

地球コロナおよび惑星間ヘリウムグローの観測*

等 松 隆 夫**・小 川 利 紘**

Geocorona and Interplanetary Helium Glow

By

Takao TOMATSU and Toshishiro OGAWA

Abstract. The altitude distribution of the extreme ultraviolet emissions of neutral helium (He 584 Å) and singly ionized helium (He⁺ 304 Å) was measured by aluminum and bismuth thin-film photon counters aboard an exospheric sounding rocket flown from Uchinoura, Japan, on September 19, 1970, 2030 JST. On ascent the He 584-Å intensity increased from 40 to 100 R between 250 to 720 km and then decreased gradually to 30 R at 1,600 km. On the downleg the intensity remained nearly constant at 5 R between 1,400 and 600 km and then decreased gradually to about 2 R at 440 km. The excitation mechanism of the He 584-Å glow is ascribed to resonance fluorescence of atmospheric helium by solar 584-Å radiation. The observed distribution is consistent with a diffusive equilibrium distribution of helium at a thermopause temperature of $1,180 \pm 50^\circ\text{K}$ and having a base-line value of density of $(1.2 \pm 0.2) \times 10^6$ atoms/cm³ at 720 km. The intensity of He⁺ 304-Å glow decreased from 12 to 4 R on ascent from 420 to 1,200 km and then remained almost steady at 1.5 ± 0.5 R through the same altitude range on descent. The absolute intensity of the 304-Å flow was at least 2.5 times greater than expected from resonance fluorescence by ionospheric helium ions of solar 304-Å radiation. Evidence for the presence of extraterrestrial helium glow is discussed

概 要

1970年9月19日20時30分に打ち上げられた観測ロケット、L3H6号機による高度250～2,017 kmの間で地球コロナおよび惑星間空間に起因するとおもわれるヘリウム 584 Å および 304 Å グローの測定結果についてのべる。He 584 Å 強度は上昇時 250～720 km の範囲で 40 から 100 R と増加し、それ以後は減少し、高度 1,600 km では 30 R になった。ロケット下降時には 1,400～600 km の範囲では約 5 R、それ以後は減少し、440 km では 2 R 以下であった。この結果をもちいて求めた中性大気の温度は $1,180^\circ\text{K} \pm 50^\circ\text{K}$ で

* 宇宙研特別事業費による論文

** 東京大学理学部

あり, またヘリウム密度は 720 km において $(1.2 \pm 0.2) \times 10^6 \text{ atoms/cm}^3$ となった. 一方, He^+ 304 Å は 420~1,200 km の間で 12 から 4 R に減少し, また下降時には $1.5 \pm 0.5 \text{ R}$ であった. この強度は電離層に存在するヘリウムイオン量からすると強すぎるので, 惑星間グローである公算が大きい.

1. 序 説

地球周辺の中性ヘリウム (He) およびヘリウムイオン (He^+) の分布状態をしらべる目的で, 紫外線検出器を考案し, 高度 2,017 km までの強度分布を測定した. ヘリウム輝線, He^+ 304 Å, および He 584 Å の起源としては地球超高層大気 (地球コロナ) 成分 (Brandt, 1961; Tohmatsu and Fujita, 1964) および惑星間成分 (Tohmatsu, 1970) の二つがあるものと予想される.

同様の目的をもって, また同様な実験手法による観測がすでに若干試みられている (Byram, et al., 1957, Bowyer, et al., 1968; Young et al., 1968, 1971, Paresce et al., 1970; Kumar et al., 1970, Johnson, et al., 1970, 1971). しかしながら L3H6 号機によって過去に試みられなかった高々度での実験が可能となった.

He は非常に大きい scale height (300~700 km) をもっている所以, 水素を除く他のすべての大気構成成分原子にくらべて高度による減少がゆるやかであるので, その分布は 2,000 km 以上にまでおよぶことが予想される. また He は 584 Å 共鳴線に対していちじるしい吸光を示すので, 1,200 km 以下の大気では光学的後薄い大気での放射輸送の近似は許されないので問題が複雑となる (Tohmatsu and Fujita, 1964).

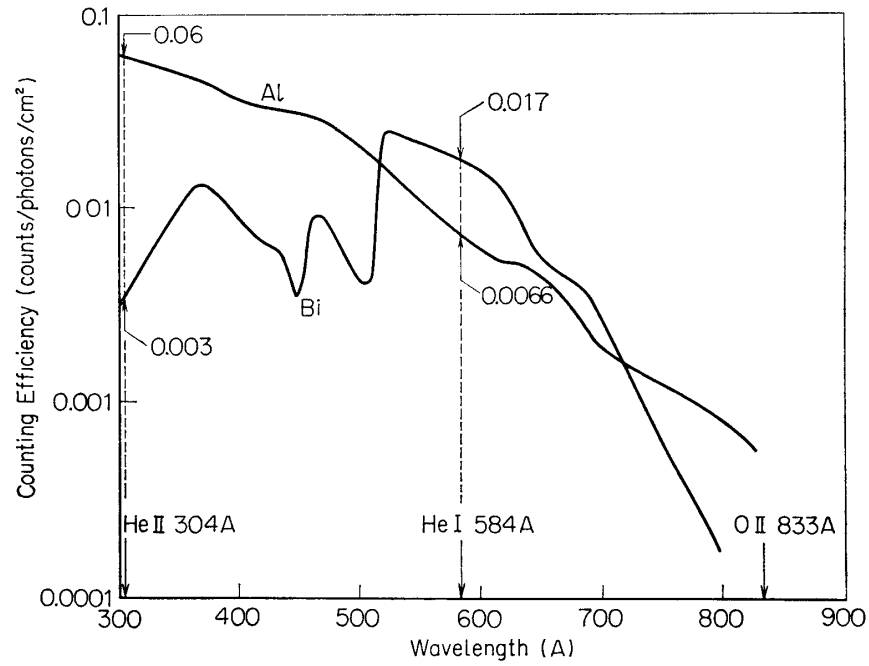
2. 観 測 装 置

使用した紫外線検出器は 2 台で, 各検出器はハネカムコリメタ, 極紫外フィルタ, チャネルマルチプライヤおよび電子計数回路からなりたっている. ハネカムコリメタは 40 mm² の有効面積をもち, 視野角 3° (0.00785 sterad. 相当) である. 極紫外フィルタは金属薄膜で, ビスマスおよびアルミニウム製で, その厚みは 0.1 ミクロン, 直径は 8 mm である. 実際にはフィルタは透過率 90% 以上のニッケルメッシュの上に張られている (Tomiki, 1970). チャネルマルチプライヤは松下中央研で開発された可撓タイプで曲率半径 2.5 cm, 光電面有効径 10 mm のものである (Hayashi, et al., 1969).

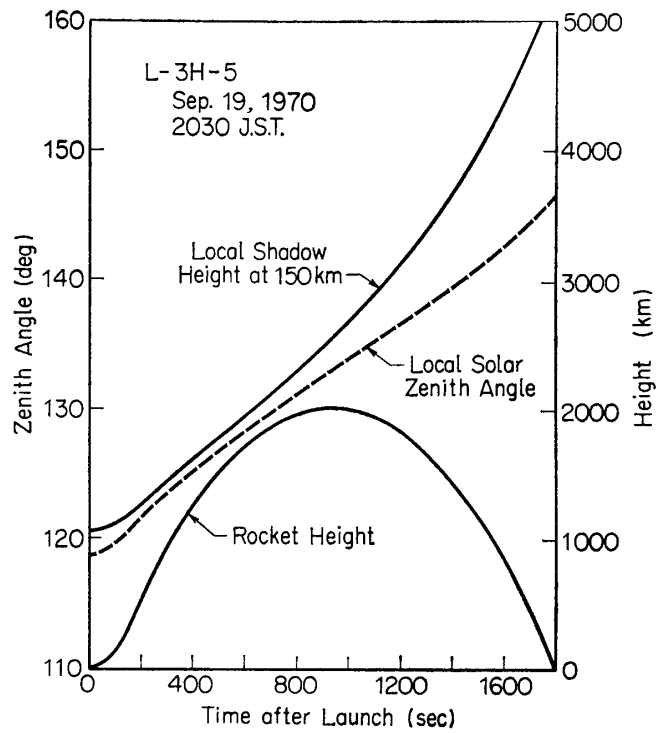
L3H6 搭載の検出器の波長感度特性を第 1 図に示した. 1,216 Å (H Ly- α) での透過率は 0.01% 以下であり, 仮に Ly- α 地球コロナが 5 kR としても 304 Å に相当するもれこみは 0.2 R 以下と推定され, 問題にはならないことがわかる. また O^+ 844.6 Å 大気光の混光も, ここで問題にする高さ 500 km では無視し得ることがわかった (Carlson and Judge, private communication).

3. 飛 しょう 実 験

観測ロケットは内之浦 (131°05' E, 31°15' N) から 1970 年 9 月 19 日, 20.30 JST に東向きに発射された. この実験では 250~2,017 km の高度範囲で観測が実施された. 第 2 図



第 1 図 L-3 H-6 紫外線検出器の波長感度特性

第 2 図 L-3 H-6 ロケットの軌道, 太陽天頂角
および 150 km 天気層の陰影線高度

にロケットの軌道データおよびそのときの太陽高度と 150 km 大気レベルの陰影線の高さを示した。

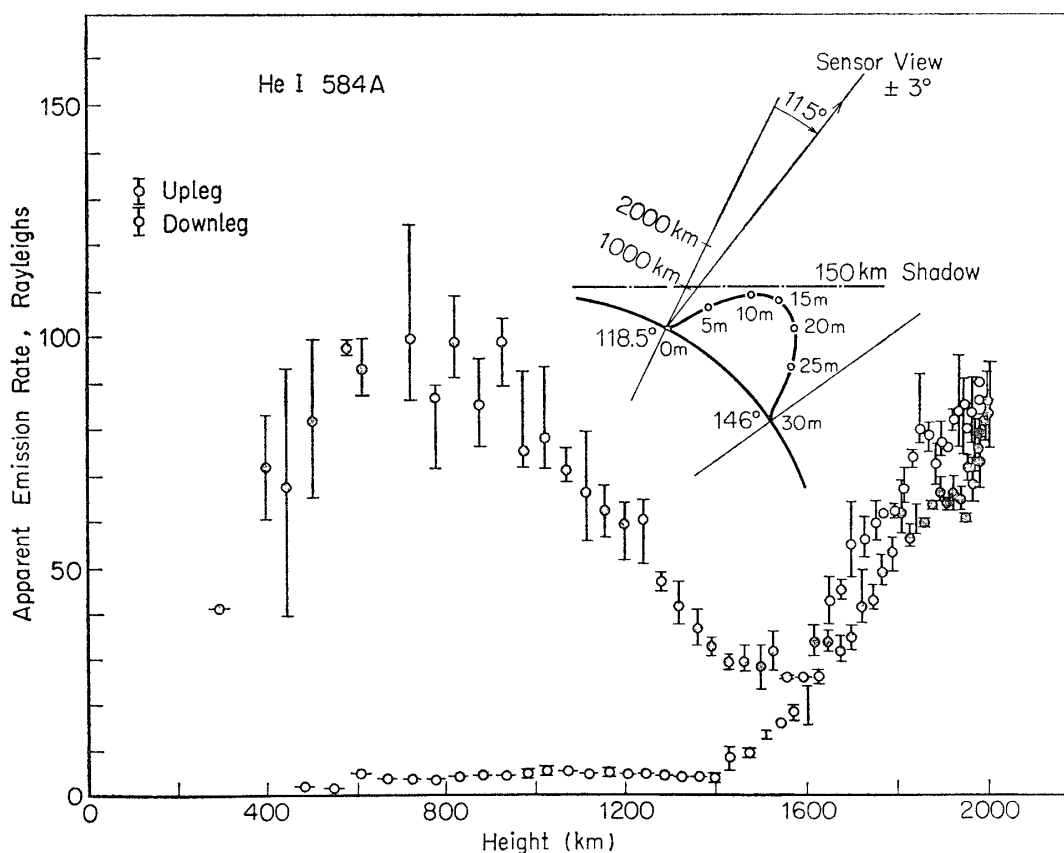
飛しょうとともに地理座標は ($131^{\circ}05' E$, $31^{\circ}15' N$) から ($154^{\circ}38' E$, $27^{\circ}41' N$) と変化したので、実際の飛しょう時間と経度変化を重ね合わせると、実験の前半と後半では約 2 時間の地方時の差があることになる。一方、紫外検出器の視線も $11.5^{\circ} E$ から $12^{\circ} W$ へ変化していったと思われる。ロケットのプレセッションを見積っても天頂角は 37° 以内に入っていたと思われる。

観測は発射 150 sec 後のマルチプライヤ高圧 ON で開始、電波水平線下にロケットが降下した 1,700 sec 後まで続けられた。

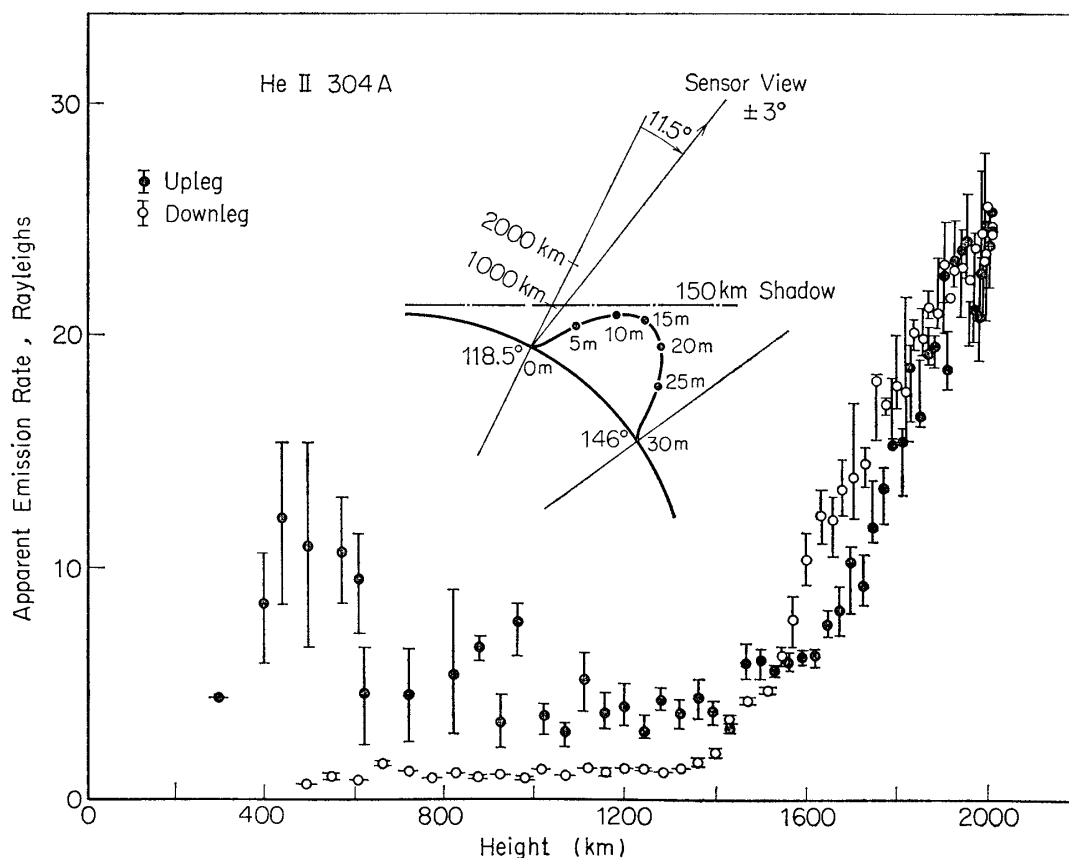
4. 実 験 結 果

第 3, 4 図にそれぞれ 304 \AA および 584 \AA の実験結果を示した。図において、黒丸および白丸はそれぞれ上昇時、および下降時の各 9 移間の平均強度、また縦線は考えられる計数誤差の最大、最小値である (mean probable error はこれよりずっと小さくなる)。

問題となるのは両図で 1,600 km 以上で強度が見かけじよう上昇するが、これは放射能帯の高速電子による影響であつて実際の信号ではない。



第 3 図 He 584 Å グローの高度分布

第4図 He⁺ 304 Å グローの高度分布

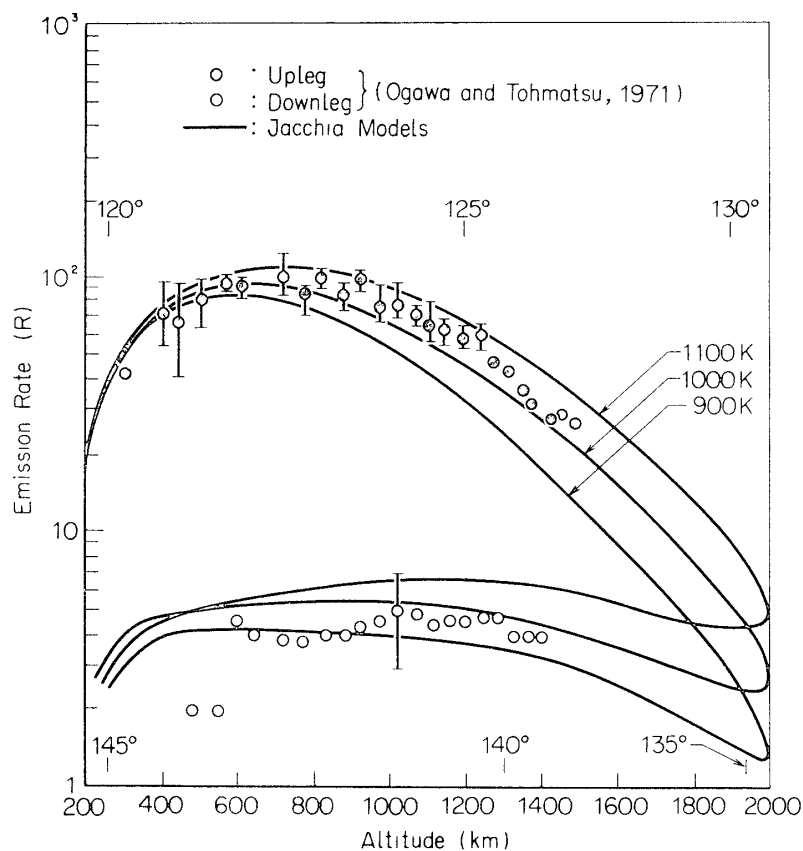
5. He 584 Åの実験結果の検討

He 584 Å に対する大気の光学症厚みは非常に大きく、1,200 km でまだ1程度の大きさになっているので、厚い大気内での放射輸送の取扱いを必要とする。平行平面大気内での理論は Tohmatsu and Fujita (1964) および Tohmatsu and Ogawa (1966) で論じられているが、この場合のような夕方から夜にかけての実験では、昼間の側からの二次散乱による 584 Å のまわりこみが主要成分であるので、球上分布大気における計算が必要である。第5図はその結果を示すものであり、thermopause temperature が 900°K, 1,000°K および 1,100°K に相当した Jacchia の model He 分布について計算した強度と実測とを比較している。

この結果、観測された 584 Å グローの大部分は地球コロナに起因するとみて良いと結論されるとともに、外気圏の温度として 20 時には 1,050°K ± 50°K, 22 時頃には 950°K ± 50°K ということが結論される。

6. He⁺ 304 Å の実験結果

He⁺ 304 Å の励起機構として、584 Å と同様に太陽 304 Å 線の共鳴散乱とみた場合、観測される強度は (Tohmatsu, 1969),



第 5 図 He 584 Å グロー実測と計算との比較 (Meir 氏の計算による)

$$4\pi I(304 \text{ Å}) = g \int_{z(\text{shadow})}^{\infty} n(\text{He}^+, z) dz,$$

ここに $n(\text{He}^+, z)$ は He^+ の数密度, g は散乱効率 (304 Å については, 最大値 3×10^{-5} photons/ion/sec, 平均値としては 1×10^{-5} photons/ion/sec), dz は視線方向の線要素, $z(\text{shadow})$ は陰影線の高さである.

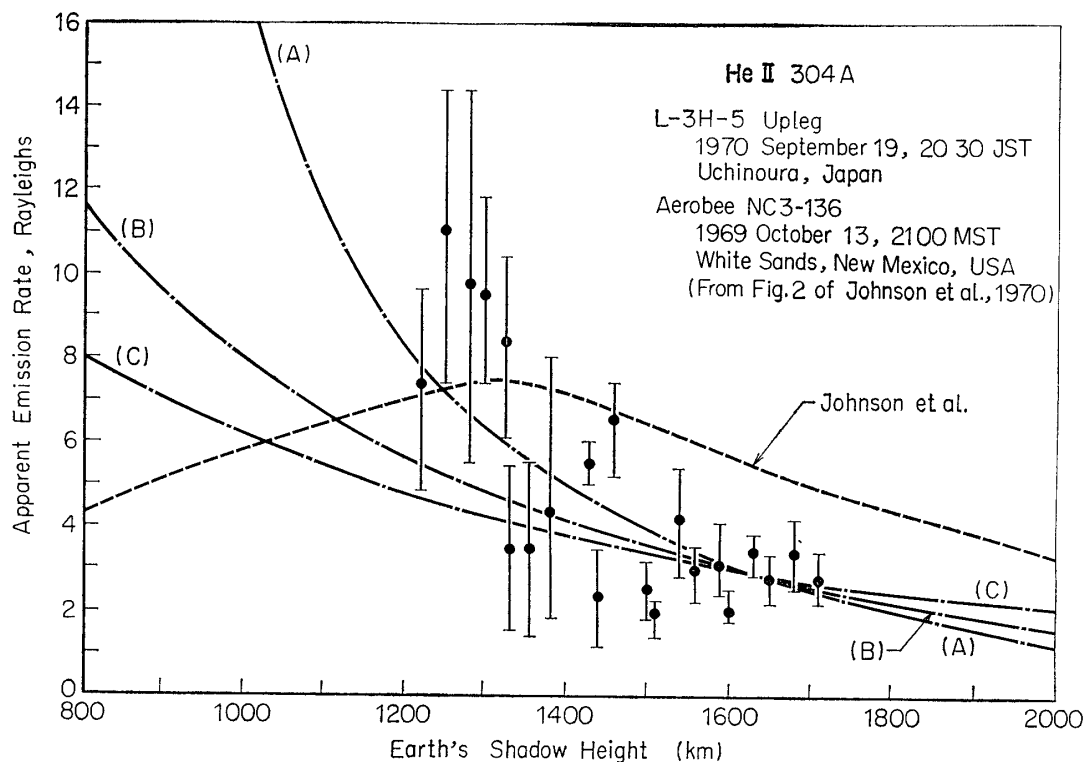
He^+ の分布後については Maier (1969), Johnson (1967) などの実測がある. 拡散平衡時には理論的に, 高速分布は

$$\frac{n(\text{He}^+, r)}{n(\text{He}^+, a)} = \exp \left[-\frac{a}{r} \cdot \frac{(r-a)}{H(\text{He}^+, a)} \right],$$

ここに r は地心距離, a は基準高度での地心距離, また $H(\text{He}^+, a)$ はそこでの scale height である. Bauer (1966) によれば

$$\frac{1}{H(\text{He}^+, a)} = \frac{1}{H(4, a)} - \frac{T_e}{(T_e + T_i)H(1, a)},$$

ここに T_e, T_i はそれぞれ電子, イオン温度, また $H(4, a), H(1, a)$ は質量数 1 および 4 の原子の scale height である. 化学反応による He^+ の損失を無視し (Maier, 1969), また熱拡散による影響 (Shunk and Walker, 1969, 1970), を省略することが許されるので, この理論的分布と実測を比較することができる. その結果を第 6 図後示す.



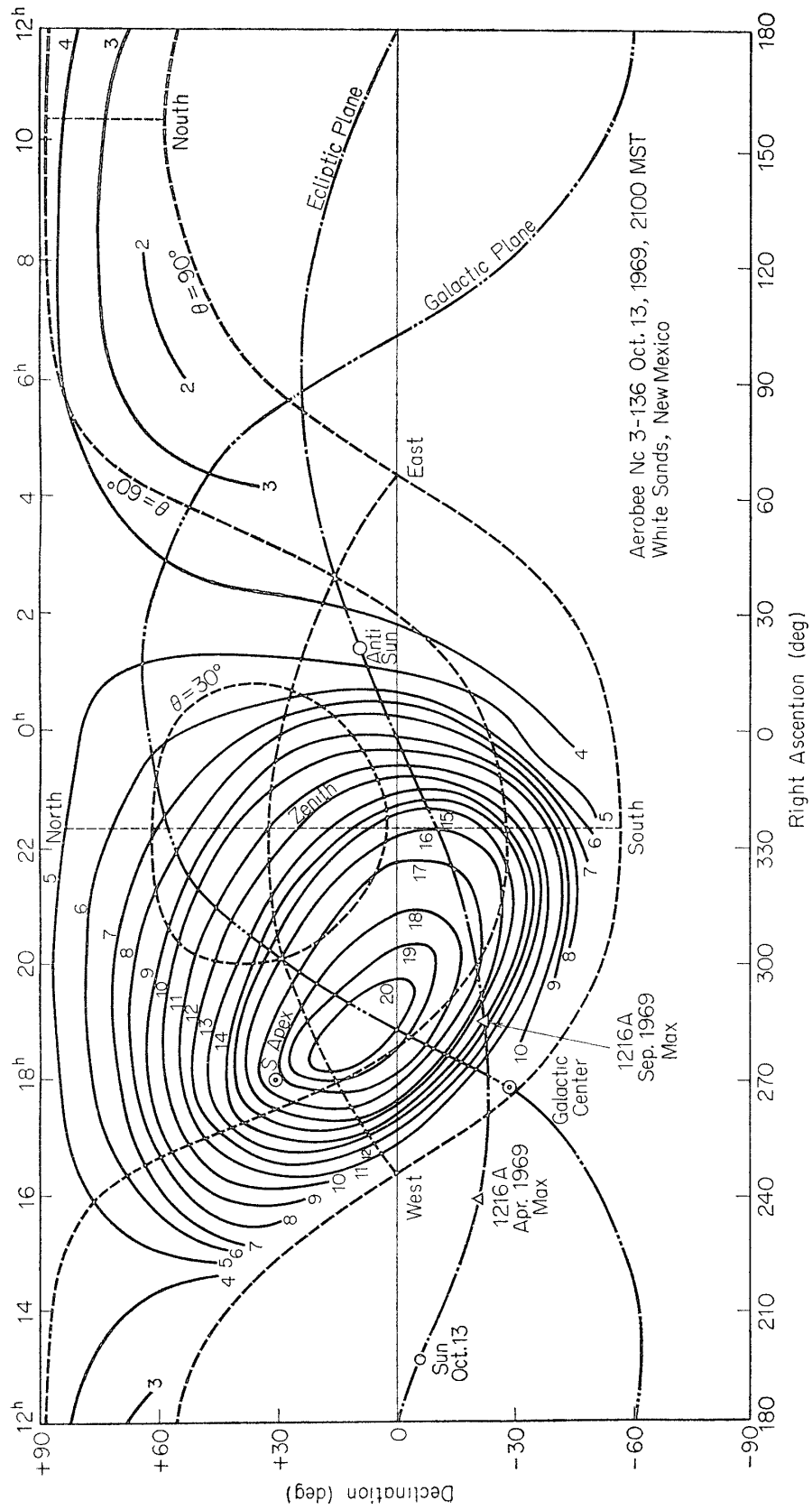
第6図 陰影線高度と $\text{He}^+ 304 \text{ Å}$ グロー強度, 実測と計算値. (A) $n(\text{He}^+, 8,000 \text{ km}) = 3.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $T_e = T_i = 1,000^\circ\text{K}$; (B) $8.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, $1,500^\circ\text{K}$, (C) $4.3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, $2,000^\circ\text{K}$

第6図において理論と実測を比較する場合次の二つの問題点がある.

(i) 曲線 A, B, C はそれぞれ温度 $1,000^\circ\text{K}$, $1,500^\circ\text{K}$ および $2,000^\circ\text{K}$ に対する理論強度分布を示している. 曲線は実験と良く合致するように見える. しかしながら, 基準高度として 800 km ($a=7,170 \text{ km}$) をとった場合, $n(\text{He}^+, 7,170 \text{ km}) = 3.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ($g=3 \times 10^{-5}$ photons/ions/sec とおめにとっている) で, 本当はこの3倍程度) と非常に大きいイオン密度を仮定する必要がある. Taylor et al. (1970) および Chandra et al. (1970) のイオン実測ではこの $1/3 \sim 1/10$ となっている. 一方 T_e を上げて $n(\text{He}^+, a)$ を小さくしようとすると実測の高度分布をうまく説明できない.

(ii) 第4図にすでに示したように, $\text{He}^+ 304 \text{ Å}$ の分布は空間的不均一を暗示するばらつきがある. おもしろい事実として, Johnson et al. (1971) の同様の実測を, 同じ視線方向の結果について図示してみると第6図の点線のようなになる. これは L3H6 の結果と非常に良く似ている.

このようなことから, 結論として, 304 Å グローの起源として, 電離層の He^+ のみを考えることは不可能であるといえる. 新しい解釈の糸口を示すのが第7図である. 第7図は Johnson et al. (1971) と L3H6 の結果を天球座標に投影した結果である. これで見ると 304 Å の明るい領域は赤経(A) 283° , 赤緯北 10° にあり, しかも銀河面上にのっているとい

第 7 図 He⁺ 304 グローの天球座標分布

う事実である。同じ図には、太陽系の近傍星に対する運動方向(Solar apex)、太陽位置(Sun)および反太陽点(Anti Sun)が示されている。He⁺ 304 Å の極大が Solar apex および銀河面に近く存在することは、このグローの特質が、星間ガスと太陽系固有運動になんらかのかかわりあいを持っていることを暗示している。さらに第7図後は地球外水素ライマンアルファ(1216 Å)グローの極大点を図示している(Thomas and Krassa, 1971)。H 1216 Å のグローの成因については、星間水素と太陽風プロトンとの電荷交換作用にともなう熱い水素による太陽 Ly-α の共鳴散乱して説明されている。Tohmatsu (1970) はこれを He 星間ガスの場合に拡張した。その結果によると、He⁺ 304 グローの場合には、太陽風内の He⁺⁺ または He⁺ イオンの散乱では説明されず、むしろ星間中性ヘリウムの一部が太陽系内に侵入し、太陽紫外線によって電離し、太陽系磁場によって捕捉されたものと解釈する方が妥当のようである。

1972 年 1 月 14 日

参 考 文 献

- Angerami, J. J., Whistler duct properties deduced from VLF observations made with the Ogo 3 satellite near the magnetic equator, *J. Geophys. Res.*, 75, 6115, 1970.
- Bauer, S. J., Hydrogen and helium ions, *Ann. Geophys.*, 22, 249, 1966.
- Bowyer, C. S., P. M. Livingston and R. D. Price, Upper limits to the 304-Å and 584-Å night helium glow, *J. Geophys. Res.*, 73, 1107, 1968.
- Brandt, J. C., Interplanetary gas, 6, Diffuse extreme ultraviolet helium radiation in the night and day sky, *Astrophys. J.*, 134, 975, 1961.
- Byram, E. T., T. A. Chubb, H. Friedmann, and J. Kupperian, Far ultraviolet radiation in the night sky, *The Threshold of Space*, edited by M. Zelikoff, p.203, Pergamon, New York, 1957.
- Chandra, S., B. E. Troy, Jr., J. L. Donley, and R. E. Bourdeau, Ogo 4 observations of ion composition and temperature in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 75, 3867, 1970.
- Cira, 1965, Cospar international reference atmosphere, compiled by Cospar W. G. IV, North Holland, Amsterdam, 1965.
- Hayashi, T., M. Hashimoto, and K. Yamamoto, Flexible channel multiplier, *Rev. Sci. Instrum.*, 40, 1239, 1969.
- Johnson, C. Y., Ion and neutral composition of the ionosphere, paper presented at Joint Symposium, IQSY/Cospar, London, 1967.
- Johnson, C. Y., J. M. Young, and J. C. Holmes, Magnetoglow—A new geophysical resource, Report of NRL progress, August 1970, *Science*, 171, 379, 1971.
- Kumar, S., C. S. Bowyer, M. Lampton, and F. Paresce, First observations of He I 584 Å and He II 304 Å dayglow radiations (abstract), *Eos Trans. AGU*, 51, 795, 1970.

- Maier, E. J. R., Sounding rocket measurements of ion composition and charged particle temperature in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 74, 815, 1969.
- Maier, W. B., II, Reactions of He^+ with N_2 and O_2 in the upper atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 16, 477, 1968.
- Meier, R. R., and P. Mange, Geocoronal hydrogen: An analysis of the Lyman-alpha airglow observed from Ogo 4, *Planet. Space Sci.*, 18, 803, 1970.
- Paresce, R., C. S. Bowyer, S. Kumar, and M. Lampton, Rocket observations of extreme ultraviolet radiations in the night airglow (abstract), *Eos Trans. AGU*, 51, 795, 1970.
- Park, C. G., and D. L. Carpenter, Whistler evidence of large-scale electron-density irregularities in the plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, 75, 3825, 1970.
- Shunk, R., and J. C. G. Walker, Thermal diffusion in the topside ionosphere for mixtures which include multiply-charged ions, *Planet. Space Sci.*, 17, 853, 1969.
- Shunk, R. W., and J. C. G. Walker, Thermal diffusion in the F_2 -region of the ionosphere, *Planet. Space Sci.*, 18, 535, 1970.
- Taylor, H. A., J., H. C. Brinton, M. W. Pharo, III, and N. K. Rahman, Thermal ions in the exosphere: Evidence of solar and geomagnetic control, *J. Geophys. Res.*, 73, 5521, 1968.
- Taylor, H. A., Jr., H. G. Mayer, and H. C. Brinton, Observations of hydrogen and helium ions during a period of rising solar activity, *Space Res.*, 10, 664, 1970.
- Thomas, G. E., Lyman-alpha scattering in the earth's geocorona, 1, *J. Geophys. Res.*, 68, 2639, 1963.
- Thomas, G. E., and R. F. Krassa, Ogo 5 measurements of the Lyman alpha sky background, *Astron. Astrophys.*, 11, 218, 1971.
- Tohmatsu, T., The hydrogen and helium ultraviolet glow, Its origins and aeronomical significance, *Space Res.*, 10, 608, 1970.
- Tohmatsu, T., and C. Fujita, He I 584 Å and He II 304 Å day airglow, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 18, 410, 1964.
- Tohmatsu, T., and T. Ogawa, Theoretical studies of the airglow resonant emission transfer, *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, 20, 418, 1966.
- Tomiki, T., *Matsushita Industrial Catalog*, Matsushita Electrical Industries, Osaka, 1970.
- Young, J. M., G. R. Carruthers, J. C. Holmes, C. Y. Johnson, and N. P. Patterson, Detection of Lyman β and helium resonance radiation in the night sky, *Science*, 160, 990, 1968.
- Young, J. M., C. S. Weller, C. Y. Johnson, and J. C. Holmes, Rocket observations of the far UV night glow at Lyman α and shorter wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 76, 3710, 1971.