

졸업논문청구논문

한글 제목

Properties of Bipolar Outflows on the Evolutionary Stages of Protostars

이 선재 (李 善 在 Lee, Seon Jae)

16072

과학영재학교 경기과학고등학교

2019

한글 제목

Properties of Bipolar Outflows on the Evolutionary Stages of Protostars

[논문제출 전 체크리스트]

1. 이 논문은 내가 직접 연구하고 작성한 것이다.
2. 인용한 모든 자료(책, 논문, 인터넷자료 등)의 인용표시를 바르게 하였다.
3. 인용한 자료의 표현이나 내용을 왜곡하지 않았다.
4. 정확한 출처제시 없이 다른 사람의 글이나 아이디어를 가져오지 않았다.
5. 논문 작성 중 도표나 데이터를 조작(위조 혹은 변조)하지 않았다.
6. 다른 친구와 같은 내용의 논문을 제출하지 않았다.

Properties of Bipolar Outflows on the Evolutionary Stages of Protostars

Advisor : Teacher Park, Kie-Hyun

by

16072 Lee, Seon Jae

Gyeonggi Science High School for the gifted

A thesis submitted to the Gyeonggi Science High School in partial fulfillment of the requirements for the graduation. The study was conducted in accordance with Code of Research Ethics.*

2016. 11. 13.

Approved by
Teacher Park, Kie-Hyun
[Thesis Advisor]

*Declaration of Ethical Conduct in Research: I, as a graduate student of GSHS, hereby declare that I have not committed any acts that may damage the credibility of my research. These include, but are not limited to: falsification, thesis written by someone else, distortion of research findings or plagiarism. I affirm that my thesis contains honest conclusions based on my own careful research under the guidance of my thesis advisor.

한글 제목

이 선재

위 논문은 과학영재학교 경기과학고등학교 졸업논문으로
졸업논문심사위원회에서 심사 통과하였음.

2016년 11월 13일

심사위원장 박승원 (인)

심사위원 이주찬 (인)

심사위원 목진욱 (인)

Properties of Bipolar Outflows on the Evolutionary Stages of Protostars

Abstract

Stars are born when matter from interstellar molecular clouds fall to its center to increase the mass of the protostar. Bipolar outflows are formed to remove the excess angular momentum of falling matter. Intensities of outflows are known as to be in a close relationship with their bolometric luminosity and evolutionary stages. In this paper, data from Institute for Radio Astronomy in the Millimeter Range 30m Telescope (IRAM) and Taeduk Radio Astronomy Observatory (TRAO) are used. IRAM was used to map $^{12}COJ = 2 - 1$ over Orion A molecular cloud. TRAO was used to map $^{13}COJ = 1 - 0$ over the same region. Outflows were observed and measured by drawing contour maps and line profiles of red/blue shifted components. SEDs were drawn for each protostars that outflows were detected. Outflows could be detected better if the energy level of the emission line is higher. Also, the correlation between a protostar's

luminosity, envelope mass, and outflow force have been confirmed.

Contents

Abstract	i
Contents	iii
List of Tables	v
List of Figures	vi
1 Introduction	1
2 이론적 배경	2
2.1 복사전달 방정식	2
2.2 아인슈타인 계수와 관계식	4
2.3 일산화탄소(<i>CO</i>) 천이 선을 이용하여 기둥 밀도(column density) 구하기	7
2.4 방출류의 세기 측정	9
2.5 원시성의 진화 단계	10
2.6 방출류	11
2.7 관측 대상	11
2.7.1 Orion A Cloud	11
2.7.2 ρ Ophiuchus Cloud	12
3 관측 데이터	12
3.1 TRAO	12
3.2 IRAM	13
3.3 NRO	14
4 분석	15
4.1 identification	15
5 결과	16

5.1 Orion A Cloud	17
5.2 방출류의 세기	22
6 토의	22
6.1 기존 연구와 비교	22
6.2 두 영역의 광도에 따른 방출류의 세기	24
7 결론 및 제언	25
A 부록	26
References	27
References	29
감사의 글	30
연구활동	31

List of Tables

Table 1.	관측된 원시성들의 정보. 위는 Orion A Cloud에서 관측된 6개의 원시성, 아래는 ρ Ophiuchus Cloud에서 관측된 4개의 원시성이다.	16
Table 2.	관측된 원시성들의 방출류의 세기	22
Table A-1.	관측한 원시성들의 적색/청색편이 속도 구간	26

List of Figures

Figure 1.	전자와 광자의 상호작용	4
Figure 2.	원시성의 방출류가 나타나는 모습으로, 아래의 스펙트럼은 왼쪽부터 red lobe, center, blue lobe의 line이다. 방출류가 나타나는 곳에서 적색/ 청색편이가 일어나면서 방출선의 파장이 이동된다.	11
Figure 3.	Orion A Cloud ^{13}CO intergrated intensity map(좌) ρ Ophiuchus Cloud ^{13}CO intergrated intensity map(우)	13
Figure 4.	Orion A Cloud ^{12}CO intergrated intensity map(좌) ρ Ophiuchus Cloud ^{12}CO intergrated intensity map(우). 좌측의 그림은 Orion A Cloud에서 관측한 북쪽 영역의 원시성들의 위치와 이름을 표시하였다. 우측의 그 림은 ρ Ophiuchus Cloud의 L1688 영역에서 관측한 원시성들의 위치와 이름, 방출류의 방향을 표시하였다.	17
Figure 5.	FIR2의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level이 오차의 60배부터 140배까지 9단계, blue lobe는 100배부터 160배까지 7단계로 나누어서 그림을 그렸다.	18
Figure 6.	FIR3의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level이 오차의 40배부터 160배까지 7단계, blue lobe는 60배부터 180배까지 7단계로 나누어서 그림을 그렸다.	18
Figure 7.	FIR6b의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level이 오차의 45배부터 105배까지 7단계, blue lobe는 50배부터 110배까지 7단계로 나누어서 그림을 그렸다.	18

I. Introduction

별들은 분자운에서 중력 수축을 통해 태어난다. 별 탄생 초기 단계에서 어린 원시성(young stellar objects; YSOs)들은 아직 분자운 속에서 묻혀 있으며, 원시성 주변 성간 물질을 중력적으로 끌어들이며 원시성의 질량과 온도를 증가시킨다. 원시성으로 물질이 유입되는 과정에서 각운동량이 보존되기 때문에 별 주변에서는 물질이 매우 빠르게 물질이 회전하고, 물질이 더 이상 별로 들어가기 힘들어진다. 그러나 별 생성 과정에서 각운동량을 제트나 쌍극방출류(bipolar outflows)로 제거하기 때문에, 관측적으로 원시성에 유입되는 물질의 양과 비례하는 방출류가 발생한다. [1]

원시성에 유입되는 물질의 양과 원시성의 광도가 비례한다는 사실은 이미 알려져 있다. [2] 방출류의 세기(outflow force)는 원시성들이 Class 0에서 Class I으로 진화할수록 감소하고, 이것은 원시성이 성간 물질을 끌어당기는 정도가 줄어든다는 것을 알려준다.

별 탄생의 초기 단계는 두꺼운 외피로 둘러쌓여 있어서 중심 원시성으로의 물질 유입을 직접적으로 관측하기는 힘들다. 앞서 언급한 방출류에 대해 지금까지 연구된 특성은 원시성으로의 물질 유입에 대해 간접적인 연구를 가능하게 한다. 다양한 원시성에서 나오는 방출류에 대해서는 지금까지 많은 연구가 되어 있다.

본 연구에서는 Orion A Cloud와 ρ Ophichus Cloud 안에 있는 원시성들과 그 방출류를 관찰하려고 한다. Orion A Cloud은 Spitzer 망원경 [3] [4] 과 Herschel [5] 원시성 catalogue를 참고하여 방출류를 관측할 수 있는 원시성들을 선택한 후, NRO ^{12}CO 관측 데이터와 TRAO ^{13}CO , $C^{18}O$ 관측 데이터를 이용해서 기원 원시성들의 알려진 방출류를 분석하여 방출류의 세기와 복사 광도의 비례 관계를 다시 확인해보자 한다. 또한 복사 온도와 SED의 기울기를 통해 원시성의 진화단계를 확인하고, 방출류의 세기와의 관계를 찾아보려고 한다.

이 연구를 위해서는 우선 천문학 자료를 이해하기 위한 기초 지식이 필요하다. 그래서 2장 이론적 배경에서는 복사전달 방정식과 아인슈타인 계수와 관계식으로부터 설명을 시작

하여 기둥 밀도와 방출류의 세기를 구하는 식까지 나타내었다. 2장의 나머지 부분에서는 본 연구에서 관측하고자 하는 대상과 지금까지 받아들여지고 있는 원시성의 진화 단계와 방출류에 대해 정리하였다. 3장은 본 연구에서 사용한 관측 데이터에 대해 나타내었다. 4장은 분석으로 관측 데이터로부터 contour map을 그려 방출류를 검출하고 방출류의 세기를 측정하는 과정과 SED를 그린 과정을 정리하였다. 5장은 결과로 관측한 원시성들에 대한 정보와 방출류가 검출된 contour map과 line profile, SED를 나열하였다. 6장 토의는 알아낸 결과들을 기존 연구와 비교하여 다양한 변인들과 방출류의 세기와의 관계를 분석해보았다. 7장은 결론 및 제언으로 결과와 토의들로 얻어낸 결론과 추후 연구에 추가하면 좋을 점들을 정리하였다.

II. 이론적 배경

II.1 복사전달 방정식

멀리 떨어져 있는 천체로부터 오는 빛을 보면 그 천체에서 일어나는 현상을 알 수 있다. 빛은 천체 현상이 일어난 곳의 물질과 상호 작용하여 성질이 바뀌게 되는데 이를 기술하는 것이 '복사전달 방정식'이다.

빛, 즉 복사장을 기술하는 물리량 중 실험적으로 측정 가능하고 가장 기본적인 것으로는 플럭스가 있다. 플럭스 (Flux, F_v)는 단위 시간동안 단위 면적을 통과하는 특정 주파수의 빛의 에너지로 단위는 [$\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$]이다. 플럭스보다 염밀하게 복사장을 기술하기 위해 빛의 세기(Intensity, I_v)를 사용한다. 이는 주어진 방향에서 단위 입체각에서 들어오는 단위 면적당 단위 시간당 특정 주파수에서의 에너지이다. 빛의 세기의 단위는 [$\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$]이고, 플럭스와는 다르게 거리와 무관하다는 특징을 갖고 있다.

빛이 물질을 통과하여 지나갈 때 물질로부터 빛이 방출되어 빛의 세기가 강해지기도 하고 흡수되어 약해지기도 한다. 미소 길이 ds 를 지날 때 방출되는 특정 주파수에서의 빛의 세기를 $dI_v^+ = j_v ds$ 라고 하자. 흡수되는 빛의 세기를 $dI_v^- = \kappa_v I_v ds$ 라고 하자. j_v 는 방출 계수이고

κ_v 는 흡수 계수이다. 빛의 주파수에 따라서 Intensity와 흡수, 방출 정도가 달라지기 때문에 논의하는 대부분의 변수들이 모두 v 의 함수로 나타내어진다.

이것을 이용해 복사전달 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dI_v = j_v ds - \kappa_v I_v ds \quad (1)$$

$$\frac{dI_v}{ds} = j_v - \kappa_v I_v \quad (2)$$

성간 물질의 개수 밀도가 n/cm^3 라고 할 때, 각 입자가 빛을 흡수하는 유효 단면적을 σ_v 라고 하자. $\kappa_v = n\sigma_v$ 라는 관계가 성립한다.

광학적 깊이 τ_v (optical depth)를 다음과 같이 정의하자.

$$d\tau_v = -\kappa_v ds \quad (3)$$

여기에서 – 부호는 빛이 나아가는 방향과 반대로 관측자로부터 얼마나 떨어졌는지를 측정한다는 것을 의미한다.

Source function(S_v) 를 다음과 같이 정의하자.

$$S_v = \frac{j_v}{\kappa_v} \quad (4)$$

복사전달 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dI_v}{d\tau_v} = I_v - S_v \quad (5)$$

복사전달 방정식의 일반해를 구해보자.

(5) 의 양변에 $e^{-\tau_v}$ 를 곱하고, 우변의 첫번째 항을 좌변으로 옮기자.

$$\frac{dI_v}{d\tau_v} e^{-\tau_v} - I_v e^{-\tau_v} = -S_v e^{-\tau_v}$$

좌변을 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\frac{d(I_v e^{-\tau_v})}{d\tau_v} = -S_v e^{-\tau_v}$$

양변을 τ_v 에 대하여 적분하면 다음과 같이 정리할 수 있다. 여기서 I^0 는 입사하는 빛의 세기이다.

$$I_v = I_v^0 e^{-\tau_v} + \int_0^{\tau_v} S_v e^{-t} dt$$

S_v 가 성간운 전체에 대하여 일정하다면 다음과 같이 표현된다.

$$I_v = I_v^0 e^{-\tau_v} + S_v (1 - e^{-\tau_v}) \quad (6)$$

성간운이 optically thin한 상태라면 $e^{-\tau_v} \approx 1 - \tau_v$ 로 근사할 수 있고, (6)을 $I_v = I_v^0 + (S_v - I_v^0) \tau_v$ 로 쓸 수 있다. 여기서 $S > I^0$ 이면 방출선이고 $S < I^0$ 이면 흡수선이다.

II.2 아인슈타인 계수와 관계식

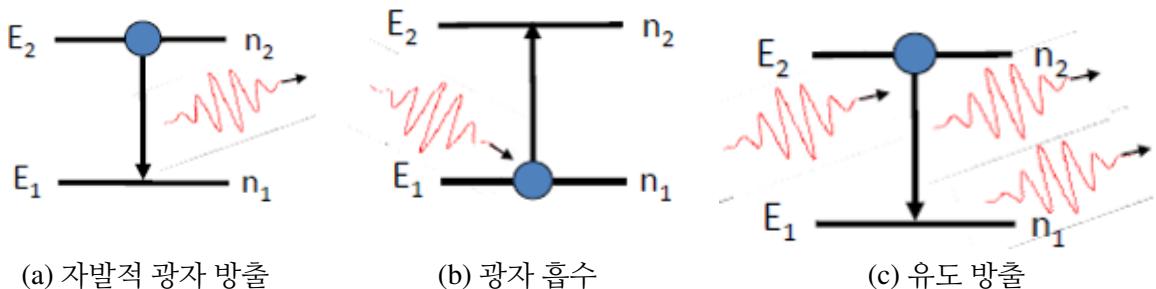


Figure 1. 전자와 광자의 상호작용

아인슈타인은 흡수계수와 방출계수를 미시적 관점에서 보았다. 성간운에서 빛이 흡수되거나 방출되는 방법에는 세 가지 방법이 있다. 첫번째 방법은 자발적 방출이다. 전자가 한 에너지 준위에서 다른 에너지 준위로 자발적으로 떨어지면서 광자를 방출하는 것이다. 레벨 2가 레벨 1보다 $h\nu_0$ 만큼 에너지가 높은 준위라고 할 때, 레벨 2에서 레벨 1으로 전자 천이가 벌어질 확률을 A_{21} 이라고 하자.

두 번째 방법은 전자가 광자를 흡수해서 레벨 1에서 레벨 2로 올라가는 것이다. 이럴 때 흡수선이 생긴다. 이상적으로는 방출선이나 흡수선이 생길 때 정확하게 하나의 주파수에서만

빛이 검출되어야 한다. 하지만 기체의 온도로 인하여 전자가 에너지를 가지게 되고, 불확정성 원리에 의해 전자의 속도가 정확하게 정해지지 않는다. 속도를 가지고 있는 입자에서 나온 빛은 도플러 효과에 의해 주파수가 바뀌게 된다. 이것을 line profile이라고 부르고, 특정 주파수 v_0 를 중심으로 넓게 퍼지게 된다. 이론적으로는 gaussian distribution을 따르게 되고, 이 함수를 $\phi(v)$ 라고 한다. $\int_0^\infty \phi(v)dv = 1$ 이 되도록 정의한다. 그리고 모든 방향에 서 들어오는 모든 빛의 세기의 평균값을 평균세기(mean intensity)라 하고 $J_v = \int I_v(\Omega)d\Omega$ 로 정의한다. $\bar{J} = \int_0^\infty J_v \phi(v)dv$ 로 정의하여 $B_{12}\bar{J}$ 를 레벨 2에서 레벨 1으로 전자 천이가 벌어질 확률이라고 하자.

또한 원자 주변에 복사장이 있으면 지나가는 광자에 의해 전자가 레벨 2에서 레벨 1으로 떨어지게 할 수 있다. 이 세 번째 방법은 유도 방출으로 일어날 확률을 $B_{21}\bar{J}$ 라고 하자.

열역학적 평형 상태에 있는 경우, 미시적 평형이 이루어져야 한다. 즉, 레벨 2에서 1으로 떨어지면서 광자를 방출하는 전자의 수와 광자를 흡수하며 레벨 1에서 2로 올라가는 전자의 수가 같아야 한다. n_1 을 레벨 1에 있는 전자의 밀도, n_2 를 레벨 2에 있는 전자의 밀도라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$n_1 B_{12}\bar{J} = n_2 A_{21} + n_2 B_{21}\bar{J} \quad (7)$$

이 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\bar{J} = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{n_1 B_{12}}{n_2 B_{21}} - 1} \quad (8)$$

열역학적 평형상태이므로 각 준위에 있는 전자의 밀도는 볼츠만 방정식을 따르고 ($n_2/n_1 = g_2/g_1 \exp(-hv/kT)$), 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\bar{J} = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{g_1 B_{12}}{g_2 B_{21}} e^{\frac{hv_0}{kT}} - 1} \quad (9)$$

열역학적 평형 상태에서 복사장은 흑체 복사를 하게 되므로 복사장의 세기는 플랑크 함수로

표현되고,

$$\bar{J} \approx B_v(v_0) = \frac{2hv_0^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hv_0}{kT}} - 1} \quad (10)$$

이라고 근사할 수 있다.

(9)과 (10)를 합치면 다음과 같은 식이 나온다.

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \quad (11)$$

$$A_{21} = B_{21} \frac{2hv^3}{c^2} \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 아인슈타인 관계식이라고 한다.

아인슈타인 관계식을 이용해서 j_v 와 흡수 계수 κ_v 를 아인슈타인 계수로 표현해 보자.

먼저 성간운에서 방출된 에너지는

$$dE(v) = j_v dV d\Omega dv dt \quad (13)$$

로 표현할 수 있다.

$A_{21}\phi(v)$ 이 단위 시간, 단위 주파수당 광자 방출이 일어날 확률이므로 단위 체적당 단위 시간과 단위 주파수에서 일어날 방출선의 개수는 $n_2 A_{21}\phi(v)$ 이다.

각 방출에서 hv_0 의 에너지는 모든 방향으로 동일하게 방출하므로 단위 입체각당 방출하는 에너지의 양은 4π 로 나눠야 하므로

$$dE(v) = n_2 A_{21}\phi(v) \frac{hv_0}{4\pi} dV d\Omega dv dt \quad (14)$$

$$j_v = \frac{hv_0}{4\pi} n_2 A_{21}\phi(v) \quad (15)$$

이다.

같은 방법으로 단위 시간당 일어날 흡수선의 개수는 $n_1 B_{12}\phi(v)$ 이고, 유도 방출선의 개수는 $n_2 B_{21}\phi(v)$ 이다. 따라서

$$\kappa_v = \frac{hv_0}{4\pi} \phi(v) (n_1 B_{12} - n_2 B_{21}) \quad (16)$$

이다. (15) 와 (16)를 이용하여 source function을 표현하면

$$S_v = \frac{n_2 A_{21}}{n_1 B_{12} - n_2 B_{21}} \quad (17)$$

이다.

II.3 일산화탄소(CO) 천이 선을 이용하여 기둥 밀도(column density) 구하기

복사전달 방정식을 이용하여 시선방향에 대해 누적된 물질의 양(기둥밀도, N)을 구할 수 있다. 별이 탄생하는 영역은 별에 비해 온도가 매우 낮으므로 광학에서는 관측이 힘들다. 대신에 이런 차가운 온도의 영역에서는 분자들의 회전 천이가 나타나고, 전파영역에서 관측이 가능하다. 이 영역에서는 수소 분자가 가장 많이 존재하지만, 수소 방출선은 관찰하기 어렵기 때문에 그 다음으로 많이 존재하는 분자 중 하나인 CO의 회전 천이 선을 이용하여 온도가 낮은 별 탄생 영역을 연구한다. 회전 천이 선은 각운동량 양자수 J 값이 변화할 때 나타나는데, $J=1-0$, $J=2-1$ 처럼 J 가 1만큼 차이나는 준위 사이에서만 천이가 일어난다. 높은 쪽 준위를 1, 낮은 쪽 준위를 0이라 하고, 두 준위가 $h\nu_0$ 만큼 에너지 차이가 있다고 하면, 식 (16)에 의해

$$\kappa_v = \frac{h\nu_0}{4\pi} (n_0 B_{01} - n_1 B_{10}) \phi(v) \quad (18)$$

볼츠만 방정식과 (11)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \kappa_v &= \frac{h\nu_0}{4\pi} (n_0 B_{01} - n_1 B_{10}) \phi(v) \\ &= \frac{h\nu_0}{4\pi} n_0 B_{01} \left(1 - \frac{n_1 B_{10}}{n_0 B_{01}}\right) \phi(v) \\ &= \frac{c^2}{8\pi v_0^2 g_0} n_0 A_{10} \left(1 - e^{-\frac{h\nu_0}{kT}}\right) \phi(v) \end{aligned} \quad (19)$$

주어진 시선방향에 대해 광학적 깊이가 $\tau_v = \int \kappa_v ds$ 이고, 간단하게 시선방향에 대해 물리적 조건(온도와 속도장)이 일정하다고 가정하면 0 준위에 있는 CO 분자의 기둥밀도는 $N_0 = \int n_0 ds$ 므로 (19)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_v = \frac{c^2}{8\pi v_0^2 g_0} N_0 A_{10} (1 - e^{-\frac{hv_0}{kT}}) \phi(v) \quad (20)$$

이 식을 v 에 대하여 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\int \tau_v dv = N_0 \frac{c^2}{8\pi v_0^2 g_0} A_{10} (1 - e^{-\frac{hv_0}{kT}}) \int \phi(v) dv$$

여기에서 $\phi(v)$ 의 정의에 따라 $\int_0^\infty \phi(v) dv = 1$ 이다. 위 식을 N_0 에 대하여 정리하면

$$N_0 = \frac{8\pi v_0^2}{c^2} \frac{g_0}{g_1} \frac{1}{A_{10} (1 - e^{-\frac{hv_0}{kT}})} \int \tau_v dv \quad (21)$$

전파 관측에서는 주파수보다는 주로 시선 속도에 대해 표현하므로 적분 변수를 속도로 표현하기 위해 v_0/c 를 곱해준다. 여기서 v_0 는 관측하는 천이 선의 주파수이다. 본 연구에서 관측하는 천이 선의 주파수와 A 값은 다음과 같다.

천이 선	주파수(GHz)	$A (\log_{10})$
$^{12}CO \ J = 1 - 0$	115.271	-7.142
$^{12}CO \ J = 2 - 1$	230.538	-6.160
$^{13}CO \ J = 1 - 0$	110.201	-7.198
$C^{18}O \ J = 1 - 0$	109.782	-7.203

$^{12}CO \ J = 1 - 0$ 에 대한 상수들을 대입하면

$$N_0 = 3.72 \times 10^6 \frac{g_0}{g_1} \frac{v^3}{A_{10}} \frac{1}{1 - e^{-\frac{4.8 \times 10^{-2} v_0}{T}}} \int \tau_v dv \quad (22)$$

여기서 구해야 하는 것은 시선방향에서의 ^{12}CO 의 기둥 밀도이다. 그것을 구하기 위해 볼츠만 방정식을 이용하자.

$$n_J = \frac{g_J}{Z} e^{-\frac{E_J}{kT}}$$

이다. CO 는 선형 문자이므로 축퇴도는 $g_J = 2J + 1$ 로 표현된다.

Z 는 분배함수이다. 원래 볼츠만 방정식에서는 Z 의 자리에 g_J 가 들어가지만 한 레벨의 문자 개수와 비교하는것이 아니라 모든 에너지 준위에서의 문자 개수와 비교하기 위해서 분배함수를 사용한다.

$$Z = \sum_0^{\infty} (2J+1) e^{-\frac{E_J}{kT}} \quad (23)$$

분배함수는 온도에 대한 함수로 10K일 때 약 3.78, 20K일 때 약 7.56이다. 따라서 다음과 같이 기둥밀도가 계산된다.

$$N_{total}^{12} = 8.59 \times 10^{-4} \frac{T \int \tau_v dV}{1 - e^{-\frac{5.5}{T}}} \quad (24)$$

$$N_{CO} = 2.5 \times 10^{15} \int T_{MB}^* dV [K km s^{-1} cm^{-2}] \quad (25)$$

^{12}CO 와 H_2 의 기둥 밀도의 비율이 10^{-4} 으로 일정하다고 가정하여 10^4 을 곱해주면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$N_{H_2} = 2.5 \times 10^{19} \int T_{MB}^* dV [K km s^{-1} cm^{-2}] \quad (26)$$

II.4 방출류의 세기 측정

H_2 의 기둥 밀도에 H_2 의 질량, 각지름(θ_B^2), 원시성까지의 거리(D)를 곱해주면 H_2 의 beam mass가 다음과같이 표현된다.

$$M_B = (\pi/4) D^2 \theta_B^2 N_{H_2} m_{H_2} \quad (27)$$

와 같은 식이 나온다. N_{H_2} 가 위치마다 다르므로 각 위치의 속도 v_{obs} 에 관한 식으로 M_B 를 고려해 momentum flux(\dot{P})를 구해주면 다음과 같다.

$$\dot{P} = \sum_{v_{obs}} \frac{M_B(v_{obs}) v_{obs} / \cos i}{D \theta_B / v_{obs} \tan i} \quad (28)$$

$\dot{P} = \frac{mv}{t}$ 인데 한 beam당 속도와 beam mass를 알고 있다. inclination을 i 라고 하면 실제 방출류의 속도는 $(v_{obs}/\cos i)$ 이다. t 는 방출류가 한 beam을 지나가는데 걸리는 시간으로 $t = D\theta_B/v_{obs} \tan i$ 이다.

본 연구에서는 [6] 의 여러 방출류의 세기 식 중에서 Annulus method을 이용해 방출류의 세기(F_{CO})를 구하였다. θ_r 은 중심으로부터 각 beam까지의 거리이다. Beam size와 pixel size가 다르기 때문에 겹치는 부분을 빼주기 위해서 momentum flux를 모두 더하지 않고 겹치는 면적에 해당하는 상수를 곱해준 후 더한다. 각 beam마다 momentum flux가 따로따로 계산되고 옆의 beam과 값의 차이가 별로 나지 않기 때문에 annulus의 안쪽 반지름을 0으로둔다.

$$F_{CO} = \sum_{annulus} \frac{2\pi\theta_r}{N_{pix}\theta_B} \dot{P} \quad (29)$$

$$= \sum_{\theta_1 < \theta_r < \theta_2} \frac{\pi^2\theta_r D}{2N_{pix}} \sum_{v_{obs}} N_{H_2}(v_{obs}) m_{H_2} v_{obs}^2 \frac{\sin i}{\cos^2 i} \quad (30)$$

II.5 원시성의 진화 단계

원시성은 진화된 정도에 따라 Stage 0, I, II, III로 분류하고, 관측된 결과를 이용해서 Class 0, I, II, III로 분류된다. 원시성의 온도가 70K 이하이면 Class 0로 판단된다. 온도가 70K과 650K 사이면 Class I, 650K와 2800K 사이일 때는 Class II로 분류한다. 온도가 그 이상이면 Class III으로 분류되고, 전주계열성이라고 부르기도 한다. 원시성의 Class를 구분하는 다른 방법이 있다. Spectral Energy Distribution(SED, λF_λ)의 기울기로 분류하기도 한다. 여기서 SED의 기울기는 $\alpha = \frac{d \log(\lambda F_\lambda)}{d \log(\lambda)}$ 로 정의한다. 원시성이 진화할수록 온도가 높아지고, 방출하는 최대 세기의 파장이 짧아지므로 α 가 음수가 된다. 보통 $2.2\mu m$ 와 $20\mu m$ 사이의 기울기를 이용해서 비교한다. Class 0 원시성들은 $20\mu m$ 에서 거의 보이지 않는다. Class I 원시성들은 $\alpha > 0.3$ 이다. Class II 원시성들은 $-0.3 > \alpha > -1.6$ 이다. Class III는 $\alpha < -1.6$ 이다. Class I 과 Class II 사이에 Flat Spectrum이라는 분류를 만들어서 사용하기도 한다.

II.6 방출류

차가운 분자운에서 중력적으로 수축이 일어난다. 수축이 더욱 심화될수록 강착원반이 생기고, 방출류가 나타난다. 수축이 진행되면서 방출류의 세기가 약해지고, 방출류의 각도가 옆으로 넓어지게 된다. 진화가 더 진행되면서 방출류가 사라진다. 이제부터 원시성이라고 부르지 않고 전주계열성이라고 부른다. 강착 원반이 응축되어 경우에 따라 행성계가 형성되기도 한다.

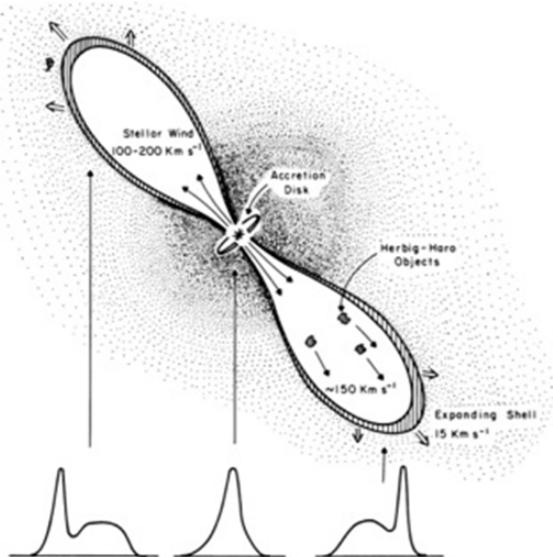


Figure 2. 원시성의 방출류가 나타나는 모습으로, 아래의 스펙트럼은 왼쪽부터 red lobe, center, blue lobe의 line이다. 방출류가 나타나는 곳에서 적색/청색편이가 일어나면서 방출선의 파장이 이동된다.

II.7 관측 대상

2.VII.1 Orion A Cloud

Orion Cloud에는 큰 molecular cloud들이 넓게 퍼져 있어 대부분의 별들은 $4M_{\odot}$ 이상의 질량과 1200만년 이하의 나이를 가지고 있다. 지구와의 거리는 약 450pc정도 떨어져 있다. [7] Orion Cloud는 크게 Orion A Cloud와 Orion B Cloud로 나누어지며 본 연구에서는 Orion A Cloud의 North 부근을 관측하였다. Orion A Cloud는 약 $29deg^2$ 의 범위를 덮고 있고, $1 \times$

$10^5 M_{\odot}$ 정도로 추정된다. OMC 1, 2, 3, OMC 1S, BN-KL Nebula 등의 hot core들이 존재한다. Orion Molecular Cloud는 약 6000만년 전에 속도가 큰 두개의 거대 분자운들이 충돌해서 생겼다고 설명되고 있다. 그래서 적위 방향으로 큰 속도변화를 보인다. Orion A Cloud의 북쪽인 OMC 2 근처에서는 $12 km/s$ 정도의 속도를 보이지만 남쪽 끝인 L1641 부근에서는 $5 km/s$ 정도의 시선속도를 가지고 있다. [8]

2.VII.2 ρ Ophiuchus Cloud

ρ Ophiuchus Cloud는 태양으로부터 가까운 별 형성 영역 중 하나로 지구로부터 약 145pc 만큼 떨어져 있다. 이는 몇 백만년 전에 생긴 성간운으로 면적은 $9.4 deg^2$ 이다. 크게 세개의 복합체로 나눌 수 있다. 주 성간운 L1688은 많은 양의 Class 0, I, II 그리고 3인 원시성들이 존재하는 5개의 부분들로 나눠지고, 나머지 두 개의 작은 성간운은 L1689N과 L1689S으로 불린다. 본 연구에서는 L1688을 관측하였다. Ophiuchus Cloud는 강한 초신성 폭발로 만들어졌을 것이라고 예측된다. 최근 관측을 통해 많은 Stage I 원시성이 발견되었다. 이것은 실질적인 모양을 이용해서 판별된 것이 아닌 L_{bol} 이나 SED를 이용해서 밝혀진 것이기 때문에 실질적으로 방출류 등의 특징들을 관찰해서 이 원시성이 Class I인지 판별해보는 것이 중요하다. [8]

III. 관측 데이터

III.1 TRAO

대덕 전파망원경(TRAO)은 SEQUIA라는 5X5 array 수신기를 최근 개발하여 관측을 시작하였다. 이 연구에서는 이정은 교수의 TRAO key science project 중 하나의 일환으로 2017년에 관측되었던 데이터를 사용하였다. 이중 ^{13}CO J=1-0와 $C^{18}O$ J=1-0 관측 데이터를 사용하였다. 대덕 전파망원경은 13.7m 주경을 가지고 이 두 천이 선에서 45 arcsec의 공간 분해능을 가진다. 그리고 $0.05 km/s$ 의 속도 분해능으로 모두 0.4K의 잡음온도의 감도로 관측이 되었

다. 이러한 TRAO로 Orion A Cloud, ρ Ophiuchus Cloud를 관측한 데이터를 사용하였다. ^{13}CO 와 $C^{18}O$ 는 ^{12}CO 에 비해 광학적으로 투명한 천이선으로 시선방향에 있는 상당부분의 물질을 추적할 수 있다. 그래서 별이 탄생하는 좁은 영역에서 매우 적은 물질로 된 방출류보다 대부분의 물질이 존재하는 외피를 추적하기에 용이하다. 본 연구에서는 TRAO 관측 데이터를 사용하여 외피의 운동학적 특성인 원시성의 속도와 선폭을 결정하고, 이를 바탕으로 다음에 기술하듯이 웹에서 받은 archive ^{12}CO 데이터를 사용하여 방출류의 특성을 연구하였다.

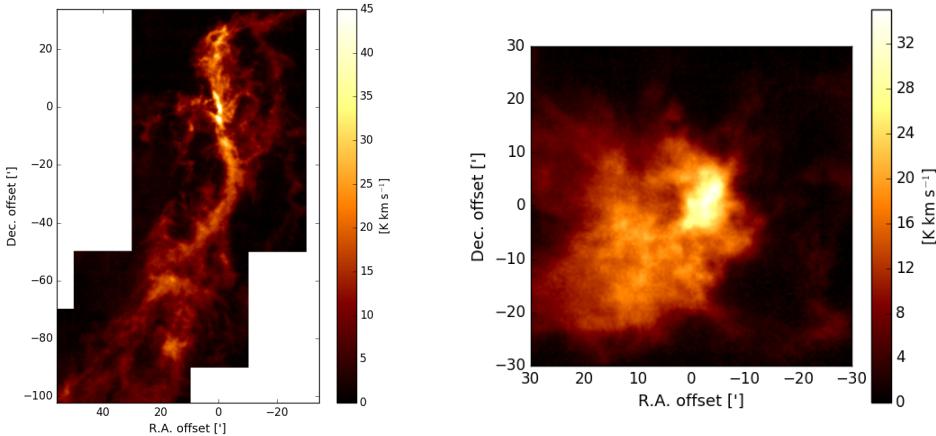


Figure 3. Orion A Cloud ^{13}CO intergrated intensity map(좌) ρ Ophiuchus Cloud ^{13}CO intergrated intensity map(우)

III.2 IRAM

스페인에 있는 IRAM 30m 망원경으로 2013년에 Orion A Cloud 영역을 관측한 ^{12}CO J=2-1 데이터를 사용하였다. 관측데이터는 11 arcsec의 공간 분해능을 가진다. 0.4 km/s의 속도 분해능으로 0.2K의 잡음온도의 감도로 관측이 되었다. [9]

III.3 NRO

일본에 있는 NRO 45m 망원경을 사용하여 2010년에 ρ Ophiuchus Cloud 영역을 관측한 ^{12}CO J=1-0 데이터를 사용하였다. 관측데이터는 12 arcsec의 공간 분해능을 가진다. 그리고 0.4 km/s의 속도 분해능으로 0.39K의 잡음온도의 감도로 관측이 되었다. [10]

IV. 분석

IV.1 identification

전파로 관측한 데이터는 시선방향에 대해 누적되고, 관찰자에 대한 상대 속도를 가진 물질의 분포를 알려준다. 원시성을 둘러싼 외피는 원시성에 대해 정적이거나 작은 속도로 수축하는 반면에 방출류는 원시성으로부터 두 극지방 방향으로 빠른 속도 성분을 가지고 멀어지므로 방출류의 축이 기울어져 있다면 관찰자를 향해 빠르게 접근하거나 멀어지는 것으로 보인다. 본 연구에서는 물질의 양이 적어 광학적 깊이가 깊기 때문에 외피를 추적하는 ^{13}CO , $C^{18}O$ 데이터를 이용해서 line을 살펴보았다. 그리고 이를 Gaussian fitting 하여 원시성의 속도 center velocity(v_{cen})을 구하고 외피의 속도 분산을 나타내는 반치전폭(FWHM: Full Width Half Maximum)을 구했다. 외피가 아닌 red lobe의 v_{out} 과 blue lobe의 v_{in} 즉 적분 구간의 시작점은 v_{cen} 로부터 FWHM만큼 떨어진 지점으로 지정하고, red lobe의 v_{in} 과 blue lobe의 v_{out} 은 각 lobe에 대한 오차(σ)이하로 intensity가 떨어지는 지점을 직접 line으로 보면서 정하여 외피가 아닌 적색/청색편이된 성분의 속도 범위를 구하였다. 본 연구에서 관찰한 원시성들에 대한 속도 범위는 부록에 추가하였다.

방출류는 분자의 속도가 외피의 속도와 차이가 생겨 도플러 효과에 의해 시선방향으로 외피 와는 다른 주파수를 나타내기 때문에 ^{12}CO 방출선은 물질의 양이 많아 광학적 깊이가 얕아 방출류의 정보를 가진다. 또한 외피와의 속도 차이가 큰 영역에서 optically thin하기 때문에 앞에서 구한 식들의 가정에 맞다. 따라서 ^{12}CO 데이터의 값을 앞에서 정한 구간에서 적분한 값을 사용하여 적색/청색편이된 성분을 관찰할 수 있는 contour map을 그렸다. 여기서 원시성을 중심으로 서로 반대 방향으로 방출류가 존재하는지 확인하였다. 여기서 보이는 red, blue lobe들이 관찰하고자 하는 원시성으로부터 나오는 방출류인지 확인하기 위해 ccontour map에서 나타나는 red, blue peak와 관찰하고자 하는 원시성의 위치 center에 대해 line을 그렸다. ^{12}CO 와 ^{13}CO , $C^{18}O$ 천이 선으로 red peak, blue peak, center의 line profile을 그려

관찰하는 원시성으로부터 나온 방출류가 맞는지 확인하였다. 그렇게 확인된 방출류에 대해 기둥 밀도와 방출류의 세기를 구해 분석하였다.

여기서 속도 성분 ($v + \Delta v$) 사이에 있는 물질의 양은 (25)와 같고, T_{MB} 는 관측온도 T_A 를 main beam efficiency로 나눠줬을 때의 온도이다. 그리고 방출류의 세기는 (30)으로 힘의 단위 [$M_\odot \text{km s}^{-1} \text{yr}^{-1}$]로 계산된다. [10]

SED는 <http://vizier.u-strasbg.fr/vizier/sed/>에서 얻은 데이터를 이용하여 그렸다. 관측하고자 하는 원시성으로부터 5 arcsec 위치에서 관측한 다양한 데이터들을 이용하여 SED를 그리고, 그 중 $2\mu\text{m}$ 에서 $20\mu\text{m}$ 사이에 있는 데이터들에 대해 선형 추세선을 그려 α 값을 구했다. 그리고 α 값을 이용하여 각 대상의 진화단계를 분류하고 알려져있는 classification과 비교해보았다.

V. 결과

Name	coordinates		L_{bol} [L_\odot]	T_{bol} [K]
	RA	Dec		
Orion A Cloud				
FIR2	05:35:24.3	-5:08:33.3	5.68	100.6
FIR3	05:35:27.5	-5:09:32.5	360.86	71.5
FIR6b	05:35:23.4	-5:12:03.2	21.93	54.1
MMS2	05:35:18.3	-05:00:34.8	20.11	186.3
MMS5	05:35:22.4	-05:01:14.1	15.81	42.4
MMS9	05:35:26.0	-05:05:42.4	8.91	38.1
ρ Ophiuchus Cloud				
Elias 32	16:27:28.6	-24:27:19.8	1.5	620
IRS 46	16:27:29.7	-24:39:16.0	0.19	280
VLA 1623	16:26:26.4	-24:24:30.9	1.0	35
BBRCG 24	16:27:09.0	-24:34:08.0	0.8	1600

Table 1. 관측된 원시성들의 정보. 위는 Orion A Cloud에서 관측된 6개의 원시성, 아래는 ρ Ophiuchus Cloud에서 관측된 4개의 원시성이다.

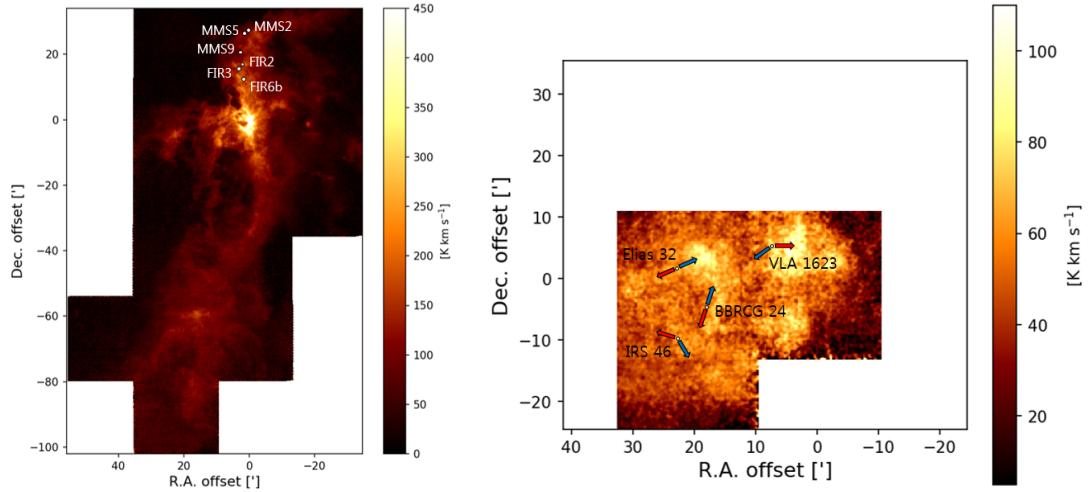


Figure 4. Orion A Cloud ^{12}CO intergrated intensity map(좌) ρ Ophiuchus Cloud ^{12}CO intergrated intensity map(우). 좌측의 그림은 Orion A Cloud에서 관측한 북쪽 영역의 원시성들의 위치와 이름을 표시하였다. 우측의 그림은 ρ Ophiuchus Cloud의 L1688 영역에서 관측한 원시성들의 위치와 이름, 방출류의 방향을 표시하였다.

본 연구에서는 Orion A Cloud의 북쪽 영역에 대해 Takahashi에서 ASTE를 이용한 ^{12}CO J=3-2 관측 데이터를 사용하여 발견한 10개의 원시성에 대해 IRAM ^{12}CO J=2-1 관측 데이터를 사용해서 6개의 원시성만 방출류를 검출할 수 있었다. [11] 그리고 ρ Ophiuchus Cloud의 L1688 영역에 대해서는 Marel에서 JCMT를 이용한 ^{12}CO J=3-2 관측 데이터를 사용하여 발견한 13개의 원시성에 대해 ^{12}CO J=1-0 관측 데이터를 사용한 본 연구에서는 오직 4개의 원시성만 방출류를 검출 할 수 있었다. [6]

이후에 나오는 Countour map에서 Orion A Cloud의 경우 $10'$ 가 실제 길이로는 1.25pc, ρ Ophiuchus Cloud에서는 $10'$ 가 실제 길이로는 0.40pc이다. 그리고 Line profile에서 검은선은 ^{12}CO 천이 선, 초록선은 ^{13}CO 천이 선, 갈색선은 $C^{18}O$ 천이 선의 line이며 파랑색과 빨강색 점선은 blue, red lobe의 속도 범위를 나타낸 것이다.

V.1 Orion A Cloud

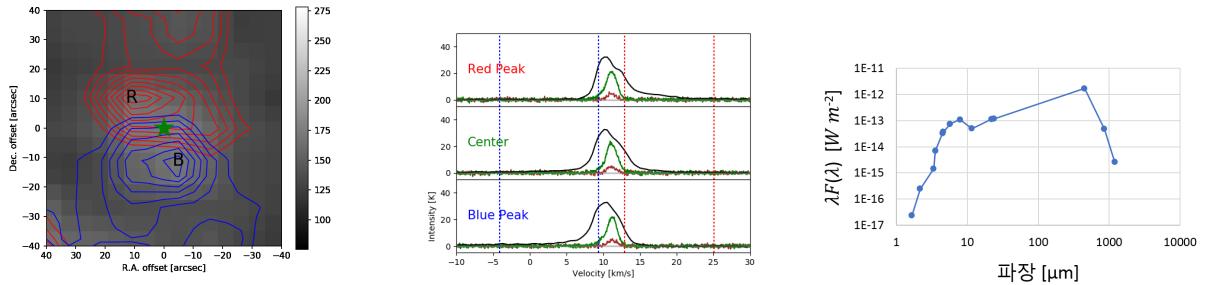


Figure 5. FIR2의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level 이 오차의 60배부터 140배까지 9단계, blue lobe는 100배부터 160배까지 7단계로 나누어서 그림을 그렸다.

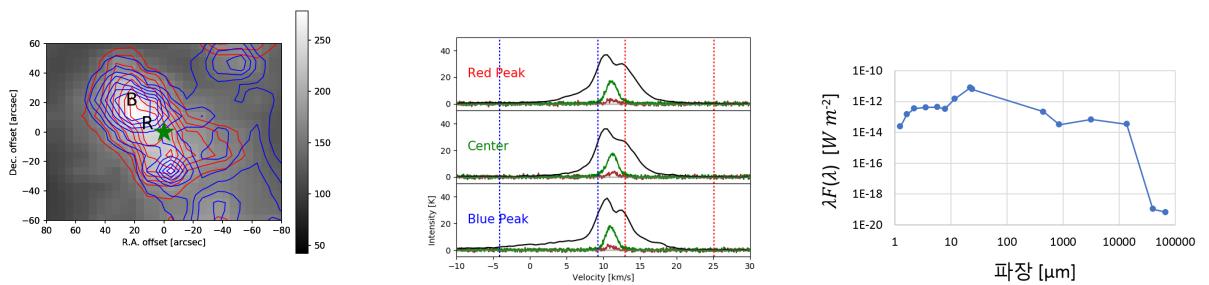


Figure 6. FIR3의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level 이 오차의 40배부터 160배까지 7단계, blue lobe는 60배부터 180배까지 7단계로 나누어서 그림을 그렸다.

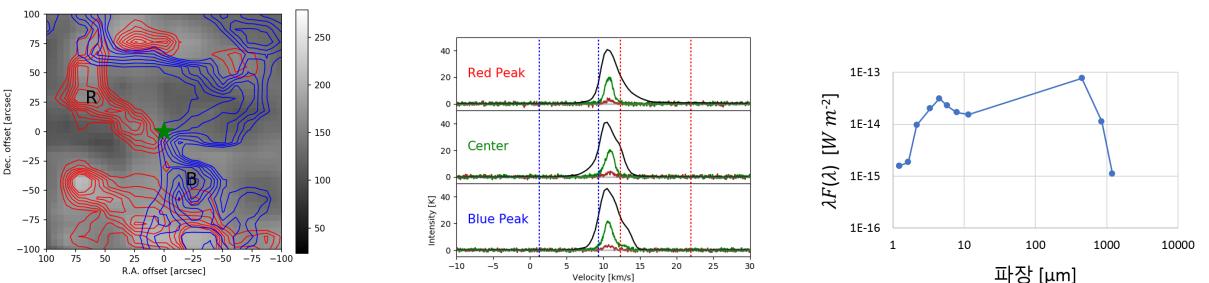


Figure 7. FIR6b의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level이 오차의 45배부터 105배까지 7단계, blue lobe는 50배부터 110배까지 7단계로 나누어서 그림을 그렸다.

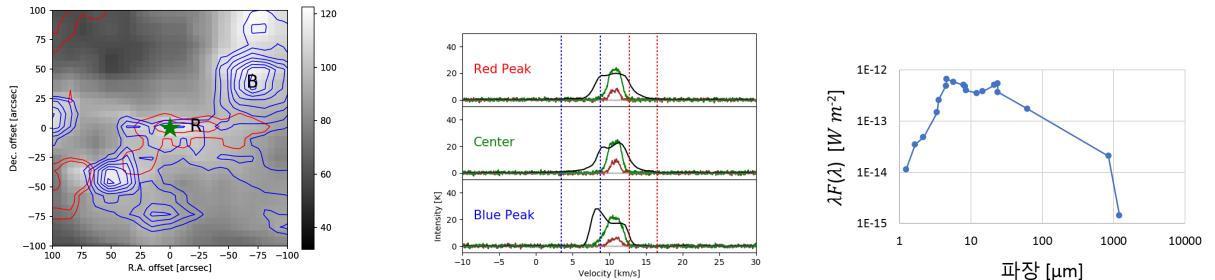


Figure 8. MMS2의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level이 오차의 30배부터 40배까지 2단계, blue lobe는 60배부터 130배까지 8단계로 나누어서 그림을 그렸다.

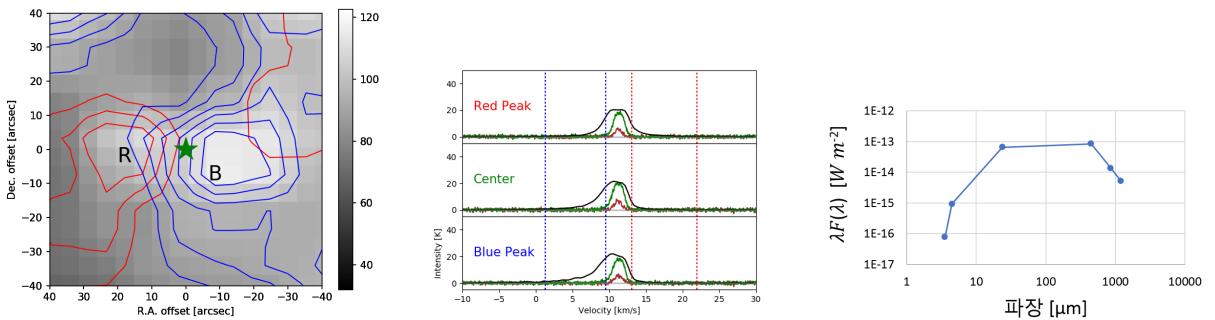


Figure 9. MMS5의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level이 오차의 20배부터 30배까지 2단계, blue lobe는 40배부터 90배까지 6단계로 나누어서 그림을 그렸다.

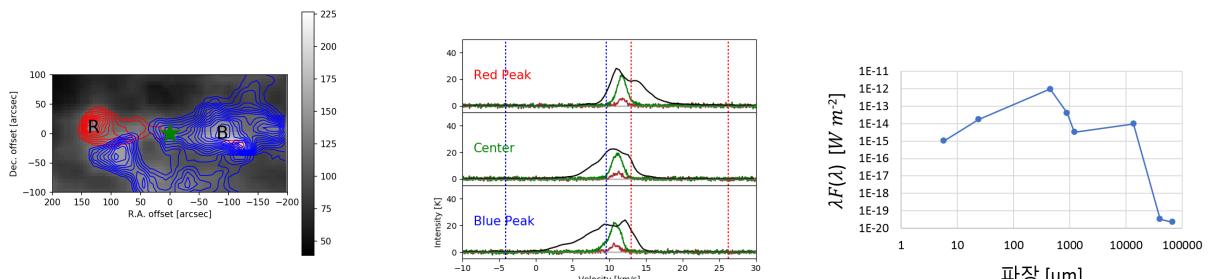


Figure 10. MMS9의 contour map(왼쪽)과 line profile(중간), SED(오른쪽)이다. Red lobe는 contour level이 오차의 50배부터 140배까지 10단계, blue lobe는 60배부터 200배까지 15단계로 나누어서 그림을 그렸다.

FIR2의 contour map을 살펴보면 N-S 방향으로 강한 방출류가 보인다. 방출류의 크기가 약 30 arcsec정도로 다른 방출류들보다 훨씬 작다. 본 연구의 결과가 Takahashi보다 약 3배 더 약하게 나타났다. Aso는 이 천체에 대하여 분석을 하지 않았다. SED의 기울기 α 는 3.12으로 Class I으로 분류하였다. Furlan에서도 Class I으로 분류하였다. [5]

FIR3의 contour map을 살펴보면 red lobe와 blue lobe의 중심이 거의 같은 위치에 있다. 방출류가 거의 시선방향과 나란하다는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과가 Takahashi보다 약 20배 더 약하게 나타났다. Takahashi는 red와 blue lobe를 각각 2개씩 관측했다. Aso는 이 천체에 대하여 분석을 하지 않았다. SED의 기울기 α 는 1.51으로 Class I으로 분류하였다. Furlan에서도 Class I으로 분류하였다. [5]

FIR6b의 contour map을 살펴보면 주변의 다른 별들로 인해서 방출류 구조 말고 다른 별들에서 나온 방출류로 인한 선들이 많이 보인다. NW-SE 방향으로 방출류가 관측이 된다. 본 연구의 결과가 Takahashi보다 약 4배 더 약하게 나타났다. Aso는 이 천체에 대하여 분석을 하지 않았다. SED의 기울기 α 는 1.20으로 Class I으로 분류하였다. Furlan에서는 Class 0으로 분류하였다. [5]

MMS2의 contour map을 살펴보면 red lobe와 blue lobe가 둘 다 별을 기준으로 동쪽에 있는 특이한 모양을 하고 있다. SW 방향에 보이는 방출류 구조는 MMS5로 인한 방출류이다. 아마 이것에 의해 방출류가 영향을 받아 치우쳐졌을 가능성이 있다. 본 연구의 결과가 Takahashi보다 약 4배 더 약하게 나타났다. J=1-0 을 사용한 Aso보다 약 1.8배 더 강하게 나타났다. Aso는 MMS2, MMS3, MMS4 세 개의 원시성을 하나의 원시성으로 간주하고 방출류를 계산했다. [15] SED의 기울기 α 는 1.23으로 Class I으로 분류하였다. Furlan에서는 Flat으로 분류하였다. [5]

MMS5의 contour map을 살펴보면 E-W 방향으로 방출류가 관측이 된다. blue lobe가 red lobe보다 더 강하게 관측된다. 본 연구의 결과가 Takahashi보다 약 4배 더 약하게 나타났다. Aso보다 약 10% 강하게 나타났다. [15] SED의 기울기 α 가 3.17로 Class I로 분류되어야 하

지만 $2.2\mu m$ 와 $20\mu m$ 사이의 관측 데이터의 값이 10^{-15} Wm^{-2} 정도로 매우 작게 나타났기 때문에 Class 0으로 분류하였다. Furlan에서는 Class I으로 분류하였다. [5]

MMS9의 contour map을 살펴보면 E-W 방향으로 강한 방출류가 나오는 것을 볼 수 있다. Takahashi(2008)에서는 red lobe를 두개 관측했는데, 본 연구의 관측 자료에서도 blue lobe의 중심 부근에서 작은 red lobe가 존재하는것을 알 수 있다. 그 세기는 main red lobe보다 10 배 정도 더 작은것으로 관측되었다. 본 연구의 결과가 Takahashi보다 약 20배 더 약하게 나타났다. Takahashi는 2개의 red lobe를 관측했다. Aso의 결과에 비해서는 약 6.7배 약하게 나타났다. [15] SED의 기울기 α 는 1.53으로 Class I으로 분류하였다. Furlan에서는 Class 0으로 분류하였다. [5]

각 원시성들의 line profile에 나타난 ^{13}CO 와 $C^{18}O$ 천이 선을 보면 red peak, center, blue peak 세 지점에서 모두 비슷한 개형이 나타났다. 따라서 각 원시성 주변의 red, blue lobe가 본 연구에서 관찰한 원시성으로부터 나온 방출류라는 것을 알 수 있다. 그리고 SED로부터 분류한 진화단계가 일부 원시성들은 Furlan의 결과와 다르게 나타났는데, Furlan은 각 원시성을 bolometric temperature을 기준으로 분류했기 때문에 본 연구에서 SED를 이용해서 구한 classification과 차이가 있을 수 있다.

V.2 방출류의 세기

Name	F_R	F_B [M_{\odot} km s ⁻¹ yr ⁻¹]	F_{CO}
Orion A Cloud			
FIR2	1.14E-05	3.28E-05	4.42E-05
FIR3	4.77E-03	7.43E-03	1.22E-04
FIR6b	1.13E-05	1.18E-05	2.31E-05
MMS2	1.14E-05	4.50E-05	5.64E-05
MMS5	5.80E-06	1.55E-05	2.13E-05
MMS9	3.67E-06	1.09E-05	1.46E-05
ρ Ophiuchus Cloud			
Elias 32	1.77E-06	1.01E-05	1.19E-05
IRS 46	4.56E-07	7.14E-07	1.17E-06
VLA 1623	2.42E-06	3.15E-06	5.57E-06
BBRCG 24	3.78E-07	8.19E-07	1.20E-06

Table 2. 관측된 원시성들의 방출류의 세기

표에서 F_R 와 F_B 는 각각 red, blue lobe의 방출류의 세기를 구한것이다.(30) F_{CO} 는 두 값을 더한 값으로 원시성이 방출해내는 총 방출류의 세기이다. 두 영역의 방출류를 비교해 보면 ρ Ophiuchus Cloud은 Orion A Cloud보다 질량이 작고 광도가 낮은 별들이 탄생하는 영역으로 방출류의 세기 또한 작게 나타났다.

VI. 토의

VI.1 기존 연구와 비교

Orion A Cloud를 ^{12}CO J=1-0, J=3-2 관측 데이터로 구한 방출류의 세기는 각각 Aso, Takahashi의 결과를 참고하였고, ρ Ophiuchus Cloud를 ^{12}CO J=3-2 관측 데이터로 구한 방출류의 세기는 Marel, Nakamura의 결과를 참고하였다. [15] [11] [6] [13] 두 영역에서 모두 MMS9

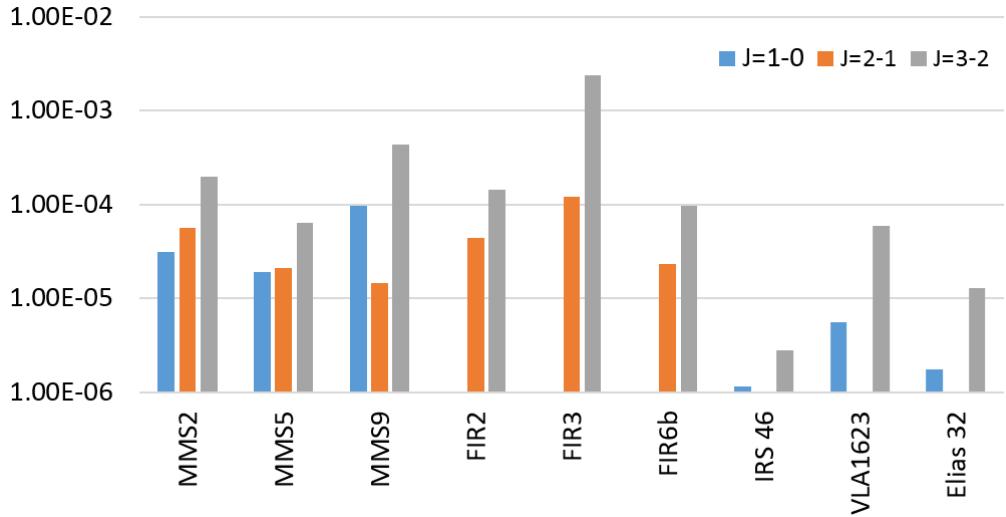


Figure 11. Orion A Cloud와 ρ Ophiuchus Cloud에서 관측한 원시성들에 대해 ^{12}CO $J=3-2$ 와 $J=2-1$, $J=1-0$ 방출선으로 구해진 방출류의 세기. Orion A Cloud의 경우 $J=2-1$, ρ Ophiuchus Cloud의 경우 $J=1-0$ 이 본 연구에서 구한 방출류의 세기이다.

을 제외한 원시성에서는 높은 천이 선일수록 방출류의 세기가 크게 나타났다.

또한 Orion A Cloud 북쪽 영역에 대해 Takahashi에서 ^{12}CO $J=3-2$ 관측 데이터를 사용하여 알려진 10개의 원시성 중 본 연구에서 사용한 ^{12}CO $J=2-1$ 관측 데이터로는 6개의 방출류만 찾을 수 있었다. 그리고 ρ Ophiuchus Cloud L1688에 대해서도 Marel에서 ^{12}CO $J=3-2$ 관측 데이터를 사용하여 발견한 13개의 원시성에 비해 본 연구에서는 ^{12}CO $J=1-0$ 관측 데이터를 사용한 결과 오직 4개의 원시성만 관측 가능하였다. [11] [6] 그리고 Orion A Cloud의 경우 본 연구에서 사용한 데이터의 beam size는 11 arcsec로 22 arcsec였던 Takahashi의 데이터보다 더 정밀하기 때문에 온도가 높은 더 안쪽 영역을 추적한 것으로 볼 수 있다. 따라서 높은 CO 천이 선일수록 상대적으로 보다 따뜻한 가스를 추적하고, 방출류를 더 잘 추적한다고 알려져 있는데, Orion A Cloud와 ρ Ophiuchus Cloud 영역에서 이를 확인 할 수 있었다. 하지만 ^{12}CO $J=2-1$, $J=1-0$ 천이 선 또한 ^{12}CO $J=3-2$ 천이 선과 비슷한 정도로 충분히 방출류를 추적할 수 있음을 알 수 있다.

VI.2 두 영역의 광도에 따른 방출류의 세기

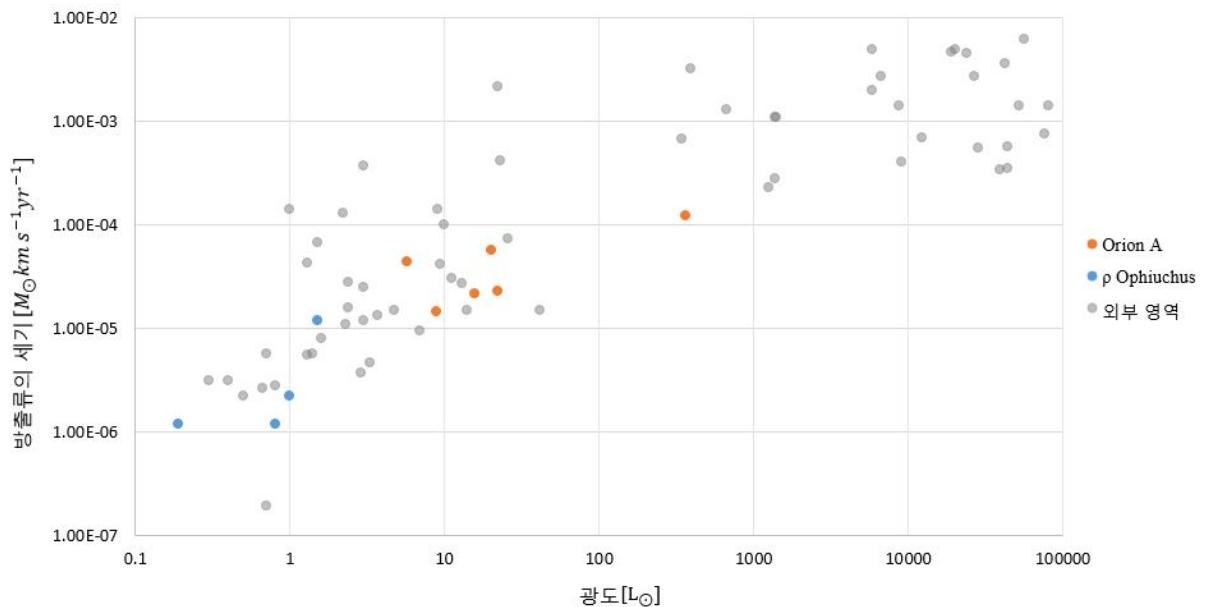


Figure 12. 광도-방출류의 세기 관계 그래프

이 그래프는 Takahashi, Bontemps, Hogerheijde, Zhang 논문에서 발견된 다양한 별 탄생 영역 안의 원시성들의 방출류의 세기와 본 연구에서 구한 Orion A Cloud와 ρ Ophiuchus Cloud 영역 안의 원시성들의 방출류의 세기를 가지고 광도와의 관계를 나타낸 것이다. [11] [1] [12] [16] 원시성의 광도는 Spitzer와 Herschel 망원경으로 관측된 값들을 사용하였다. [4] [3] [5] Orion A Cloud는 중간 정도 질량의 별들이 형성되는 지역이고 보다 큰 광도와 방출류의 세기를 보인다. ρ Ophiuchus Cloud는 낮은 질량의 별들이 형성되는 지역이고, Orion A Cloud 영역보다는 상대적으로 낮은 광도와 방출류의 세기를 보인다. 관찰한 두 지역의 원시성들에 대해 모두 방출류의 세기와 원시성의 광도가 비례한다는 사실을 재확인 할 수 있었다.

VII. 결론 및 제언

Orion A Cloud와 ρ Ophiuchus Cloud 두 영역에서 이전 연구와의 비교를 통해 ^{12}CO 의 높은 천이 선일수록, 좋은 공간 분해능의 관측일수록 방출류 검출이 더 잘 되고 방출류의 세기가 높게 나타나는 것을 통해 방출류가 잘 추적된다는 사실을 알 수 있었다. ^{12}CO 의 더 높은 준위의 분자선으로 관측한 방출류일수록 세기가 더 큰 이유는 다음과 같이 예상된다. 높은 준위의 분자선일수록 분자선의 온도가 더 작다. 방출류는 별 바로 바깥쪽의 외피의 물질을 끌고 나오기 때문에 온도가 비교적으로 높고, 더 높은 에너지의 분자선이 많이 방출된다. 따라서 방출류를 검출하기에는 온도가 높은 분자선인 높은 준위의 분자선일 수록 좋다. 또한 본 연구에서는 다양한 별 탄생 영역들의 원시성에 대한 방출류의 세기와 광도의 상관관계에 대해 Orion A Cloud와 ρ Ophiuchus Cloud 두 영역에서도 비슷한 관계를 가지는지 확인하였다. 방출류의 세기와 광도 사이의 상관관계가 나타나는 이유는 다음과 같이 예상된다. 진화가 덜 된 원시성일수록 광도가 크고 수축이 빠르게 일어난다. 수축이 많이 일어나기 때문에 각운동량의 변화가 커서 각운동량을 보존하기 위해 나타나는 방출류가 더 세게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 따라서 광도가 클수록 방출류의 세기가 높게 나타난다.

이 연구에서는 방출류의 방향 (inclination)이 알려져 있지 않은 경우에는 Takahashi와 마찬가지로 45도로 간주하고 계산을 진행했다. 따라서 각 원시성들에 대한 방출류의 방향을 알게 된다면 더 정확한 계산을 통해 방출류의 세기를 구할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 각 원시성의 진화단계에 따른 방출류의 세기를 살펴보려 했지만 표본의 수가 적어 광도에 따른 방출류의 세기를 통해 진화단계와의 관계성을 살펴보는데에 어려움이 있었다. Bontemps에서는 M_{env} 에 따른 방출류의 세기를 관찰해 진화단계에 따른 방출류의 세기와의 관계를 확인하였다. 따라서 본 연구도 추후에 더 많은 원시성들을 관찰하고, 각 원시성에 대한 M_{env} 값도 구하여 방출류의 세기와 비교하면 더 많은 결과를 도출 할 수 있을 것이다.

A. 부록

Name	Previous Work				Our Work			
	Blue Lobe		Red Lobe		Blue Lobe		Red Lobe	
	v_{out} [km/s]	v_{in} [km/s]	v_{out} [km/s]	v_{in} [km/s]	v_{out} [km/s]	v_{in} [km/s]	v_{out} [km/s]	v_{in} [km/s]
Orion A Cloud								
FIR2	-4.1	8.9	13.2	20.8	-4.1	9.4	12.9	20.8
FIR3	-4.1	8.9	13.2	25.1	-4.1	9.25	13.0	25.1
FIR6b	1.3	8.9	13.2	21.9	1.3	9.3	12.4	21.9
MMS2	3.5	8.9	13.2	16.5	3.5	8.8	12.8	16.5
MMS5	1.3	8.9	13.2	21.9	1.3	9.5	13.1	21.9
MMS9	-4.1	8.9	13.2	26.2	-4.1	9.6	13.0	26.2
ρ Ophiuchus Cloud								
Elias 32	-6.7	0.8	6.0	10.3	-6.7	1.2	5.3	10.3
IRS 46	-3.7	0.4	6.5	14.1	-1.2	1.1	5.9	8.4
VLA 1623	-3	10	6.5	13	-3	1.2	5.3	9
BBRCG 24	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	-5	1.2	5.7	9

Table A-1. 관측한 원시성들의 적색/청색편이 속도 구간

References

- [1] Bontemps, S., et al. "Evolution of outflow activity around low mass embedded young stellar objects." *Disks and Outflows Around Young Stars*. Springer Berlin Heidelberg, 1996. 270-275.
- [2] Kang, Seonmi, et al. "Outflow properties of DIGIT embedded sources." *한국천문학회보* 38.1 (2013): 51-51.
- [3] Megeath, S. T., et al. "The Spitzer Space Telescope survey of the Orion A and B molecular clouds. I. A census of dusty young stellar objects and a study of their mid-infrared variability." *The Astronomical Journal* 144.6 (2012): 192.
- [4] Dunham, Michael M., et al. "Young Stellar Objects in the Gould Belt." *The Astrophysical Journal Supplement Series* 220.1 (2015): 11.
- [5] Furlan, E., et al. "The Herschel Orion protostar survey: spectral energy distributions and fits using a grid of protostellar models." *The Astrophysical Journal Supplement Series* 224.1 (2016): 5.
- [6] van der Marel, Nienke, et al. "Outflow forces of low-mass embedded objects in Ophiuchus: a quantitative comparison of analysis methods." *Astronomy & Astrophysics* 556 (2013): A76.
- [7] Kounkel, Marina, et al. "THE GOULD'S BELT DISTANCES SURVEY (GOBELINS). II. DISTANCES AND STRUCTURE TOWARD THE ORION MOLECULAR CLOUDS." *The Astrophysical Journal* 834.2 (2017): 142.
- [8] Schulz, Norbert S. *The formation and early evolution of stars: from dust to stars and planets*. Springer Science & Business Media, 2012.

- [9] Berne, Olivier, Nuria Marcelino, and Jose Cernicharo. "IRAM 30 m Large Scale Survey of 12CO (2-1) and 13CO (2-1) Emission in the Orion Molecular Cloud." *The Astrophysical Journal* 795.1 (2014): 1
- [10] Hatchell, Jennifer, et al. "Star formation in Perseus-II. SEDs, classification, and lifetimes." *Astronomy & Astrophysics* 468.3 (2007): 1009-1024.
- [11] Takahashi, Satoko, et al. "Millimeter-and Submillimeter-Wave Observations of the OMC-2/3 Region. III. An Extensive Survey for Molecular Outflows." *The Astrophysical Journal* 688.1 (2008): 344.
- [12] Hogerheijde, Michiel R., et al. "Envelope structure on 700 AU scales and the molecular outflows of low-mass young stellar objects." *The Astrophysical Journal* 502.1 (1998): 315.
- [13] Nakamura, Fumitaka, et al. "Evidence For Cloud-Cloud Collision and Parsec-Scale Stellar Feedback Within the L1641-N Region." *The Astrophysical Journal* 746.1 (2012): 25.
- [14] Nakamura, Fumitaka, et al. "The Molecular Outflows in the ρ Ophiuchi Main Cloud: Implications For Turbulence Generation." *The Astrophysical Journal* 726.1 (2010): 46.
- [15] Aso, Yoshiyuki, et al. "Dense cores and molecular outflows in the OMC-2/3 region." *The Astrophysical Journal Supplement Series* 131.2 (2000): 465.
- [16] Zhang, Qizhou, et al. "Search for CO outflows toward a sample of 69 high-mass protostellar candidates. II. Outflow properties." *The Astrophysical Journal* 625.2 (2005): 864.
- [17] Ward-Thompson, D., et al. "The immediate environment of the Class 0 protostar VLA 1623, on scales of ∼ 50–100 au, observed at millimetre and centimetre wavelengths." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 415.3 (2011): 2812-2817.

- [18] Andre, Philippe, and Thierry Montmerle. "From T Tauri stars to protostars: Circumstellar material and young stellar objects in the rho Ophiuchi cloud." *The Astrophysical Journal* 420 (1994): 837-862.
- [19] Casanova, Sophie, et al. "ROSAT X-ray sources embedded in the rho Ophiuchi cloud core." *The Astrophysical Journal* 439 (1995): 752-770.

References

감사의 글

정말 감사합니다.

연 구 활 동

- 2011학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2012학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2013학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2014학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2015학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2016학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2017학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2018학년도 교내 R&E 발표대회에서 장려상 수상
- 2019년 노벨 물리학상 수상