

高感度近赤外線高分散分光器 WINERED

マゼラン望遠鏡 ファーストライト

第11回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ

京都産業大学 神山天文台 大坪翔悟



**WINE
RED** 

赤外線高分散ラボ LiH

- 京都産業大学 神山天文台を拠点
- 赤外線高分散分光に係るサイエンスや装置・デバイス開発



「赤外線高分散ラボ」について

赤外線高分散ラボ(LiH)は、国内外の研究者が集う世界屈指の赤外線高分散分光天文学の拠点です。観測・装置開発といった手法を用いて、天文学および惑星科学における様々な研究テーマを推進しています。



News & Topics

2021.05.26 研究成果 : 福江氏(本学研究員)ほかの論文が The Astrophysical Journal Volume 913 に掲載されました。



京都産業大学 理学部
Faculty of Science



近赤外高分散分光器 WINERED

近赤外線波長域の高分散分光器は、天文・天体物理においての科学的重要性が広く認識されていたにもかかわらず、長年の間にそれに適合した観測装置が実現しませんでした。これは波長域特有の技術的ならびに観測的な困難によるものですが、わたしたちは現在得られる最高の技術を集結し、ついに可視光と同レベルの（赤外線においては世界最高レベルの）高感度、高精度の分光観測が可能な近赤外高分散分光器（WINERED: Warm Infrared Echelle Spectrograph to REalize Decent precision）を開発することに成功しました。波長域0.9-1.35ミクロンを同時にカバーすることができる広帯域モードを備え、多種多様な天体の観測に活躍しています。また、近い将来に波長分解能10万の「超高分散モード」の搭載によって、さらに高精度な恒星の観測が可能になることが期待されています。

[> for Researcher](#)

Lバンドイメージング分光器 VINROUGE

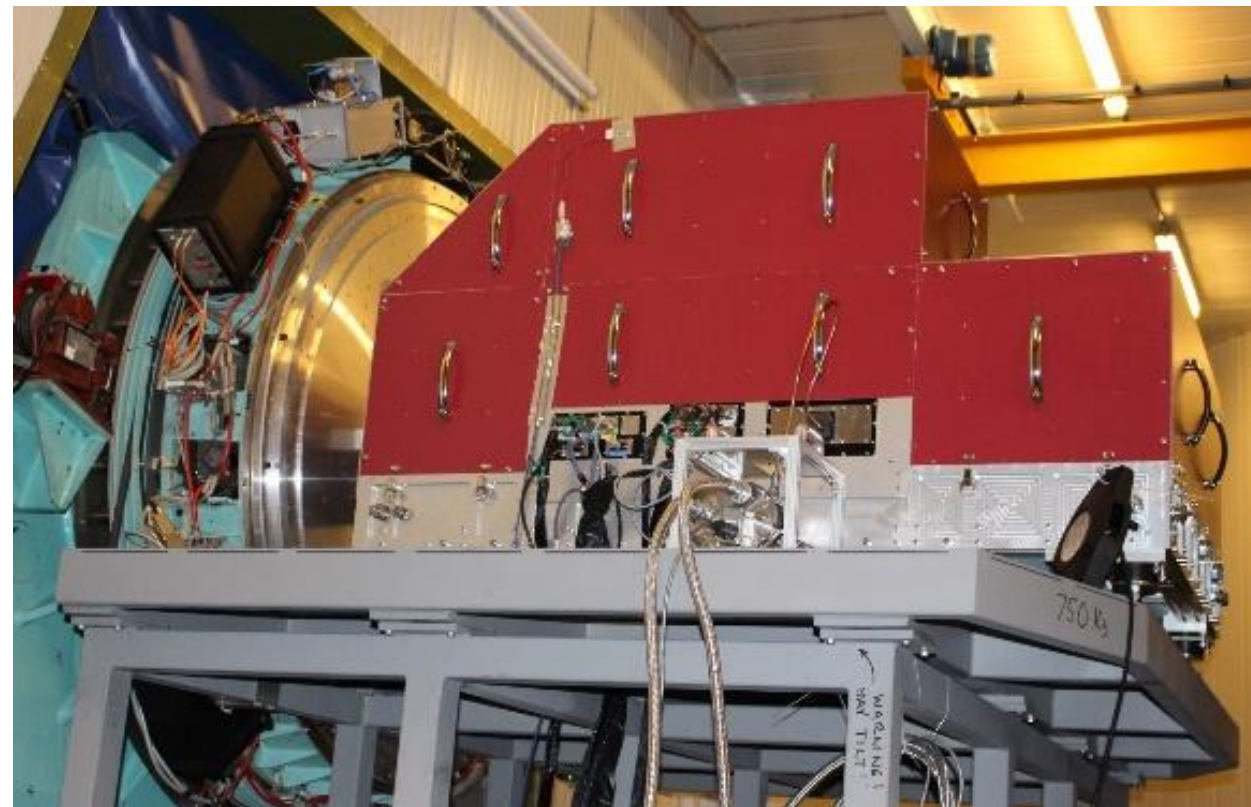
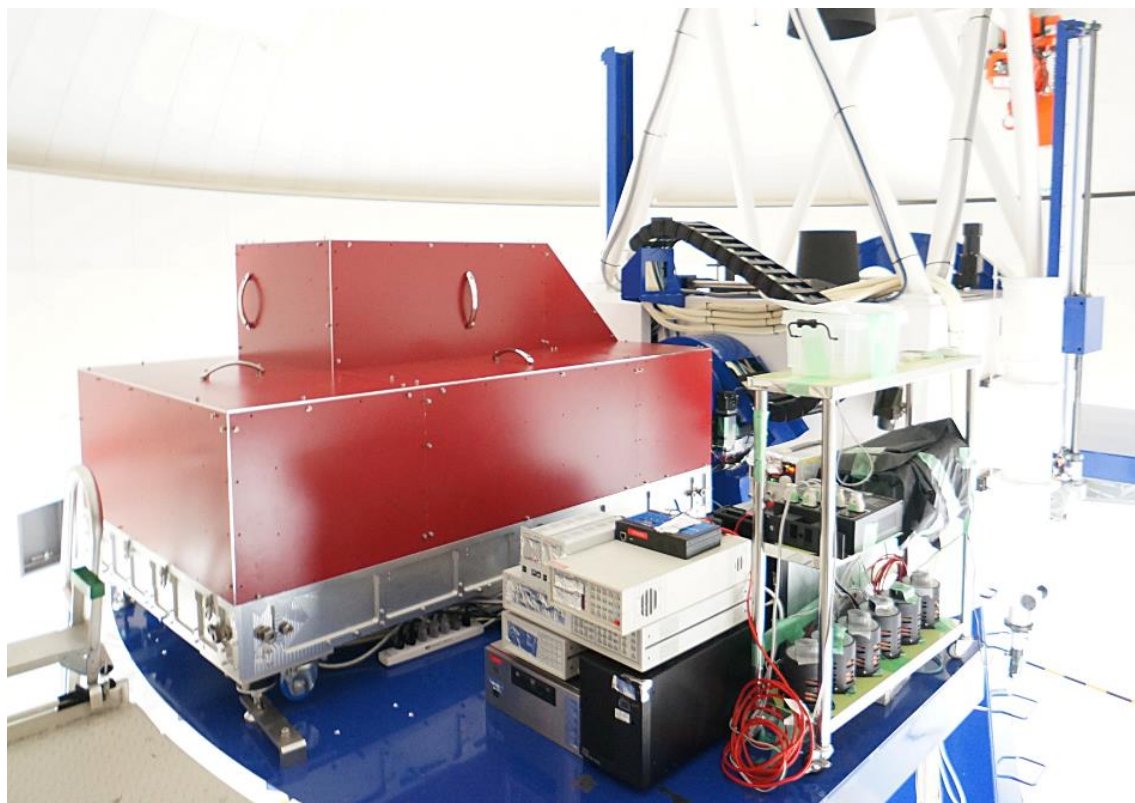
近赤外波長域でも長波長に位置する「Lバンド（波長2.9-4.2ミクロン）は、有機分子の振動回転遷移によるラインが豊富に存在することで知られています。したがって、この波長域での赤外高分散分光は、星間有機分子の観測に最も適している波長帯の1つであり、次世代の高感度分光器の実現により、アストロ・ケミストリーおよびアストロ・バイオロジーを大きく進展させることができると考えられています。わたしたちは、WINERED同様に広帯域かつ波長分解能10万をもつLバンド専用の高分散分光器（VINROUGE: Very-compact Infrared high-Resolution Ge-immersion Echelle spectrograph）を、「イメージングレーティング」と呼ばれる新しい光学素子を用いて完成させるべく開発をスタートさせました。VINROUGEは、海外の観測地の大望遠鏡に取り付けて大規模な観測をすすめることで、次世代の天文学をリードできると考えています。

赤外線用イメージングレーティングの開発

中間赤外線波長域（波長5-20ミクロン）は、大気からの強い赤外線放射に邪魔をされ天体の観測が最も難しい波長域の1つです。高分散分光は一部の明るい天体については行われていますが、本格的な観測のためには大気のない宇宙空間に出て、衛星を用いた観測が必須となります。しかし高分散分光は一般に大きな装置となるため、衛星での実現は不可能と考えられてきました。そこでわれわれは、小型の赤外線高分散分光を実現する「イメージングレーティング」と呼ばれる透過型の光学素子の開発を行っています。中間赤外線波長域には、バイオ・マーカー(bio-marker)と呼ばれる生命存在の兆候を示す分子ラインが多数存在すると考えられており、スペースからの高分散分光の初実現により、アストロバイオロジーの分野において、大きな進展が期待されます。

高感度近赤外線高分散分光器WINERED の概要

- 非冷却を実現した近赤外線高分散分光器
- 1~10mクラスの様々な望遠鏡に搭載可能なPI装置
- 最大スループット~60%を誇る高S/N観測に最適化されたデザイン



WINEREDの仕様

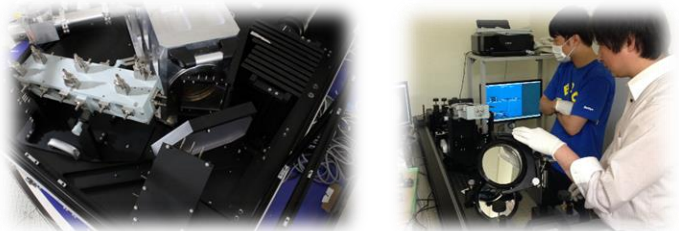
	WIDE	HIRES-Y	HIRES-J
波長範囲	0.91 – 1.35 μm	0.96 – 1.11 μm	1.14 – 1.35 μm
最大波長分解能	28,000	70,000	70,000
スループット	> 50%	~ 40%	~ 40%
スリット幅	0.3", 0.42", 0.6", 1.2" ※マゼラン望遠鏡設置時		
スリット長	9" ※マゼラン望遠鏡設置時		
運用温度	280K (光学系), 90K (カメラレンズ系), 78K (赤外線検出器)		
検出器	HAWAII-2RG 1.7 μm -cutoff (1 pixel = 18 μm)		

	スリットビューア
波長範囲	0.6 – 0.9 μm (R,I-bandが支配的)
視野	0.96' \times 0.72' ※マゼラン望遠鏡設置時
プレートスケール	0.045 "/pixel (1 pixel = 4.65 μm) ※マゼラン望遠鏡設置時

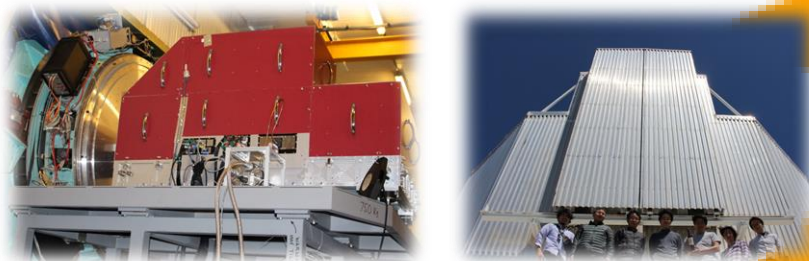
Ikeda et al. 2022

WINEREDの道のり

2016年 5月
HIRES mode ファーストライト



2017年 1月
ESO La Silla, NTT ファーストライト



2012年 5月
WIDE mode ファーストライト



2005年

東京大学にて検討開始

2010年

拠点を神山天文台へ

2012年

2013年

サイエンス観測開始

2016年

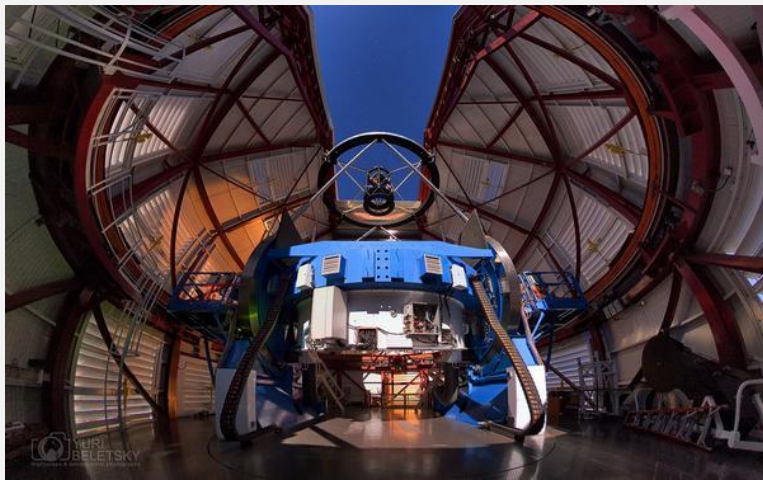
2017年

2022年

2022年 9月
Las Campanas, Magellan ファーストライト



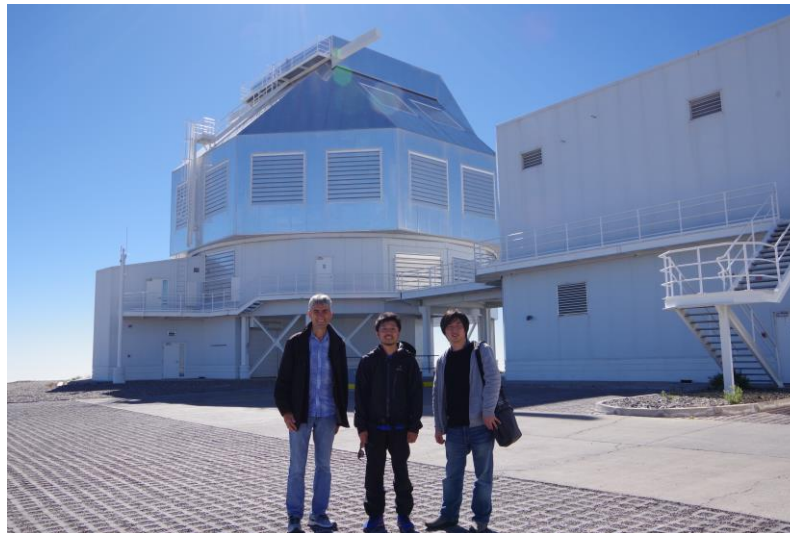
最終?目的地であるマゼランへ移設



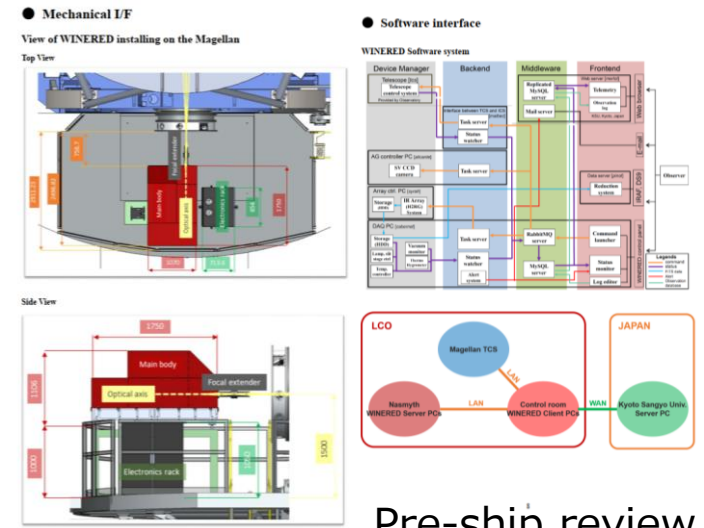
Instrument	WINERED			IRCS
Telescope	Araki	NTT	Magellan	Subaru
Location	Japan	Chile	Chile	Hawaii, US
Tel Diameter	1.3 m	3.58 m	6.5m	8.0 m
Seeing	3.0"	0.8"	0.6"	0.2" w/ AO
Spectral resolution	28,000	28,000	28,000	20,000
Limiting Mag. (J) ※ 8hrs, SNR=30	13.8	16.5	17.3 (WIDE)	15.5

Maellan/Las Campanasへ再移設

- 議論は2017年夏にスタート (w/ A. MacWilliam of Carnegie)
 - 2017年8月に最初の見学
- 2019年3月1日 pre-ship review
2019年3月中 移設作業
2019年7月 エンジニアリング観測
- PI装置であるが、他グループからのアクセスは可能
(観測サポートをする代わりに観測夜数を獲得)
- MOU/support agreementの締結
 - 観測夜数の保証
 - 装置Gr./観測所の責任の明確化
 - 予算出所の明確化
 - まずは2年、できれば5年まで



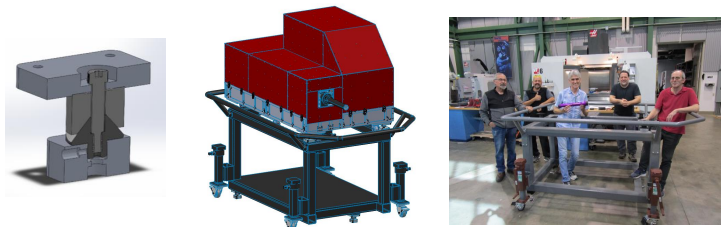
2017年8月 マゼラン訪問、検討開始



マゼラン望遠鏡へ移設 2018年~2019年

□ 機械/構造系

- ・ 筐体用カートへの設計製作 (w/カーネギー)



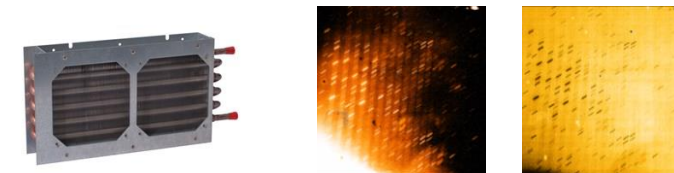
□ 光学系

- ・ focal extenderの導入
- ・ 望遠鏡との調整補助光学系 (pupil viewer)



□ 検出器・エレキ系

- ・ 検出器の微弱な迷光除去
- ・ エレキラックへheatsinkの導入
- ・ 電圧規格の変更の対応



□ 制御系

- ・ マゼラン用UIの開発 (w/エデックス)
- ・ マゼラン用ガイディングシステム (w/エデックス)



□ 真空・冷却系

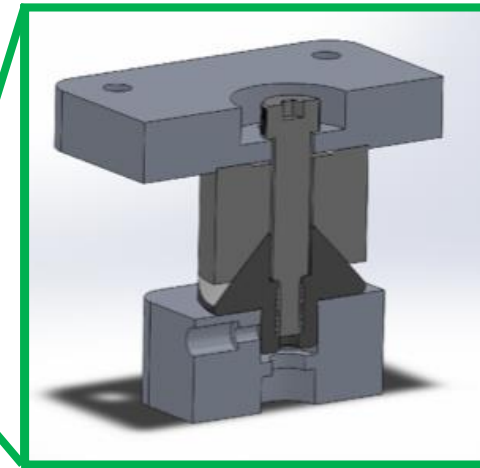
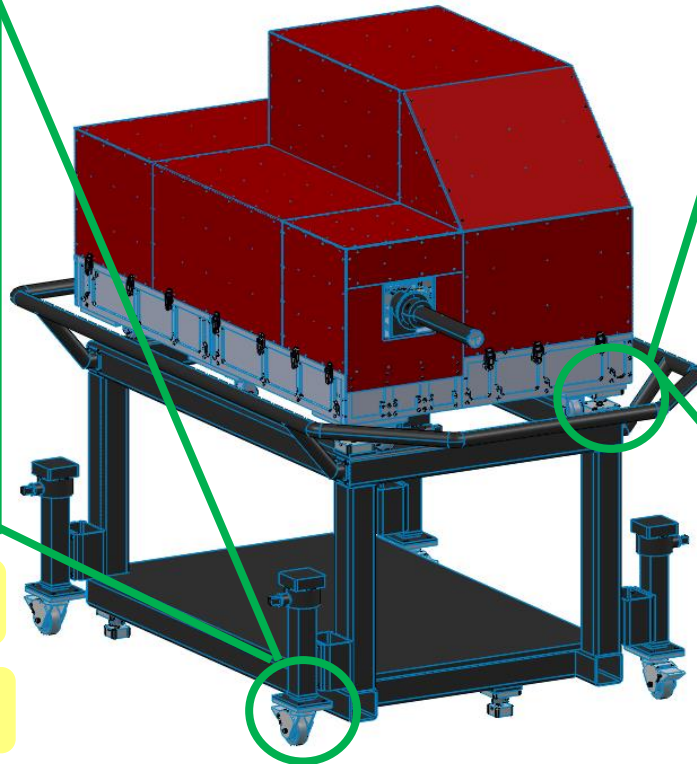
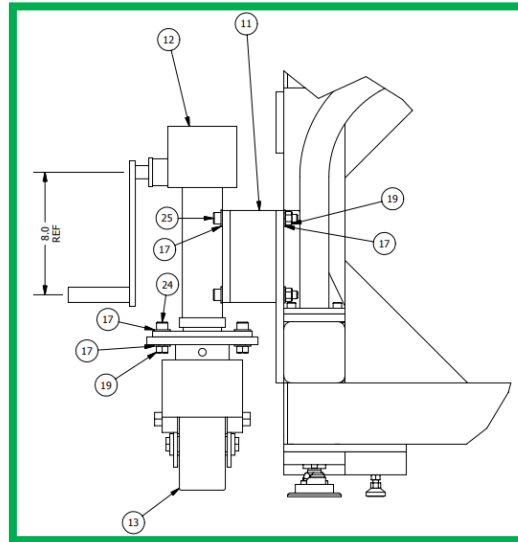
- ・ マゼランでの運用方法確立
- ・ 10年の運用を見越したメンテナンス
- ・ 冷凍機用UPSの導入



マゼラン望遠鏡へ移設 2018年~2019年

□ 機械/構造系

- ・ 筐体用カート的设计製作 (w/カーネギー)



調整手順を考慮した機構

観測所内の移動

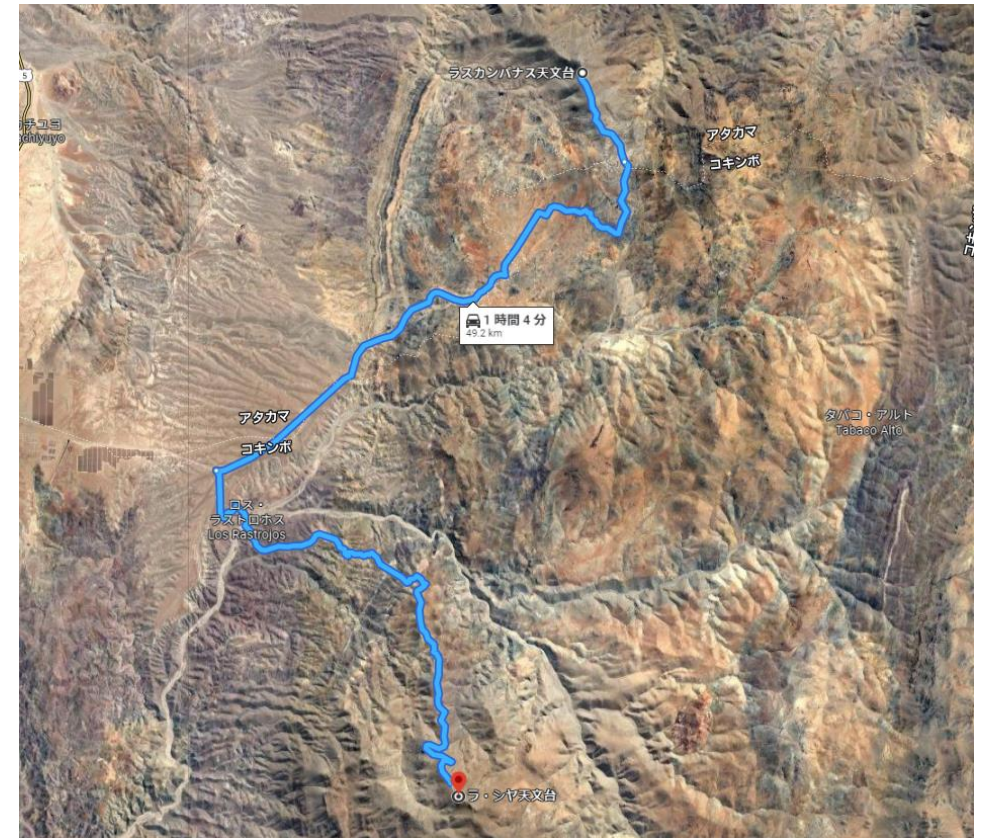
過拘束を避け、熱収縮の影響を補償

スリット位置の安定性

マゼラン望遠鏡へ移設 2018年~2019年

□ 総務

- 赤外線検出器の移転許可申請（アメリカ商務省、日本経産省）
- La SillaからLas Campanasへの全物品の輸送
- Pre-ship review等のドキュメント作成



マゼラン望遠鏡へ移設 2020年~2021年

新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、全てを一度リセットし、あらゆる物事の再調整。

マゼラン望遠鏡へ移設 2022年

➤ 5月10日～29日 観測装置セットアップ

・ 滞在者 3+2名

猿楽、大坪、竹内（京産大） + Andrew McWilliam、Charlie Hull（カーネギー）

・ 開梱、装置の組立から性能評価、新規ユニットの導入と試験

➤ 7月4日～27日 ファーストライトと観測ラン

・ 大雪のための観測中止

➤ 9月3日～26日 ファーストライトと観測ラン

・ 滞在者 5+2名

猿楽、大坪、竹内、谷口（東大）吉川（エデックス） + Andrew McWilliam、Charlie Hull

・ 5夜の観測プロポーザルに基づいて実施

“WINERED: detection of water in earth-sized exoplanet atmospheres”

“WINERED: Chemical composition of Inner Milky Way Cepheids”

マゼラン望遠鏡へ移設 2022年 1回目の渡航

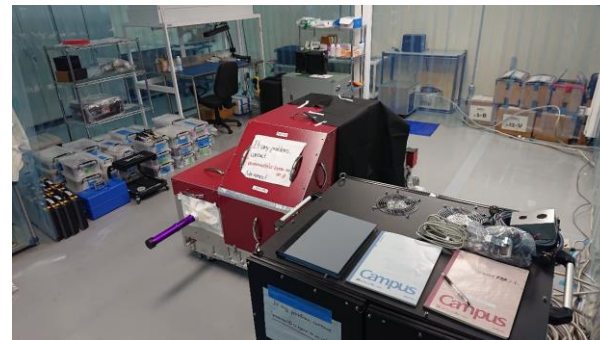
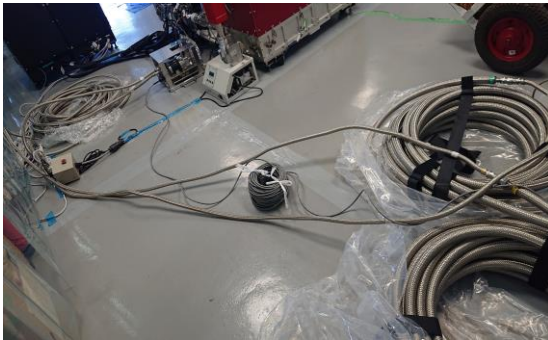
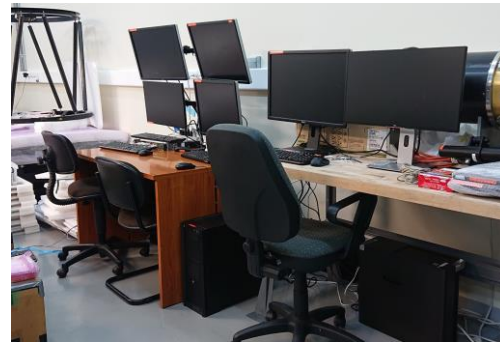
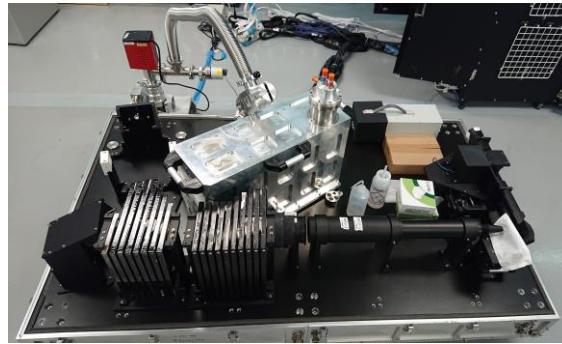
➤ 5月10日～29日 観測装置セットアップ

・滞在者 3+2名

猿楽、大坪、竹内（京産大） + Andrew McWilliam、Charlie Hull（カーネギー）

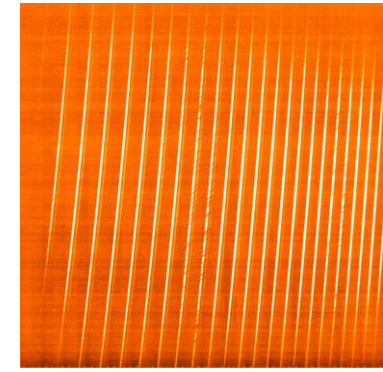
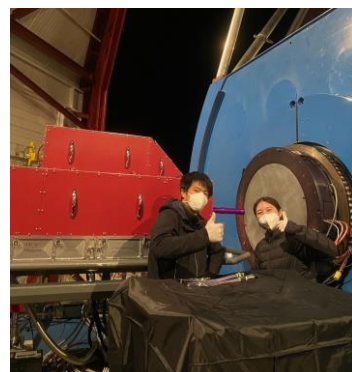
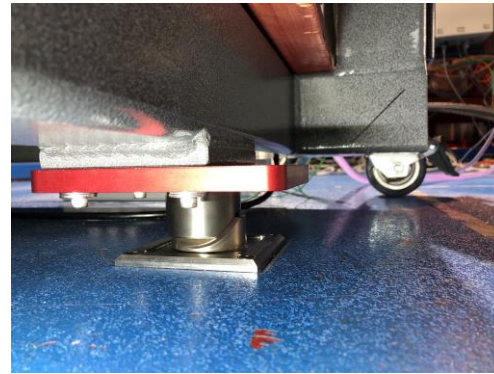
・作業内容

全物品の開梱、装置の再組立、ネットワークの構築、制御系の動作試験、冷凍機の駆動試験、赤外線検出器の駆動試験と特性評価、装置内の光学調整と特性評価、新規ユニットの導入試験 etc.

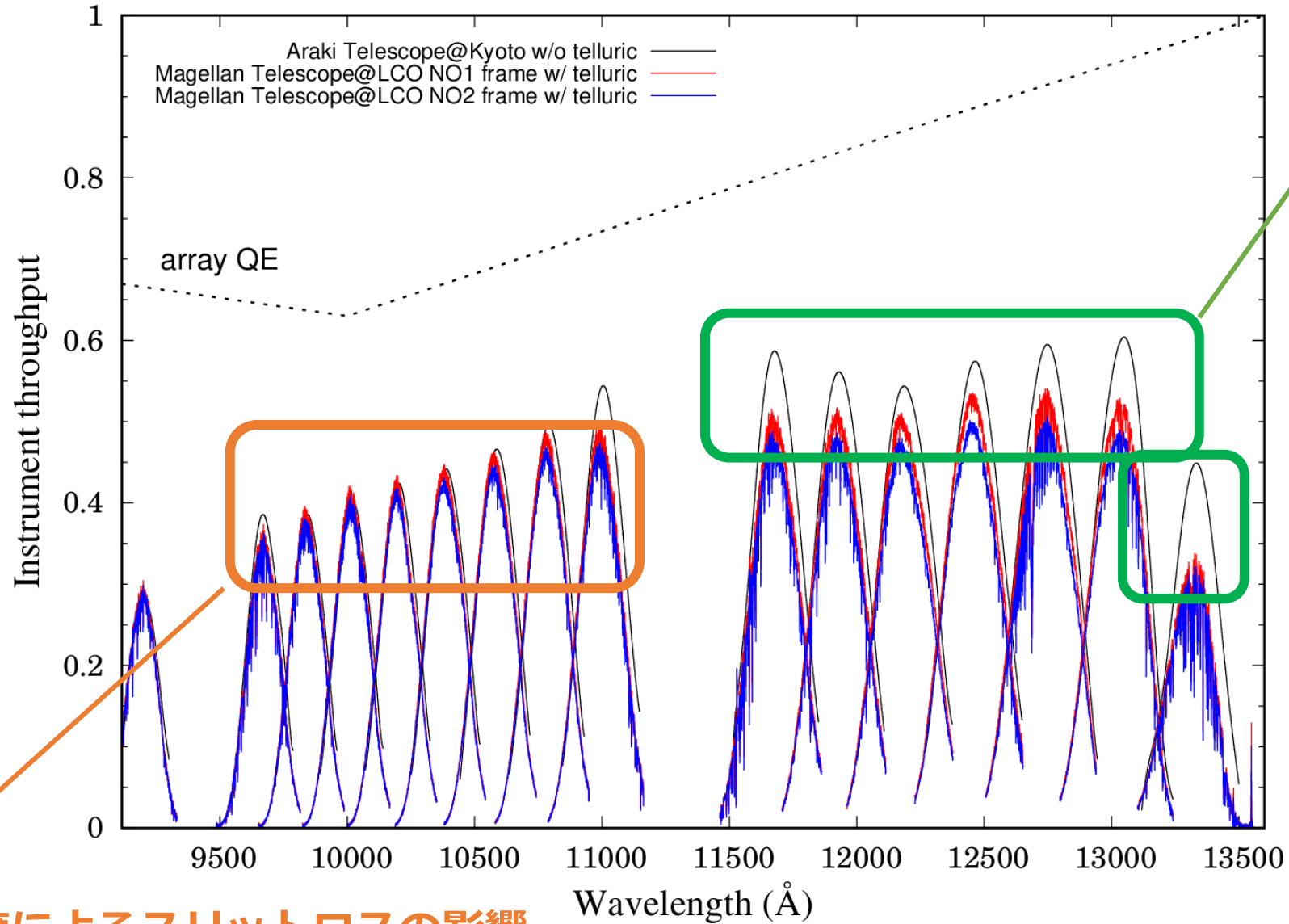


マゼラン望遠鏡へ移設 2022年 3回目の渡航

- 9月3日～26日 ファーストライトを含む観測ランのため渡航
 - ・ 滞在者 猿楽、大坪、竹内、谷口（東大）吉川（エデックス） + Andrew McWilliam、Charlie Hull
 - ・ 5夜の観測
 - “WINERED: detection of water in earth-sized exoplanet atmospheres”
 - “WINERED: Chemical composition of Inner Milky Way Cepheids”



ファーストライトの結果：スループット

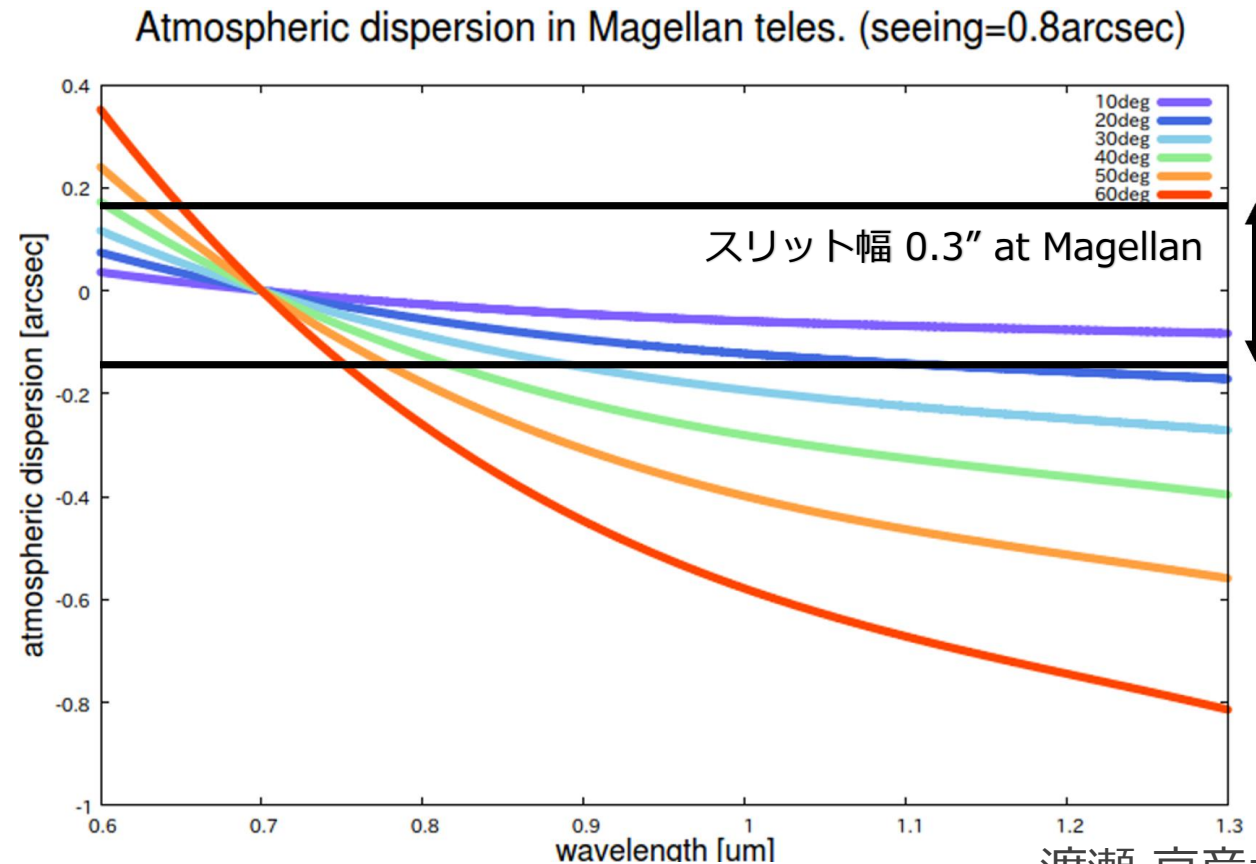


ガイドング精度によるスリットロスの影響

ファーストライトの結果：マゼランADC

大気分散差の影響

→ Magellan Clayの大気分散差の補正光学系（ADC）を使用



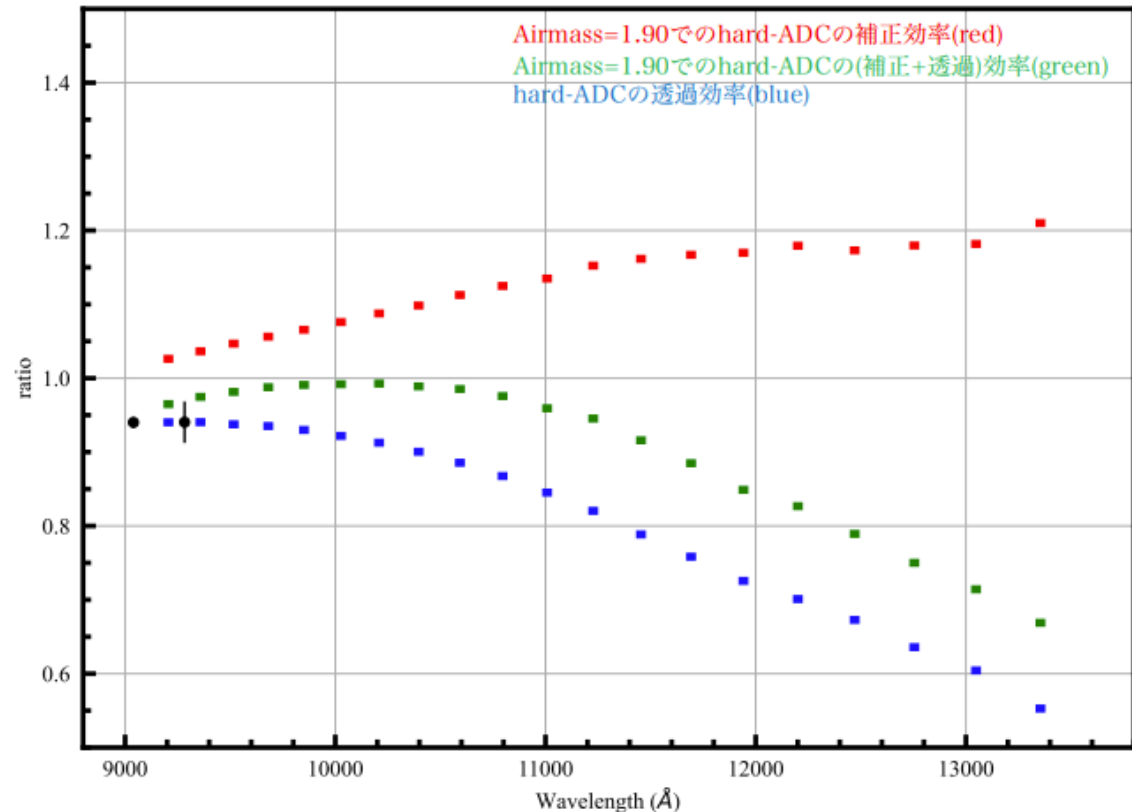
渡瀬 京産大修士論文 2018年

ファーストライトの結果：マゼランADC

Magellan Clay のADC 調査

- 近赤外線でも若干の補正は効いていそう（赤破線）
- ただし透過率が長波長に行くにつれて悪い（青破線）

WINERED波長域では使用できず



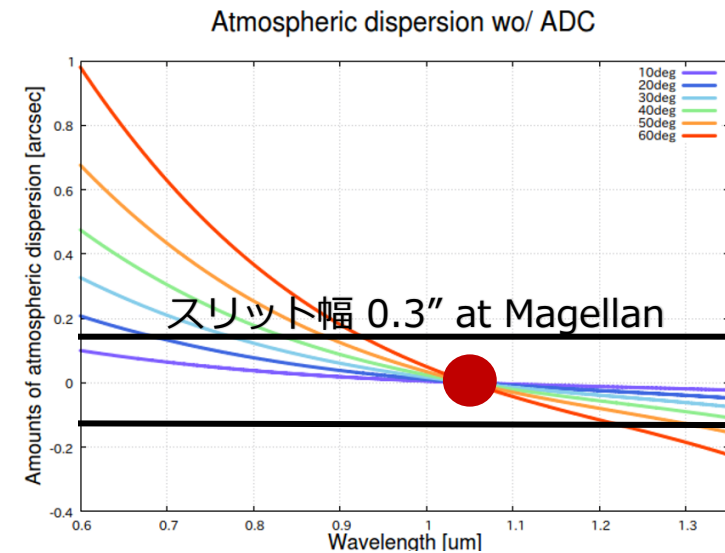
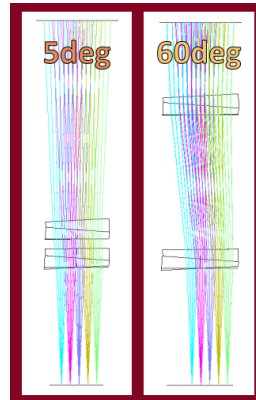
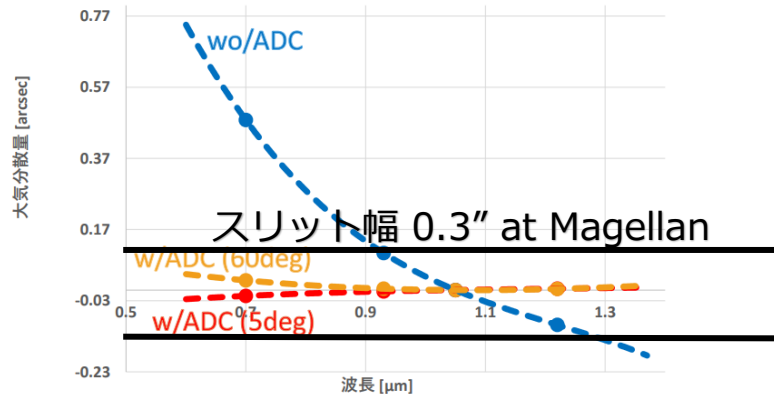
ファーストライトの結果：マゼランADC

現状の対応①

オートガイダーシステムによる大気分散差を考慮したオフセットガイド
→任意の波長を選択し、スリット効率を高める

現状の対応②

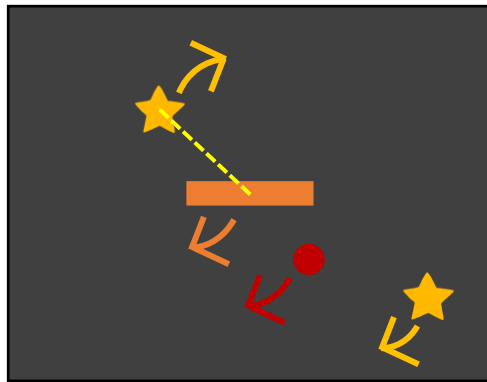
WINEREDに最適化されたADCを検討中



ファーストライトの結果：ガイディング精度

- ・イメージローテータに搭載できない
- ・スリット上でディザリングをしたい

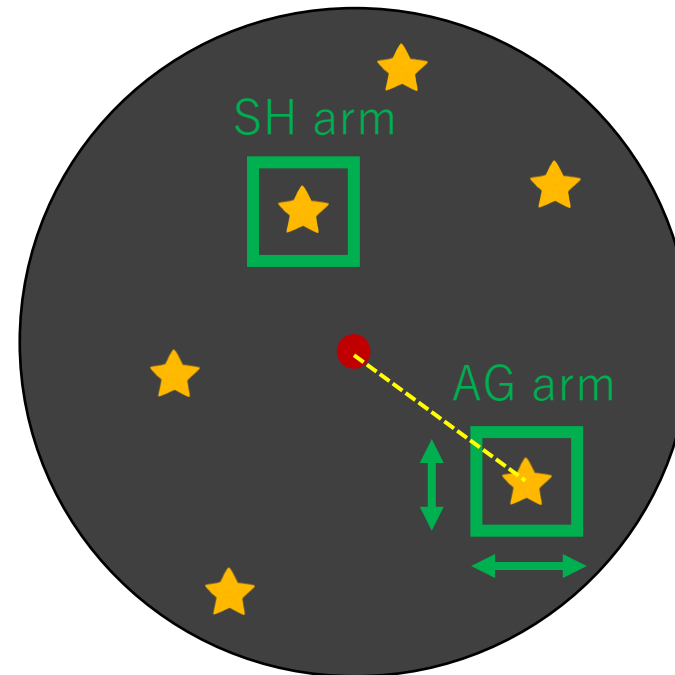
WINERED Slit viewer



- ・イメージローテータがないため、視野が回転する
- ・スリット中心とマゼラン焦点中心がずれている

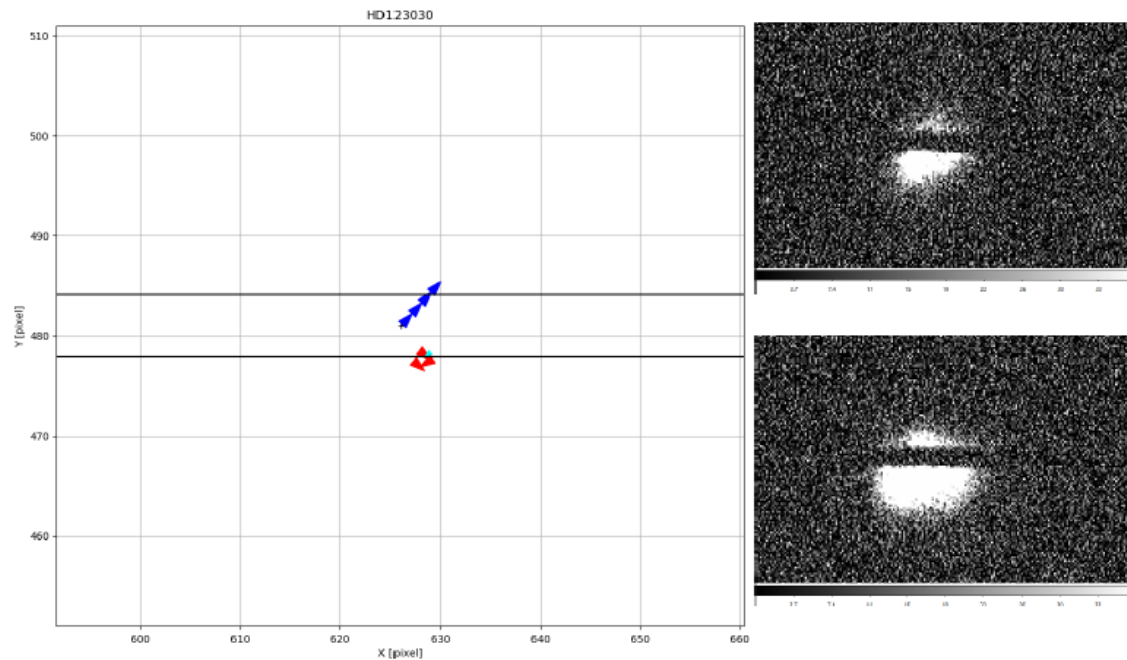
これらをスリット中心座標を基に補正

Magellan field viewer

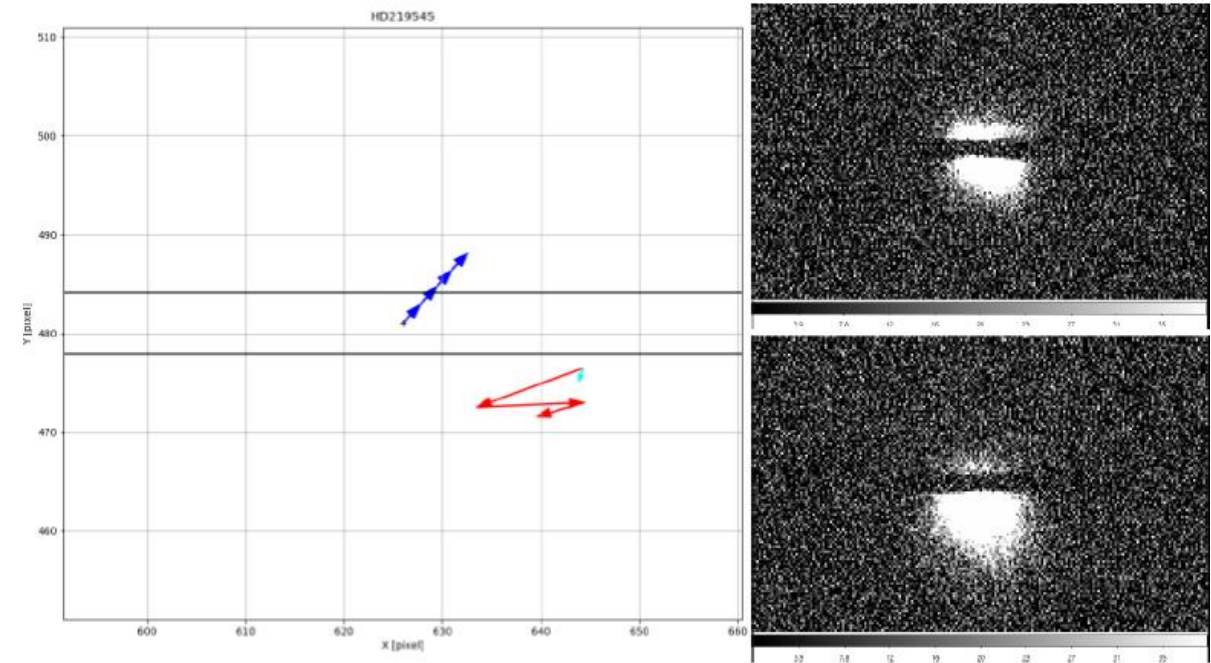


ファーストライトの結果： ガイディング精度

HD213030



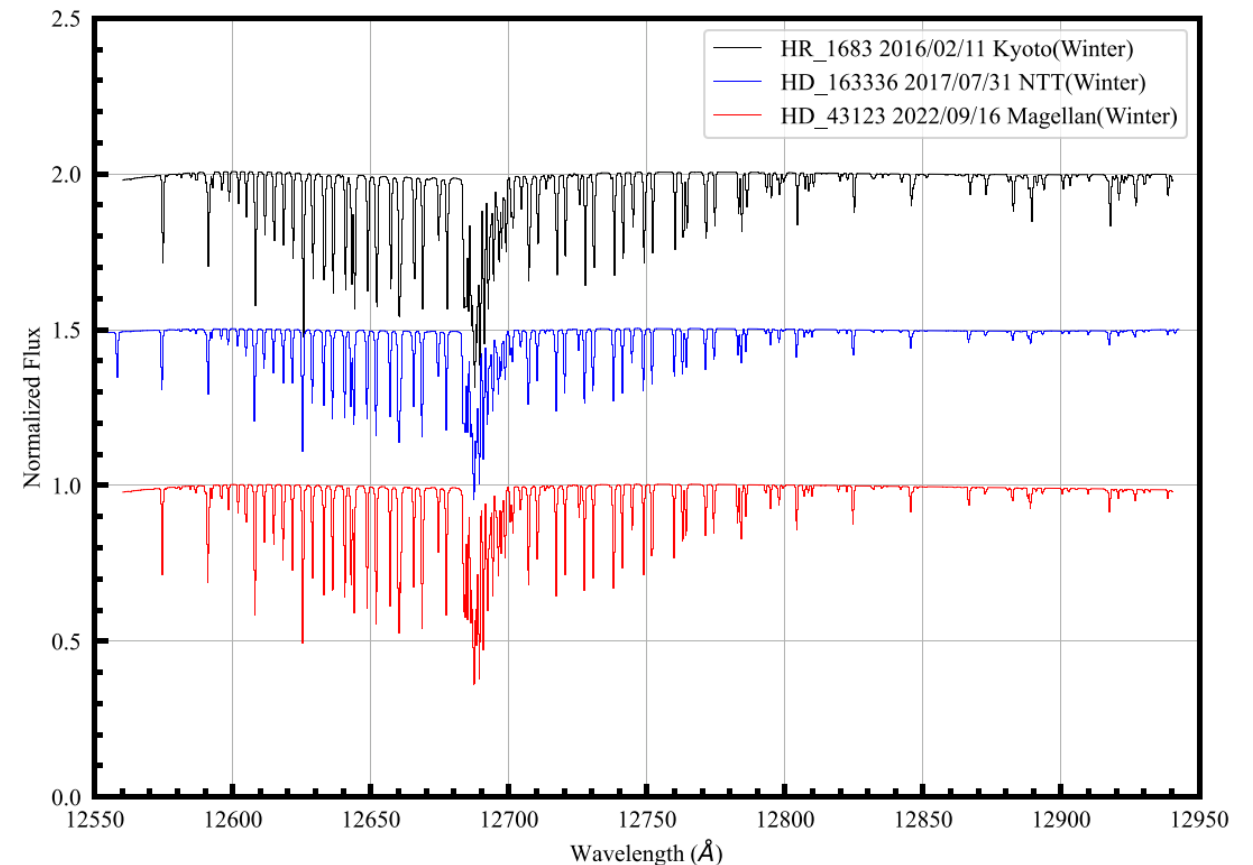
HD219545



目標天体に対して直接的に重心検出を行わないガイディングでは、ガイディング開始時のスリット中心と天体重心の一致具合に依存する

ファーストライトの結果：大気吸収線の様子

- 大気標準星の比較
 - 京都の冬（黒）と比較して水蒸気による吸収量は6割に減
 - NTTの冬（青）と比較は同等か



ファーストライトの結果：スペクトルの例

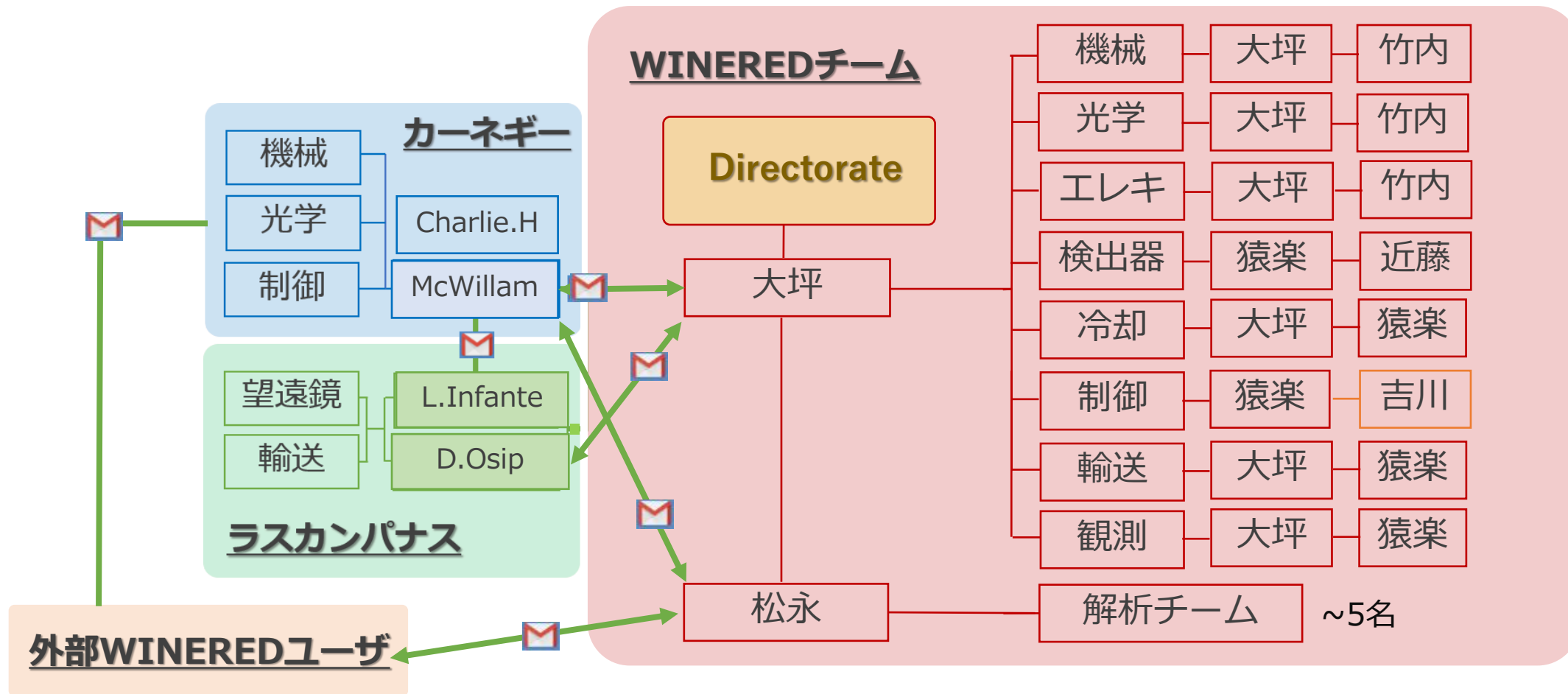
- SMC/LMC内にあるセファイド型変光星
 - セファイド型変光星
J = 12-13 mag, 20-30min積分
S/N = 40-80

これからの開発・検討要素

- 機械/構造系
 - ・筐体用カートのアスミス上での調整機構追加
 - ・待機室用の筐体カバー
 - ・観測中の温度変化における波長安定性の調査
 - 光学系
 - ・ focal extenderの鏡筒改修
 - ・モード変換の自動化
 - 真空・冷却系
 - ・ cool-downとwarm-upサイクルからの脱却
 - 検出器
 - ・残像に対する観測手法のマニュアル化
 - ・残像のないHAWAII-2RGへの変更
 - 制御系
 - ・マゼラン用ガイダーの性能向上
 - ・データ管理・配布の統合ソフトウェア
 - 観測
 - ・マゼランユーザへの観測サポート
 - ・外部観測者向けの観測準備ドキュメント
 - ・外部観測者向けの観測方法ドキュメント
 - ・航空券・滞在費の確保
-
- ・新しい望遠鏡へ移設したことに依る、インターフェイスの改修 ; 5~9月のフィードバック
 - ・環境が変化したことに依る、装置の特性評価
 - ・観測の運用方法が変化したことに依る、補助ツールの作成

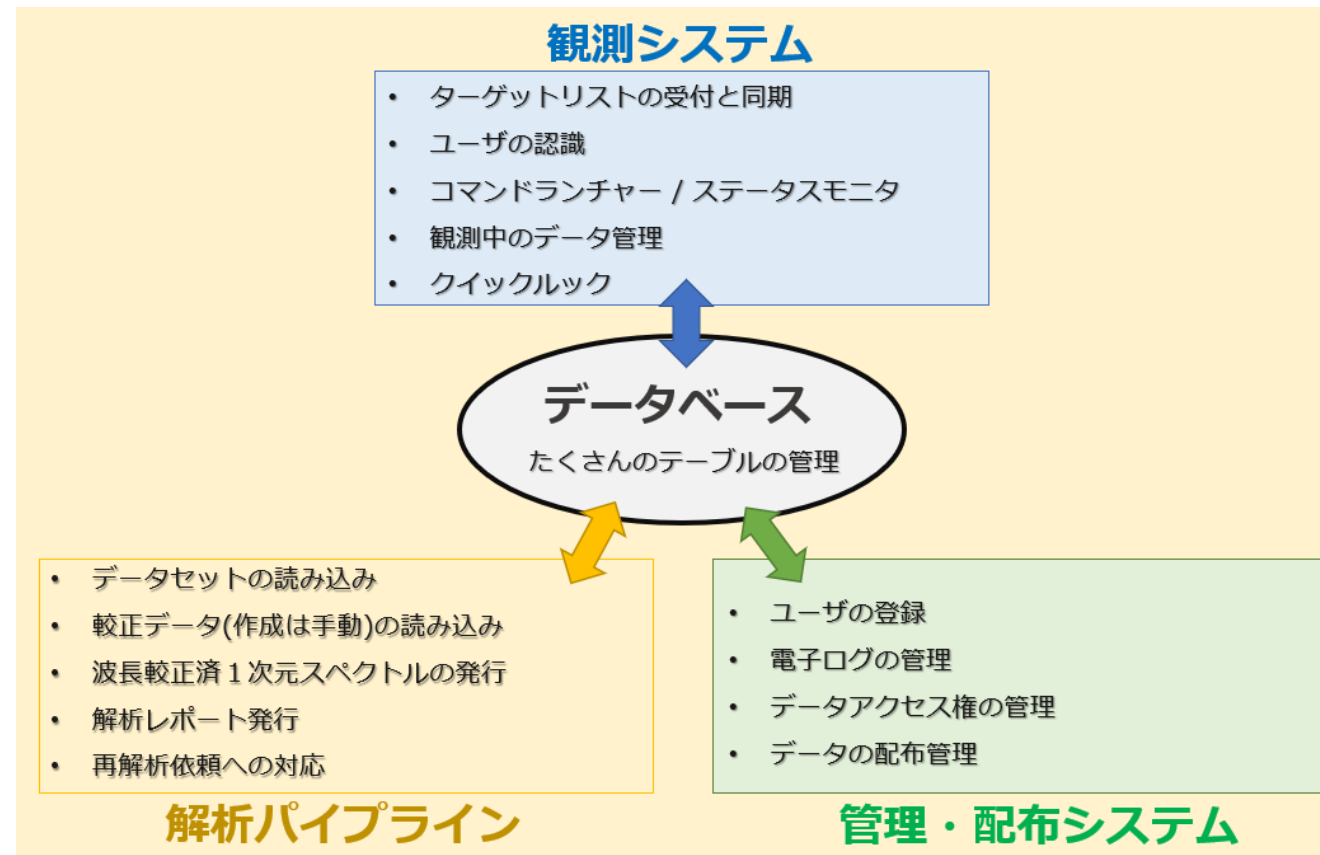
これからの開発・観測の体制

- PI装置だが、マゼランユーザに対してオープンな装置として扱われる
- WINEREDチーム外が得た時間の一部を、WINEREDチームに譲渡する



これからの開発要素 データ管理・配布の統合ソフトウェア

(おおよそ)自動で観測データを整理、解析、配布を行う統合システム



チームの成果創出に向けた最適化

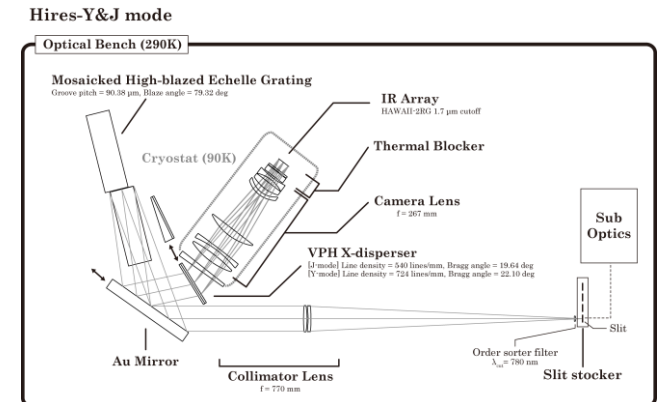
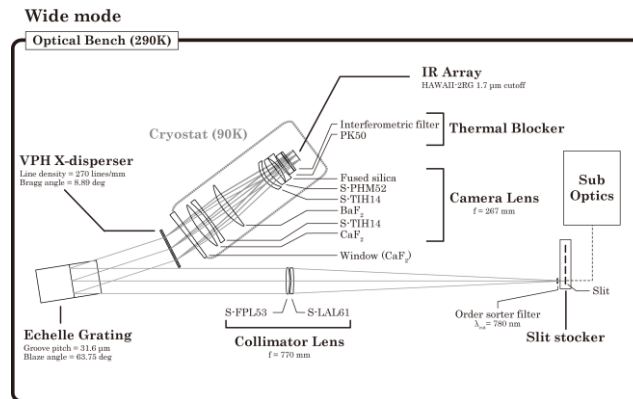
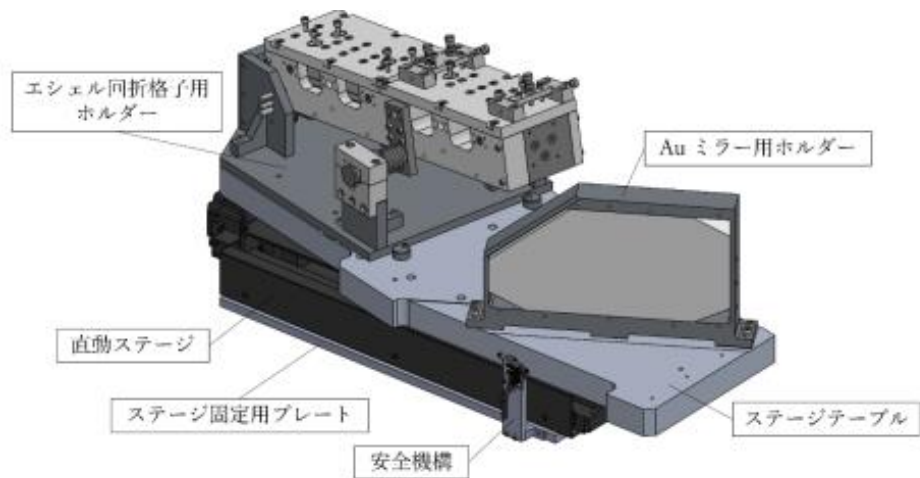
これからの開発要素 モード変換の自動化

これまでの観測

WINEREDチームに限定的で、観測計画も立てやすいため、手動のモード変換

マゼラン観測での観測

1晩の内に複数のPIや、複数のモードで観測が想定されるため、モード変換の自動化が求められる



まとめ

- 2018年よりNTTからマゼラン望遠鏡への移設を検討
 - さらなる高感度：限界等級 $J = 17.3 \text{ mag}$ ※ 8 hrs, SNR=30
 - 安定した観測時間の確保：半年で最低2晩
- 2022年9月にマゼラン望遠鏡でのファーストライトを実施
- ファーストライトの結果、概ね想定通りの感度が得られたが、
 - ADCの導入
 - ガイディングシステムを見直しなどによって、さらに観測効率が上がることを期待できる
- 次回の観測は2023年5-6月に最大10日間程度となる見込み

La Silla(ESO)とLCO(カーネギー)

サポート

La Silla NTT

- 公開天文台のためPI装置の扱いには慣れていた
→ 規則内でWINEREDのやり方を尊重
- 1-2人のスタッフに情報が集約されている
- お金はPI装置側が滞在費も渡航費も出す

LCO Magellan

- プライベート天文台でPI装置には不慣れ
→ カーネギー、LCO、WINEREDの3つの組織
規則や運用方針のベクトルを合わせる苦勞
- 1人のスタッフに情報集約されるが、
働き方の文化が異なり、不在時が多い
- お金はPI装置側が滞在費も渡航費も出す
- 拠点であるラセレナの事務所にも滞在可能

La Silla(ESO)とLCO(カーネギー)

La Silla NTT

サポート

- 公開天文台のためPI装置の扱いには慣れていない
→ 規則内でWINEREDのやり方を尊重
- 1-2人のスタッフに情報が集約されている
- お金はPI装置側が滞在費も渡航費も出す

設備

- クリーンルームなどはない
→ 精密機器の取り扱いなどは苦労する

TCSなど

- シミュレータなど管理者不在
- 様々なドキュメントがそろっていない

LCO Magellan

- プライベート天文台でPI装置には不慣れ
→ カーネギー、LCO、WINEREDの3つの組織
規則や運用方針のベクトルを合わせる苦労

- 1人のスタッフに情報集約されるが、
働き方の文化が異なり、不在時が多い
- お金はPI装置側が滞在費も渡航費も出す
- 拠点であるラセレナの事務所にも滞在可能

- クリーンルームなど設備は充実
- 但し各部屋の役割は厳格に決まっている
→ 装置状況で保管場所も変わる

- シミュレータはないが、
ドキュメントは揃っている

主観も含んだ今後のPI装置の必要性は？

- 学生にとって **大いに意義がある。飛び込める。**
 - 開発～移設～観測を経て、装置屋としてのほとんど全ての現場経験
 - 異なる観測所や望遠鏡の文化や技術、人との交流
 - 装置が海外にあることによって、すぐに触れないもどかしさはある

主観も含んだ今後のPI装置の必要性は？

- 学生にとって **大いに意義がある。飛び込める。**
 - 開発～移設～観測を経て、装置屋としてのほとんど全ての現場経験
 - 異なる観測所や望遠鏡の文化や技術、人との交流
 - 装置が海外にあることによって、すぐに触れないもどかしさはある
- ポスドクにとって **成果にならない総務が多く、現状のシステムでは中に入り難い。**
 - 輸送・通関管理、ドキュメント作成、観測サポートは大変
 - どれも研究の評価に繋がりにくいが時間的な拘束は大きい
 - 新しいコミュニティは広がる
 - 観測屋さんの現場経験としては良い

主観も含んだ今後のPI装置の必要性は？

- 学生にとって **大いに意義がある。飛び込める。**
 - 開発～移設～観測を経て、装置屋としてのほとんど全ての現場経験
 - 異なる観測所や望遠鏡の文化や技術、人との交流
 - 装置が海外にあることによって、すぐに触れないもどかしさはある
- ポスドクにとって **成果にならない総務が多く、現状のシステムでは中に入り難い。**
 - 輸送・通関管理、ドキュメント作成、観測サポートは大変
 - どれも研究の評価に繋がりにくいが時間的な拘束は大きい
 - 新しいコミュニティは広がる
 - 観測屋さんの現場経験としては良い
- 大学にとって **成立させることが出来るスタッフ、大学や組織は少ない。それくらい難しい。**
 - 観測や開発に係る運用を継続するには外部資金だけに頼るのでは無理
 - 運用と両立して成果を出せる組織作りには体力も必要
 - 情報を集約するパーマネントポストを作るのは難しい
 - 研究、技術、管理それぞれを評価できる仕組みづくり
 - 教育、開発テーマの創出は活性化
 - 他大学や企業とのコラボレーションによる社会貢献