

木星オーロラのイメージング
Imaging of Jupiter's Aurora

北海道大学理学部地球科学科
(地球物理学)
地球惑星大気物理学研究室

原山 洋平

Harayama Yohei

2000年2月4日

目次

1	要旨	3
2	背景	3
3	木星オーロラ	4
3.1	大気構造と光化学反応	4
3.2	木星磁気圏	5
3.3	オーロラ	8
4	観測	10
4.1	観測の意義・目標	10
4.2	観測システム	10
4.2.1	干渉フィルター	11
4.2.2	CCD カメラ	13
4.2.3	望遠鏡	13
4.3	観測スケジュール	15
5	結果と考察	17
5.1	観測結果	17
5.1.1	H α 656.9 (0.33 nm) J17	18
5.1.2	H α バックグラウンド Jb23	19
5.1.3	H α 656.9 (0.33 nm) J42	20
5.1.4	メタン 890.9 Jm10	21
5.1.5	メタン 757.8 Jm23	22
5.1.6	アンモニア 619.9 Ja7	23
5.1.7	ヘイズ 410.6 Jh5	24
5.1.8	H α 656.9 (0.33 nm) S2	25
5.1.9	メタン 890.9 Sm2	26
5.1.10	アンモニア 619.9 Sa3	27
5.1.11	ヘイズ 410.6 Sh2	28
5.1.12	ヘイズ 410.6 V4	29
5.1.13	1 μ m V16	30
5.1.14	H α 656.9 (0.15 nm) V146	31
5.1.15	H α バックグラウンド Vb187	32
5.1.16	H α 656.9 (0.33 nm) J210	33
5.1.17	H α バックグラウンド Jb219	34
5.1.18	H α 656.9 (0.15 nm) J299	35
5.2	解析と考察	36

6	今後の課題	37
6.1	画像解析	37
6.2	光学系	38
7	参考文献	39

1 要旨

本論文では,1999年11月28日から12月2日まで,北海道陸別町の「銀河の森天文台」において望遠鏡を用いて実施した木星オーロラの可視光領域での地上観測についてまとめた.

2章では今までに行われている木星オーロラについての研究から,地上観測の可能性とその意義についてまとめ,3章では木星の大気構造と光化学反応,木星磁気圏について示し,木星オーロラについて今まで行われてきた研究から理解されている現象についてまとめた.4章においては望遠鏡に取り付けた,CCDカメラ,レンズ,干渉フィルターからなる光学系の開発と観測手法や陸別での観測スケジュールについて,5章では得られた観測結果の解析と考察について示した.最後に6章では今後の課題についてまとめた.

2 背景

多くの惑星で,オーロラと推測される発光現象が観測されているにも関わらず,これまで可視光による惑星オーロラの研究はほとんど行われていない. Voyager 探査機の示唆的な初期観測を除けば,1997年にNASAのWeb上で発表されたGalileo探査機による夜側の木星オーロラの画像だけである.このため本研究では観測が容易で,高時間分解能かつ連続的な観測が可能な地上観測を行う.[参考 <http://photojournal.jpl.nasa.gov>]

地上観測では紫外領域での観測は大気による吸収のため困難である.また,赤外領域では大気中の水分による吸収などの気象条件の影響を受けやすく,また観測環境での熱に対する考慮が必要になり,装置が複雑化してしまう.

そこで,可視光領域だが,可視光領域においては太陽光の惑星面反射のため,とりわけ外惑星では十分なS/N (Signal/Noise)を得ることは難しい.しかし,前述の探査機などの観測結果から,地上中型望遠鏡と冷却CCDカメラによる可視光観測の可能性を検討したところ,狭帯域干渉フィルターを用いればオーロラのエミッションラインがバックグラウンド光に対して10%以上で,十分検出可能であると考えられる.もし実現すれば,木星オーロラ活動の連続観測を行い,高時間分解でダイナミクスを調べることができる.それにより,地球では数10分から1-2時間程度のタイムスケールを持つオーロラサブストームと呼ばれる爆発的な発光過程が,サイズや磁場強度の異なる他の惑星でも起こっているのか,もしそうならどのようなタイムスケールとダイナミクスを示すのかが明らかになる.また,観測中心波長をスキャンすることで,赤外の観測では計測できない発光粒子のドップラーシフトを推定することができ,木星オーロラのメカニズムの理解に貢献するものと期待される.

3 木星オーロラ

木星オーロラは、磁気圏から磁力線に沿って降ってきた電子やプロトンなどと衝突した超高層大気のアトム・分子・イオンなどが励起するために発光するものである。そのためこの章では木星の大気組成、磁気圏、オーロラ粒子などについてふれる。

3.1 大気構造と光化学反応

木星は厚い大気層を持っていて、可視表面では 100 気圧以上と推定されている。主な大気組成は H_2 (～89%) と He (～11%) で、その他ごく僅かな CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , NH_3 , H_2O , PH_3 などが含まれている (図 1)[6]。

表面から高度 760 km までが雲の層で、下から H_2O の水滴, H_2O の氷, NH_4HS の氷, NH_3 の氷, という 4 つの層から成り立っている。その上およそ 240 km にわたって、アンモニアとメタンなどのガス層があり、その外には気体水素 H_2 の層がある。雲の層の上面の気圧は 0.7 気圧, 気温は 150 K であるが、下面の気圧は 100 気圧以上, 気温は 2300 K にも達すると推測されている [6]。

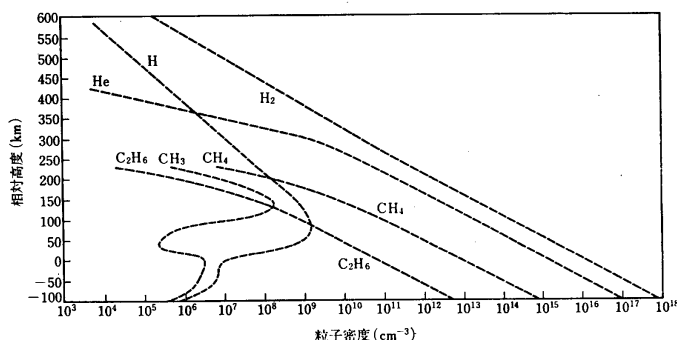


図 1: 木星のモデル大気. 1 気圧の高さを高度 0 としてある [6].

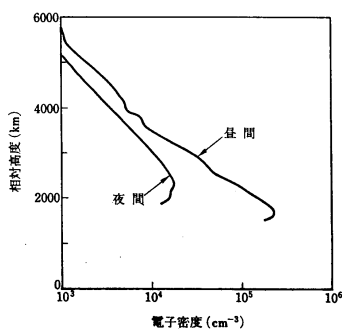
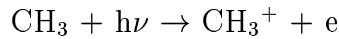
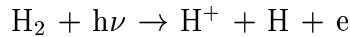
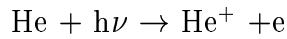
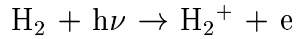


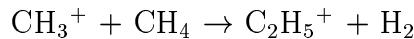
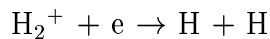
図 2: 木星の電離層. 1 気圧の高さを高度 0 としてある [6].

電離層はボイジャー 1 号の観測によると図 2 に示すように、昼間は高度 1600 km で最大電子密度が 2×10^5 個/cm³、夜間は 2300 km で 2×10^4 個/cm³ となっている。この図では、1 気圧のところ (ほぼ雲の上面) を高度の基準にとってある [6].

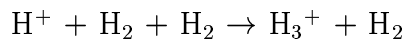
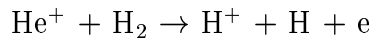
イオンの生成反応は、



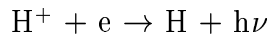
などが考えられ、消滅の反応は分子イオンについては、



原子イオンについては、低いところでは、



高い所では、



であろう [6].

木星大気による太陽光の散乱のために、木星の昼側は全体的に光っているが、極地域ではこのほかに磁気圏から流れ込んできた粒子に励起された原子・分子・イオンが発光するオーロラ現象が存在している。

[参考文献 6, 7]

3.2 木星磁気圏

木星は大きな固有の磁場を持っている。それは地球を基準として約 2 万倍もの強さである。この強い磁場とともに木星は巨大な磁気圏を有しており、磁気圏と太陽風の境は昼側に約 $45 R_J$ (木星半径) もの遠い位置にある。木星の磁気圏が地球と異なっているのは、その磁気圏内に衛星イオ (Io) から供給されるプラズマが満ちていることである。イオは木星半径の約 6 倍の距離をまわっているが、この衛星では活発な火山活動があり、ここから供給されるプラズマが木星の磁気圏内に広がり、内部磁気圏のプラズマシートを形成している。プラズマシートとは、磁力線の方向が逆向きの強い磁場の間に高密度のプラズマが存在する領域である。イオからのプラズマが満ちている領域は 2 つに分けられ、 $5.5 R_J$ より内側を inner Io torus、 $5.5 R_J - 7.5 R_J$ の範囲を outer Io torus と呼ぶ。inner Io torus には冷たいプラズマ (< 1 eV) が満ちており、その密度は 1000 cm^{-3} 以上、その厚みは $0.2 R_J$ 程である。成分は S^+ 、 O^+ 、 S^{++} 、 O^{++} 、 Na^+ 、 SO_2^+ などであり、特にその酸素や硫黄成分、ナトリウムはイオが供給していると考えられる。ここには水素イオンがないが、水素イオンは木星の電離層や太陽風から供給されるであろうから、それが主要成分ではないということは、いかにイオからのプラズマの供給が木星磁気圏では大きな役割を果たしているかを示している [6].

これに対して、outer Io torus と呼ばれる $5.5 R_J - 7.5 R_J$ の範囲には、数十 - 100 eV

の暖かい硫黄や酸素のイオンが約 $1 R_J$ の厚みの範囲に存在している。ガリレオ探査機は 1995 年 12 月にイオに 900 km の距離まで近づき、プラズマ波動の観測器やプラズマの観測器はこのとき最大で約 $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ のプラズマ密度を観測している。探査機はイオの電離層のに入ったと考えられるが、そこでのプラズマの直接観測によれば O^{++} が 30 %、そして SO_2^+ が 5% の割合で存在していた。電離層の温度は周囲の磁気圏の温度が約 100 eV であったのに対して、1桁低い 10 eV であった [6]。

イオ近辺でのプラズマの動きをボイジャーやガリレオの観測から調べると木星とともに回転する方向に流れており、完全に木星に同期して回転している場合と比べて約 0.8 倍の速度を持つ。木星から $6 R_J$ 、すなわち 42 万 km も離れた部分で若干の遅れがあるとはいえ、プラズマが 10 時間の自転周期で木星に引きずられて回転しているというのは驚異的なことである。この流れにともなって発生する電場はイオの電離層から流れ出す冷たいイオンの熱化に重要な役割を果たしていると考えられている。また、このように速い回転運動をしているために、図 3、図 4 のように木星の内部磁気圏では強い遠心力が働き、このためプラズマが円盤状となったディスク構造をしている [6]。

また、木星の回転に支配される内部磁気圏と違い、中間磁気圏では木星から離れるに従い徐々に太陽風との相互作用が強まっていき、その結果太陽側と反対側に磁気圏尾部が伸びていく。木星の尾部カレントシートは木星を取り巻くカレントディスクの一部あるいはその延長として存在している。カレントシートとは、太陽風によって変形した磁気圏のプラズマシート内に電流が生じている領域で、このカレントシートは夜側に少なくとも $100 R_J$ は伸びていて、木星のそばでは磁気赤道面内にある。厚みは平均して約 $5 R_J$ である [6]。

木星から $150 R_J$ 以遠の尾部では、もはや木星磁気圏のプラズマも木星とともに回転してはいない。ここでは木星から遠ざかる方向に $300 - 900 \text{ km/s}$ の速さでプラズマが流れ出している。このプラズマの流れを磁気圏風 (magnetospheric wind) と呼ぶ。この流れの成分を調べると高いエネルギーの H^+ と He^+ の比が磁気圏の内側で観測されるものと同じであり、この流れは木星磁気圏に源を発していることが分かる [6]。

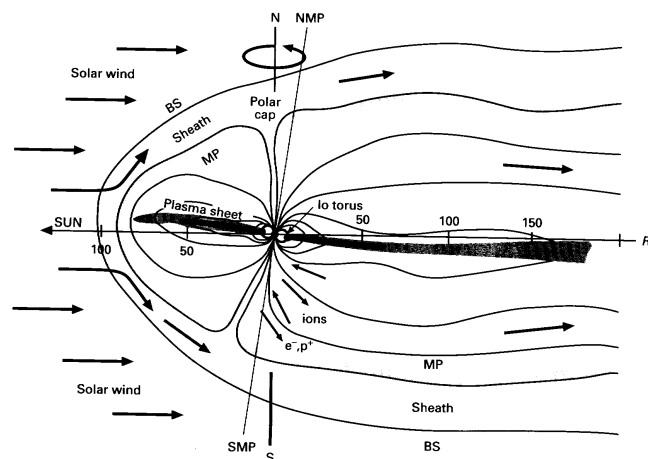


図 3: 横から見た木星磁気圏. 横軸の単位は $R_J (=71400 \text{ km})$ である [8].

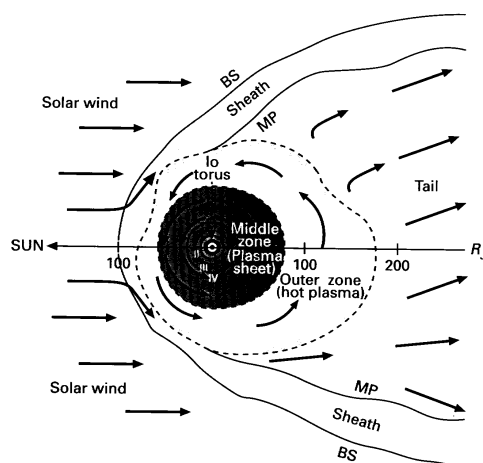


図 4: 北極側から見た木星磁気圏 [8].

なお, 木星の磁場は, 液体金属水素からなるマンツルの流動・循環による「ダイナモ効果」によって発生していると考えられる. 磁場は完全な対称ではないが, 双極子磁場として考えられ, 図 5 のように磁場の軸は自転軸に対して約 10° ほど傾いており, 極性は地球とは逆向きである [8].

木星では約 10 時間の自転にともなって, 北極域でのオーロラ帯も回転しているため, 地球からでも観測することができる.

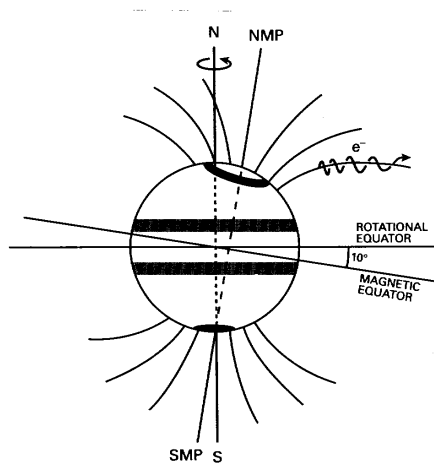


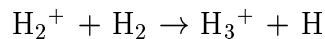
図 5: 自転軸に対して約 10° ほど傾いた磁軸. 黒い帯はオーロラ帯である [8].

[参考文献 6, 7, 8]

3.3 オーロラ

地球外のほとんどの惑星にオーロラが存在することは、最近の惑星探査機と宇宙望遠鏡の活躍によって確認されているが、中でも特に詳しい研究が行われてきたのが木星オーロラである。

木星オーロラは 1980 年代から、地上の大型望遠鏡を用いた赤外線によるイメージングが盛んに行われており、観測波長は、メタンやアンモニアの吸収によって木星大気による太陽光反射が弱められている 2 - 8 μm が用いられている。Drossart et al.[3]によると、観測の結果から近赤外領域での発光は H_3^+ の放射によるものと考えられている。 H_3^+ の主な生成反応は次式である。



紫外領域でははじめに Voyager 探査機がオーロラからの紫外線放射の観測に成功し、発光は主として H (Ly α) および H_2 (Werner バンド) によるものと理解されている。その後、高い空間分解能を持つ Hubble 宇宙望遠鏡による観測によって研究が進みオーロラオーバルの撮像にも成功している [2]。

可視光による観測は、木星表層の強い太陽光の反射を避けるため、Galileo 探査機による夜側での撮像に限られているが、最近 Galileo 探査機がはっきりとしたオーバル状の構造の撮像に成功し、可視域でもオーロラの発光が確認された。発光は主に H_2 や H の balmer 系列 ($\text{H}_\alpha, \text{H}_\beta$) によるものと考えられている [4][10]。

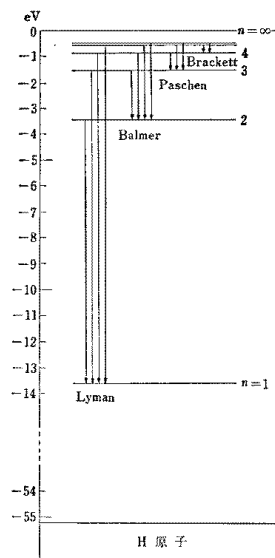


図 6: H のエネルギー準位とスペクトル系列 [5].

水素原子の発光スペクトルの中で H_α は、Balmer の発見した線スペクトル波長の実験式 (λ はスペクトル線の波長, R は Rydberg 定数.)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5 \dots$$

において $n = 3$ の時, つまり図 6 において n が 3 から 2 にエネルギー状態が変化したときに放射する光である. これは木星の磁気圏から流れ込んできた高エネルギーを持つ電子などの衝突によって励起されたオーロラ帯の水素原子が, 再び基底状態に戻るときに放射する光であると考えられている [5].

このように放射のスペクトル領域が広範囲にわたっていることは, 流れ込んでくる粒子のエネルギー状態や発光する粒子の組成が様々であることを示唆している.

[参考文献 5]

4 観測

4.1 観測の意義・目標

地球の極域に繰り広げられるオーロラ現象は、地球磁気圏で起こっている多種多様な電磁気現象が電離圏に投影された現象であり、そのダイナミクスを観測・研究することで、プラズマで満たされた磁気圏の構造やエネルギーの発生・輸送のメカニズムを解明し、さらには磁気圏と中性大気が激しい相互作用を続けている電離圏の物理機構について知見を得てきた。

最近の探査機や宇宙望遠鏡による観測から、太陽系の多くの惑星についてもオーロラ現象の存在が明らかになった。しかし、これらの観測ではまず規模が大がかりなため容易ではなく、また短時間変動を連続的に捕らえることが困難なために、静的なイメージとしての形態が議論の中心であった。しかし磁気圏の解明にはそのダイナミクスの理解が不可欠である。

そこで本研究では、可視光を用いて木星オーロラの高時間分解、かつ連続的なモニタリングを試み、惑星における磁気圏・電離圏の諸現象の解明を目指す。

4.2 観測システム

今回の観測では、図 7 のような光学系を開発設計し、望遠鏡の接眼部に取り付けた。光学系はテレセントリック光学系と呼ばれるもので 2 枚のレンズと干渉フィルターからなっている。

1 枚目のレンズで望遠鏡からの像をコリメートして平行光線を得て、それを干渉フィルターに通し、その光を 2 枚目のレンズで CCD カメラの画素面上に結像させる。

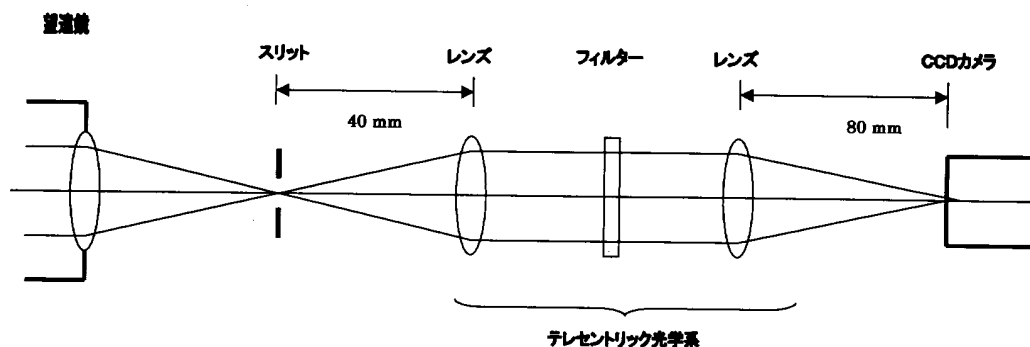


図 7: 開発した光学系. 左から順に望遠鏡, スリット, レンズ, 干渉フィルター, レンズ, CCD カメラと並んでいる。

ただ、干渉フィルターは入射光線の角度に依存性があり、角度が付くと中心波長が短波長側にシフトし、透過率も減少する。今回の観測では、レンズの位置調整は手動で行ったため、目的のライン ($H\alpha$) の光のみを透過させたいので調整はかなり慎重に行う必要があった。

今回は望遠鏡側に焦点距離 40 mm , CCD カメラ側に 80 mm のものを用いて像を 2 倍に拡大したものを撮像した. また, 場合によってはスリットを用いて, 見たい部分だけを撮像し, それ以外からの光を制限できるように設計した. この光学系が, 望遠鏡のナスミス焦点の架台に取り付けられるように金具を設計・製作し, 図 8 のように取り付けて観測を行った.



図 8: ナスミス焦点架台部. 左から CCD カメラ, レンズ, 干渉フィルター, レンズ, スリットと並んでいる.

4.2.1 干渉フィルター

干渉フィルターは薄膜の透過光による干渉を利用したもので, 平行平板ガラス面上に誘電物質の膜をスペーサーとして, 分離した 2 つの反射膜をつけることによって作られる. 今回は狭帯域干渉フィルターを使用した. 狭帯域干渉フィルターは, ファブリー・ペローの干渉計と同じ原理であり, 通常は 1 次の干渉を使用する.

ファブリー・ペロー干渉計は多重反射の干渉効果を用いた干渉計である. 入射した光は 2 面の間を多重反射し, 透過光の波面は, 偶数回の反射を受けた後に透過する各成分波面の重畳である. 各成分波面に位相差が無いときに透過光が最大になる. このとき, 入射角を θ , 光学的距離を d とすると光路差は波長 λ の整数倍になっており, 次式が成立する.

$$m\lambda = 2d \cos \theta$$

他の波長では, 各透過成分波面間で打ち消し合いの干渉が起こり, 透過光がゼロ近くまで減少する. 鏡面の反射率を上げることにより, 透過ピークを鋭くすることができる. また, 観測では必要な光だけを透過させたいので, できるだけ半値全幅 (FWHM) は狭い方が良いが, 透過光の波長は入射角度に依存性があり, 角度が付くと中心波長が短波長側にシフトし, 透過率も減少する. また観測環境下での温度にも依存するのでフィルターの選

択は難しい.

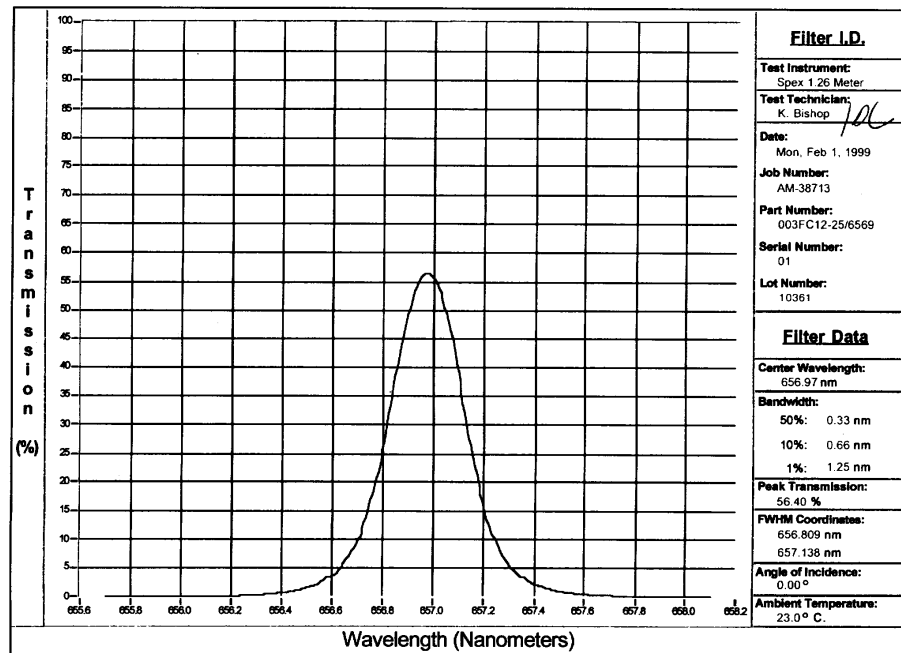


図 9: フィルターの透過特性. 縦軸は透過率. 横軸は透過波長.

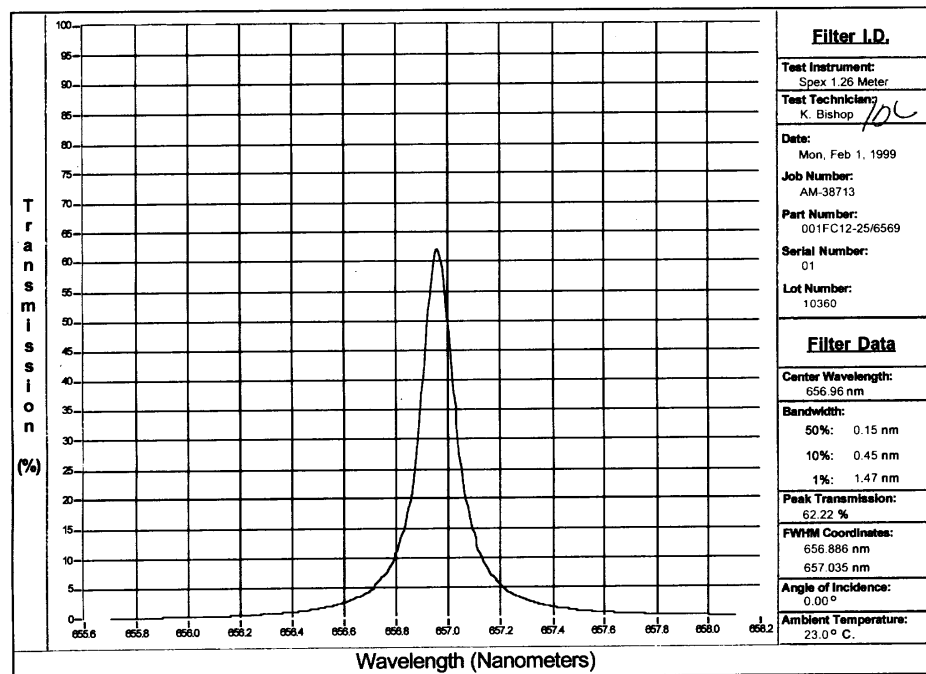


図 10: フィルターの透過特性. 縦軸は透過率. 横軸は透過波長.

今回の観測では $H\alpha$ のフィルターに、中心波長 656.9 nm , FWHM が 0.33 nm , 0.15 nm の 2 種類のものを使用した。またオーロラ以外に木星の雲模様を見るものとしてメタンの吸収線 757.8 nm , 890.9 nm の 2 種類, アンモニアの吸収線 619.9 nm のもの, ヘイズと呼ばれるもやを見るためのもの 410.6 nm , 金星の雲模様を見る 1μ , などを使用した。図 9 , 図 10 は $H\alpha$ のそれぞれ FWHM が 0.33 nm , 0.15 nm のフィルターの透過特性を示す。

また、木星オーロラの撮像において、エミッションラインの画像のみでのオーロラ検出がきびしい場合は、画像処理においてバックグラウンド光の画像との差引を行う。バックグラウンド画像はフィルターを少し傾けることによって透過波長を短波長側にシフトさせ、オーロラ光を外して撮像する。

[参考文献 1 , 9]

4.2.2 CCD カメラ

観測には Pixel Vision 社の Spectra Video シリーズの背面照射型 CCD カメラを使用した。このカメラは光を前面のポリシリコンゲート電極を通さず、背面を通して照射させ電荷を集める背面照射型で、可視光領域で 85 % 以上の高量子効率がある。また、CCD カメラは暗電流ノイズという、光が全く照射しなくても熱によって電流が発生したために生じるノイズのために冷却する必要がある。このカメラはペルチェ素子という半導体を用いて冷却しており、室温より 55°C ほど下げることができ、暗電流ノイズを抑えることができる。

CCD カメラのシステムはカメラヘッド、カメラコントローラー、PC からなっていて、PC では専用の Windows 用ソフト Pixel View を用いて露出時間、温度設定、ゲイン、ビニングなどの設定が行える。露出時間は最短で 15 ms ほどである。ビニングとは、微弱光領域で画像を取得する場合に有効な手段で、チップ上で隣り合う画素どうしの電荷を加算し、解像度と引き替えに高感度を実現する手段である。例えば、 2×2 では 4 画素分の電荷が CCD 上で加算されるため、信号成分は 4 倍になるが、読み出しは 1 回のみ行われるのでノイズは 1 回分のみとなり、S/N で 4 倍の改善となる。また、画像転送も速くなるので観測では 2×2 で連続撮像し、モニターを見ながら光学系のピント調整等を行った。

4.2.3 望遠鏡

観測に使用した望遠鏡は、北海道陸別町の「銀河の森 天文台」にある、口径 115 cm 反射望遠鏡を使用した (図 11)。

望遠鏡は経緯式望遠鏡で、星の追尾には上下 (高度) 方向と水平 (方角) 方向の 2 軸を動かして追尾を行う。この望遠鏡の操作は、起動からドームの駆動、星の導入、星の追尾、ピント調整、焦点の切替えなどすべてコンピューターによって行う。

今回の観測では、開発した光学系をナスミス焦点の架台に取り付けて行った。ナスミス焦点は図 12 のように光軸上の第 3 鏡から光線を望遠鏡の上下回転軸に沿って引き出し焦点を結ばせる。この方法だと望遠鏡の高度が変化しても接眼部の位置は変わらないの

で、大型の観測装置でも取り付けることができる。



図 11: 陸別町「銀河の森 天文台」の口径 115 cm 反射望遠鏡. ナスミス焦点の架台が高いのでセッティングには脚立を用いる.

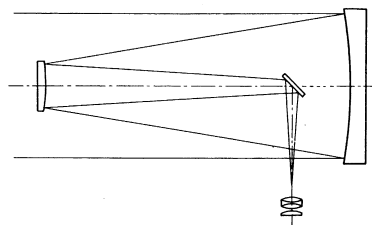


図 12: ナスミス焦点 [12].

また、星の移動と共に像が回転していくので、像の回転を防ぐためナスミス焦点の架台も回転させることができるが、観測では CCD カメラとそのコントローラーを繋ぐケーブルを延長することができず、架台にコントローラーを吊下げる形にしたため回転させずに水平のまま観測した (図 8).

[参考文献 12]

4.3 観測スケジュール

- 観測日時 1999年11月28日～12月2日
- 観測場所 北海道陸別町 銀河の森天文台
- 観測対象 木星, 土星, 金星
- 機器仕様
 - － 使用望遠鏡 口径 155cm 反射望遠鏡
 - － 検出器 背面照射型 冷却 CCD カメラ
 - － 干渉フィルター
 - * H α 656.97 nm (FWHM 0.33 nm) , 656.96 nm (0.15 nm)
 - * メタン 757.8 nm , 890.9 nm
 - * アンモニア 619.9 nm
 - * ヘイズ 410.6 nm
 - * 1 μ m

観測は、まず持ち込んだ機材等をセッティングして動作確認を行い、光学系のピント調整を行った後に望遠鏡に取り付けて観測に入った。実施した観測を以下の表にまとめた。時刻や気温については、フィルターを変えた際に記録しなかったものも含まれる。画像は比較的シーイングの良いものを選んである。

年月日	時刻	気温 (°C)	惑星	フィルター	露出時間	画像データ	
1999.11.28	23:00	-6.5	木星	H α 656.9 (0.33 nm)	500 ms	J17	
	}	-6.4	木星	H α バックグラウンド	500 ms	Jb23	
1999.11.29	0:00	-6.2	木星	H α 656.9 (0.33 nm)	500 ms	J42	
	}	-6.0	木星	メタン 890.9	500 ms	Jm10	
		-6.4	木星	メタン 757.8	500 ms	Jm23	
				木星	アンモニア 619.9	500 ms	Ja7
				木星	ヘイズ 410.6	500 ms	Jh5
				土星	H α 656.9 (0.33 nm)	1000 ms	S2
				土星	メタン 890.9	1000 ms	Sm2
				土星	アンモニア 619.9	1000 ms	Sa3
				土星	ヘイズ 410.6	1000 ms	Sh2
	1999.11.29	06:00	-4.6	金星	ヘイズ 410.6	15 ms	V4
}		金星		1 μ m	15 ms	V16	
06:30							
1999.11.29	18:00	-4.3	木星	H α 656.9 (0.15 nm)	500 ms	V146	
	}	-6.6	木星	H α バックグラウンド	500 ms	Vb187	
			木星	H α 656.9 (0.33 nm)	500 ms	J210	
	03:30		木星	H α バックグラウンド	500 ms	Jb219	
		-6.2	木星	H α 656.9 (0.15 nm)	500 ms	J299	

5 結果と考察

5.1 観測結果

観測した画像データの中で比較的シーイングの良いものを, Adobe 社の Photoshop 5.5 を用いて画像処理を行った. その処理過程と見られた特徴等を以下に示す. また, 本論文に添えた画像処理データ CD において, フォルダ [RIKUBETSU] 内のフォルダ [Planets] には撮像した生の画像データ, フォルダ [Planets2] には photoshop で処理した画像が入っている. それぞれの処理ファイルが置かれているフォルダと, 行った処理についても示しておく.

実施した処理は, レベル補正, モード変換, シャープ (アンシャープマスク), 明るさ等である.

- レベル補正

ヒストグラムによって画像上のピクセル値の分布を見ながら, 3 つの変数 (ハイライト, シャドウ, 中間調) を使ってピクセル数の最大最小を取り, 色調を補正するコマンドである. 2 回ほど行うと細かな補正が可能になる.

「イメージ」の「色調補正」で「レベル補正」を選択し, 各レベルを入力する.

- モード変換

撮像した画像は 16 bit データであるが, フィルタ等の処理を行う場合, 8 bit データに変換する必要がある.

「イメージ」の「モード」で「8 bit/チャンネル」を選択.

- シャープ

隣接ピクセルのコントラストを強調して, ぼやけた画像をシャープにする補正であり, 「アンシャープマスク」フィルタをかけることによって写真, スキャン, 再サンブル, プリントの過程で生じるピンボケが修正されオンライン用の画像に効果的である.

「フィルタ」の「シャープ」で「アンシャープマスク」を選択し, 適用量 (%) (ピクセルのコントラストの増加量を指定), 半径 (pixel) (シャープ時に使用するエッジピクセルの周囲のピクセル数を指定), しきい値 (レベル) (0 にすると, 画像内のすべてのピクセルがシャープになる) を入力. 実際はそれらの各項目は初期値のままの値を変更せずに適用した.

- 明るさ

色調範囲の調整で, 画像のハイライト, シャドウ, 中間調のすべてのピクセル値を一度に調整する.

「イメージ」の「色調補正」で「明るさ・コントラスト」を選択し, 明るさで -100 から +100 までを指定する. 適度に暗くして, 見やすくなった値を選択した.

5.1.1 H α 656.9 (0.33 nm) J17

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 030

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (24 , 1.00 , 180)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.4 , 0)
- 明るさ -50

極地域において, 南極域 (画像の上側) に比べて, 北極域 (画像の下側) に明るい部分が見られる.

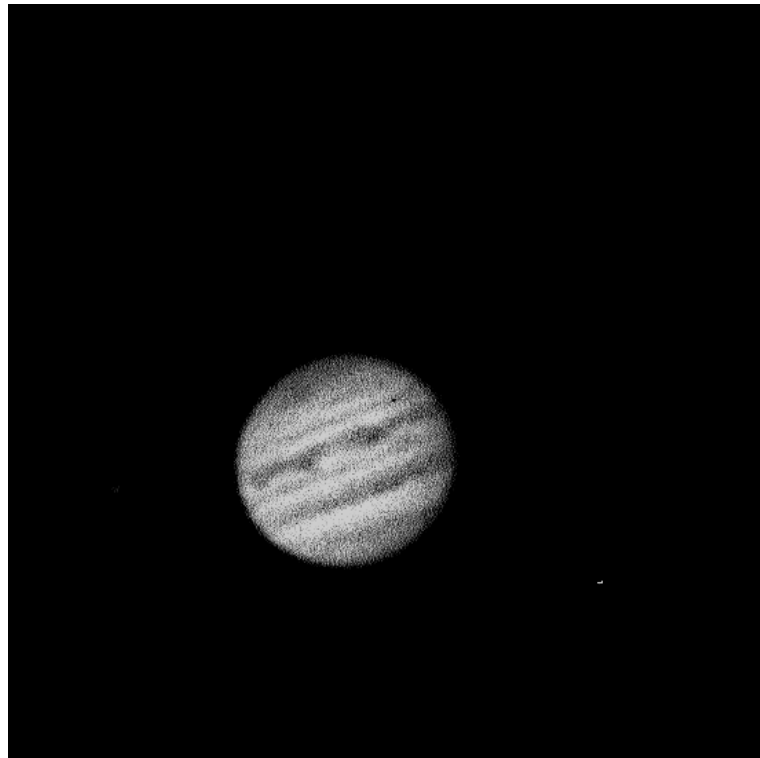


図 13: H α 656.9 (0.33 nm) J17

5.1.2 H α バックグラウンド Jb23

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 030b

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (24 , 1.00 , 180)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.2 , 0)
- 明るさ -50

バックグラウンド光を撮るために干渉フィルターを 5° 傾けて撮像. 両極域とも一様に減光してる.

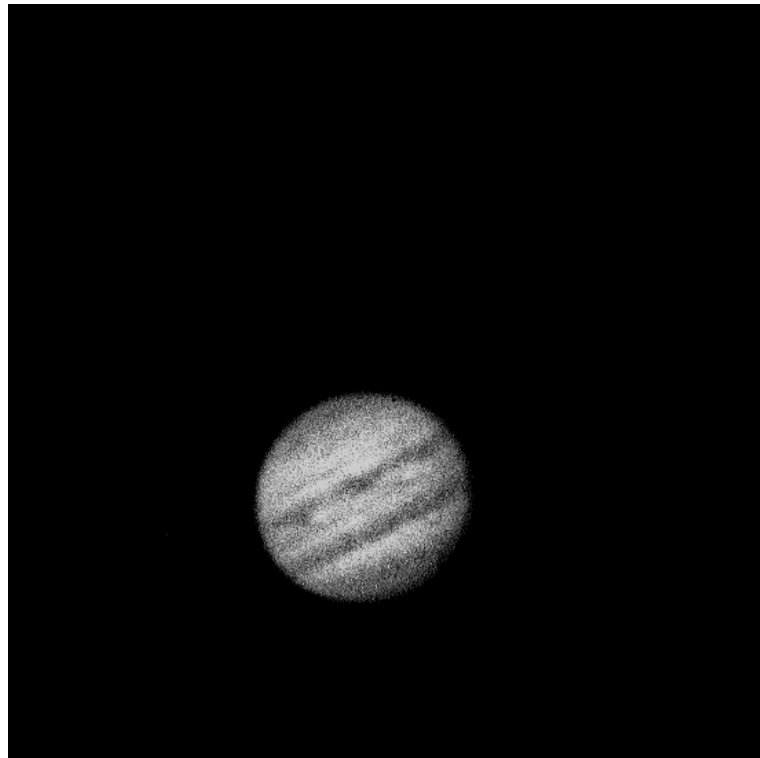


図 14: H α バックグラウンド Jb23

5.1.3 H α 656.9 (0.33 nm) J42

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 030

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (24 , 1.00 , 180)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.4 0)
- 明るさ -50

これも J17 と同様に北極域が南極域に比べて明るい部分が見られる。



図 15: H α 656.9 (0.33 nm) J42

5.1.4 メタン 890.9 Jm10

フォルダ Planets2/Jupiter/methane890

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 18)
- レベル補正 入力レベル (35 , 1.00 , 184)

赤道域が明るく,かつ膨らんでいる. 両極域も厚みがあり膨らんでいる. となりの小さな点は衛星である.

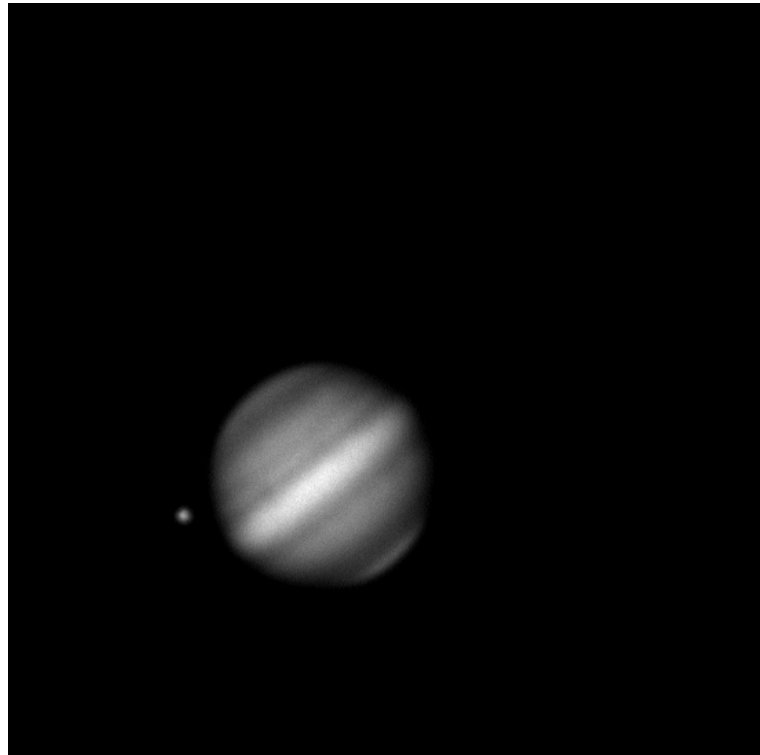


図 16: メタン 890.9 Jm10

5.1.5 メタン 757.8 Jm23

フォルダ Planets2/Jupiter/methane757

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 55)
- レベル補正 入力レベル (35 , 1.00 , 249)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -40

Jm10(メタン 890 nm) ものと大きく異なり, 比較的細かい模様が見えている. 中緯度では明るくなっている.



図 17: メタン 757.8 Jm23

5.1.6 アンモニア 619.9 Ja7

フォルダ Planets2/Jupiter/ammonia

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 73)
- レベル補正 入力レベル (20 , 1.00 , 246)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -20

Jm23 と似ているが少し淡い. 北極域に丸い模様が映っているが, それは CCD カメラのチップ上についた水滴または氷と考えられる.

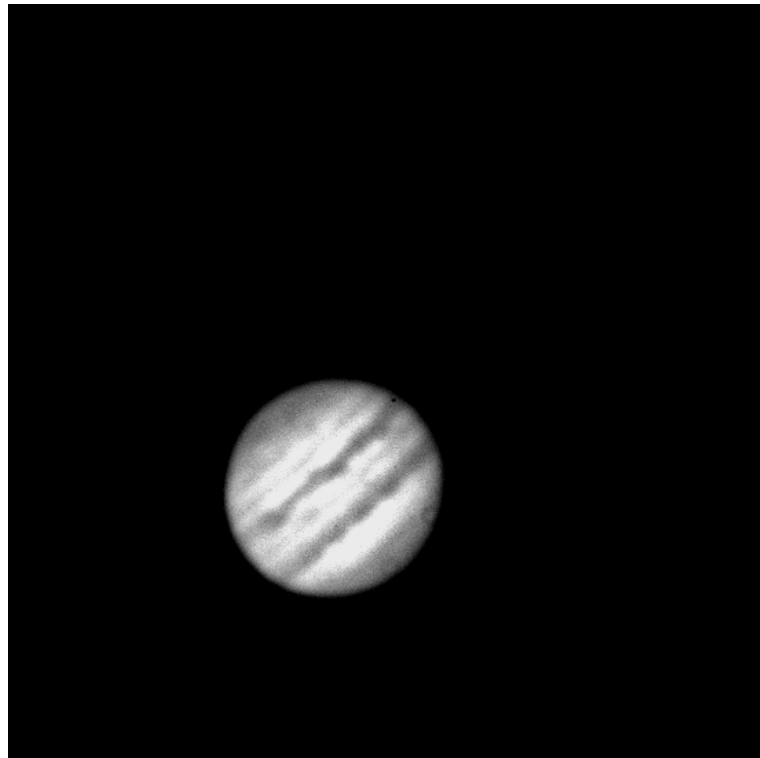


図 18: アンモニア 619.9 Ja7

5.1.7 ヘイズ 410.6 Jh5

フォルダ Planets2/Jupiter/410

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (109 , 1.00 , 195)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -35

赤道域と中緯度でくっきり明るい帯が 3 本見えている。両極域はともに暗い。明暗が非常にはっきりとしている。

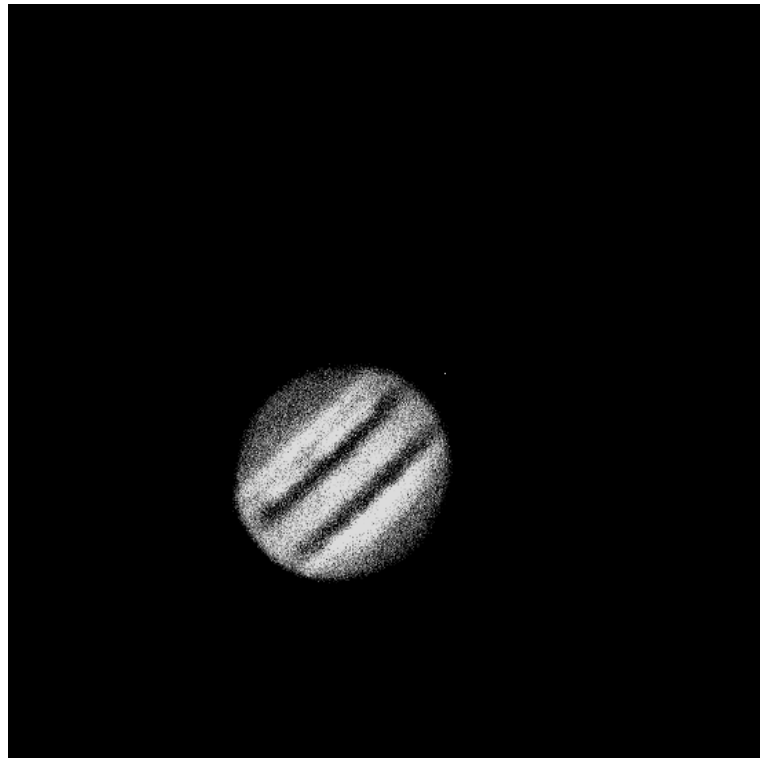


図 19: ヘイズ 410.6 Jh5

5.1.8 H α 656.9 (0.33 nm) S2

フォルダ Planets2/Saturn/H α 030

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 15)
- レベル補正 入力レベル (81 , 1.00 , 160)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -60

赤道域が明るくなっている。



図 20: H α 656.9 (0.33 nm) S2

5.1.9 メタン 890.9 Sm2

フォルダ Planets2/Saturn/methane890

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 31)
- レベル補正 入力レベル (44 , 1.00 , 252)

土星の輪だけが明るく浮かび上がり, 土星本体は見事に消えている.



図 21: メタン 890.9 Sm2

5.1.10 アンモニア 619.9 Sa3

フォルダ Planets2/Saturn/ammonia

- レベル補正 入力レベル (7 , 1.00 , 44)
- レベル補正 入力レベル (17 , 1.00 , 234)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -70

輪と赤道域ともに明るいのに反して、中緯度では暗くなっている。



図 22: アンモニア 619.9 Sa3

5.1.11 ヘイズ 410.6 Sh2

フォルダ Planets2/Saturn/410

- レベル補正 入力レベル (7 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (48 , 1.00 , 80)

輪と土星本体ともに明るいですが、模様はほとんど確認できない。

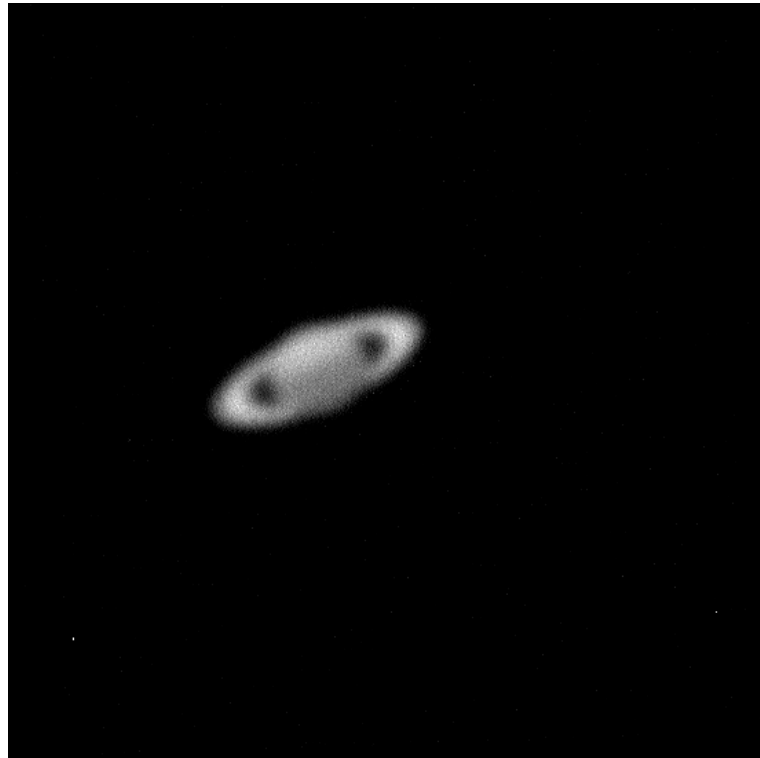


図 23: ヘイズ 410.6 Sh2

5.1.12 ヘイズ 410.6 V4

フォルダ Planets2/Venus/410

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (110 , 1.00 , 240)

拡大すれば, 夜側部分にパターンのようなものがわずかに見られる.



図 24: ヘイズ 410.6 V4

5.1.13 1 μ m V16

フォルダ Planets2/Venus/1000

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 85)
- レベル補正 入力レベル (30 , 1.00 , 248)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -60

これも V4 と同様に夜側にパターンがわずかに見られる。

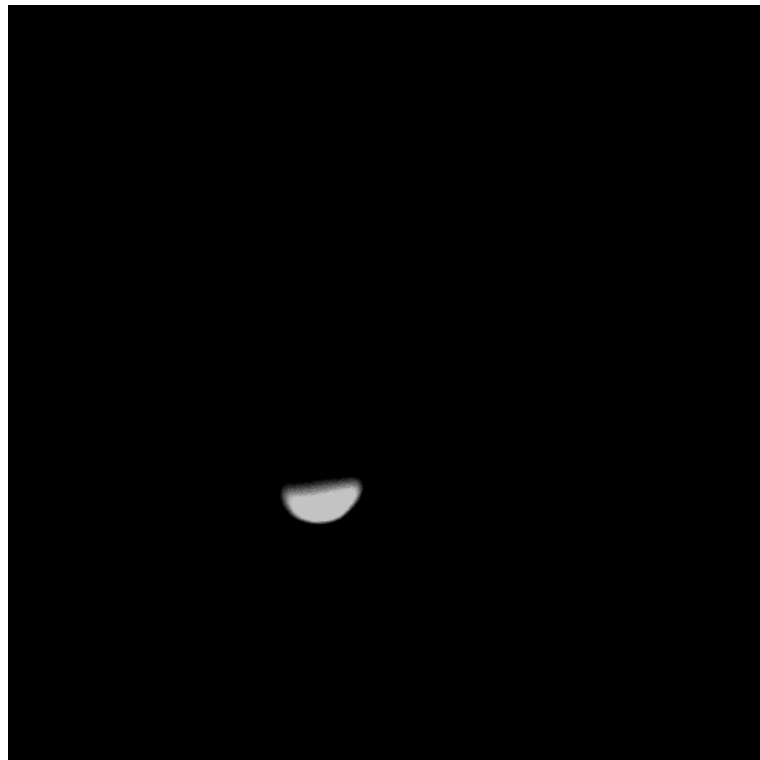


図 25: 1 μ V16

5.1.14 H α 656.9 (0.15 nm) V146

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 015

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 14)
- レベル補正 入力レベル (90 , 1.00 , 230)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -50

これも北極域が南極域に比べてわずかに明るくなっている。

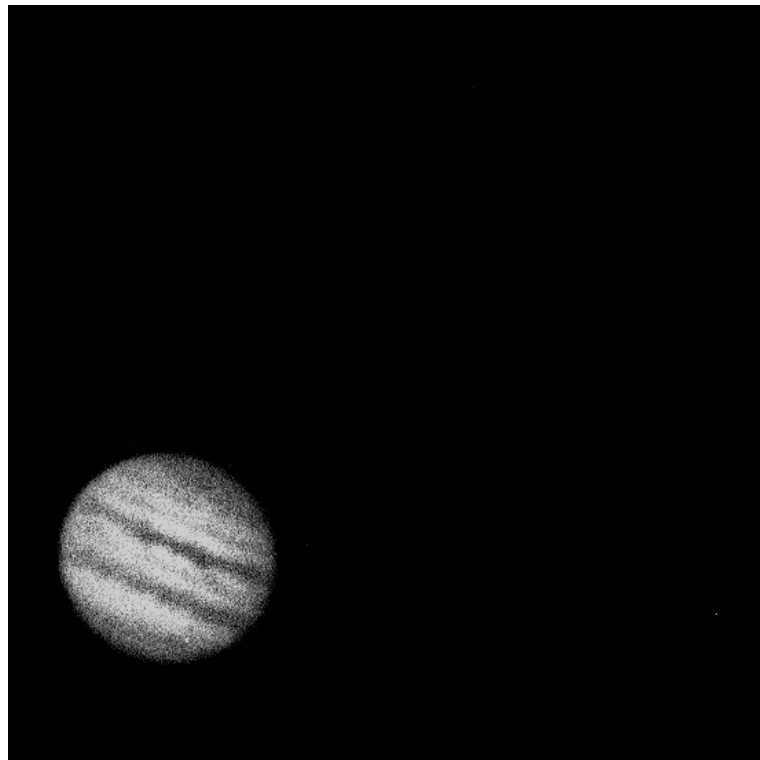


図 26: H α 656.9 (0.15 nm) V146

5.1.15 H α バックグラウンド Vb187

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 015b

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (77 , 1.00 , 230)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -60

バックグラウンド光を撮るために干渉フィルターを 3° 傾けて撮像したが, V146 と同様に北極域がやや明るく見える.

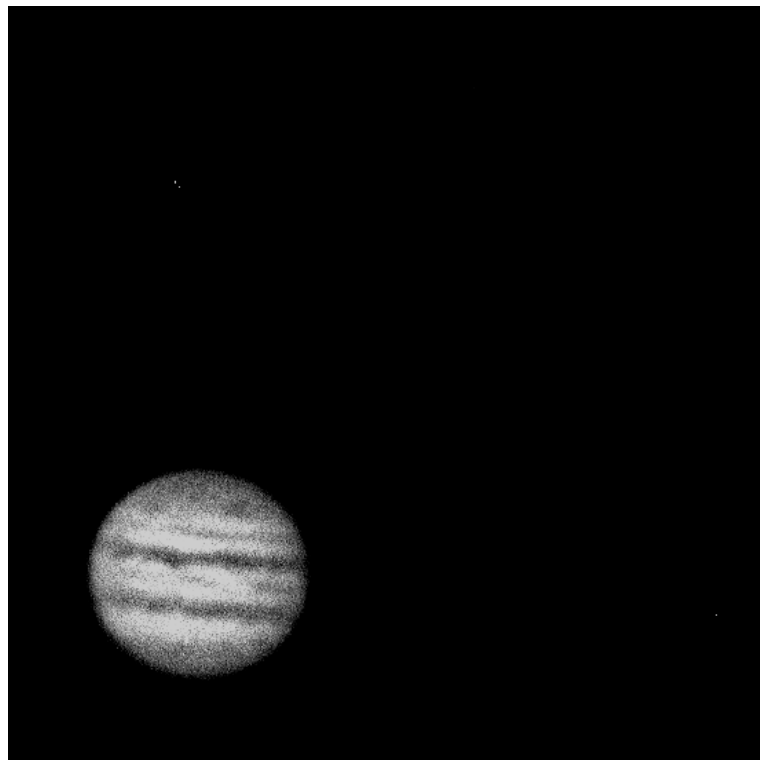


図 27: H α バックグラウンド Vb187

5.1.16 H α 656.9 (0.33 nm) J210

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 030

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (24 , 1.00 , 180)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.4 , 0)
- 明るさ -50

J17 と同様に, 北極域に明るい筋が見える.

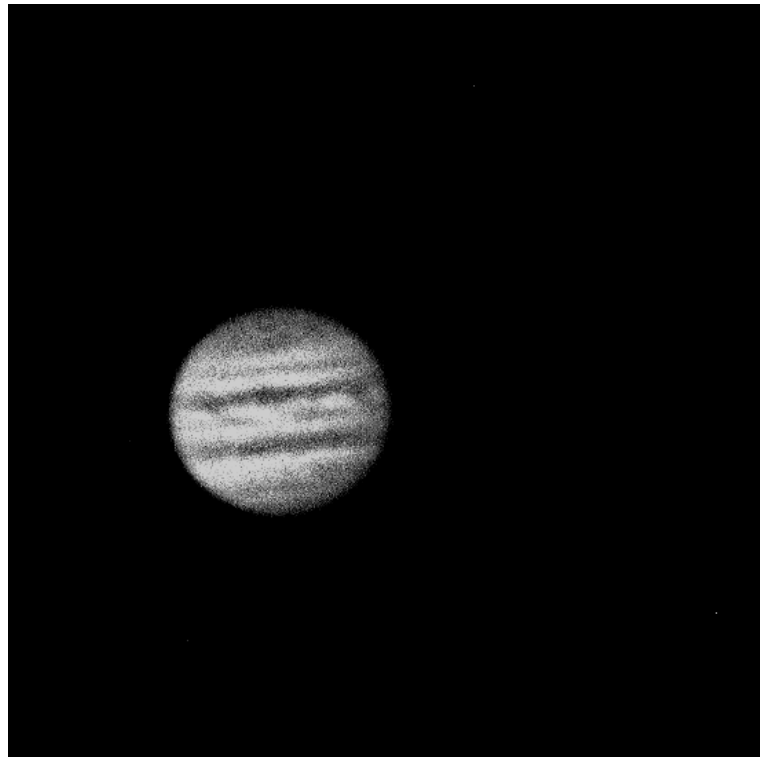


図 28: H α 656.9 (0.33 nm) J210

5.1.17 H α バックグラウンド Jb219

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 030b2

- レベル補正 入力レベル (8 , 1.00 , 16)
- レベル補正 入力レベル (24 , 1.00 , 250)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.1 , 0)
- 明るさ -50

これは干渉フィルターを 5° 傾けて撮像した. J210 と比べて北極域の明るい筋が消えている.



図 29: H α バックグラウンド Jb219

5.1.18 H α 656.9 (0.15 nm) J299

フォルダ Planets2/Jupiter/H α 0153

- レベル補正 入力レベル (6 , 1.00 , 17)
- レベル補正 入力レベル (63 , 1.00 , 129)
- モード 8 bit 変換
- アンシャープマスク (適用量, 半径, しきい値)=(500 , 7.0 , 0)
- 明るさ -40

両極ともに減光しており, 明るさの違いは見られない.

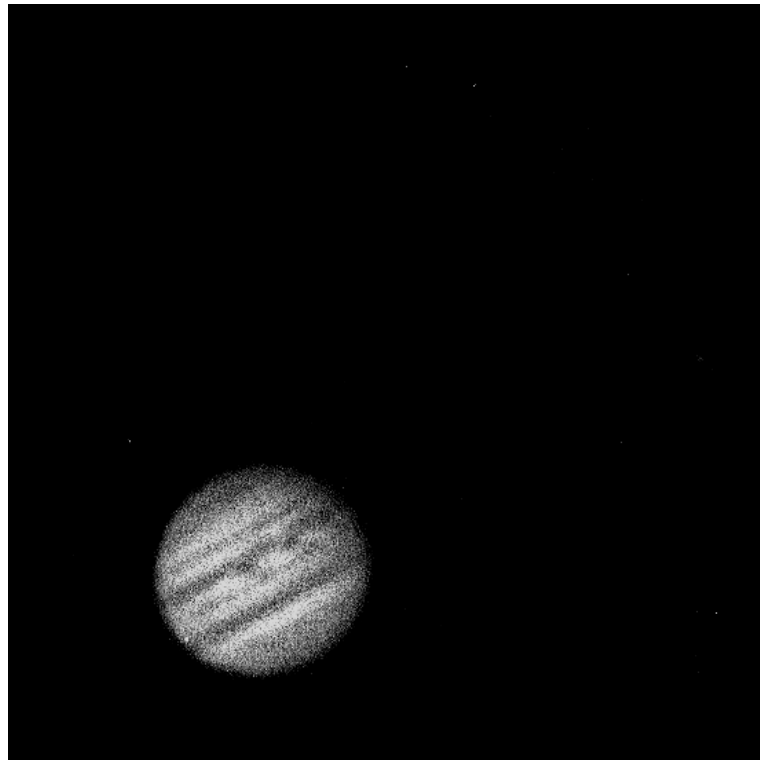


図 30: H α 656.9 (0.15 nm) J299

5.2 解析と考察

本章の 4.3 で示した木星オーロラのエミッションライン画像 J17 と バックグラウンド画像 Jb23 について, Photoshop を用いて「明るさ補正」で明るさを -50 に落した画像を並べたものが図 31 である. 左側がエミッションライン画像で右側がバックグラウンド画像である.

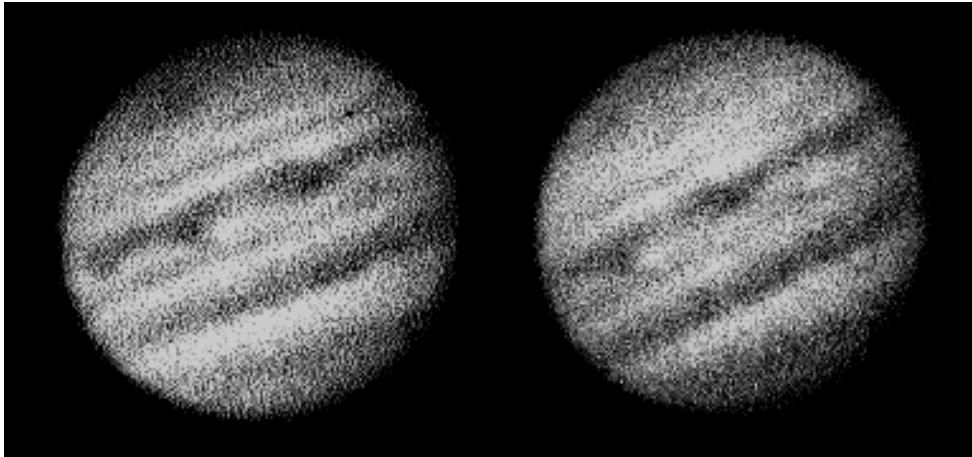


図 31: 左が J17(H α エミッションライン). 右が Jb23 (H α バックグラウンド).

南極側 (画像の上側) においてはエミッションライン画像, バックグラウンド画像ともに同様に減光しているが, 北極域 (画像の下側) においてはエミッションライン画像では一様に減光せず, 明るい領域が見られる. 北極域では 3 章の 3.2 の図 5 に示したように磁軸は自転軸に対して傾いているのでオーロラ帯も自転とともに回転していたため, J17 の画像において磁軸が地球側を向いていてオーロラオーバルが見えているという可能性もある. Ingersoll et al.[4] によると, ガリレオ探査機の観測からオーロラオーバルの幅は 500 - 8000 km と考えられており, 観測時の木星の視直径は約 47 秒角であるから木星の直径を約 14300 km とすると 1 秒角は約 3400 km に相当する. 仮にオーバルの幅が 7000 km であったとすると 2 秒角程度だが, 地上観測の場合は大気の揺らぎにより空間分解能の限界値は 1 秒角程度であるため, J17 の明るい領域のように数秒角ほどに広がって見えている可能性は考えられる. このようにエミッションライン画像とバックグラウンド画像において北極域での明るさの違いは, FWHM が 0.33 nm の H α フィルターの画像のみでなく, FWHM が 0.15 nm の H α フィルターの画像においても確認することができた. 今後の解析によっては木星オーロラ検出の可能性は十分にあると考える.

6 今後の課題

6.1 画像解析

今回得られた画像データ Photoshop や他の画像処理ソフトを用いて、より詳細な画像解析をする必要がある。

解析するにあたって、撮像した画像そのものからのオーロラオーバルの検出が困難である場合、画像処理の方法として「画像の重ね合わせ」と「画像の差引」の2つの方法が有効であると考えられる。

- 画像の重ね合わせ

1枚の画像において極域(周辺部)が暗い場合、複数の画像を重ね合わせて明るさを得る作業。この場合、重ね合わす画像はシーイングが良好で、かつ時間差の小さい画像を使用する必要がある。

- 画像の差引

オーロラ光はそのバックグラウンド光に対して微弱であるので、エミッションライン近傍の波長で撮像したバックグラウンド画像を差引するという作業をする。図32において尖った部分がオーロラのエミッションラインであり、その下がバックグラウンド光である。このようにエミッションラインを撮像してもバックグラウンド光が含まれるが、干渉フィルターを少し傾けることによってエミッションラインを外して撮像したバックグラウンド光のみの画像を差し引くことによってエミッションラインが残り、オーロラオーバルのみが浮かび上がった画像が期待できる。この場合も「重ね合わせ」の場合と同様にシーイングが良好で、かつ時間差の小さい画像を使用する必要がある。

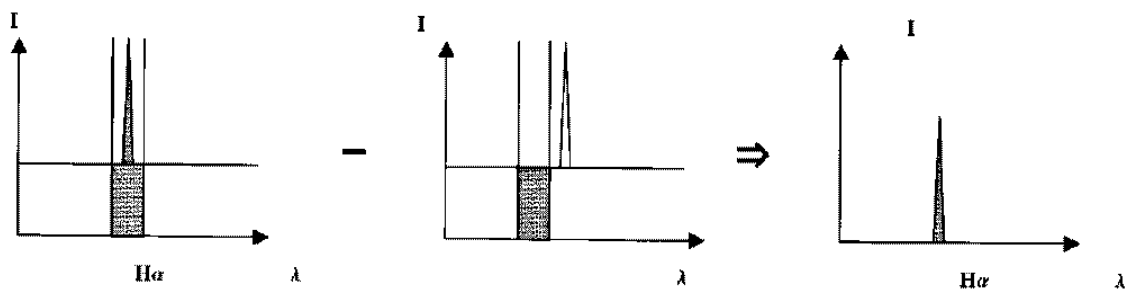


図 32: 画像の差し引き. 縦軸は光の強さ. 横軸は透過光波長. 色のついた領域がフィルターを透過した光.

6.2 光学系

今回の観測ではピント調整や干渉フィルターの調整を手で行ったので、多少精度の甘さが考えられる。特に 4 章の 4.2.1 でも触れたが、干渉フィルターは角度に対する依存性に加えて、観測環境下での温度によっても透過波長がずれが生じる。これらの対策として以下のような方法が考えられる。

- 干渉フィルターの自動調整

干渉フィルターの傾きをモーターによって調整するキャリアを使用する。これはケーブルによってコントローラーと繋いで遠隔操作ができるので、エミッションラインとバックグラウンド光の画像を交互に撮像してもそれほど時間差のないデータを撮ることが可能となり、画像の「重ね合わせ」や「差引」処理において非常に有効であると考えられる。

- 水素ランプの使用

光学系のレール上に容易に水素ランプを取り外しできるように設計し、観測中にその温度において確実に $H\alpha$ の光を透過させるよう干渉フィルターの角度調整を行う。光が干渉フィルターと垂直ではなく角度を持って入射するとフリッジ (干渉縞) が発生するが、その場合はそのフリッジの位置が CCD カメラのチップ上のどこに生じるかをモニターで確認し、撮像時に木星の極地方 (オーロラオーバル) をそこに導入する。

- エタロンの使用

光学系において干渉フィルターとともにエタロンを並べて使用する方法が考えられる。

エタロン (Fabry-Perot 干渉計) は平行平板に光がほぼ垂直に入射した時の干渉縞を用いている。エタロンにはいろいろなタイプのものがあるが、一般的なものとして表面が平面である 2 枚のガラスまたは石英板で構成されているものがある。内面は、反射率の高い膜がコートされ、かつ平行にされているため、内部は空気の平行平面層になっている。2 枚の板はコートされていない外面の反射による擾乱を避けるため、ややくさび状に作られている。インバルまたは石英で中空の円筒を作り、その両端に 3 個のねじをつけた固定スペーサーにより板を分離し、スプリングの圧力で保持している。スペーサーとねじによって決まる平面が、できるだけ平行になるように調整され、さらに、微調整はスプリングの圧力を変えることによって行う。

エタロンを用いることによって、透過波長の FWHM を干渉フィルターのみの場合よりも一桁ほど狭くすることが出来るので、観測時に干渉フィルターの調整にかなりの精度が要求されるが、うまくエミッションラインを透過させることが出来れば、バックグラウンド光がかなり抑えられた画像が期待できるようになる。

[参考文献 1]

7 参考文献

1. M.Born E.Wolf 訳 草川徹 , 横田英嗣 (1975)
「光学の原理 II」 東海大学出版会
2. John T.Clarke,Gilda ballester,John Trauger,Joe Ajello,Wayne Pryor,
Kent Tobiska,J.E.P.Connerney,G.Randall Gladstone,J.H.Waite Jr.,
Lotfi Ben Jaffel,Jean-Claude Gerard (1998) ‘Hubble Space Telescope imaging
of Jupiter’s aurora during the Glileo orbiter mission’
J.G.R 103 E9 20,217-20,236
3. P.Drossart,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 Jr,R.Wagener (1989)
‘Detection of H_3^+ on Jupiter’ NATURE 340 539-541
4. Andrew P.Ingersoll,Ashwin R.Vasavada,Blane Little,Clifford D.Anger,
Scott J.Bolton,Claudia Alexander,Kenneth P.Klaasen,W.Kent Tobiska
and the Galileo SSI Term (1998)
‘Imaging Jupiter’s Aurora at Visible Wavelengths’ ICARUS 135 251-264
5. 木村克己, 佐藤博保 (1972) 「光と原子・分子の電子構造」 共立出版 24-30
6. 前田坦 (1982) 「太陽惑星環境の物理学」 共立出版 204-207
7. 松井孝典, 永原裕子, 藤原顕, 渡辺誠一郎, 井田茂, 阿部豊, 中村正人,
小松吾郎, 山本哲生 (1997) 岩波講座 地球惑星科学 12 「比較惑星学」 岩波書店
8. John H.Rogers (1995) ‘THE GIANT PLANET JUPITER’
Cambridge University Press 285-310
9. 辻内順平 (1979) 理工学基礎講座 11 「光学概論 II」 朝倉書店
10. Ashwin R.Vasavada,Antonin H.Bouchez,Andrew P.Ingersoll,Blane Little,
Clifford D.Anger and the Galileo SSI Team (1999) ‘Jupiter’s visible aurora and Io
footprint’ J.G.R 104 E11 27,133-27,142
11. Robert A.West (1999) ‘Atmospheres Of the Giant Planets’
in ‘Encyclopedia of the Solar System’ (Eds. Paul R.Weissman,
Lucy-Ann McFadden,Torrence V.johnson)
Academic Press 333-337
12. 吉田正太郎 (1978) 「天文アマチュアのための 望遠鏡光学」 誠文堂新光社