

狭帯域チューナブルフィルターの開発と太陽彩層観測

萩野正興¹、一本潔²、木村剛一²、仲谷善一²、上野悟²、刘忠³、徐稚³、
篠田一也¹、原弘久¹、末松芳法¹、清水敏文⁴、北井礼三郎⁵

¹国立天文台、²京都大学理学研究科附属天文台、³中国科学院雲南天文台、
⁴宇宙科学研究所、⁵佛教大学

概要

太陽観測衛星「ひので」や地上大型望遠鏡による観測から、太陽大気のダイナミックなプラズマの運動が明らかになってきた。これらの現象の起源を理解するために、高速で広視野での速度場や磁場などの物理量を測定する必要がある。我々はこの分光イメージ観測を実現するべく高波長分解能で短時間に波長シフトできる「狭帯域チューナブルフィルター」の開発を行ってきた。本講演ではこのフィルターの詳細と実際の観測例を報告する。

1. 背景

太陽観測衛星「ひので」(Tsuneta et al. 2008, Kosugi et al. 2007) や高分解能の地上大型太陽望遠鏡から、太陽大気がダイナミックなプラズマの運動で満たされていることが明らかになってきた。このような現象の起源を理解するためには、広い視野でかつ高時間分解能での速度場と磁場のイメージング観測が必要である。さらに三次元構造の情報を得るために、太陽光球と彩層で生成されるスペクトル線を観測しなければならない。

我々は広視野観測ができ、様々な波長で高速チューニングが可能な新しい狭帯域チューナブルフィルター(UTF: Universal Tunable Filter)を開発してきた(Hagino et al., 2014)。この UTF はリオ・タイプの光学フィルターである。リオ・フィルターは Lyot (1933)により発案され、Öhman (1938)により開発された。いくつかの厚さの違う複屈折素子(方解石や水晶)で構成されたリオ・フィルターは狭帯域の光学フィルターになる(Zirin 1988)。Beckers (1973)は 420nm から 700nm の間でチューニングが可能なユニバーサル複屈折フィルター(UBF: Universal Birefringent Filter)を開発した。この UTF の基本的なコンセプトは NOGIS(NORikura Green-line Imaging System (Ichimoto et al. (1999))) と同様である。NOGIS は 4 段ステージであるが、UTF は 7 段ステージから構成される。それぞれのステージは方解石のペア、液晶可変遅延素子(LCVR: Liquid Crystal Variable Retarder)、1/2 波長板、そして直線偏光板から成る。チューニング素子として LCVR を利用することにより、高速の波長チューニングを可能にし、機械駆動(油槽)を排除できた。我々は広い波長範囲(510nm-1100nm)をカバーするために超色消し 1/2 波長板を用いた。図 1 はこの UTF 自体の写真と構造を示す。表 1 で UTF のスペックをまとめる。

表 1 UTF のスペック

波長範囲	510nm – 1100nm
透過幅(半値幅)	250m Å (H α 線 656.3nm 付近で)
波面性能	Strehl > 0.8
口径	32mm × 32mm(正方形)
free spectral range	> 32Å (> 7 stage)

2. UTF の光学素子

UTF を構成する各光学素子は京都大学飛騨天文台の実験室において遅延量の波長(510 から 1100nm)、温度、入射角度、電圧(LCVR)の依存性を測定した。この時用いたのは MMSP(Mueller Matrix Spectro-Polarimeter) と呼ばれる光学素子のミラー行列を測定できるシステムである(Ichimoto et al., 2006)。

UTF のチューニング素子(チューニング手法は後述)である LCVR は米国 Meadowlark 社製である。一方、広帯域で使用できる超色消し 1/2 波長板を日本の光学メーカーケオ社と共同開発した。位相板の遅延軸をある角度回転させながら積層することにより、遅延量の波長依存性を低減することができる (S. Pancharatnam, 1955, Proc.Ind.Acad.Sci., A41, 137)。この波長板は 500nm-1100nm の波長範囲で設計値をよく実現している。複屈折光学素子は京都大学飛騨天文台の SMART 望遠鏡で用いていた 32mm×32mm のリオ・フィルターで使用していた方解石である。このもともとのリオ・フィルターは南京天文光学技研究所で製作された。UTF の各ステージの方解石の透過幅は方解石の厚さに対応し、それぞれ 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 Å である。偏光板はドイツの光学メーカー CODIXX 社製の VIS 700 BC3 を用いた。各偏光板は広い波長範囲で安定した透過率(約 80%)と方位依存性が確認された。また ZYGO GPI による波面精度は 633nm で 0.1 λ (rms) であった。

3. 波長制御

液晶への印加電圧は以下の実験値から多項式のフィッティングにより求める。電圧は遅延量の 3 次式で $1/v = a_0 + a_1\delta + a_2\delta^2 + a_3\delta^3$ ---- ①

ここで係数は $a_k = a_k(\lambda, T)$ となる。係数 a_k は波長の 3 次式で $a_k = b_{k0} + b_{k1}\lambda + b_{k2}\lambda^2 + b_{k3}\lambda^3$ さらに係数 b_{kj} は温度の 2 次式で $b_{kj} = c_{kj0} + c_{kj1}T + c_{kj2}T^2$ と書ける。この係数テーブル $C_{kji}^{(n)}$ を保存する。図 1 の左図は測定値と係数 $C_{kji}^{(n)}$ を用いて再現した遅延量の差を次のように求めた。この結果を図 1 に示す。①の両辺を微分して $-\Delta V/V^2 = a_1\Delta\delta + 2a_2\delta\Delta\delta + 3a_3\delta^2\Delta\delta$ ---- ②

この式を $\Delta\delta$ について解くと $\Delta\delta = -\Delta V/V^2 \cdot 1/(a_1 + 2a_2\delta + 3a_3\delta^2)$ となる。この結果を図 1 の右図(横軸：電圧[V]、縦軸：波長[nm])に示す。この図の左の縦線は印加電圧 9.5V を示し、右側の縦方向の曲線線は 1 λ を示す。実際にフィルターはこの値の間の電圧で制御されている。等高線は $\pm 0.01\lambda$ でありカラーテーブルの範囲は $\pm 0.05\lambda$ である。このようにして必要な液晶の遅延量(すなわち印加電圧)を計算し、ターゲットの波長にチューニングする。この液晶の遅延量が安定する時間が約 0.1 秒であり、これがチューニングスピードの制限になっている。ここで紹介している温度は実際にフィルターを使用する温度に近い 25.6°C であるが、同様の測定を温度 9.3°C、16.1°C、45.3°C でも確認した。

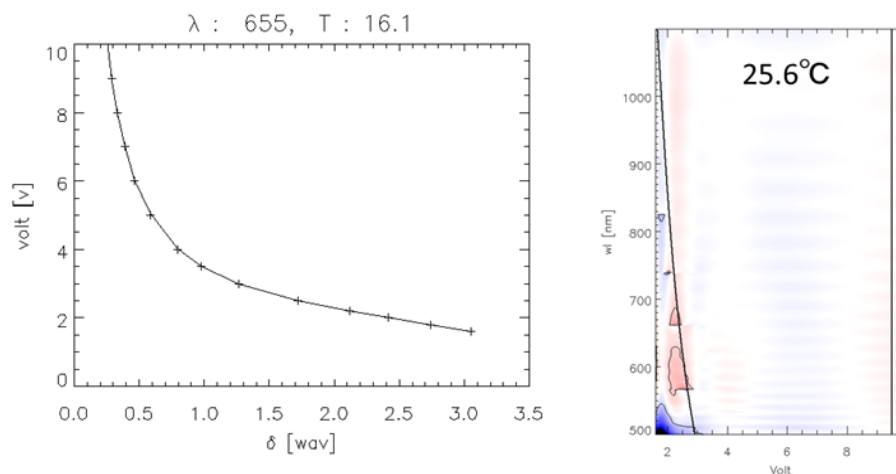


図 1 左：係数 $C_{kji}^{(n)}$ を用いた印加電圧の再現(+:実験値、実線:再現値)。右：LCVR コントロール精度。

4. フィルター性能評価

我々は京都大学理学研究科附属天文台飛騨天文台ドームレス望遠鏡において UTF の性能評価を行った。結果を図 2 に示す。H α 線付近で凡そ 250m \AA の透過幅を示した。これは本来のフィルター設計と一致する。一方、透過率は約 15%であり、一般的ナリオ・フィルターの透過率 10%程度と比べるとかなり明るいフィルターができた。イメージ観測の明るさからスペクトル線を再現した場合も分光によるスペクトル線プロファイルと非常によく一致している。

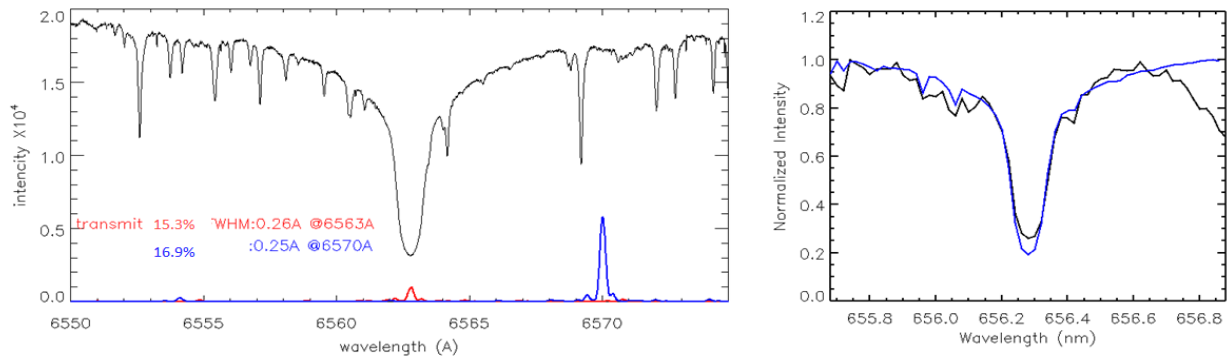


図 2 左：分光器を用いたフィルターの透過プロファイル。黒い線は太陽 H α 線付近のプロファイル。赤線は H α 線中心でのフィルター透過プロファイル。青線は連続光(657nm)での透過プロファイルである。右：フィルターの波長をシフトさせながら取得した H α 線イメージからスペクトルを再現。太陽のスペクトルアトラス(Sacramento Peak observatory, Kurucz, R. L. et al. (1982))を青色の線で示す。

5. フィルター活用計画

5.1 大型望遠鏡のバックエンド装置

この UTF は次期太陽観測衛星 Solar-C に搭載されるフィルターのプロトタイプとして開発された。一方で大型地上太陽望遠鏡のバックエンド装置としても活用が期待できる。この大型地上太陽望遠鏡での使用のキックオフとして、2015 年 1 月 19 日から 1 月 30 日の間に中国雲南省昆明市郊外撫仙湖畔にある撫仙湖太陽観測所(FSO: Fuxian Solar Observatory)の 1m 新真空太陽望遠鏡(NVST)を用いて太陽彩層イメージング観測を行った。

この観測期間は主に H α 線(656.3nm)像の高速撮像を行い、いくつかのフレアやスピキュールと呼ばれる微細構造を観測した。特に 1 月 30 日に起きた M クラスフレアと関係したフィラメントは水平方向に 120km/sec と非常に速い運動を示した。AIA/SDO の極端紫外線などでこのフィラメントに関係した放出は見られなかったため、閉じた磁束管の中を物質が速いスピードで移動したと考えられる。

図 3 の右図は FSO でのファーストライトである。この図はスペックルマスキング法や補償光学は使用していない。スペックルマスキング法によるシーイング効果を除いた像を再構築するために 100fps での撮像が可能な CMOS カメラ(Hamamatsu Orca Flash 4.0)を用いた。この観測時の空間分解能は 1m 口径の望遠鏡の回折限界である 1pixel=0.059 秒角である。

5.2 二波長同時観測による高精度速度場観測

京都大学飛騨天文台では広帯域偏光ビームスプリッター(シグマ光機製 PBSW-40-5/11)を用いた二波長同時観測を開始した。MMSP で UTF の最下流の偏光板を外し、このビームスプリッターに置き換えることで中心波長から $\pm 0.5\text{\AA}$ 離れた 2 つの波長像を同時に観測することができる。同時観測には速度場の解析をする時に、シーイングに依存しないドップラー像を得ることができるというメリットがあ

る。このビームスプリッターも MMSP により広帯域で安定した遅延量であることを確認した。

5.3 高速回転波長板による彩層偏光観測

UTF と組み合わせて用いる 200rpm の高速で回転をするオリエンタルモーター社製の中空アクチュエーターを利用した彩層偏光解析装置(Chro-Mag-Ro: Chromospheric Magnetograph with a Rotateing Waveplate)を開発した。この Chro-Mag-Ro では Solar-C で観測する彩層のスペクトル線候補になっている Ca II 854.2nm を用いる。これは偏光観測では波長が長いほうがスペクトル線のゼーマン分離が大きく、またスペクトル線の磁場感度を表すランデ因子 gff は 1.1 と H α 線(gff=1.0)よりも大きいので偏光観測に有利だからである。また、精度の高いドップラー効果の情報を得ることは重要であるが、得られた偏光データの解釈が難しいので、広帯域偏光ビームスプリッターを使用しない観測プログラムを使っている。今後、解析手法の発展に配慮して切り替えられるような観測・解析プログラムの構築を考えている。また、この観測にも FSO で用いた高速 CMOS カメラ(Hamamatsu Orca Flash 4.0)を用いる。

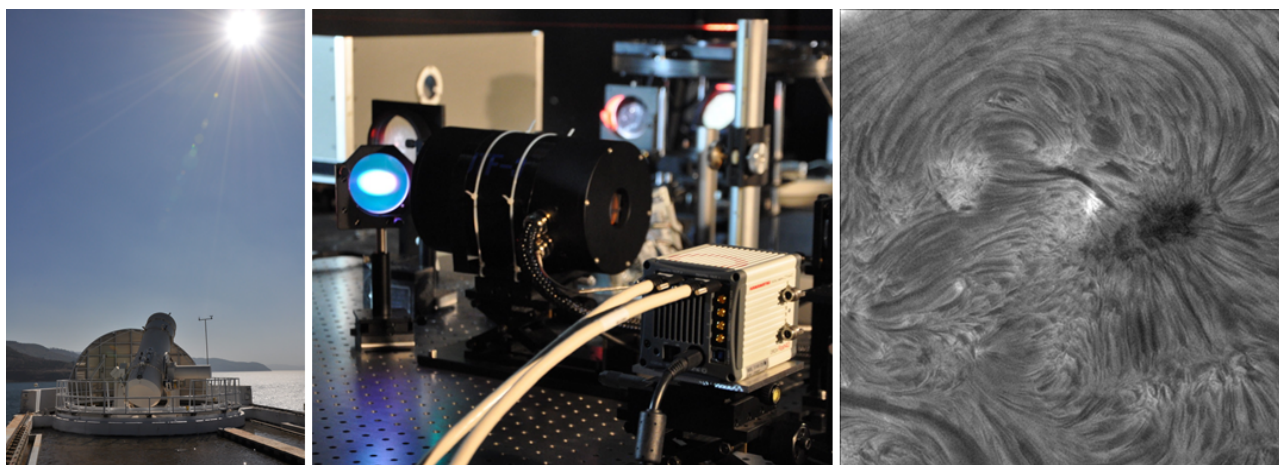


図 3 左 : FSO/NVST。中央 : FSO/NVST の観測室に UTF を設置した様子。右:FSO での UTF を用いた H α 線ラインセンター像(2015-01-19 6:42UT 撮像)。

謝辞

本研究は宇宙科学研究所搭載機器基礎開発実験費（代表：一本 H23、24 年度）、国立天文台共同開発研究（代表：一本 H23、24 年度）、JSPS 科研費 25400230（代表：萩野 H25 年度）により行われた。

参考文献

Beckers, J. M., Dickson, L., and Joyce, R. S., *Applied Optics* **14**, 2061, 1975.

Hagino M., et al., *SPIE*, 9151, 91515V, 2014.

Ichimoto, K. et al., *PASJ*, **51**, 383, 1999.

Ichimoto, K., et al., *Publications of the National Astronomical Observatory of Japan* **9**, 11, 19, 2006.

Kosugi, T. et al., *Solar Physics* **243**, 3, 2007.

Kurucz, R. L. et al., *National Solar Observatory Atlas, Sunspot*, New Mexico: National Solar Observatory, 1984.

Pancharatnam, S., *Proceedings of the Indian Academy of Sciences A* **41**, 137, 144, 1955.

Tsuneta, S. et al., *Solar Physics* **249**, 167, 2008.

Zirin, H., Cambridge University Press, 1988.