

惑 星 間 グ ロ ー

等 松 隆 夫*

1. はじめに

惑星間空間の物質の研究手段としては古くから黄道光の観測があった。黄道光には宇宙微塵による太陽光のミーン散乱と自由電子のトムソン散乱の二成分があるといわれ、各成分の強さから惑星間空間の固形物質とガス（電子）密度を求めることがなされてきた（1954年のペールジーデントプの算出した電子密度は地球近傍で数百個/ccであったが現在ではブラックウェルらにより20個/cc以下とされている）。

一方、Mariner 宇宙船、IMP、Vela 衛星などによる惑星間空間の探査がすすみ、なかでも太陽風の存在は観測的に実証され、現在ではその運動エネルギー、粒子密度、組成などが刻々と地上におくられてきている。太陽風は太陽コロナ外縁が外側にむかってぼう脹することによっておこる超音速流であるといわれており、その速さは300~700 km/sec、粒子密度は地球付近で平均5個/ccであり、組成は大部分が陽子（ H^+ イオン）でこのほか平均5%程度の α 粒子（ He^{++} ）、また酸素原子の高次イオン（ O^{+5} , O^{+6} , O^{+7} など）がふくまれている。

それでは惑星間空間のガス成分ははたして完全電離した太陽風ガスのみであろうか？このほかに太陽系に固有なガス（イオン、中性）が存在するのではなからうか？このような疑問は太陽系内の物質、電磁場をふくめた構造と力学を理解するために大変重要なことと思われる。前述の黄道光観測からの惑星間ガス密度の推定値が惑星間空間探査船による太陽風の観測の発達に歩調を合わせて(?)小さくなっているのは真に黄道光観測の精度の向上によるものかどうかと疑うのは筆者の偏見のみであろうか。

黄道光以外の現象を観測して惑星間ガスの状態を観測できれば大変興味あることである。地上あるいは地球の近傍で惑星間ガスの発する輝線スペクトルの測定がまず考えられることである。太陽の紫外放射は1500 Å以下では主としてH, He, O, Si, Feなどの輝線であるので、もし惑星間ガス中に同じ原子（イオン）があれば共鳴的に光の散乱がおこり“惑星間グロー”をおこすであろう。そしてその強度を観測することによって地球近傍のガス密度を求めることができよう。当然の事ながらHI 1216 Å（ライマンアルファ）、HI 1026 Å（ライマンベ

ータ）、HeI 584 Å, HeII 304 Å（ヘリウムライマンアルファ）などが当面の観測対象としてあげられる。これらの紫外グローは地球大気の底ではもちろん観測不可能で、少くとも200 km以上の高度でロケットあるいは人工衛星をもちいて観測する必要がある。しかしHI 6563 Å（バルマーアルファ）のような可視部でのスペクトルを利用することもできるが、後述する地球コロナや星間HII領域からのH α 6563 Åと区別することは相当工夫を要するところであろう。

この小文においては惑星間空間ガスの存在するさまざまな事実と、その存在が太陽系空間の構造におよぼす影響などについて述べる一方、今後の観測計画などについて記すことにする。

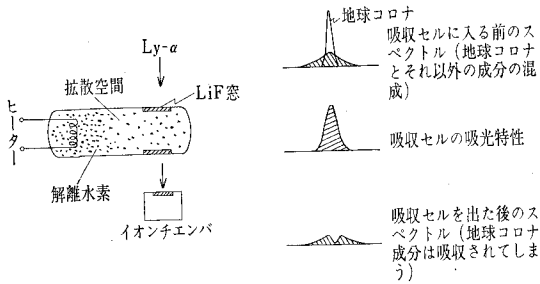
2. ライマンアルファ（Ly- α ）グローの発見と解釈

カパリアンら（Planet. Space Sci., 1, 3, 1959）は銀河系内の水素Ly- α （1216 Å）の分布をロケット観測しようとして、異常に強いLy- α が全天に分布していることを発見した。その強度は平均4 kR（1レーリー=10⁶ photons/cm². column/sec）で太陽離角とともに減少し、対日点で最小となっていることがわかった。このLy- α グローはその後の研究によって、大部分地球超高層大気の水素による太陽Ly- α 輝線の散乱であることがわかり、“地球コロナ”と呼ばれている。地球コロナを避けて惑星間空間あるいは銀河系のLy- α を見るためには高度2,000 km以上にのぼって観測しなければならない。しかしここにひとつの方法がある。それは地球コロナとそれ以外の成分のスペクトル線の幅の違いを利用する方法である。すなわち地球成分は、超高層の温度がただか2,500°Kであることから、地球大気の水素の厚みを考慮してもただか0.05 Åである。これに比して、地球コロナ外からの成分はそれぞれ異なる理由から線幅が大きいたことが予想される。まず惑星間Ly- α についていえば、惑星間空間温度10⁴°Kからみてそのドブラー幅は0.5 Å以上であろう。またもしHII領域のLy- α があれば、それは太陽系近傍にたどりつくまでには多重散乱をくりかえしてくるので、Non-coherent効果による大きな線幅をもっているであろう。Non-coherent効果とは散乱ガスの熱運動によるドブラー効果で散乱光の波長が線中心からずれる効果が多重散乱の結果蓄積されて線幅がひろがることをいう。

このような考えに立脚してモルトンら（Planet. Space

* 東京大学理学部

T. Tohmatsu: Interplanetary Glow.

第1図 水素 Ly- α 吸収セルの原理

Sci., 9, 455, 1962) は特殊な Ly- α 吸収セルを考案して Ly- α の地球コロナ成分と地球外成分との分離に成功している。その原理は第1図に示したように、Ly- α を透過する弗化リチウム結晶の窓をはりつけたガラス管球に水素ガスをつめて、熱電子解離によって原子水素を発生させて、それによる Ly- α 自己吸収を利用するものである。このような方法で彼等は地球コロナ以外の Ly- α 成分が 15% 程度、すなわち 600 R 程度もあることを発見した。

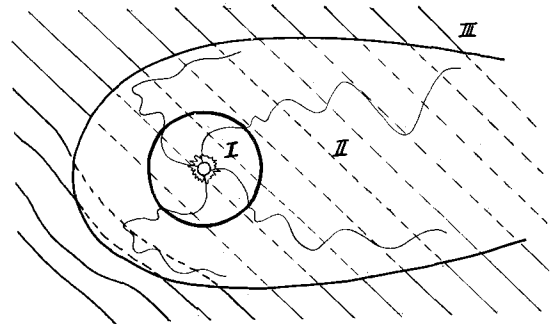
その後モルトンらの実験結果を裏付ける観測結果として金星探査船マリナー4号によるバースらの測定がある。この実験では約 600 R の宇宙からの背光が観測され、しかも金星の夜側半球で測定器の視野がかくされた場合に強度が顕著に減少したことから、明らかに金星コロナ以外に Ly- α グローが存在することが立証された。

Ly- α グローの発生の機構として明らかに異なる2つの方向が見られる。その1つは太陽系外に起源を求めるものであり、O, B 星から発する Ly- α (主として水素の Lyman continuum より生成される) の HII 領域の水素による共鳴散乱とする説である。木村博氏の計算によれば太陽系近傍にある O B 星からの Lyman continuum の放射密度は 10^{30} ergs/pc³/sec, また HII 領域の Ly- α の光学的厚みを $\tau_0=10^6$ とした場合の散光として説明できるという。この場合 Ly- α は多重散乱により拡散するのであるが、二光子放射, 吸光物質による損失を考慮した場合の拡散距離は数 10 pc (パーセク) 程度であるという。

第2の発生説は太陽系の中に起源を求めたもので、これは太陽風と惑星間空間のプラズマ状態と密接な関連をもつものではなくは興味があるものである。

バターソンらは、Ly- α グローの発生をアクسفオード (Ap. J., 137, 268, 1963) の考えた太陽風と太陽磁場の終止の理論とむすびつけた説明を試みた。すなわち、Ly- α グローの起源である水素原子を地球付近の惑星間に求めた場合、その密度は観測された Ly- α 強度と太陽 Ly- α 放射束から計算して 0.01 atom/cm³ が必要

とされる。この水素原子の発生源をバターソンらは太陽から 30 AU 付近の惑星間空間に求めた。第2図は太陽系近傍の磁場構造を示したものである。領域 I では太陽コロナ磁場は超音速の太陽風プラズマとともに吹き出しているが、太陽の自転の影響であたかもホースで庭に水をまくときのような渦巻状の形状になっている。太陽風の運動量束は太陽中心距離の増大とともに減少し、ある距離で銀河系磁場による圧力と釣り合うであろう。太陽風は超音速であるので太陽系空間と星間空間の境界はあたかも弾丸の先端に立つような衝撃波が存在し、いわゆる“衝撃前面”をつくることが予想される。この衝撃面を通過したのちに太陽風は音速以下となり、熱運動をして星間物質と混合してゆくであろう (領域 II)。この領域では太陽風プラズマ (主としてプロトン) は星間の冷い中性水素と電荷交換 (charge exchange) をおこして、熱い中性水素を生成し、冷いプラズマをのこすと考えられる。このようにして生成された熱い中性水素はすでに熱運動をともない、しかも太陽系磁場の影響をうけることなく四方に飛びちることになるので当然太陽系の内側へ向かって侵入する中性水素が存在する筈で、これが Ly- α グローを生成する中性水素の起源であるとバターソンら



第2図 太陽風と太陽系近傍の磁場構造の想像図

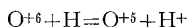
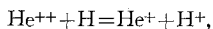
は考えたのである。フロントハウゼンによれば、太陽風イオンと星間水素との電荷交換が効果的におこる場所は衝撃前面よりかなり遠方になるはずであり、太陽風と Ly- α グローの実測値から 20~30 AU にあると算出した。この場合衝撃前面の位置は 5 AU の距離となる。惑星間空間内の中性水素 (星間成分と太陽風の電荷交換成分の二者をふくむ) の分布はさらに太陽紫外放射による光電離また再度の電荷交換による損失の影響をうけるので第3図に示すようになる。

3. 惑星間中性ガスと太陽風組成

前記のべたように太陽風は酸素原子などの高次イオンをふくんでおり、それらのイオン化の程度からコロナの温度を推定することができる。フントハウゼンらは Vela

衛星による O^{+6} と O^{+7} の組成比から静おん時で 2×10^6 °K, 活動時に 4×10^6 °K と算出している。これはコロナ輝線の測定から求められているコロナ温度とよく合っている。ところが、同じ温度下での He^+ と He^{++} の比は 1×10^{-6} 以下, O^{+5}/O^{+6} は 0.005 以下と理論上予想されるにもかかわらず、実測では $He^+/He^{++} \sim 3 \times 10^{-3}$, $O^{+5}/O^{+6} \sim 0.1$ でありいちじるしい不一致を示している。

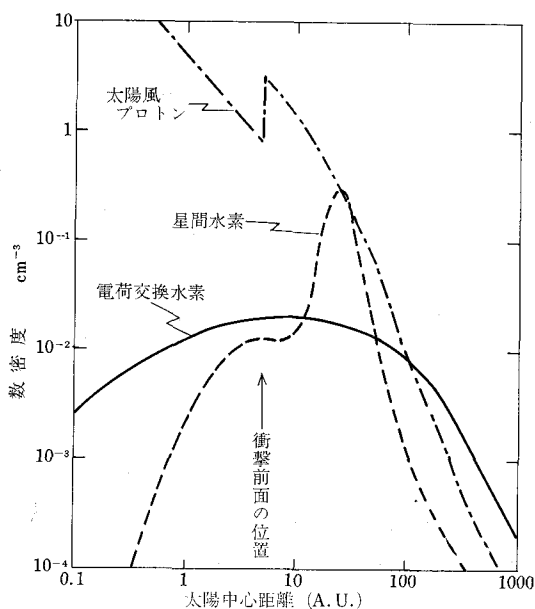
その説明として、太陽風内の He^{++} および O^{+6} がコロナから地球付近に到達する途次中性水素と電荷交換をおこなって



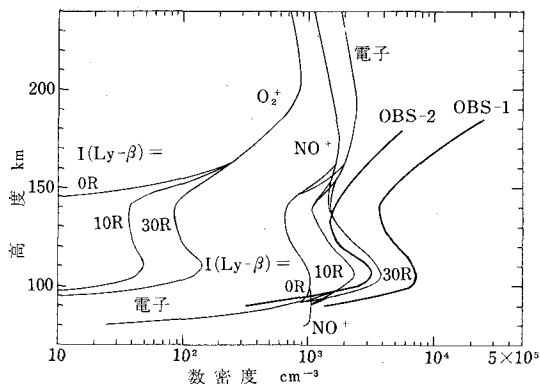
の反応で一部が He^+ および O^{+5} にもどると仮定すればよい。このように惑星間ガスによる太陽風イオン組成の変質など今後の重要な課題の1つであるとおもわれる。

4. ヘリウム極紫外グローの発見とその起源

夜間における地球電離層の状態を説明するためにはごく少量ではあるが電離放射源が存在すると都合がよいことを筆者らは指摘した。考えられる紫外放射としては $Ly-\alpha$ のほかに $Ly-\beta$ (1026 Å), $He I 584 \text{ \AA}$ および $He II 304 \text{ \AA}$ があり, $Ly-\beta$ は電離層 E 領域の電離源 (O_2^+) またヘリウムの2つの放射は F 層下部の電離源 (N_2^+ , O^+ , O_2^+) として考えられた。第4図はロケット観測による電離層の電子密度分布と、紫外グロー電離理論から計算したものを比較したものである。夜間電離層の成層状態を説明するためには、グロー強度として、 $Ly-\beta$ が 10R, $584 \text{ \AA} + 304 \text{ \AA}$ が 10R 程度であるときわめて都



第3図 惑星間空間の中性水素分布



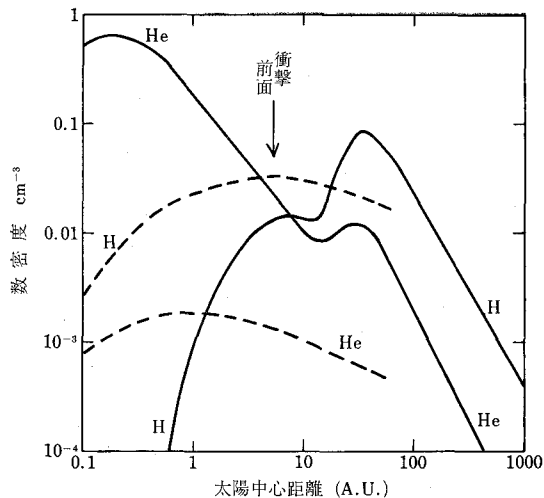
第4図 紫外グローによる夜間電離層の生成 OBS-1, 2 はロケット観測による夫々夜半前後の電子密度. グローの強さは $548 \text{ \AA} + 404 \text{ \AA}$ を 10R で一定とし, $Ly-\beta 1062 \text{ \AA}$ が夫々 0, 10, 30R の場合を描いてある。

合がよいことがわかる。

このような紫外グローの一部は地球超高層大気の水素およびヘリウムによる太陽放射の多重共鳴散乱, いわゆる地球コロナ放射で説明されるかもしれないが, かなりの部分が惑星間空間からやってくる可能性がある。たとえば $Ly-\beta$ 放射についていえば, 観測されている太陽 $Ly-\alpha$, $Ly-\beta$ の放射強度比と, 同じく観測された $Ly-\alpha$ 惑星間グロー強度から, 振動子強度 (Oscillator strength) をもちいて $Ly-\beta$ 惑星間グローの強度を推定すると約 5R となる。これは推定されている地球近傍の $Ly-\beta$ 強度の約半分である。

その後、夜間電離層研究から求めた紫外グローの存在を実測する試みがヤングらによっておこなわれた。その結果、高度 220 km までの観測結果で $Ly-\beta$ が 9.6R, $He II 304 \text{ \AA}$ と $He I 584 \text{ \AA}$ は分離し得なかったが 304 \AA であれば 4.7R, 584 \AA であれば 12.8R という値が示された。この結果は電離層からの推定値と非常によい一致を示すのであるが、残念ながら実験が地球超高層大気の下部でおこなわれているので、その発生源に関して何も回答が得られなかったわけである。しかしながら2つのヘリウム輝線の強さは地球コロナとしては理論的には大きすぎるので、その起源を地球大気外にもとめるのがよさそうである。

そこで先に中性水素の分布を計算したのと同じ方法で惑星間空間の中性ヘリウムの分布を求めてみる。この場合、太陽風の He^{++} イオンは星間からの H と2回電荷交換をおこなって熱い He となって四散する。また一方では星間の He は太陽風の H^+ と電荷交換して He^+ となるが、生きのこった He は太陽系の奥深くまで侵入して行くことができる。計算結果は第5図に示したように



第5図 惑星間空間の中性水素・ヘリウム分布。実線は星間成分、破線は電荷交換成分をあらわす。

なる。中性水素の場合と非常に対照的なのは地球近傍では星間成分と電荷交換成分との比が逆転していることである。これは He の太陽紫外線による光電離損失および太陽風 H⁺ との電荷交換による損失がそれぞれ水素の場合の 10 分の 1 の程度であることからおこるのである。この場合星間空間での He/H 比を宇宙組成から 0.137 と仮定しているが、この辺の妥当性は今後の検討を要するところである。

He⁺ についても He の星間成分から光電離および太陽風 H⁺ との電荷交換によって供給されるので地球近傍での密度は 0.01 cm⁻³ をこえることが予想され、観測された 304 Å グローを説明するのに充分である。

5. 今後の研究課題

惑星間グローの研究が木星よりも遠方の惑星間空間における磁場とプラズマの力学的構造の解明に役立つであろうことは大方理解していただけたことと思う。来る 1970 年からは IASY (太陽活動期国際観測年) の観測期に入り、とりわけ太陽・地球をふくむ惑星間空間の構造に関する観測がさかんになるであろう。

まず地上観測については、H α 6563 Å グローの観測があげられる。これは惑星間 H の太陽 Ly- β 吸収によっておこる筈であり約 1 R 程度の強度をもつと考えられる。ただし、銀河 HII 領域および地球コロナからの寄与は約 10 R 程度と考えられるので輝線の輪かくを測定するなど特殊な分離技術を必要とするであろう。また夜間電離層の電波的観測も間接的ではあるが、惑星間紫外グローの変動の研究に役立つ可能性がある。

ロケット・衛星による観測では、惑星間グローと地球コロナを分離して観測すること、高分解能分光ロメータをもちいて輝線の輪かくを測定することなどが基本的問題であるが、さらに一歩すすんで空間的な分布状態がわかれば惑星間空間の構造、星間物質と太陽風との相互作用の理解に資することが大きいであろう。

また関連した観測としては太陽風または衝撃前面付近からやってくる中性水素 (約 1 KV 程度の運動エネルギーをもつ) を直接観測することも興味がある。いずれにしても惑星間グローの研究はそれ自体でクローズすることは不可能であり、太陽風、惑星間磁場など地上および飛しよう体によるあらゆる観測とむすびつけてはじめて価値のある学問として成立つことであろう。

学会だより

日本天文学会春季年会ひらかれる

天文学会の春の年会が、ひらかれている。今年は、講演数が 112 と、記録的に多く、したがって会期も 5 月 21 日から 5 月 24 日までの 4 日間となった。会場には上野の科学博物館講堂があてられている。

研究発表の講演だけでなく、将来計画報告会、学術会議会員報告会、運営検討懇談会などの集まりが多くひらかれ、4 日間の会期はほとんどすきまなくつまっている。

講演数の増加は毎年の傾向であるが、最近は特にそれがいちじるしい。

総会では新理事長に宮本正太郎氏、副理事長に末元善三郎氏、高窪啓弥氏が選出された。

秋の年会は仙台でひらかれるようである。

松永賞候補者の推薦 財団法人松永記念科学振興財団より標記について依頼がありました。天文学会としてはひろく自薦・他薦を募集致しますので、希望者は理事長または庶務理事に御相談下さい。天文学会としての候補者は理事長が決定致します。本賞は自然科学 (理学・工学系) の分野における基礎的研究に対する褒賞であり、本年度は 1 口 100 万円、全体で 3 名以内。大正 13 年 12 月 1 日以後誕生の小壮有為な科学者から求めるとのこと、推薦は理工系学会より各 1 名を受ける。期限は昭和 44 年 6 月 20 日。