

論文の内容の要旨

論文題目 Development of a new generation EUV imaging spectrometer for space plasma observation
宇宙プラズマ観測のための次世代極端紫外線分光撮像技術の開発

氏名 滝澤 慶之

地球電離圏の外側にあるプラズマ圏と呼ばれる領域は、VLF伝播の観測によって1960年代に発見され、以後、人工衛星によるイオン粒子の「その場」観測により研究が進められてきた。しかし、このような観測では、観測された現象の時間的変化と空間的変化を分離する事は難しかった。また、プラズマ圏と電離圏とのつながりも十分には理解されていない。そこで、近年になって、プラズマ圏や電離圏に多数存在するイオンや原子が共鳴散乱する太陽光を検出し、その大局的な分布・運動の撮像観測研究が進められている。これらの共鳴散乱光は極端紫外線 (EUV) 領域で高い強度を示すが、一般にEUV光に対する物質の反射率は極めて小さいため、十分な集光・結像性能を有する光学系を構成することが困難であった。これに対し、近年、多層膜反射鏡の技術開発が進むことによって、EUV光を効率よく集光できる光学系が現実のものとなってきた。私は、プラズマ圏中の粒子の約10%を占めるヘリウムイオンが共鳴散乱する304 ÅのEUV太陽光を検出する広視野望遠鏡の設計開発、及び、この望遠鏡の光学部品である多層膜反射鏡、金属薄膜フィルターの製作、校正を行った。開発したロケット搭載用観測機器Extreme-ultraviolet Plasmaspheric Scanner (EPS)は、開口効率を高めるために「軸外し光学系」を採用し、広い視野と粗い角度分解能を持たせた直入射反射望遠鏡型センサーである。センサーの光軸はロケットの機軸に対して13°傾斜させてあり、ロケットの機軸周りの回転に伴って視線方向が変化することによって、視野角52°のヘリウムイオンの空間分布が得られるようになっていく。

このEPSは、宇宙科学研究所の新型2段式観測ロケットSS520-1号機ロケットに搭載され、1998年2月5日17時30分に鹿児島宇宙空間観測所 (KSC) から打ち上げられた。約10分間にわたるロケット実験では、複雑な

空間構造を持つと考えられる夕方側のプラズマ圏の光学撮像観測が行われ、ヘリウムイオンの304 Å 共鳴散乱線の2次元強度分布像を得ることに成功した。この観測結果から、夕方側プラズマ圏の磁気赤道面でヘリウムイオンの柱密度が減少していることが初めて明らかになった。この観測結果は、近年のイオン粒子の「その場」観測で得られた夕方側電離層上部の磁気赤道面付近でのヘリウムイオン密度の減少と定性的に符合する。このことから、電離層とプラズマ圏のヘリウム密度分布には何らかの相関があり、今回の結果は、「その場」観測で得られた断片的な夕方側プラズマ圏のプラズマ分布のより大局的な構造を反映したものであることが示唆される。このように、プラズマ圏の大局的な分布や運動を解明する上で、EUV光を用いた撮像観測は非常に重要な情報を提供する。

しかしながら、得られた共鳴散乱光の観測強度は弱く、将来的に1時間程度の時間分解能でプラズマの運動の様子を明らかにするには、現在のシステムの数10倍程度の検出光子量が求められることもわかった。このように、今後の精密観測では、新たな技術革新による光量増加が次に解決すべき課題として挙げられる。光量に関連してEPSで問題となるのは検出効率の低さである。EPSは、多層膜反射鏡、金属薄膜フィルター及びマイクロチャンネルプレート (MCP) で構成される直焦点型直入射望遠鏡である。この構成で検出効率が稼げないのは主として以下の2つの理由による。一つは、EUV域におけるMCPの検出効率が最大20%と低いこと、もう一つは、エネルギー分解能を持たないMCPを用いてヘリウムイオンの共鳴散乱線だけを検出するために、観測対象の光量を犠牲にしながら吸収フィルターによって他の共鳴散乱線成分を減光させていることである。このように、現状のシステム構成を用いて光量不足の問題を解決するには、光学系の口径を現在の数倍～10倍程度まで拡大せざるを得ず、システム全体の大型化に伴う様々な付随的課題が発生する。EPSと同じ構成をとる火星探査機「のぞみ」や将来の「SELENE」搭載の観測機器も同様である。このように、近未来の高精度の宇宙プラズマ観測においては、EPSのようなシステムに変わる高い効率を実現するEUV 2次元検出器の開発が強く求められる。

私はEUV光においてもエネルギー分解能を有する超伝導トンネル接合素子(以下、STJ)を用いて、EUV用2次元分光検出素子の開発を行ってきた。STJ素子を用いる最大の利点は、高いエネルギー分解能とEUVに対して100%に近い高い検出効率である。STJ素子では、1個の光子が作るパルス状の信号から波長情報が直接得られるため、分光器やフィルタで検出効率を損なうことなく分光観測が行える。理論的に与えられる波長分解能は、Nb系のSTJで $\Delta\lambda$ (FWHM) $\sim 13 \text{ \AA} @ 500 \text{ \AA}$ ($\lambda/\Delta\lambda \sim 37$)、Al系のSTJで $\Delta\lambda$ (FWHM) $\sim 4.4 \text{ \AA} @ 500 \text{ \AA}$ ($\lambda/\Delta\lambda \sim 110$)であり、主要観測ラインのHeII(304 Å)、HeI(584 Å)、OII(834 Å)、H-L α (1216 Å)を十分に分離できる。また、雑音成分は入射光量ではなく波長分解能を左右するだけであり、MCP、CCDのようなダークノイズは原理上存在しないため、入射光子数が限定される惑星プラズマ観測や天体観測のような微弱光の測定に非常に有利である。さらに、1光子の作るパルス信号の時間スケールは数 μ 秒であり、ダイナミックレンジも最高10kcps程度と広い。このように、STJ検出器は高感度・高エネルギー分解能・高速応答といった特徴を併せ持つ極めて高性能の検出器であり、その導入によって望遠鏡の口径を数倍～数10倍にするのと同様の効果が期待される。

そこで、惑星プラズマからのEUV光の検出器を想定して、私はSTJ素子の製作と評価を行い、261 Å (47.5eV) までのEUV光の検出分離に成功した。波長分解能は、電氣的雑音込みで $\Delta\lambda$ (FWHM) $\sim 73 \text{ \AA} @ 225 \text{ \AA}$ (18eV @ 55eV光子) ($\lambda/\Delta\lambda \sim 3$)を得ている。電氣的雑音の寄与 (FWHM=17.6eV) を考慮すると、STJ素子単体の波長分解能は $\Delta\lambda$ (FWHM) $\sim 15 \text{ \AA} @ 225 \text{ \AA}$ (3.8eV @ 55eV光子) ($\lambda/\Delta\lambda \sim 15$)と見積もられる。このように現時点では、EUV光に対する波長分解能は主として電氣的雑音の大きさとリミットされているが、回路系の改良によりこの成分を約2eVにまで抑えられることを確認しており、プラズマからの複数の輝線を十分分離できるだけの能力を持つ素子を実現しつつある。

STJ検出器の高い検出効率によって、光学系も再検討する余地が生まれる。具体的には、これまで光量的に不適合であったカセグレン型光学系のような収差補正光学系の導入が現実味を帯び、結像性能の向上等が可能となる。しかし、1回反射を用いている直焦点型と異なり、カセグレン型光学系では2回反射が基本となるため、多層膜反射光学素子の性能向上も必要である。この新たな課題に対しては、これまでのモリブデン(Mo)とシリコン(Si)を交互に積層した多層膜反射鏡(反射率~20%)に代わり、モリブデン/珪化マグネシウム(Mg₂Si)を用いた多層膜を導入することで40%程度の反射率が実現されることを確認している。その実現のためには、独自に設計し理化学研究所に導入した多層膜製膜装置(直径30cmまでの自由曲面に対応)を用いた開発を進めている。

以上より、光学系の口径を除いた構成素子だけで検出効率を考えた場合、STJの検出効率や反射鏡の反射率向上、フィルターの最適化やS/N比などを総合すると、近い将来に、従来にくらべ数10倍の明るい光学系が達成できると予想される。

本論文では、ロケットによる観測実験結果と同系観測器性能の限界を明らかにし、多層膜、フィルター、検出器、特に検出器開発を通しての効率向上の可能性を論じ、それによって新しく開かれる宇宙プラズマ観測の可能性を示すものである。