

太陽近赤外線イメージング観測に向けたファブリ・ペローフィルターの開発

Development of a Fabry-Pérot Filter for Solar Near-Infrared Imaging Observation

○伊集朝哉 (1)、末松芳法 (1)、篠田一也 (1)、萩野正興 (1)、上野 悟 (2)

(1) 自然科学研究機構 国立天文台

(2) 京都大学大学院理学研究科附属天文台

○Tomoya Iju (1), Yoshinori Suematsu (1), Kazuya Shinoda (1), Masaoki Hagino (1),
and Satoru Ueno (2)

(1) National Astronomical Observatory of Japan, National Institutes of Natural Sciences.

(2) Astronomical Observatory, Graduate School of Science, Kyoto University.

概要(Abstract)

近赤外線域スペクトル線 He I 1083.0 nm と Fe I 1564.8 nm での広視野偏光撮像観測にむけてフィルター開発を進めている。今回、高屈折率で透過波長可変なニオブ酸リチウムのエタロンを用いる近赤外域ファブリ・ペローフィルターを製作し、京都大学理学研究科附属飛騨天文台で試験観測を行った。一連の試験で、フィルターの波長透過性能 (Finesse) が目標値の 75% 程であることを確認し、He I 1083.0 nm $\pm$ 0.04 nm で太陽の活動領域やプロミネンスの撮像に成功した。また、国立天文台三鷹キャンパスでフィルター試験環境の構築を進めており、その進捗も報告する。

1. はじめに

太陽の光球・彩層におけるプラズマの動力学と磁場の 3 次元構造は、太陽コロナへのエネルギー輸送やフレアのメカニズムの理解に欠かせない研究要素であり、これらを詳細に観測できる技術の開発は今後の太陽研究において重要である。近赤外線域にあるスペクトル線 He I 1083.0 nm と Fe I 1564.8 nm は、可視光域のスペクトル線と比べて磁場に対する感度が大きく、光球・彩層の磁場観測に有用である。国立天文台太陽フレア望遠鏡の赤外線スペクトロポラリメーターでは、当該スペクトル線による太陽全面磁場の定常観測を実施しているが、分光器によるスリットスキャンであるため時間・空間分解能の向上に制限があった。短時間で変化する彩層プラズマと光球・彩層の 3 次元磁場の構造をとらえるには、半値幅が狭いフィルターを用いた高速偏光撮像観測が不可欠となる。これを実現すべく、私たちはニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 結晶を用いるファブリ・ペローフィルターの開発を進めている (*)。

2. タンデム配置 LiNbO₃ ファブリ・ペローフィルターの設計

ファブリ・ペローフィルター (以下、エタロン) は、2 つの半透過反射面が正対した構造で、干渉を利用して特定波長の光を透過する。通常の空気間隙エタロンは、広視野実現のための大口径化に困難があ

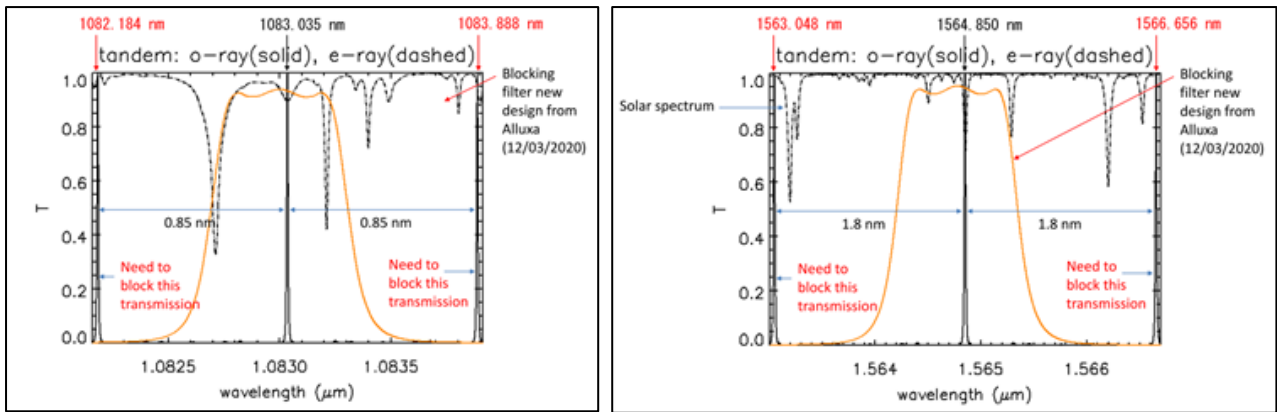


図 1. (左) 1083.0 nm 付近と (右) 1564.8 nm 付近でのタンデム配置エタロンの透過スペクトル (黒実線)。図中の黒破線は太陽光スペクトル、黄実線はバンドパスフィルターの透過強度を表す。

る。LiNbO₃ 結晶は屈折率が 2.2 と高く広視野化が容易で、複屈折性と逆圧電性を有している。この性質に着目し、電圧印加と傾きの変更で透過波長を He I 1083.0 nm と Fe I 1564.8 nm に調整できる広視野なフィルターを設計した。目的の波長のみを透過するには、組み合わせて用いる製作可能なバンドパスフィルターのバンド内にエタロンの透過線スペクトルが 1 本だけとなるようにするが、単独のエタロンではこれを満たすフリースペクトラルレンジ (FSR: エタロン透過光の波長間隔) を実現するのが難しい。そのため、厚さの比が 4:3 となる 2 枚のエタロンをタンデム配置で用いることで、狭い半値幅 (FWHM) と広い FSR (1083.0 nm で FSR = 0.85 nm、1564.8 nm で FSR = 1.8 nm) を実現している (図 1)。

3. 厚さ 0.9 mm&1.2 mm エタロンの製作と特性試験

LiNbO₃ を用いたエタロンの製作は、波長板で実績がある光学技研株式会社に依頼した。有効径 70 mm で先述の厚さ比を満たす厚さ 0.9 mm (0.9t) と 1.2 mm (1.2t) の LiNbO₃ 薄板の両面に高反射コーティング ($r > 0.9$) と導電性コーティング (ITO) を施してソリッドエタロンとしている。エタロンは、樹脂製のフレームに収められ電圧印加のための電線が接着されている (図 2)。

0.9t と 1.2t のエタロンの特性試験を 2021 年に京都大学大学院理学研究科附属天文台飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡 (DST) 水平分光器にて実施した。各エタロンの測定結果を表 1 に示す。He I 1083.0 nm と Fe I 1564.8 nm において、両エタロンの FSR は概ね設計値を満たしていた一方、FWHM は設計値をわずかに上回ったためフィルターの波長透過性能を示すフィネス (Finesse = FSR / FWHM) は目標とした値 23.5 の 75%程度となった。

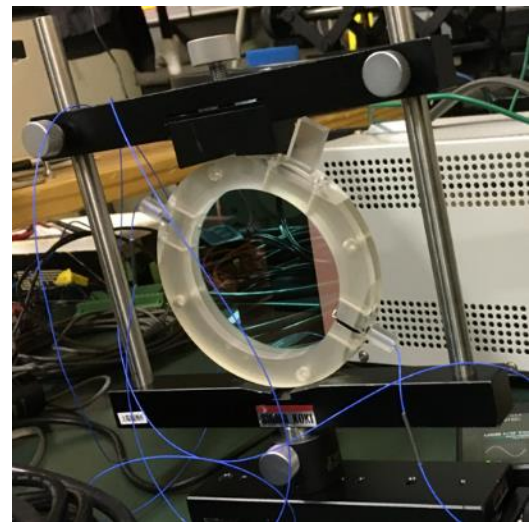


図 2. 製作されたエタロンの外観。

表 1. DST 水平分光器で行った 0.9t および 1.2t エタロンの光学特性試験結果。丸かっこの数値は F 数の影響 (FWHM 増加) を除いたもので、赤字は光学技研が実施したファイバー光源によるエタロン中心 1 点での測定値である。

Wavelength (nm)	Thickness (mm)	Ray	FWHM (nm)	FSR (nm)	Finesse	$\Delta \lambda / V$ (nm/kV)	Vendor
1083.0	0.9	n	0.0191 (0.0167)	0.292 0.292	(17.49) 28.9	0.0348	光学技研 (赤字の数値)
		e	0.0191 (0.0163)	0.303 0.303	(18.59)	0.0180	
	1.2	n	0.0154 (0.0122)	0.219 0.219	(17.95) 28.9	0.0281	光学技研
		e	0.0161 (0.0126)	0.228 0.229	(18.10)	0.0175	
	Tandem	n	0.0138 (0.0102)	0.877 0.876	(85.98)		光学技研
		e					
1564.8	0.9	n	0.0480 (0.0460)	0.618 0.620	(13.43) 26.9	0.0513	光学技研
		e	0.0496 (0.0474)	0.642 0.643	(13.54)	0.0330	
	1.2	n	0.0430 (0.0408)	0.464 0.464	(11.37) 26.9	0.0398	光学技研
		e	0.0443 (0.0418)	0.482 0.482	(11.53)	0.0258	
	Tandem	n	0.034 (0.0305)	1.851 1.858	(60.69)		光学技研
		e					

4. タンデム式ファブリ・ペローフィルターによる太陽撮像

0.9t および 1.2t エタロンは、特性試験のあと光学技研に戻され、樹脂製のホルダーに収められてタンデム式フィルターに組み上げられた (図 3 上段)。個々のエタロンはマイクロメーターにより光路に対する傾き角を調整できるようになっていて、ホルダーには温度計測用の熱電対も備えられている。

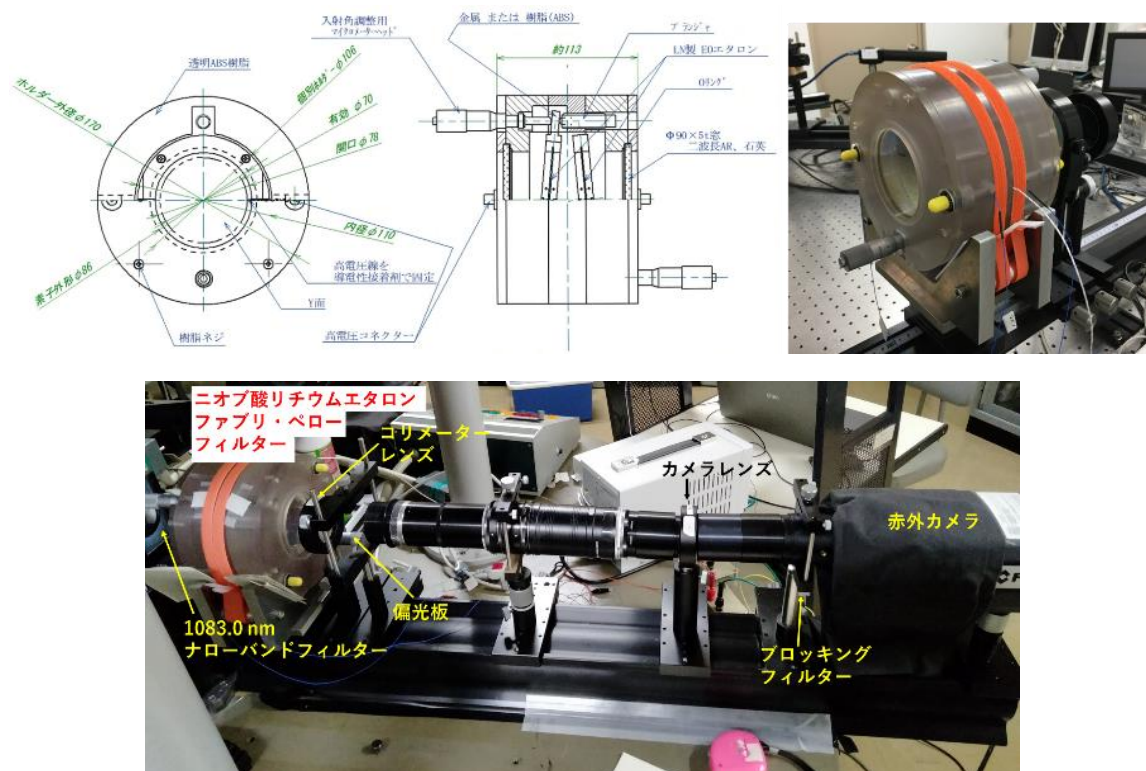


図 3. (上段左) タンデム式ファブリ・ペローフィルターの構造と (上段右) 外観写真。(下段) DST の光路中に設置された各種フィルター及びカメラの配置。

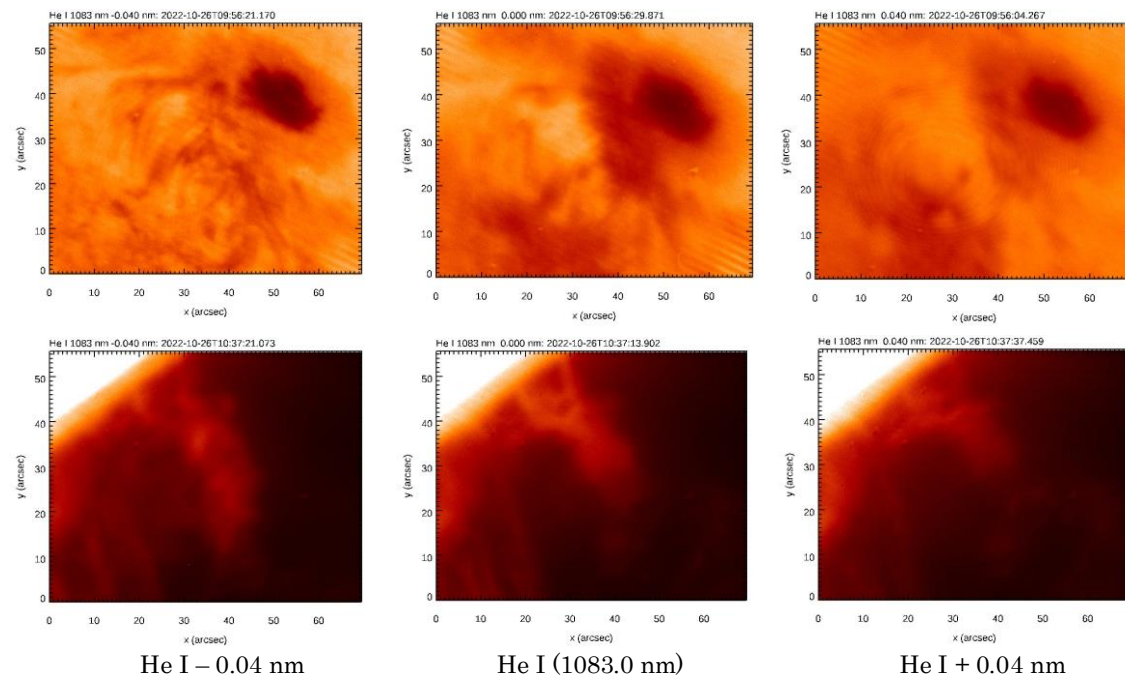


図 4. 2022 年 10 月 26 日にタンデム式ファブリ・ペローフィルターで透過波長を変えながら撮影した（上段）活動領域 NOAA 13131 と（下段）プロミネンス。透過波長の違いで見え方が変化している。

完成したフィルターを 2022 年 10 月 26 日に DST に設置し、太陽の撮像試験を実施した（図 3 下段）。この試験では、印加電圧を変化させて He I 1083.0 nm $\pm$ 0.04 nm の範囲で透過波長を変えながら、活動領域やプロミネンスの撮像に成功した（図 4）。

5. 国立天文台三鷹キャンパスでの光学試験環境構築の進捗

飛騨天文台 DST での試験と並行して、国立天文台三鷹キャンパスでの光学試験環境の構築も進めた。シーロスタットを備えた光学実験室（図 5）にてエバート型分光器の組み立てと調整を行った。現在、He I 1083.0 nm 付近での透過波長試験を実施中であり、将来はバンドパスフィルター・偏光板・液晶偏光変調装置も組み込んで撮像試験を行うことを目指している。



図 5. 三鷹キャンパス気球望遠鏡実験棟内の光学実験室。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究（B）「口径 1.5 m 回折限界観測による太陽光球・彩層磁気カップリングの物理過程研究（19H01944）」の補助をうけて実施された。

参考文献

(*) Suematsu et al., LiNbO₃ Fabry-Perot etalons for solar near-infrared narrow-passband tunable filtergraph, Proc. SPIE 12235, 1223507 (30 Sep. 2022); doi: 10.1117/12.2632133