

昼間大気光6300Åおよび3914Å放射のロケット観測*

永田 武**・等松 隆夫***・小川 利紘****

Rocket Measurements of the 6300Å and 3914Å Dayglow Features

By

Takesi NAGATA, Takao TOHMATSU and Toshihiro OGAWA

Geophysics Research Laboratory, Faculty of Science, University of Tokyo

Abstract: Rocket results are presented on the OI 6300Å line and on the N₂⁺ 3914Å band in the dayglow. An altitude range of 78–335 km is covered. Theoretical interpretations are given, using results of simultaneous measurements of electron density and electron temperature. The apparent brightness of the 6300Å line at the base of the emitting region is found to be 13kR, of which 5.5kR are ascribed to excitation through the Schumann-Runge dissociation of O₂ by the solar UV radiations, 0.55KR to the dissociative recombination of O₂⁺ and NO⁺ ions, and 0.03KR to the excitation of O by thermal electrons. An additional source of excitation above 280km is suggested. The deactivation of O(¹D) by O₂(X³Σ_g⁻) is found to be appreciable below 200km, and its rate coefficient is estimated to be 2×10⁻¹⁰cm³/sec. The apparent brightness of the 3914Å band at the base of the emitting region is found to be 6.5KR, decreasing to 3.2KR at 330km. Assuming that fluorescent scattering of solar radiation is the mechanism involved the distribution of N₂⁺ ions is calculated. The rate coefficients for the loss of these ions are hence calculated.

概 要

K9M-9 ロケットによる昼間大気光、酸素原子 6300Å 線および N₂⁺ イオンの 3914Å 帯の測定結果とその理論的解釈。測定は高度 78km ないし 335km の間でおこなわれた。6300Å 線の全輝度は 13KR であったが、そのうち 5.5KR は太陽紫外による O₂ シューマンランゲ解離により、0.55KR は O₂⁺ および NO⁺ イオンと電子の解離再結合によりまた、0.03KR は O 原子の電子による熱励起により発輝されたものとおもわれる。このほか 280km より高処に別の 6300Å 線の放射源があるようである。一方 O(¹D) の O₂(X³Σ_g⁻) の非活性化の大きさは 200 km 以下の高度ではいちぢるしく大きく、その反応速度係数は 2×10⁻¹⁰cm³/sec と推定された。3914Å 帯の全輝度は 6.5KR であったが、330km

* *Planetary and Space Science* 1965, **13**, pp. 1273–1282 に英訳

** 東大理学部附属地球物理研究施設・宇宙航空研究所併任教授

*** 東大理学部附属地球物理研究施設

**** 東大理学部地球物理学教室

で 3.2KR まで減少した。この発輝機構を太陽放射の N_2^+ イオンによる蛍光散乱として、 N_2^+ の密度の高度分布を求めた。また N_2^+ イオンの電離層内での消失機構について論じた。

1. 序 説

宇宙航空研究所観測ロケット K9M-9 の発射は 1965 年 3 月 27 日、14 時 01 分 (グリニチ標準時 5 時 01 分)、内之浦 (131°05'E, 31°15'N) でおこなわれた。昼間大気光の測定は 6300, 3914, 2500 および 2150Å において上昇時 78~335km, 下降時 78km まで連続におこなわれた。このロケットにはまた郵政省電波研究所グループによる電子密度、電子

第 1 表 K-9M#9 受光器の仕様

Mechanical Collimator:

Objective opening: 10mm

Diaphragm opening: 28mm

Distance between two openings: 144mm

Effective field of view: 100 deg² (0.0297 sterad)

Filters:

Line	Filt. No.	λ_{max} (Å)	T_{max} (%)	T_{line} (%)	W (Å)*
6300Å	65010	6310	86.1	78.0	70.5
3914Å	6599	3920	34.5	34.2	54.3

$$*W = \int_0^{\infty} T(\lambda) d\lambda$$

Photomultipliers:

HTV R-192 Ag-Bi-O-Cs photo-surface 10 stages

High tension voltage: 1200V.

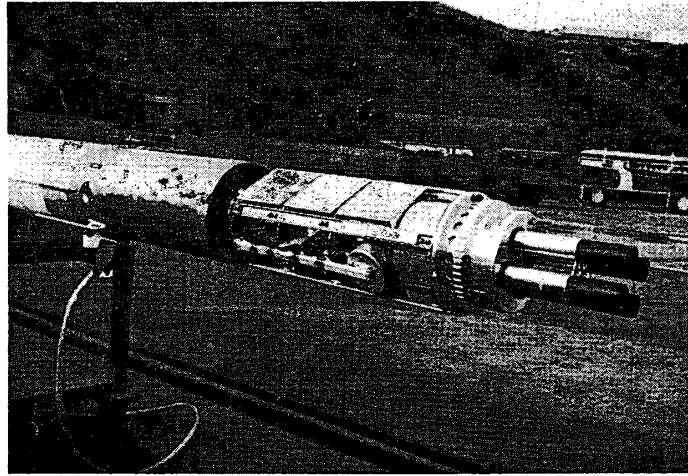
温度およびイオン密度測定のプロープが塔載されていたので、大気光発輝の機構と電離圏プラズマ状態との関連を約 250km の厚さにわたって定量的に調べることができた。

ここで報告する大気光放射は測定された四波長のうち原子酸素、 $2p^4D_2-2p^4P_2$, 6300Å (酸素赤線) および窒素イオン、 $B^2\Sigma_u^+-X^2\Sigma_g^+$ first negative band 3914Å の二波長¹⁾についてである。

2. 測定器と実験結果

各測光器はメカニカルコリメータ、干渉フィルタと補助フィルタ、光チョッパ、光電子増倍管より成り、ロケット主軸の方向に、ロケット開頭部の先端に塔載された (第 1 表、第 1 図参照)。

コリメータから入射した大気光放射はフィルタにより分光されたあと、チョッパで 4cps の交番信号となり、増倍管によって電流化され、約 50db 増幅後テレメータ回路にみちびかれた。測光器の総合感度は各波長について約 0.5V/KR であった ($1KR=1 \times 10^9$ photons/cm² column/sec)。測光器の検定は東京大学理学部附属地球物理研究施設 (GRL) において、実験

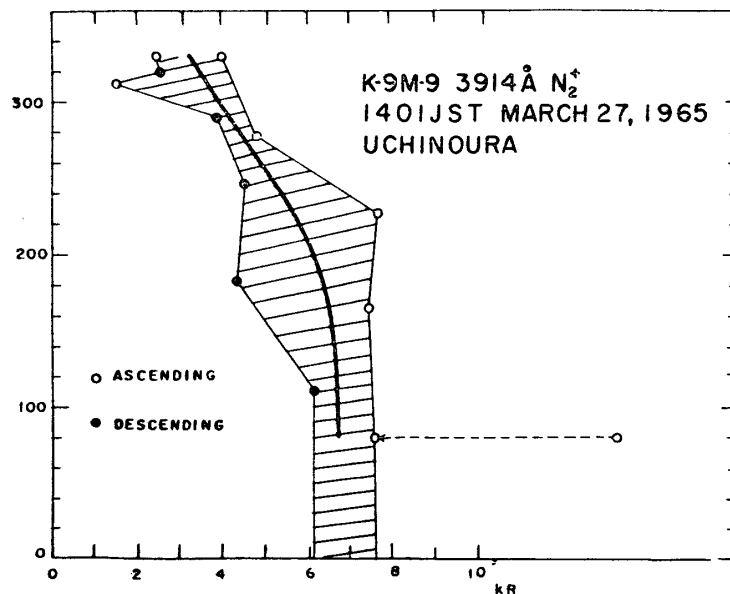


第 1 図 THE SOUNDING ROCKET K-9M #9

Four dayglow photometers are at the top with their long solar hoods and mechanical collimators, and plasma instruments following them (three square boxes). The positive ion trap is on the reader's side of the rocket. The resonance probes for electron-density, -temperature and -energy distribution are on the other Side (not seen).

室内人工光源と、標準大気光測光儀との比較の二方法でおこなわれた。

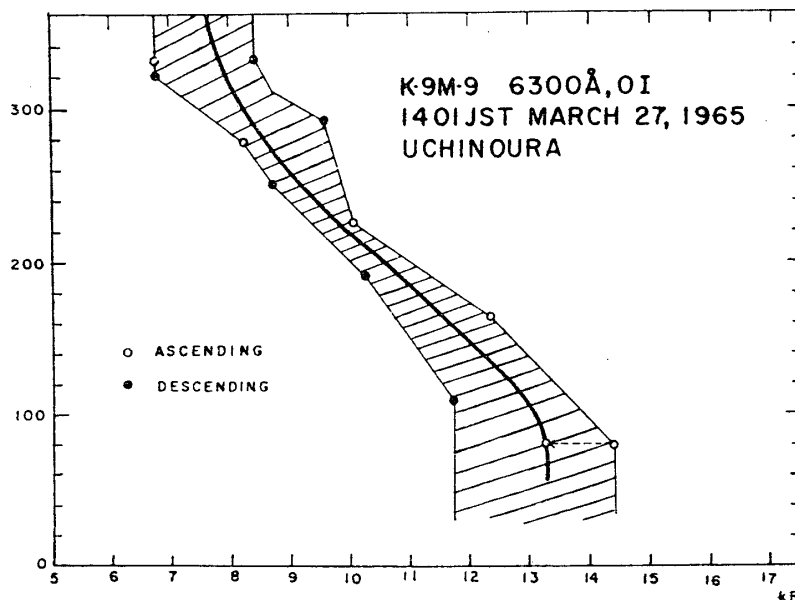
測定は発射後 53 秒 (高度 73km) で始り, 522 秒 (105km) まで続けられた。ロケットの発射仰角は 81° , 方位角は南から東へ 33° であった。この時刻の太陽方位角は南から西へ 45° , 天頂角 37° であった。ロケットは約 2cps のスピンをもち, 半角約 25° の比較的大



第 2 図 6300\AA 大気光の輝度分布測定値は斜線部にすべて入る。実曲線は姿勢とレーリー散乱補正後の値を示す。

きいプレセッションを42秒の周期でおこなったので、時々太陽光がコリメーターの金属壁に反射されて障害を受けたが、それ以外は十分よい資料が得られた。

6300Å, および 3914Å 放射の高度分布をそれぞれ第2図第3図に示した。高度80km



第3図 3914Å 大気光の輝度分布, 第2回と同様に描かれたもの。

第2表 K-9M #9 測定値

z	$4\pi I(6300\text{\AA})$	$4\pi I(3914\text{\AA})$	$4\pi J(6300\text{\AA})$	$4\pi J(3914\text{\AA})$	$n(e)$	$T(e)$
km	KR	KR	ph/cm ³ /sec	ph/cm ³ /sec	el/cm ³	°K
120	12.70	6.87	225	5	1.3+5	1200
140	12.23	6.72	270	30	1.5+5	1420
160	11.65	6.53	288	100	1.4+5	1680
180	11.07	6.28	285	185	2.4+5	1900
200	10.50	5.93	280	265	3.3+5	2030
220	9.92	5.55	260	315	6.5+5	2040
240	9.45	5.19	230	265	1.1+6	1960
260	9.05	4.78	205	195	1.3+6	1690
280	8.65	4.38	185	120	1.5+6	1640
300	8.80	3.95	165	100	1.4+6	1680
320	8.00	3.47	145	90	1.1+6	1780

Legend: 1.3+5=1.3×10⁵

以下ではレーリー散乱による残光大で、理論計算によれば、第1表の光学系の場合80kmにおけるレーリー散乱輝度は6300Å および 3914Å でそれぞれ2.5KR, 5.7KRである。第2,3図の実曲線はロケット姿勢の補正をした場合の平均輝度曲線である。

単位体積あたりの放射率を計算するためには、平均輝度曲線を高度について微分すればよい。第2表は K9M-9 による実験結果の要約であり、120~320km での 20km ごとの高度での各輝スペクトル輝度、放射率、電子密度および電子温度をかかげた。ロケットはそれぞれ高度 170km および 220km において 6300Å および 3914Å 最大放射率を観測したが、320km においてもいまだに 7.5KR および 3KR の残光があったので、両放射の発光層の厚みはかなり大であることがわかった。しかしこれら残光の原因が、太陽コロナ、太陽光の測器壁による散乱あるいは未知の大気光に起因することも考えられるので確言はできない。

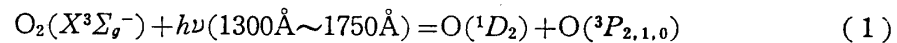
6300Å 大気光の理論的解釈

Brandt [1] は理論的に昼間の 6300Å 放射の輝度を計算し 50KR と推定した。この推定値は Noxon [2] の地上観測によれば明るすぎるようである。同じく、日食時の観測によれば、等松・田鍋 [3] および Rees・Deehr [4] は昼間の 6300Å 放射強度は 6KR 以下と推定している。

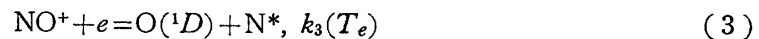
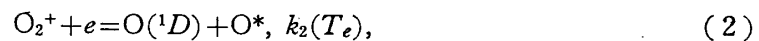
高度 230km までのロケット観測は Zipf・Fastie [5] によっておこなわれ、発光層直下で 6KR と測定された。Wallace・Nidey もロケットによる分光測光でほぼ同様の結果を得ているが、160km 以上での 6300Å 強度はさして強くないようである。

一方、6300Å 昼間大気光の励起機構は多元的であるが、それらのうちで重要と思われるものは以下の 3 種である。

(i) 太陽紫外線による O₂ の Schumann-Runge 解離 (S. R.) [1][6][7]



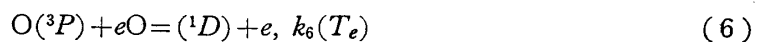
(ii) 電子と O₂⁺ および NO⁺ との解離再結合 (D. R.) [1][7][8]



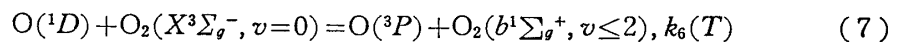
ここで、O₂⁺ および NO⁺ は次の過程で生成される。



(iii) 熱電子による O の励起 (T. E.) [9][10]



一方衝突による非活性化の過程として



が重要である。Wallace・Chamberlain は極光の O₂ の atmospheric bands の解析から、 $4 \times 10^{-12} \leq k_7(T) \leq 1 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{sec}$ と推定した。永田・小川は 6300Å の夜間変化から、 $k_7(T) = 5 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{sec}$ をみちびいている。

6300Å 放射の高度分布は明らかに、中性およびイオン大気組成、中性および電子温度に依存するから、これらの大気パラメータと 6300Å 放射の発輝度とを調べるのが重要な目的の一つである。

まず最初に S. R. を考える、 $h \leq 320\text{km}$ では 80 パーセント以上この機構で発揮されることが結論された。実際 S. R. による放射率は、

$$j(6300 \text{ \AA}, z) = J(z)n(O_2, z) \frac{3}{4} \frac{1}{1 + k_7 n(O_2, z) A_{DP}} \quad (8)$$

ここに $J(z)$ は比解離係数, $n(O_2, z)$ は分子酸素密度, $A_{DP} = 0.0091 \text{ sec}^{-1}$ は $^1D_2 - ^3P_{2,1}$ の自然遷移確率である. 比解離係数は具体的には, 太陽紫外線光子束, Q_ν (photons/cm²/sec/cm⁻¹) および O_2 の吸光係数, σ_ν (cm²/molecule) および太陽の天頂角 χ を用いて

$$J(z) = \int_0^\infty \sigma_\nu Q_\nu \exp\left[-\sec\chi \int_z^\infty n(O_2, z) dz\right] d\nu \quad (9)$$

である.

十分高いところで,

$$\int_z^\infty n(O_2, z) dz \ll \sigma_\nu, \text{ および } n(O_2, z) \ll A_{DP}/k_7, \quad (10)$$

が成立する場合には (8) は

$$j(6300 \text{ \AA}, z) \approx \frac{3}{4} (\infty) n(O_2, z) \quad (11)$$

と近似されるから, $j(6300 \text{ \AA}, z)$ と $J(\infty)$ を知ることによって $n(O_2, z)$ を知ることができる. さらに, 十分低いところで,

$$n(O_2, z) \gg A_{DP}/k_7 \quad (12)$$

が成立する場合には,

$$j(6300 \text{ \AA}, z) \approx \frac{3}{4} J(z) A_{DP}/k_7 \quad (13)$$

となり, $j(6300 \text{ \AA})$ と $J(z)$ を知って k_7 を推定することができる.

高度 160km 以下の $j(6300 \text{ \AA}, z)$ と Nicolet のモデル大気 [17][18] を用いて, (13) より $k_7 = 1.6 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{sec}$ と計算される. この値は前出の Wallace・Chamberlain の推定値 [12] および永田・小川の推定値 [7] とほぼ一致している. 今後は k_7 として,

$$k_7 = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{sec} \quad (14)$$

をとることとする.

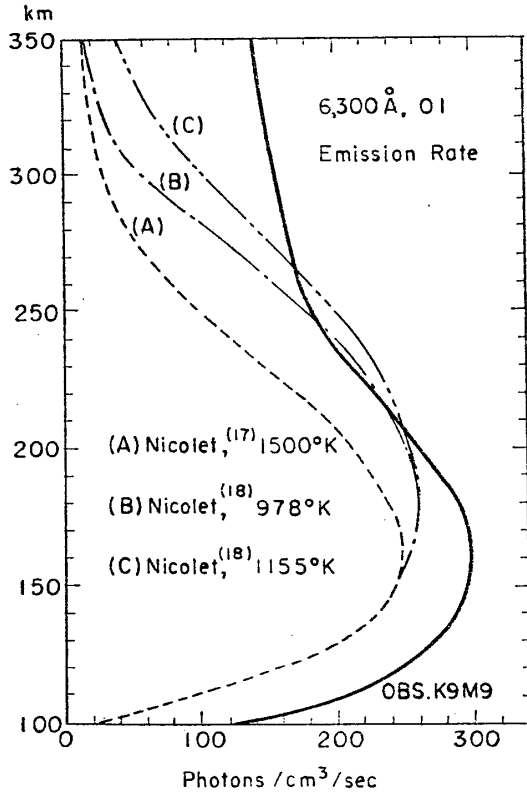
第 4 図において, 曲線 (A), (B), (C) は Nicolet 大気モデルによる $S.R$ の理論分布を示している (太陽高度 30° の場合). 高度 200~280km では実測と, 理論値 (B), (C) の一致は比較的よいが 280km 以上での様相はかなり違うことがわかる.

一方, $D.R$ による励起は実測の電子密度と温度から算出することができる. この場合, 反応係数およびイオン相対量は永田・小川 [7] および等松・小川・鶴田 [19] の研究によって決めた. 計算の結果では $D.R$ による輝度は 500R となり, $S.R$ の約一割となった.

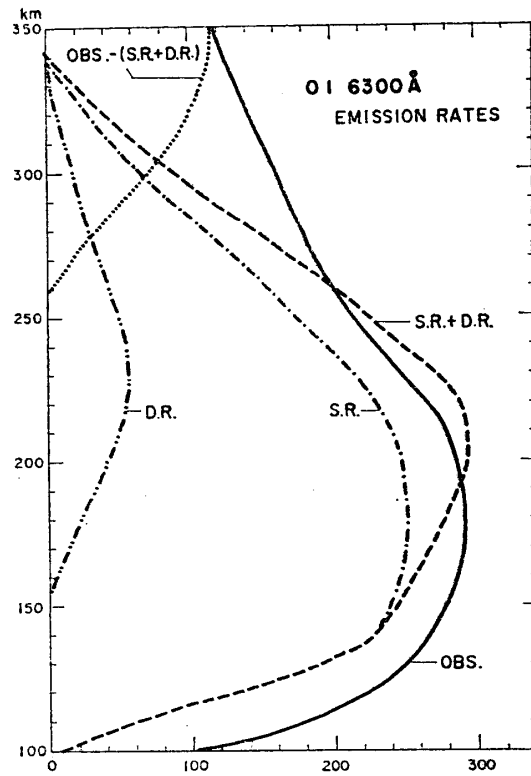
第 5 図は実測と $S.R + D.R$ とを比較したものであり, 280km 以上の両者の相違がまだ残っているので, 300km 以上での他の原因による励起も考えられないわけではない. 一つの可能性として, $T.E$ による励起を考えると, Chamberlain [10] によれば,

$$k_6(T_e) = 2.1 \times 10^{-14} (2000/T_e)^{1/2} \exp(22700/T_e) \quad (15)$$

であり, これと Nicolet の O の分布のモデル [18] を用いて, $T.E$ による励起は約 35R と算出されたことは 280km 以上の差異を説明するには不十分で, 実際この機構で説明しようとするれば, 300km より高処で, $T_e > 2700^\circ \text{K}$ が必要である. そのほかの可能性としては,



第 4 図 シューマンルンゲ解離による励起と実測との比較 (本文参照)



第 5 図 6300 Å 大気光放射率の高度分布, 実測と理論との比較

Nonthermal な光電子による励起も考えられるが, 理論的推定によれば約 500R 程度の励起が予想される。

3914 Å 大気光の理論的解釈

従来この大気光の励起に関して二つの機構が提案されている。

(i) 太陽 3914 放射の N_2^+ による螢光散乱[20][21](F. S.)

$$N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + h\nu(\lambda \sim 3914\text{Å}) = N_2^+(B^2u^+) \quad (16)$$

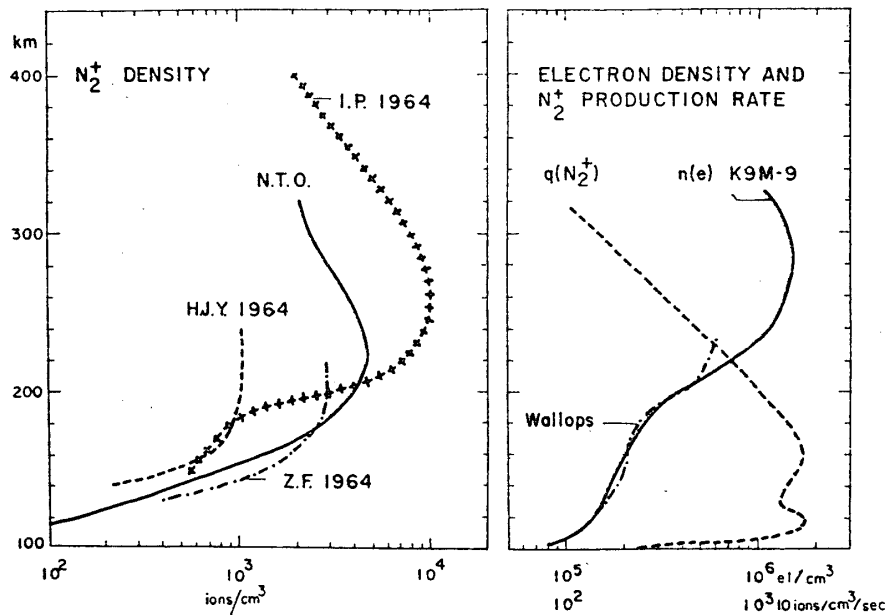
(ii) 太陽 X. U. V 放射による N_2 の同時電離, 励起[22](S. I. E.)

$$N_2(X^1\Sigma_g^+) + h\nu(\lambda \leq 660\text{Å}) = N_2(B^2\Sigma u^+) \quad (17)$$

Lyttle・Hunten [23] によれば太陽光線による (16)の励起率は 0.068 photons/ion/sec である。Dalgarno McElroy [24] によれば S. I. E. による励起はあまり有効でないという。等松・小川・鶴田によれば $\lambda=30^\circ$ の場合, S. I. E. による 1st Negative Bands の励起の全量は 1.2×10^9 transitions/cm²·column/sec であり, 3914 Å 帯としては 350R である。これは Zipf・Fastie[25] のロケット実測値の約 5% であり, F. S. に比してきわめて小さいと予想される。かくして, N_2^+ の密度は,

$$n(N_2^+, z) = j(3914\text{Å}, z) / 0.068 \quad (18)$$

から計算されることになる。この方法で求められた N_2^+ の分布は第 6 図に示されている。(N. T. O.). 第 6 図には Zipf・Fastie[25] (May 7 1963, 1611 EST, Wallops Is.) の結果も

第6図 実測より求めた N_2^+ イオンの分布および関連量の高度分布

示されていて (Z. F), 両者は比較的良好に一致している。最大密度は 230 km 附近で 5×10^3 ions/cm³ となるが, $h > 300$ km でもまだ 10^3 ions/cm³ 以上の密度を持っていることが注目される, $n(N_2^+, z)$ は質量分析器によっても定量されているが, 同図中 H. J. Y. は Holmes・Johnson・Young [26] による, I. P. は Istomin Pokhunkov [27] の実測値を示している。第6図右には K9M-9 による電子密度分布, Zipf・Fastie 等の実験時のアイオノグラムによる ($n-H$) 曲線および N_2^+ の生成率を示した。

N_2^+ は電離層中では O^+, O_2^+ をしのぐ生成率を持っているが, 数密度からいうと全イオン密度の $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ ということになる。その説明としては以下の二つの消滅機構が考えられている [29][34]。

$$N_2^+ + e = N + N, k_{19}(T_e) \quad (19)$$

$$N_2^+ + O = \begin{cases} NO^+ + N \\ N^+ + NO \end{cases} k_{20}(T) \quad (20)$$

Zipf・Fastie はこれ以外に

$$N_2^+ + O_2 = \begin{cases} NO^+ + NO \\ N_2 + O_2^+ \end{cases} k_{21}(T) \quad (21)$$

$$k_{21} = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{sec} [28]$$

を考えている。

電離平衡を仮定して

$$n(N_2^+, z) = q(N_2^+, z) / [k_{19}(T_e)n(e, z) + k_{20}(T)n(O, z)] \quad (22)$$

を得る。また k_{19} については多くの実験があり [30][31], ここでは

$$k_{19}(T_e) = 3 \times 10^{-7} (300/T_e)^{3/2} \text{cm}^3/\text{sec} \quad (23)$$

とおいた。温度依存性は Mentzoni の結果[32] を考慮した。

これらの事実を K9M-9 の実測と比較して

$$k_{20} \approx 3 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{sec} \quad (24)$$

を得た。これは Norton 等の導いた値[34] $k_{20} \approx 2 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{sec}$ に近い、Zipf・Fastie は同じくロケット実験から $k_{20} = 6 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{sec}$ を得ている。

本論文中電子密度・電子温度の資料は宇宙航空研究所平尾邦雄教授ならびに郵政省電波研究所 I. D. 実験班の方々のご好意によるものである。

1966年4月25日

参 考 文 献

- [1] J. C. BRANDT; *Astrophys. J.* **128**, 718 (1958)
- [2] J. F. NOXON; *J. Geophys. Res.* **69**, 3245 (1964)
- [3] T. TOHMATSU and H. TANABE; *Rep. Ionosph. Res. Japan* **13**, 290 (1959)
- [4] C. S. DEEHR and M. H. REES; *Planet. Space Sci.* **12**, 875 (1964)
- [5] E. C. ZIPF and W. G. FASTIE; *J. Geophys. Res.* **69**, 2357 (1964)
- [6] L. WALLACE and R. A. NIDEY; *J. Geophys. Res.* **69**, 471 (1964)
- [7] T. NAGATA and T. OGAWA; *Rep. Ionosph. Space Res. Japan* **18**, 394 (1964)
- [8] D. BARBIER; *Planet. Space Sci.* **10**, 29 (1963)
- [9] A. DALGARNO and C. G. WALKER; *J. Atmos. Sci.* **21**, 463 (1964)
- [10] J. W. CHAMBERLAIN; *Physics of the Aurora and Airglow*. Academic Press, New York (1961)
- [11] D. R. BATES and A. DALGARNO; *J. Atmos. Terr. Phys.* **4**, 112 (1953)
- [12] J. W. CHAMBERLAIN and L. WALLACE; *Planet. Space Sci.* **2**, 60 (1959)
- [13] R. H. GARSTANG; *The Airglow and the Aurora* (eds. E. B. Armstrong and A. Dalgarno). Pergamon Press, London (1956)
- [14] C. W. ALLEN; *Astrophysical Quantities*, Oxford University Press (1955)
- [15] C. R. DETWILER, D. L. GARRETT, J. D. PURCELL and R. TOUSEY; *Ann. Géophys.* **17**, 263 (1961)
- [16] P. H. METZGER and G. R. COOK; *J. Quant. Spectrosc. Radiat Transf.* **4**, 107 (1964)
- [17] M. NICOLET; *Ann. Géophys.* **15**, 1 (1959)
- [18] M. NICOLET; Scientific Report No. 155 Pennsylvania State Univ. (1962)
- [19] T. TOHMATSU, T. OGAWA and H. TSURUTA; *Rep. Ionosph. Space Res. Japan* **19** (1965), in press,
- [20] O. R. WULF and L. S. DEMING; *Terr. Mag. Atmos. Electr.* **43**, 283 (1938)
- [21] D. R. BATES; *Proc. Roy. Soc. A* **196**, 562 (1949)
- [22] M. N. SAHA; *Proc. Roy. Soc. A* **160**, 155 (1937)
- [23] E. A. LYTLE and D. M. HUNTEN; *Canad. J. Phys.* **38**, 477 (1960)
- [24] A. DALGARNO and M. B. McELROY; *Trans. Amer. Geophys. Un.* **44**, 84 (1963)
- [25] E. C. ZIPF and W. G. FASTIE; *J. Geophys. Res.* **69**, 2357 (1964)

- [26] J. C. HOLMES, C. Y. JOHNSON and J. M. YOUNG; *Space Research V*, p. 756. North Holland (1965)
- [27] V. G. ISTOMIN and A. A. POKHUNKOV; *Space Research III*, p. 117. North Holland (1963)
- [28] F. C. FEHSENFELD, A. L. SCHMELTKOPF and E. E. FERGUSON; *Planet. Space Sci.* **13**, 219 (1965); *Planet. Space Sci.* **13**, 219 (1965)
- [29] D. M. HUNTEN; *Planet. Space Sci.* **10**, 37 (1963)
- [30] W. H. KASNER, W. A. ROGERS and M. A. BIONDI; *Phys. Rev. Letters* **7**, 321 (1961)
- [31] W. H. KASNER, W. A. ROGERS and M. A. BIONDI; *Bull. Amer. Phys. Soc.* **9** (1964)
- [32] M. H. MENTZONI; *J. Geophys. Res.* **68**, 4181 (1963)
- [33] K. WATANABE and H. E. HINTEREGGER; *J. Geophys. Res.* **67**, 157 (1962)
- [34] R. B. NORTON, T. E. VAN ZANDT and J. S. DENISON; *Proceedings of International Conference on the Ionosphere, July*, (1962), p. 26.