

惑星観測用赤外エシエル分光器開発の現状

宇野 健（東北大理）、坂野井 健（東北大理）、笠羽 康正（東北大理）、小鮒 格久（東北大理）

1 木星磁気圏-電離圏-熱圏結合

木星は地球の約 2 万倍の磁気モーメントを持ち、木星本体に固定された磁場は約 10 時間という短い周期で自転している。磁気圏では衛星 Io から豊富に供給されるプラズマが存在しており、Hill(1979) は木星本体と共回転磁場から見てプラズマの運動が遅れることにより、磁力線に沿った電流と、電離圏では極から赤道方向に向いた電場が生じることを示した。電離圏赤道向きの電場は赤道向きに流れる Pedersen 電流 J を生じさせ、上向き磁場 B との作用により、 $J \times B$ のドリフト (Hall Drift) が生じる。これが極域のイオン風である。プラズマシートでは共回転方向へのプラズマ加速が、電離圏では反共回転方向へのイオン風加速がおき、電離圏から磁気圏へ角運動量を輸送する。電離圏ではイオンと中性大気の摩擦により、加熱と中性風の駆動が生じている。[Stallard et al. (2001)]

極域の中性大気および電離大気の運動方程式は以下のように表せる。

$$\frac{\partial \vec{U}_n}{\partial t} = -\nu_{ni}(\vec{U}_n - \vec{V}_i) - \frac{\nabla P_n}{n_n m_n} - \vec{U}_n \cdot \nabla \vec{U}_n - 2\Omega \sin \varphi \hat{k} \times \vec{U}_n + \frac{\mu}{n_n m_n} \frac{\partial^2 \vec{U}_n}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} = -\nu_{in}(\vec{V}_i - \vec{U}_n) - \frac{\nabla P_i}{n_i m_i} - \vec{V}_i \cdot \nabla \vec{V}_i + \frac{q}{m_i}(\vec{E} + \vec{V}_i \times \vec{B})$$

ここで、添字の n と i はそれぞれ中性大気とイオンを表し、 $\vec{U}$, $\vec{V}$ はそれぞれ中性風速、イオン風速を、 ν_{ni} , ν_{in} は、中性大気-イオンの運動量輸送衝突周波数を表す。 P は圧力、 n は数密度、 m は質量、 Ω は木星の自転角速度、 φ は緯度、 $\hat{k}$ は単位ベクトル、 q は電荷、 μ は粘性係数、 E は電場、 B は磁場である。上式の右辺第 1 項は中性大気とイオンの衝突による項、第 2 項が圧力勾配力、第 3 項が移流、第 4 項がコリオリ力、第 5 項が鉛直粘性であり、下式の右辺第 1 項はイオンと中性大気の衝突による項、第 2 項が圧力勾配力、第 3 項が移流、第 4 項が電磁力（ローレンツ力）である。

これまでモデル計算や観測によって木星磁気圏-電離圏-熱圏結合の研究が行われてきた。Millward et al. (2005) はイオン風に対する中性大気応答のシミュレーションを行い、イオン風に引きずられて中性風が駆動される様子と、中性大気の加熱を明らかにした。Stallard et al. (2001) らは H_3^+ の赤外発光を捉えることでイオン風の直接観測を行い、数 km/s のイオン風の観測に成功

した。しかし、イオン風に比べ風速、発光強度共に小さいことから、未だ中性風の観測例はなく、オーロラ現象に伴う電離圏プラズマと熱圏中性大気の相互作用の時間・空間変動、木星オーロラ発光強度と電離圏プラズマドリフト速度の時間変動は未解明な問題として残されている。

これらの問題を解決するためには、「高分散の赤外分光器で、中性 H_2 を捉えることができ、継続観測可能な装置」が必要である。我々は上記の要求に応える赤外エシェル分光器の開発を開始した。本分光器は、将来的には現在東北大学がハワイ・ハレアカラに建設計画中の「惑星・系外惑星望遠鏡」用の常設装置となる予定である。

2 観測ターゲット

想定される観測対象のパラメーターを以下に掲げる。最初のターゲットは木星の赤外オーロラである。

表 1 ターゲット・パラメーター

	木星赤外オーロラ			金星大気光
対象	H_2 S ₁ (1)	H_3^+	H_3^+ Q(1,0-)	大気光
波長 (μm)	2.12	2.05	3.95	1.27
明るさ (絶対値)	5.3×10^{-7}	5.6×10^{-7}	5.0×10^{-6}	3.0×10^{-1}
単位	W/m ² /str	W/m ² /str	W/m ² /str	W/m ² /str/ μm

出典：(Drossart et al., 1989; Miller et al., 2006; Raynaud et al., 2004)

3 装置に対する要求

上記の観測を可能とする装置に必要なパラメーターを、以下のように設定した。視野はスリット

表 2 装置要求

	ミニマム	ノミナル
視野	20"	40"
空間分解能	1.0"	0.6"
時間分解能	1 時間	30 分
速度決定要求	100 m/s	60 m/s
波長範囲	H_2 と H_3^+ の発光を同時観測できること	

長が惑星ディスクを 1 度におさめられるように、空間分解能は木星オーロラオーバルを南北に 4 分割できるように設定した。時間分解能は、イオンから中性大気への運動量輸送の時定数が約 3 時間であること、および木星自転の速度を考慮し、上記の値とした。速度決定要求は中性風速度が視線方向で最大 ± 300 m/s と予想されていることから、その 1/10 を捉えられることとした。波長範囲は $2 \mu m$ 帯の H_2 と H_3^+ の輝線を同時に捉えられるように選ぶものとする。

4 速度決定シミュレーション

上記の速度決定誤差を満たすような分光器の設計を行うにあたり、速度決定シミュレーションを行って装置パラメーターを決定した。図 1 に光学系の模式図を示す。図 1 に示すように、エシエル回折格子の他にクロスディスペルザー用の回折格子を用い、次数分離を行う予定である。

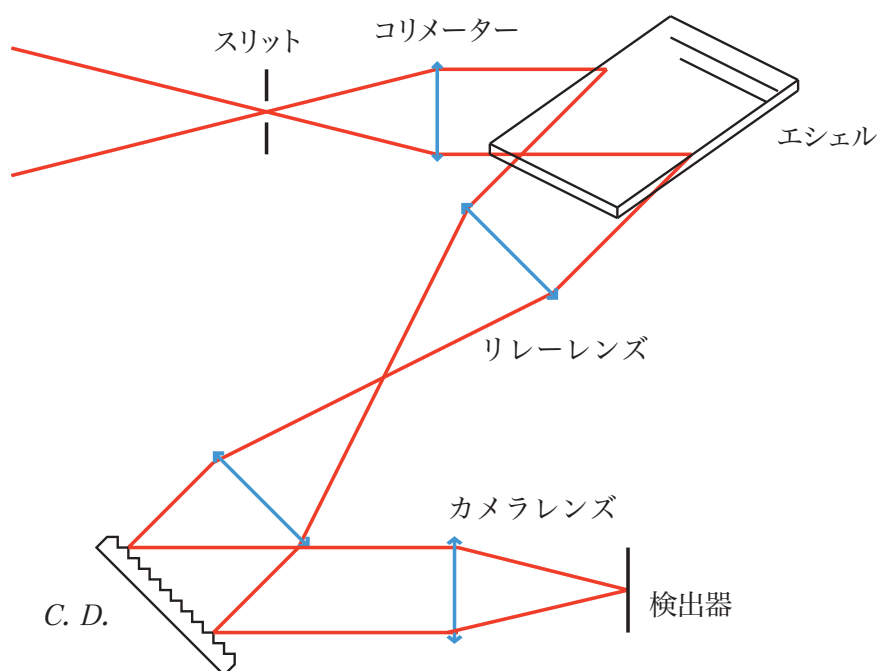


図 1 想定される光学系の模式図

4.1 方法

図 2 に速度決定誤差計算の概念図を示す。スリットが見込む画角から入射した光子は、望遠鏡と分光器のパラメーターによって決まる広がり関数に従った分布でディテクターに投影される。ディテクターでは光子は電子への変換、および AD 変換で離散化され、光子揺らぎと読み出しに起因するノイズが加わる。輝線幅、スリット幅、望遠鏡の回折限界、エシエルの回折限界、波長分解能、プレートスケール、輝線発光強度、背景光、カウント値に応じたランダムノイズを与え、観測される輝線のカウント値を模擬する。得られたカウント値分布にガウシアンをフィッティングさせ、波長の中心位置を決定する。ランダムノイズを加え中心位置を決定する操作を 1000 回繰り返し、その標準偏差を速度決定の誤差としている。

以下は計算の詳細である。

表面輝度 $F[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}]$ の対象から発せられた光は、地球大気 (透過率 T_1) を通過し、光学系の

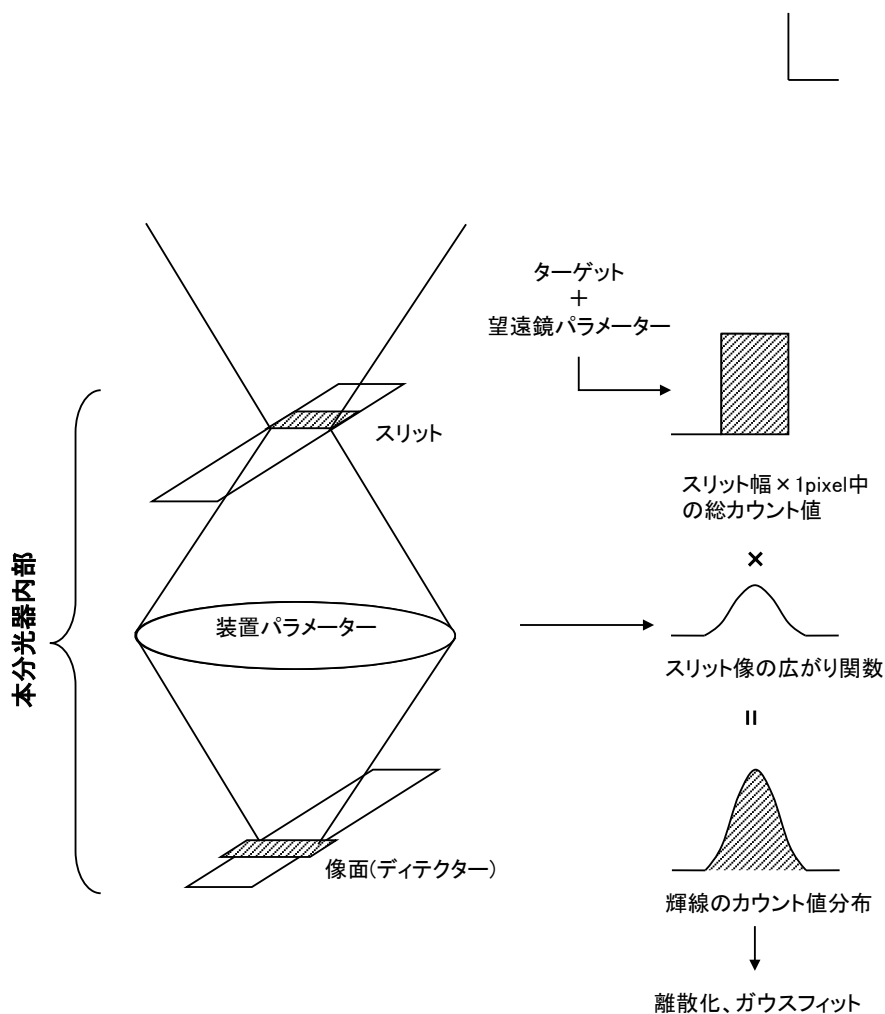


図 2 計算の概念図

内部の複数のミラーおよびレンズ (透過率 $T_{2 \sim n}$) によって減衰を受け、エシェルグレーティングによって波長方向に分散をかけられた上で検出器に到達する。到達した photon は量子効率 η で電子に変換され検出されるが、検出器の出力には素子の暗電流ゆらぎによるダークノイズと、読み出しの際の熱雑音に起因するリードノイズが含まれている (高橋 (2005))。

波長 $\lambda[m]$ の photon 1 個が持つエネルギー $\epsilon[J]$ は、プランク定数を h 、photon の振動数を ν 、光速を c として、

$$\epsilon[J/\text{photon}] = h\nu = hc/\lambda \quad (1)$$

と書ける。従って、ある波長 $\lambda[\mu m]$ で表面輝度 $F[Wm^{-2}sr^{-1}]$ の対象が放出する photon の数は、

$$I[\text{photons}m^{-2}sr^{-1}s^{-1}] = F/\epsilon \quad (2)$$

となる。

仮に photon が検出器に到達するまでの減衰やグレーティングの回折効率を考慮しないならば、2次元検出器の 1pixel が受け取る photon 数 $k[\text{個}/\text{s}]$ は、対象が放出する photon 数 I 、望遠鏡の有効口径 $A[\text{m}^2]$ 、1pixel が望遠鏡光学系を通して見込む立体角 $\Omega[\text{sr}]$ を用いて、

$$k[\text{個}/\text{s}] = I A \Omega \quad (3)$$

と書ける。

実際には大気および光学系の透過率 (反射率) T とグレーティングの回折効率を考慮する必要があり、量子効率 η であるから、検出器 1pixel で検出される電子数 (シグナル) $S[\text{electrons}]$ は、

$$S[\text{electrons}] = I A \Omega T G \eta t \quad (4)$$

となる。

一方ノイズ成分としてはダークノイズ $N_{\text{dark}}[\text{electrons}/\text{s}]$ 、 $N_{\text{read}}[\text{electrons}]$ 、その他、 $\sqrt{I}$ で表されるシグナル強度のゆらぎを考慮する必要がある。とりわけ $2 \mu\text{m}$ 帯では木星の雲やヘイズによる太陽光の散乱光 $I_{BG}[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}/\mu\text{m}]$ の強度も無視できない。 I_{BG} 地球大気や望遠鏡自身の輻射 $I_{sky}[\text{photonsm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}/\mu\text{m}]$ は観測対象付近の空を撮像することで差し引くことができるが、 $\sqrt{I_{sky}}$ はやはりゆらぎとしてノイズ成分となる。従ってノイズの電子数 $N[\text{electrons}]$ は、

$$N = \sqrt{N_{\text{read}}^2 + (N_{\text{dark}} + ((I_{BG} + I_{sky})\Delta\lambda + I)A\Omega T G \eta)t} \quad (5)$$

ここで $\Delta\lambda[\mu\text{m}]$ は 1pixel に含まれる波長幅である。ゆえに S/N は

$$S/N = \frac{I A \Omega T G \eta t}{\sqrt{N_{\text{read}}^2 + (N_{\text{dark}} + ((I_{BG} + I_{sky})\Delta\lambda + I)A\Omega T G \eta)t}} \quad (6)$$

と計算される。

ここでは、プレートスケール $0.3''$ 、望遠鏡口径 $1.9 [\text{m}]$ 、ピクセルサイズ $30 [\mu\text{m}]$ 、量子効率 0.89 、ダークノイズ $1.22 [\text{electrons}/\text{sec}]$ 、リードノイズ $60 [\text{electrons r.m.s.}]$ 、AD 変換係数 $8.5 [\text{electrons}/\text{ADU}]$ 、エシエル溝総本数 6500 本、ブレイズ角 63.5 度、溝間隔 $31.6 [\mu\text{m}]$ 、レンズ 1 枚あたりの透過率 0.9 、エシエル回折格子 0.5 、クロスディスパーザ回折格子 0.5 、大気透過率 0.8 、波長 $2.12 [\mu\text{m}]$ 、木星背景光強度 $8.89 [\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}]$ 、地球大気の放射 $4.3 \times 10^{13} [\text{photons}/\text{sec}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}]$ として計算を行った。

4.2 結果

図 3 にシミュレーションの結果予想されるカウント値分布の一例と、そこから得られる速度決定誤差を示す。スリット幅 $1.0''$ とし、左は H2 オーロラ発光強度が $1 \times 10^{-6} [\text{W}/\text{m}^2/\text{str}]$ (過去の研究から予想される中でも明るい値)、露出時間 30 分である。右は $1 \times 10^{-7} [\text{W}/\text{m}^2/\text{str}]$ (暗い値) であり、露出時間 60 分とした。その結果、左では速度決定誤差 62 m/s 、右では速度決定誤差 350 m/s となった。

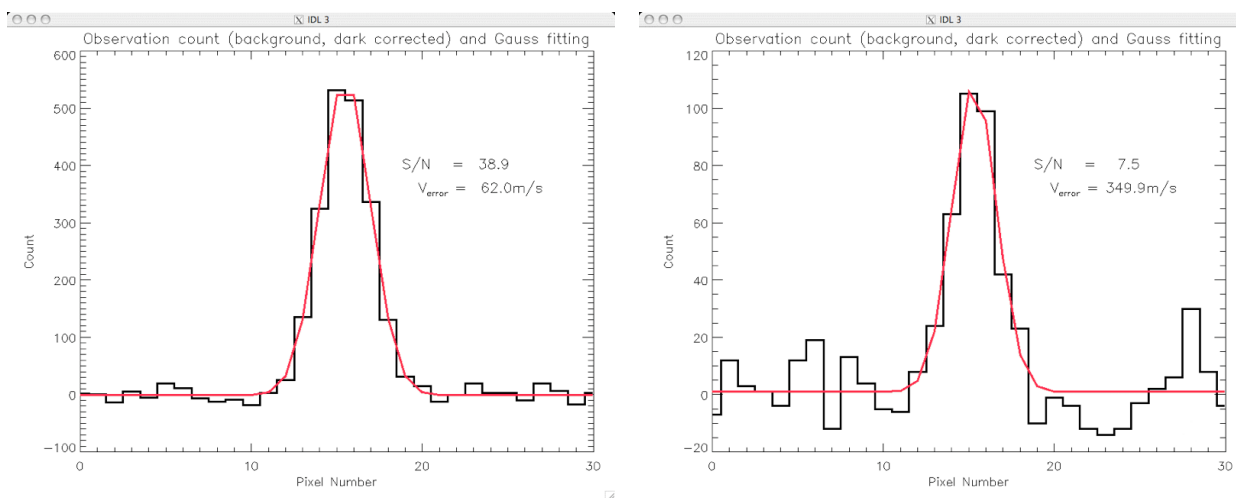


図 3 観測プロファイルとガウシアンフィッティングのシミュレーション結果。左、右ともにプレートスケール $0.3''/\text{pix}$ 、スリット幅 $1.0''$ 、エシェルの溝総本数 6500 本。左：H2 オーロラ発光強度が $1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2/\text{str}$ 、露出時間 30 分、速度決定誤差 62 m/s、右： $1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2/\text{str}$ 、露出時間 60 分、速度決定誤差 350 m/s

表 3 計算結果まとめ

オーロラの明るさ	露出時間	スリット幅	速度決定誤差
明るい ($1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2/\text{str}$)	30 分	$0.6''$	70 m/s
明るい	30 分	$1.2''$	60 m/s
暗い ($1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2/\text{str}$)	1 時間	$0.6''$	400 m/s
暗い	1 時間	$1.2''$	300 m/s

同様の計算をオーロラが明るい場合、暗い場合のそれぞれについて、スリット幅を変えて行った結果を表 3 に示す。シミュレーションにより、 $2 \mu\text{m}$ オーロラが明るい場合には中性風の観測が可能であるが、暗い場合には観測が困難であるということが分かった。実際の発光強度はこの中間の値程度が期待され、部分的には観測可能であると考えられる。

5 まとめ

オーロラ現象に伴う電離圏プラズマと熱圏中性大気の相互作用の時間・空間変動を解明するため、高分散で中性 H_2 の観測ができ、継続観測可能な赤外分光器の開発を開始した。速度決定シミュレーションを元に装置パラメータを決定し、現在光学設計を進めている段階である。

参考文献

Drossart, P., J.-P. Maillard, J. Caldwell, S. J. Kim, J. K. G. Watson, W. A. Majewski, J. Tennyson, S. Miller, S. K. Atreya, J. T. Clarke, J. H. Waite, and R. Wagener (1989),

- Detection of H_3^+ on Jupiter, *Nature*, **340** pp.539–541.
- Miller, S., T. Stallard, C. Smith, and et al. (2006), H_3^+ : the driver of giant planet atmospheres, *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, **364** pp.3121–3137.
- Millward, G., S. Miller, T. Stallard, N. Achilleos, and A. D. Aylward (2005), On the dynamics of the jovian ionosphere and thermosphere. IV. Ion-neutral coupling, *Icarus*, **173** pp.200–211.
- Raynaud, E., E. Lellouch, J.-P. Maillard, G. R. Gladstone, J. H. Waite, B. Bézard, P. Drossart, and T. Fouchet (2004), Spectro-imaging observations of Jupiter’s 2- μm auroral emission. I. H_3^+ distribution and temperature, *Icarus*, **171** pp.133–152.
- Stallard, T., S. Miller, G. Millward, and R. D. Joseph (2001), On the Dynamics of the Jovian Ionosphere and Thermosphere, *Icarus*, **154** pp.474–491.
- 高橋香代子 (2005). 「惑星大気観測のための赤外撮像装置の開発」. Master’s thesis, 東北大学大学院理学研究科.