

文章编号: 1000-8349(2004)02-0122-12

恒星形成过程中的天体物理现象

秦胜利¹, 王俊杰¹, 赵刚¹, 吴月芳²

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 北京大学 天文学系, 北京 100871)

摘要: 恒星形成于分子云环境中。近 30 多年的观测研究使得天文学家对小质量恒星的形成有了相对明确的认识: 小质量恒星通过坍缩、吸积和向外流的路标而形成。至于大质量恒星, 其形成过程还存在着许多不确定因素, 现有的观测证据表明: 大质量恒星也可能通过坍缩、吸积和向外流的路标来形成, 但也不排除在星团中通过中小质量恒星聚合而成的因素。大质量恒星形成与致密电离氢区 (UCHII) 成协较好, 而与大质量恒星形成区成协的分子云环境中, 既有大质量恒星也有小质量恒星形成。综述了恒星形成各个阶段的观测结果和研究现状以及成协的天体物理环境情况。未来的观测和研究重点在于: 大质量恒星形成以及星团环境中的恒星形成。

关键词: 天体物理学; 恒星形成; 综述; 坍缩; 吸积盘; 外向流; HII 区
中图分类号: P152 **文献标识码:** A

1 引 言

恒星起源, 即恒星形成研究是天体物理学的基本课题之一, 对它的研究一方面有助于星系结构和演化的理解, 另一方面也关系到行星的形成, 所以在天体起源的研究中, 恒星形成研究起着枢纽作用。

对恒星形成一个最基本的看法是, 恒星由一个质量足够大的气体云在其自引力作用下坍缩而成。不考虑磁场和湍动时, 气体云自引力坍缩的判据是云质量 M 必须大于金斯质量 M_J , 即金斯判据。由能量平衡条件求得

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

这里 ρ 是云的质量密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), T 是温度, G 是引力常数, $\mu = 1.36$ 是气体云的平均原子权重, m_H 是氢原子质量, n 是粒子的数密度 (cm^{-3}), M_\odot 是太阳质量。观测得知, 只有分子云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 、 H_2 等分子屏蔽紫外辐射免遭破坏所要求的柱密度大致相等。也就是说恒星形成

收稿日期: 2003-10-28; 修回日期: 2003-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19935030); 中国科学院知识创新工程资助项目 (KJXC2-SW-T06)

于分子云。

1970 年在 2.6 mm 波长处观测到宇宙中丰度仅次于 H_2 的 CO 分子, 这在观测上使我们对恒星形成过程中分子云的坍缩和最早有可直接观测特征的外向流有所理解^[1,2], 恒星形成研究有了突破性的进展。近 30 年来红外 IRAS (Infrared Astronomical Satellite)、2MASS (2 Micron All Sky Survey)、ISO (Infrared Space Observatory)、毫米波和亚毫米波 SMA (Sub-

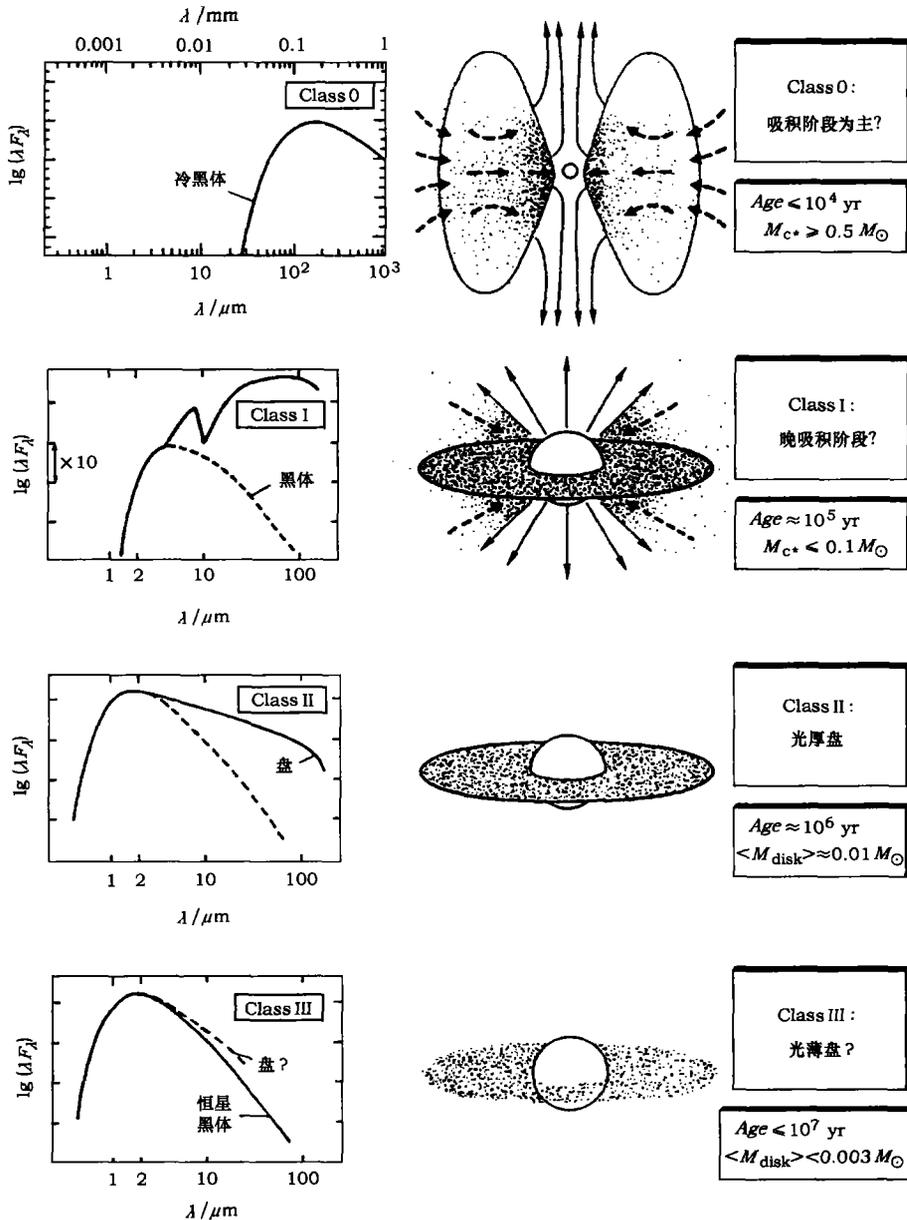


图 1 小质量恒星形成的演化序列和能谱分布图^[7]

Millimeter Array) 以及 VLA (Very Large Array)、GBT (Green Bank Telescope) 等望远镜技术的飞速发展, 为恒星形成研究提供了强有力的实测手段。通过能谱分布 (SED)、速度位置图以及在垂直于外向流方向的高激发密度谱线的等值线图, 确认了原恒星形成的吸积盘的存在。30 多年来对小质量恒星形成区的观测和理论研究表明^[3~6], 小质量恒星是在分子云中通过坍缩、吸积和外向流过程而形成的。Bachiller (1996)^[7] 提出分子云中小质量恒星形成和演化大致可分为 4 个阶段 (图 1), 即从 Class0 到 ClassIII 阶段: Class0 是引力坍缩和吸积阶段, 也有外向流现象, 能谱分布的峰值位置出现在大于 $20 \mu\text{m}$ 的亚毫米处, 能谱分布类似于 $15\sim 30 \text{ K}$ 的黑体谱, 时标 $\leq 10^4 \text{ yr}$; ClassI 是吸积和外向流阶段, 能谱分布的峰值在远红外和亚毫米处, 能谱比黑体谱宽, 有红外色余出现, 时标 $\approx 10^5 \text{ yr}$ 。Class0 和 ClassI 阶段都有大的气体和尘埃包层; ClassII 阶段的能谱比黑体谱宽, 能谱峰值在近红外处, 有红外色余, 这个红外色余由光厚的星周盘引起。ClassII 阶段的源能够在光学和红外波段被观测到, 时标 $\approx 10^6 \text{ yr}$; ClassIII 阶段的能谱类似于黑体谱, 能谱峰值在光学和红外处, 是零龄主序星或主序前的恒星, 时标 $> 5 \times 10^6 \text{ yr}$ 。

对于大质量恒星的研究目前还处于不甚成熟的阶段, 主要原因在于: 首先, 大质量恒星从分子云坍缩到形成主序星经历的时间很短 ($\leq 10^4 \text{ yr}$), 因此找到大质量原恒星的机会很少; 其次, 一旦大质量恒星演化到主序星之后, 光致电离产生的 HII 区会破坏周围的环境^[8]。那么大质量恒星是如何形成的? 一种观点认为, 大的分子云团块在星团外部星体的影响下, 通过坍缩、吸积和外向流形成大质量恒星。CO 稀有同位素和其他高激发密度谱线 NH_3 、CS、HCN、 H_2CO 以及 VLA 的观测, 证明了大质量恒星形成过程有可能类似于小质量恒星形成。

然而, 许多观测证据表明, 恒星形成活动大多发生在星团环境中, 大质量恒星的形成有可能是通过中小质量恒星的聚合 (coalescence) 而实现的^[9]。

2 分子云的坍缩

恒星形成的触发机制一般有两种, 即由于自引力导致的自发恒星形成机制和外部触发的受激恒星形成机制。前一种情况源于分子云本身内能的流失, 如热能辐射、磁能双极扩散、湍动能的粘滞损耗等导致的分子云坍缩; 后一种情况中, 受激恒星形成的外部条件主要有: 旋涡密度激波、云-云碰撞, 以及已经形成的恒星的影响等。其中已有的恒星对恒星形成的影响包括恒星形成中的物质喷射、致密电离氢区以及星体的辐射等^[3]。

坍缩是恒星形成中最基本的过程。当内部因素或外部触发因素导致分子云团块不稳定时, 这些团块将向中心坍缩。在坍缩过程中, 当离心力与引力平衡时, 引力坍缩将终止。在不考虑湍动和磁场影响的情况下, 先里后外 (inside-out) 的坍缩模型数值模拟的结果给出: 坍缩在光厚谱线上的线心有吸收特征, 表现为红峰和蓝峰的不对称, 而光薄谱线是单峰轮廓。这个阶段一般伴随有外向流和旋转运动。图 2 是坍缩的观测示意图^[10]。第 1 个坍缩的范例是 Loren 等人 (1974)^[11] 利用 CO 分子 ($J=1-0$) 谱线发现的。至今发现小质量恒星形成区的坍缩范例约 30 多个, 而大质量恒星形成区的坍缩范例较少。Zhang 等人^[12,13] 对大质量恒星形成区 W51 的坍缩进行了详细的研究, 认为大质量恒星形成区的坍缩和小质量恒星形成区的坍缩在温度、速度和密度上均有所不同。由分子云坍缩形成的分子云核是原恒星栖息的场所。

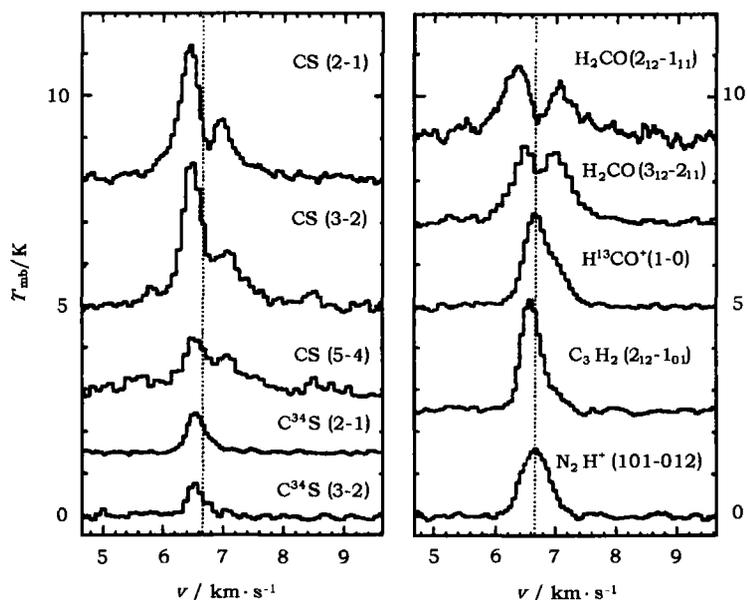


图 2 具有坍缩特征的 IRAM 04191+1522 的谱线观测图^[10]

3 恒星形成区的吸积过程

分子云团块坍缩时, 物质的下落是通过围绕年轻恒星的吸积盘向中心原恒星传输物质, 并且通过磁场带走吸积物质中的剩余角动量。吸积盘由于其尺度小, 深埋于分子云中, 给观测造成了极大的困难。对吸积盘的探测主要是: (1) 通过在与外向流垂直方向进行高激发密度的谱线成图观测, 判断其是否有扁平结构存在; (2) 判断速度 - 位置图是否符合开普勒运动模型; (3) 判断能谱分布图是否存在紫外和红外色余^[14,15]。

围绕年轻恒星的第一个吸积盘发现于 1987 年^[4]。在这之后的几年中, 该方面的研究进展缓慢。直到 1990 年之后, 由于射电望远镜灵敏度的提高, 才发现了更多的吸积盘, 但这些吸积盘都在小质量恒星形成区附近。第一个围绕大质量年轻恒星 IRAS 20126+4104 的吸积盘是由美国国立天文台的 VLA 发现的^[14]。图 3 是该吸积盘的证认图。

4 分子外向流及其成协现象

4.1 外向流概述

在原恒星形成和演化早期, 几乎所有的星体都经历一个高能的质量喷发阶段——分子双极外向流(相当于小质量星形成时的 Class 0 和 Class I 阶段)。分子外向流一般与快速移动的

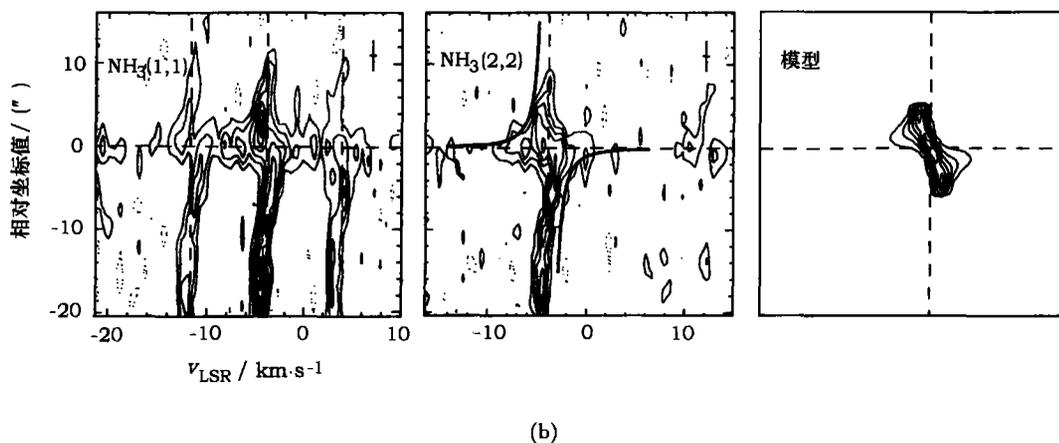
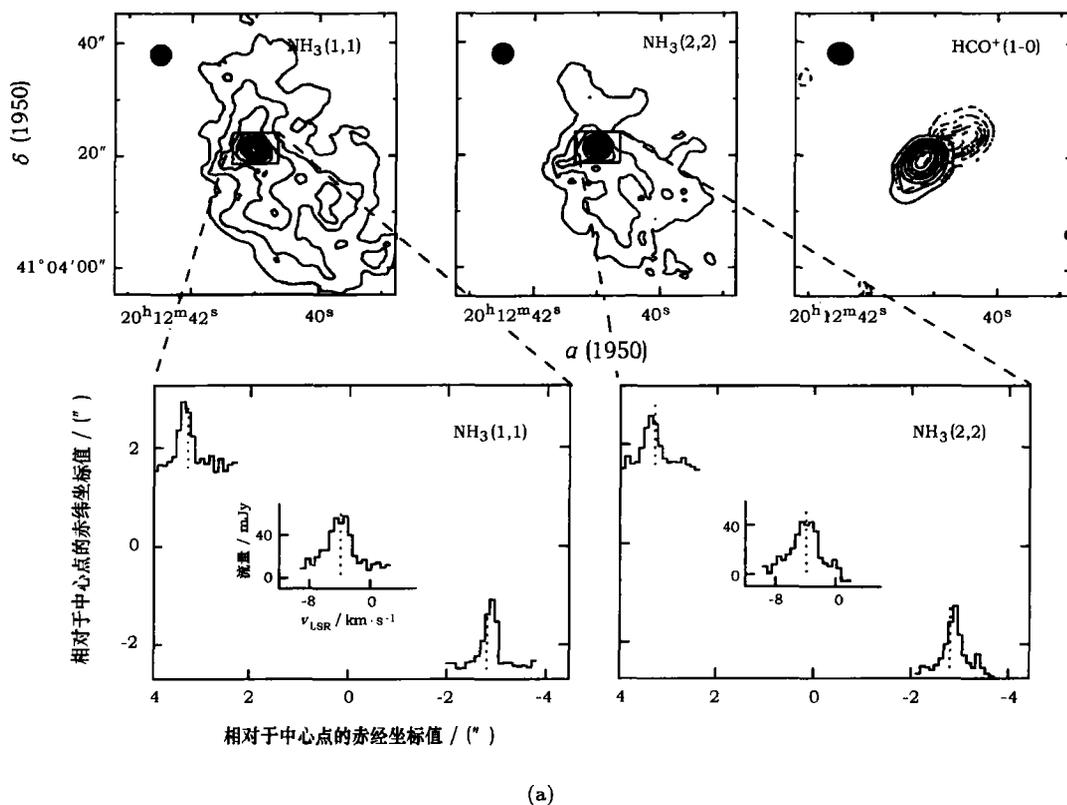


图3 IRAS 20126+4104 吸积盘的成图观测^[14]

其中 (b) 图的纵坐标为相对于中心点的沿着盘的主轴 (东北 - 西南方向) 的相对坐标值。

HH 天体、高速水脉泽、激波激发的氢分子发射和氧化硅喷流等成协^[5,7]。另一方面, 分子外向流与原恒星吸积盘在原恒星形成过程中存在着一对一的关系, 它们都是恒星正在形成的标志。然而吸积盘由于其尺度小, 深埋于分子云中, 探测比较困难, 因此对恒星形成区的位于分

子云核外部的具有大尺度延展的分子外向流(图4)^[16]的探测,就显得尤为重要。常见的方法是根据巡天的¹²CO资料,利用宽线翼的¹²CO毫米波谱线来证认外向流^[17,18]。至今为止,利用上述方法已经在银河系发现和证认了300多个分子外向流^[19]。

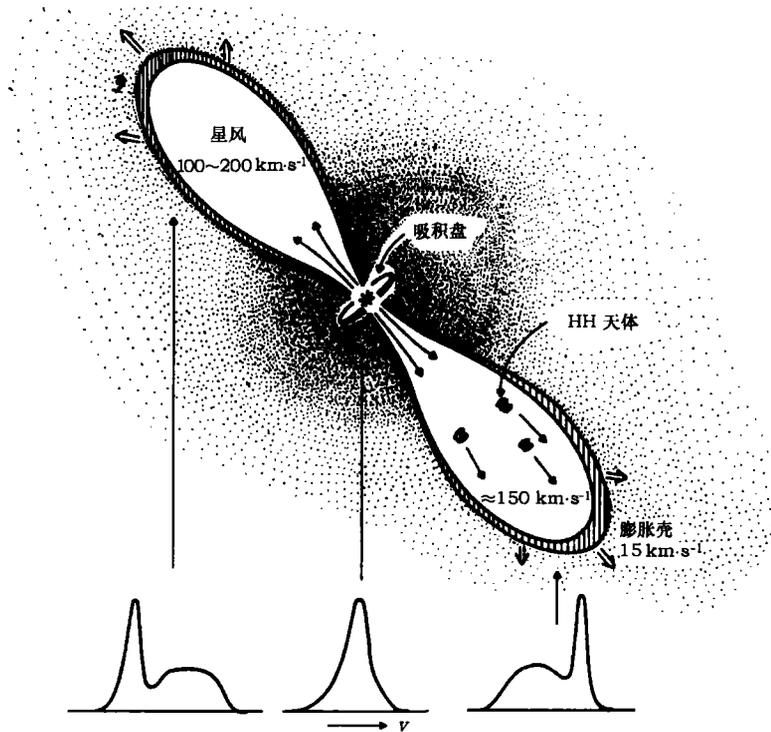


图4 L1551 外向流示意图^[16]

4.2 外向流对星际介质的影响

恒星形成活动中,吸积盘向中心传输物质,外向流带走中心分子云核的物质。此外,外向流与星云核的物质作用,可产生一系列物理(如激波、脉泽)和化学过程(如释放尘埃表面的分子,改变气态物质的化学丰富度),从而改变星云核的演化。分子云核的质量远大于原恒星本身的质量,因此分子外向流就很有可能驱散年轻星周围的气体和尘埃物质。更重要的是,外向流为星际介质注入新的能量,可能激发或影响下一代恒星的形成。例如,对处于Class0阶段的原恒星L1157区域的外向流的研究表明:该原恒星的光度只有11倍太阳光度,而外向流区域的运动温度却比原恒星附近的运动温度高,表明星风对外向流区域有很强的加热作用。此外,外向流还改变了气体物质的化学组成。对该外向流高分辨率研究发现^[20],其SiO丰度在激波波前上有很大提高,在激波波前上SiO无论速度还是位置都领先于CO,表明外向流是通过激波的弧形波前来驱动的,这给激波驱动理论提供了直接的观测证据。

4.3 与外向流成协的天体现象

(1) 脉泽

恒星形成区的脉泽有可能是喷流触发的激波与环境物质相互作用的产物,它可以出现在

喷流的尾部,也可以出现在喷流的头部。另一种可能是恒星形成区的脉泽是由恒星形成区的环境物质与星风相互作用所致^[21,22]。对 AFGL5142 研究表明,该区的水脉泽产生在一个大质量恒星形成区的吸积盘上,高速的下落物质和吸积盘上的物质相互作用会激发脉泽^[21]。脉泽出现在不同位置,也许是与其形成环境的不同有关,这为研究恒星形成区的局部物理条件提供了新的手段。

(2) HH 天体

HH 天体是一种半星半云状的特殊天体,大多与小质量恒星形成区成协,是高速星风与环境分子相互作用而导致的激波激发的表现。观测上,一般发现它们位于分子云的表面,与分子外向流成协,且与外向流有相同的方向和延展^[23]。也就是说,它们发生在恒星形成的早期阶段,是恒星形成的有效示踪物^[24]。

(3) 喷流

现在一般认为,小质量分子外向流由喷流驱动。大多准直性很好的外向流显示出 CO 分子谱线的线翼异常的宽,而且线翼成分很弱。对这部分弱的线翼积分成图,结果呈现出准直性很好的多个两极结点结构,这被认为是分子喷流^[25]。喷流的物理机制是激波激发。与分子外向流成协的喷流包括分子、原子、离子气体等的激波发射。H₂ v=1-0 和 SiO J= 1-0 跃迁示踪的分子喷流以及 HH 天体和光学禁线 [OI]λλ6630Å、6363Å; [NII]6538Å; [SII]λλ6716Å、6731Å 的光学喷流、厘米波段的电子自由-自由热辐射和中性原子氢的 21 cm 的射电喷流等均示踪这种激波激发的物理现象^[20,23,26~29]。

5 恒星形成与致密电离氢区和光学电离氢区的研究

5.1 大质量恒星形成与致密电离氢区

致密电离氢区 (UCHII) 是埋藏在分子云中的电离星云,其电子密度大于 10^4 cm^{-3} ,半径小于 0.1 pc,与大部分大质量恒星形成区成协都较好。Wood 和 Churchwell (1989)^[30] 研究了大质量原恒星候选体在银河系的分布,提出了致密电离氢区的 IRAS 颜色判据: $\lg(F_{60}/F_{12}) \geq 1.30$ 和 $\lg(F_{25}/F_{12}) \geq 0.57$ 。由于 UCHII 区具有丰富的自由电子,可以产生电子自由-自由辐射和射电复合线。在观测上,可以利用射电复合线,借助银河系旋转曲线算出电离氢区的距离,还可利用自由-自由辐射的连续谱成像求得电离氢区的尺度和其他参数。

UCHII 区是埋藏在母云中新形成的大质量恒星的标志,但是并不代表大质量恒星形成的最早阶段^[31]。在 UCHII 区出现之前,大质量恒星形成研究集中在致密分子云核的探测,这种分子云核是原恒星核 (prestellar core)。对 Orion 星团 4 个分子云核的 NH₃(1,1),(2,2) 反演谱线成图观测表明,这 4 个分子云核没有成协的红外源,也没有 UCHII 区的厘米波段辐射^[32]。它们的密度变化趋势呈由外向内递增趋势;而温度变化趋势相反,云核边缘的最高温度达 28 K,云核中心的最低温度为 13 K;由于这种分子云核还没有达到原恒星阶段,在小于 $2 \mu\text{m}$ 的近红外没有辐射;分子云核区域没有远红外波段的辐射;也没有外向流出现。这种云核应该是大质量恒星形成的最初阶段。

热核 (hot core) 是致密 ($\leq 0.1 \text{ pc}$)、高密度 ($n_{\text{H}} \geq 10^7 \text{ cm}^{-3}$)、热 ($T \geq 100 \text{ K}$) 的分子云核^[33]。Churchwell^[31] 和 Kurtz 等人^[33] 认为,热核是仍然经历着快速吸积和外向流的大质

量原恒星。这个阶段也被称为 PUCHs (Precursors of UCHII regions), 即 UCHII 区的前身。PUCHs 一般由中心的大质量原恒星和成协星团的低质量星加热。由于快速吸积, 原恒星不能产生可探测的 UCHII 区。当吸积完全终止, 大质量原恒星开始燃烧中心氢时, 利用射电复合线和射电连续辐射就可以探测到 UCHII 区的辐射。在 PUCHs 和 UCHII 区阶段, 都可以探测到大质量恒星形成阶段的坍缩、吸积和外向流。也就是说, 大质量原恒星也可能通过坍缩、吸积和外向流来形成。

5.2 恒星形成与光学电离氢区

光学电离氢区的辐射照亮分子云团块的一个表面而形成亮环云 (bright-rimmed cloud)。恒星形成的另一种外部触发机制就是发生在亮环云中由辐射驱动的暴缩作用 (radiation-driven implosion)。辐射驱动的暴缩过程一般发生在与电离氢区成协的团块中, 这些团块被环状亮云表面气体的共生激波挤压, 从而形成恒星。亮环云中的恒星形成区一般有外向流存在, 其成协源的热光度也大。Sugitani 等人 (1989)^[34] 研究了光度及其与云核质量比的关系, 发现在亮环云中的 IRAS 源的这一比值明显大于埋藏在孤立云或暗云复合体致密核中的 IRAS 源。与亮环云成协的 IRAS 源一般具有冷的色指数, 这表明它们中很可能存在年轻星体或原恒星。亮环云与老的电离氢区成协 ($\tau \geq 10^6$ yr), 而和分子外向流成协的 IRAS 点源年龄 $< 10^6$ yr, 星云的这种物理条件与单星形成的暴缩模型相吻合 (图 5)。

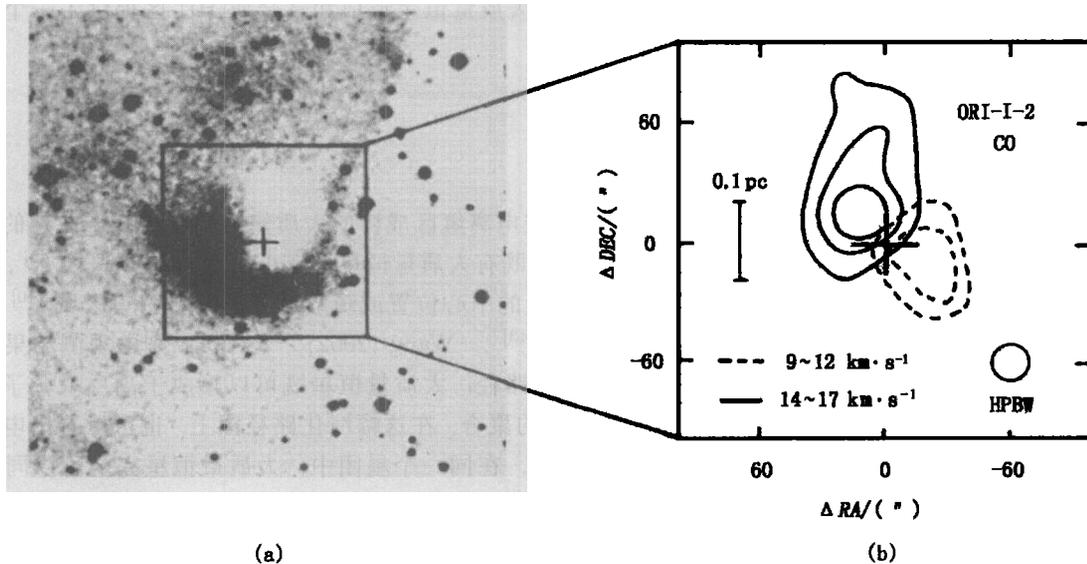


图 5 ORI-I-2 亮环云中的恒星形成^[34]

(a) POSS (Palomar Observatory Sky Survey) 图; (b) 亮环云中的外向流。

亮环云中的恒星形成是有序的恒星形成活动。如果近红外源满足 $J - K \geq 1.2$, 那么可以认为这个近红外源是年轻星体。这些近红外源一般沿着亮环云的轴线排列, 相对年老的恒星集中在亮环云的头部, 年轻的趋向于亮环云的尾部。亮环云中的恒星形成有一个从头部到尾部、从年老到年轻的传递, 也就是说亮环云中的恒星形成在时间和空间上是有序的^[35]。

5.3 银河系电离氢区的元素丰度分析

Shaver 等人 (1983) ^[36] 用光学光谱和射电复合线观测资料, 对银河系 67 个 ($3.5 \text{ kpc} < R_G < 13.7 \text{ kpc}$, R_G 是银心距) 光学电离氢区进行了温度和元素丰度的分析。他们发现银河系电离氢区的平均电子温度随 R_G 的增加而增加, 元素丰度梯度随 R_G 的增加而减小。Afflerbach 等人 (1996) ^[37] 用射电复合线对银河系 18 个致密电离氢区进行了观测, 结果表明: 银河系致密电离氢区和光学电离氢区的电子温度有相同的变化趋势, 即 $T_e(\text{K}) = (5540 \pm 390) + (320 \pm 64)R_G(\text{kpc})$, 而 T_e 的平均值要高于 Shaver 等人 (1983) 的结果 1500 K; 基于 T_e - R_G 关系, 利用光电统计平衡模型, Afflerbach 等人 (1996) ^[37] 也得出了银河系致密电离氢区的氧元素丰度关系: $d(O/H)/dR_G = (-0.047 \pm 0.009) \text{ dex} \cdot \text{kpc}^{-1}$, 这与 Shaver 等人 (1983) 所得的光学电离氢区的结果一致。利用红外精细结构谱线和射电复合线数据, Lester 等人 (1987) ^[38] 和 Afflerbach 等人 (1997) ^[39] 得出: (1) 银河系致密电离氢区的平均电子温度随 R_G 以 $300 \text{ K} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 的幅度增加; (2) O、N 和 S 的平均丰度随 R_G 以 $0.065 \text{ dex} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 的幅度减少; (3) 在相同 R_G 处, 致密电离氢区和光学电离氢区的化学丰度相同; (4) 用 ^{12}CO 和 ^{13}CO 得出的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 和 N/O 存在着很好的相关性。也就是说, 银河系电离氢区的元素丰度是由 CN 过程产生的, 恒星形成的原初分子云核和它附近的星际介质有相同的物质构成。迄今为止所发现的银河系中金属丰度最低的电离氢区是与 IRAS 04000+5052 成协的电离氢区, 它可能是由于该区域的气体星云物质是被吸积而来的河外贫金属星系物质, 或者来自于银河系形成早期, 而且没有受到临近物质化学污染的缘故。这一实例为研究大质量恒星形成和贫金属 HII 区提供了一个很好的样本 ^[40]。

6 星团中的恒星形成

人们已经对孤立环境中的恒星形成, 以及与电离氢区成协的大质量恒星形成有了一定的认识。然而, 另一个重要的观测事实是, 年轻星团中既有大质量恒星也有小质量恒星形成 ^[41,42], 大质量恒星 ($M > 10 M_\odot$) 一般位于年轻红外星团的中心位置或疏散星团的恒星密集区域 ^[40]。因此, 大质量恒星也有可能通过聚合来形成 ^[9,43]。Wang (2002) ^[44] 对一系列的观测结果进行了比较分析, 给出了大质量恒星形成的可能路径: 大质量恒星既可以形成于高质量分子云的坍缩, 也可以形成于低质量云中小质量恒星的聚合。在这幅演化路径图上, 也可以看出电离氢区从致密状态到延展 (extended) 状态的演化。在同一个星团中, 大质量恒星完全可以同时通过吸积和聚合来形成。

星团中的恒星形成有可能是有序的, 即刚刚诞生的恒星压缩它附近的分子云, 触发下一代恒星形成。星团中的恒星形成的空间分布和年龄分布, 证明了星团中的恒星形成是有序的恒星形成。小空间尺度上有序的恒星形成发生在小的红外星团中。对与 IRAS 04000+5052 成协的小的红外星团的研究表明 ^[40], 这个区域中的恒星形成具有一个年龄序列 (图 6)。图 6 显示, 位于主序带右边的近红外源是年轻星体, 最靠右边的是最年轻的星体。Sugitani 等人 ^[35] 对 6 个亮环云进行了近红外研究, 发现在这 6 个亮环云的主轴上, 近红外源在空间上按年龄排序, 即年老的近红外源更靠近激发亮环云的激发星, 而年轻的近红外源远离激发星。近红外源的空间和时间分布特性同样说明星团中的恒星形成有可能是有序的 ^[35,40,45~47]。

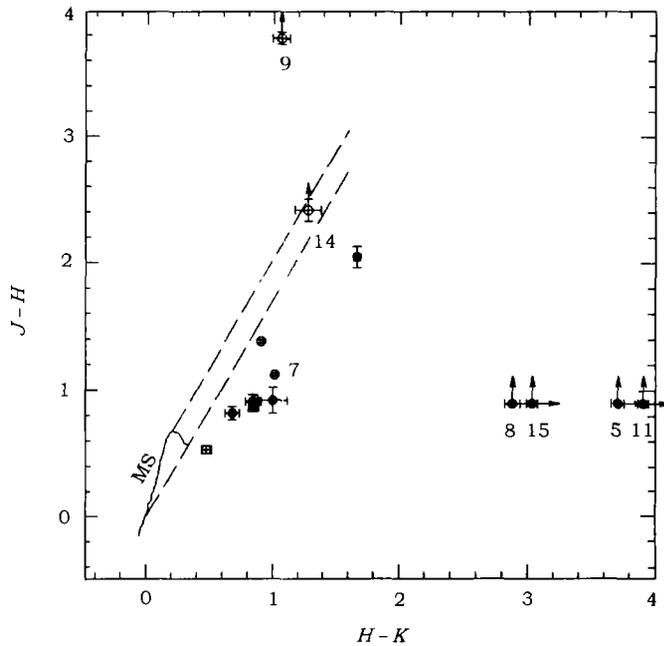


图 6 与 IRAS 04000+5052 成协的红外星团的近红外双色图^[40]

7 结论与展望

在观测和理论上,对单颗恒星形成,尤其是小质量恒星形成过程的认识已比较明确。而大质量恒星形成机制,还存在着诸多问题。大质量恒星的形成路标也许类似小质量恒星,即通过坍缩、吸积和外向流来形成。然而,大质量恒星形成与致密电离氢区成协较好,大质量恒星更多地形成于星团环境中,而且位于星团的中心,因此它们也有可能聚合而成。光学电离氢区中的恒星形成活动,是星团中有序的恒星形成。

目前,国际上投入了大量的空间和大型地面设备来进行大质量恒星形成以及星团环境中恒星形成的研究。未来的观测和研究在于,综合利用红外、毫米/亚毫米以及更高精度的望远镜对大质量恒星形成以及星团中恒星形成问题进行多波段研究。已发射的 SIRTf (Space Infrared Telescope Facility) 的一个主要课题就是研究星团中的恒星形成,寻找恒星形成最初阶段的暗弱天体。

参考文献:

- [1] Snell R L, Loren R B. ApJ, 1977, 211: 122
- [2] Bally J, Lada C J. ApJ, 1983, 265: 824
- [3] Zhou S, Evans N J II. ApJ, 1990, 363: 168
- [4] Sargent A I, Beckwith S W. ApJ, 1987, 323: 294

- [5] Lada C J. *ARA&A*, 1985, 23: 267
- [6] Shu F H, Adams F C, Lizano S. *ARA&A*, 1987, 25: 23
- [7] Bachiller R. *ARA&A*, 1996, 34: 111
- [8] Shepherd D S, Churchwell E. *ApJ*, 1996, 472: 225
- [9] Bonnell I, Bate M R, Zinnecker H. *MNRAS*, 1998, 298: 93
- [10] Belloche A, Andre P, Despois D *et al.* *A&A*, 2002, 393: 927
- [11] Loren R B, Peters W L, Vanden B P A. *ApJ*, 1974, 194: 103
- [12] Zhang Q, Ho P T P. *ApJ*, 1997, 488: 241
- [13] Zhang Q, Ho P T P, Chashi N. *ApJ*, 1998, 494: 6367
- [14] Zhang Q, Hunter T R, Sridharan T R. *ApJ*, 1998, 505: L151
- [15] Kikuchi N, Nakamoto T, Ogochi K. In: Nakamoto T ed. *Proc. of Star Formation 1999*, Nagoya: Nobeyama Radio Observatory, 1999: 233
- [16] Snell R L, Loren R B, Plambeck R L. *ApJ*, 1980, 239: L17
- [17] Wu Y, Huang M, He J. *A&AS*, 1996, 115: 283
- [18] Yang J, Jiang Z B, Wang M *et al.* *ApJS*, 2002, 141: 157
- [19] Wu Y, Wei Y, Zhao M *et al.* *A&AS*, 2003, submitted
- [20] Zhang Q, Ho P T P, Wright M C H. *AJ*, 2000, 119: 1345
- [21] Hunter T R, Testi L, Zhang Q *et al.* *AJ*, 1999, 118: 477
- [22] Patel N A, Nimesh A, Greenhill L J *et al.* *ApJ*, 2000, 538: 268
- [23] Mundt R, Fried J W. *ApJ*, 1983, 274: L83
- [24] Schwartz R D. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1975, 7: 548
- [25] Bachiller R, Martin-Pintato J, Planesas P. *A&A*, 1991, 251: 639
- [26] Mark J. *ApJ*, 1994, 436: L189
- [27] Cabrit S, Edwards S, Strom S *et al.* *ApJ*, 1990, 354: 687
- [28] Reynolds S P. *ApJ*, 1986, 304: 713
- [29] Russell A, Bally J, Padman R *et al.* *ApJ*, 1992, 387: 219
- [30] Wood D O S, Churchwell E. *ApJ*, 1989, 340: 265
- [31] Churchwell E. *ARA&A*, 2002, 40: 27
- [32] Li D, Goldsmith P F, Menten K. *ApJ*, 2003, 587: 262
- [33] Kurtz S, Cesaroni R, Churchwell E *et al.* In: Mannings V, Boss A P, Russell S S eds. *Protostars and Planets IV*, Tucson: Univ. of Arizona Press, 2000: 299
- [34] Sugitani K, Fukui Y, Mizuno A *et al.* *ApJ*, 1989, 342: L87
- [35] Sugitani K, Tamura M, Ogura K. *ApJ*, 1995, 455: L39
- [36] Shaver P A, McGee R X, Newton L M *et al.* *MNRAS*, 1983, 204: 53
- [37] Afflerbach A, Churchwell E, Acord J M *et al.* *ApJS*, 1996, 106: 423
- [38] Lester D F, Dinerstein H L, Werner M W *et al.* *ApJ*, 1987, 320: 573
- [39] Afflerbach A, Churchwell E, Werner M W. *ApJ*, 1997, 78: 190
- [40] Wang J J, Wei J Y, Hu J Y. *ApJ*, 2002, 573: 238
- [41] Testi L, Sargent A I, Olmi L *et al.* *ApJ*, 2000, 540: L53
- [42] Palla F, Stahler S W. *ApJ*, 1999, 525: 772
- [43] Wang J J, Hu J Y. *A&A*, 2000, 356: 118
- [44] Wang J J. In: Wu Y, Qin S L eds. *Proc. of Workshop on Massive Star Formation*, 2002, in press
- [45] Stahler S W, Palla F, Ho P T P. In: Mannings V, Boss A P, Russell S S eds. *Protostars and Planets IV*, Tucson: Univ. of Arizona Press, 2000: 327
- [46] Sugitani K, Fukui Y, Ogura K. *ApJS*, 1991, 77: 59
- [47] Qin S L, Wu Y F. *CJAA*, 2003, 3: 69

The Astronomical Phenomena in the Process of Star Formation

QIN Sheng-li¹, WANG Jun-jie¹, ZHAO Gang¹, WU Yue-fang²

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Department of Astronomy, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: It is well known that stars form in molecular clouds. Through almost 30 years' observation and study, astronomers come to a relatively clear agreement that low mass stars form by collapse, accretion and outflow. However, for massive star formation there still exist many indefinite factors. The observational results show that maybe massive stars form by collapse, accretion and outflow either, without excluding the possibility that massive stars form by coalescence. Low mass star forming regions include only low mass stellar objects, but massive star forming regions include not only massive stars but also low mass stars. Massive stars are associated with UCHII regions well in their embedded phase. This paper summarizes the results of observation and study for star formation in different phases. Massive star formation and star formation in star clusters will be very important in the future work.

Key words: astrophysics; star formation; review; collapse; accretion disk; outflow; HII regions