



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) 假设下应用辐射传能方程，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： $\sigma_{NT} > \sigma_{Therm}$ ，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 研究目标和方法	4
第二章 观测和数据处理	7
2.1 观测参量	8
2.2 物理参量	8
第三章 分析与讨论	9
3.1 谱线轮廓	9
3.2 云核内的湍动	9
3.3 云核的重力稳定性	9
3.4 气体-尘埃耦合	9
3.5 CO 丰度	9
3.6 云核的成协情况	9
参考文献	11
附录 A 导出参量的计算	15

附录 B 本文中术语的中英对照表	17
致谢	19

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, 从而研究恒星形成早期阶段的云核物理状态, 甚至是云核形成早期的物理状态。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 进行了细致的研究, 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 $70 \mu\text{m}$ 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 研究目标和方法

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 观测和数据处理

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	for $^{12}\text{CO}(1-0)$: 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	$20'' \text{s}^{-1}$

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。

2.1 观测参量

2.2 物理参量

第三章 分析与讨论

3.1 谱线轮廓

3.2 云核内的湍动

3.3 云核的重力稳定性

3.4 气体 - 尘埃耦合

3.5 CO 丰度

3.6 云核的成协情况

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.

附录 A 导出参量的计算

附录 B 本文中术语的中英对照表

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