

원시별 가스 원반의 최근 연구 결과

한국표준과학연구원 천문대 정 현 수

1. 서론

일반적으로, 분자운이 수축하여 새로운 별이 형성될 때, 수축하는 가스구름의 자장과 회전에 기인하여 원시별 주변에는 가스 원반이 만들어진다고 생각되고 있다. 전파 영역의 분자방출선에 의해 젊은 천체를 원반상으로 둘러싼 질은 가스덩어리들이 실제로 관측되고 있다. 한편, 별형성의 도중에는 분자류 현상의 시기가 있다는 것이 관측적으로 밝혀지고 있지만^{1, 2, 3} 분자류의 솟구쳐나옴과 가속기구에 대한 문제에 대해서는 아직 미해결의 상태로 놓여있다. 분자류는 항성풍에 의해 밀린 물질이 원반의 축방향으로 쏘여 나온 것이라는 설과 회전원반이 축방향으로 자장을 개입하여 각운동량을 놓치는 결과 생기는 것이라는 설이 있다. 전자의 경우는 별을 향해 질량강착(accretion)이 진행된 단계에서 분자류현상이 시작되는 것에 비해서, 후자의 경우는 회전원반이 형성되면 분자류현상에 곧바로 스위치가 들어가게 된다고 볼 수 있다. 어쨌든, 중심별 주변의 원반(도너츠)구조와 분자류현상은 상호간에 연관성을 가지며, 별형성에 중요한 역할을 담당하고 있음은 우선 틀림이 없는 사실일 것이다.

최근에는 이러한 원반가스중에 중심으로 가스가 흘러들어가는 것과 역회전이라는 드문 현상들도 관측되고 있다. 이하에서는 이것들을 중심으로 생각해 보기로 한다.

2. 젊은 별을 둘러싼 분자가스

몇 개의 쌍극분자류(molecular bipolar outflow)천체에서는 전파영역의 분자방출선에 의해 분자류의 근원부분에서 질은 가스의 구조가 관측되고 있다. 이러한 질은 가스의 계통적인 운동에는 그림 14.5에 있는 것처럼, 분자류에 밀린 바깥방향의 물질의 흐름과, 별로 떨어져 가는 안쪽 방향의 흐름, 회전등을 생각할 수 있다. 동일하게 보이는 분자류천체에서도, 중심별의 속성(또는 원래의 분자운의 물리량, 즉 자장의 세기와 각운동량의 크기 등)과 진화의 단계(연령)에 따라 분자류의 근원부에서의 가스의 운동은 다를 것이다. 따라서, 젊은 별 주변의 질은 가스의 공간·속도구조를 계통적으로 연구하는 것은, 별의 진화를 더듬어 감에 있어서 대단히 중요한 일이라고 할 수 있다. 그리고 가벼운 질량의 별의 경우는 원시행성계 원반의 형성과 진화라는 관점에서도 흥미 깊은 일이다. 특히, 가스 원반이 언제까지 존재할 것인가에 대한 것은 행성의 성장을 고려함에 있어서도 하나의 열쇠가 될 수 있을 것이다.

지금까지의 관측에서 발견된 대다수의 가스의 운동은 회전과 팽창이라고 해석되어져 왔다. 가령, 무거운 질량의 별생성영역인 Orion-KL에서는 팽창하는 도너츠형태의 질은 가스와 그 주변의 가스의 회전운동이 확실히 보이고 있다.^{4, 6} 그러나, 천체에 따라서는 관측결과가 확정적이 아닌 경우도 있다. Taurus분자운중의 쌍극류천체인 L1551-IRS5에서는 노베야마관측소(일본)의 45m망원경으로는 분자류와 겹침구조(모양은 같지만 크기가 다른 구조)로 되어 있는 원반상의 가스가 발견되었고, 위치-속도

그림으로부터는 완만한 회전속도가 보인다고 보고되고 있다. 한편, 또 다른 관측으로부터는 위와는 반대로 계통적인 운동은 없으며, 오히려 분자류에 의해 흩어진 가스의 구조가 있다고도 말해지고 있다. 또, 뱀좌분자운의 분자류천체인 IRAS 16293-2422에서는 분자방출선의 모양으로부터 가스의 수축이 지적되어, 원시별을 향한 강착류로서 주목되었다. 그러나, 공간분해능을 높인 그후의 관측결과, 가스의 강착은 부정되고 오히려 원반가스의 회전운동이 보고되고 있다.

3. 가스의 역회전

1) NGC2071-IRS

NGC2071-IRS는 그림2-a에서 보는 바와 같이 전형적인 쌍극분자류천체이다.^{1,7} 분자류의 근원에는 3개의 HII영역이 있으며, 이들을 둘러싸는 것과 같이 가스원반이 관측되고 있다. 거리는 대략 390pc이며, 광도는 450-600L_☉이다. 가스원반에 따른 절단선(그림 2-b, A-A')에서의 위치-속도그림을 그림3에 실었다. 45m망원경에서의 CS J=1-0의 관측¹²(그림3-a)에서는, A에서 A'을 향하여 속도가 청색편이에서 적색편이로 변화하고 있다. 그러나, 간섭계에 의한 분해능 10"×0.5km s⁻¹의 관측¹³(그림3-b)에서는, 위와는 반대로 적색편이에서 청색편이로 이행하고 있는 양상이 뚜렷이 보이고 있다. 원반가스는 반경~15"(6×10³AU)의 안쪽과 바깥쪽에서, 원반에 수직한 축 주변에서 서로 반대방향으로 회전하고 있다고 해석된다. 안쪽에서의 회전속도는 ~35km s⁻¹ pc⁻¹, 바깥쪽에서는 반대방향으로 기껏해야 5km⁻¹ pc⁻¹의 값을 가진다.

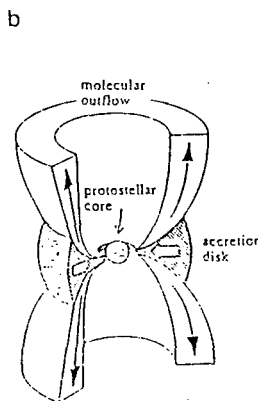
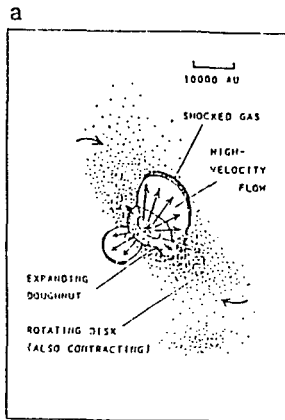


그림 1. 쌍극분자류의 근원에서의 짙은 가스

a. Orion-KL (4) b. 질량강착이 있는 경우 (5)

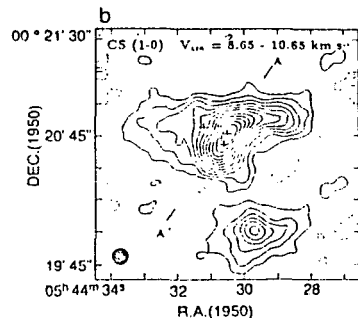
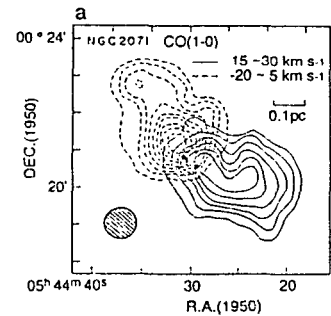


그림 2. NGC2071의 가스구조

a: 쌍극분자류 (7) b: 가스원반

2) 자장과 각운동량

가스의 역회전을 만들어주는 기구로 생각할 수 있는 것은, 자장에 의한 감속 (Magnetic Breaking)을 들 수 있다. 이 기구는 수축에 의해 고속회전을 하는 가스 원반으로부터 각운동량을 빼앗아 오기 때문이라고 생각되고 있다.^{14,15} Alfvén파에 의해, 안쪽의 코아의 각운동량이 바깥쪽으로 전달되어, 적당한 조건하에서는 코아가 바깥쪽과는 반대로 회전한다고 하는 구상이다.¹⁵ 단, 유감스럽게도 NGC2071-IRS 부근의 자장은 가시광의 편광관측으로부터는 잘 알려져 있지 않다.

4. 가스 원반의 강착류

1) GL490

GL490은 대략 900pc의 거리에 있는 고립된 적외선원으로, 태양의 $(1\sim3)\times 10^3$ 배의 에너지를 방출하고 있다. 중심부에는 두꺼운 가스막과 먼지로 뒤덮인 젊은 별이 있다고 보이며, 1980년대초에 속속 등장한 쌍극분자류천체중의 하나이다.^{1,2,7} 근래의 10여 년간에 걸쳐, 가시·적외·전파영역에서 활발한 관측이 행하여져서, 다음과 같은 공간구조 모델이 구축되어 왔다.

그림 4에 있는 것처럼, $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 에서 보이는 쌍극분자류는 관측자쪽으로 향해오는 gas와 떨어져 가는 gas가 시선방향에 겹쳐져 있다. 겹침상태로 보면, 분자류를 옆방향에서 보고 있는 것도 아니며, 또한 축방향으로 보고 있는 것도 아니다. 분자류의 속도폭은 최대 $60\sim 70\text{ km s}^{-1}$ 에 달하며, 공간상의 분포는 대략 0.3pc이다. Kawabe등은 CS($J=1-0$)분자선으로 분자류의 근원부분의 속도구조를 조사하여⁸, 분자류에 수직으로 놓인 반경 0.1pc의 링 형태의 가스(30M L)가 5 km s^{-1} 로 팽창하고 있음

을 찾아내었다(그림 5-a, 굵은 선). 0.1pc이라는 것은 HCO^+ 에서 추적된⁹ 분자류의 노즐의 규모와 잘 일치하고 있다(그림 4의 그림자부분). 또, 가시광과 근적외영역에서의 관측에서는 분자류의 청색편이부분, 즉 중심에 대해 남서쪽만이 반사성운이 보이고 있다. 떨어져 가는 분자류로부터의 산란광이 관측되지 않는 점으로부터, 분자류의

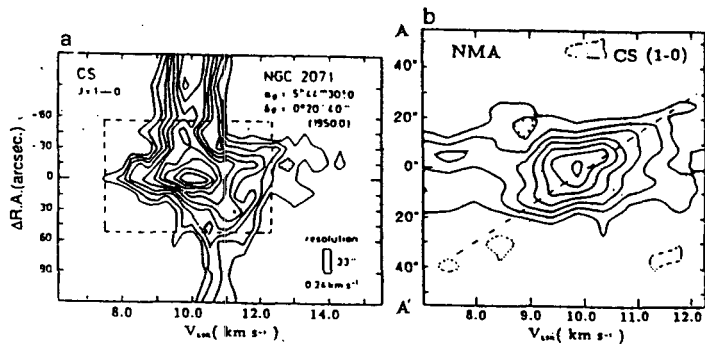


그림 3. 원반에 평행한 절단선(그림 2-b, A-A')에서의 가스의 위치-속도그림

a: 노베야마 45m망원경에 의한 관측 (13)

b: 노베야마의 밀리미터파 간섭계에 의한 관측

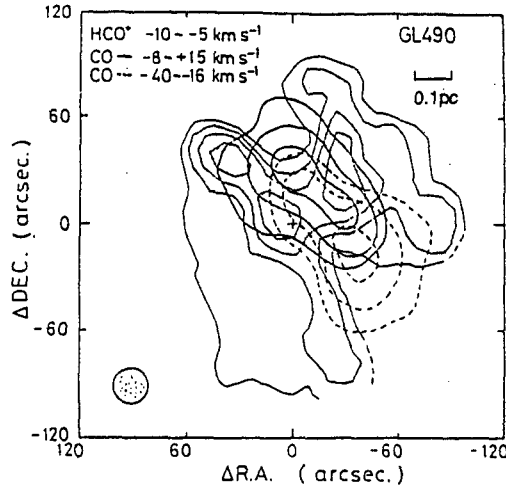


그림 4. GL490의 쌍극분자류 (7).

+표는 적외선원의 위치 (R.A. = 3h 23m 38.8s, DEC. = 58°36'39")이다.

근원부에 고밀도의 구조가 있음이 예상된다. 사실, $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 에서는 그림 5-a와 같은 찰싹 달라붙은 것과 같은 구조가 보이며, 1.3mm와 2.7mm의 연속파에서는 이들 중심부분에서의 먼지의 열방출이 검출되고 있다. 가스와 먼지의 원반이 분자류의 축에 수직으로 관통되어 있다고 가정하면, 우리는 원반을 남서(밑)쪽으로부터 절묘한 각도로 보고 있는 셈이다.

2) 관측결과

금번에 노베야마(NRO)의 NMA(Nobeyama Millimeter Array)를 이용하여, CS $J=2-1$ 방출선 및 3mm연속파에 의한 관측결과, 그림 5-b에 있는 것처럼 3mm연속파원을 중심으로 하여, 쌍극분자류에 거의 수직방향으로 뻗은 CS의 가스 원반이 발견되었다(반경 $\sim 10^4\text{AU}$). NMA의 가장 짧은 간섭계의 기선길이는 15m이기 때문에 $(3\text{mm}/15\text{m})\text{radian} \sim 40''$ 보다도 널리 분포된 구조는 빠뜨리게 되지만, CS의 적분세기는 그전에 노베야마의 45m망원경으로 관측된 양¹⁰의 약 30%에 해당되며, 따라서 이하에서 서술하는 속도구조는 가스 원반의 주요부분을 본 결과라도 해도 좋을 것이다.

그림 6에 보여주고 있는 것은 가스 원반의 속도구조이다. 중심에서 각각 $2''.4$ 씩 떨어져서 원반에 평행한 축에 대한 위치-속도그림은, 원반의 윗쪽(A-A')에서 적색편이를, 그리고 밑쪽(B-B')에서는 청색편이를 보여주고 있다. 원반의 중심부분을 통과하여 원반에 수직으로 그은 축(C-C')에서도, 중심부근에서 적색편이($1\sim 2\text{km s}^{-1}$)에서 청색편이($-1\sim -2\text{km s}^{-1}$)쪽으로 속도가 변화하고 있다. 한편, A-A'와 B-B'의 양

그림 모두 중심위치에서는 $\pm 1 \sim 2 \text{ km s}^{-1}$ 의 속도성분이 두드러짐에 반해, 중심으로부터 $\pm 10''$ 떨어진 위치에서는 0 km s^{-1} 의 속도성분이 두드러지게 나타난다. 이들 그림을 합해 주면, 기울어있는 타원의 형태가 떠오르지만, 이것은 시선을 포함한 타원면내의 동경방향의 운동에 의해 설명할 수 있다. 타원이 기울어 있는 것은 회전성분이 섞여 있기 때문으로 보인다.

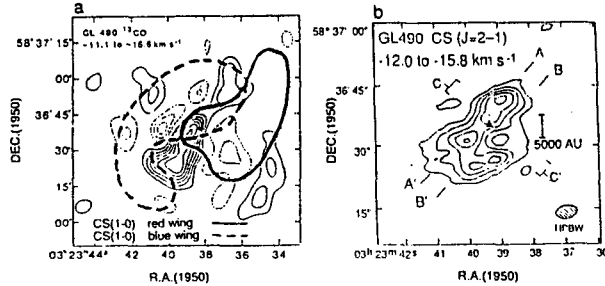


그림 5. GL490의 가스원반

a: ^{13}CO 에서의 관측 (9). 굵은 선은 분자류에 밀려 평행하는 ring상의 가스
b: CS J= 2-1에서의 관측 (10). Δ 는 3mm연속파원의 위치를 나타낸다.

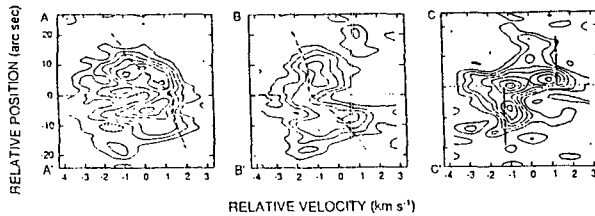


그림 6. 원반에 따른 절단선 (그림 5-b, A-A', B-B')과 수직의 절단선(C-C')에서의 가스의 위치-속도그림

3) 두개의 해석

그림 6의 위치-속도그림을 해석함에 있어서, 1)에서도 서술한 바와 같이, 가스 원반이 있는데 이것의 앞쪽의 굴곡이 북동쪽에 있으며 반대쪽의 굴곡이 남서쪽에 있다고 가정한다.

우선, 가스의 운동방향이 원반면내에 있다고 보자. 평평한 원반을 구성하는 가스의 운동을 생각하고 있기 때문에, 위의 가정은 자연스러운 것으로 생각된다. 그렇다면, 북동쪽, 즉 앞쪽에서는 적색편이가 되고, 남서쪽 즉 반대쪽에서는 청색편이가 된 속도구조는, 중심을 향해 가스가 흘러들어감을 보여주는 것이 된다. 그래서, 원반을 따라 유입되는 것과, 원반을 꿰뚫는 축 주변의 회전을 각각 생각해 보자. 별의 질량과 반경 수 천AU보다 안쪽의 원반의 질량은, 합계 20M 정도이든지 아니면 그 이상으로 추정되지만, 이 질량에 의한 중력장을 가지고도 관측되는 안쪽방향의 속도 $1 \sim 2 \text{ km s}^{-1}$ 를 만들어 내는 것은 가능하다. 여기서는 단순히, 1.5 km s^{-1} 의 일정한 속도를 가진 유입과 $1.0 \text{ km s}^{-1} / 9.5'' \sim 24 \text{ km s}^{-1} \text{ pc}^{-1}$ 의 강체회전의 모델곡선을 그리기로 한다(그림 6의 점선). 단, 원반은 시선에 평행한 면에 대해 30° 기울어 있는 것으로 한다. 간단한 모델이기는 하지만, A-A', B-B'에 따른 위치-속도그림은 잘 재현되어 있다고 할 수 있다.

다음으로, 원반에 수직한 운동을 생각해 보자. 북쪽에서 적색편이되고 남쪽에서 청색편이된 속도구조는, 분자류의 속도구조와 마찬가지로이다. 즉, 분자류의 밀도가 큰 장소에서의 속도성분을 관측한 것이라고 생각된다. 만약에 정말로 그렇다고 한다면, 속도가 $1\sim 2\text{km s}^{-1}$, 속도폭도 이와 같은 정도, 게다가 중심에서 멀어지면(밀도는 작아지게 마련인데) 감속되고 있는 것(C-C')은 기묘하다고 하겠다. 따라서, 분자류의 성분은 포함되어 있을지도 아닐지도 모르지만, 주로 원반을 따라 중심으로 향하는 운동을 보고 있는 것이라고 해석된다.

밀리미터파간섭계의 높은 분해능과 지금까지의 관측결과에서 얻어진 GL490은, 마치도 원시별의 작은 모형과도 같은 단순하며 아름다운 모양을 보여주고 있다(가령 그림 1-b). 축이 꽤 기울어져 있기 때문에, 분자류천체로서는 L1551-IRS와 이 뒤에 등장하는 NGC2071 정도의 박력감은 없지만, 이 기울기가 원반의 속도구조를 찾아냄에 있어서는 다행스런 역할을 하게 된다.

4) 원반가스의 강착류?

금번의 가스의 유입현상은 분해능 $\sim 4''$ ($\sim 3,600\text{AU}$)로 관측되었다. 그렇다면, 분해능을 보다 높여서 안쪽을 보면 어떻게 되어 있을 것인가? 큰 공간규모를 가진 질량강착률($\sim 3\times 10^{-4}\text{M}_{\text{Jup}}\text{yr}^{-1}$) 그대로 별표면까지 떨어져간다고 하면, 강착에 의해 해방된 중력에너지로 GL490의 총광도를 설명할 수 있게 된다. 그러나, 현실적으로는 수천AU의 규모에서의 강착률이, $10^{-4}\sim 10^{-5}$ 배 정도의 작은 규모로 될 때까지 그 상태를 지속해 온다는 것은 생각하기 어렵다. 중심별이 주계열(가까이)까지 진화해 나가서 질량이 8M_{Jup} 정도가 되면, 질량강착에 의지하지 않고서도 별 자신에 의해 $\sim 10^3\text{L}_{\text{Jup}}$ 정도의 광도를 만들어낼 수 있다. 따라서, 가스의 안쪽 방향의 흐름이 있다고 하고, 이것이 별을 만들어 가는 것인지(실제의 강착류), 별에의 강착은 거의 완료되어버린 시기의 현상(강착류의 잔류)인지는, 보다 안쪽을 보지 않으면 정확한 판단을 할 수 없다. 별의 질량이라든지, 별의 극히 근방에서의 질량강착률등의 보다 안쪽의 정보가 필요하다. 원시별의 작은 모형과 같이 보인 GL490도, 잘 보면 주계열에 가깝다는 것도 있을 법한 일이다.

황소자리의 분자구름속의 젊은 별들과 같은 낮은 질량의 별이라면, 가시광으로 보이지 않는 원시별의 단계로부터 T Tauri형별의 단계를 거쳐서 주계열로 이어져가는 과정이 잘 연구되어지고 있다.^{3.5.11} 그러므로, 낮은 질량별에 있어서 가스의 유입이 관측된다면, 그것이 별형성의 어느 단계에서 일어나는 것인지를 알기 위해 관측결과를 시간축상에 나열하는 것은 비교적 용이한 일로 생각된다. 게다가 낮은 질량별의 좋은 점은, 주계열에 이르기까지의 시간이 압도적으로 길다는 점과 관측가능한 천체가 많이 있다는 것이다. 문제는, 중심질량이 작기 때문에, 안쪽을 향한 가스의 흐름이 있다고 하더라도 그 속도가 대단히 작고, 공간적으로 분해하기 어렵다는 점이다. 150pc 정도의 근방에 있는 별생성영역인 황소좌·뱀주인좌의 영역을 보는데도, 현재의 분해능(감도도 포함한)으로는 그다지 충분하지 않으며, LMA(Large Millimeter Array)에 대한 기대가 모아진다.

5. 마침말

위에서 서술한 바와 같이, GL490에서의 가스의 흘러들어감과 NGC2071-IRS에서의 역회전현상은, 지금까지 관측되어 온 다른 젊은 천체에서의 원반상의 분자가스의 속도 구조와 비교해 볼 때 어떠한가? 가스의 속도구조를 좌우할만한 물리요소 중에서, 광도와 분자류활동의 크기^{1,2} 및 원반가스의 질량¹⁶ 사이에는 좋은 상관관계가 있다고 말해지고 있다. 그러므로 조금 난폭한 방법이기는 하지만, 세로축에는 광도를, 그리고 가로축에는 중심천체로부터의 거리(또는 현상의 공간적 크기)를 취하여 그림 7에 정리해 보았다. 여기서 중요하다고 생각되는 다른 요소, 즉 중심별과 분자류의 연령 및 자장등의 축은 지면에 수직하다고 생각해보자. 이 그림을 보면, 자료의 수집이 불충분한 탓도 있겠지만, 현상은 뿔뿔이 흩어져 있는 것처럼 보이기도 하고, 한편으로는 패턴이 있는 것처럼 보이기도 하는 등, 그 해석에는 아직 많은 연구를 필요로 한다고 하겠다.

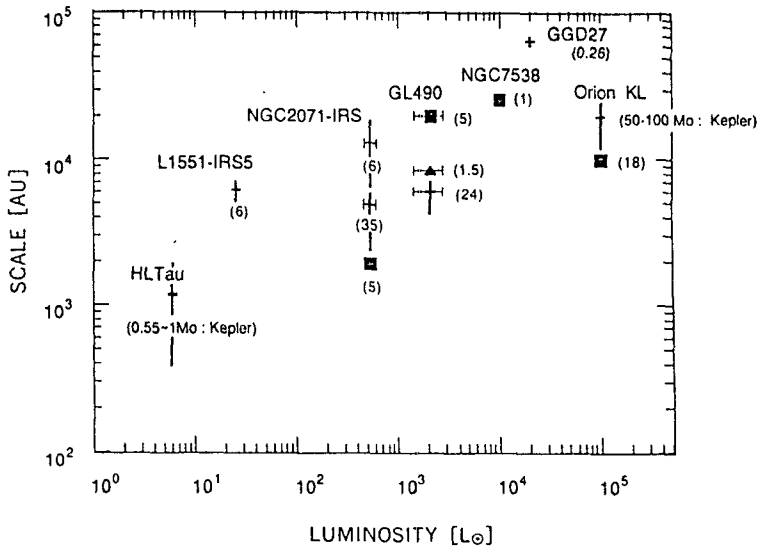


그림 7. 젊은 천체에서의 원반상 분자가스의 계통적인 운동.

기호는 각각 삼각: 흘러들어옴, 사각: 팽창, 십자선: 회전을 나타낸다.

괄호안의 숫자는 흘러들어옴·팽창속도 (kms⁻¹), 회전속도(kms⁻¹pc⁻¹)이다.

참고문헌은 아래와 같다.

HL Tau (18), L1551-IRS5 (19), NGC2071-IRS (13, 14)

GL490 (8, 10), NGC7538 (20), GGD27 (21), Orion-KL (22)

참고문헌

- 1) J. Bally and C.J. Lada, 1983, ApJ, 265, 824.
- 2) R.M. Levreau, 1988, ApJ, 330, 897.
- 3) Y. Fukui, T. Iwata, H. Takaba, A. Mizuno, H. Ogawa, K. Kawabata, and K. Sugitani, 1989, Nature, 342, 161.
- 4) T. Hasegawa, N. Kaifu, J. Inatani, M. Morimoto, Y. Chikada, H. Hirabayashi, H. Iwashita, K. Morita, A. Tojo and K. Akabane, 1984, ApJ, 283, 117.
- 5) Y. Fukui, 1989, ESO Workshop on Low mass star formation and pre-main sequence objects.
- 6) Y. Murata, 1991. Ph. D. Thesis, University of Tokyo.
- 7) R.L. Snell, N.Z. Scoville, D.B. Sanders and N.R. Erickson, 1984, ApJ, 284, 176.
- 8) R. Kawabe, H. Ogawa, Y. Fukui, T. Takano, H. Takaba, Y. Fujimoto, K. Sugitani and M. Fujimoto, 1984, ApJ, 282, L73.
- 9) L. G. Mundy and G.A. Adelman, 1988, ApJ, 329, 907.
- 10) R. Kawabe, T. Hasegawa, N. Kaifu, S.S. Hayashi and T. Hasegawa, 1987, IAU Symp. 115, p.352.
- 11) N. Ohashi, R. Kawabe, M. Hayashi and M. Ishiguro 1991, A.J., 102, 2054.
- 12) T. Takano, Y. Fukui, H. Ogawa, H. Takaba, R. Kawabe, Y. Fujimoto, K. Sugitani and M. Fujimoto, 1984, ApJ, 282, L69.
- 13) R. Kawabe, Y. Kitamura, T. Takano, T. Hasegawa and M. Ishiguro, 1992, submitted to P.A.S.J.
- 14) Moschovias, T., 1980, IAU Symp. 93, p.27.
- 15) Nakano, T., 1991, IAU Symp. 147, p.67.
- 16) Kaifu, N., 1988, 일본천문학회 가을학회