

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.03.03

云核质量函数

徐雪芳^{1,2,3}, 李 荫^{1,2}, 任致远^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 射电天文重点实验室, 北京 100012; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 云核质量函数(CMF)是分子云中致密云核的一个基本观测性质, 被用来研究恒星的初始质量函数(IMF)的成因。CMF可以用积分和微分两种形式来表达。样本较小时, 积分形式的CMF拟合出的结果能够清晰地反映出云核的数目; 样本较大时, 微分形式的CMF可以合并数据明确地表述CMF。一般来说, CMF有幂律和正态对数两种函数形式。在湍流存在的情况下, 正态对数函数可以更好地拟合CMF; 幂律形式的CMF谱指数在一定范围内波动, 其大小与天区和样本有关。Salpeter提出恒星的初始质量函数(IMF)是一个幂律函数, 很多研究认为CMF与IMF是相似的。而近期的一些研究工作认为CMF与IMF是不相同的, 这主要有三方面的原因: (1)用一个具体的幂律函数去拟合一个任意的积分函数是不可靠的; (2)只有当 $M \ll M_{\max}$ (或者 $M_{\max} \rightarrow \infty$) 时, 积分形式的CMF可以近似地认为是幂律形式的; (3)采用Monte Carlo方法拟合CMF 能够增加拟合结果的可信度。

关键词: 恒星形成; 云核; 云核质量函数; 恒星初始质量函数

中图分类号: P152 **文献标识码:** A

1 引 言

恒星形成是天体物理中的基本研究方向。恒星形成于分子云的观点在天文界已被广泛接受, 而云核是直接关联分子云和年轻恒星的天体^[1], 云核的形成和演化对理解恒星形成至关重要。

分子云是尘埃和气体中高度结构化的区域^[2]。从观测的角度, Elmegreen 认为分子云的寿命与其动力学时标是可比较的^[3]; 这对分子云的形成机制具有重要意义。在此条件下, Pringle等人认为: 分子云不是通过原子气体冷却形成的, 而是通过致密星际介质团聚(agglomeration)形成的, 并且致密的星际介质多数已经是分子形式^[4]。

收稿日期: 2014-01-16; 修回日期: 2014-03-05

资助项目: 973项目 (2012CB821802); 国家自然科学基金 (11373038); 中国科学院战略性先导科技专项(B类) (XD-B09000000)

通讯作者: 徐雪芳, xfxu@nao.cas.cn

形成分子云的气体主要是分子，这会反过来影响旋涡星系盘中星际介质的性质，进而影响星系的演化^[4]。分子云形成，产生恒星，分子云被破坏、消散，这些过程发生在几个动力学时标内，这会对分子云的形成条件设置严格的限制；同时，反过来又严重影响恒星形成过程本身的初始条件，进而影响恒星的形成率和初始质量函数^[3]。

当弥漫的气体坍缩时，分子云中会形成尺度小但能形成恒星的致密云核。云核是分子云中温度和消光度明显升高的凝聚体(condensation)，并且是由引力束缚的，同时也是在演化序列上处于原恒星之前的天体^[1]。云核可分为三类——无恒星云核(starless core)、星前云核(prestellar core)、原恒星云核(protostellar core)(见图1)，这三类云核随着其演化依次出现。我们认为无恒星云核中是没有任何源的，这里的“源”指的是原恒星、初期恒星体(young stellar object, YSO)、年轻恒星等^[5]。在观测上，这些源可能是红外源、射电源或者偶极外向流^[6]。星前云核是无恒星云核演化的产物^[7]，也不包含任何源，但比无恒星云核更致密；无恒星云核与星前云核在观测上很难区分。原恒星云核中则含有源，并且根据其演化的状态又可分为类型0(class 0)^[8]、类型I(class I)^[9]和类型II(class II)原恒星云核^[10]。

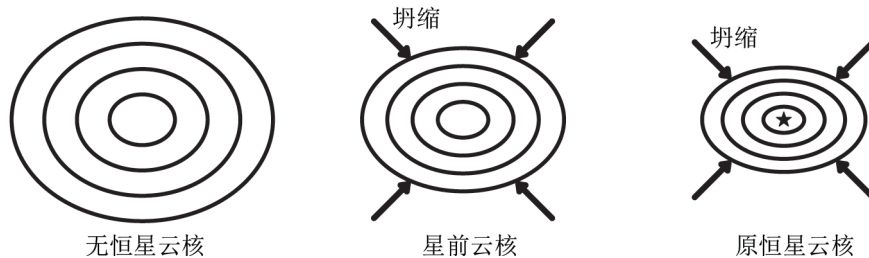


图1 三类云核示意图

目前的云核形成理论主要集中在两种观点：(1)云核是由于弥漫气体的湍动压缩形成的^[11-13]；(2)云核是通过磁场线或双极扩散之间的中性物质的运动形成的^[14-16]。磁场在第一种机制中发挥一些作用，第一种机制对应的是一种动力学的图像^[1]；而磁场却在第二种中发挥主要作用，第二种机制对应的是一种准静态的图像。这两种机制和引力可能在恒星形成的过程中发挥重要作用，但是一种机制是否能在所有情况下占主导地位仍不清楚。此外，理论研究还表明：一些附加的过程，例如辐射反馈^[17]、与会聚流相关的大尺度激波^[18]，能够影响分子云的结构，进而影响云核的形成。

云核的形成是从分子云到恒星的关键一步，云核在恒星形成过程中扮演重要角色。Shu 等人1987年提出一个重要的小质量恒星形成理论：云核坍缩形成原恒星^[19]。大量研究工作也表明，云核是恒星形成的场所^[20]。事实上，分子云中只有很小比例的物质形成云核($<10\%$)^[21]。这意味着较低的恒星形成率，同时也在一定程度上限制了恒星的质量。云核的质量分布可能对恒星的初始质量有着不可忽视的影响，一些研究工作表明云核质量函数(CMF)与恒星的初始质量函数(IMF)相似^[22-24]就是最好的证明。

如果CMF和IMF是相似的，从星际介质到恒星，每个云核中的恒星形成过程(包括坍缩、盘吸积、喷流、外向流)在质量转移效率方面很有可能是相同的^[25]。如果CMF明显

与IMF不同, 环境因素(如竞争吸积)很有可能影响恒星的IMF^[25]。

如果CMF与IMF是相似的, 那么我们认为IMF是从CMF直接演化而来, 云核与云核之间以恒定的恒星形成率演化的。这时对于恒星的早期演化, 尤其是IMF的形成原因这一过程的研究, 将会转移到云核质量来源的研究上。这无论是在观测上, 还是在理论上都会变得更为可行。因此, 研究CMF与IMF是否相似具有非常重要的意义。

云核质量函数, 又称团簇质量分布函数(Clump Mass Function), 是指云核的数量与质量之间的函数关系。无论是“core”, 还是“clump”都是指分子云中致密的, 将要或者已经形成恒星的区域。为方便起见, 本文就统称为云核。研究CMF可以区分不同的云核模型, 帮助理解恒星形成过程^[1], 也可以让我们进一步了解恒星形成的初始条件; 同时, 研究CMF与IMF之间的关系可以帮助我们寻找恒星质量的来源, 也可能帮助我们找到云核和恒星之间的转化率。

本文第2章介绍CMF的相关内容, 包括CMF的形式、谱指数及其拟合与研究的局限; 第3章简单介绍恒星的初始质量函数; 第4章介绍及总结CMF和IMF的联系; 第5章进行总结。

2 CMF

近年来, 对CMF的研究有较大的分歧, 较多的研究者认为CMF是幂律(power law)形式, 也有一些研究者认为CMF是正态对数(log-normal)形式^[26]。在湍流存在的情况下, CMF可以被正态对数函数更好地拟合。如无特别说明, CMF即为幂律形式。

2.1 CMF的形式

CMF按谱指数的个数可分为单幂律谱和双幂律谱形式, 按数学表达式的形式可分为微分和积分形式。微分形式的CMF如图2所示, 式(1)为其表达式; 积分形式的CMF如图3所示, 式(2)为其表达式。其中, N 为云核的数目, M 为云核的质量, α 和 γ 为谱指数, 且 $\gamma = \alpha + 1$ ^[24]。式(2)中的 M_0 是要拟合的云核的质量下限。

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

$$N(M > M_0) \propto M^{-\gamma}. \quad (2)$$

微分和积分形式的CMF各有优势: 当云核的数目足够多, 数据允许分段时, 微分形式的CMF是CMF的一种明确表述, 对这样一个CMF的分析将会直接给出一个幂律指数函数和相对定义明确的统计不确定度^[25]; 对于云核数目小于70的样本, 质量间隔就成为拟合微分形式的CMF的一个重要因素, 这时选择拟合积分形式的CMF比较合适^[27], 但是积分形式的CMF要考虑质量大于一定数值的云核所占的比例, 这从式(2)可以看出。

与微分形式的CMF相比, 积分形式的CMF有着不可替代的优越性。在积分形式的CMF中, 数据点的数目与云核的数目相等, 因而云核的数目可以直接从图中读出, 并且没有信息丢失; 然而, 在微分形式的CMF中, 由于数据合并, 能从图中直接读出的云核数目会大

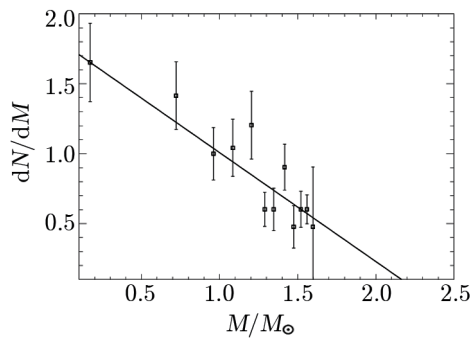


图2 谱指数 $\alpha = -0.85$ 微分形式的CMF曲线
云核样本由蒙特卡洛方法模拟产生, 处理方法与Li等人^[25]的相同。

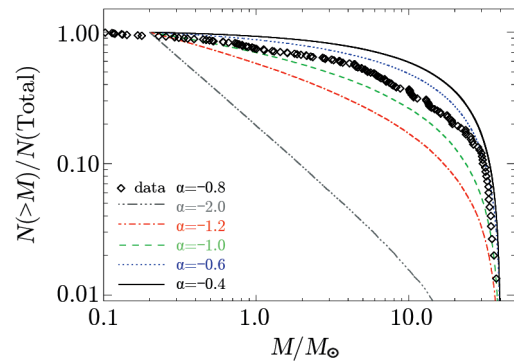


图3 不同谱指数拟合的积分形式的CMF曲线
云核样本由蒙特卡洛方法模拟产生, 处理方法与Li等人^[25]的相同。

大减少, 从图2和图3比较可以看出这点。因此, 对于云核数目较少的样本, 一些研究者支持选用积分形式的CMF来进行拟合; 而对于云核数目足够多的样本, 选用微分或者积分形式的CMF来拟合都可以。

2.2 CMF的谱指数

谱指数 α 是表征CMF性质的重要物理量。一般来说, CMF谱指数绝对值越小, 其积分形式的图像越平坦, 具体表现在小质量端趋于平缓, 而大质量端变得更陡峭。图3给出了不同谱指数下积分形式的CMF曲线, 能更好地说明这一点。

谱指数绝对值较大(对应在小质量端较为陡峭), 常常是由拟合云核的大质量端而造成^[24]。而实际上由于角分辨率或者距离较远, 在大质量端很可能将包含亚结构的天体(如多个云核组成的团簇, 甚至水脉泽和近红外源)认为是同一个云核。而这些没有分辨出的天体尤其是潜在的恒星源的存在, 会对CMF拟合的结果造成很大的影响, 必须小心对待。

与之相对, 在小质量端, 由于观测设备灵敏度的问题, 极小质量的源很可能被忽略。因此, 实际观测到的小质量源应该比拟合出来的源数量要少。然而文献的CMF图中, 几乎所有的拟合曲线, 特别是在云核质量上限较大的图中, 小质量端的云核数目都明显低于实际观测到的云核数目。这一现象也许可以从反面说明, 用一个谱指数来拟合CMF是不合适的, 尤其是对质量范围跨度较大的云核区, 用两个或两个以上的幂律谱拟合会更好。

已有的研究也表明, CMF的谱指数大小除了与云核本身的性质有关以外, 还与样本大小和样本的范围有关。例如, Motte等人2001年对猎户座(Orion)分子云进行的研究, 云核数目是70, 云核质量范围是 $(0.3 \sim 5)M_{\odot}$, 谱指数绝对值是2.1 ($M > 0.8 M_{\odot}$)和1.5 ($M < 0.8 M_{\odot}$)^[28]; 而Johnstone等人2001年对猎户座分子云进行的研究, 云核数目是75, 云核质量范围是 $(0.06 \sim 30.3)M_{\odot}$, 谱指数绝对值是2.5~3 ($M > 1.0 M_{\odot}$)和0.5 ($M < 1.0 M_{\odot}$)^[29]。尽管天区不同, CMF的谱指数 α 的取值却是在一定的范围内波动, 这从表1可以看出。

表1给出了近年来文献中幂律形式的CMF谱指数取值及相关参数, 表2给出了近年来文献中对数正态形式的CMF的相关参数。截至2013年12月, 表1和表2包含了近4年有

确切CMF谱指数的全部文献, 也包含了近15年内引用率较高的经典文献。在ADS的“Abstract Words/Keywords”中分别输入“Cloud Core Mass Function”、“Cloud Clump Mass Function”并选择“and”进行查找, 可以找到表1中大约98%的文献, 其余的文献在输入“Cloud Core Mass Distribution”或者“Cloud Clump Mass Distribution”并选择“and”后可以找到。

表 1 文献中与CMF (幂律形式)相关的参数

文献	天区	波段或谱线	云核数目	云核质量范围	谱指数 α 的绝对值
[22]	Ophiuchus	1.3 mm	59	$0.05M_{\odot} \sim 3M_{\odot}$	$1.5(M < 0.5M_{\odot})$ $2.5(M > 0.5M_{\odot})$
[30]	Ophiuchus	850 μm	55	$0.02M_{\odot} \sim 6.3M_{\odot}$	$1.5(M < 0.6M_{\odot})$ $2 \sim 2.5(M > 0.6M_{\odot})$
[31]	Ophiuchus	1.2 mm	111	—	2.6(大质量端)
[32]	Ophiuchus	1.1 mm	44	$0.24M_{\odot} \sim 3.9M_{\odot}$	$2.1 \pm 0.3(M > 0.5M_{\odot})$
[33]	Ophiuchus	1.2 mm	41	$0.1M_{\odot} \sim 3.2M_{\odot}$	2.3*
[34]	Ophiuchus	850 μm	72	$0.01M_{\odot} \sim 7.4M_{\odot}$	$2.3(M > 0.7M_{\odot})$ 0.3
[35]	Pipe	1.25 μm 1.65 μm 2.2 μm	159	$0.5M_{\odot} \sim 28M_{\odot}$	2.3*
[36]	Pipe	NH ₃	159	$0.2M_{\odot} \sim 20M_{\odot}$	2.3*
[37]	Pipe	C ¹⁸ O(1-0)	134	$0.2M_{\odot} \sim 19.4M_{\odot}$	2.3*
[38]	OMC1 in Orion A	450 μm 850 μm	55	$0.1M_{\odot} \sim 100M_{\odot}$	1.5
[28]	Orion B	850 μm	70	$0.3M_{\odot} \sim 5M_{\odot}$	$1.5(M < 0.8M_{\odot})$ $2.1(M > 0.8M_{\odot})$
[29]	Orion B	850 μm	75	$0.06M_{\odot} \sim 30.3M_{\odot}$	$0.5(M < 1.0M_{\odot})$ $2.5 \sim 3(M > 1.0M_{\odot})$
[39]	Orion B	850 μm	57	$0.37M_{\odot} \sim 90M_{\odot}$	1.5(小质量端) 2.5(大质量端)
[40]	Orion A	850 μm	71	$0.3M_{\odot} \sim 22M_{\odot}$	$3.0 \pm 0.5(M > 3.0M_{\odot})$
[25]	Orion	350 μm	51	$0.1M_{\odot} \sim 44M_{\odot}$	0.85 ± 0.21
[41]	Orion	H ¹³ CO ⁺ (1-0)	236	$2.1M_{\odot} \sim 81M_{\odot}$	0.4 ± 0.1 (小质量端) 2.3 ± 0.1 (大质量端)
[42]	Orion AN Orion AS Orion BN Orion BS	450 μm 850 μm	130 45 73 38	$0.1M_{\odot} \sim 991.4M_{\odot}$ $0.1M_{\odot} \sim 7.0M_{\odot}$ $0.2M_{\odot} \sim 6.9M_{\odot}$ $0.8M_{\odot} \sim 104.5M_{\odot}$	1.35 ± 0.2 (小质量端)
[43]	Orion A	C ¹⁸ O(1-0)	65	—	$2.3 \pm 0.3(M > 5M_{\odot})$
[44]	Orion	250 μm	248	$0.2M_{\odot} \sim 55M_{\odot}$	2.4 ± 0.4 (大质量端)
[45]	Perseus	850 μm	158 39 11	$0.1M_{\odot} \sim 9.9M_{\odot}$ $3.4M_{\odot} \sim 204.9M_{\odot}$ $107.4M_{\odot} \sim 1938.9M_{\odot}$	3.0 $2.5 \sim 3.0$ 2.0
[46]	Perseus	1.1 mm	122	$0.2M_{\odot} \sim 26M_{\odot}$	$1.3(0.5M_{\odot} < M < 2.5M_{\odot})$ $2.6 \pm 0.3(M > 2.5M_{\odot})$
[47]	Perseus	850 μm	85 122	$0.3M_{\odot} \sim 22.6M_{\odot}$ $0.3M_{\odot} \sim 47.8M_{\odot}$	$2.0 \pm 0.1(M \geq 6.5M_{\odot})$ $3.15 \sim 0.08(M \geq 6.5M_{\odot})$
[48]	Aquila	70~500 μm	302	—	2.5 ± 0.2

表1 续表

文献	天区	波段或谱线	云核数目	云核质量范围	谱指数 α 的绝对值
[49]	Aquila	70~500 μm	541	—	$2.45 \pm 0.2 (M > 2.0M_{\odot})$
[23]	Serpens	3 mm	32	—	2.1
[50]	Taurus	$\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$	36	$0.4M_{\odot} \sim 20.1M_{\odot}$	$3.5 (M > 2.5M_{\odot})$
	Perseus		122	$0.25M_{\odot} \sim 25.5M_{\odot}$	2.1 ± 0.3
[21]	Ophiuchus	1.1 mm	44	$0.2M_{\odot} \sim 3.5M_{\odot}$	2.1 ± 0.3
	Serpens		35	$0.16M_{\odot} \sim 15.5M_{\odot}$	1.6 ± 0.2
	Perseus		67	$0.28M_{\odot} \sim 4.74M_{\odot}$	2.14 ± 0.13
[51]	Serpens	1.1 mm	26	$0.16M_{\odot} \sim 3.34M_{\odot}$	2.3 ± 0.3
	Ophiuchus		15	$0.24M_{\odot} \sim 3.08M_{\odot}$	2.4 ± 0.3
	Ophiuchus		97	$0.5M_{\odot} \sim 5M_{\odot}$	1.26 ± 0.20
[52]	Taurus	850 μm	69	$0.3M_{\odot} \sim 3M_{\odot}$	1.22 ± 0.06
	Perseus		97	$1.2M_{\odot} \sim 20M_{\odot}$	0.95 ± 0.2
	Orion		292	$2.0M_{\odot} \sim 32M_{\odot}$	1.67 ± 0.7
[53]	Carina	870 μm	687	$5.2M_{\odot} \sim 4652.2M_{\odot}$	1.95 ± 0.07
[54]	HII region KR 140	450 μm 850 μm	22	$0.5M_{\odot} \sim 130M_{\odot}$	1.49 ± 0.04
[55]	HII region M8	450, 850 μm	37	$0.3M_{\odot} \sim 43M_{\odot}$	1.7 ± 0.6
[56]	HII region RCW 106	1.2 mm	95	$40M_{\odot} \sim 10^4M_{\odot}$	1.6 ± 0.3
[57]	HII region M 17	450 μm 850 μm	101 121	$1.8M_{\odot} \sim 160M_{\odot}$ $0.8M_{\odot} \sim 120M_{\odot}$	2.4 ± 0.3
[58]	HII region Sharpless2-140	$\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$	123	$5.0M_{\odot} \sim 166.6M_{\odot}$	2.1 ± 0.2
[59]	IRAS19410+2336	1.3 mm	12	$1.7M_{\odot} \sim 2.5M_{\odot}$	2.5
[24]	NGC 7538	450 μm 850 μm	67 77	$4M_{\odot} \sim 3000M_{\odot}$ $1.2M_{\odot} \sim 2700M_{\odot}$	2.0 ± 0.3 $(100M_{\odot} \sim 3000M_{\odot})$
[60]	NGC 1333	$\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$	93	$0.05M_{\odot} \sim 2.5M_{\odot}$	2.3*
[27]	NGC 6334	1.2 mm	181	$3M_{\odot} \sim 6 \times 10^3M_{\odot}$	1.6 ± 0.07
[61]	Cloud D (in Galactic Plane)	1.2 mm	29	$0.4M_{\odot} \sim 88M_{\odot}$	$1.45 \sim 1.9$
[62]	GCM-0.02-0.07	$\text{CS}(1-0)$	37	$(0.2 \sim 6) \times 10^3M_{\odot}$	2.6 ± 0.1
[63]	The Region $10^{\circ} < l < 20^{\circ}$ $ b < 1^{\circ}$	870 μm	210	$11M_{\odot} \sim 7.4 \times 10^3M_{\odot}$ $1.1 \times 10^3M_{\odot} \sim 6.2 \times 10^4M_{\odot}$	2.2 (大质量端) 2.6 (大质量端)
[64]	Hi-GAL $l=30^{\circ}$ Hi-GAL $l=59^{\circ}$	70, 160, 250, 350, 500 μm	—	—	2.12 ± 0.18 2.23 ± 0.17
[65]	G29.96-0.02	70, 160, 250, 350, 500 μm	198	$3.8M_{\odot} \sim 5432M_{\odot}$	2.15 ± 0.03 $(M > 300M_{\odot})$

注：— 文献中没有图表和文字表明有相关的数据；

* 文献中有文字说明CMF的谱指数 α 与IMF的相似，而无明确的 α 值。

2.3 CMF的拟合

拟合CMF之前，还有一些准备工作要做——证认云核和云核质量计算。

表 2 文献中与CMF(对数正态形式)相关的参数

文献	天区	波段或谱线	云核数目	云核质量范围	参数 A_0	参数 A_1
[57]	HII region	450 μm	101	$1.8M_{\odot} \sim 160M_{\odot}$	2.5 ± 0.1	1.06 ± 0.07
	M 17	850 μm	121	$0.8M_{\odot} \sim 120M_{\odot}$	2.54 ± 0.07	0.87 ± 0.09
[51]	Perseu					
	Serpens Ophiuchus	1.1 mm	108	—	0.31 ± 0.23	1.0 ± 0.1
[47]	Perseus	850 μm	85	$0.3M_{\odot} \sim 22.6M_{\odot}$	1.4 ± 0.2	1.2 ± 0.1
			122	$0.3M_{\odot} \sim 47.8M_{\odot}$	$1.0 \sim 0.1$	$0.97 \sim 0.08$
[44]	Orion	250 μm	384	$0.2M_{\odot} \sim 55M_{\odot}$	2.2 ± 0.05	0.6 ± 0.05
[64]	Hi-GAL l=30 ⁰	70, 160, 250,	—	—	4.58 ± 0.03	1.57 ± 0.03
	Hi-GAL l=59 ⁰	350, 500 μm	—	—	0.91 ± 0.02	1.43 ± 0.02

注: 对数正态形式的CMF微分公式^[57]为 $\frac{\Delta N}{\Delta M} = \frac{1}{A_1 \sqrt{2\pi} M} \exp\left[-\frac{(\ln M - A_0)^2}{2A_1^2}\right]$;

积分公式^[57]为 $N(> M_0) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\ln M - A_0}{\sqrt{2}A_1}\right)\right]$, 表中的 A_0 、 A_1 是微分公式中的。

基于尘埃连续谱的观测, 证认云核的方法有clumpfind^[66]、高斯结构分析(Gaussian structure analysis)^[67]和系统树图(dendrogram)^[68]。在运用这些证认方法时, 应注意: clumpfind 要求数据块中不能有重叠的区域^[69]; 高斯结构分析则定义明确, 能够得到有确切物理意义的结构^[70]; 而系统树图不能获得有物理意义的结构^[68]。文献中经常用的是clumpfind。clumpfind主要是根据数据的等高线图, 搜寻谱线的最高值, 然后顺着等高线找到强度的最低值^[66]。clumpfind可以对云核的位置和区域进行定位, 根据观测区域的流量大小来区分云核, 又不引入其他关于云核本身参量的假设^[27]。同时, clumpfind可以在寻找云核时读出区域的数密度、半径、峰值流量和总流量。而基于分子气体的观测, 证认云核则根据元素丰度、激发强度等参数, 具有一定的复杂性。

一般来说, 各种云核证认工具都会由于对云核性质的假设而带来一定的误差和缺陷。不过换一个角度来看, 如果对整个区域进行云核证认分析, 可以帮助我们了解恒星形成区域内部的相似性和差异性。然而, 证认分析软件的固有缺陷并不会对后来的分析造成太大的影响。

基于尘埃连续谱观测的文献对云核质量的计算, 不同文章所采用的具体计算公式($M = \frac{FD^2}{\kappa B}$)不一样, 但这些公式都是从1983年Hildebrand的文章^[71]中 $S(\nu) = N(a/D^2)Q(\nu)B(\nu, T)$ 推导而来。公式中的 M 是云核的质量, F 是流量, D 是云核的对地距离, B 是普朗克函数, κ 是不透明度, S 是流量密度, ν 是频率, a 是尘埃的几何截面, N 是尘埃的数目, Q 是吸收系数, T 是尘埃的温度。一般来说, 在估算云核质量时, 需要确定的参量有: 温度、不透明度、云核对地距离和流量, 而对结果影响比较大的参量是尘埃温度和不透明度。为了方便起见, 一般会假设云核内的温度是统一的(即尘埃的温度和气体的温度是一样的); 不透明度则与观测时所采用的波长有关, 因此不同的文章所采用的不透明度会有一些的出入。而基于分子气体观测的文献则根据元素的丰度、激发强度等得到云核质量, 具有一定的复杂性。

云核质量的计算完成之后,一般都先给出云核质量分布的图表,然后确定云核质量的上下限,之后对CMF进行拟合。拟合结果出来之后,对CMF进行分析。比较常见的一种分析方法是:分析并非从数据本身对CMF进行,而是将CMF和Salpeter于1955年提出的统一的IMF联系起来考虑。通过比较CMF与IMF在图形上(如形状、峰值、折点等)与谱指数 α 的差异,并参考相关理论模型,得出与CMF的形成原因或者IMF的起源相关的结论。

2.4 CMF研究的局限

就CMF本身而言,还存在着许多理论和观测上的问题。

目前,对CMF的普遍性还有很大的争议。CMF具有普遍性的前提是:所有的恒星形成区是一样的,并且在形成恒星时经历相同的过程。然而,最近的观测和数值模拟研究已经开始对这个假设提出疑义。例如,在研究湍流对CMF的影响中,Hennebelle和Chabrier发现恒星形成应该主要出现在分子云中某处,其密度是Larson定义的^[11]5倍;因而,他们认为选择不同的分子云参数会出现不同的CMF^[72, 73]。

另一方面,引力和热碎裂(gravitational and thermal fragmentation)^[74-76]、超音速湍流^[77-79]、吸积^[80-82]、云核并合^[83, 84]、反馈^[85]和磁场^[86]这些物理过程能够改变CMF。例如:Bailey与Basu认为CMF的形状直接取决于分子云的物理状态,具体来说就是磁场使CMF变宽,并且在大质量端出现尾巴(high-mass tail),而双极扩散将会截断大质量端的尾巴^[87]。其次,在计算质量的过程中,对整个云核区采用了统一的温度和不透明度,这是为了计算方便而做的假设。然而,事实上云核内部和边缘的温度及消光肯定有差异,当这种差异非常大时,就有可能使得到的质量与实际质量存在较大的误差。再者,不同类型的分子云之间能否转化,尤其是大、小质量的分子云之间是否在恒星形成之前能够转化,也是需要关心的问题。所以,CMF的形式是否合理,是否会因自身理论带来误差,还需要更深入的研究才可能解决。

从观测上来讲,主要的限制是分辨率。小质量端可能由于观测的不完整而出现云核数目整体下移;大质量端则可能由于分辨率不够,使得成团云核或者其他非云核物质(如脉泽)被认为是一个独立的云核。后者的质量可达上千个 M_{\odot} ,这样会给计算出来的质量造成巨大影响,还极有可能因为干扰源本身的性质严重影响观测到的谱线。这种观测上的不足会使拟合出的CMF谱指数绝对值比实际的谱指数绝对值小,表现在图上CMF曲线则显得比实际更为平坦。

3 IMF

近年来,与CMF相关的研究有很多。而提到CMF,就会将其与恒星的初始质量函数联系起来。

Salpeter于1955年通过对太阳系附近恒星光度的观测,并假设恒星的质量与云核的质量成固定的正比关系,发现恒星的数目与质量之间存在一定的关系^[88]: $f(M)dM \propto \xi(\lg M)d \lg M \propto M^{-\beta}dM \propto M^{-2.35}dM$, $0.4 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$ 。这一关系被称为恒星的初

始质量函数, 这也是最初量化的恒星的IMF。Miller和Scalo于1979年, Scalo于1986年又重新证实了IMF。随着技术的发展, 观测数据越来越精确, IMF 的形式被进一步研究和发展, Kroupa于2002年建立起一个包含三部分的分段函数^[89]:

$$dN \propto M^{-\beta} dM \begin{cases} \beta = 2.3, M \geq 0.5 M_{\odot} \\ \beta = 1.33, 0.08 M_{\odot} \leq M \leq 0.5 M_{\odot} \\ \beta = 0.3, M \leq 0.08 M_{\odot} \end{cases} . \quad (3)$$

从IMF的形状来看, 小质量端斜率偏平坦, 大质量端恒星的数目却急剧下降, 这可能暗示着大质量恒星与小质量恒星的形成机制不同。在IMF 的形式被反复验证之后, 研究的重心逐渐转移到IMF的来源上, 主要是因为这涉及到恒星质量的来源问题; 但是, 这个问题至今仍未解决。

4 CMF与IMF的联系

Motte等人1998年利用IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique)的30 m 望远镜对蛇夫座(Ophiuchus)分子云进行了1.3 mm 连续谱的大范围观测, 第一次发现团簇的质量分布和Salpeter 的IMF惊人地相似^[22]。Testi和Sergent于1998年利用OVRO (Owens Valley Radio Observatory) 对Serpens云核区进行3 mm 连续谱的观测, 所得结果证实了Motte 等人的结论^[23]。

近年来, 很多的研究工作^[28, 30, 39, 40, 56]也表明CMF 和IMF是相似的。但是, 也有一些研究工作提出了不同的观点(即CMF和IMF是不相同的)。例如, Li等人利用CSO (the Caltech Submillimeter Observatory) 的10.4 m 望远镜对猎户座分子云进行了350 μm 连续谱观测, 发现CMF明显比IMF平坦, CMF与IMF是不相同的^[25]; Muñoz等人利用SIMBA (SEST IMaging Array)对恒星形成区NGC 6334 进行了1.2 mm 的尘埃连续谱观测, 研究发现CMF的斜率明显地与IMF 不同^[27]。

Li等人^[25]发现猎户座的云核与小质量恒星形成区的云核相比, 质量要高一个量级。并且, 很多云核不是热平衡的, 很可能是由剧烈的湍动支撑或者正在发生坍塌。而在对CMF拟合时, 他们考虑到了用一个具体的幂律函数拟合一个任意的积分函数是不可靠的, 而在对CMF进行拟合时, 这又是不可避免的。从图3可以看出: 当幂律函数的指数绝对值接近1时, 其积分形式不再是幂律形式的, 而是对数形式的, 这时函数曲线出现较大的曲率。单纯从数学的角度来看, 幂律函数的曲线中出现较大的曲率与指数的取值有很大的关系。然而, 如果把CMF中存在较大的曲率这种现象理解为应该用两个谱指数对CMF进行拟合, 很可能因对大质量的云核和小质量的云核区分对待这一先入为主的观点而出现模糊甚至错误的理解; 从这个意义上来说, CMF 与IMF是不相同的。

为了增加拟合结果的可信度, Li等人^[25]采用了蒙特卡洛近似(Monte Carlo approach) 方法。蒙特卡洛近似方法的具体做法是: 先随机产生一个云核样本, 之后再比较随机样本产

生的数量分布 $C(M_i)$ 与初始数据的数量分布 $C_0(M_i)$ 之间的方差 χ^2 ；当方差 χ^2 最小时，谱指数 α 被拟合；最后用Bootstrap的统计方法去计算谱指数的方差^[90]。然而，当云核的数量很少时，蒙特卡洛近似方法并不完全具有数学意义。公式(4)^[90]为方差 χ^2 的表达式，其中 $C(M_i)$ 指的是归一化的数量分布，即质量不大于 M_i 的云核数目与云核总数的归一化比值， n 是指初始数据云核总数。

$$\chi^2 = \sum_n^{i-1} \frac{[C(M_i) - C_0(M_i)]^2}{[C_0(M_i)]^2} \quad (4)$$

另一方面，Muñoz等人^[27]研究恒星形成区NGC 6334的云核时，注意到云核的质量分布于3个量级($3M_\odot \sim 6 \times 10^3 M_\odot$)内。因而，他们在对CMF进行拟合时顾及到：如果云核的质量分布有质量上限，那么积分形式的CMF就不再是幂律形式的，并且在大质量端会显示相当大的曲率；只有当 $M \ll M_{\max}$ (或者 $M_{\max} \rightarrow \infty$)时，积分形式的CMF可以近似地被认为是幂律形式。当云核的质量分布有质量上限^[27]时， $N(> M_0) = C_1 M^\gamma + C_2$ ，而 C_2 对小质量端是不重要的^[91]。因此，幂律形式的CMF在小质量端接近于真实的CMF。而在拟合CMF时，必须在一定的质量范围内用幂律函数去拟合CMF，以避免小质量端的不完备性和大质量端的质量截断(cut off)。当在 $M > M_{\max}/2$ 范围内用幂律函数去拟合积分形式的CMF时，CMF的斜率总是会变大，并且斜率非常依赖拟合积分形式CMF大质量端时所选择的拐点，也不能反映微分形式的CMF。而在这时，过去的很多研究会解释为CMF与IMF的斜率是相似的。从这一方面来说，CMF与IMF也是不同的。

当CMF与IMF进行比较时，CMF的谱指数绝对值明显小于IMF的谱指数绝对值。谱指数绝对值较小体现在较为平坦的CMF曲线上，同时也意味着从云核到恒星的转化不是以一定形成率进行的，这其中有着复杂的过程。CMF与IMF之间的联系到底是因为什么而形成的，存在许多不同的观点。不过，所有的理论都有一个共同之处，就是都将CMF与湍流联系在一起。

5 总 结

CMF可能与很多因素有关。如，云核质量的准确计算、云核质量的上限和下限、云核周边环境(磁场、外流等)、云核的演化状态(包含YSO与不包含YSO)、云核可能发生的物理过程(如碎裂和并合)等。因此，研究CMF需要更多的云核信息，而获得更多的云核信息需要更精确的观测。通过上面的论述，我们可以得出以下结论：

(1)对于云核数目较少的样本，选用积分形式的CMF来进行拟合比较好；而对于云核数目足够多的样本，选用微分或者积分形式的CMF来拟合都可以。

(2)不同区域的CMF有着不同的 α 值，但是从表1可以看出 α 在一定的范围内取值。这说明恒星形成不是一个简单的动力学过程，可能受到初始条件和外部环境的影响。

(3)CMF谱指数 α 的大小与样本的范围有关。从表1可以看出，即使是对同一天区进行研究，CMF谱指数 α 的大小也会随着样本范围而变化。

(4)较大曲率的出现与谱指数的取值有很大的关系。从图3可以看出,当幂律函数的指数绝对值接近1时,其积分形式不再是幂律形式的,而是对数形式的,这时函数曲线出现较大的曲率。单纯从数学的角度来看,幂律函数的曲线出现较大的曲率与指数的取值有很大的关系。然而,如果把CMF中存在较大的曲率这种现象理解为应该用两个谱指数对CMF进行拟合,很可能因对大质量的云核和小质量的云核区分对待这一先入为主的观点而出现模糊甚至错误的理解。

(5)CMF与IMF的相似性目前还有很大的争议。很多研究认为CMF与IMF是相似的,也有一些研究提出了不同的观点。例如,Li等人考虑到用一个具体的幂律函数去拟合一个任意的积分函数是不可靠的,而在对CMF进行拟合时,用一个具体的幂律函数拟合一个任意的积分函数又是不可避免的,其研究表明CMF与IMF是不相同的;Muñoz等人则认为,如果云核的质量分布有质量上限,那么积分形式的CMF就不再是幂律形式的,并且在高质量端会显示相当大的曲率,只有当 $M \ll M_{\max}$ (或者 $M_{\max} \rightarrow \infty$)时,积分形式的CMF可以近似地被认为是幂律形式的,其研究也表明CMF与IMF是不相同的。未来需要通过提高观测灵敏度及分辨率对这一问题进行更为细致的研究。

(6)理论和观测手段上的局限会对拟合出来的CMF有明显的影响。理论上,CMF具有普遍性的假设,一些物理过程(湍流、吸积、云核并合、磁场等)及云核质量的计算都能影响CMF;观测上,主要的限制是分辨率,观测精度的限制使我们不能够探测到小质量云核和区分大质量的云核簇,以及是否存在原恒星,这些都会对结果有显著影响。

参考文献:

- [1] Ward-Thompson D, André P, Crutcher R, et al. *Protostars and Planets V*, Tucson: University of Arizona Press, 2007: 33
- [2] Sadavoy S I, Francesco J Di, André P, et al. *A&A*, 2012, 540: 10
- [3] Elmegreen Bruce G. *ApJ*, 2000, 530: 277
- [4] Pringle J E, Allen Ronald J, Lubow S H. *MNRAS*, 2001, 327: 663
- [5] Beichman C A, Myers P C, Emerson J P, et al. *ApJ*, 1986, 307: 337
- [6] André P, Ward-Thompson D, Barsony M. *ApJ*, 1993, 406: 122
- [7] Ward-Thompson D, Sott P F, Hills R E, et al. *MNRAS*, 1994, 268: 276
- [8] André P, Ward-Thompson D, Barsony M. *Protostars and Planets IV*, Tucson: University of Arizona Press, 2000: 59
- [9] Wilking B A, Lada C J, Young E T. *ApJ*, 1989, 340: 823
- [10] Lada C J. *IAUS*, 1987, 115: 1
- [11] Larson R B. *MNRAS*, 1981, 194: 809
- [12] Mac Low M -M, Klessen R S. *RvMP*, 2004, 76: 125
- [13] Dib S, Walcher C J, Heyer M, et al. *MNRAS*, 2009, 398: 1201
- [14] Mestel L, Spitzer Jr L. *MNRAS*, 1956, 116: 503
- [15] Mouschovias T C. *ApJ*, 1976, 206: 753
- [16] Kunz M W, Mouschovias T C. *MNRAS*, 2009, 399: L94
- [17] Krumholz M R, Cunningham A J, Klein R I, et al. *ApJ*, 2010, 713: 1120
- [18] Heitsch F, Naab T, Walch S. *MNRAS*, 2011, 415: 271

-
- [19] Shu F H, Adams F C, Lizano S. *ARA&A*, 1987, 25: 23
- [20] France J D, Evans N J II, Caselli P, et al. *Protostars and Planets V*, Tucson: University of Arizona Press, 2007: 17
- [21] Enoch M L, Glenn J, Evans N J II, et al. *ApJ*, 2007, 666: 982
- [22] Motte F, André P, Neri R. *A&A*, 1998, 336: 150
- [23] Testi L, Sargent A I. *ApJ*, 1998, 508: 91
- [24] Reid M A, Wilson C D. *ApJ*, 2005, 625: 891
- [25] Li D, Velusamy T, Goldsmith P F, et al. *ApJ*, 2007, 655: 351
- [26] Reid M A, Wilson C D. *ApJ*, 2006, 650: 970
- [27] Muñoz D J, Mardones D, Garay G, et al. *ApJ*, 2007, 668: 906
- [28] Motte F, André P, Ward-Thompson D, et al. *A&A*, 2001, 372: 41
- [29] Johnstone D, Fich M, Mitchell G F, et al. *ApJ*, 2001, 559: 307
- [30] Johnstone D, Wilson C D, Moriarty-Schieven G, et al. *ApJ*, 2000, 545: 327
- [31] Stanke T, Smith M D, Gredel R, et al. *A&A*, 2006, 447: 609
- [32] Young K E, Enoch M L, Evans N J II, et al. *ApJ*, 2006, 644: 326
- [33] André P, Belloche A, Motte F, et al. *A&A*, 2007, 472: 519
- [34] Simposon R J, Nutter D, Ward-Thompson D. *MNRAS*, 2008, 391: 205
- [35] Alves J, Lombardi M, Lada C J. *A&A*, 2007, 462: 17
- [36] Lada C J, Muench A A, Rathborne J M, et al. *ApJ*, 2008, 672: 410
- [37] Rathborne J M, Lada C J, Muench A A, et al. *ApJ*, 2009, 699: 742
- [38] Coppin K E K, Greaves J S, Jenness T, et al. *A&A*, 2000, 356: 1031
- [39] Johnstone D, Matthews H, Mitchell G F. *ApJ*, 2006, 639: 259
- [40] Johnstone D, Bally J. *ApJ*, 2006, 653: 383
- [41] Ikeda N, Sunada K, Kitamura Y. *ApJ*, 2007, 665: 1194
- [42] Nutter D, Ward-Thompson D. *MNRAS*, 2007, 374: 1413
- [43] Ikeda N, Kitamura Y. *ApJ*, 2009, 705: 95
- [44] Polychroni D, Schisano E, Elia D, et al. *ApJ*, 2013, 777: 33
- [45] Kirk H, Johnstone D, Francesco J D. *ApJ*, 2006, 646: 1009
- [46] Enoch M L, Young K E, Glenn J, et al. *ApJ*, 2006, 638: 293
- [47] Curtis E I, Richer J S. *MNRAS*, 2010, 402: 603
- [48] André P, Men'shchikov A, Bontemps S, et al. *A&A*, 2010, 518: 102
- [49] Könyves V, André P, Men'shchikov A, et al. *A&A*, 2010, 518: 106
- [50] Onishi T, Mizuno A, Kawamura A, et al. *ApJ*, 2002, 575: 950
- [51] Enoch M L, Evans N J II, Sargent A I, et al. *ApJ*, 2008, 684: 1240
- [52] Sadavoy S I, Francesco J D, Bontemps S, et al. *ApJ*, 2010, 710: 1247
- [53] Pekkruhl S, Preibisch T, Schuller F, et al. *A&A*, 2013, 550: 29
- [54] Kerton C R, Martin P G, Johnstone D, et al. *ApJ*, 2001, 552: 601
- [55] Tothill N F H, White G J, Matthews H E, et al. *ApJ*, 2002, 580: 285
- [56] Mookerjee B, Kramer C, Nielbock M, et al. *A&A*, 2004, 426: 119
- [57] Reid M A, Wilson C D. *ApJ*, 2006, 644: 990
- [58] Ikeda N, Kitamura Y. *ApJ*, 2011, 732: 101
- [59] Beuther H, Schilker P. *Science*, 2004, 303: 116
- [60] Walsh A J, Myera P C, Francesco J D, et al. *ApJ*, 2007, 655: 958
- [61] Massi F, De Luca M, Giannini T, et al. *A&A*, 2007, 466: 1013
- [62] Tsuboi M, Miyazaki A. *PASJ*, 2012, 64: 111
- [63] Tackenberg J, Beuther H, Henning T, et al. *A&A*, 2012, 540: 113
- [64] Olmi L, Anglés-Alcázar D, Elia D, et al. *A&A*, 2013, 551: 111
- [65] Beltrán M T, Olmi L, Cesaroni R, et al. *A&A*, 2013, 552: 123
- [66] Williams J P, de Geus E J, Blitz L. *ApJ*, 1994, 428: 693

- [67] Stutzki J, Güsten R. *ApJ*, 1990, 356: 513
- [68] Rosolowsky E, Pineda J, Kauffmann J, et al. *ApJ*, 2008, 679: 1138
- [69] Pineda J E, Caselli P, Goodman A A. *ApJ*, 2008, 679: 481
- [70] Kramer C, Stutzki J, Rohrig R, Corneliussen U. *A&A*, 1998, 329: 249
- [71] Hildebrand R H. *QJRAS*, 1983, 121: 161
- [72] Hennebelle P, Chabrier G. *ApJ*, 2008, 684: 395
- [73] Hennebelle P, Chabrier G. *ApJ*, 2009, 702: 1428
- [74] Larson R B. *MNRAS*, 1985, 214: 379
- [75] Klessen R S. *ApJ*, 2001, 556: 837
- [76] Li Y, Klessen R S, Mac Low M -M. *ApJ*, 2003, 592: 975
- [77] Padoan P, Nordlund A, Jones B J T. *MNRAS*, 1997, 288: 145
- [78] Padoan P, Nordlund Å. *MNRAS*, 2002, 576: 870
- [79] Ballesteros-Paredes J, Gazol A, Kim J, et al. *ApJ*, 2006, 637: 384
- [80] Larson R B. *MNRAS*, 1992, 256: 641
- [81] Bonnell I A, Clarke C J, Bate M R, et al. *MNRAS*, 2001, 324: 573
- [82] Bate M R, Bonnell I A. *MNRAS*, 2005, 356: 1201
- [83] Murray S D, Lin D N C. *ApJ*, 1996, 467: 728
- [84] Dib S, Galván-Madrid R, Kim J, et al. *Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*. French: the French Society of Astronomy and Astrophysics, 2008: 309
- [85] Adams F C, Fatuzzo M. *ApJ*, 1996, 464: 256
- [86] Shu F H, Li Z -Y, Allen A. *ApJ*, 2004, 601: 930
- [87] Bailey N D, Basu S. *ApJ*, 2013, 766: 27
- [88] Salpeter E E. *ApJ*, 1995, 428: 693
- [89] Kroupa P. *Science*, 2002, 295: 82
- [90] Qian L, Li D, Goldsmith P F. *ApJ*, 2012, 760: 147
- [91] Rosolowsky E. *PASP*, 2005, 117: 1403

The Core Mass Function

XU Xue-fang^{1,2,3}, LI Di^{1,2}, REN Zhi-yuan^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Star formation is a fundamental field in astrophysics, within which the core mass function (CMF) of molecular clouds is a hot topic. Different models of molecular core evolution predicted different CMFs. Comparing CMF with stellar initial mass function (IMF) would help reveal the origin of stellar mass and the conversion rate between cloud cores and stars.

In this review, we describe two expressions of CMFs, namely, differential CMF and cumulative CMF. When the sample size is small, cumulative CMF can clearly reflect the number of cloud cores. When the sample size is big, differential CMF is a straightforward

representation based on binning the data. We research and read most of the highly cited papers published before 2013 that are related with CMF. Based on these studies, we found that two function forms of CMF, namely, power law CMF and log-normal CMF, are widely used. Fitting a log-normal function to CMF produces a better result for cores under the influence of turbulence. The CMF power law index fluctuates in a fixed interval and varies from region to region. The stellar IMF is generally thought to follow a power law function. Many research work indicate that CMF resembles IMF. However, some recent researches conclude that CMF tends to be different from IMF. The conclusion is based on that (1) fitting a power-law directly to an arbitrary cumulative function is unreliable, (2) cumulative CMF can be approximated by a power-law only at $M \ll M_{\max}$ (or $M_{\max} \rightarrow \infty$), (3) with fitting CMF Monte Carlo approach gets a flatter index than β .

Key words: star formation; core; core mass function; stellar initial mass function