

## 밀리미터파를 이용한 서울상공 성층권 오존의 지상관측

박인희 · 가수현 · 김경희 · 권미라 · 오정진

숙명여자대학교 지구환경연구소

## Ground-based Millimeter Observations of Stratospheric Ozone above Seoul

Inhee Park, Soohyun Ka, Kyung-Hi Kim, Mi Ra Kwon, Jung Jin Oh

Research Institute of Global Environment, Sookmyung Women's University, Seoul, Korea

The  $J = 6_{1,5}-6_{0,6}$  rotational transition of stratospheric ozone at 110.8359 GHz has been observed using a Schottky diode mixer receiver at Sookmyung Women's University in Seoul during Jan 22 - Feb 16, 2002 by the load switching method. The instrument consists of a millimeter wave receiver, a multi-channel spectrometer and a computer. The mixer block is cooled to a temperature of 20 K by a closed cycle refrigerator of liquid He and the system temperature was determined to be about 850 K. The observed spectrum has been analyzed to determine variations in the ozone mixing ratio at various altitudes above Seoul. The retrieval algorithm used to obtain the data will be discussed and the variations of the altitude profiles will be compared.

**Key words:** stratosphere, ozone, rotational spectrum, millimeter wave, ozone profile

### 1. 서 론

대기권은 지구 표면에서 약 120 km정도이다. 대기는 수많은 종류의 분자들을 포함하고 있으며, 이러한 분자들은 고도에 따라 각 분자의 분포도를 달리하는 것이 일반적이다. 오존은 성층권인 대략 10 km~50 km 영역에 90%이상 존재하며, 이를 성층권 오존(stratospheric ozone)이라 하고, 대류권인 10 km 이하에 존재하는 10%의 오존을 대류권 오존(tropospheric ozone)이라 한다. 고도에 따른 오존의 밀도를 보면, 20~35 km 부근에서 최대 밀도를 이루고 있다. 이 범위에서의 오존층은 자외선 B(280 nm-315 nm) 영역의 에너지를 흡수하여 지표면에 도달되는 것을 방지해 준다. 오존은 산소 원자 3개가 화학적으로 결합해 있는 것으로 240 nm보다 짧은 파장의 빛을 흡수한 산소 분자는 두 개의 산소 원자로 해리되는데, 활성이 큰 산소원자는 주변의 산소 분자와 반응하여 오존을 생성한다. 이 오존은 다시 UV를 흡수하여 산소를 생성하므로 오존의 파괴와 생성은 균형을 이루게 된다.

오존층이 자외선과 그 밖의 태양복사에너지를 흡수

함에 따라 성층권에서의 열의 근원이 되어 지구 대기 순환에 영향을 준다. 즉, 오존층이 기후변화와 밀접한 관련을 가지므로 생명체에 직간접적인 영향을 미치게 된다. 그러나 1980년대 들어서 남극에서 오존층의 파괴된 것이 발견되고, 그에 따른 피해가 발생함에 따라 오존층 파괴의 원인과 이를 방지하기 위한 국가간 협약이 이루어졌다. 또 각국에서 이를 설명하기 위한 오존 파괴 물질들과 이와 관련된 반응 메커니즘 등이 연구되고 있다. 이처럼 오존층에 대한 연구는 보다 나은 미래 생활을 위해서도 꼭 필요한 것이다.

중층대기에 존재하는 오존 파괴 물질과 오존과의 반응성을 연구하는 방법으로 오존 분자는 전기쌍극자모멘트(electric dipole moment)와 자기쌍극자모멘트(magnetic dipole moment)와의 상호작용력에 의하여 일어나는 오존분자의  $6_{1,5}-6_{0,6}$  전이에 해당하는 110.836 GHz 방출 스펙트럼을 고감도 성능을 갖는 밀리미터파 수신기 소자들을 이용해 제작된 시스템으로 지상관측을 하게 된다. 밀리미터파를 이용한 지상관측법은 기존에 사용하던 다른 관측에 비해 여러 가지 면에서 장점을 지닌다. 높은 주파수를 사용하는 광학적

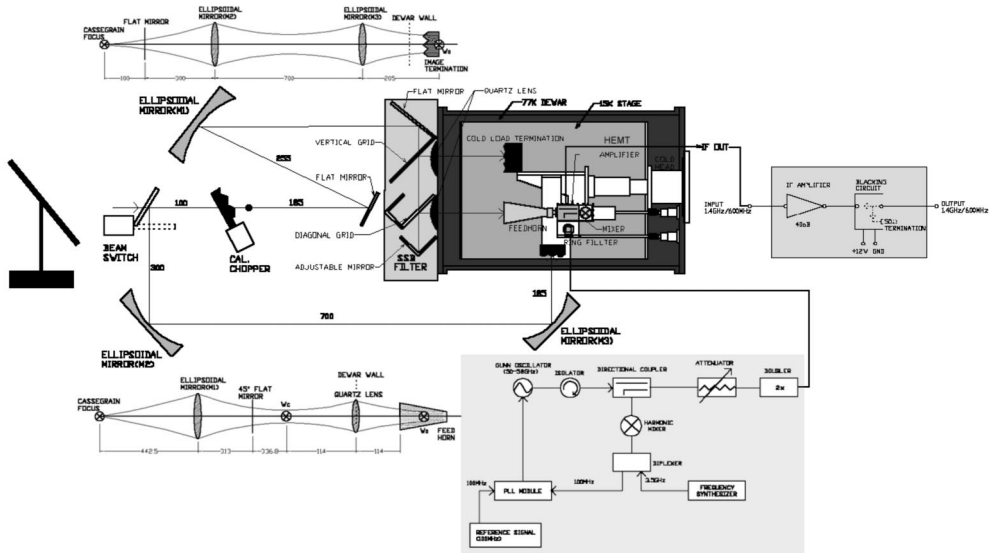


Fig. 1. Scheme of the ozone receiver system developed at Sookmyung Women's University.

방법에 비해 밀리미터파는 대기 중의 연무질이나 수증기 입자 등에 의한 산란 및 흡수 영향을 적게 받기 때문에 대기에 의한 영향을 거의 받지 않고 관측이 가능하다. 또한 대기 입자들의 전파 복사를 직접 수신하기 때문에 별도의 광원을 필요로 하지 않고, 태양이 없는 밤에도 관측이 가능하여 일변화 및 연변화 관측 자료를 얻을 수 있다. 또한 분자들의 회전스펙트럼을 얻을 수 있고, 스펙트럼의 해석으로 분자들의 구조에 관한 정보를 얻을 수 있고, 광대역 관측으로 같은 조건에서 여러 분자의 동시 관측이 가능하며, 오존과 반응을 하는 분자들의 반응성을 알아낼 수 있다. 헤테로다인 수신 기술을 사용하여 분해능이 높은 스펙트럼을 얻을 수 있다.

2. 실험방법

헤테로다인 수신방식의 밀리미터파 오존 수신기 시스템은 안테나, 준광학계, 국부발진기, 믹서, 중간주파수 시스템, 분광기시스템, 컴퓨터로 구성되어 있다(Fig. 1).

오존신호는 관측소의 안테나에 반사되어 준광학계 부분을 통과해 평면경과 반사경을 거쳐 단측파대여파기(Single Side Band filter)로 입력된다. 혼을 통하여 믹서로 들어가는 신호는 국부발진주파수와 차이에 의해 중간주파수를 만들어내고, isolater를 거쳐 HEMT 증폭기로 증폭된 후 필터뱅크 분광기로 들어간다. 이후 컴퓨터로 입력되어 신호처리가 된다.

$$T_{sys} = T_{rec} + T_{atm}$$

시스템의 온도는 대기와 수신기에 의한 잡음온도의 영향을 받는다.

이런 잡음 온도는 믹서에 의해 낮춰질 수 있는데, 본 연구에서는 schottky 믹서를 사용하였다. 잡음온도의 변화( $\Delta T_{noise}$ )는 관측 스펙트럼의 주파수 분해능( $\Delta f$ )와 관측시간( $t_{obs}$ )과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\Delta T_{noise} \propto \frac{T_{sys}}{\sqrt{\Delta f t_{obs}}}$$

대기에 의한 잡음온도는 수십K인데 비해 오존분자의 신호는 10K로 잡음온도에 비해 낮다. 따라서 관측자료를 적분하여 S/N비를 높여야 한다. 관측신호의 밝기 온도는 적분 후에도 일정하므로 수신기의 잡음온도를 낮추는 것이 좋은 관측 자료를 얻기 위한 방법이다. 수신기의 잡음온도는 Y-factor 방법을 이용해서 측정하였다.

Hot load에 의한 온도( $T_h$ )는 실온의 물체에서 방출되는 온도로 하였고, cold load에 의한 온도( $T_c$ )는 액체질소와 열평형을 이루고 있는 물체의 밝기 온도로 하여 입력 수신기의 잡음 온도를 측정하였다.

$$Y = \frac{T_h + T_{rec}}{T_c + T_{rec}}$$

$$T_{rec} = \frac{T_h - Y T_c}{Y - 1}$$

본 실험에서 수신기에 의한 잡음온도로 약 270K을 얻었다.

오존 관측 수신기의 앞단부는 USB(upper side band)만을 관측하기 위해 LSB를 제거하기 위한 여파기를 사용한다. 이러한 여파기는 Martin-Puplett 간섭계의 원리를 적용한 것과 Fabry-Perot 여파기 RPI (reflective polarizing interferometer) 등이 있다. 본 시스템의 여파기는 Martin-Puplett 간섭계의 원리를 이용해 설계된 여파기를 사용하고 있다. 관측하고자 하는 신호는 수직 편파만을 인식할 수 있기 때문에 수평편파를 수직편파로 바꾸고, 제거하고자 하는 이미지는 수평편파로 유지될 수 있도록 구성되어 있다. 여파기를 통해 들어오는 신호는 quartz 렌즈를 거치는데, 대기와 quartz 렌즈 사이의 임피던스 매칭을 위해서 공기 유전율과 quartz 유전율의 중간값을 갖는 teflon을 중간주파수 파장의 1/4에 해당되는 두께로 입히게 된다. 임피던스 매칭을 위한 방법으로 파장의 1/4값에 해당되는 간격으로 흡을 파서 사용하는 경우도 있다.

54.5 GHz-Gunn 발진기와 2체배기를 사용하여 국부 발진을 얻고 있으며, 국부발진기에서 나오는 신호와 관측되는 신호는 링 필터(ring filter)를 통해 믹서로 들어가 중간주파수를 내게 된다.

$$V_{RF} - V_{LO} = \pm V_{IF}$$

중간주파수는 증폭기를 이용해 증폭된다. 직접 증폭시키는 방법으로는 FET(field mobility transistor)와 HEMT(high electron mobility transistor)를 이용하여 입력 주파수를 그대로 증폭하게 된다. FET를 이용한 증폭은 매우 안정되어 있고 작동법이 쉽다. HEMT는 FET보다 잡음이 더 낮기 때문에 초저온으로 냉각하여 천체 관측용으로 사용되고 있다. 본 연구소에 사용된 증폭기는 HEMT 증폭기로  $\pm 15V$ 의 전원이 공급되며 믹서와 증폭기 사이에는 isolator를 두어 변환손실을 줄일 수 있도록 했으며 관측하는 동안 헬륨을 이용해 25 K으로 냉각된 상태를 유지하게 된다.

고도에 따른 오존 농도는 관측된 오존 스펙트럼 해석을 통해 얻을 수 있는데, 이 방법은 대기압에 따라 나타나는 높은 고도일수록 스펙트럼 폭이 좁아지는 압력 넓힘에 따른 것이다. 이에 따른 오존의 밝기 온도  $T_R(f)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_r(f) = \int T(z) \alpha(f, z) n(z) R(z) \sec \theta dz$$

여기서  $z$ 는 고도,  $f$ 는 오존 스펙트럼의 중심으로부터의 주파수 offset,  $T(z)$ 는 오존분자로부터 방출되는 밝기 온도,  $\alpha(f, z)$ 는 오존 라인에 대한 각분자들의 흡광계

수,  $n(z)$ 는 대기에 있는 모든 분자들의 밀도,  $R(z)$ 는 오존의 부피혼합비,  $\theta$ 는 천정고도에 해당한다.

오존에 의해 방출되는 지상 관측 신호는 대류권에 의해서 부분적으로 흡수되어  $T_{O_3}$ 에서 광학적 깊이  $\tau$ 를 갖는 대기에 의해  $T_{O_3} \exp(-\tau)$ 로 감소된다. 오존의 신호 이외에 대류권에 의한 배경 잡음  $T_{atm} \exp(1-\tau)$ 과 수신기의 잡음  $T_{rec}$ 이 측정되는데, 이러한 신호 이외의 잡음은 frequency-switching mode 혹은 load-switching mode를 이용해 보정하게 된다.

신호의 입력세기와 밝기온도(brightness temperature) 사이의 근사적 선형관계를 다음과 같이 안테나 온도(antenna temperature)라고 정의한다면,

$$T_a = \frac{P}{k}$$

수신기의 출력전압으로부터 안테나 온도  $T_a$ 를 구하고, 안테나 자체의 손실과 대기 감쇠를 보정한 corrected antenna temperature  $T_a^*$ 를 구하는 것이 calibration의 목적이다. 수신기의 출력 전압은 안테나 온도의 단위로 보정을 해주는 과정에서 frequency switching과 chopper-wheel method를 이용하였다. Frequency-switching mode에서는 오존을 포함하고 있는 신호  $T_{on}(i)$ 와 오존이 없을 때의 신호  $T_{off}(i)$ 를 측정하게 된다.  $T_{off}(i)$  신호는 국부 신호 주파수를 변화시켜서 얻을 수 있다.

$$T_{on} = T_a = T_s e^{-\tau_0 A} + T_{atm} (1 - e^{-\tau_0 A})$$

$$T_{off} = T_{atm} (1 - e^{-\tau_0 A})$$

$$\Delta T_{on-off} = T_{src} e^{-\tau_0 A}$$

$$T_{src} = \frac{\Delta T_{on-off}}{e^{-\tau_0 A}}$$

수신기로 입력되는 feed horn의 앞단에 회전 chopper를 설치하여, sky와 ambient를 번갈아 관측하며 대기 효과를 제거하는 chopper-wheel method를 사용하여 대기에 의한 흡수 항인  $e^{-\tau_0 A}$ 를 보정하였다.

$$\Delta T_{chop} = T_a(amb) - T_a(sky) = T_{amb} - T_{atm} (1 - e^{-\tau_0 A})$$

chopper-wheel method에서 가장 중요한 한가지 가정을 하는데, 그것은 안테나 앞단에서 측정되는 온도  $T_{amb}$ 와 대기의 온도  $T_{atm}$ 이 같다고 한다면, 다음의 식과 같이 대기에 의한 흡수항  $e^{-\tau_0 A}$  역시 보정할 수 있다.

$$\Delta T_{chop} = T_{amb} e^{-\tau_0 A}$$

$$e^{-\tau_0 A} = \frac{\Delta T_{chop}}{T_{amb}}$$

$$T_{src} = \frac{\Delta T_{on-off}}{\Delta T_{chop}} \cdot T_{amb}$$

최종적으로 컴퓨터에 저장된 결과는 전압의 단위를 갖는 값 V로서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = A \cdot T_{sys}$$

$$T_{sys} = T_a + T_{rec}$$

즉, 기기로부터 출력되는 최종 결과 V로부터 안테나 온도  $T_a$ 를 구하기 위해서는 load-switching method를 사용하였다. 이 방법은 두 개의 흑체 복사를 reference 온도로 사용하는 것인데, cold load로는 77 K의 액체 질소를, hot load로는 absorber가 붙어 있는 chopper가 내려왔을 때의 온도 300 K를 reference 온도로 하였다.

$$V_{atm} = A(T_b + T_{rec})$$

$$V_c = A(T_c + T_{rec})$$

$$V_h = A(T_h)$$

$$T_b = \frac{T_h - T_c}{V_h - V_c} (V_{atm} - V_c) + T_c$$

### 3. 실험결과 및 고찰

2002년 1월 22일부터 2월 16일까지 110.8359 GHz를 중심으로 상측파대와 하측파대로 각각 64 MHz, 총 대역폭이 128 MHz의 영역에 따른 밝기 온도로 나타나는 오존 스펙트럼을 관측하였다(Fig. 2).

스펙트럼의 세기는 128 MHz 영역 내에서 약 6 K

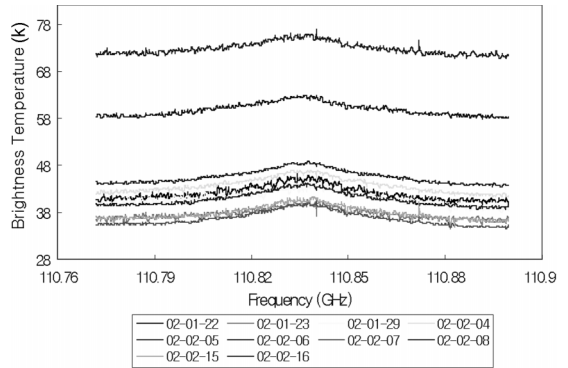


Fig. 2. Observed ozone spectra at Sookmyung Women's University.

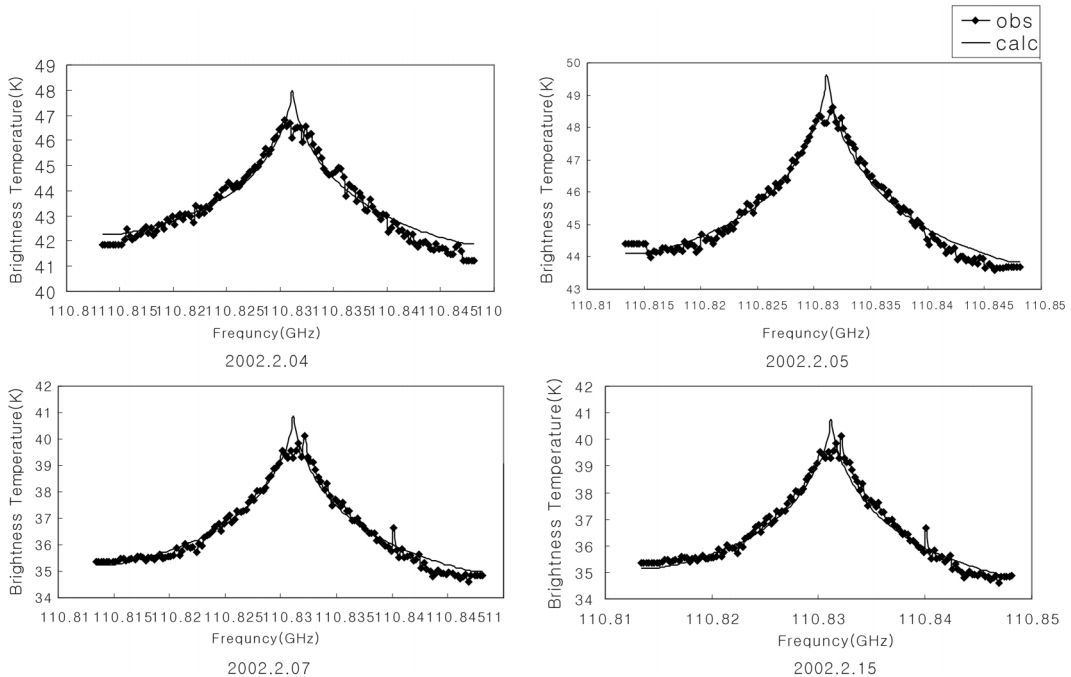


Fig. 3. Observed and calculated spectra during February, 2002(selected).

로 측정되었는데, 이는 성층권으로부터 대류권을 통과하는 서울상공의 오존량과 대략적으로 일치하는 값이다(Fig. 3).

오존 스펙트럼의 세기가 가장 강한 중심부근은 주로 압력이 낮은 고층영역의 분자의 기여에 따르며, 스펙트럼 바깥부분은 압력이 높아 분자간의 충돌에 의해 넓은 선폭을 가지는 저층영역 분자의 기여에 따른다. 이 원리로부터 밝기온도로 관측되는 초기 자료로부터 성층권의 오존의 고도별 연직분포에 추정이 가능하다.

대략적으로 밝기온도는 다음과 같이 고도에 따른 수밀도와 기중합수로 표현되는데,

$$T_b = \sum N(h) \cdot W(v, h) \cdot \Delta h$$

이 식으로부터 고도에 따른 수밀도를 구하는 과정을 역산법이라고 한다. 여러가지 역산법 중에서 우리는 Rogers' Optimal Estimation Method를 사용하여 밝기온도로부터 오존의 고도별 연직분포를 도출하였다. 날짜별로 관측된 오존농도의 변화는 Fig. 4에 보이고 있다.

지상관측의 특성상 오존분자가 대류권을 통과해서 지상에 있는 수신기로 검출되는 과정에서 대류권의 영향을 받기 때문에, 그 결과의 정확성을 검증하기 위해서는 대류권의 영향을 받지 않은 위성 관측 데이터와 비교하는 과정이 필요하다.

Fig. 4에서는 위도부근 북위 37도에서 관측된

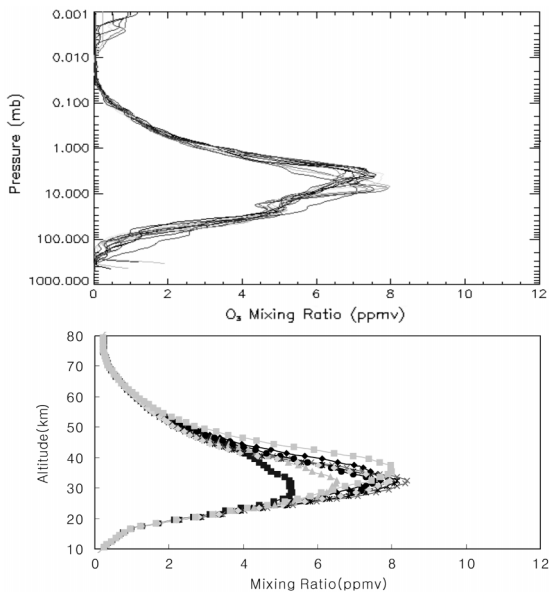


Fig. 4. Comparison of HALOE(above) and SMU(below) observation.

HALOE 위성 데이터와 비교해 보았다. 압력-고도 변환을 하여 위성관측과 지상관측의 결과를 비교해 보면, 대체적으로 고도 30 km 부근에서 오존 최대 농도로 분포되어 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 위성관측에 비해 밀리미터파를 이용한 지상관측방법을 통해 밤과 낮의 뚜렷한 변화를 관찰할 수 있는 연직 고도 프로파일을 얻을 수 있었으므로, 관측에서 사용된 오존 수신기의 성능을 검증해 볼 수 있었다. 압력-고도 변환을 하여 위성관측과 지상관측의 결과를 비교해 보면, 대체적으로 고도 30 km 부근에서 오존 최대 농도로 분포되어 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

관측 결과는 대기 중의 수증기에 의한 투과도를 고려하여 2차식으로 온도보정을 하였다. bias 온도는 주로 수증기에 의한 것으로 이로 인한 투과도가 계산되었고 보통 70~85%의 투과도로 나타났고 이를 스펙트럼에 반영하였다. 기타 스펙트럼의 습도에 영향을 미치는 요인을 모두 보정하였으며 결과적으로 5% 미만의 오차 범위 내에서 오존 농도가 결정되었다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부의 환경기술개발사업의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

### 참고문헌

- 1) Michael A. Janssen, "Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry", 1993, John Wiley & Sons, Inc.,
- 2) 정현수, 한석태, 이창훈 공역, "밀리미터파 공학 (기초와 응용)", 문운당, 1998, 269-313
- 3) 한국천문연구원, "서브-밀리미터 전파 수신기 개발(I) 최종보고서", 1994
- 4) 천문우주과학연구소, "전파망원경에 의한 관측기술 개발(2차년도)", 1987
- 5) 민영철, "전파 천문학", 동양문화사, 1994, 141-203.
- 6) WMO Global Ozone Research and Monitoring Project PROJ NO.18, "Report of the International Ozone Trends Panel 1998", 1988, 111-120
- 7) Kin-aki Kawabata, Hideo Ogawa, and Yoshinori Yonekura, J. Geomag. Geoelectr., 1994, 46, 755-770
- 8) Kin-aki Kawabata, Hideo Ogawa, and Yoshinori Yonekura, J. Geomag. Geoelectr., 1996, 48, 353-360
- 9) C. D. Rodgers, Reviews of Geophysics and Space Physics, 1976, 14(4), 609-624
- 10) Moustafa T. Chahine, J. Atmospheric Science, 1970, 27, 960-967