ニオブ酸リチウムエタロンを用いた太陽近赤外狭帯域チューナブルフィルターの開発

末松芳法、伊集朝哉、篠田一也、萩野正興
（国立天文台)
上野悟（京都大学・飛騨天文台)

イントロ

●近赤外には太陽磁場・ダイナミクス観測に有用なスペクトル線He I 1083 nm、光球精細磁場観測に有用なFe I 15649 nmがあり、これらの撮像偏光観測により、光球・彩層の3次元磁場構造の情報を得ることができる。

He I 1083 nm

・彩層上部のダイナミクス

・コロナ活動現象の間接的観測　（地上で太陽面コロナ情報）

・彩層（スピキュール）磁場に感度が良い（直線偏光：ハンレ効果）

Fe I 1564.8 nm

・磁場感度が高い：　光球底部の精密磁場観測

●これまでのリオフィルター、ファブリ・ペローフィルターでは波長分解能、広視野化に難がある。

●屈折率が大きく（広視野化）、波長可変可能なニオブ酸リチウム（LiNbO3）エタロンファブリ・ペローフィルターの新規開発

Φ４mESTフィルター観測装置、Φ４mDKISTの第２世代焦点面観測装置への提供

●これまでオーストラリア・CSIROが提供、受注しなくなったため、新たなベンダー必要：　波長板製作に実績のある光学技研に依頼

・Flare Genesis: Ca I 612.22 nm

・IMaX on Sunrise: Fe I 525.0 nm

・PHI on Solar Orbiter: Fe I 617.3 nm

・SMART, Hida Obs. : Fe I 630.25 nm

・MAST, Udaipur Solar Obs.: Fe I 617.3 nm, Hα, (Ca II 854.2)

タンデム式$LiNbO_3$エタロンの設計

・狭い半値幅（FWHM）で広いフリースペクトラルレンジ（FSR）を実現するには、厚さの異なるエタロンを並べて使う必要がある。
・厚さの比が４：３のエタロンにより、厚いエタロンのFSRの4倍広いFSRを実現（設計厚さ1.2㎜と0.9㎜）
・LiNbO3は複屈折が使えるY-cut結晶で、常光線で1083.035 nm 及び1564.85 nmの中心波長を最適化するようAiry functionの関係を用いて設計

$$T = \frac{T_0}{1 + F_r sin^2(\delta/2)}$$

Phase difference between rays:

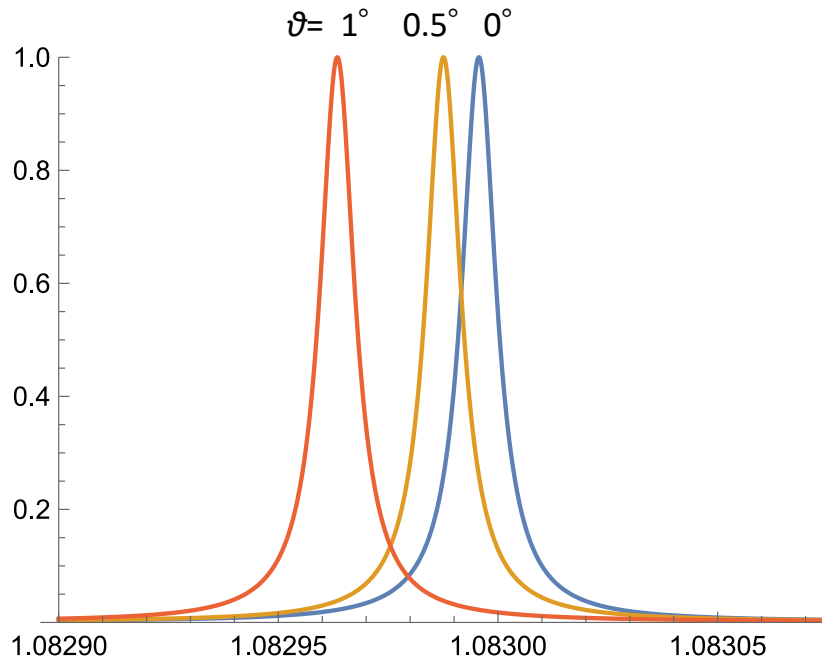
$$\delta = 4\pi n(\lambda) t \cos\theta_1/\lambda$$

Thikcness of etalon:

$$t = \frac{m\lambda}{2n(\lambda)}$$

Peak wavelength shift due to tilt:

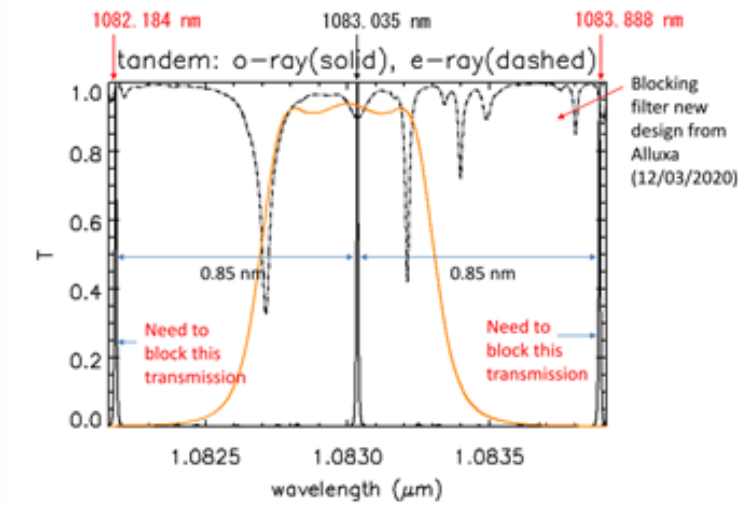
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\theta^2}{2n^2}$$

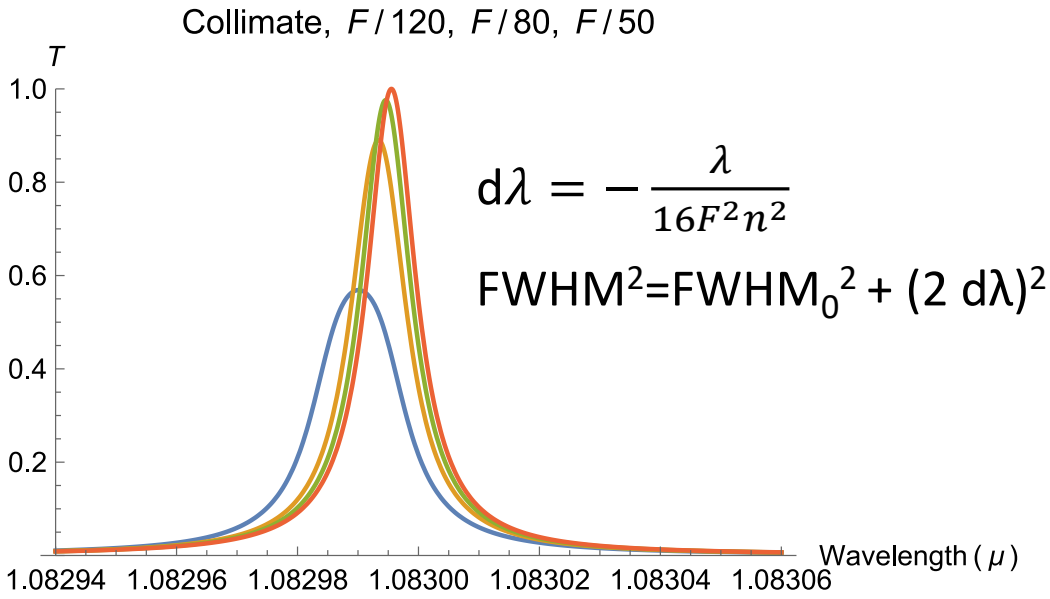


the lithium-niobate etalon of thickness 0.9 mm.

$LiNbO_3$ エタロンの製作

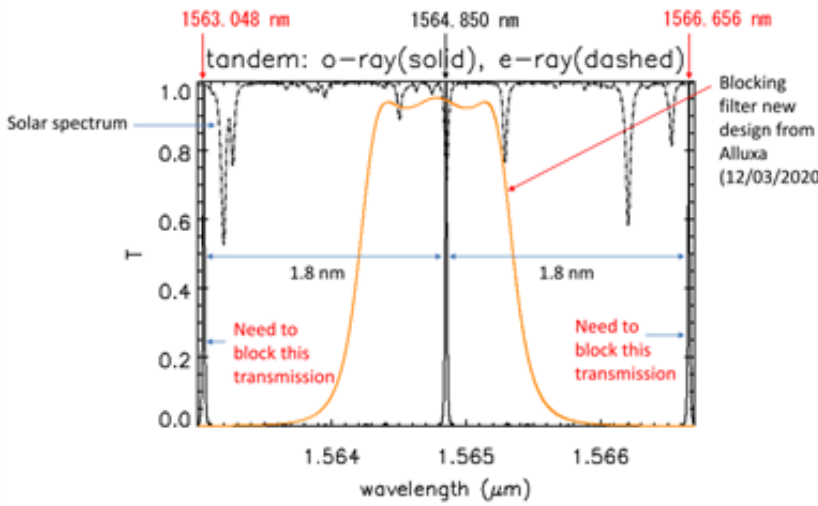
有効径70㎜で厚さ 0.9 mm 及び1.2 mm のエタロンに高反射コーティング(r>0.9)、導電性コーティング（ITO）
常光線での中心波長 1083 nm 及び1565 nm で、わずか長い波長で最適化（傾きによる波長調整、テレセンビームでの青色偏位考慮）





$$d\lambda = -\frac{\lambda}{16F^2n^2}$$

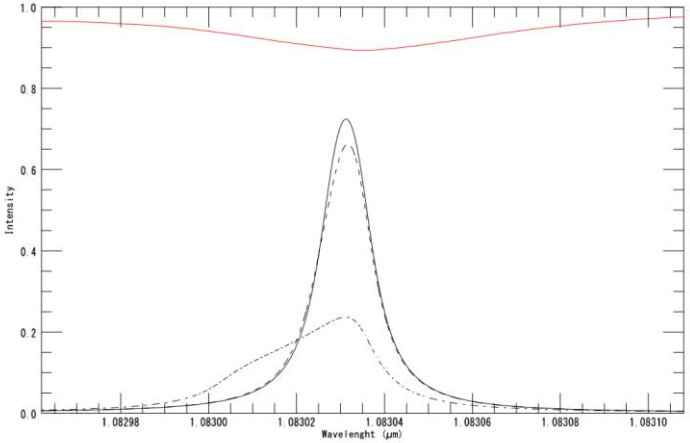
$$FWHM^2 = FWHM_0^2 + (2\,d\lambda)^2$$



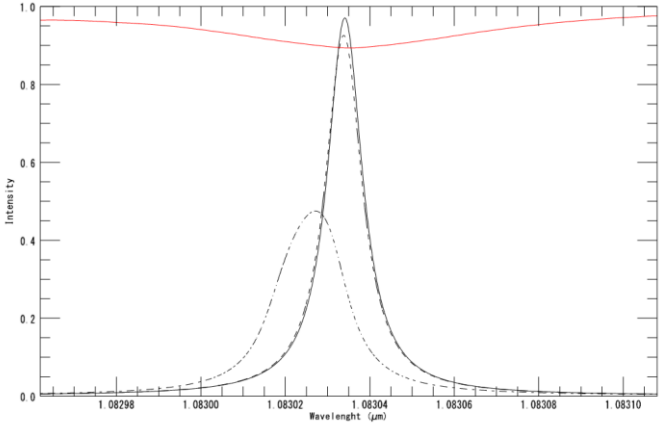
Effect of F number on the transmission peak wavelength and FWHM of the lithium-niobate etalon of thickness 0.9 mm.

テレセンではエタロンの傾き波長調整不適

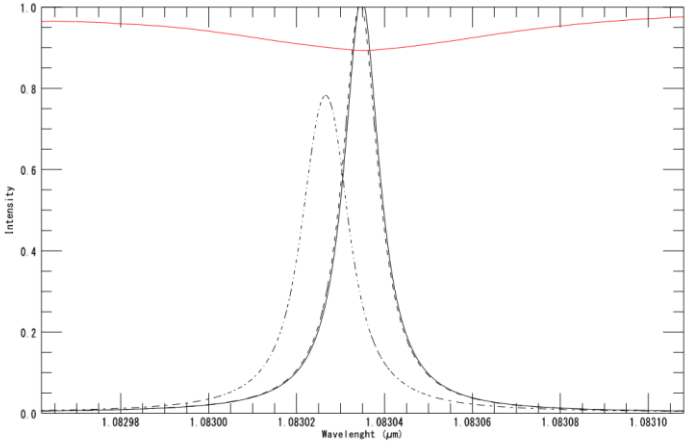
F/60, t=0.9 mm, 入射角θ=0°, 0.1°, 0.5°



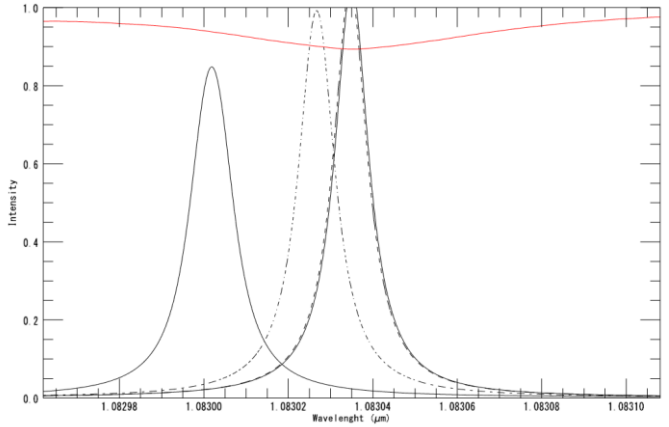
F/120, 入射角θ=0°, 0.1°, 0.5°



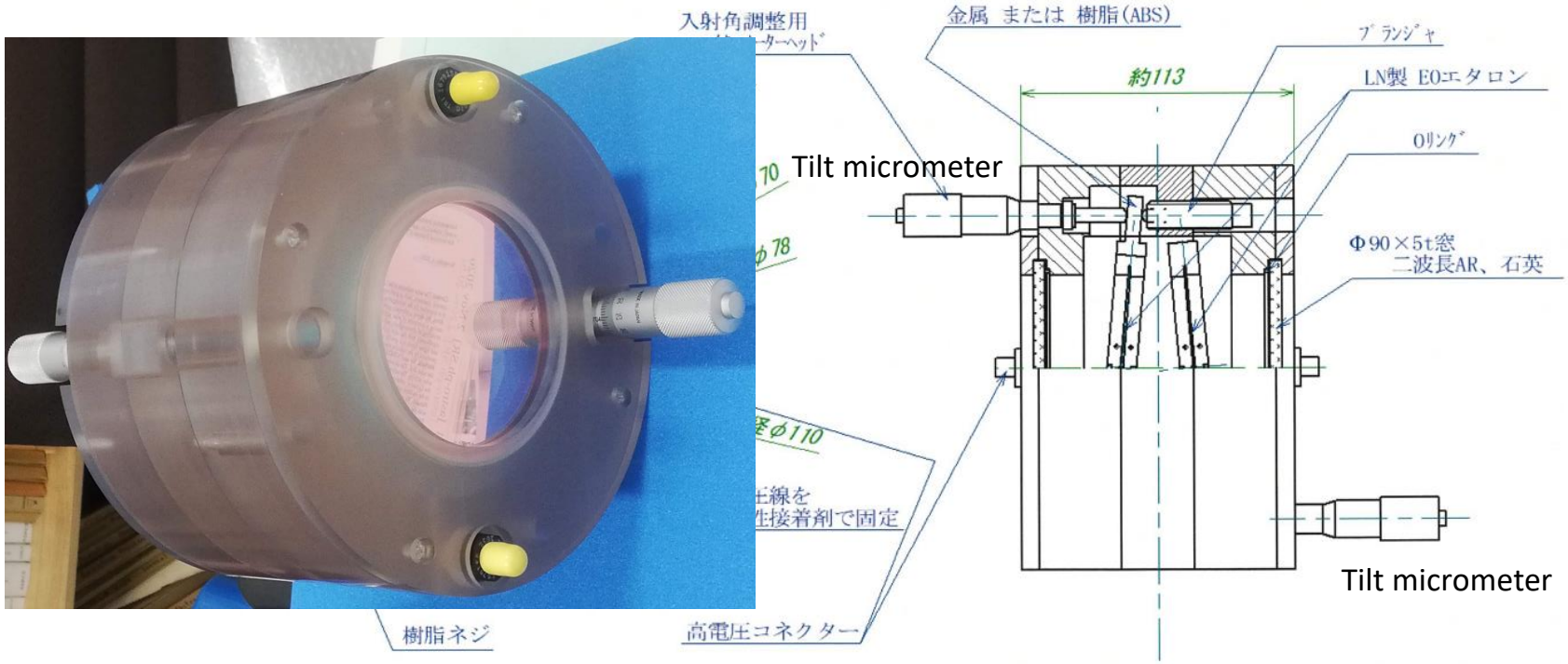
F/240, 入射角θ=0°, 0.1°, 0.5°



F/540, 入射角θ=0°, 0.1°, 0.5°, 1.0°



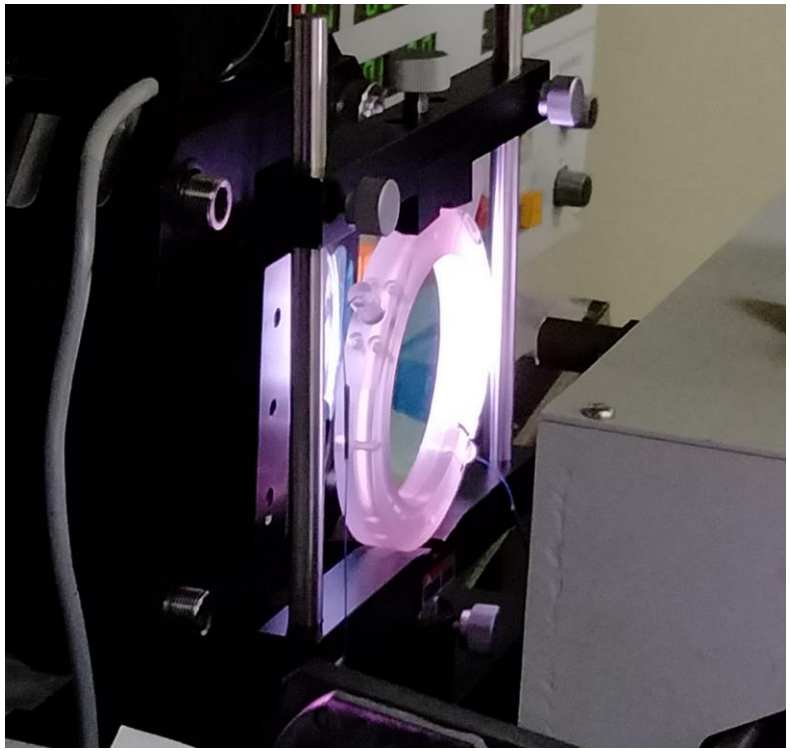
タンデム式$LiNbO_3$エタロン



Fabricated tandem etalon unit; 70 mm aperture etalons of 0.9 mm and 1.2 mm thick, with protection windows and tilt mechanism.

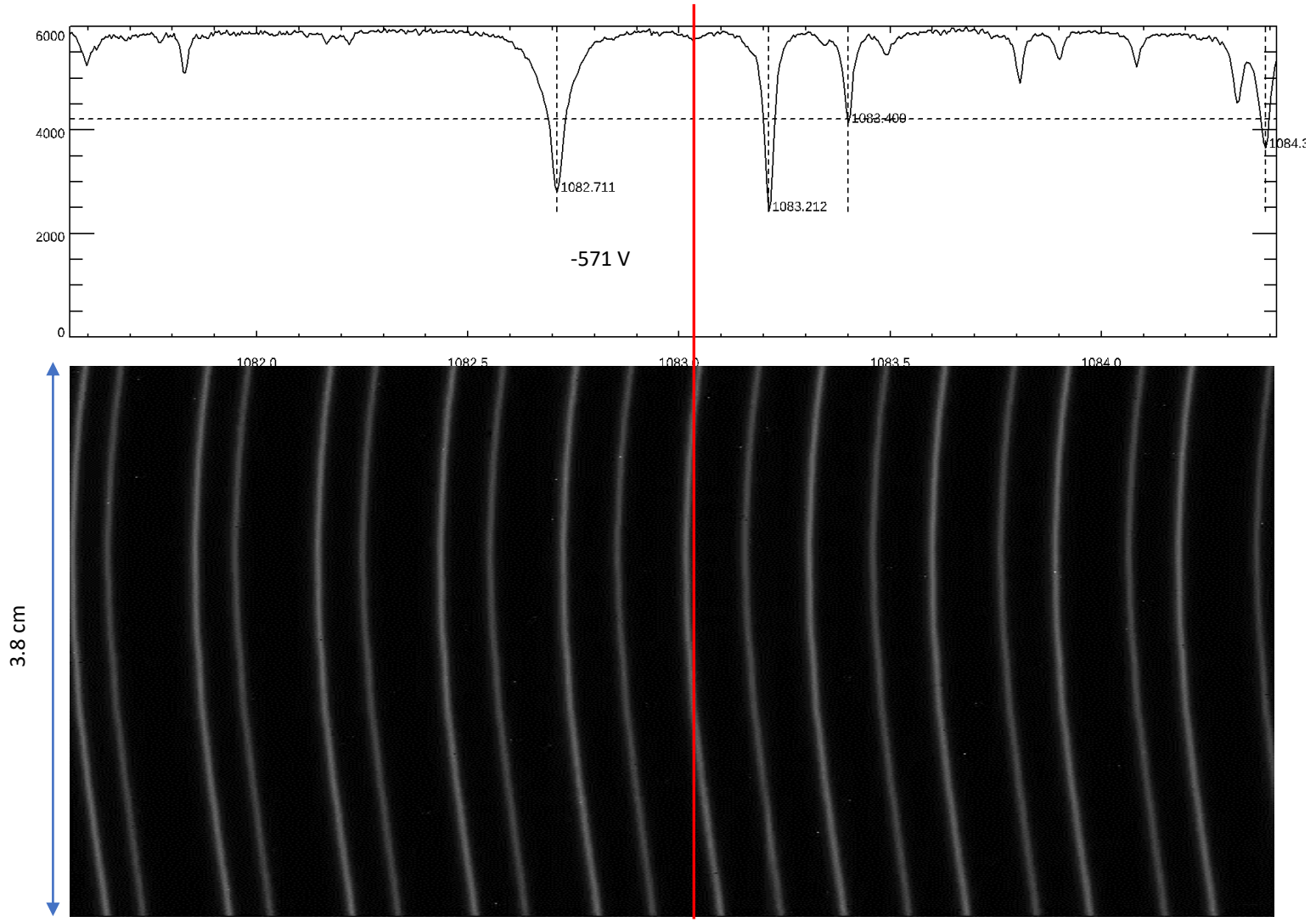
個々のLiNbO3エタロンの特性試験

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡（DST、F/54）と高分散水平分光器により、個々のエタロンの光学特性、電圧・波長変化率測定を行った。



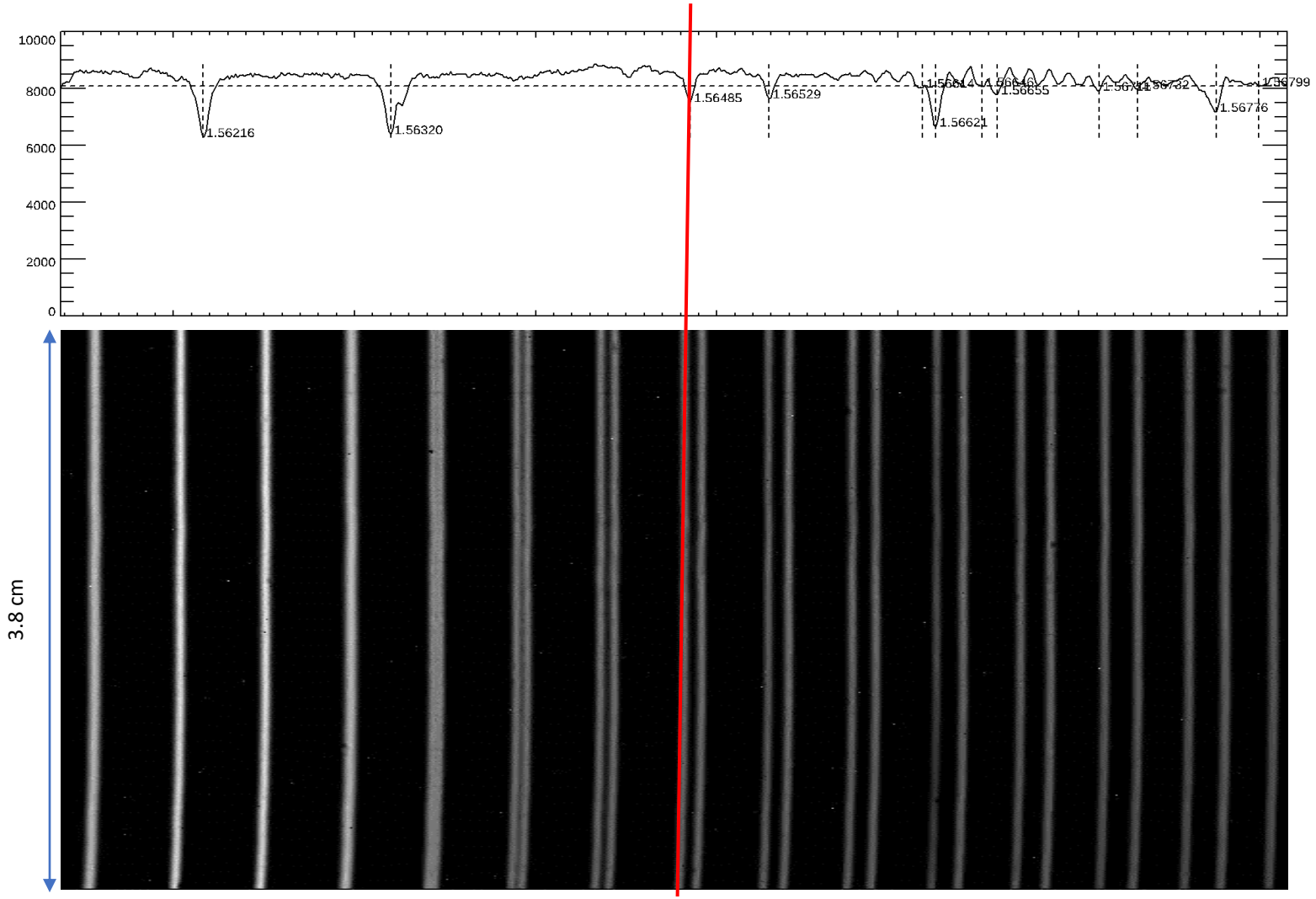
Wavelength (nm)	Parameters
1083.0	F-ratio: F/54 Slit width: 20 µm, height: 5 cm (3.8 cm) Grating No. 3, 2nd order θ=37° 37' Camera XEVA-610, port 5, X300 mm Exp.: 2 sec Dispersion: 0.00446 nm/pixel (20 µm = 0.0012 nm)
1564.8	F-ratio: F/54 Slit width: 20 µm, height: 5 cm (3.8 cm) Grating No. 3, 1st order θ=25° 03' Camera XEVA-610, port 5, X300 mm Exp.: 1 sec Dispersion: 0.0106 nm /pixel (20 µm = 0.0028 nm)

t0.9㎜ @ 1083 nm, V = - 900 ~840 V

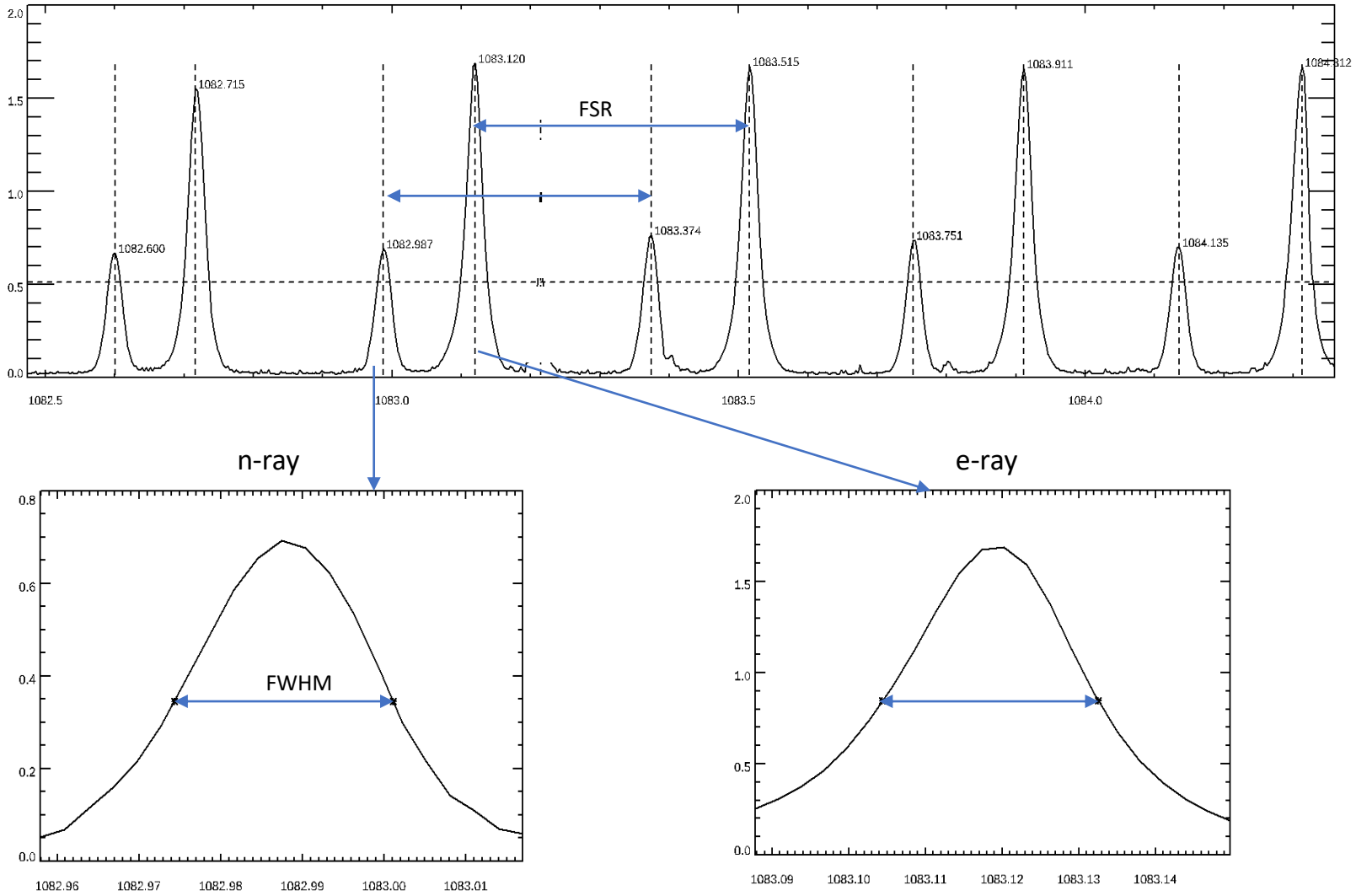


Since it turned out that the transmission profiles over the aperture are not uniform in wavelength, we pick up the profiles near a central region of aperture.

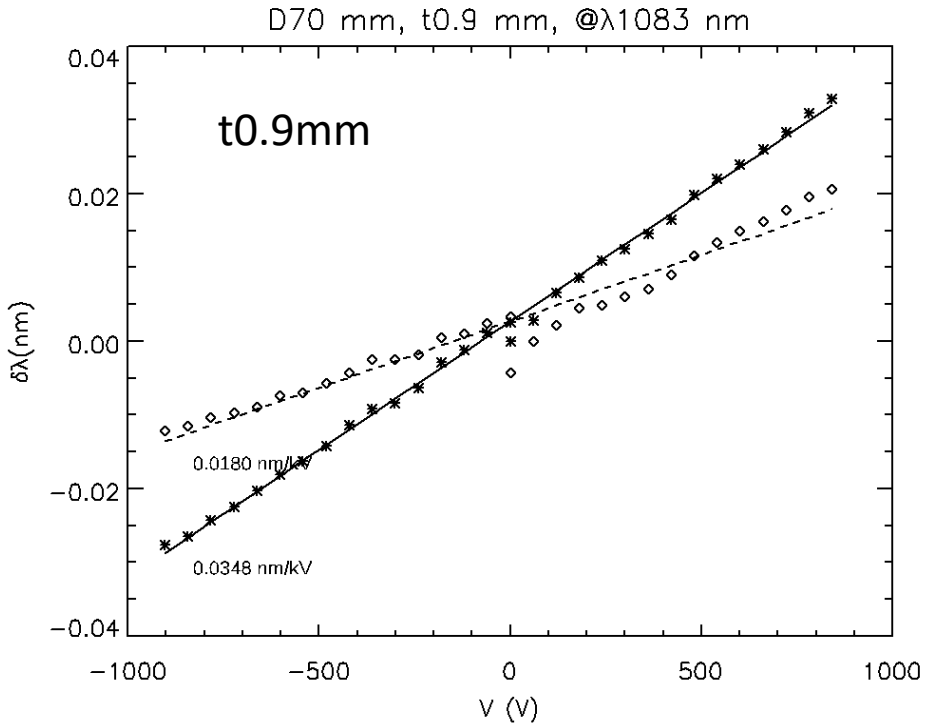
t1.2㎜ @ 1567 nm, V = - 1020 ～1020 V



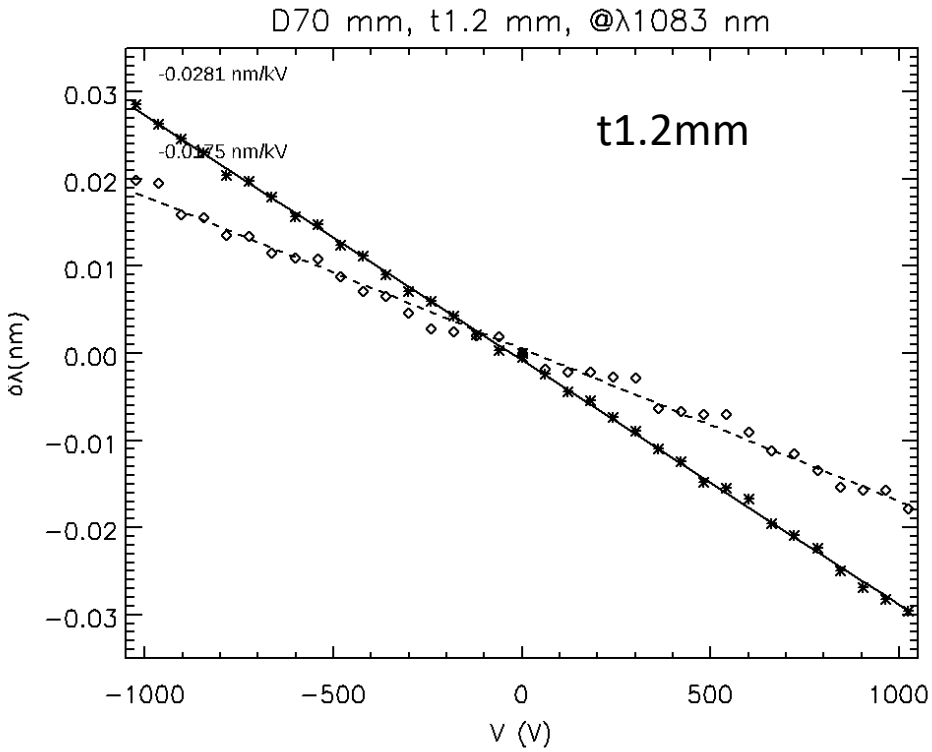
$LiNbO_3$ Etalon t=0.67 mm @1083 nm



λ-shift vs. Volt: 1083 nm

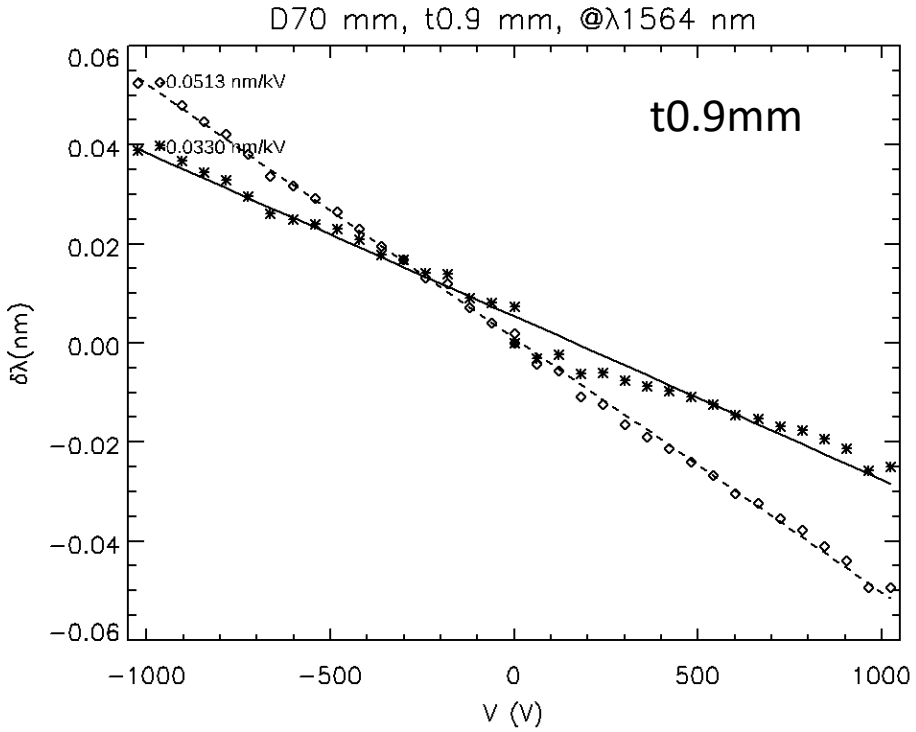


wp1-wp0= 0.29224725 FWHM1= 0.019057919
wp3-wp2= 0.30322116 FWHM2= 0.019148629

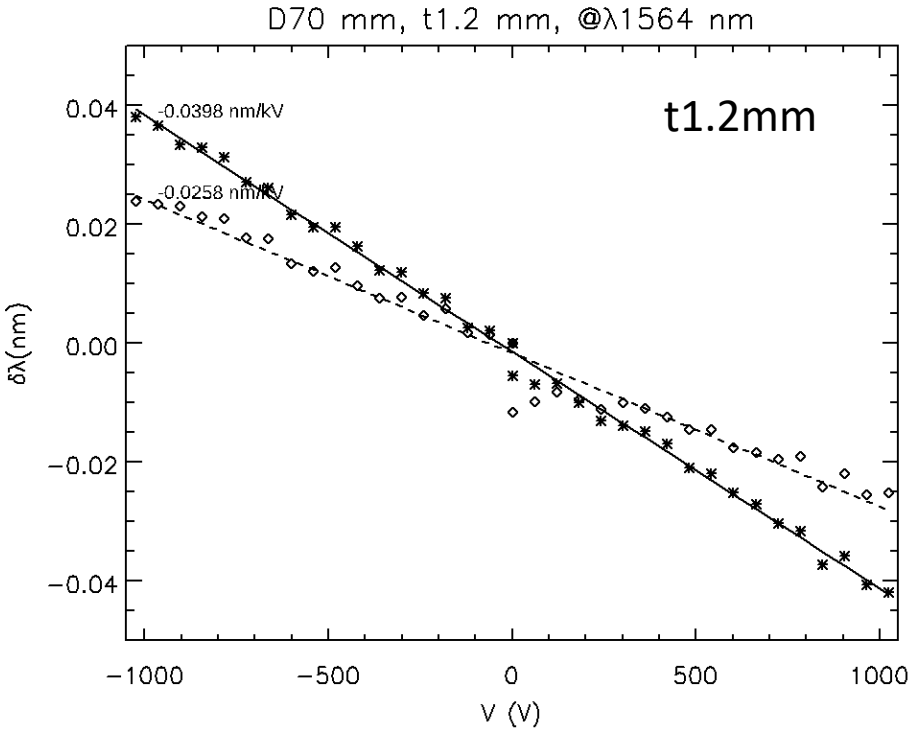


wp1-wp0= 0.21930307 FWHM1= 0.015421819
wp3-wp2= 0.22811716 FWHM2= 0.016097384

λ-shift vs. Volt: 1564 nm

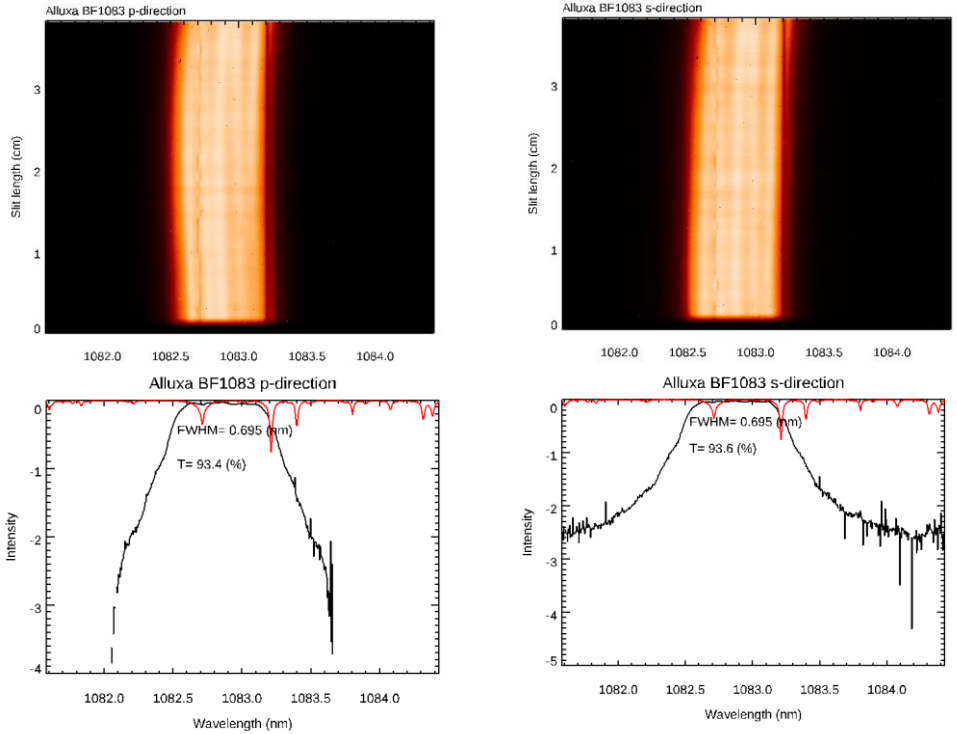


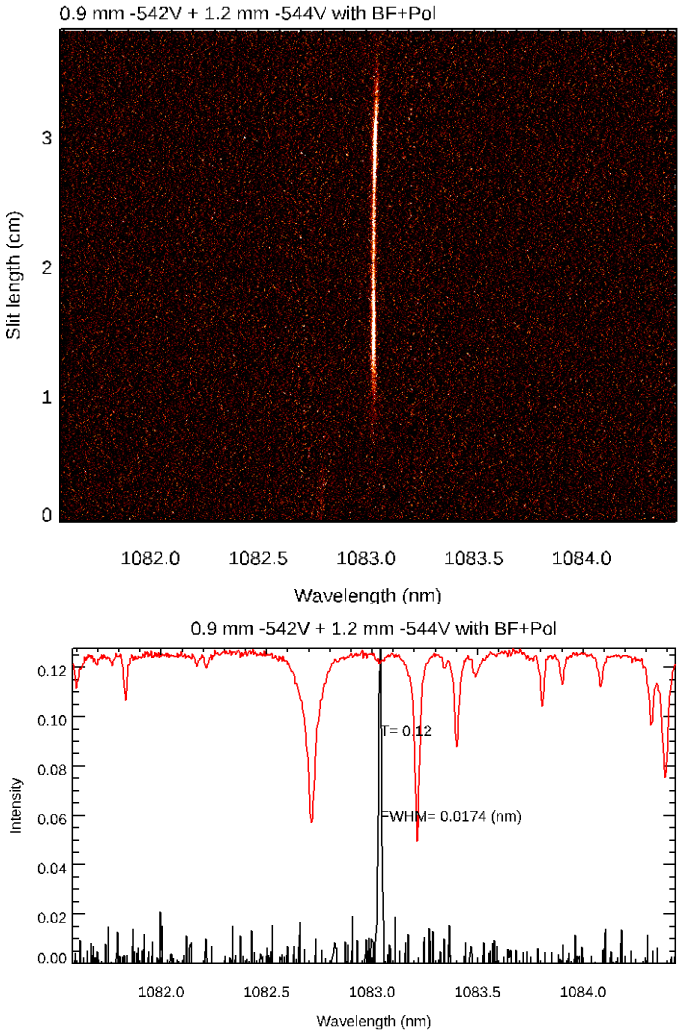
wp1-wp0= 0.64161391 FWHM1= 0.049606995
wp3-wp2= 0.61848638 FWHM2= 0.047984539



wp1-wp0= 0.46461795 FWHM1= 0.043041310
wp3-wp2= 0.48184790 FWHM2= 0.044271245

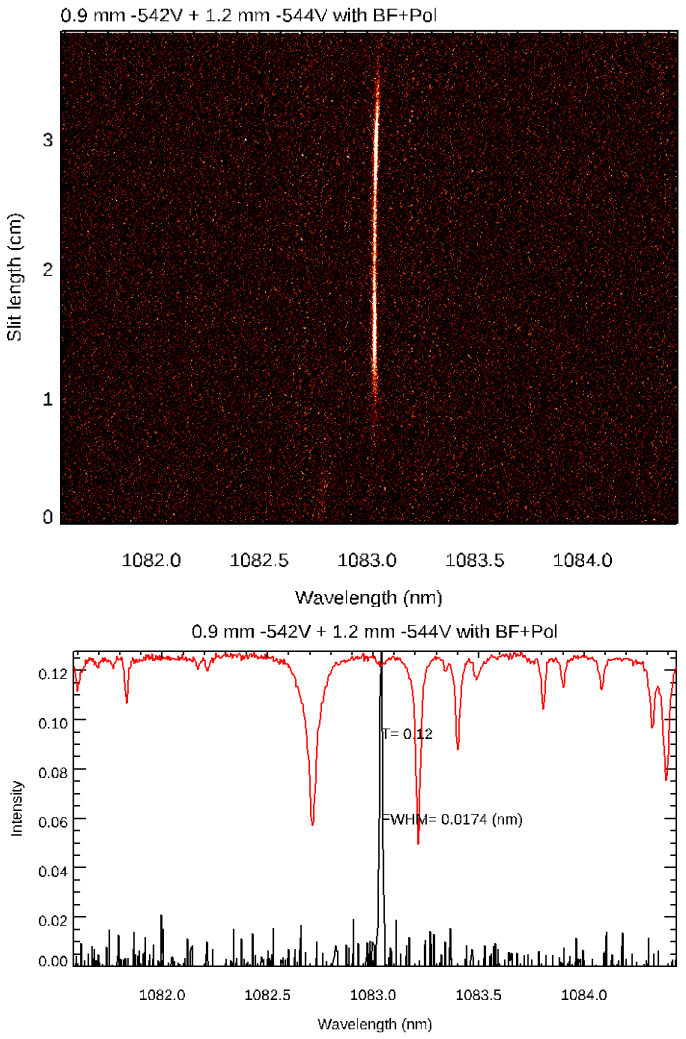
ブロッキングフィルター（Alluxa）





Tandem 1083 nm; 0.9 -542V+1.2 -544V with Blocking Filter + Polarizer

Tandem 1083 nm; 0.9 -542V+1.2 -544V
with Blocking Filter + Polarizer

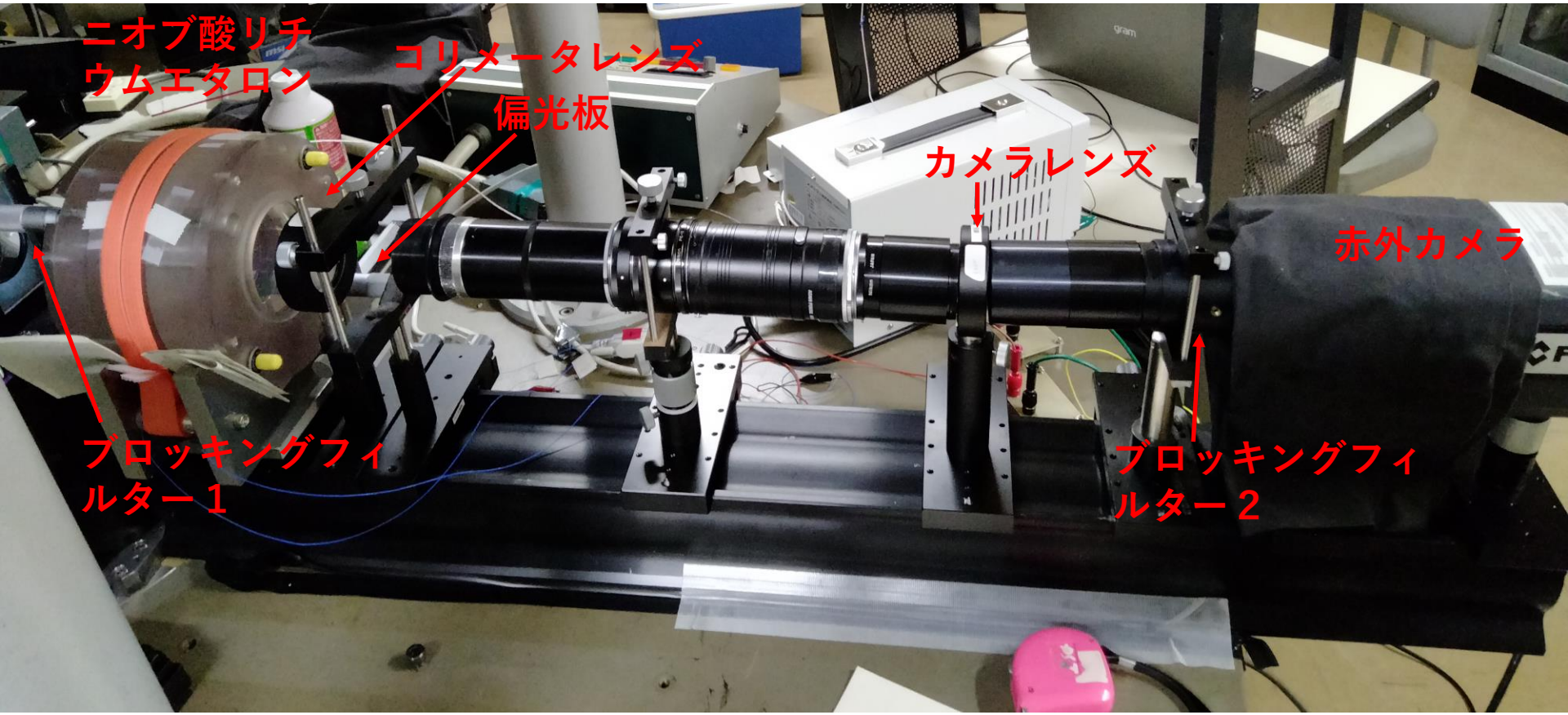


$LiNbO_3$ エタロン測定結果

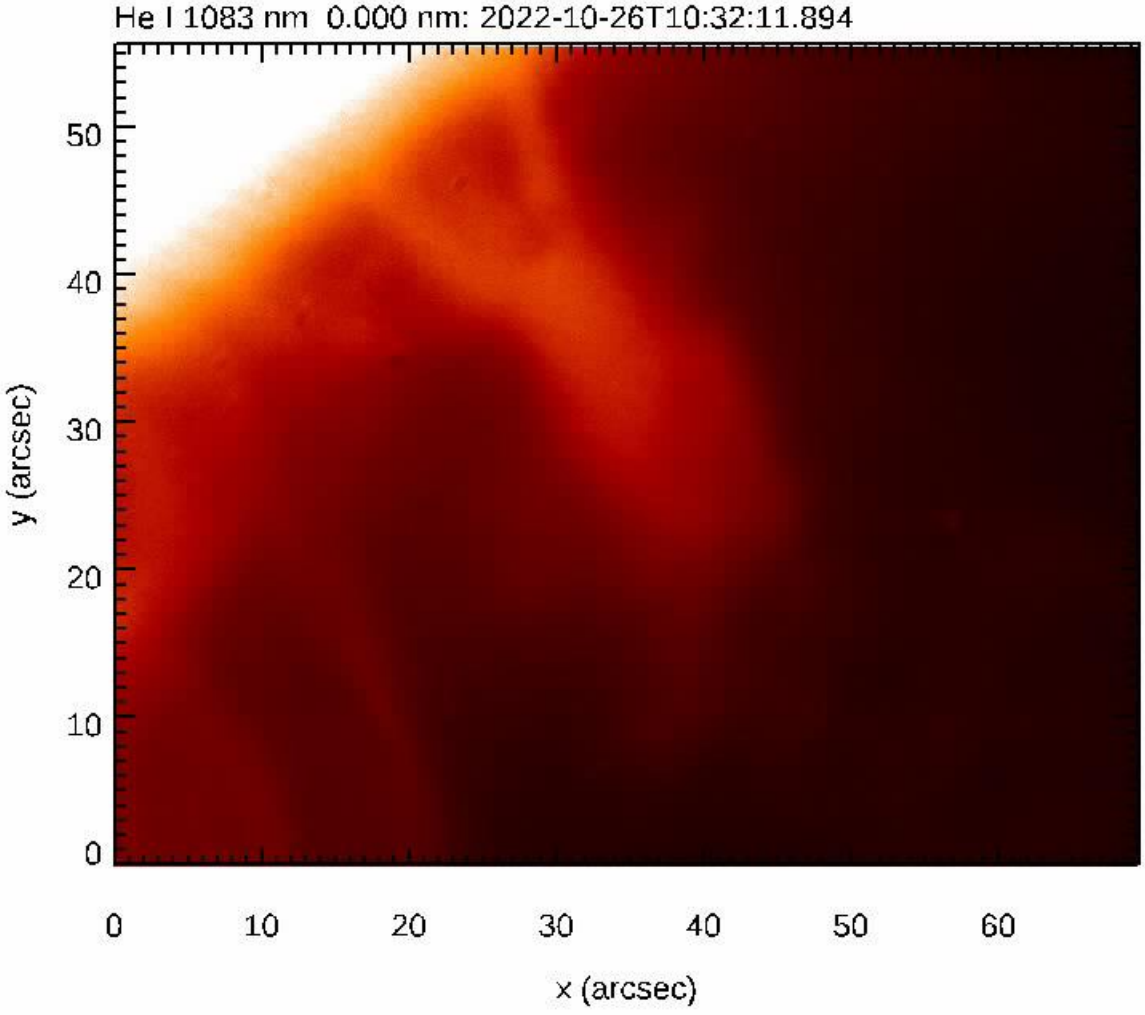
Wavelength (nm)	Thick (mm)	Ray	FWHM (nm)	FSR (nm)	Finesse	Δλ/V (nm/kV)	Vendor
1083.0	0.9	n e	0.0191 (0.0167) 0.0191 (0.0163)	0.292 0.292 0.303 0.303	(17.49) 28.9 (18.59)	0.0348 0.0180	Kogaku Giken (red letter)
	1.2	n e	0.0154 (0.0122) 0.0161 (0.0126)	0.219 0.219 0.228 0.229	(17.95) 28.9 (18.10)	0.0281 0.0175	Kogaku Giken (red letter)
	Tandem	n	0.0138 (0.0102)	0.877 0.876	(85.98)		Kogaku Giken (red letter)
1564.8	0.9	n e	0.0480 (0.0460) 0.0496 (0.0474)	0.618 0.620 0.642 0.643	(13.43) 26.9 (13.54)	0.0513 0.0330	Kogaku Giken (red letter)
	1.2	n e	0.0430 (0.0408) 0.0443 (0.0418)	0.464 0.464 0.482 0.482	(11.37) 26.9 (11.53)	0.0398 0.0258	Kogaku Giken (red letter)
	Tandem	n	0.034 (0.0305) 0.0113	1.851 1.858	(60.69) 164		Kogaku Giken (red letter)

The FWHM in (), the effect of broadened profiles : $\lambda_0/(8n^2F^2)$ due to F/54 beam are removed.

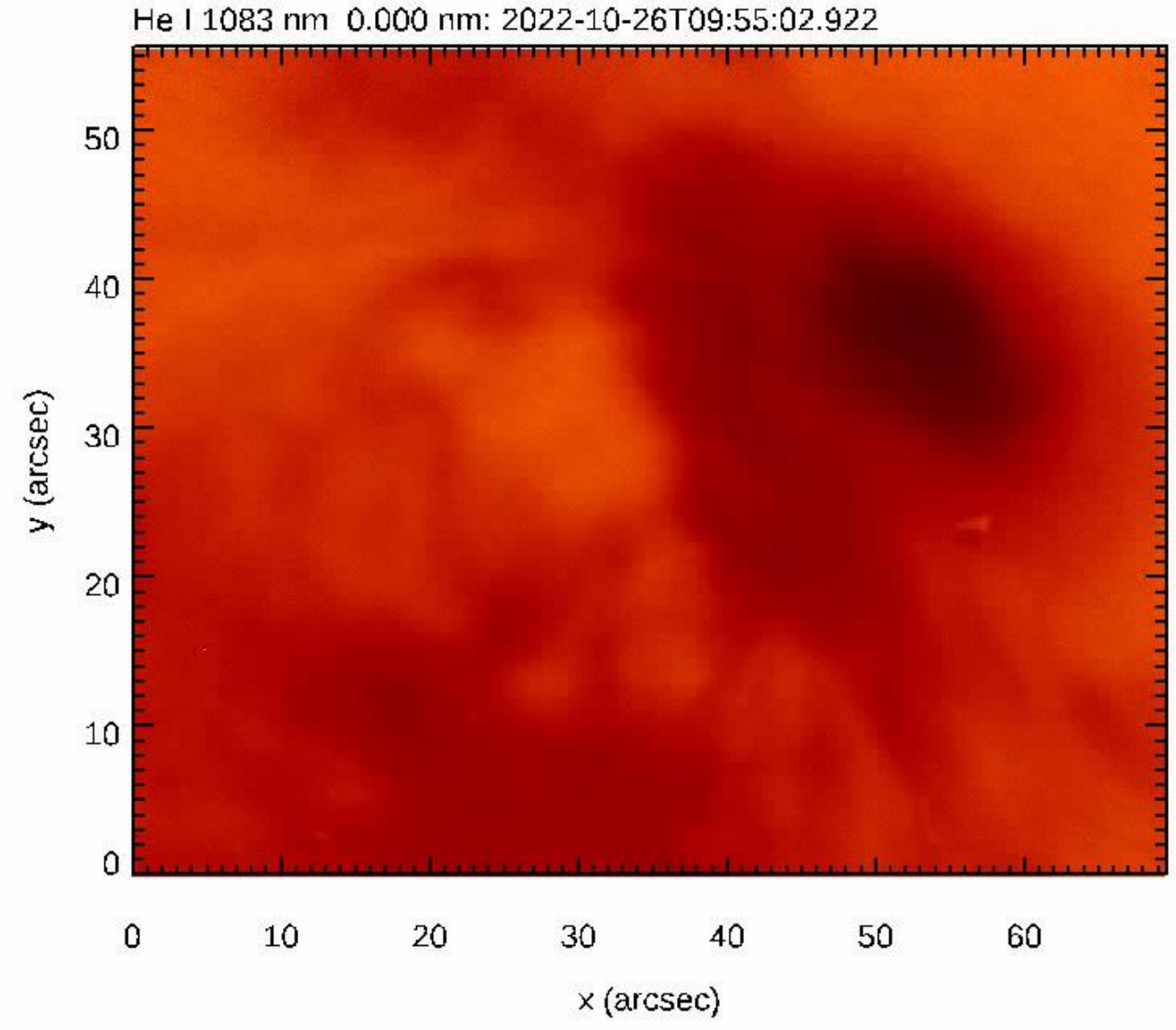
飛騨天文台1階観測室光学系



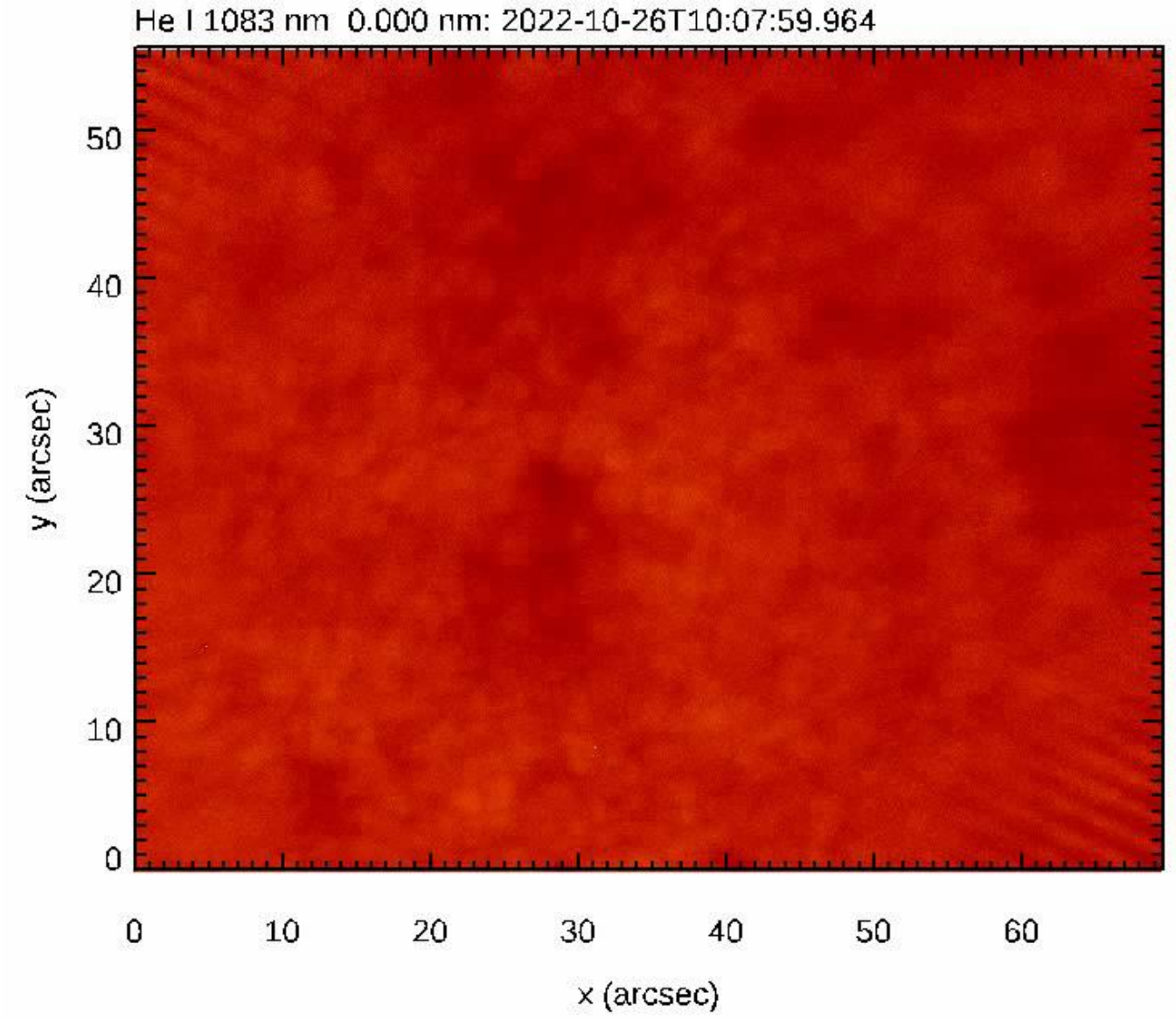
He I 1083 nm ±0.04 nm: プロミネンス



He I 1083 nm ±0.04 nm: 活動領域



He I 1083 nm ±0.04 nm: 静穏領域



$LiNbO_3$ フィルター分光偏光観測

