

分类号 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

密级 公开  
编号 800212008S20

# 中国科学院研究生院

## 硕士学位论文

红外暗云的分子谱线研究

杜福君

指导教师 杨戟研究员、博士、紫金山天文台

申请学位级别 理学硕士      学科专业名称 天体物理

论文提交日期 2008年9月      论文答辩日期 2008年10月

培养单位 中国科学院紫金山天文台

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_



中国科学院紫金山天文台硕士学位论文

# 红外暗云的分子谱线研究

杜福君

(天体物理)

指导教师: 杨戟

二〇〇八年九月

A THESIS PRESENTED FOR THE MASTER OF SCIENCE DEGREE

# Study of Infrared Dark Clouds Using Molecular Lines

FUJUN DU

(Astrophysics)

SUPERVISOR: JI YANG

September, 2008

## 摘 要

红外暗云 (IRDC) 是相对银河系红外背景的消光特征, 主要由 MSX 卫星在中红外波段发现, 被认为是大质量恒星形成的场所。我们先对 61 个红外暗云进行了  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ , 以及  $\text{C}^{18}\text{O}$  的巡天观测。其中 52 个处于银盘第一象限, 选自 Simon 等人 2006 年给出的表; 其它处于第二、三象限, 通过肉眼检视 MSX 图像得到。在三条谱线上的探测率分别是 90%, 71%, 和 62%。这些红外暗云的空间分布与 5 kpc 分子环的图像一致, 同时大致符合银河系的旋臂图像, 但还需进一步认证。典型激发温度为 10–20 K, 典型柱密度为  $10^{22-23} \text{ cm}^{-2}$ 。如果采用 Simon 暗云表里的角尺度, 则它们的典型尺度为几个秒差距, 由此估计典型的体密度和 LTE 质量为大约  $5000 \text{ cm}^{-3}$  和  $5000 M_{\odot}$ 。这些红外暗云处于或接近处于位力平衡。

从这些单点观测的源中选出了 19 个进行了 CO 三条谱线的成图。识别出了 46 个  $^{13}\text{CO}$  核, 56 个  $\text{C}^{18}\text{O}$  核。 $^{13}\text{CO}$  核与 MSX 图像中的暗区重合的比例为 54%,  $\text{C}^{18}\text{O}$  核与暗区重合的比例为 70%。其余的多数与亮区重合, 少数是暗区内有亮源。核的尺度与 Simon 星表的尺度一般相差较大。 $^{13}\text{CO}$  核和  $\text{C}^{18}\text{O}$  核按尺度分布的谱指数分别是 2.7 和 3.8, 按质量分布的谱指数是 2.5 和 2.7; 这些分布同时也可用对数正态分布拟合。线宽–尺度关系的指数分别为 0.35 和 0.27, 接近 Kolmogorov 湍动指数。通过引力塌缩将能量转换成微观湍动动能, 进一步转换成毫米波辐射是可行的。

根据 CO 成图结果进一步选出 7 个区域 (10 个核区) 进行了 CS (2–1) 和  $\text{HCO}^+$  (1–0) 成图。CS (2–1) 和  $\text{HCO}^+$  (1–0) 的典型积分强度为  $\sim 4\text{--}5 \text{ K km s}^{-1}$ , 而  $\text{HCO}^+$  (1–0) 的稍强。典型线宽为  $2\text{--}4 \text{ km s}^{-1}$ , 而  $\text{HCO}^+$  (1–0) 的稍大, 并且一般两者的线宽都大于  $\text{C}^{18}\text{O}$  的线宽。假定所有源的这两条谱线的激发温度为 10 K, 算出典型柱密度分别为  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  和  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。不同源和不同谱线的分布方式各异。 $\text{C}^{18}\text{O}$  多与 MSX 暗区成协,  $^{12}\text{CO}$  更倾向于与亮区成协,  $\text{HCO}^+$ , CS 和  $^{13}\text{CO}$  两种情况都有。对三个成图区域的接近圆形的核考察了密度轮廓, 发现暗区的密度轮廓近似遵从  $\rho \propto r^{-2}$ , 而亮区近似有  $\rho \propto r^{-1.5}$ 。分子气体的分布与红外暗区和亮区的关系表明暗核的形成与亮区有密切关系。至少三个区域表现出明显的速度结构, 其中一个的速度分布可能与银盘的影响有关。至少有三个源的  $\text{HCO}^+$  谱线发现有不对称特征, 其中两个是红端强, 一个是蓝端强; 同时还看到了不同谱线的形状和宽度随着位置的变化, 这些都表明了不同源的不同运动状态。

**关键词** 尘埃, 消光—星系: 结构—红外: 星际介质—射电谱线: 星际介质—恒星: 形成

## ABSTRACT

InfraRed Dark Clouds (IRDCs) are extinction features against the Galactic infrared background, mainly in mid-infrared band. Recently they were proposed to be potential sites of massive star formation. In this work we firstly made a  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ , and  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1\rightarrow 0$ ) survey of 61 IRDCs, 52 of which are in the first Galactic quadrant, selected from a catalog given by Simon et al. (2006), while the others are in the outer Galaxy, selected by visually inspecting the MSX images. Detection rates in the three CO lines are 90%, 71%, and 62%, respectively. The distribution of IRDCs in the first Galactic quadrant is consistent with the 5 kpc molecular ring picture, while slight trace of a spiral pattern is also noticeable, and needs to be further examined. The IRDCs have a typical excitation temperature of 10 K and typical column density of several  $10^{22} \text{ cm}^{-2}$ . Their typical physical size is estimated to be several parsecs using angular sizes from the Simon catalog. The typical volume density and LTE mass are  $\sim 5000 \text{ cm}^{-3}$  and  $\sim 5000 M_{\odot}$ , respectively. The IRDCs are in or near virial equilibrium.

19 IRDCs were then selected to be further mapped in the three CO isotope lines. 46  $^{13}\text{CO}$  cores and 56  $\text{C}^{18}\text{O}$  cores are identified. 70% of the  $\text{C}^{18}\text{O}$  cores coincide with the MSX dark features, and 23% coincide with the bright regions, while the rest coincide with dark regions containing bright dots. The angular sizes of the cores are generally significantly different from those in the Simon catalog. The number distribution of the sizes of  $^{13}\text{CO}$  and  $\text{C}^{18}\text{O}$  cores have a spectral index of 2.7 and 3.8, respectively, while the spectral index of masses are 2.5 and 2.7. However, these distributions can also be fitted by log-normal functions. The power indexes of the velocity width-size relation are 0.35 and 0.27 for  $^{13}\text{CO}$  and  $\text{C}^{18}\text{O}$ , which are close to the Kolmogorov turbulence index. It is possible that the gravitational energy is cascaded to microscopic turbulent kinematic energy, then converted into millimeter radiation.

CS (2-1) and  $\text{HCO}^+$  (1-0) mapping were carried out for 7 regions (10 cores) on checking the CO results. The typical integrated intensities for CS (2-1) and  $\text{HCO}^+$  (1-0) are  $\sim 4\text{--}5 \text{ K km s}^{-1}$ , respectively, with those of  $\text{HCO}^+$  (1-0) being larger. Typical line-widths are  $2\text{--}4 \text{ km s}^{-1}$ , also with those of  $\text{HCO}^+$  (1-0) being larger. The line widths of these two are generally greater than those of  $\text{C}^{18}\text{O}$ . Typical column densities are  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ,  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , respectively, assuming an excitation temperature of 10 K for all the sources. The spatial distribution of integrated intensity varies among objects and lines.  $\text{C}^{18}\text{O}$  cores are almost always associated with the MSX dark regions, while  $^{12}\text{CO}$  cores tend to be associated with the MSX bright regions, and both situations appear for  $\text{HCO}^+$ , CS, and  $^{13}\text{CO}$ . Density profile for three near-round regions are derived, and it turns out that for dark regions  $\rho \propto r^{-2}$ , for bright regions  $\rho \propto r^{-1.5}$ . At least three regions show conspicuous velocity structure, with one of them might be relevant to the Galactic structure. Asymmetric line profiles are found in  $\text{HCO}^+$  for at least three sources, two of which appear stronger in the red wing and another one the opposite; the lines stronger in the red wing are toward bright regions, while the one stronger in the blue wing is toward a dark region. The line-shapes and line-widths are also found to vary with positions, indicating different dynamical status of different sources.

**Keywords** DUST, EXTINCTION — GALAXY: STRUCTURE — INFRARED: ISM — RADIO LINES: ISM — STARS: FORMATION

## 目 录

<b>第一章</b>	<b>引言</b>	1
1.1	恒星形成	1
1.2	分子云	3
1.3	红外暗云	5
1.3.1	MSX 卫星	5
1.3.2	红外暗云的研究状况和基本性质	5
1.4	本工作的目的	6
<b>第二章</b>	<b><math>^{12}\text{CO}</math>, <math>^{13}\text{CO}</math>, <math>\text{C}^{18}\text{O}</math> (<math>J=1 \rightarrow 0</math>) 单点巡天</b>	7
2.1	红外暗云表与选源	7
2.2	观测	12
2.3	速度成份的认证	12
2.4	观测结果和物理参数的列表	13
2.5	探测率	20
2.6	在银河系中的分布	20
2.7	红外暗云的基本物理性质	22
2.8	尺度谱和质量谱	25
2.9	线宽、尺度、质量的联合分析	29
2.10	分子谱线观测结果与 MSX 数据的相关性	30
2.11	小结	34
<b>第三章</b>	<b>CO 谱线成图观测</b>	35
3.1	核的分类	59
3.2	与单点观测结果比较	61
3.3	物理状态	63
3.4	核的尺度谱和质量谱	63
3.5	线宽尺度关系与湍动	72
<b>第四章</b>	<b>CS 和 <math>\text{HCO}^+</math> 谱线成图观测结果</b>	76
<b>第五章</b>	<b>几个源的具体考察</b>	77
5.1	G012.81+00.36	77
5.1.1	各谱线积分强度的分布	77
5.1.2	谱线形状	77
5.1.3	强度随半径的变化	78
5.2	G014.72-00.88	84
5.3	G017.09+00.45	84
5.3.1	积分强度的分布	84
5.3.2	谱线观测量随着位置的变化	85

5.4	G038.95-00.47 .....	88
5.4.1	各谱线的分布 .....	88
5.4.2	谱线参数随位置的变化 .....	89
5.5	G078.06-00.67 .....	94
5.6	G080.00+02.67 .....	94
5.6.1	三个核的积分强度图 .....	94
5.6.2	a 核的谱线形状随位置的变化 .....	95
5.7	G084.81-01.09 .....	98
5.8	本部分小结 .....	104
<b>第六章</b>	<b>总结与展望 .....</b>	<b>105</b>
6.1	单点方面 .....	105
6.2	成图方面 .....	106
6.3	其它方面 .....	106
<b>附录 A</b>	<b>椭圆拟合方法 .....</b>	<b>107</b>
<b>附录 B</b>	<b>高斯拟合线宽与实际线宽的关系 .....</b>	<b>108</b>
<b>附录 C</b>	<b>各谱线的参数 .....</b>	<b>110</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>111</b>
<b>攻读硕士学位期间的研究工作</b>	<b>.....</b>	<b>115</b>
<b>致谢</b>	<b>.....</b>	<b>116</b>



## 插图目录

2-1	样本在银道坐标系中的分布。 .....	10
2-2	样本角半径和峰值对比度的分布。 .....	11
2-3	样本在银盘上的分布。 .....	21
2-4	所有速度成分在银面上的分布。 .....	22
2-5	位于第二象限的一个红外暗云 G173.38+02.57 的 CO 谱线。 .....	22
2-6	峰值强度的相关性 .....	23
2-7	积分强度的相关性 .....	24
2-8	线宽的相关性 .....	24
2-9	激发温度的柱状图及其随银心距的变化。 .....	26
2-10	光深的分布及其随银心距的变化。 .....	26
2-11	样本的尺度分布以及随银心距的变化。 .....	27
2-12	柱密度的分布及其随银心距的变化。 .....	27
2-13	LTE 质量的分布和随着银心距的变化。 .....	28
2-14	尺度谱和质量谱。 .....	28
2-15	积分强度与柱密度的关系。 .....	29
2-16	线宽的柱状图及其随着银心距的变化。 .....	31
2-17	位力参数的柱状图及其随着银心距的变化。 .....	31
2-18	尺度与线宽和质量的相关关系。 .....	32
2-19	MSX 流量及峰值对比度与柱密度的相关性。 .....	33
3-1	G008.67-00.70 的 CO 成图结果。 .....	36
3-2	G010.99-00.07 的 CO 成图结果。 .....	37
3-3	G012.81+00.36 的 CO 成图结果。 .....	38
3-4	G013.34+00.17 的 CO 成图结果。 .....	39
3-5	G013.82-00.48 的 CO 成图结果。 .....	40
3-6	G013.97-00.43 的 CO 成图结果。 .....	41
3-7	G014.29-00.66 的 CO 成图结果。 .....	42
3-8	G014.56-00.78 的 CO 成图结果。 .....	43
3-9	G014.72-00.88 的 CO 成图结果。 .....	44
3-10	G017.09+00.45 的 CO 成图结果。 .....	45
3-11	G019.27+00.07 的 CO 成图结果。 .....	46
3-12	G024.49-00.69 的 CO 成图结果。 .....	47
3-13	G025.04-00.20 的 CO 成图结果。 .....	48
3-14	G034.24-01.25 的 CO 成图结果。 .....	49
3-15	G034.77-00.55 的 CO 成图结果。 .....	50
3-16	G038.95-00.47 的 CO 成图结果。 .....	51
3-17	G078.06-00.67 的 CO 成图结果。 .....	52

3-18	G080.00+02.67 的 CO 成图结果。 .....	53
3-19	G084.81-01.09 的 CO 成图结果。 .....	54
3-20	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的尺度的分布。 .....	63
3-21	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的积分强度的分布。 .....	64
3-22	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的激发温度的分布。 .....	64
3-23	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的速度宽度的分布。 .....	65
3-24	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的光深的分布。 .....	65
3-25	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的柱密度的分布。 .....	66
3-26	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的密度的对数的分布。 .....	66
3-27	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的质量的分布。 .....	67
3-28	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的位力参数的分布。 .....	67
3-29	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的尺度与柱密度。 .....	68
3-30	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的尺度的对数的分布。 .....	69
3-31	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的质量的对数的分布。 .....	69
3-32	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的质量的对数的分布。 .....	70
3-33	$^{13}\text{CO}$ 核与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的线宽-尺度关系。 .....	73
3-34	Simon 2006 观测结果的 $^{13}\text{CO}$ 核的线宽-尺度关系。 .....	73
5-1	G012.81+00.36: $^{12}\text{CO}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	79
5-2	G012.81+00.36: $^{13}\text{CO}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	80
5-3	G012.81+00.36: $\text{C}^{18}\text{O}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	80
5-4	G012.81+00.36: CS 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	80
5-5	G012.81+00.36: $\text{HCO}^+$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	80
5-6	G012.81+00.36 的 $^{12}\text{CO}$ , $^{13}\text{CO}$ 和 $\text{HCO}^+$ 三条谱线形状。 .....	81
5-7	G012.81+00.36 的 $\text{C}^{18}\text{O}$ , CS 和 $\text{HCO}^+$ 三条谱线形状。 .....	82
5-8	G012.81+00.36: $\text{C}^{18}\text{O}$ , CS 和 $\text{HCO}^+$ 的半径-积分强度关系 .....	83
5-9	G014.72-00.88 的 CS 谱线积分强度等值线图。 .....	84
5-10	G017.09+00.45: $^{12}\text{CO}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	86
5-11	G017.09+00.45: $^{13}\text{CO}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	86
5-12	G017.09+00.45: $\text{C}^{18}\text{O}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	86
5-13	G017.09+00.45: CS 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	86
5-14	G017.09+00.45: $\text{HCO}^+$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	87
5-15	G017.09+00.45 各区域各谱线的形状。 .....	87
5-16	G038.95-00.47: $^{12}\text{CO}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	90
5-17	G038.95-00.47 的 MSX 图像 .....	90
5-18	G038.95-00.47: $^{12}\text{CO}$ 的峰值强度图。 .....	91
5-19	G038.95-00.47: $^{12}\text{CO}$ 的总积分强度图。 .....	91
5-20	G038.95-00.47: $^{13}\text{CO}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	91
5-21	G038.95-00.47: $\text{C}^{18}\text{O}$ 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	91
5-22	G038.95-00.47: $^{13}\text{CO}$ 柱密度的等值线图。 .....	91

---

5-23	G038.95-00.47: C <sup>18</sup> O 柱密度的等值线图。 .....	91
5-24	G038.95-00.47: CS 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	92
5-25	G038.95-00.47: HCO <sup>+</sup> 各个速度区间的积分强度的等值线图。 .....	92
5-26	G038.95-00.47 的 <sup>12</sup> CO 峰值速度图。 .....	92
5-27	G038.95-00.47 <sup>13</sup> CO 与 C <sup>18</sup> O 的丰度比与 MSX 流量的关系 .....	93
5-28	G038.95-00.47 各谱线的平均形状。 .....	93
5-29	G078.06-00.67 CS 的积分强度等值线图。 .....	94
5-30	G078.06-00.67 HCO <sup>+</sup> 的积分强度等值线图。 .....	95
5-31	G078.06-00.67 a 核的 C <sup>18</sup> O, CS 和 HCO <sup>+</sup> 三条谱线形状。 .....	96
5-32	G078.06-00.67 a 核的积分强度与半径的关系 .....	97
5-33	G080.00+02.67a: CS 和 HCO <sup>+</sup> 的积分强度等值线图。 .....	98
5-34	G080.00+02.67b: CS 和 HCO <sup>+</sup> 的积分强度等值线图。 .....	98
5-35	G080.00+02.67c: CS 和 HCO <sup>+</sup> 的积分强度等值线图。 .....	99
5-36	G080.00+02.67 a 核的 C <sup>18</sup> O, CS 和 HCO <sup>+</sup> 三条谱线形状。 .....	99
5-37	G080.00+02.67 a 核的 C <sup>18</sup> O 谱线形状随位置的变化。 .....	100
5-38	G080.00+02.67 a 核的 CS 谱线形状随位置的变化。 .....	101
5-39	G080.00+02.67 a 核的 HCO <sup>+</sup> 谱线形状随位置的变化。 .....	101
5-40	G080.00+02.67 a 核的 <sup>13</sup> CO 峰值速度随位置的变化 .....	101
5-41	G080.00+02.67 a 核的积分强度与半径的关系 .....	102
5-42	G080.00+02.67 b 核的积分强度与半径的关系 .....	102
5-43	G084.81-01.09: CS 和 HCO <sup>+</sup> 的积分强度等值线图。 .....	103
5-44	G084.81-01.09 的 C <sup>18</sup> O, CS 和 HCO <sup>+</sup> 三条谱线形状。 .....	103
A-1	椭圆和高斯分布的椭圆拟合。 .....	107
B-1	谱线形状随光深的变化。 .....	109

## 表格目录

2-1	源名、银道坐标, 以及赤道坐标的列表。 .....	8
2-1	源名、银道坐标, 以及赤道坐标的列表。 .....	9
2-2	单点巡天结果 .....	13
2-3	红外暗云的观测性质。 .....	14
2-3	红外暗云的观测性质。 .....	15
2-3	红外暗云的观测性质。 .....	16
2-4	红外暗云的物理参数。 .....	17
2-4	红外暗云的物理参数。 .....	18
2-4	红外暗云的物理参数。 .....	19
3-1	$^{13}\text{CO}$ 核的参数。 .....	55
3-1	$^{13}\text{CO}$ 核的参数。 .....	56
3-2	$\text{C}^{18}\text{O}$ 核的参数。 .....	57
3-2	$\text{C}^{18}\text{O}$ 核的参数。 .....	58
3-3	CO 核的性质描述。 .....	60
3-4	$\text{C}^{18}\text{O}$ 单点观测与成图观测的比较。 .....	62
3-5	$^{13}\text{CO}$ 与 $\text{C}^{18}\text{O}$ 核的平均性质 .....	63
4-1	CS 和 $\text{HCO}^+$ 观测结果。 .....	76
5-1	G017.09+00.45 的不同区域的谱线峰值强度、线宽、光深、柱密度之差异 ..	86
5-2	G038.95-00.47 不同区域 $^{13}\text{CO}$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}$ 的柱密度 .....	88
5-3	G038.95-00.47 不同区域的谱线线宽与速度之差异 .....	90
C-1	各谱线的参数 .....	110

## 第一章 引言

恒星在其形成和演化中发出的光照亮了宇宙，其星风、外流、脉动以及爆发等活动是星际物质混合和湍动的重要源泉，并通过超新星爆发向星际和星系际介质输送重元素。它们提供了构建生命的材料和能源，以及栖居地。恒星的活动往往触发宇宙中其它天体的进一步活动；是某些极端天体，比如中子星、黑洞的前身。恒星释放的能量来自核能和引力能，引力能来自宇宙的膨胀，而根据目前的推测，宇宙的膨胀和核能上都来自大爆炸初期暴涨场的相变潜热。

第一代恒星 (星族 III) 是一类设想中的、存在性尚有疑问的天体，用来合成早期重元素以解释遥远类星体发射谱中的重元素线，并可能是宇宙从黑暗时代 (物质与辐射脱耦到第一代恒星形成这段时间) 再电离的驱动者之一。质量据推测可高达  $10^6 M_{\odot}$  (但实际上可能只有  $100 M_{\odot}$  左右)，红移  $z \sim 20-30$ 。主要通过数值模拟手段研究。早期缺乏重元素以及尘埃，并且磁场的动力学作用小，不受更早的恒星形成活动的影响，初始条件比较简单，因此第一代恒星的理论研究相对容易一些。而当今正在形成恒星的分子云的初始条件则难以确定。星族 II 主要分布于星系核球和晕中，金属含量较小，形成于较早期，光谱型较晚。星族 I 的金属含量高，特征质量为  $\sim 1 M_{\odot}$ ，多位于星系盘中。

已观测的星中 80% 以上都处于主序阶段，且多是双星或小恒星群的成员。与分子云成协的光学可见星一般不处于主序，而是对于相同的光度有较低的等效温度，称为“T Tauri”星。与分子云成协的光学不可见星具有更宽的频谱，在远红外达到峰值，并且通常比单温黑体谱宽很多，称为原恒星，它们是处于流体静力学平衡的

气态物体，光度主要来自其母云的塌缩释放的引力能，还未但将会出现氢燃烧 (Zinnecker & Yorke, 2007)。通过观测搜寻正在发生引力内流的原恒星有重要意义。

### 1.1 恒星形成

按照 Shu, Adams, & Lizano (1987)，恒星的形成可以粗略分为四个阶段：原初分子云由湍动和磁场支撑；由于湍动的耗散和双极扩散，在引力的作用下形成云核；云核从内到外塌缩，形成原恒星和盘；星风沿着转轴吹出，形成双极外流；内流逐渐停止，恒星及其盘显露出来。Zinnecker & Yorke (2007) 也将形成过程分为压缩，塌缩，吸积，驱散四个阶段。恒星形成率 (SFR) 描述一个区域的恒星形成的速率，恒星形成效率 (SFE) 描述一个区域的气体转换成恒星的效率。银河系恒星形成率约为  $3 M_{\odot}/\text{yr}$ ，恒星形成效率为 2% (Shu, Adams, & Lizano, 1987)。

大质量恒星定义为能产生 II 型超新星的 OB 型星 (对太阳这样的金属丰度， $M/M_{\odot} > 8$ )。甚大质量星 (VMS: very massive star,  $100 \lesssim M/M_{\odot} < 1000$ ) 以及质量更大的一般认为只有在宇宙初期才可能形成 (Zinnecker & Yorke, 2007)。现阶段的大质量恒星家族主要由 O、B 型星组成，除此之外还有 Wolf-Rayet 星 (典型质量  $10-25 M_{\odot}$ ，可高达  $80 M_{\odot}$ ，Crowther (2007))。Kudritzki et al. (1992) 和 Massey & Hunter (1998) 发现有恒星质量达到  $120 M_{\odot}$ 。Wolfire & Cassinelli (1986) 甚至给出几个质量为几百到几千太阳质量的恒星的例子 (但常有双星或多星系统被误认为一个恒星的情况)。网上一个列表 (Wikipedia, List of most massive stars) 中有三个恒星的质量估计达到  $150 M_{\odot}$ ，但

有较大的不确定性。相对可靠的是，位于 NGC 3603 星团中的 A1 双星的两个成员被测出具有质量  $114 M_{\odot}$  和  $84 M_{\odot}$ 。

基本问题是，大质量星的形成是小质量星形成的增强版，即通过从周围包层的吸积，还是本质上完全不同，比如，通过原恒星的合并？即使是塌缩，其具体方式也有多种。比如 Larson (1969) 计算了均匀等温球的塌缩，Shu (1977) 给出等温球的“自内向外”自相似塌缩模型，它们都是球对称的；更现实的模型考虑到初始角动量导致非球对称，形成盘，后期通过盘吸积。整体塌缩模型要求预先存在较大质量的云核，一个问题是这些云核本身如何能存在。如果依靠湍动支撑，意味着原始的云中会有相应的密度涨落，而密度涨落有诱发形成大量小质量星的可能。Krumholz & McKee (2008) 估计，为了避免早期的碎裂而形成大质量恒星，云的柱密度不能小于  $1 \text{ g cm}^{-2}$  ( $\sim 1.4 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ )。塌缩模型需要在盘吸积、外流形成等方面完善细节。竞争吸积模型 (Bondi-Hoyle 吸积) (Bonnell, Vine & Bate, 2004) 中，小星子在其母云里四处游走不断吸附物质，质量越大的或处于密气体环境中的吸积越快。Krumholz, McKee, & Klein (2005a) 认为观测到的星际环境不足以提供足够的竞争吸积率来形成大质量恒星。相关的争论还在继续中。恒星形成过程除了必然伴随着塌缩之外，往往还伴随着双极外流、准直喷流等，与化学、磁流体力学，以及辐射转移等过程纠缠在一起。大质量恒星形成的观测研究之困难是由于：a. 早期阶段被尘埃消光遮掩；b. 大质量恒星相对数量少；c. 演化快；d. 一般以成团的方式形成。

引入并合说 (Bonnell, Bate & Zinnecker, 1998) 的一个原因是，在大质量恒星的形成过程中，辐射压会阻碍物质的进一步吸积。主序的平均质光关系为

$L \propto M_{\odot}^{3.5}$ ，光度随着质量很快增长，因此当质量达到一定程度时辐射压将超过引力。Eddington 极限根据光子与电子的散射算出，据推测在  $150 M_{\odot}$  左右。而在恒星形成过程中主要考虑的是尘埃消光导致的辐射压。按照 Kahn (1974)，假定本地的尘埃丰度，则质量超过  $40 M_{\odot}$  的恒星不能形成。但现在一般认为这基本上不成问题了，有多种可能的解决方案。比如 Yorke & Sonnhalter (2002) 的数值模拟表明原则上任意多的物质都可以吸积到中心星上。但是对于大质量星，形成过程中相当多的物质会被辐射压力推出。通过强化辐射场的各向异性特征，辐射加速的效果将会减弱。这种过程称为手电筒效应 (“flashlight effect”)。更加仔细的辐射转移程序将会强化这一效应。Edgar & Clarke (2003) 认为当辐射压超过引力的时候，虽然会让内流减速，但由于内流物质已经具有相当大的速度，所以还是可以掉落到原恒星表面。

需要通过观测确定真实的星际环境是倾向于碰撞合并或竞争吸积还是塌缩。并合说要求大质量恒星的形成环境的星子密度很高，塌缩则预期原恒星会伴随着盘。由于大质量恒星的演化周期短，并且盘会很快被高能光子蒸发，所以直接观测很有难度。Jiang et al. (2005) 通过近红外偏振成像探测到环绕一个质量不小于  $7 M_{\odot}$  的原恒星的外流/盘系统，Beltrán et al. (2006) 通过氨分子谱线观测到内流、旋转、外流在一个质量约  $20 M_{\odot}$  的年轻星附近同时存在，为大质量星的非球对称吸积提供了证据，表明大质量恒星与小质量恒星的形成机制类似。不过在紧密的大质量星团中，可能存在气体供给不足的问题；而物理上恒星之间的确有碰撞的可能，在星团核心区域可能有恒星并合事件发生。因此并合说还是有一定的意义；通过并合形成的大质量恒星可能会具有较大的自转角动量，而可作为长伽玛暴的前身。另

外，除了质量相仿的星体碰撞之外，还存在小质量的紧密颗粒往较大质量的原恒星掉落的情形，这也有助于克服辐射压。

关于恒星形成研究的一个重要问题是初始质量函数 (IMF) 及其对大质量星的普适性。作为例子，Salpeter (1955) 给出的初始质量函数为

$$dN/d\lg(M) \simeq 0.03 \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1.35},$$

当  $-0.4 \leq \lg(M/M_{\odot}) \leq 1.0$  (1-1)

Kroupa (2001) 给出如下初始质量函数：

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-\alpha} \quad (1-2)$$

其中

$$\alpha \simeq \begin{cases} +0.3 \pm 0.7, & \text{当 } 0.01 \leq M/M_{\odot} < 0.08 \\ +1.8 \pm 0.5, & \text{当 } 0.08 \leq M/M_{\odot} < 0.50 \\ +2.7 \pm 0.3, & \text{当 } 0.50 \leq M/M_{\odot} < 1.00 \\ +2.3 \pm 0.7, & \text{当 } 1.00 \leq M/M_{\odot} \end{cases} \quad (1-3)$$

关于高端初始质量函数的普适性 (Zinnecker & Yorke, 2007)，竞争吸积模型能给出解释。对于竞争吸积不适用的情形，分形云随机采样也可给出解释。假定原恒星质量是对数正态分布 (由于中心极限定理) 以及吸积率正比于质量也可给出高端的幂率谱。

## 1.2 分子云

星际云一般可按其成份和形态分为弥漫原子云 ( $A_V \sim 0$ )、弥漫分子云 ( $A_V \sim 0.2$ )、半透明云 ( $A_V \sim 1-2$ )，以及致密分子云 ( $A_V \sim 5-10$ ) 等几类 (Snow & McCall, 2006)。

巨分子云的典型尺度为 40 pc，典型  $H_2$  密度为  $300 \text{ cm}^{-3}$ ，典型质量为  $10^{5-6} M_{\odot}$  (Solomon, Sanders, & Scoville, 1979)，典型动力学温度为 8–11 K，典型自由下落时间为  $3 \times 10^6$  年。银河系中共有  $\sim 4000$

个巨分子云，总质量  $\sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$ ，约占银河系总质量的 0.1–0.5%。

光学暗云 (Bok 球) 的典型尺度为几个 0.1 pc，典型质量是 2–100  $M_{\odot}$ ，典型密度是  $10^{4-5} \text{ cm}^{-3}$  (Launhardt & Henning, 1997)。

分子云的主要成分是氢分子，其次是氢和氦原子，氢氦比约为 3:1。氢分子不能直接通过两个氢原子的碰撞形成。一般认可的形成机制是，氢原子先被吸附到尘埃或冰壳表面，然后再反应变成氢分子；或者氢原子先与其它物质反应间接生成氢分子。恒星形成于分子云中，所以需要通过对分子云来了解恒星形成的早期过程；对分子云的研究也有助于增加对星际湍动、磁场、星系和宇宙的组成结构及其演化的认识。常用的研究方法有：通过观测获取大样本的整体分布状况，或者单个样本的物理状况。理论包括解析方法和数值模拟。解析方法可以是做一些模型，通常比较简化。或采用湍流理论常用的方法进行分析，研究系统的尺度、质量、密度谱，以及线宽尺度关系等。在这类分析中引力的作用往往不明显。由于分子云可压缩，并且常与磁场耦合，而引力又导致碎裂和丝化并提高涡度，增加了问题的复杂性。数值模拟一般是给定某种初始条件和边界条件，让系统演化一段时间后再看物质的分布和运动状况。计算方法有平滑粒子流体动力学 (SPH: Smoothed Particle Hydrodynamics) 和自适应网格加细等方法 (AMR: Adaptive Mesh Refinement)。

分子谱线观测的物理解释通常用到以下几种计算。

- 热动平衡方法假定分子能级服从玻耳兹曼分布，可用一个激发温度描述；完全热化时激发温度等于动力学温度；忽略辐射场对能级布居的影响。需要同时拥有光厚和光薄的谱线数

据 (一条包含 (超) 精细结构的谱线相当于多条谱线)。对于光厚谱线, 扣除背景辐射并进行瑞利-金斯改正后可获得激发温度, 在光薄谱线的 A-B 系数已知的情况下根据激发温度即可得到光深和柱密度; 在知道丰度的情况下就可得到总的气体柱密度。实际上只要不同谱线对应的能级的布居数满足热动平衡条件, 不需要谱线是光厚也能拟合出激发温度和光深。对于 CO 谱线, 由于  $^{12}\text{CO}$  与  $^{13}\text{CO}$  的丰度比一般在 40-90 之间, 而实际观测到的峰值强度比常远小于此, 因此  $^{12}\text{CO}$  一定是光厚的。常用分子谱线的丰度一般都是引用典型值, 而典型值本身需要知道分子云中总的气体含量。后者可以通过直接的卫星观测得到, 或者通过尘埃消光估计, 也可通过位力平衡来估计。

- 大速度梯度方法 (Castets et al., 1990; Scoville & Solomon, 1974) 假定谱线的速度宽度来自气体的宏观系统运动, 不假定分子能级满足玻耳兹曼分布, 引入逃逸概率简化统计平衡方程, 通过假定不同的几何形态可算出逃逸概率, 把全局的辐射转移问题转化为局部问题, 利用统计平衡方程通过多次迭代得到准确值。输入参数一般包括动力学温度, 氢气密度, 几何形状, 速度梯度等。通过将算出的谱线形态与实际观测结果比较, 可以选出最优的输入参数。
- 微观湍动方法 (Leung & Liszt, 1976) 光子平均自由程远大于湍流相关尺度, 假定谱线速度宽度来自微观湍动而非宏观运动, 把湍动速度涨落与热速度同等对待。
- 在只有单条谱线数据的情况下, 有时也能进行一些估计。比如根据

$^{12}\text{CO}$  的积分强度可估计总的气体柱密度。X-因子定义为  $N(\text{H}_2)/I(\text{CO})$ , 在数个 pc 的尺度上近似为常数,  $X=1.6\times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$  (Paglione et al., 2001)。对此通常解释为巨分子云分成多个小云团, 每个云团处于自引力平衡, 不同云 (和云团) 的温度密度不会差别太大, 而 CO 的积分强度代表了视线方向的云团数 (Dickman, 1986; Kutner & Leung, 1985)。

分子云常用的一些特征量:

▷ 自由下落时标

$$t_{\text{ff}} = \frac{\sqrt{3\pi/32}}{\sqrt{G\rho}} \simeq (1 \text{ Myr}) \left( \frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \quad (1-4)$$

▷ 穿越时标

$$t_{\text{cross}} = 1 \text{ Myr} \left( \frac{R}{1 \text{ pc}} \right) \left( \frac{1 \text{ km s}^{-1}}{v} \right) \quad (1-5)$$

▷ 金斯时标是小扰动 (声波) 穿过云所需的时间

$$t_{\text{sound}} = \frac{R}{c_s} \simeq (5 \text{ Myr}) \left( \frac{R}{1 \text{ pc}} \right) \left( \frac{c_s}{0.2 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1} \quad (1-6)$$

▷ 开尔文-亥姆赫兹时标是通过辐射耗尽引力能所需的时间

$$t_K = \frac{3GM^2}{4LR} \simeq (20 \text{ Myr}) \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^2 \left( \frac{L_\odot}{L} \right) \left( \frac{R_\odot}{R} \right) \quad (1-7)$$

▷ 金斯质量是在热压和引力作用下能保持稳定的质量上限

$$M_J = \frac{\pi}{6} \frac{c_s^3}{G^{3/2}\rho^{1/2}} \simeq (2 M_\odot) \left( \frac{c_s}{0.2 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left( \frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \quad (1-8)$$



▷ 位力质量通过以下公式计算

$$M_{\text{virial}} = \frac{5\sigma^2 R}{G} = 105 M_{\odot} \times \left(\frac{\text{Size}}{\text{pc}}\right) \times \left(\frac{\text{dV}}{\text{km s}^{-1}}\right)^2 \quad (1-9)$$

Size 是云直径, dV 是谱线半极大全宽。

▷ Bonnor-Ebert 质量定义为处于给定压强的环境中的等温气体球能在引力作用下保持稳定平衡的最大质量

$$\begin{aligned} M_{BE} &= \frac{c_{BE} v_T^4}{P_0^{1/2} G^{3/2}} \\ &= 6.6 \times 10^{-5} M_{\odot} \times \\ &\quad \left(\frac{T_{\text{core}}}{T_{\text{amb}}}\right)^{1/2} \left(\frac{T_{\text{core}}}{10 \text{ K}}\right)^{3/2} \left(\frac{100 \text{ cm}^{-3}}{n_{\text{amb}}}\right)^{1/2} \end{aligned} \quad (1-10)$$

其中  $v_T = \sqrt{\frac{kT}{\mu m_H}}$  是等温声速,  $P_0$  是环境压强,  $c_{BE} \simeq 1.18$  是个无量纲常数,  $T_{\text{core}}$  是核心温度,  $T_{\text{amb}}$  是环境温度,  $n_{\text{amb}}$  是环境密度, 平均分子量取为 2.8。

▷ 磁临界质量是

$$M_{\Phi} = 200 M_{\odot} \left(\frac{B}{3 \times 10^{-6} \text{ G}}\right) \left(\frac{R}{3 \text{ pc}}\right)^2 \quad (1-11)$$

如果假定磁场冻结于云团上, 当云的质量小于这个质量, 气压和磁压的作用胜过自引力的作用, 云将不能充分塌缩。当云的质量大于这个质量, 则当体积小于一定值的时候将会塌缩。

## 1.3 红外暗云

### 1.3.1 MSX 卫星

ISO 卫星的 ISOGAL 项目在 1996 年用 ISOCAM 发现了大量的暗特征 (Perault et al., 1996), 估计可见消光  $A_v > 25$ 。稍后中程空间实验卫星 (MSX) 上携带的 SPIRIT 红外望远镜发现了大量的红外暗云。这是一个弹道导弹防御系统卫星, 发射于 1996 年 4 月 24 日, 900 km 高, 极向轨道, 服役 5 年 (Price et al., 2001)。此卫星用 6

到 25  $\mu\text{m}$  的四个中红外波段 (A, C, D, E 波段) 测量了  $|b| \leq 5^\circ$  的整个银盘。另外两个 B 波段由于带宽窄灵敏度低, 没有生成天文图像。其指向精度为 2 角秒 (rms), 空间分辨率约为  $18''.3$ 。这些巡测数据组合起来在每个波段生成了  $1680$  个  $1^\circ.5 \times 1^\circ.5$  的图片, 覆盖了整个银盘区域, 像素间隔为  $6''$ 。8.3  $\mu\text{m}$  处 (A 波段) 的等效噪声辐射率在内银河系大约为  $1.3 \text{ MJy sr}^{-1}$ , 在外银河系纬度极限处变到此值的三倍。由于焦平面温度随着时间增长导致噪声随着时间增长, 而内盘较早观测, 并且覆盖次数更多, 故噪声比外盘小。在其它 MSX 中红外波段的灵敏度要差 10 到 25 倍。在每个波段还生成了 36 个较低分辨率的  $10^\circ \times 10^\circ$  图像, 覆盖了巡测的所有经度和纬度范围。这些全景图分辨率大约为  $1'.2$ , 像素间隔为  $36''$ , 便于与射电观测进行比较。MSX 还对在银盘  $10^\circ$  以内的一些区域生成了一些辅助图像。图像数据的单位是 “in-band-radiance” ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ )。

### 1.3.2 红外暗云的研究状况和基本性质

红外暗云 (InfraRed Dark Clouds (IRDCs)) 是相对银河系的明亮中红外背景辐射的暗的消光特征 (Egan et al., 1998), 通常具有丝状或者紧致的形态, 在 A 波段 (8.3  $\mu\text{m}$ ) 最明显。A 波段的明亮红外背景主要来自多环芳香烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon: PAH) 发射的贡献。红外暗云的高度不透明暗示了高的气体柱密度。Carey et al. (1998, 2000) 发现红外暗云的柱密度可高达  $10^{23} \text{ cm}^{-2}$ , 密度约  $10^{5-6} \text{ cm}^{-3}$ , 离太阳的距离在 1–8 kpc 之间, 直径为 0.4–15 pc, 质量为几十到几千个太阳质量, 而典型温度为 10–25 K; 两个源观测到了由  $\text{HCO}^+$  示踪的分子内流。Rathborne et al. (2005) 通过毫米波到中红外连续谱观测发现一个红外暗云的核具有很高的光度, 9000–32000  $L_{\odot}$ , 并

推断有大质量恒星正在形成。Pillai et al. (2006) 对 9 个红外暗云进行了氨分子反演谱线成图观测。发现红外暗云普遍具有较低的温度 ( $<20$  K), 较大的湍动, 较显著的速度结构, 并处于位力平衡。Ragan et al. (2006) 对 41 个靠近 UCH II 区的红外暗云进行了  $N_2H^+$  ( $1\rightarrow 0$ ), CS ( $2\rightarrow 1$ ), 和  $C^{18}O$  ( $1\rightarrow 0$ ) 的成图观测。他们发现不同的红外暗云在形态上经常显著不同, 并将之归结为演化状态的不同和/或未探测到的深埋原恒星。通过  $N_2H^+$  的柱密度他们估得云的平均质量为  $2500 M_\odot$ , 与之前对大质量恒星形成区的探测结果相仿。典型线宽为  $2.0\text{--}2.9 \text{ km s}^{-1}$ 。Simon et al. (2006b) 通过  $^{13}CO$  巡测确定了 313 个红外暗云 ( $18^\circ < l < 55^\circ$ ,  $|b| < 1^\circ$ ) 的运动学距离, 得到典型尺度为  $5 \text{ pc}$ , 峰值柱密度  $10^{22} \text{ cm}^{-2}$ , LTE 质量  $5 \times 10^3 M_\odot$ , 平均  $H_2$  体密度  $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 。Rathborne et al. (2006) 从中选出 38 个进行了毫米波连续谱观测, 发现了 140 个核; 其质量谱与恒星初始质量函数相洽。假定每个核最终变成一个恒星, 他们发现大部分核将成为 OB 型星。这些核类似于成协于单个年轻大质量星的热核, 只是冷得多, 因此他们建议这些 IRDC 代表了大质量恒星形成的早期阶段, 并可能是星团的冷的前身。Wang et al. (2006) 在这 140 个核中探测到 17 个强水脉泽, 远小于大质量原恒星体和 UCH II 区的探测率。他们建议那些质量很大却并无水脉泽的核可能处于比原恒星更早的阶段。Beuther & Steinacker (2007) 在一个红外暗云中发现了一个很可能变成大质量恒星的原恒星。

上述研究表明红外暗云可作为研究大质量恒星形成的初始条件和早期阶段的理

想对象。

关于红外暗云的起源, Egan et al. (1998) 将 MSX 云与 Abergel et al. (1996) 注意到的暗的中红外消光区域 (ISOCAM 对  $\rho$  Ophiuchus 主云的成图) 进行了对比。 $\rho$  Oph 暗云是高密度 (中心密度  $6\text{--}7 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ) 但是小 (直径大约  $0.1 \text{ pc}$ ) 的云, 其位置、密度和尺度与分子云块 ( $n \geq 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ,  $d \leq 0.5 \text{ pc}$ ) 的一致。MSX 红外暗云与这些密度一致, 但它们不与正在形成恒星的分子云成协, 并且大得多 ( $\geq 1 \text{ pc}$ )。实际上, MSX 云表现为分子云核 ( $d \approx 0.5\text{--}3 \text{ pc}$ ,  $n \approx 10^{4\text{--}6} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \approx 30\text{--}100 \text{ K}$ ) 与孤立暗云 ( $d \approx 0.2\text{--}4 \text{ pc}$ ,  $n \approx 10^{2\text{--}4} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \approx 8\text{--}15 \text{ K}$ ) 的混合物, 具有分子云核的密度和孤立暗云的温度。一种可能的解释是, 它们是巨分子云的包层消散之后留下的裸核。这一机制提供了已探测到的大量天体的恰当来源, 解释了云的分布 (对 GMC 有破坏性作用的云间碰撞和激波在分子环和旋臂中更加普遍, 而正是在这些区域中观测到的暗云聚集最多。) 这个机制要求剩下的云是自引力的, 因此具有高密度, 可以抵抗激波的消散作用和包层丢失时压力的变化。

#### 1.4 本工作的目的

- (1) 通过对红外暗云的巡测, 进一步认识红外暗云的性质, 包括结构形态、空间分布、尺度、温度、密度、运动状态, 等等。
- (2) 在这些样本中, 寻找大质量恒星形成早期阶段的候选者, 并使用 CO 谱线和其它谱线进行进一步的成图研究。

## 第二章 $^{12}\text{CO}$ , $^{13}\text{CO}$ , $\text{C}^{18}\text{O}$ ( $J=1 \rightarrow 0$ ) 单点巡天

### 2.1 红外暗云表与选源

我们用的红外暗云表来自 [Simon et al. \(2006a\)](#)。这个表里的云处于银河系一、四象限。作者用  $8.3 \mu\text{m}$  数据构建了背景模型 (用半径  $15'$  的圆做中值平滑), 再通过  $\text{Contrast} = (\text{Background} - \text{Image}) / \text{Background}$  得到对比度图。为了提高信噪比, 作者对原图做了 Gauss 卷积, 最终的等效角分辨率为  $28''$ 。红外暗云候选者定义为对比度  $2\sigma$  闭合等值线所围连续区。候选者的面积必须足够大, 以免识别出的是极小的特征, 而这有可能是坏像素导致。于是作者要求其等效面积 (定义为峰值对比度的 10% 所围区域的面积) 大于卷积过的  $28''$  FWHM 波束的立体角的二倍, 即大于  $\frac{\pi}{2}(28'')^2 = 1232 \text{ arcsec}^2$ 。实际操作中只要了至少包含 36 个邻近像素的源。

这个表有 10931 个红外暗云, 12774 个核 (定义为比云的平均消光至少大 40% 的区域, 通过迭代的二维椭圆高斯拟合得到), 列出了位置、角尺度、位置角、面积、峰值对比度及其噪声、红外暗云及其核的积分对比度。对大的高对比度云, 作者通过与其它源表以及分子谱线成图结果的对比估得可靠性为 82%。低对比度云的可靠性较低。18% 的错误识别中, 多是朝向亮而复杂的 W51 区。MSX 分辨率和选取的空间滤波尺度限制了红外暗云的尺度; 不能区分亮而复杂的发射区中的空洞与真消光; 有可能临近的红外暗云是被前景发射区或者星体隔断的同一区域。故需其它波段观测交叉验证。

云的典型尺度为 1 到 5 角分。未探测到大于 7.5 角分的。尽管算法可能错过 0.5 度的, 但肉眼看应该没有这么大的。典型核尺度为 0.75 到 2 角分; 最小尺度对应平

滑后的 28 角秒的角分辨率。红外暗云在银纬方向上的分布是高斯型, 其 FWHM 大约 2.2 度。对比度的数密度分布近似遵从幂率谱。红外暗云的分布与银河系弥漫红外背景符合得很好。在恒星形成区、旋臂, 以及“5 kpc 分子环”的方向红外暗云较多。由于红外暗云是消光特征, 当背景亮的时候会更容易探测; 并且, 由于红外暗云可能与恒星形成区成协, 当背景很亮的时候其数目也会增加。仅凭当前数据不能区分这两个因素。

本工作的源主要选自这个云表。我们首先找出对比度大于 0.4、面积大于  $1' \times 1'$ , 且赤纬大于  $\sim -22^\circ$  (使得在青岛站每天有不错的可观测时间) 的云。如此得到 209 个云。然后将源以银经  $2^\circ$  为间隔分组, 然后通过肉眼查看 MSX 图像, 从每组中选出一个或者几个有显著消光特征和明确边缘的源。这样选出了 52 个。其中 9 个源的位置取成第一或第二峰的位置, 其余源的位置是云的对比度加权中心。所有坐标来自 Simon 的表。

除了这些, 我们还在第二和第三象限通过肉眼看图选出 9 个源作为补充, 希望藉此了解银河外区 IRDC 的存在与分布的线索。坐标选为估计的消光峰值位置。银河外围区域的 IRDC 认证比较困难, 因为背景辐射更弱, 而 MSX 图像质量相对内区也差些。

表 2-1 列出源名、银道坐标, 以及观测中用的赤道坐标。图 2-1 是样本的银道坐标分布, 银河外区的源未画出。在  $l = 50^\circ$  和  $l = 70^\circ$  之间没有源, 这也是 Simon 源表的一个特征 (见 [Simon et al. \(2006a\)](#) 的图 5)。图 2-2 是本文样本的面积和峰值对比度的分布, 所用数据来自 [Simon et al. \(2006a\)](#)。

Table 2-1. 源名、银道坐标, 以及赤道坐标的列表。

(1)	NAME MSXDC (2)	COORDINATES			
		$l$ (deg) (3)	$b$ (deg) (4)	R. A. (J2000) (5)	DECL. (J2000) (6)
1	G008.21+00.47 <sup>a</sup>	008.211	+0.514	18:02:05	-21:35:52
2	G008.67-00.70	008.677	-0.709	18:07:40	-21:47:27
3	G010.71-00.16	010.710	-0.167	18:09:51	-19:45:00
4	G010.99-00.07	010.994	-0.074	18:10:05	-19:27:23
5	G011.87-00.62 <sup>a</sup>	011.909	-0.622	18:13:59	-18:55:03
6	G012.81+00.36	012.815	+0.368	18:12:09	-17:38:52
7	G013.22-00.07	013.224	-0.079	18:14:37	-17:30:11
8	G013.34+00.17	013.344	+0.180	18:13:55	-17:16:25
9	G013.82-00.48	013.825	-0.483	18:17:19	-17:10:01
10	G013.97-00.43	013.978	-0.437	18:17:27	-17:00:37
11	G014.29-00.66	014.297	-0.666	18:18:55	-16:50:16
12	G014.56-00.78	014.569	-0.785	18:19:54	-16:39:16
13	G014.72-00.88 <sup>b</sup>	014.731	-0.897	18:20:38	-16:33:52
14	G014.97+01.60	014.974	+1.606	18:11:57	-15:09:35
15	G015.80-00.40	015.809	-0.409	18:20:57	-15:23:01
16	G017.09+00.45	017.094	+0.460	18:20:17	-13:50:27
17	G017.98+01.97	017.982	+1.975	18:16:32	-12:20:30
18	G019.27+00.07	019.271	+0.074	18:25:52	-12:05:57
19	G019.92-00.29	019.927	-0.293	18:28:27	-11:41:22
20	G022.35+00.41	022.357	+0.416	18:30:29	-09:12:28
21	G023.42-00.52	023.430	-0.525	18:35:52	-08:41:25
22	G024.49-00.69	024.491	-0.698	18:38:27	-07:49:38
23	G025.04-00.20 <sup>a</sup>	024.974	-0.166	18:37:27	-07:09:14
24	G028.23-00.19	028.235	-0.191	18:43:32	-04:16:00
25	G028.37+00.07 <sup>a</sup>	028.341	+0.058	18:42:51	-04:03:30
26	G028.51+03.60	028.514	+3.609	18:30:31	-02:16:35
27	G028.67+00.13	028.677	+0.132	18:43:12	-03:43:33
28	G031.97+00.07	031.976	+0.071	18:49:26	-00:49:06
29	G034.24-01.25	034.246	-1.252	18:58:17	+00:35:54
30	G034.77-00.55	034.771	-0.557	18:56:47	+01:22:57
31	G034.77-00.55 <sup>a</sup>	034.782	-0.558	18:56:48	+01:23:33
32	G035.19-00.72 <sup>a</sup>	035.201	-0.726	18:58:10	+01:41:17
33	G035.39-00.33 <sup>a</sup>	035.479	-0.303	18:57:10	+02:07:46
34	G036.67-00.11	036.673	-0.120	18:58:42	+03:16:27
35	G038.77+00.78	038.772	+0.789	18:59:18	+05:33:24

Table 2-1 (cont'd)

	NAME MSXDC	COORDINATES			
		$l$ (deg)	$b$ (deg)	R. A. (J2000)	DECL. (J2000)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
36	G038.95-00.47	038.952	-0.475	19:04:09	+05:08:17
37	G050.39-00.41	050.395	-0.414	19:25:36	+15:17:39
38	G076.64-01.13	076.642	-1.133	20:30:18	+37:17:25
39	G076.79+02.59	076.794	+2.596	20:15:07	+39:30:50
40	G077.61+02.10	077.610	+2.102	20:19:37	+39:56:48
41	G077.95+02.59	077.957	+2.598	20:18:30	+40:30:45
42	G078.06-00.67	078.064	-0.677	20:32:42	+38:42:24
43	G078.60+03.92	078.602	+3.922	20:14:33	+41:47:04
44	G078.62-00.93	078.629	-0.932	20:35:29	+39:00:28
45	G079.24+00.52 <sup>a</sup>	079.244	+0.529	20:31:17	+40:22:18
46	G079.28+03.25	079.280	+3.259	20:19:32	+41:58:36
47	G079.58+03.59	079.584	+3.591	20:18:59	+42:24:52
48	G079.60-02.49	079.606	-2.499	20:44:55	+38:49:28
49	G080.00+02.67	080.002	+2.680	20:24:19	+42:14:26
50	G081.52+01.60	081.522	+1.608	20:33:52	+42:50:43
51	G081.69+02.85	081.694	+2.856	20:28:53	+43:43:14
52	G084.81-01.09	084.814	-1.095	20:56:45	+43:44:13
53	G093.14+02.71	093.144	+2.713	21:13:11	+52:28:37
54	G110.97-00.85	110.970	-0.854	23:14:17	+59:44:30
55	G111.04-00.64	111.041	-0.641	23:14:12	+59:58:00
56	G133.28+00.21	133.283	+0.218	02:19:22	+61:18:38
57	G173.38+02.57	173.384	+2.579	05:39:31	+35:55:25
58	G189.97+00.45	189.972	+0.457	06:09:44	+20:23:58
59	G190.12+00.45	190.128	+0.457	06:09:44	+20:23:58
60	G206.30-02.01	206.304	-2.012	06:32:08	+04:58:14
61	G206.91-02.45	206.914	-2.453	06:29:50	+05:06:44

<sup>a</sup>坐标为 IRDC 第一个峰的坐标。

<sup>b</sup>坐标为 IRDC 第二个峰的坐标。

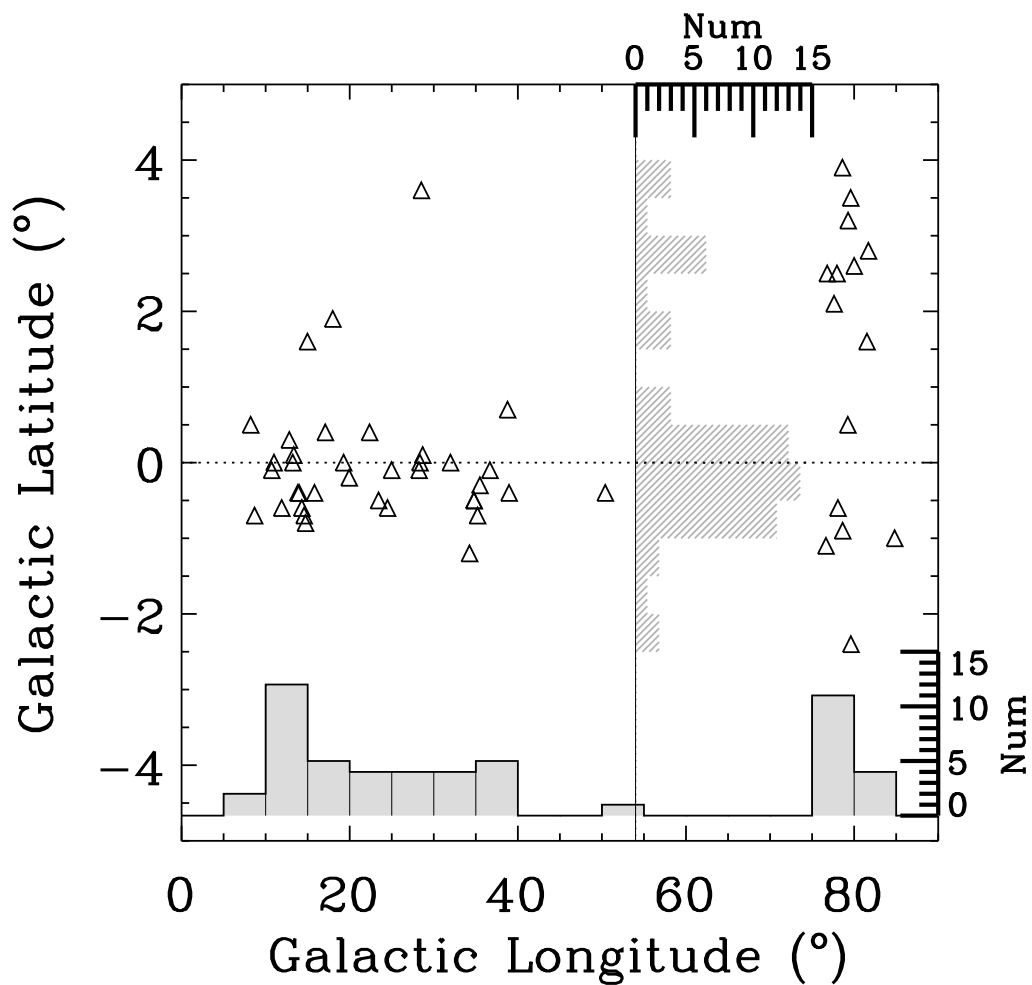


Fig. 2-1.— 样本在银道坐标系中的分布。横向的灰色柱状图是样本的银经的分布，纵向的阴影柱状图是样本的银纬的分布。