)	3.37(0.18)	-19.07(0.02)	1.05(0.04)	1.62(0.1)				CMC
G154.68-15.34C1	3.37(0.07)	1.61(0.19)	4.09(0.74)	3.34(0.01)	0.96(0.03)	2.59(0.1)				PMC
G155.52-08.93C1	-7.45(0.01)	1.08(0.02)	3.38(0.06)	-7.45(0.01)	0.80(0.02)	1.57(0.04)				CMC
G156.92-09.72C1	-7.36(0.02)	2.23(0.05)	2.54(0.15)	-7.24(0.01)	1.39(0.03)	1.54(0.05)	-7.36(0.07)	1.12(0.28)	0.29(0.06)	CMC
G157.12-11.56C1	-1.98(0.02)	1.96(0.04)	4.44(0.21)	-1.68(0.01)	1.23(0.02)	2.43(0.07)	-1.63(0.03)	0.87(0.06)	0.55(0.07)	CMC
G157.12-11.56C2	-1.94(0.02)	2.05(0.05)	4.3(0.23)	-1.7(0.01)	1.28(0.03)	2.03(0.07)	-1.66(0.06)	0.88(0.12)	0.36(0.08)	CMC
G157.12-11.56C3	-1.79(0.02)	2.19(0.06)	4.58(0.26)	-1.72(0.02)	1.14(0.05)	1.93(0.13)				W
G157.60-12.17aC1	-7.61(0.02)	2.52(0.05)	3.4(0.14)	-7.63(0.01)	1.43(0.04)	2.19(0.42)	-7.59(0.04)	0.95(0.09)	0.53(0.07)	W
G157.60-12.17bC1	-2.89(0.01)	2.53(0.02)	5.44(0.09)	-2.57(0.01)	1.15(0.03)	2.68(0.59)	-2.4(0.07)	0.71(0.14)	0.24(0.07)	BA+
G157.60-12.17bC2	-2.44(0.02)	2.89(0.04)	5.11(0.18)	-1.97(0.03)	1.82(0.09)	1.69(0.11)				BA+
G157.91-08.23C1	-7.28(0.02)	3.25(0.05)	2.38(0.11)	-7.31(0.01)	2.05(0.03)	1.92(0.07)	-7.49(0.05)	1.4(0.1)	0.53(0.08)	CMC
G159.21-20.12C1	6.41(0.01)	4.44(0.01)	5.75(0.07)	6.63(0.01)	2.14(0.01)	4.88(0.06)	6.69(0.01)	1.2(0.03)	1.87(0.06)	PMC
G159.67-05.71C1	-8.72(0.01)	2.85(0.03)	3.39(0.09)	-8.71(0.02)	2.01(0.04)	1.6(0.08)				CMC
G159.82-10.48C1	6.96(0.02)	1.87(0.03)	4.9(0.2)	7.04(0.02)	1.36(0.04)	1.91(0.1)				BA+, De
G160.35-06.37C1	-9.34(0.02)	1.44(0.05)	2.70(0.1)	-9.25(0.02)	1.03(0.04)	1.56(0.05)				CMC
G160.53-19.72C1	3.21(0.01)	2.33(0.03)	5.39(0.15)	3.4(0.01)	1.85(0.02)	2.69(0.07)	3.61(0.04)	1.17(0.11)	0.52(0.07)	PMC
G162.24-09.04C1	-0.74(0.02)	1.89(0.03)	2.5(0.1)	-0.9(0.02)	1.48(0.04)	1.39(0.08)				CMC
G164.13-08.85C1	-1.57(0.02)	3.27(0.05)	2.98(0.12)	-1.88(0.02)	2.18(0.05)	1.26(0.07)	-1.87(0.1)	1.4(0.18)	0.26(0.07)	CMC
G164.57-24.48C1	0.96(0.01)	1.86(0.02)	5.09(0.09)	0.78(0.01)	1.38(0.03)	1.49(0.06)				TMC

续下页

接上页

云核名称	$v_{lsr}(12)$ (km/s)	FWHM (12) (km/s)	Ta (12) (K)	$v_{lsr}(13)$ (km/s)	FWHM(13) (km/s)	Ta(13) (K)	v_{lsr} (18) (km/s)	FWHM (18) (km/s)	Ta (18) (K)	谱线轮廓 [†]
G164.57-24.48C2	1.45(0.01)	2.1(0.02)	4.92(0.09)	1.68(0.01)	1.08(0.03)	1.5(0.06)				BW TMC
G164.57-24.48C3	1.18(0.01)	2.41(0.02)	4.88(0.09)	0.86(0.02)	1.87(0.05)	0.95(0.05)				BA+ TMC
G164.75-24.19C1	1.57(0.01)	1.53(0.01)	4.19(0.06)	1.45(0.01)	1.17(0.02)	1.29(0.04)				RA+ TMC
G164.75-24.19C2	1.01(0.01)	1.8(0.02)	4.67(0.1)	1.09(0.01)	1.26(0.03)	1.42(0.05)				W TMC
G164.81-05.67C1	3.29(0.01)	2.03(0.02)	3.12(0.09)	3.14(0.02)	1.37(0.04)	1.91(0.11)				RA+ TMC
G164.92-12.65C1	2.96(0.03)	1.65(0.06)	2.44(0.2)	2.87(0.02)	0.94(0.05)	1.39(0.11)				BA+ TMC
G164.92-12.65C2	2.95(0.04)	2.08(0.08)	2.37(0.23)	2.86(0.04)	1.07(0.09)	1.25(0.18)				TMC
G164.92-12.65C3	2.98(0.03)	2.09(0.06)	2.54(0.19)	2.83(0.05)	1.16(0.11)	1.17(0.18)				TMC
G166.99-15.34C1	6.61(0.02)	3.07(0.04)	2.33(0.09)	6.62(0.02)	1.48(0.04)	1.24(0.06)	6.76(0.04)	0.74(0.1)	0.37(0.06)	W TMC
G172.83-05.17C1	7.39(0.01)	0.91(0.03)	3.95(0.2)	7.41(0)	0.58(0.01)	2.75(0.06)	7.4(0.03)	0.39(0.07)	0.53(0.09)	RA+ TMC
G172.94-05.49C1	7(0.01)	0.8(0.01)	4.89(0.12)	6.98(0.01)	0.64(0.01)	3.05(0.07)	6.98(0.01)	0.42(0.02)	1.06(0.05)	TMC
G173.07-17.89C1	3.75(0.01)	2.03(0.02)	4.43(0.1)	3.99(0.01)	1.32(0.02)	2.39(0.06)	4.09(0.04)	0.77(0.09)	0.49(0.06)	BW TMC
G173.07-17.89C2	3.61(0.01)	2.41(0.02)	3.6(0.1)	3.96(0.01)	1.33(0.02)	2.03(0.06)	4.28(0.03)	0.34(0.07)	0.39(0.07)	RA TMC
G173.45-05.43C1	6.8(0.01)	0.62(0.02)	4.55(0.16)	6.82(0.01)	0.48(0.02)	2.53(0.09)				W TMC
G173.60-17.89C1	4.59(0.01)	0.76(0.03)	3.44(0.12)	4.39(0.01)	1.28(0.03)	1.78(0.07)	4.49(0.07)	0.7(0.16)	0.28(0.07)	BA TMC
G173.60-17.89C2	3.67(0.02)	2.07(0.04)	2.77(0.13)	3.9(0.01)	1.01(0.02)	2.07(0.07)	4(0.07)	0.86(0.21)	0.23(0.07)	RA+ TMC
G174.70-15.48C1	5.95(0)	2.04(0.02)	4.69(0.08)	5.87(0)	1.13(0.01)	3.65(0.05)	5.97(0.01)	0.59(0.02)	1.47(0.05)	TMC
G175.97-20.38C1	7.17(0.01)	1.32(0.03)	3.19(0.14)	7.26(0.01)	1.19(0.03)	1.51(0.07)				RA TMC

表 3.2: 观测参量统计结果

	$V_{lsr}(12)$ (km/s)	$\Delta V(12)$ (km/s)	$T_A(12)$ (K)	$V_{lsr}(13)$ (km/s)	$\Delta V(13)$ (km/s)	$T_A(13)$ (K)	$V_{lsr}(18)$ (km/s)	$\Delta V(18)$ (km/s)	$T_A(18)$ (K)
全部 38 个云核									
最小值	-19.14	0.62	2.3	-19.07	0.48	0.95	-7.59	0.34	0.23
最小值	7.39	4.44	5.8	7.41	2.18	4.88	18.98	1.40	1.87
中位数	1.51	2.04	3.8	1.56	1.26	1.80	4.04	0.86	0.44
平均值	-0.12	2.04	3.8	-0.08	1.30	1.97	2.40	0.87	0.57
标准差	6.66	0.75	1.03	6.65	0.41	0.76	6.65	0.32	0.45
TMC 中 19 个云核									
最小值	0.96	0.62	2.33	0.78	0.48	0.95	4.00	0.34	0.23
最小值	7.39	3.07	5.09	7.41	1.87	3.65	7.40	0.86	1.47
中位数	3.61	2.03	3.95	3.90	1.17	1.51	5.23	0.64	0.44
平均值	3.94	1.77	3.79	3.93	1.14	1.86	5.50	0.60	0.60
标准差	2.26	0.64	0.99	2.29	0.33	0.72	1.43	0.20	0.43
CMC 中 16 个云核									
最小值	-19.14	1.08	2.38	-19.07	0.80	1.26	-7.59	0.71	0.24
最小值	6.96	3.27	5.44	7.04	2.18	2.68	18.98	1.40	0.55
中位数	-5.08	2.12	3.38	-4.91	1.32	1.75	-2.13	1.03	0.33
平均值	-5.77	2.23	3.66	-5.69	1.42	1.82	-1.38	1.06	0.38
标准差	6.63	0.63	0.99	6.64	0.40	0.38	8.68	0.25	0.14

3.3 物理参量

通过已经求得的观测参量我们计算出了各个云核的物理参量. 在局部热动平衡 (LTE) 假设下应用辐射传能方程, 我们可以计算出云核的激发温度 (T_{ex})、气体柱密度 (N_{H_2})、热速度弥散 (σ_{Therm})、非热速度弥散 (σ_{NT}) 以及三维速度弥散 (σ_{3D}) 等物理参量. 通过对云核成图进行椭圆高斯拟合, 我们还得到了云核的几何尺度 (R), 进而计算出气体数密度 (n_{H_2})、LTE 质量 (M_{LTE})、Jeans 质量 (M_J) 和 virial 质量 (M_{vir}).

我们对于每个云核中各观测位置均计算了物理参量, 结合得到的云核边界, 我们在云核内部对这些物理参量进行了平均. 得到了云核的平均物理参量, 如表 3.3. 另外, 我们对于全部云核、TMC 中的云核以及 CMC 中的云核分别统计了其平均物理参量的情况, 如表 3.4.

表 3.3: 物理参量

云核名称	V_{LSR} (km s^{-1})	偏移 ($''$, $''$)	几何尺度 ($'' \times ''$)	R (pc)	T_{ex} (K)	$\tau(^{13}\text{CO})$ (10^{21} cm^{-2})	N_{H_2} (10^{21} cm^{-2})	σ_{Therm} (km s^{-1})	σ_{NT} (km s^{-1})	σ_{3D} (km s^{-1})	n_{H_2} (10^3 cm^{-3})	M_{LTE} (M_{\odot})	M_J (M_{\odot})	M_{vir} (M_{\odot})	区域
G153.34-08.00C1	-18.93	(6, -49)	196×107	0.158	9.7 (0.5)	0.82(0.04)	2.0 (0.7)	0.19(0.005)	0.34(0.04)	0.66(0.07)	2.0	2.9	43	19	CMC
G153.34-08.00C2	-19.10	(-163, 120)	224×86	0.151	10.3(0.4)	0.65(0.03)	1.5 (0.4)	0.19(0.003)	0.30(0.05)	0.60(0.07)	1.6	2.0	35	17	CMC
G154.68-15.34C1	3.31	(216, 31)	1261×381	0.394	11.9(0.9)	0.99(0.07)	2.2 (0.7)	0.21(0.008)	0.32(0.09)	0.65(0.14)	0.9	20	76	28	PMC
G155.52-08.93C1	-7.46	(18, -2)	392×284	0.364	9.7 (1.0)	0.75(0.08)	1.0 (0.3)	0.18(0.009)	0.22(0.05)	0.48(0.07)	0.5	7.8	49	15	CMC
G156.92-09.72C1	-7.19	(50, 53)	714×421	0.598	9.0 (0.4)	0.92(0.04)	1.8 (0.4)	0.18(0.004)	0.33(0.08)	0.64(0.13)	0.5	38	160	35	CMC
G157.12-11.56C1	-1.79	(-12, 84)	383×238	0.331	6.3 (0.9)	0.79(0.11)	3.0 (0.7)	0.15(0.010)	0.26(0.05)	0.51(0.08)	1.5	19	53	10	CMC
G157.12-11.56C2	-1.90	(-50, 137)	694×269	0.473	6.2 (0.7)	0.63(0.07)	2.7 (0.9)	0.15(0.009)	0.26(0.06)	0.52(0.09)	0.9	35	77	13	CMC
G157.12-11.56C3	-1.62	(-38, -352)	173×102	0.145	5.3 (0.2)	0.54(0.02)	2.4 (0.8)	0.14(0.003)	0.45(0.08)	0.81(0.13)	2.8	3.0	40	30	CMC
G157.60-12.17C1	-7.68	(67, -45)	405×335	0.402	10.5(1.0)	1.02(0.10)	2.4 (0.8)	0.19(0.009)	0.28(0.09)	0.59(0.13)	0.9	23	76	20	CMC
G157.60-12.17bC1	-2.55	(-92, -59)	513×372	0.476	14.9(1.5)	0.67(0.07)	3.0 (0.9)	0.23(0.012)	0.21(0.10)	0.54(0.15)	1.0	40	50	14	CMC
G157.60-12.17bC2	-2.32	(-187, -266)	281×213	0.267	14.7(1.3)	0.40(0.04)	2.9 (0.9)	0.23(0.010)	0.61(0.14)	1.11(0.23)	1.8	12	190	98	CMC
G157.91-08.23C1	-7.23	(31, -106)	524×494	0.556	8.5 (0.6)	1.61(0.11)	2.8 (0.8)	0.17(0.005)	0.41(0.13)	0.77(0.21)	0.8	51	230	47	CMC
G159.21-20.12C1	6.53	(47, 3)	877×633	0.425	16.1(1.3)	1.86(0.15)	10.7(2.6)	0.24(0.010)	0.35(0.13)	0.74(0.21)	4.1	110	130	18	PMC
G159.67-05.71C1	-8.50	(-17, -12)	469×418	0.482	9.4 (0.6)	0.63(0.04)	2.0 (0.9)	0.18(0.006)	0.51(0.13)	0.94(0.20)	0.7	27	410	90	CMC
G159.82-10.48C1	7.00	(23, -7)	453×263	0.376	12.4(0.7)	0.49(0.03)	2.1 (0.7)	0.21(0.006)	0.41(0.09)	0.79(0.14)	0.9	17	150	49	CMC
G160.35-06.37C1	-9.2	(8, -47)	238×79	0.149	8.6 (0.7)	0.63(0.05)	1.3 (0.5)	0.17(0.008)	0.27(0.08)	0.55(0.11)	1.6	1.7	33	12	CMC
G160.53-19.72C1	3.56	(6, 89)	864×473	0.364	12.8(0.7)	0.69(0.04)	4.2 (1.3)	0.21(0.005)	0.34(0.11)	0.71(0.18)	1.8	33	100	23	PMC
G162.24-09.04C1	-0.82	(-5, -19)	562×377	0.501	8.3 (0.4)	0.80(0.04)	1.6 (0.5)	0.17(0.004)	0.37(0.08)	0.70(0.13)	0.5	23	230	45	CMC
G164.13-08.85C1	-1.66	(19, -6)	709×372	0.559	9.9 (0.8)	0.54(0.04)	2.3 (0.7)	0.19(0.008)	0.41(0.11)	0.78(0.17)	0.7	42	230	52	CMC
G164.57-24.48C1	0.90	(-49, 90)	226×90	0.048	12.6(0.6)	0.34(0.02)	1.7 (0.5)	0.22(0.005)	0.35(0.07)	0.69(0.11)	5.6	0.23	19	14	TMC
G164.57-24.48C2	1.54	(0, -108)	285×176	0.076	12.6(0.6)	0.36(0.02)	1.3 (0.3)	0.22(0.005)	0.35(0.08)	0.69(0.13)	2.8	0.44	19	20	TMC
G164.57-24.48C3	0.97	(-116, -164)	190×128	0.053	12.3(0.8)	0.22(0.01)	1.3 (0.3)	0.21(0.006)	0.43(0.09)	0.82(0.13)	4.0	0.21	39	26	TMC
G164.75-24.19C1	1.45	(-14, 98)	145×84	0.038	11.2(0.7)	0.37(0.02)	1.2 (0.3)	0.19(0.006)	0.29(0.04)	0.59(0.06)	5.1	0.10	11	8.7	TMC
G164.75-24.19C2	1.07	(-23, -16)	133×81	0.035	11.7(1.3)	0.36(0.04)	1.4 (0.5)	0.21(0.012)	0.32(0.07)	0.65(0.11)	6.6	0.10	12	10	TMC
G164.81-05.67C1	3.10	(30, 14)	497×306	0.132	9.3 (1.1)	0.94(0.11)	2.2 (0.6)	0.18(0.011)	0.42(0.08)	0.78(0.13)	2.8	2.2	52	27	TMC

续下页

接上页

云核名称	V_{Lsr} (km s^{-1})	偏移 ($''$, $''$)	几何尺度 ($'' \times ''$)	R (pc)	T_{ex} (K)	$\tau(^{13}\text{CO})$	N_{H_2} (10^{21} cm^{-2})	σ_{Therm} (km s^{-1})	σ_{NT} (km s^{-1})	σ_{3D} (km s^{-1})	n_{H_2} (10^3 cm^{-3})	M_{LTE} (M_\odot)	M_J (M_\odot)	M_{vir} (M_\odot)	区域
G164.92-12.65C1	2.85	(-83, 53)	264×104	0.056	8.4 (0.9)	0.83(0.09)	1.2 (0.4)	0.17(0.010)	0.30(0.06)	0.59(0.09)	3.5	0.22	10	10	TMC
G164.92-12.65C2	2.84	(101, -126)	342×63	0.050	8.4 (0.7)	0.74(0.06)	1.2 (0.3)	0.17(0.008)	0.36(0.09)	0.68(0.15)	4.0	0.18	12	15	TMC
G164.92-12.65C3	2.86	(132, -167)	123×52	0.027	9.4 (0.5)	0.61(0.03)	1.3 (0.3)	0.18(0.005)	0.40(0.09)	0.75(0.14)	7.6	0.055	7	14.0	TMC
G166.99-15.34C1	6.49	(-30, -22)	291×199	0.082	8.2 (0.3)	0.75(0.03)	1.6 (0.5)	0.17(0.003)	0.22(0.09)	0.48(0.15)	3.2	0.63	9	5.6	TMC
G172.83-05.17C1	7.45	(-83, 43)	587×410	0.167	11.5(1.3)	1.18(0.13)	1.5 (0.4)	0.20(0.012)	0.11(0.05)	0.41(0.08)	1.4	2.4	5	5.0	TMC
G172.94-05.49C1	6.98	(1, 64)	709×482	0.198	13.1(1.1)	0.97(0.08)	1.9 (0.5)	0.22(0.009)	0.12(0.04)	0.44(0.04)	1.6	4.4	7	5.7	TMC
G173.07-17.89C1	3.81	(-28, -19)	609×401	0.168	11.5(0.6)	0.77(0.04)	2.5 (0.7)	0.20(0.005)	0.23(0.07)	0.54(0.12)	2.4	4.1	21	8.6	TMC
G173.07-17.89C2	3.89	(120, -115)	454×283	0.122	11.1(0.5)	0.82(0.04)	2.4 (0.7)	0.20(0.004)	0.10(0.08)	0.37(0.13)	3.2	2.1	3	2.9	TMC
G173.45-05.43C1	6.82	(-54, 72)	531×269	0.128	12.3(0.7)	0.45(0.03)	1.1 (0.3)	0.21(0.005)	0.14(0.02)	0.41(0.02)	1.4	1.1	6	6.4	TMC
G173.60-17.89C1	4.17	(101, -49)	380×264	0.107	9.7 (0.9)	0.72(0.07)	1.8 (0.5)	0.19(0.009)	0.21(0.09)	0.47(0.14)	2.8	1.2	11	6.0	TMC
G173.60-17.89C2	3.74	(-28, 113)	273×231	0.085	9.5 (0.7)	1.35(0.10)	1.6 (0.5)	0.18(0.006)	0.25(0.07)	0.54(0.12)	3.0	0.68	13	8.4	TMC
G174.70-15.48C1	5.86	(-27, -60)	979×651	0.271	14.0(1.6)	1.49(0.17)	4.0 (1.1)	0.22(0.013)	0.17(0.04)	0.50(0.07)	2.4	17	20	6.9	TMC
G175.97-20.38C1	7.23	(38, -32)	148×105	0.042	9.5 (0.7)	0.63(0.05)	1.1 (0.5)	0.18(0.006)	0.32(0.09)	0.63(0.13)	4.4	0.11	12	11.0	TMC

表 3.4: 物理参量统计结果

	R (pc)	T_{ex} (K)	$\tau(^{13}\text{CO})$	N_{H_2} (10^{21} cm^{-2})	σ_{Therm} (km s^{-1})	σ_{NT} (km s^{-1})	σ_{3D} (km s^{-1})	n_{H_2} (10^3 cm^{-3})	M_{LTE} (M_{\odot})	M_J (M_{\odot})	M_{vir} (M_{\odot})
全部 (38)											
最小值	0.03	5.3	0.22	1.0	0.14	0.10	0.37	0.5	0.1	3	3
最小值	0.60	16.1	1.86	10.7	0.24	0.61	1.11	7.6	110.0	410	98
中位数	0.16	10.1	0.73	1.8	0.19	0.32	0.64	1.9	3.0	37	14
平均值	0.24	10.5	0.77	2.2	0.19	0.31	0.63	2.5	14.3	70	22
标准差	0.18	2.4	0.36	1.6	0.02	0.11	0.16	1.8	21.7	89	21
TMC (19)											
最小值	0.03	8.2	0.22	1.1	0.17	0.10	0.37	1.4	0.1	3	3
最小值	0.27	14.0	1.49	4.0	0.22	0.43	0.82	7.6	17.0	52	27
中位数	0.08	11.2	0.74	1.5	0.20	0.29	0.59	3.2	0.6	12	9
平均值	0.10	10.9	0.73	1.7	0.20	0.27	0.58	3.6	2.0	15	11
标准差	0.07	1.8	0.35	0.7	0.02	0.11	0.13	1.7	3.9	12	7
CMC (16)											
最小值	0.14	5.3	0.40	1.0	0.14	0.21	0.48	0.5	1.7	33	10
最小值	0.60	14.9	1.61	3.0	0.23	0.61	1.11	2.8	51.0	410	98
中位数	0.39	9.6	0.66	2.2	0.18	0.34	0.65	0.9	21.0	76	25
平均值	0.37	9.6	0.74	2.2	0.18	0.35	0.69	1.2	21.5	128	35
标准差	0.16	2.7	0.28	0.6	0.03	0.11	0.17	0.7	16.1	107	27

3.3.1 激发温度

在 LTE 假设下, 我们可以认为 T_{ex} 在视线方向上为定值, 于是可以通过辐射传能方程 (radiation transfer equation) 得到:

$$T_{\text{ex}} = T_0 / \ln[T_0(T_R^* + T_0 \exp(-T_0/T_{bg}) - 1)] \quad (3.1)$$

T_R^* 是经过主波束效率改正后的天线温度. $T_0 = h\nu/k$, k 是 Boltzmann 常量. $T_{bg} = 2.73/k$ 是宇宙微波背景辐射能谱的拟合黑体谱对应的温度.

3.3.2 柱密度

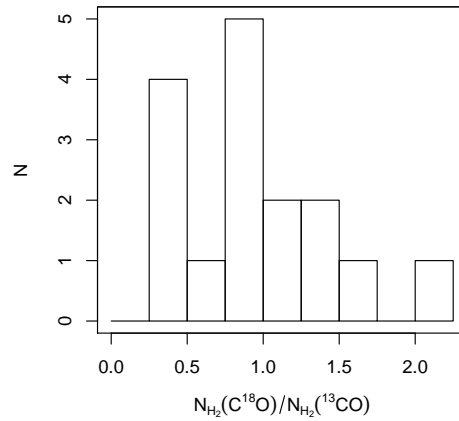
在 LTE 假设下, 如果我们假设 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 的发射是光薄的, 我们可以计算出 ^{13}CO . 采用的方法和 Garden et al. (1991) 所用方法相同^[37]. 之后我们使用典型的丰度比: $[\text{H}_2]/[^{12}\text{CO}] = 10^4$, $[^{12}\text{CO}]/[^{13}\text{CO}] = 60$ 来计算 N_{H_2} . (考虑到之前的研究^[38] 证实太阳系附近的 $[^{12}\text{CO}]/[^{13}\text{CO}] \sim 50$ 而另一研究^[39] 揭示 $[^{12}\text{CO}]/[^{13}\text{CO}] \sim 70$: 我们采用 $[^{12}\text{CO}]/[^{13}\text{CO}] = 60$.)

由于 27 个云核测到有 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 的辐射, 我们检验了他们的光厚效应: 分

表 3.5: 由 ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线计算得到的 N_{H_2} 的比较

云核名称	$N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})$ (10^{21} cm^{-2})	$N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ (10^{21} cm^{-2})	$\frac{N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})}{N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})}$	区域
G153.34-08.00C1	2.8	3.1	0.9	CMC
G156.92-09.72C1	2.9	2.6	1.1	CMC
G157.12-11.56C1	4.0	4.2	1.0	CMC
G157.12-11.56C2	2.7	3.6	0.8	CMC
G157.60-12.17C1	4.8	3.8	1.3	CMC
G157.60-12.17bC1	1.9	5.3	0.4	CMC
G157.91-08.23C1	6.6	3.2	2.1	CMC
G159.21-20.12C1	27.0	10.0	2.7	PMC
G160.53-19.72C1	6.4	5.0	1.3	PMC
G164.13-08.85C1	3.4	2.1	1.6	CMC
G166.99-15.34C1	2.4	2.1	1.1	TMC
G172.83-05.17C1	2.1	4.9	0.4	TMC
G172.94-05.49C1	4.7	5.7	0.8	TMC
G173.07-17.89C1	3.8	4.2	0.9	TMC
G173.07-17.89C2	1.3	3.6	0.4	TMC
G173.60-17.89C1	1.8	3.0	0.6	TMC
G173.60-17.89C2	1.8	3.5	0.5	TMC
G174.70-15.48C1	9.6	7.0	1.4	TMC

别用 C^{18}O 和 ^{13}CO 计算其中心附近的 N_{H_2} ，并分别记为 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})$ 和 $N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ 。计算方法同前^[37]。表 3.5显示了对于每个云核用两种同位素计算的 N_{H_2} 数值。图 3.2显示了二者的差异。我们发现 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})/N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ 的范围为从 0.4 到 2.1，平均值为 0.96, 中位数为 0.90，而其标准差为 0.48。

图 3.2: 18 个云核的 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})/N_{\text{H}_2}(^{13}\text{CO})$ 分布。

首先, 通过 $\overline{N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})/N_{\text{H}_2}(\text{C}^{13}\text{CO})} \approx 1$ 我们可以看到, 在我们的样本中, 通过 ^{13}CO 、 C^{18}O 两种同位素求得的 N_{H_2} 之间并无系统偏差. 这说明光厚效应本身并不显著或我们采用的方法已经考虑了光厚效应并将其很好地反应在了计算结果上, 而根据我们的统计, $\tau(^{13}\text{CO})$ 总体上相对较小, 所以至少前者是成立的.

其次, 我们注意到 $N_{\text{H}_2}(\text{C}^{18}\text{O})/N_{\text{H}_2}(\text{C}^{13}\text{CO})$ 的统计结果中, 标准差高达 0.48, 这很可能是由我们观测的 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 信号的低信噪比造成.

综合以上两点, 同时基于提高精确度的考虑, 我们仍然采用 ^{13}CO 来计算 N_{H_2} .

3.3.3 速度弥散

对于所有的云核, σ_{Therm} 可如下导出:

$$\sigma_{\text{Therm}} = \left(\frac{kT_{\text{ex}}}{m_H \mu} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

其中, m_H 是 H 原子的质量, $\mu = 2.33$ 是气体分子的平均质量^[40] (以氢原子质量为单位).

对于无 C^{18}O 信号的云核, 我们假设 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 谱线是光薄的, 从而可以计算出 σ_{NT} :

$$\sigma_{\text{NT}} = \left(\sigma_{^{13}\text{CO}}^2 - \frac{kT_{\text{ex}}}{m_{^{13}\text{CO}}} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

其中 $\sigma_{^{13}\text{CO}} = \frac{\Delta V_{^{13}}}{\sqrt{8 \ln 2}}$ 是 ^{13}CO 的一维速度弥散, 而 $m_{^{13}\text{CO}}$ 是 ^{13}CO 的分子质量.

而对于有 C^{18}O 信号的云核, 我们假设 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 谱线是光薄的. 我们用 $\sigma_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 和 $m_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 来替换 3.3 式中的 $\sigma_{^{13}\text{CO}}$ 和 $m_{^{13}\text{CO}}$, 从而可以计算出相应的 σ_{NT} :

$$\sigma_{\text{NT}} = \left(\sigma_{\text{C}^{18}\text{O}}^2 - \frac{kT_{\text{ex}}}{m_{\text{C}^{18}\text{O}}} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

结合 σ_{Therm} 与 σ_{NT} , 我们可以得出 σ_{3D} :

$$\sigma_{3D} = \sqrt{3(\sigma_{\text{Therm}}^2 + \sigma_{\text{NT}}^2)} \quad (3.5)$$

3.3.4 云核参量

由于我们证认出的云核具有明确的边界，我们可以估算其几何尺度。而依赖于其尺度的 n_{H_2} 和 M_{LTE} 等参量即可求出。为了强调这些参量依赖于我们对云核的证认，特别是依赖于我们对于云核的界定标准，我们统称之为“云核参量”。

对云核进行椭圆高斯拟合，我们可以得到其椭圆长短轴 a 、 b ，以及半径 $R = \sqrt{ab}D$ 。其中， D 是云核的距离，参见第1.3节。

通过得到的 R ，我们进而可以求出其数密度 $n_{\text{H}_2} = N_{\text{H}_2}/2R$ ，由于 R 来自于云核的 60% 等值线，我们采用 60% 等值线以内的平均 N_{H_2} 而非峰值 N_{H_2} 以避免对 n_{H_2} 的高估。

最后，我们可以根据上面的云核参量求得 M_{LTE} （此记号强调这种质量估算是在 LTE 假设下进行的）：

$$M_{\text{LTE}} = \frac{4}{3}\pi R^3 m_H \mu n_{\text{H}_2} \quad (3.6)$$

m_H 是 H 原子质量， $\mu = 2.33$ 是以 m_H 为单位的平均气体分子质量^[40]。

第四章 分析与讨论

4.1 谱线轮廓

云核偏离高斯型的谱线轮廓通常是其动力学特征的反映。我们对于本研究中云核发射谱线的非高斯轮廓进行了探究，对于各谱线形态的界定沿用 Wu et al. (2012) 单点观测中的判据^[11]。

在 TMC 的 19 个云核中：2 个云核的谱线存在蓝色轮廓（blue profile），1 个存在蓝不对称（blue asymmetry）；4 个存在红色轮廓（red profile），2 个存在红不对称（red asymmetry）。在 PMC 仅有的 3 个云核中，有 2 个分别被证认分别伴随蓝色、红色轮廓。在 CMC 的 16 个云核的发射谱线中，有 5 个发现了蓝色轮廓，1 个发现了红色轮廓，2 个发现了线翼（wings）。

各云核的非高斯轮廓形态均列于表 3.1。

通过 P-V 图（position-velocity diagram），我们可以检验谱线存在线翼的云核是否确实具有高速气体（如外向流）^[41]。

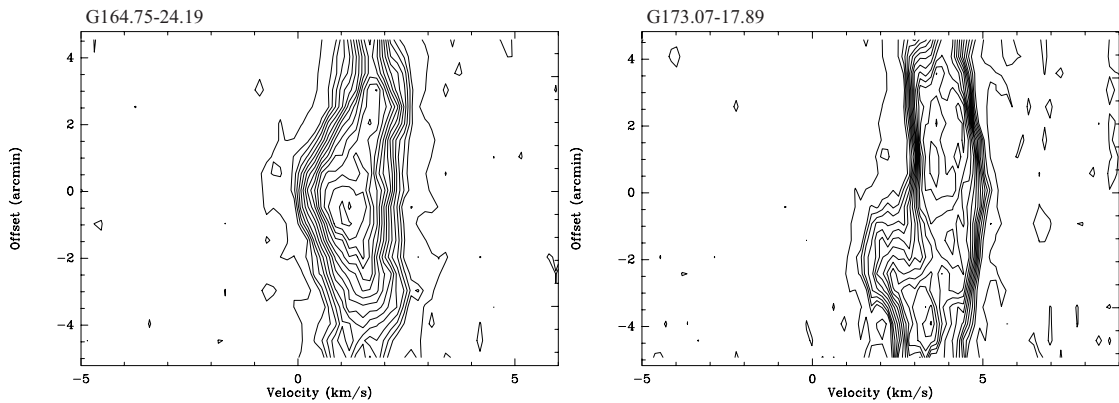


图 4.1: 云核 G164.75-24.19C2 和 G173.07-17.89C1 的 P-V 图，位置选取参见附录 B.1 中的图 B.1 相应积分强度图上的线段标记。

根据 P-V 图（见图 4.1）显示，在我们的全部样本中，仅有 2 个云核展现出高速气体的特征：云核 G164.75-24.19C2 的 P-V 图显示了清晰的外向流特征。而对于云核 G173.07-17.89C1，其 P-V 图上的凸起顶点位置和云核位置有显著的偏离，这说明了云核和周围物质有一定的相互作用，但同时也伴随着高速湍动。

即便如此，我们的样本中的绝大多数云核并未发现高速气体的存在，这证明了 Planck 冷团块“年轻”、“安静”的特征，说明我们的选源是成功的。

4.2 云核内的湍动

截至目前的研究揭示：云核尺度的湍动一般是亚音速的，而分子云尺度上湍动是超音速的，相较于热压力，湍动在支撑云核（抵抗重力塌缩）方面作用较小^[16,42]。然而，对于我们的样本，云核中的湍动较之热运动更加剧烈，占有支配地位。

我们首先比较了 σ_{Therm} 和 σ_{NT} 。如图 4.2，可见在 TMC 和 CMC 中大多数云核都有 $\sigma_{NT} / \sigma_{Therm} > 1$ ，从而其非热运动压力和热压力的比值 $R_p = \frac{\sigma_{NT}^2}{\sigma_{Therm}^2}$ 也总体上大于 1。而由于只有两个云核中发现了高速气体的迹象，对于大多数云核来说，这种相对而言大的非热速度弥散很可能是湍动占支配地位造成的。

另外，我们还检验了各个云核 N_{H_2} 的概率分布函数（probability distribution function，下文简称为 PDF），亦证实此结论。理论计算与数值模拟^[43] 以及最近的观测结果^[44] 均指出：湍动支配下的云核 N_{H_2} 分布会显示出对数正态（lognormal）型的 PDF，而重力因素会使得分布函数在高 N_{H_2} 范围内出现符合幂律分布的情形（power law tail）。为了定量研究我们云核 N_{H_2} 的 PDF，我们采用 Kolmogorov-Smirnov 检验。依惯例，我们设定拒绝空假设的 p 值为 0.05。对立假设为 N_{H_2} 符合对数正态（lognormal）分布。

在 TMC 的 19 个云核中，84% 展现出对数正态分布的 N_{H_2} PDF；在 CMC 的 16 个云核中，此比例为 69%。在我们的样本中，未发现高 N_{H_2} 范围内出现幂律分布的迹象。图 4.3 出示了典型的三个云核（分属于 TMC、PMC 和 CMC）的 PDF 以及相应的对数正态分布拟合。

湍动在这些云核中的支配地位说明我们的样本中罕有重力作用下的塌缩，否则湍动会在一个动力学时标内耗散殆尽^[6]。这也证实了 Planck 冷团块的处在演化早期，同时也能说明重力对这些云核的影响并不明显。

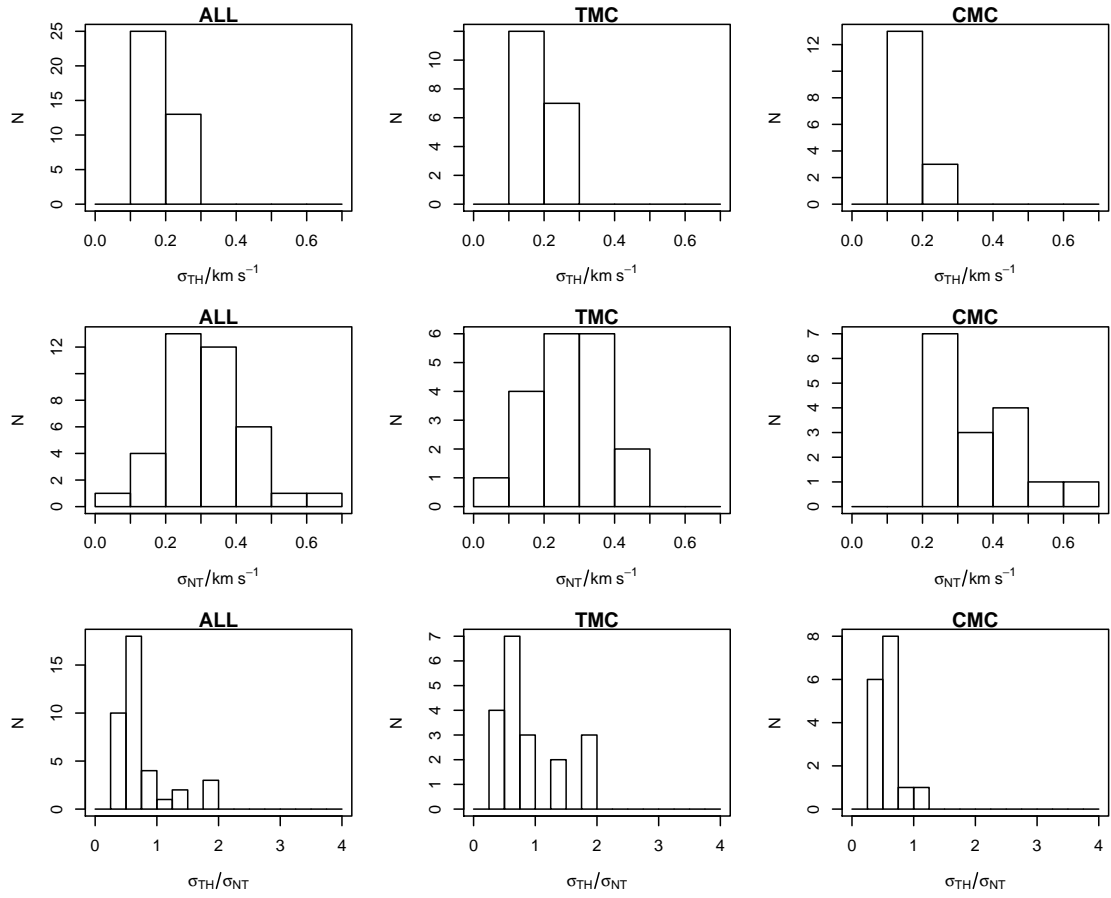


图 4.2: 在各个区域中, σ_{Therm} , σ_{NT} 以及 $\sigma_{Therm}/\sigma_{NT}$ 的分布情况.

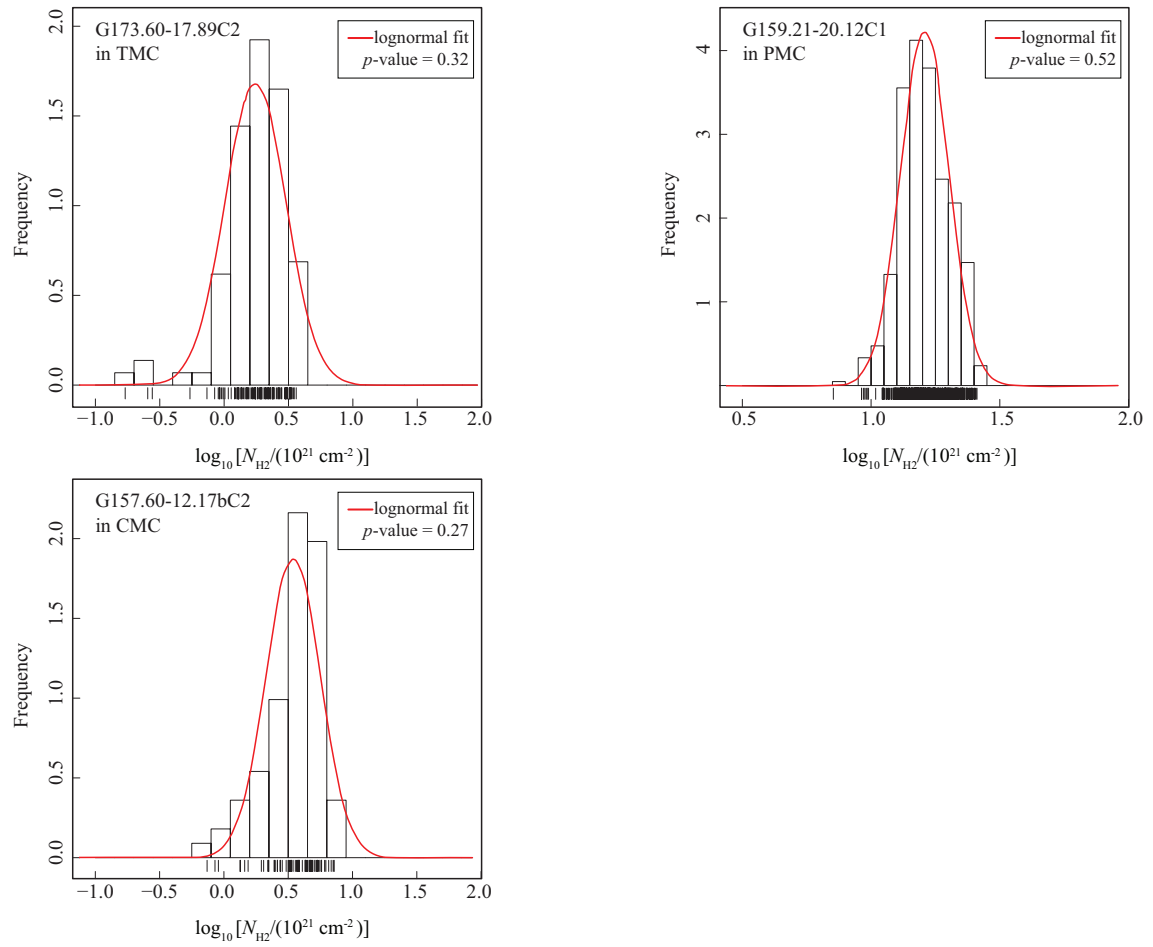


图 4.3: TMC、PMC 和 CMC 中典型云核的 N_{H_2} PDF 以及相应的对数正态分布拟合

4.3 云核的重力稳定性

在分子云中，可能有多重作用共同抵抗重力、支持气体成分，例如热压力、湍动、磁场等。考虑到第4.2节中我们已经证实了我们的云核中有丰富的湍动，我们将同时考虑热运动和湍动^[45]来计算 M_J ：

$$\frac{M_J}{M_\odot} \approx 1.0 a_J \left(\frac{T_{eff}}{10\text{K}} \right)^{3/2} \left(\frac{\mu}{2.33} \right)^{-1/2} \left(\frac{n^{\text{H}_2}}{10^4 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \quad (4.1)$$

其中， a_J 是考虑到维度因素的无量纲量，此处为 1. 有效温度 T_{eff} 定义为：

$$T_{eff} \equiv \frac{C_{s,eff}^2 \mu m_H}{k} \quad (4.2)$$

其中， $C_{s,eff}$ 是等效声速，其定义为：

$$C_{s,eff} \equiv (\sigma_{NT}^2 + \sigma_{Therm}^2)^{1/2} \quad (4.3)$$

如果我们假定云核是重力束缚的等温球，并且具有骏一的密度且仅仅被随机运动所支撑，其 M_{vir} 可表示为^[46]：

$$\frac{M_{vir}}{M_\odot} = 2.10 \times 10^2 \left(\frac{R}{\text{pc}} \right) \left(\frac{\Delta V}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 \quad (4.4)$$

其中， ΔV 是 C^{18}O 或 ^{13}CO 的 FWHM（参见第3.3.3节的讨论）。由此，我们可以通过比较 M_{vir} 和 M_{LTE} 来讨论云核的稳定性。

对于 TMC 和 CMC 中的云核，我们均进行了 $M_{LTE} - M_J$ 以及 $M_{LTE} - M_{vir}$ 的比较，比较结果分别如图 4.4所示。

通过比较，我们发现 TMC 的 19 个云核中有 17 个 M_J 大于 M_{LTE} ，这表明他们很可能没有重力作用下的塌缩；对于 CMC 的 16 个云核中有 10 个 M_J 大于 M_{LTE} ，在其余 6 个 $M_{LTE} > M_J$ 的云核中，三个（G156.92-09.72C1, G157.12-11.56C1, G157.60-12.17bC1）被发现有蓝色轮廓的谱线，这表明了其中可能存在重力塌缩。值得注意的是，G157.60-12.17bC1 是 CMC 中唯一一个有 $\sigma_{Therm} > \sigma_{NT}$ 的云核，这增加了其存在重力塌缩的可能性。

与此同时，所有的云核都有 $M_{vir} > M_{LTE}$ 。在 TMC 中，云核的平均 $\alpha = \frac{M_{vir}}{M_{LTE}}$ 高达 51；在 CMC 中，这个比值更达到 58。在 TMC 中仅 4 个云核有

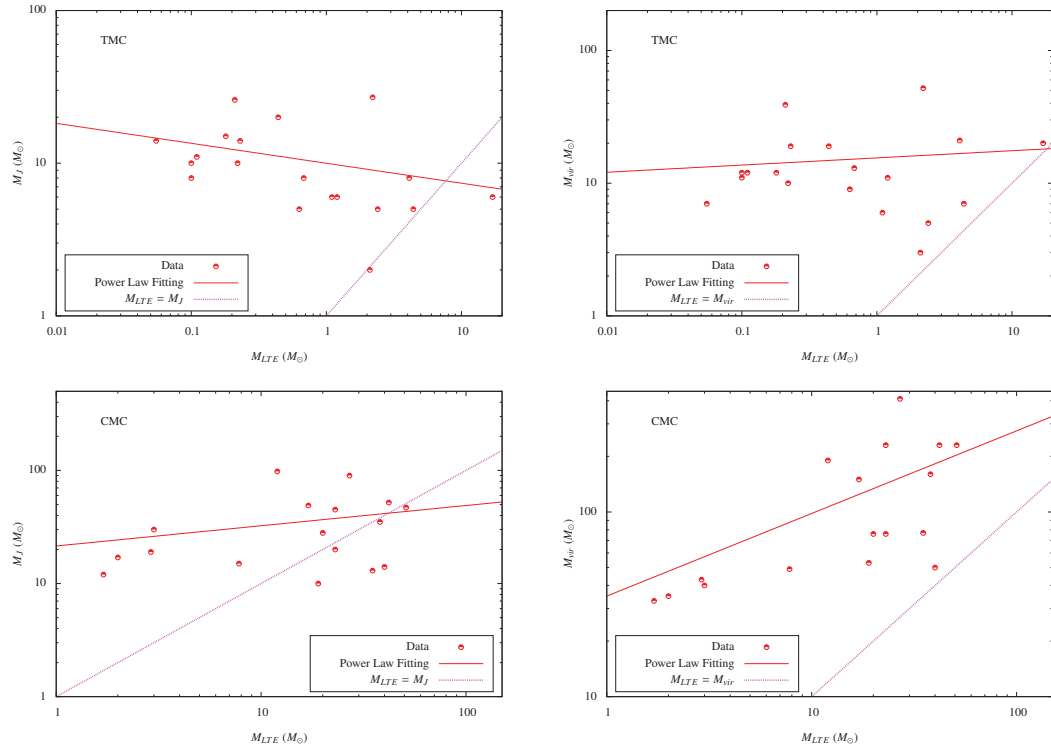


图 4.4: 左上图: TMC 中云核的 $M_{LTE}-M_J$ 关系; 右上图:TMC 中云核的 $M_{LTE}-M_{vir}$ 关系; 左下图: CMC 中云核的 $M_{LTE}-M_J$ 关系; 右下图:CMC 中云核的 $M_{LTE}-M_{vir}$ 关系. 蓝色虚线表示 $M_{LTE} = M_J$ 或 $M_{LTE} = M_{vir}$ 。

$\alpha < 3$ ，而其中的 63% 都有 $\alpha > 10$ ；对于 CMC， α 的均值为 9 ± 6 ，仅 3 个云核有 $\alpha < 3$ 。两个区域如此巨大的 α 揭示了他们并未处于重力束缚下，很可能正处在演化的过渡阶段。

需要强调的是，我们不能忽略分辨率对以上分析准确性的影响。在 CMC 的距离（450 pc）上，我们采用的望远镜的波束投影直径为 ~ 0.1 pc，意味着其不能很好分辨典型尺寸（0.03 0.2 pc）^[1] 的云核。而考虑到 $M_J \propto R^{1/2}$ 、 $M_{vir} \propto R$ 但是 $M_{LTE} \propto R^2$ ：我们可能高估了 CMC 中云核的 M_{LTE} （相对于 M_{LTE} 和 M_J ）。

4.4 气体 -尘埃耦合

我们研究了全部云核的气体 -尘埃热耦合状况。

由于我们采用了 LTE 假设， T_{ex} 可以表征云核中气体成分的热运动温度（ T_k ）。而云核中尘埃成分的温度可以由 Planck 的连续谱观测导出。我们直接使用 ECC 源表中的“TEMPERATURE_CORE”一列^[8]，记之为 T_D 。

对于这些云核的 T_k 和 T_D 之间的比较如图 4.5所示：

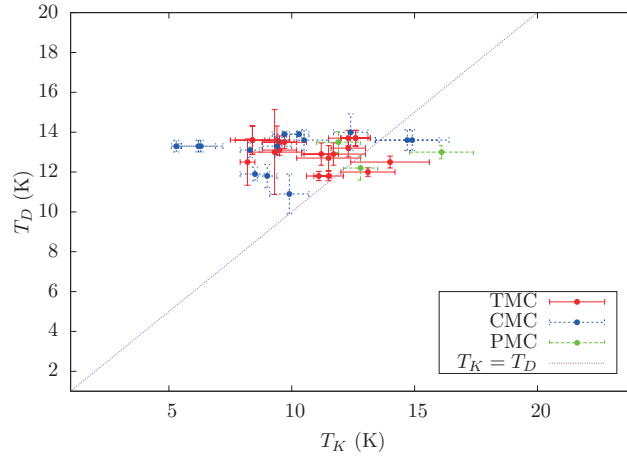


图 4.5: $T_D - T_K$ 关系, T_K 即为各云核的 T_{ex} 而 T_D 为 ECC 源表^[8] 中的“TEMPERATURE_CORE”一列.

我们没有发现 T_K 和 T_D 之间有任何明显的相关性：例如其线性相关的 $R^2 \sim 10^{-5}$ 。然而，我们发现大部分（61%）的云核有 $T_D > T_K$ 。对于全部 38 个云核， T_D/T_k 的平均值为 1.3 ± 0.4 ；对于 TMC 中的云核，此均值为 1.23 ± 0.23 ；而对于 CMC 中的云核，此均值为 1.47 ± 0.47 。

相较于气体温度，大部分云核具有更高的尘埃温度，这可以用“尘埃加热气体”的模型解释：尘埃颗粒被分子云中心恒星形成过程中的辐射所加热，之后通过碰撞将能量传递给比尘埃颗粒冷的气体分子^[47]。另外，关于耗空（depletion）的物理模型^[48]显示 $n_{\text{H}_2} < 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 时会有 T_K 的升高，从而使得 $T_D > T_K$ 。我们样品中云核的 n_{H_2} 全部在这个范围内（TMC 和 CMC 中云核均有 $n_{\text{H}_2} < 10^{3.9} \text{ cm}^{-3}$ ），但并无 $T_D > T_K$ ，故而不符合此模型。此矛盾很可能揭示了我们的云核尚无显著的耗空，这同样可能是由于我们云核处于早期演化阶段导致的。

4.5 CO 丰度

我们在第3.3.2节计算 N_{H_2} 的过程中假定 $[\text{H}_2]/[\text{CO}] = 10^4$ 。然而通过 Planck 观测的尘埃连续谱，我们也可以用不同的方法得到 N_{H_2} 。本节比较了两种方法得到的 N_{H_2} 。

我们首先确定了我们的云核在 ECC 中对应的辐射源的面积，我们在同样的面积中重新计算平均 N_{H_2} ，方法仍然同第3.3.2节。由于每个云核中，柱密度随半径变化明显，这样在同样面积中计算平均柱密度可以避免云核的柱密度随半径变化带来的系统性偏差。ECC 中“云核”的 $R = \sqrt{\pi\theta_{\text{maj}}\theta_{\text{min}}/[8\ln(2)]}$ 。我们采用 Planck Collaboration (2011) 通过尘埃辐射流量计算 N_{H_2} 的方法^[9]。

对于全部的 38 个云核，CO 丰度 ($N_{\text{CO}}/N_{\text{H}_2}$) 的范围为从 4×10^{-7} 至 1.3×10^{-3} ，均值为 1.5×10^{-4} 。这与前人得出的 CO 丰度范围吻合较好^[49]。

对于 TMC，我们特别比较了其 CO 丰度和之前同样针对 TMC 的 CO 丰度研究^[50]。如果我们沿用第3.3.2节中的丰度比^[37]：假定 $[\text{H}_2/\text{CO}] = 10^4$ 而 $[\text{O}^{16}/\text{O}^{18}] = 490$ ，即可得出 TMC 中云核的 $N_{\text{CO}}/N_{\text{H}_2}$ 范围为 1×10^{-9} 至 1×10^{-6} ，均值为 3×10^{-7} 。这与 [50] 中给出的 TMC 中 $N_{\text{CO}}/N_{\text{H}_2}$ 范围： 4.2×10^{-8} 至 1.3×10^{-7} 相符。

4.6 团块的成协源情况

为了更全面深入地了解我们成图区域（团块）所处的环境，我们调查了与其成协的前人观测中的源，特别是 YSO（Young Stellar Object）。我们检查了全部成图区域 $14' \times 14'$ 中的成协源情况，发现的成协源包括：X-射线、射电、中性氢、

脉泽、红外天体、HH (Herbig-Haro) 天体以及 YSO。成协源种类与坐标数据全部来自 SIMBAD 数据库^[51]。成协源具体情况如附录B中的图 B.1所示。

首先, 由于我们主要关注 YSO, 为了明确我们的团块是否在 *Spitzer* YSO 巡天的覆盖范围之内, 我们调查了 IRAC 以及 MIPS 的相关数据^[52]。被 IRAC 或 MIPS 巡天覆盖的源在表 2.2 中表头为 “†” 的一系列标识为 Y (被 IRAC 或 MIPS 巡天覆盖) 或 N (未被 IRAC 或 MIPS 巡天覆盖)。

之后, 我们分别调查了三个区域的成协源情况。

在 TMC 的 34 个团块中, 13 个发现了 X-射线成协源, 14 个发现了射电、H_I或脉泽成协源, 16 个发现了红外成协源。其中 8 个被发现与 HH 天体成协。在 TMC 中, *Spitzer* IRAC 或 MIPS 覆盖了 28 个团块, 但其中只有 8 个团块被发现和 YSO 成协。

我们 PMC 中的团块拥有成协源的比例比之 TMC 显著较高。虽然其中只有 13 个团块, 但在这 13 个团块中, 2 个被发现有 X-射线源与之成协, 7 个被发现有射电、H_I或脉泽成协源。在 PMC 的 11 个被 IRAC 或 MIPS 覆盖的团块中, 6 个发现了 YSO 成协源。不仅 PMC 中的大多数团块有成协源, 其单个团块的成协源数量也较大, 例如 G158.20-20.28 和 G158.37-20.72 均含有丰富的成协源。值得注意的是, 我们发现 G159.21-20.12 是 Barnard 1 暗云的一部分^[53]; G160.51-17.07 是 Barnard 5 暗云的一部分^[54]。并且, G159.21-20.12 的 ¹²CO(1-0) 谱线和 SMM 1 的同一谱线十分相似^[54], 这从侧面验证了我们观测的可靠性。

对于 CMC 中的 24 个团块, G159.82-10.48 和 G160.53-09.84 被发现与 X-射线源成协, 6 个被发现有射电、H_I或脉泽成协源, 9 个被发现与红外源成协, G155.52-08.93 和 G160.53-09.84 两个源被发现与 HH 天体成协。参考最近对 CMC 的一项观测^[33], 我们发现有 4 个 CMC 的团块与 YSO 成协, 但在 CMC 中有 12 个团块被 IRAC 或 MIPS 覆盖。总体来看, CMC 中的团块成协源较 TMC 和 PMC 为少, 这也恰恰说明了 CMC 中恒星形成活动的低活跃度, 与前人关于 CMC 研究吻合。

除了对于我们样本中的团块进行成协源分析, 我们还专门考察了云核的成协源情况。我们限定在云核中心偏离一个主波束大小 ($\sim 1'$) 的范围内寻找成协源。我们发现绝大多数云核在中心附近这样的范围内没有成协源, 仅有的几个特例为:

G159.21-20.12C1 的中心区域有 YSO 和 YSO 候选体以及 HH 天体与之成协;

G164.75-24.19C2 的中心有红外源;

G164.92-12.65C1 的中心有红外源;

G174.70-15.48C1 的中心区域有 YSO、X-射线源以及红外源.

除去这四个, 大多数 (34 个, 占总数的 90%) 的云核在中心区域并无成协源。如此高的无源核比例同样说明了 Planck 团块处于早期演化阶段。

值得注意的是, 我们仔细考察 TMC 中仅有的 3 个中心有成协源的云核, 发现 G164.75-24.19C2 和 G164.92-12.65C1 均有 $\sigma_{Therm} > \sigma_{NT}$, 根据第4.2节中的分析, 这说明了他们可能演化得更加成熟, 其中的湍动已经经过一定的耗散。而 G174.70-15.48C1 有着高达 14 K 的 T_{ex} , 是 TMC 云核中 T_{ex} 最大者, 这也说明了其可能处在比我们的大多数云核晚的演化阶段。这些演化阶段较晚的云核所展现出来的 (与我们大多数云核不相符合的) 特征很好地验证了我们之前第4.2节和第4.4节的讨论。

第五章 总结与展望

5.1 本文总结

本文介绍了对 71 个 Planck 冷团块的 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 成图研究。于 2011 年 1 月到 5 月在中国科学院紫金山天文台青海观测站进行观测。我们在本研究中已经得到如下所列的结果：

1. 对于所有的 71 个团块，我们均探测到了 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 和 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 辐射。而对于其中的 55 个，我们探测到了 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 辐射。对于我们探测到的每个谱线，通过高斯拟合，我们得到了其线心速度、天线温度以及 FWHM。我们在这些团块中证认出了 38 个云核。TMC、PMC 和 CMC 中分别由 19、3 和 16 个云核。在 LTE 假设下，我们计算了云核的激发温度与柱密度。并且得到了云核的热速度弥散、非热速度弥散以及三维速度弥散。得益于云核明确的边界，我们估算了云核的尺度，从而得到了包括云核半径、气体数密度以及 LTE 质量在内的“云核参量”。
2. 大约半数云核的中心谱线显示出非高斯轮廓。但是经过检验其 P-V 图，我们排除了大多数云核伴随有高速气体的可能。仅有的两个例外是 G164.75-24.19C2 和 G173.07-17.89C1。考虑到我们的云核总数，总体而言，我们的云核并无剧烈的高速气体运动。
3. 我们发现了在我们的样本中，湍动在支撑云核和云核柱密度分布中起支配地位：大多数在 TMC 和 CMC 中的云核有 $\sigma_{NT} / \sigma_{Therm} > 1$ ；同时，对于大多数的云核，无论是在 TMC 或 CMC 中，其柱密度的概率分布函数均接近对数正态分布，这说明了湍动主导了其柱密度分布。丰富的湍动表明这些云核并没有收到过多的重力作用。
4. 我们在考虑了湍动作用的情况下计算了云核的 Jeans 质量和 virial 质量，并且发现大多数云核的 LTE 质量都小于 Jeans 质量，说明其很可能是稳定的。

同时我们发现所有的云核都有 virial 质量明显大于 LTE 质量, 说明其不是重力束缚状态, 很可能正处在演化的过渡阶段。

5. 我们考察了云核的气体成分与尘埃成分之间的热耦合情况。通过 ECC 的数据, 我们得到尘埃温度 T_D , 跟我们求得的云核气体成分温度 T_k 进行了比较。我们发现, 61% 的云核有 $T_D > T_k$, 与 [47] 中的“尘埃加热气体”模型吻合。同时, 参考 [48] 中的耗空 (depletion) 模型, 这也说明了我们的云核并无明显的耗空现象发生。
6. 我们检验了云核中的 CO 丰度情况。一方面我们利用我们计算出的 CO 柱密度; 另一方面我们根据 ECC 表中提供的尘埃连续谱流量计算出的氢分子柱密度, 两相比较, 发现这些云核的 CO 丰度 $N_{12\text{CO}}/N_{\text{H}_2}$ 在 4×10^{-7} 到 1.3×10^{-3} 之间, 和之前的研究得到的范围相符^[49]。此外, 我们还特别检验了 TMC 中的 CO 丰度情况, 我们发现其同样符合之前对 TMC 区域的 CO 丰度研究^[50]。
7. 利用 SIMBAD 数据库提供的资料, 我们还调研了团块与云核成协源的情况。我们发现了 X-射线、射电、中性氢、脉泽、红外天体、HH (Herbig-Haro) 天体以及 YSO 等与之成协的源。我们发现 CMC 中的团块成协源很少, 而 PMC 中的团块成协源较多。90% 的云核中心区域 (中心附近 $1'$ 半径范围内) 没有成协源, 仅有的四个例外显示出明显更晚期演化阶段的特征。

参考文献

- [1] E. Bergin and M. Tafalla. “*Cold Dark Clouds: The Initial Conditions for Star Formation*”. *ARA&A*, 2007-09: 339–396.
- [2] J. Burke and D. Hollenbach. “*The gas-grain interaction in the interstellar medium-Thermal accommodation and trapping*”. *ApJ*, 1983-02: 223–234.
- [3] E. Vazquez-Semadeni. “*Hierarchical Structure in Nearly Pressureless Flows as a Consequence of Self-similar Statistics*”. *ApJ*, 1994-03: 681.
- [4] J. Williams, L. Blitz and C. McKee. “*The Structure and Evolution of Molecular Clouds: from Clumps to Cores to the IMF*”. *Protostars and Planets IV*, 2000-05: 97.
- [5] B. Bok. “*Dimensions and Masses of Dark Nebulae*”. *Harvard Observatory Monographs*, **1948**, 7: 53.
- [6] F. Shu, F. Adams and S. Lizano. “*Star formation in molecular clouds - Observation and theory*”. *ARA&A*, **1987**, 25: 23–81.
- [7] Planck Collaboration *et al.* “*Planck early results. I. The Planck mission*”. *A&A*, 2011-12: A1.
- [8] Planck Collaboration. “*Planck Early Release Compact Source Catalogue (Planck, 2011)*”. *VizieR Online Data Catalog*, 2011-01:.
- [9] Planck Collaboration. “*Planck early results. XXIII. The first all-sky survey of Galactic cold clumps*”. *A&A*, 2011-12: A23.
- [10] Planck Collaboration. “*Planck early results. XXII. The submillimetre properties of a sample of Galactic cold clumps*”. *A&A*, 2011-12: A22.

- [11] Y. Wu *et al.* “*Gas Emissions in Planck Cold Dust Clumps: A Survey of the $J = 1-0$ Transitions of ^{12}CO , ^{13}CO , and C^{18}O* ”. *ApJ*, 2012-09: 76.
- [12] T. Liu, Y. Wu and H. Zhang. “*Molecular Environments of 51 Planck Cold Clumps in the Orion Complex*”. *ApJS*, 2012-09: 4.
- [13] T. Dame *et al.* “*A composite CO survey of the entire Milky Way*”. *ApJ*, 1987-11: 706–720.
- [14] P. Myers, R. Linke and P. Benson. “*Dense cores in dark clouds. I - CO observations and column densities of high-extinction regions*”. *ApJ*, 1983-01: 517–537.
- [15] P. Myers and P. Benson. “*Dense cores in dark clouds. II - NH_3 observations and star formation*”. *ApJ*, 1983-03: 309–320.
- [16] P. Myers. “*Dense cores in dark clouds. III - Subsonic turbulence*”. *ApJ*, 1983-07: 105–118.
- [17] P. Myers *et al.* “*Dense cores in dark clouds. V - CO outflow*”. *ApJ*, 1988-01: 907–919.
- [18] P. Myers *et al.* “*Dense cores in dark clouds. VI - Shapes*”. *ApJ*, 1991-08: 561–572.
- [19] B. Zuckerman, T. Kuiper and E. Rodriguez Kuiper. “*High-velocity gas in the Orion infrared nebula*”. *ApJL*, 1976-11: L137–L142.
- [20] R. Snell, R. Loren and R. Plambeck. “*Observations of CO in L1551 - Evidence for stellar wind driven shocks*”. *ApJL*, 1980-07: L17–L22.
- [21] Y. Wu *et al.* “*A study of high velocity molecular outflows with an up-to-date sample*”. *A&A*, 2004-11: 503–515.
- [22] H. van Langevelde, E. van Dishoeck and G. Blake. “*Evidence for $\text{HCO}(+)$ infall toward T Tauri?*” *ApJL*, 1994-04: L45–L48.
- [23] M. Tafalla *et al.* “*L1544: A Starless Dense Core with Extended Inward Motions*”. *ApJ*, 1998-09: 900.

- [24] A. Sargent and S. Beckwith. “*The molecular structure around HL Tauri*”. *ApJL*, 1991-11: L31–L35.
- [25] M. Saito *et al.* “*Aperture Synthesis 12CO and 13CO Observations of DM Tauri: 350 AU Radius Circumstellar Gas Disk*”. *ApJ*, 1995-11: 384.
- [26] M. Lombardi, C. Lada and J. Alves. “*2MASS wide field extinction maps. III. The Taurus, Perseus, and California cloud complexes*”. *A&A*, 2010-03: A67.
- [27] D. Johnstone *et al.* “*Dense Gas Tracers in Perseus: Relating the N_2H^+ , NH_3 , and Dust Continuum Properties of Pre- and Protostellar Cores*”. *ApJ*, 2010-03: 655–670.
- [28] J. Jørgensen *et al.* “*Current Star Formation in the Perseus Molecular Cloud: Constraints from Unbiased Submillimeter and Mid-Infrared Surveys*”. *ApJ*, 2007-02: 293–305.
- [29] A. Sargent. “*Molecular clouds and star formation. II - Star formation in the Cepheus OB3 and Perseus OB2 molecular clouds*”. *ApJ*, 1979-10: 163–181.
- [30] P. Padoan *et al.* “*Supersonic Turbulence in the Perseus Molecular Cloud*”. *ApJ*, 1999-11: 318–329.
- [31] J. Hatchell *et al.* “*Star formation in Perseus. Clusters, filaments and the conditions for star formation*”. *A&A*, 2005-09: 151–161.
- [32] C. Lada, M. Lombardi and J. Alves. “*The California Molecular Cloud*”. *ApJ*, 2009-09: 52–59.
- [33] P. Harvey *et al.* “*A First Look at the Auriga-California Giant Molecular Cloud with Herschel and the CSO: Census of the Young Stellar Objects and the Dense Gas*”. *ApJ*, 2013-02: 133.
- [34] Ed. by J. Mangum and S. Radford. “*Imaging at the IRAM Plateau de Bure Interferometer*”. In: *Imaging at Radio through Submillimeter Wavelengths*, **2000**: 299.
- [35] Ed. by R. Shaw, H. Payne and J. Hayes. “*A Retrospective View of MIRIAD*”. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV*, **1995**: 433.

- [36] T. Dame, D. Hartmann and P. Thaddeus. “*The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey*”. *ApJ*, 2001-02: 792–813.
- [37] R. Garden *et al.* “*A spectroscopic study of the DR 21 outflow source. III - The CO line emission*”. *ApJ*, 1991-06: 540–554.
- [38] I. Hawkins and M. Jura. “*The C-12/C-13 isotope ratio of the interstellar medium in the neighborhood of the sun*”. *ApJ*, 1987-06: 926–950.
- [39] A. Penzias. “*Nuclear Processing and Isotopes in the Galaxy*”. *Science*, 1980-05: 663–669.
- [40] J. Kauffmann *et al.* “*MAMBO mapping of Spitzer c2d small clouds and cores*”. *A&A*, 2008-09: 993–1017.
- [41] Y. Wu *et al.* “*CO $J = 2-1$ Maps of Bipolar Outflows in Massive Star-forming Regions*”. *AJ*, 2005-01: 330–347.
- [42] M. Tafalla *et al.* “*On the internal structure of starless cores. I. Physical conditions and the distribution of CO, CS, N_2H^+ , and NH_3 in L1498 and L1517B*”. *A&A*, 2004-03: 191–212.
- [43] J. Ballesteros-Paredes *et al.* “*Gravity or turbulence? - II. Evolving column density probability distribution functions in molecular clouds*”. *MNRAS*, 2011-09: 1436–1442.
- [44] N. Schneider *et al.* “*What Determines the Density Structure of Molecular Clouds? A Case Study of Orion B with Herschel*”. *ApJL*, 2013-04: L17.
- [45] P. Hennebelle and G. Chabrier. “*Analytical Theory for the Initial Mass Function: CO Clumps and Prestellar Cores*”. *ApJ*, 2008-09: 395–410.
- [46] H. Ungerechts, P. Umbanhowar and P. Thaddeus. “*A CO Survey of Giant Molecular Clouds near Cassiopeia A and NGC 7538*”. *ApJ*, 2000-07: 221–235.
- [47] P. Goldreich and J. Kwan. “*Molecular Clouds*”. *ApJ*, 1974-05: 441–454.
- [48] P. Goldsmith. “*Molecular Depletion and Thermal Balance in Dark Cloud Cores*”. *ApJ*, 2001-08: 736–746.

- [49] E. van Dishoeck and J. Black. “*The photodissociation and chemistry of interstellar CO*”. *ApJ*, 1988-11: 771–802.
- [50] M. Frerking, W. Langer and R. Wilson. “*The relationship between carbon monoxide abundance and visual extinction in interstellar clouds*”. *ApJ*, 1982-11: 590–605.
- [51] Ed. by S. Ricketts, C. Birdie and E. Isaksson. “*The New Version of SIMBAD*”. In: *Library and Information Services in Astronomy V*, 2007-10: 197.
- [52] L. Rebull *et al.* “*The Taurus Spitzer Survey: New Candidate Taurus Members Selected Using Sensitive Mid-Infrared Photometry*”. *ApJS*, 2010-02: 259–307.
- [53] P. Goldsmith, W. Langer and R. Wilson. “*Molecular outflows, gas density distribution, and the effects of star formation in the dark cloud Barnard 5*”. *ApJL*, 1986-04: L11–L15.
- [54] M. Hiramatsu, N. Hirano and S. Takakuwa. “*Outflow-Core Interaction in Barnard 1*”. *ApJ*, 2010-04: 778–789.

附录 A 云核中心光谱

本附录出示云核中心的光谱，如图A.1.

图 A.1: 云核中心的光谱. 对于每个光谱图, $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 的谱线分别以红、绿、蓝表示. 光谱选取的位置 (相对于 Planck 冷团块几何中心的偏移) 标示在云核名称的下方, 形式为 “(RA,DEC)”, 单位为角分.

附录 B 各团块积分强度图

本附录出示每个团块的积分强度图，如图B.1.

图 B.1: 等值线图表示 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 谱线的积分强度，灰度背景表示 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 谱线的积分强度. 等值线表示的积分强度范围: 由峰值强度的 30% 到 90%; 相邻等值线表示的积分强度差: 峰值强度的 10%. 图上的蓝色或黄色符号表示成协物: \times (X-ray object)、 \triangle (radio, HI, Maser)、 \diamond (IR object)、HH (Herbig-Haro object)、YSO (Young Stellar Object). 成协物的种类、位置以及代表符号均根据 SIMBAD 数据库中的 Aladin 应用程序.

致谢

感谢北大未名 BBS 的 MathTools 版和 Thesis 版诸位同学的支持。特别感谢 pkuthss 模版的最初创作者 solvethis 网友，以及不断地对 Casper 提出的诸多问题予以解答的 cauchy 网友:)

北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

（必须装订在提交学校图书馆的印刷本）

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

- 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；
- 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
- 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；
- 因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，授权学校在 ☐ 一年/ ☐ 两年/ ☐ 三年以后在校园网上全文发布。

（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名： 导师签名： 日期： 年 月 日