

論文内容の要旨

論文題目 Observational study of inter- and circum-planetary space using EUV emissions

(極端紫外光観測による惑星間空間および惑星周辺空間に関する研究)

氏 名 山崎 敦

1. 極端紫外光光学観測について

磁気圏物理学、惑星間空間物理学では、粒子直接観測を中心に研究が進められ、多大な成果をもたらしている。しかしながら、その場の局所的な観測のため全体像を把握するためには統計的解析が必要で時間分解能を犠牲にしてきた。また、衛星ポテンシャルの影響から Thermal プラズマの測定は困難であるという問題点も抱えている。そこで、リアルタイムで大局的な変化を測定できる光学観測が脚光を浴びている。光学観測の利点は、

- 一瞬で全体の二次元画像を得る
- 場を乱すことなく観測できる
- Thermalプラズマを容易に測定できる

であり、大局的な構造変化の観測に有効な手段である。ただし、次のような欠点もある。

- 測定値は視線方向積分値である
- ドップラー効果が複雑に絡む
- 粒子一個の観測効率が低い

このため光学観測だけでは物理量の同定はできず、直接粒子観測との相補的な関係にあり、同時観測が必要不可欠となる。

光学観測の実現にはプラズマの可視化という課題が重要であった。基底状態のプラズマは、高い遷移確率の散乱輝線は極端紫外光領域（波長：10~100nm）に存在する事が知られている。しかし、この領域の光はほとんどの物質に対し低反射率、低透過率という特性を持つため低効率光学系しか実用化されてこなかった。ところが 1990 年代に入り薄膜蒸着技術が

発達すると、この光を十分に反射する多層膜反射鏡が開発された。これはガラス基板表面上に何十層の金属薄膜を蒸着した反射鏡で、ブラッグの反射条件を満たす波長の反射率を高める効果がある。膜物質の組合せと膜厚を制御することで観測対象波長の光を選択的に反射させることができる。当初軟 X 線観測で成功を収めたこの技術を極端紫外光領域へ応用し、冷たいプラズマの可視化に成功した。

まず、ヘリウム原子・イオンからの共鳴散乱光 (He I : 58.4 nm、He II : 30.4 nm) を観測対象とした極端紫外光スキャナー (XUV スキャナー) を火星探査衛星「Planet-B」へ搭載した。「Planet-B」は打上後地球周回軌道に投入され、XUV スキャナーは地球プラズマ圏の外側からの撮像に世界で初めて成功した。その後スイングバイ時に月を観測した後、火星周回軌道投入までの惑星軌道上から惑星間空間の光学観測を続けている。惑星間空間に存在するヘリウムは星間ガスを起源に持つことが知られている。星間ガスと太陽系の相対運動により星間物質が惑星間空間へ流れ込むことによる。この流れを星間風と呼ぶ。太陽圏内では星間ガスは太陽重力と放射圧の影響を受ける。水素は重力と比較して放射圧が大きいので太陽系内部へは侵入できない。しかし、ヘリウムはほぼ太陽重力だけによるケプラー運動で表現され地球軌道内部にまで侵入し、太陽を通りすぎた星間風風下方向で軌道が重なり合い密度の濃い領域を形成する。この領域は、太陽から 0.数 AU に頂点を持ちその長さは数 AU に達する円錐形になることからヘリウムコーンと呼ばれる。ヘリウムコーンの密度分布は星間ガスの物理量を反映しており、この観測から星間ガスの密度、温度、星間風の速度、方向を同定できる。これまでにヘリウムコーンの光学観測例は多数あるが、そのほとんどが地球周回軌道からの観測であり地球ヘリウムジオコロナの影響が無視できない。またその視線は反太陽方向を向いていたため、ヘリウムガス分布の日心距離依存性は測定できない。これに対し、惑星軌道にある「Planet-B」からの観測は、ジオコロナの影響は皆無であり、かつヘリウムコーンの軸に対して非平行方向からの観測ができるという利点があるので、ヘリウム分布をより精確に観測できると期待される。

さらに、極域電離圏からのイオン流出過程を測定するため、酸素イオン共鳴散乱光 (O II : 83.4 nm) を観測対象とした極端紫外光センサー (XUV センサー) を観測ロケット SS-520-2 号機へ搭載した。ロケットはノルウェーのスヴァールバルロケット実験場 (地理緯度: 79 °N, 12 °E) から打上げられ、最高高度 1,108 km まで到達し、カスプ領域を通過した。XUV センサーはポーラーウインドを光学的に O II で観測することに成功し、地球・惑星磁気圏撮像、大気流出の O II による撮像が可能であることを実証した。

本研究では、2000 年 1 月から 6 月にかけて XUV スキャナーで観測したヘリウムコーンからの散乱光強度分布についてまとめ、ヘリウムコーン形成モデルとの比較から星間ガス密度、温度および星間風の速度を推察した。また、XUV センサーで観測した散乱光量の高高度プロファイルと電離圏密度モデル (International Reference Ionosphere (IRI)) から予想される電離圏起源の酸素イオン散乱光量との比較から、ポーラーウインド起源の散乱光成分を同定した。

2. 惑星間空間ヘリウム散乱光分布の観測

図1にXUV スキャナーが観測した惑星間空間の He I 散乱光強度分布を示す。座標系は、XUV スキャナー視線方向の黄経（横軸）、黄緯（縦軸）である。色は He I の散乱光強度を示し、2.1 から 7.2 Rayleigh の範囲を表示している。なお、灰色は太陽光迷光あるいは太陽フレアに伴う高エネルギー粒子の影響を受けているため解析から除外した部分を表す。黄経 105° 付近の散乱光量が強い部分がヘリウムコーンである。

星間ガスの物理量を求めるため、ヘリウムコーン形成モデルを仮定し観測をモデル化した。モデル構築にあたり、散乱効率への Doppler 効果と太陽自転による太陽放射束の周期変動を考慮した。また、星間風風下方向、惑星間空間内での消失率を固定値として扱い、星間ガスの温度と密度および星間風速度をフリーパラメータとした。数々の観測モデルを構築し、全体像から χ^2 値を求めモデル評価を行った。その結果最適パラメータとして、温度 12,000 \pm 3,000 K、密度 0.013 \pm 0.001 /cm³、速度 29.0 \pm 1.0 km/s を得た。このときの観測モデルを図2に示す。座標系および表示色は図1と同一である。観測された光量やヘリウムコーン方向が再現されている。これらの値を過去の研究と比較すると、矛盾しない値であることが分かる（表1）。しかし、特に高黄緯において定量的には観測結果と最適モデルで差がある。これは、ヘリウムコーン形成モデルが星間風方向に軸対象ではなく、太陽放射束の緯度依存性を考慮すべきであることを示唆する。

3. ポーラーウインド起源酸素イオン共鳴散乱線観測の初期結果

XUV センサーは、カスプ領域から O II 観測に成功し高度プロファイルを得た。高度 500 km 以上の観測カウント数高度変化を図3に示す。ここでは太陽光迷光の影響がないデータのみを使用した。上昇時、下降時とも同様なプロファイルを得ており、O II の観測に成功したと考えられる。また同時に IRI-95 モデルから見積もった電離圏酸素イオン密度の高度プロファイルを基に算出した電離圏起源の O II 光量を青色点線で示した。高度 800km 以上で電離圏酸素イオンからの散乱光だけでは説明できない光量を観測していることが分かり（赤色実線）、この成分がポーラーウインド起源の O II であることを示唆している。

4. まとめ

「Planet-B」が惑星間空間軌道航行中の XUV スキャナーによるヘリウムコーン観測結果をまとめ、モデル計算との比較から星間ヘリウムガスの温度、密度および星間風速度を求めた。観測結果とモデルとの間に定量的な差があるが、これは軸対象モデルではヘリウムコーンの形成を説明できないことを示唆する。「Planet-B」には 2001 年夏に再観測機会がありその結果が期待される。また、観測ロケット実験により極域電離圏から流出する酸素イオンを O II 観測することに成功した。酸素イオンを光学的に観測できることを実証し、将来の地球・惑星磁気圏や大気流出の撮像計画へ第一歩を標した。

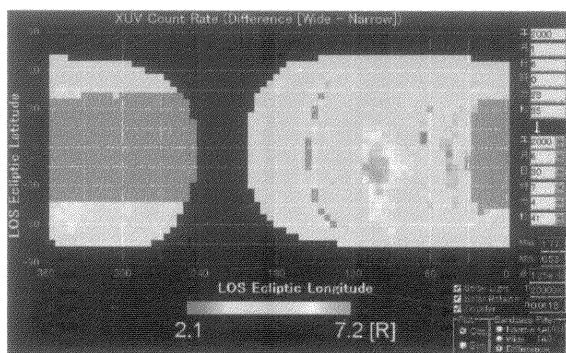


図 1. 惑星間空間ヘリウム散乱光観測結果

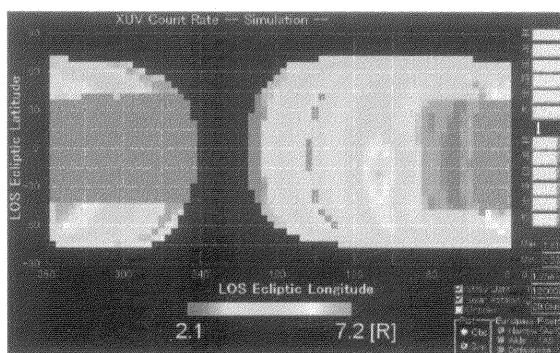


図 2. 最適パラメータモデル

表 1. 星間パラメータ (過去の観測との比較)

衛星名 観測年	STP72-1 (1972-73)	Prognoz6 (1977-78)	EUVE (1992-93)	Planet-B [This work] (2000)
速度 (km/s)	5~20	27±3	26.4±1.5	29.0±1.0
風下 赤道(α, δ)	(72, +15)	(73.9, +16.6)	(75.4, +17.3)	(75.4, +17.3)
黄道(λ, β)		(74.5, -6.0)	(76.0, -5.4)	(76.0, -5.4)
温度 (K)	2,500~10,000	16,000	6,900	12,000±3,000
密度 (cm^{-3})	0.009~0.024	0.015~0.020	0.01	0.013±0.001
消失率 (s^{-1})	6.8×10^{-8}	1.25×10^{-7}	1.25×10^{-7}	1.25×10^{-7}

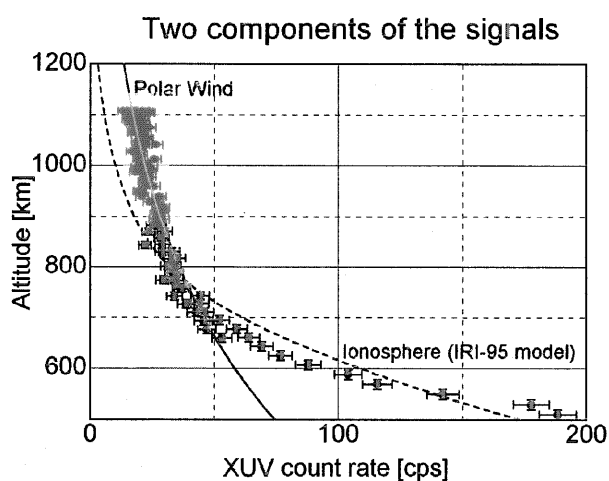


図 3. 酸素イオン共鳴散乱光の観測初期結果