



高分辨率深度观测揭示大质量原恒星团动态演化图景

许峰玮, 王科*

北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871

* 联系人, E-mail: kwang.astro@pku.edu.cn

Deep high-resolution observations reveal the dynamical picture of massive protostellar cluster evolution

Fengwei Xu & Ke Wang*

Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: kwang.astro@pku.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2024-0300

“至和元年五月己丑, 出天关东南, 可数寸, 岁余稍没。”《宋史·天文志》中的这一记载, 使今天的天文学家得以准确地追踪发生于1054年的那次造就了蟹状星云(SN 1054)的著名超新星爆发。这种天文现象是大质量恒星生命终结时产生的剧烈爆炸, 这场耀眼的光芒为恒星绚丽一生的谢幕。

大质量恒星(质量大于8倍太阳质量的恒星)不仅在死亡时如此华丽, 其早期形成和主序阶段更是在星系演化中扮演着重要角色。它们不仅持续释放耀眼的光芒, 通过强烈的紫外光子电离气体, 而且通过内部的核合成和星风等改变星系及宇宙中的化学组分。然而, 大质量恒星究竟如何形成至今尚无定论。

过去数十年的观测研究表明, 星系中存在着冷(约为10~20 K)而致密(约大于 10^3 particles/cm³)的分子气体云。这些云内部存在湍动, 用于平衡整体的引力坍缩, 但局部则因引力不稳定性碎裂而形成致密云核(大于 $10^5\sim 10^6$ particles/cm³), 后者便是诞生大质量恒星的摇篮^[1]。然而, 这些云核在早期阶段的质量不足以形成大质量恒星, 这意味着它们在演化至大质量恒星前必须以某种方式进一步吸积足够多的质量。此外, 这些云核总是成团形成, 它们的质量分布, 即云核质量函数与恒星的初始质量函数有着类似的形式, 因此这些正在形成恒星的云核团被认为是星团的前身, 从而被称为大质量原恒星团(以下统称为原恒星团)。

原恒星团是研究大质量恒星形成的基本单元。过去单天线望远镜时代的研究由于观测分辨率受限, 往往将其当作整体, 类比小质量的恒星进行分析。可是, 考虑到原恒星团形成过程中内部气体和云核动力学的复杂性, 我们需要使用高分辨率的设备来解析与恒星形成直接相关的单个云核尺度。此

外, 碎裂和吸积是随时间变化的动态过程, 原恒星团因而为动态的研究对象。在几个自由落体时标尺度内, 原恒星团的质量即可完成装载。相比其百万年或更短的形成时标, 天文观测却只能捕捉其漫长一生中的短暂一瞬。为了描绘出它们形成过程的整个动态演化图景, 研究者需要观察大量处于不同演化阶段的样本, 以复现它们在不同时间点的状态^[2]。

新一代射电干涉阵的高空间、谱线分辨率和高灵敏度性能使得这样的工作成为可能。为此, 基于中国科学院上海天文台刘铁研究员为项目PI(principal investigator)的阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波天线阵列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)观测项目, 我们发起研究项目——“ALMA Survey of Star formation and Evolution in Massive Protoclusters with Blue Profiles”(ASSEMBLE), 对11个光质比大于10、质量大于1000太阳质量且面密度大于1 g/cm³的活跃大质量恒星形成区, 开展了深度(质量灵敏度约小于0.1太阳质量)拼接成图(约20万天文单位)。ASSEMBLE的观测设置与另一个国际团组的“ALMA Survey of 70 μ m Dark High-mass Clumps in Early Stage”(ASHES)项目^[3]高度匹配: 不仅具有类似大小的视场, 而且有非常相似的质量灵敏度和空间分辨率(约3000天文单位)。更重要的是, 后者的研究对象在演化序列上更加早期, 是一批中红外波段暗弱(温度和光质比都较低)的样本, 代表了大质量恒星形成的极早期阶段。ASSEMBLE和ASHES两个项目可以说是天生一对——具有类似的观测设置, 但却研究了不同演化阶段的原恒星团, 这非常利于我们进行对比研究, 从而构建原恒星团形成的演化序列图景。

针对ASSEMBLE项目研究的11个大质量恒星形成区, 我们首先采用了先进的算法, 能够同时针对背景、纤维状结构

和致密云核进行图像分解。我们提取了共248个致密云核(后简称ASSEMBLE云核)。它们的大小约为2000~6000天文单位,质量约为1~20太阳质量,面密度为0.5~3 g/cm³,未来有坍缩形成恒星的潜力。对比ASHES项目中所探测到的云核(以下简称ASHES云核),ASSEMBLE云核总体质量和面密度提升了近两倍,这代表着原恒星团在演化的过程中,成员的密度和质量都在增加。此外,每一个ASSEMBLE原恒星团中,最大质量的云核与大尺度的云团块的质量存在0.75次幂指数相关性,即更大质量的云团块会孕育更大质量的云核。这一点与成熟星团中观测到的“恒星团总质量和最大恒星质量”的相关性^[4]有着异曲同工之处。更有意思的是,这种相关性却没有在ASHES中发现,这意味着这种质量的相关性是可能演化的结果,是在动态过程中不断建立的,而非在早期碎裂阶段就产生了。在数值模拟中^[5],这种质量增长和相关性的建立过程被认为起源于云团块中存在的纤维状气体流。在另一项研究成果中,我们采用高灵敏度、高分辨率的分子探针,在ASSEMBLE样本之一SDC335大质量恒星形成区中追踪到了4条长达数10天文单位的纤维状气体流,快速地将物质从大尺度的分子云团块带入致密的原恒星团中^[6]。这是从观测上对数值模拟结果的直接验证,有力地解释了我们看到的原恒星团中云核质量的演化性质。

这批样本同时被另一单天线望远镜——阿塔卡马探路者实验望远镜(Atacama Pathfinder Experiment, APEX)的大型

观测项目所覆盖。利用HCN (4-3)和CO (3-2)的转动跃迁谱线,这些大质量云团块正以数百太阳质量每百万年的速率吸积气体。如果大质量云团块经历整体坍缩过程,可预期内部的物质会变得更加致密,从而云核的间距会变小。我们系统地统计了ASSEMBLE和ASHES的原恒星团,发现与理论估算结果一致,从而证实了这一猜想。

在星团中,恒星频繁地通过两体相互作用交换动能,使得动能达到均分,其结果是大质量的恒星因为丢失能量潜入星团内部,而小质量恒星因为得到能量而分布在外侧,因而称之为质量分层。然而,关于质量分层是否纯粹是动力学效应,还是继承自原始原恒星团的特性,仍有争论。目前仅有少数研究团队试图在大质量原恒星团中寻找所谓的“原始质量分层”,而他们的努力受到空间分辨率不足或样本量小的限制。如ASHES团队^[3]近期报告称,在大质量星团形成的初始阶段并没有发现明显的原始质量分层。有意思的是,大于7成的ASSEMBLE原恒星团表现出明显的质量分层。这代表着从早期的ASHES到演化晚期的ASSEMBLE,原恒星团中的质量分层逐渐建立。进一步探究发现,这种质量分层的演化不能仅由纯粹的动力学效应解释,因为系统的动力学弛豫时间尺度(约10⁷~10⁸年)远长于这些原恒星团的生命周期(约10⁵~10⁶年)。该团队指出,这种质量分层与“竞争吸积”模型^[7]一致,即位于中心的致密云核由于更深的引力势,倾向于积累更多的质量。在ASSEMBLE样本中观察到的原始质量分层有助于解

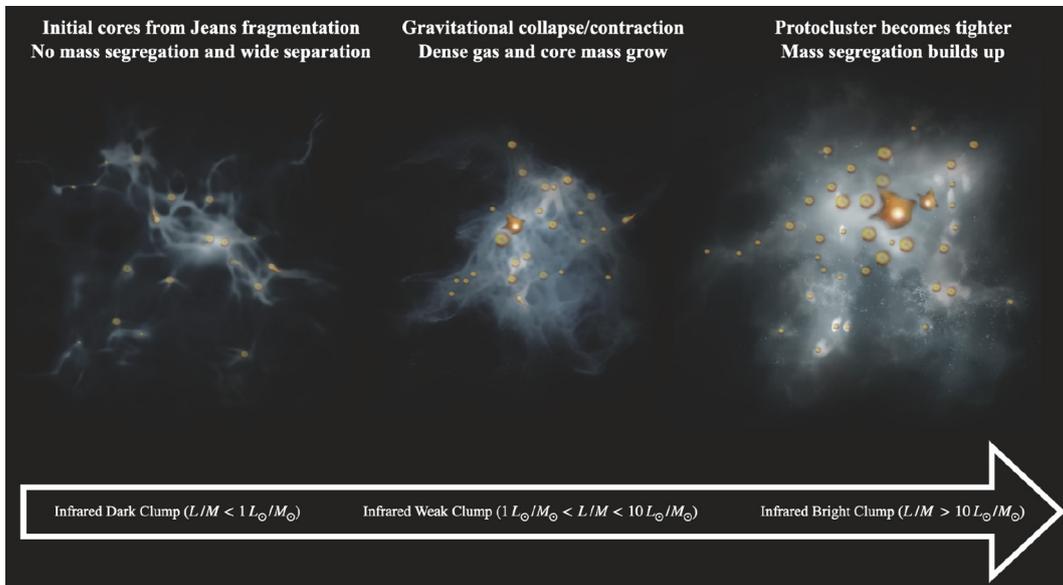


图1 (网络版彩色)大质量原恒星团的演化图景(概念图)。自左至右为演化早期至演化晚期,大质量云团块在中心原恒星加热下从红外暗变为红外亮,因此光质比(L/M)不断增加。在演化早期,致密云核由热金斯碎裂诞生,间距较大,没有明显的质量分层。随后在引力作用下,气体吸积至云核,云核质量增长,间距收缩,且部分开始形成原恒星。最后,质量分层建立

Figure 1 (Color online) The evolutionary picture of massive protocluster evolution, from infrared dark (left), to infrared weak (mid), and to infrared bright (right), so the luminosity-to-mass ratio (L/M) increases. At the initial stage, dense cores form from thermal Jeans fragmentation with wide separation and no mass segregation. Subsequently, core mass grows as gravitational contraction and assemble of gas into the cores, and the core separations shorten. Finally, mass segregation builds up in the late stage

决传统星团中质量分层起源问题, 为大质量恒星团形成过程提供了新的理解角度。

结合上述发现, ASSEMBLE团队提出了一个关于大质量原恒星团演化的全面动态视角(图1)。在初始阶段, 原恒星团起源于热力学金斯碎裂, 表现为较大的云核间距(约0.1秒差距)和质量未分层。随后, 纤维状结构作为“传送带”, 促进物质从团块尺度的弥散介质(密度约 $10^3\sim 10^4$ particles/cm³)向致密云核(密度约 $10^5\sim 10^6$ particles/cm³)的转移, 从而逐渐建立

起团块与云核之间的联系。与此同时, 原恒星从致密核心中形成, 导致气体和尘埃的加热, 团块转变为红外弱状态。由于持续的引力坍塌和收缩效应, 原恒星团变得更加紧密(平均间距约0.035秒差距), 核心间距缩小, 晚期出现质量分层。

在下一阶段的研究中, ASSEMBLE团队计划将样本数量从数十扩大到数百, 以便更全面地理解大质量原恒星团的演化路径。我们正踏上一条漫长的旅程, 捕捉原恒星团生命中的每一个短暂瞬间, 见证它们的诞生和演变。

致谢 感谢国家重点研发计划(2022YFA1603100)和国家自然科学基金(12033005)资助。

推荐阅读文献

- 1 Motte F, Bontemps S, Louvet F. High-mass star and massive cluster formation in the Milky Way. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2018, 56: 41–82
- 2 Xu F, Wang K, Liu T, et al. The ALMA survey of star formation and evolution in massive protoclusters with blue profiles (ASSEMBLE): Core growth, cluster contraction, and primordial mass segregation. *Astrophys J Suppl Ser*, 2024, 270: 9
- 3 Sanhueza P, Contreras Y, Wu B, et al. The ALMA survey of 70 μm dark high-mass clumps in early stages (ASHES). I. Pilot survey: Clump fragmentation. *Astrophys J*, 2019, 886: 102
- 4 Weidner C, Kroupa P, Pflamm-Altenburg J. The $m_{\text{max}}-M_{\text{cc1}}$ relation, the IMF and IGIMF: Probabilistically sampled functions. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 434: 84–101
- 5 Guszejnov D, Markey C, Offner S S R, et al. Cluster assembly and the origin of mass segregation in the STARFORGE simulations. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2022, 515: 167–184
- 6 Xu F W, Wang K, Liu T, et al. ATOMS: ALMA three-millimeter observations of massive star-forming regions—XV. Steady accretion from global collapse to core feeding in massive hub-filament system SDC335. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2023, 520: 3259–3285
- 7 Bonnell I A, Bate M R, Clarke C J, et al. Competitive accretion in embedded stellar clusters. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2001, 323: 785–794