

2021年6月4日
TMTに向けた開発ミニワークショップ

Second-Earth Imager for TMT (SEIT) 実現に向けた 高コントラスト観測システムの開発

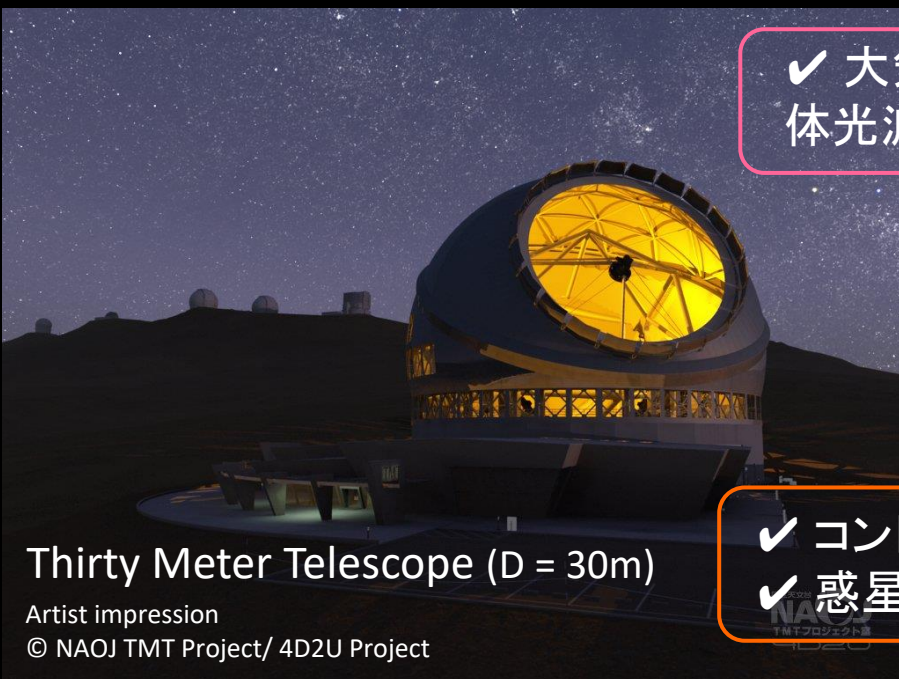
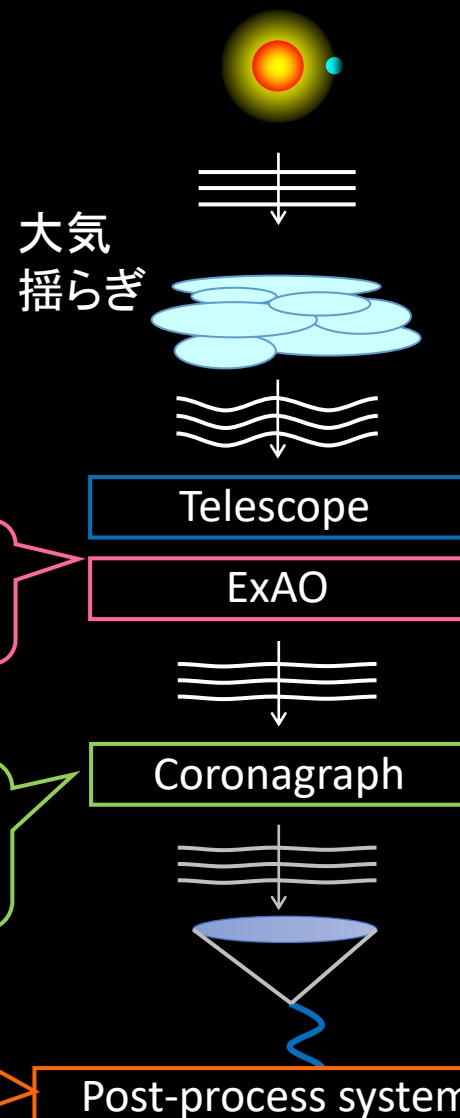
村上尚史(北海道大学), 山本広大(京都大学),
小谷隆行(ABC/国立天文台), 河原創(東京大学),
田村元秀(東京大学/ABC/国立天文台), SEICA & SEITメンバ

謝辞: TMT戦略基礎開発研究経費では、主に以下の研究開発を推進しました。ご支援に厚くお礼申し上げます。

- せいめい望遠鏡SEICAへのコロナグラフSPLINE搭載実機開発
- 将来の高コントラスト観測技術(ポストプロセス技術など)の基礎研究

SEIT (Second-Earth Imager for TMT) の提案 → PSI-blueへ合流

- 構成: 極限補償光学・コロナグラフ・ポストプロセス系
- 装置性能: 主星から離角 $0''.01$ - $0''.02$ でコントラスト 10^{-8}**
- 主要なサイエンス目標:
 - 晩期型星ハビタブルゾーンに存在する地球型惑星の直接観測およびキャラクタリゼーション
 - e.g., O_2 はロバストなバイオシグネチャーと期待



Thirty Meter Telescope (D = 30m)

Artist impression

© NAOJ TMT Project/ 4D2U Project

✓ 大気揺らぎに起因する天体光波面を測定・補正

✓ 主星(恒星)光を強力に除去

✓ コントラストのさらなる改善
✓ 惑星光の分析

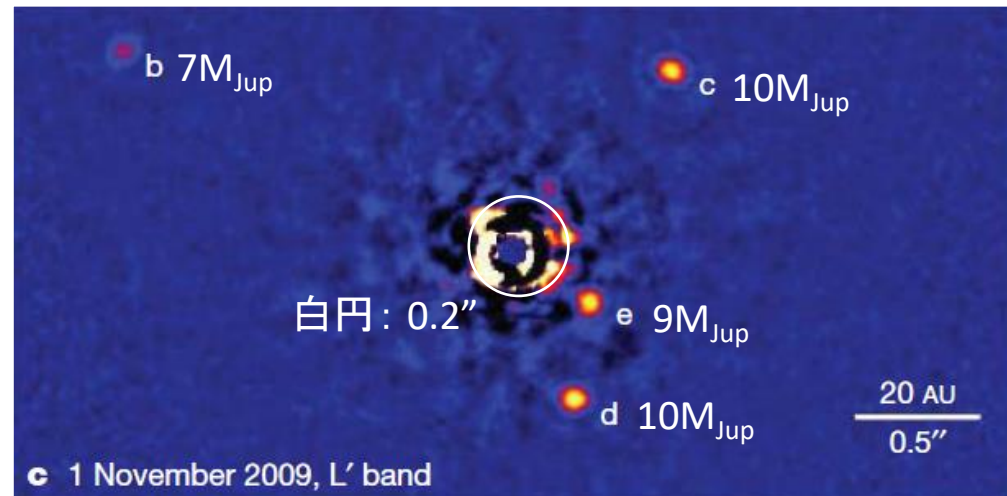
SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Adaptive Optics)

- 京都大学せいめい望遠鏡(口径3.8m)
 - TMTと同じ分割主鏡(18枚)、アクセスが容易
- 極限補償光学・高コントラスト装置SEICA → 2022年度FL目標
 - サイエンス目標: 木星質量の惑星 ($> 0''.2$) の直接観測・キャラクターゼーション (YJH bands, goal $10^{-5\sim-6}$)
 - 技術目標: TMTでの惑星撮像装置に向けた先進技術の開発・実証
 - 分割主鏡に特化した高性能コロナグラフ
 - 高速変動する大気揺らぎの精密測定・補正 ・・・など



From Kyoto Univ. SEIMEI Telescope Website
<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>

Marois et al. (2010), Nature, 468, 1080



SEICAの開発体制

◆ 主に5機関/10名でそれぞれ開発進行中

◆ 補償光学

■ 全体光学系:	京都大学
■ 新方式波面センサ:	京都大学
■ FPGA制御装置:	大阪電気通信大学

◆ コロナグラフ

■ <u>コロナグラフ系:</u>	<u>北海道大学</u>
-------------------	--------------

◆ ポストコロナグラフ

■ <u>スペckルナリング:</u>	<u>北海道大学</u>
■ 惑星RV分光器:	東京大学/ABC

2020年度末

2021年度末

◆ 開発場所: 京都大学 → せいめい望遠鏡ドーム

要素技術等の主な開発拠点

サイエンス

ポストコロナグラフ開発

コロナグラフ開発

補償光学開発

東京大学



ABC/NAOJ

北海道大学



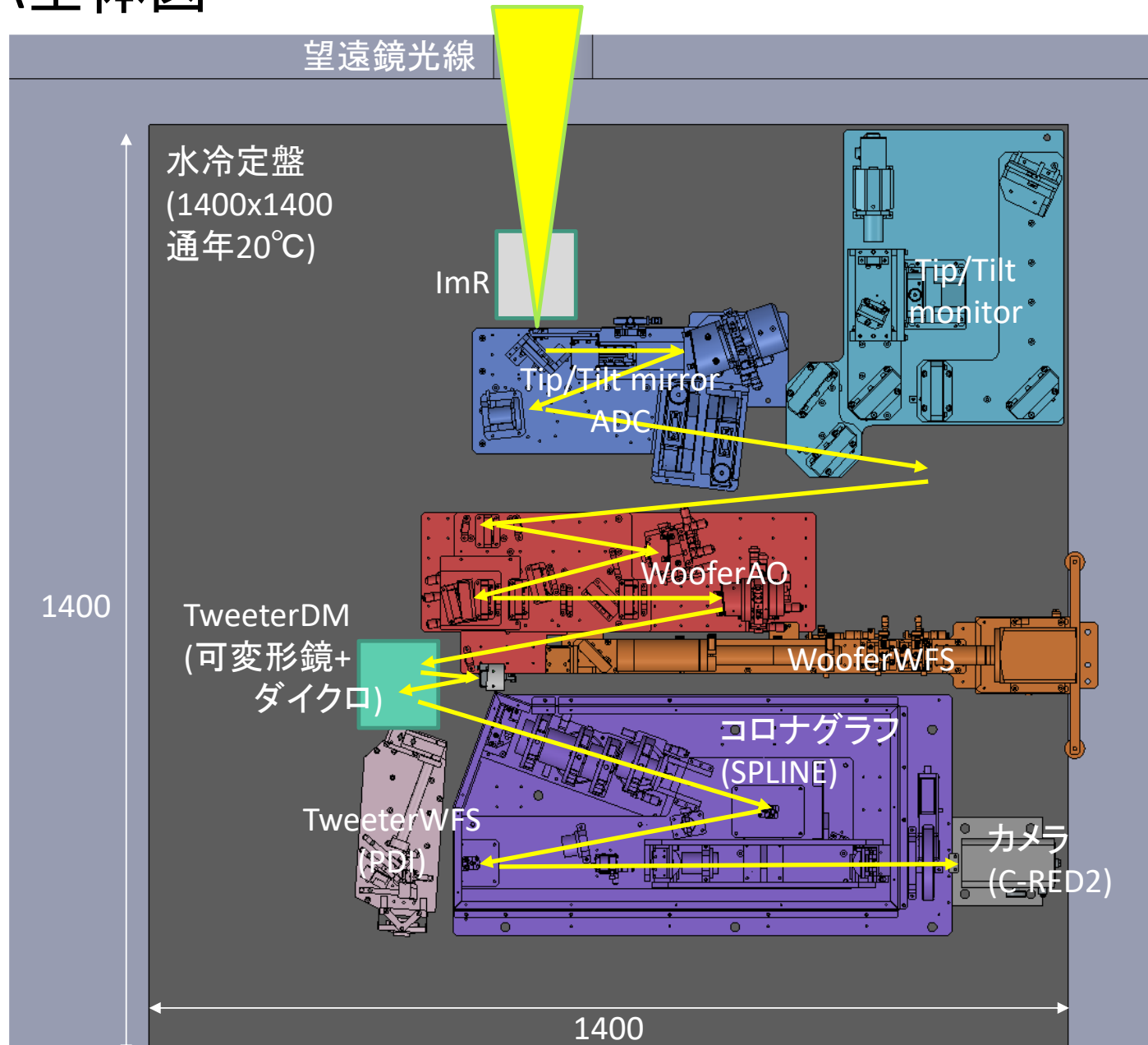
京都大学



大阪電気通信大学



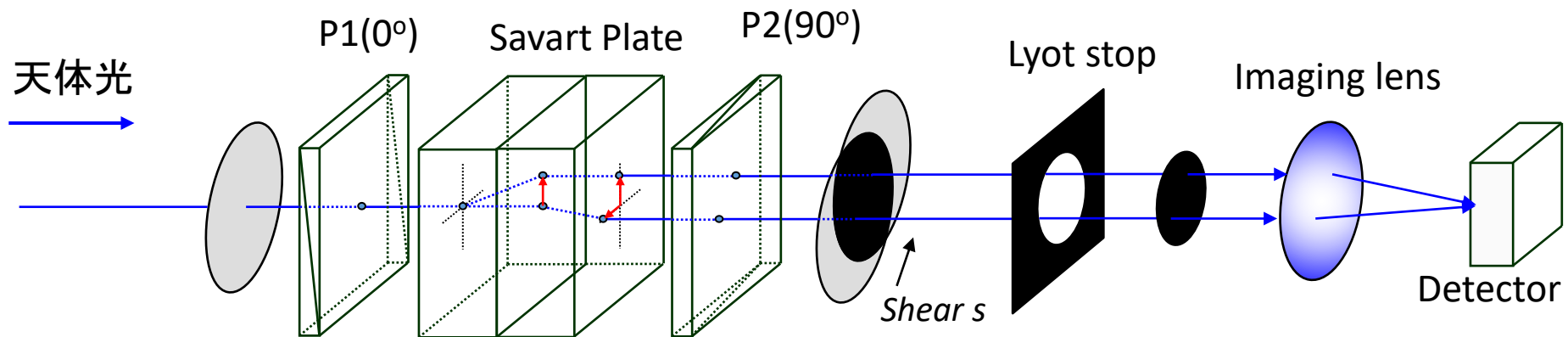
SEICA全体図



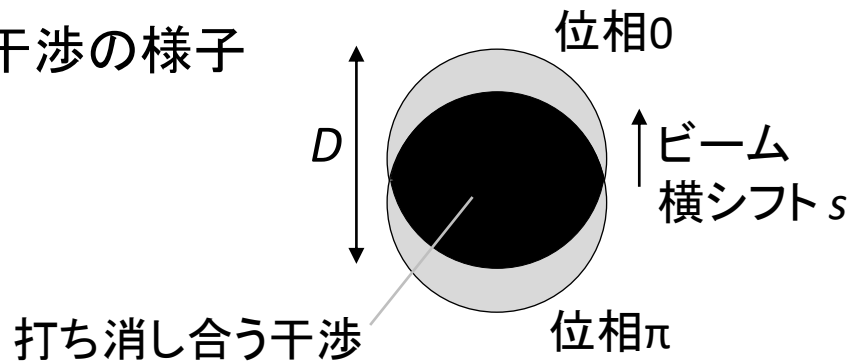
SPLINE (Savart-Plate Lateral-shearing Interferometric Nuller for Exoplanets)

コロナグラフSPLINEの特長

- シンプル・高安定な光学系(機械的稼働部がない)
- アクロマティックな恒星除去(波長依存性が(少)ない)
- 任意の望遠鏡瞳に対応可能(分割主鏡に適応可能)
- 恒星のごく近傍に迫れる(小さなIWAを実現可能) → $1.5\lambda/D$ に設定(下表)



光波干渉の様子

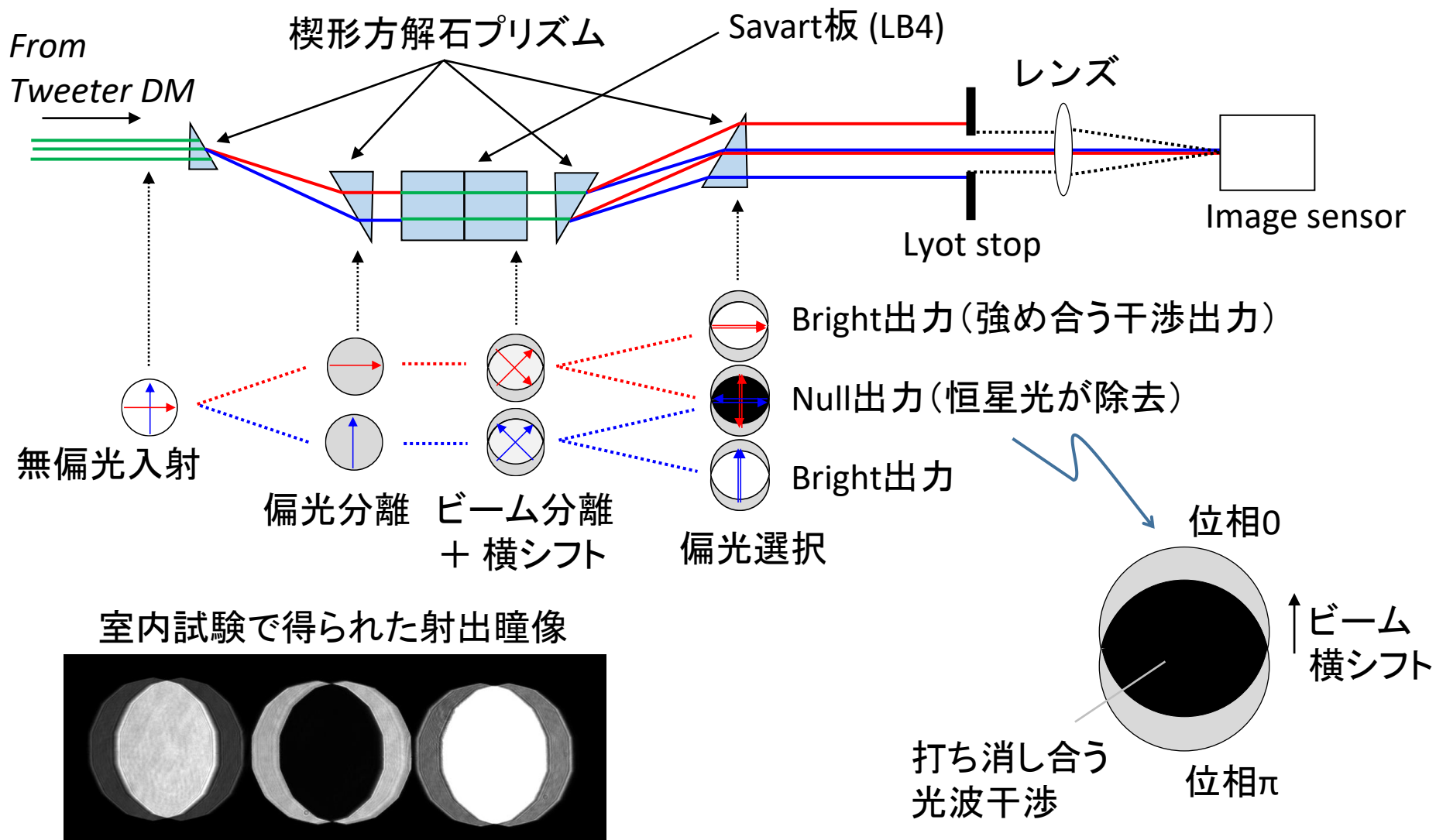


$$IWA = \lambda / (4s)$$

	SEICA	SEIT/TMT
IWA	0".10	0".012
D	3.8m	30m
S	0.64m	5.1m

SEICA搭載用2チャンネルSPLINEの提案

偏光分離プリズムを用いた2チャンネル構成 → 光量スループット向上



SEICA/SPLINE作業工程

FY2014

偏光プリズム製作開始（偏光分離プリズム & Savart板）



FY2015

偏光プリズム製作完了(偏光分離プリズム残り)、光学収差解析



FY2016

仮組み、室内試験、要求アライメント精度見積もり



FY2017

安定性評価、ホルダ・調整機構の仮製作



FY2018

ホルダ・調整機構の本製作、アSEMBル(仮組み)、安定性評価



FY2019

リヨストップ設計・製作

レンズ系製作、
アSEMBル(モジュール化)

FY2020



FY2021

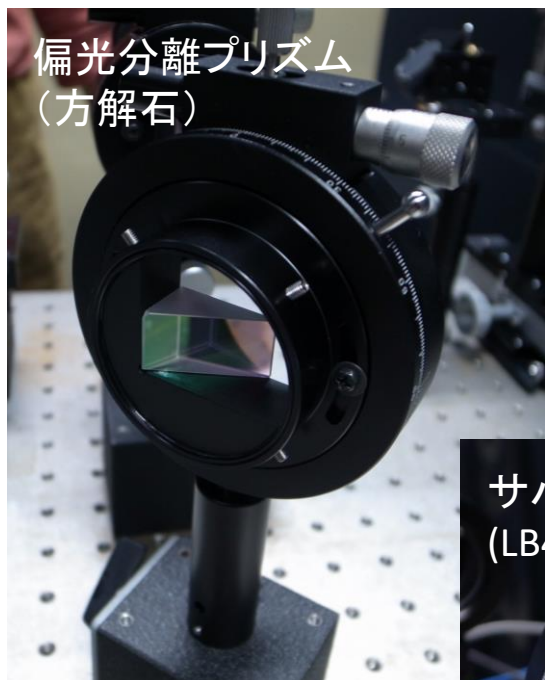
アSEMBル(継続)、SEICAとの接続



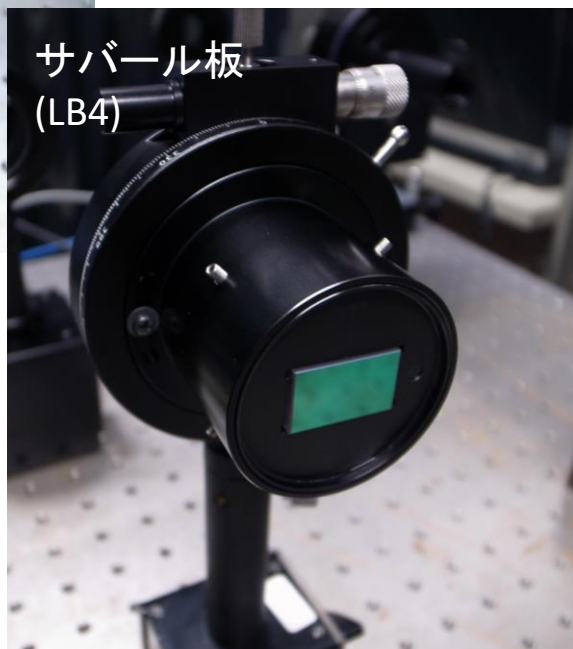
FY2022

SEICAとの接続(継続)、ファーストライト(目標)

偏光プリズム製作／収差解析



偏光プリズム
製作完了



収差の影響は十分に小さい

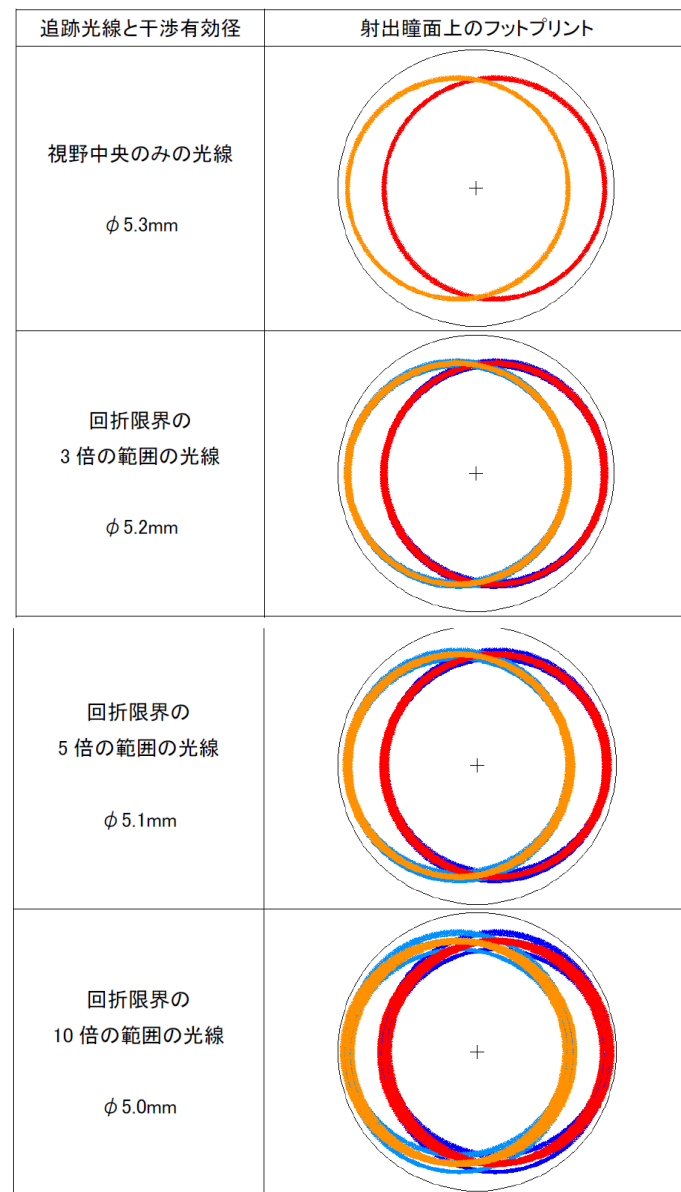


図 14 射出瞳の収差 ($\lambda = 1.00 \mu\text{m}$, $1.25 \mu\text{m}$, $1.65 \mu\text{m}$, $1.90 \mu\text{m}$)

SEICA/SPLINE作業工程

FY2014

偏光プリズム製作開始（偏光分離プリズム & Savart板）



FY2015

偏光プリズム製作完了(偏光分離プリズム残り)、光学収差解析



FY2016

仮組み、室内試験、要求アライメント精度見積もり



FY2017

安定性評価、ホルダ・調整機構の仮製作



FY2018

ホルダ・調整機構の本製作、アSEMBル(仮組み)、安定性評価



FY2019

リヨストップ設計・製作

レンズ系製作、
アSEMBル(モジュール化)

FY2020



FY2021

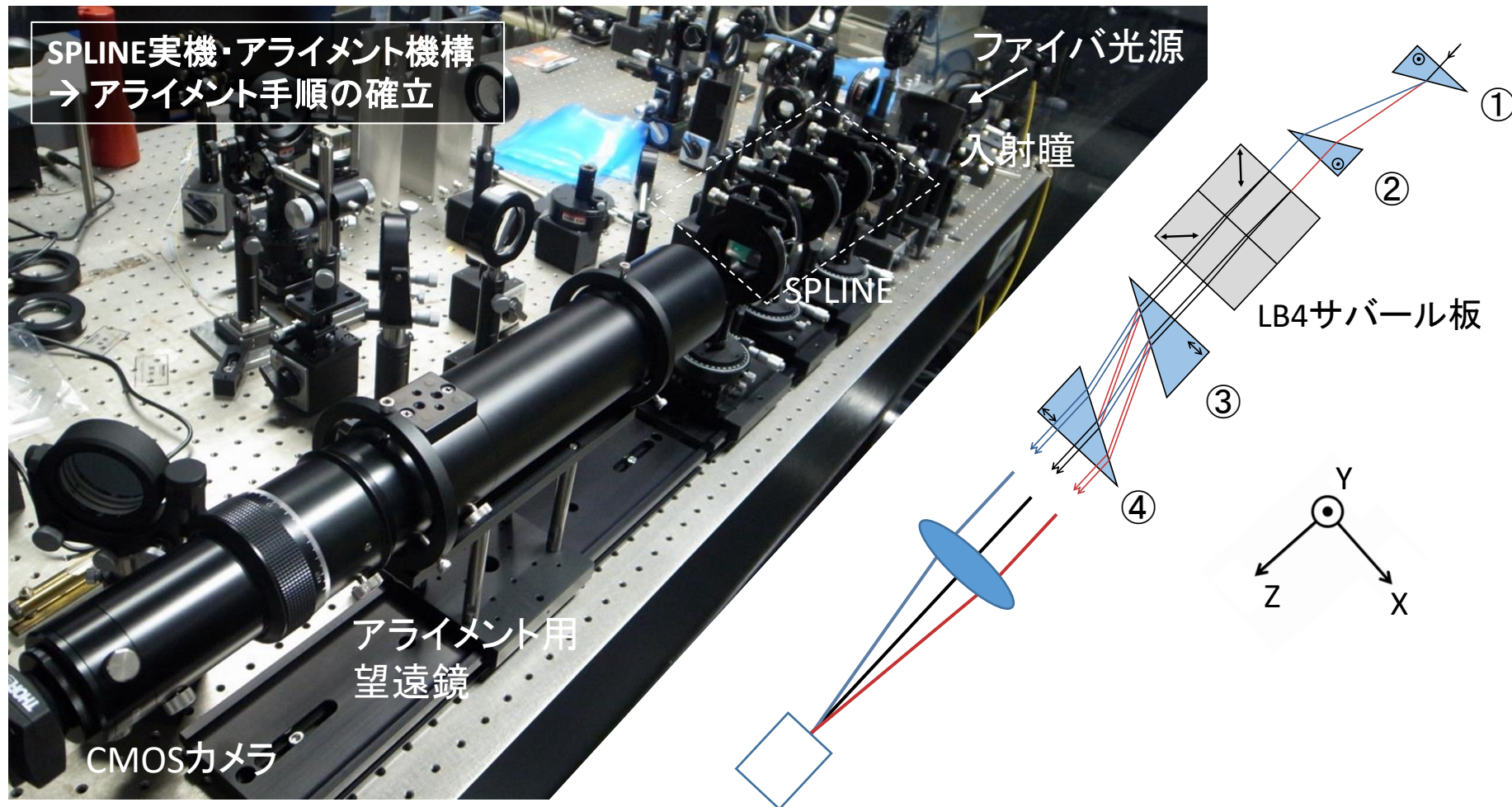
アSEMBル(継続)、SEICAとの接続



FY2022

SEICAとの接続(継続)、ファーストライト(目標)

SPLINE/SEICA仮組み



アライメント用望遠鏡 (Borg 77ED II):

射出光線が平行になるように(すべての像が同じ位置に重なるように)、各プリズムをアライメント

要求アライメント精度の評価／室内実証試験

アライメント精度評価

各プリズムのアライメント誤差



天体光波面傾斜 or
偏光制御誤差



SPLINEコントラスト劣化

目標コントラスト
(ピーク)

$10^{-1.5}$

サバール板
(Y軸回り)

± 0.22 分角

プリズム①②
(Y軸回り・相対位置)

± 1.94 分角

プリズム①(Z軸回り)

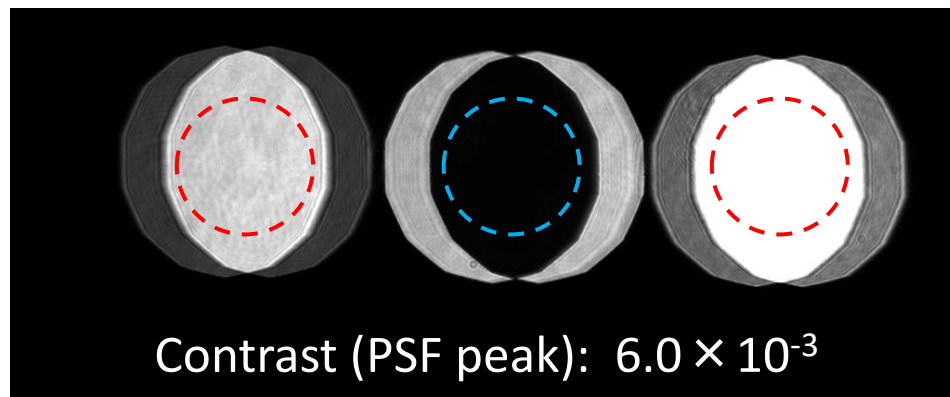
± 135 分角

プリズム②(Z軸回り)

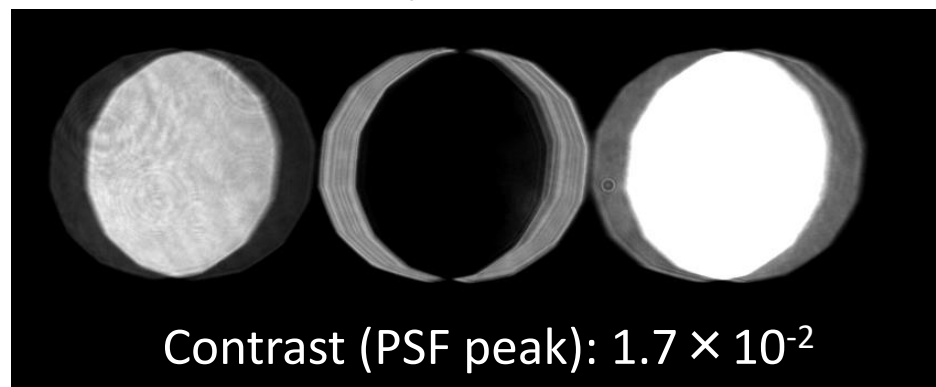
± 99 分角

実証試験結果(瞳面観測)

Laser ($\lambda = 670\text{nm}$)



Xenon lamp ($\lambda \sim 500\text{-}700\text{ nm}$)



目標コントラスト($10^{-1.5}$) クリア

SEICA/SPLINE作業工程

FY2014

偏光プリズム製作開始（偏光分離プリズム & Savart板）



FY2015

偏光プリズム製作完了(偏光分離プリズム残り)、光学収差解析



FY2016

仮組み、室内試験、要求アライメント精度見積もり



FY2017

安定性評価、ホルダ・調整機構の仮製作



FY2018

ホルダ・調整機構の本製作、アSEMBル(仮組み)、安定性評価



FY2019

リヨストップ設計・製作

レンズ系製作、
アSEMBル(モジュール化)

FY2020



FY2021

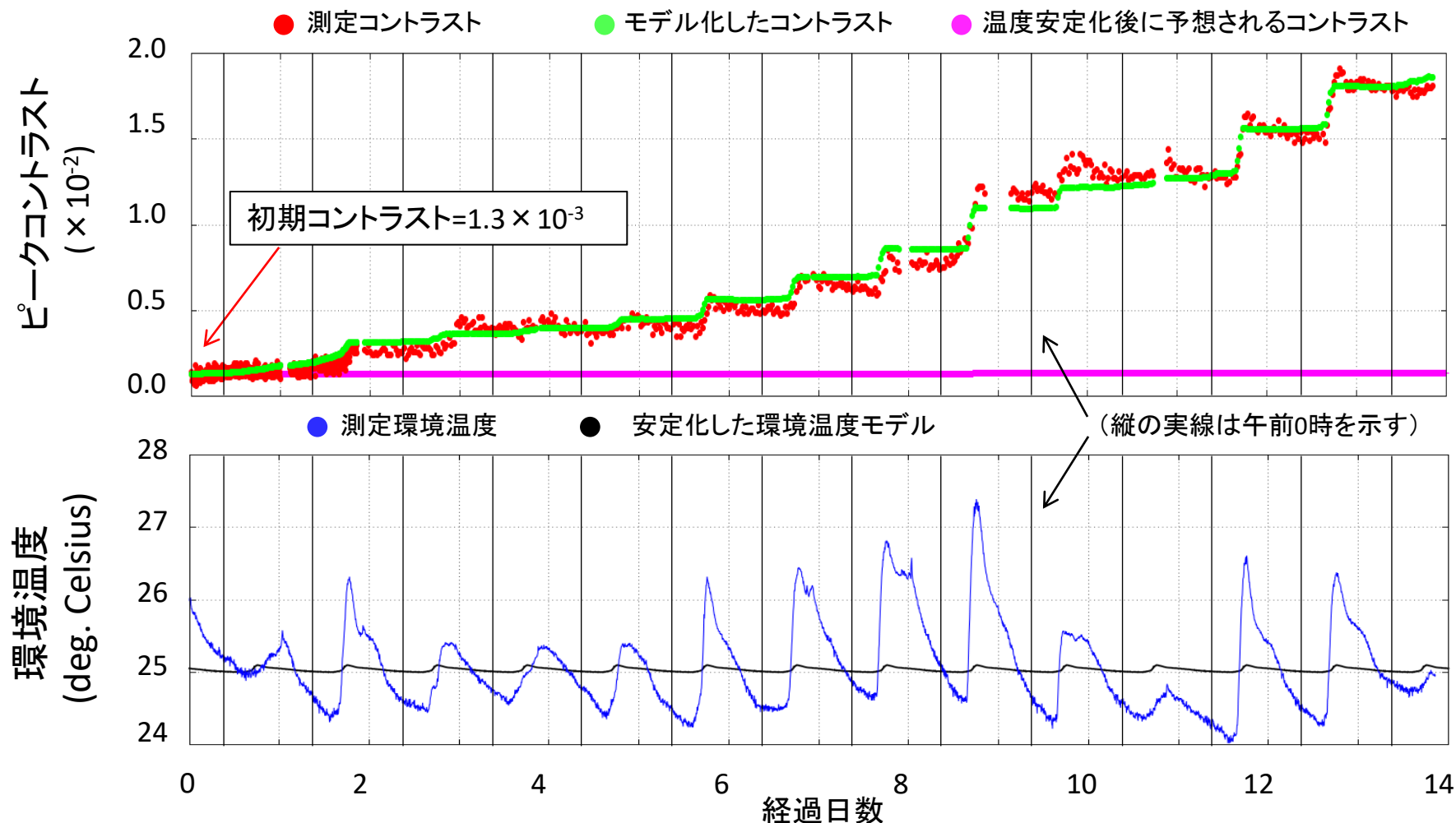
アSEMBル(継続)、SEICAとの接続



FY2022

SEICAとの接続(継続)、ファーストライト(目標)

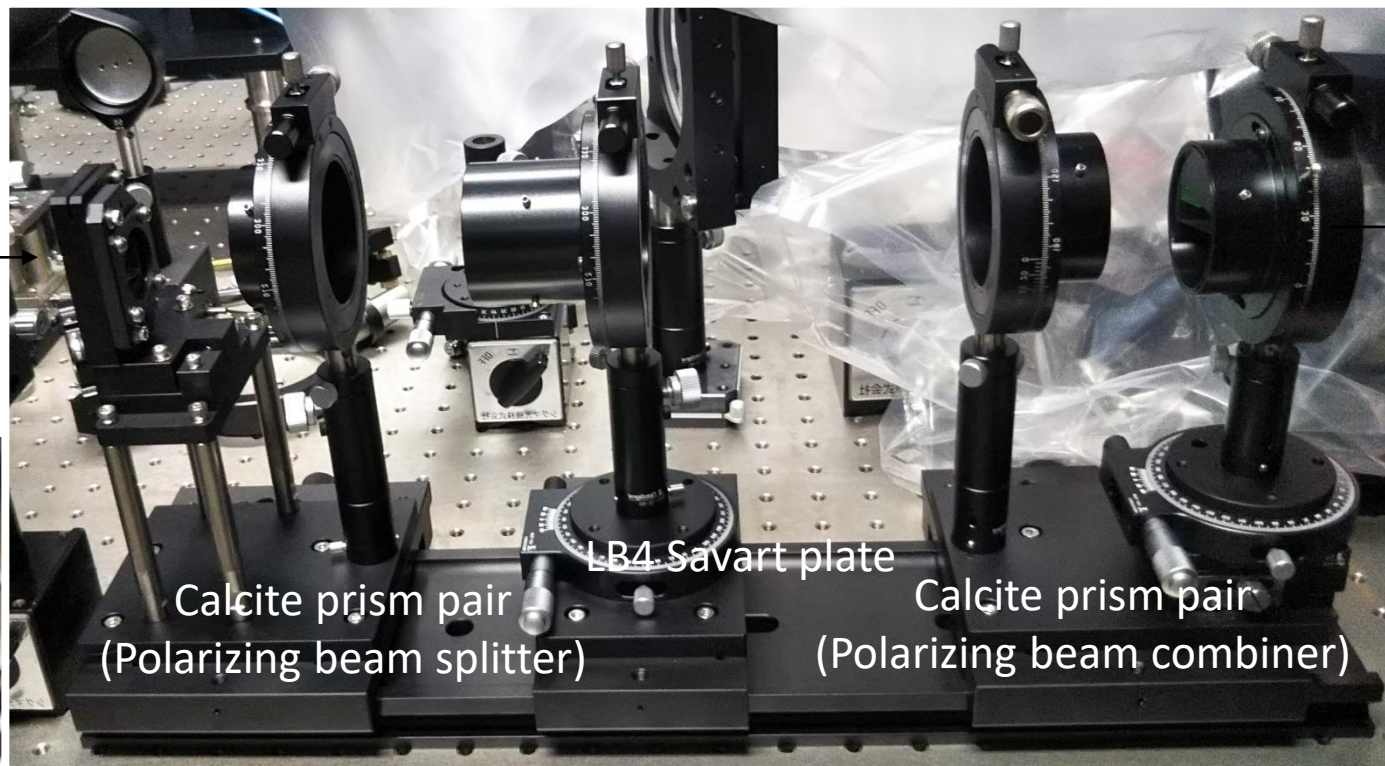
安定性・環境温度依存性の評価



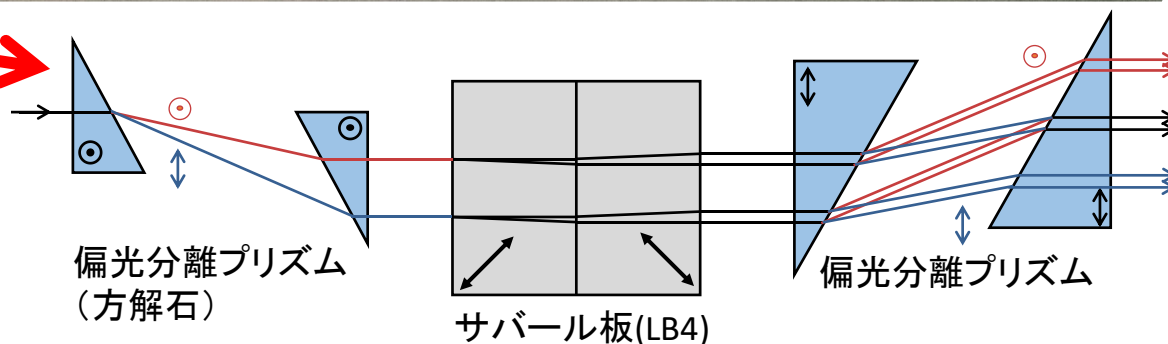
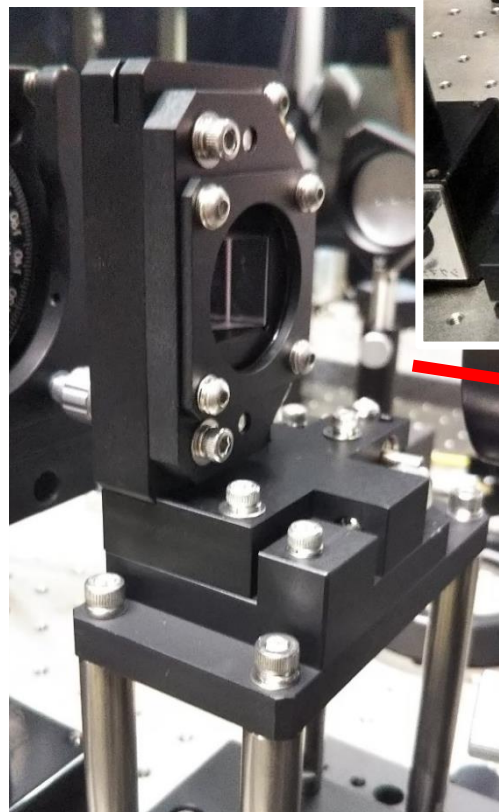
■ SPLINEコントラスト劣化(変動)の要因

温度変動によるホルダのたわみ → SPLINEへ入射する天体光波面にtiltがつく？

ホルダ・調整機構・アセンブル



偏光分離プリズム



+ リレーレンズ製造完了

SEICA/SPLINE作業工程

FY2014

偏光プリズム製作開始（偏光分離プリズム & Savart板）



FY2015

偏光プリズム製作完了(偏光分離プリズム残り)、光学収差解析



FY2016

仮組み、室内試験、要求アライメント精度見積もり



FY2017

安定性評価、ホルダ・調整機構の仮製作



FY2018

ホルダ・調整機構の本製作、アSEMBル(仮組み)、安定性評価



FY2019

リヨストップ設計・製作

レンズ系製作、
アSEMBル(モジュール化)

FY2020



FY2021

アSEMBル(継続)、SEICAとの接続



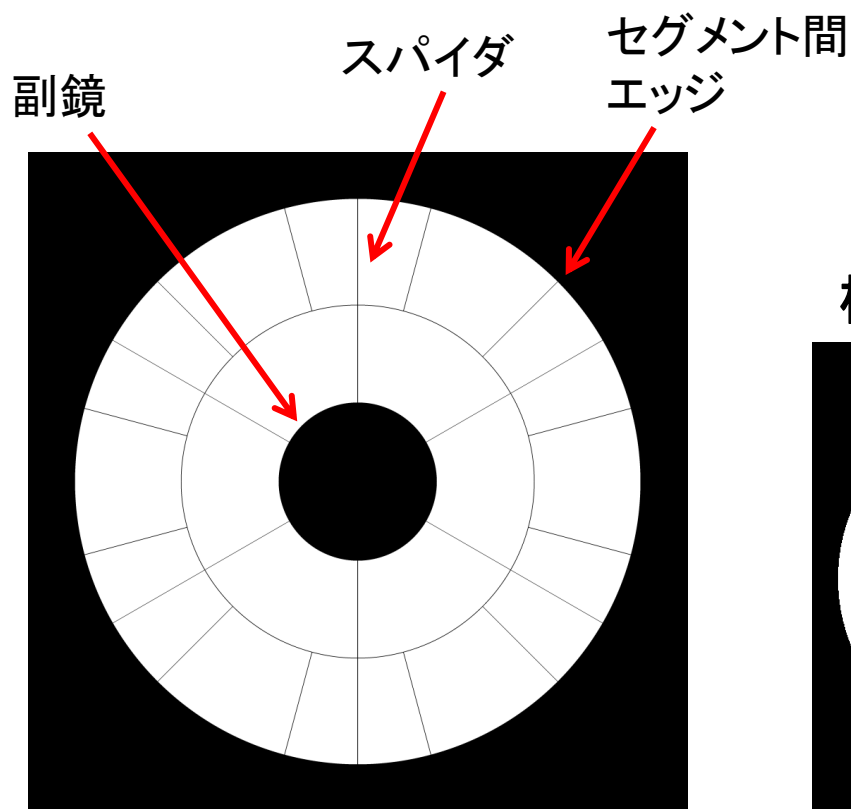
FY2022

SEICAとの接続(継続)、ファーストライト(目標)

Lyotストップ設計

- **Lyotストップ**

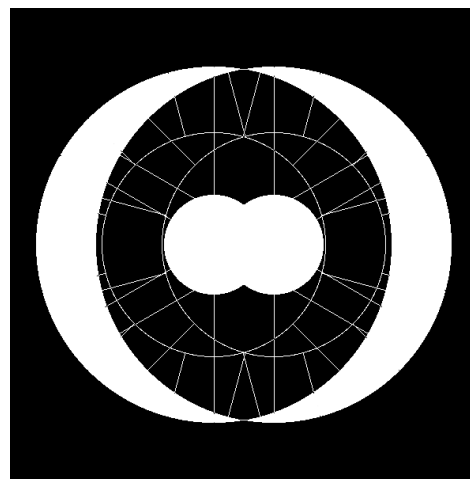
- 光波干渉が起きない部分(白い領域)をブロックすることで、原理上、恒星光を完全に除去
- 厳密解をに設計・評価(FY2017) → 簡略型を検討 (FY2019)



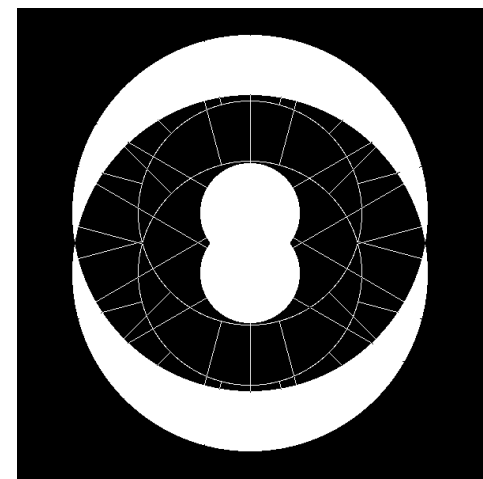
京大岡山3.8m望遠鏡瞳

主鏡有効口径	3783mm
副鏡有効口径	1059mm
スパイダ、エッジ太さ	5mm

横方向分離



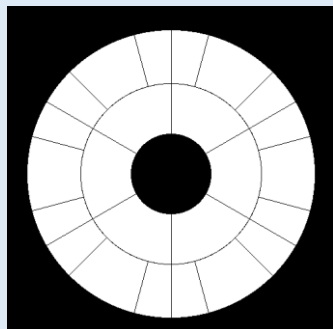
縦方向分離



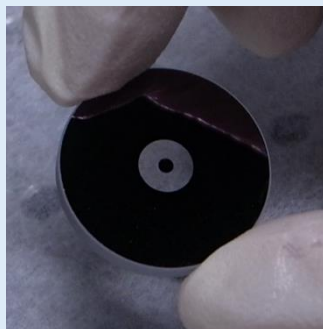
SPLINE射出瞳像(計算値)

Lyotストップ設計・製作

せいめい望遠鏡瞳

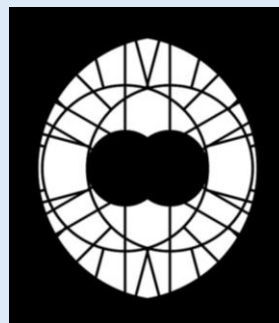


せいめい望遠鏡瞳を
模擬した光学マスク
(2018年度製作)



Lyotストップ厳密解

黒田真之佑, 2017年度修士論文



簡略型Lyotストップ

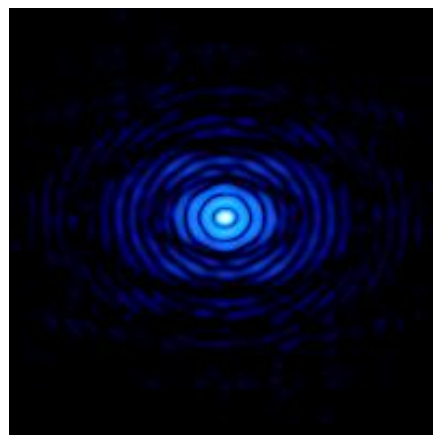
吉田光希, 2019年度修士論文



SPLINE出力(実験)

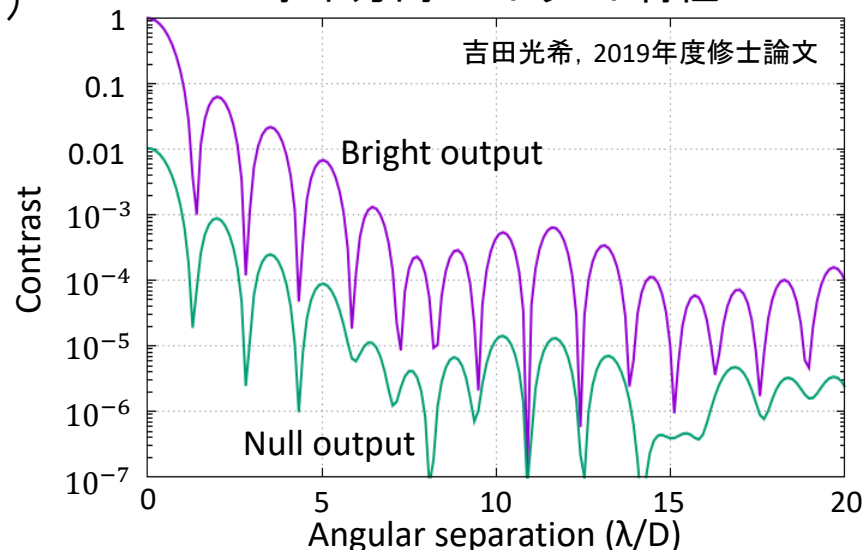


恒星像(シミュレーション)



10^{-6} Log contrast 0.01

水平方向コントラスト特性



目標コントラスト($10^{-1.5}$) クリアの見通し → Lyotストップ製作完了(2020年2月)

SEICA/SPLINE作業工程

FY2014

偏光プリズム製作開始（偏光分離プリズム & Savart板）



FY2015

偏光プリズム製作完了(偏光分離プリズム残り)、光学収差解析



FY2016

仮組み、室内試験、要求アライメント精度見積もり



FY2017

安定性評価、ホルダ・調整機構の仮製作



FY2018

ホルダ・調整機構の本製作、アSEMBル(仮組み)、安定性評価



FY2019

リヨストップ設計・製作

レンズ系製作、
アSEMBル(モジュール化)

FY2020



FY2021

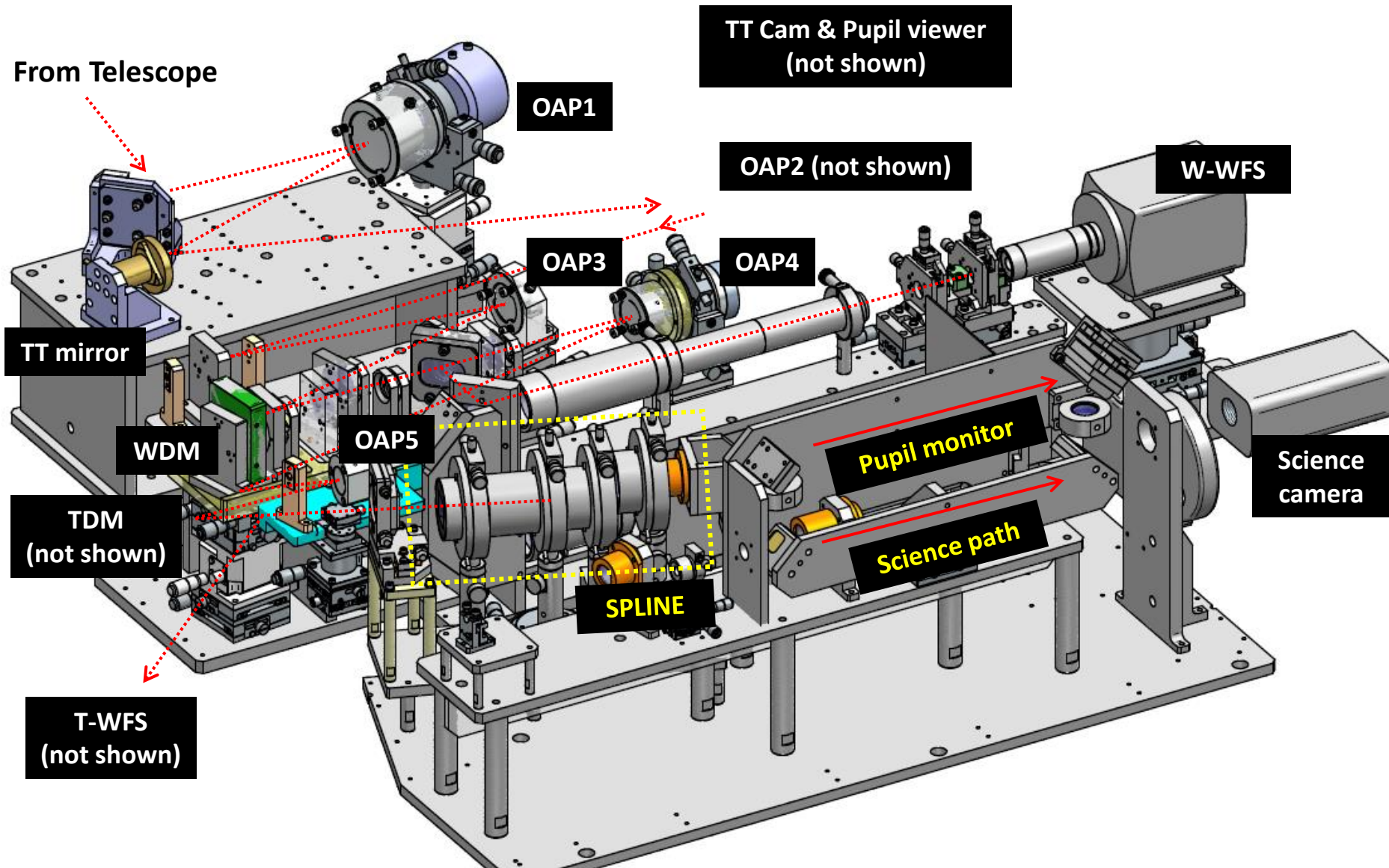
アSEMBル(継続)、SEICAとの接続



FY2022

SEICAとの接続(継続)、ファーストライト(目標)

SEICA/SPLINEアセンブル



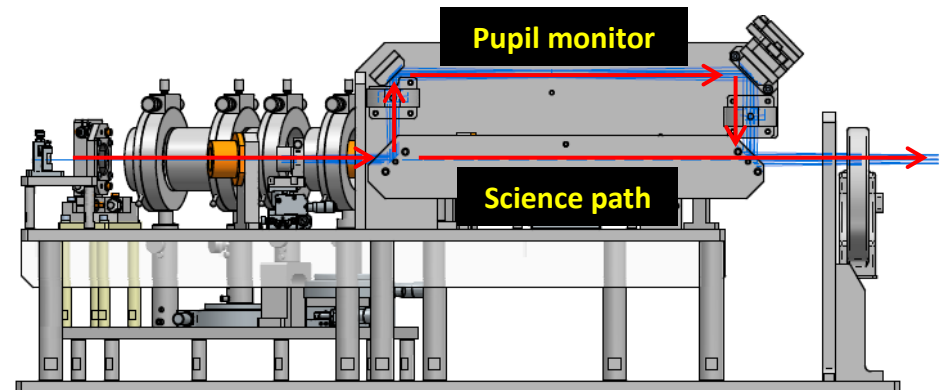
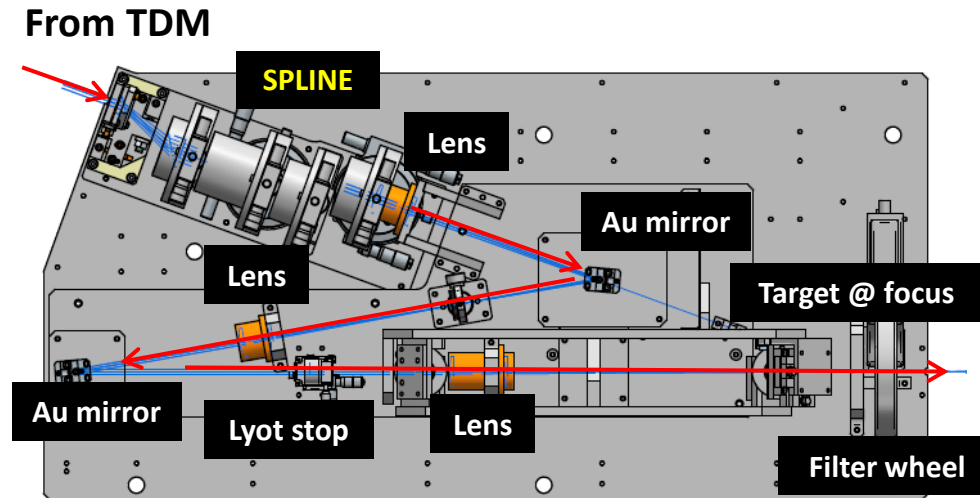
SEICA/SPLINEアセンブル

- **FY2019までの開発項目**

- SPLINEモジュール化
 - 光学系全体をベース板に設置
- リレーレンズ系アセンブル
 - ホルダ・マウント類の製作を含む
 - 集光レンズ・コリメータレンズは2018年度に製作済み
- 瞳モニター導入を決定 (Lyotストップ設置用)

- **FY2021年度(以降)の開発項目**

- 瞳モニタ系 (機械系・光学系) 製作
- 温度安定化カバー製作
- ExAO撮像モード (w/o SPLINE) の検討
- SEICA接続に向けた準備 (京都大学へ移送など)



TMTに向けて検討・開発中の先端進技術の例

- 極限補償光学

- FPGAによる補償光学制御
- 直接位相計測型波面センサ

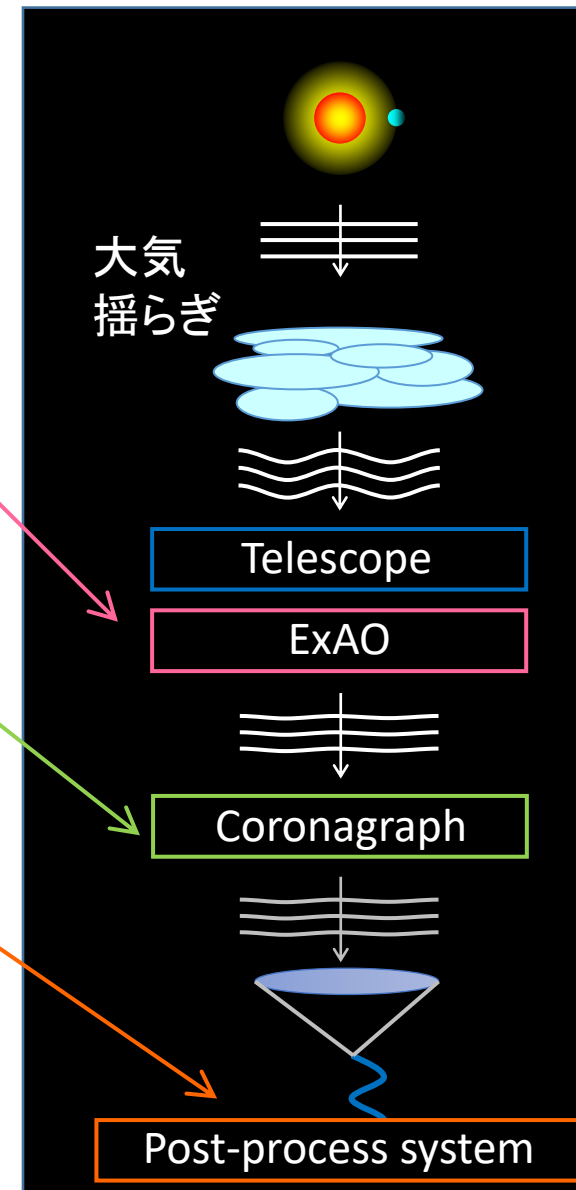
- コロナグラフ

- ナリ干渉型コロナグラフSPLINE
- 焦点面位相マスクコロナグラフ

- ポストプロセス

- スペックルナリング、焦点面波面センシング、惑星RV高分散分光器、差分撮像技術

・・・など



まとめ

• TMT戦略経費での活動

- せいめい望遠鏡SEICA搭載を目指したSPLINEの開発
 - TMTと同様の分割主鏡で有効、小IWAを目指せるなどの利点
 - [完了] 偏光プリズム製作、アライメント精度要求の見積もり、光学収差解析、装置仮組み、Lyotストップ設計・製作 など
 - [推進中] レンズ系構築、SPLINE実機モジュール化 など
 - [今後] 瞳モニタ構築、ExAO撮像モード検討、モジュール化完了・京都大学へ移送、極限補償光学との接続、ファーストライト(2022年度目標)
- ポストプロセス技術開発
 - 例: SLMを用いたスペックルナリング技術の基礎研究

• せいめい望遠鏡/SEICAでの目標

- サイエンス目標: 木星質量惑星の直接観測・キャラクター化
- 技術目標: TMTでの惑星撮像装置に向けた先進技術の開発・実証

謝辞: TMT戦略基礎開発研究経費のご支援に、厚くお礼申し上げます。