

夜間大気光 O₂ Atmospheric (0-0) 及び OH Meinel band のロケット
観測

高野 元春・渡辺 隆・中村 正年

(1989年9月12日受理)

Rocket measurements of O₂ Atmospheric (0-0) and OH Meinel bands
in the night airglow

By

MOTOHARU TAKANO, TAKASHI WATANABE AND MASATOSHI NAKAMURA

INSTITUTE OF PHYSICS, UNIVERSITY OF TSUKUBA

Abstract: The O₂ atmospheric band and the OH Meinel bands have been simultaneously observed by rocket-borne photometers at Uchinoura (31°N) on August 24, 1981 and September 13, 1982 respectively. The peak emission was found at the altitudes of 93.5-95.5km for the O₂ atmospheric band and 87-89km for the OH Meinel bands respectively and these altitudes are in good agreement with the previous observations. Atomic oxygen densities, which are determined from the emission intensity of the O₂ atmospheric band, are capable to explain the altitude profiles of the observed OH Meinel bands.

概 要

ロケットに搭載したマルチカラー・フォトメーターを用いて、夜間大気光 O₂ atmospheric (0-0) band 及び OH Meinel band の同時観測を行った。

O₂ atmospheric (0-0) band の発光層のピーク高度は94km 付近に見いだされた。また OH Meinel band では高度88km 付近であった。この結果はわれわれの前回までの観測と一致した。強度の絶対値は O₂ atmospheric (0-0) band が6.1-10.3kR であった。OH (8-3), (7-3), (6-2) band ではそれぞれ240, 1450, 660R となった。この値は地上観測及び他のロケット観

測にはほぼ等しい。

この観測で得た O₂ atmospheric (0-0) band の強度より酸素原子密度を求めた。得られた酸素原子密度は高度96km 付近で最大となり高度90-94km に構造が現れ酸素原子の直接測定ともよく一致する結果が得られた。この酸素原子密度を用いて O₃+H 反応による OH の大気光強度を計算すると、強度の絶対値も高度分布も今回の観測値によく一致することがわかった。また OH の消光で重要な働きをする酸素原子の反応係数の大きさを観測と実験との比較から推定することができた。

同時に観測した OH (7-3), (6-2) band の高度分布は良く似ており、強度の絶対値も O₃+H 反応による計算値と一致することから、HO₂+O 反応による OH の生成は小さいことが確かめられた。

重要語 ロケット観測, 大気光, OH Meinel band, O₂ atmospheric (0-0) band, 酸素原子密度

1. 始め

Meinel (1950) [23]、が夜間大気光中に OH の発光スペクトルを見いだして以来、その励起機構解明のための観測が数多くなされてきた。大気光発光層の高度とプロファイルは大気光を励起する大気成分の高度分布を反映するので、ロケットによる発光層の観測は励起機構の解明に重要である [1] [8] [9] [12] [13] [16] [19] [21] [31] [37] [39] [41]。

地上で観測された OH 大気光スペクトルの中に、励起振動レベルが10以上のバンドが存在しないことから



が OH 大気光の主要な励起反応であることが解っている [2] [14]。他方 OH 大気光の振動温度や回転温度の解析から付加的な励起反応として



の存在が指摘されている [26] [35] がこの反応がどの程度寄与しているかについては未だよくわかっていない。(1)式において OH の生成にかかわる O₃ は夜間下部熱圏の化学反応を支配する酸素原子 (O) の三体反応により生成されるが一方、O は再結合により励起状態の O₂ を生成する。O₂ の大気光 O₂ atmospheric (0-0) band (以下 O₂ A-band) はこの反応で生成される O₂ (b¹Σ_g⁺) からの遷移による発光である。それ故 OH 及び O₂A-band の二つの大気光を同時に観測することによって、これらの励起機構がより明確になることが期待できる。

O₂ (b¹Σ_g⁺) は単純な



の三体反応で生成されると思われていた [39] が、近年





の二段階励起が主張されるようになって来た[11][17][41]。しかし中間励起状態 O₂* が不明であり未だ結論は得られていない。

我々はロケットに搭載したフォトメーターを用いて OH Meinel band 及び O₂A-band の高度分布の同時観測を行った。O₂A-band の高度分布より O 密度を求め、これを用いて OH Meinel band の発光プロファイルを説明することを試みた。

2. 実験概要

表1に実験概要を示す。ロケット観測に使用した大気光観測装置は multi-color filter photometer である。装置は payload の中段に設置され、ロケットスピン軸から30°の方向から採光する。フィルターの透過率は monochromator (CT-25) を用い、フォトメーターの絶対感度は低輝度標準ランプ[34]を用いて測定した。また飛翔中のフォトメーターの感度は蛍光塗料を用いてチェックされた。光検出器の出力に含まれる暗電流を除去するため phase sensitive detector により交流増幅を行った。August 24, 1981の実験は O₂ Herzberg I

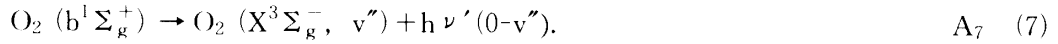
Table 1. Summary of the rocket experiments.

Flight Number	S310. 10	K9M. 75		
Location	Uchinoura, Japan			
Latitude	31°15'N			
Longitude	131°05'E			
Launch date	August 24, 1981	September 13, 1982		
Launch time	21:00 J. S. T.	21:30 J. S. T.		
Apogee	186 km	322 km		
Rocket	Filter central wavelength	Filter bandwidth	Field of view (full angle)	Airglows
S310. 10	7325A	120A	3°	OH (8-3)
	7640A	150A	3°	O ₂ atmospheric (0-0)
	7150A	125A	3°	continuum
K9M. 75	8365A	140A	3°	OH (6-2)
	8860A	120A	3°	OH (7-3)
	7630A	140A	3°	O ₂ atmospheric (0-0)
	7130A	130A	3°	continuum

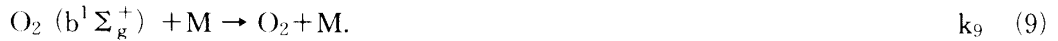
band; OH (8-3) band 及び連続大気光の同時観測として行われた[29]. 発光層通過時のロケット軸の天頂角は上昇時 $32^\circ (\pm 2^\circ)$, 下降時 $2^\circ (\pm 2^\circ)$ である. K9M.75号機の場合, O_2A -band の強度の天頂角依存性 (van-Rhijn 効果) 及び磁気センサーのデータを利用しロケット軸の天頂角を得た (上昇時 18° , 下降時 60°).

3. 解析方法

ここでは O_2A -band のデータより O 密度を求める方法, 及びここで得た O を用いて OH Meinel band を理論的に再現する方法について簡単に述べる. 前述したように O_2A -band は三体衝突による直接励起 (DE) または二段階励起 (TE) で生成された $O_2 (b^1\Sigma_g^+)$ から基底状態への遷移による発光である, 即ち



$O_2 (b^1\Sigma_g^+)$ 消光は主に O, N_2 及び O_2 との衝突による, 即ち



また(4)式で生成される O_2^* は主に O と O_2 によって消光されている[30]



(3), (6)~(9)式を用いると DE による O_2A -band の発光率 (volume emission rate), V_d は

$$V_d = A_6 k_3 [O] [O] [M] / (\sum \nu'' A_7 + k_8 [O] + k_9 [M]). \quad (12)$$

O_2^* からの光学的遷移は $O_2 A$ -band に匹敵する強度の O_2 大気光が可視域から近紫外域で観測されない[3][18]ことから無視すると, TE による $O_2 A$ -band の発光率は(4)~(11)式を用いて

$$V_t = \{A_6 k_4 k_5 / k_{11} [O] [O] [M] / (\sum \nu'' A_7 + k_8 [O] + k_9 [M])\} \\ \times [O_2] / (k_{10} / k_{11} [O] + [O_2]). \quad (13)$$

O 密度は(12)と(13)式を [O] について解いて求めることができ, DE の場合は(12)式より

$$[O]_d = \{V_d k_8 + [(V_d k_8)^2 + 4A_6 k_3 [M] (\sum \nu'' A_7 + k_9 [M]) V_d]^{0.5}\} \\ / (2A_6 k_3 [M]). \quad (14)$$

TE の場合は(13)式より

$$[O]_t = \{A + (A^2 + 4BC)^{0.5}\} / 2B. \quad (15)$$

ここで

$$A = V_t \{(\sum \nu'' A_7 + k_8 [O_2] k_{10} / k_{11} + k_9 [M])\},$$

$$B = A_6 k_4 k_5 / k_{11} [O_2] [M] - V_t k_8 k_{10} / k_{11},$$

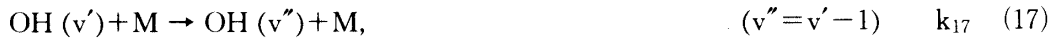
$$C = V_i (\sum v'' A_7 + k_9 [M]) [O_2].$$

観測した O₂A-band の発光率から (14), (15) 式を用いて O 密度が得られる. ここで k₃ は O₂ の反応係数 $k = 4.7 \times 10^{-33} (300/T)^2 \text{cm}^6 \text{sec}^{-1}$ [4] と O₂ (b¹Σ_g⁺) の生成率 $\alpha = 0.17$ [6] の積 0.17k とし, また標準大気モデル [38] を用いて計算した O₂A-band の積分強度が DE と TE で等しくなるようにするため $k_4 k_5 / k_{11} = 0.2k$ と仮定した. 得られた積分強度の計算値は 5.3kR である. O による O₂ (b¹Σ_g⁺) の消光の反応係数 $k_8 = 8 \times 10^{-14} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ [32], N₂ 及び O₂ による消光の反応係数 $k_9 (\text{N}_2) = 2.2 \times 10^{-15} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$, $k_9 (\text{O}_2) = 4.0 \times 10^{-17} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ [20], (0-0) band の遷移確率 $A_6 = 0.079 \text{sec}^{-1}$, (0-0) band 以外の遷移も含めた band system の遷移確率 $\sum v'' A_7 = 0.083 \text{sec}^{-1}$ [6] を用いた. O₂* の O と O₂ による消光係数の比 k_{10}/k_{11} は室内実験値 2.7 [30] を用いた.

OH Meinel band は (1) 式あるいは (2) 式の反応により生成された振動回転励起状態の OH からの発光である, 即ち



また OH(v') の脱励起反応として



OH の生成率を求める方法として発光層中の O₃ のつりあいを考えると, O₃ は



で生成され, これと (1) 式の消滅とで平衡状態にあると考えられる [22] [28], すなわち $k_1 [\text{O}_3] [\text{H}] = k_{19} [\text{O}] [\text{O}_2] [\text{M}]$. 従って OH の生成率として $k_{19} [\text{O}] [\text{O}_2] [\text{M}]$ が得られる. 各振動単位の OH 生成比率を $\epsilon(v')$ とすると O₃ + H 反応による OH Meinel band の発光率 $Vv'v''$ は (1), (16) ~ (19) 式より

$$Vv'v'' = \text{Av}'v'' \{ k_{19} [\text{O}] [\text{O}_2] [\text{M}] \epsilon(v') / \sum v' \epsilon(v') + \sum_{v=v'+1}^9 \text{Av}'v' [\text{OH}(v)] + k_{17} [\text{M}] [\text{OH}(v'+1)] / (k_{17} [\text{M}] + k_{18} [\text{O}] + \sum_{v=0}^{v'-1} \text{Av}'v) \}. \quad (20)$$

Av'v'' は室内実験での laser photolysis の解析 [10] より得られた $A_{93} = 6 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ で Mies (1974) [24] の値を規格化したものを用いた. 振動緩和の反応係数 k_{17} は室内実験値 [33], O による消光の反応係数 $k_{18} = 3.6 \times 10^{-13} (T)^{0.5} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ [5], $3.3 \times 10^{-11} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ [40], 各振動レベルの OH 生成比率 $\epsilon(v') = 0.54$ (v'=9), 0.29 (8), 0.10 (7), 0.07 (6) [9], そして O₃ 生成の反応係数 $k_{19} = 1.1 \times 10^{-34} \exp(510/T) \text{cm}^6 \text{sec}^{-1}$ [15] を用いた.

4. 結果と議論

各大気光の強度は基本的には各フォトメーターの出力から直接得られるが, フィルターの透過率の裾の部分で他の大気光の影響を受けるので正確に強度を求めるためフィルターの透過率を係数とし強度を変数とした三元一次連立方程式の解として得た. 出力は天頂角の補正後, 各フォトメーターの出力を 1 spin につき 10 ないし 20 分割し次にロケットスピンの同位

相の出力について3点最小二乗法で傾きを求め、これより発光率を得た。同じ高度の各位相の発光率の相加平均を最終的な発光率とした。発光率の誤差としてはこの平均化の際の標準偏差を用いた。表2に今回のロケット観測で得た大気光強度をまとめて示した。

図1にはO₂A-bandの天頂積分強度を図2には発光率の高度分布を示した。今回の観測で得られたO₂A-bandの積分強度4~12kR及び半値幅7~12kmと良い一致を示している。また発光層の中心高度はわれわれのこれまでの観測[39]の平均高度94kmにほぼ等しい。

3で述べた解析方法に従ってO₂A-bandの観測値から(14), (15)式及びUSSA 1976[38]の大気密度モデルを用いてO密度を求めた。結果を図3に示す。S310.10号機によるO₂A-bandの観測値から得たO密度のプロファイルはDEを仮定したものとTEを仮定したものとがほぼ一致し、O密度は高度96kmで最大となる。一方K9M.75号機の場合、得られたO密度のプロファイルは励起機構によって多少異なる。(12), (13)式から判るようにO₂A-bandの強度はTEを仮定した場合は、DEの機構にOによる消光が加わったものなので、Oによる消光の効果が大きくなる高度でDEとTEの違いが大きくなる。K9M.75機で得たO₂A-bandの発光層はS310.10号機に比べ少し高いので、O密度がTEの場合に大きくなる。実際O密度の最大値はTEでDEに比べ25%大きい。しかし測定誤差を考慮するとTEとDEの間の違いは認められないので、今回の観測から積極的にO₂A-bandの励起機構を決定できないことが判明した。O密度が最大になる高度は三例とも96~97kmで良く一致する。また肩の構造が高度90~94kmに現れるが、これはO₂A-band観測値に現れた肩の構造を反映している。図3に示すようにO密度の実測プロファイルにも高度92~97kmに小さな構造が見られ、我々の今回の結果と高度も規模もほぼ一致するので、この構造はO密度の恒常的構造と考えられる。

図4と図5にOH Meinel bandの天頂積分強度と発光率の高度プロファイルを示す。今回観測したOH(8-3), (7-3), (6-2)bandの積分強度は地上観測[25][36]とほぼ一致する。またOH発光層の中心高度は我々のこれまでのロケット観測の平均高度90kmにほぼ等しい。K9M.75で得られたOH(6-2), (7-3)bandの発光率のプロファイルはピークがテーブル状でOH(8-3)bandとはかなり異なっている。

Table 2. Overhead airglow intensities observed in this work.

Rocket	S310. 10		K9M. 75	
	Ascent	Descent	Ascent	Descent
OH (8-3)	240 ± 50R	240 ± 50R	—	—
OH (7-3)	—	—	1450 ± 200R	1600 ± 500R
OH (6-2)	—	—	660 ± 130R	730 ± 220R
O ₂ (0-0)	6.1 ± 0.6kR	7.2 ± 0.7kR	10.3 ± 1.8kR	10.1 ± 2.0kR
continuum	0.22 ± 0.11R/A	0.23 ± 0.15R/A	—	—

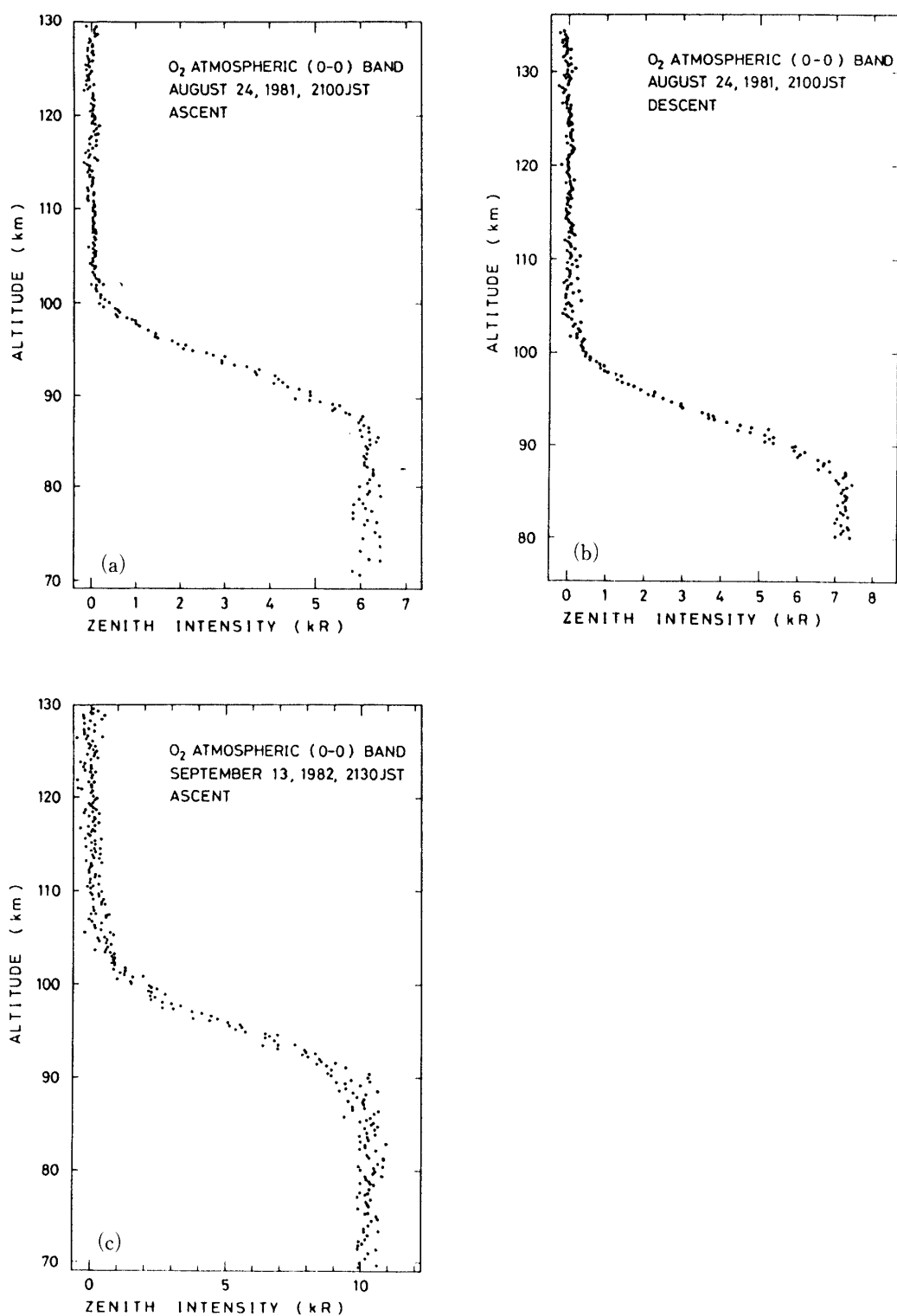


図1. ロケット観測で得られた O₂ atmospheric (0-0) band の積分強度の高度分布.
(a), (b)はそれぞれ S310.10上昇時. (c)は K9M.75上昇時.

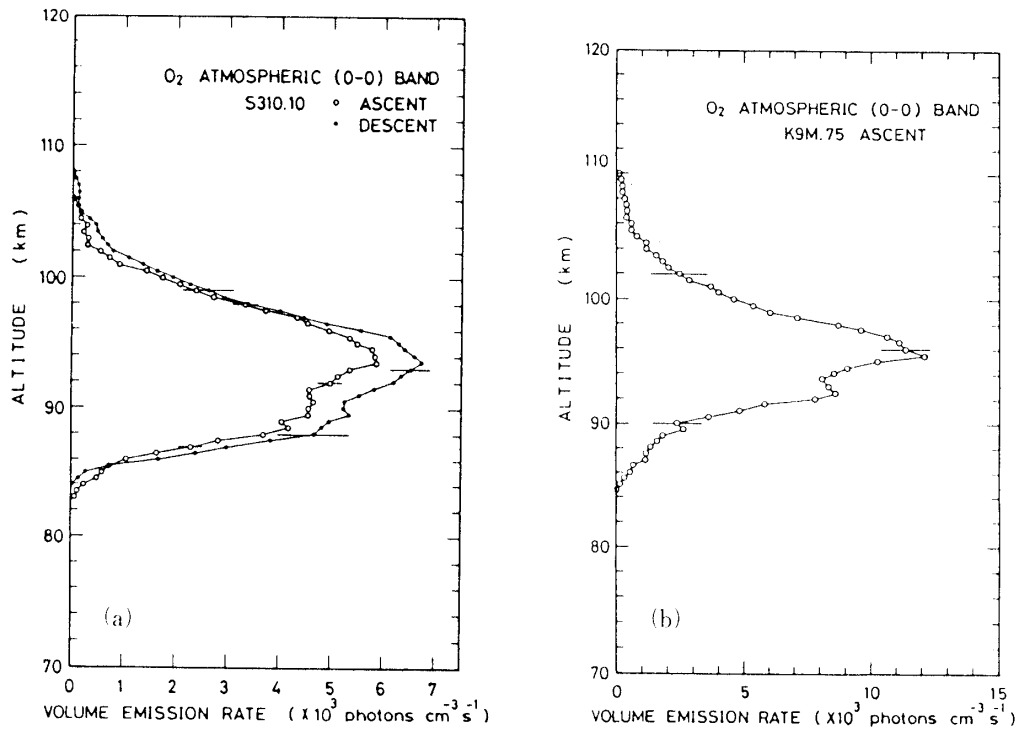


図2. O₂ atmospheric (0-0) band の発光率の高度分布. (a)は S310.10 上昇時及び下降時. (b)は K9M.75 上昇時.

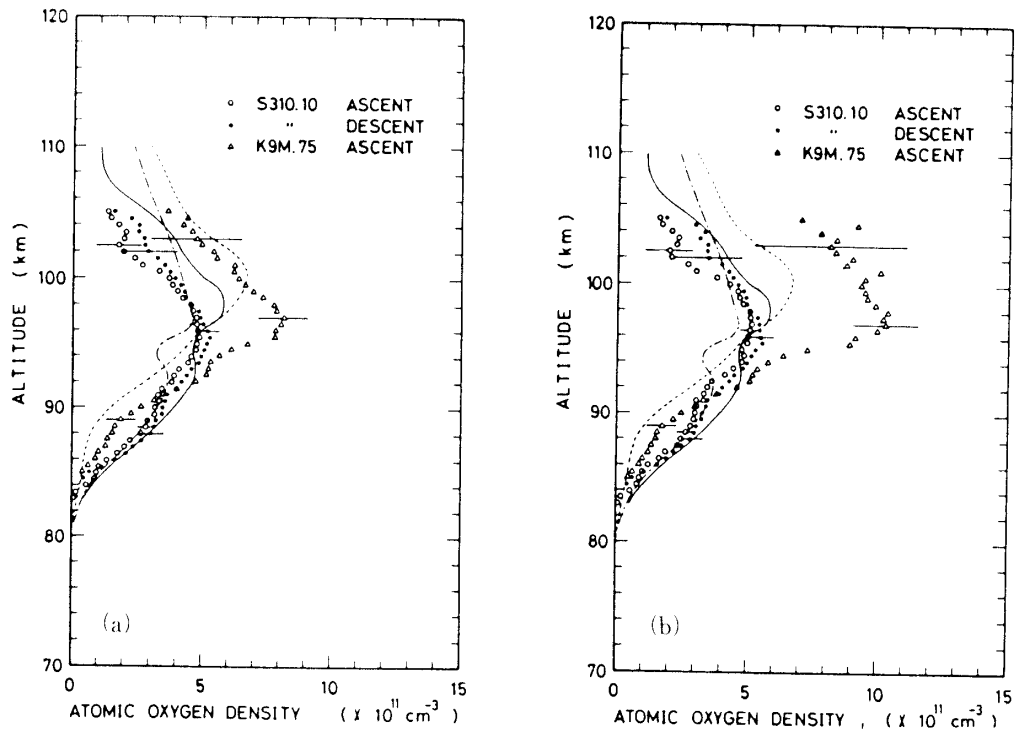


図3. O₂ atmospheric (0-0) band の発光率より求めた O 密度の高度分布. (a)は直接励起(DE)を仮定して求めたプロファイル, (b)は二段階励起(TE)を仮定して求めたプロファイル.

——は Offermann et al. [27], - - - - は Dickinson et al. [7]

..... は Greer et al. [12] による測定値.

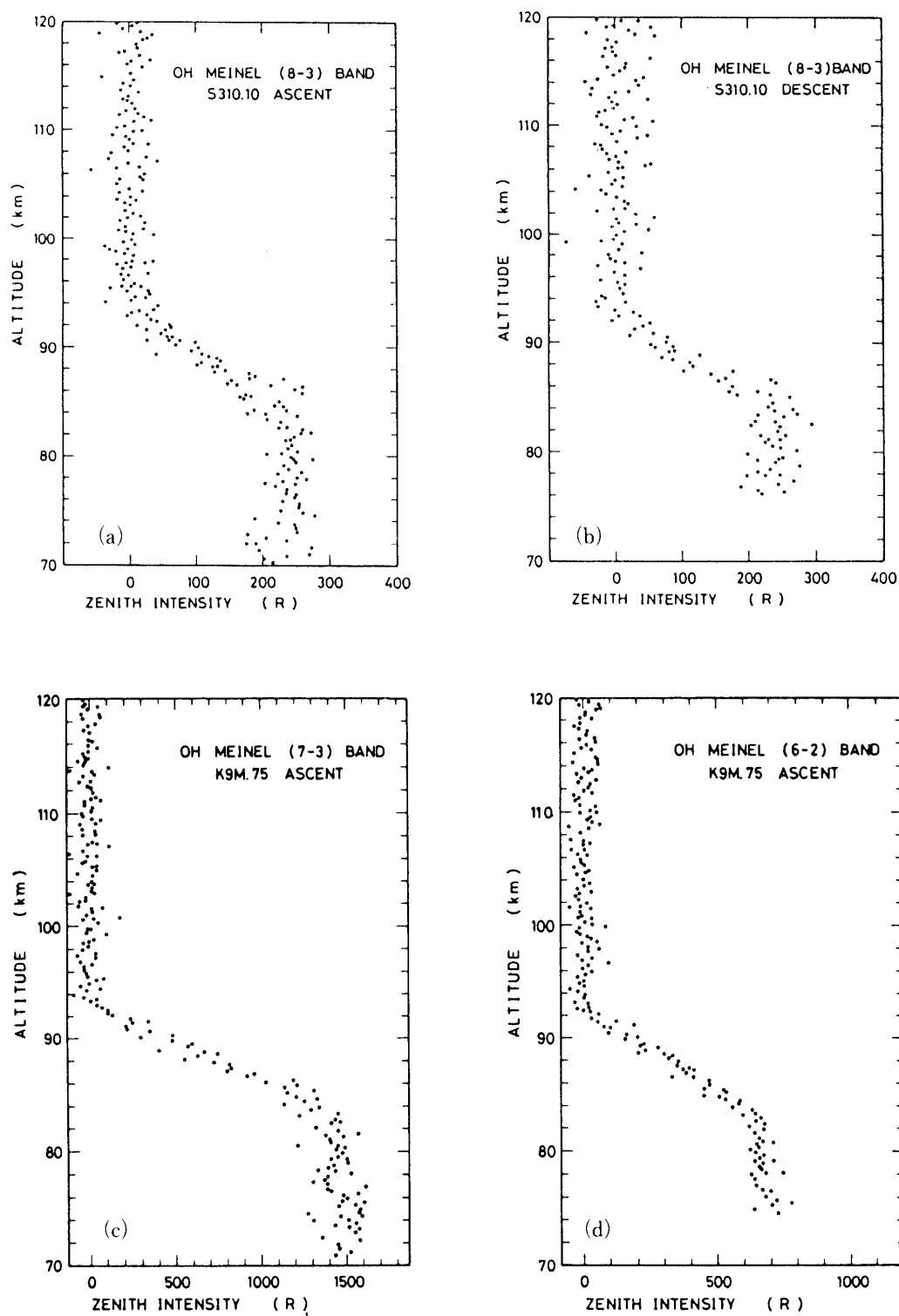


図4. ロケット観測で得られた OH Meinel band の積分強度分布. (a), (b), はそれぞれ S310.10 上昇時及び下降時の OH (8-3) band. (c), (d) はそれぞれ K9M.75 上昇時の OH (7-3) 及び OH (6-2) band.

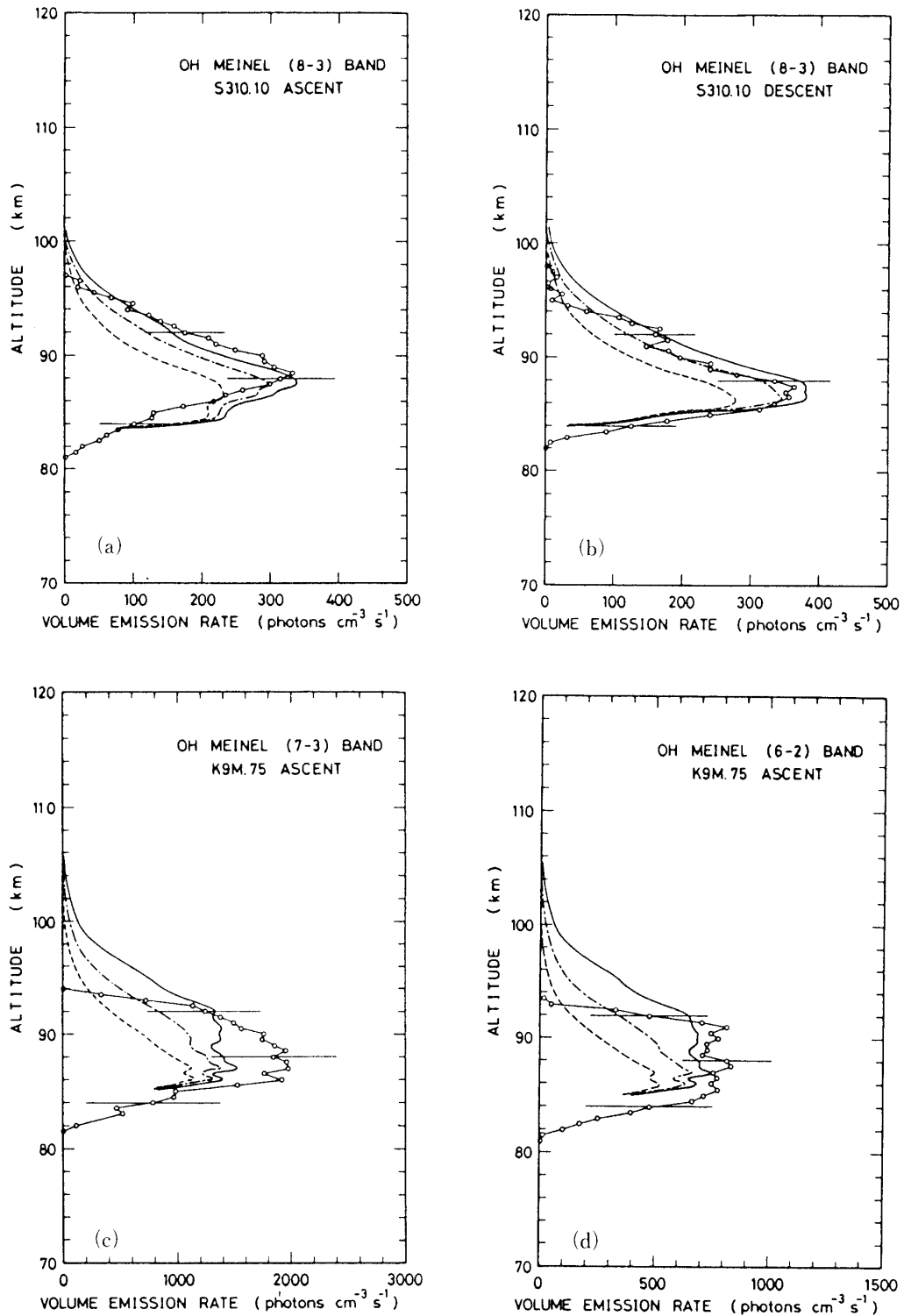


図 5. OH Meinel band の発光率の高度分布. (a), (b) はそれぞれ S310.10 上昇時及び下降時の OH(8-3) band. (c), (d) はそれぞれ K9M.75 上昇時の OH(7-3) 及び OH(6-2) band. —○— は今回のロケット観測.

—— は $k_{18} = 5.1 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$, - - - は $k_{18} = 3.3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$,
 は $k_{18} = 1.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ を仮定した計算プロファイル(本文参照)

次に O₂A-band から得た O 密度を用いて OH Meinel band の発光率を計算した。また [O₂] 及び [M] は USSA 1976 モデルを使用した。OH 発光層では O₂A-band から得られた O 密度は DE でも TE でもほとんど等しいことからここでは O 密度としては DE を仮定したものを使用した。OH 発光率の計算には大気温度として 200K を用いた。O による OH の消光の反応係数 k_{18} については確定的なものが無いが、 k_{18} の大きさは OH 発光層の高度や形、絶対強度を決める重要な要素であるので k_{18} に対する感度を調べるため $k_{18} = 5.1 \times 10^{-12}$ [5], 3.3×10^{-11} [40], $1.0 \times 10^{-10} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ の三通りの値について OH の発光率の計算をした。計算された OH の積分強度は O の消光の反応係数が小さい順に (8-3) band の場合ロケット上昇時 270 (±50), 220 (±40), 170 (±30) R, 下降時 270 (±60), 220 (±50), 160 (±30) R また (7-3), (6-2) band の場合それぞれ 1500 (±600), 1100 (±440), 750 (±300) R と 740 (±300), 490 (±200), 300 (±120) R となる。OH プロファイルの計算結果を図 4 に示す。積分強度の観測と計算との比較及び発光率のプロファイルの比較から O の消光係数 k_{18} は最も小さい値 $5.1 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$ [5] が良いことがわかる。OH (8-3) band に比べると観測日が異なる OH (7-3), (6-2) band はプロファイルの形も異なるが計算したプロファイルはそれぞれ良く一致している。O 密度は O₂ ($b^1 \Sigma_g^+$) の生成率に依存するが、得られた O 密度を用いた OH Meinel band の絶対強度の計算値は観測値とほぼ一致することから、ここで用いた生成率の値に大きな誤りはなさそうである。

OH 発光層下部 (図 5) の高度では O₂A-band の発光率 (図 2) が急激に減少しているので、これより求めた O 密度の誤差が大きく計算プロファイルは約 86km 以下では観測との一致が悪くなっている。OH (8-3) band の発光率の計算と観測は発光層上部において良い一致を示すのに対して、OH (7-3), (6-2) band の場合高度 93-94km で OH 発光率の観測値はほぼ零になるが計算値まだ大きな値になっている。OH 発光上層部では O 密度は O₂A-band の発光率が強いため信頼性が高いので OH 発光率の計算誤差は小さく、高度 92-100km での計算と観測との違いは意味があると思われる。O の消光係数が大きい計算は高度 92km より上空の発光率の急激な減少を説明するが、発光率のプロファイルの形を再現せずまた積分強度も観測値より小さくなってしまふ。高度 93-94km における発光率の急激な減少を O, O₂, N₂ 以外の原子又は分子の消光によるものとする、反応係数を最大にしてもその密度は非常に大きくなってしまふ。O, O₂, N₂ 以外の原子、分子の密度は小さいので消光によりこの発光率の減少が生じたとは考えられない。反応係数の温度依存性によりプロファイルが変りうるが、高度 90-95km 間で温度差が 50K 以上なければならぬので現実的ではない。

HO₂+O 反応における OH 発光率の時間変化の計算 [35] によれば、今回のロケット観測時にあたる 21-22 時では O₃+H 反応に比べると H O₂+O 反応の発光高度は 2-3km 低く、強度は 10 数% である。HO₂+O 反応の寄与は OH (6-2) band に現れ OH (7-3) band には現れないはずであるので理論的には二つのバンドのプロファイルの違いがでる可能性がある。しかし今回の OH (7-3), (6-2) band の同時観測の結果からは発光層の中心高度及びプロファイルは細部を除けば良く一致しており大きな違いは見られなかった。また今回の OH (7-3) band と OH (6-2) band の観測値の積分強度比は 2.2 (±0.3) で O₃+H 反応による発光率の計算値 2.0 と誤差内で一致する。このことから HO₂+O 反応による OH 発光は O₃+H 反応に比べ理論計算で予想される程度以下であるといえる。従って今回の観測からは積極的に HO₂+O 反応を支持する手がかりは得られなかった。

OH (7-3), (6-2) band の発光層上部の観測と計算との違いは現在のところ説明できない

が、積分強度及びプロファイルは全体として観測と計算で非常に良く一致しており O 密度の導出、発光の励起機構、用いた反応係数及び観測結果の解析は正しいものと考えられる。

5. まとめ

夜間大気光 OH Meinel band と O₂A-band の発光層高度分布の同時測をおこなった。発光のピーク高度は OH Meinel band, O₂A-band 共今までのわれわれの観測と一致した。O₂A-band の発光率より求めた O 密度は in-situ 測定と一致した。この O 密度は O₃+H 反応の計算に用いると OH Meinel band の高度分布をよく説明する。

6. 謝 辞

ロケット実験を行なうにあたり宇宙科学研究所ロケット実験班各位の全面的な御協力を得ました。感謝の意をここに表します。

参考文献

- [1] Baker, D. J., and R. O. Waddoups, Correction to paper by D. Baker and R. Waddoups, Rocket measurement of midlatitude night airglow emission, *J. Geophys. Res.*, 73, 2546-2549, 1968.
- [2] Bates, D. R., and M. Nicolet, The photochemistry of atmospheric water vapor, *J. Geophys. Res.*, 55, 301-327, 1950.
- [3] Broadfoot, A. L., and K. R. Kendall, The airglow spectrum, *J. Geophys. Res.*, 73, 426-428, 1968.
- [4] Campbell, I., and C. N. Gray, Rate constants for O(³P) recombination and association with N(⁴S), *Chem. Phys. Lett.*, 18, 607-609, 1973.
- [5] Coltharp, R. N. S. D. Worley, and A. E. Potter, Reaction rare of vibrationally excited hydroxyl with ozone, *Appl. Opt.*, 10(8), 1786-1789, 1971.
- [6] Deans, A. J., Shepherd, G. G., and W. F. J. Evans, A rocket measurement of the O₂ (b¹Σ_g⁺-X³Σ_g⁻) atmospheric band nightglow altitude distribution, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 441-444, 1976.
- [7] Dickinson, P. H. G., R. C. Boldem, and Young, Measurement of atomic oxygen in the lower ionosphere using a rocket-borne resonance lamp, *Nature*, 252, 289-291, 1974.
- [8] Evans, W. F. J., E. J. Llewellyn, and A. Vallance Jones, Altitude distribution of hydroxyl bands of the Δv=2 sequence in the nightglow, *Can. J. Phys.*, 51, 1288-1292, 1973.
- [9] Good, E. Rarl, Determination of atomic oxygen density from rocket borne measurement of hydroxyl airglow, *Planet. Space Sci.*, 24, 389-395, 1976.
- [10] Greenblatt, D. G., and J. R. Wiesenfeld, Time-resolved emission studies of vibrationally excited hydroxyl radicals: OH (X²π, v''=9) , *J. Geophys. Res.*, 87, C12, 11145-11152, 1982.
- [11] Greer, R. G. H., E. J. Llewellyn, B. H. Solheim, and G. Witt, The excitation of O₂ (b¹Σ) in the nightglow, *Planet. Space Sci.*, 29, 383-389, 1981.
- [12] Greer, R. G. H., D. P. Murtagh, I. C. McDade, P. H. G. Dickinson, L. Thomas, D. B. Jenkins, J. Stegman, E. J. Llewellyn, G. Witt, D. J. Mackinnon and E. R. Williams, ETON 1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow, *Planet. Space Sci.*, 34, 771-788, 1986.
- [13] Harrison, A. W., Altitude profile of airglow hydroxyl emission, *Can. J. Phys.*, 48, 2231-2234, 1970.

- [14] Herzberg, G., Paper presented at upper atmosphere symposium, Pasadena, May 1950, J. Roy. Astron. Soc. Canada, 45, 100, 1951.
- [15] Huit, R. E., J. T. Herron, and D. D. Davis, Absolute rate constants for the reaction O+O₂+M → O₃+M over the temperature range 200-345k, J. Phys. Chem., 76, 2653-2658, 1972.
- [16] Lopez-Moreno, J. J., R. Rodrigo, and S. Vidal, Radiative contamination in rocket-borne infrared photometric measurements, J. Geophys. Res., 90, A7, 6617-6621, 1985.
- [17] Krasnopolsky, V. A., Oxygen emissions in the night airglow of the earth, venus and mars, Planet. Space Sci., 34, 511-518, 1986.
- [18] Krassovsky, V. L., N. N. Shefov, and V. I. Yarin, Atlas of the airglow spectrum 3000-12400 A, Planet. Space Sci., 9, 883-915, 1962.
- [19] Makino, T., H. Yamamoto, and H. Sekiguchi, Altitude profiles of OH and O₂ near infrared airglows in the evening twilight, J. Geomag. Geoelectr. 35, 57-64, 1983.
- [20] Martin, L. R., R. B. Cohen and J. F. Schatz, Quenching of laser induced fluorescence of O₂ (b¹Σ_g⁺) by O₂ and N₂, Chem. Phys. Lett., 41, 394-396, 1976.
- [21] McDade, I. C., D. P. Murtagh, R. G. H. Greer, P. H. G. Dickinson, G. Witt, J. Stegman, E. J. Llewellyn, L. Thomas and D. B. Jenkins, ETON 2: Quenching parameters for the proposed precursors O₂ (b¹Σ_g⁺) and O (¹S) in the terrestrial nightglow, Planet. Space Sci., 34, 789-800, 1986.
- [22] McDade, I. C., and E. J. Llewellyn. Mesospheric oxygen atom densities inferred from nighttime OH Meinel band emission rates, Planet. Space Sci., 36, 897-905, 1988.
- [23] Meinel, A. B., OH emission bands in the spectrum of the night sky. Part I and II, Astrophys. J., 111, 555, and 112, 120, 1950.
- [24] Mies, F. H., Calculated vibrational probabilities of OH (X²Π) , J. Mol. Spectrosc., 53, 150-188, 1974.
- [25] Myrabo, H. E., C. S. Deer, and G. G. Sivjee, Large-amplitude nightglow OH (8-3) band intensity and rotational temperature variations during a 24-hour period at 78° N, J. Geophys. Res., 88, A11, 9255-9259, 1983.
- [26] Nicolet, M., Ozone and hydrogen reactions, Ann. Geophys., 26(2), 531-546, 1970.
- [27] Offermann, D., V. Friedrich, P. Ross, and U. von Zahn, Neutral gas composition measurements, Planet. Space Sci., 29, 747-764, 1981.
- [28] Ogawa, T., and T. Shimazaki, Diurnal variations of odd nitrogen and ionic densities in the mesosphere and lower thermosphere: Simultaneous solution of photochemical diffusive equations, J. Geophys. Res., 80, 3945-3960, 1975.
- [29] Ogawa, T., N. Iwagami, M. Nakamura, M. Takano, H. Tanabe, A. Takechi, A. Miyashita, and K. Suzuki, Simultaneous observation of the night airglow O 5577 A, O₂ Herzberg and atmospheric bands, J. Geomag. Geoelectr., 39, 211-228, 1987.
- [30] Ogryzlo, E. A., Y. Q. Shen, and P. T. Wassell, The yield of O₂ (b¹Σ_g) in oxygen atom recombination, J. Photochem., 25, 389-398, 1984.
- [31] Packer, D. M., Altitudes of the night airglow radiations, Ann. de Geophysique, 17, 67-75, 1961.
- [32] Slinger, T. G., and G. Black, Interactions of O₂ (b¹Σ_g⁺) with O (³P) and O₃, J. Chem. Phys., 70, 3434-3438, 1979.
- [33] Streit, G. E., and H. S. Johnston, Reactions and quenching of vibrationally excited hydroxyl radicals, J. Chem. Phys., 64, 95-103, 1976.

- [34] Sutoh, M., Y. Morioka, and M. Nakamura, Absolute rate constant for the chemiluminescent reaction of atomic oxygen with nitric oxide, *J. Chem. Phys.*, 72, 20-24, 1980.
- [35] Suzuki, K., and T. Tohmatsu, An interpretation of the rotational temperature of the airglow hydroxyl emissions, *Planet. Space Sci.*, 24, 665-671, 1975.
- [36] Takahashi, H., and P. P. Batista, Simultaneous measurements of OH (9,4), (8,3), (7,2), (6,2) and (5,1) bands in the airglow, *J. Geophys. Res.*, 86, A7, 5632-5642, 1981.
- [37] Thomas, R. J., and R. A. Young, Measurement of atomic oxygen and related airglows in the lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 86, C8, 7389-7393, 1981.
- [38] U. S. Standard Atmosphere, 1976., National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA-S/T 76-1562 m Washington.
- [39] Watanabe, T., M. Nakamura, and T. Ogawa, Rocket measurements of O₂ atmospheric and OH Meinel bands in the airglow, *J. Geophys. Res.*, 86, A7, 5768-5774, 1981.
- [40] Westenberg, A. A., N. de Hass and J. M. Roscoe, Radical reactions in electron spin resonance, *J. Phys. Chem.*, 74, 3432-3438, 1970.
- [41] Witt, G., J. Stegman, B. H. Solheim, and E. J. Llewellyn, A measurement of the O₂ ($b^1\Sigma_g^- - X^3\Sigma_g^-$) atmospheric band and the O(¹S) greenline in the nightglow, *Planet. Space Sci.*, 27, 341-350, 1979.
- [42] Witt, G., J. Stegman, D. P. Murtagh, I. C. McDade, R. G. H. Greer, P. H. G. Dickinson, and D. B. Jenkins, Collisional energy transfer and the excitation of O₂ ($b^1\Sigma_g^-$) in the atmosphere, *J. Photochem.*, 25, 365-378, 1984.