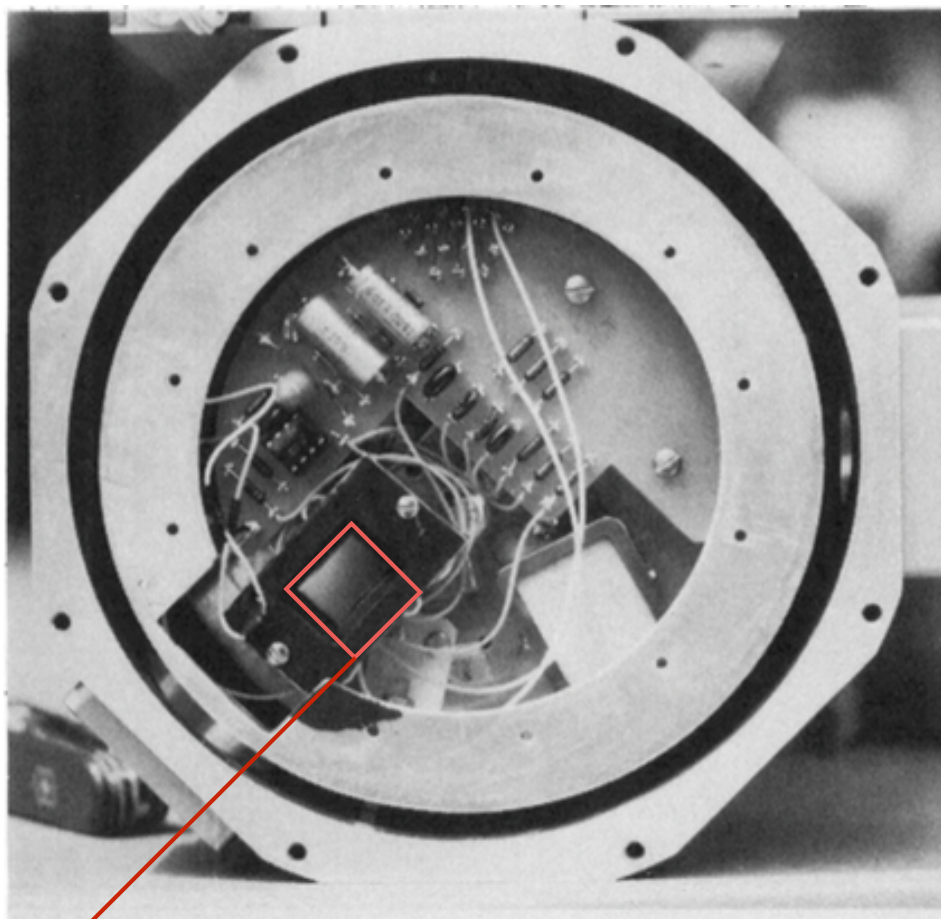


# Hyper Suprime-Camの開発

宮崎 聡、HSC開発組一同

1980年中頃からCCD



RCA 512x300

受光面積は狭い

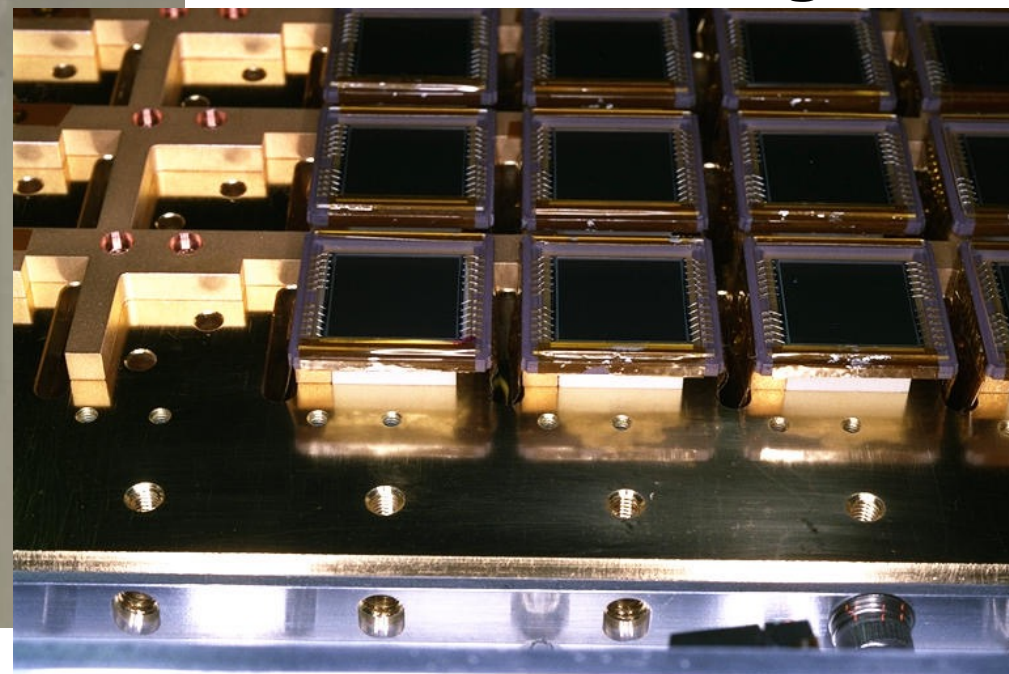
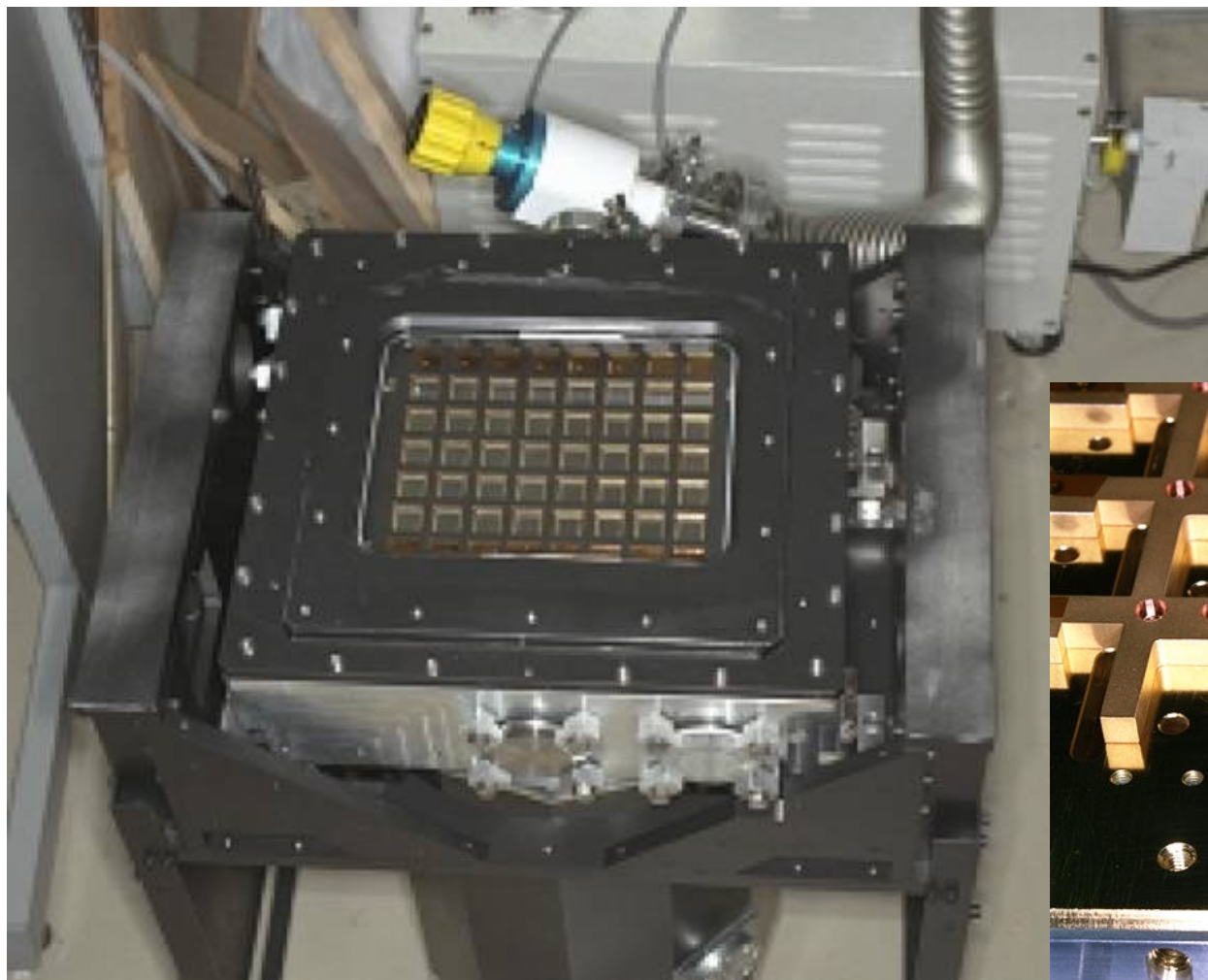
15 mm x 10 mm (5' x 3' @ Kitt Peak 4 m)



# モザイク CCD type I

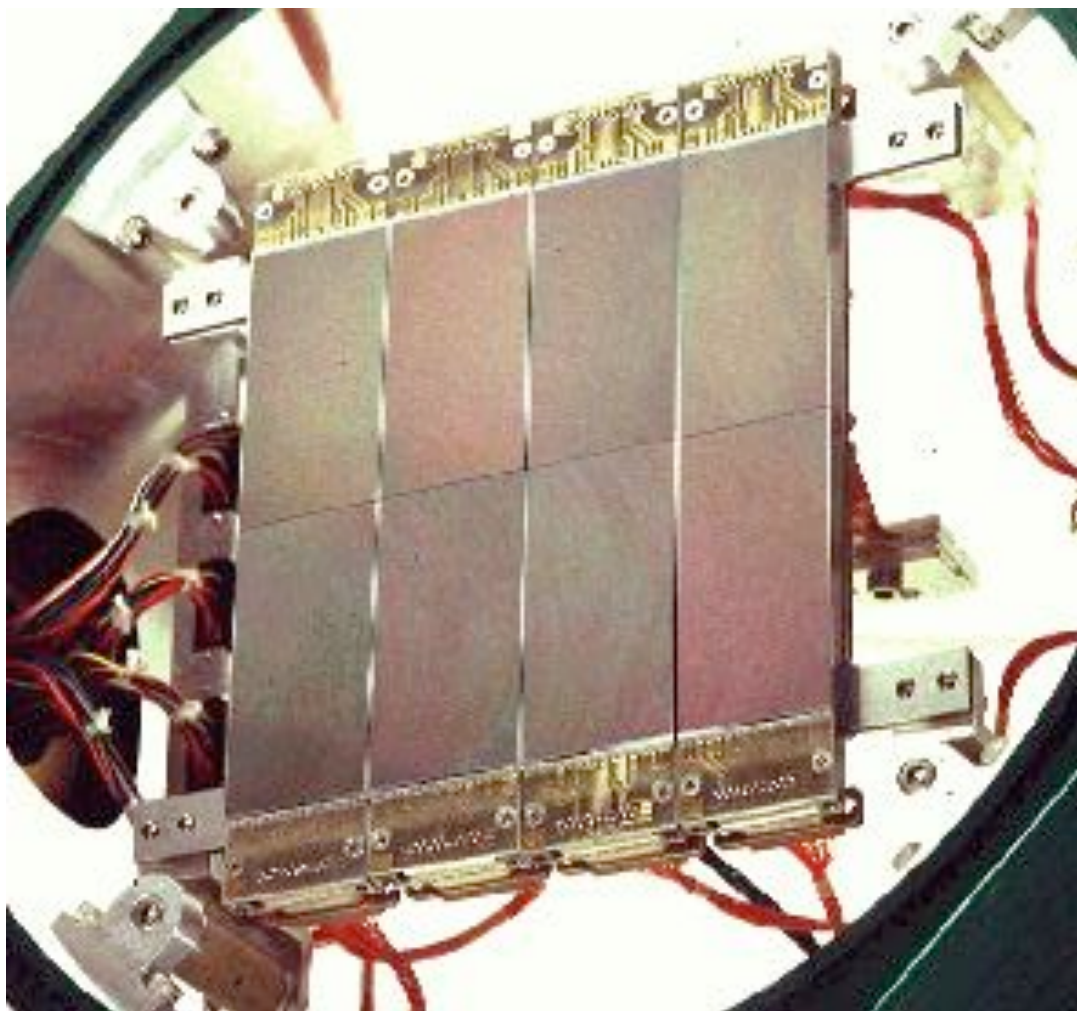


Sekiguchi



1 cm x 1cm 汎用CCDをすき間を許して多数並べる  
木曾シュミット 1990年初頭 世界最大級

# モザイク CCD type II

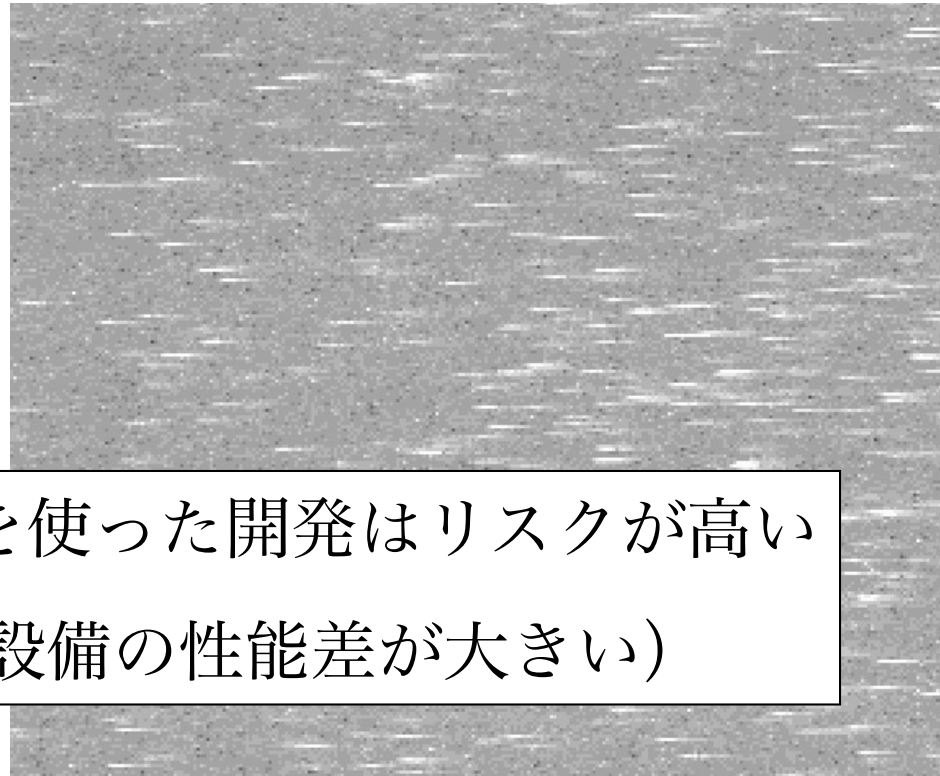
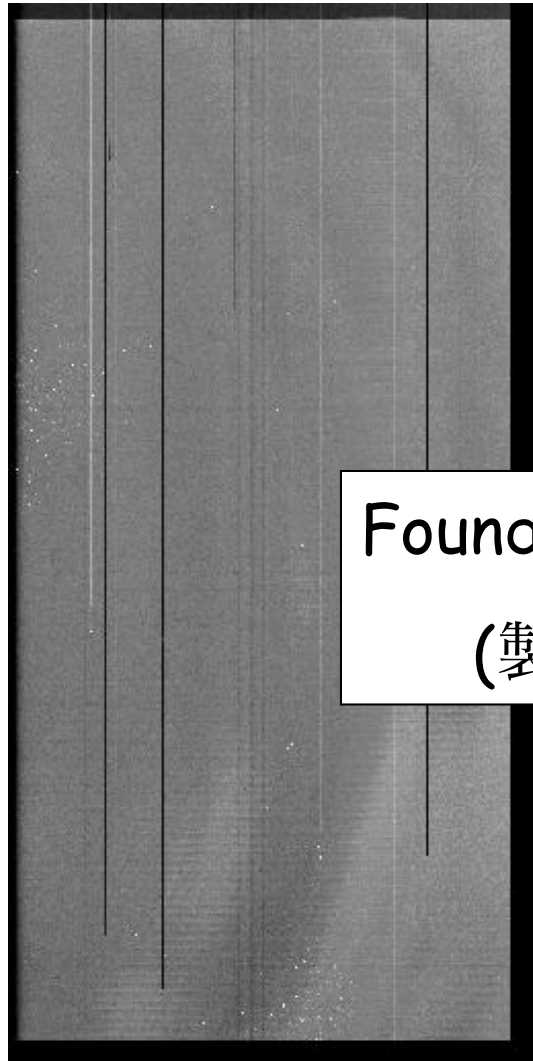


Luppino

3 cm x 6cm 専用CCDをすき間を最小にして並べる  
焦点面が狭い場合はこのtypeとなる(すばる主焦点)

# 専用CCDの開発

Si Foundryに発注 (ただし性能は無保証)



-75 C

Foundryを使った開発はリスクが高い  
(製造設備の性能差が大きい)

傷や電荷転送効率等、  
いろいろ問題が・・・



# CCDの開発

国立天文台の採用条件

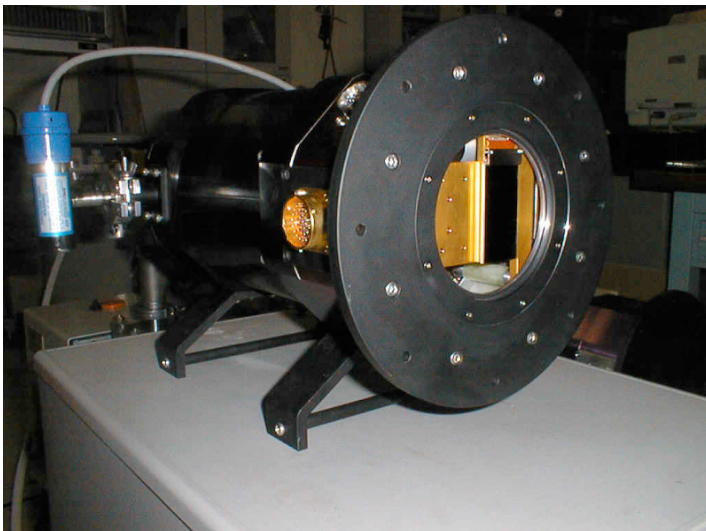
MITリンカーン研究所との共同開発

低雑音・高量子効率(あすか・すざく・チャンドラ)

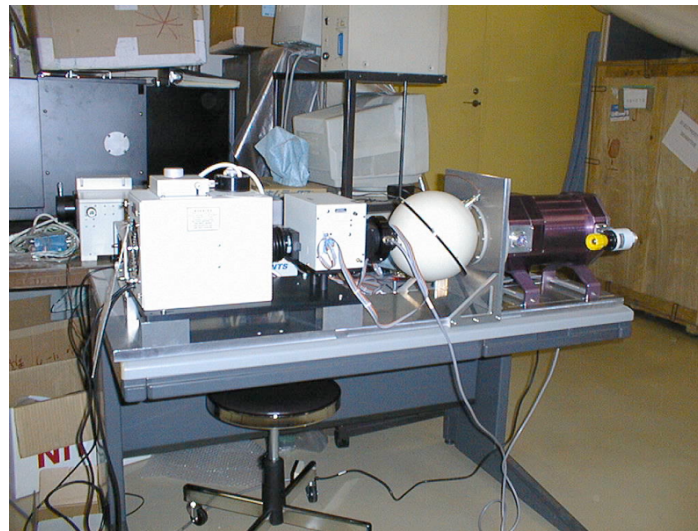
Luppinoが光学天文の要望をとりまとめ開発依頼

国立天文台も素子評価を通じて開発に参加

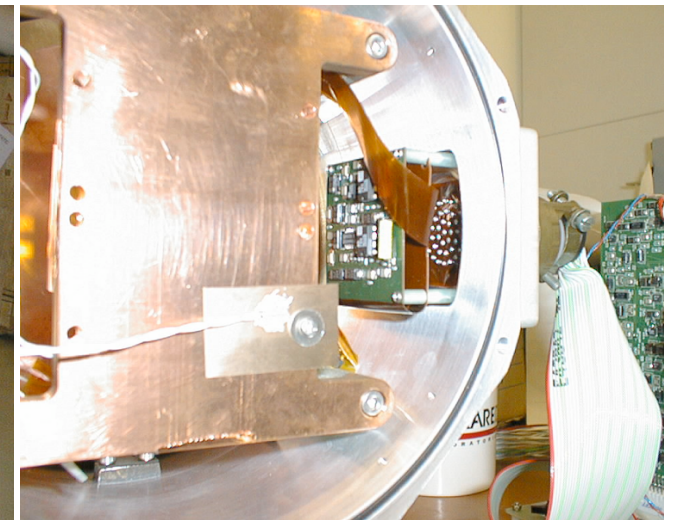
Dewar

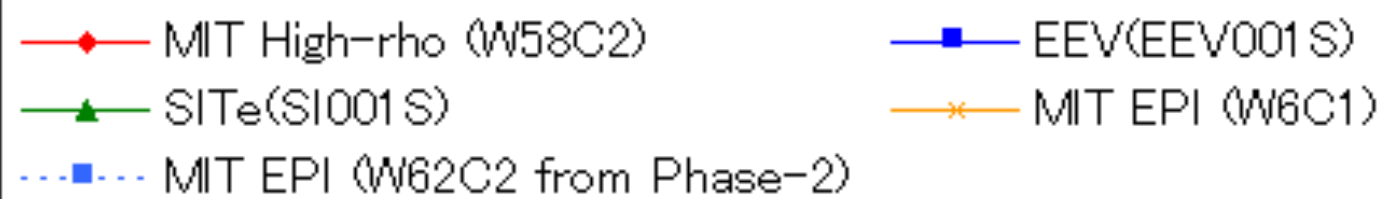
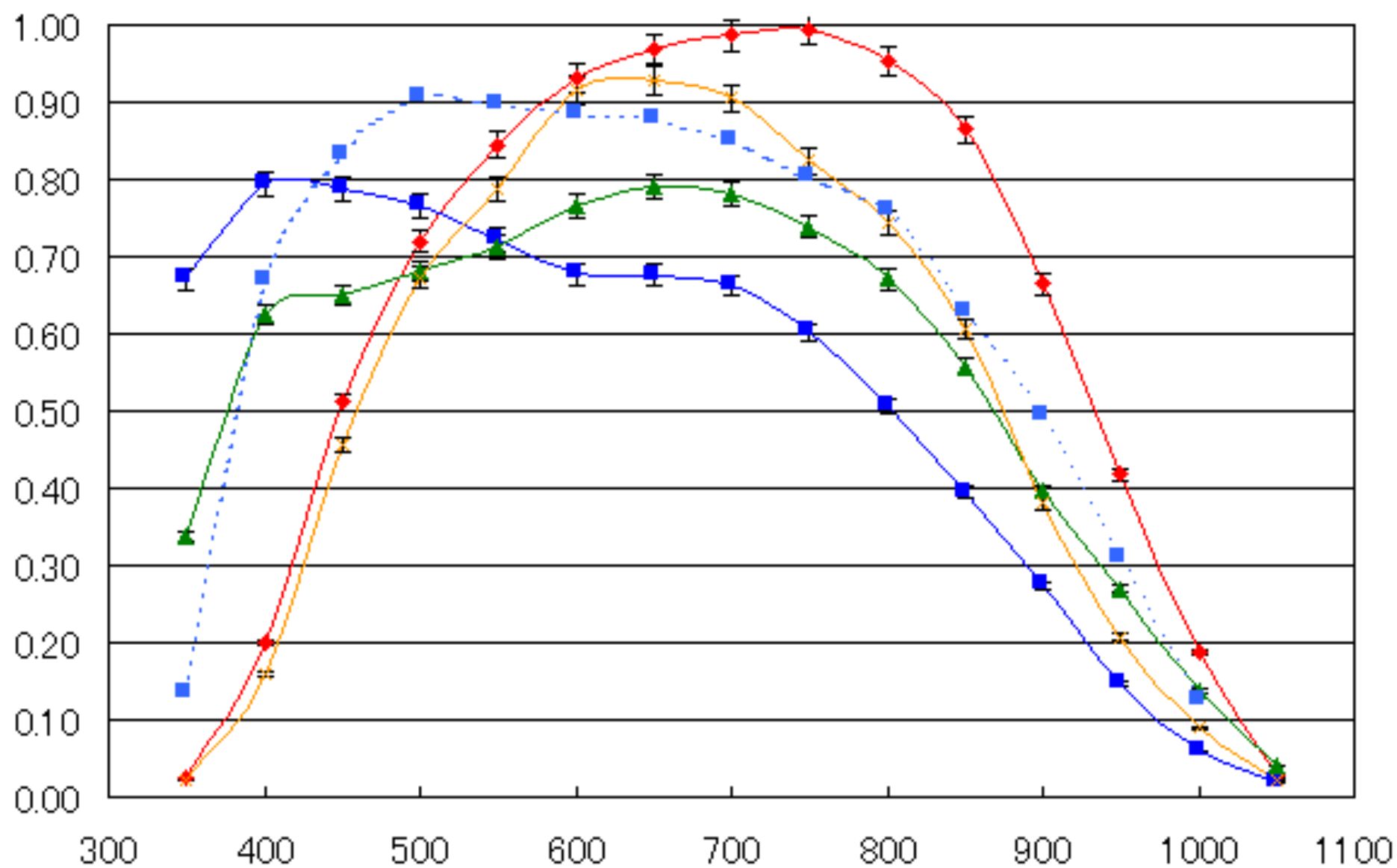


QE bench



Readout electronics







# 大望遠鏡での広視野撮像



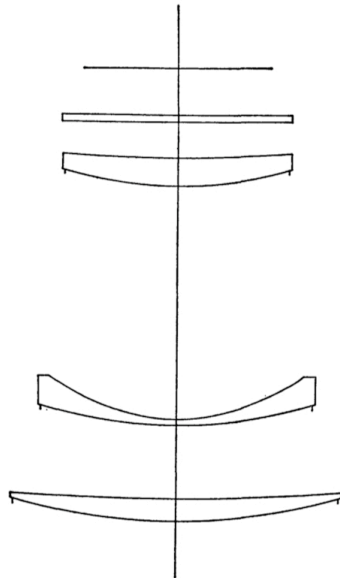
1 回反射の主焦点：焦点距離最短 → 広視野

# 主焦点での撮像

主鏡：双曲面

そのままでは（軸上ですら）あらゆる収差が発生

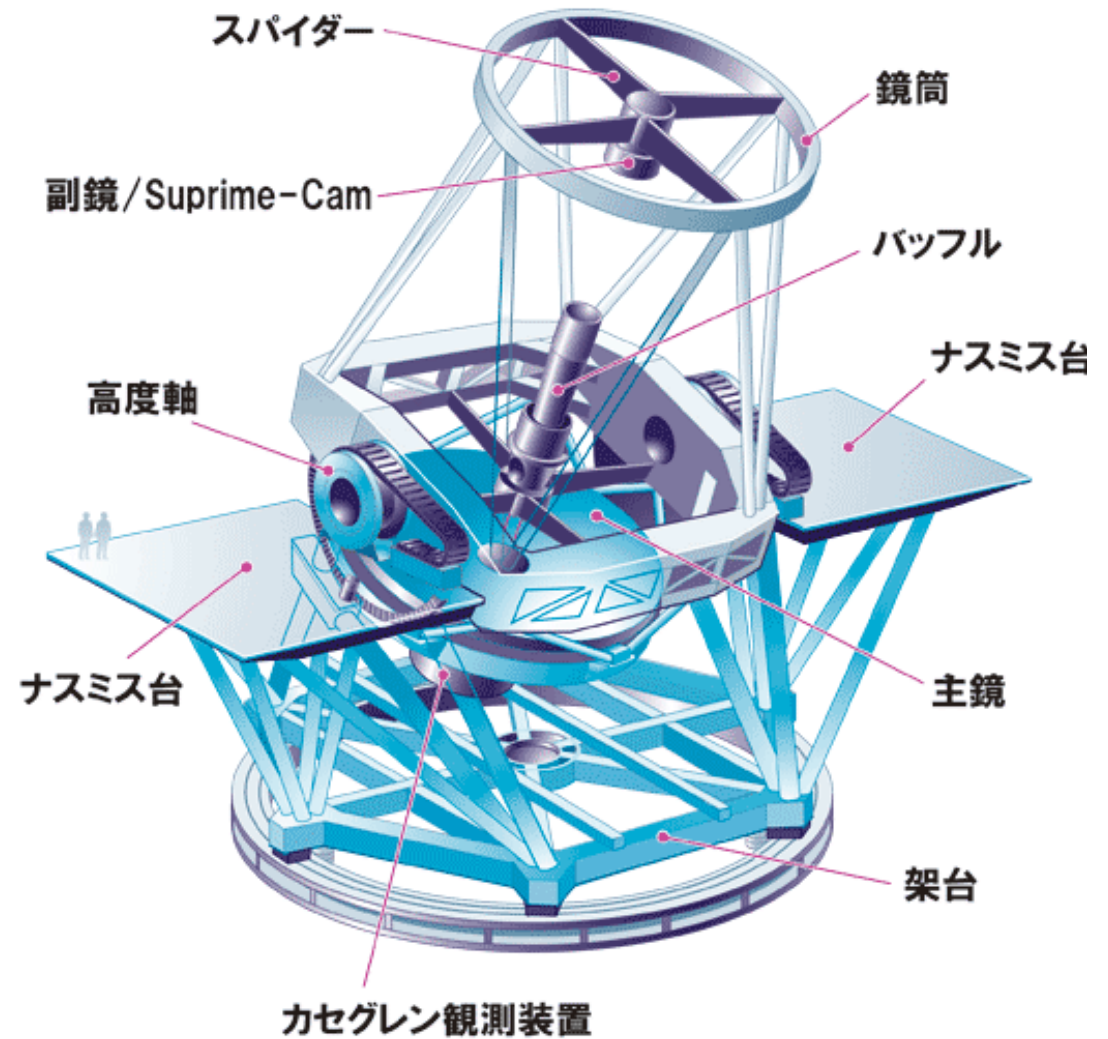
補正光学系



- Wynne Triplet (1968)
- Kitt Peak 4 m望遠鏡用 (F/2.8)
- 全て球面 UBK7ガラス
- 結像性能 0'' .5 ( $\phi=30'$ ) 1'' .0 ( $\phi=1 \text{ deg}$ )  
400-500nm



# すばるの主焦点



口径が大きい

口径比(焦点距離/口径=F)が小さい (明るい)

設計・製作が難しい

遠藤孝悦・画 日経サイエンス1996年2月号より  
Illustration by Takaetsu Endo, taken from Nikkei Scienc



# すばるの主焦点

## 初期のデザイン

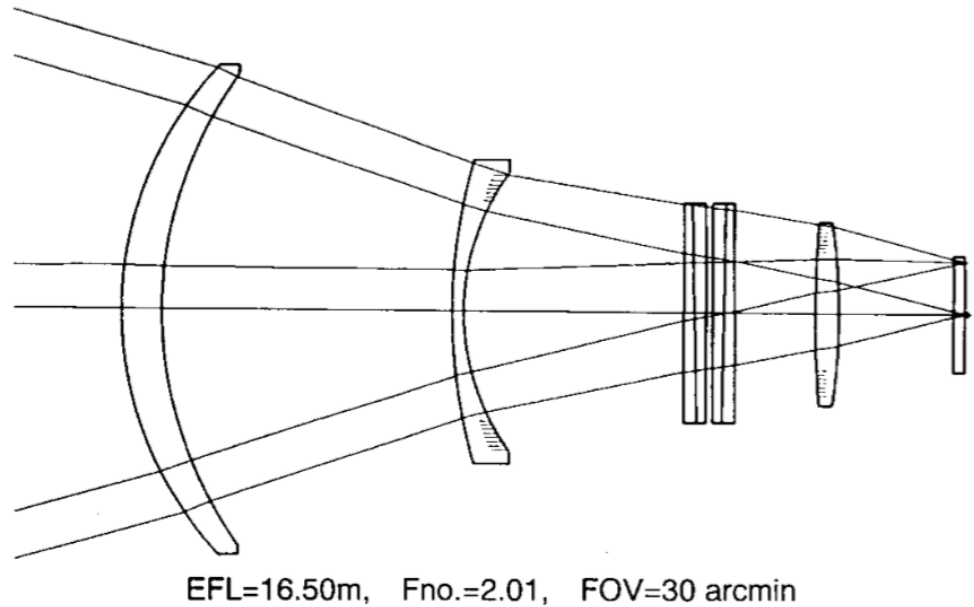
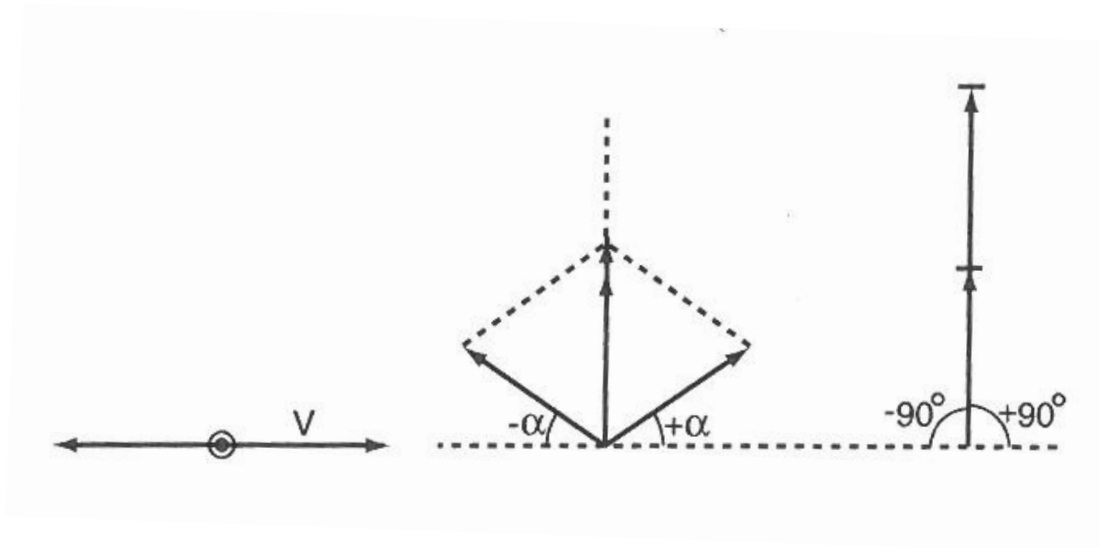
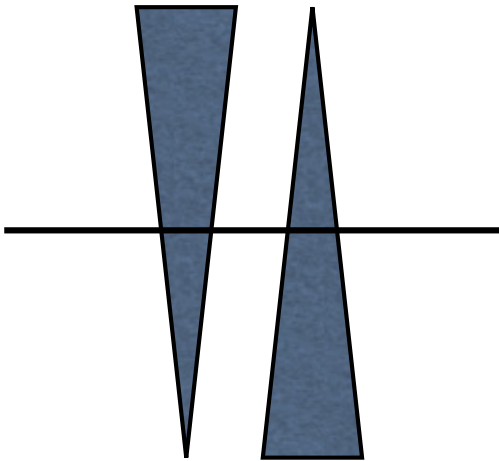


Figure 4-2. Nariai's Primary Corrector with direct-vision prism ADC (Nariai et al. 1985)

rms < 0".2  
350 - 1000 nm

# Atmospheric Dispersion Corrector

- a pair of oppositely rotating prism



# すばるの主焦点

初期のデザイン

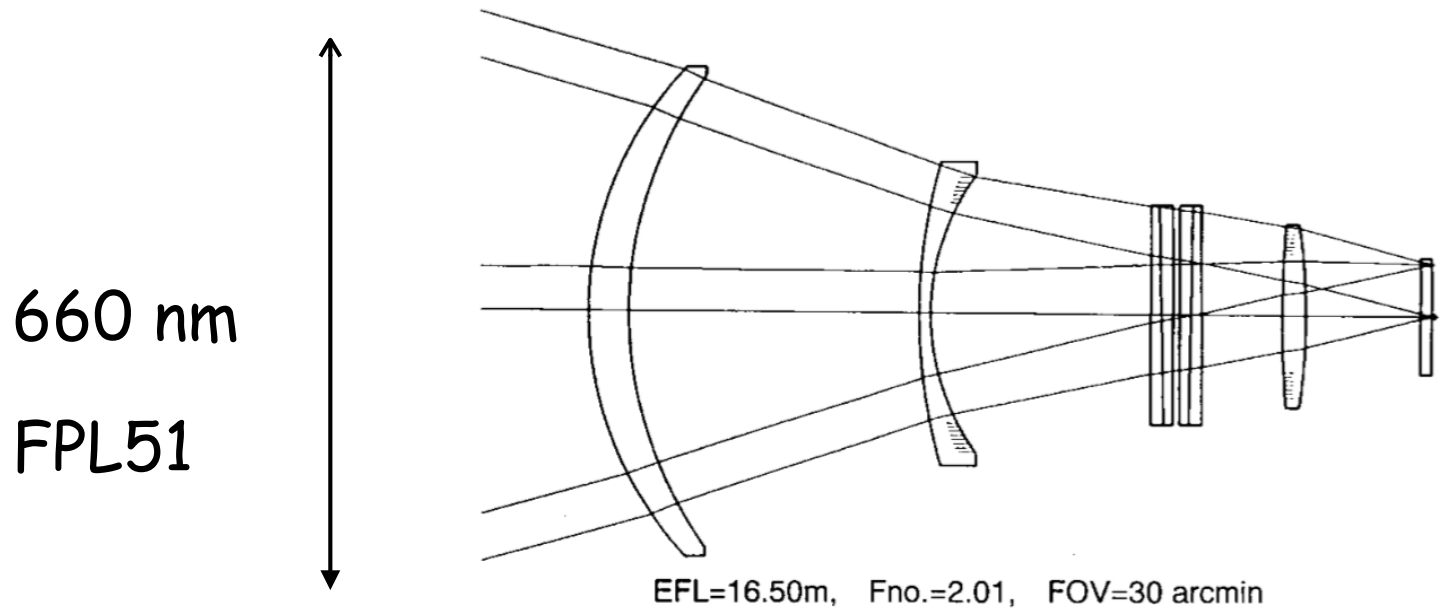


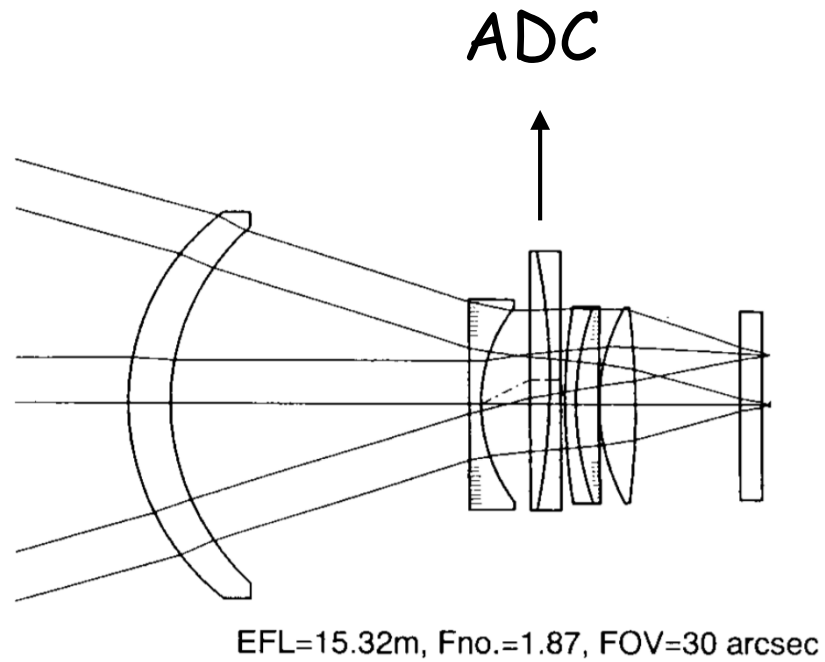
Figure 4-2. Nariai's Primary Corrector with direct-vision prism ADC (Nariai et al. 1985)

OHARAの大口徑低分散ガラス

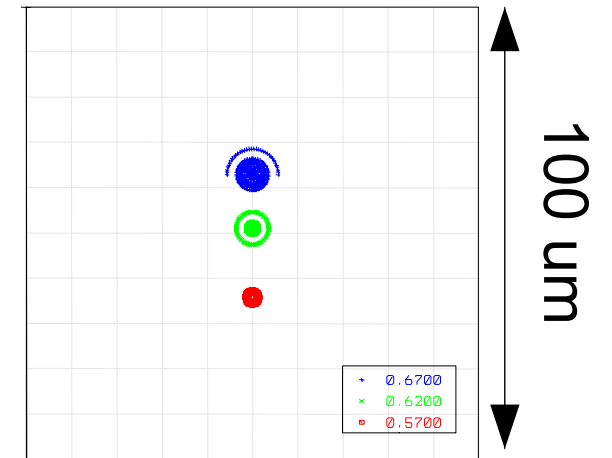
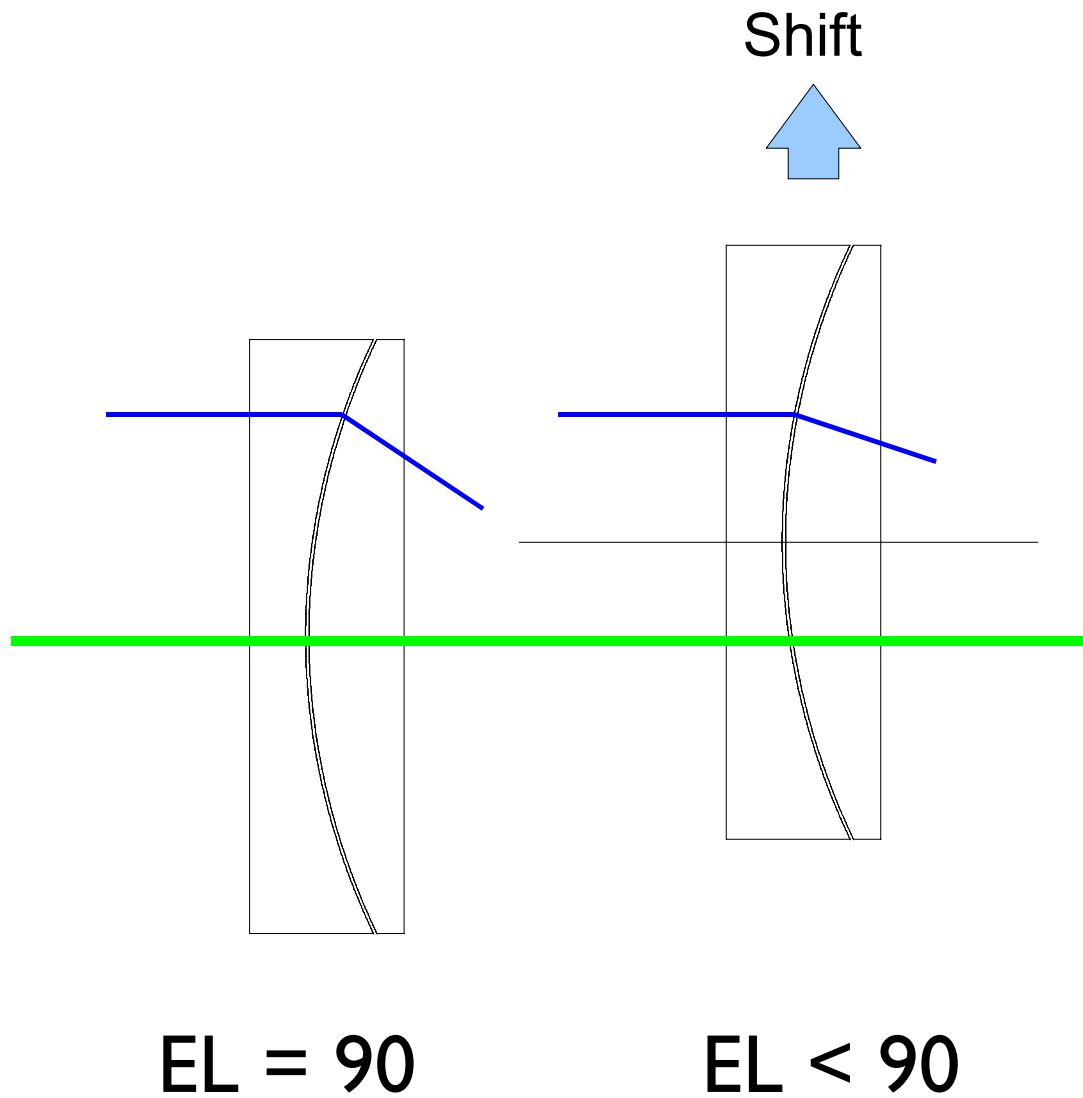
試作 → 失敗

# すばるの主焦点

Takeshi (武士) design

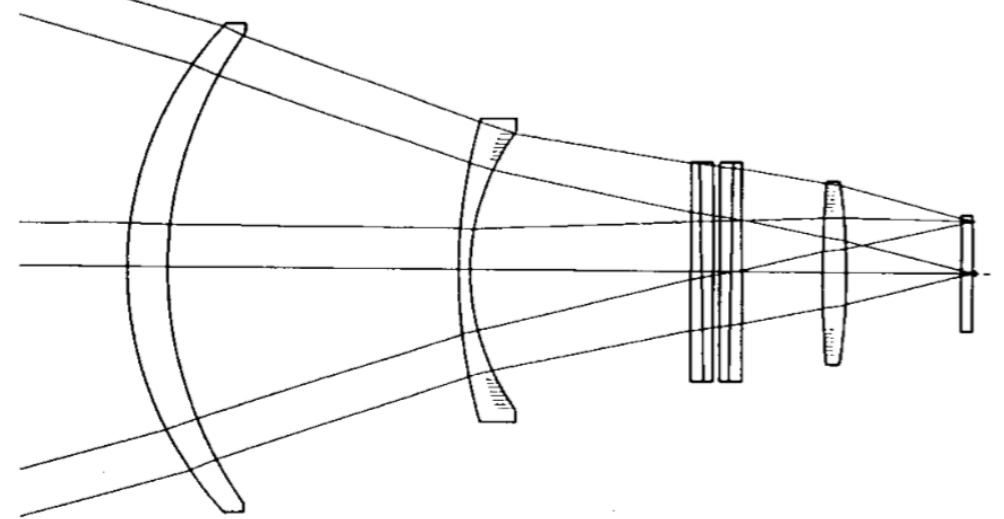


# Lateral Shift ADC (Takeshi 2000)



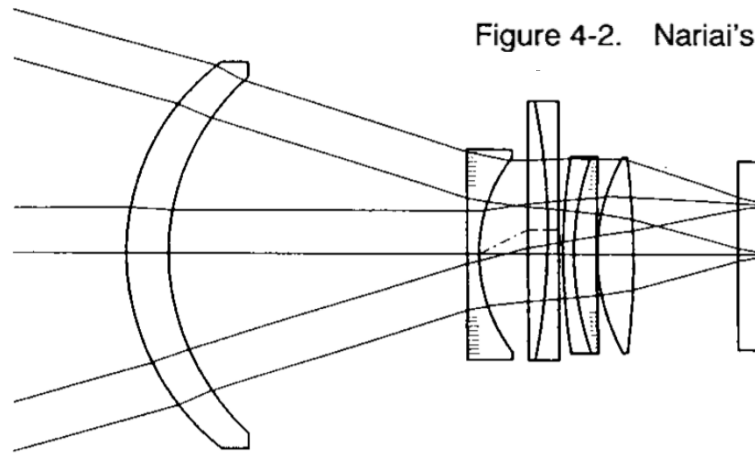
# すばるの主焦点

Takeshi (武士) design



EFL=16.50m, Fno.=2.01, FOV=30 arcmin

Figure 4-2. Nariai's Primary Corrector with direct-vision prism ADC (Nariai et al.)



EFL=15.32m, Fno.=1.87, FOV=30 arcsec

ADCの面を収差補正にも使える

コンパクトな光学系 → 製造可能になった

# Suprime-Cam

1999/01	カセグレン焦点でFirst Light
2000/06	主焦点でFirst Light
2001/04	すべてのCCDがMIT/LL CCID20に
2008/08	浜松完全空乏型CCDに置き換え Mfront -> Mfront2 MessiaIV -> MessiaV
2011/07	水没
2017	引退予定

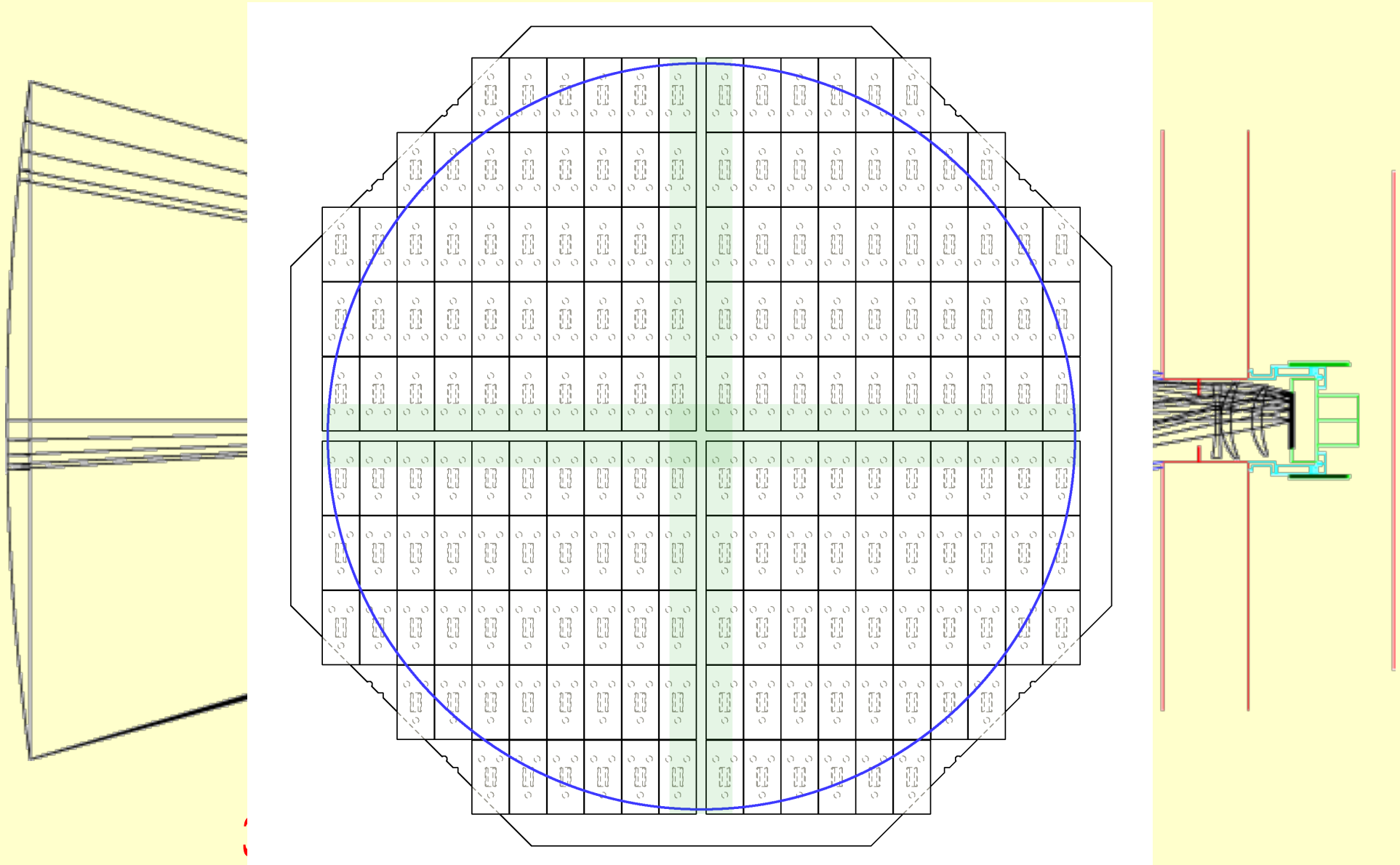
# 新型カメラ構想

## 観測プロジェクト計画

Camera	$A\Omega$	Telescope
MegaCam	9.6	CFHT 3.6 m
Suprime-Cam	10.1	Subaru 8.2 m
Pan-STARRS	53.6	1.8 m x 4
DES	37.4	CTIO 4m
LSST	329	6.5 m (equiv.)
<b><math>\pi</math>-Cam</b>	<b>162</b>	<b>直径2 度</b>



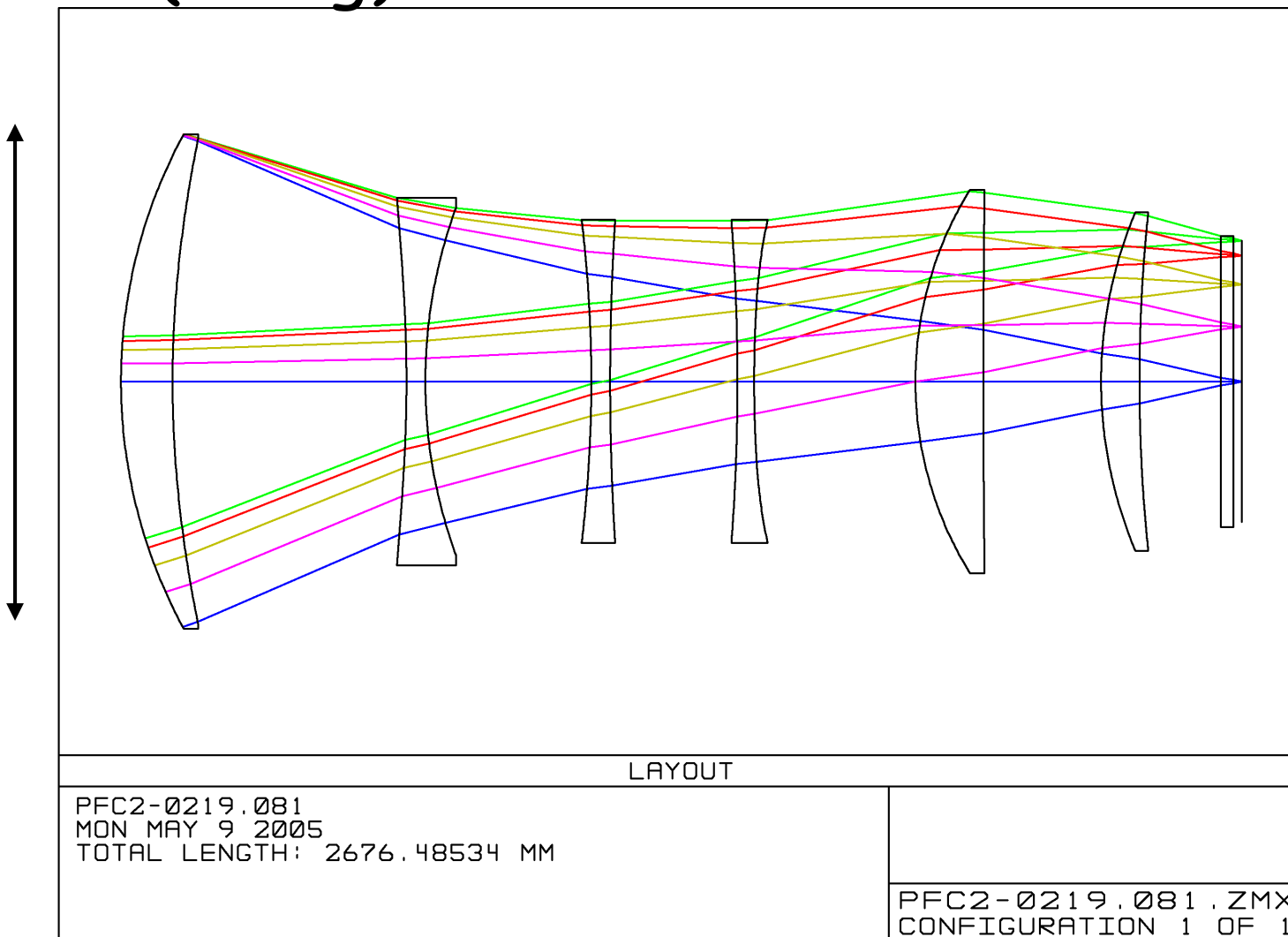
# Next Generation Camera: $\pi$ -Cam



# 新型カメラ構想

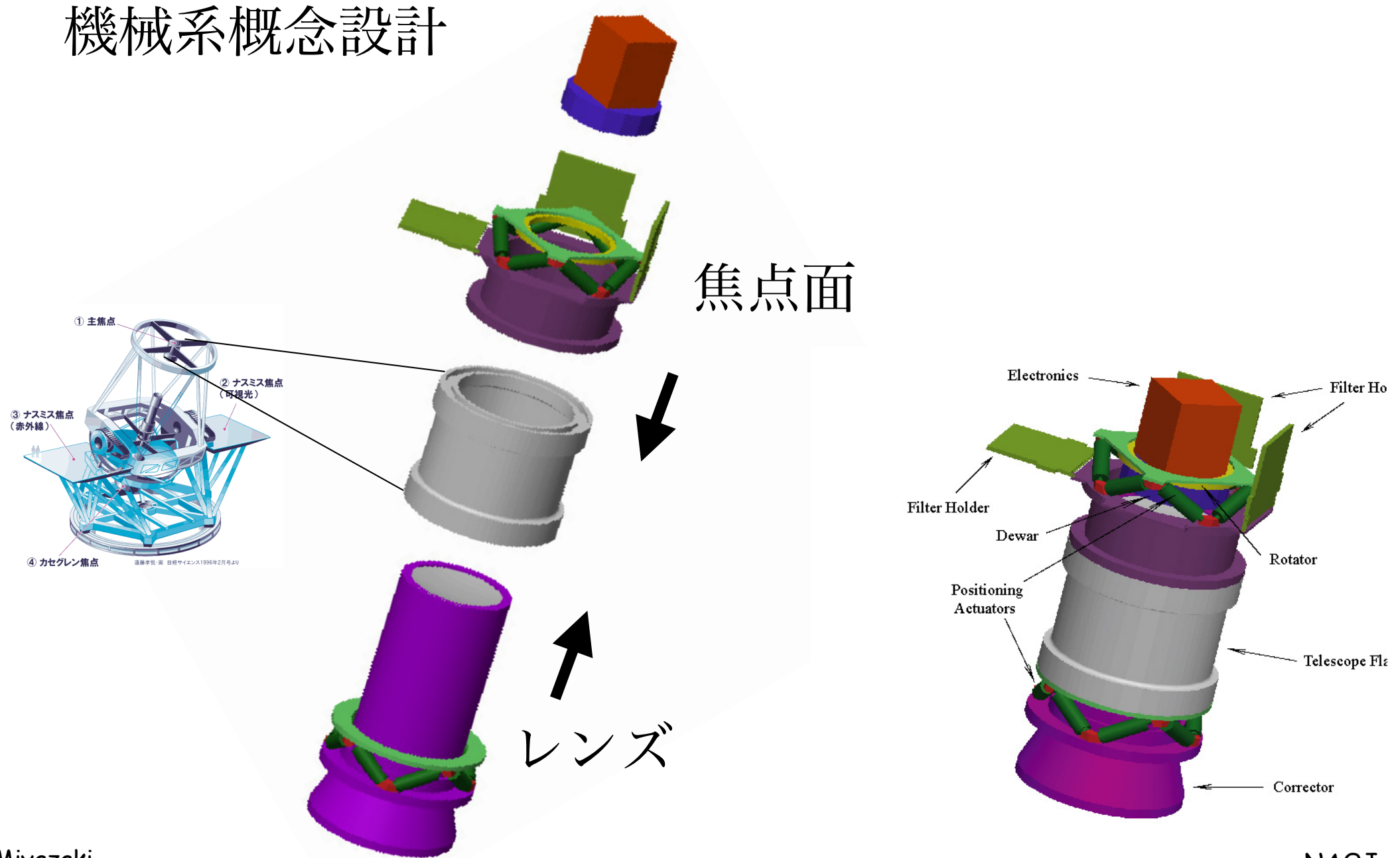
## 補正光学系 (2 deg)

1.2 m Quarz



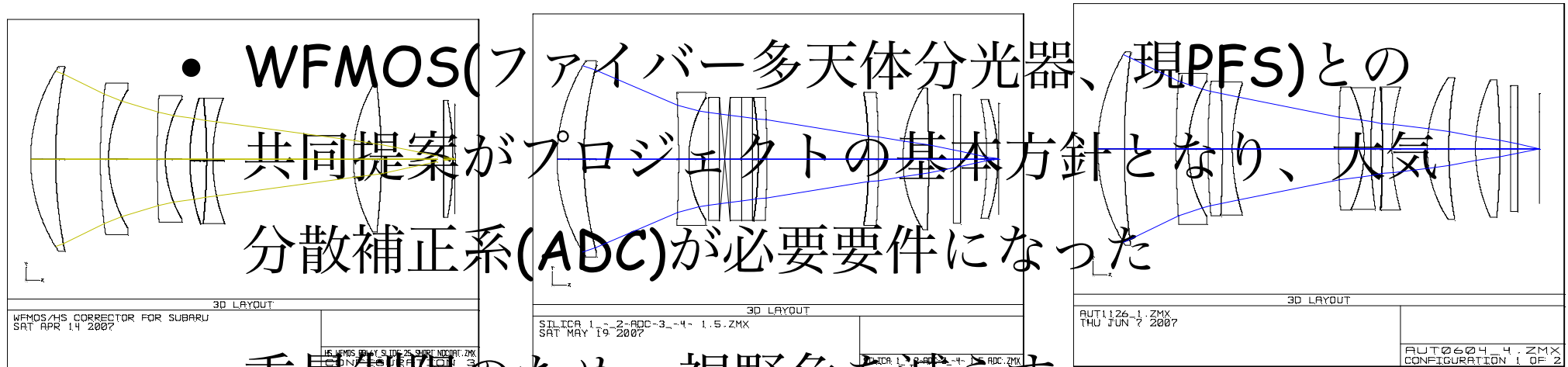
キヤノンを退職されていた、武士さん(故人:Suprime-Cam補正系担当)に設計依頼

## 機械系概念設計



# 新型カメラ構想

光学系 2度 → 1.5度



- WFMOS(ファイバー多天体分光器、現PFS)との共同提案がプロジェクトの基本方針となり、大気分散補正系(ADC)が必要要件になった
- 重量制限のため、視野角を減らす

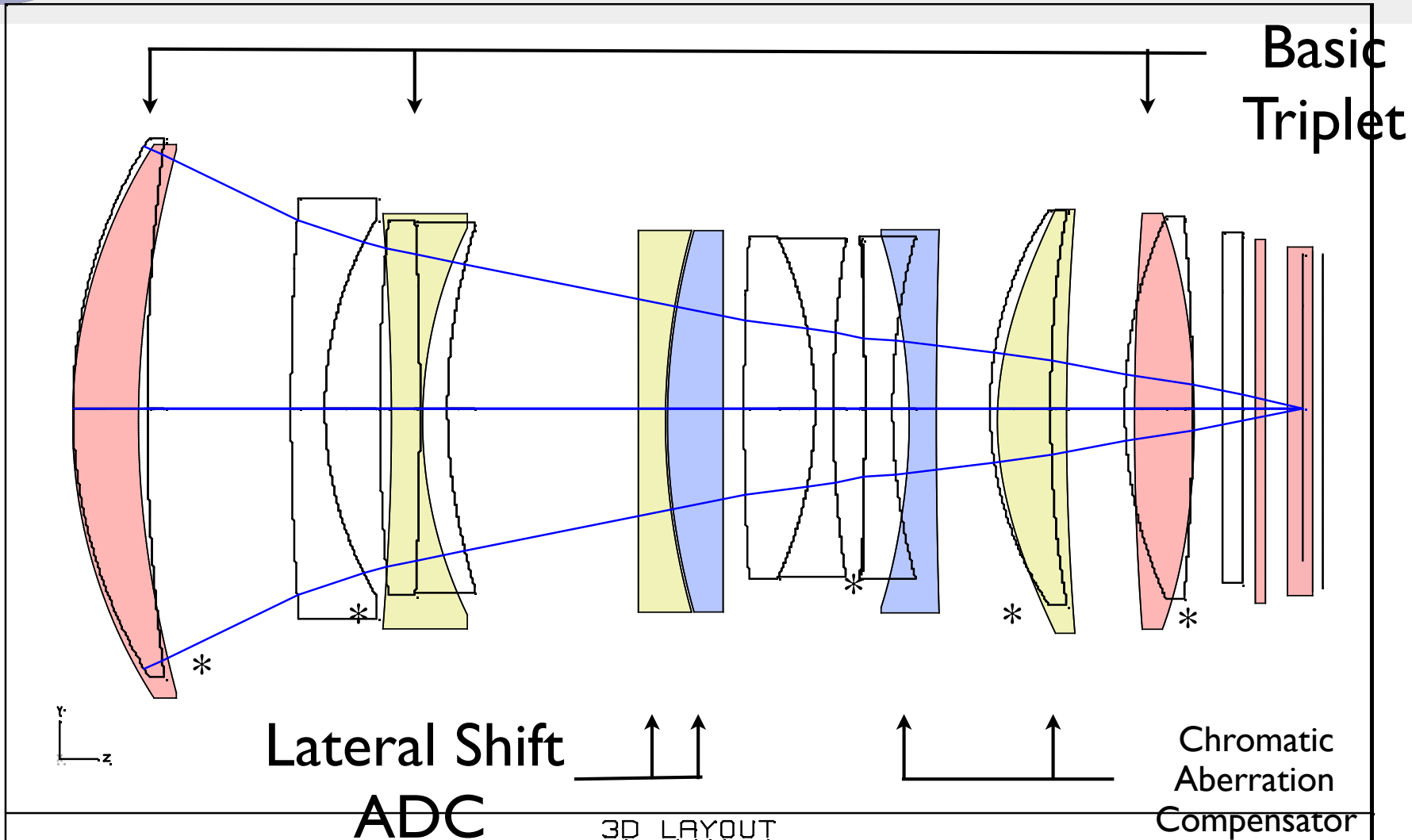
Gillingham氏

成相先生

田中(陽子)さん

これらを、キヤノンに持ち込み、詳細設計を依頼

# 新型カメラ構想



AUT1126\_1.ZMX  
THU JUN 7 2007

補正系(最終設計)

AUT0604\_4.ZMX  
CONFIGURATION 1 OF 2

- Quartz
- BSL7Y
- PBL1Y

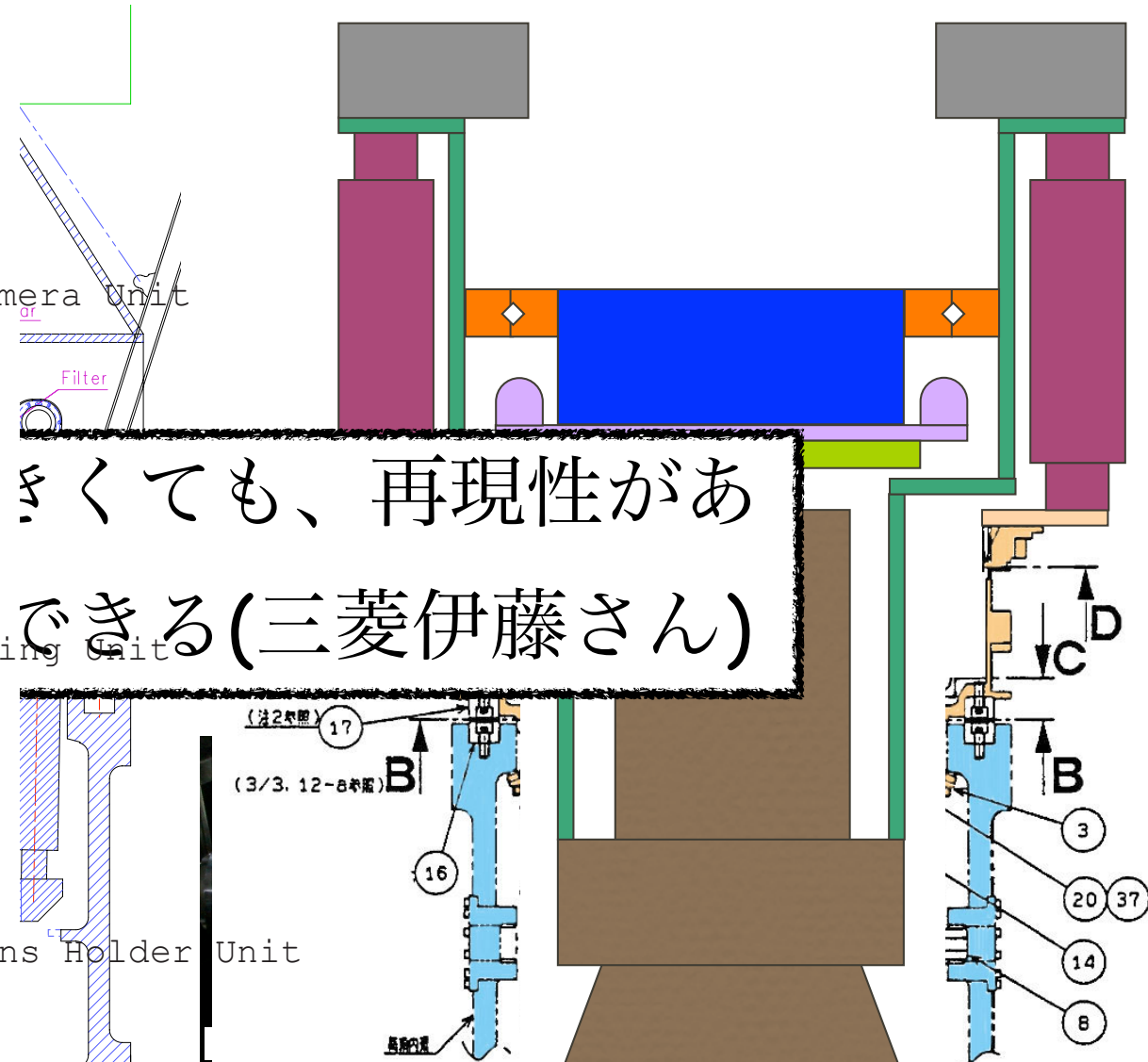
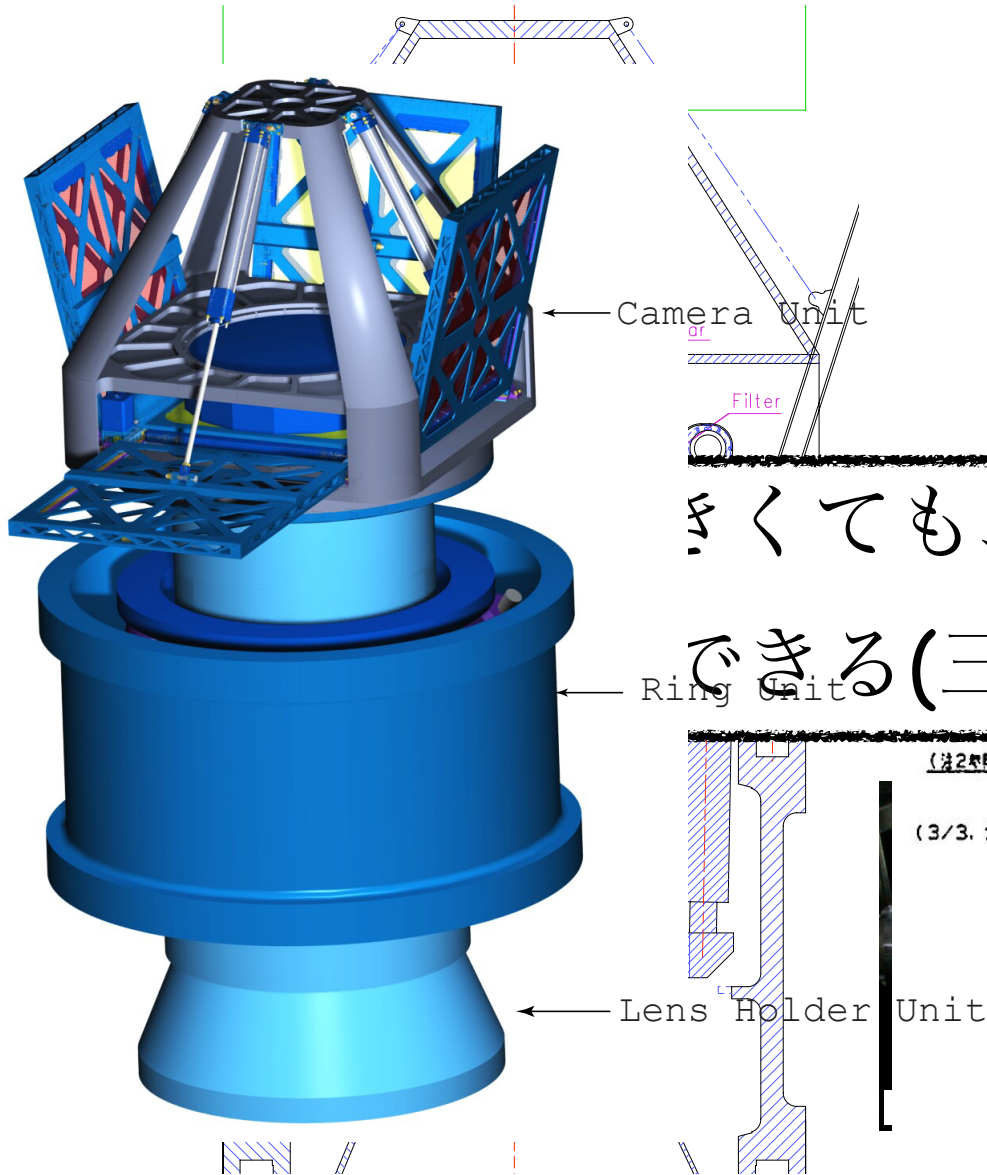
# 新型カメラ構想

機械系

国立天文台案

三菱案

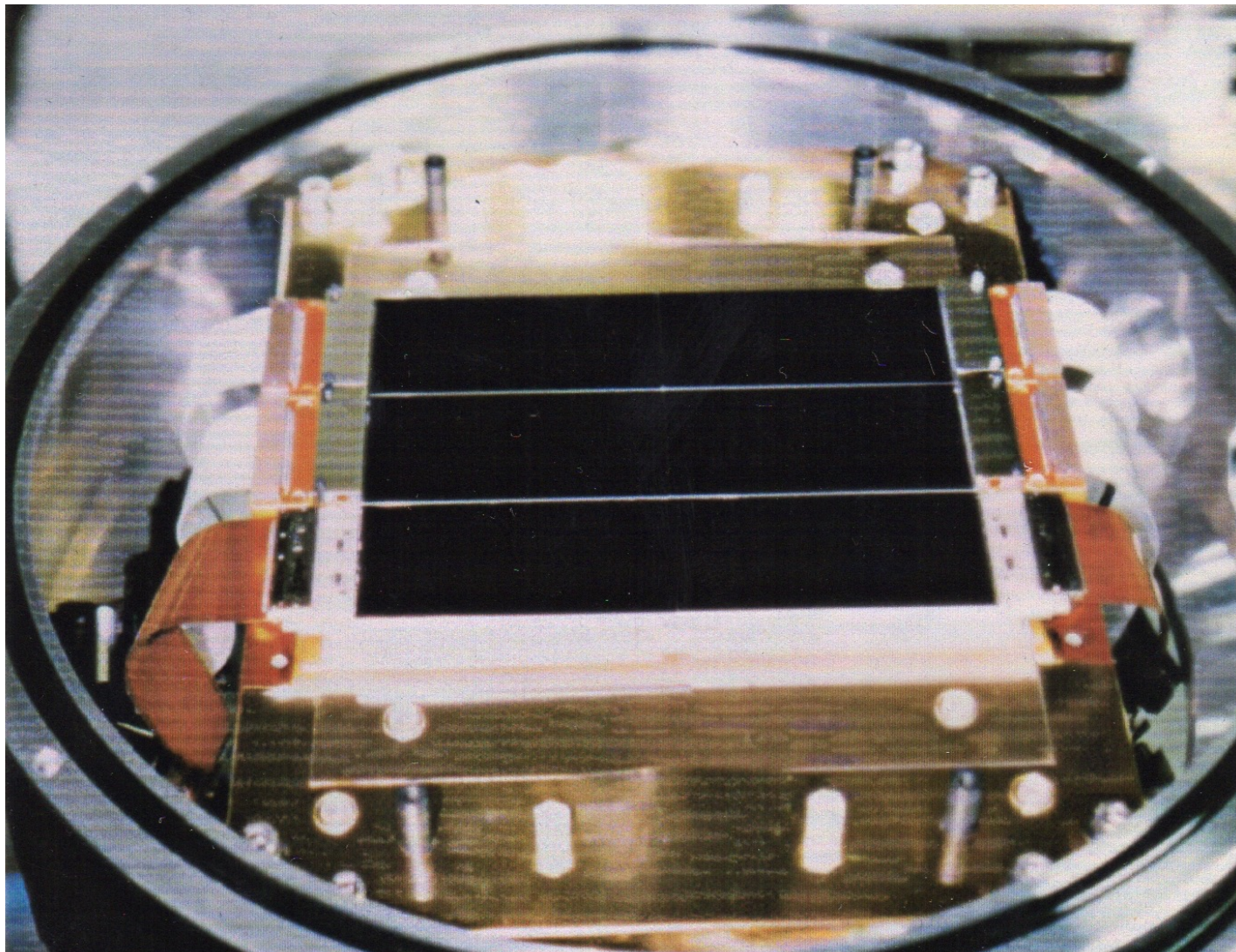
exch



ハーモニックドライブ社と共同試作



# 新型カメラ構想



最初期のSC

FL時MIT素子は  
2個しかなかった

CCDはProject  
の生命線

独自開発を決  
める

新しい要素  
完全空乏型

2002

2003

2003

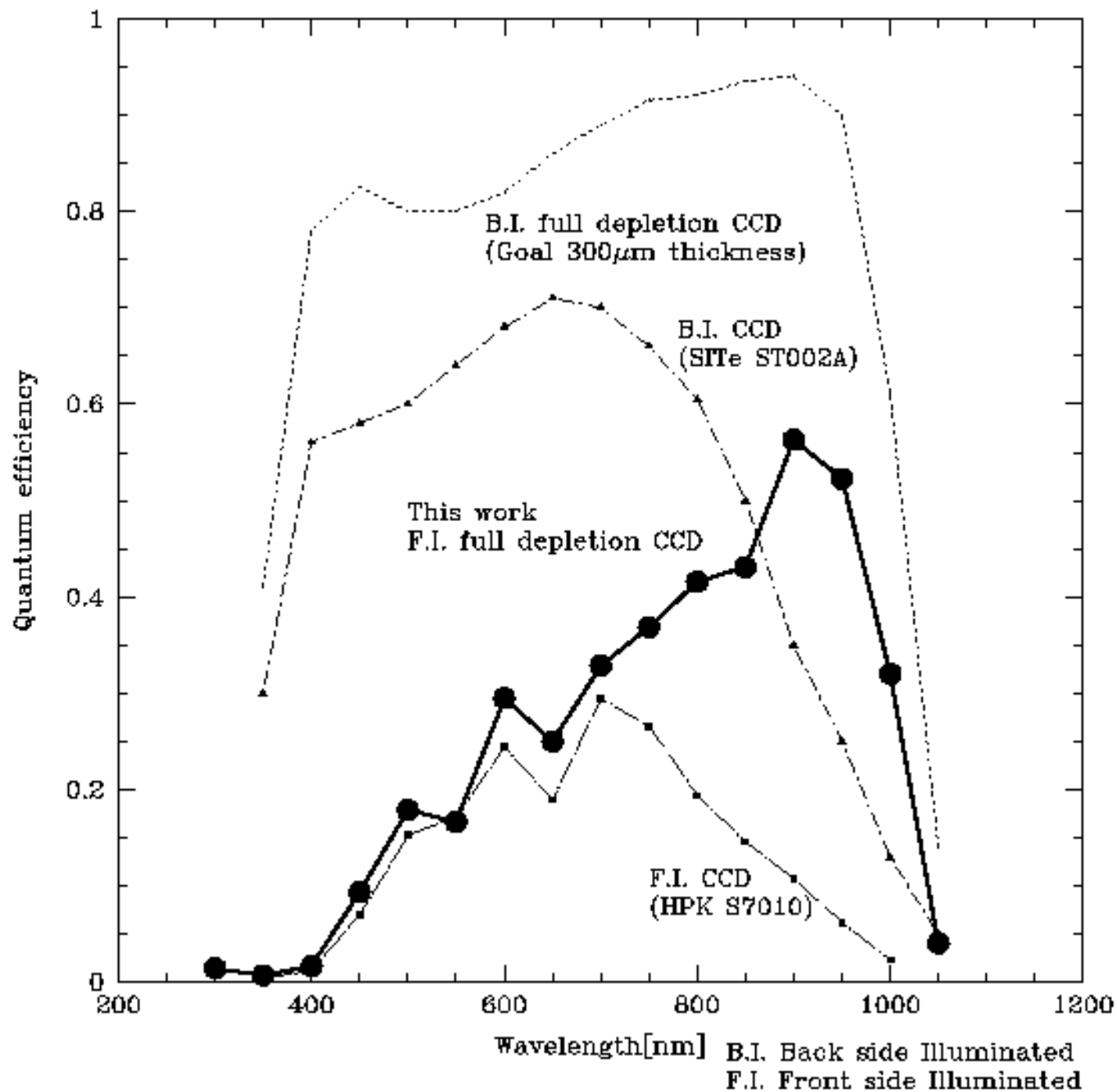
2004

2004

2005

2005

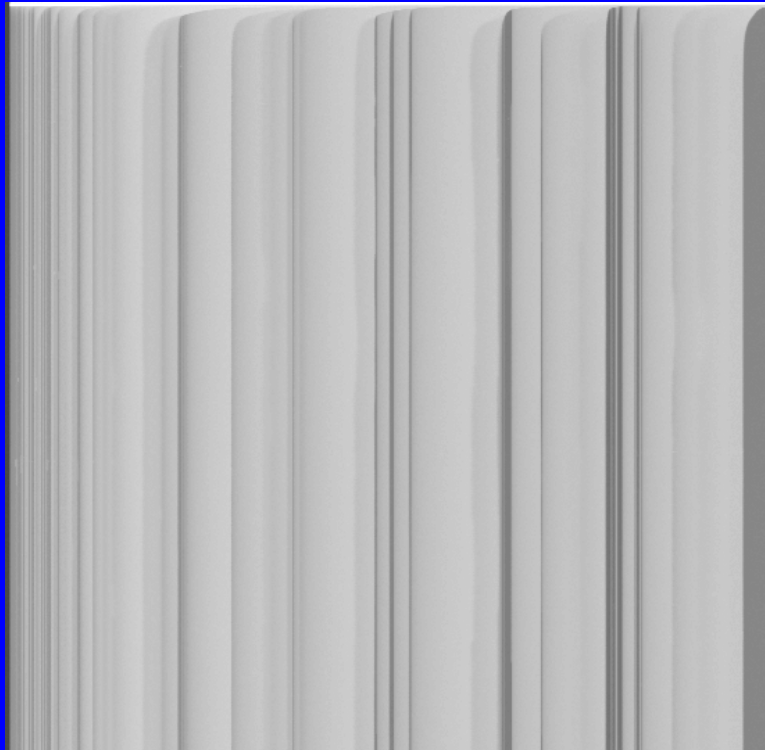
2005



g layer



# Reduction of dark current

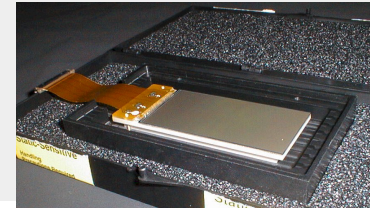


First BI CCD

100 e / s / pix at  $-30\text{ C}$

Adopting gettering layer on the backside  
to absorb metal ions

# 新型カメラ構想



CCD 浜松ホトニクスとの共同開発(再開)



2002年表面



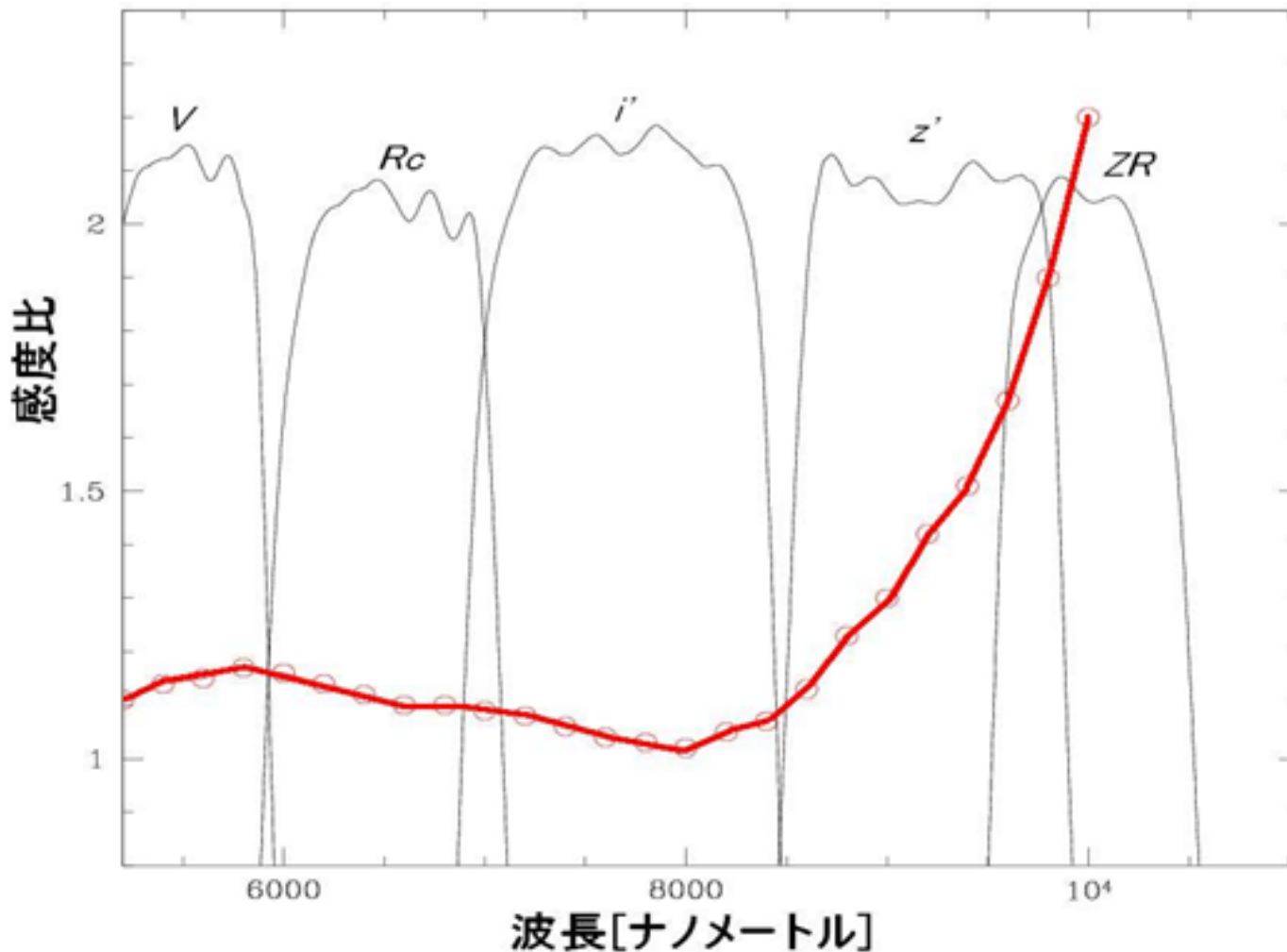
2003年裏面



2007年裏面

# 新型カメラ構想

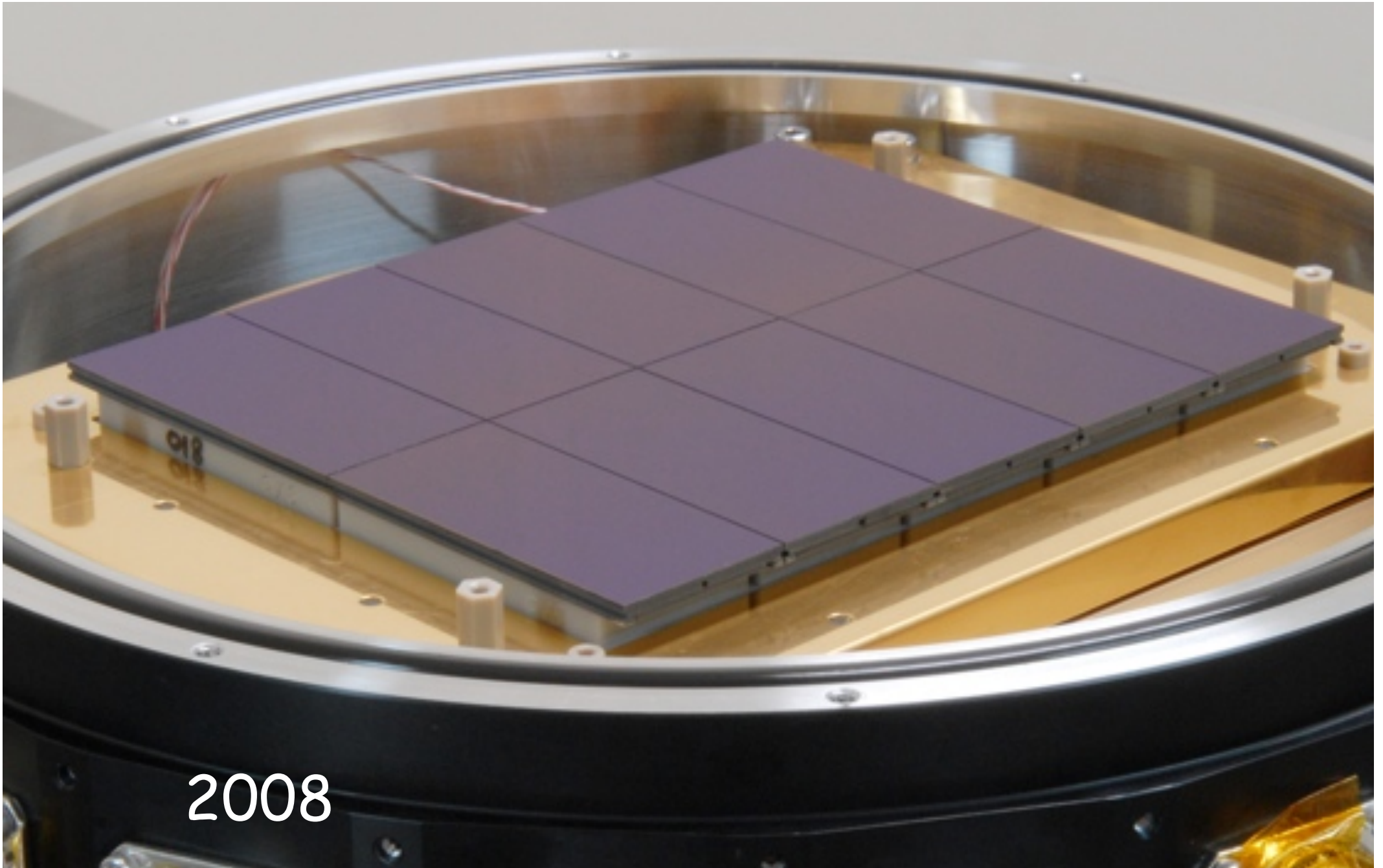
CCD 浜松ホトニクスとの共同開発



対 MIT/LL 量子効率比

「ひとみ」も同型CCDを

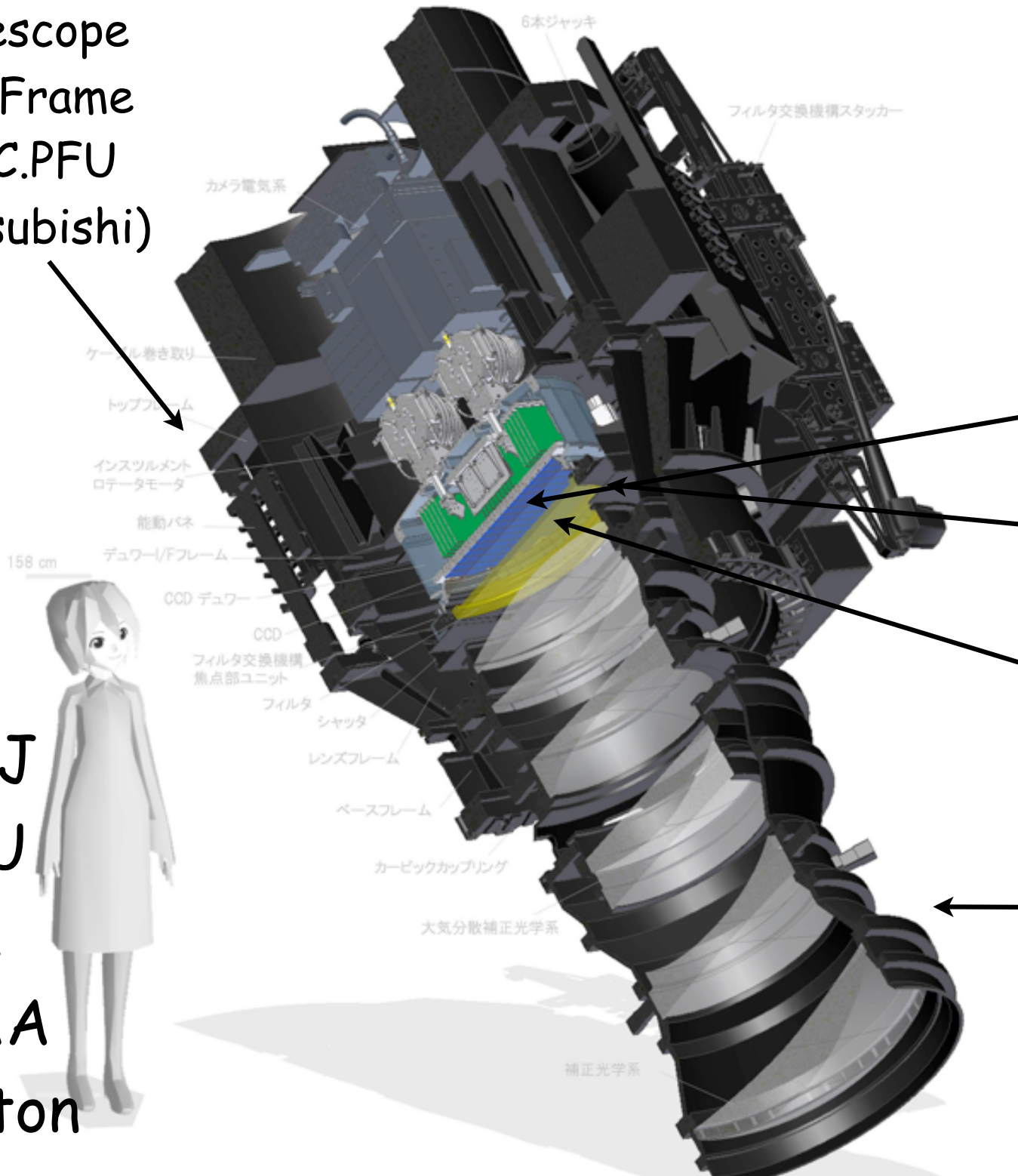
# 新型カメラ構想



2008



Telescope  
I/F Frame  
HSC.PFU  
(Mitsubishi)

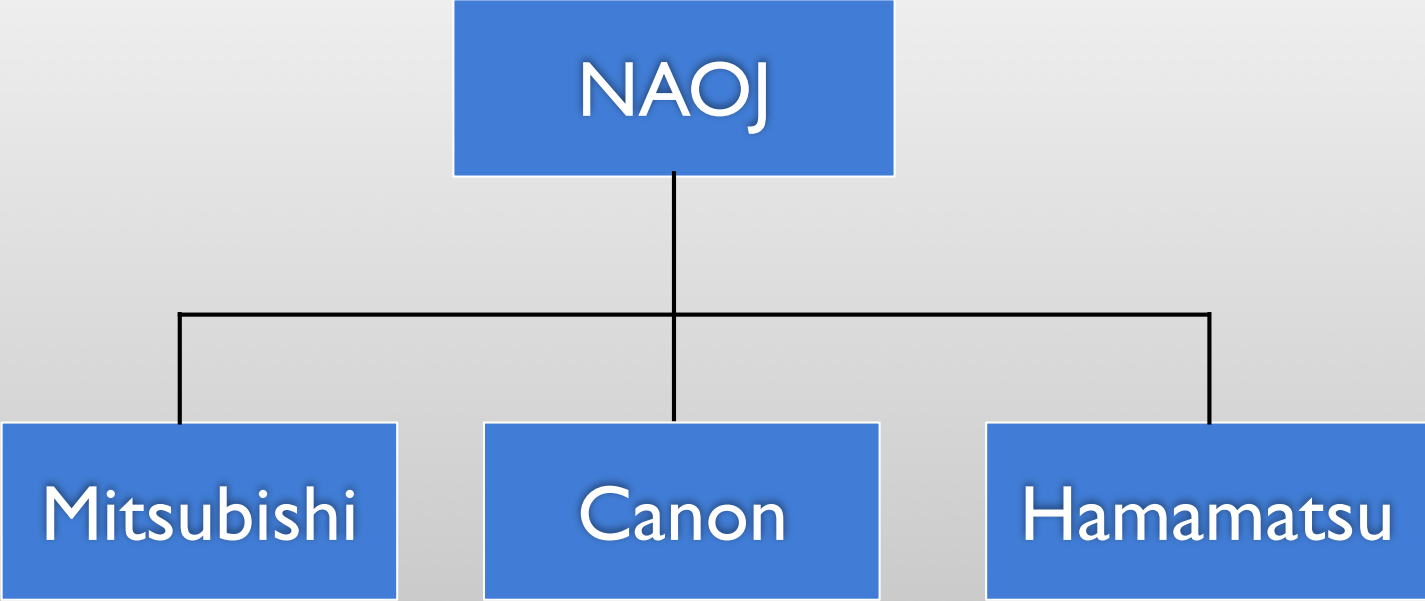


HSC.CAM  
CCD(HPK)  
Shutter  
Filter  
Lens  
(Canon)  
HSC.WF

NAOJ  
IPMU  
KEK  
ASIAA  
Princeton

## 詳細システム設計: (結像性能)

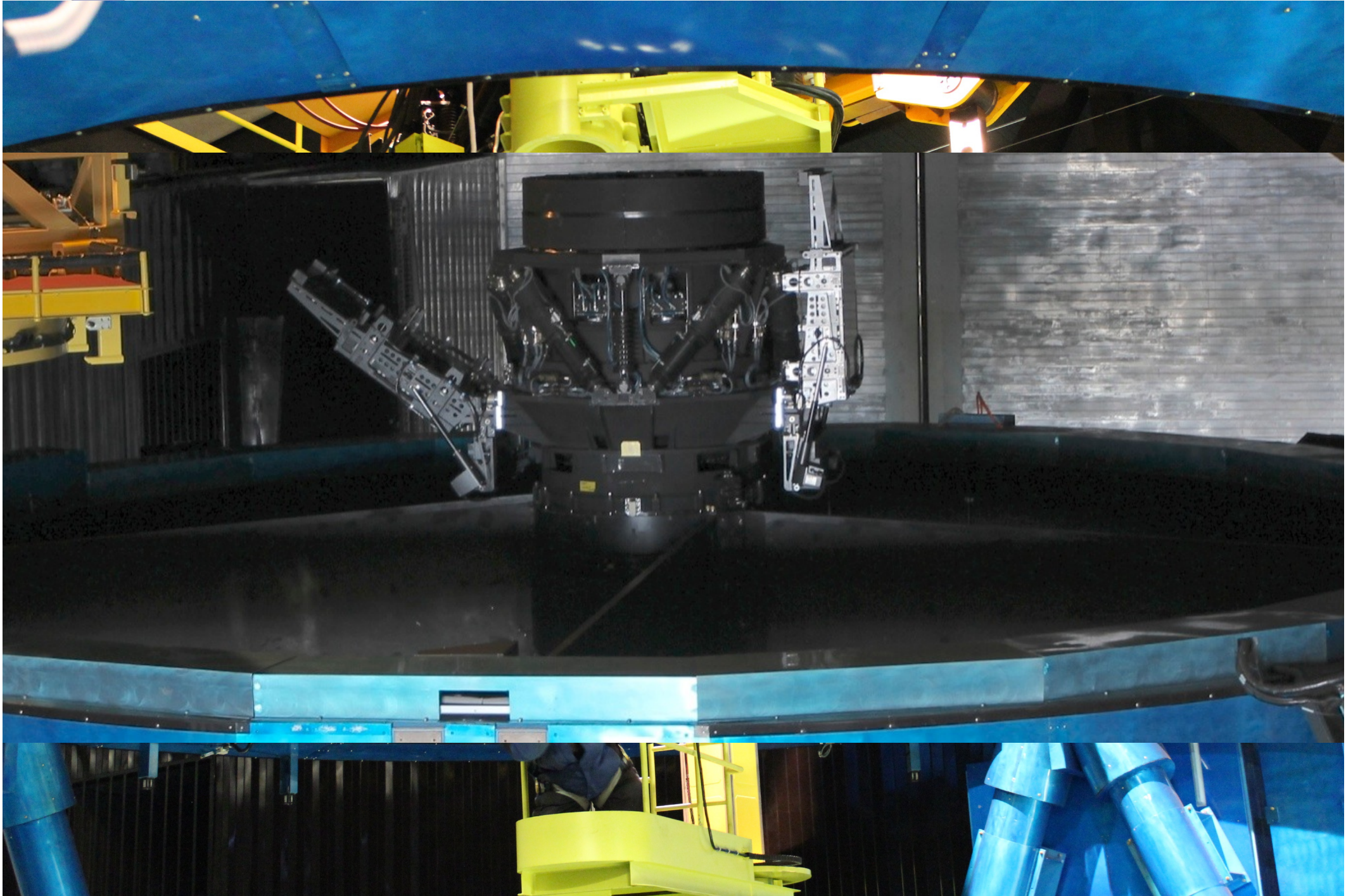
Table 5. Summary of the specifications for HSC units.

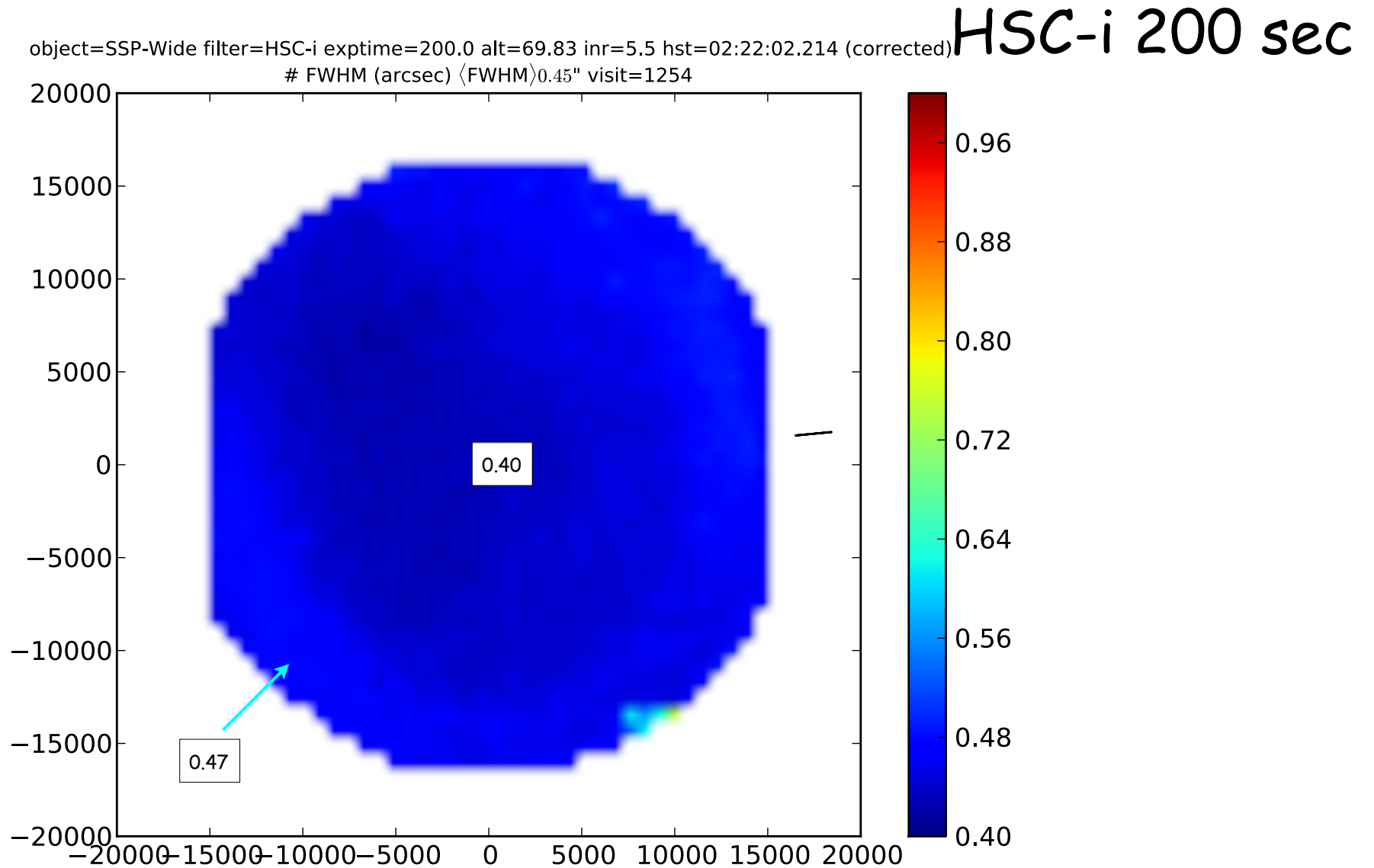
	Telescope	flexure mounting	un-repeatability	3.7	7.3	5.7	0.004	0.108	0.044	0.120
										





# HSCの開発



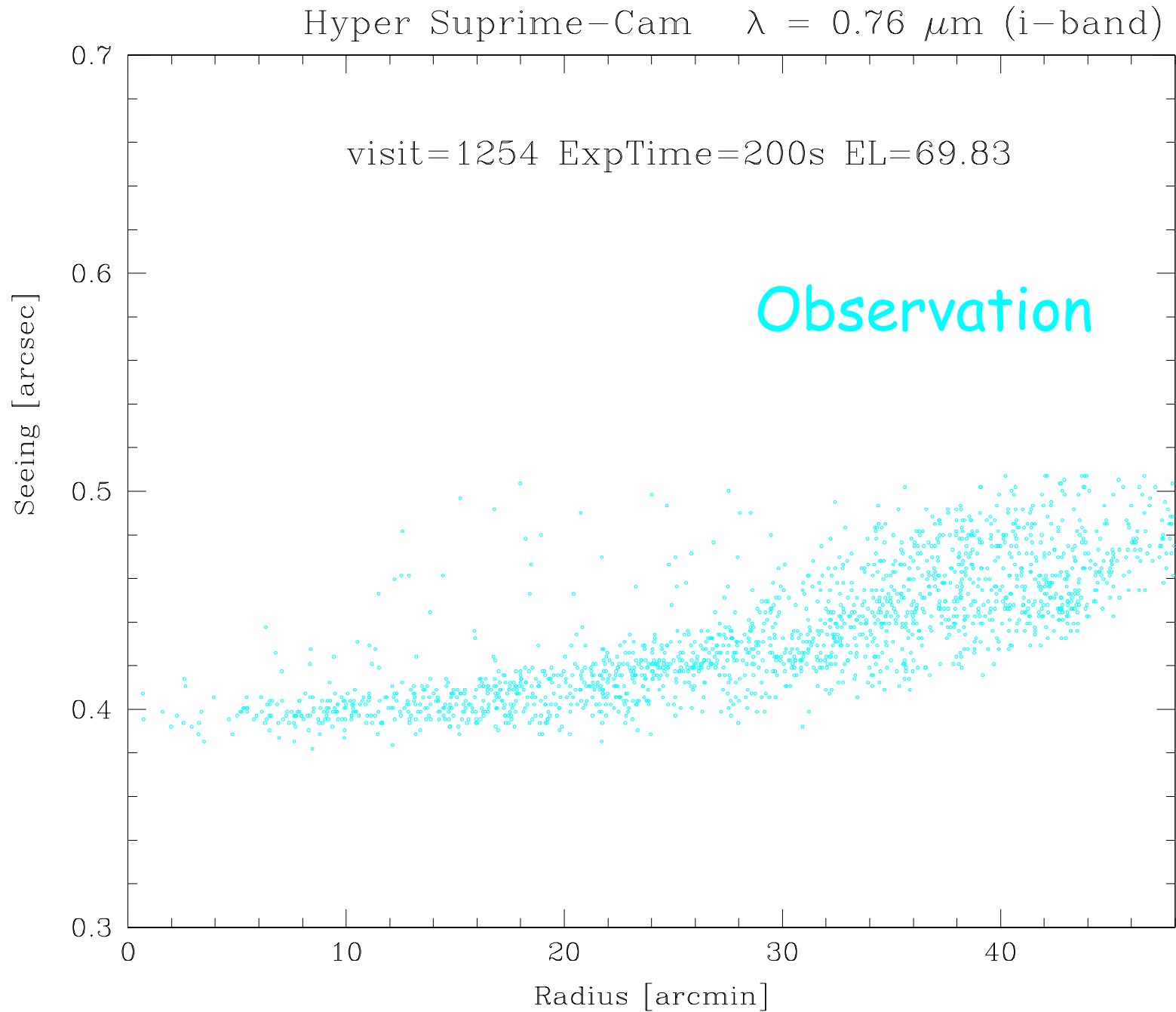


Very Sharp Image Realized after tilt correction



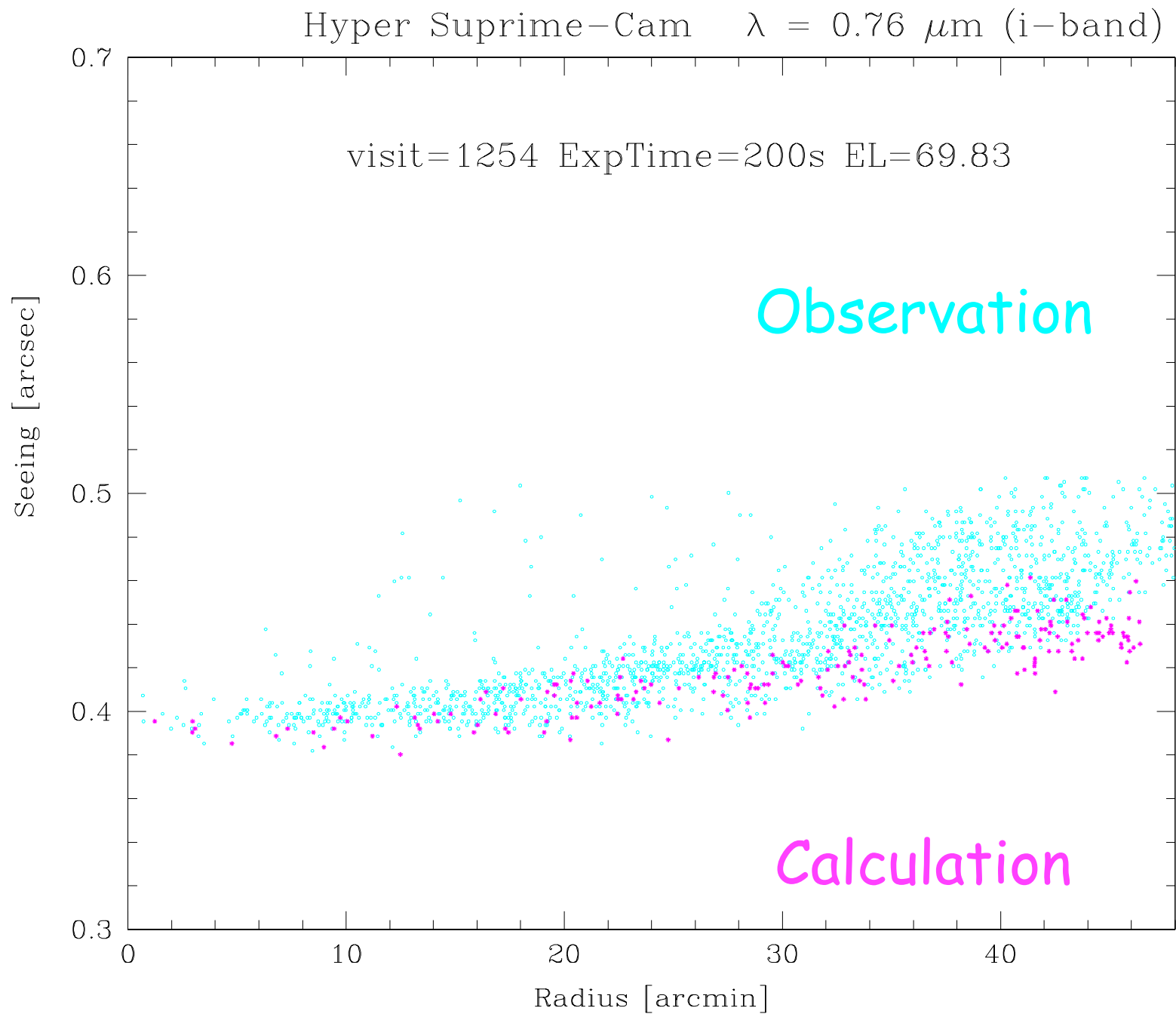


# HSCの性能評価



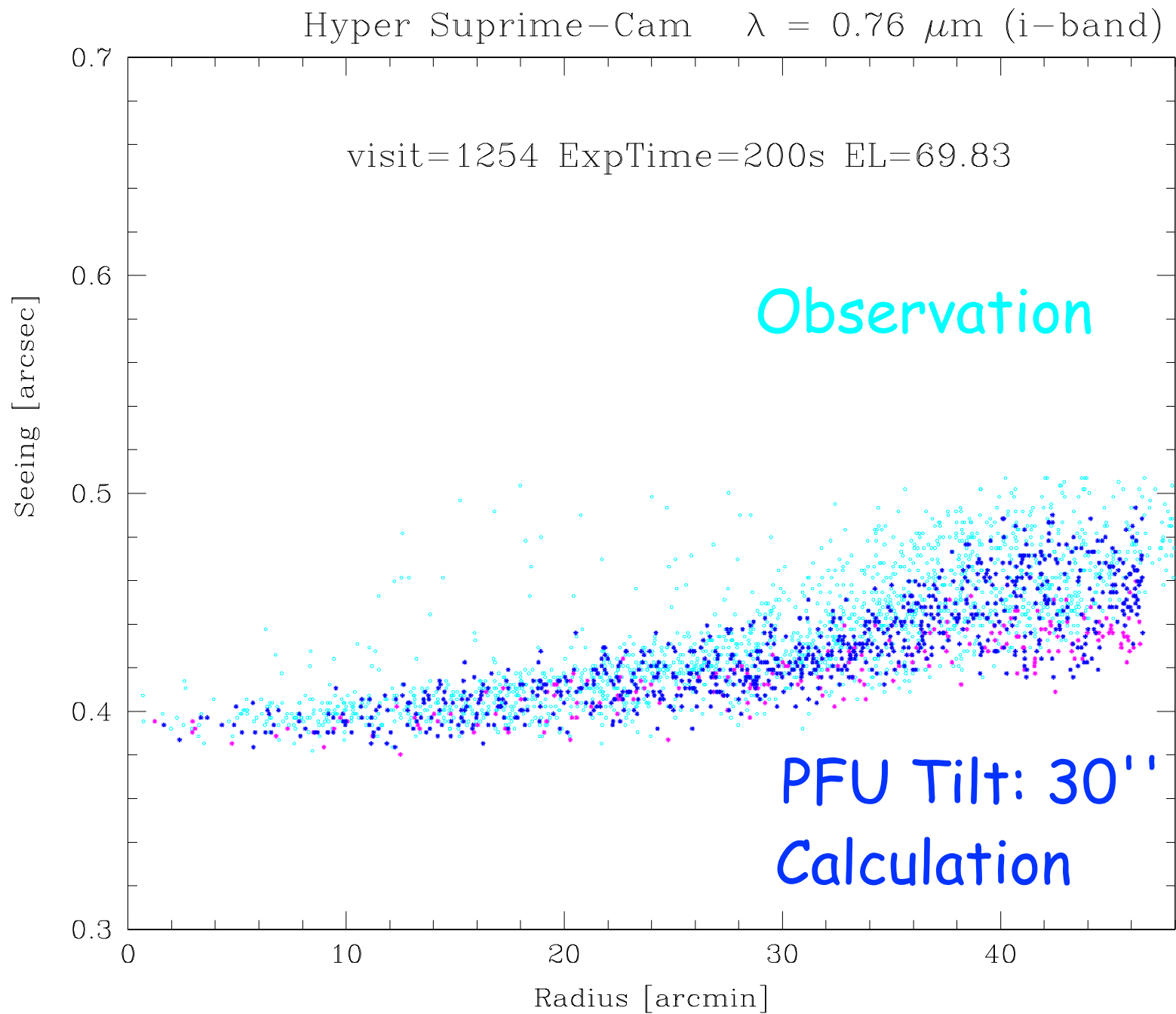


# HSCの性能評価

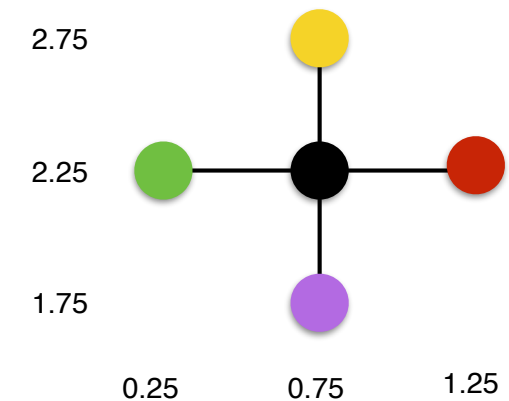
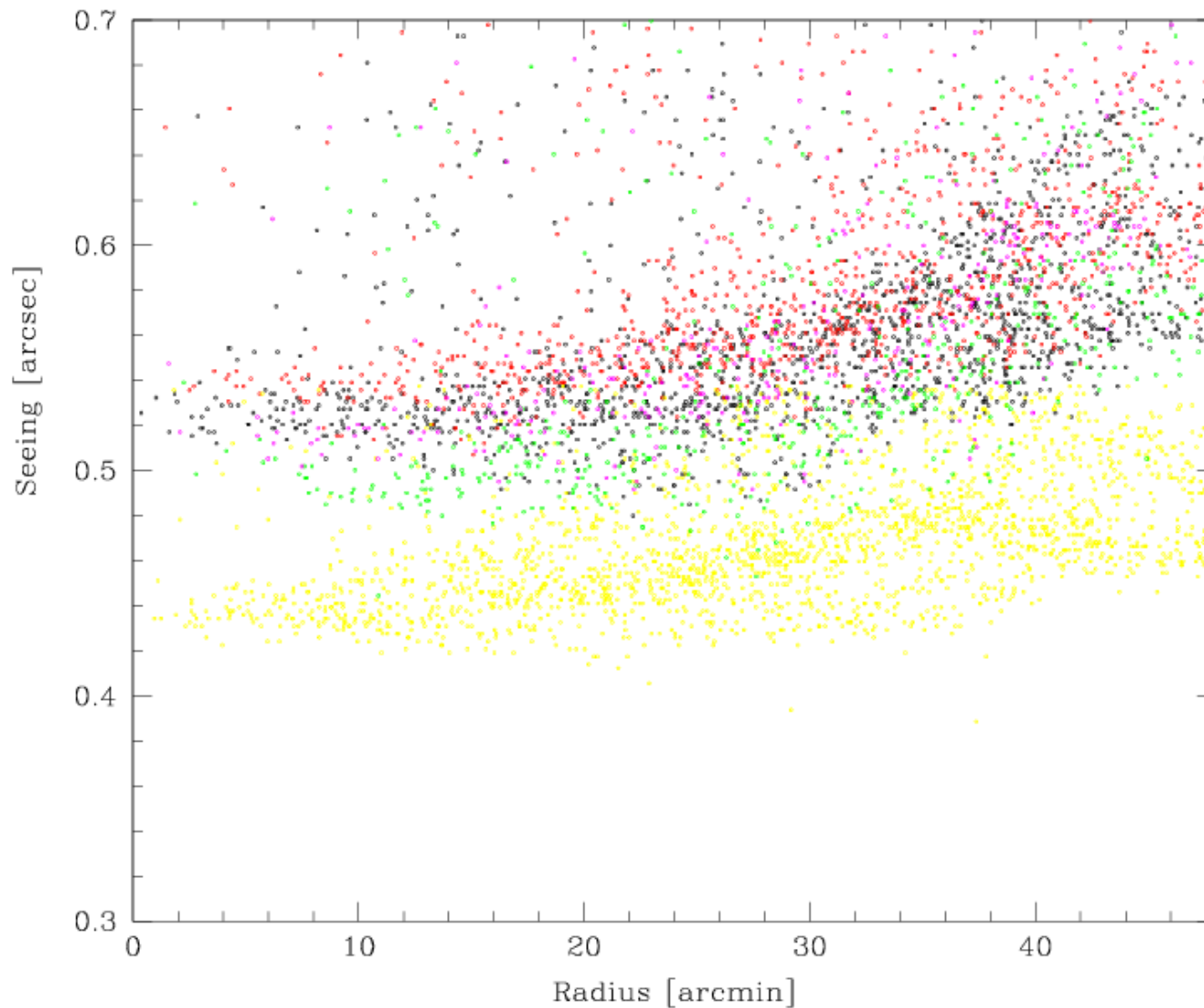




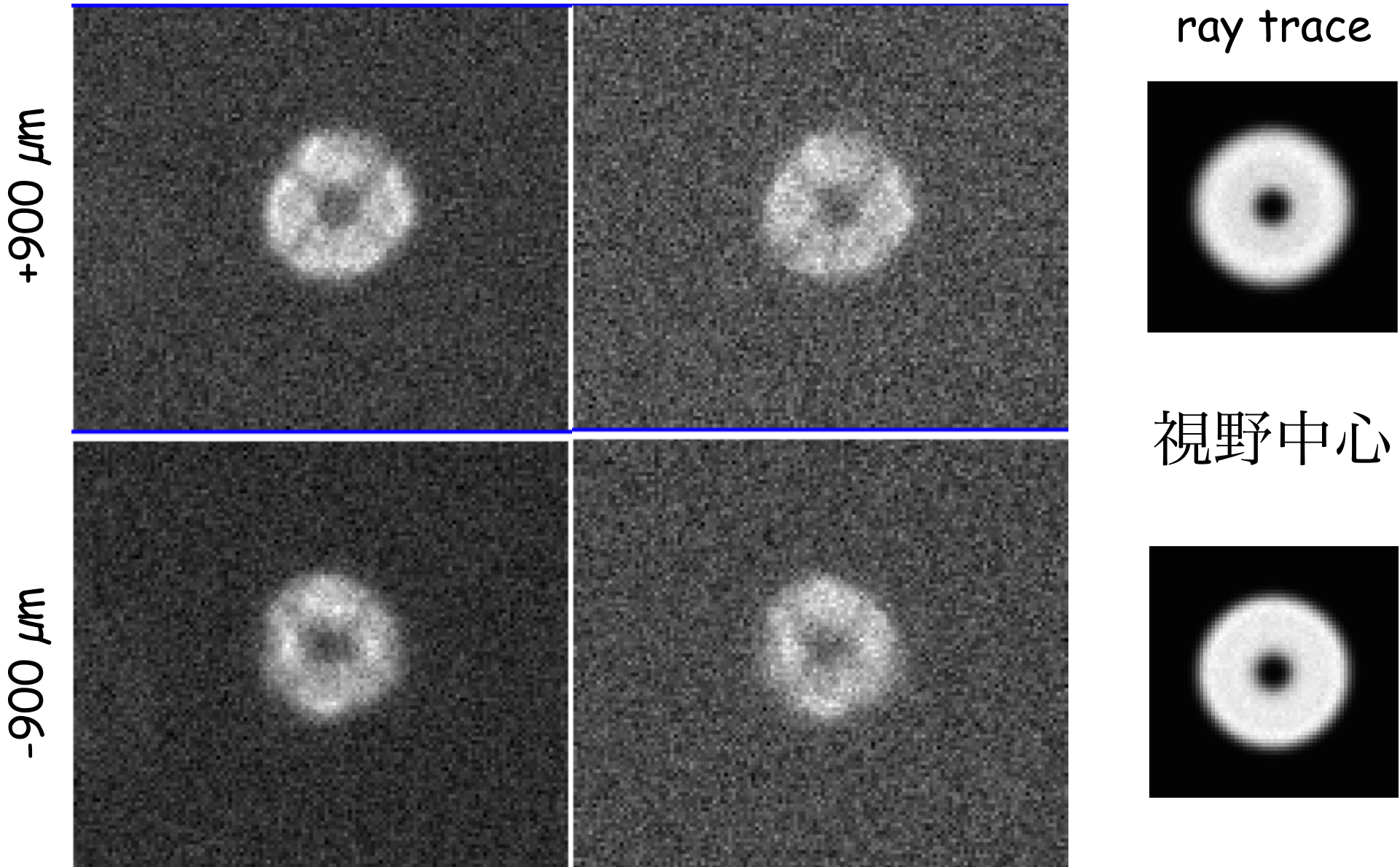
# HSCの性能評価



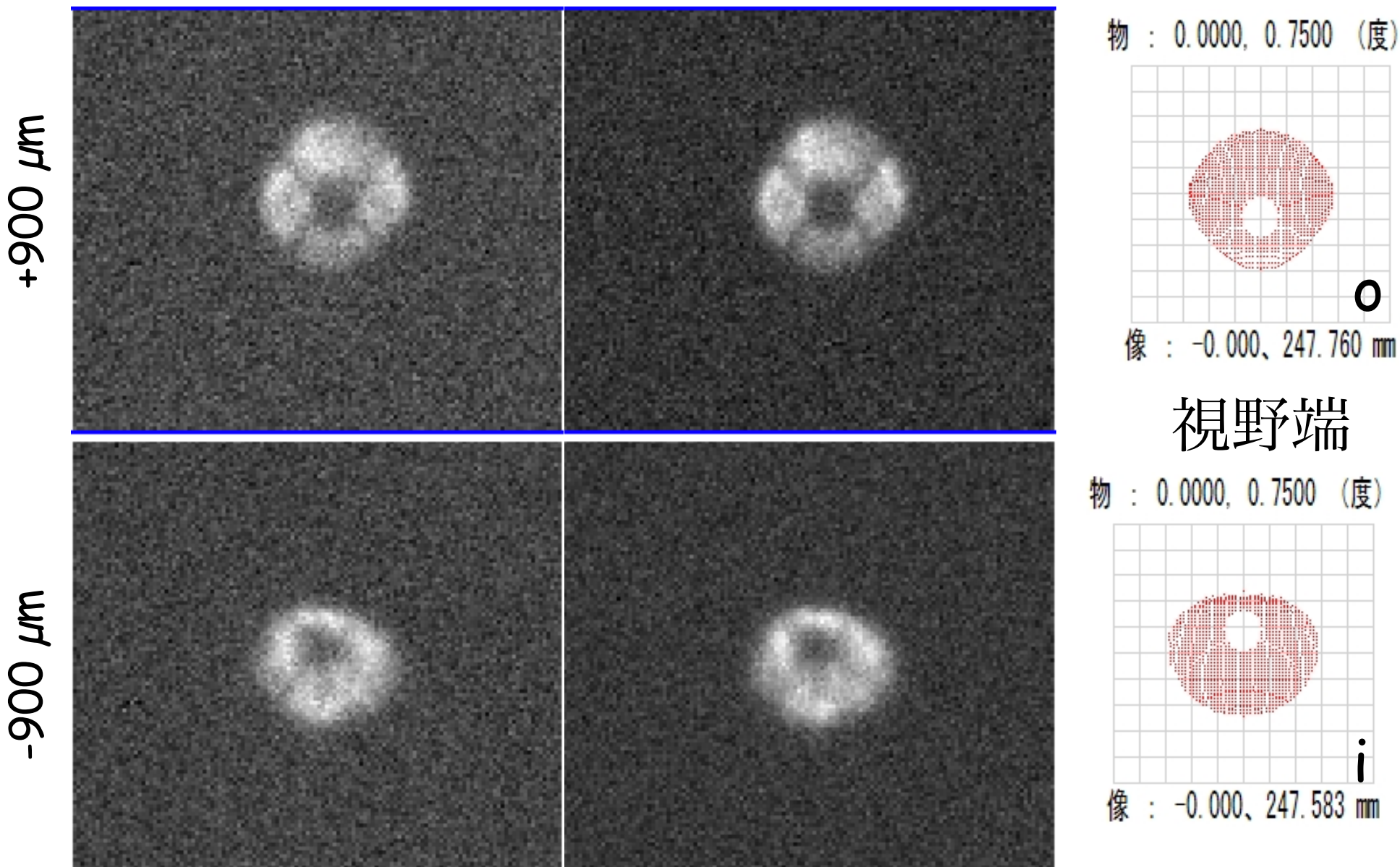
30分角傾けても . . .



最近の進展 Off-Focus画像から波面誤差を計測する方法を開発



最近の進展 Off-Focus画像から波面誤差を計測する方法を開発

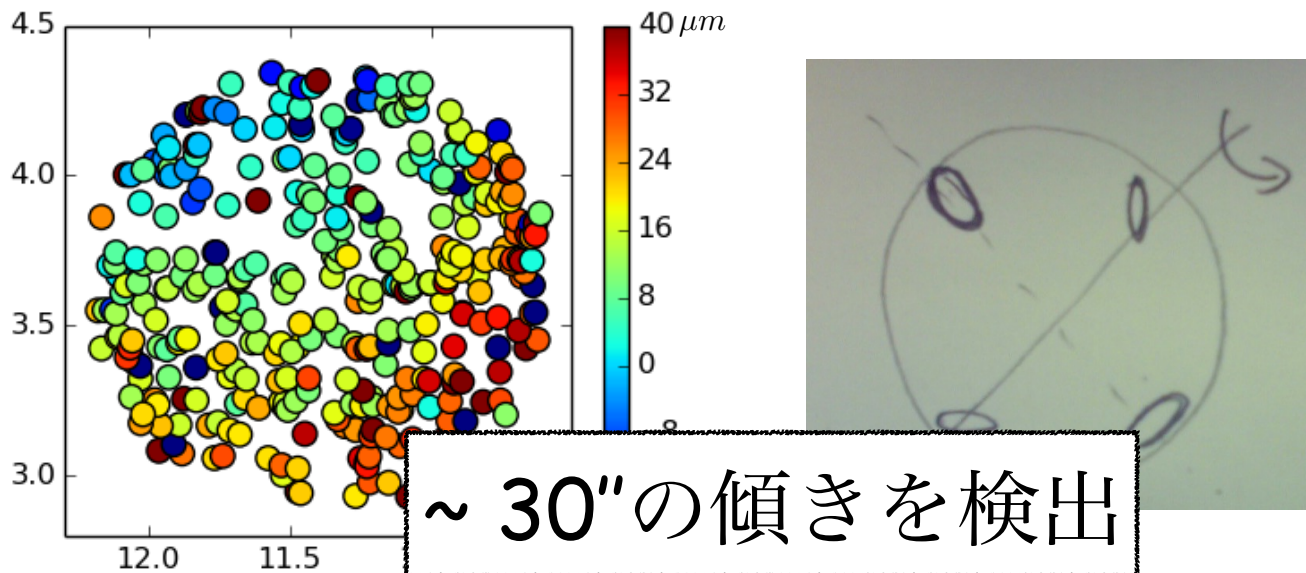




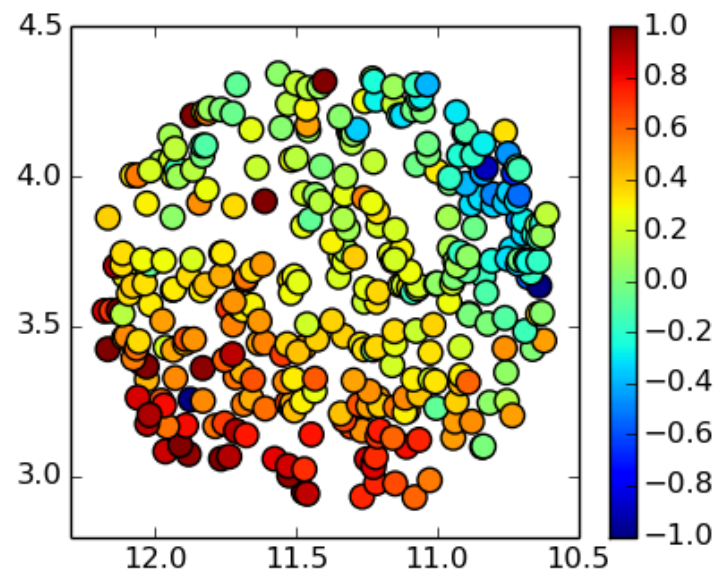
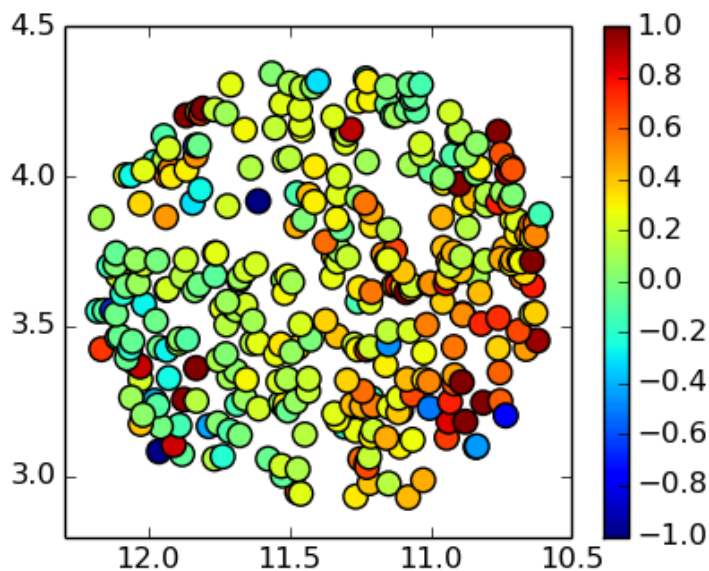
# HSCの性能評価

最近の進展 Off-Focus画像から波面誤差を計測する方法を開発

$\Delta a_4$   
defocus



$\Delta a_5$   
astig.(45)

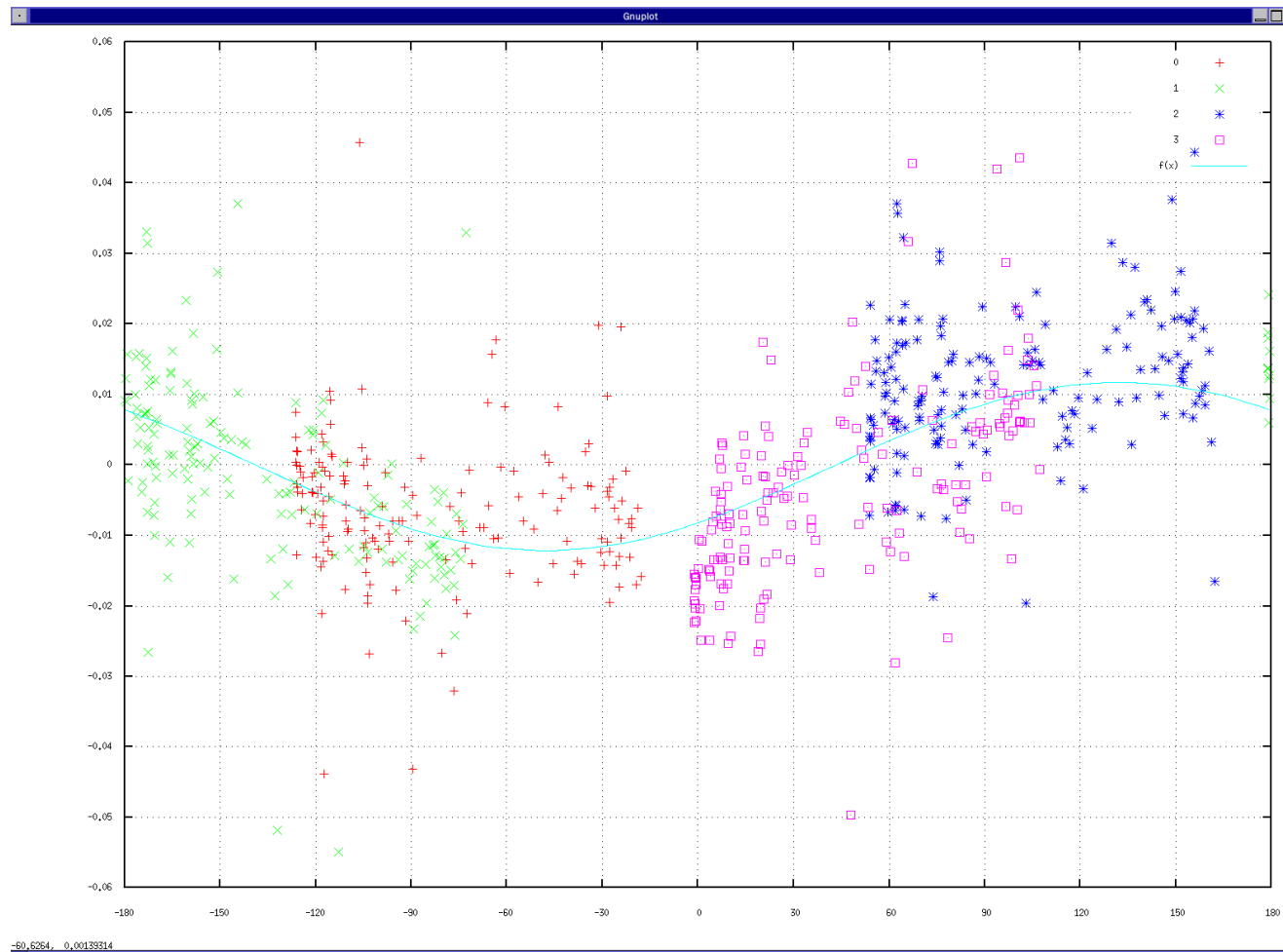


$\Delta a_6$   
astig.  
(0/90)

4隅に $\pm 200$   $\mu\text{m}$  offset pairを配置

各pairのoff focus像からa4を推定(seeing sizeは分離される)

De-Focus量  
a4

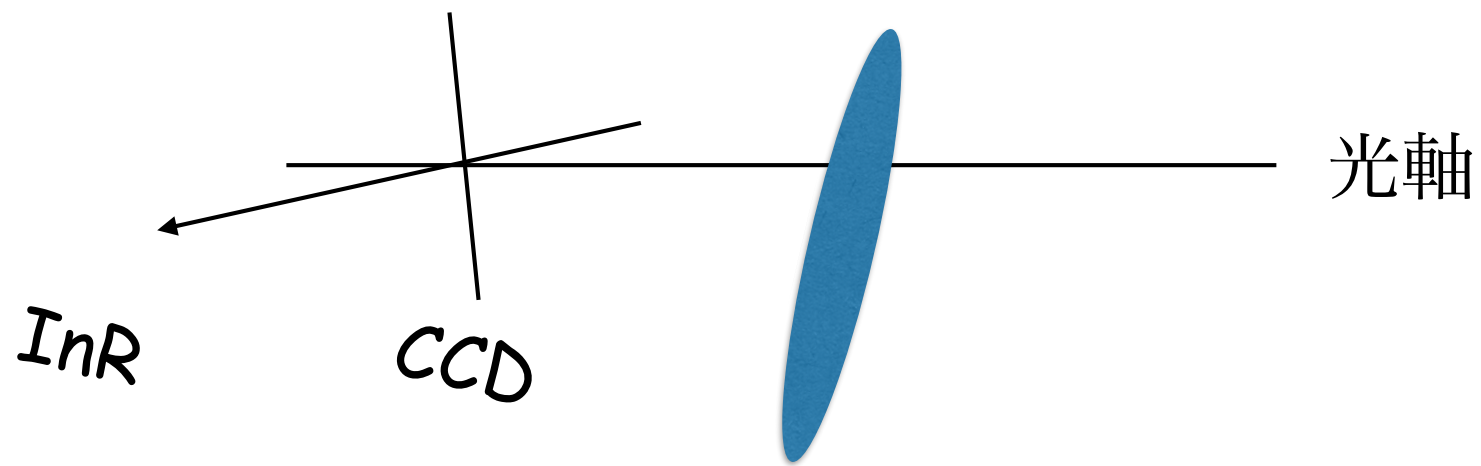
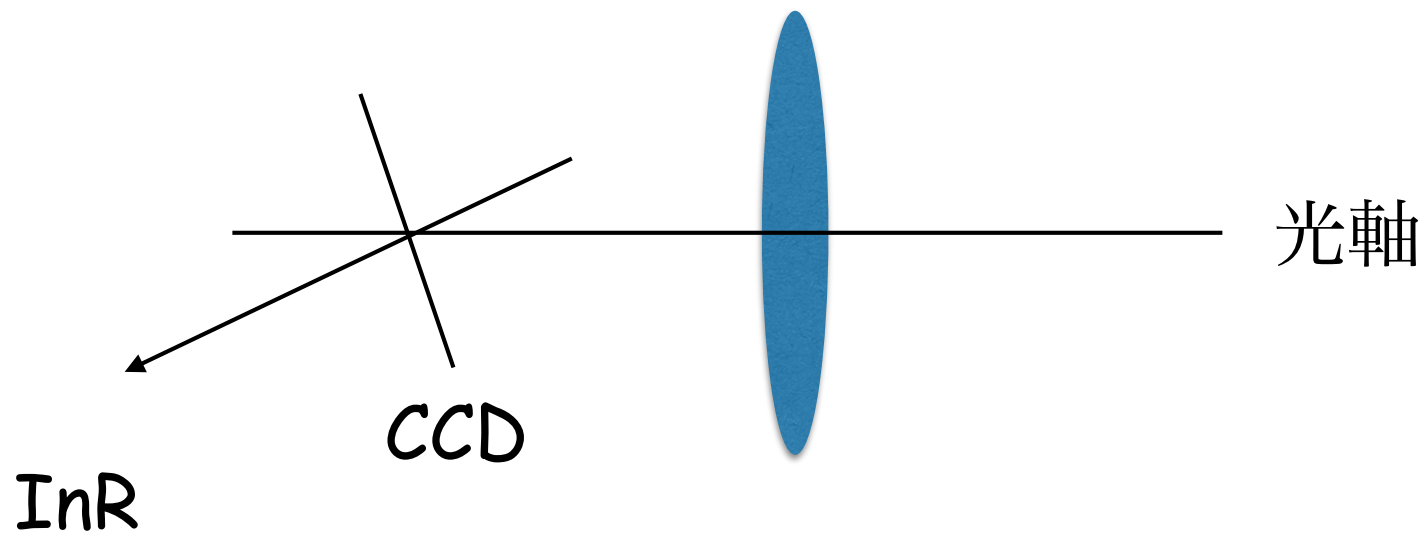


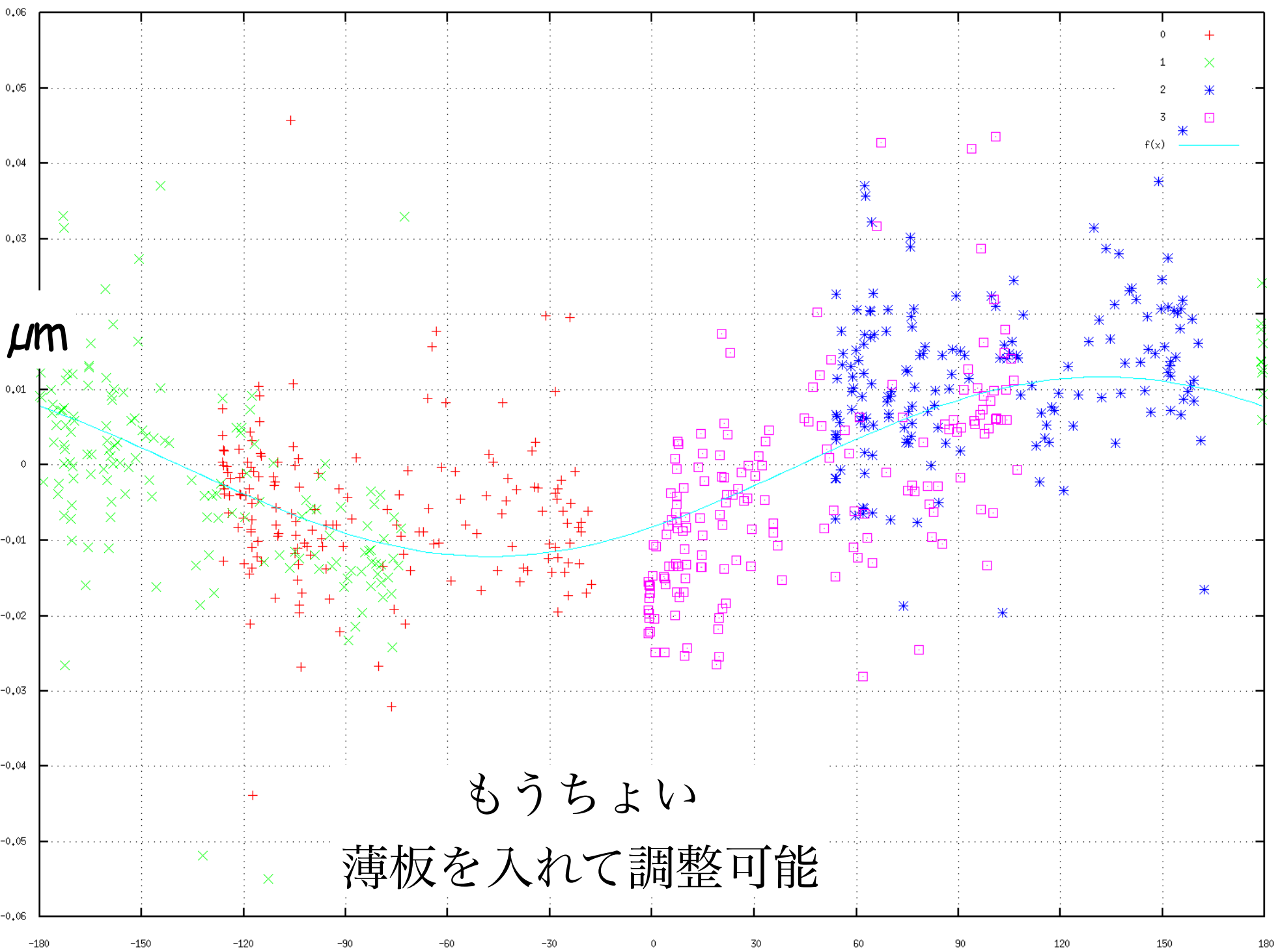
InR角度

InRの回転軸が光軸と合っていない

視野端での振幅 $\sim \pm 22$   $\mu\text{m}$

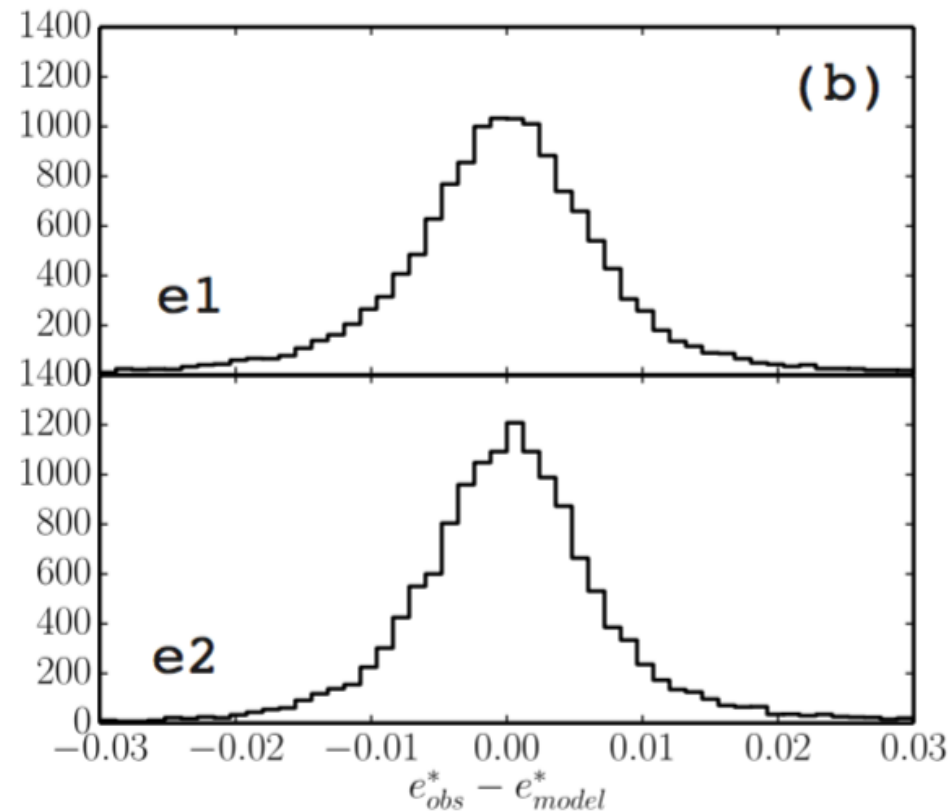
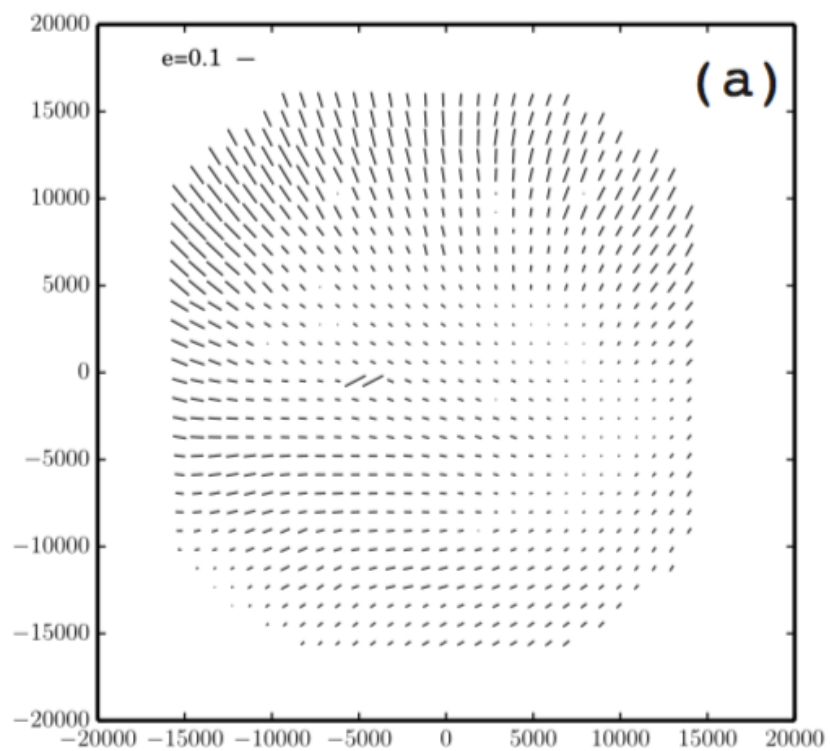






# PSFの補正

星を使いPSF modelを作る



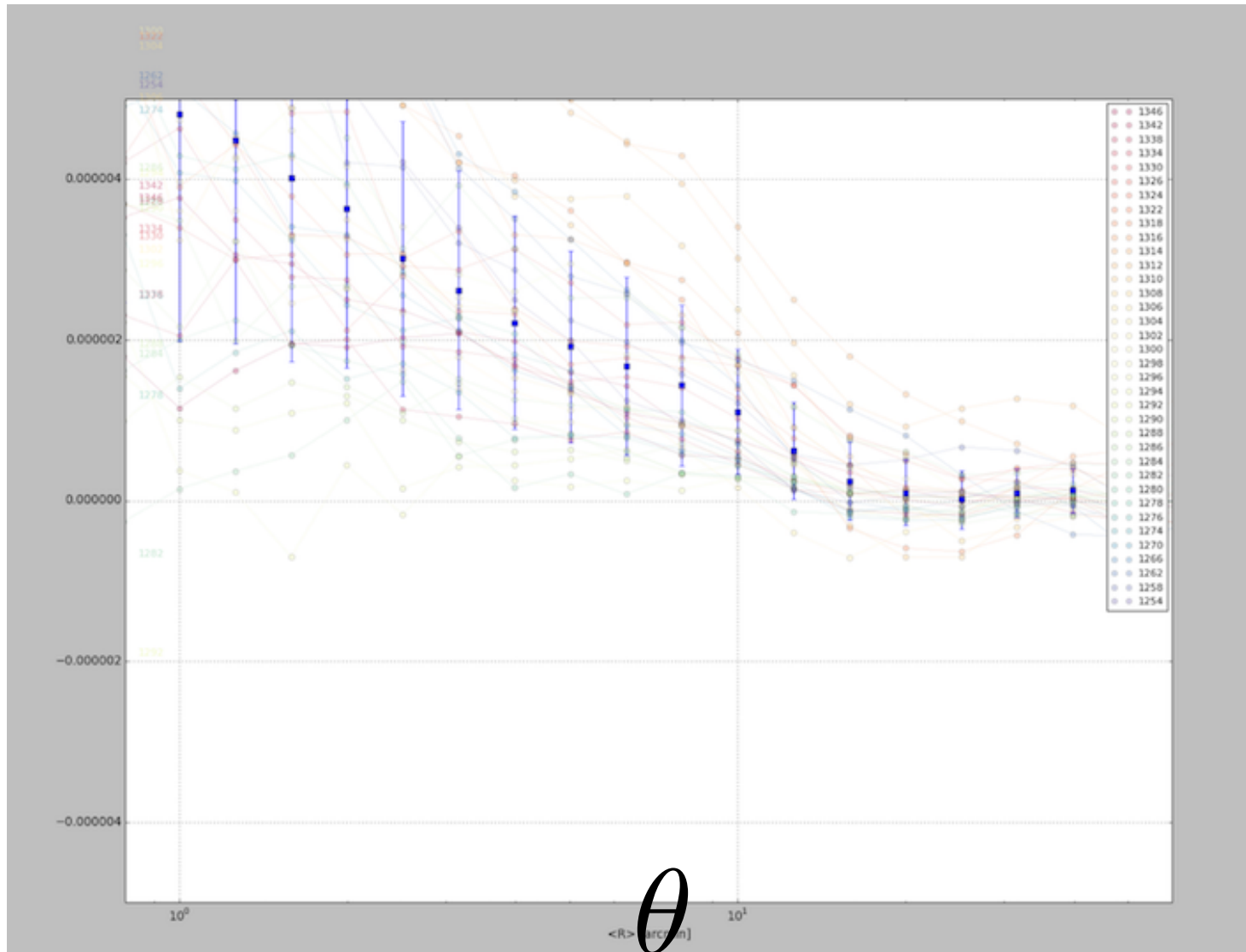
Miyazaki et al. (2015)

現在は、外部情報は全く未使用 取得画像のみからモデル化

# PSFの補正

modelと計測値の残差のauto correlation

$\rho_1(\theta)$

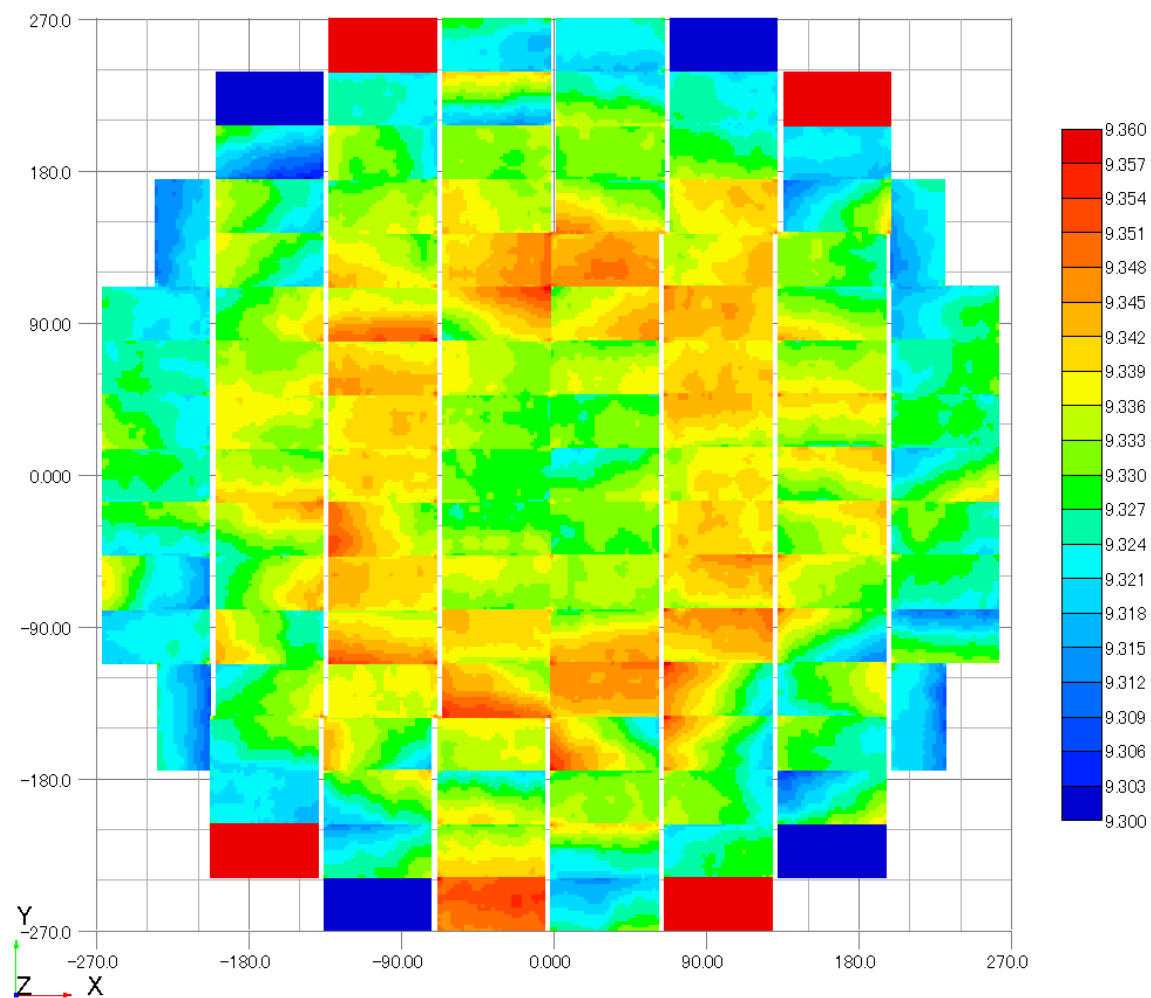


exposure毎にかなりばらつく

PSF modelが十分ではない

# PSFの補正

まだPSF modelに取り入れていない情報



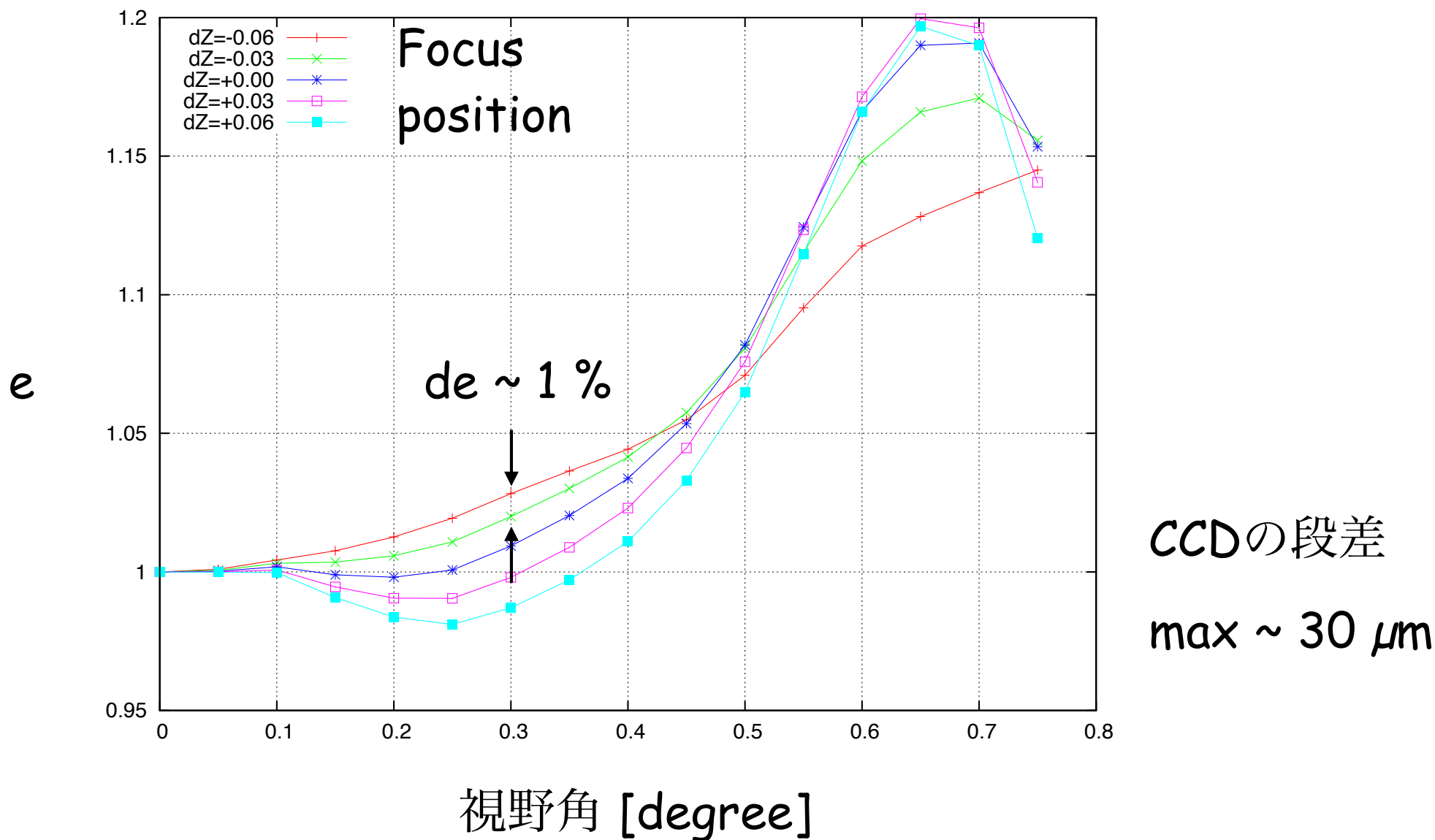
CCDの段差

max ~ 30  $\mu\text{m}$



# PSFの補正

まだPSF modelに取り入れていない情報



観測の成功を目指し、カメラを調整し、特性を理解する努力はまだ続いています。

