

L1014 분자운 핵에 대한 SRAO 6m 망원경을 이용한 분자선 관측연구 MOLECULAR LINE STUDY OF L1014 WITH SRAO 6M TELESCOPE

이 창 원

한국천문연구원, 대전광역시 유성구 화암동 61-1, 305-348

CHANG WON LEE

Korea Astronomy and Space Science Institute, 61-1 Hwaam, Yusong, Taejon 305-348, Korea

E-mail: cwl@kasi.re.kr

(Received December 1, 2005; Accepted December 15, 2005)

ABSTRACT

We report molecular line observations of CO(1-0), $^{13}\text{CO}(1-0)$, CS(2-1), and HCN(1-0) with SRAO 6m telescope toward L1014-IRS which is thought to be a very faint infrared source embedded in previously known “starless” core L1014. The CO(1-0) observations find several components with different velocities along the line of sight of L1014, 4 km s $^{-1}$ and between 40 ~ 50 km s $^{-1}$. We find a parsec scale CO molecular outflow at the 4 km s $^{-1}$ component for the first time the direction of which is coincident with that of the small scale (~ 500 pc) outflow previously found. Although the observation is not covered for whole area of the outflow, the size of the molecular outflow seems not very inconsistent with the expected age of L1014-IRS. More accurate size and shape of the molecular outflow from L1014-IRS will be determined from the full coverage mapping in CO over the outflow region in very near future.

Key words: ISM: globules — ISM: individual (L1014, L1014-IRS) — ISM: jets and outflows—
formation: stars: low-mass, brown dwarfs

1. 서론

L1014 분자운 핵 (그림 1)은 Lynds 의 분류등급에서 가장 어두운 6등급에 해당하는 분자운 핵이고, 그 내부에 IRAS 점광원 천체가 없어서 별이 없는 (“starless”) 분자운 핵으로 알려져 왔다 (Parker 1988; Lee & Myers 1999). 그러나 최근 스피처 우주망원경을 이용한 “Cores to Disks” 라는 이름의 Legacy 프로그램 (Evans et al. 2003)에 의한 관측을 통해 이 곳에 원시성의 에너지 분포를 보이는 아주 흐린 적외선 원 (L1014-IRS) 이 발견되어 (Young et al. 2004) 이 천체의 정체와 더불어, 이것이 L1014 분자운에 미치는 영향에 대해 활발히 연구되고 있다. 특히 적외선원은 최근 여러 관측에 의해 가까이 있고 (약 200 pc), 아주 어두운 갈색 왜성이 될 원시성의 한 부류일 가능성이 아주 큰 것으로 보여 지고 있다 (Huard et al. 2005; Bourke et al. 2005). Crapsi et al. (2005) 은 FCRAO 14m 망원경을 이용하여 L1014 분자운에 대한 CO 및 다양한 분자선 관측을 수행하여 적외선원에서 유발되는 분자 분출류 (molecular outflow)의 증거를 찾고자 하였지만 성공적이지는 못했다. 그들의 해석은 적외선원에서 나오

는 분출류의 규모가 너무 작아서 큰 단일경에 관측되지 않았거나 혹은 이 적외선원의 진화과정은 보통의 원시성의 진화과정과는 다른 형태의 과정에 있을 가능성이 있다는 것이었다. 반면, Huard et al. (2005)는 지상의 고감도 근적외선 관측에 의해 Ks 밴드에서 성운 모양의 영상이 보이는 것을 쌍극 분출류가 두꺼운 가스층을 통과할 때 나타나는 산란광의 영향에 의한 것으로 해석하여 L1014-IRS 에서의 분자 분출류의 존재를 주장하였다. 그리고 마침내 Bourke et al. (2005)은 Sub-Millimeter Array (SMA) 의 간섭계 망원경을 이용한 고감도 정밀관측으로부터 이 적외선원에서 약 500 AU 크기와 $< 10^{-4} M_{\odot}$ 질량의 가스 분출류를 발견하였는데, 그들은 발견된 적외선원이 지금까지 알려진 어떤 것 보다 작고, 약한 가스 분출류를 내는 특이한 원시성 또는 원시갈색왜성의 한 종류일 것으로 해석하였다. 본 논문에서는 다른 연구자들에 의해 시도되었지만 찾지 못하였던 L1014-IRS와 관련된 큰 규모의 분자 분출류의 존재의 최근 발견을 소개하고 그 의미를 고찰하고자 한다.

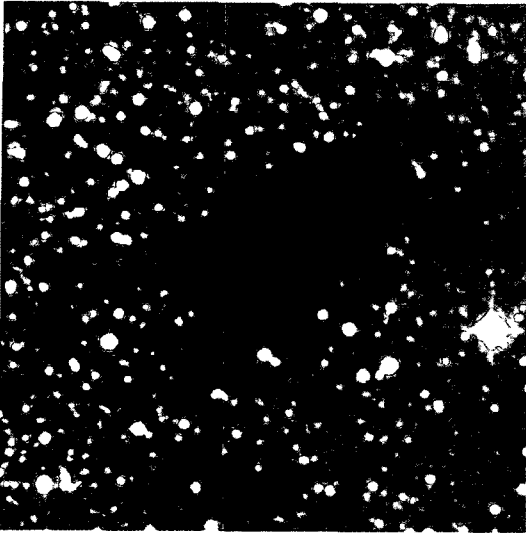


그림 1.— L1014의 광학 영상 (DSS-red). 그림의 크기는 $5' \times 5'$ 이다.

2. 관측

L1014 분자운 핵의 관측은 2005년 3월 9일 - 12일 사이에 서울대학교 교내에 위치한 서울대학교전파천문대 (SRAO) 6m 전파망원경을 이용하여 이루어 졌다. 관측 분자선은 CO(1-0), $^{13}\text{CO}(1-0)$, CS(2-1) 및 HCN(1-0) 등이다. 사용된 SRAO 6m 망원경의 주빔 효율은 73%이며, 110GHz에서 약 $100''$ 의 절반세기빔 (HPBW) 크기를 갖는다 (Koo et al. 2003). 분광기로는 50 MHz 밴드 폭에 1024 채널을 유지하는 자기상관분광기를 이용하여, 얻어지는 스펙트럼의 속도 분해능은 CO 분자선에서 0.13 km s^{-1} 정도이다. 관측 중심은 L1014에서 적외선원이 발견된 지점으로, 2000년 적경, 적위 좌표계로 (21:24:07, 49:59:08)이다. 관측은 CO(1-0) 분자선의 경우 $8' \times 8'$ 의 영역에 중심영역에 대해선 $2'$ 격자간격으로, 외곽은 $4'$ 격자로 이루어졌고, $^{13}\text{CO}(1-0)$ 의 경우, $2'$ 격자간격으로 이루어졌으며, CS(2-1) 및 HCN(1-0)의 경우는 L1014-IRS 방향으로 한점 관측만이 이루어 졌다. 관측기간 동안 관측 시스템온도는 CO(1-0)의 경우 500~800 K, $^{13}\text{CO}(1-0)$ 의 경우는 310 K 정도, CS(2-1)의 경우는 300-320 K, HCN(1-0)의 경우는 320-400 K의 값을 보였다. L1014-IRS 방향에 대해서는 CO의 경우 0.06K, ^{13}CO 의 경우 0.026 K, CS의 경우 0.026K, HCN의 경우는 0.027K 정도의 1 sigma 감도로 관측이 수행하였으며, 넓은 지역의 관측에 있어서는 CO의 경우 약 0.24 K, ^{13}CO 의 경우는 0.05 K 정도의 감도로 관측이 이루어졌다. 관측 하늘의 양을 제거하기 위해 사용한 관측 방법은 대부분이 주파수 전환의 방법이였지만, CO관측의 경우 여러 속도성분의 존재를 정확히 파악하기위해 먼저 주변 빈 하늘의 관측하여 보정하는 위치전환의 방법을 이용하여 다른 속도 성분에 영향을

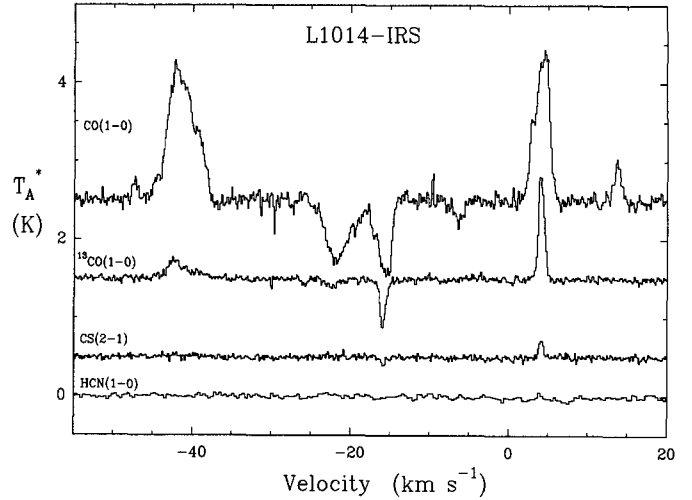


그림 2.— L1014-IRS 방향으로 관측된 분자선. 흡수선으로 보이는 부분은 주파수 변환 방식으로 하늘의 밝기를 제거하는 과정에서 나타나는 현상임

주지 않는 적당한 주파수 이동치를 얻었고, 이를 이용하여 주파수 전환의 방법으로 대부분의 관측을 수행하였다.

3. 결과

3.1. L1014-IRS 방향의 분자선스펙트럼

그림 2는 L1014-IRS 방향으로 얻은 4개의 분자선 모양을 보여준다. CO(1-0)의 분자선은 이 방향에 약 4 km s^{-1} 와 -40 km s^{-1} 두개의 분자운의 존재를 나타내주고 있다. 약 13 km s^{-1} 속도를 갖는 약한 성분은 지구 대기에서 나오는 성분이며서 관측 하늘의 위치에 따라 약간씩 다른 밝기와 다른 속도 성분을 보여 준다. 흡수선들은 두개의 주요성분들이 주파수 변환 모드 관측 방법에 의해 기인되어 나타나는 부분들이다. 최근의 연구에 의하면 4 km s^{-1} 성분은 광학에서 어렵게 보이는 L1014 분자운 핵과 직접적으로 관련이 있는 반면, -40 km s^{-1} 성분은 약 2.6 kpc 정도 떨어져 있는 페르세우스 나선팔에 위치하는 분자운과 관련이 있는 것으로 생각되고 있다 (예, Young et al. 2004, Crapsi et al. 2005). 4 km s^{-1} 성분은 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 에서 아주 밝게 관측되며, 고밀도 추적분자선인 CS(2-1)과 HCN(1-0)에도 검출이 되어 여기에는 고밀도 분자운 핵의 존재를 암시해 준다. 반면, 40 km s^{-1} 성분은 ^{13}CO 에는 검출이 되지 않지만 대조적으로 고밀도 추적 분자선에서는 검출이 되지 않는데 이는 고밀도 분자운 핵이 없거나, 있다 하더라도 아주 먼 거리에 위치하기 때문에 작은 크기의 분자운 핵이 상대적으로 망원경의 큰 관측 빔에 의해 쉽게 뭉그러져 아주 약하게 되는 (beam dilution) 현

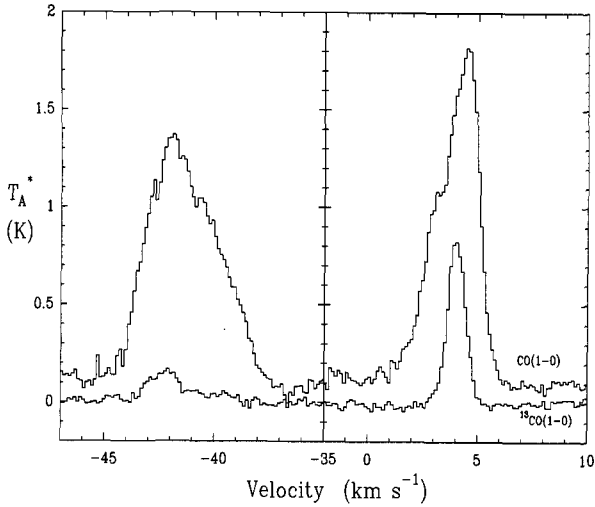


그림 3.— L1014-IRS 방향 $4' \times 4'$ 영역서 관측된 CO 및 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 의 평균 스펙트럼

상 때문일 것으로 여겨진다.

두 성분의 CO 분자선 특성은 서로 다르게 나타난다.

그림 3은 $4' \times 4'$ 영역서 관측된 CO 및 ^{13}CO 의 스펙트럼을 평균한 스펙트럼인데 이는 CO 분자선의 특성을 잘 보여주고 있다.

4 km s^{-1} 성분은 FWHM 선폭이 약 2.2 km s^{-1} 정도로 전형적인 가벼운 분자운 핵의 선폭을 보여주고 있다. 특히 스펙트럼은 두개의 밝은 성분으로 이루어져 있는데 ^{13}CO 의 분자선 극대밝기의 위치가 두개의 성분 사이에 위치하는 것으로 보아 이 분자운이 가스의 여기 온도가 내부로 갈수록 증가하는 환경이라면 이는 이 분자운이 팽창하는 가스 운동이 주요 동력으로 주어지는 가능성을 추측케 한다. 한편 -40 km s^{-1} 성분의 선폭은 4 km s^{-1} 성분의 그것보다 거의 배에 이르는데 이는 ^{13}CO 분자선의 모양과 비교하여 보면 시선 방향에 약간씩 서로 다른 몇 개의 속도 성분이 합쳐져 나타나는 현상에서 기인되는 것으로 생각된다.

3.2. L1014 방향의 CO 분자의 분포

그림 4는 $8' \times 8'$ 영역에서 4 km^{-1} 성분의 CO 스펙트럼의 분포를 보여준다. CO는 L1014 분자운 핵의 분포를 추적하기보다는 오히려 희박한 L1014 주변 가스의 분포를 추적하고 있어 DSS에서 보이는 L1014 분자운의 영상의 모습을 잘 대변하고 있지는 않음을 알 수 있다.

반면 그림 5는 CO보다 광학적인 투과도가 깊은 분자선인 ^{13}CO 분자선의 밝기 분포를 보여주는 것인데 4 km s^{-1} 성분의 경우 실제 광학에서 보이는 L1014의 암흑부분의 윤곽을 어느 정도 잘 대변해주고 있다. -40

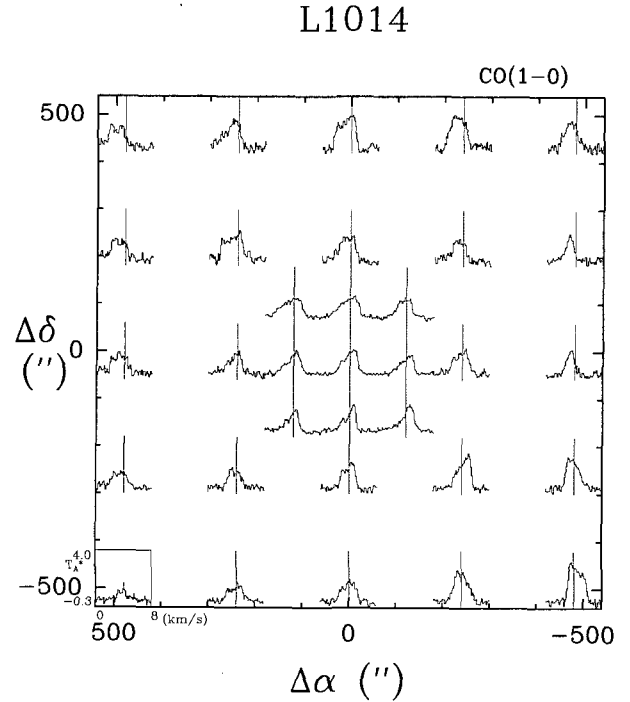


그림 4.— L1014 $8' \times 8'$ 영역에서 4 km^{-1} 성분의 CO 스펙트럼의 분포. 각 스펙트럼에 그려진 직선은 L1014-IRS 방향에서 관측된 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 분자선의 가운데인 맞춤 속도 값 (4.06 km s^{-1})의 위치를 나타낸 것이다.

km s^{-1} 성분의 경우 중심의 $4' \times 4'$ 영역에서는 -38 km s^{-1} 성분과 -43 km s^{-1} 성분 등의 두개의 주요 성분이 보인다.

L1014-IRS의 위치가 4 km s^{-1} 또는 -43 km s^{-1} 성분과의 관련 가능성을 암시하고 있지만, 최근의 여러 연구들은 4 km s^{-1} 성분과의 직접적인 관련성을 보여주고 있다 (Huard et al. 2005; Bourke et al. 2005). 본 관측에서도 고 밀도 지역 추적자인 HCN이 -43 km s^{-1} 성분에서 검출되지 않은 것으로 보아 L1014-IRS는 고 밀도 가스가 거의 없는 이 속도 성분보다는 고 밀도 지역을 포함하고 있는 4 km s^{-1} 성분의 L1014 분자운과 관련 가능성이 보다 더 높은 것으로 판단된다.

3.3. L1014 방향의 CO 분자선 모양의 특성

4 km s^{-1} 성분의 CO의 분자선에 나타나는 흥미로운 사실은 중심의 $4' \times 4'$ 영역의 스펙트럼들이 한결같이 체계적인 가스의 운동을 연상케 하는 적색성분이 밝은 적색비대칭 (red asymmetry)을 보이고 있다는 것이다. 이는 ^{13}CO 스펙트럼과 비교한 그림 6에서 더욱 뚜렷이 보인다. 광학적으로 깊은 투과도를 보이는 ^{13}CO 의 분자선의 경우 비대칭 스펙트럼을 보이는 CO 분자선의

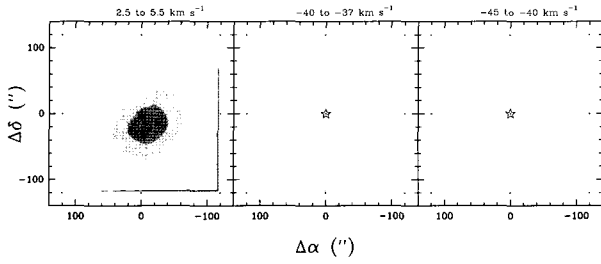


그림 5.— L1014영역에서 ^{13}CO 분자선의 밝기 분포. 그림 속의 별표는 L1014-IRS의 위치를 나타내고 점은 관측점의 위치를 표시한다.

밝은 성분에 일치하기보다는 두 밝은 성분의 사이에 위치하는 것은 이 분자선이 체계적인 어떤운동과 관련을 갖고 있을 가능성을 암시해주는 부분이다.

-40 km s^{-1} 성분의 경우 중심의 $4' \times 4'$ 영역에서의 CO 분자선의 속도 성분은 대체로 -40 km s^{-1} 근처에서 유지하고 있으나 그 밖의 영역으로 넘어가면 상당히 -50 km s^{-1} 까지 걸쳐 다른 속도 성분들이 보인다. 실제로 중심영역을 ^{13}CO 분자선으로 더욱 자세히 보면 ^{13}CO 분자는 CO의 밝은 성분을 주로 추적하는 까닭에 ^{13}CO 분자선의 성분들은 약 -39 와 -42 km s^{-1} 두개의 다른 속도 성분들로 구성되어 있다. 따라서 -40 km s^{-1} 성분 CO 분자선의 넓은 선포는 L1014 방향, 특히 페르세우스 나선팔 방향으로 거리와 속도가 다른 분자들이 걸쳐 있어 이들이 시선방향으로 합쳐져 나타나는 것에 기인되는 것이라 할 수 있다.

3.4. L1014-IRS에서의 분자분출류 존재 조사

Crapsi 외 연구자 (2005)는 FCRAO의 CO의 관측 자료를 이용하여 L1014-IRS에서의 분자 분출류의 존재를 조사하였지만 FCRAO 14m 망원경의 큰 빔의 관측으로는 관측하기 어려웠다고 보고 하였다. 그러나, Huard et al. (2005)과 Bourke et al. (2005)는 지상적외선 망원경관측과 submillimeter 영역의 간섭계 관측 (SMA 관측)으로 L1014-IRS와 직접 관련된 지금까지 관측된 가장 소규모의 분자분출류의 발견을 보고한다. 그렇지만 이 모든 관측은 아주 큰 pc 규모의 분자분출류의 존재를 부정하고 있다. 그러나 그림4의 CO 프로파일의 모습은 이 원시성후분자는 적어도 각 크기로 20 분 이상의 큰 규모의 분자 분출류의 존재를 암시해주고 있다. 즉 북동쪽에서 북쪽에 걸친 CO 분자의 프로파일은 L1014-IRS 방향에서 얻은 ^{13}CO 분자선의 속도 측에 대해 청색이동 된 스펙트럼의 모습을 보여주고, 남서쪽에는 체계적으로 CO 프로파일이 적색 이동된 양상을 보여준다. 이들의 속도 채널 지도인 그림 7은 이

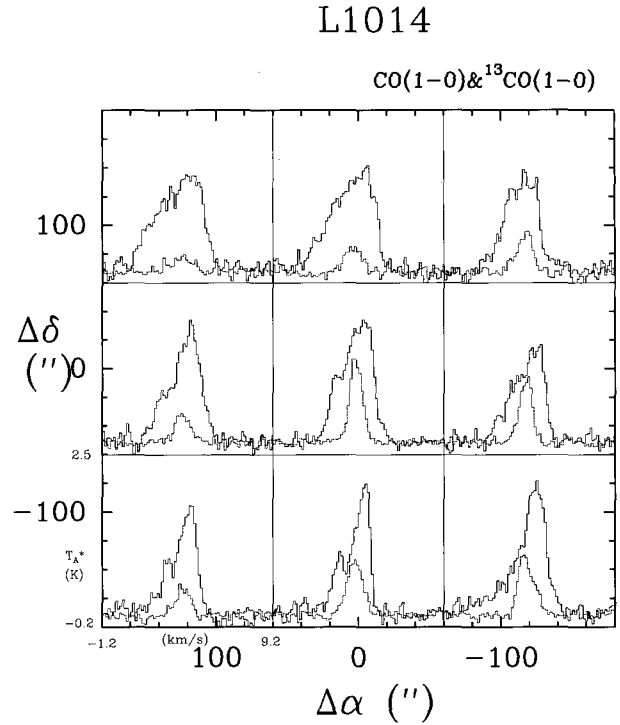


그림 6.— L1014영역에서 관측된 4 km^{-1} 성분의 CO와 ^{13}CO 분자선의 모양 비교. 바깥쪽의 밝은 것은 CO, 안쪽의 어두운 것은 ^{13}CO 의 분자선이다.

의 양상을 명확히 보여 주는데, Bourke et al. (2005)이 간섭계 관측에서 발견한 작은 규모의 분자분출류의 방향과, Huard et al. (2005)의 적외선으로 보이는 가스 산란광의 축 방향 등이 큰 규모의 가스분출류의 방향과 잘 일치하는 것은 이것이 큰 규모의 분출류일 가능성을 뒷받침해주고 있다.

가스 분출류의 한 부분 (적색부분)의 투영된 크기는 (적색부분에 대해서) 약 $11'$ 의 각 크기로 200 pc의 거리를 가정할 때 이는 약 0.66 pc 정도의 크기로 계산된다. 가스 분출류의 속도는 정확히는 알 수 없지만, 청색 분출류 부분에서의 속도와 적색 분출류에서의 최대 속도 차이가 약 5.2 km s^{-1} 정도 이어서 이의 절반 정도의 속도로 멀어져 가고 있다고 볼 수 있다. 이렇게 계산되는 분출류의 존재시간은 대략 2.3×10^5 년 정도가 된다. Huard et al. (2005)는 근 적외선에서 관측된 흐릿한 성운성을 설명하기 위해서는 이 분출류의 축의 경사각이 60도 보다는 크나 분출류의 퍼진 각이 50도 정도 인 것으로 추정한다. 만약 그러하다면 관측된 분출류의 속도는 거의 관측치와 비슷하거나 다소 클 것이고 투영된 분출류의 크기는 실제보다 커질 수 있기 때문에 분출류의 계산된 지속시간의 계산은 다소 달라질 수도 있다. 보다 정확한 계산은 보다 정밀하고 다양한 관측자료가 요구되어 이 논문의 범위를 벗어난다.

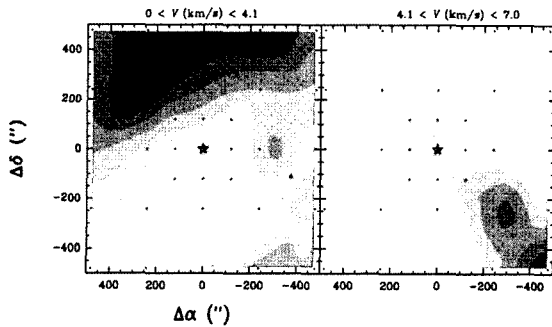


그림 7.— L1014영역에서 관측된 속도에 따른 CO 밝기 지도. 그림 속의 별표는 L1014-IRS의 위치를 나타내고 점은 관측점의 위치를 표시한다.

여하튼 이러한 대략적인 계산치는 L1014-IRS가 Class 0형의 원시성 후보자라는 사실 (Young et al. 2004)과 이 것이 최근 이야기 논의되고 있는 Class 0원시성의 지속시간 ($\sim 2 \times 10^5$ 년 : Visser et al. 2002)과 그다지 어긋나지 않음을 알 수 있다.

한편, 관측된 자료를 자세히 보면 가스 분출류의 크기는 실제 우리가 관측한 범위의 크기를 넘어서음을 알 수 있다. 보다 더 넓은 영역의 자세한 관측은 분출류의 정확한 크기와 나아가 L1014-IRS의 정체를 연구하는데 필수 불가결하다. 가스 분출류의 전 영역에 대한 자세한 분자선 보완 관측이 계획되어 있다.

4. 결론

이 논문에서는 L1014 분자운 핵에서 발견된 아주 흐린 ($\sim 0.09 L_{\odot}$) 적외선원 L1014-IRS에 의한 분출류의 존재를 찾기 위한, 서울대학교 6m 전파망원경을 이용한 CO(1-0), ^{13}CO (1-0), CS(2-1), 및 HCN(1-0) 관측이 소개되었다. 4 km s^{-1} 성분의 ^{13}CO 의 분포는 광학적으로 암흑 지역으로 보이는 L1014의 모습과 가장 잘 일치하는 것으로 보아 L1014가 4 km s^{-1} 성분으로 구성되어 있는 것으로 재확인 할 수 있었다. 이 관측의 무엇보다도 중요한 기여는 기존에 발견하지 못한 4 km s^{-1} 성분의 CO 프로파일에서 $\sim 1 \text{ pc}$ 크기 정도의 가스 분출류의 모습을 최초로 발견하였다는 것이다. 가스 분출류의 방향은 남동-북서 방향으로 있는 분자운 핵에 반해 남서-북동방향으로 향하고 있는데 이는 SMA의 간섭계관측이나 정밀한 지상 적외선관측에서 발견한 아주 작은 규모 (약 500 AU) 크기의 방향과 일치한다. 분출류가 생성된 개략적인 시간은 L1014-IRS가 Class 0형의 원시성 후보자라고 하는 기존의 관측과 그다지 모

순되어 보이지는 않지만, 분출류의 범위가 관측 범위를 벗어나 넓은 영역에 걸쳐 있는 것으로 보아, 이의 보완 관측이 계획되어 있으며 이를 통해 L1014-IRS에 의한 가스 분출류의 정확한 크기와 더불어 L1014-IRS의 정체를 밝힐 예정이다.

본 연구는 한국과학재단의 R01-2003-000-10513-0 연구비에 의해 이루어졌음을 밝힙니다.

참고문헌

- Bourke, T., Crapsi, A., Myers, P., Evans, N., Wilner, D., Huard, T., Jørgensen, J. K., & Young, C. H., 2005, *ApJ*, 633, 129
- Crapsi, A., Devries, C. H., Huard, T. L., Lee, J.-E., Myers, P. C., Ridge, N. A., Bourke, T. L., Evans, N. J., Jørgensen, J. K., Kauffmann, J., Lee, C. W., Shirley, Y. L., & Young, C. H., 2005, *A&A*, 439, 1023
- Evans et al., 2003, *PASP*, 115, 965
- Huard et al., 2005, *ApJ*, accepted (astro-ph/0509302)
- Koo, B.-C., et al., 2003, *JKAS*, 36, 43
- Lee, C. W. & Myers, P. C., 1999, *ApJS*, 123, 233
- Parker, N. D., 1988, *MNRAS*, 235, 139
- Visser, A. E., Richer, J. S., & Chandler, C. J., 2001, *MNRAS*, 323, 257
- Young et al., 2004, *ApJS*, 154, 396