

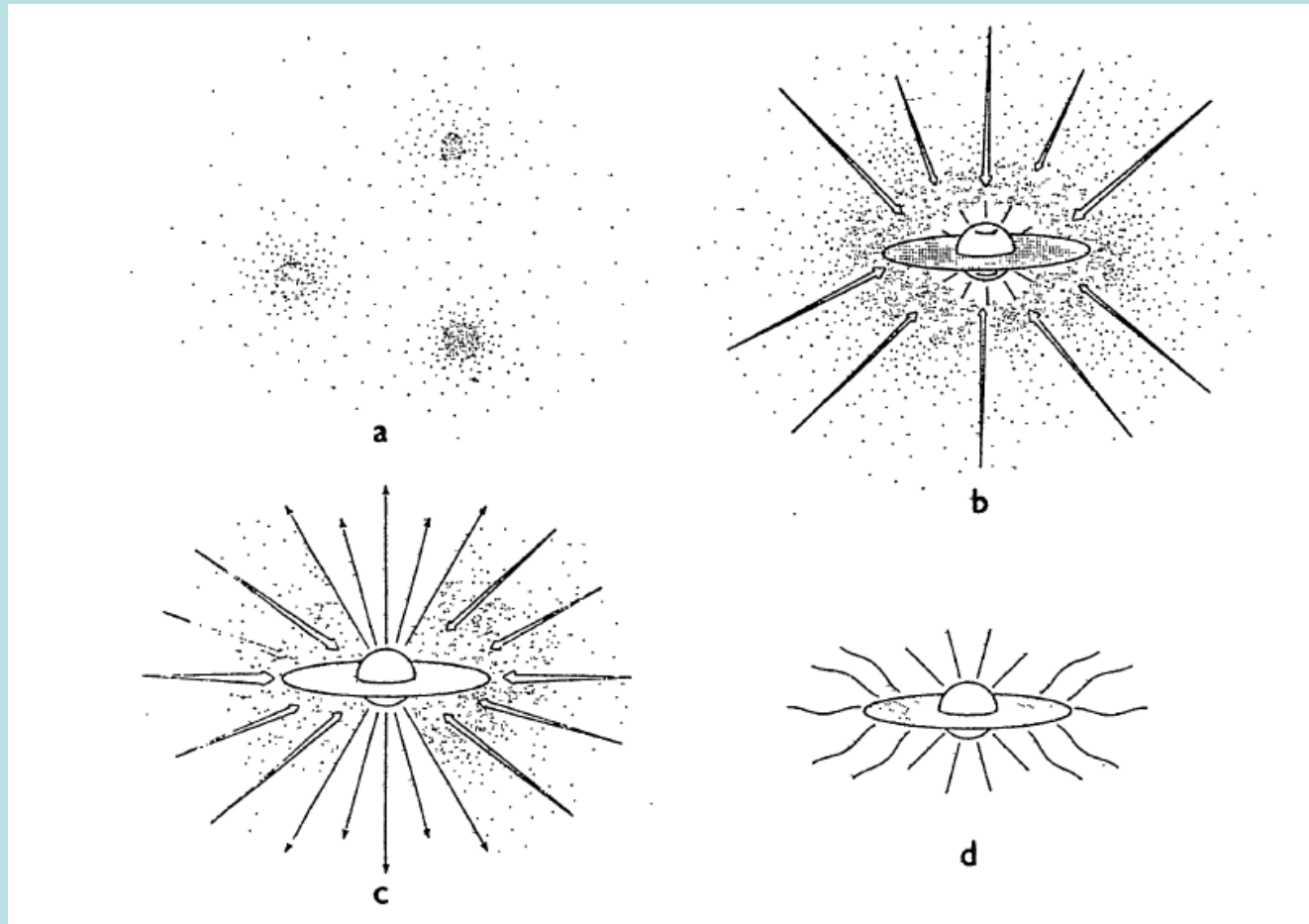
分子云和恒星形成

II. 银河系内的恒星形成研究

恒星形成研究简单历史

- 恒星形成过程是天文学的基本问题之一
- 康德的星云假说(18世纪中期)
- 拉普拉斯假说(18世纪末)
- 现代天体物理恒星光谱分类(19世纪末)
- 分子气体的发现(1970年)
- 小质量恒星形成的阶段的定性分类(80年代)
- 大质量恒星形成研究(20世纪70年—现在)

小质量恒星形成的理论模型(4个阶段)



Shu, Adams, Lizano, 1987, ARA&A

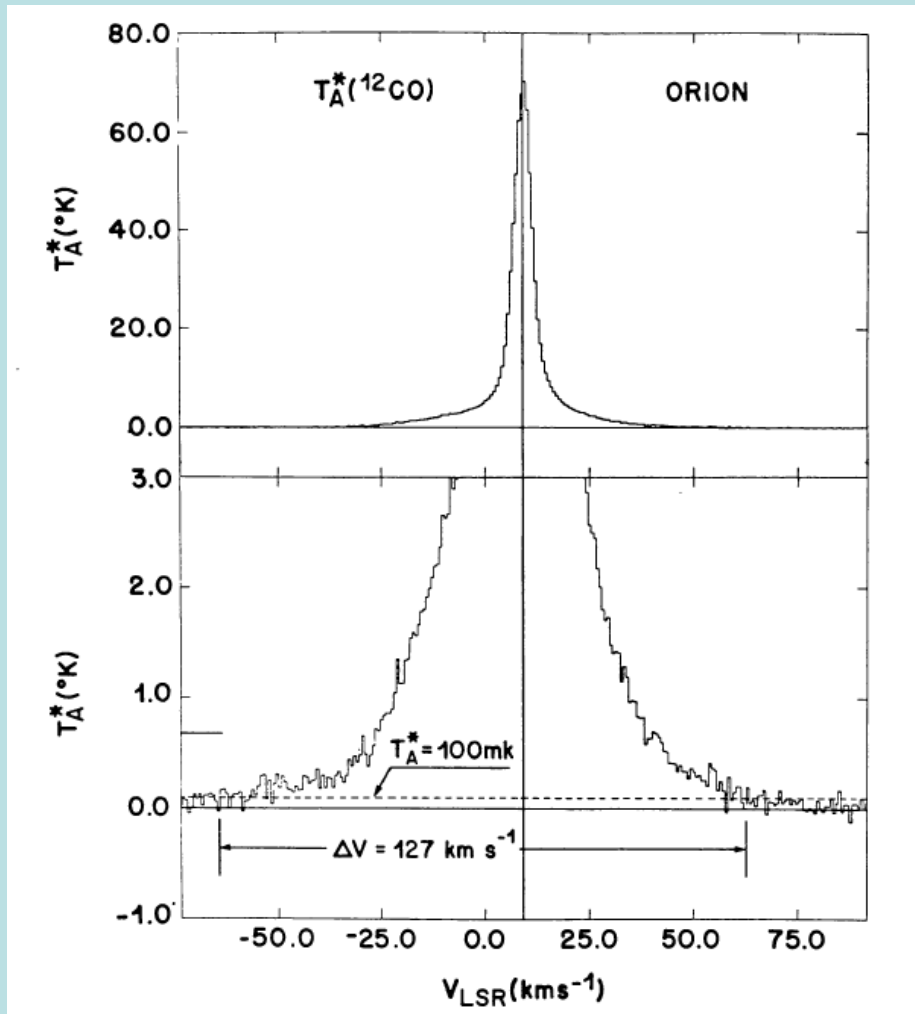
分子暗云(dark cloud)

- 没有恒星形成的分子云
- 加热主要靠宇宙线
- 冷却主要靠 H_2 与 CO 的碰撞，将 CO 碰撞到高的转动能级，然后 CO 辐射带走能量
- 尘埃的辐射带走能量在这种情况下不重要
- 这种情况下的平衡温度在10K左右
- 质量和密度大到一定的尺度，它会进行塌缩，到达上面的图中第一个阶段

分子外向流的发现

- 银河系内恒星形成活跃区域一般在巨分子云 (GMCs) 里 (10^5 - $10^6 M_{\odot}$, ~ 100 pc, ~ 10 K)
- GMC 中的声速一般在几十 km/s, 测量得到的线宽, 一般小于这个数值
- 气体的塌缩过程, 角动量守恒需要满足, 所以会慢慢的形成一个盘状结构, 同时还会伴随着角动量的转移
- 吸积盘本身是比较难以观测的, 一般认为外向流的存在必须有吸积盘
- CO 谱线发现后, 在 70 年代同时发现了外向流

分子外向流谱

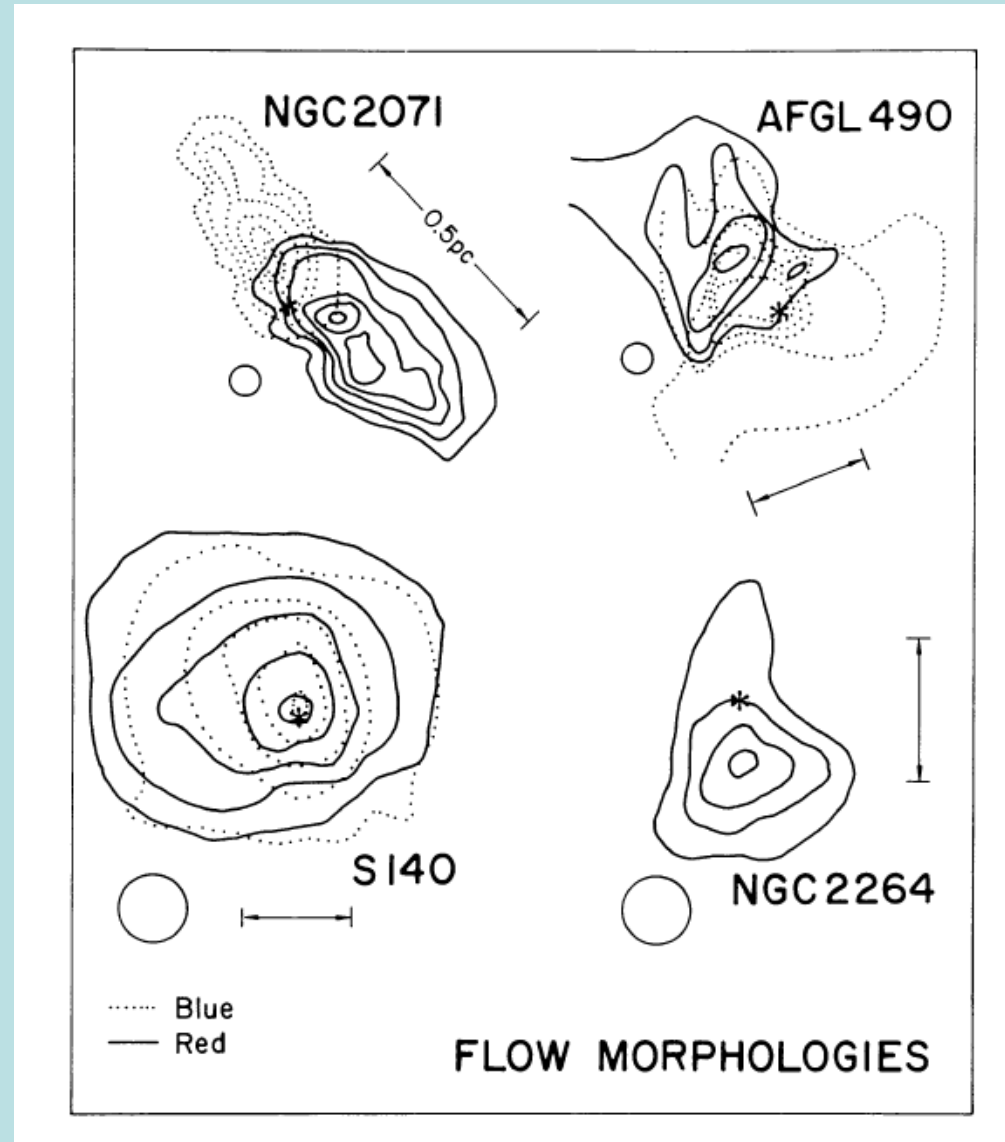


Orion中的CO 1-0谱线，Bell实验室7m毫米波望远镜测得，可以看出明显的高速成分，和正常的多普勒致宽导致的谱线轮廓(接近与gauss轮廓)有很大差异

Lada 1985 ARA&A

双极分子外向流的观测证据

- 外向流的形态
- 经过CO谱线的成图观测，可以知道红翼和蓝翼的空间分布的差异
- 到目前为止已经发现大量(>300个)分子外向流，大部分是双极的，同时有少部分单极，外向流在大质量和小质量恒星形成区都普遍存在



外向流的质量估算

- 质量流失率在恒星形成过程中很重要
- $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 组合，在一定的假设下，可以计算外向流的质量

- $$\frac{I(^{12}\text{CO})}{I(^{13}\text{CO})} = \frac{1 - e^{-r\tau_v^{13}}}{1 - e^{-\tau_v^{13}}} \quad r = N^{12}/N^{13}$$
 这个可以得到光学厚度

- 一般用89，也就是地球上的丰度比
- 激发温度一般可以结合多个能级的 ^{13}CO 观测得到

$$\frac{\tau_v^{13}(2 \rightarrow 1)}{\tau_v^{13}(1 \rightarrow 0)} = 2.0 \frac{[1 - \exp(-hv_{21}/kT_{\text{ex}})]}{[\exp(hv_{10}/kT_{\text{ex}}) - 1]}$$

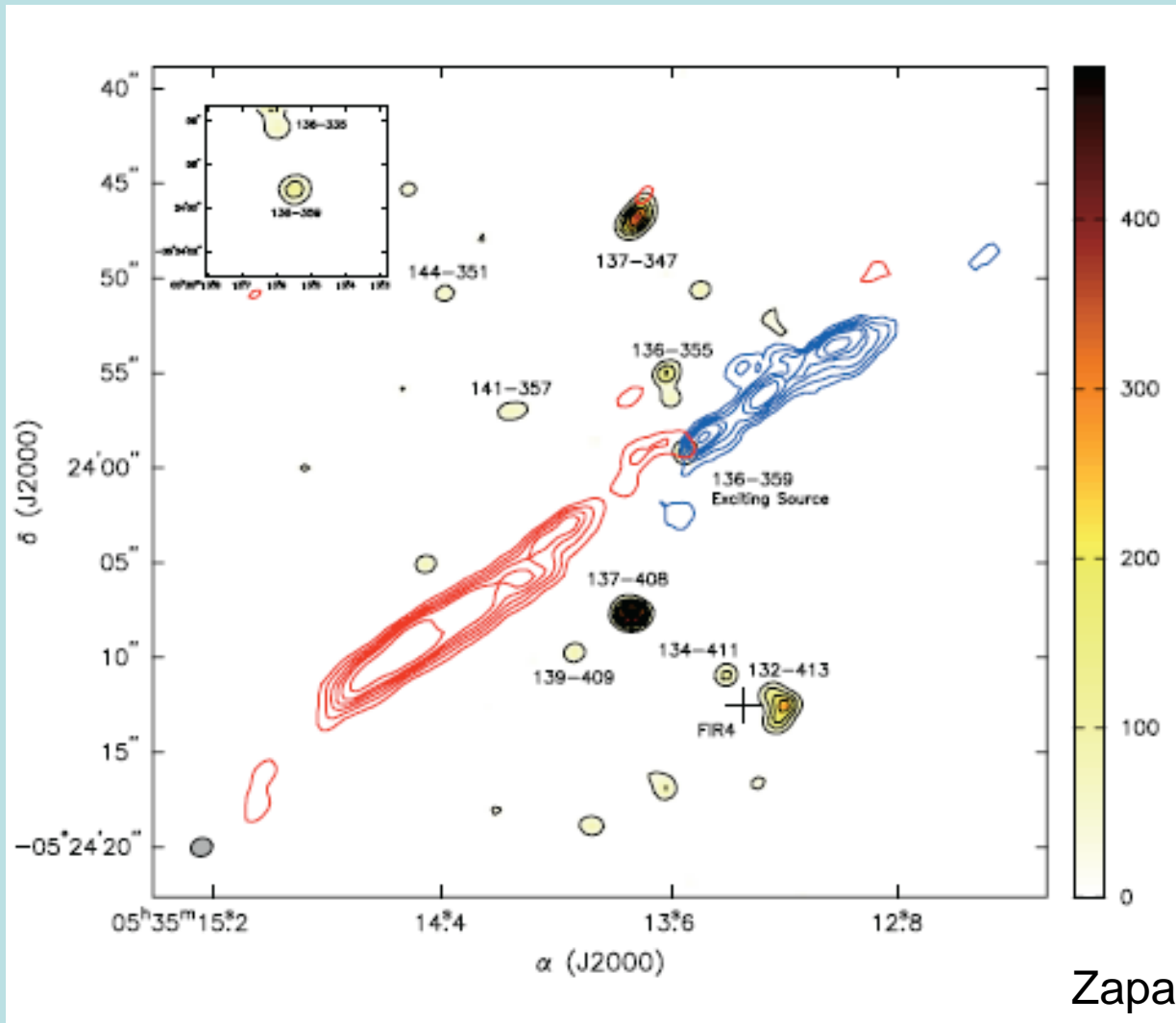
- 单纯只有 ^{13}CO 1-0的观测也是可以进行计算的
- 这时可以假定激发温度和环境气体类似，并假定完全光薄

外向流能量以及动量的估算

- 速度和质量知道后，很容易的计算动量和动能
- 这些通过观测得到的数据，对于研究外向流的驱动机制以及带走能量和角动量等的理论估算很有用

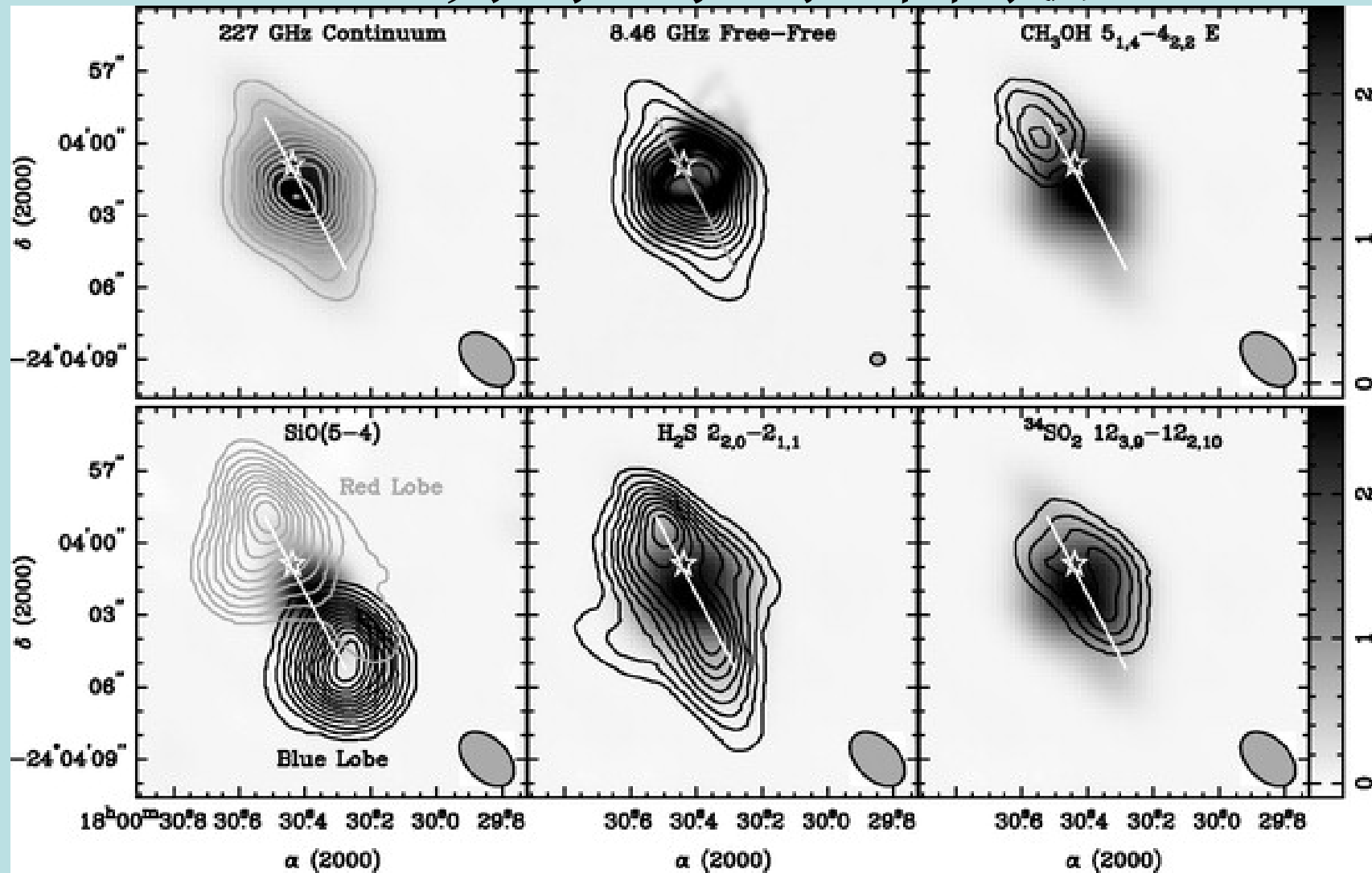
$$P = \int \int M_v v / \sin(i_v) dv dA,$$
$$T = \frac{1}{2} \int \int M_v v^2 / \sin^2(i_v) dv dA,$$

双极分子外向流



Zapata et al. 2005

SiO分子示踪外向流



Sollins et al. 2004 ApJL

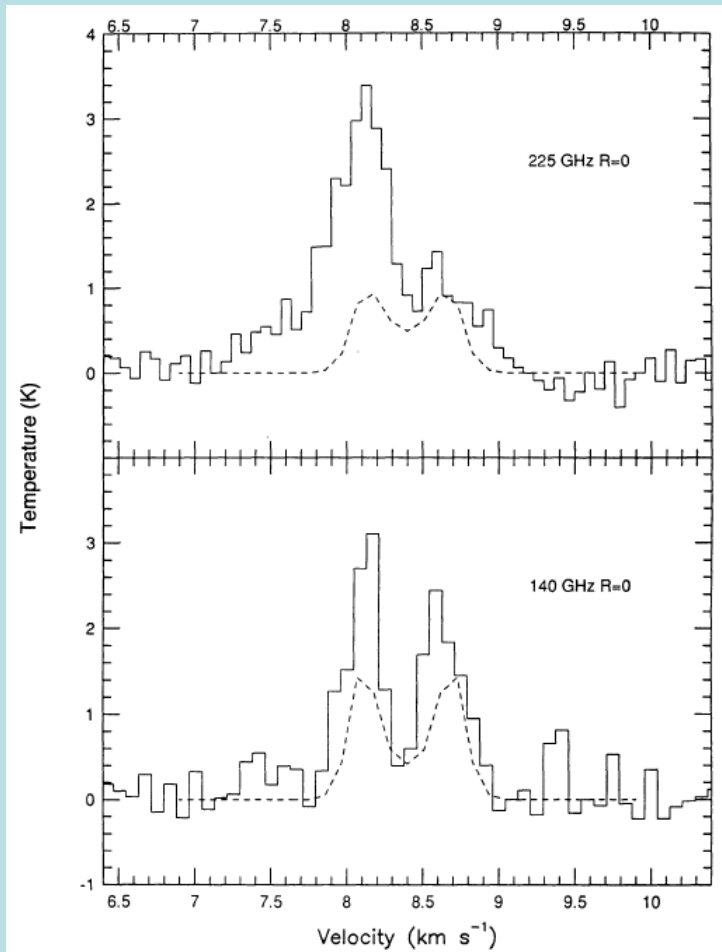
初始质量函数(IMF)

- MF: 恒星计数随着质量分布的函数
- IMF: 开始形成的恒星的MF
- 初始质量函数的确定, 对于星系演化、重元素的形成等研究有很重要的影响
- 测量: 气体团块的质量函数、尘埃的团块的质量函数、年轻恒星计数
- 高空间分辨率的观测(分子谱线、亚毫米波连续谱)测量

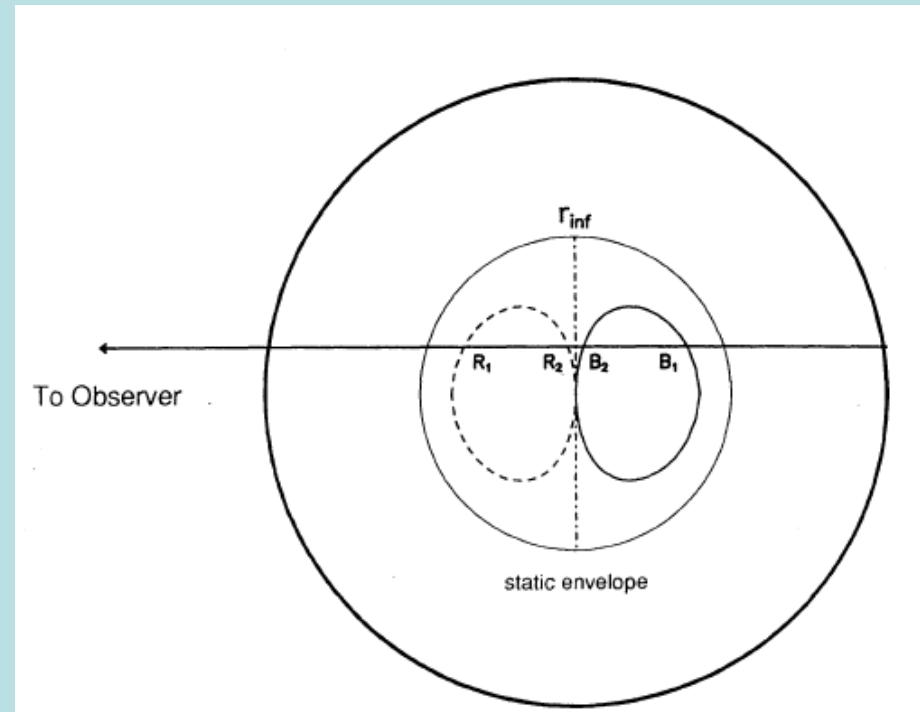
Infall (内向流过程)

- 恒星形成过程十分复杂，既有外向流，也有内向流
- 金斯不稳定性导致的塌实，是大尺度的，在小尺度上，究竟物质怎么到达引力中心，形成恒星，具体过程是需要研究的
- 要最后形成恒星，物质的内流是必须的
- 观测上也证明了infall的存在是普遍的

小质量恒星形成 infall 的观测证据



Zhou et al. 1993 ApJ



$$T_{\text{red}} = T_2(1 - e^{-\tau_2})e^{-\tau_1} + T_1(1 - e^{-\tau_1}).$$

By symmetry, the emission at $-V$ is

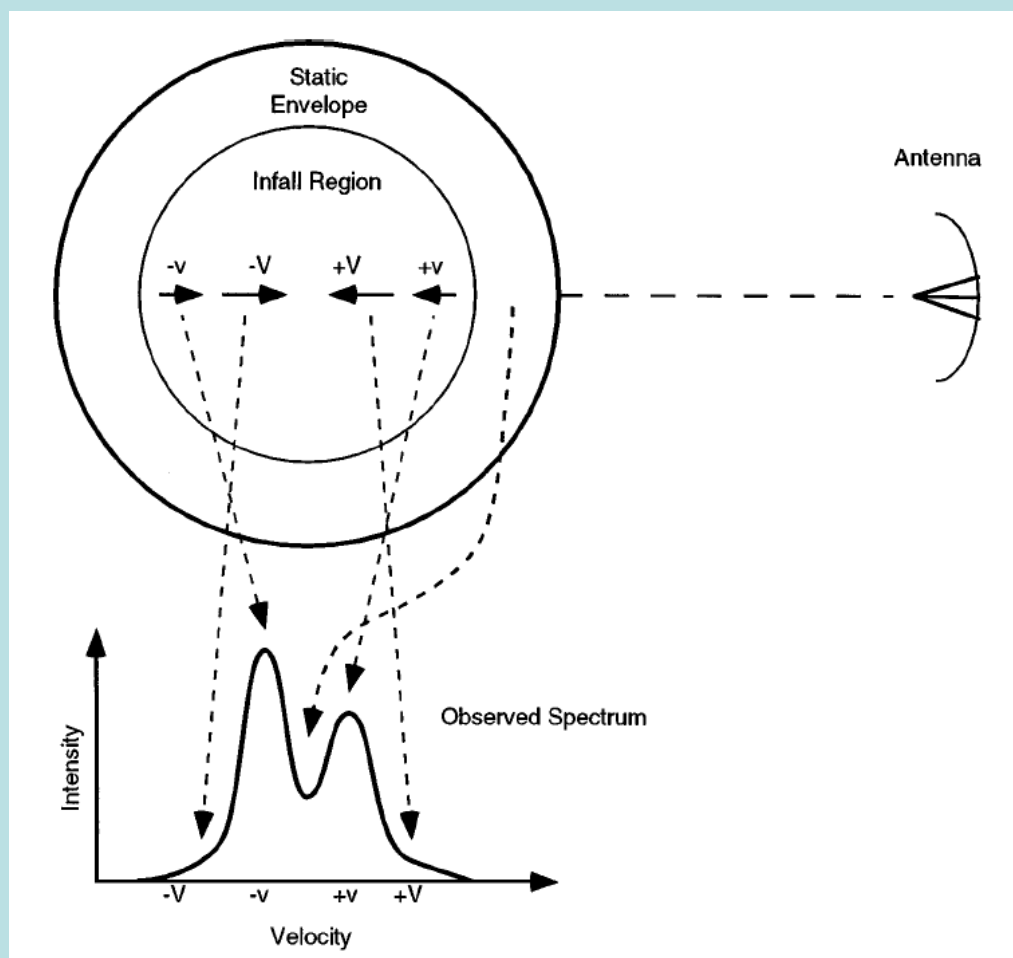
$$T_{\text{blue}} = T_1(1 - e^{-\tau_1})e^{-\tau_2} + T_2(1 - e^{-\tau_2}).$$

It follows that

$$T_{\text{blue}} - T_{\text{red}} = (T_2 - T_1)(1 - e^{-\tau_1})(1 - e^{-\tau_2}).$$

It is easy to see that $T_{\text{blue}} > T_{\text{red}}$ if and only if $T_2 > T_1$.

谱线轮廓对应的辐射区域



Evans 1999 ARA&A

Infall在各种质量恒星的形成中都普遍存在

- 谱线特征和小质量恒星形成的类似
- 光厚谱线自吸收
- 光薄谱线的峰值对着光厚谱线的吸收位置
- Wu & Evans 2003

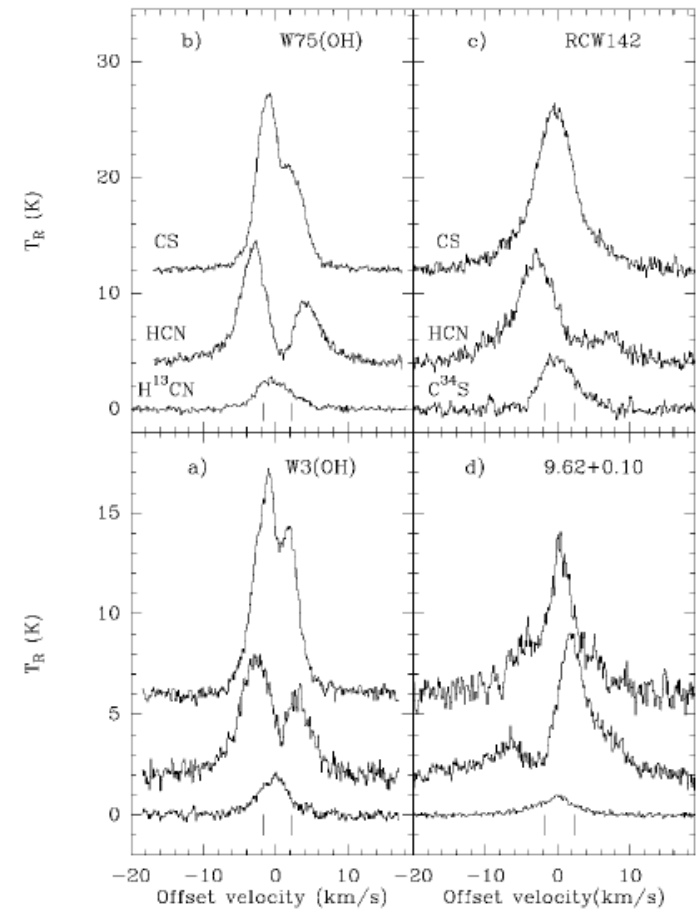


FIG. 1.—Line profiles of HCN (3–2) (*middle lines*), CS (5–4) (*upper lines*), and optically thin lines [*lower lines*; H^{13}CN (3–2) for (a), (b), and (d) and C^{34}S (5–4) for (c)]. HCN (3–2) and CS (5–4) lines have been displaced upward for clarity. All lines are plotted with the velocity relative to the optically thin line's central velocity. The two vertical lines below the spectra indicate the location of the outermost hyperfine components of the HCN (3–2) line. The radiation temperature T_R has been corrected for main-beam efficiency.

致密分子气体探针

TABLE 1 Properties of density probes

Molecule	Transition	ν (GHz)	E_{up} (K)	$n_c(10\text{ K})$ (cm^{-3})	$n_{eff}(10\text{ K})$ (cm^{-3})	$n_c(100\text{ K})$ (cm^{-3})	$n_{eff}(100\text{ K})$ (cm^{-3})
CS	$J = 1 \rightarrow 0$	49.0	2.4	4.6×10^4	7.0×10^3	6.2×10^4	2.2×10^3
CS	$J = 2 \rightarrow 1$	98.0	7.1	3.0×10^5	1.8×10^4	3.9×10^5	4.1×10^3
CS	$J = 3 \rightarrow 2$	147.0	14	1.3×10^6	7.0×10^4	1.4×10^6	1.0×10^4
CS	$J = 5 \rightarrow 4$	244.9	35	8.8×10^6	2.2×10^6	6.9×10^6	6.0×10^4
CS	$J = 7 \rightarrow 6$	342.9	66	2.8×10^7	...	2.0×10^7	2.6×10^5
CS	$J = 10 \rightarrow 9$	489.8	129	1.2×10^8	...	6.2×10^7	1.7×10^6
HCO ⁺	$J = 1 \rightarrow 0$	89.2	4.3	1.7×10^5	2.4×10^3	1.9×10^5	5.6×10^2
HCO ⁺	$J = 3 \rightarrow 2$	267.6	26	4.2×10^6	6.3×10^4	3.3×10^6	3.6×10^3
HCO ⁺	$J = 4 \rightarrow 3$	356.7	43	9.7×10^6	5.0×10^5	7.8×10^6	1.0×10^4
HCN	$J = 1 \rightarrow 0$	88.6	4.3	2.6×10^6	2.9×10^4	4.5×10^6	5.1×10^3
HCN	$J = 3 \rightarrow 2$	265.9	26	7.8×10^7	7.0×10^5	6.8×10^7	3.6×10^4
HCN	$J = 4 \rightarrow 3$	354.5	43	1.5×10^8	6.0×10^6	1.6×10^8	1.0×10^5
H ₂ CO	$2_{12} \rightarrow 1_{11}$	140.8	6.8	1.1×10^6	6.0×10^4	1.6×10^6	1.5×10^4
H ₂ CO	$3_{13} \rightarrow 2_{12}$	211.2	17	5.6×10^6	3.2×10^5	6.0×10^6	4.0×10^4
H ₂ CO	$4_{14} \rightarrow 3_{13}$	281.5	30	9.7×10^6	2.2×10^6	1.2×10^7	1.0×10^5
H ₂ CO	$5_{15} \rightarrow 4_{14}$	351.8	47	2.6×10^7	...	2.5×10^7	2.0×10^5
NH ₃	(1,1)inv	23.7	1.1	1.8×10^3	1.2×10^3	2.1×10^3	7.0×10^2
NH ₃	(2,2)inv	23.7	42	2.1×10^3	3.6×10^4	2.1×10^3	4.3×10^2

... means no value; inv means inversion transition.

Evans 1999 ARA&A

大质量恒星形成

- **infall**还在进行的时候，大质量恒星已经到达主序，中心已经有核燃烧了

- 自由下落时标：

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} \approx 10^5 \text{ yrs}$$

- **Kelvin-Helmholtz**时标：

$$t_{KH} = \frac{W}{L_{star}} = \frac{GM_{star}}{R_{star}L_{star}} \approx 10^4 \text{ yrs}$$

- 中心产生的强大的辐射压会阻止吸积
- 吸积还是碰撞？

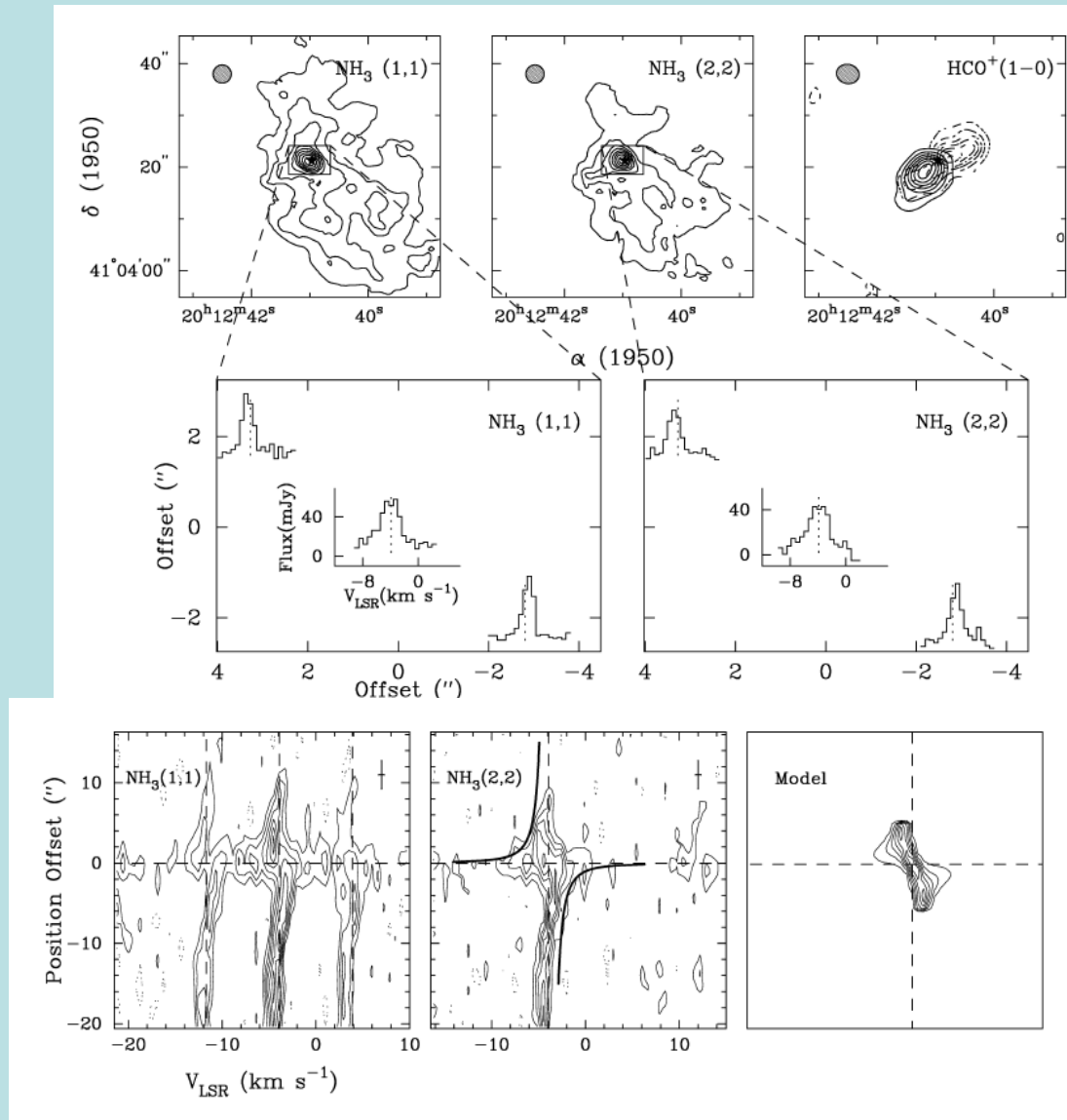
辐射压阻止内流？

- 大质量恒星是类似小质量恒星那么形成的吗？
- 大于10个太阳质量的恒星，辐射压很大，会阻止物质内流增加质量，怎么形成？
- 大质量恒星形成于星团中，是否可能由多个恒星并合形成更大的恒星？ (Bonnell 1998)
- 吸积方式？
- 观测证据？

吸积盘和外向流的搜寻

- 外向流在大质量恒星形成区大量存在
- 吸积盘也在年轻大质量恒星周围发现
- 近红外(Jiang et al. 2005 Nature)
- 氨分子(Zhang et al. 1997 ApJ)
- 亚毫米波(Patel et al. 2005 Nature)
- 观测结果倾向于大质量恒星的形成过程和小质量类似，吸积和外流过程伴随着整个过程
- 理论的估算，对于辐射压也有更为精确和全面的考虑，可以满足吸积和辐射压的限制(Keto 2003)

旋转盘的观测证据



Zhang et al. 1997

大质量恒星形成研究的重要性

- 大质量恒星对于产生重元素至关重要
- 大质量恒星在其形成、主序以及死亡时对于周围的星际介质的反馈十分重要，会影响到下一代的恒星形成
- 大质量恒星形成研究目前还有很多问题需要解决
- 大质量恒星形成的研究对于理解河外星系中的恒星形成活动十分重要

银河系内的分子谱线巡天观测

- CO 1-0 示踪总的分子气体：
哥伦比亚巡天 (主要使用1米镜完成)
青海站计划中的CO 1-0 三条谱线巡天
- CO 3-2 示踪高温分子气体(需要额外加热)
计划中的巡天? Arizona SMT
- NH₃等致密分子气体的巡天

维里(位力)定理和维里平衡

- 对于一个稳定的自引力体系，存在下列关系： $2T + \Omega = 0$ ，式中 T 为体系总的内部动能， Ω 为体系总引力势能
- $2T + \Omega > 0$ 时，膨胀
- $2T + \Omega < 0$ 时，收缩
- 只考虑热运动动能时，可以估算金斯质量

维里定理与金斯质量

- 考虑一个密度均匀的自引力气体球
- 只考虑热运动动能时， $2T=3NkT$

- $\Omega = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$

- 维里平衡时 $3NkT = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$

- 而 $N=M/m$ (m 为平均分子质量) $R = \left(\frac{3M}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{3}}$

- 金斯质量 $M_J = \left(\frac{5kT}{Gm}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$

维里定理(续)

- 实际情况下，动能不仅是热运动导致
- 这个时候，我们需要通过测量量来进行计算维里平衡下的质量

$$M \times v^2 = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$M = \frac{5}{3} \frac{Rv^2}{G}$$

- 其中v可以通过线宽测得，而R可以通过谱线成图得出

作业

射电天体物理 分子气体2 课后作业：

1. 考虑一个密度均匀的自引力气体球，密度为 ρ ，质量为 M ，半径为 R ，推导其势能为 $-\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}$
2. 说明自由下落时标和Kelvin-Helmholtz时标的物理意义，并简要论述为什么大质量恒星在周围的气体还在继续下落的时候，中心已经开始进行核燃烧。