

大尺度赫比格 - 哈罗天体的光学研究进展

王 敏

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

摘 要

近期大视场 CCD 成像观测表明, 由年轻星激发的部分赫比格 - 哈罗 (HH) 天体的尺度范围超过 1 pc, 比过去认识的 HH 天体的尺度大了一个量级。目前的观测已经发现 pc 尺度的 HH 天体有数十个, 表明 HH 天体达到 pc 尺度是很普遍的, 这将深刻地改变人们对年轻星与其周围环境作用的认识。综合评述了 pc 尺度 HH 天体的观测性质, 讨论了巨 HH 天体对恒星形成的重大意义及其对周围星际介质的物理和化学影响。

关键词 恒星: 形成 — 星际介质: 赫比格 - 哈罗天体 — 星际介质: 喷流和外流

分类号 P155

1 引 言

年轻星诞生于致密的分子云核, 经常喷发高速喷流和星风。这些喷流和星风进入星际介质, 并与星际介质相互作用, 这些作用在近红外发射线区由分子氢和 [Fe II] 示踪, 在毫米波段表现为双极分子外流, 在可见光波段则由 HH 天体示踪。现在的一致认识是: HH 天体是由年轻天体喷发的外流所产生的激波激发星云, 它们显示外流碰撞周围分子云所产生的激波 (末端工作面)、以不同速度和在不同时刻喷发的流体所产生的激波 (内部工作面)。HH 天体在光学波段呈现 [S II]($\lambda\lambda 6717, 6731$)、 $H\alpha$ ($\lambda 6563$) 和 [O I]($\lambda\lambda 6300, 6363$) 发射谱, 近期的研究发现部分在红外波段具有 H_2 发射 ($2.12\mu\text{m}$) 的激波云也是 HH 天体 (比如 HH 212)。

HH 天体的形态和结构可以提供有关恒星形成的种种重要物理过程的线索。例如, 可以从一个外流在一很长时间跨度的情况, 观测到其激发源活动加强、事件爆发、休眠等阶段; 由来自年轻星的外流向周围分子云的影响可以推断外流传送到分子云中的能量和动量。在小尺度上, 外流能够瓦解单颗恒星周围介质, 使原恒星脱颖而出。在大尺度上, 外流能够提供湍流能源, 阻止周围分子云的继续坍缩, 从而调整恒星形成率。

1983 年 Mundt 和 Fried^[1] 发现了年轻星发出的喷流以超音速向相反方向运动形成双极

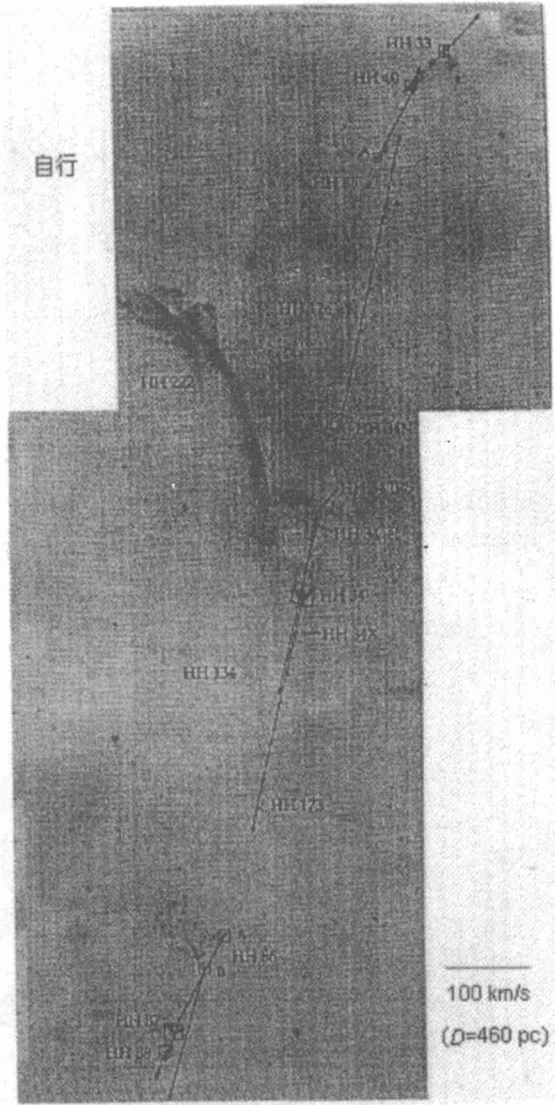
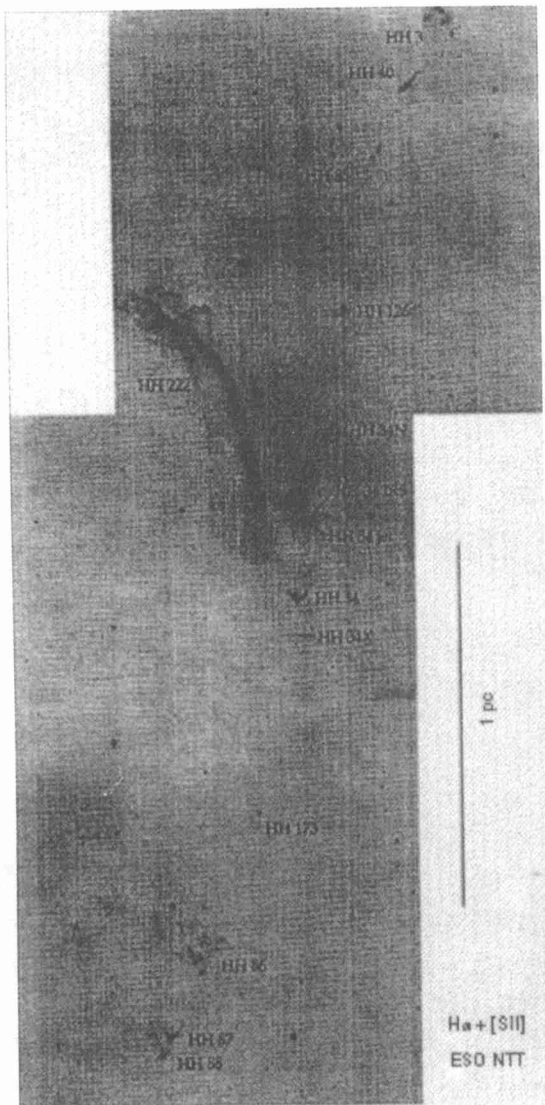


图 1a 巨 HH 34 系统的 CCD 图像^[3]
从北至南 HH 33、40、85、126、34N、34、173、
86/87/88 等构成一个长度约为 3 pc 的巨 HH 流

图 1b 巨 HH 34 系统的自行揭示了这些 HH 天体构
成一个有内在联系的巨 HH 流^[3]
自行随着离开中心源距离的增大系统减小

HH 天体，其尺度已普遍被认定是几分之 pc 的量级，典型值是 0.3 pc。但 Bally 和 Devine^[2] 在研究了 HH 天体形态的基础上，发现 Orion 中 L1641 区的一串 HH 天体实际上是一个尺度约为 3 pc 的巨 HH 天体流，使上述认识受到了挑战。他们在 1993 年用基特峰天文台的视场 23' 的 0.9 m 望远镜，配备 Tektronix 2k 的 CCD，发现 HH 34 喷流驱动了 20' 的 HH 长链 (500 pc 距离上投影长度为 3pc)。它包括了 HH 33/40、HH 85、HH 126、HH 34N、HH 34、HH 173、HH/86/87/88 等 (参见图 1a)，系一颗光度小于 $45 L_{\odot}$ 的年轻星 HH 34 IRS 激发。其高质量的图像由 Devine 等人^[3] 用欧洲南方天文台的新技术望远镜 (NTT) 拍得，与

表 1 pc 尺度 HH 天体一览表

区域名	源名	α (1950)	δ (1950)	投影长度 /pc	距离 /pc	所包括的 HH 天体	参考文献	备注	
L1448	L1448 IRS2	03:22	+30:35	1.8	300	267,195	13		
L1448	L1448 IRS3	03:23	+30:35	2.7	300	193,196	13		
NGC1333	HH 333 star	03:26	+31:15	0.3	220	333	13	许多 HH 天体, 图 4	
HH366@B5	B5 IRS11	03:44	+32:43	1.9	300	366E, 366W	5	bi, CO	
HH355	T Tauri	04:19	+19:25	1.5	140	355 North, 355 South	7	Bi, bi, H ₂	
HH300@B18	IRAS04239+2436	04:24	+24:36	1.2	140	300D, 300C, 300B, 300A	7	不对称, bi.	
L1551	L1551 NE	04:28	+18:00	0.41?	+1.06	140	728/29, 286	13	
HH410/411	Haro 6-10	04:29	+24:32	1.6	140	411, 413, 412, 184, 410	33		
HH 434-436	IRAS 04325+2402	04:31	+23:03	> 2.4	140	434, 435, 436	9		
HH114/115@L1589	IRAS 05155+0707	05:15	+07:07	2.6	460	114, 115	7		
HH243/244/245/179@L1582B	IRAS 05295+1247	05:30	+12:48	3.4	460	245, 243, 244, 179	7	5pc 的 CO 外流	
HH83/84@L1641	HH 83 IR	05:32	-06:31	1.4	470	83, 84	34		
Orion Nebula	OMC 1S	05:32	-05:24		470	202, 203/204, 528, 529, 269, 530	30	至少 6 个巨大 HH	
HH41/295	IRAS 05329-0505	05:33	-05:05	3.1	460	129, 128, 42, 41, 294, 293, 295	7	与 Haro 5a/6a 成协	
HH34@L1641	HH 34 IRS	05:33	-06:29	3	470	322?, 323, 33, 40, 85, 126, 34, 134?	173, 86, 87, 88	2	
HH306-310@L1641N	L1641N VLA source	05:33	-06:10	6.3	470	306, 307, 308, 309, 310	35		
HH1/2/401/402@L1641	VLA1	05:34	-06:48	5.9	470	401, 1, 2, 402	8		
HH403/404@L1641N	L1641N VLA source	05:34	-05:54	10.6	470	403, 404, 127	35		
HH38/43/43X	HH43-IRS1	05:35	-07:11	0.7	450	38, 43, 43X	16		
HH90/91@L1630	HH91 IRS	05:38	-01:11	1.3	460	91A-V, 91X-Z, 92, 790	36	H ₂ , CO	
HH24J/19	SSV 63W	05:43	-00:11	1.6	450	24J, 19, 27	16		
HH24C	SSV 63E	05:43	-00:11	1.1	450	20, 21, 37, 70, 24C	16		
HH11/113/311	IRAS05491+0247	05:49	+02:48	7.7	460	113, 111, 311	7	bi, CO	
HH396/397@G192.16-3.82	IRAS05553+1631	05:55	+16:42	10	2000	397U, 397, 396, 396Q	37	H ₂ , CO	
HH39	R Mon	06:36	+08:54	1.7	800	39	38		
HH124	IRAS06382+1017	06:38	+10:17	5.3	800	124W, 124, 124E	16		
HH160	Z Cma	07:01	-11:28	3.6	1150	160	39		
HH46/47	HH46/47 IRS	08:24	-50:50	2.6	450	46, 47	40		
HH56	Re 13	16:28	-44:48	1.0	700	56N, 56, 56S	41	bi.	
HH80/81	IRAS18162-2048	18:16	-20:49	5.3	1500	80, 81	42		
HH106/107	IRAS18269+0116	18:26	+01:16	1.2	310	106, 107	43		
HH365/165&1548C27	IRAS 20359+6745	19:41	+23:22	5.5	2400	365, 165	7		
HH376@L1152	PV Cep	20:35	+67:43	1.5	500	376A, 376B	7		
HH315/215		20:45	+67:46	2.6	500	315C, 315B, 315A, 215, 315D, 315E, 315F, 415?	7	bi, CO	
HH199@L1228		20:58	+77:24	1.8	300	199	39		
HH200@L1228		20:58	+77:25	1.6	300	200	39		
HH354@IC 1396@L1165	IRAS 22051+5848	22:06	+58:57	2.4	750	354	7	bi, CO	

注: 表中缩写的含义, bi: 双极的, ? 表示不确定是否包括在该 pc 尺度 HH 天体内

80年代的观测图像作自行比较,并结合高分辨率的长缝光谱分析得到: HH 34 IRS 北边的所有 HH 天体都向北运动且是红移的,而 HH34 IRS 南边的所有 HH 天体都向南运动且是蓝移的。径向速度和自行随着离开中心源距离的增大均系统地减小(参见图 1b)。HH 流的形态和运动学特征都呈现 S 形的点对称,这种对称说明源于 HH 34 IRS 的双极喷流的抛射方向可能存在长期变化。高速 CO 发射局限于 pc 尺度光学外流内部 0.1 pc 的部分。激波激发的 H₂ 发射在距离激发源 1.5 pc 接近外流末端的地方被观测到(北边在 HH 85 和 HH 33/40 处,南边在 HH 86/87/88 处),在靠近 HH 34 IRS 的内部工作面的地方却没有观测到 H₂ 发射。

大阵列 CCD 2048×2048 的高灵敏度和接近 1°×1° 的宽阔视场(FOV),为整个恒星形成云区的窄带深度成像提供了条件,这样的成像观测表明许多 HH 天体实际上组成 pc 尺度的巨大 HH 流。除了上面讨论的 HH 34 外,已经有光谱证据的 pc 尺度的 HH 天体的例子还包括 L1228 中的 HH 199 及 HH 200^[4]、Barnard 5 中的 HH 366^[5]、L1448 及 L1455 附近的几个 HH 天体链^[6]。HH 111 系统的自行由 Reipurth 等人测得^[7]。还有一批仅在成像的基础上被认为是 pc 尺度的 HH 天体。例如, Ogura^[8] 提出弓形激波 HH 401、HH 402 和 HH 1/2 组成投影线尺度大约是 6 pc 的巨 HH 天体; T-Tauri 系统的 HH 355 等^[7]。而王红池等人^[9] 则借助红外偏振的观测,揭示了 HH 434-436 可能是一个由 IRAS 04325+2402(图 2 中记为 04325)发出的长度超过 2.4 pc 的巨 HH 流的一部分。

2 观测性质

表 1 列出了一些巨 HH 天体及其尺度,这些巨 HH 天体具有以下观测性质。

2.1 大的动力学年龄

外流的年龄是一个很难测定的量,经常考虑的年龄是动力学年龄,它可由外流的长度除以速度得到。pc 尺度 HH 天体中激波的典型动力学年龄是 $\tau_{\text{dyn}} = 10^4 d_{\text{pc}} / v_{100} \text{yr}$, 其中 d_{pc} 是以 pc 为单位的巨 HH 天体的长度, v_{100} 是以 100 km·s⁻¹ 为单位的速度。这里讨论的巨 HH 天体的典型长度是 3 pc, v_{100} 取其典型值 1, 因此其最外层可见光部分的动力学年龄是 10⁴ ~ 10⁵ yr, 比以前所认识到的 HH 天体的动力学年龄差不多大一个量级。这一重新估计的时标接近恒星吸积阶段的时标以及从 CO 观测估计得到的外流的寿命。

2.2 多重内工作面

大多数巨 HH 天体流在外流的轴线上有多组 HH 天体,这就提供了抛射速度、抛射方向、也许还包括质量损失率、准直度随时间变化的线索。激波的间距随着离开激发源距离的增加而增大。有些 HH 天体在离激发源 0.1 pc 的范围内包含连续的喷流,另一些 HH 天体在其内部包含数个间距为几角分的密切联系的激波。大部分 HH 天体在最外层的激波间距很大,达 10'。观测到的自行与从发射线得到的激波的速度之比远大于 1, 这表明大部分 HH 天体是激波,这种激波是由快速流动成分赶超较慢速流动成分及非静止气体而形成。因此,大多数 HH

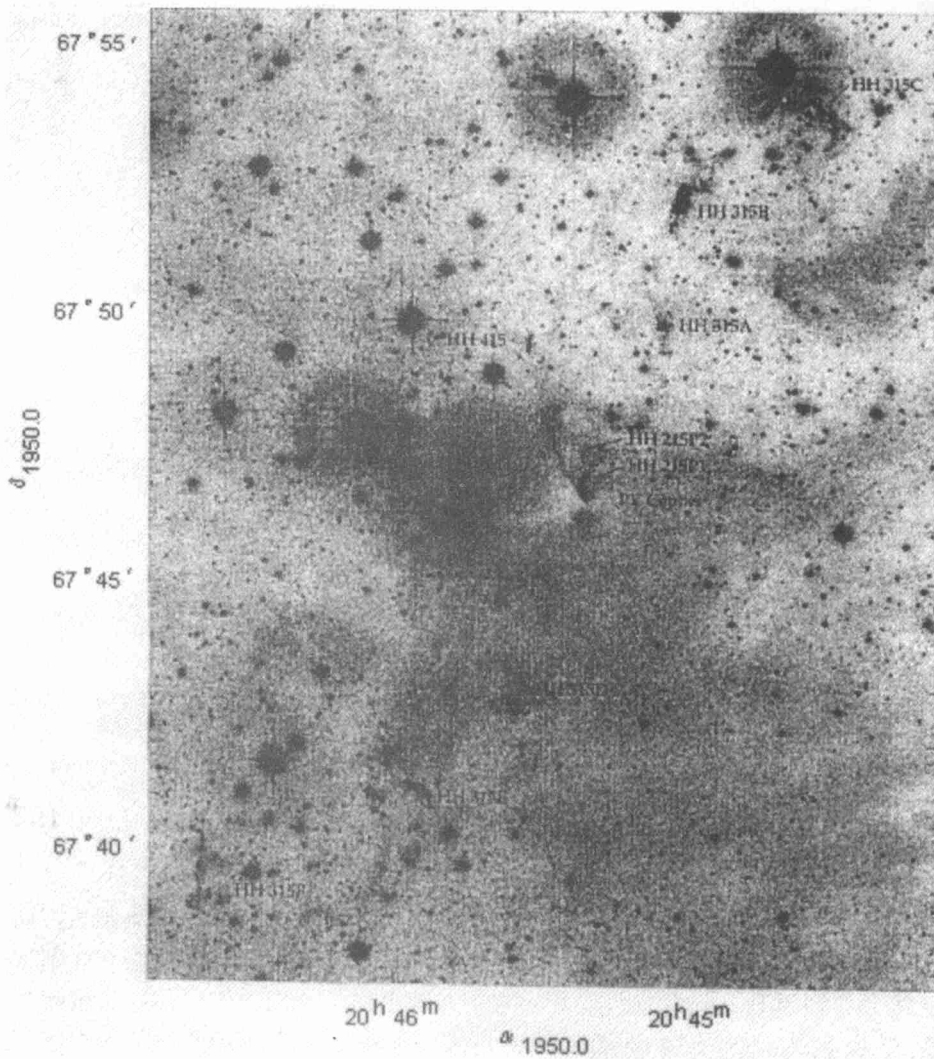


图3 PV Cep附近的 CCD 图像 [7]

从 HH 315C 至 PV Cep, 再到 HH 315F, 这个巨 HH 流明显呈现 S 形的点对称的线尺度随着离开激发源距离的增加而增大。而且, 随着离开激发源距离的增加, 激波看上去趋于复杂和混乱。Reipurth 等人 [7] 已经测定了 pc 尺度 HH 流外层几个激波的径向速度和自行, 包括 HH 83 系统中的 HH 84/59/60、HH 34 系统中的 HH 33/40/86/87/88、PV Cep 驱动的 HH 315 激波、HH 111 驱动的 HH 311/113。在这些系统中, 径向速度随着离开源的投影距离的增加而降低为原来的 $1/2 \sim 1/10$ 。HH 34 和 HH 111 系统的自行也显示相似的趋势。这说明外流不是被减速, 就是较远处的 HH 天体示踪源较早喷出较低速的喷发。

激波线尺度随着离开源距离的增加而增大, 距源在 $1'$ 内的激波半径趋于 $1'' \sim 10''$ 或更小, 离开源 $1' \sim 10'$ 的激波其尺寸趋于 $0.1' \sim 1'$ 。离开源几十角分的最外层激波其长度更大。最极端的例子是 HH 1/2 西北的 HH 401, 其长度超过 $20'$ 。对于一个速度随时间变化的喷流,

后激波气体被挤出偏离喷流的轴线(“溅射”),介质的侧向运动驱使激波进入喷流的包层或周围静止云。碰撞流体产生的“溅射”其横向速度是激波前导的上游和下游流体的密度对比和相对速度合成作用的结果。发射区域的尺寸取决于冷却时间和“溅射”速度以及在横向激波速度衰减至不能再激发可观测的辐射前流体时扩散的范围。当喷流扩散时,几何学的稀释将降低流体密度和增长冷却时间,进而周围的密度和压力趋于降低,导致大的激波结构。随着离开源距离的增加,激波形态趋于复杂。内弓形激波 HH 34 和 HH 111 以及激波 HH 47A、C 和 D 类似于理想的模型,而更多的 pc 尺度 HH 流的外层激波看起来不像弓形激波。HH 111 末端的 HH 113 和 HH 311、HH 34 末端的 HH 33/40 和 HH 86/87/88 具有由薄板状、纤维状和节点状组成的复杂形态,其中有些在大的弓形状包层内显示小尺度弓形激波结构。导致这些复杂形态的原因可能是,在巨 HH 天体的 $10^4 \sim 10^5$ yr 的动力学寿命期间,各种动力学不稳定性已经增长,甚至会以非线性方式增长。

2.5 吹出云核

典型恒星形成分子云核的尺度是 $0.1 \sim 0.3$ pc, 比这里讨论的外流大约小一个量级。 pc

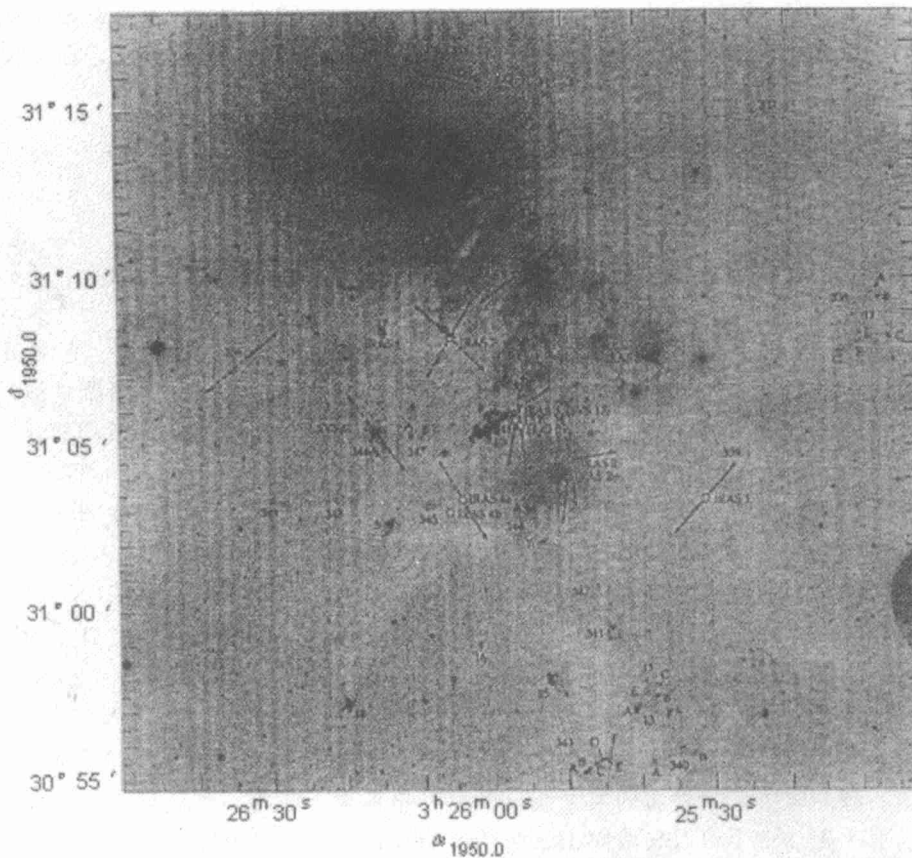


图 4 NGC 1333 中 HH 天体和外流密集分布^[13]

其中的数字为 HH 天体的分布,带箭头的线表示外流的倾向,实线指蓝移瓣,虚线指红移瓣

尺度外流中的许多 HH 天体正好位于包含年轻星的云核的可见边界处。这些外流已经爆发出了它们的母分子云核, 并且正向周围介质注入质量、动量和能量。外流爆发超出母云核的例子包括: HH 111 系统的西边 HH 311、Barnard 5 中的 HH 366 系统中东北边的几个 HH 天体、T Tau 北边的激波、Perseus 区 L1448 核中的大部分 HH 天体^[7] 以及 HH 34 系统中较远的 HH 天体。这些天体处于沿视线方向缺少 CO 发射而且背景星和星系分布丰富的区域。

如果一个分子云核位于或靠近一个巨分子云 (GMC) 的表面, 那么双极外流至少有一个瓣将直接向 GMC 的晕或分子云周围的星际介质注入能量。例如, HH 83 喷流在一个位于 L1641 最西缘的云核中形成, 这个外流的东瓣及至 L1641 云表面的 HH 84 处, 其西瓣穿过一个热泡, 该热泡位于 Orion OB 星协的超面的内部^[12]。

2.6 成团

表 1 列出的巨 HH 天体部分位于相对孤立的恒星形成区, 在这样的天区只有十来颗或更少的年轻星 (像 L1551 区)。即使是这样的天区, 也经常有多个外流在天空平面上重叠。但是许多 (也许是大部分) 年轻星处于高度成团的环境, 在这样的环境中一个 pc 尺度的区域内几十到几百个恒星已经形成, 这就很难或根本不可能逐个确定 HH 天体与激发源的确切联系。对 Perseus 区复合云的成像显示, 许多 HH 天体与其最邻近的年轻星或云核相距超过 1 pc。对许多这样的 HH 天体我们还很难将其与特定的外流或激发源相联系 (NGC 1333, 参见图 4^[13]; L1448 和 L1455)。

3 pc 尺度 HH 天体的重要作用

3.1 对 CO 外流模型的限制

有几种模型可将 CO 外流与 HH 天体联系起来^[14]。在多成分模型中, HH 天体由快速且高度准直的外流产生, 这种外流可能产生于吸积盘的内部或恒星的磁气圈。较低速的盘风可能产生准直度低但质量较大的 CO 分子外流。在统一模型中, 一个高速喷流是拖带周围介质产生分子外流的主要动能来源。在多成分模型中, 低速盘风所携带的动量和质量比喷流的多, 分子外流、HH 天体、喷流是截然不同的外流成分, 这些外流成分相互间可能并无作用。在统一模型中, 所有喷发的动量和质量都由喷流带出; 分子气体在激波中被拖带产生, 双极分子外流由喷流以拖带的方式驱动。直接检验这些模型很困难, 因为很难估计驱动 HH 天体的喷流和外流的质量和动量。我们根据 Hartigan 等人^[15] 最近的计算可知: HH 34、HH 47 和 HH 111 的喷流提供的动量和能量足以驱动分子外流。Eisloffel 和 Mundt^[16] 算得 HH 喷流输入周围分子云的总动量大约是 $0.5 \sim 10 M_{\odot} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 与 CO 外流的总动量 $1 \sim 20 M_{\odot} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 几乎在同一范围。这样看来 HH 喷流驱动分子外流是可能的。

这里讨论的许多 HH 天体都具有与其成协的 CO 外流, 但大部分还没有完整的 CO 成图。对已经成图的源, 成协 CO 外流的最大线尺度范围总是小于或相当于观测到的光学发射的最大范围。巨 HH 天体至少可以与成协 CO 外流具有相同长度, 这就为统一模型提供了进一步的支持。HH 34 和 HH 111 的光学外流比成协 CO 外流大近一个量级。对已经很好研究过的 L1551, 光学发射范围比 CO 外流瓣远 1.5 倍。而 B5 喷流和 HH 114/115 系统中, 光学和 CO 外流的范围相当。合理的情况是在母云核区域 (内部 $0.1 \sim 0.3 \text{pc}$) 外流拖带产生 CO 气体, 而

在此区域外, 外流拖带产生的主要是原子的 (或电离的) 气体, 这就导致了在大多数情况下, 外流的外层部分并不是由 CO 示踪的。虽然 CO 的高速“子弹”在 HH 111 云核和 CO 外流瓣的范围以外也观测到了, 但这些“子弹”可能是喷发的物质而不是拖带产生的物质。

通过分析不同环境中不同年龄的外流, 可以研究 HH 天体和成协外流的演化。当一个外流是年轻的, 喷流主要会遇到与母云成协的致密气体或原恒星周围的正在向内下落的气体。开始的时候喷流可能比周围介质的密度低, 但当喷流钻出一个空腔时, 它将遇到离源越远密度逐渐越低的气体。单个喷发的演化将取决于介质中的密度梯度范围和喷发中密度的几何稀释。对于足够大的周围密度梯度, Rayleigh-Taylor 不稳定性可能会碎裂这样的喷发流体^[17]。这一过程可能在 Orion Nebula 中 BN/KL 区和 Cep A 中已经被观测到^[18,19]。

3.2 填充分子云空处的介质

CO 成图上填充分子云团块间空处的介质 (ICM) 的性质仍很神秘。Blitz 和 Stark^[20] 提出 ICM 由高度湍动的 ($\Delta v \approx 20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)、但密度很低的 ($n < 10 \text{ cm}^{-3}$) 且与巨分子云处于近似压力平衡的分子气体组成。Williams 等人^[21] 提出 ICM 包括大量冷的 (20~几百 K) 21cm H I 发射。Bertoldi 和 McKee^[22] 以及 Block 等人^[23] 认为这种介质主要是热气体 ($> 9000 \text{ K}$), 这样的热气体包括如 C II 低电离元素, 也许还呈现 H α 发射。

许多 pc 尺度的 HH 外流扩散至 ICM 内部, 它们末端工作面的物理性质依赖于它们进入的周边介质的特征。当激波结构被完全分解的时候, 下游介质的低电离部分将在激波前无禁线发射的地方 (几个碰撞长度内) 产生 Balmer 线^[24]。对扩散到电离介质的激波, 由于缺少中子进入激波将会使 Balmer 线消失。对以大于 $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度扩散进入分子介质的激波, 将会产生 $2 \mu\text{m}$ H₂ 发射。目前只有几个天体 (HH 34 系统^[3]; B5 中 HH 366^[5]) 进行了探测 ICM 所需的全范围观测, 但关于介质的性质一时尚未得到普适的结论。当得到所需要的全范围观测结果时, 对巨 HH 天体的末端激波的研究可以成为探测 ICM 强有力的探针。

3.3 年轻星质量损失随时间的变化

所有 pc 尺度的外流沿每个瓣至少有几个 HH 天体。有些外流在激发源的 $30''$ 到几角分范围内包含由间隔很近的低激发激波和与之成协的冷却层组成的几乎连续的喷流。激波激发的间隔和程度随着离开源的距离的增加而趋于增大。大多数 HH 天体在距离源超过几角分的地方呈现间隔大于 $10'$ 的激波系统。间隔增加的激波组成直链并成为快速喷发的激波遭遇慢速运动的年老激波的内部工作面。激波间距和激发程度随着离开源距离的增加需要满足: 在较短的时间间隔 (10 ~ 500yr) 内发生小幅度的速度变化 (小于 $40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 或者在超过 10^4 yr 的间隔内发生较大幅度的速度变化 (约 $50 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 甚至更高)。外流速度的变化频率如果按照喷发速度变化的 $1/f$ 型分布, 其速度变化谱就可以解释以上的观测。

对巨 HH 天体链的观测可以作为研究年轻星的质量喷发历史的约束条件。考虑到质量喷发与吸积相联系, 它也可作为研究年轻星的吸积历史的约束条件。从源附近向外流空腔末端行进的激波代表了逐渐年老的喷发。

如果喷发方向随时间变化, 那么等质量损失率和等外流速度也可以产生多重内工作面。然而, 喷发方向变化自身不能产生像喷流中接近直线的激波链。

3.4 化学复活

pc 尺度外流可以电离分子和原子。pc 尺度外流本身的大尺度, 结合它们在活跃恒星形成

区的频繁出现, 暗示它们可以改变分子云的化学状态。快速激波产生的紫外 (UV) 和 X 射线发射可以照亮母云, 并改变云的电离状态和分子云的丰度^[25,26]。激波辐射可以产生荧光 H_2 , 导致 HCO^+ 和 NH_3 等丰度的增加^[27,28], 形成中性原子和电离碳^[25]。在 UV 辐射被严重遮挡的分子云中, 激波的电离可能是诸如 HI 和 CI 等中性元素产生的重要来源。

分子云中包含大量冷的 HI , 与 H_2 的估计量相当。原子碳 CI 只在分子云表面的光致电离区内含量丰富, 在这样的区域中 UV 辐射导致的光致电离决定了恒星形成率。但 492 GHz CI 线的研究已经说明沿指向分子云的视线方向都存在这种分子。对这样的观测结果的一种解释是分子云是高度渗透的, 星际 UV 辐射可以通过许多通道穿入分子云的深层内部。 ^{13}CO 的观测表明分子云是高度结构化的, 由纤维状物、壳状物、部分壳状形态物组成, 壳状物围绕在大的和小的空腔周围, 空腔允许 UV 辐射进入云的内部。另一个解释是来自年轻星的 pc 尺度外流驱动的正在电离的激波导致被遮挡的分子云内部产生高密度的 HI 和 CI ^[13]。

像 NGC 1333 和 Orion A 这样的富恒星形成区域观测到的激波面积填充因子大于 5%。即使在 L1448 这样相对贫的区域, 虽然目前仅有 4 个已知的年轻星, 但由这些源产生的多重亮激波的覆盖面超过其云核周围投影表面积的 1%。

可以用以下图像来估计激波穿过指定区域中特定一块气体的平均时间, 这种再生时间由任意倾斜方向的外流扫过云的整个体积所需要的时间确定。观测到的 HH 天体的面积覆盖因子由 $n_t \pi r_t^2$ 给定, 这里的 n_t 是尺寸为 L 的给定区域中末端工作面的数目, $r_t \approx l' = 3 \times 10^{17} d_{300}$ cm, d_{300} 是以 300 pc 为单位的 HH 天体的距离, r_t 是个工作面的典型半径。如果 HH 天体的速度取观测得到的典型值 $v_{flow} \approx 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 那么激波的再生时间由 $\tau_{shoch} \approx L^3 / (L_{flow}^3 R_{flow})$ 确定, 这里的 L_{flow} 是一个典型外流在其末端工作面速度降低至低于电离分子所需速度时的尺寸大小, R_{flow} 是外流的诞生率, $L_{flow}^3 \approx \pi r_t^2 v_{flow}$ 和 $R_{flow} \approx n_t / \tau_{flow}$, 这里 τ_{flow} 是外流在其末端工作面的电离停止时的年龄。因此, $\tau_{shoch} \approx L^3 / (n_t \pi r_t^2 v_{flow}) = 10^6 L_{3pc}^3 n_{10}^{-1} r_{0.1pc}^{-2} v_{100}^{-1} (\text{yr})$, 这里 L_{3pc} 是表示以 3 pc 为单位, n_{10} 以 10 个工作面为单位, $r_{0.1pc}$ 以 0.1 pc 为单位, v_{100} 以 $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位。激波的再生时间范围从 NGC 1333 这样活跃恒星形成区的 10^4 yr 到 L1448 这样相对不活跃区域的几百万年。这些激波可能是分子云核和周围 ICM 中湍动产生的主要动力。

多重 pc 外流对周围环境的累积作用是电离分子气体, 即外流在末端激波速度高得足以电离分子的时段里电离其影响范围内的分子气体。另一方面, 当外流扫过的壳层减速到低于电离分子所需的速度时, 它可能变成一个很强的分子再形成区。正在电离的激波将使影响区内的化学条件重新置于其初始的原子状态。强烈的激波 ($> 60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) 可能电离碳和氢。复合导致无新激波的区域产生大量 HI , 最终在颗粒的表面再形成 H_2 。当高电离态的碳与其俘获的电子快速复合时, 中性碳或者 CII 可能维持一段相当长的时间, 这取决于电离分子化学形成 CO 的低形成率。主流的 CO 形成机制需要存在 H_3^+ , H_3^+ 由氢离子和 H_2 的相互作用产生。因此, 后激波气体将保留大量的 CI , 直到相当数量的 H_2 再形成。

电离激波的重复作用可能会阻碍 GMC 内部的化学演化以及由以时间为参量的化学模型所预计的分子气体的“化学老化”^[29]。这些模型估计在 10^6 或 10^7 yr 后, 分子云中相当部分的 CO 应该锁定在较重的元素, 诸如碳元素和氧元素。分子气体这样老化的证据还极少。 CO 丰度的明显不变 (在 2 倍范围内) 可能部分是由于大体稳定的电离率, 或者是由于 CO 的形成

阻止了大部分云演化至化学模型所预计的最后状态。

3.5 湍流的起源和恒星形成的自调节

观测到的分子云是由纤维状物、层面状物和部分壳状物组成,壳状物围绕在空腔周围,空腔的尺寸谱从 0.1 到 10 pc 以上,形状从圆到高度拉长的椭圆。大部分的线宽远大于声速。分子云呈现杂乱的结构,运动谱呈现湍动特征。

原恒星外流可能会对分子云内部湍动的产生起关键作用。例如在著名的猎户大星云中,巨 HH 天体向星云内部注入的动量可能接近于大质量星风的作用,成为猎户大星云中湍动能量的主要来源^[30]。随着对 pc 尺度 HH 天体的认识,我们可能已经发现了外流在云中产生大尺度运动的直接证据。pc 尺度外流瓣的尺寸与分子云在毫米波段看到的空腔和洞的尺寸相当。pc 尺度 HH 天体的末端激波向巨分子云内部和周围的星际介质注入动量。这些外流可能是分子云中许多运动的动力。这些外流的不稳定性可能产生巨分子云中分子气体的杂乱运动,即外流喷发最终与周围气体混合在一起,造成外流携带的动量和能量的转移,它们的能量和动量以后可能就以毫米波段谱线的湍流运动出现。

因为 pc 尺度 HH 天体的速度超过巨分子云的引力逃逸速度,一些直接受影响的气体可能从云中喷出。然而如果观测到的气体扫过的质量超过其自身质量的 10~100 倍,且是减速的,那么这些气体可以保持束缚态。从 HH 天体向 ICM 最大的动量转移可能发生在末端工作面。一个巨分子云内几十到几百个这样的工作面的累加作用可能会产生超音速移动的冷气体的层面。这些层面的碰撞压力可能成为支持巨分子云对抗引力的内压力。

3.6 X 射线和 UV 观测的前景

这里讨论的几个 pc 尺度外流瓣方向的低消光暗示了 UV 和 X 射线技术可以用来研究外流。出自小质量年轻星的外流其内部的喷流具有从 200 到超过 500 km·s⁻¹ 的速度。虽然已有这些外流的成分随着与源距离的增加而减速的证据,它们可能仍然影响外流空腔末端使其具有足够的速度而激发 UV 发射线、产生软 X 射线发射、产生如 [O VI]、Si III 和 C IV 的具有强 UV 共振线的高电离元素。

HH 天体的谱线说明它们的激波速度典型值范围从 30 到大约 150 km·s⁻¹。但自行和径向速度范围为 100 ~ 500 km·s⁻¹。假设已达到热平衡和电离平衡,且穿过外流空腔扩散的流速以 f 因子减速,那么绝热层中瞬时后激波的温度 T_{ps} 将达 $0.08\mu m_H f^2 v_0^2 / k \approx 3 \times 10^5 v_{300}^2 f_{0.5}^2$ K 的量级。对于速度更快的外流(例如 HH111),这意味着末端后激波的温度至少达 10⁶ K。

因为激波运动而进入的介质的密度 (0.1 cm⁻³) 呈现比源附近介质要低得多的趋势,所以热成分的冷却时间可能接近激波的动力学年龄。pc 尺度外流中冲入相对低密度环境的末端激波其条件与中等年龄的超新星遗迹中发现的比较相似,可以应用相同的激波诊断。非热平衡条件可能普遍存在于部分或全部的激波结构中,因此对每一个特别的情况需要构建详细的激波模型,以改进对后激波温度和冷却时间的估计。

对末端工作面处的弓形激波和反激波,通过明亮背景星的吸收光谱学、通过寻找较亮的发射线、或通过对后激波冷却带内等离子体的硬 UV 和软 X 射线发射的研究,也许可以探测到激波后面的热气体。pc 尺度外流的一个直接结果是外流瓣覆盖的面积接近 1 pc²(这由每个外流面积是 0.01 平方度投影在 Orion A 距离 500 pc 上得到)。正对着明亮背景源的外流瓣其偶然投影的可能性是不可忽略的,因此不久的将来在明亮早型背景星方向上发现外流瓣的

UV 吸收光谱是可能的。

3.7 被外部辐射场照射的喷流

随着对喷流和外流的深入广泛研究，有一类处于很强辐射场中的喷流近几年引起了研究者的特别注意。如：马头星云旁由大质量星照亮的 HH 444^[31](参见图 5)、猎户星云中四边形的 Lyman 连续谱辐射场照射的 HH 502^[32]。其喷流的两瓣不对称，有的甚至看起来是单瓣的。NGC 1333 中软紫外辐射场照射的 HH 333，其喷流几乎是双极对称的。由于外部辐射场的照射，许多喷流呈现 C 形弯曲的对称性，如 HH 502、HH 499 等。另外，驱动喷流的年轻星经常能被直接观测到，没有明显的遮挡。这些驱动源可能比通常 HH 流的激发源年老，或者其周围的云核已经被外部辐射场破坏。

在没有外部作用的情况下，年轻的喷流应该是对称的。而在许多著名的 HH 喷流(如 HH

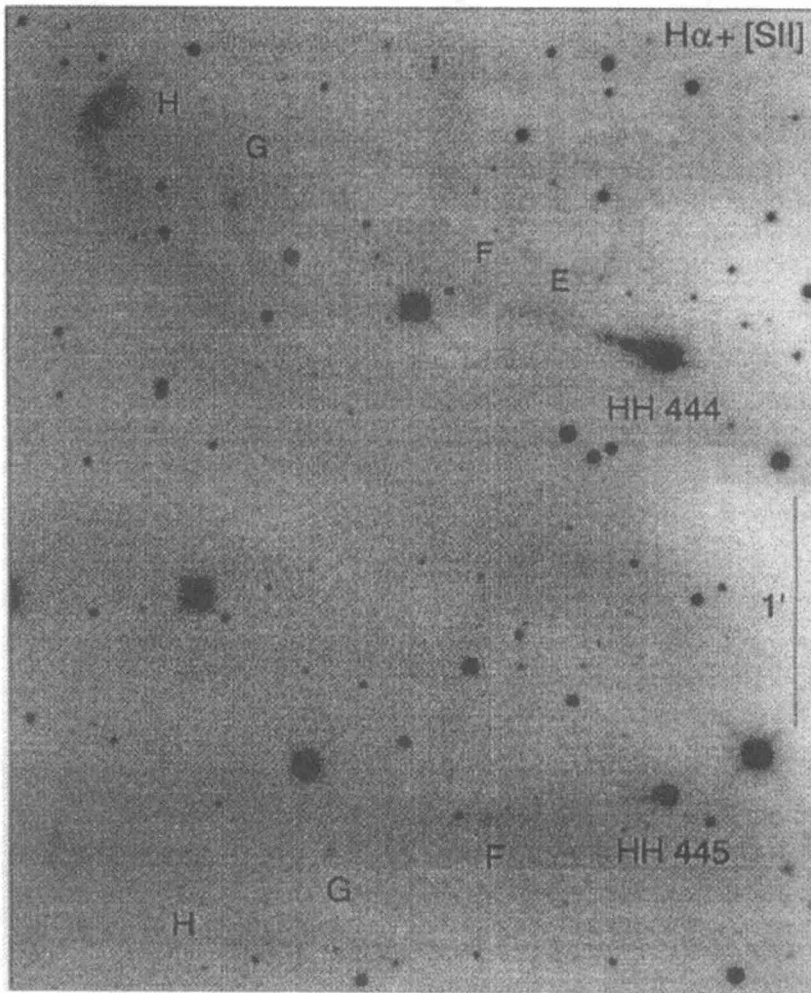


图 5 HH 444 和 HH 445 两个喷流的 CCD 图像^[31]

HH 444 的投影长度是 0.35 pc。HH 444 的激发源在其最西端是一颗大约 15mag 的变星 V510 Orions

34、HH 47、HH 111) 中, 不对称是由于后退瓣的严重遮挡所致, 红外研究经常能揭示对称的喷流。但这种解释不适合 HH 444, 因为它们并不与高消光区成协。或许值得注意的是, HH 444 等喷流在投影上背离 OB 星, 暗示不发达的喷流瓣暴露于强紫外辐射场中。发达的喷流瓣由于发射点和准直点位于拱星盘的阴影中, 只被弥散的紫外场照射。HH 444 喷流的底部通常是激波激发 [S II] 主导区, 很快地随着其远离驱动源, 喷流的光谱变成 H α 主导的光致电离谱。如果喷流是光致电离的, 比较通常的激波激发喷流, 可能将提高驱动源质量损失率的估计精度^[31]。与 Lyman 连续谱辐射场的电离相似, 软 UV 辐射场的电离、加热和光致蒸发对瓦解年轻星的包层可能有重要作用, 这也就阻止了恒星的进一步演化。光致蒸发甚至能对分子云内部湍流的产生起相当重要的作用。

4 结 语

巨 HH 外流的观测说明 HH 天体的动力学年龄可以超过 10^5 yr。S 形点对称的 pc 尺度 HH 外流提供了喷发方向随时间变化的证据。多重内工作面说明源在喷发速度上也随时间变化, 小幅度的变化经常出现, 大幅度的变化很少出现。在一些外流中, HH 天体的平均速度随着离开源的投影距离的增加而减小, 这提供了喷发减速或者喷发速度随时间有一系统增加的证据。许多外流已经离开了它们的母云核, 并向周围介质注入机械能。巨外流的这些“裸露”部分在 X 射线和 UV 波段也许能观测到, “裸露”部分的背景上通常能看见星系。快速激波产生的发射或多种元素的高电离态的吸收也许能观测到。HH 激波激发发射可能对银河系 X 射线和 UV 背景作出大量贡献, 为恒星形成环境提供一个新的探针。巨 HH 外流可相仿于或长于成协 CO 外流, 这为“统一”模型提供了证据, 在这个模型中快速、准直、双极的星风是激发低速 CO 外流的首要机制。巨 HH 外流的末端工作面可能成为用来探测分子云团块间介质的性质的工具。pc 尺度外流的末端工作面可能电离分子, 从而“化学复活”分子云。HH 激波和 UV 辐射在缺少恒星 UV 辐射的区域可能对 C I 和 C II 的产生有贡献。这些外流可能是分子云和周围缺少大质量星的星际介质中湍流产生的首要原因, 也可能对恒星形成的自调整有贡献。

近几年国内天文学家在 HH 天体研究方面也取得了令国际同行瞩目的成果。紫金山天文台和原北京天文台合作, 利用兴隆观测站 60/90 cm 施密特望远镜的大视场特点和 2048×2048 阵列的高效率 CCD, 配合使用合适的滤光片, 三年来一直在对太阳系附近的猎户座、蛇夫座和金牛座等典型恒星形成区做 HH 天体的大视场巡天观测。期间开发了自动寻找 HH 天体的方法和程序^[44], 新发现大批 HH 天体包括 pc 尺度 HH 天体^[9,45~48]。预计在完成上述巡天观测计划的基础上, 继续研究 pc 尺度 HH 天体并探求 HH 天体在大尺度分布上的统计规律, 可能会获得更显著的研究结果。

参 考 文 献

- 1 Mundt R, Fried J. *Ap. J.*, 1983, 274: L83
- 2 Bally J, Devine D. *Ap. J.*, 1994, 428: L65
- 3 Devine D, Bally J, Reipurth B. A. J., 1997, 114: 2095

- 4 Bally J, Devine D, Fesen R *et al.* *Ap. J.*, 1995, 454: 345
- 5 Bally J, Devine D, Alten V. *Ap. J.*, 1996, 473: 921
- 6 Bally J, Devine D, Alten V. *Ap. J.*, 1997, 478: 603
- 7 Reipurth B, Bally J, Devine D. *A. J.*, 1997, 114: 2708
- 8 Ogura K. *Ap. J.*, 1995, 450: L23
- 9 Wang H, Yang J, Wang M *et al.* *A. J.*, 2001, 121: 1551
- 10 Terquem C, Eisloffel J, Papaloizou J *et al.* *Ap. J.*, 1999, 512: L131
- 11 Bence S, Richer J, Padman R. *M.N.R.A.S.*, 1996, 279: 866
- 12 Cowie L, Songaila A, York D. *Ap. J.*, 1979, 230: 469
- 13 Devine D. PhD Thesis, Colorado: University of Colorado, 1997
- 14 Cabrit S, Raga A, Gueth F. In: Reipurth B, Bertout C eds. *Herbig-Haro Flows and the Birth of Low Mass Stars*, Proc. IAU Sym. 182, Dordrecht: Kluwer, 1997: 163
- 15 Hartigan P, Morse J, Raymond J. *Ap. J.*, 1994, 436: 125
- 16 Eisloffel J, Mundt R. *A. J.*, 1997, 114: 280
- 17 Stone J, Xu J, Mundy L. *Nature*, 1995, 377: 315
- 18 McCaughrean M, Mac Low M. *A. J.*, 1997, 113: 391
- 19 Hartigan P, Carpenter J, Dougados C *et al.* *A. J.*, 1996, 111: 1278
- 20 Blitz L, Stark A. *Ap. J.*, 1986, 300: 89
- 21 Williams J, Blitz L, Stark A. *Ap. J.*, 1995, 451: 252
- 22 Bertoldi F, McKee C. *Ap. J.*, 1992, 395: 140
- 23 Block D, Dyson J, Madsen C. *Ap. J.*, 1992, 390: L13
- 24 Heathcote S, Morse J, Hartigan P *et al.* *A. J.*, 1996, 112: 1141
- 25 Wolfire M, Konigl A. *Ap. J.*, 1993, 415: 204
- 26 Taylor S, Williams D. *M.N.R.A.S.*, 1996, 282: 1343
- 27 Rudolph A, Welch W. *Ap. J.*, 1988, 326: L31
- 28 Rudolph A, Welch W. *Ap. J.*, 1992, 395: 488
- 29 Xie T, Allen M, Langer W. *Ap. J.*, 1995, 440: 674
- 30 Bally J, O'Dell C, McCaughrean M. *A. J.*, 2000, 119: 2919
- 31 Reipurth R, Bally J, Fesen R *et al.* *Nature*, 1998, 396: 343
- 32 Bally J, Reipurth B. *Ap. J.*, 2001, 546: 299
- 33 Devine D, Reipurth B, Bally J *et al.* *A. J.*, 1999, 117: 2931
- 34 Bally J, Castets A, Duvert G. *Ap. J.*, 1994, 423: 310
- 35 Reipurth B, Devine D, Bally J. *A. J.*, 1998, 116: 1396
- 36 Gredel R, Reipurth B, Heathcote S. *Astron. Astrophys.*, 1992, 266: 439
- 37 Devine D, Bally J, Reipurth B *et al.* *A. J.*, 1999, 117: 2919
- 38 Schwartz R, Schultz A. *A. J.*, 1992, 104: 220
- 39 Poetzel R, Mundt R, Ray T. *Astron. Astrophys.*, 1989, 224: L13
- 40 Stanke T, McCaughrean M J, Zinnecker H. *Astron. Astrophys.*, 1999, 350: 43
- 41 Reipurth B, Olberg M, Gredel R *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 327: 1164
- 42 Heathcote S, Reipurth B, Raga A. *A. J.*, 1998, 116: 1940
- 43 Reipurth B, Eiroa C. *Astron. Astrophys.*, 1992, 256: L1
- 44 Deng L, Yang J, Zheng Z *et al.* *Publ. Astro. Soc. Pac.*, 2001, 113: 463
- 45 Yan J, Wang H, Wang M *et al.* *A. J.*, 1998, 116: 2438
- 46 Zhao B, Wang M, Yang J *et al.* *A. J.*, 1999, 118: 1347
- 47 Wang M, Zhao B, Yang J *et al.* *Chinese Physics Lett.*, 2000, 17: 304
- 48 Wu J W, Wang M, Yang J *et al.* *A. J.*, 2002, to appear in the April issue

Progress in Optical Studies on Parsec-scale Herbig-Haro Flows

Wang Min

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

Recent observations demonstrate that outflows traced by Herbig-Haro (HH) objects can extend for parsecs from their driving sources, at least an order of magnitude larger than previous work. Some well-known HH objects such as HH 34 and HH 111 are verified to be parsec-scale HH flows. Up to now, dozens of giant HH flows have been reported in the Orion, Taurus, Cepheus and Perseus molecular cloud complexes. It thus appears that it is common for HH flows to attain parsec-scale dimensions. The ubiquity of parsec-scale HH flows profoundly alters our view of the impact of young stars on their environment. They provide a fossil record of the outflow behavior and mass loss rate from a young star over a significant fraction of the 10^5 year outflow phase, and provide indirect clues to the accretion history of the forming star. Many parsec-scale HH outflows with multiple internal working surfaces and S-shaped point symmetry about the central sources show evidence for variability of ejection velocity and orientation of the source jets. Giant HH flows with longer or comparable lengths to associated CO outflows, imply that HH flows power CO flows. Giant HH flows are capable of heating, ionizing, and dissociating cloud material over parsec scale distances and may play a role in the chemical rejuvenation of clouds and the generation of the turbulent motions observed in molecular clouds as well as the self-regulation of star formation.

Key words stars: formation—ISM: Herbig-Haro objects—ISM: jets and outflows