

## 거대 행성들과 혜성들의 분광학 SPECTROSCOPY OF PLANETS AND COMETS

김상준<sup>1</sup>, 이영식<sup>2</sup>, 이유<sup>3</sup>, 김용하<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 우주과학과

<sup>2</sup>경희대학교 화학과, <sup>3</sup>충남대학교 천문우주과학과

SANG JOON KIM<sup>1</sup>, YOUNG SIEK LEE<sup>2</sup>, YU YI<sup>3</sup> AND YOUNG HA KIM<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Astronomy and Space Science, Kyunghee University

<sup>2</sup>Dept. of Chemistry, Kyunghee University

<sup>3</sup>Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam National University

Received Jul. 18, 2000; Accepted Aug. 7, 2000

### ABSTRACT

We have presented detected molecules, atoms, radicals, ions, and dimers in the atmospheres of planets and comets from Earth-based and spaceborne observatories during the last 3 decades. We have reviewed spectroscopic studies on the auroral emissions and airglows of the giant planets, and briefly summarized spectroscopic observations of dimers in the atmospheres of the giant planets and Titan. In particular, we highlighted the recent detections of new molecular emissions and absorptions in the spectra of the giant planets, Titan, and recent bright comets from spaceborne or ground-based observatories. We also reviewed current models and theories of the origin and evolution of the solar system, and implications of isotopic ratios in these atmospheres.

*Keywords:* planets, comets, spectroscopy

### 1. 서론

1970년대 초반의 Pioneer 10호와 11호 이후로 여러 무인 우주선들이 거대 행성들과 혜성들을 조우하면서 인류 처음으로 행성들에 근접해서 촬영한 생생한 사진들은 천문학자뿐만 아니라 일반인들까지 모두에게 센세이션을 일으켰다. 그러나 이런 사진들은 행성들의 구성 성분의 종류 및 함량, 온도, 압력, 동위원소비 등 물리 화학적 정보를 거의 주지 못한다. 분광학은 천문학자들로 하여금 이러한 천체들의 특성들을 알아낼 수 있게 하는 가장 강력한 방법이다. 행성들의 스펙트럼을 분석함으로써 행성대기 내의 구성분자, 원자, 라디칼, 이온, 다이머, 먼지 입자 등을 알아낼 수가 있고, 그 구성 성분의 양들도 알아낼 수가 있다. 그리고, 이 스펙트럼에서 대기의 온도와 압력을 유추해 낼 수가 있으며, 행성대기 내의 상세한 복사 및 충돌 과정을 연구할 수가 있다.

지난 30여 년간 지상과 우주에서 행해진 외부 행성들과 혜성들에 대한 분광 관측을 통해 수많은 대기 속의 분자, 라디칼, 이온들을 알아내었다. 그럼에도 불구하고 혜성의 가시광 영역에서만 수백 개의 분광선들을 확인해 내지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 혜성들과 외부 행성들의 대기 스펙트럼을 분석하고 구성 분자들을 확인하기 위해서

는, 분자 밴드들의 올바른 실험 측정 자료가 시급히 필요하다. 최신의 가시광 영역 고분해능 분광기술은 일반 분자선 주위의 동위원소 분자선을 구분해낼 수가 있다. 이러한 고정밀 분광 기술은 행성 천문학자 뿐만 아니라 원자, 분자 물리 분야의 실험 및 이론 과학자들에게도 도전적인 분야를 열어주고 있다.

행성대기 스펙트럼에 대한 정량적인 연구를 위해서는 분자들의 들뜸(excitation) 및 들뜸해소(de-excitation)을 포함한 복사 전달을 계산하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 많은 실험 측정값들이 필요하다. 예를 들면, 분광선의 위치, 그 분광선을 결정하는 양자수, 분광선과 밴드의 강도, 압력확장에 의한 분광선폭, 그리고 분자, 원자, 전자, 이온들간의 충돌에 의한 양자 상태의 들뜸 및 들뜸해소율 등이 다. 때때로 대기의 화학 반응과정을 정확히 이해하기 위해서는 특정 분자와 라디칼의 화학 반응율이 필요하다. 그리고 만약 이러한 실험 측정값들이 없다면, 최소한 이론 모델에 의한 근사값이라도 구해야 한다. 그러나 이론 모델 값은 정량적인 계산에 사용하기에는 불확정성이 크므로, 다만 정성적인 계산에만 사용할 수가 있다.

본 논문에서는 행성대기 구성성분들의 발견과 이에 의거한 원시 물질에서부터의 대기 물질의 진화를 통제하는

행성대기 내의 화학과정에 대한 이해의 발달을 시간순으로 소개를 하고자 한다. 그리고 지상과 우주 망원경을 사용하여 거대 행성들과 최근의 밝은 혜성들인 Hyakutake와 Hale-Bopp 혜성들의 스펙트럼에서 관측된 새로운 방출선과 흡수선들을 소개하려고 한다. 그 후에 태양계의 기원과 진화의 관점에서 분광학적으로 얻어진 행성대기의 구성분자들의 함량과 동위원소비 등의 관측 자료를 해석하는 최근의 이론 등을 소개하려고 한다.

## 2. 거대 행성들의 분광학

### 2.1. 분자들과 동위원소 분자들의 스펙트럼

1930년대 초에 Wilt(1932)가 목성의 분광관측을 통해 가시광 영역에서  $\text{CH}_4$ 와  $\text{NH}_3$  선들을 관측한 이후 외부 행성에서 수많은 구성 분자들의 존재가 밝혀져 왔다.

거대 행성들이 가시광 영역에서는 태양빛을 수동적으로 반사하지만, 행성의 차가운 대기에서 방출되는 적외선 영역에서는 대기의 구성 성분과 열적 특성에 관한 많은 정보를 알아낼 수가 있다. 1960년대 말 1970년대 초에 Fourier Transform Spectrometer(FTS)등의 개발로 적외선 영역에서 분자의 회전-진동 밴드를 측정하는 것이 가능해짐으로 인해 많은 대기 구성 분자선들의 확인이 가능하였다.

1979년도에 Voyager 탐사선이 목성과 조우하면서 탐사선에 실린 Infrared Interferometer Spectrometer(IRIS), FTS 등을 이용하여 그간 지상에서 관측으로 예견되던 많은 수소탄화 분자들의 존재를 확인하였으며 (그림 1), 이 IRIS 스펙트럼에서  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_4$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$  그리고  $\text{CH}_3$  같은 많은 분자들을 발견하였다 (Kim et al. 1985). 1995년 Galileo 탐사선에서 목성대기에 투하된 탐사체에 실린 질량분석기의 직접 측정에 의해 목성의 대기 내의 주요 성분인  $\text{H}_2$ 와 He의 혼합비 그리고 이보다는 함량이 많지 않은  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  같은 분자들과 Ne, Ar, Kr, Xe 등의 불활성 기체들의 혼합비와 예상 최대치를 구할 수 있게 되었고, 목성에 탄소와 다른 중원소가 풍부하게 존재한다는 것도 확인되었다. (e.g., Niemann et al. 1998)

최근에는 Infrared Space Observatory (ISO)가 거대 행성들에서 여러 분자들을 찾아내었고, 특히 목성, 토성, 천왕성, 해왕성 모두의 성층권에서  $\text{H}_2\text{O}$ 를 관측해 내었다. 거대 행성들의 대류권에서 성층권으로  $\text{H}_2\text{O}$ 의 전달을 차가운 대류권계면이 방해할 것으로 예상된다. 그러므로, 성층권에서의  $\text{H}_2\text{O}$ 의 존재는 혜성에서 나온 행성간 먼지나 행성의 링 혹은 위성 표면의 얼음에서 분리된 얼음 운석조각 등이 유입된 것으로 해석될 수도 있다 (Bézard et al. 1999).

이렇게 행성에서 분자들의 관측이 가능했던 것은 실험실에서 측정된 이들 분자선들의 위치정보를 문헌 자료에서 입수할 수 있기 때문이다. 이는 1980년대 초 이후

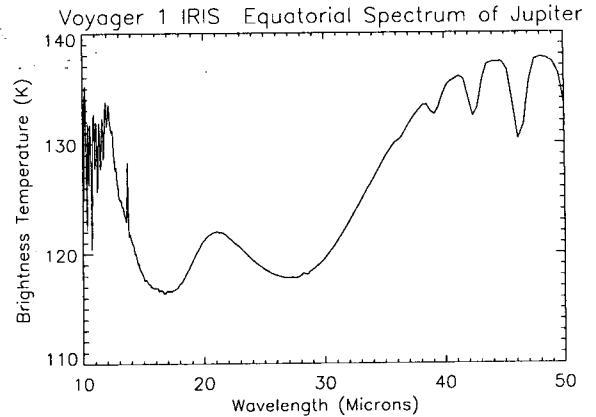


그림 1.—전형적인 목성 적도부근의 Voyager IRIS 스펙트럼.

에 미국의 Air Force Geophysical Laboratory(AFGL), Goddard Space Flight Center(GSFC), Jet Propulsion Laboratory(JPL)과 프랑스의 Center National de la Recherche Scientifique (CNRS)의 분광학자들이 분광 자료들을 데이터베이스로(각각 HILTRAN, MLA, ATMOS, GEISA) 구축해 놓았기 때문이다. 이 데이터들은 주로 지구 대기 분자들의 적외선 영역에 보이는 스펙트럼 자료들이다. 이 자료들은 그 후 지금까지 20여 년 동안 지속적으로 보강되었음에도 불구하고 여러 분자선들이 중첩되거나 섞이는 적외선 영역에서는 아직까지도 판명이 안되는 스펙트럼 선들이 많이 있다. 한 예로 근적외선 영역에 위치한  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_4$ ,  $\text{C}_4\text{H}_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  등의 분자선들이다.

목성에서는 동위원소 분자들도 관측이 되었고, Galileo 탐사선 탐사체의 질량분석기는 동위원소비  $\text{D}/\text{H}$ ,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (Mahaffy et al.1998),  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ ,  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  등(Niemann et al. 1998)을 정확히 측정하기도 했다. 최근에 ISO로 여러 천체들에 대해 적외선 영역에서 HD의 회전 분자선을 관측하여  $\text{D}/\text{H}$  동위원소비를 구하였다(Bézard et al. 1999). 목성과 토성의  $\text{D}/\text{H}$ 비는 국부공간 물질과 비슷하고, 천왕성과 해왕성의 경우는 이 보다는 큰 값을 보이며, 타이탄이나 헬리 혜성 그리고 지구 바다의 값에 가깝다. 이들  $\text{D}/\text{H}$  비는 거대 행성들의 핵과 대기가 얼음덩어리의 미행성들이 뭉치고 이것들에 원시 태양계 성운의 기체들이 잡혀서 만들어졌다고 해석될 수 있겠다. 동위원소비나 중원소 함량은 행성의 형성과 내부구조, 대기의 대류와 화학 반응과정, 그리고 행성의 진화 등을 이해하는데 필수적이다. 이를 위해서 대기를 구성하는 동위원소 분자들의 분광 파라미터값들이 필요하다.

### 2.2. 적외선 대기광(Airglow) 및 오로라 스펙트럼

행성에서 방출되는 대기광은 고층대기의 분자나 이온에서 나오는 형광이나 열적 방출에 의한 것이다. 목성 전 영

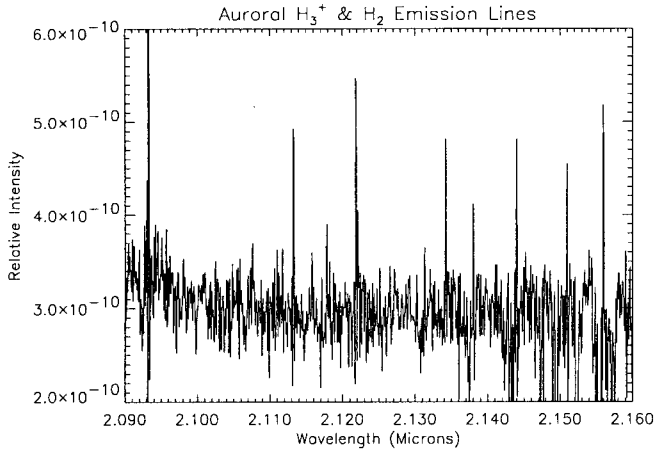


그림 2.—목성 오로라지역의 근적외선 H<sub>3</sub><sup>+</sup> and H<sub>2</sub> 분광선을 보여준다.

역에서의 H<sub>3</sub><sup>+</sup>의 방출이 확인되었고(그림 2: Kim et al. 1991), 이 H<sub>3</sub><sup>+</sup>스펙트럼을 공간적으로 분해하여 목성에서 위도 변화에 따른 온도 변화를 구해내었다(Ballester et al. 1994). 그리고, 목성에 SL9 파편들이 충돌할 때에 충돌 지점에서 정상시와 비교하여 H<sub>3</sub><sup>+</sup> 방출이 감소하였음이 밝혀졌다(Kim et al. 1996). 최근에는 ISO가 토성에서 16 μm 영역에서 CH<sub>3</sub> 방출을 관측하였으며, 목성과 토성의 디스크에서 CH<sub>4</sub>를 성공적으로 관측하였다.(Drossart et al. 1999).

오로라는 자기극지방에 자기권 입자들이 낙하하면서 대기 분자들과 충돌을 일으키면서 빛이 방출되는 현상으로, X-선에서 전파까지 여러 영역의 전자기파를 방출한다. 1950년대에 지상 전파 망원경으로 목성의 강한 전파를 처음으로 관측하였으며(Burke and Franklin, 1955), Voyager 1, 2호가 자외선 분광기로 목성의 극지방에서 H<sub>2</sub> Lyman 과 Werner 밴드들과 H Ly-α 방출을 관측하였고(Broadfoot et al. 1979), 바로 다음에 International Ultraviolet Explorer(IUE)가 오로라 자외선 방출을 확인하였다(Clarke et al. 1980). 그리고, Voyager 1호가 가시광 오로라 이미지를 처음으로 촬영하였고(Smith et al. 1979), Einstein Observatory가 처음으로 soft x-선 방출을 측정하였으며(Metzger et al. 1983), 최근에 ROSAT이 목성의 x-선 방출을 상세히 관측하였다(Gladstone et al. 1998). 현재 목성의 soft x-선은 고에너지 산소나 황의 이온에서 나오는 원자선 방출이라고 생각되고 있다(Waite et al. 1994; Cravens et al. 1995). 앞으로 1999년에 발사된 Chandra x-선 망원경으로 모든 거대 행성들의 고해상도 x-선 오로라 이미지들이 관측될 것이다.

Voyager/IRIS로 관측한 오로라 영역의 적외선 스펙트럼에서 스펙트럼 역전(spectral inversion)방법을 사용하

여 목성 오로라 영역의 성층권 온도가 처음으로 구해졌다(Kim et al. 1985). 구해진 온도는 1 mbar 압력에서 대략 185K로 예상되며, 이는 목성의 다른 지역의 동일 압력 수준에서 보다 15K 정도 높은 값이다. 1 μbar 고도 이상에서는 H<sub>3</sub><sup>+</sup> 방출선들이 온도계로 사용될 수 있다. 이 H<sub>3</sub><sup>+</sup>이온의 2와 4 μm에서의 회전 밴드를 분석하여 온도를 여러 연구팀이 구하였는데, 1 μbar 압력수준 이상에서 목성 고층대기의 온도가 900-1500 K로 나타났다.(Miller et al. 1990, Maillard et al. 1990; Oka and Geballe 1990; Kim et al. 1993).

최근에 1995년 이후로 목성 주위를 돌고 있는 Galileo 탐사선의 Solid State Imager (SSI)를 사용하여 목성의 가시광 오로라 이미지가 근접 촬영되었고(Ingersoll et al.1998), 자외선 오로라는 Galileo의 Ultraviolet Spectrometer(UVS)로 관측되었다(Ajello et al. 1998). Voyager 1, 2 호의 UVS 자료를 분석하여 다른 목성형 행성인 토성(Broadfoot 1981 a,b), 천왕성(Broadfoot 1986) 그리고 해왕성(Broadfoot 1989)의 오로라도 판명되었다.

행성의 오로라 영역의 주된 들뜸 과정들은 낙하하는 입자와 충돌에 의한 전자 전이나 회전 전이에 의해 일어난다. 그 후에 이 들뜬 입자들이 다른 분자와 충돌이나 복사로 에너지를 방출하게 된다. 입자 낙하에 의한 오로라 현상의 마지막 단계는 오로라 지역의 대기가 열적 평형에 도달하여 분자의 회전-진동 밴드영역에서 적외선을 방출하게 된다. 그러므로 이러한 과정들을 이해하기 위해서는 모든 분자들과 원자들간의 전자 전이, 해리 들뜸, 해리 이온화, 회전 및 진동 들뜸 단면적들을 알아야만 한다. 그러나 지구 대기에 존재하는 입자들간의 실험 데이터 값들은 비교적 잘 알려져 있지만, 그 외의 행성 대기 분자들(예를 들자면 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> 등)의 수치는 충분히 알려져 있지 않기 때문에 양자물리 이론 계산에 의존해야만 하는 상황으로 앞으로도 많은 연구자들의 노력을 필요로 한다.

### 2.3. Dimer 스펙트럼

Voyager/IRIS로 관측한 목성과 토성의 원적외선 스펙트럼의 미약한 흡수선들이 알려지고(Hanel et al., 1979), 이것이 H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> 다이머에 의한 것이라고 밝혀졌다(McKellar 1984: Frommhold et al.1984). 연이어 Fox and Kim(1984)이 토성의 위성인 Titan의 Voyager/IRIS 극적외선 스펙트럼에서 H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 다이머에 의한 흡수선을 찾아내었다. 그 후에 지상 관측이 가능한 2.1 μm 밴드로 목성(그림 3; Kim et al. 1995)과 토성 및 해왕성(그림 4; Trafton et al. 1997)에서 H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> 다이머를 관측하였다. 이는 2 μm 밴드의 지상 관측으로 H<sub>2</sub>-Ar과 He-Ne의 예리한 분광선들을 이용하여 가시광과 적외선 영역에서 강한 방출선이 없는 불활성 기체들의 관측이 가능할 것이라는 것을 의미한다. 이것은 Galileo 탐사체의 직접 측정 외에도 거대 행성들의 대기에 있는 불활성 기체의 함량을 알 수 있는 중요한

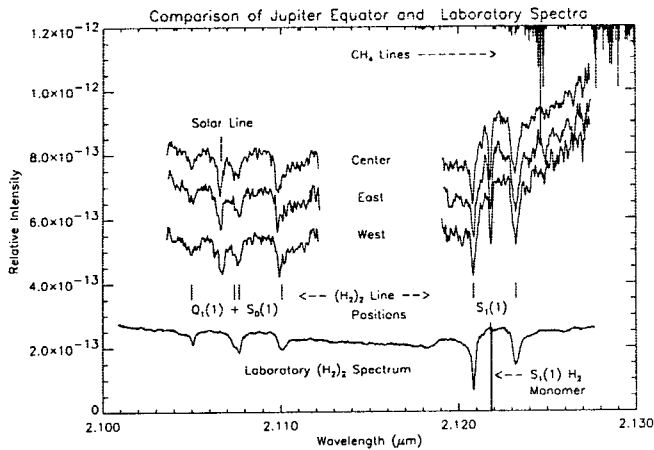


그림 3.— 목성의 2.10 - 2.13 $\mu\text{m}$  영역과 실험실  $\text{H}_2\text{-H}_2$  다이머 스펙트럼과의 비교.  $\text{H}_2\text{-H}_2$  분광선과  $\text{H}_2\text{S}_1(1)$  분광선, 태양 흡수선 등이 표시되어 있다. (Kim et al. 1995).

방법이다. 그러나 실험값도 많지 않은 다이머들의 스펙트럼은 가장 간단한  $\text{H}_2\text{-H}_2$ 의 경우도 겨우  $S_0(0)$ 와  $S_0(1)$  천이들의 극적외선에서 이론 모델만 있는 정도이다(Schaefer and McKellar 1990).

### 3. 행성의 분광학

Swing et al.(1941)이 행성의 분광 관측을 시작한 후로 행성 핵의 어미분자가 원시 태양계 성운의 구성 성분에 대한 정보를 제공할 수 있을 것이라고 생각해오고 있다. 어미 분자들의 함량비는 다만 분자, 라디칼, 이온들 간의 화학 반응에 대한 실험 또는 이론 값을 이용하여 행성 코마에서의 라디칼의 함량비로부터 유추할 수 있다. 이 유추된 행성 내의 어미분자의 함량비가 성간 얼음 티끌의 함량비와 비교되었으며, 이들이 거의 유사하므로 행성 물질들이 성간운으로부터 형성되었을 것이라는 것을 알게 되었다.(Bockelée-Morvan et al 2000; Irvine et al. 2000). 행성들의 스펙트럼은 풍부한 원자, 분자, 라디칼, 이온들을 보여준다. 그러나, 몇몇 라디칼들은 실험 스펙트럼들이 알려져 있지 않기 때문에 행성 핵의 스펙트럼에서 바로 확인해 낼 수가 없다. 자유 라디칼의 경우는 매우 활발히 반응을 하기 때문에 실험실에서 조차 스펙트럼을 얻기 힘들다(Herzberg 1971).

#### 3.1. 자외선 및 가시광 스펙트럼

자외선 영역에서 행성 관측은 사운딩 로켓과 비행선 망원경을 이용하게 되면서 시작되었다. (Jenkins and Wingert, 1972; Bertaux et al. 1973; Code et al. 1972; Feldman et al. 1974; Carruthers et al. 1974; Festou et al. 1979). 강한 H I Ly- $\alpha$  와 3085 Å 에서의 OH 방출을 관측함으로써, Whipple (1950, 1951)이 제안한 더러운 눈덩이 모형(dirty snowball model)이라 불리는 행성의 얼음 덩어

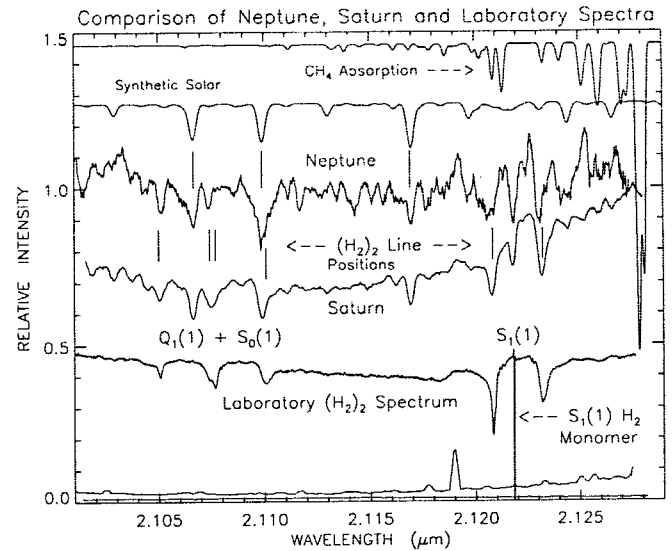


그림 4.— 토성과 해왕성의  $\text{H}_2\text{-H}_2$  다이머 분광선들을 보여준다 (Trafton et al. 1997).

리 모델을 확인하였다. 1978년 이후로, IUE가 거의 18년 동안 헬리 행성을 비롯한 많은 행성들을 관측하였다. 행성들의 자외선 스펙트럼에서 대개 H, C, S와 O의 강한 원자선 방출; CS, OH, 그리고  $\text{C}_2$  밴드의 라디칼선 방출;  $\text{CO}_2^+$ 의 이온 방출 등이 관측되었다.  $S_2$  방출선의 경우 행성 IRAS-Araki-Alcock 1983VII 과 최근의 밝은 행성들이었던 Hyakutake와 Hale-Bopp에서 만 관측되었다.

가시광 영역(3000 - 9000 Å)에서는 OH, NH, CH, CN,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$ ,  $\text{NH}_2$  등의 라디칼들(e.g., Arpigny et al. 1991; Brown et al. 1996),  $\text{CO}^+$ ,  $\text{OH}^+$ ,  $\text{CH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CO}_2^+$  같은 이온들(e.g., Wyckoff et al. 1996), 그리고 유일하게 안정된 분자인  $S_2$  (Kim et al. 1990) 가 관측되었다.

지난 50여 년간 가시광 영역의 분광 분해능이 ( $\lambda/\delta\lambda$ ) 1,000(Swings et al. 1941; Dossin et al. 1961)에서 100,000 (Brown et al. 1996) 까지 향상되었다. 가시광 영역에서의 고분해능 분광기술은 라디칼에서 나오는 수많은 방출선들에 관한 정보를 제공함으로써, 행성 코마 지역의 라디칼들의 상세한 형광이나 충돌에 의한 들뜸 과정을 연구를 가능하게 하였으며 (e.g., Schleicher et al. 1982; Kim et al. 1989), 일반 분자선들에 붙어있는 동위원소 분자선들을 구분해 내는 것도 가능하게 하였다(e.g., Kleine et al. 1994, 1995). 그럼에도 불구하고 Brown et al.(1996)이 3800-9900 Å 영역에서 수 백개의 미확인 분광선들을 정리할 수 있었을 정도로 아직도 연구해야 할 부분이 많다.

Kleine et al.(1995)은 헬리 행성의 고분해능 CN 스펙트럼을 분석하여  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  함량비가 95 +/- 12 임을 구했다. 이 결과는 태양에서 구한 값 90과 일치한다. 이 결과는 행성들이 태양계의 다른 천체들과 동일한 분자운에서 함께

생성되었음을 나타낸다.

3.2. 적외선 스펙트럼

1985년의 헬리 혜성 관측 이전에는 적외선 영역에서 혜성들의 저분해능 분광법을 이용하여 대기 투과가 가능한 3, 10과 20  $\mu\text{m}$  밴드 영역에서 먼지나 얼음들의 연속 방출선 관측만이 가능하였다(e.g., Tokunaga et al. 1984). 그러나 최근에는 ISO에 의해 Hale-Bopp 혜성의 7 - 45  $\mu\text{m}$  전 영역에서 먼지입자들의 적외선 스펙트럼을 관측할 수 있다 (Crovisier et al. 1997).

NASA의 Kuiper Airborne Observatory (KAO)의 FTS는 헬리 혜성 코마의  $\text{H}_2\text{O}$ 를 2.65  $\mu\text{m}$  밴드에서 7개의 분광선들로 성공적으로 분해하였다 (Mumma et al. 1986). 러시아의 헬리 혜성 탐사선 Vega는 저분해능의 infrared spectrometer (IRS)를 이용하여 헬리 혜성에서 2.5 - 5  $\mu\text{m}$   $\text{H}_2\text{O}$  밴드를 비롯하여  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  분자선들과  $\text{CO}$ 로 예상되는 분자 방출선들을 관측하였다(Moroz et al. 1987). 그 이후, Hoban et al.(1993)은 주기 혜성인 Swift-Tuttle 혜성에서  $\text{CH}_3\text{OH}$ 의 3.52  $\mu\text{m}$  밴드의 방출선들을 관측하였다.

최근의 Hale-Bopp, Hyakutake 혜성들의 고분해능 적외선 스펙트럼에서 여러 어미 분자들을 발견하였다. 특별히 대칭 구조 때문에 고유의 전기 이중극성이 없어서 전파 관측이 불가능한  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  과  $\text{C}_2\text{H}_2$  분자들을 관측하였다. Mumma et al.(1996)은 Hyakutake 혜성 코마에서  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  적외선 분자선들을 관측하였다. 그리고, Brooke et al.(1996)은 Hyakutake 혜성에서  $\text{C}_2\text{H}_2$ 의 3  $\mu\text{m}$  밴드 선들을 관측하였다. Hale-Bopp 혜성에서는  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ 와  $\text{HCN}$  등이 관측되었다.(Weaver et al. 1999).  $\text{OCS}$ 가 Hyakutake 혜성의 전파 관측에서 처음으로 관측되었으며(Woodney et al. 1997), Hale-Bopp 혜성에서도 적외선 4.85  $\mu\text{m}$ 에서 관측되었다 (Dello Russo et al. 1998). 구해진  $Q(\text{OCS})/Q(\text{H}_2\text{O})$  함량비는 Hyakutake 혜성에서  $3 \times 10^3$  이었으며 (Woodney et al. 1997), Hale-Bopp 혜성에서는  $3 - 5 \times 10^3$  로 나타났다 (Dello Russo et al. 1998).

3.3. 전파 스펙트럼

1990년대 초에 Bockelée-Morvan et al. (1991) 와 Crovisier et al. (1991) 등이 밀리미터파 관측으로  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  와  $\text{CH}_3\text{OH}$ 를 검출하기 전까지는 혜성의 전파 관측에는 성공적인 결과가 없었다. 그 전에는 다만 헬리 혜성과 Kohoutek 1973 XII 혜성의 마이크로파 관측으로  $\text{HCN}$ 을 관측했을 뿐이었다(e.g., Schloerb et al. 1987). 최근에 Hyakutake 와 Hale-Bopp 혜성의 전파 관측에서 많은 어미 분자들을 탐지하였다. Hyakutake 혜성에서  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HDO}$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HNCO}$ 를, Hale-Bopp 혜성에서  $\text{HCOOH}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{NH}_2\text{CHO}$ ,  $\text{SO}$ ,

$\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HNCO}$ 를 관측해내었다. (Lis et al. 1997; Crovisier and Bockelée-Morvan, 1999; Bockelée-Morvan et al., 2000).

Hyakutake 와 Hale-Bopp 혜성의 어미 분자들에서 구해진 함량비가 대략 성간 얼음이나 뜨거운 분자운 핵과 원시 별 주위의 양극 흐름의 관측에서 유추된 값들과 대략적으로 일치 한다 (e.g., Bockelée-Morvan, et al. 1998; Irvine et al. 2000). 적외선 관측과 전파 관측으로 구해진 함량비는 혜성 물질들이 주로 성간 얼음을 만드는 과정과 비슷한 비평형 과정으로 만들어졌음을 암시한다. 그 후에 원시 태양계 성운에서 행성들이 만들어지는 동안에는 혜성 물질의 구성비가 크게 변하지 않은 것 같이 보인다(e.g., Bockelée-Morvan, et al. 1998). 이러한 새로운 발견은 이론가들에게는 새로운 도전이 될 것이다.

Hyakutake 혜성에서  $\text{HDO}$ 와  $\text{H}^{13}\text{CN}$ , Hale-Bopp 혜성에서  $\text{DCN}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{HC}^{15}\text{N}$ ,  $\text{C}^{34}\text{S}$  과 같은 동위원소 분자들이 탐지되었다. (e.g., Bockelée-Morvan, et al. 1998; Meier et al. 1998a; Meier et al. 1998b; Crovisier and Bockelée-Morvan, 1999). Hyakutake 혜성과 Hale-Bopp 그리고 헬리 혜성의  $\text{H}_2\text{O}$  와  $\text{HDO}$  분광선에서 구해진 D/H 함량비가  $3 \times 10^4$  정도 이다. 이 값은 대략 분자운의 뜨거운 핵의 D/H 값과는 비슷하나 탄소형 운석이나 성간 얼음에서 구한 값보다는 작은 값이다. 혜성들의 D/H 값이 성간 얼음의 값보다 작다는 것은 원시 태양계 성운의 내부에서 확산 과정을 통해 본래의 성간 얼음의 높은 D/H 값에서 낮아졌음을 암시한다. (Bockelée-Morvan, et al. 1998; Bockelée-Morvan et al. 2000; Irvine et al. 2000). 위의 세 혜성들에서 구해진 D/H 함량비가 지구의 바다의 평균 값, SMOW (Standard Mean Ocean Water)보다 두 배 정도 크다는 것은 단지 혜성이 지구 바다의 유일한 공급원이 아님을 암시한다 (Meier et al. 1998b).

$\text{HCN}$ 과  $\text{DCN}$  분광선에서 구해진 D/H 함량비가  $2.3 \times 10^3$  이며(Meier et al. 1998a), 이는 분자운의 뜨거운 핵에서 구해진 값들의 범위 내에 있으며(Hatchell et al. 1998) 성간 이온-분자 간의 화학 모델에서 계산된 값과도 일치한다 (Millar et al. 1989). 그러나, 뜨거운 분자운 핵은 아직 충분히 평형 상태에 도달하지 못한 상태이므로 관측된 값은 원래의 성간 얼음의 높은 D/H 값보다 낮게 측정되었을 지 모른다 (Hatchell et al. 1998). 그러므로 혜성 물질들과 성간 물질들의 관계를 정확히 알기 위해서는 추가적인 관측과 분자들에 대한 실험 및 이론 연구가 필요하다. C, N, S 같은 중원소들의 분리과정이 혜성 핵 내의 화학과정에 민감하지 않으므로 이들의 동위원소비는 우주 전체적으로 일정할 것이다.

4. 결론

지난 30여년간 기록해 온 거대 행성들과, 타이탄, 혜성들의 대기 분자들에 대한 성공적인 분광 관측과 이 결과로

서 구해진 구성물질들의 함량비는 행성 천문학자들에게 풀어야 할 도전적인 과제를 던져주었다. 이는 이런 물질들의 함량비에 근거해 어떻게 태양계의 기원과 화학적 진화를 설명할 수 있는가 하는 것이다. 현재 거대 행성의 대기에서 구해진 함량비는 거대 행성들의 핵과 대기가 주위의 원시 태양계 성운의 기체들과 얼음 덩어리의 미행성들로부터 만들어졌다는 행성 형성 시나리오를 지지한다. 그리고 Hyakutake와 Hale-Bopp 혜성들에서 구해진 구성 분자의 함량비는 분자운의 뜨거운 핵이나 성간매질의 얼음들의 함량비와 거의 같다.

그러나, 거대 행성들의 오로라와 대기광에 대해 많은 분광과 이미지 관측이 이루어졌으나 이에 관여하는 행성 분자들의 충돌 단면적과 같은 물리량들에 대한 정보가 아직 불충분하다. 그러므로 거대 행성들의 오로라와 대기광에 대한 이해는 지구 오로라와 대기광 현상에 비해 매우 미흡한 상태다. 그리고 아직도 혜성들과 행성들의 스펙트럼에서 수백개의 분광선을 판명해 내지 못하고 있으므로, 혜성들과 거대 행성을 구성하는 분자선들에 대한 충분한 분광학적 연구가 필요하다. 오로라 및 대기광 같은 현상들이나 태양계 행성에 대한 이해를 높이기 위해서는 앞으로 추가적인 관측과 더불어 분자들에 대한 실험 및 이론 연구가 절대적으로 필요하다. 향후 계획된 우주 탐사 계획들과 지상 관측과 분자들에 대한 실험과 이론 연구가 모두 성공적으로 수행된다면, 거대 행성들과 혜성들 대기 내의 분자들의 화학과정과 태양계의 형성과 진화를 이해하는데 보다 진보된 발전을 가져올 것이다.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 학술진흥재단의 2000년 협동연구과제 연구비에 의해 연구되었다. (KRF-99-042-D00140 D6101).

#### 참고문헌

- Ajello, J., Shemansky, D., Pryor, W., 1998, *J. Geophys. Res.*, 103, 20125
- Arpigny, C., Dossin, F., Wozzyczek, A., Donn, B., Rahe, J., and Wyckoff, S., 1991, An abstract presented at the International Conference on Asteroids, Comets, Meteors 1991, Flagstaff, Arizona, June 24-28
- Ballester, G.E., Miller, S., Tennyson, J., Trafton, L.M., and Geballe, T.R., 1994, *Icarus*, 107, 189
- Bertaux, J.L., Blamont, J.E., and Festou, M., 1973, *A&A*, 25, 415
- Bézard, B., Encrenaz, T., Lellouch, E., and Feuchtgruber, H., 1999, *Science*, 283, 800
- Bockelée-Morvan, D., Colom, P., Crovisier, J., Despois, D., and Paubert, G., 1991, *Nature*, 350, 318
- Bockelée-Morvan, D., Gautier, D., Lis, D.C. et al., 1998, *Icarus* 133, 147
- Bockelée-Morvan, D.C. Lis, J.E. Wink et al., 2000, *A&A*, 353, 1101
- Broadfoot, A., Belton, M., Takacs, P. et al., 1979, *Science*, 204, 979
- Broadfoot, A., Sandel, B., Shemansky, D., McConnell, J., Smith, G., Holberg, J., Atreya, S., Donahue, T., Strobel, D., and Bertaux, J., 1981a, *J. Geophys. Res.* 86, 8259
- Broadfoot, A., Sandel, B., Shemansky, D., et al., 1981b, *Science*, 212, 206
- Broadfoot, A., Herbert, F., Holberg, J., et al., 1986, *Science*, 223, 74
- Broadfoot, A., Atreya, S., Bertaux, J., et al., 1989, *Science*, 246, 1459
- Brooke, T.Y., Tokunaga, A.T., Weaver, H.A., Crovisier, J., Bockelee-Morvan, D., and Crisp, D., 1996, *Nature*, 383, 606
- Brown, M.E., Bouchez, A.H., Spinrad, H., and Johnskrull, C.M., 1996, *ApJ*, 112, 1197
- Burke, L., and Franklin, K., 1995, *J. Geophys. Res.* 60, 213
- Carruthers, G.R., Opal, C.B., Page, T.L., Meier, R.R., and Prinz, D.K., 1974, *Icarus*, 23, 526
- Clarke, J., Moos, H., Atreya, S., and Lane, A., 1980, *ApJ*, 241, L179
- Code, A.D., Houck, T.E., and Lillie, C.F., 1972, *The Scientific Results from Orbiting Astronomical Observatory (OAO-2)*, ed. A.D. Code, NASA SP-310, p. 109
- Cravens, T. E., Howell, E., Waite Jr., J. H., and Gladstone, G. R., 1995, *J. Geophys. Res.*, 100, 17153
- Crovisier, J., Despois, D., Bockelée-Morvan, D., Colom, P., and Paubert, G., 1991, *Icarus*, 93, 246
- Crovisier, J., Leech, K., Bockelée-Morvan, D., Brooke, T.Y., Hanner, M.S., Altieri, B., Keller, H.U., and Lellouch, E., 1997, *Science*, 275, 1904
- Crovisier, J., and Bockelée-Morvan, D., 1999, *Composition and Origin of Cometary Materials*, Kluwer Academic Pub., Netherlands, p. 1
- Dello Russo, N., Disanti, M.A., Mumma, M.J., Magee-Sauer, K., and Rettig, T.W., 1998, *Icarus*, 135, 377
- Dossin, F., Fehrenbach, Ch., Haser, L., and Swings, P., 1961, *Ann. Astrophys.* 24, 519
- Drossart, P., Fouchet, Th., Crovisier, J., Lellouch, E., Encrenaz, Th., Feuchtgruber, H., and Champion, J.-P., 1998, *Proceed. of the Conf. The Universe as seen by ISO*, Paris, France
- Feldman, P.D., Takacs, P.Z., Fastie, W.G., and Donn, B., 1974, *Science*, 185, 705



Woodney, L.M., McMullin, J., and A'Hearn, M.G.,  
1997, Planet. Space Sci. 45, 717  
Wyckoff, S., Fox, R., Wehinger, P., Heyd, R., and  
Ferro, A., 1996, BAAS, 28, 1093