

天王星の測光観測： アルベドの長期変動と短期変動の解析

岡山大学 理学部 地球科学科
05425513 中村 小百合

2017/02/10

要旨

天王星のアルベドは約 40 年の周期で変動していることが知られている (Hammel and Lockwood, 2007). これは, 天王星の自転軸が公転面に対して 98 度傾いており, 天王星の公転にともなって太陽に照らされる緯度帯が変わるためと考えられている. これまでの観測では, 天王星のアルベドは極が太陽を向いている時に極大となり, 赤道の上に太陽がある時に極小であった. しかし, 天王星の明るさが十分な精度で観測された期間は公転周期 (84 年) に達しておらず, 特に, 北半球の夏至の時期の観測はまだない. 天王星のアルベドは継続的な観測が必要である.

本研究は, 岡山大学天文台の 356mm 反射屈折式望遠鏡と CCD カメラ (SBIG STL-1001E) を用いて V バンドで天王星の測光観測をおこなった. 標準星に対する相対測光をおこなって天王星のアルベドを決定するとともに, スペクトル解析をおこなって短周期 (10 分以下) 変動の抽出を試みた.

本研究で得られた 2016 年の天王星の明るさは 5.551 ± 0.028 等級で, これは, 2016 年と似た太陽直下点緯度の時に観測された天王星の明るさと誤差の範囲で一致する. 一方で, スペクトル解析の結果からは, 今回の観測について周期 10 分以下に統計的に有意な変動はなかった.

目次

第1章 天王星アルベド	4
第2章 測光観測	5
2.1 観測	5
2.1.1 観測日と観測機材	5
2.1.2 明るさの決め方	6
2.1.3 観測手順	7
2.2 測光	7
2.2.1 一次処理	7
2.2.2 測光	8
2.2.3 大気減光補正	9
第3章 天王星アルベドの長期変化	11
3.1 距離と満ち欠けの補正	11
3.2 天王星アルベドの長期変動	12
第4章 短周期変動	14
4.1 スペクトル解析	14

4.2 天王星の見かけの明るさの短周期変動	14
第 5 章 まとめ	17
第 6 章 付録	20
6.1 AIP4Win の使い方	20
6.1.1 準備	20
6.1.2 測光	21

第1章 天王星アルベド

天王星は太陽から約 19AU 離れた位置を公転している太陽系の惑星の一つで、地球からは天王星が反射する太陽光を観ることが出来る。天王星のアルベド (太陽光の反射率) は天王星の公転周期 84 年の約半分である 40 年の周期で時間的に変動していることが知られている (図 1.1; Hammel and Lockwood, 2007). 天王星の自転傾斜角は 98 度であり、公転に伴って太陽に照らされる緯度帯が変わることによってアルベドが変化すると考えられている。

しかし、天王星の明るさが十分な精度で観測された期間は天王星の 1 公転周期に達しておらず、北半球の春分から夏至に至る期間の観測は戸田 (2015) 以外に報告がない。よく見ると季節変化以外に更に長い時間スケールでのアルベドの変化があるようにも見え、南半球と北半球で非対称があるようにも見える。天王星アルベドの時間変化は未だ解明されていない。

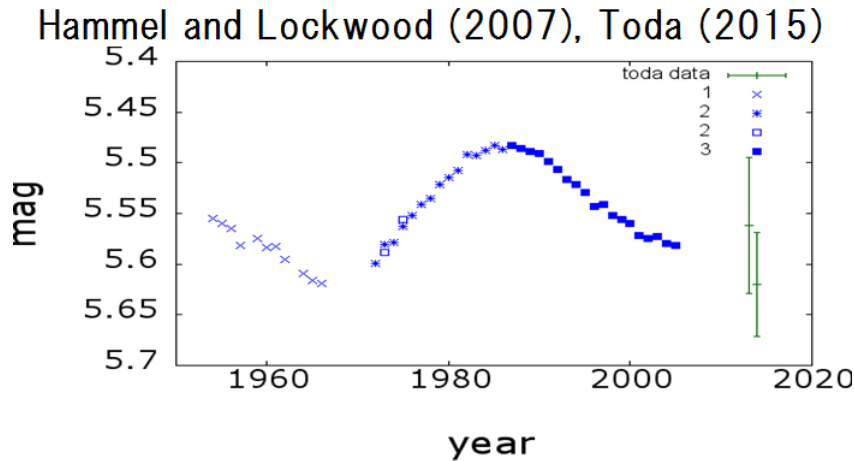


図 1.1: 天王星の明るさの時間変化。青は Hammel and Lockwood (2007), 緑は戸田 (2015)。

本研究では、天王星の測光観測をおこない 2016 年の天王星の明るさを決定した。その結果に基づいて天王星アルベドの長期変化について考察するとともに、今回の測光観測の結果をスペクトル解析することによって 10 分以下の短周期変動の抽出を試みた。

第2章 測光観測

2.1 観測

2.1.1 観測日と観測機材

観測は，岡山大学天文台（東経 $133^{\circ}55'21.4$ ，北緯 $34^{\circ}41'19.1$ ）で 2016 年 10 月 6 日と 14 日の 2 夜におこなった．

望遠鏡 (図 2.1) は口径 356(mm)，焦点距離 2845(mm) の MEADE LX600-35F8ACF，CCD カメラ (図 2.2) は SBIG STL-1001E(検出器の大きさは 24.6×24.6 (mm)，ピクセル数は 1024×1024) を用いた．望遠鏡と CCD カメラをかけ合わせた視野は 0.495×0.495 (deg) である．

観測では V バンドのフィルターを使用した．フィルターとは特定の波長を透過するものである．V バンドの中心波長は約 550(nm) で，おおよそ可視光の真ん中である (図 2.3)．

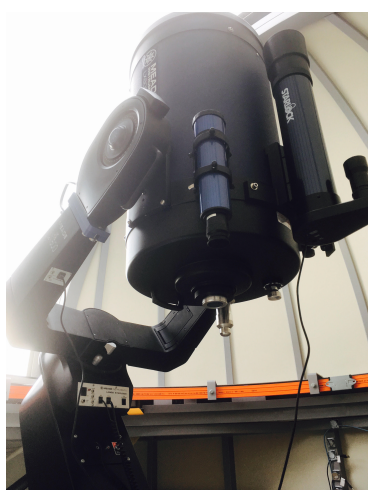


図 2.1: 望遠鏡



図 2.2: CCD カメラ

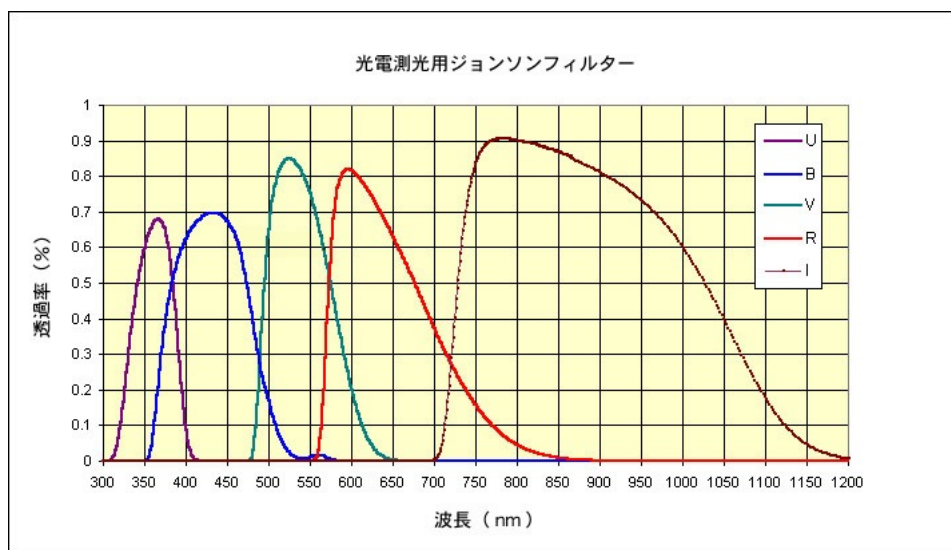


図 2.3: フィルター透過率

(http://www.sbigjapan.com/UBVRI/ubvri_m.html#Anchor:CSubvriG)

2.1.2 明るさの決め方

標準星を使い、天王星と標準星の間で相対測光を行うことで天王星の明るさを決定した。対象とする星を観測して明るさの絶対値を決める事を絶対測光と言うが、絶対測光は難易度が高く、精度良く明るさを決めることは難しい。一方で相対的な明るさを決める相対測光は、絶対測光に比べるとはるかに良い精度で明るさを決めることができる。

天王星の明るさは以下の式で求めた。

$$M_u = M_s - 2.5 \log \left(\frac{C_u/t_u}{C_s/t_s} \right) \quad (2.1)$$

表 2.1: 標準星

名前	BSC 402
座標	01h24m01.4s, $-8^{\circ}11'00''$
等級	3.59 (V)

ここで、 M_u は天王星の等級、 M_s は標準星の等級、 C_u と C_s は観測された天王星と標準星の明るさ (カウント値)、 t_u と t_s は天王星と標準星それぞれの露出時間である。今回は、標準星として表 2.1 にある星を用いた。

2.1.3 観測手順

観測は V バンドで連続撮像した。天王星と標準星は同一視野に入らなかったため、100 枚撮像を 1 セットとし、それぞれの星を 1 セットごと交互に撮像した (図 2.4)。1 セットの撮像には約 9 分かかった。

10 月 6 日は天王星と標準星をそれぞれ 10 セットと 11 セット、14 日はそれぞれ 14 セットと 12 セット、2 夜合わせると天王星 2400 枚、標準星 2300 枚の画像データを取得した。

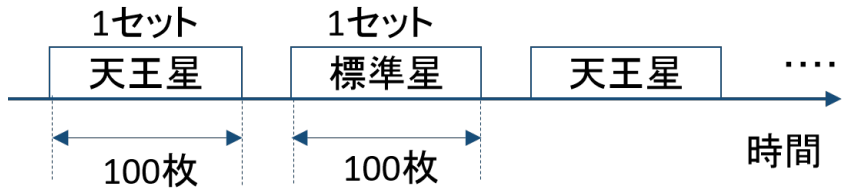


図 2.4: 観測の流れ

2.2 測光

解析には AIP4Win (Berry and Burnell, 2005) を使用した。AIP4Win の使い方は、大島のウェブページ (<http://otobs.org/photometry>) を参考にした。測光手順の詳細は付録に記述した。

2.2.1 一次処理

取得した各画像について、一般的な処理であるダーク引きとフラット割をおこなった。

2.2.2 測光

星の明るさを測定することを測光と呼ぶ。星の他に空も光を発しているため、星本来の明るさを測るためには上乗せされている空の明るさを引く必要がある。これをスカイ引きと言う。

星の明るさを測る範囲 (aperture) と空の明るさを測る範囲 (sky 内径, sky 外径) は、星像の広がりに基づいて適正と思われる値を設定した (表 2.2)。図 2.5 は 10 月 6 日の天王星の星像分布関数である。aperture が小さすぎると星の光のカウント漏れがおこる。一方で aperture を大きくしすぎると、sky の不定性による誤差が大きくなる。また、sky はなるべく星の近くで測定するのがよいが、星に近すぎると漏れてくる星の光の影響を受けてしまう。

測光で用いるパラメタを設定した後、各セット毎に AIP4Win の Multi-Image Photometry Tool (MIPT) を用いて自動処理で測光をおこなった。aperture とスカイ内径・外径以外に設定したパラメタは表 2.3 に示した。

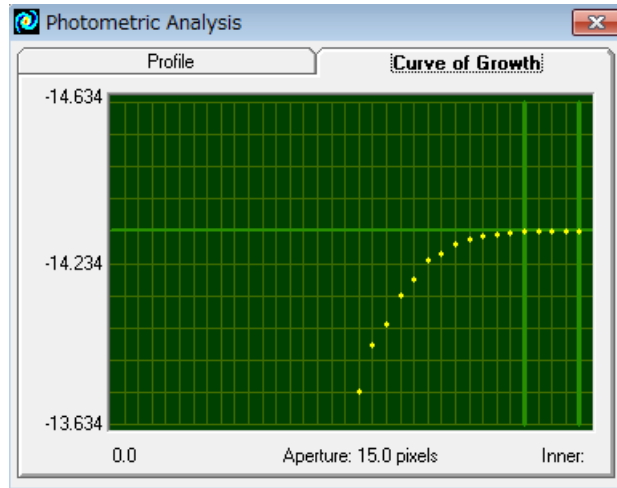


図 2.5: 10 月 6 日の天王星の星像分布関数

表 2.2: 測光で使したパラメタの値

観測日	対象	aperture(pix)	sky 内径 (pix)	sky 外径 (pix)
2016 年 10 月 6 日	天王星	15	20	22
	標準星	16	21	23
2016 年 10 月 14 日	天王星	11	16	18
	標準星	8	11	12

表 2.3: パラメタ設定値

Instrument Parameters	
Zero Point	0.0
Gain (e/adu)	1.0
R.O. Noise (e rms)	0.0
Dk Curr (e/s/pix)	0.0

2.2.3 大気減光補正

測光データに対して大気減光の補正をおこなった。宇宙からの光は大気を通してから観測される。大気を通してるとき、光は散乱されたり吸収されたりして減光する (図 2.6)。大気を通して距離が長くなるほど減光は大きくなる。星本来の明るさを測定するためには、大気減光を補正する必要がある。

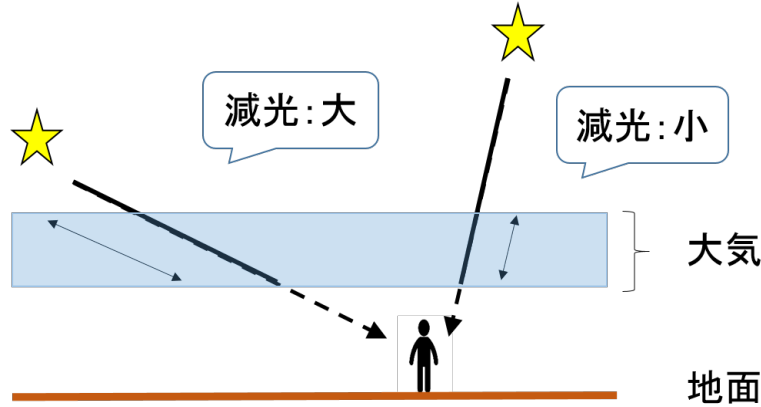


図 2.6: 大気減光のしくみ

大気減光の補正は、減光の大きさがエアマスに比例すると仮定しておこなった。

$$m_0 = -2.5 \log C - az \quad (2.2)$$

ここで、 m_0 は大気減光補正後の明るさ (等級)、 C は観測された星の明るさ (カウント値)、 a は大気減光補正の係数、 z はエアマスである。エアマスは天頂角の正割 ($1/\cos \theta$, θ は天頂角) で与えられ、星の光が大気を通して量に対応する。各観測日について、観測された C , z に対して最小自乗法で補正の係数 a を決定した (表 2.4)。天頂角は NASA HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) を用いて計算した。大気減光補正前と後の標準星の明るさを図 2.7～10 に示す。

表 2.4: パラメータ設定値

観測日	a
2016 年 10 月 6 日	0.28474
2016 年 10 月 14 日	0.24833

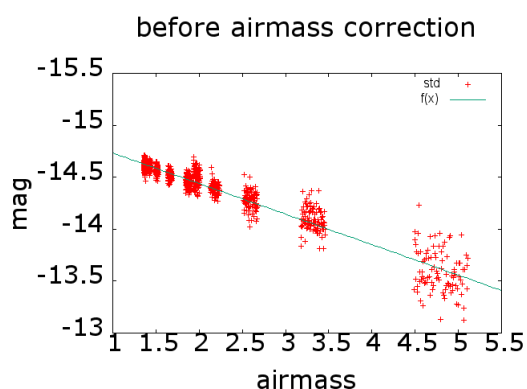


図 2.7: 大気減光補正前の標準星の明るさとエアマス (2016 年 10 月 6 日)

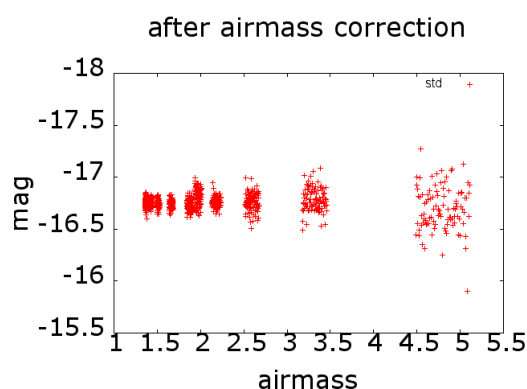


図 2.8: 大気減光補正後の標準星の明るさとエアマス (2016 年 10 月 6 日)

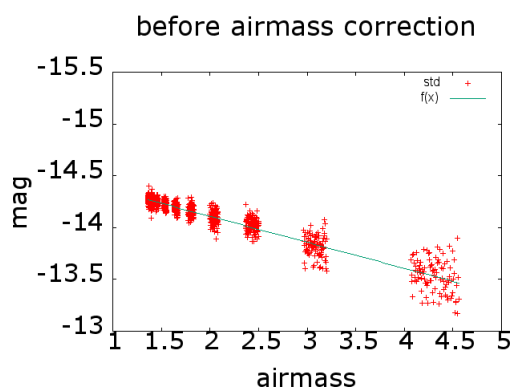


図 2.9: 大気減光補正前の標準星の明るさとエアマス (2016 年 10 月 14 日)

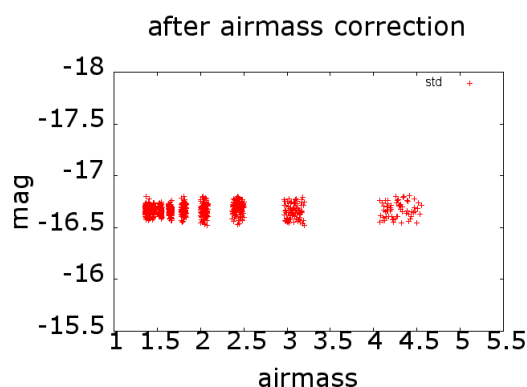


図 2.10: 大気減光補正後の標準星の明るさとエアマス (2016 年 10 月 14 日)

第3章 天王星アルベドの長期変化

3.1 距離と満ち欠けの補正

天王星の明るさはアルベドの他に、天王星と太陽の間の距離、天王星と地球の間の距離、天王星の満ち欠け、によっても変わる。異なる時期におこなわれた天王星の明るさの観測結果を比べて天王星アルベドの変動を見るためには、これらの影響を補正する必要がある。

Hmmel and Lockwood (2007) にならって、距離の補正をおこない、満ち欠けは満天王星時の明るさになるように補正した (式 3.1)。

$$C_0 = C \times \left(\frac{d_s}{d_{s0}}\right)^2 \times \left(\frac{d_e}{d_{e0}}\right)^2 \times \left(\frac{1}{f}\right) \quad (3.1)$$

ここで、 C_0 は補正後の天王星の明るさ (カウント値)、 C は補正前の天王星の明るさ (カウント値)、 d_s は天王星と太陽の距離、 d_e は天王星と地球の距離、 f は地球から見た天王星ディスクの太陽光に照らされている部分の割合、である。 d_{s0} と d_{e0} はそれぞれ基準とした天王星と太陽の間の距離、天王星と地球の間の距離で、 $d_{s0} = 19.19(\text{AU})$ 、 $d_{e0} = 18.19(\text{AU})$ である。

3.2 天王星アルベドの長期変動

2016 年 10 月 6 日と 2016 年 10 月 14 日，観測された天王星の明るさはそれぞれ 5.579 ± 0.013 等級と 5.522 ± 0.011 等級となった (表 3.1)．2 夜の平均は 5.551 ± 0.028 等級である．図 3.1 には，本研究の結果と先行研究 (Hammel and Lockwood, 2007; 戸田 2015) を並べて描いた．2016 年は北半球の春分から夏至に向かう途中で，観測された天王星の明るさは前回の春分の時よりは明るくなっている．図 3.2 は，天王星アルベドと太陽直下点緯度の関係を見やすくするために，図 3.1 の横軸を太陽直下点緯度で描き直したものである．今回 (2016 年) の観測結果は，太陽直下点緯度が現在とほぼ同じ 1960 年頃の明るさとおおよそ整合的であるように見える．

表 3.1: 天王星の明るさ

観測日	明るさの平均 (等級)	σ	n
2016 年 10 月 6 日	5.579	0.020	10
2016 年 10 月 14 日	5.522	0.020	14

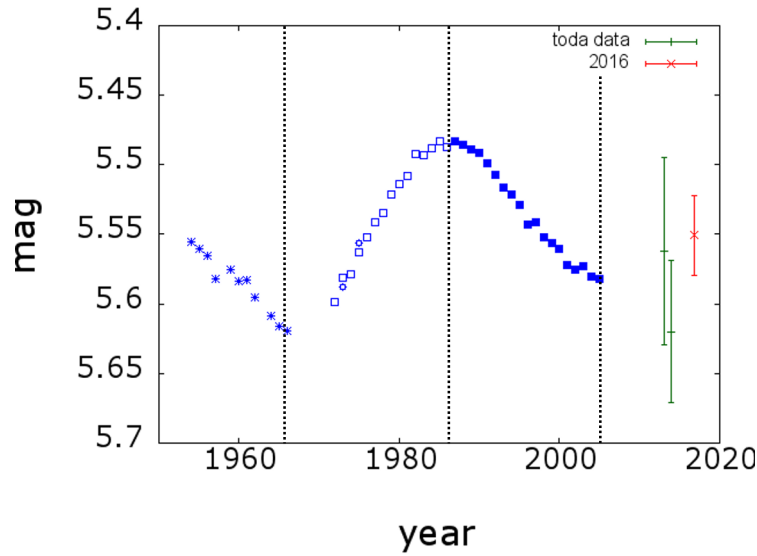


図 3.1: 天王星の明るさの時間変化．明るさは距離と満ち欠けの補正後のもの．縦の点線はそれぞれ左から北半球の秋分，冬至，春分を表わす．

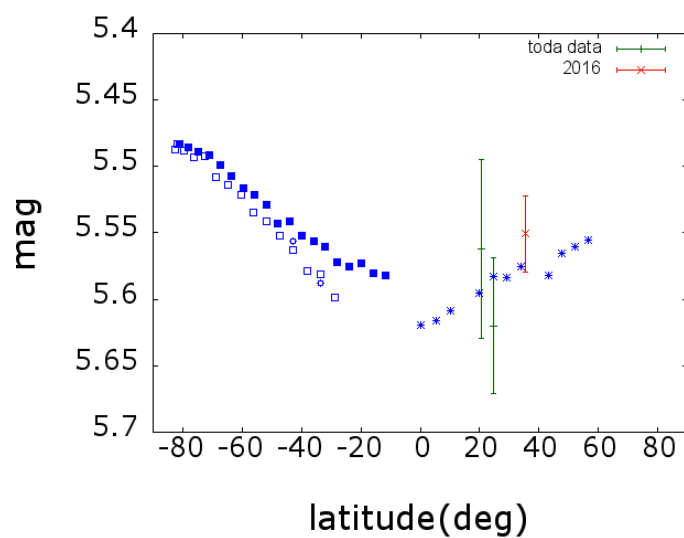


図 3.2: 太陽直下点緯度と天王星の明るさ. 明るさは距離と満ち欠けの補正後. 青は Hammel and Lockwood (2007), 緑は戸田 (2015), 赤は本研究.

第4章 短周期変動

測光観測によって明るさの時系列データが得られた。明るさの変動に含まれる周期性を抽出するため、スペクトル解析をおこなった。

4.1 スペクトル解析

スペクトル解析をおこなう際の一般的な前処理である、トレンド除去とウィンドウ関数の適用をおこなったのち、フーリエ変換をおこなった。ウィンドウ関数は三角ウィンドウを採用した。スペクトル解析は、各セット (100 枚の画像) ごとにおこない、各夜毎にパワースペクトルの平均を求めて 95%信頼区間を計算した。

4.2 天王星の見かけの明るさの短周期変動

図 4.1～4.3 は標準星，比較星，天王星の明るさをスペクトル解析して得たパワースペクトルである。比較星とは天王星と同じフレームに写った恒星で，ここでは複数の恒星の和をとっている。それぞれの図にある 2 つの線は，2 夜それぞれのパワースペクトルである。色を付けた範囲は 95%の信頼区間である。

図 4.1～4.3，全てにおいて統計的に有意なピークはないことが確認された。標準星は明るさが時間変化しないと想定される天体なので，スペクトル解析では大気減光の変動に由来する変動を見ることができる。今回の観測期間中においては，10 分以下の時間スケールでの大気減光の周期的な変動はなかったと言える。また，比較星 (天王星と同じフレームに写った恒星) のパワースペクトルからも同様に，大気減光に 10 分以下の周期的な変動は無かったと言える。さらに，天王星のパワースペクトルにもピークが無いことから，観測時には天王星アルベドにも 10 分以下の周期的変動はなかったと結論される。

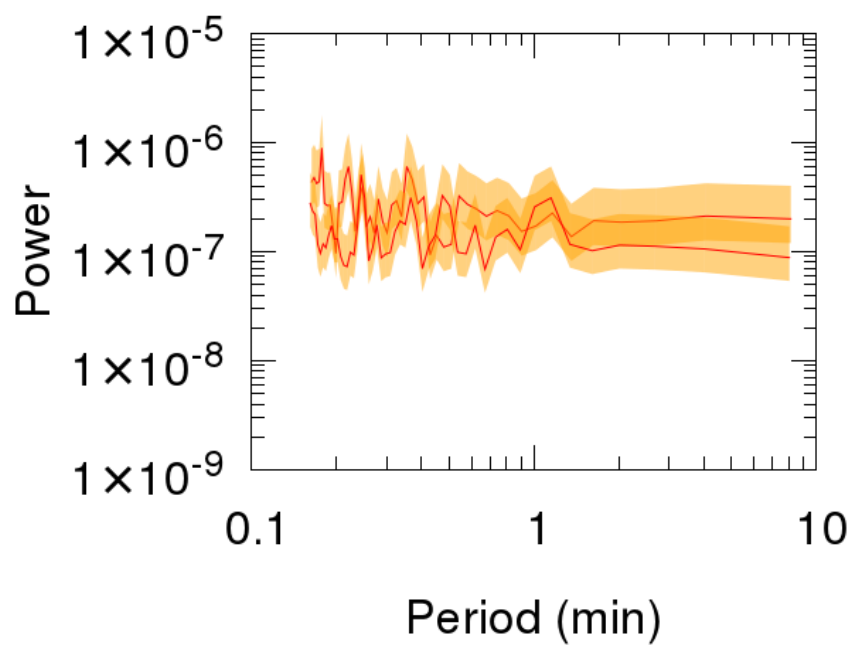


図 4.1: 標準星のパワースペクトル

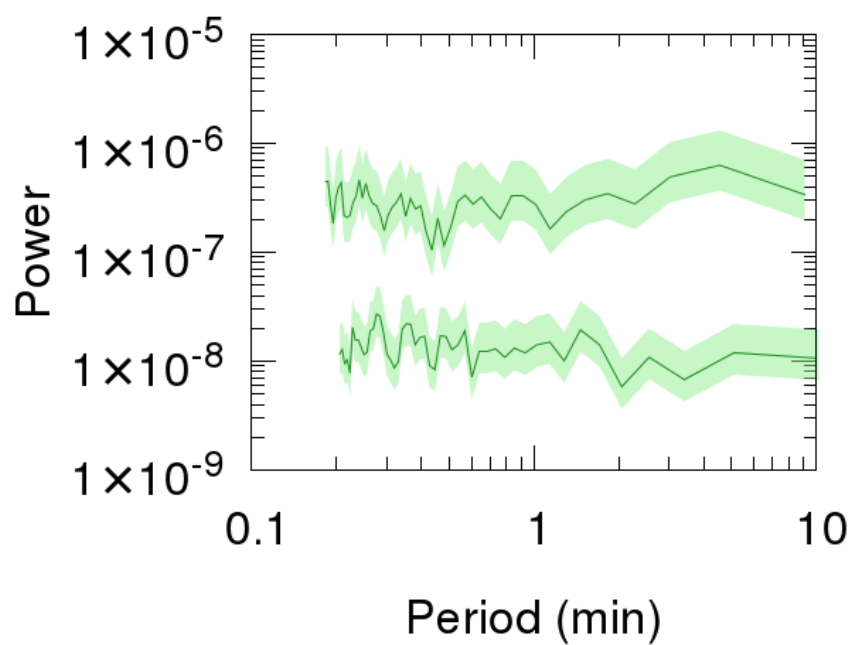


図 4.2: 比較星のパワースペクトル

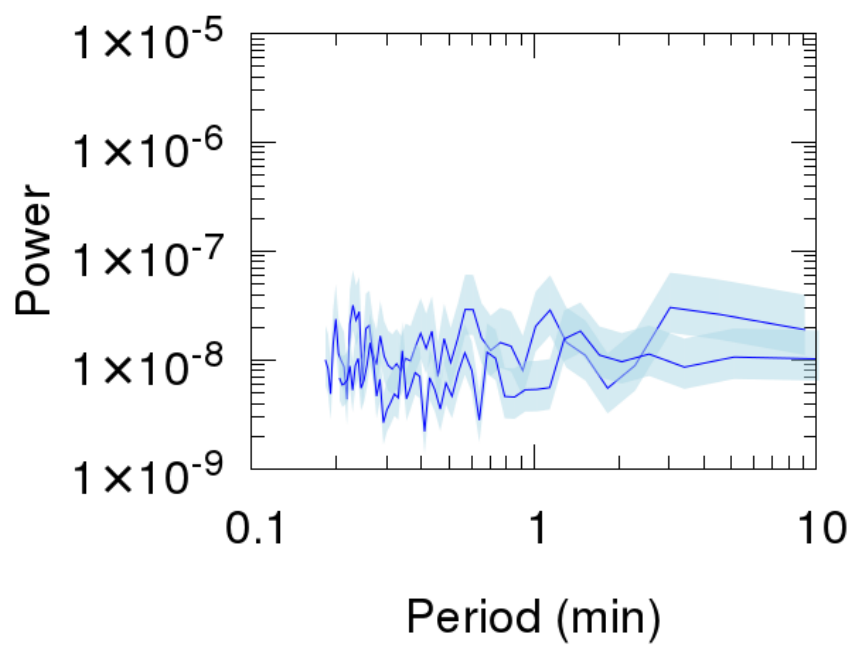


図 4.3: 天王星のパワースペクトル

第5章 まとめ

岡山大学天文台で2016年10月6日と14日の計2夜、天王星の測光観測をおこない、計4700枚の画像データを取得した。データを解析して求めた2016年10月の天王星の明るさは 5.551 ± 0.028 等級で、これは過去に太陽直下点緯度が同じような時期に観測された天王星の明るさと同程度であった。10月6日と14日でそれぞれ明るさを決定すると、2夜の間には約6%の違いがあった。この違いは実際に天王星のアルベドが違っていたのか、その他の原因によるものなのかは解明できていない。また、スペクトル解析をおこなって10分以下の短周期変動のパワースペクトルを求めたところ、統計的に有意な変動は見つからなかった。

謝辞

本研究をおこなうにあたり，ご指導いただきました指導教員である はしもと
じょーじ 准教授に心より感謝いたします。

同研究室の先輩方や同期の皆さまには，研究を進める上で様々な相談に乗って
いただきました。ありがとうございました。

参考文献

- NASA HORIZONES (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>), 2017 年 1 月閲覧
- Hammel and Lockwood (2007) Long-term atmospheric variability on Uranus and Neptune, ICARUS 186, 291-301.
- Lockwood and Jerzykiewicz (2006) Photometric variability of Uranus and Neptune, ICARUS 180, 442-452.
- 戸田晃太 (2015) 天王星アルベドの季節変化に関する研究. 岡山大学大学院自然科学研究科 修士論文.
- Berry, R., and J. Burnell (2011) The Handbook of Astronomical Image Processing. Willmann-Bell Inc., pp. 625.
- 大島修, CCD 測光の精度を向上させるために～小型望遠鏡と小型冷却 CCD カメラを使って～, <http://otobs.org/photometry>.

第6章 付録

6.1 AIP4Win の使い方

本研究でおこなった AIP4Win を使った測光手順を示す．その際「AIP4WINVer.2 を使った自動処理の手順 (<http://otobs.org/photometry/aip4win.html>)」を参考にした．

6.1.1 準備

== 使用ディレクトリの指定

* メニューから [Preferences]⇒[Set Directories] を選択し，測光に使用するフレームが置いてあるディレクトリを選択しておく．

* [ImageDirectory] には天体フレーム

* [Darkframe Directory] には天体フレーム用のダークフレーム

* [Flatframe Directory] にはフラットフレーム

* [Flatdark Directory] にはフラットフレーム用のダークフレームが置いてあるフォルダを指定する

* 最後に [Set directories] ボタンを押し，窓を閉じる

== マスターダーク，フラットの作成

* メニューから [Calibrate]⇒[Setup]⇒[Standard] を選択．

* Standard はフラットとダークの処理を行うモードで，Basic はダーク・フラットの処理無しモード

=== マスターダークを作成

* [Dark] タブでマスターダークを作る．

- * [Select Dark Frames] で複数のダークフレームを選択
- * 合成方法は [Median Combine] を指定し, [Process Dark Frame] ボタンを押してマスターダークを作成
- * 処理が完了したら [Save as Master Dark] ボタンを押してマスターダークを保存
- * 保存時に出てくるポップアップでは, [16bit] を, [Cortision] は [No coersion.Clip to Min/Max] を選択する
- * マスターダークが既に作成されている場合, [Select Dark Frames] で1枚マスターダークを選択し, [Process Dark Frame] で読み込んでおく. この際, 合成方法はどちらでもよい.

=== マスターフラットを作成

- * [Flat] タブでマスターフラットを作る.
- * [Select Flat Flames] で複数のフラットフレームを選択
- * 合成方法は [NormalizeMedian] を指定
- * [Subtract Flat Dark] にチェックを入れ, 複数のフラット用ダークフレームを選択し [Median Combine] で合成
- * [Process Flat Frame] ボタンを押してマスターフラットを作成
- * 処理が完了したら [Save as Master Flat] ボタンを押してマスターフラットを保存
- * 保存時に出てくるポップアップでは, [32bit] で保存
- * マスターダークが既に作成されている場合, [Select Flat Frames] で1枚マスターフラットを選択し, [Process Flat Frame] で読み込んでおく. この際, 合成方法はどちらでもよい.

6.1.2 測光

- * メニューから [Measure]⇒[Multi-Image Photometry Tool (MIPT)] を選択. 自動測光してよいか尋ねるポップアップが出てくるので [はい] を選ぶ.
- * [Setup] タブで [Auto-Calibrate] にチェックを入れ, [SelectFiles] で複数の天体フレームを選ぶ.
- * この操作で, 上記で読み込んだマスターダークとマスターフラットを使い自動で天体フレームを処理してくれる.
- * 読み込んだら最初の1枚の画像が表示される. 画像表示に8bitしか使っていないようで階調表示が変に見えるが, 測光には影響ないので気にしなくてよい.
- * [SelectStars] の [Analysis] にチェックを入れて目的星を左クリックすると, 星像の濃度曲線と後で設定する StarAperture と SkyAnnulus のサイズが縦のラインに

なったグラフが出てくる．これにより Aperture サイズが適当かどうか見ることができる．

* [SelectTrackingMode] は, [Automatic] と [Track C1,offsetV & Cs] を選択

* [Tarck search radius] は望遠鏡の追尾の状態に合わせて, フレームとフレームの間で追尾のズレの程度が何ピクセルかをを入力する．

* 最初は適当に数字を指定し, 処理に失敗したら数字を大きくする．この値が大きいと処理に時間がかかる．

* [Setting] タブに移り, [Radii] で Aperture の半径を入力する．

* 左から星の Aperture, Sky 内径, Sky 外径を入力．

* あらかじめマカリヤステライメージを使って値を調べておく．[Setup]⇒[SelectStars]⇒[Analysis] の星像の濃度曲線を見つつ設定することもできる．

* [IntegrationTime] には観測時の露出時間 (second) を入力

* [Instrument Parameters] の [Zero point] は, ダークを引くので [0]．[Gain], [Read-OutNoise], [DarkCurrent] は順に [1], [0], [0]．

* [Save] ボタンで, 次の測光でもこれらの設定した値が引き継がれる (変更も可能)．

* [Zero point], [Gain], [ReadOutNoise], [DarkCurrent] の値を順に [0], [1], [0], [0] とすると, 値が引き継がれず [0], [1], [10], [1] になってしまうので再入力が必要．

* [J.D] タブに移り, [Time Zone] に C C D 制御に使った P C の時間設定に合わせて UT か, JST の場合は UT-9 h を選ぶ

* [True-Log] は実際の露出時間の中央時刻 True と FITS ヘッダーに記録された観測時刻 Log との差を入力する．

* [0] で OK

* [Heliocentric Correction] には日心ユリウス日の補正值を入力する．

* [0] で OK

* [Report] タブに移り, [Send photometry output to...] は [File on Hard Disk] を選択．

* これで測光結果がファイルに書き出される

* [Photometry output format...] は [Differential(w/ Extra Decimals)] を選択すると V-C1 が等級差で出力され, [Raw Aperture Photometry] にすると画像ごとに RAW データが書き出される．

* [Raw Aperture Photometry] を選択

* [Column Separetion Character] では, 出力ファイルのデータ区切りに何を使うかを指定する．

* [Setup] タブに戻り, 読み込んだ観測フレームが一枚表示されているので, 測光

する順に星をクリックする。

* 目的星 (V), 比較星 1(C1), 比較星 2(C2=チェック星 K), 比較星 3, 以下必要に応じて比較星 32 まで選べる。

* 以上の準備が完了したら [Execute] ボタンを押す。選択した複数の天体フレームの測光処理が自動で進行する。