

# 年轻星天体喷流的近红外成像观测进展

江 治 波      杨   戟

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)  
(中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

## 摘      要

分子氢的红外振动发射线是显现年轻星质量外流的重要谱线之一。自 Gautier 等人 1976 年在猎户座发现年轻星质量外流的分子氢发射开始,人们在银河系内几乎所有的恒星形成区都发现了这种线发射。研究表明,分子氢发射与年轻星周围的其它活动现象(如分子外流和光学喷流)之间有着非常密切的联系。红外和光学喷流代表了年轻星剧烈活动的两个侧面,是喷流与周围介质相互作用强弱不同的表现,这种作用还拖带周围介质,产生分子外流。光学、红外喷流和分子外流组成了恒星形成区壮观的景象,它们是恒星形成活动的重要标志。

随着红外探测技术的飞速发展,对年轻星外流活动现象的观测越来越丰富和详细,使人们对这种现象的本质越来越了解。在 20 世纪 90 年代 NICMOS 等大阵列红外探测器投入使用后,红外成像观测有了长足的进步。目前已在 70 个左右的区域里发现了  $H_2$  发射,这一数字还在迅速增加。今后的研究主要可能向两个方向发展。其一是高分辨观测,进一步了解  $H_2$  发射的结构以及与光学喷流和分子外流之间的关系;其二是巡天观测,了解银河系内的恒星形成区  $H_2$  发射的大尺度结构和恒星形成的统计分布规律。

**关键词** 恒星:形成 — 星际介质 — 技术:红外观测

**分类号** P144, P141.91

## 1 引      言

质量外流是恒星形成过程中必然经历的阶段。在恒星形成过程中,中心星在从盘或包层中吸积物质的同时,还以巨大的能量向外抛射物质<sup>[1~4]</sup>。被抛射物质与星周物质和母体云相互作用,产生了如赫比格—哈罗(HH)天体<sup>[5~7]</sup>、分子外流<sup>[8]</sup>和分子氢的红外谱线发射<sup>[9,10]</sup>等可观测现象。这三种现象之间存在着密切的关系。

早期阶段的年轻恒星深埋在母体分子云中,光学上不可见。在母体云中的低消光区域,可以观测到外流和介质相互作用的激波所产生的光学 HH 天体(例如 HH111/121 系统<sup>[11]</sup>)。红外辐射在穿越气体和尘埃时受到较小的消光,因此红外观测能用于探测来自分子云深层的

辐射; 同时红外观测与光学波段观测相比分辨率相差不大, 所以红外探测目前已经成为探测年轻星及周围环境的重要手段之一。

氢是宇宙中最丰富的元素。在极低温的星际条件下, 氢以分子的形式大量存在并构成分子云。由于氢分子不存在转动偶极跃迁, 在典型的分子云中, 氢分子不能被观测到。只有当分子云受到紫外辐射或者气体温度达到  $2000 \sim 3000\text{K}$  [12] 时, 分子氢的转动-振动谱线出现在红外波段。超声速气流与周围介质相互作用时产生激波加热, 就可以激发分子氢的转动-振动谱线。但是另一方面, 当分子云中的激波速度超过  $50\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 分子氢会被离解。因此,  $\text{H}_2 v = 1-0 \text{ S}(1) (2.122\mu\text{m})$ 、 $v = 2-1 \text{ S}(1) (2.248\mu\text{m})$  等近红外谱线成为激波速度不高于  $50\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$  的高速外流气体的常用示踪线。激波激发的红外  $\text{H}_2$  发射的云团块有时也被称为红外 HH 天体 [9]。此外,  $[\text{FeII}]$  线也是近红外波段 HH 天体的示踪线。

Gautier 等人 [13] 首次在猎户座星云发现氢分子的转动-振动谱线, 这些谱线很快与恒星形成区的质量外流相联系 [14,15]。通过对若干个 HH 天体的分光观测, Elias [16] 发现其中几个 HH 天体具有较强的分子氢线发射。在以后的十多年时间里, 在许多 HH 天体中探测到  $\text{H}_2$  转动-振动谱线 [17,18]。

随着阵列红外探测器的应用, 对分子氢发射的成像观测进展很快。人们利用中心波长在  $2.122\mu\text{m}$  的窄带 (1%) 滤光片, 得到大量激波激发的分子氢发射区的图像, 其中一些高空间分辨率的图像清晰地勾画出红外喷流与分子外流和 HH 天体的密切联系。

## 2 红外 HH 喷流观测的最新结果

20 世纪 90 年代初, 红外多天体分光照相机 (NICMOS) 被广泛应用到 UKIRT、CFHT 等大型地面望远镜及哈勃太空望远镜上, 红外成像的观测由此迅速发展。对年轻星附近  $\text{H}_2$  发射的观测成为恒星形成领域的一个新热点。通过对高分辨  $\text{H}_2$  发射图像的观测以及与光学和射电喷流图像的相互比较, 我们对恒星形成时质量外流的性质与物理过程有了更进一步的了解。

表 1 给出 2000 年 6 月以前用  $\text{H}_2 v = 1-0 \text{ S}(1)$  线或  $[\text{FeII}]$  对恒星形成区观测的结果。其中除参考文献 [12]、[18]、[97] 外全部有成像观测。表 1 中一般按单个喷流列出, 一些难以分辨的多重喷流列于同一项内, 并在形态一列中用 mj 标识; 对于有多重  $\text{H}_2$  发射结点的区域, 只列出一个具有代表性的位置, 其原则是: 首先考虑中心激发源的位置, 如果激发源尚不可知, 就列出最强或参考文献中第一个标识点的位置; 结点数一列给出该区域的发射结点的大致数目, 由于观测分辨率的差别, 所给出的此列数据不是唯一的; 成协一列给出与发射源坐标相近的年轻星或已知的分子外流或 HH 天体; 可能的激发源一列给出根据形态及性质判断的最具可能性的年轻星。

### 2.1 形态

图 1 为 McCaughrean 等人 [9] 在英仙座 IC348 恒星形成区所发现的  $\text{H}_2 v = 1-0 \text{ S}(1) (2.12 \mu\text{m})$  红外喷流 HH 211。高准直度的双极喷流从一个深埋在分子云核内部的原恒星向外伸展, 尺度达到  $0.15 \text{ pc}$ 。  $\text{H}_2$  外流的单色光度达到  $0.04 \sim 0.09 L_{\odot}$ 。外流的动力学时标估计只有  $1000 \text{ yr}$ 。喷流发射区的消光  $A_{\nu} = 10 \text{ mag}$ 。中心星只能在  $> 350\mu\text{m}$  处被探测到, 是一个掩埋很

表 1 红外 H<sub>2</sub> 发射源表

区域	$\alpha(1950)$	$\delta(1950)$	d/pc	结点数	形态	成协	可能的激发源	参考文献
S187 IR	01:20:01.2	61:32:00	1000	21	cj	S187IR	S187IR NIRS1	21,22
L1448	03:22:34.3	30:33:35	300	12	cj	L1448 MO	L1448-mm	10,63
GL490	03:23:39.2	58:36:35	900		j	MO	IRS	30
RNO15FIR	03:24:33.9	30:02:27	350	3	bi	RNO15 FIR,HH	IRAS03245+3002	49,67
NGC1333	03:25:49.9	31:04:16	350		bi,j	ASR15,16,49,71	IRAS 2	71,77
NGC1333	03:26:02.5	31:05:10	350	many	j,Vshape,	HH7-11	SVS 13, SVS 13B	71,77
NGC1333	03:26:05	31:03:15	350		bi,j	ASR57	IRAS 4 A&B	71,77
IC348	03:40:48.7	31:51:23	300	10	bi,sy	HH211	HH211-mm	9
IRAS04016	4:01:40.61	26:10:49.0	140			HH360A	IRAS04016+2610	73
IRAS04169	4:16:53.78	27:02:48.2	140			HH391A	IRAS04169+2702	73
IRAS04239	4:23:54.46	24:36:54.0	140				IRAS04239+2436	73
IRAS04381	4:38:08.53	25:40:52.9	140				IRAS04381+2540	73
L1551 IRS5	04:28:39.2	18:01:46	140	6		MO,HH102,HH260,HH264,HH29	L1551 IRS5/NE	64,77
L1634	05:17:22.3	-5:55:01	470	11	mj,bs,bi,sy	HH240/241	IRAS05173-0555	67,77
AFGL5142	05:27:27.5	33:45:38	1800	> 6	dis	MO,HH190,MS	IRS1,IRS2	26
Orion KL	05:32:46.6	-05:24:16.5	470	many		IRc2	IRc2	62
OMC1	05:32:46.6	-05:24:17	470	many	dis	Ori BN/KL,MO,HH202,HH208	OMC11	28,62,91
OMC3	05:32:54.5	-05:02:45	470		mj	HH331	MMS 5	35
HH33/40	05:32:54.5	-06:20:15	460	3	bi,j	HH33/40		97
OMC2	05:32:58.3	-05:07:40	470	many	mj	MMS8-10	MMS9	35
L1641N	05:33:02.6	-06:27:39	470	4+1	j,arc	HH34		34
HH1/2	05:33:53.02	-06:47:13.5	470	19	bs,bi,j	HH1/2,HH145,HH147,VLA1 jet	VLA1	20,42
L1641N	05:33:55.0	-06:23:30	470	many	dis,fi,j	HH85-88/299/301-304	IRAS05338-0624	19,34
OMC2	05:33:58.7	-05:12:11	470	many	ls,str	IRS1-6	cannot associate	35
AFGL5157	05:34:32.6	31:57:38	1800	12	bi,dis,dif	IRAS05345+3157		27
HH43	05:35:45.4	-07:11:04	470	many	j	HH43	IRS 1	12
S233 A	05:35:51.0	35:44:15	1800	4	bi	S233B,MO		96
Haro4-255	05:36:54.5	-07:27:40	400	8	bs	MO	Haro4-255 FIR	19
L1630	05:39:25.9	-01:15:01	470	a-v,x-z	bi	HH91,HH90		38
HH212	05:41:19.0	-01:04:08	470	6	j,bi	HH212		98
HH19	05:43:16.3	-00:06:56	460		bs,nl	HH19	IRAS05413-0104	18,97
HH24-26	05:43:31.6	-00:15:44	400	4	j,bs	HH26	HH26IR	67
HH24-26	05:43:33.9	-00:14:32	400	4	j,bs	HH25	HH25mms	67
HH24-26	05:43:35.8	-00:11:31	400	2	j,bs	HH24	HH24mms	67
CB34	05:44:05.0	20:58:38	1500	8	bi,j	HH290,HH291	HH290 IRS	84
L1647	05:48:46.4	02:55:10	470		bi,j	IRAS05487+0255	IRS1&IRS2,IRAS05487+0255	19,39,72
L1647	05:48:48.4	02:54:49	470	18	bi,j	HH110		19,39,72

续表 1

区域	$\alpha(1950)$	$\delta(1950)$	d/pc	结点数	形态	成协	可能的激发源	参考文献
L1647	05:49:09.0	02:47:48	470	>10	bi,j,E,W	HH111,IRAS05491+0247	HH111IRS,VLA	19
L1647	05:49:09.0	02:47:48	470		bi,j,N-S	HH121,IRAS05491+0247	HH111IRS,VLA	19
G192.16-3.82	05:55:19.1	16:31:42	2000	2	bi,di	HH396/397	G192.16-3.82,IRAS05553+1631	93
GL5180	06:05:53.2	21:39:01	1500	7	dis	MO,IRAS06058+2138	IRAS06058+2138	30
GL5180 E	06:05:53.2	21:39:01	1500	7	bi,j		DES?	30
S255	06:09:58.6	18:00:13	2500	many	j,bs,bb,fb	S255-2	S255IR NIRS3,G192.58-0.04	79,83
NGC2264	06:38:25.6	09:58:51	800	many	j,bs	MO	IRAS06384+0958,VLA2	19
L1660	07:18:00.9	-23:56:49	1500	13	j,as	HH72	IRAS07180-2356	67
IRAS08076	08:07:45.1	-35:55:26	450	8	bi,mj	HH120,CG30	IRAS08076-3556	12,77
HH46/47	08:24:16.5	-50:50:44	450		bi,j,bs	HH46/47,MO	IRAS08242-5050	37,55,78
Sa 136	11:59:03	-64:52:11	200	3	j,conic	HH320,HH321	IRAS11590-6452	29
HH52-54	12:51:28	-76:41:35	170	1	bi,bs,j	HH52-54	HH52IRS1,HH53*1,HH54*1	12
VLA1623	16:23:17.7	-24:16:22	160	2	bs,bi,j	HH313	VLA1623	19,68,69
HH56/57	16:28:54.1	-44:48:37	700			HH56/57		12
L43	16:34:29.3	-15:47:01	160		dis	RNO91		80
NGC6334I	17:17:30.5	-35:44:17	1740	4		MO.		19,88
HH106-107	18:27:15.9	01:23:51	310			HH106/107		12
SMC	18:27:24.7	01:11:48	310	18	j	HH455,MO	SMM-3	76
HH108-109	18:33:01.7	-00:37:39	310			IRAS18331-0035		12
HH101	18:58:12.3	-37:07:17	130			HH96-101		12
HH99	18:58:43.1	-36:59:01	130	4	bs	HH99		12,68
L723	19:15:41.3	19:06:55	300	5	bi,j	MO,HH223,HH82,HH84	L723VLA2	87
AS953A	19:20:26.8	11:00:38	300	2	bs	HH32,HH332	AS953A	66
B335	19:34:31.5	07:27:19.8	250	5	dis	B335,HH119		78
IRAS20126	20:12:42.8	41:04:42	1700	2	bi,j	MO(CO,N-S,HCO+,NW-SE)	IRAS20126+4104	60,61
GL2591	20:27:36.0	40:01:15.4	2000	6	bi	MO	NIRS1	95
W75 N	20:36:39.7	42:25:56	2000	9	bs	MO	IRS1	48
DR 21	20:37:13.0	42:09:00	3000	many	bi,bs,j	MO	DR21 IRS1	65
L1157	20:38:42.8	67:50:34	440	18	bi,j	L1157MO,HH375	IRAS20386+6751	19
S140	22:17:52.2	63:18:45	900	6	bi,j	HH251-253	star 2	30
Cep A E	22:54:21.3	61:46:02	725	1+1	di	MO	Cep A E	31,74
Cep E	23:01:10.1	61:26:16	700	3	bi,j	IRAS23011+6126,HH337	IRAS23011+6126	70,81,86
NGC7538	23:11:36.6	61:11:50	2700		bi,bs,bb,mj	MO	IRS1,IRS11	30
NGC7538	23:11:36.6	61:11:50	2700		bi,j	MO	IRS9	30

注:表中缩写含义为: am: 无定形的; as: 不对称的; bb: 泡; bi: 双极的; sy: 对称的; bl: 兰移瓣; bs: 弓激波; bs: 弯曲喷流; di: 弥漫; dis: 离散  
的; fi: 纤维; j: 喷流; ls: 大尺度; mj: 多喷流; MO: 外向分子流; MS 微波激射线; nl: 非线性; str: 冕流



深、极端年轻的原恒星。从图上可以看出，喷流的准直度很高。 $H_2$  发射瓣显现出外流的空腔结构，并在两端清楚地出现多重激波面。分析认为，该红外喷流是起源于包围恒星喷流的湍动鞘层内的  $H_2$  发射，并且呈现很对称的临边增亮现象。

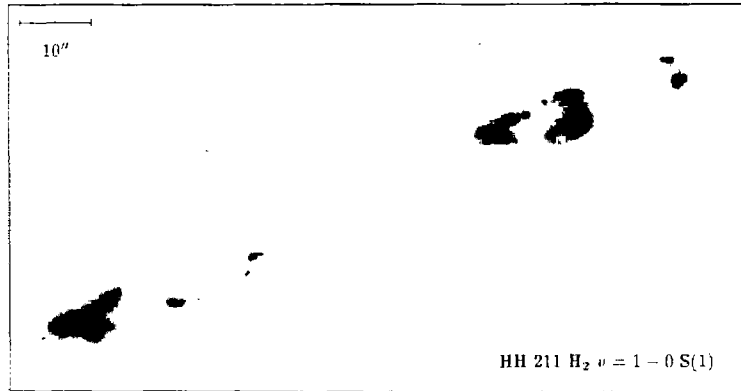


图 1 HH 211 的  $H_2 v = 1 - 0 S(1)$  ( $2.12\mu m$ ) 成像<sup>[9]</sup>

这是一个由深埋在母体云中的年轻星发出的高准直喷流，仅仅在红外可见。这个高准直  $H_2$  喷流与高准直的 CO 分子喷流成协<sup>[51]</sup>

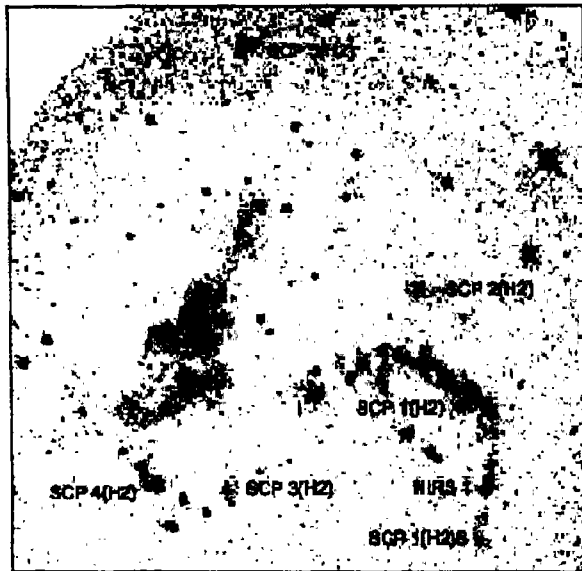


图 2 S187 IR 区  $H_2$  成像<sup>[22]</sup>

从 NIRS1 发出的喷流向北延伸，并在中途向东南方向弯曲，在高准直的喷流中具有如此大弯曲程度是罕见的，SCP 1( $H_2$ )S

是这个双极喷流南方的一个结点

表明它们是呈双极喷发的高速气流，其中许多具有较好的准直性(如图 1 所示的 HH 211<sup>[9]</sup>，HH

不论在大质量还是在小质量的年轻星周围，红外喷流是普遍存在的。年轻的小质量原恒星附近的质量外流通常较准直，对于极年轻的恒星的情形尤其明显。大质量外流的准直性通常较差<sup>[28]</sup>。部分原因是大质量恒星形成时，其周边环境很复杂。由于恒星经常是成团形成的，较差的准直性还可能意味着多个年轻星产生的多重外流同时存在。由于观测分辨率限制，目前只能在少数场合(例如当这些外流达到 pc 量级的尺度时)分辨这种多重外流。因此，大质量恒星附近的质量外流的准直性较差是多重外流的结果还是由恒星形成时的本质因素决定的，需要对特定的对象作仔细的考察和研究。

在观测到的众多  $H_2$  发射中，它们的形态千变万化。许多(数量超过 46%) $H_2$  发射呈双极型线形排列，表明

111<sup>[11,19]</sup>); 还有一些单极的喷流状 H<sub>2</sub> 发射结点(如 L1448-mm<sup>[10]</sup>), 它们被解释为由年轻星周围介质的不对称分布产生, 在有些双极喷流系统中, 一个方向具有很好的准直性, 另一个方向则准直性较差, 例如 HH1-2<sup>[20]</sup>; 有一些极窄、弯曲的喷流(如图 2 所示的 S187 IR<sup>[21,22]</sup>), 解释这类现象的模型很多, 但就本质而言可分为三类 (1) 喷流的进动(如 L1157<sup>[23,24]</sup>); (2) 喷流受不均匀介质阻力作用而产生弯曲(如 L1448<sup>[10]</sup>); (3) 喷流受斜向风而产生的弯曲(如 S187 IR<sup>[21,25]</sup>)。

在有些恒星形成区可以看到许多相对孤立的 H<sub>2</sub> 发射结点(如 AFGL 5142<sup>[26]</sup>、AFGL 5157<sup>[27]</sup>)。H<sub>2</sub> 发射结点之间似乎并无关系, 也很难判定它们是被哪个源激发。这种形态可能缘于探测的灵敏度不够, 也可能意味着这些区域的复杂性。结点可能和原星团(protocluster)成协。在原星团中有多重原恒星同时或依次形成, 由于此起彼伏的质量外流活动, 导致这些区域的速度场的杂乱以及复杂的光学/红外天体的形态。更极端的例子出现在 OMC-1 恒星形成区, Stolovy 等人<sup>[28]</sup>在该区 BN/KL 天体周围 30'' 的范围内探测到大量的 H<sub>2</sub> 发射结点及弥漫发射, 它们本身就显示了多样的形态, 其中有些可能是该区域的外流源激发的, 另一些朝向似乎与已知的外流形态不吻合, 似表明它们之间不相关。

还有一些呈 V 字型排列的 H<sub>2</sub> 发射团块, 它们散布在顶角较大的锥型区域里, 例如在暗云 Sandqvist 136<sup>[29]</sup>(HH320/321) 中, H<sub>2</sub> 发射形态呈 V 字型, 被认为是产生于外流的壳层上, 该外流的激发源(IRAS 11590-6452)可能是一个 Class 0 或极端 Class I 天体, 过去普遍认为与 Class 0 天体成协的外流通常具有较高的准直性, 但这个外流的准直性并不高。

最令人惊奇的是大尺度结构。在 NGC 7538 中<sup>[30]</sup>, 我们可以看见许多不规则排列的 H<sub>2</sub> 弓形发射结点, 它们代表许多不同的年轻星激发的激波。在 IRS1 西北约 2' 处可以看见条状、略显弥漫的 H<sub>2</sub> 发射云, 其形态构成一个巨大的空腔, 从 CO(*J*=2-1) 谱线成图观测也可得到类似的结果<sup>[30]</sup>。

## 2.2 物理过程

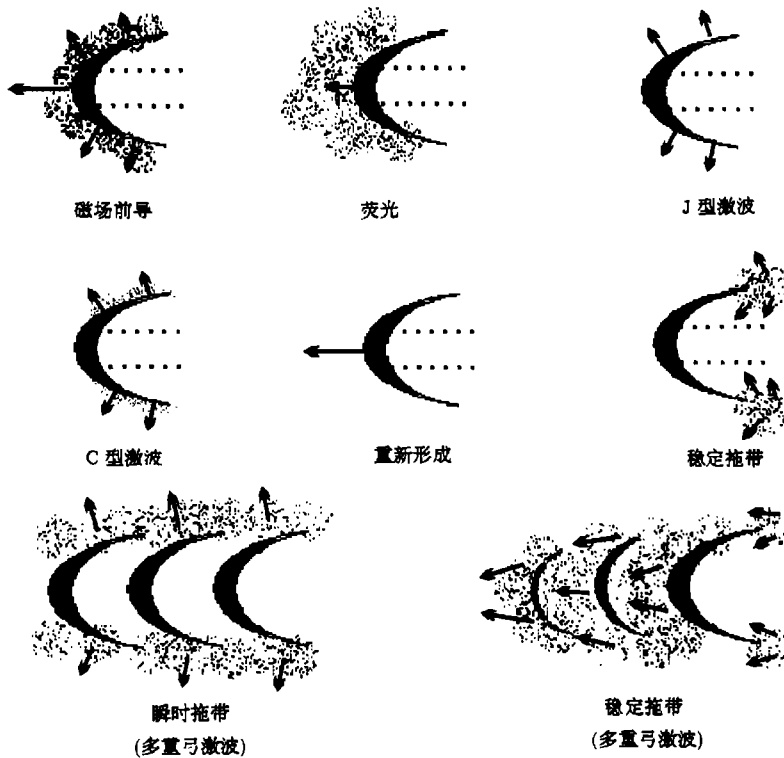
分子氢的近红外发射起源于两种典型的激发机制: 激波激发(热激发)和紫外光子的荧光效应(非热激发)。由于激波可显示年轻星的质量外流活动, 因此人们对分子氢的激波发射较感兴趣。辨别这两种机制并不十分困难。从形态看, 激波激发的 H<sub>2</sub> 发射一般准直性高, 呈团块状, 经常有一串发射结点排列成直线或曲线形(喷流状), 许多结点的形状呈弓形(弓激波)。而荧光效应产生的分子氢发射常是弥漫的, 附近常存在致密 HII 区。激波激发的机制是碰撞激发, 能有效地把分子氢从基态激发到较低能级的激发态。因此从谱线强度看, 激波激发的 (1,0) S(1) 和 (2,1) S(1) 的强度比一般大于 5; 而紫外光子能有效地把 H<sub>2</sub> 激发到更高的能级, 因此产生一般不大于 2 的强度比<sup>[14]</sup>。更进一步的判别方法是测定高阶转动-振动线的强度, 例如, 在非热荧光激发条件下, 波长在 1.61~1.64 μm 之间的 (6,4) Q(1)~Q(5) 跃迁的谱线强度可达 (1,0) S(1) 强度的十分之几<sup>[12]</sup>。

在激波激发的情形下, 存在若干不同的具体物理过程, 这些不同的过程导致 H<sub>2</sub> 发射形态以及与光学喷流和分子外流之间位置关系的不同。通过对过去的理论作详细分析, Hartigan 等人<sup>[31]</sup>总结出产生 H<sub>2</sub> 发射的各种物理过程及产生相应的 H<sub>2</sub> 发射的形态、与光学喷流和分子外流的关系(图 3; 表 2)。高分辨的红外/光学喷流及分子外流观测使我们能够对这些关系作详细考察。

当喷流冲击周围介质时, 会产生一种叫“马赫盘”的激波使喷流减速, 同时产生弓激波而

表 2 红外、光学喷流及分子外流的物理关系的观测表现<sup>[31]</sup>

物理过程	描述	例子	参考文献
磁场前导	H <sub>2</sub> 发射位于光学激波前端各处	HH7, Cep A knot H,G, HH111 V	31,38,52,53
C 型激波 荧光	H <sub>2</sub> 发射位于光学激波的两翼	HH1F	31
再生	H <sub>2</sub> 发射包围较高激发的光学 激波	Cep A knot S(?), HH7, HH47A,HH43,	31,54
瞬时带动	H <sub>2</sub> 发射形成于光学喷流的弓 激波与马赫盘之间	无	55,56
瞬时带动	H <sub>2</sub> 发射在光学辐射外部吹起 壳层	Cep A, HH47	37,38
稳定带动 (单一激波)	H <sub>2</sub> 发射位于光学喷流的底部	HH 111, HH 1	57,58,59
稳定带动 (多重弓激波)	准直的、混沌的 H <sub>2</sub> 发射	IRAS03282, DR21, L1448, HH110, OMC-1, L1634	12,20

图 3 H<sub>2</sub> 发射 (虚点) 与不同的喷流模型产生的弓激波的关系<sup>[31]</sup>

阴影部分表示 J 型激波产生的光学谱线发射区, 箭头表示 H<sub>2</sub> 相对于周围介质的速度。

喷流位于各图的两条虚线之间

使喷流头部的流体加速。在弓激波的尾部出现湍动混合层, 通过湍动混合层拖带周围气体。在这种“稳恒拖带”模型中, H<sub>2</sub> 发射出现在弓激波的尾部。在稳恒拖带起决定作用的极端情

形下, 喷流会在与周围气体的作用过程中逐渐消散, 形成高度准直的湍动分子流。

当激波传播到以中性气体为主的区域, 磁场会通过推动离子而加速激波前的物质。当磁场足够强时, 激波前后的物理参数受磁场平滑而连续变化, 这就是 C 型激波。C 型激波能有效产生  $H_2$  发射, 因为在 C 型激波条件下, 气体被平稳加热并保持分子状态不变。根据模型, C 型激波产生的  $H_2$  发射出现在弓激波的翼部<sup>[32]</sup>。

分子氢还可能被速度较小 ( $\leq 50\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的 J 型激波加热。J 型激波在界面前后的温度、密度有一个跳跃 (这就是 J 型激波名称的来历), 在这种情形下,  $H_2$  发射发生于光学弓激波的内侧。当磁场不够强时, 磁场仍能加速激波前方的离子, 从而产生“磁场前导”。磁场前导与 C 型激波的不同之处在于紧随其后的是 J 型激波。J 型激波通常是离解性的, 因此在光学激波后一般看不见  $H_2$  发射。

荧光在激发分子氢中也起着重要作用。在激波附近常有很强的氢  $Ly\alpha$  线, 分子氢很容易吸收  $Ly\alpha$  光子以及更硬的紫外光子, 从而产生“荧光效应”。这种效应通常产生在光致离解区和光致激发区, 因此其形态经常是弥漫的。

还有一种可能性, 就是  $H_2$  形成于光学弓激波和马赫盘之间的尘埃颗粒上。研究表明这种过程需要达到  $10^{22}\text{cm}^{-2}$  的柱密度, 相当于  $10^6\text{cm}^{-3}$  的体密度<sup>[33]</sup>。模型表明尘埃在以 HH 天体的速度行进的激波过后仍能存在, 因此分子氢的这种形成方式是可能的。由于  $H_2$  形成于弓激波和马赫盘之间, 可以预期这种过程产生的  $H_2$  发射相对于激发星将有一个相当大的速度, 其线发射强度比也将与碰撞激发和荧光效应略有不同。

以上过程预言了红外及光学激波之间明显不同的空间位置关系 (图 3)。结合光谱观测的速度信息和强度信息, 就能容易分辨在某个特定的喷流中什么机制在起主要作用。

### 2.3 巡天观测

目前已有对个别天区作的巡测<sup>[27,34]</sup>。Yu 等人<sup>[35]</sup>在 OMC2/OMC3 区  $6' \times 16'$  的范围内进行了  $H_2$  发射的观测, 发现了许多高准直的外流, 其中在分子云的南部 (OMC-2)  $H_2$  发射呈现许多大尺度的条状结构, 这些条状结构相互交叉, 形成网状, 表明该区域的情况非常复杂。除了激波激发外, 还存在荧光效应, 这一区域的条状和弥漫状  $H_2$  发射可能显现与 M43 和 NGC1977 成协的光致离解区。Stanke 等人<sup>[34]</sup>对 Orion A(L1641) 区作了较大范围的观测, 发现了一批新  $H_2$  的发射天体和喷流, 这一结果给出了该区域恒星形成活动的全貌, 使我们对巨分子云中恒星团形成模式有了更深入的了解。在 AFGL5157 区, Chen 等人<sup>[27]</sup>发现了许多  $H_2$  发射结点, 其中有喷流状的、孤立的和弥漫的, 这些  $H_2$  发射团块为我们提供了原星团形成时的一些物理性质。Smutko 等人<sup>[36]</sup>对银河系内的一些 H II 区的  $H_2$  发射进行研究, 他们在 S61、S80、S83、S93、S99、S146、S148、S152、S156、S175 和 S186 等区发现了环绕 HII 中心区的  $H_2$  发射壳层, 其结果表明这些 H II 区的  $H_2$  发射是紫外光子的荧光效应引起的。

上述观测结果表明,  $H_2$  喷流普遍存在于活跃的恒星形成区。系统的搜寻可以在光学和射电巡天的基础上为揭示致密分子云中恒星形成的规模提供更为完备的统计, 具有重要的意义。随着大阵列红外探测器 (例如  $2\text{k} \times 4\text{k}$  探测器阵列) 的应用, 可以预见今后将出现更大规模的巡天观测工作。

### 2.4 大尺度分布

图 4 给出已知  $H_2$  发射、光学 HH 天体及分子外流在银道面上的分布。我们看到, 在所有

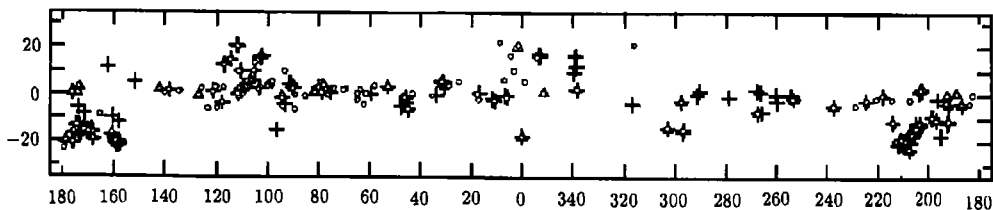


图4 光学HH天体(+)、 $H_2$ 发射( $\Delta$ )和分子外流( $\circ$ )在银道面上的分布

活跃的恒星形成区,  $H_2$ 发射是普遍存在的。但除了猎户座分子云外, 其它区域的  $H_2$ 发射相对较少, 这可能是由于观测的偏差造成的。由于目前红外  $H_2$ 发射的观测资料相对于光学及射电分子谱线少, 要作出较完备的统计分析为时尚早。但总的来说,  $H_2$ 发射的发生频数与光学HH天体和分子外流的发射频数相关。所以,  $H_2$ 发射可以作为与分子外流和光学喷流相互补充的工具, 以显现原恒星与恒星形成区, 为了解原恒星的性质及演化状态提供进一步的证据。

### 3 与光学HH天体的关系

在2.2节中我们谈到, 不同的激发状态会导致  $H_2$ 发射与光学HH天体的位置关系不同, 从许多观测结果中可以看到这些不同的形态。在HH 1-2系统中<sup>[20]</sup>, 可见高激发的[SII]禁线出现在HH 1喷流的头部; 较低激发的  $H_2$ 发射出现在弓激波的尾流, 这可能是因为在该处激波方向是倾斜的, 激波速度相对较小。在激波头部很小的区域里观测到的  $H_2$ 发射可能起源于马赫盘, 但它的出现至少说明两件事: 其一是在激波的头部区域仍有大量物质以分子形态存在, 其二, 因为  $H_2$ 发射的紧密结构, 该处的喷流是高准直的。在HH 2区, 光学和红外的线发射结构很复杂, 相互之间的关系很难理清, 因此需要更高分辨率的观测。

在HH 46/47系统中<sup>[37]</sup>, 可以看到类似的情形。在激发源的西南面(HH 47C), 可以看见弓激波头部的[SII]发射以及结构紧密的  $H_2$ 发射(这和HH 1-2系统非常相似), 激波的侧面则可见两条  $H_2$ 发射带向东北延伸, 造成这里  $H_2$ 发射的原因同样是激波面的倾斜使激波速度很小; [SII]发射从激发源向东北延伸, 直到弓激波头部(HH 47A), 而只在喷流的基点和头部出现了  $H_2$ 发射, 在沿喷流途中则没有  $H_2$ 发射。有趣的是HH 47A弓激波的开口方向并不朝向激发源, 只能从延展的[SII]发射看出它与HH 46的关系。

在HH 110区<sup>[38,39]</sup>, 可以观察到准直的  $H_2$ 喷流以及  $H\alpha$ 发射的摇摆状形态。Davis等人<sup>[38]</sup>认为, 在该区域  $H\alpha$ 显示的是喷流中较为延展的湍动混合层, 而  $H_2$ 发射显示的是片状的分子喷流。在HH 111区,  $H_2$ 发射和[SII]发射的形态基本相同, 它们可能代表了同一个工作面的不同区域。

以上例子表明, 光学和红外喷流可能是同一个高速气体喷流在不同激发条件下的表现。另外的证据来自于对红外  $H_2$ 发射结点的自行测量, 例如, 对HH 111和HH 121  $H_2$ 发射结点的自行测量<sup>[40]</sup>表明,  $H_2$ 发射结点的自行速度为  $200 \sim 400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 远大于使  $H_2$ 分子离解的激波速度( $\approx 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 而与光学喷流的自行速度相同。这一方面表明光学和  $H_2$ 发射团

块代表同样的喷流, 它们的激波传播速度相同, 同时还说明喷流带动了周围气体随动, 因此相对于周围介质的速度较小, 这样才能保证氢分子不致离解。最近对几个 HH 天体的  $H_2$  发射结点的自行测量也得到类似的结果<sup>[41]</sup>。

仅就某个区域而言, 光学 HH 天体常存在红外波段的对应体, 但  $H_2$  发射则不一定有光学波段的谱线发射<sup>[42]</sup>。这是因为  $H_2$  发射激发条件较低, 如果极高速的 HH 喷流能激发如 [OIII]、[SII] 等禁线, 则在激波的尾部冷却区发生  $H_2$  发射的可能性是很大的, 而对于较低速度的激波, 则只可能产生  $H_2$  发射而不能产生 [OII]、[SII] 等光学波段的谱线; 另一方面, 由于光学 HH 喷流在云中受到很强的消光, 有些产生于云中的 HH 天体可能因此而不见, 但红外波段光的透过率较高,  $H_2$  发射受到的消光较小, 因此在云深层的激波可以通过  $H_2$  发射加以探测。

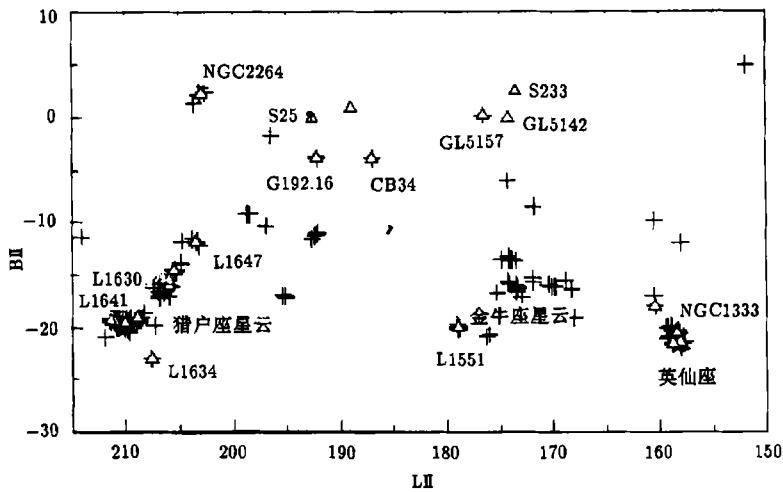


图5 英仙、金牛和猎户座中 HH 天体 (+) 与  $H_2$  发射 ( $\Delta$ ) 位置比较图  
金牛、英仙和猎户星云里都发现了  $H_2$  发射, 它们大都与光学 HH 天体的位置重合

图5 给出英仙座、金牛座及猎户座的光学和  $H_2$  发射结点位置比较图, 在大部分存在光学 HH 天体的位置上均有  $H_2$  发射对应体, 但在如 G192.16、CB34、GL5157、S233、S255 等分子外流区没有光学 HH 天体。在金牛座星云的广大区域里较少有  $H_2$  发射的报道。

## 4 与分子外流的关系

Hodapp<sup>[43]</sup> 对 Fukui<sup>[44]</sup> 列举的分子外流源作了广泛的 K 波段巡测, 由于他使用的滤光片涵盖了  $H_2 v = 1-0 S(1)$  线, 所得的图像包含了许多有趣的  $H_2$  发射图形。Hodapp 的工作具有典型意义, 在以后的工作中, 许多人采用了 Hodapp 的思路: 分子外流与红外分子氢发射有着密切的关系。在分子外流附近寻找  $H_2$  发射成为较普遍使用的方法。

关于分子外流的起源, 目前比较普遍地认为是由星风喷流驱动产生的<sup>[45]</sup>。喷流常以两种方式带动分子外流: 瞬时拖带和稳恒拖带<sup>[46]</sup>。瞬时拖带发生在激波头部, 激波气体以动

量守恒的方式冲击前方气体并使之运动。稳恒拖带发生在激波侧翼，通过湍动混合层的作用来带动周围气体。

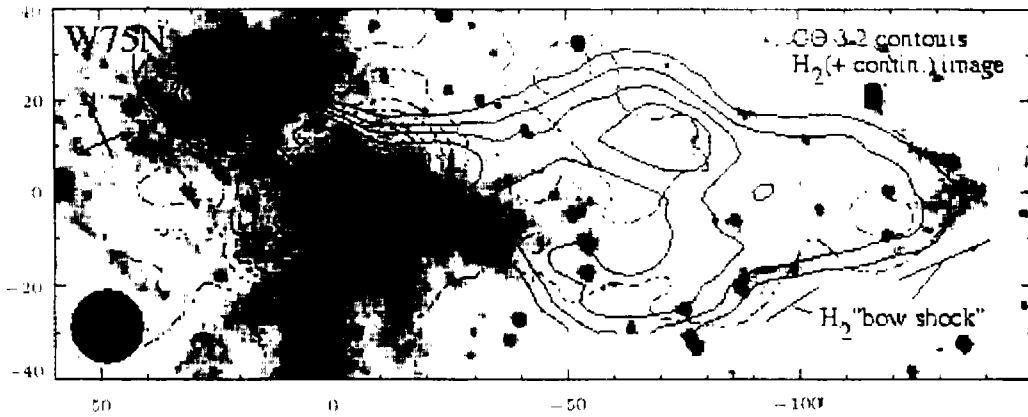


图 6 W75N 分子外流区的  $H_2$  发射与分子外流的形态比较<sup>[48]</sup>

外流红移瓣 (实线) 形状与  $H_2$  发射结点的排列相互吻合, 成为喷流拖带外流的很好的证据

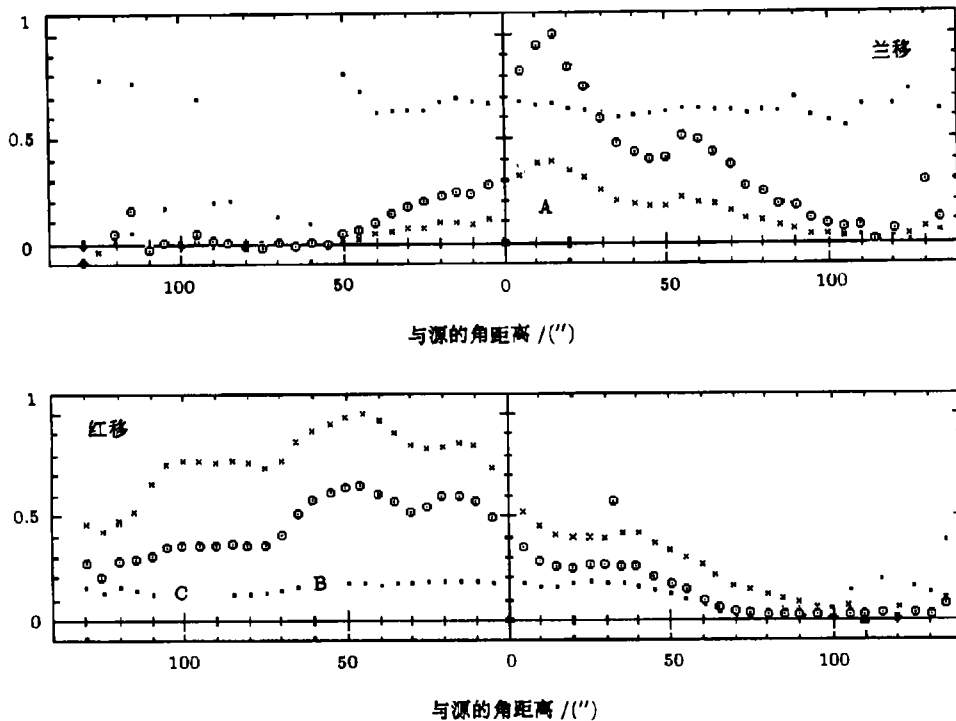


图 7 RNO 15 FIR 分子外流区质量 ( $\times$ )、动量 ( $\odot$ ) 和速度 ( $\bullet$ ) 沿外流轴向上的分布<sup>[50]</sup>

除平均速度沿轴向大致不变外, 质量和动量随距中心源的距离增加而减少. A、B、C 表示  $H_2$  发射所在的位置, 可以看出在这几个点处有动量注入外流气体中, 这成为瞬时拖带的重要证据

区别这两种拖带的方法是测量外流某点处单位长度的动量随距中心驱动源的距离的变化。在瞬时拖带的情形中, 激波受到前方致密气体的阻力, 速度不断减小, 因此单位长度的动量随距中心星的距离减小。稳恒拖带则相反, 由于喷流动量不断注入湍动混合层, 混合层的宽度随与驱动源的距离增加而增加, 因此单位长度的动量也就增加<sup>[47]</sup>。但是这种方法仅限于判断环境比较简单的区域, 在复杂区域, 常有多个外流相互掺杂, 很难区分。因此在大质量恒星形成区(在那里恒星周边环境常常很复杂), 要判定是什么物理过程在带动分子外流时起主要作用, 需要作仔细的考察。

观测表明, 瞬时拖带和稳恒拖带在外流活动中都存在。Davis 等人<sup>[48]</sup>发现在 W75N 分子外流中, 距激发源西南约 100'' 处的 H<sub>2</sub> 弓激波形状与用 CO 3-2 谱线探测到的分子外流(红翼)的形状相同, 从而非常清晰地描绘喷流拖带分子外流的物理图像(图 6)。Davis 等人<sup>[49]</sup>也观测到了在 RNO 15-FIR 分子外流区瞬时拖带的证据(图 7)。Lada 和 Fich<sup>[50]</sup>发现 NGC2264G 分子外流中的“哈勃定律”, 即某点的外流速度正比于该点到中心源的距离, 这可能是喷流通过湍动混合层拖带外流的证据之一, 事实上, Davis 等人<sup>[19]</sup>在这个区域发现的 H<sub>2</sub> 发射显示了湍动混合层的存在。

HH 211 也许是能够说明 H<sub>2</sub> 红外喷流与分子外流之间关系的最好例证。最近的高分辨 CO  $J = 1-0$  和  $J = 2-1$  干涉阵观测<sup>[51]</sup>表明, 高速的 CO 分子气体本身准直度较高, 能显示高准直的喷流及吹起的空腔。低速的分子气体与 H<sub>2</sub> 发射形态很接近, 它显示的是带动分子外流的工作面及包围空腔的壳层(图 1)。

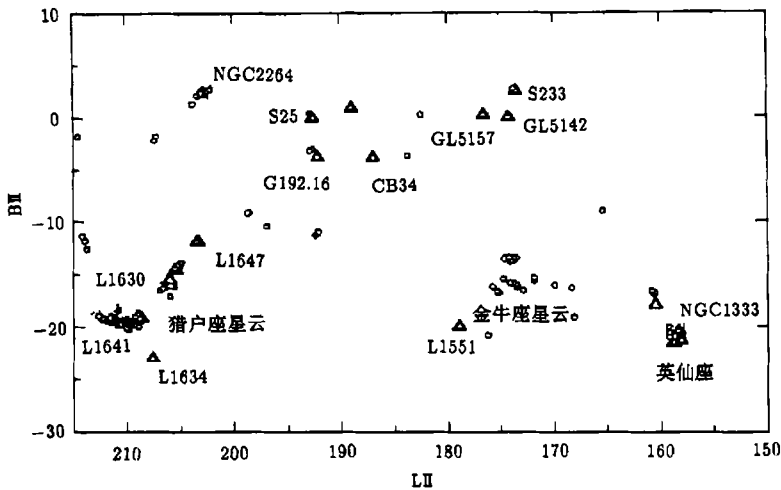


图 8 英仙、金牛和猎户座的 H<sub>2</sub> 发射( $\Delta$ )与分子外流( $\circ$ )的分布比较  
可以看出在分子外流区发现 H<sub>2</sub> 发射的几率是相当高的, 而目前  
为止几乎所有已经发现的 H<sub>2</sub> 发射都存在相应的分子外流

图 8 给出英仙、金牛及猎户座 H<sub>2</sub> 发射及分子外流的位置比较图, 从中可以看出, 在发现红外 H<sub>2</sub> 发射的位置处几乎总存在对应的分子外流, 这是否意味着红外喷流总能拖带起分子外流? 这个问题虽尚无定论, 相信随着红外喷流观测样本数的增加, 会对它与分子外流之间



的关系有更深入的了解。

## 5 结 语

近红外成像观测是最近几年出现的新研究领域,并伴随 NICMOS 等大阵列探测器的广泛应用而取得飞速的发展。大型地面望远镜(如 Keck、Gemini、Subaru 等)和空间望远镜的投入使用,使得能在更高的空间分辨率上观测这一现象。这些器件和设备为我们了解年轻星的物质抛射活动提供了新的证据和资料。目前已在数十个近邻恒星形成区内发现了  $H_2$  发射,并且探测到的  $H_2$  发射还在迅速增加。高分辨图像也使我们比较年轻星附近的其它波段观测的剧烈活动(如分子外流、喷流、激波等),以得到反映这些活动之间关系的更清晰的物理图像:

(1) 红外喷流,是年轻星的高速喷射气体与周围气体相互作用的结果。红外喷流和光学喷流或 HH 天体是喷流速度、位置和几何关系不同侧面的表现。光学 HH 天体产生于超高速的( $\approx 200\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )激波,而  $H_2$  发射结点产生于高速( $20\sim 50\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )激波。在有些喷流中可以同时出现光学和红外的发射线。许多情形下光学 HH 天体在弓激波头部,而红外  $H_2$  发射则在尾部冷却区。由于不同的物理过程和激发条件,以及不同的环境,可能导致光学和红外喷流的形态差异很大,它们之间的位置关系经常反映了喷流与周围介质相互作用的结果。

(2) 分子外流是由喷流拖带的。拖带包括两种机制,一种是激波冲击前方气体而产生的瞬时拖带,另一种是在激波经过的区域因速度剪切而产生的湍动混合层引起的稳恒拖带,这两种拖带都被证实存在质量外流活动中存在。高准直的分子外流可能本身就是高速的分子喷流,它们与红外  $H_2$  喷流并无本质区别,只是不同的波段及分辨率观测的不同表现。

(3) 红外喷流的探测是恒星形成领域中一个崭新的分支,近年来发展迅速。今后的工作可能集中在两个方面,一是利用更先进的望远镜观测著名的分子外流和 HH 天体,获取更高分辨率的图像;二是对已知恒星形成区作无偏巡测,以获取比较完备的统计分析。

## 参 考 文 献

- 1 Lada C J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1985, 23: 267
- 2 Shu F H, Adams F C, Lizano S. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1987, 25: 23
- 3 Bachiller R. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1996, 34: 111
- 4 Lada C J. In: Yuan C, You J eds. *Molecular Clouds and Star Formation*, Singapore: World Scientific, 1993, 1
- 5 Herbig G. *Ap. J.*, 1951, 113: 697
- 6 Haro G. *Ap. J.*, 1952, 115: 572
- 7 Reipurth B. 1999, [Http://casa.colorado.edu/hhcat](http://casa.colorado.edu/hhcat)
- 8 Snell R L, Loren R B, Plambeck R L. *Ap. J.*, 1980, 239: 17
- 9 McCaughrean M J, Rayner J T, Zinnecker H. *Ap. J. Lett.*, 1994, 436: L189
- 10 Davis C J, Dent W R F, Matthews H E *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1994, 266: 933
- 11 Gredel R, Reipurth B. *Ap. J. Lett.*, 1993, 407: L29
- 12 Gredel R. *Astron. Astrophys.*, 1994, 292: 580
- 13 Gautier III T N, Fink U, Treffers R R *et al.* *Ap. J. Lett.*, 1976, 207: L129
- 14 Hollenbach D J, Shull J M. *Ap. J.*, 1997, 216: 419
- 15 Kwan J. *Ap. J.*, 1977, 216: 713

- 16 Elias J H. *Ap. J.*, 1980, 241: 728
- 17 Lane A P, Bally J. *Ap. J.*, 1986, 310: 820
- 18 Zinnecker H, Mundt R, Geballe T R et al. *Ap. J.*, 1989, 342: 337
- 19 Davis C J, Eisloffel J. *Astron. Astrophys.*, 1995, 300: 851
- 20 Davis C J, Eisloffel J, Ray T P. *Ap. J. Lett.*, 1994, 426: L93
- 21 Salas L, Cruz-Gonzalez I, Porras A. *Ap. J.*, 1998, 500: 853
- 22 Jiang Z, Yao Y, Yang J et al. *A. J.*, 2000, submitted
- 23 Gueth F, Guilloteau S, Bachiller R. *Astron. Astrophys.*, 1996, 307: 891
- 24 Raga A, Cabrit S. *Astron. Astrophys.*, 1993, 278: 267
- 25 Canto J, Raga A C. *M.N.R.A.S.*, 1995, 277: 1120
- 26 Hunter T R, Testi L, Taylor G B et al. *Astron. Astrophys.*, 1995, 302: 249
- 27 Chen Y, Yao Y, Yang J et al. *A. J.*, 1999, 117: 446
- 28 Stolovy S R, Burton M G, Erickson E F et al. *Ap. J. Lett.*, 1998, 492: L151
- 29 Yun J L, Clemens D P, Moreira M C et al. *Ap. J. Lett.*, 1997, 479: L71
- 30 Davis C J, Moriarty-Schieven G, Eisloffel J et al. *A. J.*, 1998, 115: 1118
- 31 Hartigan P, Carpenter J M, Dougados C. A. J., 1996, 111: 1278
- 32 Smith M D, Brand P W J L. *M.N.R.A.S.*, 1990, 245: 108
- 33 Hollenbach D J, McKee C F. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1979, 41: 555
- 34 Stanke T, McCaughrean M J, Zinnecker H. *Astron. Astrophys.*, 1998, 332: 307
- 35 Yu K C, Bally J, Devine D. *Ap. J. Lett.*, 1997, 485: L45
- 36 Smutko M F, Larkin J E. *A. J.*, 1999, 117: 2448
- 37 Eisloffel J, Davis C J, Ray T P et al. *Ap. J. Lett.*, 1994, 422: L91
- 38 Davis C J, Mundt R, Eisloffel J. *Ap. J. Lett.*, 1994, 437: L55
- 39 Noriega-Crespo A, Garnavich P M, Raga A C. *Ap. J.*, 1996, 462: 804
- 40 Coppin K E K, Davis C J, Miccono M. *M.N.R.A.S.*, 1998, 301: L10
- 41 Chrysostomou A, Hobson J, Davis C et al. *M.N.R.A.S.*, 2000, 314: 229
- 42 Noriega-Crespo A, Garnavich P M. *A. J.*, 1994, 108: 1432
- 43 Hodapp K. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 94: 615
- 44 Fukui Y. In: Reipurth B ed. *Workshop on Low-Mass Star Formation and Pre-Main-Sequence Objects ESO Conf. And Workshop Proc. 33*, Garching: ESO, 1989, 2
- 45 Masson C R, Chernin L. *Ap. J.*, 1993, 414: 230
- 46 de Young D S. *Ap. J.*, 1986, 307: 62
- 47 Chernin L M, Masson C R. *Ap. J.*, 1995, 455: 182
- 48 Davis C J, Smith M D, Moriarty-Schieven G H. *M.N.R.A.S.*, 1998, 299: 825
- 49 Davis C J, Eisloffel J, Ray T P et al. *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 1013
- 50 Lada C J, Fich M. *Ap. J.*, 1996, 459: 638
- 51 Gueth F, Guilloteau S. *Astron. Astrophys.*, 1999, 343: 571
- 52 Hartigan P, Curiel S, Raymond J. *Ap. J. Lett.*, 1989, 347: L31
- 53 Carr J. *Ap. J.*, 1993, 406: 553
- 54 Fernandes A, Brand P W J L. *M.N.R.A.S.*, 1995, 274: 639
- 55 Curiel S, Raymond J C, Wolfire M et al. *Ap. J.*, 1995, 453: 322
- 56 Schwartz R D, Cohen M, Williams P M. *Ap. J.*, 1987, 392: 145
- 57 Bachiller R, Terebey S, Jarrett T et al. *Ap. J.*, 1994, 437: 296
- 58 Garden R, Russel A, Burton M. *Ap. J.*, 1990, 244: 115
- 59 Bally J, Lada E, Lane A P. *Ap. J.*, 1993, 418: 322
- 60 Ayala M, Curiel S, Raga A C et al. *Astron. Astrophys.*, 1998, 332: 1055
- 61 Cesaroni R, Felli M, Testi L et al. *Astron. Astrophys.*, 1997, 325: 725
- 62 Chrysostomou A, Burton M G, Axon D J et al. *M.N.R.A.S.*, 1997, 289: 605
- 63 Davis C J, Smith M D. *Ap. J. Lett.*, 1995, 443: L41

- 64 Davis C J, Mundt R, Eisloffel J et al. *A. J.*, 1995, 110: 766  
65 Davis C J, Smith M D. *Astron. Astrophys.*, 1996, 310: 961  
66 Davis C J, Eisloffel J, Smith M D. *Ap. J.*, 1996, 463: 246  
67 Davis C J, Ray T P, Eisloffel J et al. *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 263  
68 Davis C J, Smith M D, Eisloffel J et al. *M.N.R.A.S.*, 1998, 308: 593  
69 Dent W R F, Matthews H E, Walther D M. *M.N.R.A.S.*, 1995, 277: 193  
70 Eisloffel J, Smith M D, Davis C J et al. *A. J.*, 1996, 112: 2086  
71 Everett M E. *Ap. J.*, 1997, 478: 246  
72 Garnavich P M, Norieg-Crespo A, Raga A C et al. *Ap. J.*, 1997, 490: 752  
73 Gomez M, Whitney B A, Kenyon S J. *A. J.*, 1997, 114: 1138  
74 Goetz J A, Pipher J L, Forrest W J et al. *Ap. J.*, 1998, 504: 359  
75 Gredel R, Reipurth B. *Astron. Astrophys.*, 1994, 289: L19  
76 Herbst T M, Beckwith S V W, Robberto M. *Ap. J. Lett.*, 1997, 486: L59  
77 Hodapp K. *Ap. J.*, 1995, 453: 715  
78 Hodapp, K. *Ap. J. Lett.*, 1998, 500: L183  
79 Howard E M, Pipher J L, Forrest W J. *Ap. J.*, 1997, 481: 327  
80 Kumar M S, Anandarao B G, Davis C J. *Astron. Astrophys.*, 1999, 344: L9  
81 Ladd E F, Hodapp K W. *Ap. J.*, 1997, 475: 749  
82 Micono M, Davis C J, Ray T P et al. *Ap. J. Lett.*, 1998, 494: L227  
83 Miralles M P, Salas L, Cruz-Gonzalez I et al. *Ap. J.*, 1997, 488: 749  
84 Moreira M C, Yun J L. *Ap. J.*, 1995, 454: 850  
85 Noriega-Crespo A. In: Reipurth B, Bertout C eds. *Herbig-Haro Flows and the Birth of Low Mass Stars*. IAU symp. 182, Chamonis, France, 1997, Dordrecht: kluwer, 1997, 103  
86 Noriega-Crespo A, Garnavich P M, Molinari S. A. J., 1998, 116: 1388  
87 Palacios J, Eiroa C. *Astron. Astrophys.*, 1999, 346: 233  
88 Persi P, Roth M, Tapia M et al. *Astron. Astrophys.*, 1996, 307: 591  
89 Raga A C, Canto J, Biro S. *M.N.R.A.S.*, 1993, 260: 163  
90 Sahai R, Hines D C, Kastner J H et al. *Ap. J. Lett.*, 1998, 492: L163  
91 Schild H, Miller S, Tennyson J. *Astron. Astrophys.*, 1997, 318: 608  
92 Schultz A S B, Golgan S W J, Erickson E F et al. *Ap. J.*, 1999, 511: 282  
93 Shepherd D S, Watson A M, Sargent A I et al. *Ap. J.*, 1998, 507: 861  
94 Sugai H, Kawabata H, Usuda T et al. *Ap. J.*, 1995, 442: 674  
95 Tamura M, Yamashita T. *Ap. J.*, 1992, 391: 710  
96 Wang J J. PhD Thesis, Beijing: Beijing Astronomical Observatory, 1997,  
97 Zealey W J, Williams P M, Sandell G et al. *Astron. Astrophys.*, 1992, 262: 570  
98 Zinnecker H, McCaughrean M J, Rayner J. In: Reipurth B, Bertout C eds. *Herbig-Haro Flows and the Birth of Low Mass Stars*. IAU Symp. 182, Chamonis, France, 1997, Dordrecht: kluwer, 1997, 198

## Recent Progress in the Near Infrared Imaging of Jets from Young Stellar Objects

Jiang Zhibo    Yang Ji

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

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

### Abstract

The infrared ro-vibrational lines of molecular hydrogen are the most important tracers of

mass outflow around young stellar objects (YSOs). Since the first discovery by Gautier *et al.* in 1976, the molecular hydrogen lines have been detected in almost all star forming regions in the Galaxy over the subsequent decades. Further studies show that H<sub>2</sub> line emissions are closely associated with other energetic activities around YSOs such as molecular outflows and optical jets. Infrared and optical jets are two different manifestations of the same jet interaction with ambient media. Such interaction leads to the entrainment of ambient material and subsequently drives molecular outflow. Optical/infrared jets and molecular outflows make up the spectacular scenery in the star forming regions and are the signposts of star forming activities.

With the advent of the large array detector such as NICMOS in the 1990's, great progress has been made in near infrared imaging observation. So far about 70 regions have been detected in H<sub>2</sub> emission, with the number increasing rapidly. Future development will be in two directions: observation at higher angular resolution should reveal the detailed structure of H<sub>2</sub> jets, which will also help to understand the relation between H<sub>2</sub> emissions, HH jet, and CO outflows; large scale survey will provide information on the large scale structure and distribution of H<sub>2</sub> knots in star forming regions in the Galaxy.

**Key words** stars: formation—ISM—techniques: infrared observation