

3-5 酸素イオン共鳴散乱光(O II:83.4nm)撮像装置開発 —磁気圏撮像に向けて—

3-5 *Development of Instrument for Imaging of the Resonance Scattering Emission from Oxygen Ions (O II:83.4nm)* — *Toward the Imagery of Magnetosphere* —

山崎 敦 三宅 互 吉川一郎 中村正人 滝澤慶之
YAMAZAKI Atsushi, MIYAKE Wataru, YOSHIKAWA Ichiro, NAKAMURA Masato,
and TAKIZAWA Yoshiyuki

要旨

従来の理論的な研究において、質量の重い酸素イオンが大量に電離圏を脱出し磁気圏へ輸送されることは不可能であると考えられていた。しかしながら近年の衛星観測により、電離圏起源の酸素イオンが磁気圏内に非常に多く存在していること、電離圏からの酸素イオン流出量は太陽活動度や地磁気活動度が高い場合には質量の軽い水素イオンの量に匹敵することが明らかとなった。したがって、電離圏から磁気圏にかけての酸素イオンの振る舞いは、擾乱時のプラズマ輸送を把握するため必要不可欠な情報であり、宇宙天気予報にとっても重要な情報である。そこで、磁気圏全体にわたって酸素イオン分布を観測するリモートセンシング法に期待が集まっている。私たちはこの観測を実現するため、酸素イオン共鳴散乱光を検出する光学系の開発を進めている。

According to previous theories a large number of oxygen ions are not able to escape from the ionosphere to the magnetosphere due to its heavy mass and loss process in the upper atmosphere. Recent satellite observations, however, reveal that oxygen ions of the ionospheric origin exist in the magnetosphere, and that the outflow flux from the polar ionosphere is comparable to that of hydrogen ions, which have its light mass, during the high solar activity and the high geomagnetic activity. The distribution of oxygen ions provides the interpretation of the plasma transfer during the high activity, and gives us the effective information for monitoring the space weather. The remote-sensing method is useful for the measurement of the distribution of oxygen ions all over the magnetosphere. We advance development of new optics for the resonance scattering emission of oxygen ions.

[キーワード]

酸素イオン, 共鳴散乱, 極端紫外光, リモートセンシング, 撮像
Oxygen ion, Resonance scattering, Extreme ultraviolet, Remote sensing, Imaging

1 序論

高度数10kmの電離圏から磁気圏にかけて地球を取り巻くプラズマの振る舞いは、太陽地球系プラズマの研究者にとって最大の興味の対象である。特に重要なことは、太陽風プラズマに対する地球磁気圏内のプラズマの応答であり、その結果発生する様々な現象、例えば磁力線再結

合や沿磁力線電流系、地球極域上空における荷電粒子の加速とそれに伴うオーロラ発光現象等である。これまでの30年間は、これらの現象を解明するためのプラズマ観測は、発生領域に人工衛星を飛行させ直接プラズマ計測を行う、いわゆる *in-situ* measurement によって支えられてきた。しかしながら、このような観測は主に1点における瞬間の観測であるため、時々刻々と変

化する太陽風に対する磁気圏の応答を時間的変化と空間的变化に分離することは難しかった。

これらの研究と並行して、プラズマを可視化することにより、地球周辺でのプラズマの振る舞いを大局的に把握しようとする試みもなされてきた。中でも大きな成功は極域上空を飛翔する衛星からオーロラ発光現象をとらえ、その時間発展と磁気圏の活動度の変化との関係を明らかにしたことである[1][2]。このようなリモートセンシング観測は主に可視光から紫外光の領域でなされてきた。さらに短い波長域である極端紫外光領域は、プラズマ観測にとって非常に重要な共鳴散乱線であるヘリウムイオン及び原子のライマン α 線である30.4 nm (He II)と58.4 nm (He I)、また酸素イオンの83.4 nm (O II)を含んでいる。これらの輝線は、基底状態にある粒子の最も遷移確率の高いエネルギーギャップに対応している。これらの散乱光を検出することによって希薄なプラズマ環境の可視化という概念を生んだ[3]。光学系作製の技術上の困難さから、極端紫外光領域での観測の試みは初期的段階に止まっていたが、最近10数年間のナノテクノロジー技術進歩の結果、極端紫外光を効率よく集光できる多層膜反射鏡の制作が可能となり、極端紫外光により地球周辺のプラズマ環境の全体像を撮影して、その挙動を研究することの可能性・必要性が議論されるようになった[4][5][6]。

共鳴散乱光の観測で注意しなければならない点は、ドップラーシフトによる散乱効率の変化である。観測対象となる共鳴散乱線の主光源は太陽光である。太陽に対し相対的に運動しているプラズマに乗った系ではドップラーシフトが起こる。もし、散乱体となるプラズマが高速度で移動し、シフト量が太陽スペクトル幅を外れると、そのプラズマは共鳴散乱を引き起こすことができない。これは、He II領域のように太陽光スペクトルが孤立した輝線からなる場合、顕著に起こる現象である。しかし、O II領域は複数の共鳴状態が縮退しているため細かく見れば幾つかのラインが存在し、さらには水素の連続帯成分がある。したがって、ドップラーシフトを起こしても別の輝線・連続帯が共鳴散乱できる波長に重なり、共鳴散乱効率がある一定のレベルに保たれる。したがって、酸素イオンはヘリ

ウムイオンと異なり極域電離圏からのプラズマ流出や磁気圏尾部のプラズマ分布・輸送を撮像するトレーサーとして用いることが可能となる[5][7]。

地球近傍を取り巻くプラズマ圏ではヘリウムイオンの共鳴散乱線(He II)が撮像の有力な候補となる。プラズマ圏中のイオンの約1割をヘリウムイオンが占めること、また運動エネルギーが小さいためドップラーシフトによる悪影響を受けないことがその理由である。He IIの撮像観測はPlanet-B衛星搭載極端紫外光スキャナ(XUV: eXtreme Ultra-Violet scanner)[8][9][10]やImager for Magnetosphere and Aruroral (IMAGE)衛星搭載極端紫外光撮像装置(EUV: Extreme Ultra-Violet imager)[11][12][13]によって成功を収め、プラズマ圏の挙動をリアルタイムで2次元的に把握できるようになった。

一方、電離圏から散逸するプラズマや磁気圏内に存在するプラズマのように大きな運動エネルギーを持ったプラズマの可視化には、酸素イオンの共鳴散乱(O II:83.4 nm)が候補となる。さらに重要なことは、理論的な予想に反して、磁気圏では酸素イオンが水素イオンやヘリウムイオンと比較して重要な役割を果たしていることである。極域電離圏からのプラズマ散逸は、ポーラーウィンドとして知られている。1960年代の理論的検討では水素イオンやヘリウムイオンといった質量の軽いプラズマがポーラーウィンドの主成分で質量の重い酸素イオンの流出量は数%に過ぎないと予想されていた[14][15]。しかしながら、極軌道衛星(あけぼの衛星、Dynamic Explorer-1,2衛星など)の観測結果は、極域電離圏から大量に酸素イオンが散逸していることを示していた[16][17][18]。この現象は高度1000 km以下で酸素イオンが加速・加熱されていないと説明できない[19]が、そのメカニズムはいまだ解明されていない。また、磁気圏尾部には冷たい酸素イオンが大量に存在していることをGeotail衛星が発見した[20][21][22]。特にローブ領域に存在しビーム状になって磁気圏尾部方向へ流れている。この酸素イオンは磁気圏に進入してきた太陽風起源 α 粒子の振る舞いとと比較から地球電離圏起源とされるが、未知の加速・加熱機構が働かなければその存在を説明できない[23][24]。さらに、磁気圏と惑星間空間・電離圏間の酸素

イオンの収支をこれまでの *in-situ* measurement の結果から計算すると一桁以上磁気圏に入り込む量が多く、未知の酸素イオン存在分布か輸送経路があると考えられる[25]。Planet-B衛星によって明らかにされたプラズマシートに冷たいヘリウムイオンが存在している事実[26]も未知のプラズマが存在していることの傍証としてあげられる。これらの研究は、これまでの衛星ポテンシャルの影響で直接観測では確認できなかった冷たいプラズマが磁気圏内に分布していることを示しており、酸素イオンの磁気圏内での振る舞いがプラズマの加速・加熱メカニズムの解明に有効なトレーサーとなることを示唆している。

ところで、撮像観測では視線方向のコラム密度を与えるに過ぎないため、磁気圏内部での *in-situ* measurement と相補的な関係にある(図1)。磁気圏尾部のダイナミクスを直接とらえている磁気圏内部にある衛星の場所やタイミングを撮像により知ることができれば、直接プラズマ観測の解釈に大変有用となる。逆に磁気圏内部衛星の観測は各点でのプラズマの密度や速度の情報を与え、境界条件として利用することで撮像された二次元像から三次元の描像を描くことができる。

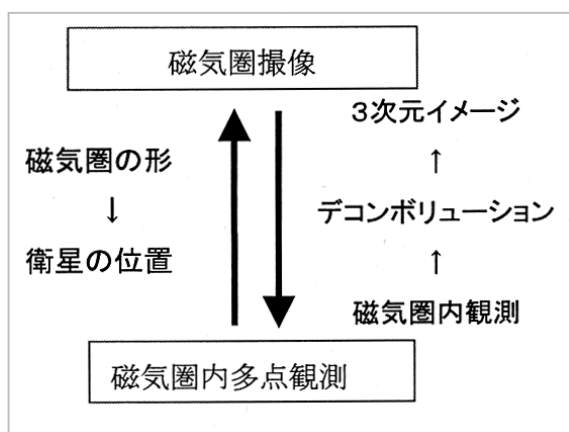


図1 撮像観測と直接粒子観測の位置付け

2 酸素イオン共鳴散乱

2.1 太陽光中の酸素イオンの輝線

地球近傍の宇宙空間に存在する酸素イオンの共鳴散乱を引き起こす最も主要な光源は太陽である。太陽スペクトル中には、波長83.4nm付近

に1価と2価の酸素イオンの輝線(O IIとO III)が混在し、さらに各価数のイオンともエネルギー順位状態が縮退しているため複数の輝線が近接している。1960年代のロケット観測からこの波長域の詳細なスペクトルが調査されモデル化されている[7][27]。さらに、この波長域には水素のLyman連続帯成分が存在している[28]。これら輝線のスペクトルモデルと連続帯の観測値を合わせた太陽活動極小期のスペクトルを図2に示す。83.26 nmから83.55 nmにかけて7本の輝線が存在することが分かる(厳密には9本の輝線が存在するが、1本は輝線幅の内側に存在し分離されない)。

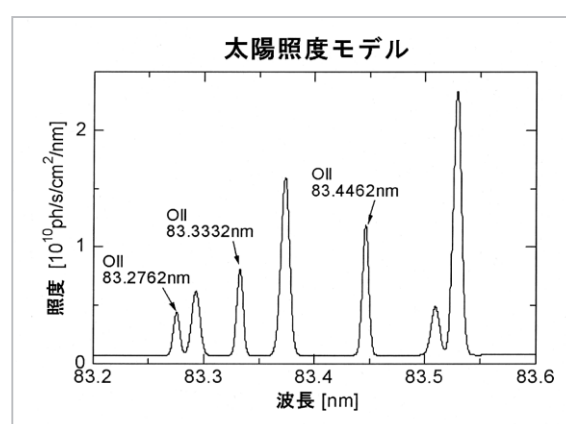


図2 83.4nm付近の太陽スペクトル

このうちO IIに対応するものは83.2762、83.3332及び83.4462 nmの3本の輝線であり他の線はO IIIに対応する。もし、1価の酸素イオンが太陽に対して静止していれば共鳴散乱はこの3本の輝線とのみ起こる。しかし太陽に対して相対的に運動するとき、酸素イオンに対する静止系では、上記の輝線はドップラーシフトを起こす。シフト後の波長は元の波長を λ_0 として、

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (2.1)$$

で表される。ここで v は太陽へ近づく向きを正に取った酸素イオンと太陽の相対速度、 c は光速である。例えば83.37 nm近辺のO IIIの輝線は酸素イオンが300 km/sで太陽から遠ざかれば、その系では0.0834 nm長い波長にシフトし、83.4462 nmの共鳴散乱線に重なることになる。つまり共鳴散乱を起こす効率 g -factorは、光源となる太陽に対する相対速度にも依存する。また、磁気圏・電離圏の酸素イオンは有限な温度を持って

いるためドップラー幅を持つ。そのため、中心波長が厳密に一致しなくてもドップラー幅内の波長の光子を散乱でき、温度に対しても散乱効率が変化する。したがって、g-factorを計算するときにはドップラーシフトとドップラー幅の二つのドップラー効果を考慮する必要がある。この時g-factorは次式で表される。

$$g = \int \sum_i \sigma_{oi} \exp \left[- \left(\frac{\lambda \lambda_{oi} - 1}{v_{th}/c} \right)^2 \right] F_{\lambda} [\lambda(1+v/c)] d\lambda \quad (2.2)$$

ここでiはO IIの輝線を表し、 v_{th} は熱速度、 F_{λ} は単位波長当たりの太陽放射束である。また σ_{oi} は各輝線の中心波長での散乱断面積を表し

$$\sigma_{oi} = \frac{\pi e^2}{m_e c} \cdot \frac{f_i}{\sqrt{\pi} \frac{v_{th}}{c} \lambda_{oi}} \quad (2.3)$$

である。ここでは m_e は電子質量、 e は素電荷、 f_i はi番目の輝線の調和振動子強度である。

酸素イオン温度が1、100、1000 eVのときのg-factorを太陽に対する相対速度の関数として図3に示す。速度は太陽に向かう方向を正としている。温度依存性は太陽スペクトルのドップラー幅との関係から、低温では速度に対し複雑に変化し、高温になると滑らかな変化をする。着目すべき点は太陽に対し静止しているときより300 km/sで近づくときにg-factorが高くなることで、太陽光中の照度の大きなO IIIの輝線と共鳴散乱を起こす場合である。

このように計算されるg-factorを用いると散乱光の強度 $4\pi I$ は

$$4\pi I = \int_{\text{line of sight}} n g d z \quad (2.4)$$

で与えられる。ここでnは酸素イオンの密度、gはg-factorとともに視線距離zの関数であり、観測器から無限大の距離まで積分する。

2.2 観測器開発

酸素イオン共鳴散乱光撮像観測器の開発が困難である理由は、観測時に地球近傍が視野内に含まれる場合には、地球を取り巻く水素ガスから発せられるジオコロナの影響を無視することができないことである。ジオコロナはO IIの834 nmに近接する水素のライマン α 線(Ly- α 、波長121.57 nm)で光り、しかもその強度は最大10kRayleigh(kR)と報告されている[29]。観測対象となるO IIは後述するように約1Rと微弱であるため、O IIのLy- α に対する感度比が $10^5 \sim 10^6$ と非常に高いことが要求される。さらに、困難なことに発光量が微弱であるためO II帯にバンドパスを持った光学素子を使って集光することが必要であるが、834 nmの光を透過する物質がないこと、また、高反射効率を持つ物質がないことから、主鏡1枚の直焦点反射型光学系、つまり主鏡、バンドパスフィルター、検出器からなる光学系を採用することになる。光学素子のうち、観測器感度を決定する重要なファクターは、主鏡面コーティングとフィルター材料である。

光学的性質[30][31]から、主鏡面のコーティング材としてはモリブデンが、バンドパスフィルターとしてはインジウムの薄膜が有効である。経年変化が少なく安定に存在する物質でO II帯で反射率・透過率が比較的高いことが理由である。これまでに私たちのグループでは、O IIとLy- α の感度比が約 10^6 を達成した感度特性の観測器を制作した。ミラー中心で100 nm厚のモリブデンをコーティングした反射鏡と厚み275 nmのインジウムフィルター及び検出器としてチャンネルトロンを使用した。光学系の断面図を図4に、反射鏡の反射率とフィルターの透過率の測定結果を図5、6に示した。反射率と透過率の波長依存性は金属特有の光学特性によって決まるものである。また、観測器の総合的な感度特性を図7に示した。この観測器は北極域から打ち上げられ、

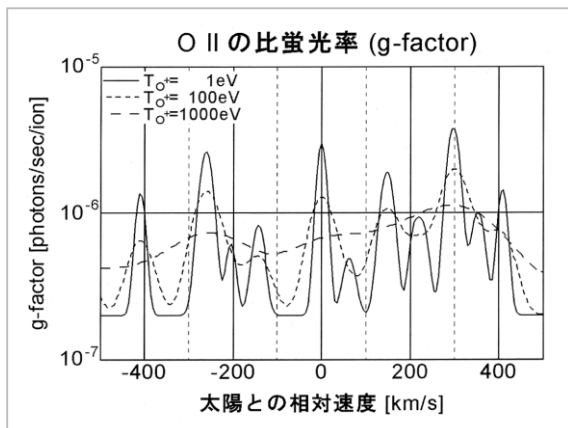


図3 ドップラー効果を考慮した散乱効率(g-factor)

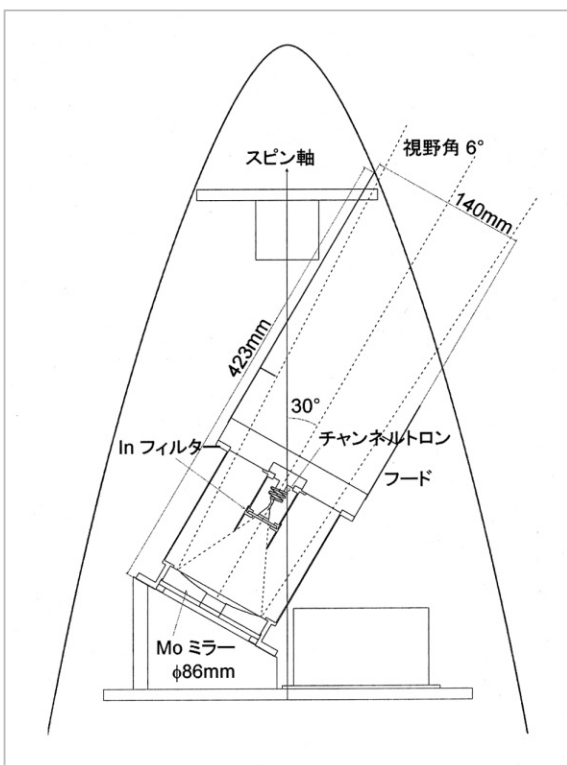


図4 SS-520-2 ロケットに搭載した観測器の断面図

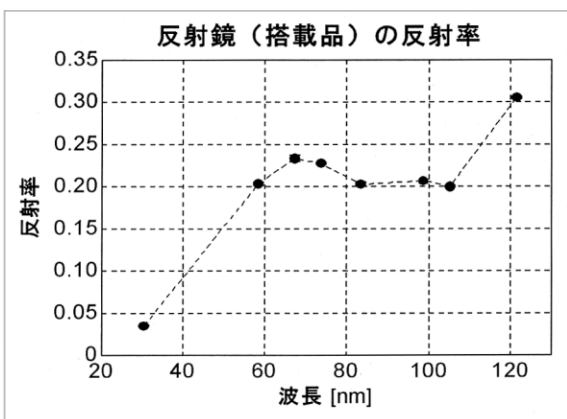


図5 モリブデンミラーの反射率特性

高度1000 kmに達したSS-520-2号機観測ロケットに搭載され、電離圏上部から酸素イオン共鳴散乱光の検出に成功した。観測結果は極域電離圏上空にまで酸素イオンが広がっていることを示すものであり、電離圏から散逸する酸素イオン撮像観測の第一歩を記した[32]。

O IIに対する感度を上げる研究もなされている。アルミ基板上にNi/MgF₂のコーティングを施すと図8に示すようにH Ly- α での反射率を2桁程度下げることがある[33]。このミラーの実用化に成功すれば、現在はインジウムフィルター

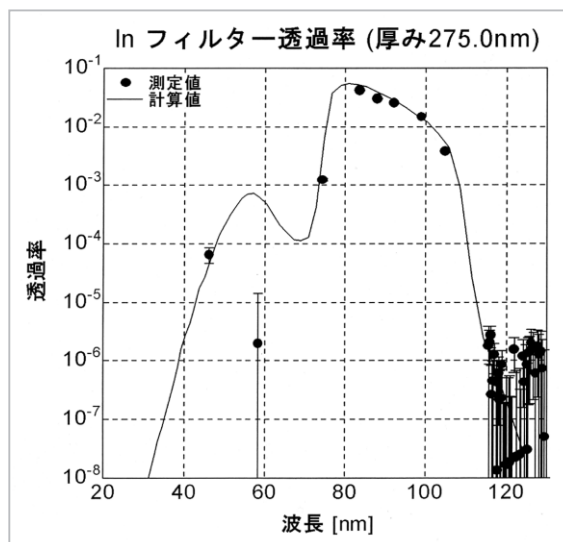


図6 インジウムフィルターの透過率特性

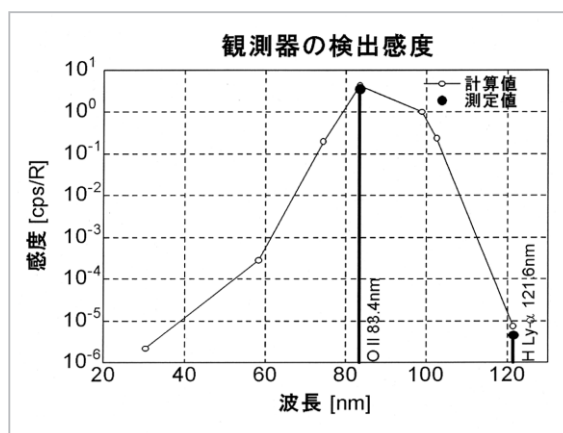


図7 SS-520-2 ロケットに搭載した観測器の感度特性

のみでH Ly- α を除去している手法をミラーでも同時に行うことができ、フィルターでの除去率を下げるのが可能となる。つまり、ロケット搭載機器レベルのO IIとH Ly- α の感度比を保ったままインジウムフィルターを薄くすることが可能となり、O IIの絶対感度を高めることにつながる。このときの予想されるO IIに対する感度を表1にまとめ、SS-520-2搭載機器と比較した。ミラーの反射率と検出器の量子効率と同じであるが、薄いフィルターのため透過率が高くなり、5倍程度の感度増加が見込まれる。実用化には経年変化による層膜界面拡散の問題が指摘されており[34]、今後解決すべき研究課題で我々のグループでも検討を行っている。

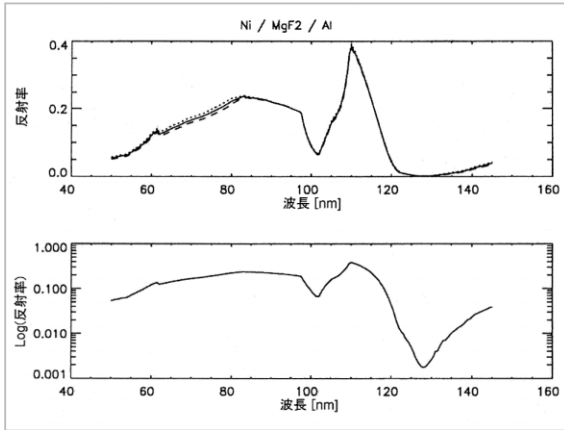


図8 アルミ基板上にNi 70 Å / MgF₂ 105 Å をコーティングした反射鏡の反射率特性

表1 SS-520-2号機搭載機器と新ミラー採用機器の感度比較

観測器種類	ロケット搭載品	新規ミラー採用品
反射率	0.2	0.2
透過率	0.05	0.2
量子効率	0.04	0.05
総合感度	0.0004	0.002

3 ポーラーウィンドの撮像

3.1 極域電離圏からの散逸

1960年代の理論的予測では、酸素イオンの流出量は、プロトンやヘリウムイオンの流出量の数%程度であると考えられていた[14]。その理由は、重い質量と電荷交換による中性酸素原子への変わりやすさである[15]。ところが、その予想を覆す観測が、極軌道衛星により1980年代になされた。Dynamic Explorer-1,2衛星の結果では磁気圏が荒れた場合や太陽活動の高い場合、酸素イオンの流出量が多くなることが明らかになった[16]。また、あけぼの衛星の観測から求まる酸素イオンの磁力線平行速度は、高度4000km以下で酸素イオンが加速していることを突き止めた[18]。さらに、ロケット観測により加速高度は1000km付近であることが分かり、酸素イオンの加速メカニズムが電離圏からのプラズマ流出量の鍵を握っていることが判明した[19]。酸素イオンの散逸量はあけぼの衛星観測の統計結果から図9に示される分布を示す[17]。昼間側カスプ付近、夕方側で散逸量が多く10⁸/cm²/secに達し、真夜中や高緯度地域では流出量が少ないことが

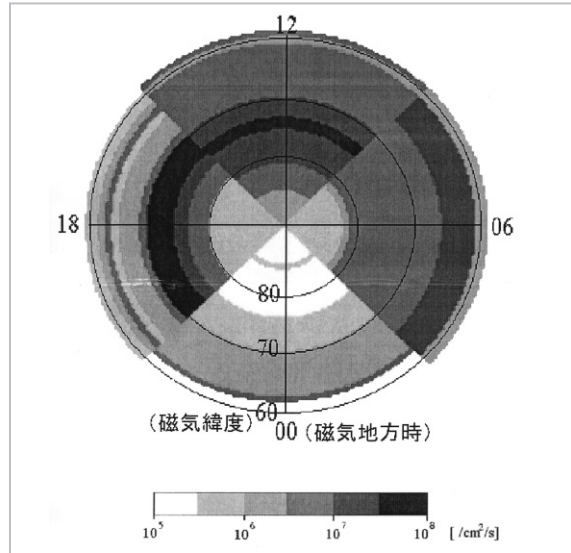


図9 あけぼの衛星観測の極域電離圏からの酸素イオンの散逸量分布

分かる。

3.2 散逸酸素イオンの散乱光強度

O II 散乱光量を算出するため、式(2.4)で必要となる密度分布とg-factorをモデル化する。密度分布は、図9に示したあけぼの衛星の観測の統計結果を境界条件として、圧力勾配、分極電場と重力を考慮した運動方程式から求めた。このとき準中性プラズマを仮定し、散逸酸素イオンの温度を4000K、電離圏から脱出するエネルギーを10eVとした。また、同時に任意の位置での酸素イオンの散逸速度・温度も求まり、式(2.2)からg-factorを推定することができる。これらを基に計算された散乱光強度分布を図10に示す。下辺中央部の半円が地球を、他の白線がダイポールを仮定した地球磁力線を示し、赤道面内に±5R_E(地球半径)、極方向に5R_Eの範囲を図示した。上図は昼夜方向、下図は朝夕方向に視線が向く観測時の酸素イオン散乱光強度を示している。この結果から最大1Rの強度を持つことが見て取れる。酸素イオンの散逸経路を同定するために地球周辺数R_E離れた箇所まで観測できることを条件とすると0.1Rの強度を観測する必要があることが分かった。また、各磁力管によって異なる発光パターンを示しており、酸素イオンの流出メカニズムの空間構造を浮き彫りにすることが期待できる。

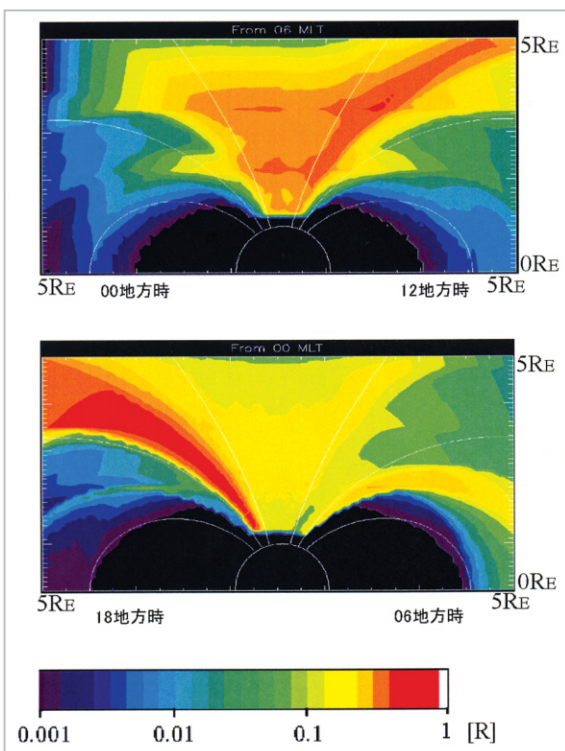


図10 予想される散乱光量分布

4 磁気圏撮像

4.1 磁気圏尾部に分布する酸素イオン

地球を発し惑星間空間へつながる開いた磁力線に沿った圧力勾配だけでは、質量の重い酸素イオンは地球重力を振り切るほど磁場平行方向

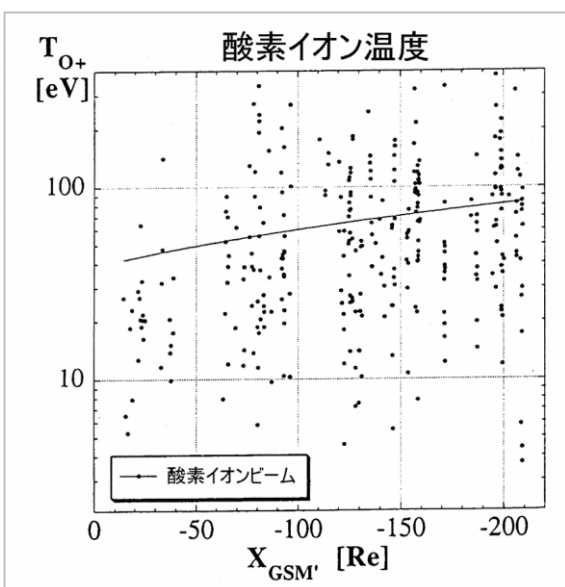


図11 磁気圏尾部の酸素イオン温度分布

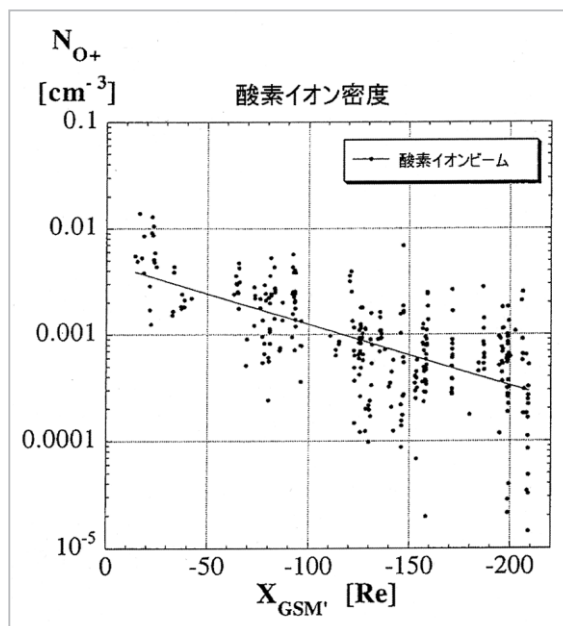


図12 磁気圏尾部の酸素イオン密度分布

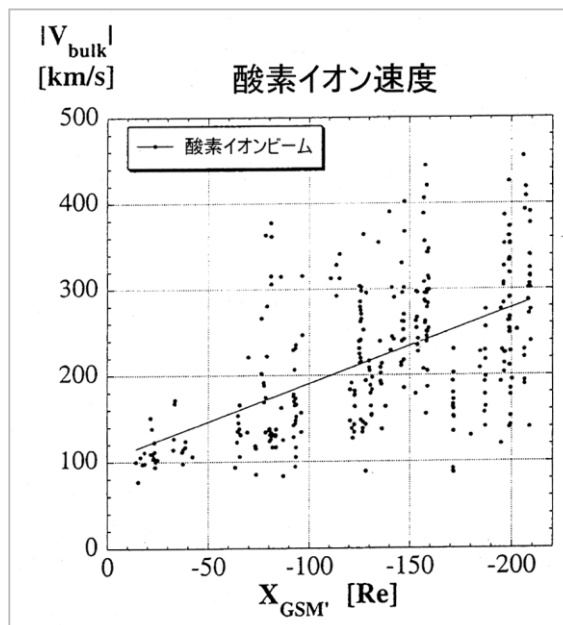


図13 磁気圏尾部の酸素イオン速度分布

に十分な速度を持つことができず、地球から遠く離れることなく $E \times B$ ドリフトによってプラズマシートへ入ることが予想されていた[35][36]。しかし、ジオテイル衛星観測によって磁気圏尾部ローブ領域に電離圏起源の酸素イオンが存在することが明らかになった[22][23]。図11、12、13に観測された酸素イオンの温度、密度、速度を示す[37]。全図とも横軸は地球からの距離であり、地球半径 (R_E) を単位として0～220までの観測を示した。図11から分かるように酸素イオンの温

度は低く、10~100 eVの範囲に大半の観測が入っている。しかし、地球からの距離に対して線形フィッティングを試みると図中の線に示したように地球から離れるに従って温度が上昇する傾向がある。図12によれば酸素イオンの密度は地球から離れるに従い減少し、その平均値は50 R_E 離れたところで $3 \times 10^3 / \text{cm}^3$ 、200 R_E で $3 \times 10^4 / \text{cm}^3$ である。また、図13に示したように、地球から尾部に向けて流れる平均速度は地球近傍20 R_E における120 km/sから深尾部200 R_E における280 km/sと大きく変わるが、ばらつきも大きく深尾部では速いときは400 km/s以上になることもある。

予想される光量を計算するに当たり、磁気圏の形状と酸素イオンの分布のモデルを設定した。磁気圏の形状は図14に示すように、 $X = -50 R_E$ 以遠では $Y \times Z = 30 \times 20 R_E$ の楕円形状とし、これより太陽側では昼側磁気圏境界面を $X = 10 R_E$ に置き、 $X = -5 R_E$ で滑らかに磁気圏尾部とつながる放物面形状と仮定した。ここではGSM座標(X軸を太陽方向、Z軸をX軸と地磁気軸を含む面内北向き方向)で表した。

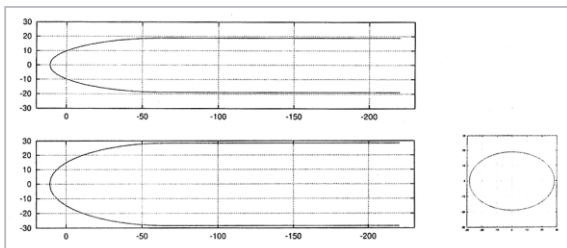


図14 仮定した磁気圏形状

図11、12、13に示された近似直線を磁気圏酸素イオンの温度、密度、バルク速度のモデル値とし、これらを用いて計算したg-factorを図15に示す。横軸をX座標とし縦軸にg-factorを示す。また、パラメータとして酸素イオンのバルク速度をモデルの V_b 及びその0.5倍、2倍の速度、また、速度が200 km/sで一定と仮定した四つを選んだ。速度が一定の場合、g-factorは温度のみの関数となるのでXによらずほぼ一定だが、速度が変化するとg-factorが大きく変化することが分かる。

4.2 磁気圏尾部からの共鳴散乱光強度

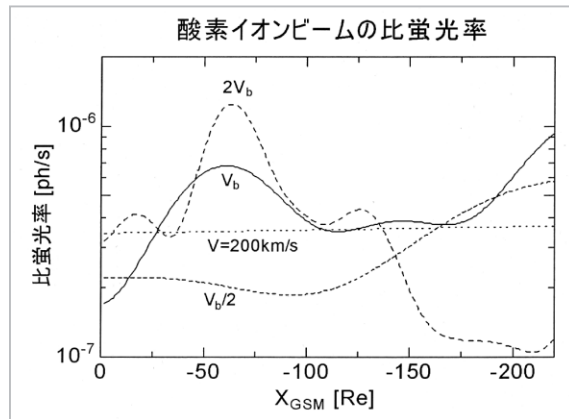


図15 磁気圏尾部酸素イオンのg-factor

前節で計算したg-factorと図12に示された密度分布から磁気圏で発光するO II強度分布を見積もった。ただし、酸素イオンビームの空間的な広がり観測されていないので、酸素イオンの温度、密度、バルク速度はXのみの関数とし、Y、Z方向には一様と仮定した。したがって、ここで見積もった磁気圏尾部の散乱光量は最大値を示すものである。速度を200 km/sとXによらず一定とした場合の計算結果を図16に示す。左の2図の左端中央部が地球の位置($X = 0, Y = 0$)である。左上図が磁気圏を地球赤道面内から(+Y方向から)、左下図が地球北極方向から(+Z方向から)観測したときの、また、右図が地球から(+X方向から)磁気圏尾部を見通したときの散乱光強度分布である。g-factorがほぼ一定のため散乱光強度は視線に沿ったコラム密度に比例する。したがって、地球から10~30 R_E ほど離れたプラズマシートに沿った領域が最も散乱光強度が強く50 μR の強度がある。地球から200 R_E 離れた深尾部でも1 μR 程度の強度があることが分かる。

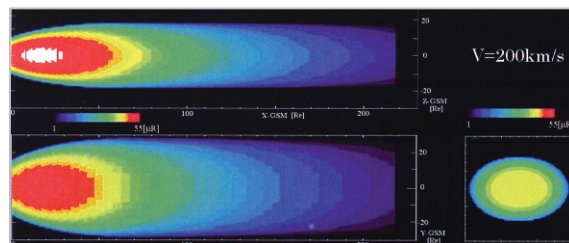


図16 一定速度を仮定したときの散乱光強度分布

Geotail衛星の観測によるバルク速度のモデルによる計算結果は図17に示した。各図は図16と

同じ配置である。この場合 g-factor が地球からの距離の関数になっているため、密度分布のみによらず、コラム密度と g-factor の積が最大になる $X = -50 R_E$ 近辺で最大の共鳴散乱光強度 $50 \mu R$ を与える。最も強度が弱くなるのは $X = -180 R_E$ 付近であるが、そこでもプラズマシート付近では $5 \mu R$ 以上の散乱光強度があることが分かる。

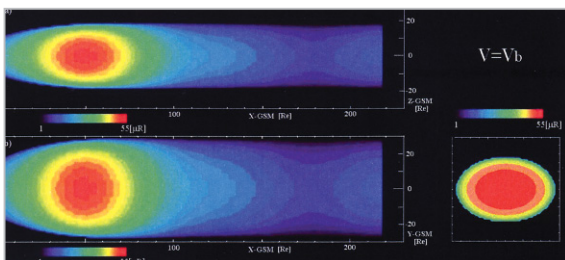


図 17 Geotail 衛星の観測から求めたバルク速度を仮定したときの散乱光強度分布

5 観測性能

3、4 での簡単な計算結果から $0.1 R$ の光を検出できればポーラーウィンドの撮像が、 $5 \mu R$ の光を検出できれば磁気圏尾部の撮像が有意義となることが分かった。現実にはこのような光学系が製作可能かどうかを検討する。計測カウント数は信号と検出器のノイズ成分を加算したものであり、ノイズは地上での較正試験から既知とする。信号(S)をノイズ(N)から分離するためには、信号、ノイズともにその分布が正規分布をすると仮定すれば、計測カウント(S+N)の統計誤差よりも信号カウントが大きいという条件式(5.1)を満たすことが必要である(図18)。ここでは、Sと $\sqrt{S+N}$ との比をS/N比と定義する。

$$S > \sqrt{S+N} \quad (5.1)$$

信号(S)とノイズ(N)の大きさは次の式で表される。

$$S = I \cdot \pi \delta^2 / 4 \pi \cdot \eta \cdot \pi a^2 / 4 \cdot T = 0.196 \cdot I \cdot \delta^2 \eta \cdot a^2 T \quad (5.2)$$

$$N = \pi (aF\delta)^2 \cdot N_a \cdot T = \pi \cdot (F\delta)^2 \cdot N_a \cdot a^2 T \quad (5.3)$$

ここで a は望遠鏡の口径、 δ は視野角、 η は光学系の効率、 T は露光時間、 I は光量、 N_a は検出器の単位面積単位時間当たりのノイズ数を表す。

検出器に Micro Channel Plates (MCPs) を用い

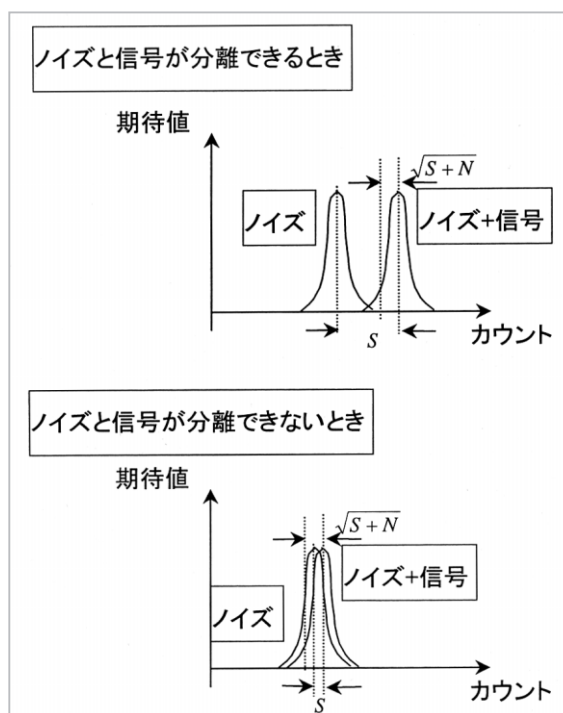


図 18 信号とノイズの分離

ると仮定し N_a を $0.5/\text{cm}^2/\text{sec}$ 、また、光学系の効率として 0.0004 (SS-520-2 搭載品)、 0.002 (新ミラー採用品) を用い、視野角を 1 度、口径を 10 cm 、F 値を 1.0 という実現し得る値を代入して求まる S/N 比を散乱光強度(縦軸)と露光時間(横軸)の関数として表したものが図 19 である。

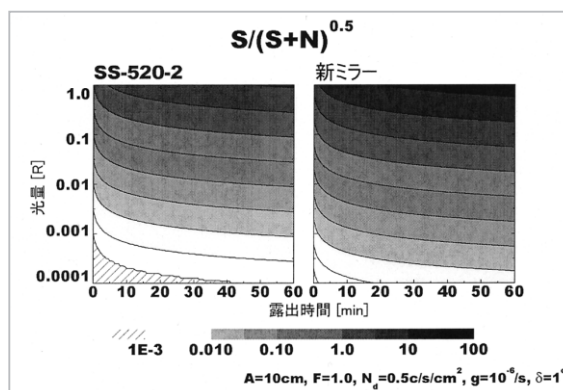


図 19 散乱光強度と露光時間の関数として表した S/N 比

S/N 比 1 以上の観測を必要条件とすると、 $0.1 R$ の光量まで観測対象となるポーラーウィンドの撮像では、SS-520-2 ロケット搭載器で 1 時間程度の露光時間が必要なのにに対し、新ミラーを採用すると 10 分の時間分解能で撮像可能であることが分かる。一方、最大でも $50 \mu R$ の磁気圏撮像

は新ミラーを採用して1時間露出でS/N比が0.01程度であることが分かる。S/N比は望遠鏡の口径と露光時間の平方根に比例するため、S/N比1を達成するには、例えば30倍の口径(つまり300 cm)の望遠鏡で10倍の露光時間(10時間)が必要である。しかし、この大きさは非現実的であるし、時間分解能は磁気圏プラズマの変動の応答時間と比較して長いものであり、有効な観測にはならない。そこで、高感度の検出器 Superconducting tunneling junction (STJ) に期待が集中している[38]。特記すべき特徴は、90%程度と高い量子効率を持つ、原理的にノイズカウントがない、エネルギー分解が可能である、0.3 Kまでの冷却が必要である、ということである。これを用いれば観測器の感度を10倍以上高めることができ、さらにノイズが無視できるため数10倍以上のS/N比が予想される。数10 cmの口径を持った望遠鏡で1時間程度の露出時間で磁気圏撮像ができ、有意義な観測になると考えられる。

6 まとめ

ポーラーウィンドと磁気圏尾部は、その中に含まれる酸素イオンの共鳴散乱を利用した撮像観測の対象になることが分かった。観測光学系に対して要求されるスペックは、それぞれ0.1R、5 μ Rの光をノイズから分別する必要がある。ポ

ーラーウィンド撮像は、反射鏡のコーティングを新規開発することで実現可能であることが示された。一方、磁気圏撮像は、ミラー開発に加えて、新検出器STJの利用が必要不可欠であり、今後の課題である。

撮像観測は、大局的なプラズマ分布を観測でき、輸送経路の把握など、時間変化と空間変化の分離を可能とする手法である。しかし、同時に観測対象領域にプラズマの *in-situ* measurementを行う衛星が展開していれば、酸素イオンのバルク速度と温度の情報が得られ、厳密な密度分布の議論を行うことができる。また、複数台の撮像衛星による異なる視点からの同時観測が行われれば、トモグラフィ手法により、酸素イオン三次元密度分布のリアルタイム測定が可能となるであろう。

地球近傍プラズマ、特に酸素イオンの密度分布やエネルギー分布について、未解決な問題が残されている。具体的には電離圏からの散逸過程や経路、磁気圏への供給メカニズム、冷たいプラズマ分布などである。リモートセンシング法はこれらの課題の解決に有効なプラズマ環境の二次元分布を与え、地磁気嵐などの宇宙環境擾乱の進行を酸素イオンの大局的な分布の変動を通じて見る事が可能となり、宇宙天気モニタリングシステムとして有意義である。また、惑星大気・プラズマの散逸・輸送メカニズムの解明にも大きな貢献が期待できる。

参考文献

- 1 Kaneda, E., M. Takagi, and N. Niwa, "Vacuum ultraviolet television camera", Proc. 12th Intl. Symp. Space Tech. Sci., 233, Agne, Tokyo, 1977.
- 2 Frank, L. A., J.D. Craven, J.L. Burch, and J.D. Winningham, "Polar views of the earth's aurora with Dynamics Explorer", Geophys. Res. Lett., 9, 1,001, 1982.
- 3 Johnson, C. Y., J.M. Young, and J.C. Holmes, "Magnetoglow - A new geophysical resource", Science, 171, 379, 1971.
- 4 Chiu, Y. T., R.M. Robinson, G.R. Swenson, S. Chakrabarti, and D.S. Evans, "Imaging the outflow of ionospheric ions into the magnetosphere", Nature, 322, 441, 1986.
- 5 Meier, R. R., "Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere", Space Sci. Rev., 58, 1, 1991.
- 6 Williams, D. J., E.C. Roelof, and D.G. Mitchell, "Global magnetospheric imaging", Rev. Geophys., 30, 183, 1992.
- 7 Meier, R. R., "The scattering rate of solar 834Å radiation by magnetospheric O⁺ and O⁺⁺", Geophys. Res.

- Lett., 17, 1,613, 1990.
- 8 Nakamura, M., I. Yoshikawa, A. Yamazaki, K. Shiomi, Y. Takizawa, M. Hirahara, K. Yamashita, Y. Saito, and W. Miyake, "Terrestrial plasmaspheric imaging by an extreme ultraviolet scanner on Planet-B", *Geophys. Res. Lett.*, 27, 141, 2000.
 - 9 Yoshikawa, I., A. Yamazaki, K. Shiomi, K. Yamashita, Y. Takizawa, and M. Nakamura, "Evolution of the outer plasmasphere during low geomagnetic activity observed by the EUV scanner onboard Planet-B", *J. Geophys. Res.*, 105, 27,777, 2000.
 - 10 Yoshikawa, I., A. Yamazaki, K. Shiomi, M. Nakamura, K. Yamashita, Y. Saito, M. Hirahara, Y. Takizawa, W. Miyake, and S. Matsuura, "Development of a compact EUV photometer for imaging the planetary magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 106, 26,057, 2001.
 - 11 Burch, J. L., S.B. Mende, D.G. Mitchell, T.E. Moore, C.J. Pollock, B.W. Reinisch, B.R. Sandel, S.A. Fuselier, D.L. Gallagher, J.L. Green, J.D. Perez, and P.H. Reiff, "Views of Earth's magnetosphere with the IMAGE satellite", *Science*, 291, 619, 2001.
 - 12 Burch J. L., D.G. Mitchell, B.R. Sandel, P.C. Brandt, and M. Wüest, "Global dynamics of the plasmasphere and ring current during magnetic storms", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1,159, 2001.
 - 13 Sandel, B. R., R.A. King, W.T. Forrester, D.L. Gallagher, A.L. Broadfoot, and C.C. Curtis, "Initial results from the IMAGE extreme ultraviolet imager", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1,439, 2001.
 - 14 Axford, W. I., "The polar wind and the terrestrial helium budget", *J. Geophys. Res.*, 73, 6,855, 1968.
 - 15 Banks, P. M., and T.E. Holzer, "High-latitude plasma transport: The polar wind", *J. Geophys. Res.*, 74, 6,317, 1969.
 - 16 Chandler, M. O., J.H. Waite Jr., and T.E. Moore, "Observations of polar ion outflows", *J. Geophys. Res.*, 96, 1,421, 1991.
 - 17 Abe, T., B.A. Whalen, A.W. Yau, R.E. Horita, S. Watanabe, and E. Sagawa, "EXOS D (Akebono) suprathermal mass spectrometer observations of the polar wind", *J. Geophys. Res.*, 98, 11,191, 1993.
 - 18 Abe, T., S. Watanabe, B.A. Whalen, A.W. Yau, and E. Sagawa, "Observations of polar wind and thermal ion outflow by Akebono/SMS", *J. Geomag. Geoelectr.*, 48, 319, 1996.
 - 19 Yau, A. W., and M. Andre, "Sources of ion outflow in the high latitude ionosphere", *Space Sci. Rev.*, 80, 1, 1997.
 - 20 Mukai, T., M. Hirahara, S. Machida, Y. Saito, T. Terasawa, and A. Nishida, "Geotail observation of cold ion streams in the medium distance magnetotail lobe in the course of a substorm", *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1,023, 1994.
 - 21 Hirahara, M., T. Mukai, T. Terasawa, S. Machida, Y. Saito, T. Yamamoto, and S. Kokubun, "Cold dense ion flows with multiple components observed in the distant tail lobe by Geotail", *J. Geophys. Res.*, 101, 7,769, 1996.
 - 22 Seki, K., M. Hirahara, T. Terasawa, I. Shinohara, T. Mukai, Y. Saito, S. Machida, and T. Yamamoto, "Coexistence of Earth-origin O⁺ and solar wind-origin H⁺/He⁺ in the distant magnetotail", *Geophys. Res. Lett.*, 23, 985, 1996.
 - 23 Seki, K., M. Hirahara, T. Terasawa, T. Mukai, and S. Kokubun, "Properties of He⁺ beams observed by Geotail in the lobe/mantle regions: Comparison with O⁺ beams", *J. Geophys. Res.*, 104, 6,973, 1999.
 - 24 Seki, K., R.C. Elphic, M.F. Thomsen, J. Bonnell, E.J. Lund, M. Hirahara, T. Terasawa, and T. Mukai, "Cold flowing O⁺ beams in the lobe/mantle at Geotail: Does FAST observe the source?", *J. Geophys. Res.*, 105, 15,931, 2000.
 - 25 Seki, K., R.C. Elphic, M. Hirahara, T. Terasawa, and T. Mukai, "On atmospheric loss of oxygen ions from

- earth through magnetospheric processes", *Science*, 291, 1,939, 2001.
- 26 Yoshikawa, I., A. Yamazaki, K. Shiomi, K. Yamashita, Y. Takizawa, and M. Nakamura, "Photometric measurement of cold helium ions in the magnetotail by an EUV scanner onboard Planet-B: Evidence of the existence of cold plasmas in the near-Earth plasma sheet", *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3,567, 2000.
- 27 Tousey, R., "The extreme ultraviolet spectrum of the Sun", *Space Sci. Rev.*, 2, 3, 1963.
- 28 Hinteregger, H. E., "Absolute intensity measurements in the extreme ultraviolet spectrum of solar radiation", *Space Sci. Rev.*, 4, 461, 1965.
- 29 Rairden, R. L., L.A. Frank, and J.D. Craven, "Geocoronal imaging with Dynamics Explorer", *J. Geophys. Res.*, 91, 13,613, 1986.
- 30 Palik, E. D., ed. "Handbook of optical constants of solids", New York: Academic Press, 1985.
- 31 Palik, E. D., ed. "Handbook of optical constants of solids II", Boston: Academic Press, 1991.
- 32 Yamazaki, A., S. Tashiro, Y. Nakasaka, I. Yoshikawa, W. Miyake, and M. Nakamura, "Sounding-rocket observation of O II 83.4-nm emission over the polar ionosphere", *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2,005, doi:10.1029/2002gl014788, 2002.
- 33 Chakrabarti, S., J. Edelstein, R.A.M. Keski-Kuha, and F.T. Threat, "An 834Å reflective coating for magnetospheric imagery applications," *Instrumentation for Magnetospheric Imagery*, Supriya Chakrabarti, Editor, Proc. SPIE, 1744, 208, 1992.
- 34 Larruquert, J. I., and R.A. Keski-Kuha, "Multilayer coatings for narrowband imaging in the extreme ultraviolet", *EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VIII*, O.H. Siegmund, and M.A. Gummin, Editors, Proc. SPIE, 3114, 608, 1997.
- 35 Chappell, C. R., T.E. Moore, and J.H. Waite Jr., "The ionosphere as a fully adequate source of plasma for the earth's magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 92, 5,896, 1987.
- 36 Orsini, S., M. Candidi, M. Stockholm, and H. Balsiger, "Injection of ionospheric ions into the plasma sheet", *J. Geophys. Res.*, 95, 7,915, 1990.
- 37 Seki, K., Private communications.
- 38 Zehnder, A., C.W. Hagen, and W. Rothmund, "Superconducting tunneling junction detectors", *EUV, X-ray, and Gamma-ray instrumentation for astronomy*; H.S. Hudson., and O.H. Siegmund, Editors, Proc. SPIE, 1344, 286, 1990.



やまざき たかのり
山崎 敦
電磁波計測部門宇宙天気システムグループ専攻研究員 理学博士
地球惑星科学



みね ますひろ
三宅 寛
電磁波計測部門宇宙天気システムグループ主任研究員 理学博士
宇宙天気



よしかわ いちろう
吉川一朗
文部科学省宇宙科学研究所助手 理学博士
地球惑星科学



なかむら まさと
中村正人
文部科学省宇宙科学研究所教授 理学博士
地球惑星科学



たきざわ えいき
滝澤慶之
理化学研究所研究協力員 理学博士
地球惑星科学

磁気圏／酸素イオン共鳴散乱光(O II: 83.4 nm)撮像装置開発―磁気圏撮像に向けて―

