

L1521F의 HCN(J=1-0) 분자선 전파 관측

손정주¹ · 이창원^{2,*}

¹한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791, 충청북도 청원군 강내면 다락리 산 7

²한국천문연구원, 305-348, 대전광역시 유성구 화암동 36-1

Radio Observation of L1521F using HCN (J=1-0) Line

Jungjoo Sohn¹ and Chang Won Lee^{2,*}

¹Department of Earth Science Education, Korea National University of Education,
Chungbuk 363-791, Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

Abstract: In this study, we investigated the kinematical properties of the L1521F-IRS in Taurus region using HCN (J=1-0) molecular line. The high resolution mapping has carried out by 5×5 point observations covering 3.7×3.7' area using a 12-m telescope of Arizona Radio Observatory in Tucson, USA. L1521F which harbors the faint infrared L1521F-IRS, displayed a strong central concentration of integrated intensity in HCN without serious molecular depletion. It showed a symmetric kinematical structure with the opposite infall motion in either side of the central cores. It is a direct evidence of bipolar outflows in the core of L1521F.

Keywords: astronomy, radio observation, interstellar medium, star formation

요약: 본 연구에서는 황소자리 분자운에 위치한 L1521F-IRS의 운동학적 특성을 알아보기 위하여 HCN(J=1-0) 분자선을 이용한 전파관측을 수행하여 분석하였다. 약한 밝기의 천체에 대한 높은 공간 분해능 지도 관측을 위하여 미국 Tucson에 위치한 Arizona Radio Observatory 12 m 망원경을 이용하였으며, 대상의 주변을 충분히 포함할 수 있도록 5 지점×5지점 광역관측모드로 관측대상의 중심을 포함한 3.7×3.7' 영역을 관측하였다. HCN 분자선 적분 밝기 분포자료는 분자운핵 L1521F가 고밀도 환경에서 분자의 심각한 결핍 현상이 없이 중심에서 강한 밝기를 보여 주고 있음을 보였다. L1521F에서 발견된 적외선원의 위치를 기준으로 동쪽방향에는 청색비대칭 분광선이 서쪽에는 적색비대칭 분광선이 존재하고 이들의 분포가 기존의 적외선영상에서 나타난 고갈모양과 잘 일치하는 모습을 보이고 있는 것으로 보아 L1521F-IRS에서 나오는 가스 쌍극류의 존재를 확인 할 수 있었다.

주요어: 천문학, 전파 관측, 성간 물질, 별 생성

서론

‘별의 형성’은 천문학에서 근본적인 연구 분야 중 하나이다. 거대 분자운의 고밀도 부분에 대한 전파와 적외선 파장에서의 관측과 이론적인 수치 모형 계산 결과를 통해 별의 형성 단계에 대한 많은 설명이 가능해 졌다. 하지만, 여전히 태양 정도의 작은 질량을 갖는 별들의 초기 형성 단계에 대한 연구는 크기가

작고 어두운 관측 대상 천체가 가지는 관측적 한계로 인해 90년대 초반까지도 제한점이 많았다. 이후 큰 구경의 전파 망원경의 등장과 꾸준히 개선되고 있는 검출기의 성능과 분석 기술, 그리고 최근 높은 정밀도를 갖는 일본의 AKARI(Murakami et al., 2007), 미국의 Spitzer(Werner et al., 2004), 유럽의 Herschel(Pilbratte et al., 2010) 적외선 위성 망원경의 관측 자료를 통해 깊이 있는 해석을 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 Spitzer 우주망원경에 의해 적외선 파장에서 태양 광도의 10% 정도가 된다고 알려진 질량이 작은 아기별을 내포한 L1521F분자운, 특히 아기별 L1521F-IRS 주변의 운동학적 특성

*Corresponding author: cwl@kasi.re.kr

Tel: 82-42-865-3276

Fax: 82-42-865-2020

을 전파 분자선을 이용한 지도 관측 결과로 부터 이해하고자 한다.

별의 형성 초기 단계에 대한 물리적 화학적 상태를 알기 위해 이해되어야 할 대상은 ‘무성 분자운핵(starless core)’이다. 이 천체는 분자운에서도 높은 밀도로 집중된 영역인 동시에 아직 항성 즉, IRAS 적외선 위성으로 관측된 점광원 목록에 포함되지 않은 천체로 정의된다(Beichman et al., 1986; Lee and Myers, 1999). 하지만 모든 무성 분자운핵에서 별이 생성되지는 않는다. 이들 중 ‘전원시성핵(Prestella Core)’은 중심 수소분자 밀도가 $10^5\text{-}10^6\text{ cm}^{-3}$ 이며 화학적으로 진화된 상태의 고밀도 분자운 핵을 갖고 있고, 여러 분자선 관측으로 별이 형성되기 직전의 고밀도 가스 핵의 물리적인 상태를 지시하는 천체이다. 또한, 2003년 발사되어 관측을 수행중인 Spitzer 적외선 우주 망원경은 IRAS 적외선 우주 망원경 보다 높은 민감도와 정밀도로 0.1 태양광도(L_{\odot})보다 어두운 극저광도천체(Very Low Luminosity Objects: VeLLO)를 새롭게 분류하고 있다(Young et al., 2004). 예를 들어, 기존에 별이 없는 분자운 핵 코어로 알려져 왔으나 L1014과 같이 0.1 L_{\odot} 보다 작은 극저광도천체를 포함하고 있는 천체가 관측되고 있다(Young et al., 2004).

L1521F는 CS(2-1) 분자선 관측 연구(Lee et al., 1999)로 무 항성 분자운 핵 내부의 운동학적 연구가 이뤄졌고, 다양한 관측 결과로 상당히 진화된 분자운 핵으로 알려져 있다(Crapsi et al., 2005). 흥미롭게도 이 천체에 대한 CS 분자선 지도관측 결과는 중심으로 향하는 수축운동을 지시하는 분광양상과 중심에서 밖으로 향하는 팽창 운동을 지시하는 분광양상이 공존하여 나타났다(Lee et al., 2001). 또한, CS 분자선 보다 고밀도 영역을 지시하고 화학적 모형계산(Lee et al., 2004; Aikawa et al., 2005)으로 밀도가 높은 영역에서 분자의 먼지포피 또는 얼음에 흡착되어 분자선 관측 결과에서 그 밝기가 결핍 되어 나타나는 현상이 CS 분자선에 비하여 크지 않은 것으로 알려진 HCN(J=1-0) 분자선을 통한 중심 관측 결과에서도 HCN(J=1-0)의 3개 미세 천이선에서 서로 다른 방향성의 복잡한 운동양상이 보고되었다(Sohn et al., 2007).

2003년 발사되어 임무 수행을 시작한 미국 NASA

의 Spitzer 적외선 위성의 영상검출기를 이용한 관측 결과에서 L1521F는 더 이상 무성분자운 핵이 아닌 극저광도천체(L1521F-IRS)를 지닌 천체로 분류가 되었다(Bourke et al., 2006). Spitzer의 영상검출기에서 보여진 고깔모양의 성운상 모습이 중심 극저광도천체에 의한 질량분출의 간접적인 증거로 제시되었다(Bourke et al., 2006; Terebey et al., 2009). 그러나 영상 관측에서는 운동학적 요소를 직접적으로 해석하기 어려우므로, 본 연구에서는 L1521F의 운동학적정보를 얻을 수 있는 분광관측을 전파 파장대에서 수행하였다. 관측을 위한 지시선으로 고밀도 분자운 관측에서 중심 결핍 현상이 심각하지 않는 것으로 알려진(Lee et al., 2003; Aikawa et al., 2005) HCN(J=1-0) 분자선을 선택하였다.

L1521F는 140pc 거리의 황소자리 분자운에 위치하고 있으며 중심 밀도가 약 10^6 cm^{-3} 으로 비교적 높다(Ohishi et al., 1999; Crapsi et al., 2004). L1521F는 전파 파장에서 분자 지시선에 따라 다른 결과를 보여 주는데, 그 예로 CO(J=2-1)에서는 쌍극 분출류 현상의 증거가 잘 보이지 않았으나(Lee et al., 2001) HCO⁺(J=3-2)에서는 분광선의 가장자리가 두드러지는 현상으로 코어의 외곽에서의 운동에 특이점을 보였다(Ohishi et al., 1999).

따라서 본 연구에서는 HCN(J=1-0) 분자 분광선을 사용하여 별이 없는 분자운 핵의 중심 고밀도 영역에서 일어나는 운동학적 특성의 양상과 성질을 조사하였다. 점 관측으로부터 얻어진 분광선은 분자운 핵의 시선 방향으로 적분된 운동학적 정보를 보여준다. 그러한 이유로 분광선에서의 청색비대칭 선윤곽이 반드시 중심으로 향하는 운동을 지시한다고 보기는 어렵다. 분광선에서의 비대칭 선윤곽 형태는 회전이나 중심으로 바깥으로의 분출로도 가능하다. 그러나 공간 분해능을 높여 지도 관측을 하면, 코어에서의 중심 수축 운동을 계산하여 공간적인 속도 변이를 측정할 수 있으므로 보다 정확한 운동학적 특성을 파악할 수 있다.

그리하여 본 연구에서는 별 진화의 초기 수축 단계에 있는 후보로 알려진 L1521F, 특히 여기에서 발견된 아기별 L1521F-IRS 주변에 대한 고밀도 중심 영역에서 보이는 운동학적인 특성을 알아보기 위하여 HCN(J=1-0) 분자선의 지도 관측을 수행하였다.

Table 1. L1521F-IRS source parameters

R.A. (J2000)	Dec. (J2000)	$L_{IR} (L_{sun})$	Distance (pc)
04:28:39.8	+26:51:35.0	0.02	140

연구 방법 및 절차

연구 대상

L1521F는 Carapsi et al.(2005)에 의해 분자개수 밀도가 $n(H_2) \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 으로 높고 중심부 20" 안쪽에서는 CO 분자가 심각하게 결여된다고 보고되었다. 다양한 관측적 증거로 L1521F는 별이 형성되기 직전 상태까지 상당히 진화된 분자운 핵이라는 것을 보여 주고 있다(Dalgarno and Lepp, 1984; Millar et al., 1989; Oliveira et al., 2003; Crapsi et al., 2005). 그러나 이 천체는 CS 지도 관측에 의하면 중심을 기준으로 대칭적인 상이한 운동 방향성을 보이고 HCN 중심 점 관측에서는 분광 천이 지시선에 따라 서로 상이한 운동 방향성을 시사하는 비대칭 분광선 윤곽이 확인되었다(Sohn et al., 2007; Lee et al., 2004). 또한 근래의 Spitzer 적외선 우주 망원경(Werner et al., 2004) 관측을 통해 0.1 태양 광도보다 어두운 천체에 해당하는 점광원이 관측되었으며 그 중심에서 쌍극성물질 분출로 보이는 적외선영상이 관측되었다(Bourke et al., 2006; Terebey et al., 2009). 이러한 이유로, L1521F는 극저광도천체를 포함하고 있는 천체로 여겨지고 있다. 그러나 Spitzer의 영상 자료만으로는 이 천체의 쌍극성 가스분출류의 존재를 파악하기 어려우므로 분광관측 연구를 수행하였다. L1521F의 극저광도천체 L1521F-IRS의 좌표정보는 Table 1.에 표시되어 있으며, 이 대상 천체까지의 거리는 해당 분자운인 “항소자리 분자운”의 거리로서 140pc을 채택했다(Lee et al., 2001; Jinija et al., 1999).

자료 수집

본 연구를 위해 미국의 Tucson에 위치한 Arizona Radio Observatory(ARO) 12 m 전파망원경을 이용하였다. 지도 관측은 2003년 1월에서 3월에 수행되었으며, 관측시 전파망원경의 시스템 온도는 160-210 K 범위였다. 높은 분광 분해능을 얻기 위해 12 KHz의 채널 폭을 선정하여 MAC(millimeter auto correlator; 밀리미터 상관기)를 사용하였다. 결과적으로 88.6 GHz에서 약 0.04 km/s의 속도 분해능을 얻을 수 있었다. 한번 관측으로 동시에 두개의 편광된 관측 자

Table 2. HCN(J=1-0) observation parameters

Telescope	$\langle T^*_{MB} \rangle$	$\langle V_{N_2H^+} \rangle$ [km/s]	R_{CS} [pc]
ARO 12m	0.72	6.48+ _{-0.01}	0.07

료를 획득하여 주어진 시간에 더 높은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있었으며, 주파수 스위칭 방법을 사용하여 하늘의 밝기를 보정하였다. 모든 관측 자료는 망원경의 주빔 효율을 고려하여 주빔 밝기로 변환하였다. 관측에 사용한 전파망원경의 빔크기는 88 GHz에서 약 70"이며, 빔효율은 약 0.95이다.

HCN(J=1-0) 분자선에는 3개의 미세 천이선이 있으며, HCN(J=1-0)선의 주파수 설정을 위하여 Cologne 데이터 베이스의 값을 이용하였다. 이들 값의 불확실도는 약 1 KHz 정도로 실제 분광학적 분해능의 약 1/10-1/20배로 충분히 정밀한 HCN의 분자선 주파수를 제공해준다. Cologne의 자료가 주는 미세 천이선들의 주파수는 다음과 같다. HCN(J=1-0, F=1-1)은 88630.4157 (± 0.001)MHz, HCN(J=1-0, F=2-1)은 88631.8473 (± 0.001)MHz, HCN(J=1-0, F=0-1)은 88633.9360 (± 0.001)MHz이다. 이 값들은 HCN의 통계적 관측에서 사용된 값과 동일하다(Sohn et al., 2007). 관측된 분광선의 분석을 위해 CLASS 분석 소프트웨어(Buisson et al., 1994)와 IDL을 사용하였다.

연구 결과

분광선

L1521F-IRS의 관측 영역에서 신호 대 잡음비가 5 이상($S/N > 5$)인 분광선들의 주천이선인 HCN(J=1-0, F=2-1)의 평균 주빔 온도는 1.7 K였다. 또한, 대상의 중심위치에서는 신호 대 잡음비가 10이상의 값이 측정되었다. Table 2에서는 관측에 사용된 망원경과 관측결과 주천이선으로 나타난 HCN(J=1-0, F=2-1)의 평균 주빔 온도, 비교 관측 자료로 사용된 N_2H^+ (J=1-0)의 밝기분포에서 중심 밝기의 절반이 되는 영역이 갖는 속도의 평균값(Lee et al., 2001)이 제시되었다. 그리고 R_{CS} 는 CS 분자선 관측으로부터 얻어진 코어의 반경을 표현한 것이다.

Fig. 1은 L1521F-IRS 주변의 HCN 분광선 윤곽들을 나타낸 것이다. HCN 분광선 윤곽에서 밀도와 온도가 중심보다 낮은 코어의 외곽을 둘러싸고 있는

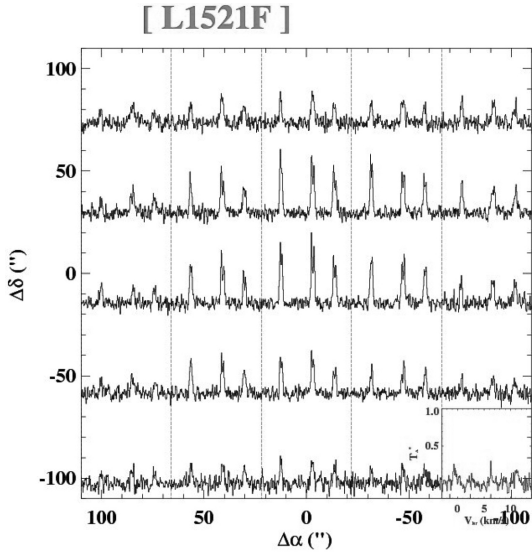


Fig. 1. HCN profiles of L1521F. Blue asymmetries with double peaks are shown near the central region. Red asymmetries appear in the outer part of this plot. The spectra were obtained in the $\sim 44''$ interval.

영역에 의한 자기흡수로 인해 밝기의 침강(self-absorption dip)이 나타나거나 비대칭적인 2개의 정규 분포곡선의 합으로 이루어진 분광선이 보인다. 중심에서 강한 중력적 수축 운동의 구조를 갖는 전원시 성행들의 경우 자기 흡수 침강에 의해 분리된 두개의 마루 중 파장이 짧은 쪽의 청색의 요소가 더 밝게 보이며, 또한 그 밝은 정도는 중심 부분에서 더 크고 바깥으로 갈수록 세기가 작아진다. 그러나 L1521F의 경우 HCN 천이 선들의 형태 분포는 중심에서 한 축을 기준으로 한쪽 방향은 청색성분이 더 밝게 보이는 반면 반대편은 적색성분이 더 밝게 보인다.

HCN(J=1-0)의 주 천이선(F=2-1)의 선운곽은 CS의 경우와 뚜렷한 차이를 보이며 N_2H^+ 적분 밝기 분포에서 최대밝기의 반에 해당하는 밝기 등고선 내부의 평균 분광선 윤곽(Lee et al., 2001)과도 차이를 보인다. HCN 분광선은 두 개의 마루를 갖는 정규분포곡선으로 이루어지고 동시에 청색 파장 쪽의 요소가 밝은 수축 비대칭의 모습을 보이고, 이는 CS 분광선에서 보이는 청색성분보다 더 짧은 파장으로 편향된 모습을 갖는 것이 명확하게 보여진다. 이는 분광선의 비대칭 정도를 측정하기 위해서 광학적 투과도가 깊은 분광선과 상대적으로 덜 깊은 분광선 사이의 속

도 차이를 표준화한 dV 값을 고밀도 분자운 코어들에 대해 정량적으로 분석한 Sohn et al.(2007)의 결과와도 일치한다. 표준화된 속도 차이 dV 는 다음과 같이 정의된다(Mardones et al., 1997):

$$\delta V = [V_{HCN(F=i-j)} - V_{N_2H^+}] / \Delta V_{N_2H^+}, \quad (1)$$

여기에서, $V_{HCN(F=i-j)}$ 는 HCN(F=i-j)의 최고 밝기를 보이는 속도이며, $V_{N_2H^+}$ 는 N_2H^+ 분광선의 최대 밝기의 반에 해당하는 밝기에서의 선폭이다. 본 연구에서는 HCN의 미세 천이선(F=i-j) 각각에 대해 가우스분포를 맞추는 방법으로 $V_{HCN(F=i-j)}$ 을 구하였다. 두개의 요소 성분 또는 비대칭 윤곽선을 갖는 HCN 천이선들에 대해서 값을 구할 때에는 각 선들의 속도를 얻기 위해 두개 성분에서 약한 밝기를 갖는 부분을 가리고 밝은 성분에 대해서만 가우시안 맞춤의 방법을 이용하였다. N_2H^+ 분광선의 최대 밝기에 해당하는 속도 값 $V_{N_2H^+}$ 과 최대 밝기의 반에 해당하는 선폭인 $\Delta V_{N_2H^+}$ 값은 Lee et al.(2001)로부터 자료를 얻었다. 또한 δV 계산에서의 오차를 측정하기 위해 청색성분의 최대 밝기 값과 적색성분의 최대 밝기 값의 차이가 분광학적 잡음의 1σ 보다 큰 경우만 선택하여 처리하였다.

HCN선의 적분 밝기 분포

HCN의 고밀도 중심영역에서의 분자 결핍현상과 공간적 넓이의 정도를 알아보고 동시에 정확한 중심 좌표를 결정하고자 관측된 HCN(J=1-0)의 적분 밝기 분포와 $N_2H^+(J=1-0)$ 의 적분 밝기 분포를 비교하였다. Fig. 2는 HCN(J=1-0)의 세 가지 미세 천이선과 $N_2H^+(J=1-0)$ 분광선으로 구한 적분 밝기 분포 지도이다.

두 분광선의 적분 밝기 분포는 상당히 잘 일치하는 것으로 보인다. 또한 Fig. 3에서는 HCN의 적분 밝기 분포의 교차단면 윤곽이 N_2H^+ 의 경우와 서로 아주 좋은 상관관계를 보여 준다. 다시 말해, 주천이선에서는 HCN과 N_2H^+ 의 밝기 분포 중심 위치가 서로 잘 일치하고, 또한 HCN 선운곽에서는 중심의 밝기 침강현상이 거의 보이지 않는다. N_2H^+ 분광선은 핵의 고밀도 중심 영역에서 밝기 결여 현상이 거의 없는 것으로 알려져 있기 때문에 HCN과 N_2H^+ 의 밝기 분포가 잘 일치하는 것은, HCN 분자선이 핵의 중심 고밀도 영역에서 밝기가 결여되는 정도가 CS에 비하여 거의 무시할 수 있을 정도로 작다는 것을 의미한다(Aikawa et al., 2005; Tafalla et al., 2006).

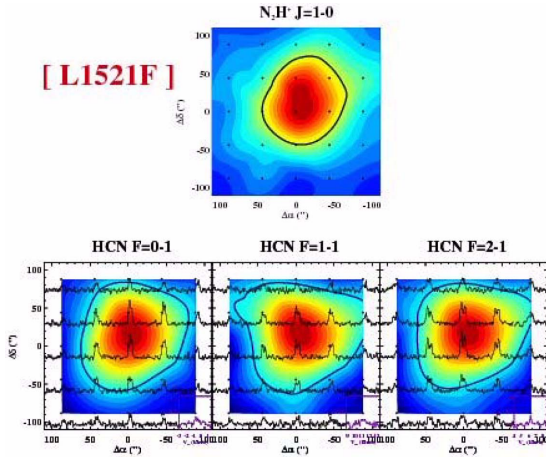


Fig. 2. Integrated intensity distributions of HCN(J=1-0) hyperfine lines and N₂H⁺(J=1-0).

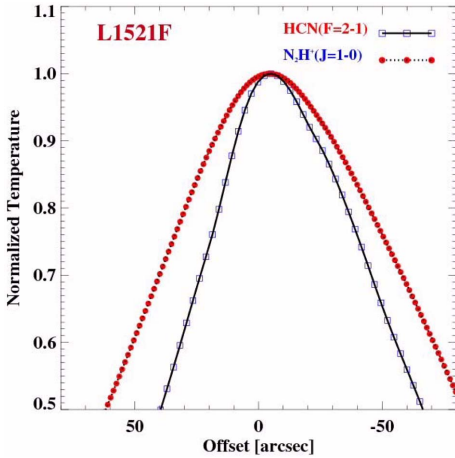


Fig. 3. The cross-scanned integrated intensity profile of HCN and N₂H⁺.

그러나, HCN의 적분 밝기 분포는 N₂H⁺의 분포보다 다소 넓게 퍼져있다. Table 2에서의 네 번째 행에 표시된 “R”은 신호 대 잡음비가 5 이상을 갖는 밝은 중심 부근에서의 선형 반경으로 정의된다. “R_{HCN}” 값은 “R_{CS}”와 비교했을 때 비슷하거나 또는 다소 작는데 이는 HCN 분자 분포의 공간적 넓이가 CS 분자 분포와 유사하거나 작은 것을 의미한다 (Lee et al., 2001)는 결과와 일치한다. 이것은 별이 없는 핵의 중심부 고밀도 영역을 해석하는데 분자 결핍의 현상에서 비교적 자유로우면서도 CS 분자와 비슷한 범위의 가스영역을 살펴볼 수 있다는 측면에서 HCN 분광선이 CS 보다 더 유용한 지시선임을 의미한다.

Table 3. Related parameters

Line	Hyperfine	Value
	F=0-1 (14)	6.46±0.04 km/s
	F=1-1 (14)	6.43±0.06 km/s
	F=2-1 (14)	6.31±0.05 km/s
	F=0-1 (14)	-0.15±0.12
	F=1-1 (14)	-0.31±0.18
	F=2-1 (14)	-0.71±0.19
		0.53±0.04 ⁽¹⁾
R _{HCN}		0.06 pc
R _{CS}		0.07 pc ⁽¹⁾

Note.- 1) from Lee et al. (2001)

δV HCN

분광선의 비대칭 양상은 식 (1)에서처럼 사용된 광학적 투과도가 깊은 분광선 N₂H⁺ 분광선의 속도와 상대적으로 얇은 HCN 분광선의 속도차이를 N₂H⁺의 선폭으로 나눈 양인 δV 값으로 정량화될 수 있다. Table 3은 코어의 각 미세 천이선들에 대한 값의 평균 <δV_{HCN(F=i-j)}>과 CS 분자선에 대한 이전 연구 결과 값(Lee et al., 2001)인 <dV_{CS}>와 비교한 것이다. 평균값은 <δV_{HCN(F=i-j)}>=ΣVⁱ_{HCN(F=i-j)}/N식으로 계산되었으며, N은 신호 대 잡음비가 5이상의 값을 갖는 분자선 개수를 의미한다.

δV의 도수분포표가 Fig. 4에 나타나 있다. 서로 다른 방향의 운동학적 요소가 청색 편향된 부분과 적색 편향된 부분으로 뚜렷하게 분리되어 보인다.

T_b/T_r distribution

HCN 분광선의 미세천이선들에서 나타난 공간적인 가스 운동의 특성을 파악하기 위하여 HCN 분광선 윤곽의 청색 성분의 최고 밝기(T_b)와 적색 성분의 최고 밝기(T_r)의 비를 계산하였다. 가스 쌍극류가 있는 지역의 보다 자세한 가스운동의 양상은 가스의 운동과 자세한 복사전달의 계산을 계산하는 이론적 모형의 연구를 통해 이루어질 수 있다. 예를 들어 Rawlings et al.(2004)는 가스쌍극류가 발생하는 지역에 대한 3차원의 복사전달 계산을 통하여 가스쌍극류의 분출 방향에 따른 관측에서 보여진 HCO⁺ 분자선의 청색 및 적색비대칭의 윤곽의 분포를 재현하여 가스쌍극류의 물리적인 조건을 밝힌 바 있다. 이러한 자세한 모형연구를 통한 가스분출류의 구체적인 연구가 궁극적 지향점이긴 하지만 이는 많은 복잡한 일을 원하는 것으로 다음의 연구로 남겨둔다. 본 연구에서는 다만 관측 가능한 물리량인 T_b/T_r의 공간적인

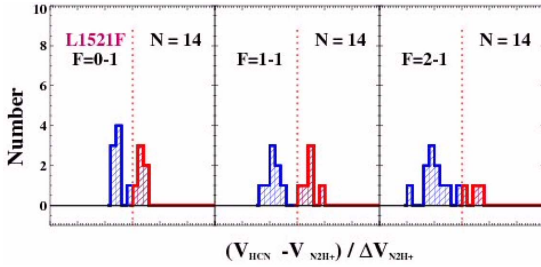


Fig. 4. Histogram of δV_{HCN} for L1521F.

분포를 살펴봄으로써 적외선 관측으로만 추측되는 가스쌍극류의 존재여부를 파악하는 것에 초점을 둔다. Rawlings et al.(2004)의 모형연구에 의하면 가스 쌍극류의 축이 관측자에게 수직을 이루면서 쌍극류가 발생되면 광학적 투과도가 얇은 분자선의 윤곽양상은 비록 자기흡수에 의한 두성분의 윤곽스펙트럼이 보이지만 청색과 적색의 성분의 크기가 모두 같은 형태의 윤곽스펙트럼이 보인다. 그러나 가스쌍극류의 축이 임의 각도로 관측자를 향하여 발생하면 우리에게 다가오는 쌍극류의 상 혹은 하층부 성분과, 멀어져가는 하 혹은 상층부 성분이 합쳐져 분자선이 쌍극류를 발생시키는 원시성의 임의의 축을 기준으로 한쪽은 청색비대칭으로, 다른 한쪽은 적색비대칭의 스펙트럼이 분포하는 양상을 보이게 된다(예, Rawling et al., 2004의 Fig. 6). 본 연구는 관측된 HCN 분자선이 이와 같은 분포를 보이는지 살펴봄으로써 L1521F-IRS의 적외선 영상에서 보여진 고깔모양의 영상이 가스 분출류의 존재에서 비롯된 것인지 살펴보고자 하는 것이다. Fig. 5는 L1521F의 HCN(J=1-

0) 천이선의 이러한 윤곽선 분포를 정량적으로 파악하기 위한 T_b/T_r 분포지도이다. 흥미롭게도 수축하는 고밀도 분자운 핵(예, L694-2)들의 경우에는 중심에 가까이 갈수록 T_b/T_r 의 값이 커지는 경향을 볼 수 있는 반면, L1521F의 경우 특히 HCN(J=1-0) F=1-1 천이선의 경우 적외선원의 위치를 기준으로 T_b/T_r 값이 동쪽방향에는 청색비대칭($T_b/T_r > 1$)이 서쪽에는 적색비대칭($T_b/T_r < 1$) 분광선이 존재하고 무엇보다도 흥미로운 것은 이들의 모양이 Bourke et al.(2006)에서 보여진 적외선 고깔모양과 잘 일치하는 모습을 보이고 있다는 것이다. 이러한 모습은 회전에 의한 운동으로도 해석할 수 있겠으나 적외선 파장에서 아기별이 중심부에 존재하고, HCN 분자선 윤곽의 T_b/T_r 분포지도가 적외선원의 고깔모양과 잘 일치하는 것으로 보아 본 관측은 L1521F-IRS에서 나오는 가스쌍극류의 존재를 입증하는 것으로 사료된다.

연구결과 및 논의

황소자리 분자운에 위치한 L1521F는 중심의 고밀도 상태와 화학적 특성에 대한 분광학적 연구 등을 통해 이 천체는 별 생성 초기의 중력적 불안정 상태인 “임계 단계” 근처에 놓여 있는 것으로 알려져 왔다(Crapsi et al., 2005). 그리고 Spitzer 적외선 우주 망원경의 관측 결과, L1521F-IRS로 명명된 극저광도 천체가 존재하는 것으로 예측된다고 보고되었다. 본 연구에서는 이 천체의 운동학적 성질을 연구하기 위해, 기존의 분자 지시선보다 밝기가 약하지만 고밀도 중심에서 심각한 결여 현상을 보이지 않는 HCN

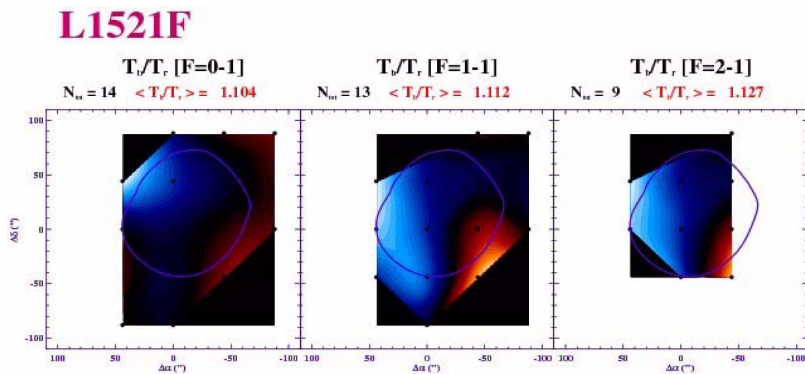


Fig. 5. The T_b/T_r distribution for each HCN hyperfine for L1521F-IRS. A half maximum contour of N_2H^+ intensity is superimposed in each panel. The regions with $T_b/T_r > 1$ are shown by the blue color and the region with $T_b/T_r < 1$ is in red color. In blue region, the brighter part indicates the higher, T_b/T_r , whereas the brighter part indicates the lower T_b/T_r , in red regions.

($J=1-0$) 분자선을 지시자로 선택하여 분광 관측한 결과를 분석하였다. 기존에는 L1521F-IRS 주변에 대한 CS 지도 관측에서 보이는 적색비대칭 현상을 주로 팽창 운동의 결과로 해석했으나 본 연구에서 수행된 L1521F-IRS에 대한 HCN 지도 관측결과는 이 천체를 기준으로 동서 방향으로 청색비대칭과 적색비대칭 윤곽의 대칭적인 보여주는 결과를 얻었다. 이는 Spitzer 관측의 영상결과에서 보이는 고갈모양의 성운의 모습을 설명할 수 있는 직접적인 운동학적 증거로서, 그 원인이 중심에서 원시성이 형성되는 진화 단계에서 보이는 중심에서 바깥으로의 쌍극 분출류 현상에서 기인한 것으로 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국연구재단의 학문후속세대지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: KRF-355-2007-1-C00021).

참고문헌

- Aikawa, Y., Herbst, E., Roberts, H., Caselli, P., 2005, Molecular Evolution in Collapsing Prestellar Cores. III. Contraction of a Bonnor-Ebert Sphere. *The Astrophysical Journal*, 620, 330-346.
- Beichman, C.A., Myers, P.C., Emerson, J.P., Harris, S., Mathieu, R., Benson, P.J., Jennings, R.E., 1986, Candidate solar-type protostars in nearby molecular cloud cores. *Astrophysical Journal*, 307, 337-349.
- Bourke, T.L., Myers, P.C., Evans, N.J., II, Dunham, M.M., Kauffmann, J., et al. 2006, The Spitzer c2d Survey of Nearby Dense Cores. II. Discovery of a Low-Luminosity Object in the "Evolved Starless Core" L1521F. *The Astrophysical Journal*, 649, L37-L40.
- Buisson, G., Desbats, L., Duvert, G., Forveille, T., Gras, R., Guilloteau, S., and Valiron, P., 1994, CLASS Manual, Grenoble: IRAM
- Crapsi, A., Caselli, P., Walmsley, C.M., Tafalla, M., Lee, C.W., Bourke, T.L., Myers, P.C., 2004, Observations of L1521F: A highly evolved starless core. *Astronomy and Astrophysics*, 420, 957-974.
- Crapsi, A., Caselli, P., Walmsley, C.M., Myers, P.C., Tafalla, M., Lee, C.W., and Bourke, T.L., 2005, Probing the Evolutionary Status of Starless Cores through N_2H^+ and N_2D^+ Observations. *The Astrophysical Journal*, 619, 379-406.
- Dalgarno, A. and Lepp, S., 1984, Deuterium fractionation mechanisms in interstellar clouds. *Astrophysical Journal*, 287, L47-L50.
- Jijina, J., Myers, P.C., and Adams, F.C., 1999, Dense Cores Mapped in Ammonia: A Database. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 125, 161-236.
- Lee, C.W. and Myers, P.C., 1999, A Catalog of Optically Selected Cores. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 123, 233-250.
- Lee, C.W., Myers, P.C., and Tafalla, M., 2001, A Survey for Infall Motions toward Starless Cores. II. CS (2-1) and N_2H^+ (1-0) Mapping Observations. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 136, 703-734.
- Lee, J.-E., Bergin, E.A., and Evans, N.J., II 2004, Evolution of Chemistry and Molecular Line Profiles during Protostellar Collapse. *The Astrophysical Journal*, 617, 360-383.
- Mardones, D., Myers, P.C., Tafalla, M., Wilner, D.J., Bachiller, R., and Garay, G., 1997, A Search for Infall Motions toward Nearby Young Stellar Objects. *Astrophysical Journal*, 489, 719.
- Millar, T.J., Bennett, A., and Herbst, E., 1989, Deuterium fractionation in dense interstellar clouds. *Astrophysical Journal*, 340, 906-920.
- Murakami, H., Baba, H., Barthel, P. et al., 2007, The Infrared Astronomical Mission AKARI, Publications of the Astronomical Society of Japan, 59, S369, S376.
- Onishi, T., Mizuno, A., and Fukui, Y., 1999, A Very Dense Low-Mass Molecular Condensation in Taurus: Evidence for the Moment of Protostellar Core Formation. Publications of the Astronomical Society of Japan, 51, 257-262.
- Oliveira, C.M., Hébrard, G., Howk, C.J., Kruk, J.W., Chayer, P., and Moos, H.W., 2003, Interstellar Deuterium, Nitrogen, and Oxygen Abundances toward GD 246, WD 2331-475, HZ 21, and Lanning 23: Results from the FUSE Mission. *The Astrophysical Journal*, 587, 235-255.
- Pilbratte, G.L., Riedinger, J.R., Passvogel, T. et al. 2010, Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy, *Astronomy and Astrophysics*, 518, L1-L6.
- Rawlings, J.M., Redman, M.P., Keto, E., and Williams, P.A., 2004, HCO^+ emission excess in bipolar outflows, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351, 1054-1062.
- Sohn, J., Lee, C.W., Park, Y.-S., Lee, H.M., and Myers, P.C., 2007, Probing Inward Motions in Starless Cores Using the HCN ($J=1-0$) Hyperfine Transitions: A Pointing Survey toward Central Regions, *The Astrophysical Journal*, 664, 928-941.
- Tafalla, M., Santiago-Garcia, J., Myers, P.C., Caselli, P., Walmsley, C.M., and Crapsi, A., 2006, On the internal structure of starless cores, II. A molecular survey of L498B and L517B. *Astronomy and Astrophysics*, 455,

- 577.
- Terebey, S., Fich, M., Noriega-Crespo, A., Padgett, D.L., Fukagawa, M., 2009, Far-Infrared Observations of the Very Low Luminosity Embedded Source L1521F-IRS in the Taurus Star-Forming Region. *The Astrophysical Journal*, 696, 1918-1930.
- Werner, M.W., Roellig, T.L., Low, F.J., Rieke, G.H., Rieke, M., 2004, The Spitzer Space Telescope Mission. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 154, 1-9.
- Young, C.H., Bourke, T.L., Young, K.E., Evans, N.J., II, Jørgensen, J.K., 2004, Submillimeter Common-User Bolometer Array Mapping of Spitzer c2d Small Clouds and Cores. *The Astronomical Journal*, 132, 1998-2013.

2010년 7월 28일 접수
2010년 8월 11일 수정원고 접수
2010년 8월 15일 채택