

# 무거운 별 탄생 지역인 DR21(OH) 천체에 대한 중수소화된 메탄올(CH<sub>3</sub>OD) 관측연구 DEUTERATED METHANOL (CH<sub>3</sub>OD) IN THE HOT CORE OF THE MASSIVE STAR-FORMING REGION DR21 (OH)

민영철

한국천문연구원

YOUNG CHOL MINH

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

E-mail: [minh@kasi.re.kr](mailto:minh@kasi.re.kr)

(Received June 27, 2014; Accepted July 21, 2014)

## ABSTRACT

We have observed the deuterated methanol, CH<sub>3</sub>OD, toward the hot core MM1 in the massive star-forming region DR21 (OH) using the Submillimeter Array with a high angular resolution of about 1 arcsecond. The position of the hot core associated with the sub-core MM1a was confirmed to coincide with the continuum peak where an embedded young stellar object is located. The column density of CH<sub>3</sub>OD was found to be about  $(2 \pm 1) \times 10^{16}$  cm<sup>-2</sup> toward the MM1a center. The abundance ratio CH<sub>3</sub>OD/CH<sub>3</sub>OH was measured to be  $\sim 0.45$ , which is about the median value for low mass star-forming cores but much larger than those of the massive star-forming cores. The ratio is believed to change depending on, for example, the chemical condition, the temperature and the density of the source. This ratio may further depend on the evolutionary phase especially in the massive-star-forming cores. The sub-core MM1a is thought to be in the very early phase of star formation. This large abundance ratio found in this source indicates that even the massive star-forming cores, during a relatively short period in the very early stage of star formation, may also show a chemical state resulted from the cold and dense pre-collapsing phase, the enhanced deuteration as found in low mass star-forming cores.

*Key words:* ISM: clouds: interstellar molecules: astrochemistry: star formation

## 1. 서론

성간분자에 포함된 수소(H)가 중수소(D)로 대체된 중수소화(deuterated) 분자는 성간가스의 물리적 조건과 진화를 연구하는 아주 중요한 수단으로, 최근 점점 더 많은 중수소 포함 성간분자들이 발견되고 있다(참조: Roueff & Gerin, 2003; Peng et al., 2012). 태양 부근의 성간 가스에서 발견되는 D/H 함량비는 약  $2-3 \times 10^{-5}$ (예, Linsky et al., 2006) 정도이나 성간분자운에서 관측되는 값은 이보다 수 천 배 이상에 이르는 경우도 있듯이 매우 큰 중수소 분별화(deuterium fractionation) 결과를 보이고 있다. 이러한 중수소 포함 분자의 함량 증가는 얼음 상태인 성간먼지 표면에서의 화학반응에 의한 결과로 여겨진다(Tielens, 1983). 우주에서 처음으로 수소가 중수소로 대체된 분자가 관측된 것은 DCN 분자였다(Jefferts et al., 1973). 그 이후 성간에서 발견된 여러 중수소화된 성간

분자들 중에서 중수소화된 메탄올(CH<sub>3</sub>OD)은 1988년 오리온 BN/KL 천체에서 처음 관측되었다(Mauersberger et al., 1988). CH<sub>3</sub>OD는 무거운 별의 탄생과 밀접하게 연관되어 있는 핫-코어(hot-core)의 물리 화학적 특성을 이해하는데 매우 흥미로운 정보를 제공할 것으로 기대되나 아직 이와 관련된 연구가 많은 천체에서 이루어지고 있지 못하다.

수소가 포화된(saturated) 형태인 메탄올(CH<sub>3</sub>OH)은 핫-코어의 대표적 분자이다. 성간먼지 표면에서 수소가 중수소가 대체되는 반응에 대한 화학적 특성 연구와 함께, 여러 형태의 중수소화된 분자들 간의 상대적 함량비율을 설명하기 위한 분기 비율(branching ratio)도 중요한 연구주제이다(예, Charnley et al., 1997). 앞선 연구에서 CH<sub>3</sub>OD와 CH<sub>3</sub>OH의 함량비는, 작은 질량의 별이 탄생하고 있는 원시성에서는 약 0.1-2 정도로 높은 중수소화 비율을 보이거나(예, Parise et al., 2006), 오리온 BN/KL 천

체에 대한 최근의 관측에서는 그 비가 약  $1 \times 10^{-3}$  로 매우 낮아(Peng et al., 2012; Neill et al., 2013) 천체의 특성에 따라 큰 차이를 보여준다. 그러나 이들의 특성을 이해하기 위한 관측 자료는 아직 크게 부족하며 특히 기존의 대부분의 자료가 공간 분해능이 낮은 단일경 관측 자료로, 매우 복잡하고 작은 스케일의 다양한 특성의 물리적 상태가 집중되어 있는 성간분자운 코어, 특히 무거운 별이 탄생하는 코어에서의 중수소화에 대한 연구는 매우 흥미로우며 이제 시작단계에 있다.

이번 논문에서는 백조자리-X 북쪽 지역에 위치하고 있는 DR21(OH) 천체에 대하여 공간 분해능 약 1" 정도로 관측된 중수소화된 메탄올  $\text{CH}_3\text{OD}$  분자 천이선의 고분해능 관측 결과를 논의한다. 이 천체에는 여러 고밀도 분자운 덩어리들이 집중되어 있으며 새로운 별 탄생을 일어나고 있는 지역이다. 메탄올은 확실히 별-탄생 지역의 핫-코어에 존재하는 성간먼지의 맨틀에서 기화하고 있다고 여겨진다. 이 연구는 처음으로 이 천체에 대한  $\text{CH}_3\text{OD}$  분자의 함량을 측정하고, 거대 분자운의 복잡한 중심에 존재하는 이 천체의 활동적인 핫-코어의 위치를 확인한다.

DR21(OH) 천체는 태양으로부터 1.4 kpc 떨어진 거리에 있으며, 무거운 별이 활발히 생성되고 있는 많은 별 탄생 코어들이 존재하고 있다(Rygl et al., 2012; Schneider et al., 2006; Motte et al., 2007). 이 천체를 포함하고 있는 거대한 분자운은 지름이 100 pc를 넘으며 무게는  $4 \times 10^6 M_{\odot}$ 에 이르고, 우리 은하계에서 가장 무거운 OB 성협인 Cyg OB2와 연관되어 있다. 이 DR21(OH)는 별 탄생의 표식으로 여겨지는 OH,  $\text{H}_2\text{O}$ , 그리고  $\text{CH}_3\text{OH}$  등의 활동적 메이저 방출선들이 관측되고 있다(Norris et al., 1982; Argon et al., 2000; Genzel & Downes, 1977; Batrla & Menten, 1988; Plambeck & Menten, 1990; Kogan & Slysh, 1998; Kurtz et al., 2004; Araya et al., 2009; Fish et al., 2011). 이 천체에서 관측되는 여러 고밀도 가스 덩어리들은 서로 약 30" - 50" 떨어져 존재하고 있으며 이들의 질량은  $\sim 10^3 M_{\odot}$  정도, 분자 밀도( $n(\text{H}_2)$ )는  $\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 에 이른다(Mangum et al., 1991). 이 가스 덩어리들에서는 새로운 별들이 생성되거나 생성될 것으로 생각된다. 그 중에서도 가장 밝은 두 개의 코어인 MM1과 MM2는 서로 8" 정도 떨어져 있는 것이 1.4 mm 연속파 관측결과에서 확인되었다(Woody et al., 1981). 간섭계 관측은 이들 코어가 여러 개의 서브-코어로 이루어져 있음을 확인하였고(Araya et al., 2009; Zapata et al., 2012), 이 MM1의 서브-코어들은 새로이 MM1a, b, c로 이름 붙여졌다(Minh et al., 2012).

이들 서브-코어들은 가장 최근의 새로운 별 생성과 매우 밀접하게 연관되어 있는 것으로 보인다. 이러한 무

거운 별이 탄생하는 지역의 가까운 주변에서 핫-코어들은 주로 발견되고 있다. 원시성이 생성되면 이들에 의하여 주변의 고밀도 가스 덩어리가 가열되면서 내부에 존재하는 성간먼지 맨틀에서 무거운 복합분자들이 기화되는데 이 천이선들이 핫-코어를 가장 잘 특징짓는다. 이들 핫-코어들은 그 크기가 매우 작고( $10^2 \sim 10^1 \text{ pc}$ ), 밀도가 높으며( $\geq 10^7 \text{ H}_2 \text{ cm}^{-3}$ ), 온도는 비교적 높은 것으로 알려졌다( $\geq 100 \text{ K}$ ) (참조: Viti & Williams, 1999; Kurtz et al., 2000). 핫-코어들에 존재하는 성간먼지의 맨틀에는 분자운의 중력 수축과정에서 오랫동안 쌓여오거나 자체적인 화학 반응에 의하여 생성된 다양한 복합분자들, 특히 수소가 포화된(saturated) 분자들이 다량 존재한다. 이들이 기화되면서 고밀도 가스 상태의 화학반응이 촉진되기도 한다. 이러한 화학적 특징의 대표적인 모습을 보이는 분자들의 하나가 메탄올( $\text{CH}_3\text{OH}$ )이며 이 DR21(OH) 천체 또한 매우 풍부하고 다양한 메탄올 방출선을 보여주고 있다(Minh et al., 2012). 메탄올 OH기의 수소가 중수소로 대체된  $\text{CH}_3\text{OD}$ 는 핫-코어의 상태와 관련된 화학적 특성에 대한 매우 흥미로운 결과를 알려줄 것으로 생각된다.

이 논문의 2장에서는 전파간섭계 관측 수행에 대한 요약, 3장에서는  $\text{CH}_3\text{OD}$ 의 관측결과를, 그리고 4장에서는 결과에 대한 논의가 포함되었다. 마지막으로 5장에서 이 논문을 요약한다.

## 2. 관측

관측한 중수소화된 메탄올( $\text{CH}_3\text{OD}$ )의 천이선은 5(1,4) - 4(2,2) E 선으로 주파수는 216.945559 GHz이다. 이 천이선을 DR21(OH) 천체에 대하여 (서브-)밀리미터파 전파간섭계 어레이인 SMA(Submillimeter Array\*, Ho et al., 2004)로 2006년 5월 23일에 관측하였다. 이 관측은 DR21(OH) 천체의 고밀도 핫-코어에 대한 다양한 복합성간분자 연구를 위한 관측과 함께 이루어졌다(Minh et al., 2012). SMA 간섭계의 주 안테나 시야는 230 GHz에서 56"이며, 8개의 안테나가 확장 배열(extended configuration)로 관측된 합성 빔 크기는 1.0" x 0.9" ( $\text{PA} = -74^\circ$ )였다. 사용된 헤테로다인 SIS 수신기의 시스템 잡음온도는 120 - 240 K이었다. RF 밴드대역은 케이사 3C454.3 천체를 사용하여 보정하였고, 전파세기 보정은 해양성 관측으로 수행하였다. 이 전파어레이의 위상 중심의 좌표는  $(\text{R.A., Dec.})_{\text{J2000}} = (20^{\text{h}} 38^{\text{m}} 36.4^{\text{s}}, 40^\circ 37' 28.0'')$ 이다. 연속파 세기는 방출선이 없는 채널을 선택하여 총 대역폭  $\sim 3.8 \text{ GHz}$ 를 적분하여 구하였으며 RMS 잡은 수준은 약 1 mJy/beam이었다. 기계적 분광 분해능은 0.8125 MHz이며 채널당 잡은 수준은 약 30 -

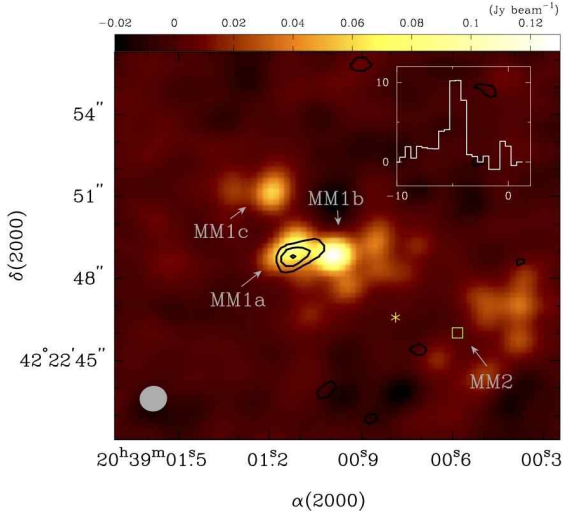


Figure 1. Total integrated intensity map of the CH<sub>3</sub>OD 5(1,4) - 4(2,2) E transition (black contours, 10, 15, and 20 K km<sup>-1</sup> levels). The background false color image is the 230 GHz continuum map and its scale is shown on top of this figure. The inset on the upper right is the observed spectrum toward MM1a. Its x-axis is velocity (km s<sup>-1</sup>), and its y-axis is flux (K). The ellipse in the lower left corner shows the synthesized beam of this observation (1.0'' x 0.9'', PA = -74°). The asterisk is the H<sub>2</sub>O maser position and the sub-cores are indicated (Minh et al., 2012, Woody et al., 1989).

40 mJy/beam이다. 자료 분석은 MIRIAD 소프트웨어 아래서 MIR/IDL을 이용하여 처리하였다.

### 3. 결과

Figure 1은 서브-코어 MM1a 중심에서 관측된 CH<sub>3</sub>OD 천이선의 스펙트럼 모습과 관측된 천이선의 총 속도 적분 강도 등고선 지도이다. 관측된 선의 파라미터들은 Table 1에 요약되어 있다. 이 그림의 배경 지도에는 230 GHz 연속파의 방출 분포로 앞서 확인된 세 개의 서브-코어 MM1a, b, c가 표시되어 있다(Minh et al., 2012). MM1a와 b 서브-코어의 가스덩어리는 매우 비슷한 크기와 질량을 가지는 것으로 보이는데(연속파 방출 대상: 크기 ~ 1'', 질량 ~ 0.5 M<sub>⊙</sub>) 이들의 화학적 특징은 서로 약간 다른 것으로 나타나며 아마도 진화 단계의 차이에서 비롯된 것으로 보인다.

Table 2는 이번 관측에서 구한 CH<sub>3</sub>OD의 함량과 앞서 관측된 CH<sub>3</sub>OH의 함량 비이다(Minh et al., 2012). 구한 함량은 관측된 합성빔 크기 안에서 평균화된 값이다. 두 분자의 함량 계산은 광학적 깊이가 작다고 가정하고 구하였으며 CH<sub>3</sub>OH 함량의 경우는 보다 자세한 설명이 앞선 논문에 논의되어 있다(Minh et al., 2012). 사용된 회

Table 1. Spectrum parameters observed toward MM1a

T <sub>peak</sub> <sup>a</sup> [K]	v <sub>peak</sub> <sup>a</sup> [km s <sup>-1</sup> ]	Δv <sub>HP</sub> <sup>a</sup> [km s <sup>-1</sup> ]	Flux [K km s <sup>-1</sup> ]	RMS(1σ) [K]
10.7	-4.7	1.7	21.2	1.5

<sup>a</sup>Gaussian fit values.

Table 2. Abundances of CH<sub>3</sub>OD and CH<sub>3</sub>OH

T <sub>rot</sub> [K]	N <sub>col</sub> (CH <sub>3</sub> OD) [cm <sup>-3</sup> ]	N <sub>col</sub> (CH <sub>3</sub> OH) <sup>a</sup> [cm <sup>-3</sup> ]	CH <sub>3</sub> OD CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> OD H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH H <sub>2</sub>
50	7.6(15)	1.7(16)	0.44	0.9(-8)	2.1(-8)
100	1.3(16)	2.8(16)	0.45	1.5(-8)	3.3(-8)
150	1.9(16)	4.2(16)	0.45	2.3(-8)	5.1(-8)
200	2.7(16)	5.9(16)	0.45	3.2(-8)	7.2(-8)

x(y) means x × 10<sup>y</sup>.

<sup>a</sup> CH<sub>3</sub>OH 5(1,4)-4(2,2) E transition (frequency: 216.945559 GHz) was used.

전 천이 온도(T<sub>rot</sub>)는, 하나의 천이선만 관측되었기 때문에, 몇 가지 대표적 값을 가정하고 구하였다. 이 표에서 보듯이 회전천이 온도에 의한 결과의 차이는 그렇게 크지 않다. 그것은 분자의 천이 레벨 점유 비율과 전체 분배함수(partition function)의 값이 온도 변화에 어느 정도 같이 변하기 때문이다. 그러나 보다 정확한 분자량을 추정하기 위해서는 이 분자의 여러 천이선의 관측을 통하여 여기(excitation) 상태를 확인하는 것이 필요하다. 그리고 광학적 깊이가 작다고 가정하여 구하였기 때문에 이 분자량은 하한값(lower limit)이라고 여겨야 될 것이다.

MM1a의 경우 메탄올의 회전 천이 강도 도표를 보면 최소한 두 가지 온도 성분으로 이루어져있음이 밝혀졌다(Minh et al., 2012). 그 중에서 높은 온도 성분은 약 200 K 정도로 여겨진다. 관측 값의 오차에서 가장 큰 부분을 차지하는 요인은 관측 잡음 오차보다는, 적용한 회전천이 온도의 범위에서 비롯된다는 점을 감안하면, 여기 표에서 표시한 정도인 약 3배 정도 이내의 불확실성을 갖는다고 볼 수 있다. 이 천체에서 CH<sub>3</sub>OD는 주로 MM1a 코어의 위치에 존재하며, CH<sub>3</sub>OD의 함량이 약 (2 ± 1) × 10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup>가 됨을 처음으로 구하였다. 그리고 CH<sub>3</sub>OD와 CH<sub>3</sub>OH 상호 함량비는 약 0.45로 측정되었다. 전체 수소(H<sub>2</sub>)에 대한 분자의 상대적 함량 비에서 가장 큰 오차를 일으키는 것은 H<sub>2</sub> 함량을 어떻게 구하는가이다. 여기서는 연속파 강도를 사용하여 각각의 서브-코어들에 대하여 앞서 구한 값을 사용하였다(Minh et al.,

2012). Table 2에서 보듯이  $\text{CH}_3\text{OD}$ 와  $\text{CH}_3\text{OH}$ 의 전체 수소 함량에 대한 비는 두 분자 모두 약  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  정도임을 밝혔다.

#### 4. 논의

관측된  $\text{CH}_3\text{OD}$ 의 방출선 세기의 피크 위치는 (RA, Dec.)<sub>J2000</sub> = (20<sup>h</sup> 39<sup>m</sup> 01.13<sup>s</sup>, +42° 22' 48.79")으로 연속 파로 관측된 MM1a의 세기 중심과 거의 일치한다. 앞선 연구에서 이 천체에서 가장 최근에 생성된 별이 존재하는 곳은 MM1a이며 이와 연관된 핫-코어가 존재하는 위치도 MM1a 근처로 생각되었다(Minh et al., 2012). 그러나 앞서 관측된 성간분자들의 여러 천이선들의 관측 결과는 그 천이선의 특성이나 여기 상태에 따라 MM1a와 MM1b 서브-코어 걸쳐 퍼져있어 구체적으로 핫-코어의 위치를 확신하기는 어려웠다. 이  $\text{CH}_3\text{OD}$ 의 결과는 가장 활동적인 핫-코어의 위치가 MM1a 코어와 일치한다는 것을 확실하게 보여준다고 생각된다. 전반적인  $\text{CH}_3\text{OD}$  방출 세기의 분포는 MM1a와 MM1b의 중간에 걸쳐, 그러나 MM1a에 치우쳐, 타원형으로 분포하는데 이 두 서브-코어에서 가열된 고밀도 가스 분포를 보여 준다. 두 서브-코어를 비교하면 MM1b 보다 MM1a가 대략  $10^4$  년 정도 늦은 것으로 추정되는데(Minh et al., 2012), 그렇다면 MM1b에서는 앞서 생성된 별이 이미 주변 가스구름을 와해시키기 시작한 것으로 보인다. 그래서 MM1b 주변의 고밀도 덩어리들에서는 포함되어있는 성간먼지 맨틀에서 이미 기화된 메탄올과 같은 복합 분자들은 가스 상태에서 이미 분해되거나 다른 성간분자로 전환되었을 것으로 추정할 수 있다. 하지만 현재 메탄올이 기화되고 있는 MM1a 코어에서는 중심에서 생성되고 있는 새로운 별이 아직 주변 고밀도 가스덩어리들에 둘러싸인 상태의 매우 초기 단계임을 알려 준다.

메탄올은 수소가 완전히 포화된 상태의 복합 분자로 다량의 얼음 형태로 맨틀에 존재하는 것이 흡수선 관측으로 확인되었으며(예, Boogert et al., 2004), 얼음 표면에서 CO 분자에 수소가 덧붙여지는 반응과정의 마지막 단계가 메탄올로 생각되고 있다. 가스 상태에 존재하는 메탄올은 성간먼지가 가열되면서 맨틀에서 기화된 것으로 여겨진다. 중수소가 대체된 메탄올의 생성은 크게 두 가지로 생각되고 있다. 하나는 맨틀에 있는 얼음 형태의 CO 분자에 수소가 계속 첨가되는 반응에 의한 것이고(Charnley et al., 1997) 또 다른 한 가지는 얼음 맨틀에 있는 CO, 메탄, 물 분자가 별빛에 의한 화학반응으로 광분해되면서 생성되는 것이다(예: Nagaoka et al., 2005; Hudson & Moore, 1999; Wada et al., 2006). 이 과정은 여러 복잡한 과정으로 이루어져 있고, 아직 충분히 이해

되고 있지 않으며 많은 논란이 이어지고 있다(예, Rodgers & Charnley, 2002). 그러나 대체적으로 각각의 주변 상황에 따른 화학적 성분구성, 온도 혹은 가스밀도 등에 따라 다르게 진행될 것으로 추측되고 있다. 앞으로의 많은 관측 결과, 특히 고분해능 관측결과가 매우 중요한 자료를 제공할 것이다.

이번 결과에서 추정된  $\text{CH}_3\text{OD}/\text{CH}_3\text{OH}$  함량비는 약 0.45(Table 2)이다. 이 값은 낮은 질량의 별이 생성되는 원시성에서 구한 값 범위에서 중간쯤에 해당되며 오리온 BN/KL에서의 값보다는 매우 큰 값이다(참조: 1장). 우선 중수소화된 분자의 상대적 함량비가 크다는 것은 성간분자운의 진화에서 차가운 온도 상태 아래서 진행된 사전-수축(pre-collapse) 단계에 있는 분자운의 성간먼지 맨틀에서 효과적으로 진행되는 중수소화의 과정을 반영하고 있다. 따라서 이 DR21(OH)의 진화 상태가 아직 별 탄생 사전 단계의 수축 과정 상황이 크게 변하지 않은 매우 초기 단계임을 간접적으로 추정할 수 있으며, 이것은 무거운 별 형성의 초기 단계를 가능할 수 있는 중요한 지표가 될 수 있다. 지금까지 대체로 낮은 질량의 별 탄생 환경과 무거운 별 탄생의 환경이 서로 크게 달라 이러한 중수소화 값의 차이가 있지 않나 예측해왔으며, 그 외에도 여러 복잡한 과정이 있을 수 있다. 예를 들면, 물리적 조건에 따른 차이로는 충격파나 새로 생성된 별에 의한 가열 등이 있을 수 있고, 화학적 차이로는, 중수소화된 물(HDO)과 메탄올 사이에 추가적인 수소-중수소 교환 반응이 있을 수 있다. 이러한 과정에서 중수소화된 메탄올의 양이 증가될 수 있다고 제안되었다(Ratajczak et al., 2009; Weber et al., 2009; Peng et al., 2012). 이러한 여러 영향들은 그들의 대략적인 가능성이 제시되었으나 아직 보다 구체적인 연구가 필요한 상황이다. 이러한 차이가 복합적으로 낮은 질량의 별 탄생 코어와 무거운 별 탄생 코어에서 중수소화된 분자량의 차이를 가져올 것이다. 하지만 이번 연구에서 확인된 무거운 별 탄생 지역에서의 높은 중수소화 비율은 별 질량에 상관없는 전반적인 진화 과정의 차이일 수도 있다는 제안을 한다. 무거운 별의 경우는 생성되는 중심별의 빠른 진화와 강력한 에너지로 주변 가스를 빠르게 변화시키기 때문에, 낮은 질량 별 탄생과 비슷한 과정이 매우 빠르게 지나가고, 확률적으로 관측되는 천체들은 보다 진화된 결과를 보여줄 가능성이 높다. 중수소화된 경우와 그렇지 않은 경우의 함량비의 변화는 가스 상태에서 메탄올이 최종적으로 사라지기 전까지 그 진화 정도에 따라 비율이 달라질 수 있을 것이다. 따라서 이 천체와 같이 무거운 별이라도 매우 초기 단계의 경우에 대하여, 고 분해능의 관측을 수행한다면 중수소화된 결과의 진화 과정을 더 잘 이해하리라고 생각된다.

## 5. 결론

서브밀리미터 어레이(SMA, Submillimeter Array)를 이용하여, 별 탄생지역 DR21(OH)의 서브-코어들에 대하여, 중수소화된 메탄올(CH<sub>3</sub>OD)을 관측하였다. 이 결과를 통하여 이 천체에서 가장 최근에 별 탄생을 시작되고 있는 것으로 확인된 MM1a 서브 코어의 연속파의 세기 중심의 위치와 CH<sub>3</sub>OD 방출선 세기의 중심이 거의 일치하는 것이 확인되었다. 이것은 메탄올이 성간먼지의 얼음 맨틀에서 기화되고 있는 핫-코어의 확실한 위치가 별 탄생 바로 주변임을 확인하였다.

이 천체에서 CH<sub>3</sub>OD 함량이 최소 약  $(2 \pm 1) \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  임을 처음으로 구하였으며 CH<sub>3</sub>OD와 CH<sub>3</sub>OH 상호 함량비는 약 0.45로, 대략 낮은 질량의 별이 생성되는 성간운 코어에서 관측되는 값이 갖는 범위의 중간에 해당되었다. 이것은 이 MM1a 천체가 아직 차가운 사진 중력 수축 과정에서 비롯된 초기 환경을 보여주는 것으로 추측된다. 이러한 결과를 초래하는 여러 물리 화학적 조건들이 있겠으나, 그 외에 질량의 차이뿐 아니라 핫-코어 진화 과정의 시간에 따라서 무거운 별 탄생 코어에서도 초기에는 작은 질량의 별 탄생 환경이 반영될 수 있지 않은가 하는 결과를 보여준다. 앞으로 보다 많은 고-분해능의 중수소화된 분자의 연구가 필요하다.

\* The Submillimeter Array is a joint project between the Smithsonian Astrophysical Observatory and the Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics and is funded by the Smithsonian Institution and the Academia Sinica.

## REFERENCES

- Araya, E. D., Kurtz, S., Hofner, P., & Linz, H., 2009, Radio Continuum and Methanol Observations of DR21(OH), *ApJ*, 698, 1321
- Argon, A. L., Reid, M., J., & Menten, K. M., 2000, Interstellar Hydroxyl Masers in the Galaxy. I. The VLA Survey, *ApJS*, 129, 159
- Batrla, W. & Menten, K. M., 1988, Detection of a Strong New Maser Line of Methanol Toward DR 21(OH), *ApJ*, 329, L117
- Boogert, A. C. A., Pontoppidan, K. M., & Lahuis, F., et al., 2004, Spitzer Space Telescope Spectroscopy of Ices toward Low-Mass Embedded Protostars, *ApJ*, 154, 359
- Charnley, S. B., Tielens, A. G. G. M., & Rodgers, S. D., 1997, Deuterated Methanol in the Orion Compact Ridge, *ApJ*, 482, L203
- Fish, V. L., Muehlbrad, T. C., Pratap, P., et al., 2011, First Interferometric Images of the 36 GHz Methanol Masers in the DR21 Complex, *ApJ*, 729, 14
- Genzel, R. & Downes, D., 1977, H<sub>2</sub>O in the Galaxy: Sites of Newly formed OB Stars, *A&AS*, 30, 145
- Ho, P. T. P., Moran, J. M., & Lo, K. Y., 2004, The Submillimeter Array, *ApJ*, 616, L1
- Hudson, R. L. & Moore, M. H., 1999, Laboratory Studies of the Formation of Methanol and Other Organic Molecules by Water+Carbon Monoxide Radiolysis: Relevance to Comets, Icy Satellites, and Interstellar Ices, *Icarus*, 140, 451
- Jefferts, K. B., Penzias, A. A., & Wilson, R. W., 1973, Deuterium in the Orion Nebula, *ApJ*, 179, L57
- Kogan, L. & Slysh, V., 1998, VLA Imaging of Class I Methanol Masers at 7 Millimeters with Angular Resolution approximately 0.2 Arcseconds, *ApJ*, 497, 800
- Kurtz, S., Cesaroni, R., Churchwell, E., Hofner, P., & Walmsley, M., 2000, in *Protostars and Planets IV*, ed. V. Mannings, A. P. Boss, & S. S. Russell, 299 (Tucson: Univ. Arizona Press)
- Kurtz, S., Hofner, P., & Alvarez, C. V., 2004, A Catalog of CH<sub>3</sub>OH 7\_0-6\_1 A+ Maser Sources in Massive Star-forming Regions, *ApJS*, 155, 149
- Linsky, J. L., Draine, B. T., Moos, H. W., et al., 2006, What Is the Total Deuterium Abundance in the Local Galactic Disk?, *ApJ*, 647, 1106
- Mangum, J. C., Wootten, A., & Mundy, L. G., 1991, Synthesis Imaging of the DR 21(OH) Cluster. I - Dust Continuum and C(O-18) Emission, *ApJ*, 378, 576
- Mauersberger, R., Henkel, C., Jacq, T., & Walmsley, C. M., 1988, Deuterated Methanol in Orion, *A&A*, 194, L1
- Minh, Y. C., Chen, H. -R., Su, Y. -N., & Liu, S. -Y., 2012, SMA Observations of the Hot Cores of DR21(OH), *JKAS*, 45, 157
- Motte, F., Bontemps, S., Schilke, P., Schneider, N., et al., 2007, The Earliest Phases of High-Mass Star Formation: a 3 Square Degree Millimeter Continuum Mapping of Cygnus X, *A&A*, 476, 1243
- Nagaoka, A., Watanabe, N., & Kouchi, A., 2005, H-D Substitution in Interstellar Solid Methanol: A Key Route for D Enrichment, *ApJ*, 624, L29
- Neill, J. L., Crockett, N. R., Bergin, E. A., et al., 2013, Deuterated Molecules in Orion KL from Herschel/HIFI, *ApJ*, 777, 85
- Norris, R. P., Booth, R. S., Diamond, P. J., & Porter, N.

- D. 1982, Interferometric Observations of Four Protostellar OH Maser Sources, *MNRAS*, 201, 191
- Parise, B., Ceccarelli, C., Tielens, A. G. G. M., et al., 2006, Testing Grain Surface Chemistry: a Survey of Deuterated Formaldehyde and Methanol in Low-Mass Class 0 Protostars, *A&A*, 453, 949
- Peng, T. -C., Despois, D., Brouillet, N., et al., 2012, Deuterated Methanol in Orion BN/KL, *A&A*, 543, 152
- Plambeck, R. L. & Menten, K. M., 1990, 95 GHz Methanol Masers Near DR 21 and DR 21(OH), *ApJ*, 364, 555
- Ratajczak, A., Taquet, V., & Kahane, C., et al., 2011, The Puzzling Deuteration of Methanol in Low- to High-Mass Protostars, *A&A*, 528, L13
- Rodgers, S. D. & Charnley, S. B., 2002, Multiply Deuterated Molecules and Constraints on Interstellar Chemistry, *Planetary and Space Science*, 50, 1125
- Roueff, E. & Gerin, M., 2003, Deuterium in Molecules of the Interstellar Medium, *Space Sci. Rev.*, 106, 61
- Rygl, K. L. J., Brunthaler, A., & Sanna, A., et al., 2012, Parallaxes and Proper Motions of Interstellar Masers toward the Cygnus X Star-Forming Complex. I. Membership of the Cygnus X region, *A&A*, 539, 79
- Schneider, N., Bontemps, S., & Simon, R., et al., 2006, A New View of the Cygnus X Region. KOSMA 13CO 2 to 1, 3 to 2, and 12CO 3 to 2 Imaging, *A&A*, 458, 855
- Tielens, A. G. G. M., 1983, Surface Chemistry of Deuterated Molecules, *A&A*, 119, 177
- Viti, S. & Williams, D., 1999, Time-Dependent Evaporation of Icy Mantles in Hot Cores, *MNRAS*, 305, 755
- Wada, A., Mochizuki, N., & Hiraoka, K., 2006, Methanol Formation from Electron-irradiated Mixed H<sub>2</sub>O/CH<sub>4</sub> Ice at 10 K, *ApJ*, 644, 300
- Weber, A., Hodyss, R., Johnson, P., Willacy, K., & Kanik, I., 2009, Hydrogen-Deuterium Exchange in Photolyzed Methane-Water Ices, *ApJ*, 703, 1030
- Woody, D. P., Scott, S. L., & Scoville, N. Z., et al., 1989, Interferometric Observations of 1.4 Millimeter Continuum Sources, *ApJ*, 337, L41
- Zapata, L. A., Loinard, L., & Su, Y. -N., et al., 2012, Millimeter Multiplicity in DR21(OH): Outflows, Molecular Cores, and Envelopes, *ApJ*, 744, 86