

헤일밥 혜성의 HCN (J=1-0) 천이선 관측
OBSERVATIONS OF THE J=1-0 TRANSITION LINE OF HCN
IN COMET HALE-BOPP

김봉규¹, 김효령¹, 조세형¹, 김상준²

¹천문대

²경희대학교 우주과학과

KIM, BONG GYE¹, KIM, HYO RYUNG¹, CHO, SE HYUNG¹, KIM, SANG JOON²

¹Korea Astronomy Observatory,

²Department of Astronomy & Space Science, Kyung Hee University, Yong-In

(Received September 21, 1998; Revised November 30, 1998)

ABSTRACT

Observations of the J=1-0 transition line of HCN were made at the center of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) from November, 1996 to April, 1997 with the 14-m radio telescope at the TRAO (Taeduk Radio Astronomical Observatory). From the obtained data, an HCN production rate at each observed date was derived. The rapid variation of the HCN production rate near the perihelion was detected, and it is thought to be caused by jet(s) from the nucleus. The correlation between the visual magnitude and the HCN production rate is found to be $Q_{\text{HCN}} = 27.03 - 0.11(m_v - 5 \log \Delta)$.

I. 서 론

장주기 혜성은 대부분의 시간을 태양으로부터 멀리 떨어져 존재해 태양에 접근하기 전까지는 태양이나 다른 별 등 외부의 영향으로 인한 내부의 변화를 경험하지 않은 것으로 알려져 있다. 또한 핵의 크기는 수 km에서 수십 km 정도에 불과하여 자체 중력에 의한 내부 물질의 변화도 거의 없었을 것으로 추정된다. 이러한 관점에서 혜성은 우리 태양계 초기의 구성 물질 그대로 구성되어 있을 것으로 추정되며, 따라서 혜성의 구성 물질의 함량을 결정하는 것은 태양계 초기의 상태를 파악하는데 중요한 열쇠가 된다.

이러한 관점에서 혜성의 구성 함량비를 결정하려는 노력은 오랫동안 지속되어 왔다. 그러나 지상의 관측으로부터 물질의 함량이 결정될 수 있는 소수의 극히 밝은 혜성에 제한되며, 특히 전파관측 기술은 광학에 비해 늦게 발전되어 전파관측에 의한 혜성의 구성 물질의 구성을 결정하는 연구는 극히 최근에만 가능할 수 있었다.

혜성에 대한 전파관측이 활발해 지는 또 다른 이유는 적외선, 광학, 자외선 등의 파장 영역에서 관측되는 것은 대부분 혜성을 직접 구성하고 있는 분자의 천이선이 아니라 태양풍이나 태양

의 복사열을 받아 해리된 분자나 기(基)들이었다. 따라서 그러한 관측으로부터 원래의 구성물질의 양을 추정하는 데에는 몇 가지 가정이 필요하고, 이에 따른 결정치의 불확실성도 높다. 이에 반해 전파 영역 관측되는 천이선은 혜성에 원래 포함되어 있던 분자가 태양의 복사열에 의해 외부로 분출된 것이라는 의미가 있다.

혜성에 대한 전파관측으로부터 검출된 mm 파 천이선 분자들은 CO, CH₃OH, HCN, H₂S, H₂C, CS, CH₃OH, HNC 등이 있는데(Biver et al 1997), 그 중에서 HCN은 광학이나 적외선 분광에 의해 검출되는 CN 분자의 모분자일 가능성이 높다는 관점에서 특별히 관심의 대상이 되고 있어 Kohoutek 혜성, Halley 혜성, IRAS-Araki-Alcock 1983d 혜성, Hykutake 혜성 등에 대한 관측이 이미 수행된 바 있다(Huebner et al., 1974; Despois et al. 1986; Winnberg et al., 1987; Bocklee-Morvan et al., 1984; Wornack et al. 1997; etc.).

그러나 극히 소수의 밝은 혜성에 대해서만 전파 분자선의 관측이 가능하며, 이런 관점에서 볼 때 헤일-밥 혜성에 대한 HCN 관측은 중요한 의미를 지닌다고 볼 수 있다. 이 논문에서는 1996년 11월부터 근일점을 통과한 1997년 4월 1일까지 헤일-밥(C/1995 O1) 혜성에 대한 HCN(J=1-0) 천이선을 관측한 결과를 다룬다. 이 논문의 II장에서는 관측에 관하여 다루고, III장에서는 관측자료로부터 HCN 분자선의 생성율을 결정하며, IV 장에서는 시간에 따른 HCN 분자의 생성을 변화 특성 등을 논한다.

II. 관 측

대덕전파천문대 구경 14 m 전파망원경을 이용하여 헤일-밥 혜성(C/ 1995 O1)에 대한 HCN(J=1-0) 분자선 관측을 수행하였다. 관측은 1996년 11월 25일, 12월 8일, 1997년 3월 31일, 및 4월 1일에 수행되었으며, 관측 위치는 혜성의 중심부 1점에 국한되었다. 수신기의 전반부에는 SIS 믹서가 이용되었고, 후반부는 250 KHz × 256 채널의 필터뱅크와 20 KHz × 1024 채널의 correlator를 상태의 양호에 따라 선택적으로 이용되었다.

대덕전파천문대 구경 14 m 전파망원경의 빔크기와 빔효율은 HCN(J=1-0) 분자선의 정지주파수 88.6 GHz에서의 각각 64"와 0.45(박용선 외 1994)이며, 250 KHz 필터뱅크와 20 KHz correlator의 1 채널당 속도분해능은 각각 0.85 km s⁻¹와 0.068 km s⁻¹이다. 그러나 correlator로 관측한 96년 12월 8일의 자료는 천이선의 세기가 약해 실제로는 5채널을 하나로 묶어 사용했으므로 실질적인 속도분해능은 0.34 km s⁻¹이다. 관측 기간 중의 시스템온도는 기상 상태 등에 따라 다소간의 변화가 있었으나 600 K 내외였다. 1 점 관측에 소요시간은 5000초 ~ 10000초 사이로 분자선의 세기에 따라 조정되었으며, 이에 상응하는 필터뱅크 1 채널 당의 rms는 0.01 ~ 0.02 정도이다. Fig. 1에는 각 관측 때에 얻어진 헤일-밥 혜성의 천이선 모양을 제시하였다.

III. HCN의 생성율

관측으로부터 얻어진 HCN(J=1-0, F=2-1) 분자선의 보정된 안테나온도, T_A^* 의 속도적분강도와 HCN 분자의 기동밀도, N_{12} 의 관계식은

$$\int T_A^* dV = \eta_B \frac{c^3}{2k\nu} \frac{h\nu A_{10}}{4\pi} N_{12} \text{ K km s}^{-1} \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서 η_B 는 관측주파수에서의 망원경의 빔효율, c 는 빛의 속도, k 는 볼츠만 상수, ν 는 관측 주파수, h 는 프랑크 상수, A_{10} 는 HCN 분자의 J=1-0 천이 Einstein 상수이다. Schloerb et al. (1986)가 제시한 것처럼, 망원경의 빔에 검출된 HCN 분자의 양과 실제 혜성의 코마 내에 존재하는 양의 비를 F 라 정의하면

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^\infty dx \int_{-\pi/2}^{\pi/2} dt e^{-x \sec(\theta)} e^{-4 \ln 2 x^2 / \theta^2}, \quad (2)$$

로 표현될 수 있으며, HCN 분자선의 생성율, Q_{12} 은

$$N_{12} = Q_{12} \tau_{\text{HCN}} \frac{4 \ln 2}{\pi \Delta^2 \theta^2} F(\theta), \quad (3)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 θ 는 망원경의 빔크기(θ)와 HCN 분자의 scale length, l_p 의 각거리 비율, τ_{HCN} 은 HCN 분자의 lifetime이며, Δ 는 지구-혜성 간의 거리이다.

식 (1), (2) 및 (3)으로부터 HCN 분자의 생성율을 결정하기 위해서는 분자의 lifetime과 scale length를 알아야 한다. 여기서는 혜성이 태양으로부터 1 AU 떨어져 있을 때의 HCN 분자의 life을 Bocklee-Morvan et al. (1984)이 제시한 $\tau_{\text{HCN}} = 8 \times 10^4$ sec를 택했으며, lifetime은 태양-혜성 간의 거리 제곱에 비례하는 것으로 가정했다(Swamy 1997). 그리고 scale length는 분자의 팽창속도를 $V = 0.8 \text{ km s}^{-1}$ 로 택해 결정했다. 또한 분자선의 강도가 약해 F=1-1 선을 분해할 수 없어 F=2-1 분자선과 F=1-1 분자선의 강도비를 statistical weight로부터 5/3으로 가정하고 이에 따른 함량비를 9/5로 결정했다. 표 1에는 결정된 분자선의 생성율을 관측일자, 태양-혜성 간의 거리 r_h , 지구-혜성 간의 거리 Δ , HCN 분자의 scale length 각거리와 망원경의 빔크기의 비 θ , 혜성의 코마 전체에 포함된 HCN 분자 양과 망원경의 빔에 포착된 분자 양의 비 $F(\theta)$, 보정된 안테나온도 T_A^* 의 속도적분강도 T_{int} 및 겉보기 등급 m_v , 등과 함께 제시하였다.

표 1. HCN 분자의 생성율

관측일자	r_h (AU)	Δ (AU)	θ	F(θ)	m_v	T_{int}	Q_{HCN} (mol. s ⁻¹)
11/15/1996	2.22	2.97	0.44	0.26	3.8	0.08	7.8E26
12/08/1996	2.07	2.86	0.49	0.28	3.4	0.14	7.4E26
03/30/1997	0.91	1.33	1.14	0.50	-0.7	0.39	1.3E27
03/31/1997	0.91	1.34	1.15	0.50	-0.7	0.74	2.4E27
04/01/1997	0.91	1.35	1.15	0.50	-0.7	0.32	1.1E27

태양중심거리 r_h , 지구중심거리 Δ 및 시등급 m_v 는 IAU circular로부터 추정했음.

IV. 논 의

혜성은 태양에 접근함에 따라 태양의 복사열에 의해 표면 물질이 급격히 증발하므로 코마가 커지고 HCN을 포함한 분자들의 생성율도 증가한다. 특히 혜성이 태양에 근접해 있을 때에는 핵에 포함된 많은 물질이 동시에 분출되면서 jet 현상을 유발하는 경우가 가끔 발생한다. 특히 상대적으로 큰 헤일-밥 혜성의 경우 이런 현상이 많이 보고된 바 있다. jet 현상은 코마의 밝기

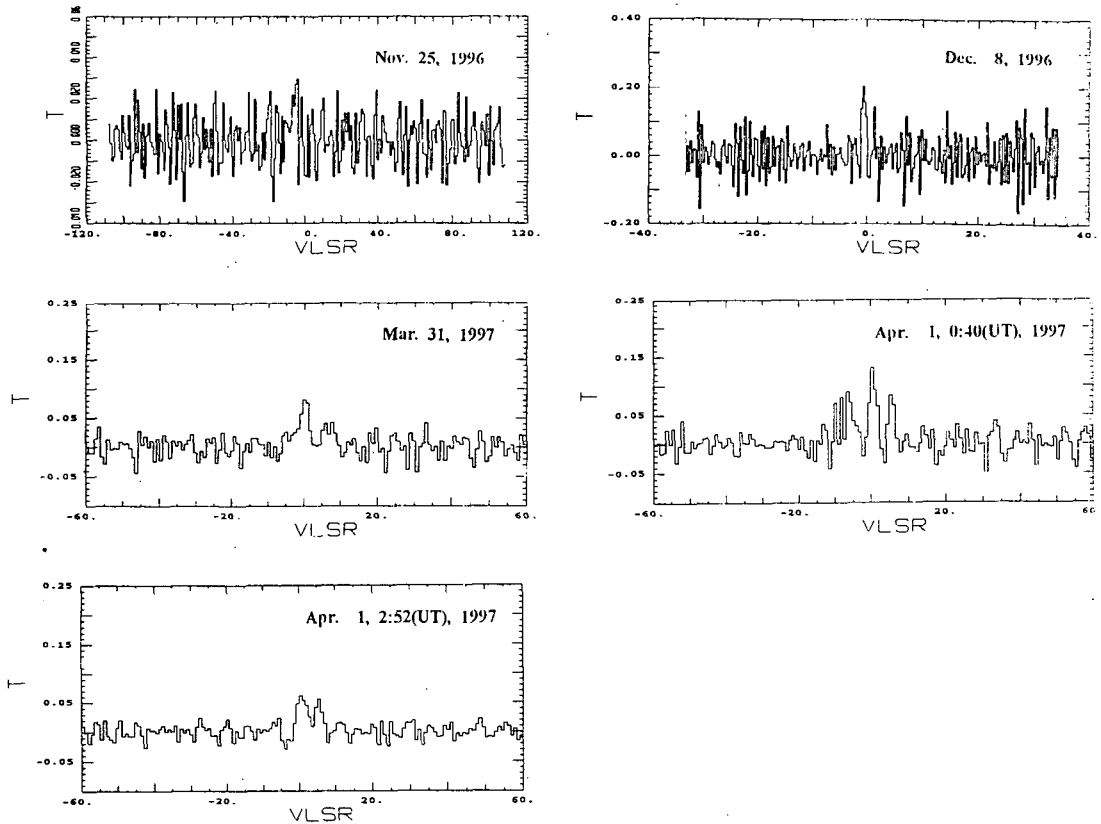


그림 1. 관측된 HCN (J=1-0) 천이선들을 보여준다. 1997, 4월 1일 0:40 (UT)에 관측된 강한 Emission은 혜성의 핵으로 부터 분출된 jet에 의한 것으로 생각된다.

에도 영향을 주지만 HCN을 포함한 분자들의 생성율도 증가시키는 것으로 알려져 있다 (Schloerb et al. 1986). 이런 관점에서 우리가 관측한 근일점 근처 때인 1997년 3월 31일과 4월 1일 사이의 분자선의 심한 변화는 주목할 만 하다(표 1 및 그림 1 참조). 즉, 4월 1일 0:40(UT)에 관측된 결과로부터 유도된 HCN의 생성율(2.4×10^{27} mol. s⁻¹)은 그 전날인 3월 31과 그보다 2시간 뒤에 관측된 결정치 보다 2 배나 많다. 따라서 이같은 일시적 증가는 다른 혜성에서도 알려진 것처럼 jet 현상에 기인했을 것으로 추정된다. Weaver et al. (1998)은 1997년 3월 2-5일의 적외선 관측을 통해 HCN 생성율이 8.5×10^{27} mol. s⁻¹ 임을 알아냈다.

Despois et al. (1981)은 여러 혜성에 대한 OH 분자선 관측 결과들을 종합하여 혜성의 밝기와 분자의 생성율 간에

$$\log Q_{\text{HCN}} = m_0 - a (m_v - 5 \log \Delta) \quad (4)$$

의 관계가 있음을 보여주었다. 동등한 방법으로 헤일-밥 혜성의 HCN 생성율과 시등급 간의 관계를 결정해 $m_0 = 27.03$, $a = 0.11$ 를 얻었다. 이 결과는 Schloerb et al. (1986)이 헬리혜성에 대해 결정한 값($m_0 = 27.57$, $a = 0.24$)과 약간의 차이를 보인다. 그 원인으로는 첫째, 본질적으로 혜성들 간에는 내부 구성 성분이 다소간 차이가 있거나, 둘째, 우리의 한정된 관측 횟수로 인한 오차 증가 등을 들 수 있다.

서론에서 지적한 것처럼 혜성의 핵에서 분출된 HCN 분자는 태양의 복사에 의해 H와 CN으로 해리된다. 이런 관점에서 볼 때 HCN과 CN의 생성율을 비교는 CN의 기원을 파악하는데 중요한 역할을 한다. Son et al. (1996)이 헤일-밥 혜성의 관측으로부터 결정한 CN 분자의 생성율은 비슷한 시기에 우리의 관측으로부터 결정한 HCN 분자의 생성율과 비슷한 값을 갖거나 오히려 약간 큰 값을 갖는다. 이 결과는 이전의 관측 결과와도 잘 일치하며(Bocklee-Morvan, 1984), 이로부터 Bocklee-Morvan & Crivisier (1985)가 제시한 것처럼 혜성의 핵 속에 CN의 모체가 되는 다른 분자들이 포함되어 있을 것으로 추정된다.

참고 문헌

박용선, 한석태, 박종애, 김효령, 1994, 천문대 기술보고서 No. 10
 Biver, N., Bocklee-Morvan, D., Colom, P., Crovisier, J., Davies, J. K., Dent, W. R. F., Despois, D., Gerard, E., Lellouch, E., Rauer, H., Moreno, R., Paubert, G., 1997, Science 275, 1915
 Bocklee-Morvan, D., & Crovisier, J., A&A 151, 1985,
 Bocklee-Morvan, D., Crovisier, J., Baudry, A., Despois, D., Perault, M., Irvine, W. M., Schloerb, F. P., & Swade, D., 1984, A&A 141, 411
 Despois, D., Crovisier, J., Bocklee-Morvan, D., Schraml, J., Forveille, T., & Gerard, E., 1986, A&A 160, L11
 Despois, D., Gerard, E., Crovisier, J., & Kazes, I., 1981, A&A 99, 320
 Huebner, W. F., Snyder, L. E., & Buhl, D., 1974, Icarus 23, 580

- Schloerb, F. P., Kinzel, W. M., Swade, D. A., & Irvine, W. M., 1986, ApJ 310, L55
- Son, D. H., Kim, S. J., Kim, J. H., Kim, K.-M., Sung, E-C, & Hyung, S., 1996, PKAS 12, 99
- Swamy, K. S. K., 1997, in Physics of Comet(World Scientific), p.127
- Weaver, H., Brooke, T., Chin, G., Kim, S.J., Bockelée-Morvan, D., & Davis, J.K. Proceeding of the First International Conference on Comet, Tenerife, Canary Island, Feb. 2-5, 1998.
- Winnberg, A., Ekelund, L., & Ekelund, A., 1987, A&A 172, 335
- Womack, M., Stern, S.A., & Festou, M. C., 1997, Planet. Space Sci. 45, 711