

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.02.01

大质量恒星形成：外向流和绿色延展天体

张 昶^{1,2}, 李金增¹, 袁敬华¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 恒星作为宇宙的基础组成元素, 其形成过程一直是天文学中的重要研究对象。人们已基本了解中小质量恒星 (质量小于 $8M_{\odot}$) 的形成和演化过程; 受到数量少、嵌埋深、演化快和反馈剧烈等因素的影响, 大质量恒星 (质量大于 $8M_{\odot}$) 的形成过程依然谜团重重。介绍了小质量恒星形成的基本理论, 以及吸积盘、竞争吸积、并合三种主流的大质量恒星形成模型; 回顾了以往使用红外或射电望远镜对大质量恒星形成区的观测和分析, 以及现阶段使用多波段巡天观测手段对大质量恒星形成区的研究成果; 着重介绍了目前公认的大质量恒星形成的示踪物——分子外向流的理论和观测现状, 以及大质量外向流的优秀候选体——绿色延展天体的发现、理论及观测研究情况。最后, 对大质量恒星形成的理论和观测研究进行了总结和展望。

关 键 词: 恒星形成; 大质量恒星; 分子外向流; 绿色延展天体

中图分类号: P155.2

文献标识码: A

1 引 言

通常, 天文学家把质量小于 $3M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ 为太阳质量) 的恒星称为小质量恒星, 质量为 $3M_{\odot} \sim 8M_{\odot}$ 的恒星称为中等质量恒星, 质量大于 $8M_{\odot}$ 的恒星称为大质量恒星。不同质量的恒星有着不同的形成和演化过程。

20 世纪 60 年代, 天文学家在星际空间发现了分子云气体和嵌埋在其中正在形成阶段的原恒星 (protostar) 之后, 恒星形成的过程才初步被人们所了解: 对恒星形成的一个最基本看法是, 恒星是由足够大的气体云在其自身引力作用下坍缩而成。在不考虑磁场和湍动时, 分子云由自身引力引发坍缩的判据 (即金斯判据) 是, 分子云质量 M 必须大于金斯质量 M_J 。由能量平衡条件可求得:

$$M_J = (\pi k T / \mu m_H G)^{3/2} \rho^{-1/2} = 18 M_{\odot} T^{3/2} n^{-1/2}, \quad (1)$$

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-08-06

资助项目: 国家自然科学基金 (11503035, 11573036); 科技部国际重大合作项目 (2010DFA02710)

通讯作者: 张昶, zhangc@nao.cas.cn

其中, ρ 是分子云的质量密度, T 是温度, G 是引力常数, $\mu=1.36$ 是分子云的平均原子权重, m_{H} 是氢原子质量, n 是粒子的数密度。由观测得知, 只有分子云才有可能满足金斯条件, 而原子云不能形成恒星。另一方面, 自引力支配所要求的最小柱密度与 CO 和 H_2 等分子屏蔽紫外辐射, 使分子云免遭破坏所要求的柱密度大致相等, 这也表明恒星形成于分子云中^[1]。

经过半个多世纪的观测研究, 天文学家对恒星形成过程已经有了很深入的了解, 其中对于中小质量恒星形成过程更是如此。但是, 大质量恒星形成过程始终不为天文学家所了解, 其演化快、嵌埋深、反馈剧烈等一系列问题阻碍着天文学家对其形成过程的进一步研究。如今, 已经有多种关于大质量恒星形成的理论模型被提出, 但是没有哪一种理论模型可以很好地与观测现象相符合, 因此, 要想研究大质量恒星的形成过程, 就必须通过特殊的观测手段, 找到大质量恒星形成早期阶段的候选体。

因分子外向流普遍存在于恒星形成的大部分阶段, 且根据外向流的形貌和成分组成, 我们可以揭示中心原恒星的性质, 所以分子外向流自然成为了恒星形成领域热门的研究对象。经过对分子外向流近 40 年的观测和理论研究, 人们发现, 通过研究分子外向流, 可以揭示中心星的部分性质。此外, 分子外向流还在不同尺度上影响着恒星的形成, 甚至是整个巨分子云的热能和湍动的来源。可以说, 分子外向流对于恒星形成既有促进作用, 也有抑制作用。

近十几年来, 随着红外空间望远镜巡天项目的发展, 天文学家通过分析红外巡天数据取得了丰硕的成果, 其中最引人注目的成果之一便是发现了在大质量恒星的早期形成阶段分子外向流的优秀候选体——绿色延展天体 (extended green object, EGO)。对已经证认出的 300 余个 EGO 进行多波段观测后发现, 大部分 EGO 与大质量恒星形成活动有很强的相关性, 这无疑在很大程度上丰富了大质量恒星形成的研究手段。目前, 大质量恒星形成已经成为天文学研究的热门课题。

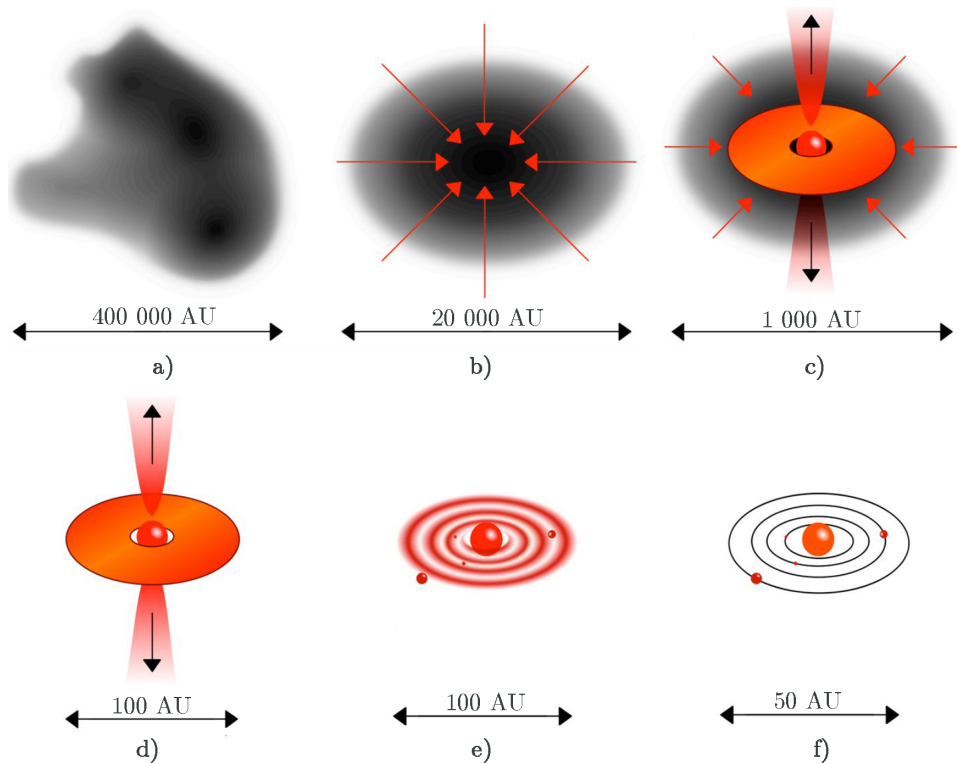
2 恒星形成的基本理论

2.1 小质量恒星

一般来说, 天文学家把质量小于 $8M_{\odot}$ 的恒星统称为小/中质量恒星, 因为这类恒星形成的过程较为相似。自从 20 世纪 60 年代射电望远镜被大规模用于天文观测以来, 天文学家在星际空间首次发现了分子气体和分子云的存在^[2-4]。这项被称为 20 世纪天文学四大发现之一的重大成果使人们在很大程度上提高了对恒星形成的认知。

根据现有理论, 恒星形成于星际的分子云中, 且这种冷暗的分子云通常只有 10 K 左右的温度, 其空间尺度可以达到几秒差距至几百秒差距, 总质量高达几十至上千倍太阳质量。小质量恒星通常不会单独形成, 分子云受到扰动时会碎裂成与其金斯质量相当的小云核, 小质量恒星便在小云核中形成。小质量恒星在各形成阶段的典型尺度如图 1 所示。

现在, 天文学家对小质量恒星的形成过程已经较为了解。Shu 等人^[6]将小质量恒星的形



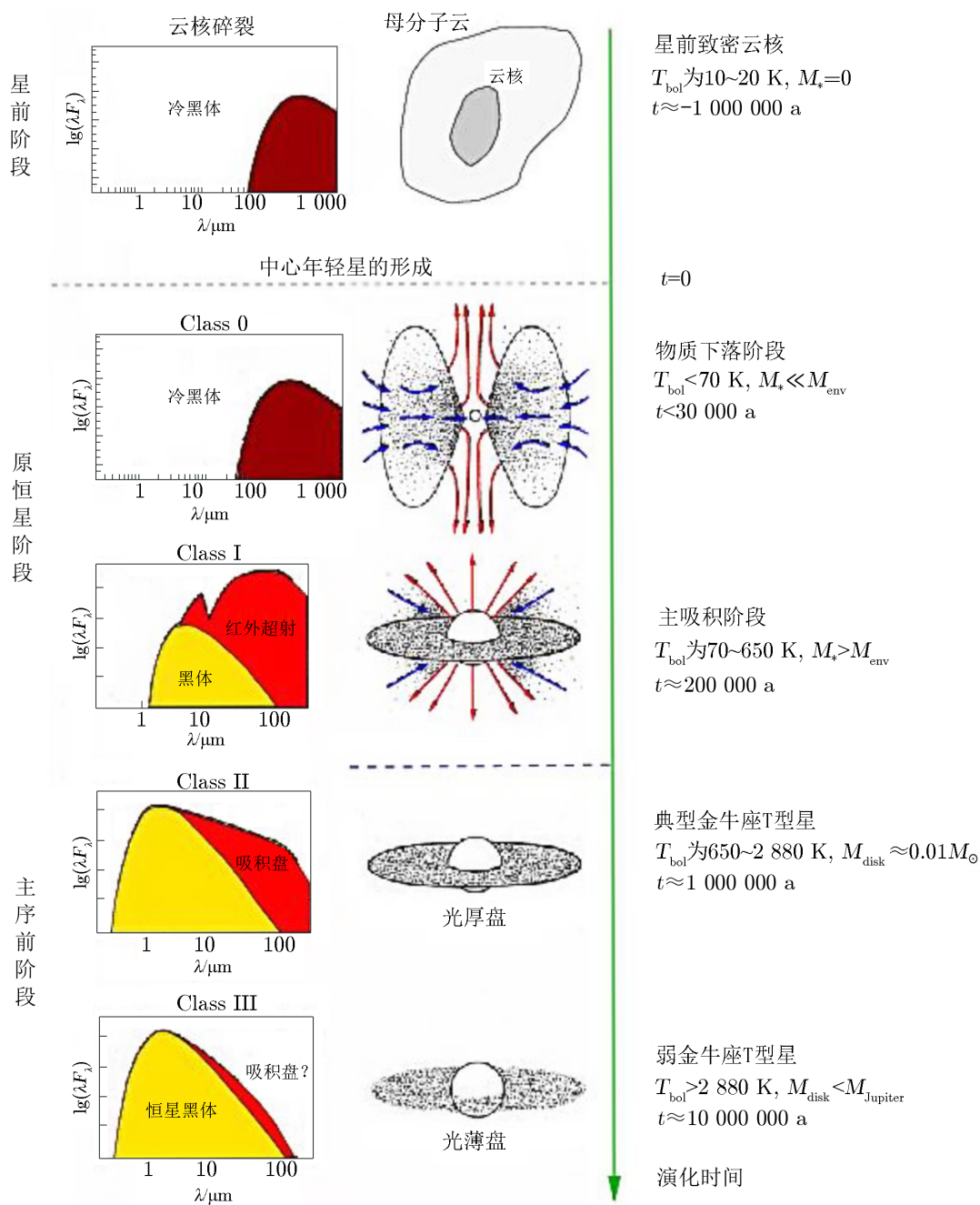
注: a) 母分子云; b) 碎裂后的云核; c) 早期原恒星、吸积盘和向外流; d) 晚期原恒星、吸积盘和向外流; e) 带有残存物质的行星盘; f) 恒星系统。其中红色箭头表示物质下落方向。

图 1 小质量恒星在各形成阶段的尺度^[5]

成过程划分成四个主要的阶段。基于上述理论模型, Lada^[7] 根据能谱分布把早期阶段的年轻星分成三种类型: Class I, Class II 和 Class III, 并根据这三类年轻星的演化情况构建了小质量恒星形成的时间演化序列。后来, Andre 等人^[8] 又在此基础上观测证实了处于更早期的恒星演化类型——Class 0。Bachiller^[9] 对这四个阶段对应的能谱分布 (spectral energy distribution, SED) 进行了总结归纳(如图 2 所示), 得出了现在较为公认的小质量恒星的形成过程。

(1) 分子云/分子云核阶段: 星际空间中的冷暗分子云最初处于压力平衡状态, 即内部热压与自引力基本平衡的状态。此时的分子云会缓慢地旋转和收缩, 分子云内温度上升。当分子云内热压不足以对抗自身引力, 即分子云质量大于金斯质量时, 分子云会碎裂成金斯质量大小的分子云核。由于角动量守恒, 此时的分子云核会以更快的速度旋转。

(2) 引力坍缩阶段: 当分子云核内热压无法抵抗自身的引力时, 云核便开始向内坍缩。由于云核外层气体的角动量较大, 中心区域的角动量较小, 根据角动量守恒定律, 外层气体不会马上落入中心区域, 而是围绕中心区域旋转, 形成一个旋转的偏平吸积盘 (accretion disk) (典型小质量恒星的吸积盘的尺度约为几十到上百个天文单位); 靠近中心区域的气体



注: T_{bol} 表示云核中心温度, M_* 表示中心星质量, M_{disk} 表示吸积盘质量, M_{env} 表示云核包层质量, M_{Jupiter} 表示木星质量, λ 表示波长, F_λ 表示流量, t 为演化时间。

图 2 小质量恒星形成过程及其各阶段对应的能谱分布^[9]

会直接落入引力势阱中, 并在中心区域形成原恒星。

(3) 物质吸积阶段: 云核中的大部分物质不会马上落入中心的原恒星, 而是聚集在旋转的吸积盘上。中心的原恒星通过从其两极区域产生的高准直性喷流 (jet) / 分子外向流 (outflow) 释放气体的多余角动量, 使吸积盘中的物质得以下落到原恒星上, 从而使原恒星质量持续增加。

(4) 物质驱散阶段: 随着吸积盘中的物质不断落入中心星中, 原恒星内部的热压和光压不断增大, 导致吸积率下降, 外向流张角变大。当原恒星的质量达到点燃热核反应的要求时, 中心原恒星的质量不再有实质性的增长, 而是开始准静态收缩, 并且表面出现对流层。此时中心星进入零龄主序阶段。因中心星的辐射和星风的影响, 吸积盘中残留的物质不会继续下落到中心星上, 而是部分形成行星系统, 部分被驱散。

上述这四个理论预言的阶段已经得到了实际观测的证实。天文学家利用从光学到红外, 再到毫米射电波段的观测设备, 成功地找到了小质量恒星形成的各个阶段所对应的现象。例如, 19 世纪被光学望远镜所发现的 Burnham 星云, 在 1940 年被命名为赫比格-阿罗天体 (Herbig-Haro object, HH object)。HH 天体被认为是新生恒星的喷流与星际物质高速碰撞时所产生的带有明亮光学辐射的天体, 所以 HH 天体是恒星形成早期活动在光学波段的很好的示踪物。旋转的吸积盘还会激发盘上气体, 在红外波段形成明亮的辐射, 高速喷流和分子外向流也会激发其中的特征分子 (如 CO, SiO, HCO^+ , CH_3OH 等) 谱线和分子脉泽发射 (如 CH_3OH , H_2O 等)。以上这些辐射均被天文学家利用红外到射电波段的望远镜所探测到。

目前, 小质量恒星的形成机制已经较为明确。虽然如脉泽现象的抽运机制和外向流形成的物理过程等问题未被解决, 但是小质量恒星的形成理论总体是正确的。

2.2 大质量恒星的形成

作为宇宙空间中高能光子辐射和重金属元素的主要贡献者, 大质量恒星在星际介质的物理与化学演化, 以及星团和星系的形成和演化中扮演着重要角色。但是, 大质量恒星形成的基本理论还未建立。与小质量恒星的研究相比, 大质量恒星的研究工作要滞后很多, 其主要原因是: 一方面, 在大质量恒星形成过程中, 由于较强的紫外辐射对其初始形成环境的破坏, 形成大质量恒星的初始环境变得无法追溯。此外, 致密的云核中还同时蕴藏着一系列恒星、星团和 O/B 星协^[10], 因此, 研究对象更加复杂。可以说, 目前对于大质量恒星的诞生和最早期演化阶段的研究, 无论在观测上, 还是在理论上都较为匮乏。另一方面, 由于大质量恒星的演化时标远小于小质量恒星的 (如 O 型星的开尔文-亥姆霍兹时标 $\tau_{\text{K-H}} < 10^4$ a), 因此, 大质量恒星几乎没有一个明确的主序前演化阶段, 而是直接进入主序阶段^[11]。此外, 大质量恒星通常形成于巨大的稠密分子云核中, 因此周围的分子包层很厚, 即使大质量恒星已经形成, 它仍然有一段时间被深埋在分子云核中。被嵌埋的大质量恒星会发出大量高能光子, 周围的分子云核会被这些高能光子电离, 因此, 分子包层内会形成典型尺度小于 0.03 pc 的超致密电离氢区 (hyper compact H II region, HCH II)^[12]。这种仍然嵌埋在母分子云中的超致密电离氢区是新形成大质量恒星的重要演化阶段和表现形式。在这种情况下, 天文学家只有通过观测其离子、原子和分子在红外和射电波段的电磁辐射来研究它们, 通常的

光学波段观测是无效的。

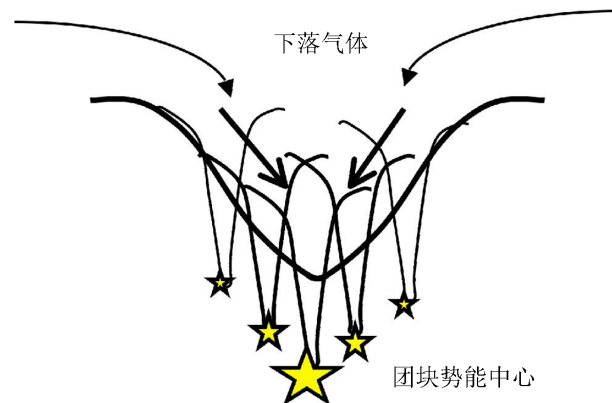
Zinnecker 和 Yorke^[13] 将大质量恒星的形成过程划分成四个主要的演化阶段：(1) 红外暗云 (infrared dark cloud, IRDC)；(2) 热分子云核 (hot core)；(3) 超致密电离氢区 (ultra compact H II region, UCH II)，其典型尺度为 $0.05 \sim 0.1 \text{ pc}$ ^[14, 15]；(4) 致密与经典电离氢区。根据目前的观测和理论分析，第三个阶段，即超致密电离氢区，是大质量恒星已经形成的判据^[16]。那么，若试图研究大质量恒星形成的原初条件，就要在大质量恒星开始热核反应之前将其从第一或者第二演化阶段的候选体中有效地筛选出来。

观测大质量恒星的形成过程存在诸多困难，因为其形成理论还未被建立，但这并不妨碍天文学家提出各种关于大质量恒星形成过程的猜测和理论模型。迄今为止，主要有三种大质量恒星形成过程的理论模型。

(1) 单体吸积模型：在第2.1节里我们描述了小质量恒星形成的过程。因为此形成模型已经被证实是正确的，所以，天文学家自然而然地延续这个思路，提出了大质量恒星单体吸积形成模型。此模型可以看作是小质量恒星形成模型的放大版本。人们认为大质量恒星诞生于大型分子云核中，其形成过程和物理现象与小质量恒星类似，只是过程更加剧烈。但是，人们通过进一步的数值模拟计算发现，当中心原恒星所吸积质量达到 $10M_{\odot}$ 时，原恒星的辐射光压和内部热压就可以与自身引力相抗衡，以致吸积盘上的物质停止下落到原恒星上。这样，原恒星的质量将被限制在 $10M_{\odot}$ 之内，这显然不符合观测事实。随后，支持此模型的天文学家提出，光子可以从两极区域由喷流和外向流活动而清扫出的高透明度柱状空腔中逃逸，从而使原恒星内部的光压减小。这种假设的模拟结果是，原恒星质量上限可提高到近 $100M_{\odot}$ ^[17-20]。但是，由于该模拟中没有考虑分子外向流所带出的物质质量的影响，只是根据云核质量给出可以形成的最大恒星的质量上限，故这种理论还是存在缺陷。另外，单体吸积模型还存在一个重大的缺陷，即形成大质量恒星的红外暗云基本上不可能达到很大的金斯质量。金斯质量决定着分子云碎裂后形成的云核质量，即限制着在云核中形成的恒星的最大质量，而金斯质量又是由分子云的温度所决定，因为大质量恒星形成于红外暗云中，而红外暗云的内部温度较低 ($10 \sim 20 \text{ K}$)，因此，红外暗云的金斯质量不会很大，其碎裂所形成的云核质量也不会很大。这点与观测事实相符：云核质量基本不会超过 $20M_{\odot}$ 。考虑到恒星形成效率 (即最终形成的恒星质量与云核的质量之比) 约为 30%，故 $20M_{\odot}$ 的云核不可能形成大质量恒星。根据最新支持此模型的理论，红外暗云可以通过内部较强的湍动和热压的共同作用，达到较大的金斯质量，从而形成较大质量的云核^[21-24]。但是此假设充满了不确定性，因为湍动是一个随机的、非各向同性的过程，如果红外暗云仅因湍动就形成较大质量的云核，这未免显得太过巧合。

(2) 竞争吸积模型：根据竞争吸积模型，人们认为，红外暗云在受到外界扰动时会碎裂成质量与金斯质量相近的较小云核。这些较小的云核在各自引力作用下会坍缩形成小质量恒星，而处于引力优势位置 (如靠近分子云中心) 的云核会从其他云核吸积物质，从而使自身的质量增长。这些增长的质量又会通过吸积盘持续下落到原恒星上，使得原恒星质量持续增长。这种模型也很好解释了大质量恒星大多处于星团中心位置的原因 (如图 3 所示)，以及大质量恒星大多有伴星系统的原因。这些问题都是用单体吸积模型无法解释的^[25]。竞争

吸积模型与单体吸积模型的最主要区别在于形成大质量恒星的云核完成物质积累所处的阶段^[26]: 单体吸积模型的云核质量确定于红外暗云发生碎裂之时, 而竞争吸积模型的云核质量会随着原恒星的质量增长而一同增长。Zinnecker 和 Yorke^[13]用两个经济学现象对竞争吸积现象进行了生动的描述。类似于房地产中的楼盘, 分子云核在原恒星团中所处的位置对其最终形成的恒星质量有重要影响, 离星团中心越近的云核, 形成大质量恒星的概率越大。另一个是金融业中“富者越富”现象, 即在竞争中具有优势的原恒星在吸积物质方面会越来越有优势。另外, 根据竞争吸积模型, 人们认为分子云中正在形成的恒星基本上处于同一形成和演化阶段。这一点与单体吸积模型所代表的观点不一样。根据单体吸积模型, 人们认为分子云中的大质量恒星形成于小质量恒星形成之后, 即大质量恒星的演化阶段晚于小质量恒星的演化阶段。因为根据此模型, 大质量恒星一旦形成, 其强大的高能辐射将驱散其周围可用于形成恒星的分子云, 以致其他恒星难以形成。Cyganowski 等人^[27]通过对 G11.92-0.61 大质量恒星形成区的持续观测研究, 发现其中存在大质量恒星与小质量恒星处于同一演化阶段的现象。虽然不能以此为依据断定竞争吸积模型是正确的, 但这个发现是支持此模型的有效证据。



注: 处于团块势能中心的云核在原恒星形成过程中将持续吸积更多的物质, 以达到可以形成大质量恒星的规模。

图 3 竞争吸积模型示意图^[28]

(3) 星体碰撞并合模型: 通过小质量恒星碰撞并合产生大质量恒星这一观点, 虽然在理论上不存在缺陷, 但与数值模拟和实际观测结果并不一致, 至少现在还没有直接的观测证据支持该观点。发生星体碰撞并合的主要困难是宇宙中恒星数密度太小, 即使是在恒星数密度最高的星团中, 恒星数密度也只有 10^3 pc^{-3} 。针对此模型进行的数值模拟显示^[29], 在 1 pc^3 的空间内, 两颗 $0.5M_{\odot}$ 的恒星相互靠近至 20 AU 的距离时会受到引力的束缚, 并在靠近至 2 AU 时发生并合。数值模拟显示, 在 1 pc^3 的空间内, 恒星数密度需要达到 10^8 pc^{-3} 时碰撞并合才能有效地发生。另外, 恒星的碰撞并合是一个非常剧烈的过程, 并合过程中的高能活动很可能激发出强烈的高能光子闪光。遗憾的是, 现在并没有探测到符合此模型的高能活动。

本章主要简述了研究大质量恒星形成的困难和该领域内提出的大质量恒星的主要演化模型：单体吸积模型、竞争吸积模型和星体碰撞并合模型。前两个模型之间并不是绝对独立和排斥的，大质量恒星的形成过程很可能混合着这两种模式同时进行，我们现在讨论得更多的是哪个模式占主导地位。星体碰撞并合模型在理论上不存在缺陷，但实际上因为恒星数密度太低，所以星体碰撞并合过程难以发生。不过在诸如银心等恒星极端密集的区域还是有可能发生星体碰撞并合的，但受限于现在的观测手段和较长的恒星并合时标 ($10^6 \sim 10^7$ a)，到目前为止还没有探测到这类现象。

3 分子外向流和绿色延展天体

3.1 分子外向流

自从 1980 年 Snell 等人^[30] 在 L1551 恒星形成区首次发现分子外向流以来，人们经过近 40 年的研究发现，分子外向流普遍与正在形成阶段的原恒星成协。示踪分子外向流的连续谱辐射和多分子谱线辐射覆盖了从射电至 X 射线的多个波段，天文学家利用这些谱线可以确定外向流的物理性质、化学组成、视向速度和自行等信息。科学技术的快速发展，以及近年来一批广域近/中红外空间望远镜的发射升空和位于地面的综合孔径干涉厘米/毫米波射电望远镜阵列的建成，对恒星形成和分子外向流领域的研究起到了很大的推进作用。许多分子外向流起源于复杂的分子云系统中，虽然大多数外向流是双极结构，并与高准直的喷流成协，但是部分外向流仍呈现出各向同性的喷发现象。通过观测分子外向流的形态结构和速度场的分布，人们可以得到系统的物质流出速度和质量流出率等信息，甚至在某些情况下，还可以得到外向流的方向和准直程度。外向流的强度与原恒星的光度成正相关，但是会随着演化的进程而减弱：处于极早期阶段的分子外向流可以被 CO, SiO, H₂O 和 H₂ 等分子所示踪；而处于晚期阶段的分子外向流的规模可以增长到几个秒差距的量级，并且能被激波所激发的原子和离子的辐射所示踪，例如 H 的复合线，以及 [S II] 和 [O II] 等^[31]。分子外向流向周围环境传输动量和物质，是恒星形成系统中自我调节的重要过程。

3.1.1 分子外向流的基本观测性质

过去十余年，SMA, CARMA, PdBI 及 ALMA 等毫米和亚毫米波干涉仪的建造，使得人们对外向流的认知能力得到了空前的提升。利用这些仪器开展的分辨率达到角秒，甚至亚角秒量级的观测结果，成功地揭示了外向流的众多性质。目前，人们对小质量外向流有着较为充分的认识。它们一般大小为 $0.1 \sim 1$ pc，外流速度可达 $10 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，质量外流率可达 $10^{-6} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$ ^[32]。大部分小质量外向流呈双极形态，且具有较高的准直性。典型的准直因子约为 3 ^[33]，最高可达 20 ^[34]。

近些年来，对大质量外向流的研究受到了更多的重视。天文学家利用中远红外到射电波段的巡天数据，对大质量恒星形成区外向流进行了大量的统计分析，并取得了进一步成果。König 等人^[35] 和 Urquhart 等人^[36] 利用多波段内银道面的巡天数据将大质量团块的演化阶段进行了分类；Traficante 等人^[37] 在一批极早期大质量的星前团块中发现了与之成协的外

外向流; Yang 等人^[38]通过对 919 个大质量团块观测数据进行分析, 发现其中 325 个团块存在大质量外向流现象, 且外向流与 UCH II /HCH II 区的成协率达到 90% 左右, 这也充分说明外向流是大质量恒星形成时普遍存在的现象。通过近 20 年的统计性研究, 人们发现, 来自大质量年轻星外向流的质量外流率为 $10^{-5}M_{\odot} \sim 10^{-3}M_{\odot} \text{ a}^{-1}$, 机械光度为 $10^{-1}L_{\odot} \sim 10^2L_{\odot}$ ($L_{\odot}$ 代表一个太阳光度), 动量外流率为 $10^{-4}M_{\odot} \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[34, 39, 40]。相对来说, 大质量外向流具有较低的准直性, 典型的准直因子约为 2^[33]。也有一些具有较高准直性的外向流或喷流在早型 B 型年轻星系统中被观测到^[41, 42], 但它们一般都非常年轻 (小于 10^4 a)^[34]。在年龄大于 10^4 a 的 B 型和 O 型年轻星系统中观测到的外向流具有大的张角和较差的准直性。相对于小质量外向流, 大质量外向流出现多极形态的概率更高。这些观测上的性质差异起源于大质量恒星形成过程与小质量恒星形成过程的不同。形成大质量恒星时发生的剧烈且复杂的物理过程及其产生的强力反馈对大质量外向流的形态和准直性有着重要影响。此外, 成团过程中形成的大质量恒星也增加了大质量外向流的复杂性。

研究表明, 小质量和大质量外向流间存在一些相似的观测特征。外向流的质量 M 与速度 v 存在一个分段的幂律关系, 即 $dM(v)/dv \propto v^{-\gamma}$ (γ 表示幂律)。在低速度端, γ 处在 1~3 之间; 而在高速度端, γ 值较大, 有时可达 10 ^[43-45]。该关系说明, 外向流的质量分布随外流速度的增加呈幂率下降。这一趋势在年老和高能的外向流中更为明显 (对应更大的 γ 值)。Wu 等人^[33]对近 400 个不同质量外向流的统计研究表明, 外向流的质量、作用力和机械光度与激发源的热光度间存在着密切的关系, 它们都随着热光度而递增。这些特点也符合更大质量年轻星具有更剧烈反馈的推论。

3.1.2 分子外向流的起源

整体而言, 分子外向流的结构和动力学特征表明, 外向流是由来自吸积盘范围内的星风所驱动的, 而位于中心的致密核心被低密度和低速度的广角星风所包围。一般来说, 外向流的驱动模型可分为喷流驱动和星风驱动两个独立的模型, 尽管在实际研究中这两个模型总是难以彻底区分^[46]。

在 100 K 温度下, 分子云中的声速仅有 $1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 从原恒星中喷出的喷流速度远远超过本地声速, 故喷流会在分子云中产生激波。喷流冲入分子云时会在前端产生一个弓形激波, 该激波会将周围的物质清扫进一个薄的壳层中^[47, 48]。此时的激波具有双层结构: 外层使分子云中的物质加速, 内层使喷流减速。弓形激波是由于在喷流顶端的工作面 (working surface) (在喷流路径上发现的很多 HH 天体就像老树的节, 天文学家认为这些 HH 天体是激波面, 故称为工作面) 边界上的压力作用而产生的。包围喷流的外向流壳层是由夹在两层激波中的高压气体沿横向滑出产生的更大的弓形激波面与近邻湍动气体作用而形成的, 这正是高压气体横向流动的驱动源。弓形激波的张角往往较小, 因为处在工作表面外侧的冷却气体限制了壳层的横向力^[49], 因此, 壳层的宽度与中心原恒星到喷流顶端距离的平方根成正比^[50]。弓形激波模型存在难以解释广角外向流的问题, 然而, 在某些系统中出现的速度特性与弓形激波模型的预测结果吻合得很好。

而在广角星风模型中, 星风的横向动量与激波气体壳层中的横向压力相比是很大的。由

于动量守恒, 星风将横向动量传递给周围的物质, 于是, 星风就像扫雪机一样清扫出一个张角很大的壳层。Shu 等人^[51] 基于星风模型提出了可以解释广角外向流形成机理的星风驱动壳层模型。Li 和 Shu^[52] 以及 Matzner 和 McKee^[53] 进一步提出, 产生星风的吸积盘具有密度分层现象 ($\rho \propto r^{-2}$)。另外, 广角星风驱动模型的数值模拟结果也较好地与大张角和年老的外向流观测结果相吻合。

3.1.3 分子外向流对环境的反馈

分子外向流是恒星形成过程中普遍存在的现象, 这种恒星形成的示踪物同时也在恒星形成过程中扮演着重要的角色。外向流庞大且剧烈的质量和能量流出对云核, 乃至母分子云产生了强烈而深远的反馈作用, 给恒星的形成带来两种截然不同的影响: 一方面, 外向流带走吸积盘上物质的多余角动量和原恒星内部强大的光压, 使得物质可以持续下落到原恒星表面, 从而使原恒星的质量增长, 促进恒星形成; 另一方面, 外向流也从原恒星和云核中带走大量物质, 并将大量动能注入母分子云中, 从而使恒星形成的环境变得不稳定, 并且使恒星的质量增长得到抑制。我们将分子外向流对环境的影响范围从小到大分为三个尺度, 并进行讨论。

(1) 原恒星和吸积盘尺度 (1~1 000 AU)

虽然分子外向流的起源和形成的具体原理尚不可知, 但是外向流和吸积盘普遍成协已经是不争的事实。在恒星形成的吸积物质阶段, 分子气体遵从角动量守恒定理形成一个吸积盘, 而不会直接下落到原恒星表面, 分子外向流则释放吸积盘上气体的多余角动量。理论上, 气体的多余角动量可以通过平行于吸积盘的方向和垂直于吸积盘的方向释放, 即通过粘滞作用横向转移和磁场作用下形成星风/喷流/外向流。数值模拟结果表明, 通过横向作用释放多余角动量的作用较小^[54, 55], 吸积盘上的物质主要通过垂直于盘方向的喷流和向外流转移角动量。在这个最小的尺度上, 分子外向流的作用是促进物质吸积, 从而使得原恒星质量得以持续增长。

(2) 包层和分子云核 (1 000 AU~1 pc)

分子外向流的典型速度约为 $50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当外向流延伸至包层和分子云核的范围中一段时间后, 原恒星进入吸积晚期阶段。这时外向流张角变大, 准直性变差, 外向流影响的范围逐渐增大。由于外向流携带了大量动量, 因此, 它将夹带包层中的物质冲出分子云核的范围, 从而使包层和云核中的物质密度下降^[56]。在这个尺度上, 分子外向流是云核内物质损失的主要原因, 它在一定程度上限制了原恒星的最终质量, 以致云核与恒星的质量转化率普遍只有 50% 左右^[57]。

(3) 母分子云 (1~100 pc)

对母分子云产生重要影响的外向流活动一般来自大质量恒星。大质量的外向流所携带的动量和能量是分子云中湍动和热量的主要贡献者^[58, 59]。大质量原恒星激发的外向流所携带的大量动量可使母分子云中物质速度增加, 分子谱线展宽^[60], 并使分子云的位力质量增加, 从而使分子云坍缩变得困难; 大质量外向流所携带的较高温度的物质也会加热母分子云, 使分子云的金斯质量提高, 从而在一定程度上阻止分子云碎裂成云核, 进而形成恒星。

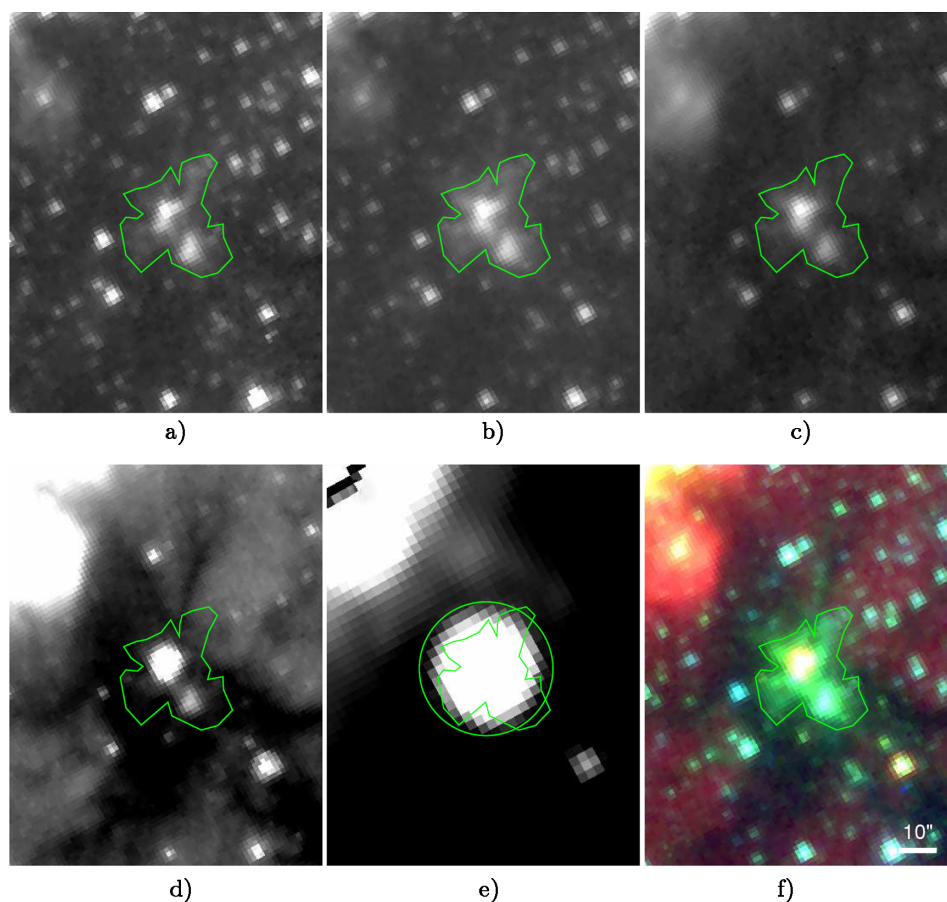
总体来说, 外向流在母分子云这个尺度起到抑制恒星形成活动, 降低恒星形成效率的作用。

3.2 绿色延展天体

天文学家为了研究大质量恒星形成的原初条件, 需要在大质量恒星开始热核反应之前将其从第一或者第二演化阶段的候选体中有效筛选出来。幸运的是, 近年来出现的先进观测设备使天文学家有可能追踪恒星形成的更早期过程, 特别是在 2003 年发射升空的斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope, SST), 人们利用在其上搭载的红外阵列相机 (infrared array camera, IRAC) 对大面积天区开展了红外巡天工作。其中最瞩目的成果之一便是英国天文学家 Cyganowski 等人^[61] 基于 Spitzer/GLIMPSE 观测数据, 在内银道面中 ($10^\circ < |l| < 60^\circ$, $|b| < 1^\circ$) 发现了大质量年轻星驱动的 300 余颗外向流候选体。在激波环境中易被激发的 $\text{H}_2(0-0)$ (其分子能级为 (9, 10, 11)) 和 $\text{CO}(1-0)$ 发射使得外向流往往在 $4.5 \mu\text{m}$ 宽带图像上呈现延展结构。在把 $4.5 \mu\text{m}$ 发射渲染成绿色的合成三色图中, 外向流便自然呈现出绿色延展结构, 因此, 这类天体又被称为绿色延展天体。源表中首个 EGO 天体图像如图 4 所示。

随后, Chen 等人^[62] 在 2013 年使用 Spitzer/GLIMPSE2 巡天数据在银道面银心方向 ($|l| < 10^\circ$, $|b| < 1^\circ$) 证认出 98 颗新 EGO 天体, 将 EGO 天体数量扩展至 400 余颗。多数 EGO 天体拥有两处被认为是明显的双极外向流的区域。根据恒星形成理论和观测事实, 双极外向流是恒星形成早期阶段的主要特征之一, 因此, EGO 天体是大质量恒星形成的候选体。研究表明, 强烈的激波活动可以增强 H_2 分子在 $4.5 \mu\text{m}$ 波段的辐射, 这种反常的辐射增强现象必定由强烈的动力学效应引起的。小质量恒星形成时的吸积和向外流过程则难以达到形成 EGO 的要求, 或者即使能够形成类似的发射, 但无法形成延展状结构。后来, 人们在 EGO 天体中探测到了普遍存在的 I / II 型 CH_3OH 脉泽和 H_2O 脉泽^[63-65]。I 型 CH_3OH 脉泽和 H_2O 脉泽被认为与外向流活动相关, 而 II 型 CH_3OH 脉泽通常被认为与大质量恒星形成区成协。以上探测结果进一步表明, 它们是大质量外向流候选体。此外, 就以往直接探测到的分子外向流而言, EGO 天体的动力学年龄非常小 (小于 10^4 a), 因此可以说, 探测 EGO 天体是寻找外向流, 进而寻找处于形成早期的大质量原恒星的一个很好的途径。天文学家可以利用 EGO 天体探测结果, 在统计的规模上寻找大质量恒星形成的规律。

在 EGO 天体被发现之后, 位于北天可观测的 EGO 天体首先被天文工作者用射电望远镜进行分子谱线的低分辨率观测。Chen 等人^[66] 利用位于青海德令哈的 13.7 m 口径毫米波射电望远镜对北天的 88 个 EGO 天体进行了 $\text{HCO}^+(1-0)$, ^{12}CO , ^{13}CO , $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ 的分子谱线观测, 并在 29 个源中 (约占 33%) 发现了蓝端不对称轮廓 (blue asymmetric profiles), 19 个源中发现了红端不对称轮廓 (red asymmetric profiles)。前者表明被观测源很可能处于坍缩阶段, 后者表明被观测源很可能存在外向流。He 等人^[67] 利用亚利桑那天文台的 10 m 口径亚毫米波射电望远镜对北天的 89 个 EGO 天体进行了分子谱线观测, 并在这些 EGO 天体中发现了 H^{13}CO^+ , SiO , SO , CH_3OH , CH_3OCH_3 , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}$, HCOOCH_3 和 HN^{13}C 的分子谱线发射, 其中 H^{13}CO^+ 和 SiO 分子谱线在大部分源中被探测到, 说明 EGO 天体中存在激波和外向流; 而探测到复杂有机分子 (如 CH_3OCH_3 , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}$ 和 HCOOCH_3), 则证实激发源处于大质量恒星形成的早期阶段——热核阶段^[68]。Cyganowski 等人^[64] 则使用



注: a) 3.6 μm 波段图像; b) 4.5 μm 波段图像; c) 5.8 μm 波段图像; d) 8.0 μm 波段图像; e) 24 μm 波段图像; f) 8.0 μm (红)/4.5 μm (绿)/3.6 μm (蓝) 合成的三色图。

图 4 EGO 源表中首个 EGO 天体图像^[61]

日本长野县的 Nobeyama 射电望远镜对北天所有已知的 94 个 EGO 天体开展了 H_2O 脉泽和 $\text{NH}_3(1, 1), (2, 2), (3, 3)$ 的巡天工作。观测结果表明, $\text{NH}_3(1, 1)$ 和 H_2O 脉泽与 EGO 天体的相关性分别高达 97% 和 68%。这个结果说明, 在 EGO 区域存在高温致密分子气体和致密 H_2 分子。另外, $\text{NH}_3(2, 2)$ 和 $\text{NH}_3(3, 3)$ 分子谱线与大质量恒星形成的 Class I 和 Class II 阶段有很强的相关性, 这也充分表明 EGO 天体是大质量恒星形成区的优秀候选体。Yu 和 Wang^[69] 使用 MALT90 对 31 个 EGO 天体在 90 GHz 波段进行了分子谱线观测, 发现处于演化晚期的 EGO 天体中 $[\text{N}_2\text{H}^+]/[\text{H}^{13}\text{CO}^+]$ 和 $[\text{C}_2\text{H}]/[\text{H}^{13}\text{CO}^+]$ 的比值比演化早期的高, 这表明 N_2H^+ 和 C_2H 分子可以作为探测大质量恒星演化的化学时钟。同时, 这一观测结果也提高了上述对于 NH_3 分子与大质量恒星形成的早期阶段成协现象所总结的观测成果的可靠性。Voronkov 等人^[70] 利用位于澳大利亚的致密阵列射电望远镜对南天的恒星形成区进行 I 型 CH_3OH 脉泽低分辨率巡天时, 观测到了 71 个与 EGO 天体成协的 I 型 CH_3OH 脉泽及

其复杂的形态结构和外向流活动。Towner 等人^[71]利用 VLA 对 20 个 EGO 天体进行了 25 GHz 的 CH_3OH 脉泽的观测工作 (在先前的工作中已经证实, 这些区域有 70% 的源存在 I 或 II 型 CH_3OH 脉泽), 发现其中 13 个源存在 25 GHz 的 CH_3OH 脉泽辐射, 同时还新发现了 34 处 CH_3OH 脉泽辐射和 10 处 CH_3OH 热辐射。这也说明 CH_3OH 分子是 EGO 天体的优秀示踪物和探针。

从 EGO 天体这一概念被提出到现在, 近 10 年来, 天文工作者使用高分辨率的厘米波/毫米波/亚毫米波射电望远镜 (如 SMA, VLA, ALMA 等) 阵列, 对部分 EGO 区域进行了高分辨率观测研究, 发现了一批活跃的恒星形成区域。人们通过对这些大多处于恒星形成早期阶段的区域的观测, 发现了一些新的现象。Cyganowski 等人^[72]使用 SMA 和 ALMA 对恒星形成区 G11.92 连续进行高分辨率观测, 率先发现了其中的大质量外向流和激波活动 (见图 5)。

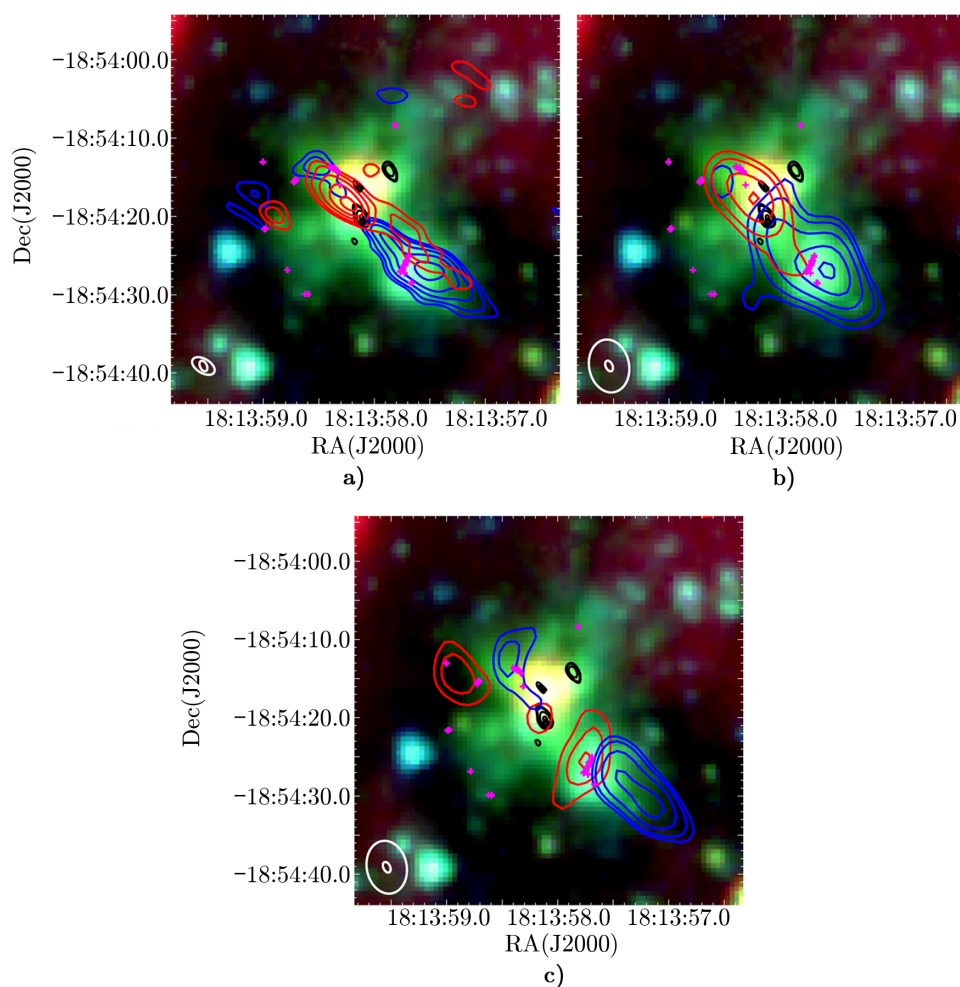
随着望远镜分辨率的进一步提高, 他们又在该区域内观测到尺度更小的结构, 并发现了其中的大质量无星云团和处于热核阶段的云核^[73]。最终, 他们利用 ALMA 在亚角秒级别的高分辨率观测数据, 发现了大质量恒星和小质量恒星同时形成的现象 (如图 6 和图 7 所示)^[27]。此 EGO 区域的观测结果在一定程度上支持了竞争吸积模型, 揭示了大质量恒星形成是一个复杂的过程这一事实。

Rosero 等人^[74]使用 VLA 和 UKIRT 红外望远镜对 EGO 源表中的 G11.11-0.12 区域进行了高分辨率的厘米波 (1.3 cm/6 cm) 连续谱观测, 其结果表明, 该源中的大质量原恒星存在光学厚的吸积盘和电离态的喷流, 这正是大质量恒星演化早期阶段的特征。Chen 等人^[75]使用 SMA 对恒星形成区 G350.69-0.49 进行高分辨率观测时发现, 该区域内存在两个致密的大质量云核, 它们分别位于红外气泡中心和壳层边缘。位于壳层边缘的云核通过外流的方式将分子气体持续地输送至位于中心的云核中, 从而使得中心云核质量持续增长。此外, 中心云核已经出现分子外向流和旋转等早期恒星形成的特征。

近年来, 通过多波段观测手段研究大质量恒星形成区或 EGO 天体已经成为一种新型且有效的研究手段。Dewangan^[76]通过对新认证的 EGO 区域 G35.2-0.74 进行的从红外到射电的多波段研究, 揭示了分子云间碰撞与大质量恒星形成活动之间的关联。多波段和大数据分析研究是目前大质量恒星形成研究, 甚至是天文学研究的主要方法, 同时, 海量的巡天数据也为这种研究方式提供了很大的便利。

4 总结和展望

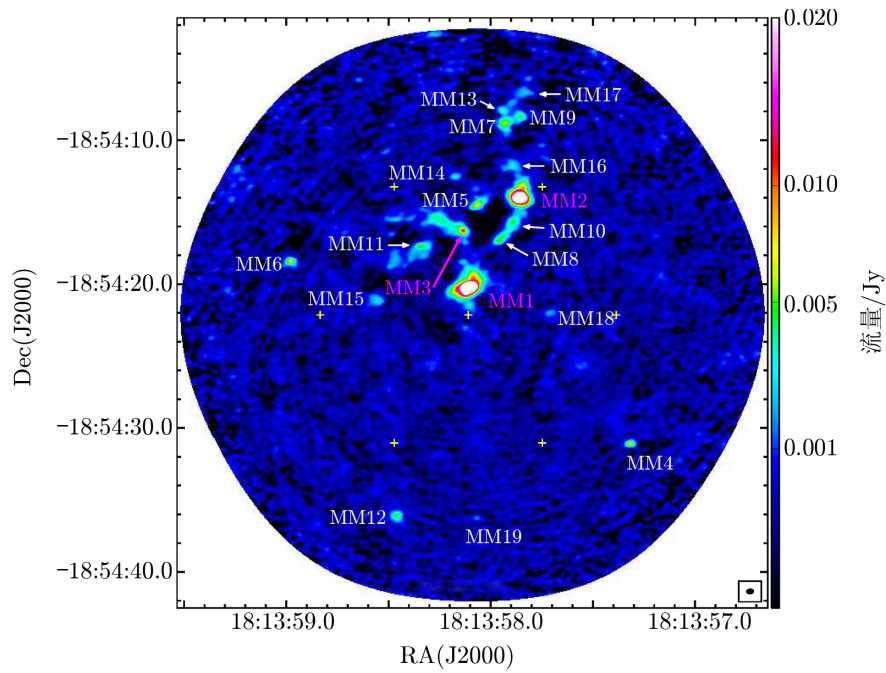
恒星形成和演化一直是天体物理学, 乃至天文学中一个重要且活跃的研究领域。随着质能方程在 20 世纪初被提出, 恒星的演化活动才被人们逐步了解; 直到 20 世纪 40 年代天文学家发现星际空间中存在冷暗分子云以后, 恒星形成的原因才逐步被揭示, 小质量恒星的形成机制才被人们所基本了解。我们都知道, 恒星不论大小都有生命周期, 恒星质量不同, 其结局也不一样: 小质量恒星只能形成一颗暗淡的白矮星, 而大质量恒星一般会发生超



注: a) G11.92 中 $^{12}\text{CO}(2-1)$ 所示踪的外向流结构; b) G11.92 中 $\text{HCO}^+(1-0)$ 所示踪的外向流结构; c) G11.92 中 $\text{SiO}(2-1)$ 所示踪的外向流结构。

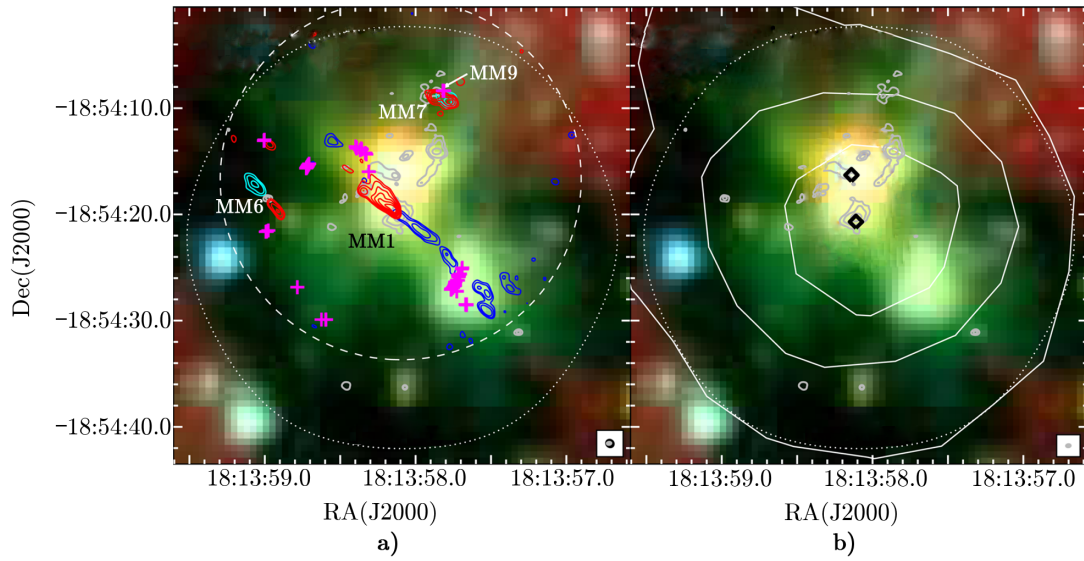
图 5 Cyganowski 等人^[72]使用 SMA 在 EGO 天体中探测到的显著的分子外向流

新星爆发,以至于照亮整个星系。大质量恒星演化晚期的情况已经有众多的理论解释和观测支持,但是大质量恒星的形成过程问题却一直困扰着天文学家。描绘大质量恒星形成过程的最主要障碍便是大质量恒星形成时的深嵌埋、快速形成和对周围环境的剧烈反馈:深埋在高度不透明的巨分子云中的大质量原恒星所发出的光学辐射会被周围的气体吸收,以致通常使用的光学望远镜无法观测,只能依靠红外和射电波段望远镜进行观测;大质量恒星的开尔文-亥姆霍兹时标一般小于恒星形成时标,这就意味着大质量恒星尚未完成质量的积累便已经点燃H元素,并开始热核反应,并且在相当长的一段时间内,大质量恒星虽然已经进入主序阶段,但还是深埋在分子云中,以致其无法被观测到;大质量恒星一旦进入主序阶段,就会发生剧烈的热核反应,以对抗自身强大的引力,强烈的核反应所发出的高能光子



注: MM1—MM3 为大质量云核, MM4—MM19 为小质量云核。1" 对应3 370 AU的距离。

图 6 Cyganowski 等人^[27]使用 ALMA 在 EGO 中探测到的同时形成的大/小质量恒星



注: a) 使用SMA 对G11.92 内部观测发现, MM1 (大质量云核) 和MM6/9 (小质量云核) 均存在 $^{12}\text{CO}(3-2)$ 外向流, 其中洋红色十字标出的是44 GHz的I型 CH_3OH 脉泽所在的位置; b) 白色轮廓代表870 μm 的ATLASGAL 观测积分强度, 灰色轮廓代表1.05 mm的ALMA 连续谱观测积分强度, 黑色菱形代表6.7 GHz的II型 CH_3OH 脉泽所在的位置。1" 对应3 370 AU的距离。

图 7 G11.92 内复杂的多外向流^[27]

辐射将电离并吹散周围的分子云,从而使大质量恒星形成的原始环境因被破坏而无法被追溯。由于大质量恒星形成过程很难被观测到,因此,天文学家试图从理论上解释大质量恒星的形成过程。目前,主要有三种理论模型:单体吸积模型、竞争吸积模型和星体碰撞并合模型。这三种模型各有优缺点。目前为止的观测结果表明,大质量恒星的形成过程可能是一个复杂的过程,需要混合多个模型来解释。

分子外向流是恒星形成过程中极其重要的现象。随着大量巡天计划的实施,天文学家发现了高效地研究它的新途径。由于大质量外向流的流出速度很高,在周围的分子气体中会产生激波,激发 H_2 分子在近红外波段产生辐射,且 EGO 天体大多与大质量恒星形成的示踪物成协,因此,上述现象均表示,EGO 天体是大质量外向流的优秀候选体。

发现 EGO 天体后近十年来,天文学家对部分 EGO 天体进行了高分辨率观测,发现 EGO 天体所示踪的大质量恒星大部分处于形成和演化的早期阶段,这与理论相符合。由于大质量恒星具有数量稀少、演化速度快和难以观测等特点,因此,到目前为止,天文工作者尚未能对形成中的大质量恒星进行统计上的研究,只对零碎的单个恒星形成区进行了观测研究。EGO 天体的出现为寻找早期大质量原恒星的性质和规律提供了一个很好的途径。观测手段的发展必将推动理论工作的前进。基于现代大规模、多波段的巡天观测,对恒星形成的研究向着大数据、统计性规律的方向发展是必然的趋势。通过丰富的红外卫星巡天数据库,天文工作者可以对 EGO 天体进行大规模的分类工作,而后再利用高分辨率射电望远镜对其中个别源进行细致的观测研究,以便提高天文工作者对大质量恒星形成理论框架的搭建效率。但是,到目前为止,还没有对大质量恒星形成区进行大规模统计分类工作,所以,我们预想利用红外多波段数据对大质量恒星形成区开展 EGO 天体的筛选和分类工作。完成 EGO 天体的筛选和分类将在很大程度上扩大大质量恒星形成区的样本数量,为恒星形成理论研究打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 秦胜利, 王俊杰, 赵刚, 等. 天文学进展, 2004, 22(2): 122
- [2] Barret A. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1964, 12: 822
- [3] Wilson R W, Jefferts K B, Penzias A A. ApJ, 1970, 161: L43
- [4] Cheung A C, Rank D M, Townes C H, et al. Phys Rev Lett, 1968, 21: 1071
- [5] Braiding C. Dissertation. Sydney: Macquarie University, 2011
- [6] Shu F H, Adams F C, Lizano S. ARA&A, 1987, 25: 23
- [7] Lada C J. IAUS, 1987, 115: 1L
- [8] Andre P, Ward-Thompson D, Barsony M. ApJ, 1993, 406: 122
- [9] Bachiller R. ARA&A, 1996, 34: 111
- [10] Lada C J, Lada E A. ARA&A, 2003, 41: 57
- [11] McKee C F, Tan J C. ApJ, 2003, 585: 850
- [12] Sanchez-Monge A, Pandian J D, Kurtz S. ApJ, 2011, 739: L9
- [13] Zinnecker H, Yorke H W. ARA&A, 2007, 45: 481
- [14] Kurtz S. IAUS, 2005, 227: 111

-
- [15] Hoare M G, Kurtz S E, Lizano S, et al. In: Reipurth B, Jewitt D, Keil K, ed. *Protostars and Planets V*. Tucson: Univ of Arizona Press, 2007: 181
- [16] Churchwell E. *A&ARv*, 1990, 2: 79
- [17] Wolfire M G, Casinelli J P. *ApJ*, 1987, 319: 850
- [18] Krumholz M R, McKee C F. *ApJ*, 2005, 618: L33
- [19] Yorke H W, Sonnhalter C. *ApJ*, 2002, 569: 846
- [20] Kuiper R, Klahr H, Bellther H, et al. *ApJ*, 2010, 722: 1556
- [21] Krumholz M R, Klein R I, McKee C F, et al. *Science*, 2009, 323: 754
- [22] Krumholz M R, Klein R I, McKee C F, et al. *ApJ*, 2007, 656: 959
- [23] Krumholz M R. *ApJ*, 2006, 641: L45
- [24] Krumholz M R, Cunningham A J, Klein R I, et al. *ApJ*, 2010, 713: 1120
- [25] Bonnell I A. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2008, 390: 26
- [26] Bonnell I A, Smith R J. *IAUS*, 2011, 270: 57
- [27] Cyganowski C J, Brogan C L, Hunter T R, et al. *MNRAS*, 2017, 468: 3694
- [28] Bonnell I A, Larson R B, Zinnecker H. In: Reipurth B, Jewitt D, Keil K, ed. *Protostars and Planets V*. Tucson: Univ of Arizona Press, 2007: 149
- [29] Bonnell I A, Bate M R. *MNRAS*, 2002, 336: 659
- [30] Snell R L, Loren R B, Plambeck R L. *ApJ*, 1980, 239: L17
- [31] Bally J. *ARA&A*, 2016, 54: 491
- [32] Bontemps S, Andre P, Terebey S, et al. *A&A*, 1996, 311: 858
- [33] Wu Y, Wei Y, Zhao M, et al. *A&A*, 2004, 426: 503
- [34] Arce H, Shepherd D, Gueth F, et al. In: Reipurth B, Jewitt D, Keil K, ed. *Protostars and Planets V*. Tucson: Univ of Arizona Press, 2007: 245
- [35] König C, Urquhart J S, Csengeri T, et al. *A&A*, 2017, 599: 139
- [36] Urquhart J S, König C, Giannetti A, et al. *MNRAS*, 2018, 473: 1059
- [37] Traficante A, Fuller G A, Billot N, et al. *MNRAS*, 2017, 470: 3882
- [38] Yang A Y, Thompson M A, Urquhart J S, et al. *ApJS*, 2018, 235: 3
- [39] de Villiers H, Chrysostomou A, Thompson M A, et al. *MNRAS*, 2014, 444: 566
- [40] Maud L T, Moore T L T, Lumsden S L, et al. *MNRAS*, 2015, 453: 645
- [41] Beuther H, Schilke P, Sridharan T K, et al. *A&A*, 2002, 383: 892
- [42] Beuther H, Schilke P, Gueth F, et al. *A&A*, 2002, 387: 931
- [43] Rodriguez L F, Carral P, Ho P T P, et al. *ApJ*, 1982, 260: 635
- [44] Lada C J, Fich M. *ApJ*, 1996, 459: 638
- [45] Ridge N A, Moore T J T. *A&A*, 2001, 378: 495
- [46] McKee C F, Ostriker E C. *ARA&A*, 2007, 45: 565
- [47] Raga A, Cabrit S. *A&A*, 1993, 278: 267
- [48] Masson C R, Chernin L M. *ApJ*, 1993, 414: 230
- [49] Downes T P, Ray T P. *A&A*, 1999, 345: 977
- [50] Ostriker E C, Lee C F, Stone J M, et al. *ApJ*, 2001, 557: 443
- [51] Shu F H, Ruden S P, Lada C J, et al. *ApJ*, 1991, 370: L31
- [52] Li Z-Y, Shu F H. *ApJ*, 1996, 468: 261
- [53] Matzner C D, McKee C F. *ApJ*, 1999, 526: L109
- [54] Lesur G, Ferreira J, Ogilvie G Z. *A&A*, 2013, 550: A61
- [55] Bai X-N, Stone J M. *ApJ*, 2013, 769: 76
- [56] Arce H G, Sargent A I. *ApJ*, 2006, 46: 1070
- [57] Machida M N, Hosokawa T. *MNRAS*, 2013, 431: 1719
- [58] Maclow M M. *AP&SS*, 2004, 289: 323
- [59] Cunningham A J, Frank A, Carroll J, et al. *ApJ*, 2009, 692: 816
- [60] Bence S J, Richer J S, Padman R. *MNRAS*, 1996, 279: 866

- [61] Cyganowski C J, Whitney B A, Holden E, et al. AJ, 2008, 136: 2391
- [62] Chen X, Gan C-G, Ellingsen S P, et al. ApJS, 2013, 206: 9
- [63] Cyganowski C J, Brogan C L, Hunter T R, et al. ApJ, 2009, 702: 1615
- [64] Cyganowski C J, Koda J, Rosolowsky E, et al. ApJ, 2013, 764: 61
- [65] Chen X, Ellingsen S P, Shen Z-Q, et al. ApJS, 2011, 196: 9
- [66] Chen X, Shen Z-Q, Li J-J, et al. ApJ, 2010, 710: 150
- [67] He J H, Takahashi S, Chen X. ApJS, 2012, 202: 1
- [68] Ge J X, He J H, Chen X, et al. MNRAS, 2014, 445: 1170
- [69] Yu N-P, Wang J-J. MNRAS, 2015, 451: 2507
- [70] Voronkov M A, Caswell J L, Ellingsen S P, et al. MNRAS, 2014, 439: 2584
- [71] Towner A P M, Brogan C L, Hunter T R, et al. ApJS, 2017, 230: 22
- [72] Cyganowski C J, Brogan C L, Hunter T R, et al. ApJ, 2011, 729: 124
- [73] Cyganowski C J, Brogan C L, Hunter T R. ApJ, 2014, 796: L2
- [74] Rosero V, Hofner P, McCoy M, et al. ApJ, 2014, 796: 130
- [75] Chen X, Ren Z-Y, Zhang Q, et al. ApJ, 2017, 835: 227
- [76] Dewangan L K. ApJ, 2017, 837: 44

The Massive Star Formation: Molecular Outflow and Extended Green Object

ZHANG Chang^{1,2}, LI Jin-zeng¹, YUAN Jing-hua¹

(1. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the main contributor of radiation and chemical enrichment of the universe, stars are the key targets for astronomical investigations. Therefore, it is crucial to figure out how stars and especially massive stars form in molecular clouds. The scenario of low-mass star formation has been well established. However the formation of high-mass stars ($>8M_{\odot}$) has been elusive for decades as high-mass star-forming regions are rare, always deeply embedded, the timescales are considerably short, and the natal environs are inevitably destroyed by strong feedbacks. We present here, the fundamental theoretical models and observational facts of star formation, which are followed by a summary of recent findings based on observations in infrared and radio bands. Additionally, molecular outflows which can serve as an excellent tracer of early phases of high-mass star formation (HMSF) are introduced. Up-to-date investigations of extended green objects, which are candidates of massive outflows, have provided new constraints on the HMSF models. The by-far status of HMSF studies is summarized and future perspectives are given in the last part of this paper.

Key words: star formation; massive star; molecular outflow; extended green object