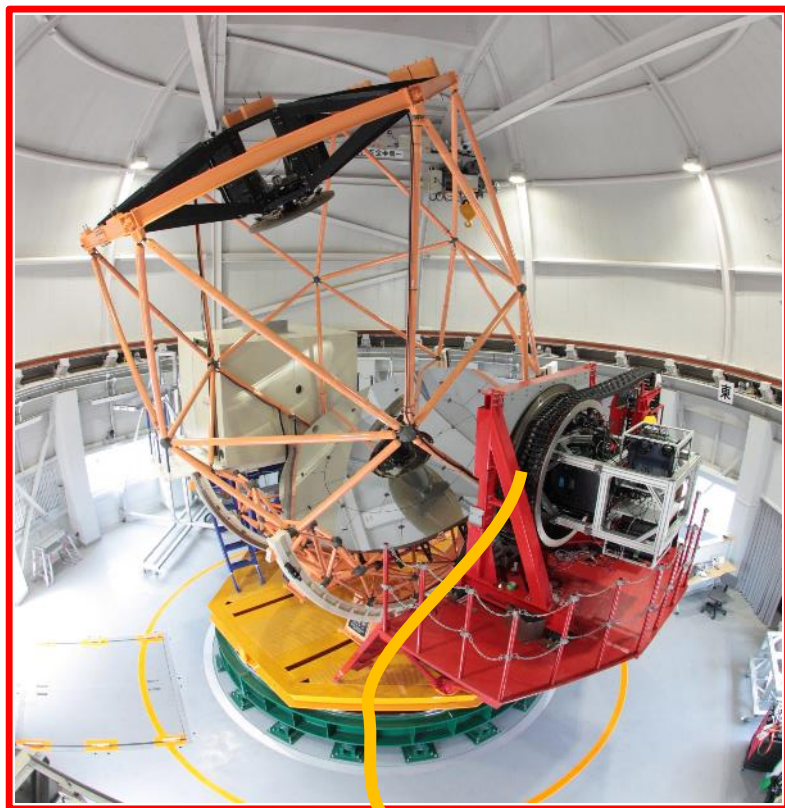


せいめい望遠鏡 + KOOLS-IFU
向け自動観測システムの開発状況
と即時T₀観測に向けた展望

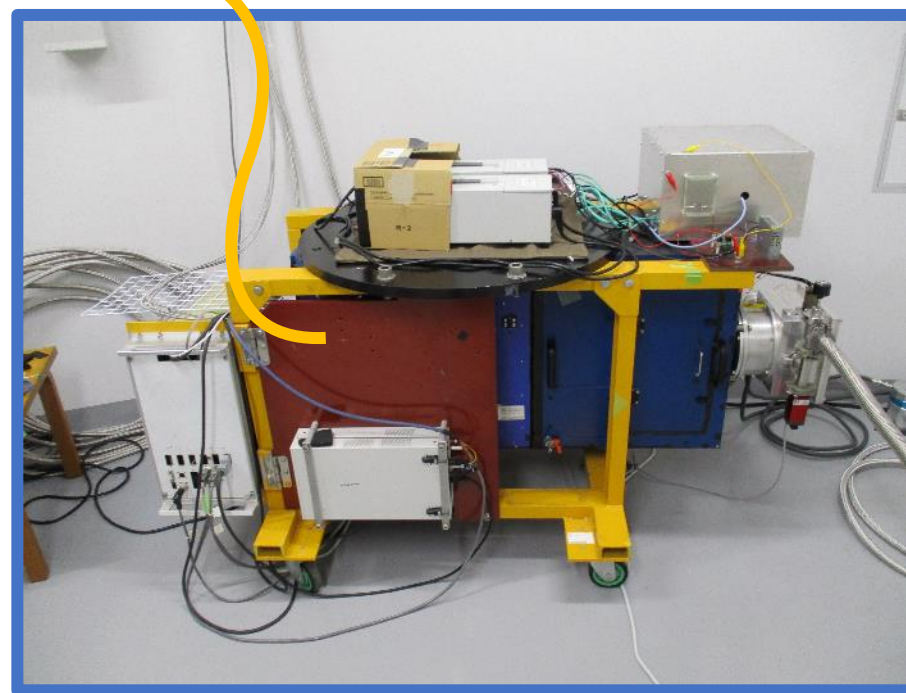
前原裕之 (国立天文台)

KOOLS-IFU



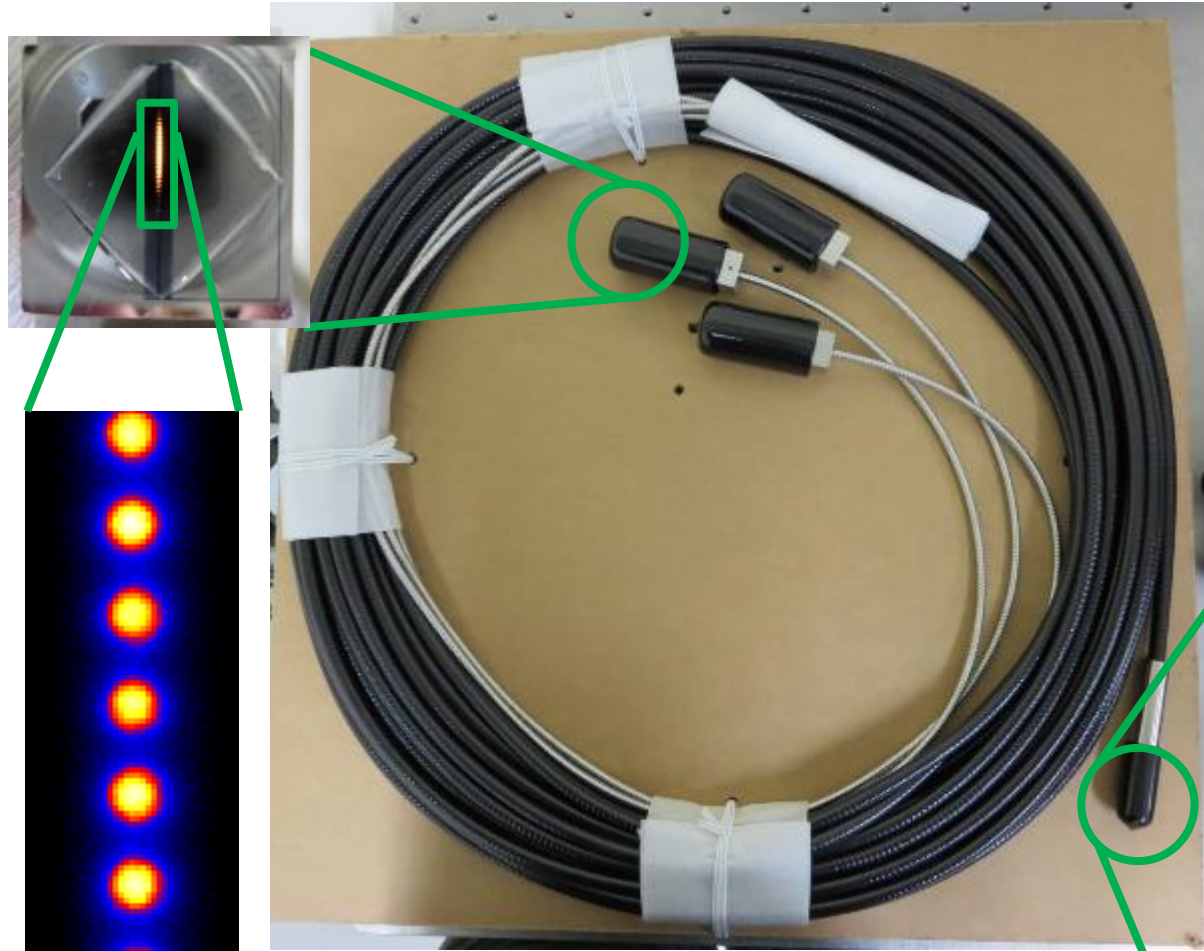
ファイバー

- ファイバー型面分光装置
- 2019年2月から観測中



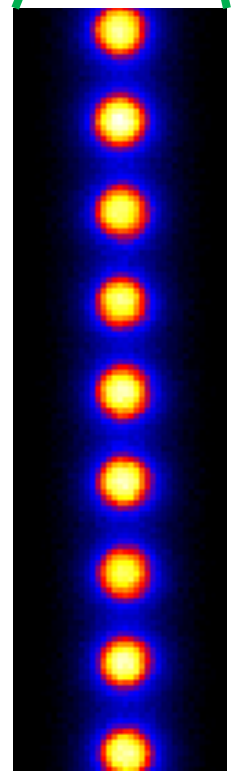
分光器@ドーム1階

ファイバーバンドル (2020年9月まで)

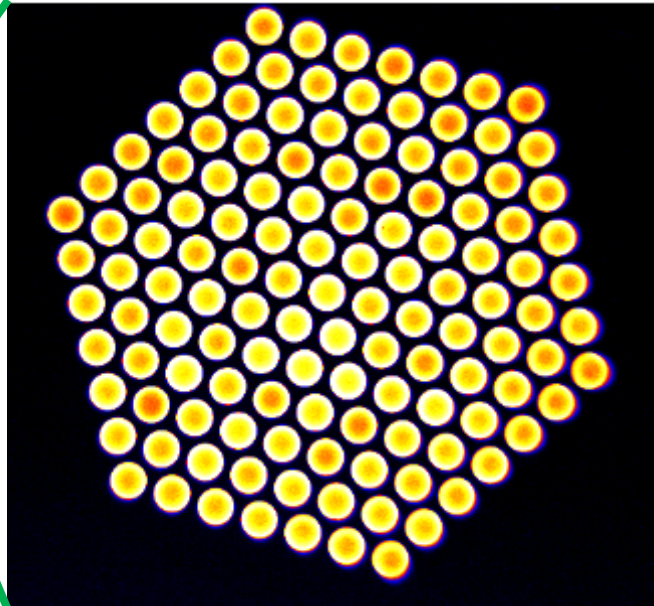


ファイバーの長さ : 24 m
透過率 : 80% (表面反射込)
Filling factor : 58%

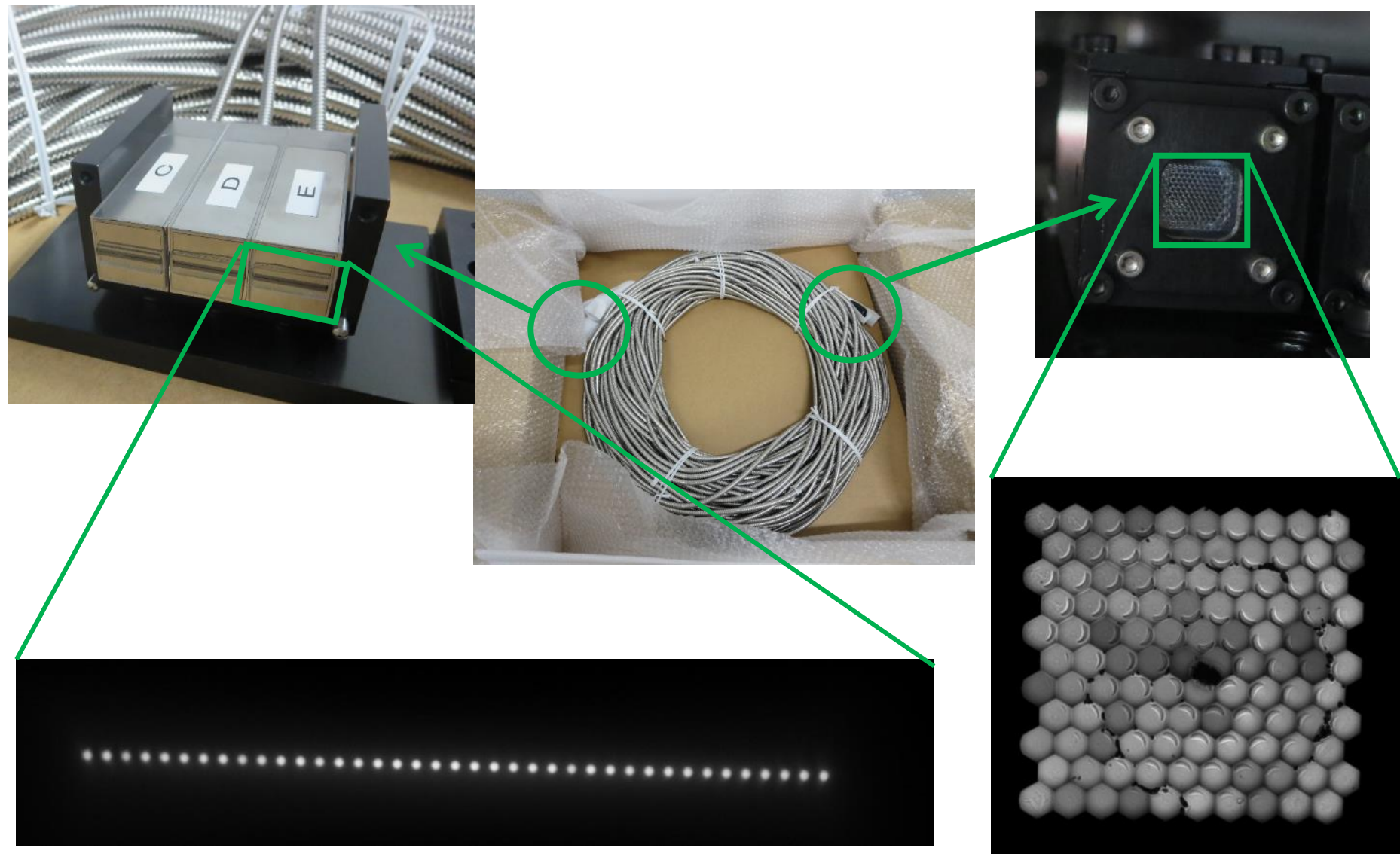
2次元アレイ
(望遠鏡側)



1次元アレイ
(KOOLS側)

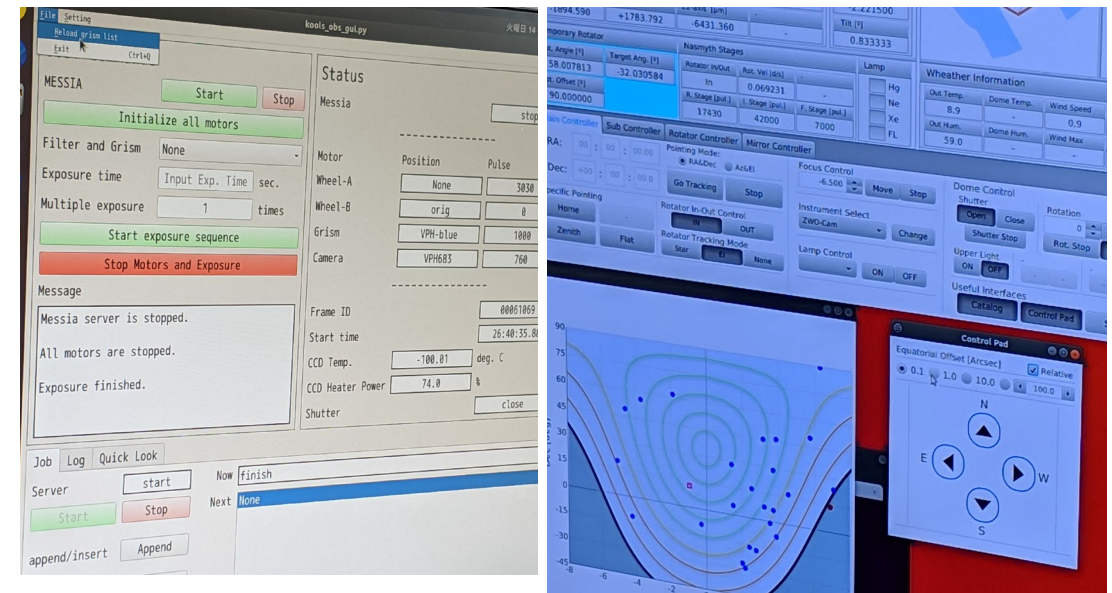
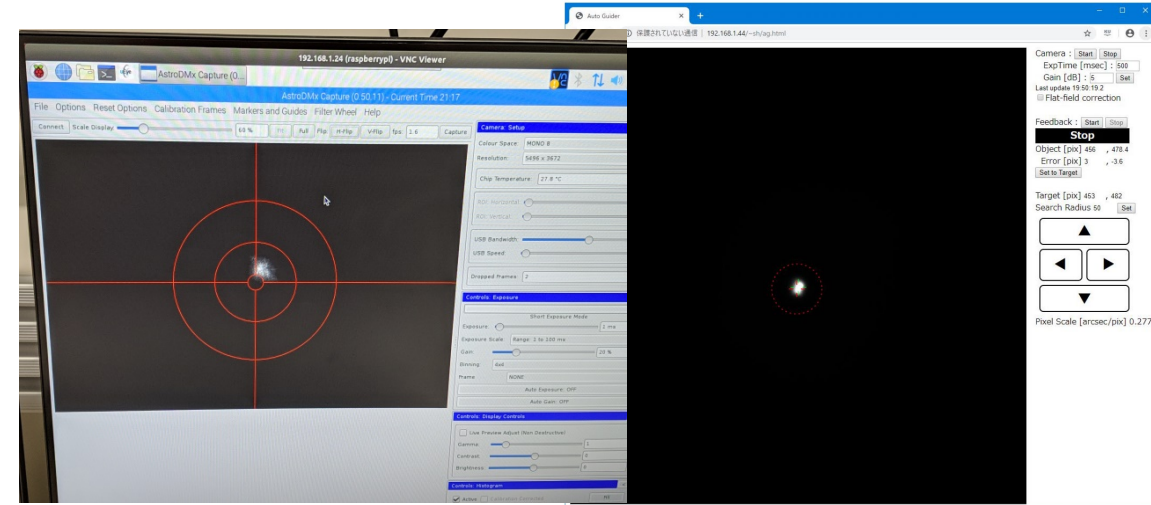


新ファイバーバンドル + MLA

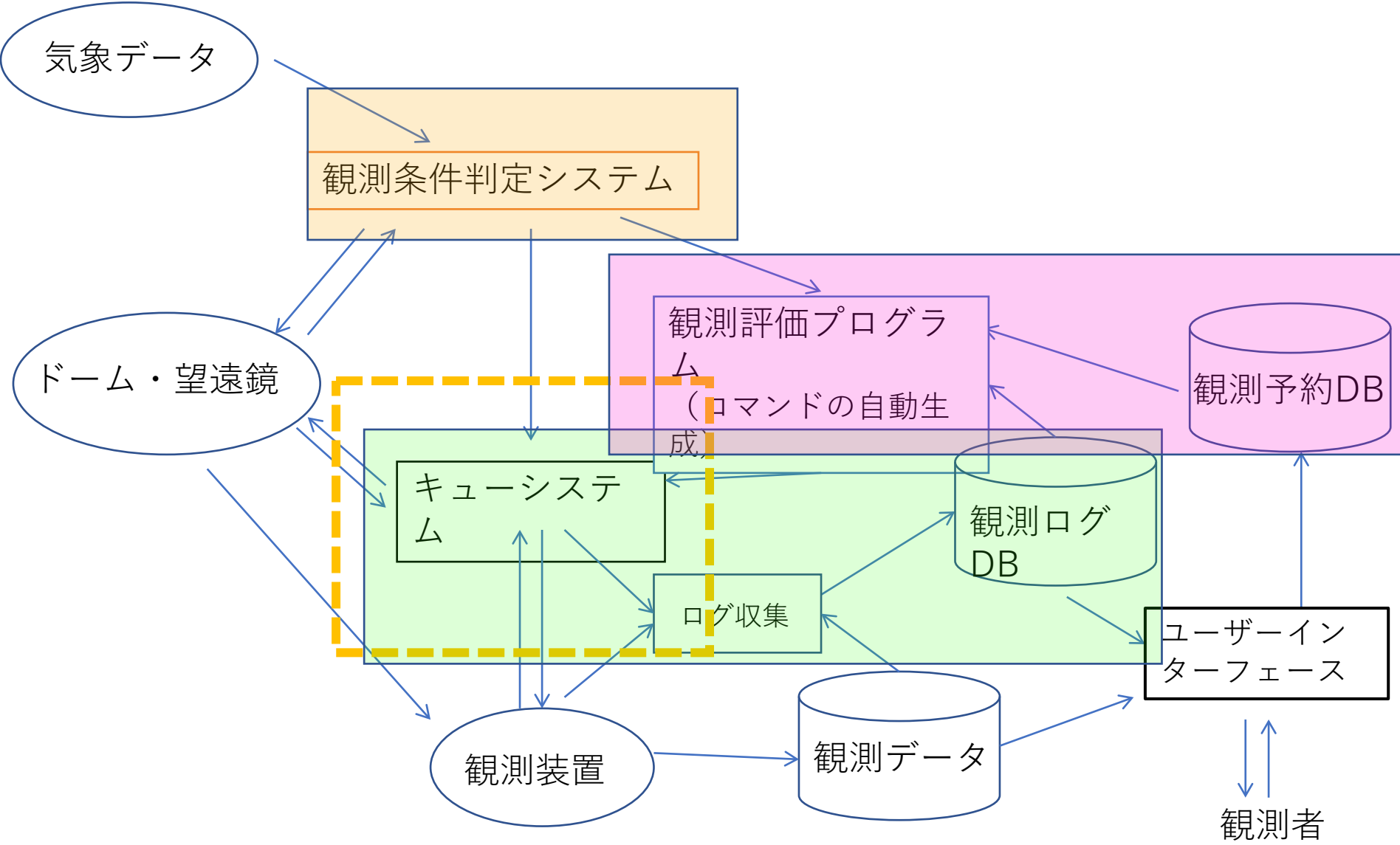


KOOLS-IFUでの既存の観測手順

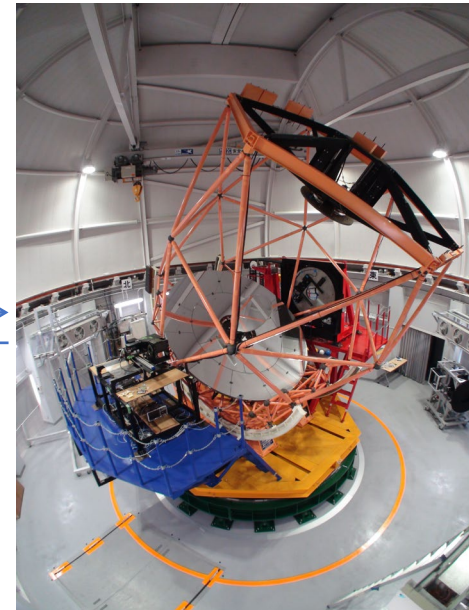
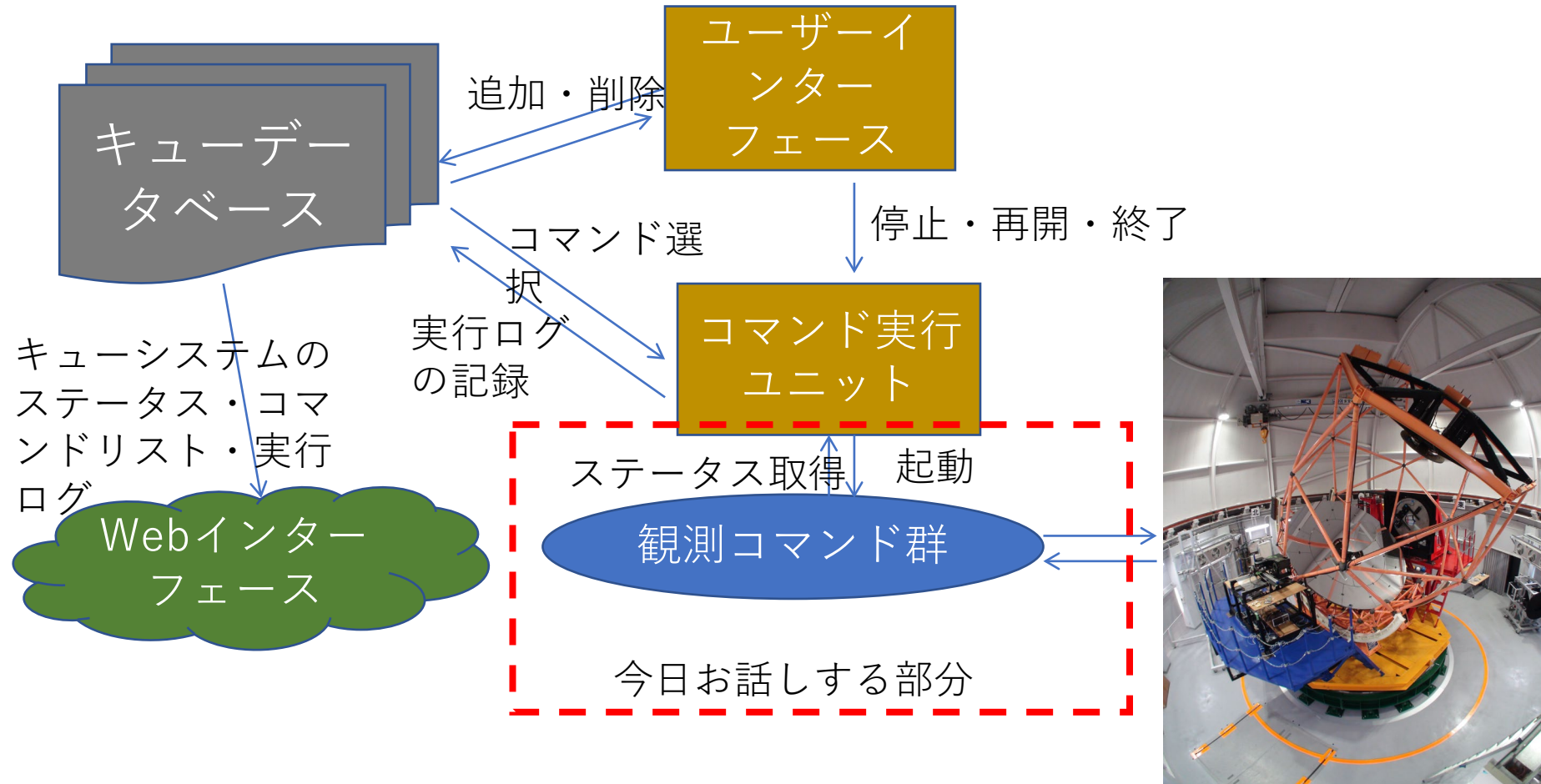
- 望遠鏡を指向誤差補正用天体に向ける
 - 望遠鏡制御プログラム
- 視野確認カメラで指向誤差を補正
 - 視野確認カメラ
- 望遠鏡を観測天体に向ける
 - 望遠鏡制御プログラム
- 装置をKOOLS-IFUに切り替える
 - 望遠鏡制御プログラム
- ガイド星を選定（ステージ位置変更など）→オフセットガイド開始
 - 望遠鏡制御プログラム
 - オフセットガイダー制御プログラム
- 積分開始
 - KOOLS-IFU制御プログラム
- 全て手動で操作が煩雑



最終的に作りたい自動観測システムの全体像



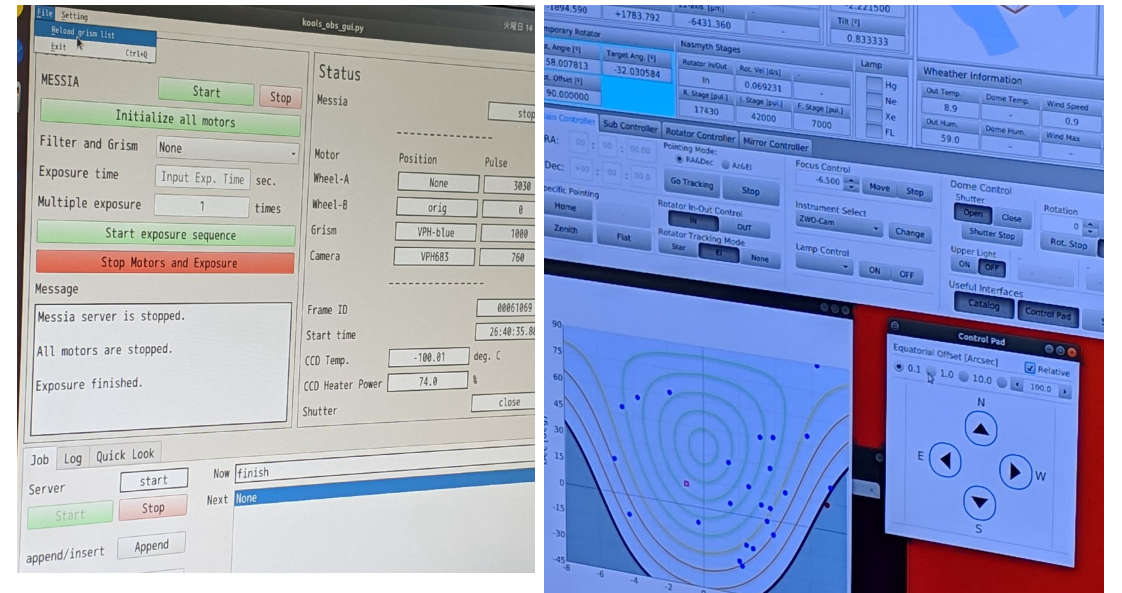
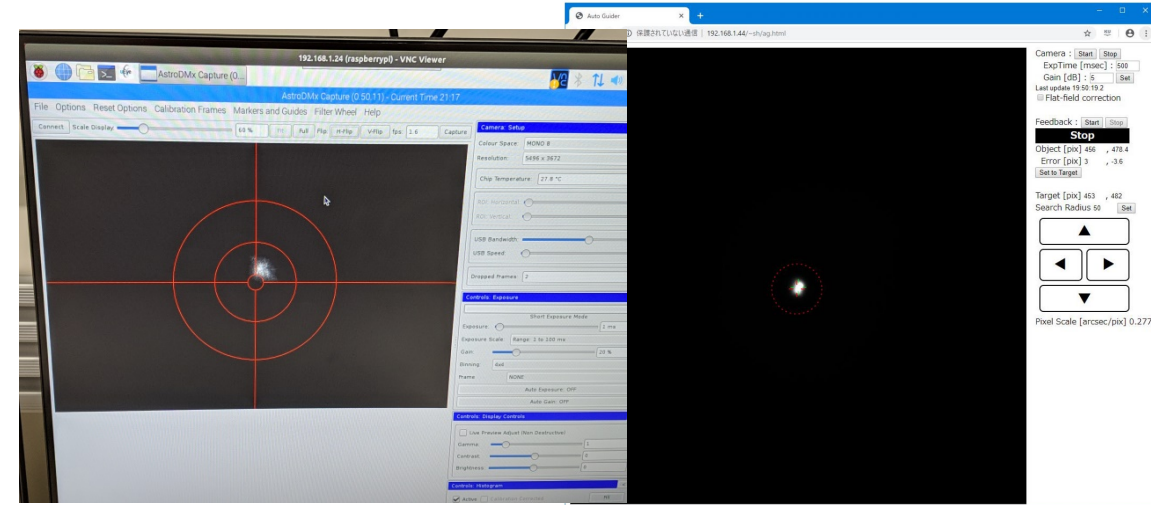
キューシステムの概要



望遠鏡・ドーム・観測装置

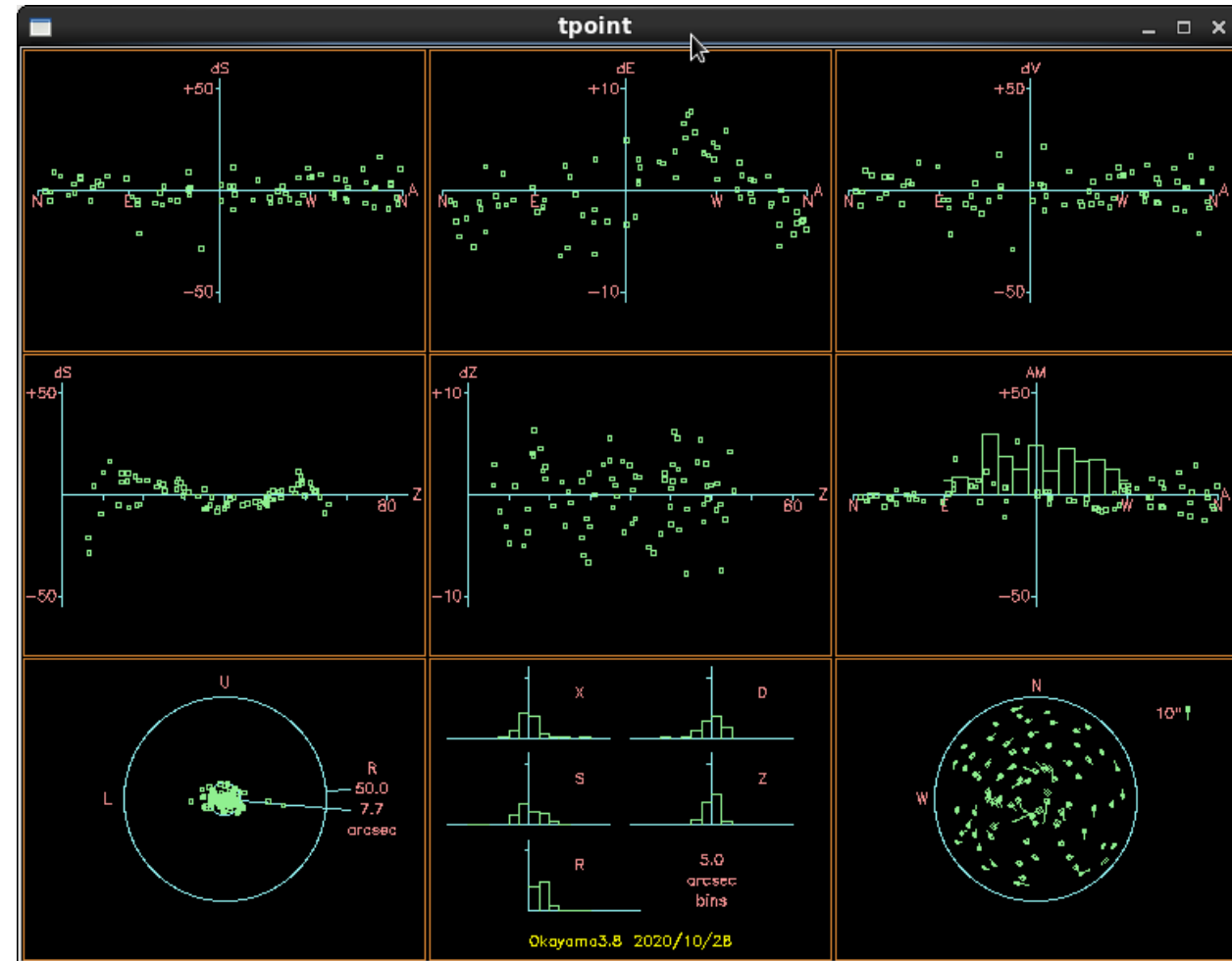
KOOLS-IFUでの既存の観測手順

- 望遠鏡を指向誤差補正用天体に向ける
 - 望遠鏡制御プログラム
- 視野確認カメラで指向誤差を補正
 - 視野確認カメラ
- 望遠鏡を観測天体に向ける
 - 望遠鏡制御プログラム
- 装置をKOOLS-IFUに切り替える
 - 望遠鏡制御プログラム
- ガイド星を選定（ステージ位置変更など）→オフセットガイド開始
 - 望遠鏡制御プログラム
 - オフセットガイダー制御プログラム
- 積分開始
 - KOOLS-IFU制御プログラム
- 全て手動で操作が煩雑



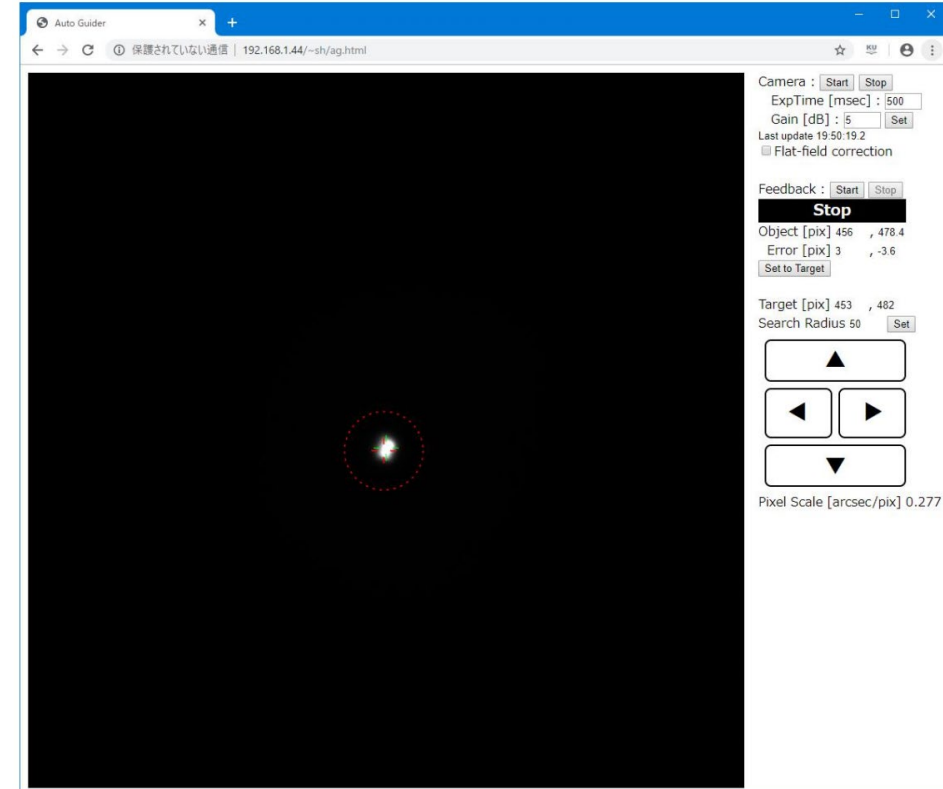
観測自動化にあたっての課題（1）

- 指向誤差補正
 - せいめい望遠鏡 + KOOLS-IFUの観測自動化の最大の障害
 - 指向誤差 (RMS $\sim 7''$) がKOOLS-IFUの視野 ($7.7'' \times 8.1''$) より大きい
 - KOOLS-IFU自体にはIFU視野周辺を確認するカメラはない
 - 指向誤差を何らかの外部カメラで（自動的に）補正しないと天体がIFU視野に入っていることを保証できない
- ガイド星選択
 - 観測天体の座標から適切なガイド星を選択し、適切な位置にオフセットガイドの載ったステージを動かして、写った星を自動的に選択する機構の実装が必要



観測自動化にあたっての課題（2）

- ネットワーク経由での望遠鏡・装置の制御
 - 望遠鏡制御プログラム、KOOLS-IFUプログラムは当初からネットワーク経由での制御に対応
 - オフセットガイダー他もWebブラウザを用いて操作するので、ネットワーク経由での制御には問題ない



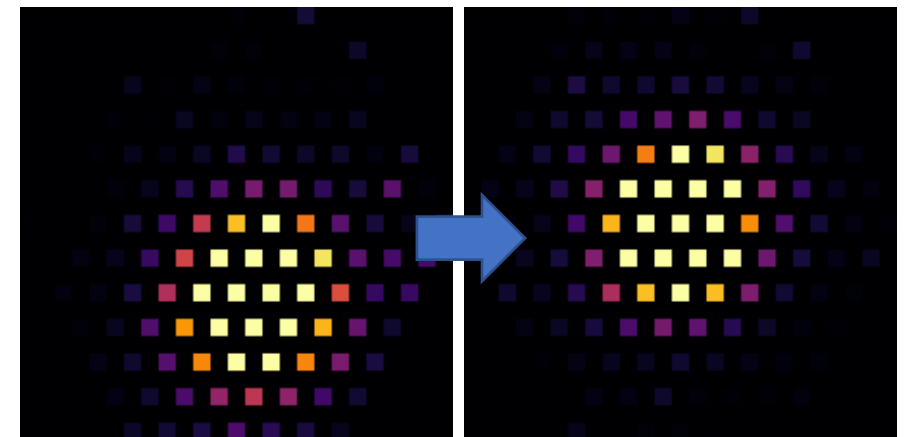
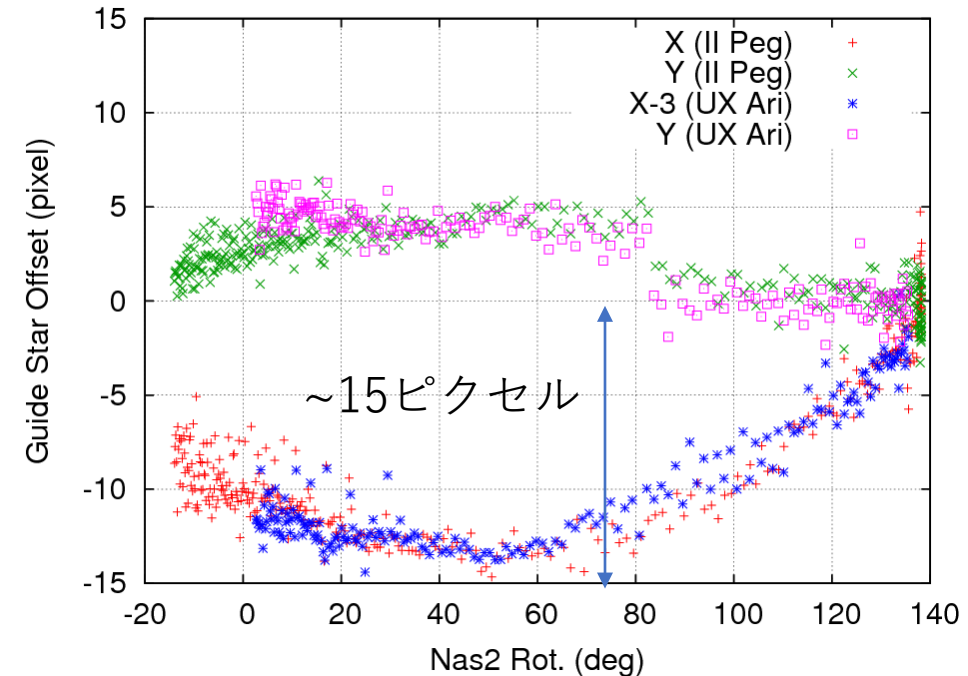
指向誤差補正の自動化の方針

1pixel = 0.28"

- オフセットガイダーを使って荒く補正
 - 視野：~3分角
 - 限界等級：~15等@5秒積分
 - 問題点：精密な指向誤差には向かない
 - KOOLS-IFUの視野とは~22分角離れた場所を見ている
 - ローテータの回転角によってKOOLS-IFUの視野中心との相対位置がずれる



- KOOLS-IFU自体を使って再補正をする
 - IFU視野内の任意のファイバー位置へ導入
 - 視野：8x8秒角
 - 限界等級：~12等@10秒積分

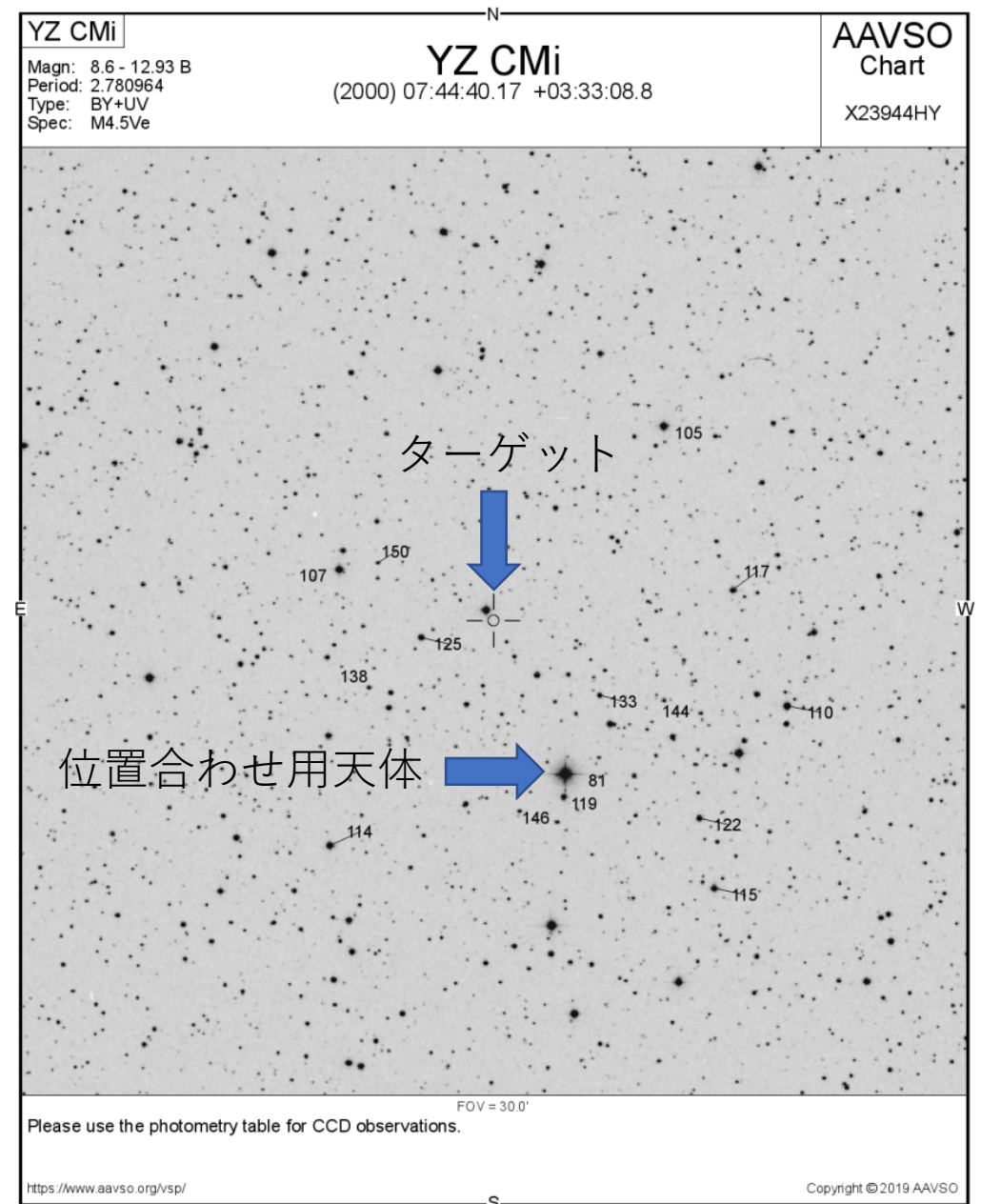


KOOLS-IFUの2次元画像を用いた精密位置補正のテスト

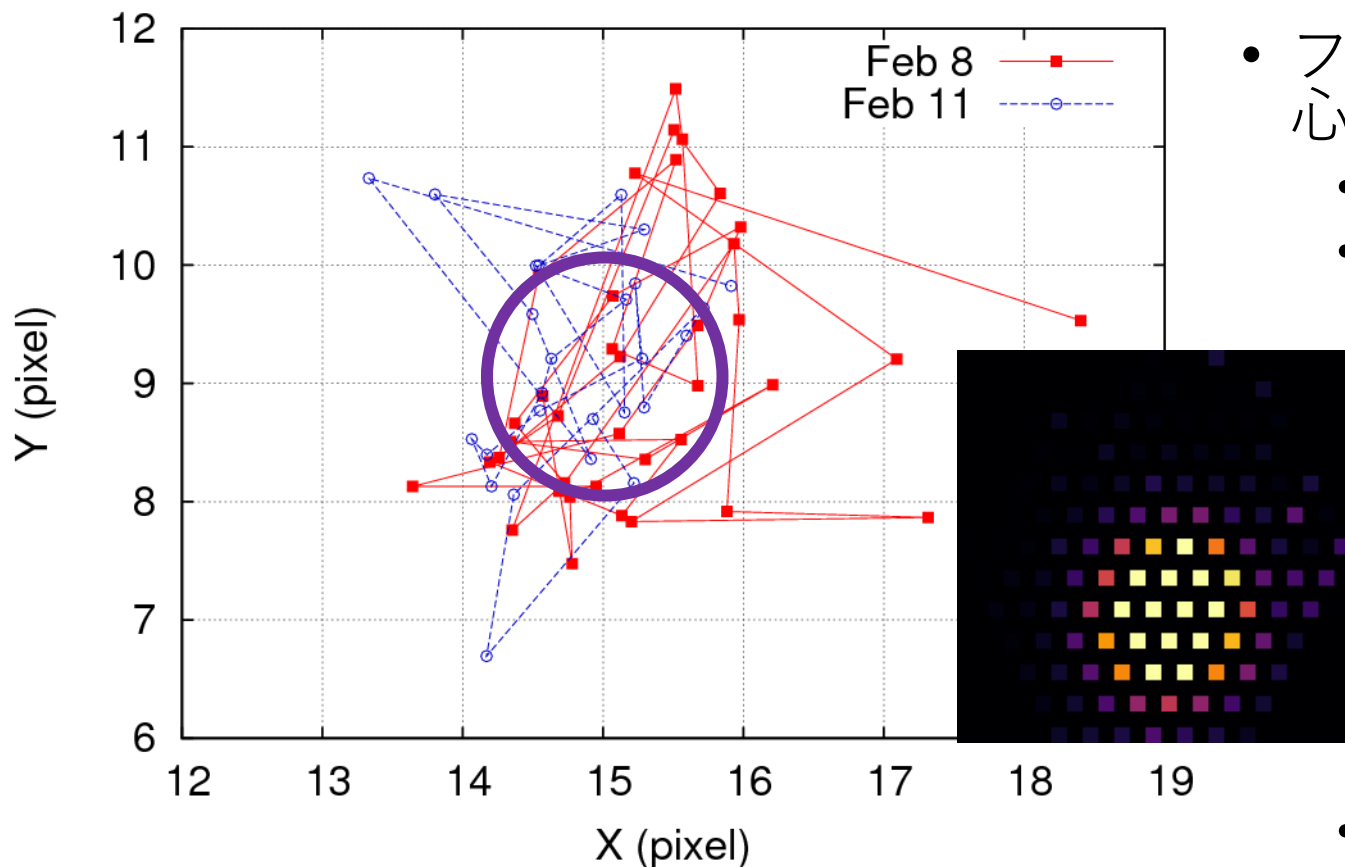
• 動作試験の概要

- KOOLS-IFUの2D画像を使い、YZ CMiで近くの天体（8等星）で位置合わせ（5秒積分）
- その後、YZ CMiに向けて観測画像を取得（30秒積分）
- 再び位置合わせ用天体に戻って追尾誤差を補正（5秒積分）
- YZ CMiを観測（30秒積分）
- 上記を繰り返す
 - 2月8日：18:40-20:04
 - 2月11日：18:45-19:30

- どの程度の位置の再現性があるか、観測時間のロスは何の程度かを評価



KOOLS-IFUの2次元画像を用いた位置補正



- ファイバー端面の2D画像上での星の重心位置が指定位置になるように補正
 - 例：YZ CMi
 - 目標位置： $X=15, Y=9$
 - KOOLS-IFUの2D画像を使い、YZ CMiで近くの天体（8等星）で位置合わせ（5秒積分）
 - その後、YZ CMiに向けて観測画像を取得（30秒積分）
 - 再び位置合わせ用天体に戻って追尾誤差を補正（5秒積分）
 - YZ CMiを観測（30秒積分）
 - 上記を繰り返した時のYZ CMiの位置のばらつきを評価

- 2/8 : $X_{RMS}=0.92, Y_{RMS}=1.10$
- 2/11 : $X_{RMS}=0.62, Y_{RMS}=0.95$
- $\sim 0.6''/\text{pix.}$ ($15''/25 \text{ pix.}$)

観測自動化の手法

- 位置補正用天体導入
 - 観測天体の位置から20'以内にある11等より明るい天体をカタログから検索
 - 望遠鏡制御プログラムへネットワーク経由でコマンドを送る
- 指向誤差補正
 - オフセットガイダーを用いて位置補正用天体を検出→補正
 - 視野~3分角なのでポインティング誤差 (RMS~7-8") の補正には十分
 - その後、KOOLS-IFU自体を使ってIFU上の狙った位置に天体を導入
- 観測天体導入
- ガイド星自動選択
 - 天体位置からオフセットガイダーの可動範囲にある14等より明るいガイド星をカタログから探し、適切なステージ位置へ移動
 - →オフセットガイダーの積分開始&ガイド星検出
 - →ガイド星の目標位置を設定し、追尾補正を開始
- 積分開始・オフセットガイドON/OFF
 - それぞれの制御プログラムへコマンドを送る

スクリプトの例 (V1674 Her)

```
#!/bin/sh
rm -f /tmp/.ag_on
stagectl.py --x=30 --y=24 --z=55 --inst=kools
agctl.py --exp=off
agctl.py --set-exptime=5000 --set-gain=10
agctl.py --exp=on
agctl.py --feedback=off
n2rot.py star
nearbystar.py V1674_Her 18:57:30.95 +16:53:39.6
dither.py 0 1200
agtarget.py
dither.py 0 -1200
find_obj.py 11 10 6.0e5 2.0 VPH-blue 10 || exit
tel_point.py V1674_Her 18:57:30.95 +16:53:39.6
search_guidestar.py || exit
find_guidestar.py || exit
agctl.py --feedback=on
kools.py VPH683_O56 300
kools.py VPH683_O56 300
kools.py VPH683_O56 300
agctl.py --feedback=off
agctl.py --exp=off
```

装置をKOOOLS-IFUに切り替え
オフセットガイダーのステージ位置を位置補正用の値に変更

オフセットガイダーの積分を開始

ローテータのモードをSTAR(RA-DEC方向固定)に変更

目的位置近くの位置補正用天体をGaiaEDR3から探して導入

オフセットガイダーを使った位置補正

KOOOLS-IFUを使って精密位置補正

観測天体を導入

ガイド星をカタログから探してステージ位置を自動変更

ガイド星検出&ガイド目標位置設定

ガイド開始

天体光積分

ガイド終了

実際の観測におけるdead time

KIF00123042	15:38:56.39	Gaia_EDR3_4514145288240593408	OBJECT	VPH-blue	10	21
KIF00123043	15:39:30.63	Gaia_EDR3_4514145288240593408	OBJECT	VPH-blue	10	21
KIF00123044	15:40:59.74	V1674_Her	OBJECT	VPH683(O56)	300	21
KIF00123045	15:46:17.10	V1674_Her	OBJECT	VPH683(O56)	300	21
KIF00123046	15:51:34.24	V1674_Her	OBJECT	VPH683(O56)	300	21
KIF00123047	15:57:10.23	V1674_Her	OBJECT	VPH-blue	60	21
KIF00123048	15:58:27.33	V1674_Her	OBJECT	VPH-blue	60	21
KIF00123049	15:59:44.61	V1674_Her	OBJECT	VPH-blue	60	21
KIF00123050	16:01:13.82	V1674_Her	OBJECT	VPH-red(O56)	60	21
KIF00123051	16:02:31.13	V1674_Her	OBJECT	VPH-red(O56)	60	21
KIF00123052	16:03:48.30	V1674_Her	OBJECT	VPH-red(O56)	60	21

15:37:20ごろにスクリプト実行開始
15:38:56にKOOLS-IFUを用いて精密位置補正
15:40:59に最初の積分を開始

KIF00123095	16:55:52.82	Gaia_EDR3_364112179006331008	OBJECT	VPH-blue	10	21
KIF00123096	16:56:27.82	Gaia_EDR3_364112179006331008	OBJECT	VPH-blue	10	21
KIF00123097	16:57:00.42	Gaia_EDR3_364112179006331008	OBJECT	VPH-blue	10	21
KIF00123098	16:58:08.71	ASASSN-21lg	OBJECT	VPH-blue	120	21
KIF00123099	17:00:25.82	ASASSN-21lg	OBJECT	VPH-blue	120	21
KIF00123100	17:02:43.87	ASASSN-21lg	OBJECT	VPH-blue	120	21
KIF00123101	17:05:00.45	ASASSN-21lg	OBJECT	VPH-blue	120	21
KIF00123102	17:07:17.71	ASASSN-21lg	OBJECT	VPH-blue	120	21
KIF00123103	17:09:34.92	ASASSN-21lg	OBJECT	VPH-blue	120	21
KIF00123104	17:11:52.40	ASASSN-21lg	OBJECT	VPH-blue	120	21

16:54:20ごろスクリプト実行開始
16:55:53にKOOLS-IFUを用いて精密位置補正
16:58:09に最初の積分を開始

- ポインティング：<1分
- オフセットガイダーでの位置補正：<1分
- KOOLS-IFUでの位置補正 + ガイド星自動設定：~2分
- スクリプト実行からおおむね3-4分程度で科学観測用の積分を始められる

今後（むこう～1年くらい）の課題

- 動作高速化
 - CCD読み出し中に次のコマンドを実行する機能の追加など
- TriCCSへの対応
 - GUI側ではKOOLSと同じくネットワーク経由の操作が可能なこと、視野が圧倒的に広く精密なポインティングが分光ほどは要求されないので、難易度は低い？
- コマンドの順次実行やを行うキューシステムの導入
 - 既存のHIDES-F用のものを改修して移植？
 - 条件分岐機能、エラー処理機能等の追加、強化など
- 観測天体リストから観測スクリプトを自動生成するシステムの開発
 - ガイド星や位置補正天体は事前に自動選択して、ユーザーが確認できる方が良さそう？
- 移動天体追尾
- フォーカスやセグメント鏡の自動調整

自動観測システムの開発ロードマップ

- 第0フェーズ（21B末まで？）
 - 観測スクリプトの整備
 - ユーザーが観測スクリプトを手動生成すればこの段階でもある程度の自動観測を実現
- 第1フェーズ（22Aくらい？→22Bから公開？）
 - 観測コマンドの自動生成システムの実装＋手動キュー観測
 - ユーザーは天体リストを作成し、観測モード・積分時間を指定
 - コマンド自動生成システムが天体リストから観測スクリプトを自動生成
 - ユーザーが手動でキューシステムを制御、観測スクリプトをキューに投入して観測実行
 - ToO用に自動的にキューに観測スクリプトを投入する機能の実装
- 第2フェーズ（？？？）
 - 天候など観測可能な条件の判断も自動化
 - 観測者の判断を介さない全自動観測
 - 複数装置への対応も自動化するには最低でも5年くらいは必要か？

即時ToO観測

- せいめい望遠鏡共同利用のToO発動
 - 現在はSlackを用いている。
 - ToO課題関係者が発動の連絡をして、それを現地の観測者が観測を実行
 - 22AからはToO関係者がリモートから観測することを推奨
- 将来的にはSlackに座標や観測モード・積分時間を投げると自動的にToO観測が走るようにしたい
 - ToO用のSlack botを開発中
 - ToOの観測指示をSlackに送信
 - Slack botが受信・実施可否の判断
 - キューに観測コマンドを投入してToO観測を実行
 - 将来的にはTomo-eなど他の望遠鏡からのトリガーで自動でToO観測を実行できるようになることを目指す
 - キューシステムを使った観測（ユーザーが手動で観測コマンドをキューに登録して観測する場合も含む）が実行中であることが必要→最短で2022年後期くらい？

全自動観測に向けて

- 観測条件（天候）判定
 - 複数の装置がつく→空の状態とターゲットの明るさなどからその時使用可能な観測装置・モードを判断する必要がある
 - より高度な観測条件判定（晴れ・曇りだけでなく、空の明るさや透過率、シーイングサイズ etc.）が必要
- 簡易解析パイプライン/データ品質チェックプログラム
 - 自動観測の場合、あらかじめ登録されている積分のみ実行する
 - 撮り直しや追加の積分が必要かどうかの判断が必要
 - 翌日に人(PI/Co-I)が判断する？
 - ToOの場合などはその晩のうちに撮りなおしたい場合もある。
- NAOJ+京大：キューシステムにユーザー作成の解析コマンドを登録できる仕組みを用意+観測天体リストの操作（再登録など）のインターフェースを公開
- ユーザー：得られたデータの評価+ダメなら再登録して取り直すかどうか判断するプログラムの作成

Summary

- KOOLS-IFU向けに自動観測システムを開発中
 - スクリプト観測が可能になりました。
 - Dead time: ~3-4 min
 - TriCCSも同様の仕組みで使えるようにする予定
 - 21B後半でキューシステムを導入予定→2022年後半からは共同利用の供せるようにしたい
- 即時のToO観測に向けて
 - SlackからToO観測を自動で実施できるようにすることを検討中
 - 今年度中くらいを目途にテストを始めたい
 - Tomo-eなどから外部の望遠鏡からの自動トリガーを受け付けるようにする予定