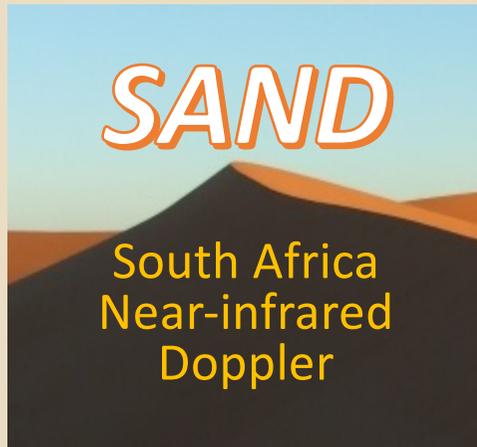


可視赤外線観測装置ワークショップ2022 @ 京都大学



# 南アフリカ望遠鏡用 近赤外ドップラー分光器 SANDの開発

高橋 葵<sup>1,2</sup>, 小谷 隆行<sup>1,2,3</sup>, 細川 晃<sup>3</sup>, 多田 将太郎<sup>3</sup>, 葛原 昌幸<sup>1,2</sup>,  
田村 元秀<sup>4,1</sup>, 西川 淳<sup>2,1,3</sup>, 上田 暁俊<sup>2</sup>, 永山 貴宏<sup>5</sup>,  
國生 拓摩<sup>6</sup>, 小崎 瑛子<sup>6</sup>, 住 貴宏<sup>7</sup>

(1) アストロバイオロジーセンター, (2) 国立天文台, (3) 総合研究大学院大学,  
(4) 東京大学, (5) 鹿児島大学, (6) 名古屋大学, (7) 大阪大学

# SANDとは・・・

- 南アフリカ・サザーランド観測所にある複数の望遠鏡にインストール予定の近赤外高分散分光器
- 天体の視線速度を高精度に測定するための高安定性を有した装置  
(プロジェクトのメインターゲットは視線速度法による系外惑星探索)
- すばるのIRDのヘリテージを生かして開発中

## 本発表の流れ

- 科学目標とアプローチ
- 装置概要と設計仕様
- スペクトル変動を抑えるための工夫
- 開発体制と進捗状況

# 本発表の流れ

- 科学目標とアプローチ
- 装置概要と設計仕様
- スペクトル変動を抑えるための工夫
- 開発体制と進捗状況

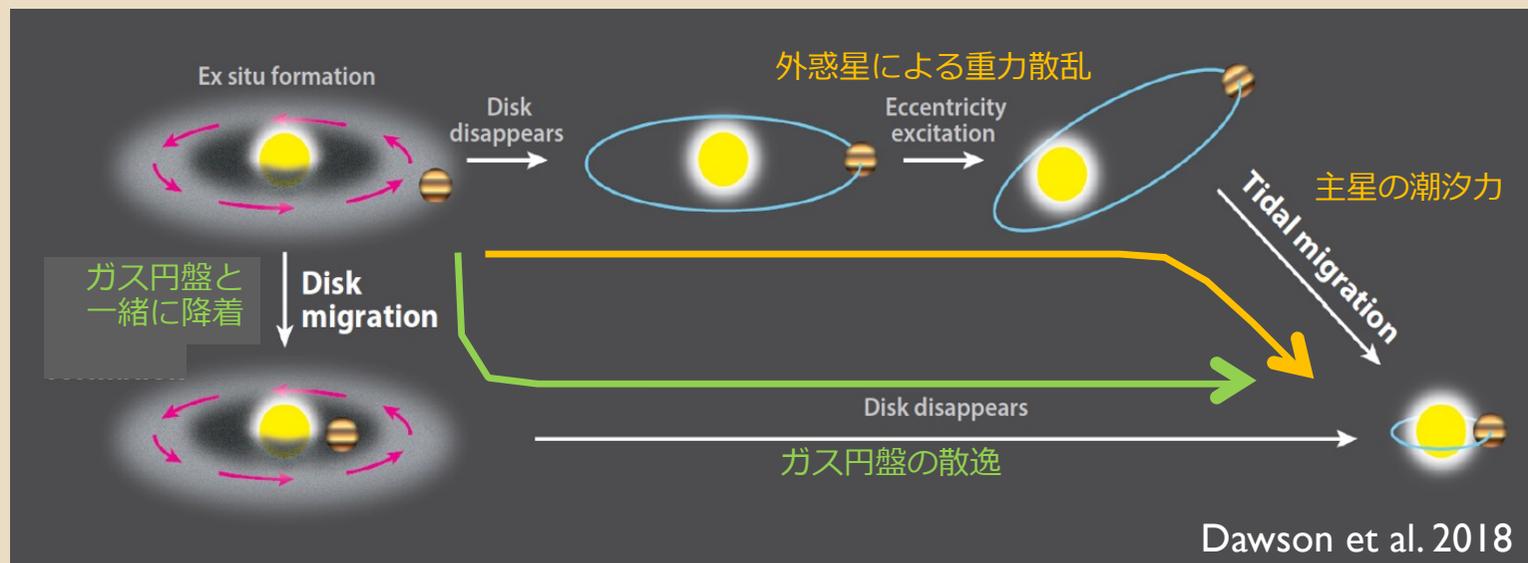
# 科学目標：若いガス惑星探索

- 若いガス惑星の軌道パラメータを調査し、惑星軌道移動過程を制約する  
=> 若い (<1Gyr) 星団内の恒星の視線速度を長期モニター観測

スリングショットモデル?  
(軌道移動タイムスケール > 100 Myr)

or

Type-II 軌道移動モデル?  
(軌道移動タイムスケール < 10 Myr)

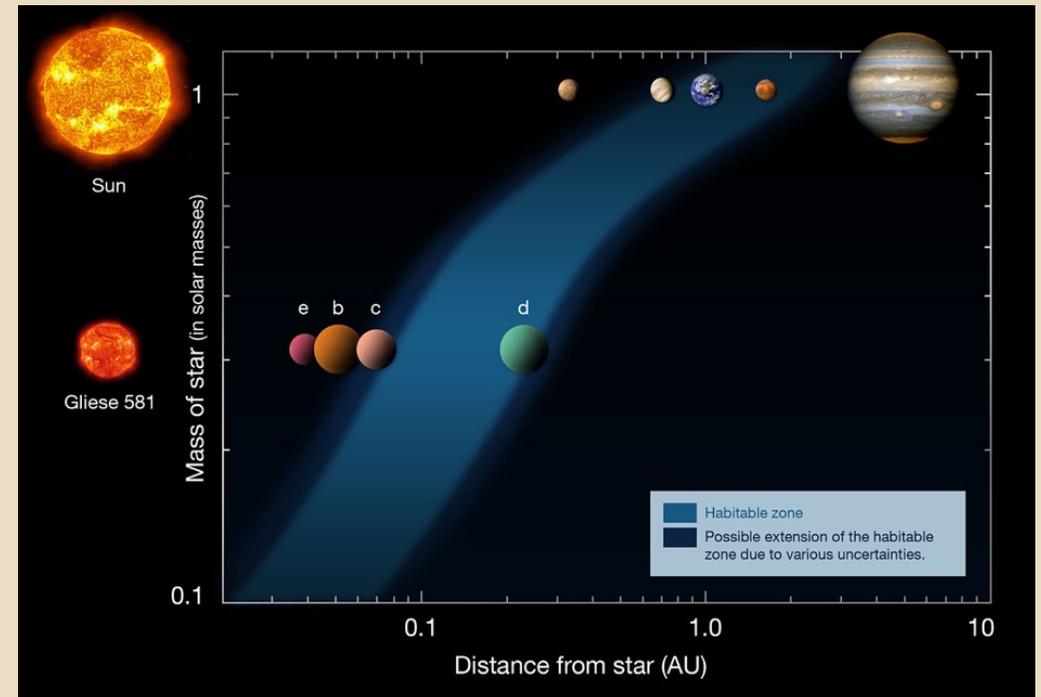


# 科学目標：ハビタブル惑星探索

- ハビタブルゾーンにある地球型惑星（=ハビタブル惑星）の発見・特徴付け  
=> **近傍のM型星の視線速度を高精度モニター観測**

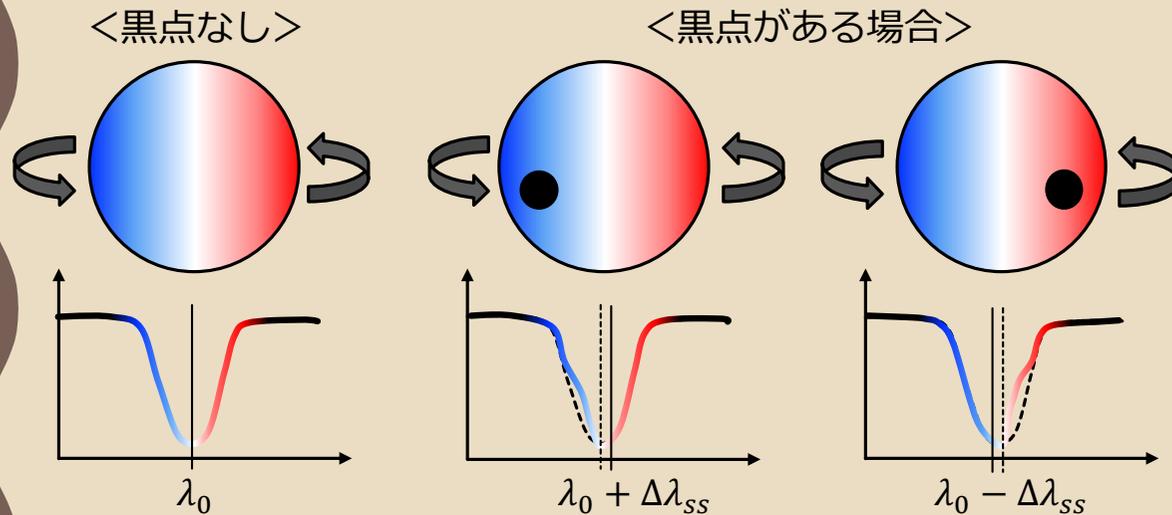
ハビタブル惑星の探索に最適！

- ✓ 存在頻度が高い  
→ 太陽近傍にもターゲットが豊富
- ✓ 有効温度が低い  
→ ハビタブルゾーンが主星に近い  
→ ハビタブル惑星の公転周期が短い
- ✓ 恒星質量が小さい  
→ 惑星の重力的影響を受けやすい
- ✓ 大気吸収線が多い  
→ 高い視線速度精度が得られる

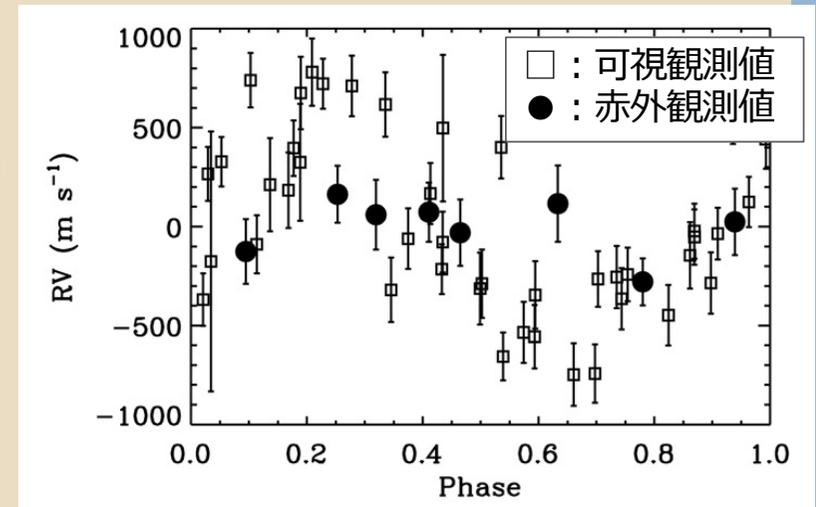


# なぜ“近赤外”か？

- 若い恒星の表面には黒点が顕著に見られ自転に伴う偽の視線速度変動を示す  
=> 可視域に比べ赤外域でその影響が弱まる
- M型星は可視域で暗く近赤外域で放射強度ピークを持つ



Prato et al. 2008

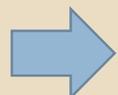


# なぜ“南アフリカ”か？

- 若い星団が豊富な南天をモニター観測したい  
(Scorpius Centaurus, TW Hydrae,  $\beta$ -Pictoris etc...)
- 北半球に比べて南半球で運用中・計画中の近赤外ドップラー分光器は少数
  - NIRPS (La Silla 3.6m, 2022~) :  $\lambda=0.95-1.8 \mu\text{m}$ , R~100,000
  - CRIRES+ (VLT, 2021~) :  $\lambda=0.95-5.3 \mu\text{m}$ , R~92,000
  - ANDES (E-ELT, ?) :  $\lambda=0.40-1.8 \mu\text{m}$ , R~100,000
- 独占的かつ柔軟に望遠鏡の観測時間を使える中小口径望遠鏡と組み合わせて**長期的かつ高頻度な視線速度モニター観測**を実施したい！

=> 

=>	}	幅広い時間スケール (様々な軌道長半径を持つ惑星)	の視線速度変動を捉えたい
		小さな変動幅の (質量の小さい惑星)	

 サザーランド観測所 (南アフリカ) の複数の中小口径望遠鏡を併用する

# 本発表の流れ

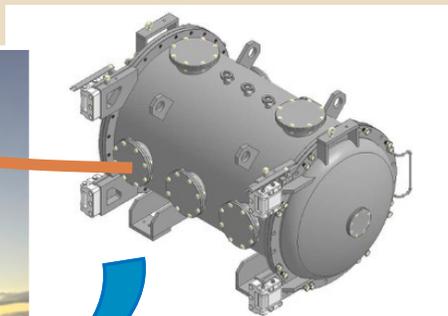
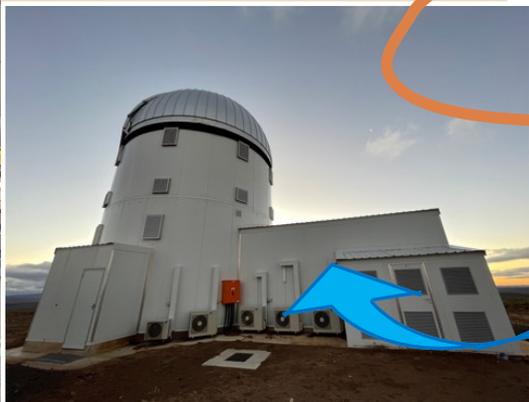
- 科学目標とアプローチ
- 装置概要と設計仕様
- スペクトル変動を抑えるための工夫
- 開発体制と進捗状況

口径1.8m (大阪大)

# TELESCOPES IN SOUTH AFRICA



Optical fiber

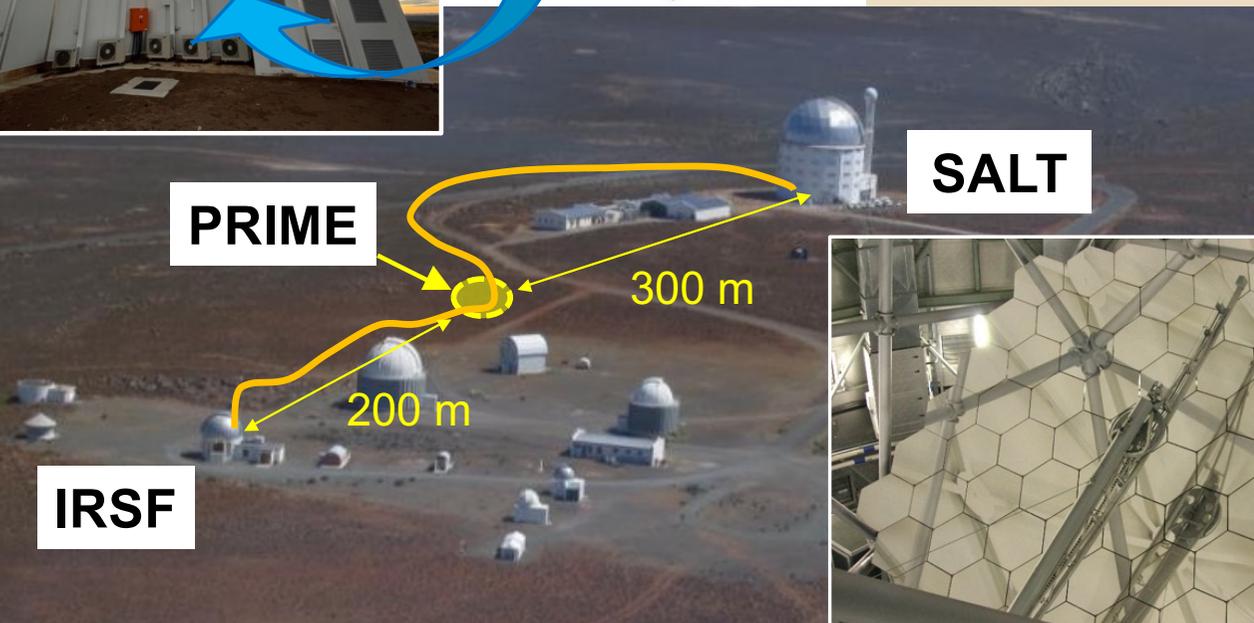


SAND  
分光器

口径11m  
セグメント鏡  
(SAAO)



口径1.4m (名古屋大他)



SALT

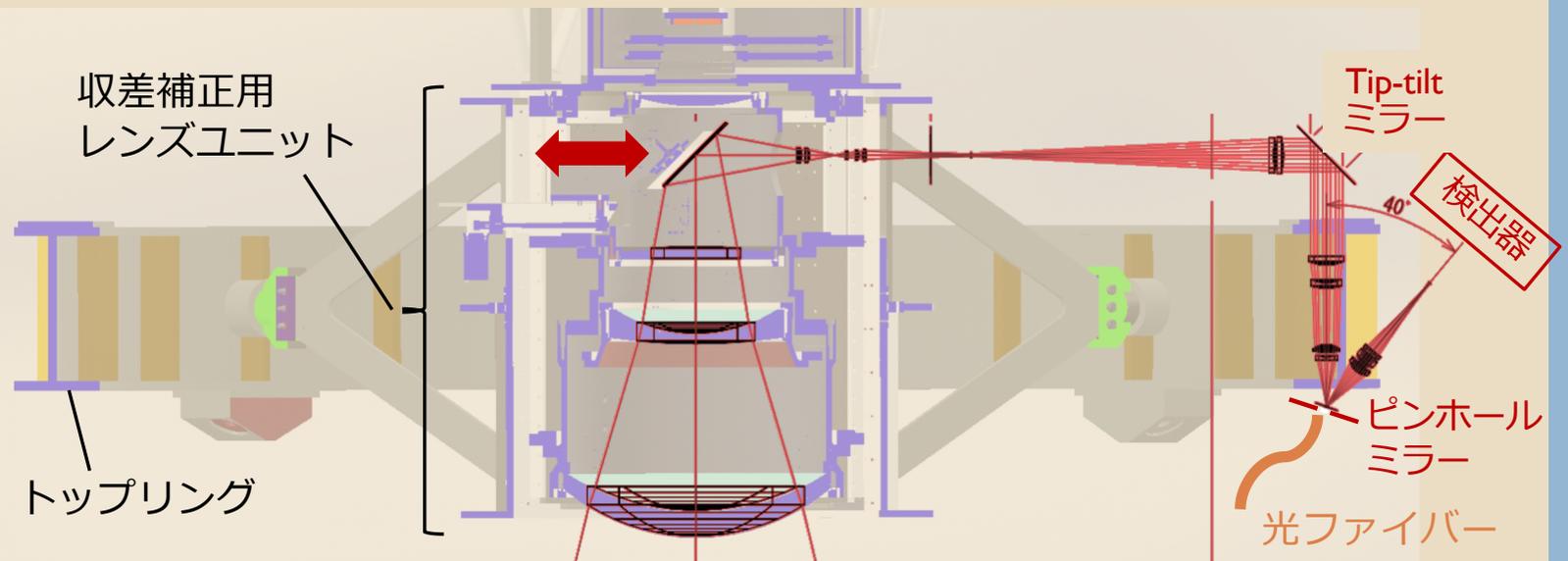
PRIME

IRSF



# ファイバー入射モジュール

- 望遠鏡収束光をファイバー入射端面上へ結像させる
- ファイバーコアのサイズとシーイング像サイズの比率が最適となるよう拡大率を変える
- ファイバーコアに対する星像の重心位置をモニター・制御する
- 大気分散を補正する

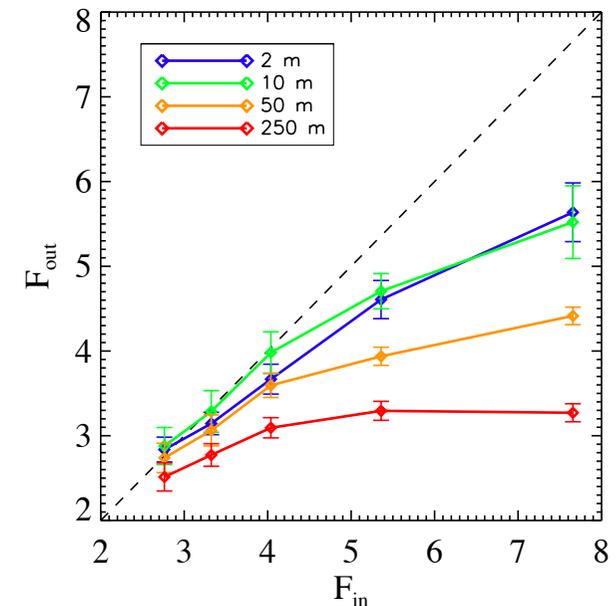


# 各望遠鏡のパラメータ

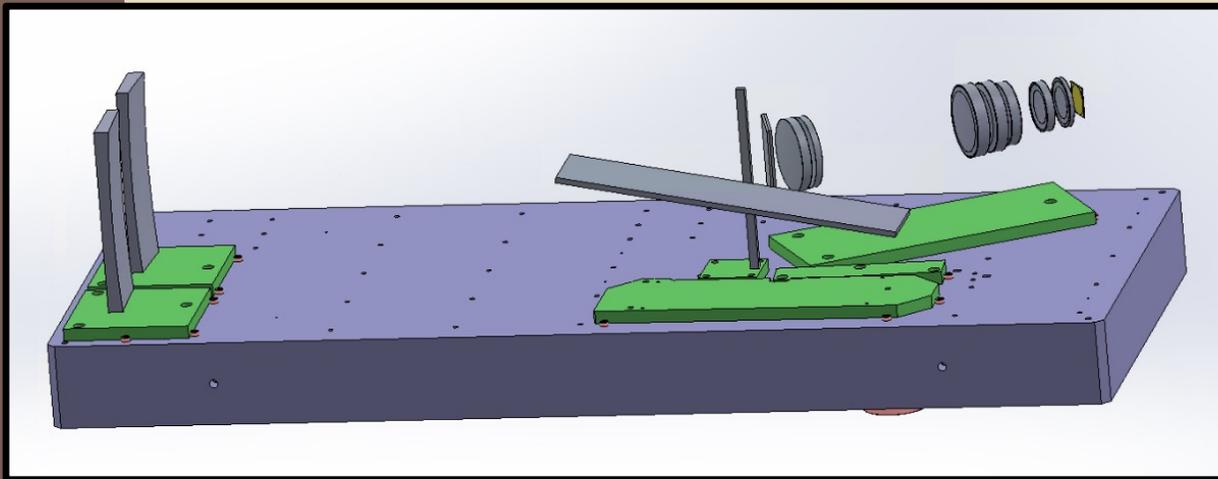
\*シーイングサイズ FWHM=1.5" z,Y-band

	口径 [m]	利用焦点	ファイバー入射F値	ファイバー面 Plate scale [ $\mu\text{m}/\text{arcsec}$ ]	ファイバーコア直径 [ $\mu\text{m}$ ]	ファイバー視野 [arcsec]	ファイバーカップリング効率* [%]
PRIME	1.8	主焦点	3.3	29.1	60	2.1	75
IRSF	1.4	ナスミス	3.3	22.6	60	2.6	88
SALT	11	主焦点	3.3	178	60	0.34	<10
			4.2	224	350 → 60	1.56 → 0.34	60 → <10

- 安定したファイバー出射F値を得るため、ファイバー入射F値<3.3としたい
- SALTは大口徑望遠鏡のためプレートスケールが1桁大きく、同じ分光器ではファイバーカップリング効率が約10分の1に...  
その分、集光力が約40~50倍になる。  
(ただし観測高度は37度に固定)



# エシエル分光器



軸外し放物面鏡  
( $f=741\text{mm}$ )

クロスディスペルサー  
(VPHグレーティング)

カメラレンズ  
( $f=250\text{mm}$ )

検出器  
(HAWAII-2RG→  
SIDCAR→MACIE)

オーダーソート&  
サーマルカット  
フィルター

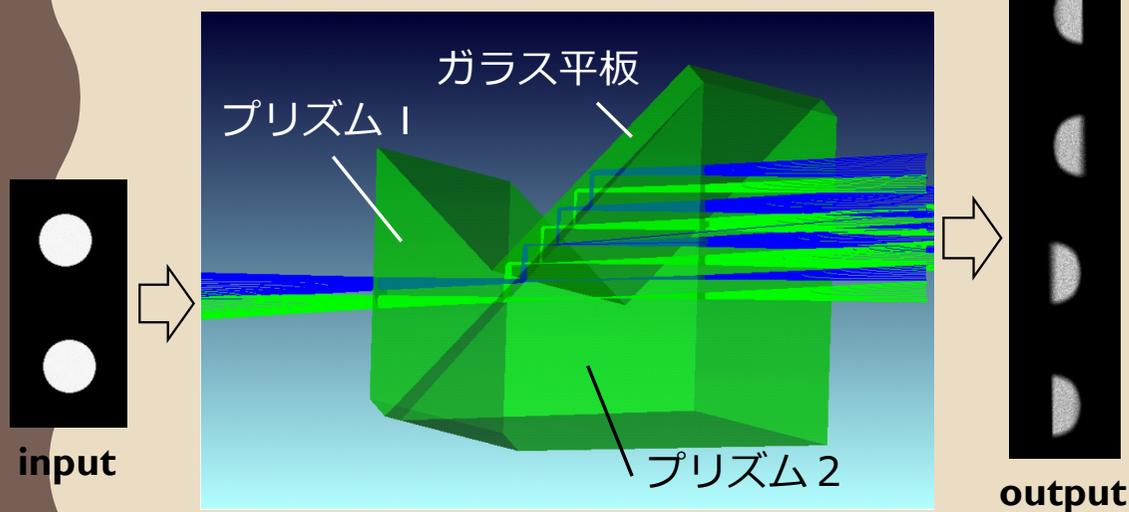
← ファイバー像入力

エシエルグレーティング  
(溝間隔実測値  $75\ \mu\text{m}$ , ブレーズ角実測値  $79.4^\circ$ )

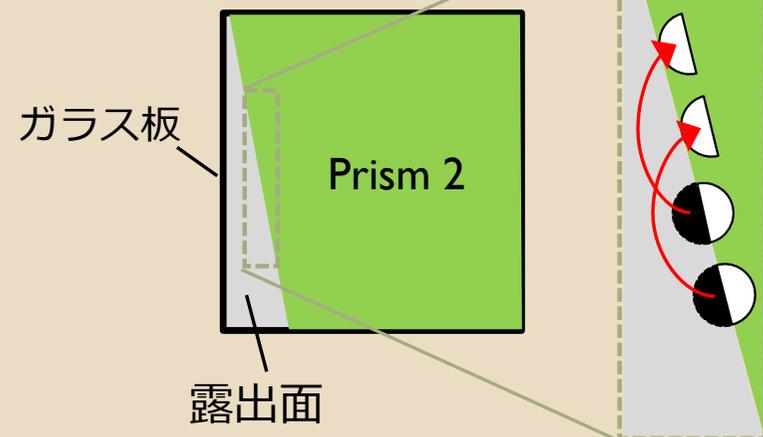
# イメージスライサー

- イメージスライサーでそれぞれのファイバーコア像を2分割してから波長分散をかけることで、光損失なく波長分解能を向上させる

Bowen-Wallraven 型イメージスライサー



Back side view



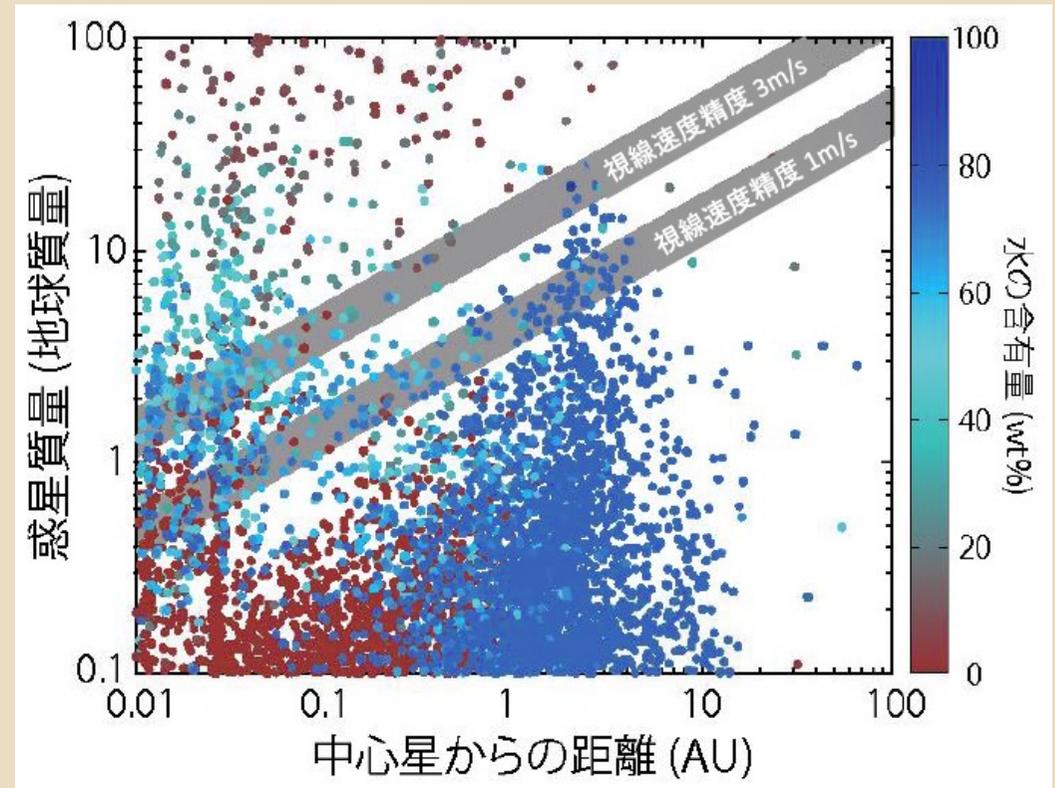
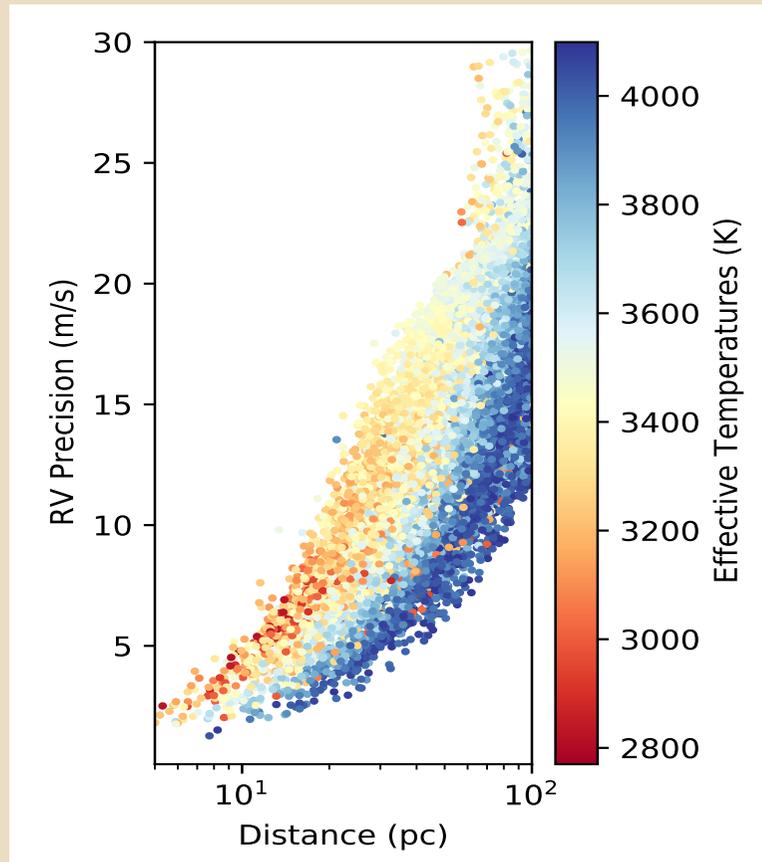
白色領域の光線 : 直進して同一材質のプリズム2へ入射

黒色領域の光線 : ガラス平板内で多重反射し光軸が上方へ移動

# 設計仕様

波長範囲	<b>0.849 – 1.083 <math>\mu\text{m}</math> (z,Yバンド)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— 強い吸収線が豊富</li><li>— 恒星活動度の指標となる吸収線とともに最端次数でカバー (Call at <math>\sim 0.85 \mu\text{m}</math>, He at <math>1.083 \mu\text{m}</math>)</li></ul>
波長分解能	<b>R<math>\sim 66,000</math></b>
ファイバ視野	$\phi 2.1''$ cf. シーイング FWHM $1.5''$ => ファイバカップリング効率 $\sim 75\%$
効率	<b><math>\sim 10\%</math> at <math>1 \mu\text{m}</math></b>
視線速度精度	距離 50pc にある自転速度 $V \sin i \sim 10 \text{ km/s}$ の G 型星で $\sim 5 \text{ m/s}$ 距離 10pc にある自転速度 $V \sin i \sim 2 \text{ km/s}$ の M 型星で $\sim 2 \text{ m/s}$ ※ 恒星フォトンノイズリミットの30分露光1回の場合

# TESSのターゲットリストにあるM型星について SAND+PRIMEで観測した場合に期待される視線速度精度 (恒星フォトンノイズリミットの30分露光1回)



▲ M型星周りに予測されるハビタブル惑星の分布

しかし・・・！

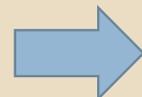
一般的な高分散分光器では、装置の不安定性によりスペクトルが変動し  
装置由来の系統的な視線速度誤差が

フォトンノイズに由来する統計的な視線速度誤差を上回ってしまう

視線速度変動 2 m/s => 波長変動  $7 \times 10^{-9}$   $\mu\text{m}$

波長要素の約2000分の1

検出器ピクセルの約1000分の1

 ドップラー分光器ではスペクトルを安定させるための工夫が必要

# 本発表の流れ

- 科学目標とアプローチ
- 装置概要と設計仕様
- スペクトル変動を抑えるための工夫
- 開発体制と進捗状況

# ファイバースクランブラー

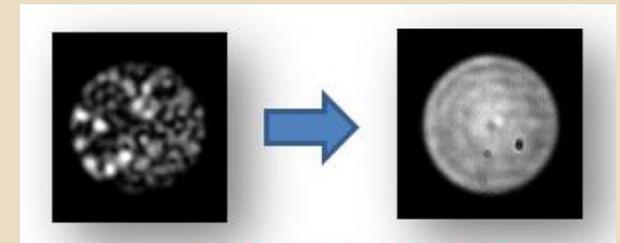
モーダルノイズによりファイバー出射面での輝度分布が変動することで、検出器面での各波長のファイバー像重心位置が変動する



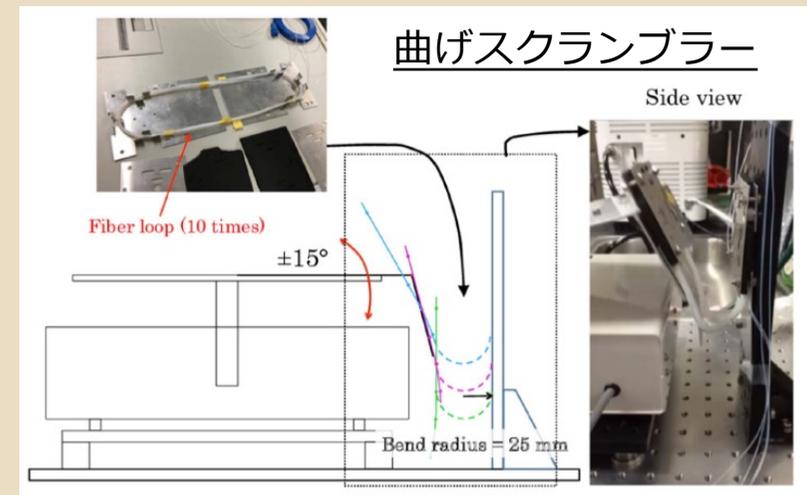
■ 出射面輝度分布を一様にするため、以下のいずれかまたはその組み合わせを用いる

- 長いファイバー
- 八角形ファイバー
- 曲げスクランブラー
- ねじれスクランブラー
- Nearfield-Farfield Exchange coupler

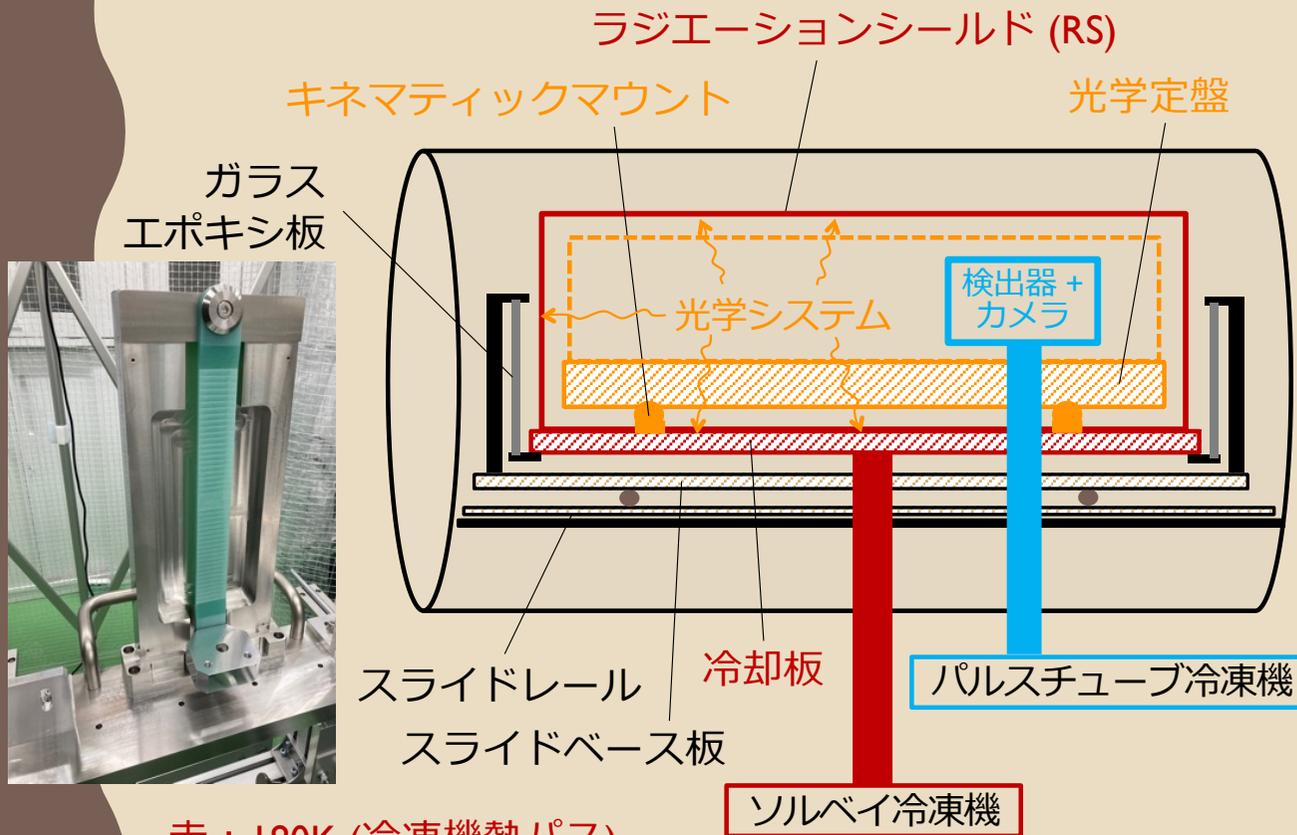
Kotani et al. 2018



Ishizuka et al. 2018



# 温度制御システム



赤 : 180K (冷凍機熱パス)  
橙 : 180K (放射冷却)  
青 : 60K (冷凍機熱パス)

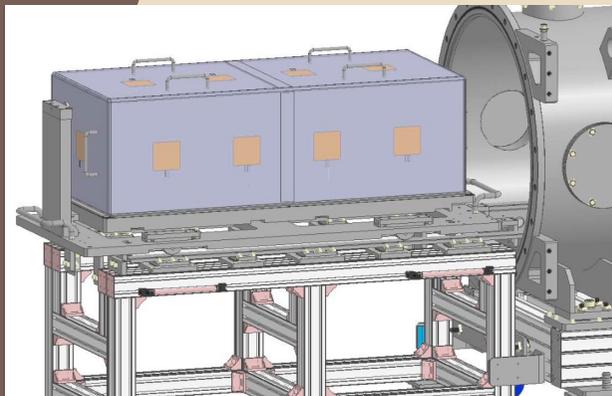
分光器光学系の温度変動により各波長のファイバー像重心位置が変動する



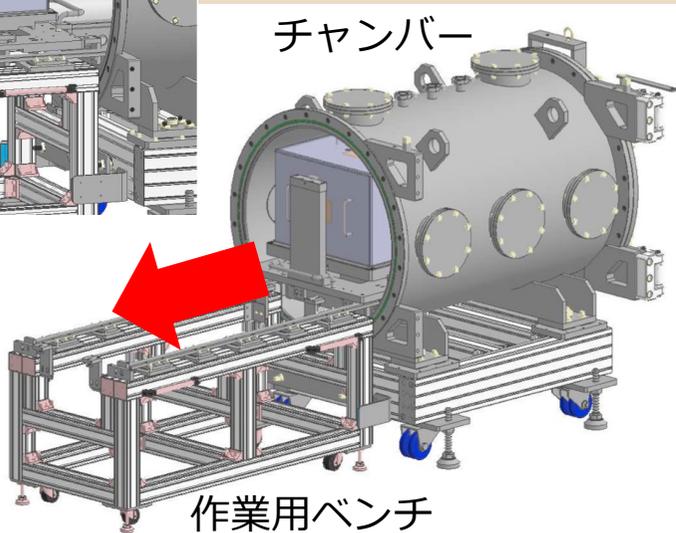
- 冷却板・RSに熱パスを繋ぎ、多数の温度センサーとカプトンヒーターを用いて温度制御する (目標 $\pm$ 数十mK)
- 放射冷却でRS内部の光学系を冷やす
- 断熱のためガラスエポキシ板によって冷却板を3点で吊り下げ支持する

# 温度制御システム

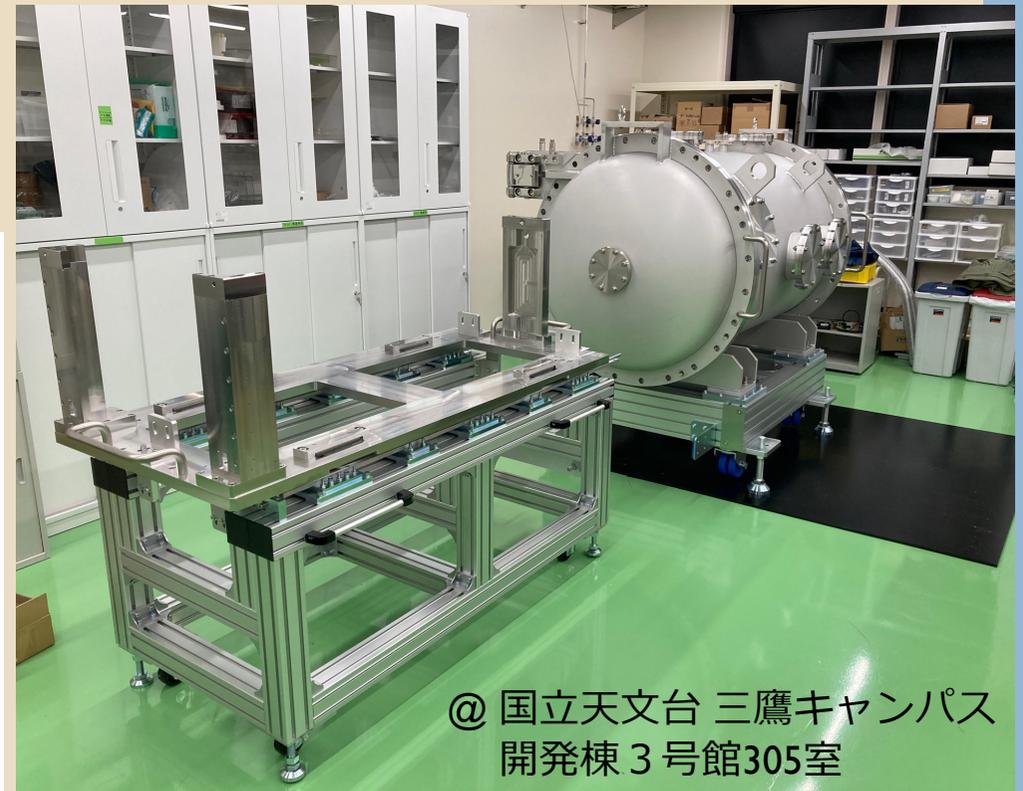
- 作業効率の向上のため、スライドレールに沿って光学系を外に引き出せる機構を装備



チャンバー



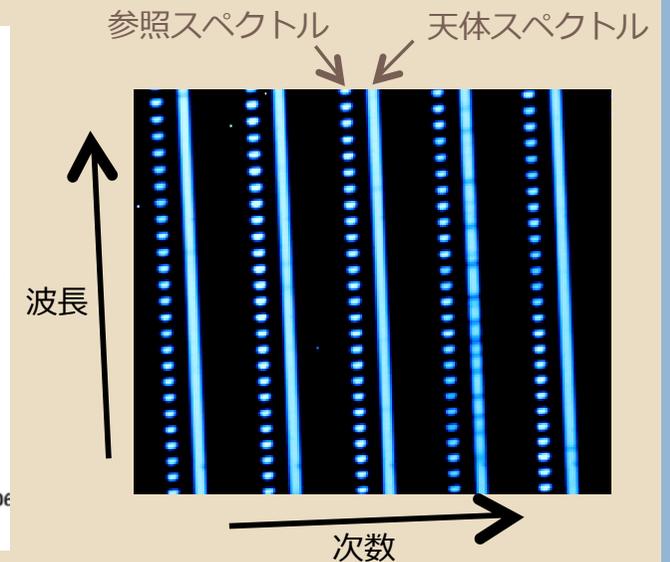
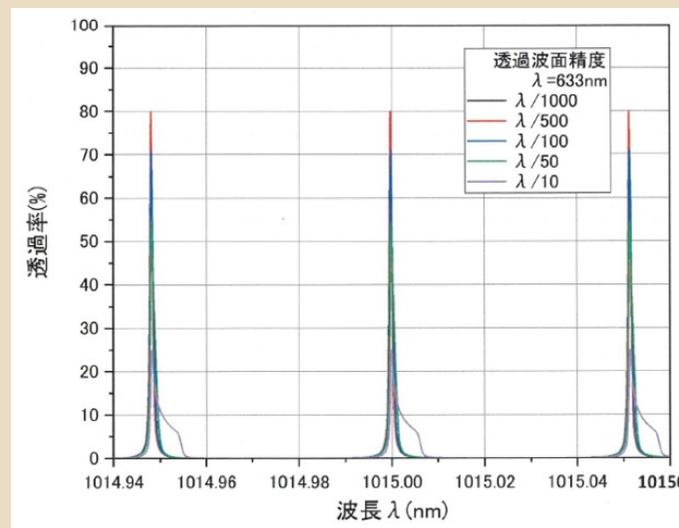
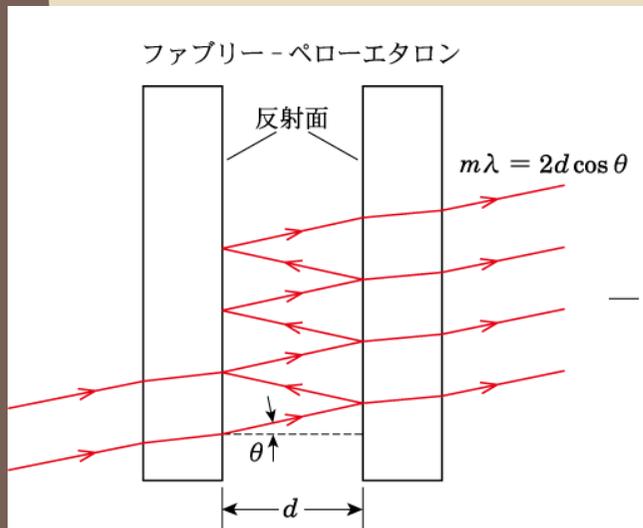
作業用ベンチ



@ 国立天文台 三鷹キャンパス  
開発棟 3号館305室

# 波長同時参照システム

- 天体光と同じ分光器光路を通った波長参照光のスペクトルを同時取得し、それらの間の相対的な変動に着目することで、装置の不安定性の影響を低減する
- 白色光をファブリペローエタロンに通し、等周波数間隔で輝線を示す参照スペクトルを得る
- 波長の絶対値を知るために ThAr ランプを併用する



# 本発表の流れ

- 科学目標とアプローチ
- 装置概要と設計仕様
- スペクトル変動を抑えるための工夫
- 開発体制と進捗状況

# 開発体制

※ 下線付きは大学院生

コンポーネント	メンバー（敬称略）
PRIME 望遠鏡	大阪大（住、鈴木、平尾、他）
PRIME用ファイバー入射モジュール	アストロバイロロジーセンター 国立天文台 総研大 東京大 （田村、小谷、高橋、葛原、 <u>細川</u> 、 <u>多田</u> 、西川、上田）
エシエル分光器	
分光器温度制御システム	
波長同時参照システム	
分光器用検出器モジュール	鹿児島大（永山）
IRSF用ファイバー入射モジュール	名古屋大（國生、 <u>小崎</u> ）

# 進捗状況

コンポーネント	
PRIME 望遠鏡	初期運用開始
PRIME 用ファイバー入射モジュール	前段光学系のみ製作済み。
エシエル分光器	光学設計は完了。機械構造設計中。 一部の機械構造を除き本年度中に製作完了見込み。
分光器温度制御システム	ラジエーションシールドと熱パスを除く構造部品は製作済み。ヒーター選定中。 まずは冷凍機ヘッド温度制御試験を予定。
波長同時参照システム	来年度設計予定
分光器用検出器モジュール	機械構造設計中。読み出し試験を準備中。
IRSF用ファイバー入射モジュール	大気補正光学系の実証実験を準備中。

0%

100%

→ 2024年に南アへ輸送、ファーストライト予定

# まとめ

- 若いガス惑星、ハビタブル惑星の探索を目指して近赤外ドップラー分光器を開発中
- PRIME、IRSF（将来的にはSALT）とファイバー接続することで多くの望遠鏡時間を獲得し、長期的かつ高頻度な視線速度モニター観測を実現する
- ファイバースクランブラーと温度制御システムによりスペクトルを安定させ、装置由来の視線速度誤差を抑える
- 波長同時参照システムを用いて、残されたスペクトル変動を補正する
- 分光器部分は来年度から組み立て・試験段階に入る
- ファイバー入射モジュール、波長同時参照システムは引き続き設計を進める