

低质量年轻星体附近的外向流研究*

吴月芳

(北京大学地球物理系)

提 要

本文简介了恒星形成区的气体外向流现象,着重对低质量年轻星体附近的气体外向流的速度范围、形态特征、物理性质作了概述,同时分析和探讨了其产生率、准直因素和对成协分子云的作用,最后对外向流区域的光学现象和向外流的驱动机制进行了综述。

一、引 言

近 20 年来,天文学上最激动人心和出人意料的发现之一,是年轻星体附近的外向流。具有毫米波辐射而又易于激发、丰富而又几乎与 H_2 成恒定比例的 CO 分子谱线测量表明:在零强度(天线温度为 0.1—0.2K)时的谱线全宽,可达每秒几十到一百多公里,能量最高可达 10^{47} erg。这种高速冷分子气体流动,把从星体急速向外移动的 HH 天体、 H_2O 脉泽源以及激波激发的分子辐射区域联系起来,极大地促进了恒星形成过程中质量抛射的研究,使得约半个世纪以前就开始揭示的这一现象,有可能辨认为一个演化阶段。外向流已被公认为高能质量抛射的示踪剂。

外向流由 Zuckerman 和 Kuiper 等首先在 Orion 分子云中 发现^[1-3],谱线翼宽度达到 $150\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,其发射区域以 kL 为中心,线度 $\sim 1'$;接着在一些其他分子云中也发现了高速气体^[4-7],其中包括 Snell、Loren 和 Plambeck 发现的低质量星形成区 L1551^[6]。该源发射区域大,测到了相当准直的并具有红蓝两瓣的 CO 天图。后来,无论在高度屏蔽的亮原恒星凝聚体和低质量暗年轻星周围,均相当普遍地测到了一批高速气体外向流^[8-10],其中质量较小的恒星形成区的外向流探测,在近年有较大深入^[11-14],这些区域主要包含刚刚形成或正在形成的 T-Tauri 型星。具体有暗星云稠密核,IRAS 源、Lynds 云及和外向流成协的 HH 天体等。我们主要对这类外向流源进行讨论,这里所述低质量星体即指其光度 $L < 100L_{\odot}$ 。主要为 $1-50L_{\odot}$ 。或质量相应于赫罗图上向主序演化轨迹的质量标称为 $1-3M_{\odot}$ 的星体。所讨论内容为外向流的高速范围和产生率,形态特征和准直因素,物理参数和对分子云的作用,以及相应的光学特征和驱动机制。

* 国家自然科学基金资助项目。
1989 年 12 月 15 日收到。
1990 年 5 月 29 日收到修改稿。

二、高速范围和产生率

低质量年轻星体附近的外向流，速度一般要比大质量星形成区的小，但两类外向流速度并无明确界限，要看星体附近成协分子云的具体物理条件。

外向流证认主要看速度是否超过附近气体中的声速，但分子云中声速一般只有每秒几百米^[8]，而恒星形成区域中的系统坍缩、自转或湍流等速度也可超过声速，并造成谱线的超宽现象，因此确定外向流时应当排除这几种可能性。

Zuckerman 和 Evans 发现在用自由坍缩解释 CO 谱线的异常半极大功率全宽时，将导致银河系内过高的恒星形成率^[15]，而若气体以与零强度时的谱线全宽相应的速度坍缩，则矛盾更为突出，CO 分子谱线半功率全宽一般为 $1-3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而外向流速度可高得多。

抗衡坍缩的自转速度决定于云的中心质量 $M_c = v^2 r / G$ ，其中 r 为以速度 v 自转的物质到云中心的距离， G 为引力常数^[11]。若 v 为所观测到的外向流速度，则要求云所有的中心质量，比云的实际质量大一个数量级以上。Frerking 和 Langer^[11]指出，个别云如 B335，从上式算得的中心质量值只比 C^{18}O 、CS 等分子谱线测得的质量大一倍，但转动所造成的系统速度位移，不能解释在速度弥散较大的位置同时出现正负值的现象。其实，外向流源谱线的高度不对称和发射区域的双极性，已可排除坍缩、膨胀及自转等因素。至于湍动，若分子团块间的超声速相对运动引起观测到的速度值，则将在周围气体中产生激波并在时间 $t_{\text{dis}} = \frac{L}{v} < \frac{R}{v} \cong t_{\text{ff}}$ 内耗散其能量，其中 L 、 R 各为湍流源尺度和星云半径， t_{ff} 为自由坍缩时间^[16-17]。由于缺乏具有同样能量转换效率的补充能源，这又将导致坍缩和过高的恒星形成率。

除了速度上的证认，有的作者如 Margulis 和 Lada, Snell^[18] 还提出了一些附加条件，如谱线轮廓的形状是否光滑和连续地延伸到高速范围等，有无可作为驱动源的成协年轻星体也是确认外向流的前提条件之一。

表 1 列出了 52 个 1988 年底前在正式书刊或在预印本上发表的低质量年轻星体外流源。前四栏依次为源名、赤经、赤纬和距离，第 5 栏速度 Δv 即零强度时的 CO 谱线全宽，第 7 栏为中心天体光度。从表 1 可见，最大速度为 Mon OB1G 的 $54.8\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最小为 L255 中的 $4.19\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，速度范围 $\geq 30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的只有 7 个源，而其中的 HH26IR 和 S140-N，光度可能 $> 100L_{\odot}$ ，Mon OB1 中的两个源 C 和 G，速度 $> 30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，从总机械功率与光度的关系看^[9]，光度也很可能大于 $100L_{\odot}$ ，因此 $v \geq 30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的源只占 6—14%，而 $\Delta v < 10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的占绝大多数。在 Lada^[8]表中 44 个大质量星附近的外流源，速度 $\geq 30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的有 15 个，占 34%，最高的为 Orion A，速度为 $127\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最低的为 HD250550，速度为 $7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，是唯一的速度小于 $10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的源。两类源的速度范围分布见图 1：(a) 为低质量星的；(b) 为高质量星的。两类源的峰值分布类似。

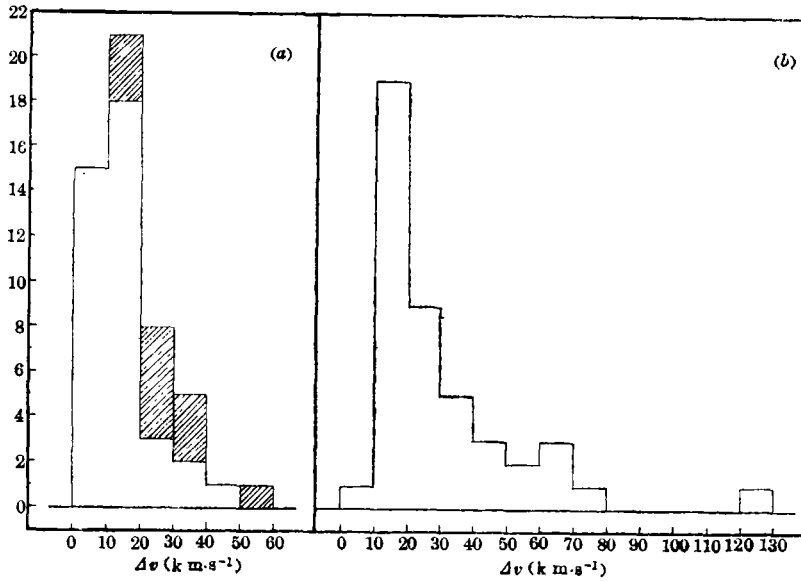
表 1 所列源的距离不超过 1kpc。从中我们可知太阳附近低质量星形成区外向流的产生率较高，以 500pc 范围内的源计算，若外流源的寿命为 τ 年，则产生率为 $5.5 \times 10^{-8} / \tau \cdot \text{pc}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ ，设外流源时标的平均值(见第四节)为 $7 \times 10^4 \text{yr}$ ，则该范围内的产生率为 $7.9 \times$

表 1 外向流源

Core Name	R.A.(1950)			Dec.(1950)			D (pc)	Δv (km·s ⁻¹)	Rcoll	L* (L _☉)	Ref.
	h	m	s	°	'	''					
RNO13	03	22	04.8	30	35	50	350	12	1.8	5.2	8.19
L1455NW	03	24	22.0	30	05	24	350	12	3.7	≈0.3	19.20.25
L1455FIR	3	24	36.2	30	02	40	350	15	2.4	<6	8.19.21
L1455M	03	24	43.5	30	01	43	350	15	3.7	7.2	19.21.25
HH12	03	25	57.0	31	10	00	350	20		23	8.22
HH7-11	03	25	58.2	31	05	46	350	40	1.9	90	8.23
B5	03	44	28.7	32	44	33	350	20		9.6	12
L1489	04	01	40.6	26	10	48	140	5.5	2.0	4.2	13.25.33
T Tau	04	19	04	19	25	05	140	13	1.0	22	8.20
ZZ Tau	04	27	50.6	24	35	24	140	5.2	2.0	0.18	24.25
L1551	04	28	40.0	18	01	52	140	30	5.2	25	8.19.26
HL/XZTau	04	28	44.4	18	07	36	140	11		8.5	8.19
L1529	04	29	43.4	24	16	54	135	30		2	27
L1535	04	32	31.6	24	02	08	140	4.8	2.4	0.41	13.24.25
L1527	04	36	00	26	10	00	160	6.0	3.2		11
TMC1A	04	36	31.3	25	35	55	140	10.04		2.4	14.33
IC2087	04	36	54.6	25	39	17	140	7.3	2.1	0.86	24.25
L1582B	05	29	26.9	12	47	13	400	12.08	2.9	5.9	14.29
RN043S	05	29	35.0	12	50	00	460	11	1.5		8.22
RN043N	05	29	38	12	55	00	460	11	2.9		8.22
Ori A-W	05	30	14.5	-05	37	52	500	13		40-400	31
L1641N	05	33	52.7	-06	24	02	500	28.0	2.0	40-400	25.31
CS-Star	05	33	55.4	-06	47	24	480	8	2.1	36	8.19
Ori A-E	05	34	11.0	-05	30	03	500	19		40-400	31
H* 4-255	05	36	57.4	-07	28	20	500	10	2.0	55	19
L1641S	05	38	03.0	-07	28	59	500	28.0	1.6	40-400	31
B35	05	41	42.0	09	07	00	500	12.5	2.3	15	13.25.29
HH26IR	05	43	31.6	-0	15	23	500	30	2.7	50-300	8.32
HH24	05	43	38	-0	13	23	500	15	1.0	20	8.32
N*2071-N	05	45	00	00	40	00	500	17	1.7	40-400	31
MonOB1H	06	38	17	10	39	56	800	27.3		>100?	18.38
MonOB1D	06	38	19.0	09	37	32	800	28.0	1.9	>100?	18.38
MonOB1I	06	38	19	10	52	39	800	18.2	2.6	<100?	18.38
MonOB1C	06	38	26.0	09	32	00	800	31.2	1.0	>100?	18.38
MonOB1G	06	38	27.0	09	58	28	800	54.6	4.2	>100?	18.38
L1686	16	22	54.9	-24	12	06	160	9.1	2.1	14	14.29
ρOph-E	16	29	20.9	-24	22	13	160	25	2.1	40-400	31
L43	16	31	38.0	-15	40	50	160	9.5	2.5	4.3	13.25.33
L255	16	44	13.7	-09	30	59	160	4.19		0.97	14.33
L379	18	27	00	-15	10	00	200	7.0	1.6	>40	30
L723	19	15	42.0	19	06	49	300	20	4.1	2.8	21.25.34
AS353	19	18	09.4	10	56	30	300	11	2.2	7.2	19
L778	19	24	26.4	23	52	37	250	19	2.3	0.57	13.29.34
B335	19	34	34.0	07	27	20	400	8	2.8	7.6	21.25
PVcep	20	45	23.3	67	46	36	500	5	3.5	80	8
V1331CYg	20	59	32.1	50	09	56	700	16	4.9	36	19
L1174	20	59	46.2	68	01	03	440	8.02		4.2	14.33
L1172D	21	01	44.9	67	42	32	440	9	1.8	0.95	13.25.29
B361	21	10	40.8	47	12	01	350	13.0	2.9	4.7	14.29
L1031C	21	44	35.5	47	04	20	900	7.0		4.9	14.29
L1031B	21	45	27.9	47	18	12	900			95.0	13.29
S140-N	22	17	51.5	63	17	50	900	32	1.3	40-400	31

* H=Haro

N*=NGC



(a)低质量年轻星体附近的外流源。阴影表示相应的源有可能属于高质量星形成区
(b)高质量年轻星体附近的外流源

图 1 外流源随速度 Δv 的分布

$10^{-10} \text{pc}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 这和太阳附近的恒星局部诞生率 $(6-10) \times 10^{-10} \text{pc}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 接近^[35,36,18], 比 AO 或更早型星的形成率要高^[37]。一些其他无选择性的巡天中, 也发现较高的外向流产生率。例如 Myers 等^[13]发现暗星云稠密核有 7/16 具有外向流, Margulis 等^[18]在 Mon OB1 的巡天中发现太阳附近的产生率高于 $48/\tau \text{kpc}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 与我们的结果符合得很好。由于可能还有外向流没有搜寻到, $5.5 \times 10^{-5}/\tau \cdot \text{pc}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 可能是低估的。但总的说来, 出现频率可与恒星局部诞生率相比, 这说明低质量星形成区域几乎都存在外向流。

三、形态和准直因素

分子外向流最引人注目的特征是气体发射具有红蓝移的两翼分布, 发射区域具有双极性。多数源具有这种特点, 它们常常与一个年轻星或深嵌的红外源不同程度地对称分布, 也有各向同性分布的, 还有单极的。图 2 为一些外流源的形态: (a) 是 L1551-IRS5^[6]; (b) 是 L723^[21]; (c) 为 S140-N^[31], 均是双极分布, 但两极相距远近不同; (d) 是 L1535^[24], 是单极的; (e) S140 为各向同性, 是高质量星形成区的外流源^[9]。

从图 2 可见, 同是非各向同性的外流源, 准直程度不同。Bally 和 Lada 用准直因子 R_{coll} 来描写这一性质^[9]: $R_{\text{coll}} = R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$

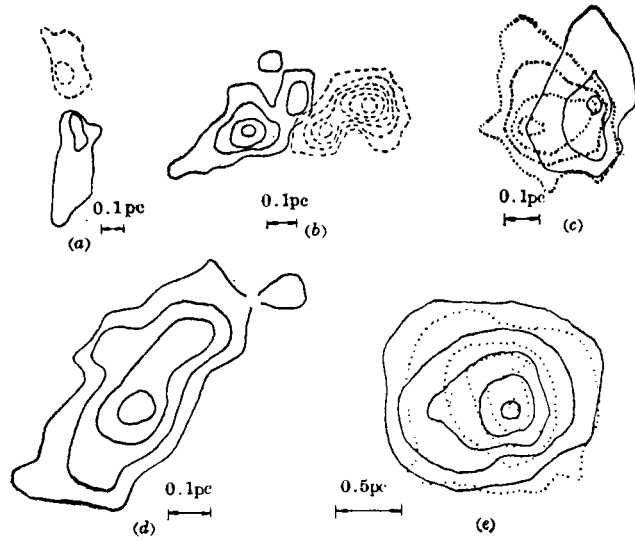
$$\text{其中 } R_{\text{max}} = \frac{1}{2} [D_{\text{max}}^2 - \theta_{\text{FWHM}}^2]^{1/2}$$

$$R_{\text{min}} = \frac{1}{2} [D_{\text{min}}^2 - \theta_{\text{FWHM}}^2]^{1/2}$$

D_{max} 和 D_{min} 为外向流区域的长径和短径, θ_{FWHM} 为望远镜的高斯束宽。表 1 中所列源的准

直因子如第 6 栏所示。

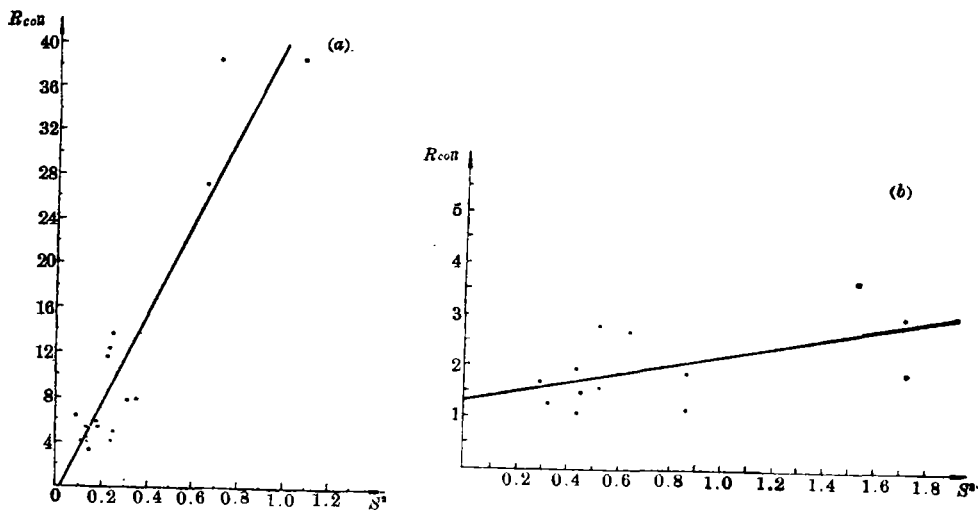
低质量年轻星体附近外向流的形态,总的说来与大质量星形成区的相同,也是多种多样,但统计表明,低质量星体的外流源各向同性的少,极性源多,且其准直程度较高。至今所发现的 4 个各向同性源 M8E, S140, NGC7538, MWC1080 中,前 3 个属大质量星形成区, MWC 是 Herbig Ae/Be 星,其光度为 $6500L_{\odot}$,光谱型为 B0,表明它很近主序,候选恒星质量也较大,近似 $12M_{\odot}$ [19],说明这些典型的各向同性源中没有一个是低质量星形成区的。毛信杰 [25] 等曾研究过外流气体质量不同的源的准直性对速度的依赖关系,他们引入量 S : $S^2 = \left(\frac{L_{\text{HMF}} R_{\text{max}}}{M_g} \right)^{1/3}$, 式中三



(a) L1551-IRS5^[6], (b) L723^[21], (c) S140-N^[31]
(d) L1535^[24], (e) S140^[9]

图 2 外流源的形态

个量分别为总机械功率、外流区域半长径和外流气体质量, S 和外流真速度^[8]成正比。他们得到的各源 $R_{\text{coll}}-S$ 的关系如图 3 所示,不同外流气体质量的源在图上分布有所不同,但总的呈外向流准直因子随速度增加而增加的趋势,且低质量源的准直因子增加较快,在速度相同时,外流气体质量小的源准直性较好。统计表明,外流气体质量与其年轻星体质量关,文献 [25] 所述 21 个小质量源中,除 GGD12—15、HD250550、LKH198、EL 1—12 可能



(a) 外流气体质量 $< 2M_{\odot}$ 的源

(b) 外流气体质量 $> 2M_{\odot}$ 的源

图 3 准直性与外流气体质量的关系^[25]

沿 $M \geq 3M_{\odot}$ 的轨迹演化外, 均属于低质量星形成区。所以外向流准直性与外流气体质量的关系, 也反映其与中心天体质量的关系。

关于外流源的准直性与中心天体光度 L_* (表 1 第 7 栏) 的关系, 我们分别对两类源作了考察。对表 1 中 R_{coll} 和 L_* 都已知的 37 个源, 其随准直性及光度的分布见图 4(a), $R_{\text{coll}} > 2$ 的有 26 个, $R_{\text{coll}} < 2$ 的有 11 个, 若考虑到其中 9 个光度可能 $> 100L_{\odot}$ 的源的分布, $R_{\text{coll}} > 2$ 的源占 $> 70\%$, $R_{\text{coll}} < 2$ 的占 $< 30\%$ 。在 Lada 表中^[8], 17 个大质量星形成区的源, 光度 $> 150L_{\odot}$, 其中包括 EL1—12, 根据文献[33]为 $201L_{\odot}$, 其随 R_{coll} 和 L_* 的分布如图 4(b), $R_{\text{coll}} < 2$ 的有 12 个, 占 71%, 而 $R \geq 2$ 的占 29%, 情况正好与低质量形成区的相反。在 R_{coll} 最大的两个大质量源中 ($R_{\text{coll}} \geq 6$), 有一个是 Cep A^[39,40], 这个源的准直性在本文涉及到的所有样品中, 是唯一一争议较大的源。按文献[8]和[41], $R_{\text{coll}} = 6.2$, 而 Levreault^[19] 对此源区测到了更大的天图, 几乎是典型的各向同性。在文献[25]中的 $R_{\text{coll}}-S^2$ 图上, Cep A 是唯一的例外作为一个大质量源因 R_{coll} 值高而落在小质量源的分布区。若 Levreault 的结果准确, 则在关于 $R_{\text{coll}}-L_*$ 的关系中, 大质量源准直因子 < 2 的比例还要增加, 而文献[25]中的这一例外也可消除。总之, $R_{\text{coll}}-L_*$ 的统计表明, 中心光度大的源对应外向流的准直性有变差的趋向, 这与质量较低的年轻星体附近的外向流准直性较好的结果是一致的。

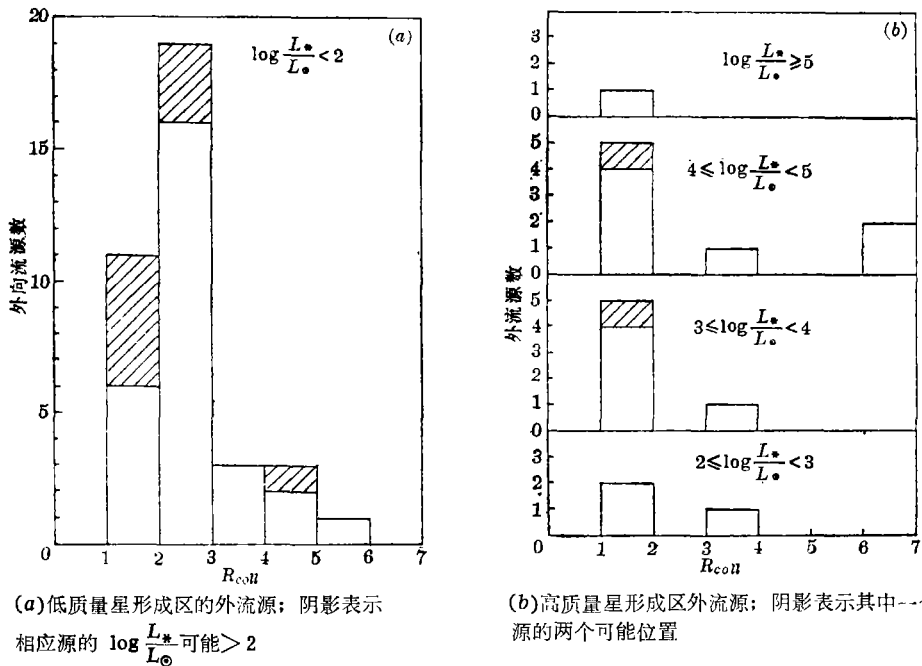


图 4 外流源随准直性及中心星光度的分布

上述外向流源随准直性和光度的分布表明, 至少在低质量年轻星体附近, 辐射压不是外向流的主要驱动因素。这与 Evans 等^[28]的研究结论相符。

四、物理参量及对分子云的作用

气体外向流的基本物理参量, 可从分子谱线的观测, 再由发射区域相应的激发条件、元

素丰度等方面的经验关系或模型得到。

为求外流气体的柱密度, 可测一个光学薄分子的跃迁, 一般用 ^{13}CO , 并假设气体处于局部热动平衡, 以光学厚的 CO 分子的相应谱线测得激发温度 T_{ex} , 即可求得 ^{13}CO 分子的光厚 τ^{13} 及柱密度 N^{13} , 若气体速度为 v , 则

$$N_v^{13} = 2.41 \times 10^{14} (T_{ex} + 0.91) (1 - e^{-h\nu/kT_{ex}})^{-1} \tau_v^{13} / \text{cm}^2 \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$$

再由 ^{13}CO 和 H_2 的丰度比及观测得的高速发射气体速度和空间分布区域, 即可求得外流气体的质量, 并估算出动量和动能^[8,9]:

$$M = \int M_v dv d\alpha d\delta$$

$$P = \int M_v v dv d\alpha d\delta$$

$$E = \int M_v v^2 dv d\alpha d\delta$$

并以观测到的外向流尺度 R , 结合 v 、 P 和 E 等量, 求出动力学演化时标 $\tau = R/v$, 驱动力 $F = \dot{P} = P/\tau$, 总机械功率 $L_{\text{HMF}} = E/\tau$. 由星风和被撞击气体间相互作用动量守恒,

表 2 外向流的物理参数

Core Name	M M_{\odot}	P $M_{\odot}\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	E 10^{43}erg	τ 10^4yr	L_{HMF} L_{\odot}	dM/dt $10^{-6}M_{\odot}\text{yr}^{-1}$	P_{core} $M_{\odot}\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	参考文献
L1455NW	0.3	1.6	9	5.7	0.01	30		13,21
L1455M	0.6	2.9	20	4.7	0.04	60		13,21
HH12	0.1	0.6	4	0.7		30		22
HH7-11	2.0	11.0	400	1.0	6.4	600		8,22
B5	0.02	0.3	5	1.0			0.86	12,13
L1489	0.04	0.04	0.12	13	0.0004	0.2	0.028	13
T Tau	0.1	0.38-0.8	1.5-3	2.0	0.0006	10		22,24
ZZ Tau	0.04	0.11	0.3	4.0	0.0007	3.1		24
L1551	1.7	5.3-11	30-50	8-10	0.031	100-40	0.35	22,24
HL/XZ Tau	0.003	0.01	0.01-0.04	0.7-1	0.00008	0.6-6		22,24
L1535	0.06	0.17	0.5	19	0.0003	0.9	0.12	13,24
IC2087	0.28	0.72	2	19	0.0008	3.8		24
RNO43S	2.1	5.8	40	10		30		22
RNO43N	2.2	5.6	40	8.0		40		22
B35	0.86	2.0	6.4	18	0.0029	11	1.4	13
HH26IR	3.1	13	200	3.0	1.8	200		22,32
HH24	3.2	15	200	6.0	0.24	100		22,32
MonOB1H	1.6-2.3	17-53		1.2	1.1-8.2		12*	18
MonOB1D	16-30	92-520		6.9	0.36-11		1900*	18
MonOB1I	.14-.22	1.0-3.1		3.9	0.01-0.092			18
MonOB1C	1.6-7.2	11-150		1.1	0.32-25		140*	18
MonOB1G	1.3-1.9	26-93		1.8	1.9-21			18
L43	0.11	0.12	0.52	17	0.0002	0.5	0.13	13
L723	0.2	1.0	7	4.7	0.01	20	0.072	13,21
AS353	0.2	0.9	2	2.0	>0.003	30		22
L778	0.08	0.28	2.1	8.0	0.0011	1.9	0.17	13
B335	0.1	0.3	1	9.4	0.009	3.0	0.15	13,21
L1172D	0.88	2.3	14	17	0.0036	6.6	0.23	13

*由 CO 及 ^{13}CO 观测导出,

若知星风速度 v_w , 即可求得年轻星体质量损失率:

$$\dot{M} = dM/dt = P/\tau v_w^{[8,21]}$$

表 2 列出了 28 个低质量星附近的外向流的上述参量。由表 2 第 2 栏可见, 低质量星附近外向流的质量是比较小的, 大多数在 $2M_{\odot}$ 以下。这些外向流多发生在稠密云核中。由 NH_3 谱线观测, 这些云核温度 $\sim 10\text{K}$, 密度 $\sim 3 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$, 质量为 $\sim 4M_{\odot}$ 。^[42] 外向流可能包括星体喷发的物质, 但它仍小于云核质量。在大质量星附近, 外向流的质量一般 $\geq 2M_{\odot}$, 最高的达 $100M_{\odot}$ 。^[8] 相应的能量和动量也是如此, 能量在 $10^{41} - 10^{45} \text{erg}$, 比大质量星形成区的小 2 个量级以上。寿命在 $0.7 \times 10^4 \text{yr}$ 和 $1.9 \times 10^5 \text{yr}$ 之间, 平均 $7.0 \times 10^4 \text{yr}$, 其延续时间是相当长的。这些源的总机械功率的范围 $0.0001 - 6.4L_{\odot}$, 比大质量星形成区的小 2 个以上量级。

尽管低质量星形成区的外向流比较弱, 但仍能给周围分子云输入相当大的动量、能量, 抵抗坍缩。Myers 等^[13]用年轻星体所在的稠密云核的动量和外向流的动量比较来考察这种作用。他们由 NH_3 观测得出云核的动量 P_{core} ,

$$P_{\text{core}} = M_g \left[-\frac{(\Delta v_{\text{FWHM}})^2}{8 \ln 2} + \frac{kT}{m_{\text{H}}} \left(\frac{1}{2.3} - \frac{1}{17} \right) \right]^{1/2}$$

M_g 为云核气体质量, Δv_{FWHM} 为 NH_3 谱线全半宽。表 2 第 8 栏给出部分源的 P_{core} 值, 其中有 * 的数值为 Margulis 等^[18]从 CO 和 ^{13}CO 观测中导出的相应分子云中谱线致宽所需要的动量, 其余均为由 NH_3 谱线测量导出。对比第 3 栏外向流动量可见, 对于 NH_3 发射区, 除 B5 和 L43 外, 均有 $P_{\text{flow}} \geq P_{\text{core}}$, 而且有 $P_{\text{flow}} \approx (1-2)P_{\text{core}}$; 对于 CO 发射区, 外向流也向环境气体输入了相当大的动量。由于只考虑了一维动量等, 结果有一定不确定性, 但足可表明外向流的作用。由于外向流的速度约比相应云核中的气体运动速度大 10 倍, 上述结果也意味着外向流的动能一般要比云核的大。

这些比较说明, 外向流对分子云起着相当大的支撑作用。外流物质与星体周围气体的作用可能是这些区域中占支配地位的非热运动。这些分子云的核心部分一般处于维里平衡状态^[42]。外向流与云的作用可能解开引力束缚甚至驱散气体。尽管这种作用的可能性要依赖于动量、能量转换的形式、阶段和效率, 但实测和理论已表明^[8,13,18], 分子云坍缩形成恒星, 又抛回部分物质, 通过外向流对母云输入能量, 使年轻星体和由之形成恒星的分子云, 以反馈机制联系起来, 这对分子云的寿命、恒星的质量和形成率也是决定因素之一。

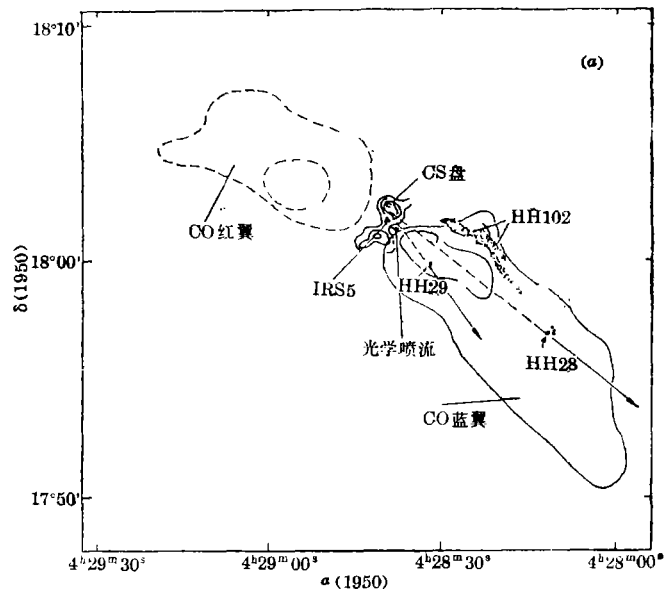
五、质量流失的光学特征及外向流的驱动

恒星早期演化中的质量损失首先在光学波段观测到, 大部分迹象来自低质量星形成区。

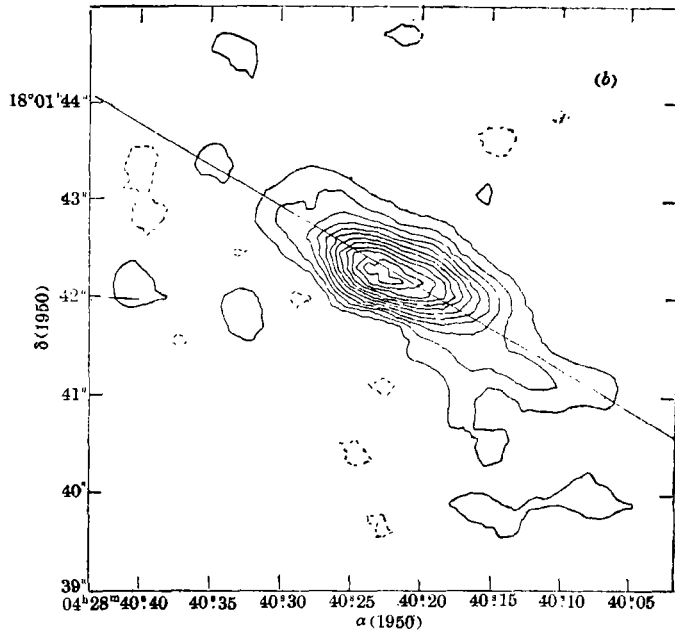
金牛 T 型星一般沿着质量 $\leq 3M_{\odot}$ 的轨迹向主序演化^[43,44], 其 H_{α} 和 HeI 、 OI 及 S II 、 Fe I 等低激发态发射线常常呈现宽而不对称的轮廓, 多数在蓝端具有吸收特征, 表明高能星风的存在和质量的稳定流失^[45,46,47]。有的金牛 T 型星的谱线具有 P-Cygni 型轮廓, 常常被看作是质量外流的明确佐证^[8]。耀星的爆发伴随质量的断续抛射, 虽然爆发机制还不清楚, 但 Herbig^[48]作的光谱测量表明, 耀星在爆发前是金牛 T 型星, 因此, 这也是这类星质量流失的一个表现。

出现在外向流区域的还有号称“星际弹丸”、半星半云状的 HH 天体^[49-51], 它们总是和金牛 T 型星成协, 自行速度可高达 $350 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。它们也有氢 Balmer 谱线及其他中性、电离气体的发射线^[52,53], 其线宽表明这类天体的径向运动速度 $100-300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 而且通常是负的。Schwartz 指出这些光谱是高速运动的气团与环境气体相撞引起的激波激发的, HH 天体可能是星风加速的云块^[54], 与外向流及 HH 天体随伴出现的还有快速运动的 H_2O 脉泽源^[55-57], 也是低质量恒星形成区的高速现象之一, 但比起高质量星附近的 H_2O 脉泽源, 探测率低, 且弱, 变化极快。 H_2O 脉泽源与 HH 天体可能有着某种演化关系^[51,57]。

最吸引人的光学特征是喷流 (jet)^[58-60,74], 这些喷流高度准直, 张角仅为 $3^\circ-5^\circ$, 常常成排出现, 从金牛 T 型星或低光度的红外源向外延伸刺入云中, 速度可达 $100-400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 也有类似 HH 天体的激波激发的气体辐射, 并且与 HH 天体及大尺度的 CO 外向流成协。图 5 为 L1551 的天图, (a) 中等值线由毫米波测得^[6,62]。由图可见, 中心天体 IRS5 与 CO 两翼排列成直线, 看来它驱动了外向流, HH28—29 的运动看来也起源于同一星体^[76]; (b) 是 VLA 测得的中心天体 6cm 连续辐射天图^[61], 其伸长方向也和 CO 两翼成排。这些成排的中心天体、光学喷流和 CO 外向流均与 CS 测得的盘状结构垂直^[62], 这样的光学喷流在分子外向流源中已发现 6 个^[59,60], 全部都在低质量星形成区, 均在距太阳 500pc 以内, 但仅占这一区域所发现的外向流数的 $\sim 10\%$ 。可见由突发性



(a) CO、CS 天图及光学喷流、HH 天体的分布^[6,62]



(b) IRS5 的 VLA 6cm 连续谱天图^[61]

图 5 外流源 L1551-IRS5 的结构

的喷射驱动气体外向流,不能解决多数源的驱动问题。

因此,不同稳定程度的星风是最可能的外向流的普遍驱动机制,而且上述种种观测事实说明,将金牛T型星体周围的外向流解释为由星风和环境气体的作用所引起,最为自然和现实^[63,64]。当然对于低质量星形成区的外向流,能量高达 10^{41} — 10^{45} erg,总机械功率 10^{-4} — $10^1 L_{\odot}$,星风对它能否驱动及如何供能还要具体分析。Lada等^[37,65]指出,星风不能以辐射压直接驱动外向流,Calvet等估算出T Tauri和HL/X2 Tau等星体注入周围气体的动量率,确可与从光学观测得到的金牛T型星星风的动量率相比较;DeCampli^[45]发现当质量损失率为 $10^{-8} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的几倍时,没有可供维持星风的机制,而小于这一损失率时,可用辐射压或Alfven波转换来供能。至于星风驱动又如何产生外向流的双极性和准直性的问题,则争论更大。一些作者^[67,68]认为,星风离开星体是各向同性的,而在具有压力梯度的环境云的作用下或者因为磁压力而变形^[69,71,73];而另一些作者^[66,71]则认为,星风在吸积盘中产生,并获得约相当于吸积物质0.1—1%的能量,这种物质流本身就具有双极性。近年来,观测上发现了一些中心天体周围的扁平盘状结构^[62,72]。在图5中,CS测得的盘状结构介于CO两翼之间,而成排的中心天体—光学喷流—CO外向流,却和CS盘的轴平行。准直范围在量级上由当初的CO天图的 $\sim 10^{18}$ cm,经光学CCD照片的 10^{16} cm提高到VLA 6cm波长连续谱测量的 10^{15} cm。这些观测事实和图像,可能是对转动吸积盘加速并准直星风的有力支持。

六、结 语

低质量年轻星体附近的分子气体外向流,无论其速度、外流气体质量、能量以及总机械功率等,均比高质量星形成区的要小,但发生较为普遍,延续时间相当长,形态上双极的较多,准直性较好,其中心天体附近及外流区域存在HH天体、 H_2O 脉泽源、射电连续辐射区及光学喷流,从不同方面反映了同一物理过程即年轻星体质量流失的本质,而且外向流从星风获得的能量,作用于周围介质,成为成协分子云的一种重要动力学支撑。

外向流研究虽然取得很大进展,但至今观测决非完备,人们仍在以尽可能高的灵敏度和分辨率,以最好的观测方案进行搜寻和取样。低质量星形成区,尤为太阳系附近的年轻星体外向流源,由于距离近,尺度小,易取得天图,对进一步研究外向流的性质、作用具有重要意义。目前除了广泛巡测、完善样品外,尤其需要对稠密云核和外流区域进行高分辨率观测,了解其速度和密度的更细致的结构,以高密情况下才能激发的光学薄分子跃迁来探测盘区状况,因此毫米—亚毫米波观测将起重要作用;并以光学、红外等多种观测手段,进一步探测光学喷流、HH天体及其他块状物和红外源的性质,以考察星风及分子云的相互作用、激发条件,探求外向流的动量、能量源泉。在理论上,星风如何向外向流供能、外向流的双极性、准直性如何产生,以及喷流的触发与原恒星质量的关系,恒星形成中角动量转移方式及恒星形成率等问题,均急待进一步解决。低质量年轻星体附近的外向流曾经是发掘星风这一外向流驱动机制的突破口,对这些基本问题的回答,也将提供众多的机会。

参 考 文 献

- [1] Zuckerman, B. and Palmer, P., *Ap. J. (Letters)*, 199 (1975), L 35.
[2] Zuckerman, B., Kuiper, T. P. H. and Kuiper, E. N. R., *Ap. J. (Letters)*, 209 (1976), L 137.
[3] Kwan, J. and Scoville, N., *Ap. J. (Letters)*, 210 (1976), L 39.
[4] Knapp, G. R., Kuiper, T. B. H., Knapp, S. L. and Brown, R. L., *Ap. J.*, 214 (1977), 78.
[5] Bally, J., *Ap. J.*, 261 (1982), 558.
[6] Snell, R. L., Loren, R. B. and Plambeck, R. L., *Ap. J. (Letters)*, 239 (1980), L 17.
[7] Blitz, L., Thaddeus, P., *Ap. J.*, 241 (1980), 676.
[8] Lada, C. J., *Ann. Rev. A. Ap.*, 23 (1985), 267.
[9] Bally, J. and Lada, C. J., *Ap. J.*, 265 (1983), 824.
[10] Rodriguez, L. F., Carral, P., Ho, P. T. P. and Moran, J. M., *Ap. J.*, 260 (1982), 635.
[11] Frerking, M. A. and Langer, W. D., *Ap. J.*, 256 (1982), 523.
[12] Goldsmith, P. F., Langer, W. D. and Wilson, R. W., *Ap. J. (Letters)*, 303 (1986), L 11.
[13] Myers, P. C., Heyer, R. L., Snell, R. L. and Goldsmith, P. F. (1988), Preprint.
[14] Wu, Y., Zhou, S. and Evans, N. J. II, (1989), Preprint.
[15] Zuckerman, B. and Evans, N. J. II, *Ap. J. (Letters)*, 192 (1974), L 149.
[16] Goldreich, P. and Kwan, J., *Ap. J.*, 189 (1974), 441.
[17] Field, G. B., in *Protostar and Planets*, ed. by T. Gehrels, p. 243, Univ. Arizona Press, (1978).
[18] Margulis, M., Lada, C. J. and Snell, R. L., *Ap. J.*, 333 (1988), 316.
[19] Levreault, R. M., (1985), Preprint.
[20] Levreault, R. M., (1988), Preprint.
[21] Goldsmith, P. F., Snell, R. L., Heyer, M. H. and Langer, W. D., *Ap. J.*, 286 (1984), 599.
[22] Edwards, S. and Snell, R. L., *Ap. J.*, 281 (1984), 237.
[23] Snell, R. L. and Edwards, S., *Ap. J.*, 251 (1981), 103.
[24] Heyer, M., Snell, R. L., Goldsmith, P. F. and Myers, P. C., *Ap. J.*, 321 (1987), 370.
[25] 毛信杰, 吴月芳, 郝晋新和侯梅, *北京大学学报*, 25 (1989), 605.
[26] Strom, K. M., Strom, S. E. and Vrba, F. J., *A. J.*, 81 (1976), 320.
[27] Lichten, S. M., *Ap. J. (Letters)*, 255 (1982), L 115.
[28] Evans, N. J. II, Levreault, R. M. and Harvey, P. M., *Ap. J.*, 301 (1986), 894.
[29] Beichman, C. A., Myers, P. C., Emerson, J. P., Harris, S., Mathieu, R., Benson, P. J. and Jennings, R. E., *Ap. J.*, 307 (1986), 337.
[30] Hilton, J., White, G. J., Cronin, N. J. and Rainey, R., *A. Ap.*, 154 (1986), 274.
[31] Fukui, Y., Sugitani, K., Takaba, H., Iwata, T., Mizuno, A., Ogawa, H. and Kawabata, K., *Ap. J. (Letters)*, 311 (1986), L 85.
[32] Snell, R. L., Edwards, S., *Ap. J.*, 259 (1982), 668.
[33] Myers, P. C., Fuller, G. A., Mathieu, R. D., Beichman, C. A., Benson, P. J. and Schild, R. E., *Ap. J.*, 319 (1987), 340.
[34] Heyer, M. H., Snell, R. L., Goldsmith, P. F., Strom, S. E. and Strom, K. M., *Ap. J.*, 308 (1986), 134.
[35] Ostriker, J. P., Richstone, D. O. and Thuan, T. X., *Ap. J. (Letters)*, 188 (1974), L 87.
[36] Mezger, P. G. and Smith, L. F., in *IAU Symposium No. 75*, p. 133, (1977).
[37] Lada, C. J. and Harvey, P. M., *Ap. J.*, 245 (1981), 58.
[38] Margulis, M. and Lada, C. J., *Ap. J. (Letters)*, 309 (1986), L 87.
[39] Rodriguez, L. F., Ho, P. T. P. and Moran, J. M., *Ap. J. (Letters)*, 240 (1980), L 149.
[40] Koppelaar, K., Sargent, A. I., Nordh, L., Van Duinen, R. J., and Aalders, J. W. G., *A. Ap. (Letters)*, 75 (1979), L 1.
[41] Ho, P. T. P., Moran, J. M. and Rodriguez, L. F., *Ap. J.*, 262 (1982), 619.
[42] Myers, P. C. and Benson, P. J., *Ap. J.*, 266 (1983), 309.
[43] Cohen, M. and Kuhl, L. V., *Ap. J. Suppl.*, 41 (1979), 743.
[44] Strom, S. E., Strom, K. M. and Grasdalen, G. L., *Ann. Rev. A. Ap.*, 13 (1975), 187.
[45] DeCampli, W. M., *Ap. J.*, 244 (1981), 124.
[46] Schwartz, R. D., *Ap. J.*, 195 (1975), 631.
[47] Kuhl, L. V., *Ap. J.*, 140 (1964), 1409.
[48] Herbig, G. H., *Ap. J.*, 217 (1977), 693.

- [49] Herbig, G. H. and Jones, B. F., *A. J.*, 86 (1981), 1232.
 [50] Jones, B. F. and Herbig, G. H., *A. J.*, 87 (1982), 1223.
 [51] Herbig, G. H. and Jones, B. F., *A. J.*, 88 (1983), 1040.
 [52] Dopita, M. A., *Ap. J. Suppl.*, 37 (1978), 117.
 [53] Hartmann, L. and Roymond, J. C., *Ap. J.*, 276 (1984), 560.
 [54] Schwartz, R. D., *Ap. J.*, 223 (1978), 884.
 [55] Sandell, G. and Olofsson, H., *A. Ap.*, 99 (1981), 80.
 [56] Rodriguez, L. F., Moran, J. M., Ho, P. T. P. and Gottlieb, E. W., *Ap. J.*, 235 (1980), 845.
 [57] Norman, C. and Silk, J., *Ap. J.*, 228 (1979), 197.
 [58] Mundt, R. and Fried, J. W., *Ap. J. (Letters)*, 274 (1983), L 83.
 [59] Mundt, R., Ray, T. P. and Buhrke, T., *Ap. J. (Letters)*, 333 (1988), L 69.
 [60] Mundt, R., in *Protostars and Planets II*, ed. by D. Black., p. 414, Univ. Ariz. Press, (1985).
 [61] Bieging, J. H., Cohen, M. and Schwartz, P. R., *Ap. J.*, 282 (1984), 699.
 [62] Kaifu, N., Suzuki, S., Hasegawa, T., Morimoto, M., Inatani, J., Nagane, K., Miyazawa, K., Chikada, Y., Kanzawa, T. and Akabane, K., *A. Ap.*, 134 (1984), 7.
 [63] Kutner, M. L., Leung, C. M., Machnik, D. E. and Mead, K. N., *Ap. J. (Letters)*, 259 (1982), L 35.
 [64] Norman, C. A. and Silk, J., *Ap. J.*, 238 (1980), 158.
 [65] Lada, C. J. and Gauter, T. N. III, *Ap. J.*, 261 (1982), 161.
 [66] Calvet, N., Canto, J. and Rodriguez, L. F., *Ap. J.*, 268 (1983), 739.
 [67] Canto, J. and Rodriguez, L. F., *Ap. J.*, 239 (1980), 982.
 [68] Konigl, A., *Ap. J.*, 261 (1982), 115.
 [69] Pudritz, R. E. and Norman, C. A., *Ap. J.*, 274 (1983), 677.
 [70] Draine, B. T., *Ap. J.*, 270 (1983), 519.
 [71] Torbett, M. V., *Ap. J.*, 278 (1984), 318.
 [72] Takano, T., Fukui, Y., Ogawa, H., Takaba, H., Kawabe, R., Fujimoto, Y., Sugitani, K. and Fujimoto, H., *Ap. J. (Letters)*, 282 (1984), L 69.
 [73] Fukui, Y., Takaba, H., Iwata, T. and Mizuno, A., *Ap. J. (Letters)*, 325 (1988), L 13.
 [74] Graham, J. A. and Elias, J. H., *Ap. J.*, 272 (1983), 615.
 [75] Beichman, C. and Harris, S., *Ap. J.*, 245 (1981), 589.

(责任编辑 刘金铭)

Outflows near the Low-mass Young Stellar Objects

Wu Yuefang

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

After a brief introduction of the CO outflows, this paper presents the velocities, morphologies and physics properties for the outflows near the low-mass young stellar objects. Meanwhile, it analyses and investigates the outflow occurrence rates, collimation factors and the action on the molecular clouds. The optical phenomena in the outflow regions and the driving mechanism of the outflows are also reviewed.