

広視野多天体分光カメラの 要素技術

本原顕太郎(東京大学)

必要そうな要素技術

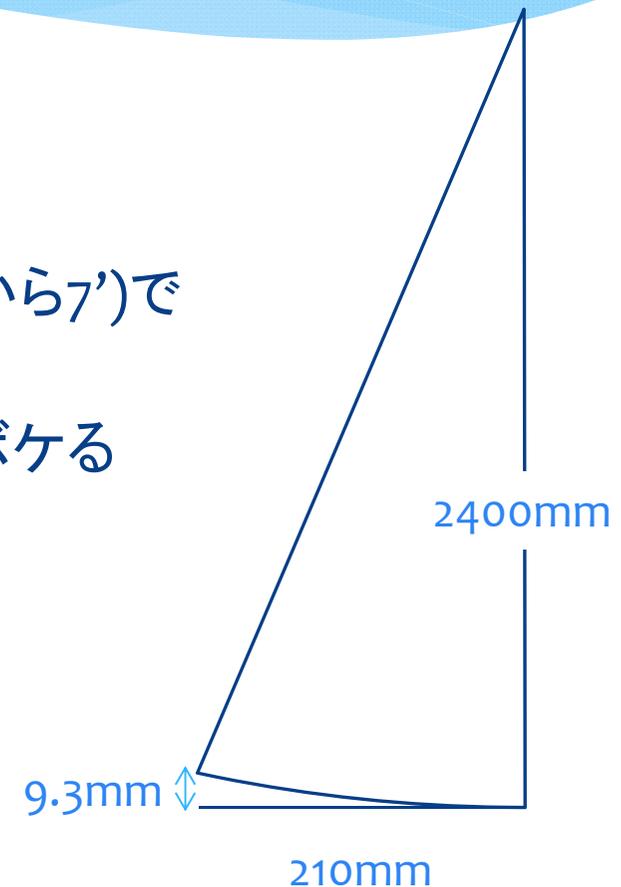
- * 大面積MOSスリットユニット
- * 検出器
- * Tunable Filter
- * 狭帯域フィルタ

(1)大面積MOSスリットユニット

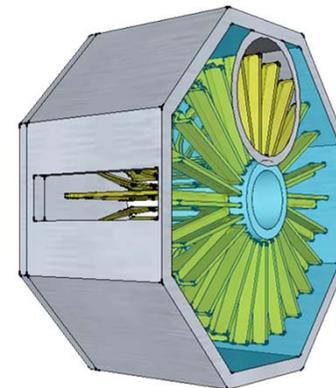
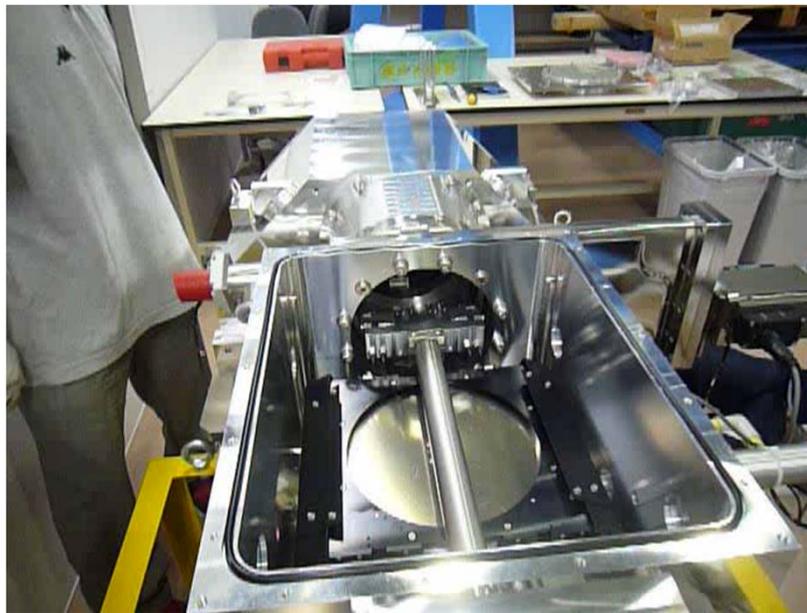
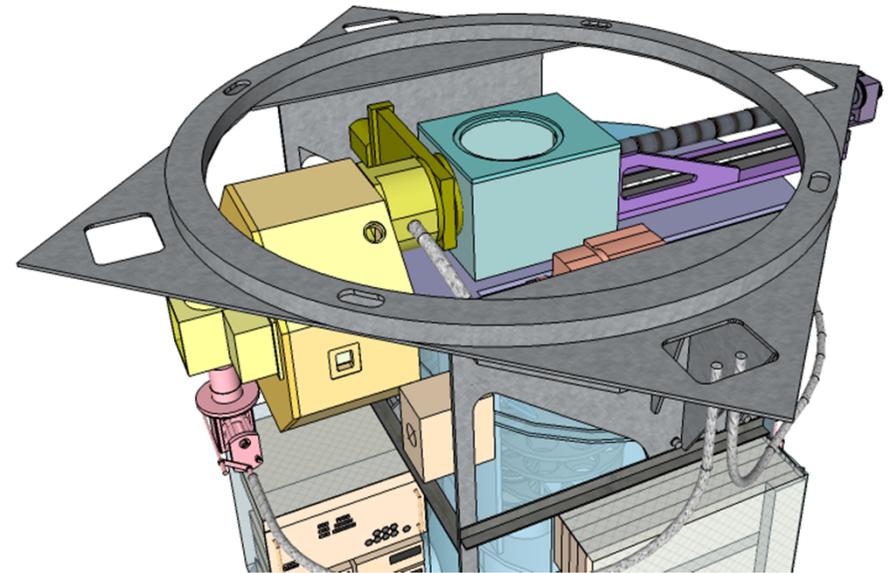
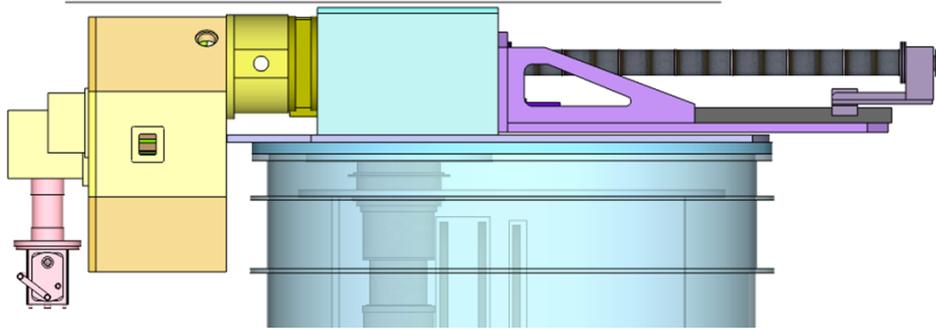
- * スリットマスク方式
 - * MOIRCS/SWIMS方式
 - * FLAMINGOS方式
- * CSU方式

Curved Focal Planeであることに注意

- * すばるのカセグレン焦点面
 - * $R=2400\text{mm}$ の湾曲がある
 - * 視野10分角とすると、視野端(中心から7')で9.3mm焦点位置がずれる
 - * 像は $9.3/12=0.78\text{mm}=1.6\text{arcsec}$ 程度ボケる
- * 曲がった多天体マスクプレート
 - * 球面
 - * 直径400mm



MOIRCS/SWIMS型の交換機構



MOIRCS/SWIMS型の交換機構

- * 利点

- * 球面の焦点面に対応は容易

- * 欠点

- * 回す、という動作があるので大きなスペースが必要。
⇒マスクサイズを5'x10'とかにすれば回転スペースは減らせるが...
- * 真空中のロボット動作
 - * ストロークは非常に大きくなる
 - * ストロークと同じかそれ以上の蛇腹の最短長が更に必要
⇒大型化

FLAMINGOS型の交換機構



(a) F2 mos wheel



(b) Test Mosplate

Figure 2. (a) Engineer holding the 0.9 m diameter moswheel. One of the three circular apertures around the periphery is for imaging and is ~ 234 mm in diameter, which corresponds to ~ 6.28 arcmin. The wheel can carry 9 mosplates. (b) A FLAMINGOS-2 test mosplate; 8 slitlets of varying lengths are visible. The region interior to the mounting frame is ~ 76 mm x ~ 232 mm, which corresponds to ~ 2.0 arcmin x ~ 6.2 arcmin.

Raines et al.,
arXiv : 0803.3083

FLAMINGOS型の交換機構

- * 利点

- * ホイールを回すだけなので、シンプル

- * 欠点

- * 回転板の大きさは焦点面サイズに比例して大きくなる
- * 細長いMOSスリットであれば数は稼げるが、少なくとも一箇所、視野をすべて貫通する穴が必要

MOSFIRE CSU型



- * “Configurable Slit mask Unit”
- * Swiss Centre for Micro-Electronics (CSEM)
- * 267mm x 267mm aperture
- * 位置精度 36um

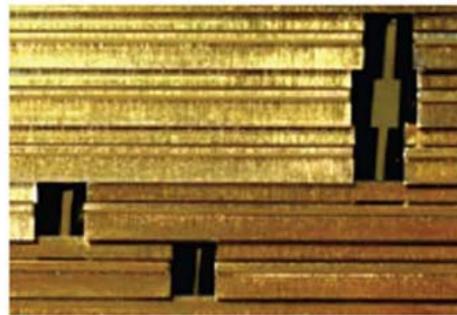
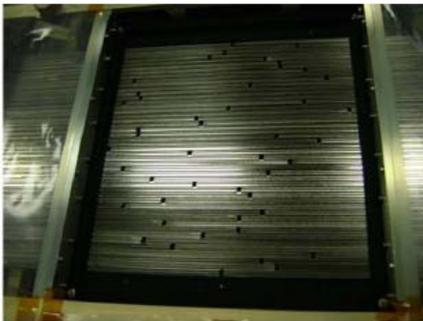


Figure 7: Left: a picture of the CSU showing a mask configuration. Right: a close-up showing the black knife-edge slits.

MOSFIRE CSU型

- * 利点

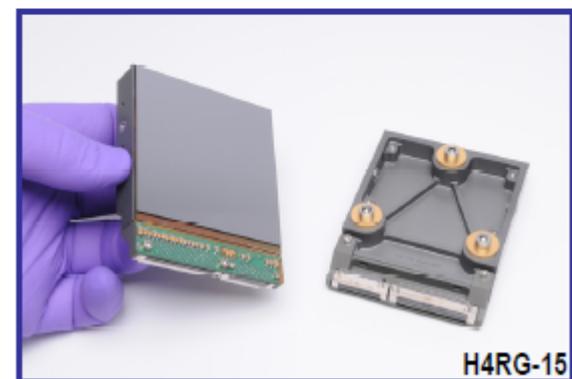
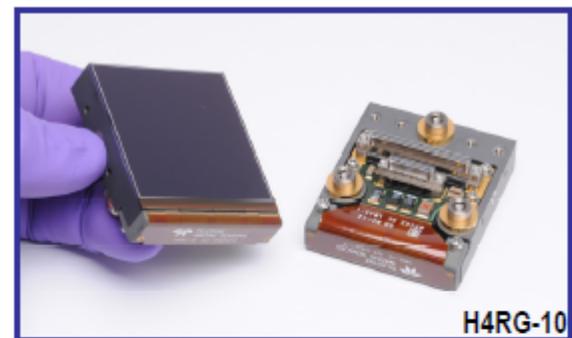
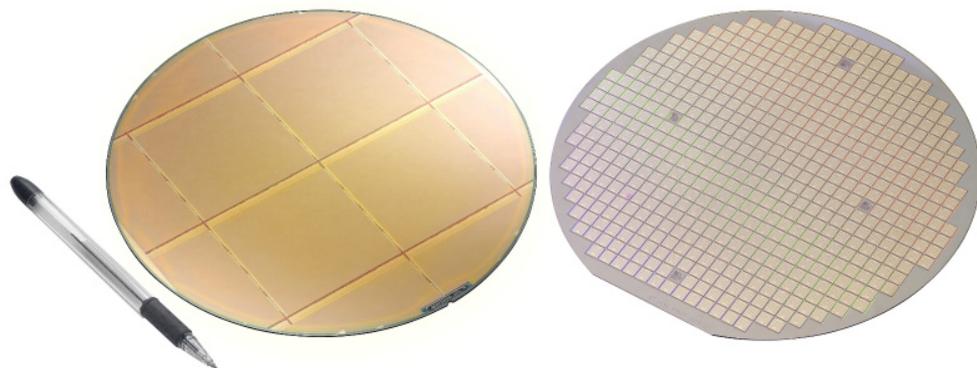
- * マスク交換機構・マスクの事前準備は不要

- * 欠点

- * 温度によるスリット幅変化とかで苦労した？
- * 非常に複雑かつ複雑(>fewM\$らしい)
- * 球面の焦点面に対応できるのか？
 - ⇒波長方向にあまり幅をとらなければいいかも
 - ⇒空間方向には焦点面の湾曲にあわせる

(2)検出器

- * HAWAII-4RG
 - * 3-side buttable
 - * 1,4,16,32,64 output selectable
 - * ピクセルサイズは2つ選べる
 - * 15um
 - * 10um
 - * (H2RG:18um)



H4RG First Light at UH88

* 2012/6 press release



(3) Tunable Filter : Fabry Perot分光器

- * 高反射率膜を付けた二つのガラス面を平行に設置 : “ethalon”
- * 間隔を調整することにより透過波長を制御する
- * Finessを調整することにより波長幅を変える
- * 波長分解能

- * 位相差 $\delta = \frac{4\pi dn \cos \theta}{\lambda}$ より
$$d\delta = \frac{4\pi dn \cos \theta}{\lambda^2} d\lambda$$

- * 波長幅は $\Delta\delta = \varepsilon = 2\pi/F$ より
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{4\pi dn \cos \theta} \varepsilon \sim \frac{\lambda^2}{2dnF} (\theta \sim 0)$$

- * よって
$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2dnF}{\lambda}$$

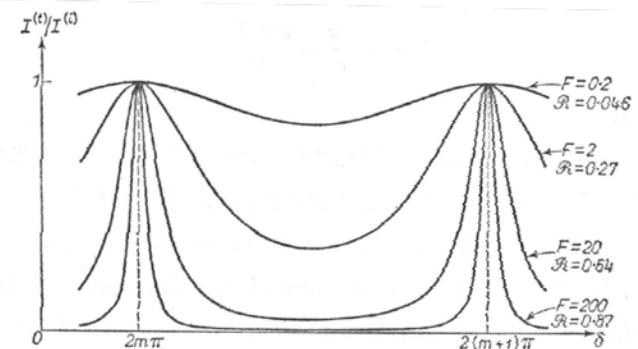
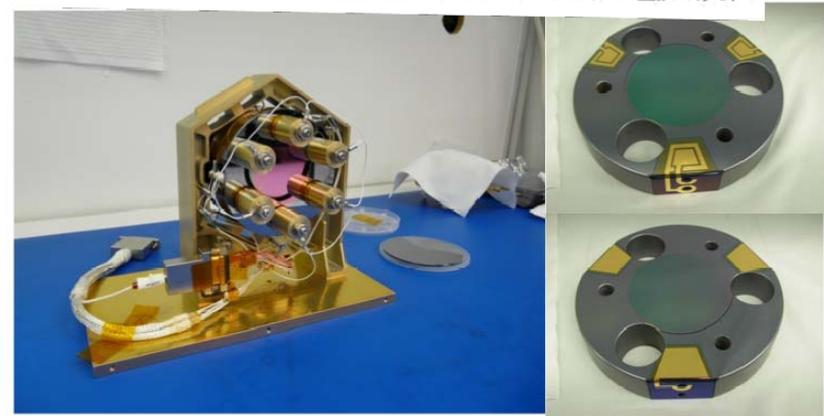


図 7.58 透過光による多光束等傾角干渉縞: 透過光強度と入射光強度の比 $I^{(t)}/I^{(i)}$ を位相差 δ の関数として表わしたもの (m は整数である)



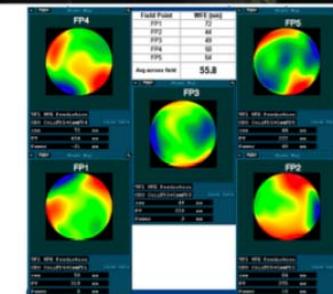
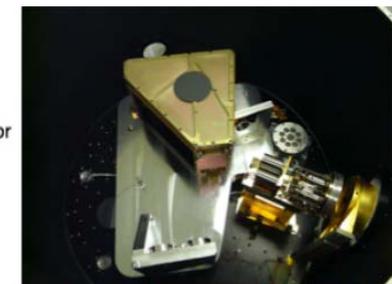
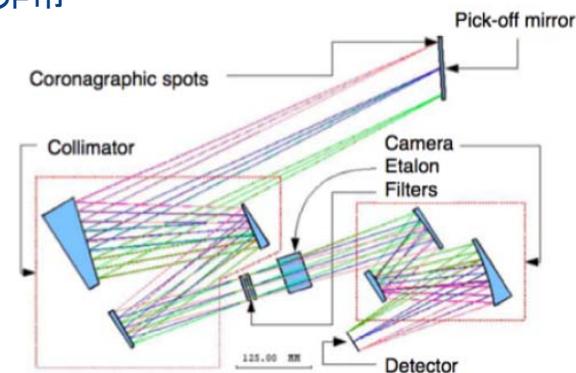
JWST/TFIのエタロン
Doyon et al., Proc SPIE 7731, 77310F (2010)

ファブリ・ペロー撮像

- * 次数を選択するためのオーダーソートフィルタを併用する必要がある
- * 波長分解能の実際
 - * $F = 30(R \sim 0.9)$, $nd = 4\text{mm}$ のエタロン
 $\Rightarrow \lambda/\Delta\lambda \sim 2.4 \times 10^5$
 - * JWST/TFI: $F = 30(R \sim 0.9)$, $\lambda/\Delta\lambda \sim 100 @ 2\mu\text{m}$
 $\Rightarrow nd = 3.3\mu\text{m}$
 : 波長分解能を下げるためにはエタロン幅を非常に狭くしないとイケない。
- * 冷却下での制御は非常に困難

Table 1. TFI Requirements and Specifications

Instrument Parameters		Comments
Detector	2048x2048 Hawaii-2RG	5 μm cut-off; 18 μm pixel pitch
Image scale	0.065 arcsec	Nyquist sampled at 4.0 μm
Field of view	2.2'x2.2'	Matches one NIRCcam FOV
Wavelength Range	1.6 to 4.9 μm	Non-functional between 2.6 and 3.2 μm . Coating designed to reach 1.5 and 5.0 μm at both ends.
Spectral Resolution	R~100	70-150 acceptable range.
Continuum sensitivity	126 nJy	10 σ 100000s
Coronagraphic contrast ratio	10 ⁻⁴ at 1 arcsec	1 σ at 4.6 μm . Exclude significant gain (>10x) achieved through PSF calibration and/or multi- λ speckle suppression technique.
Etalon Parameters		Comments
Clear Aperture	56 mm	Pupil size 39 mm
Finesse	~30	Compromise between fabrication challenges & minimizing # of blockers
Surface Figure	< 30 nm	Coated etalon surface figure must support reflectance finesse.
Transmittance	> 75%	Limited by surface figure and absorption within coating material
Contrast	> 100	Peak transmittance divided by minimum between spectral peaks
Passband Shift with FOV	< 0.5%	Measured < 0.35%
Number of Blocking Filters	8	5 at short wavelengths, 3 at long wavelengths.



JWST/TFI
 Doyon et al., Proc SPIE 7731, 77310F (2010)

Figure 4 - Left: optical layout of the TFI optics. Upper right: collimator TMA and optical set-up mounted in the test cryostat. Bottom right: cryogenic WFE measurements at 5 field points of the combined flight and camera TMAs. The average (RMS) WFE is 56 nm and never exceeds 72 nm.

JWST/TFI Cancelled

The screenshot shows a web browser window displaying the website for the Tunable Filter Imager (TFI) at the Space Telescope Science Institute (STScI). The browser's address bar shows the URL www.stsci.edu/jwst/instruments/tfi. The website header includes the STScI logo and the text "SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE". A navigation menu contains links for Home, About Us, Current Missions, Data Archives, News and Education, Future Missions and Initiatives Support, Staff Research, and Events. The main heading reads "James Webb Space Telescope TFI: Tunable Filter Imager".

The central content area features a prominent announcement: "TFI is now a Heritage Instrument". Below this, a text block states: "In July 2011 the Canadian Space Agency (CSA) reluctantly discontinued work on the Tunable Filter Imager (TFI) when it became clear that issues associated with the cryogenic operation of its Fabry-Perot etalon were unlikely to be resolved in time to meet the instrument's delivery schedule. Instead, CSA will provide a reconfigured instrument - the Near InfraRed Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS) - that enhances the capabilities of the JWST Observatory while being simpler to fabricate and operate."

To the left of this text is a photograph showing two individuals in white cleanroom suits working on the instrument's components. To the right of the photograph, a text block explains: "A science instrument known as the Tunable Filter Imager (TFI), is packaged with the guide camera (FGS), but is functionally independent. The TFI will be used solely for science observations and will have a selectable band of resolution $R \sim 100$ across its $2.2' \times 2.2'$ field between $1.5 - 5 \mu\text{m}$. The Canadian Space Agency will provide the TFI to the JWST Project. The prime contractor is Com Dev. The Principal Investigator for the TFI is René Doyon from the Université de Montréal."

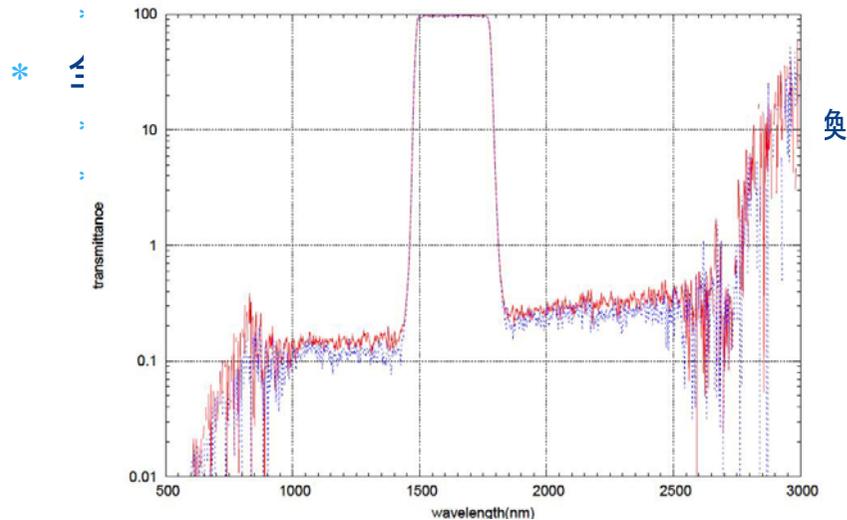
On the far right, a sidebar titled "TFI at a glance" lists various resources: Instrument Design, Sensitivity, Document Archive, Software Tools, and Contact/Help Desk. Below this is a section titled "TFI at:" which includes a link to the Canadian Space Agency and a search box containing the text "TFI Team".

A left-hand navigation menu lists various sections: JWST Overview, Community Advice, Science, Optical Telescope Element, Instruments (with sub-links for JWST Instruments, Instrument Module, FGS, MIRI, NIRCам, NIRISS, and NIRSpec), Operations, Software Tools, Document Archive, and Glossary.

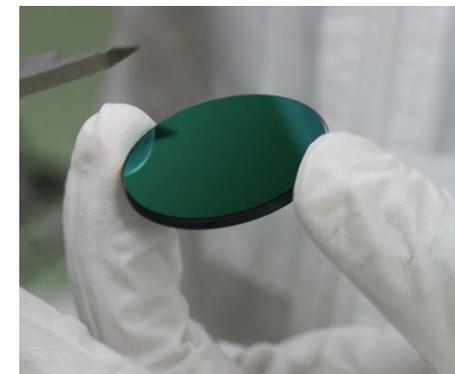
(4)(狭帯域)多層膜干渉フィルター



- * ファブリ・ペローエタロンを蒸着膜で形成するような
 - * 多数の膜を重ねて望む波長プロファイルを形成することが可能
 - * 金属干渉フィルター
 - * 半透明金属膜と透明誘電体膜($\sim 1/4$ 波長)を交互に入れ、誘電体膜内で干渉



MK Filter SetのH-bandフィルタ



1.31 μ m狭帯域フィルタ

干渉フィルタの波長シフト

* 斜め入射すると実効的な多層膜の厚みが変わる

* 入射角 θ のときの中心波長のズレ $\Delta\lambda$ は

$$\Delta\lambda = \lambda_c \left(1 - \frac{\sqrt{n_{\text{eff}} - n_0 \sin^2 \theta}}{n_{\text{eff}}} \right)$$

* n_{eff} : 多層膜の実効的な屈折率

* n_0 : 周囲の屈折率

* 斜め入射で中心波長は短い側にシフトする

* フィルターをどこに置くかで影響が変わる

* 焦点面周囲

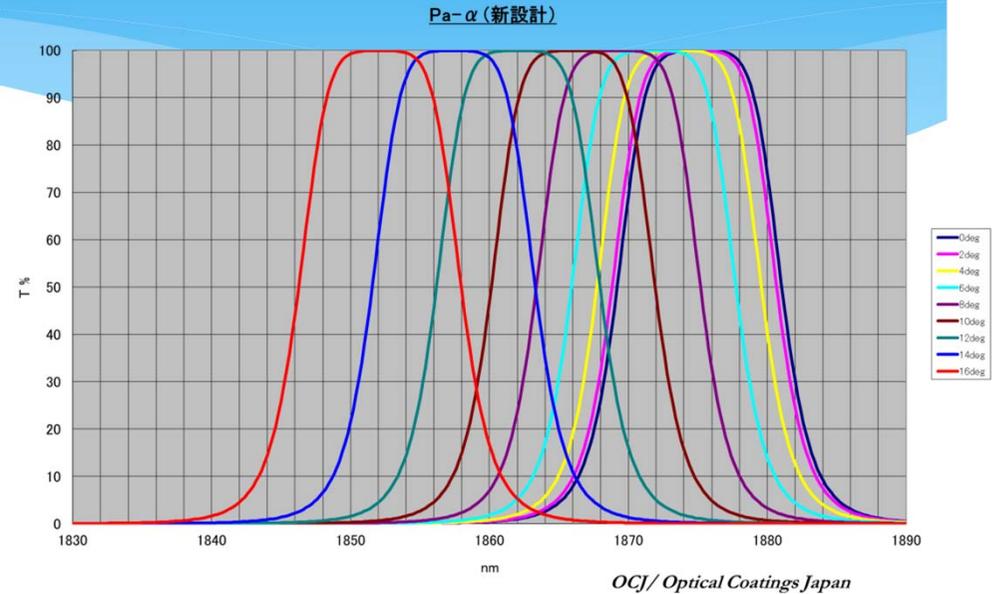
* フィルタバンド幅が広がる: 視野内で一定の透過プロファイル

* フィルター自身の非一様性が視野内に反映される

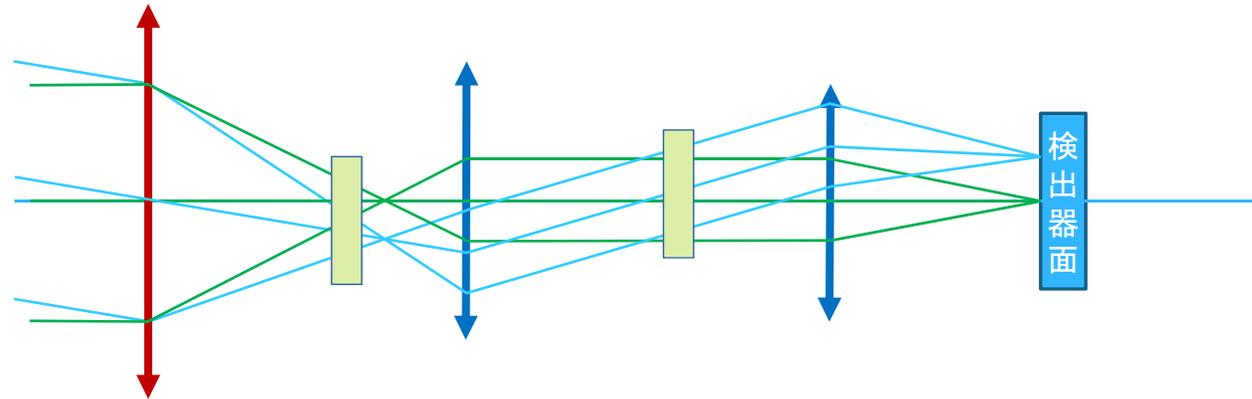
* コリメート光内

* 視野中心から外にかけて中心波長がずれていく

* フィルター自身の非一様性の影響はキャンセルされる



SWIMSの1.875 μm フィルタの透過プロファイル(日本真空光学(株))



狭帯域フィルター

- * 視野内での波長ズレが大きくなる
 - * 冷却瞳のサイズを小さくする
 - ⇒視野端の入射角が大きくなる
 - ⇒波長ズレが大きくなる
- * 逆に焦点面に置くのも手かも
 - * フィルターの一様性がどこまで確保できるか？
 - * 実効的な波長分解能は少し落ちる

まとめ

- * MOSユニットをどうするかは早くから検討が必要
(装置の予算・デザインに大きな影響)
- * H4RGは10um? 15um?
- * Tunable Filter は難しそう。
- * 狭帯域フィルタは焦点面近くに置くことも考えてもいい
かもしれない