



miniTAO 1.0m  
から  
TAO 6.5m望遠鏡へ

高橋 英則

東京大学大学院理学系研究科・天文学教育研究センター

キーワード

TAO

= The University of Tokyo  
Atacama Observatory

= 東京大学アタカマ天文台

チリ共和国、アタカマ砂漠、  
サンペドロ・デ・アタカマ、チャナントール山

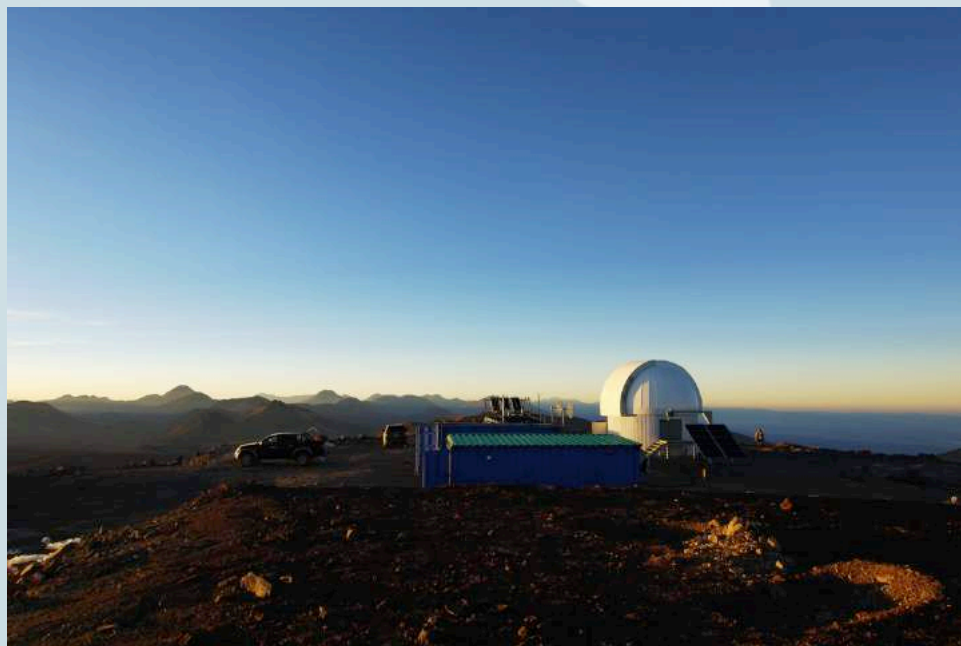




# 世界最標高の天文台



2009年  
ギネスブックに  
「世界最標高の天文台」  
として登録。



## CERTIFICATE

The highest astronomical observatory is the University of Tokyo Atacama Observatory, located at an altitude of 5,640 m (18,503 ft) on the summit of Cerro Chajnantor in a scientific reserve called Atacama Astronomical Park, Chile. The observatory houses a 1 m (3 ft 3.37 in) infrared telescope called miniTAO, which saw first light on 23 March 2009.

GUINNESS WORLD RECORDS

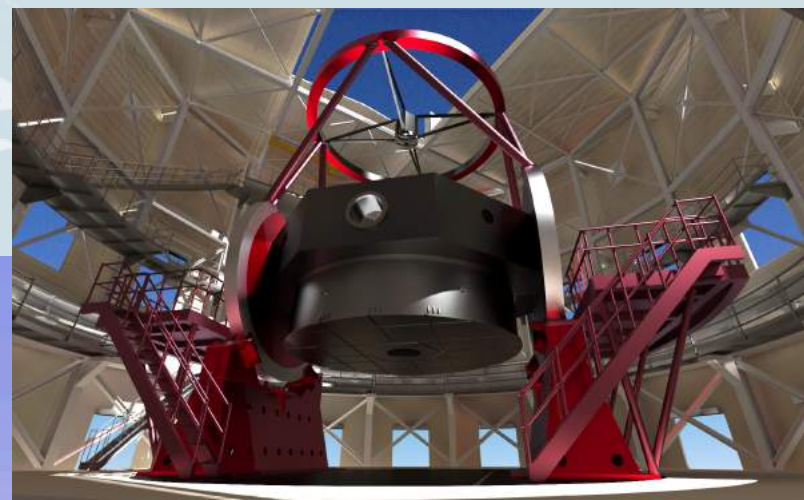




# 東京大学アタカマ天文台 (TAO) プロジェクト



- 東京大学・理・天文センターを中心とした大型赤外線望遠鏡計画
- パイロット望遠鏡のminiTAO 1m → 口径6.5m望遠鏡 (TAO 6.5m) へ.
- 抜群の赤外線透明度を活かして広範な分野のサイエンスを展開.
- 大学望遠鏡として若手育成を重視、サーベイ・萌芽的観測を推進.



チャナントール山



ALMA望遠鏡



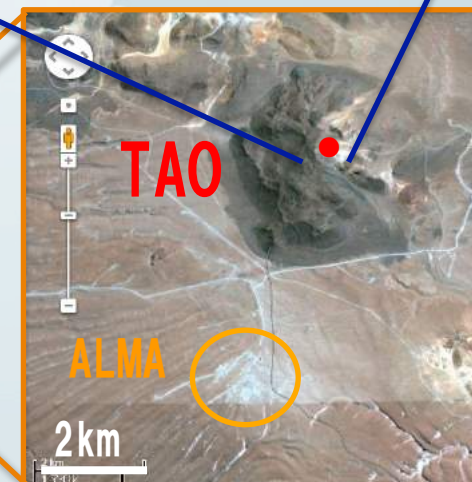
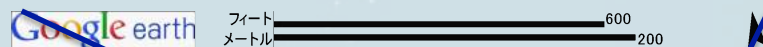


# サイト



## □ チリ共和国の北部

- ベース基地：サンペドロ・デ・アタカマ (標高2400m)
- 天文台：アタカマ高原チャナントール山 (標高5640m)



サンペドロ・デ・アタカマ



# 地理・気候の比較



## 東京

緯度：北緯**35**度**41**分  
経度：東経**139**度**45**分

日本語

## チリ・アタカマ砂漠

(チャントール山頂)

緯度：南緯**22**度**59**分  
経度：西経**67**度**45**分

スペイン語

Gracias!  
¿Cuánto cuesta?





# 地理・気候の比較

## 東京

## チリ・アタカマ砂漠

(チャントール山頂)

標高：海拔 **3** m

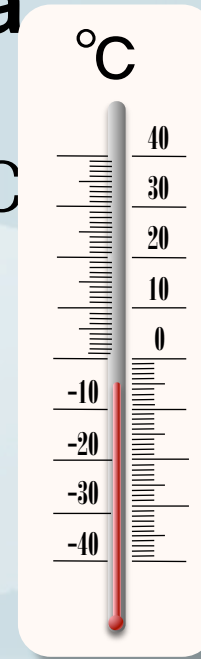
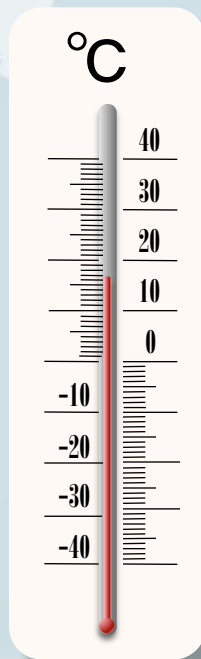
標高：海拔 **5640** m

気圧：**1013** hPa

気圧：**517** hPa

年平均気温：**16.6** °C

年平均気温：**-5** °C





# 地理・気候の比較

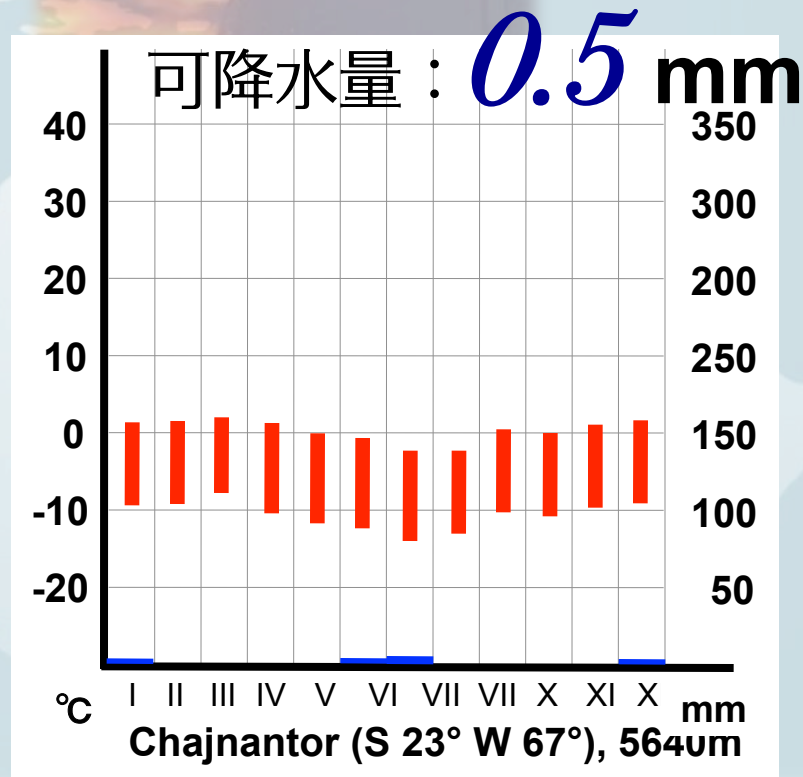
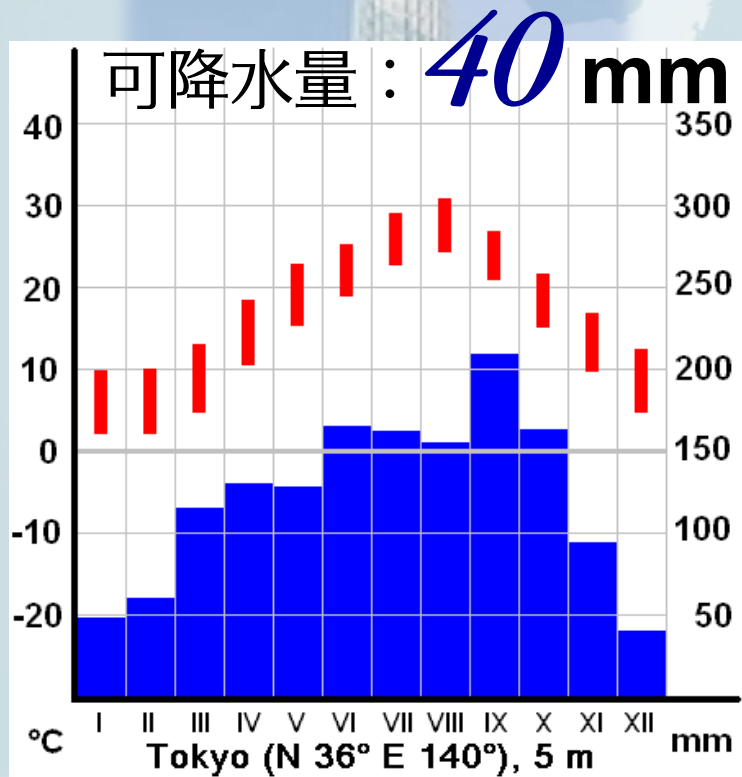
## 東京

## チリ・アタカマ砂漠

(チャナントール山頂)

年平均降水量：**1470** mm

年平均降水量：**20** mm







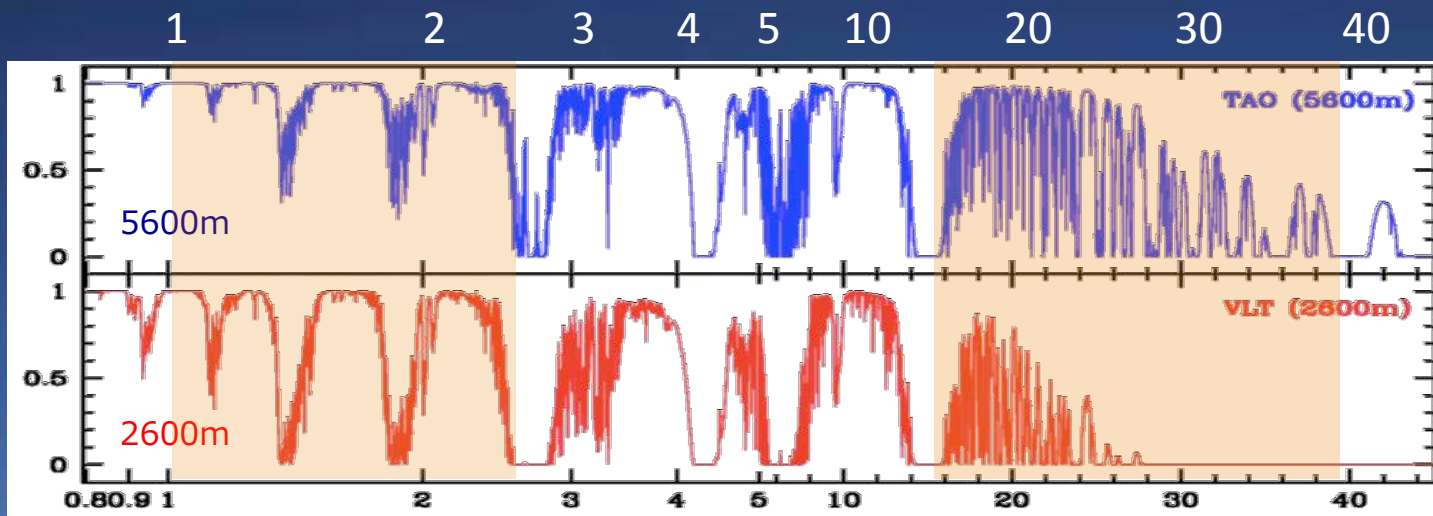
# 世界最高の天体観測条件



チャナントール山山頂(5,640m)での  
赤外線大気透過率のモデル計算

波長 [ミクロン]

透過率



近赤外線：  
連続した大気の窓

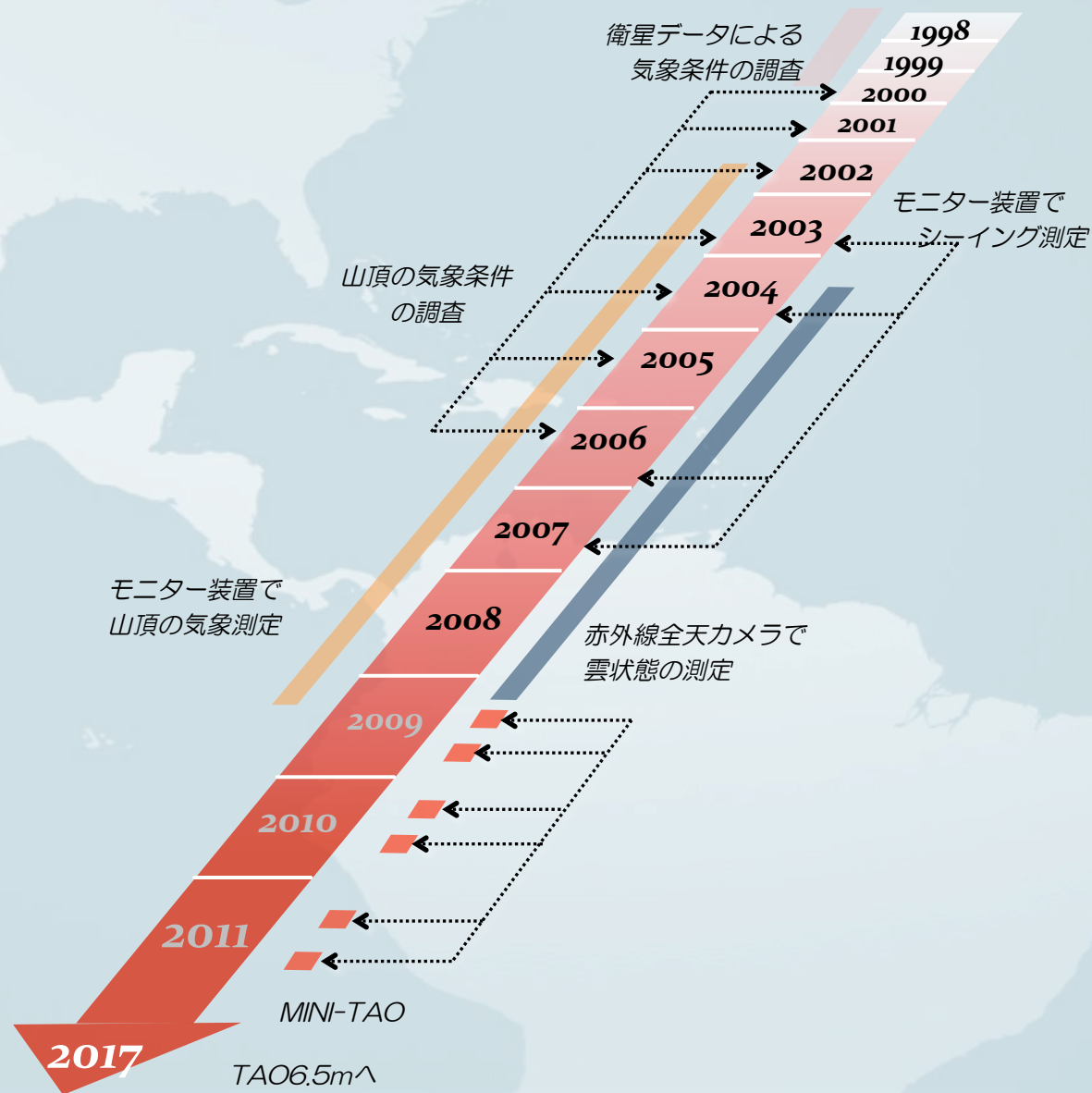
中間赤外線：  
新しい大気の窓



パンパラボラ平原から望む  
チャナントール山



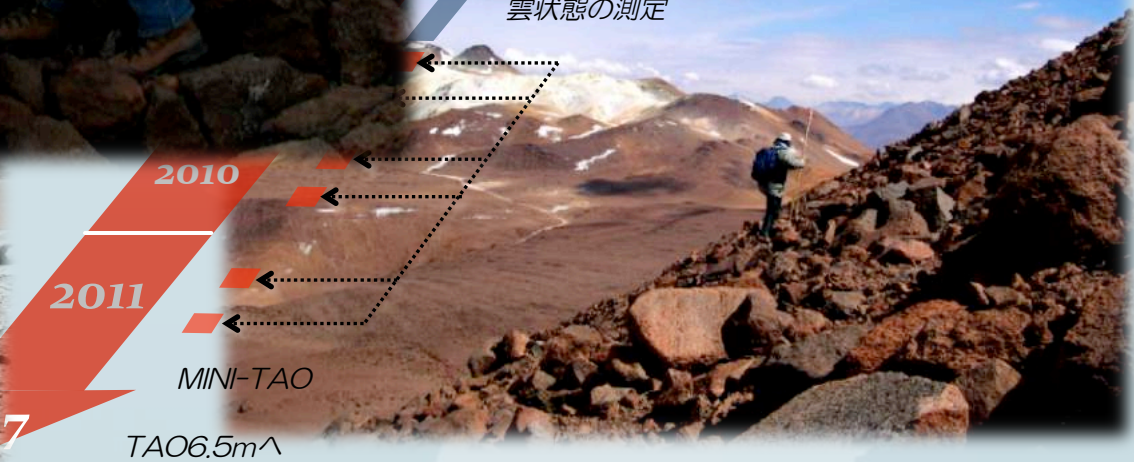
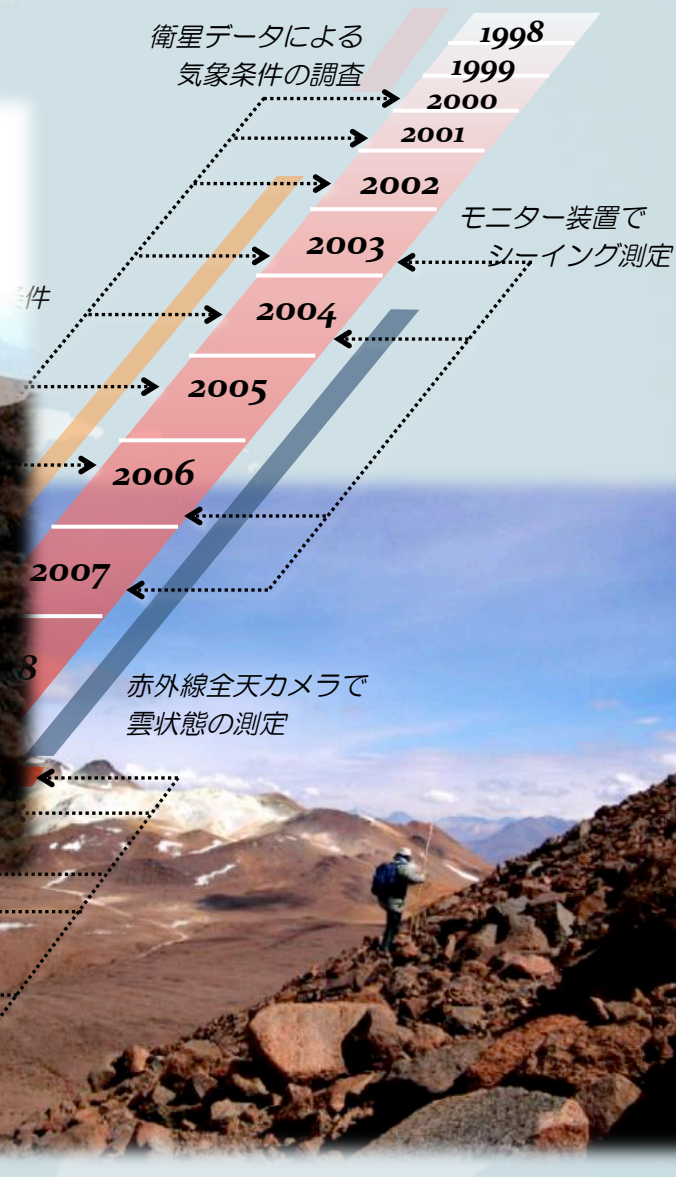
# TAO Project 20年の軌跡







# 2002年 標高5640m 山頂への初登頂







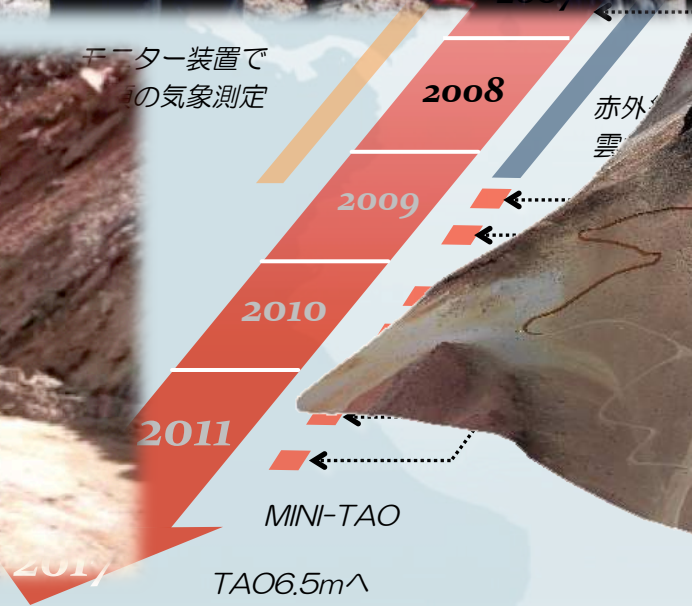
# 2006年 山頂アクセス道路の建設



で  
測定



モニター装置で  
の気象測定



MINI-TAO

TAO6.5m^





# 2009年 mini-TAO 1m望遠鏡の設置



衛星データによる

1998



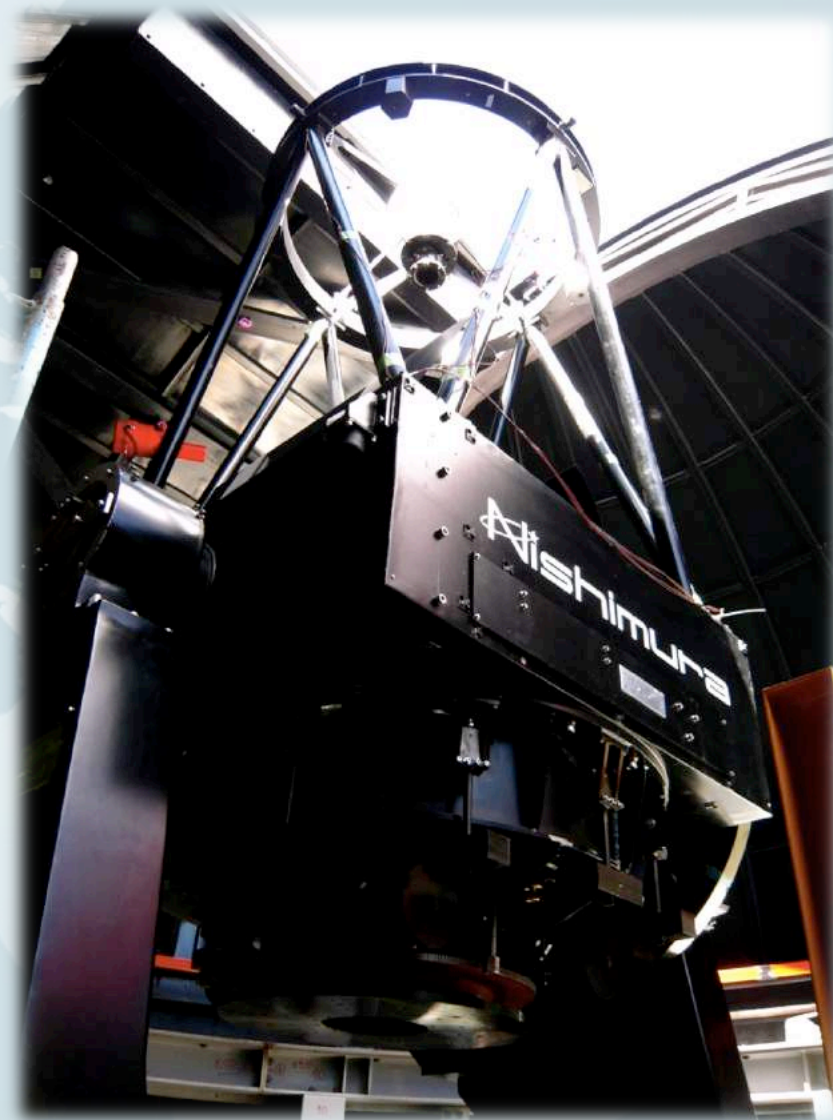
TAO6.5m^



# miniTAO望遠鏡



- 赤外線観測に特化
- 口径：1m
- リッチー・クレチアン光学系
- F値：F/12
- 視野： $\Phi 10'$
- 観測装置：
  - ◇ 近赤外線カメラ (ANIR)
  - ◇ 中間赤外線カメラ (MAX38)







# miniTAO望遠鏡の赤外線之眼



近赤外線カメラ (ANIR)

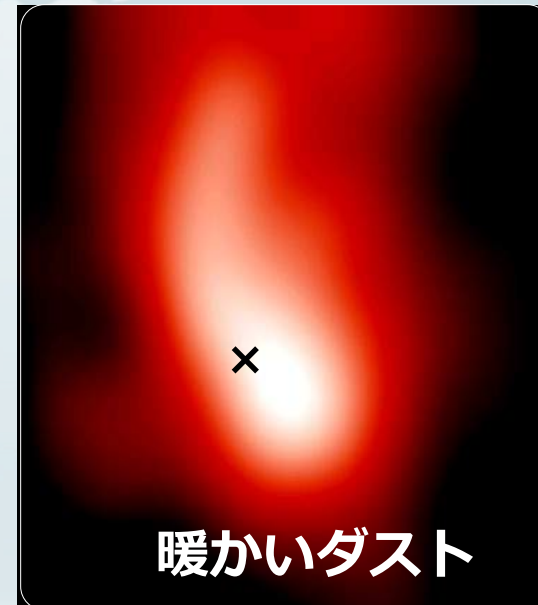
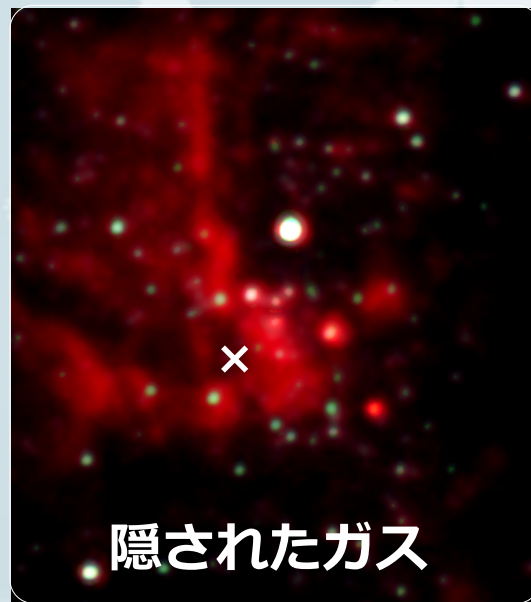


中間赤外線カメラ (MAX38)

可視光線

近赤外線

中間赤外線



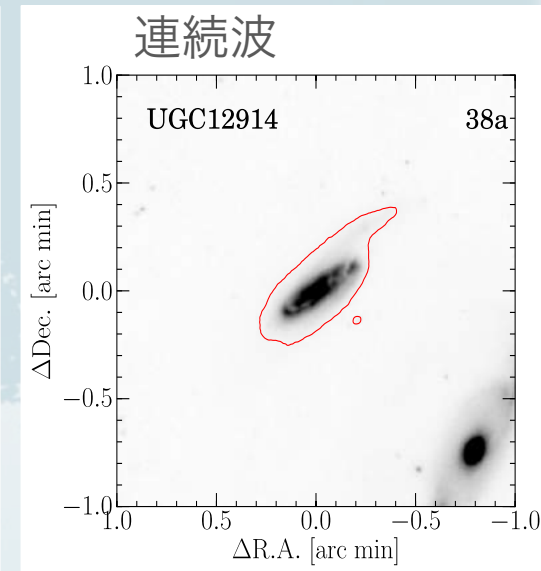
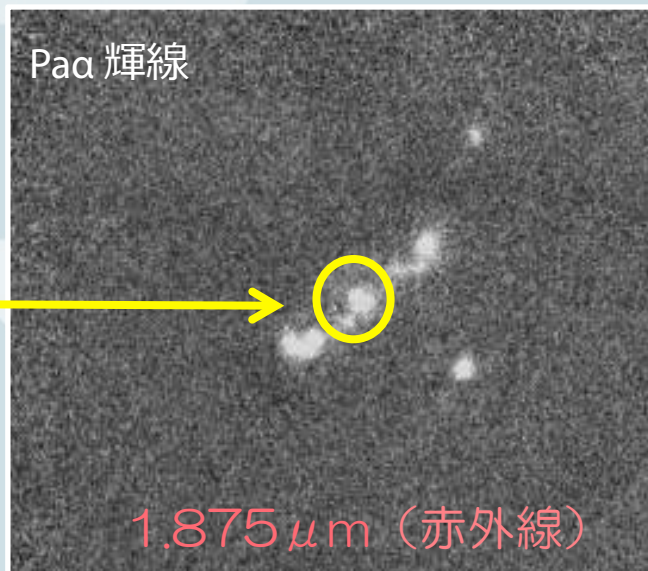
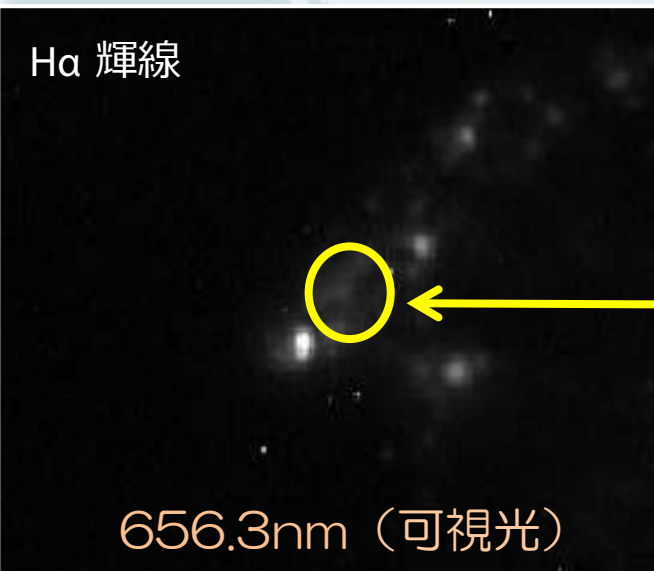


# miniTAO望遠鏡の赤外線的眼

ANIR



星形成の現場を直接観る！



可視光では見えない…  
■ダスト・塵による減光  
■短波長でより影響を受ける。

より長波長の赤外線  
■内部が見えてくる！

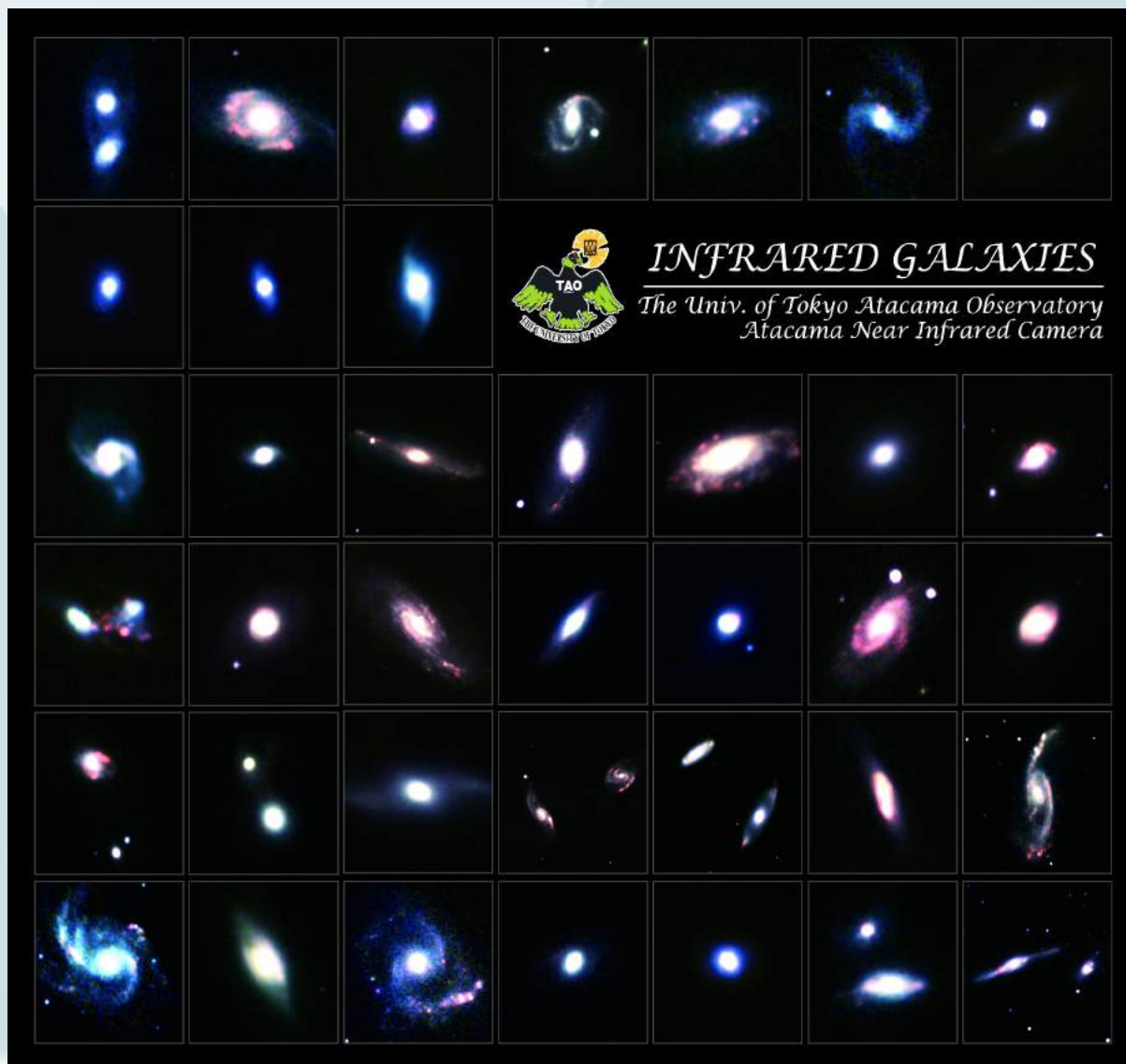


# miniTAO望遠鏡の赤外線的眼

# ANIR



近傍の高光度赤外銀河の星形成の様子を探る







# 水素パッシェン $\alpha$ 輝線サーベイ観測による 近傍高光度赤外線銀河バルジの研究

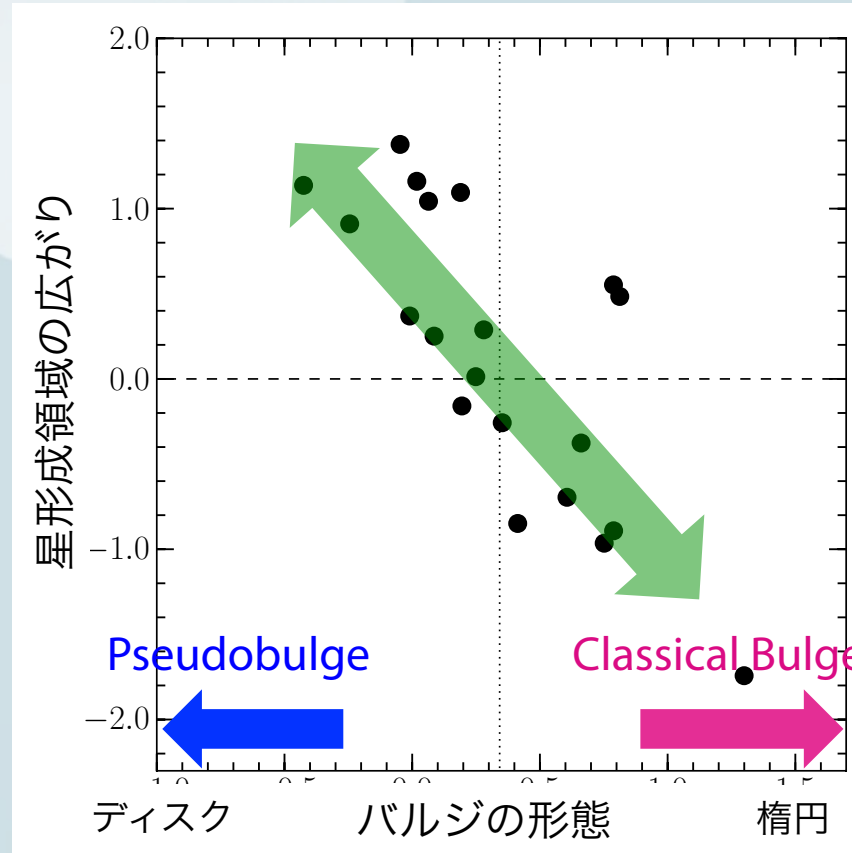
Tateuchi et al. 2015



- ◆ 銀河の形態形成解明：バルジの形成に注目した観測的研究（ $\leftrightarrow$ 理論予測）
- ◆ 星形成活動が活発な LIRG のバルジ形成に注目  $\rightarrow$   $Pa\alpha$  による星形成活動観測



Pseudobulge  
広がった  
星形成領域



Classical bulge  
コンパクトな  
星形成領域



Classicalバルジはコンパクトな星形成、Pseudoバルジは広がった星形成  
 $\rightarrow$  ClassicalバルジはMerger起源、PseudoバルジはSecular Evolution起源を支持

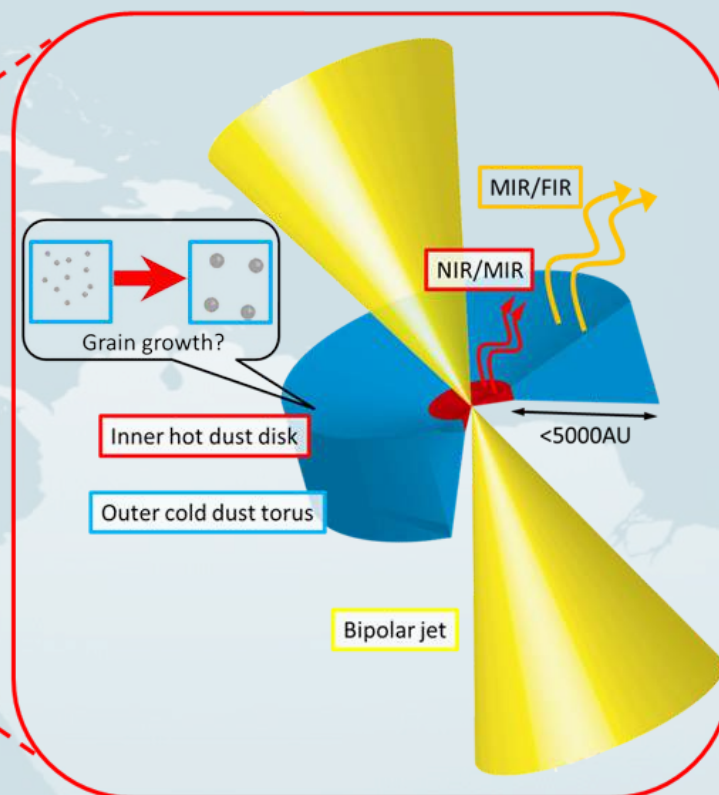
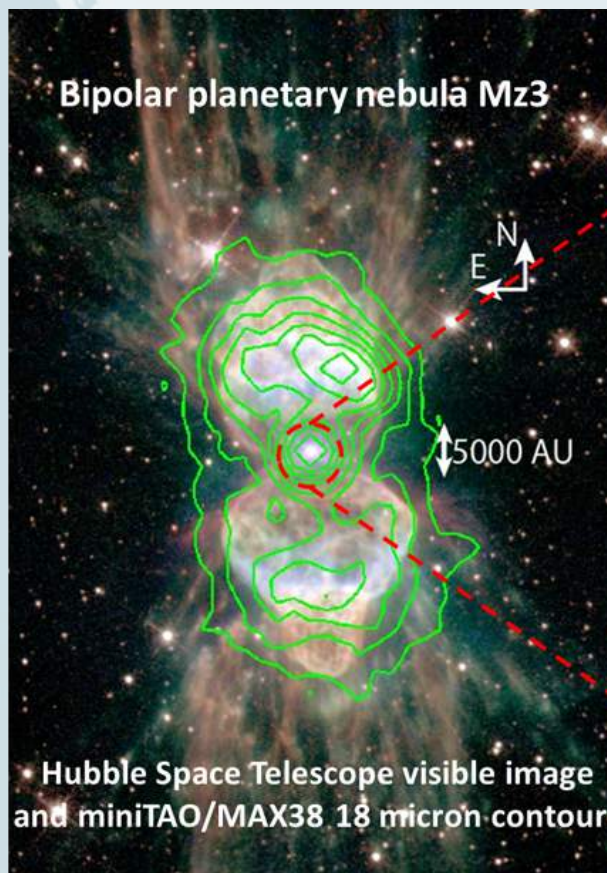


# miniTAO望遠鏡の赤外線的眼 MAX38



- ◆ 惑星状星雲の双極状形状形成のメカニズムの解明
- ◆ 低温の塵からの中間赤外線（10~30um帯）による撮像観測

Asano 2015



厚いドーナツ型のトーラス構造を確認  
 → 赤道面へ選択的に塵の放出が起きた事で双極状形状が形成



# miniTAOで探る大質量星（クラスター）

## 研究の目的と手法

- **大質量星の面白いところ**
  - ・ 膨大なエネルギー放射、多様な金属の生成・放出
  - ・ 銀河や星間物質の進化に大きな影響を及ぼす
  - ・ **超新星の母天体**
  
- 大質量星の**誕生から最期までの進化シナリオ**は？
  - ・ どんな環境で生まれるの？
  - ・ 個数・質量分布は？（IMFは？）
  - ・ 質量放出の量・メカニズムは？
  - ・ 予想よりも少ないWR星の数問題.



大質量星を含むクラスターの詳細研究





# miniTAOで探る大質量星（クラスター）



減光に強い波長：近赤外線  
大質量星の検出：狭帯域フィルター

→撮像・測光

得られるものとわかること

▶ 3バンドの2色図（[N207/Ks] vs [N187/Ks]）

- 種族（構成要素）の分類
- 既知天体の検出
- 未知天体の検出
- 減光量
- 赤い天体の検出

▶ Ks等級 vs N187 excess

- WN型の詳細クラス分類
- クラスターの環境・進化



## 特徴的なフィルターセット

### N187 filter

- ▶ フィルター情報 :  $\lambda_{\text{center}} = 1.875 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0.008\mu\text{m}$
- ▶ 検出輝線 : Pa $\alpha$ , He II [n=8-6, n=6-5]
- ▶ 特徴的な天体 : WN型WR星, LBV

### N207 filter

- ▶ フィルター情報 :  $\lambda_{\text{center}} = 2.074 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0.041\mu\text{m}$
- ▶ 検出輝線 : CIV 2.07 $\mu\text{m}$
- ▶ 特徴的な天体 : WC型WR星

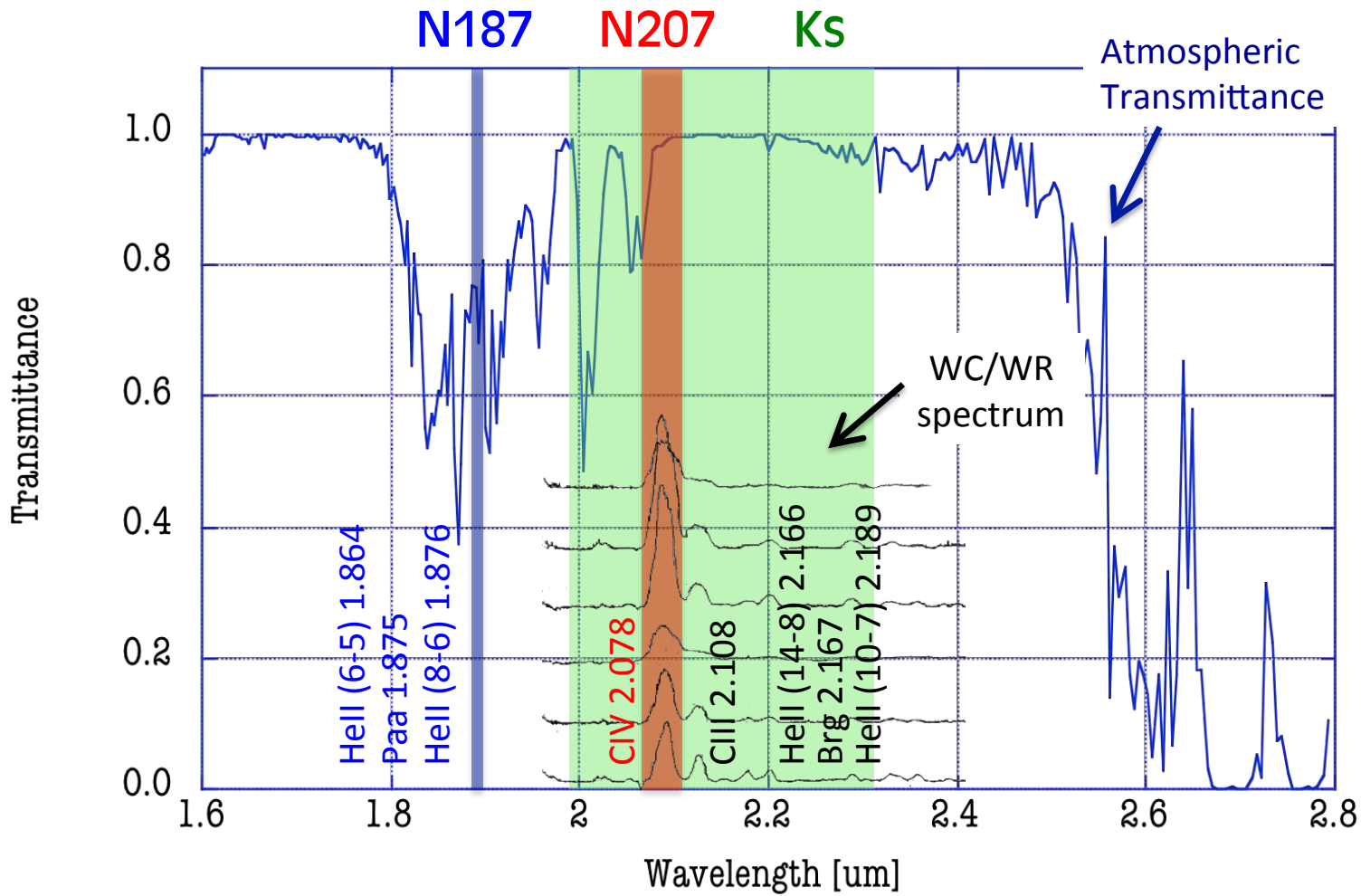
### Ks filter

- ▶ フィルター情報 :  $\lambda_{\text{center}} = 2.149 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 0.322\mu\text{m}$
- ▶ 検出スペクトル : continuum (Line offフィルターの役割)
- ▶ 検出天体 : All



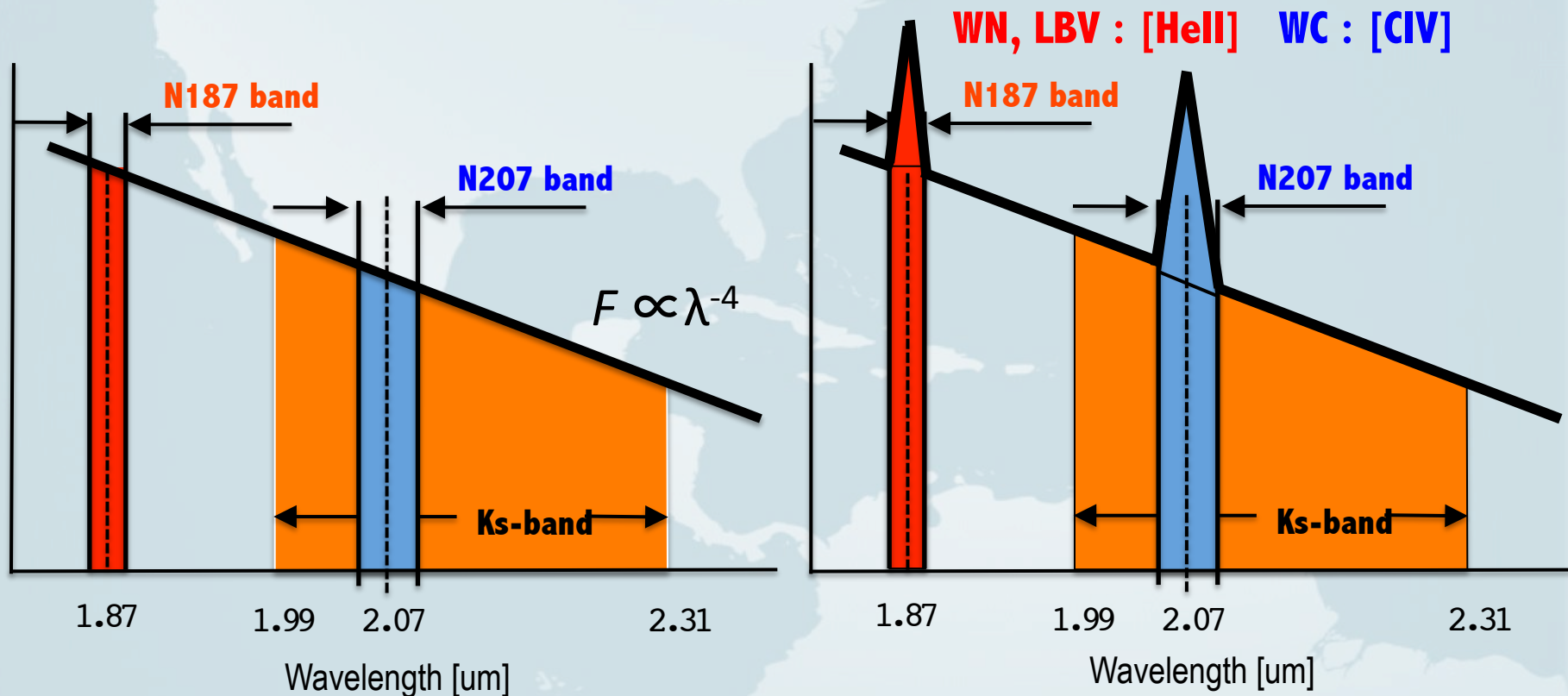


# 特徴的なフィルターセット





# 観測手法 ~ using narrow-band



**no lines object**

→ **N187/Ks ~ 0.043**

→ **N207/Ks ~ 0.130**

**With line object**

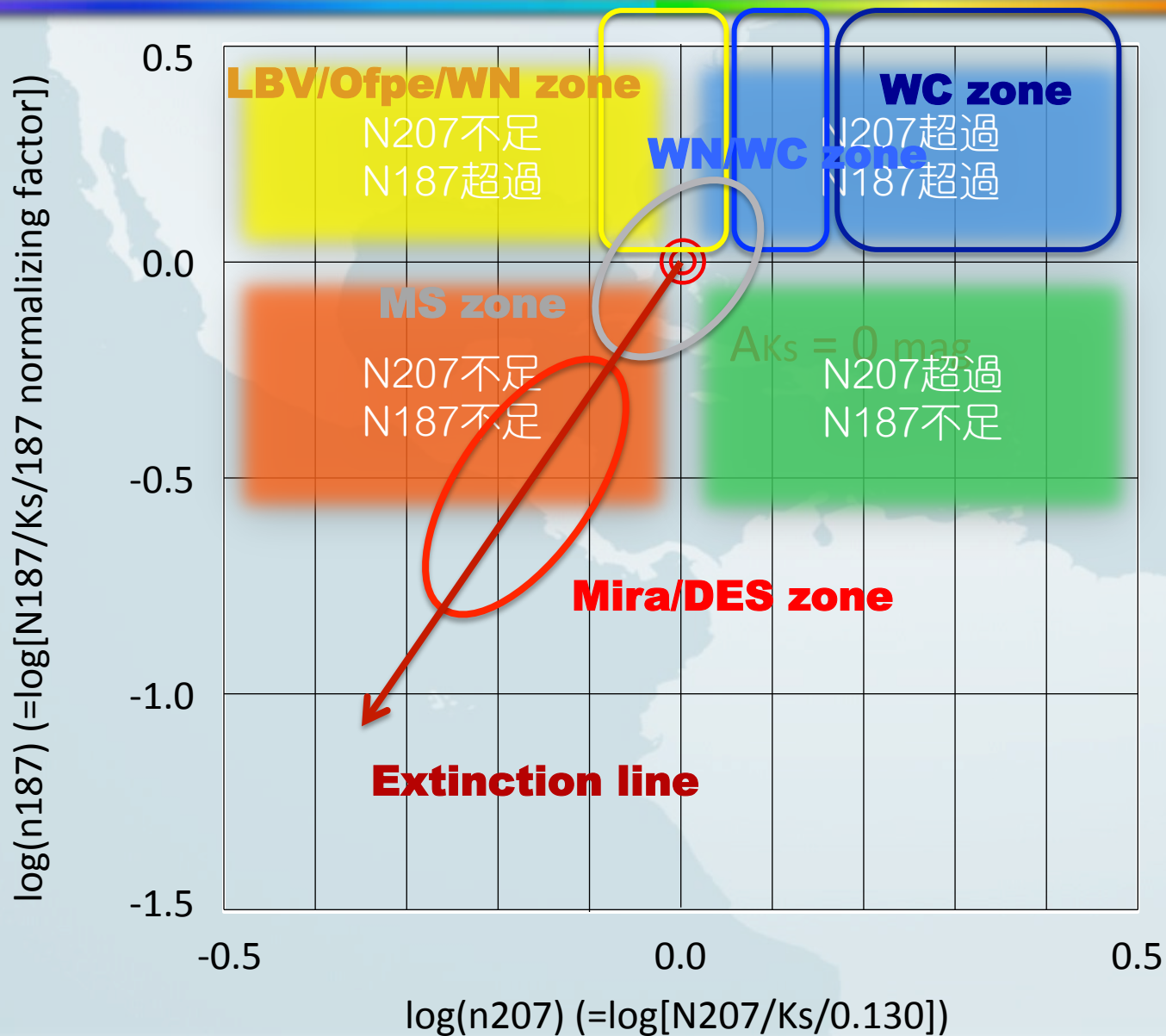
→ **N187/Ks > 0.043**

→ **N207/Ks > 0.130**



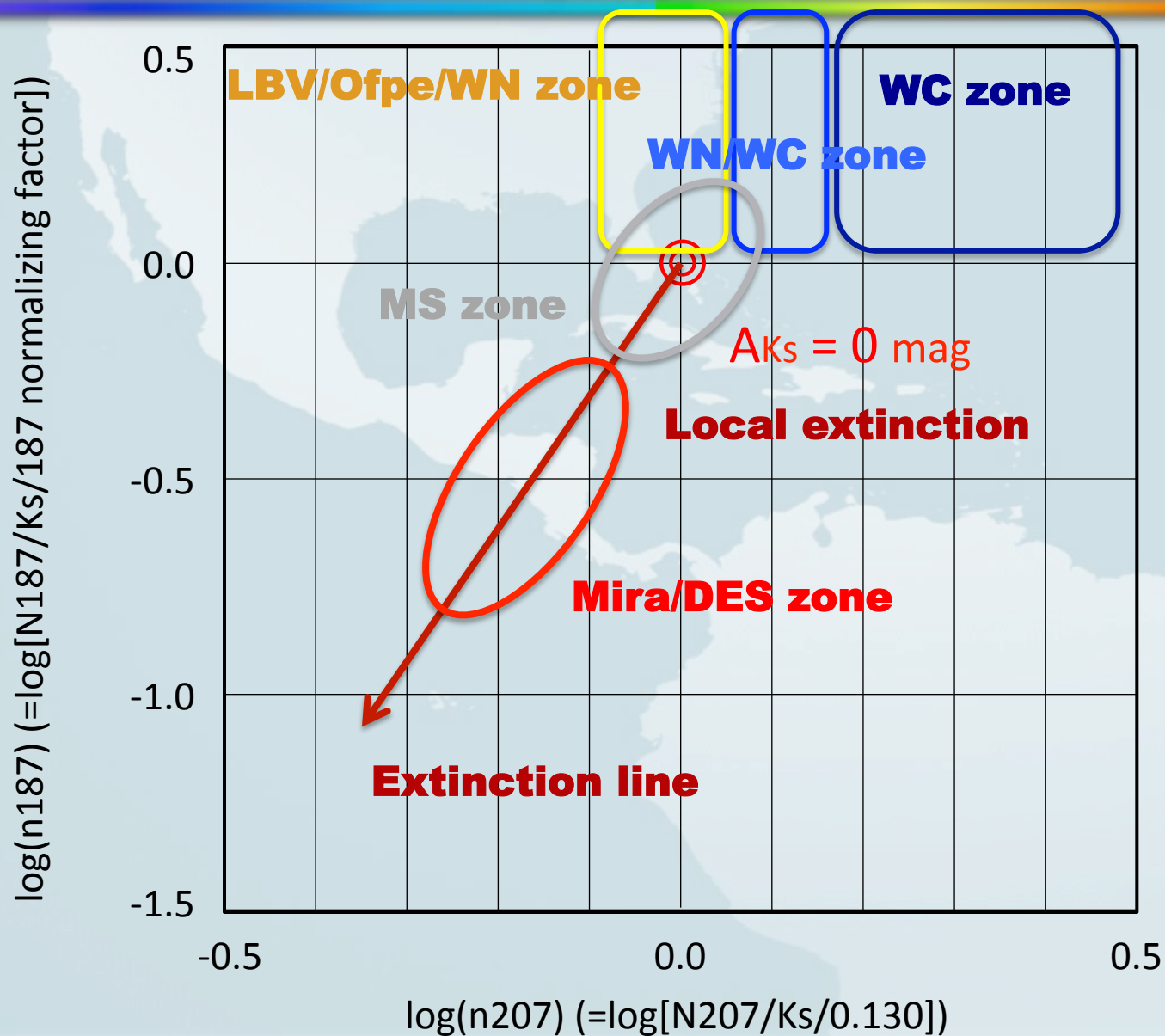


## 2色図～ 2 colors diagram





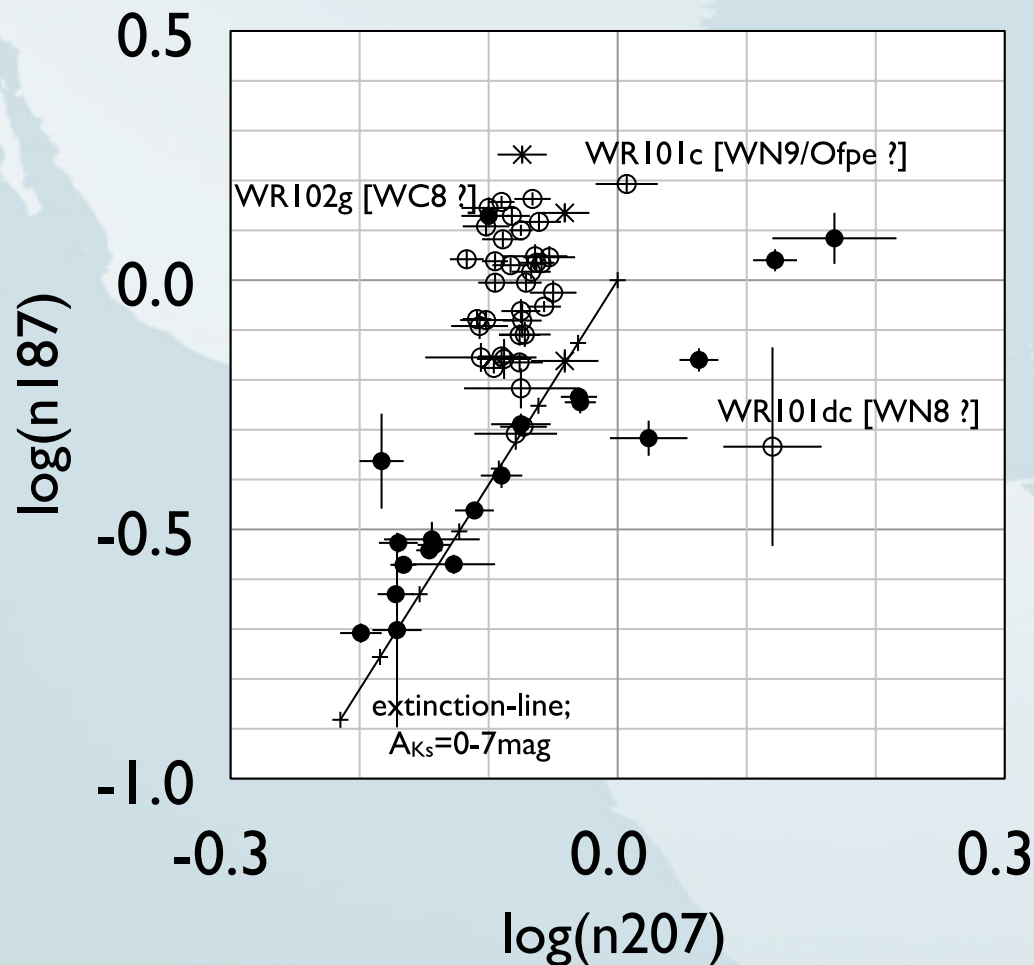
## 2色図~ 2 colors diagram





## 2色図～ 2 colors diagram

- 銀河中心方向3クラスター (GC、Quintaplet, Arches)



Tanaka et al. in prep.

- カタログカされているWR(はほぼ**総てピックアップ**)
- **然るべきゾーン**にプロット

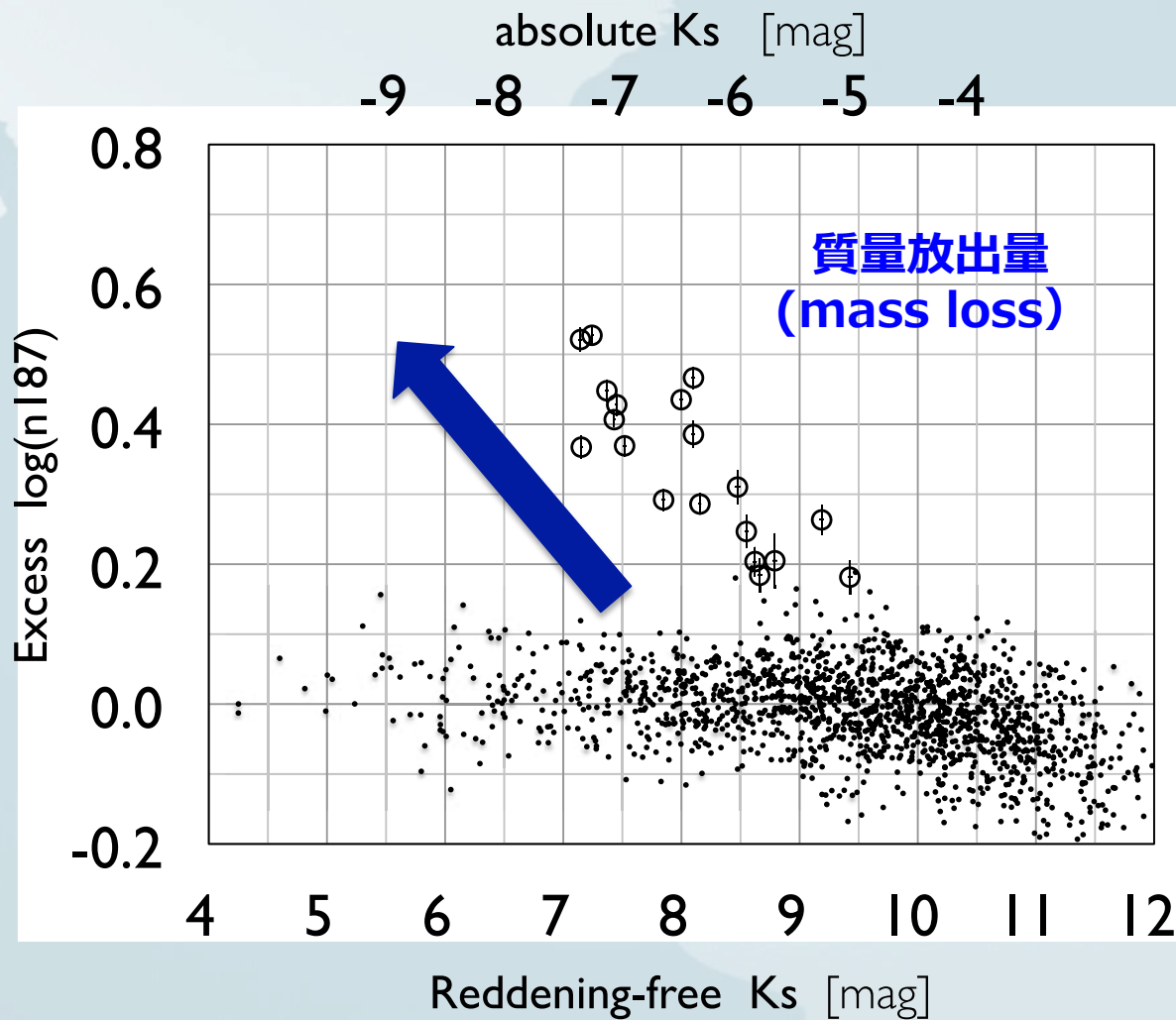




## Ks vs N187 excess

□ ArchesクラスタのWN late

mass loss → ヘリウム密度 → He II (+Paa)



Tanaka et al. in prep.

mass loss → Free-free emission → Ks



# 観測室の風景

- 20フィートコンテナ (L6.1m x W2.4m x H2.6m)
- 発電機 + 太陽電池
- 水道なし
- 燃烧式トイレ
- ネットワークは完備

頭痛

お腹が痛い

臭苦しい 眠い



山頂は気圧が低い

ポテトチップスが やたら美味しい 寝がひたすら長く感じる

狭い お肌カサカサ 寒い

早く帰りたい

本当は曇ればいいと思ってる



ダウン……zzz





# 高山ゆえの問題



## □ 高山症状

- ✓ 集中力の低下
- ✓ 体力の消耗
- ✓ イライラする
- ✓ すぐに喧嘩
  - 酸素吸入を義務化
  - 山頂作業は4人、車は2台以上
  - 山頂滞在は8時間まで

## □ ハードウェア障害

- ✓ HDDの機械的クラッシュ
- ✓ 放熱効率の低下
- ✓ 低温・紫外線

## □ 山頂～サンペドロ往復4時間の運転



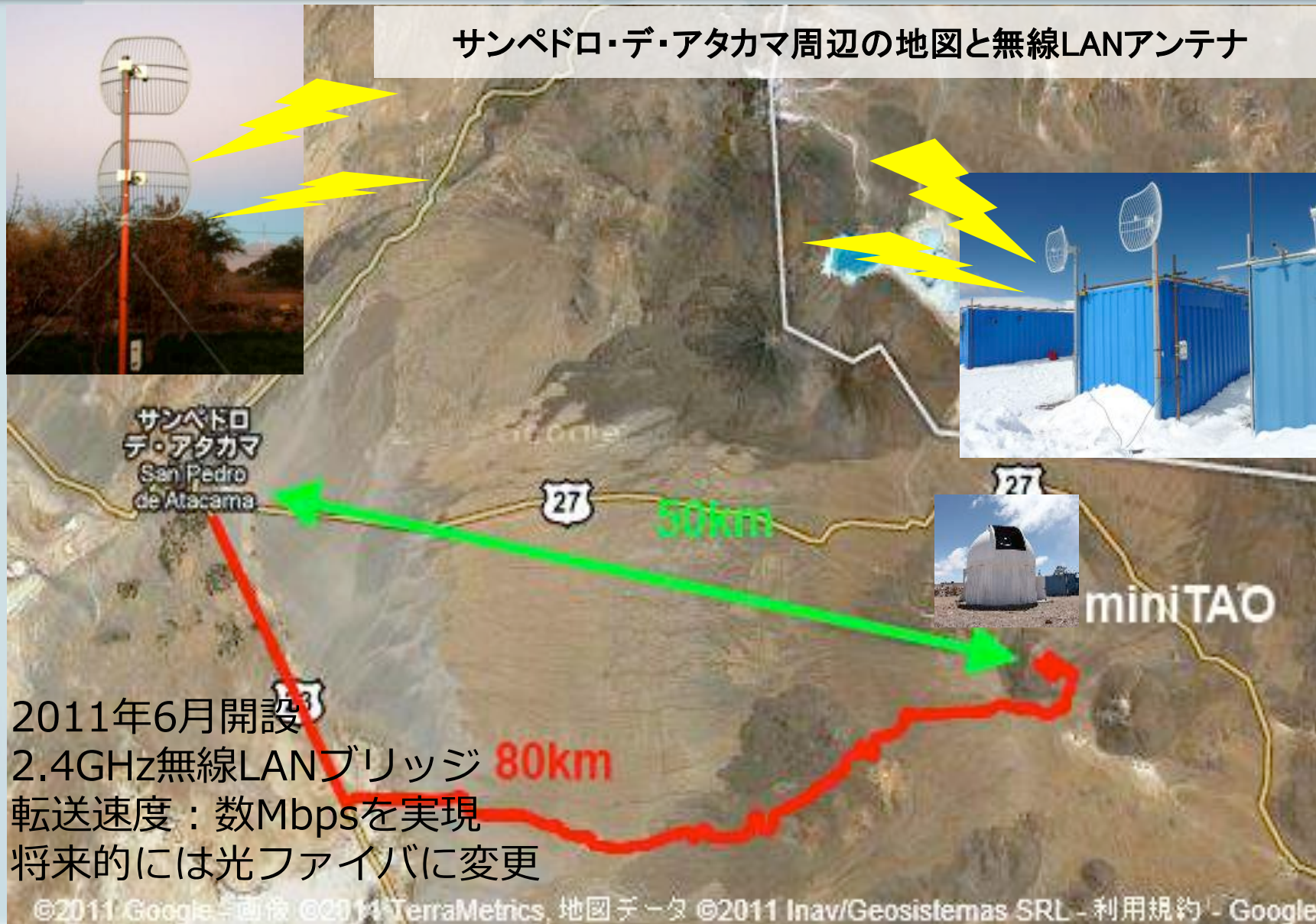




# 無線通信の設置



サンペドロ・デ・アタカマ周辺の地図と無線LANアンテナ



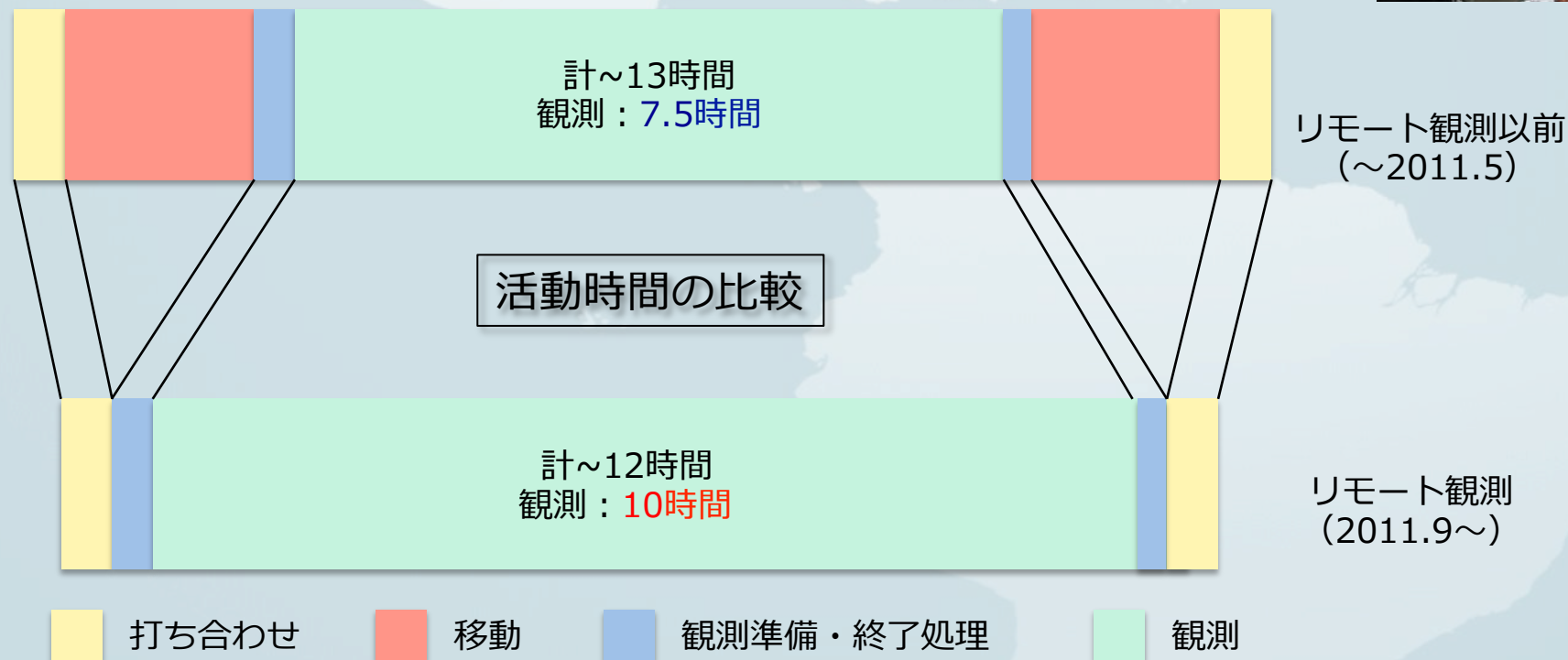
- 2011年6月開設
- 2.4GHz無線LANブリッジ
- 転送速度：数Mbpsを実現
- 将来的には光ファイバに変更



# 山麓からの遠隔観測の効果



- 観測時間の延長
- 疲労軽減（喧嘩の減少）





# Atacama Panoramic View



塩湖とフラミンゴ









山頂を望む

ペニテンテ



山頂からの夕焼け





やがて日が暮れ….

星空が広がる





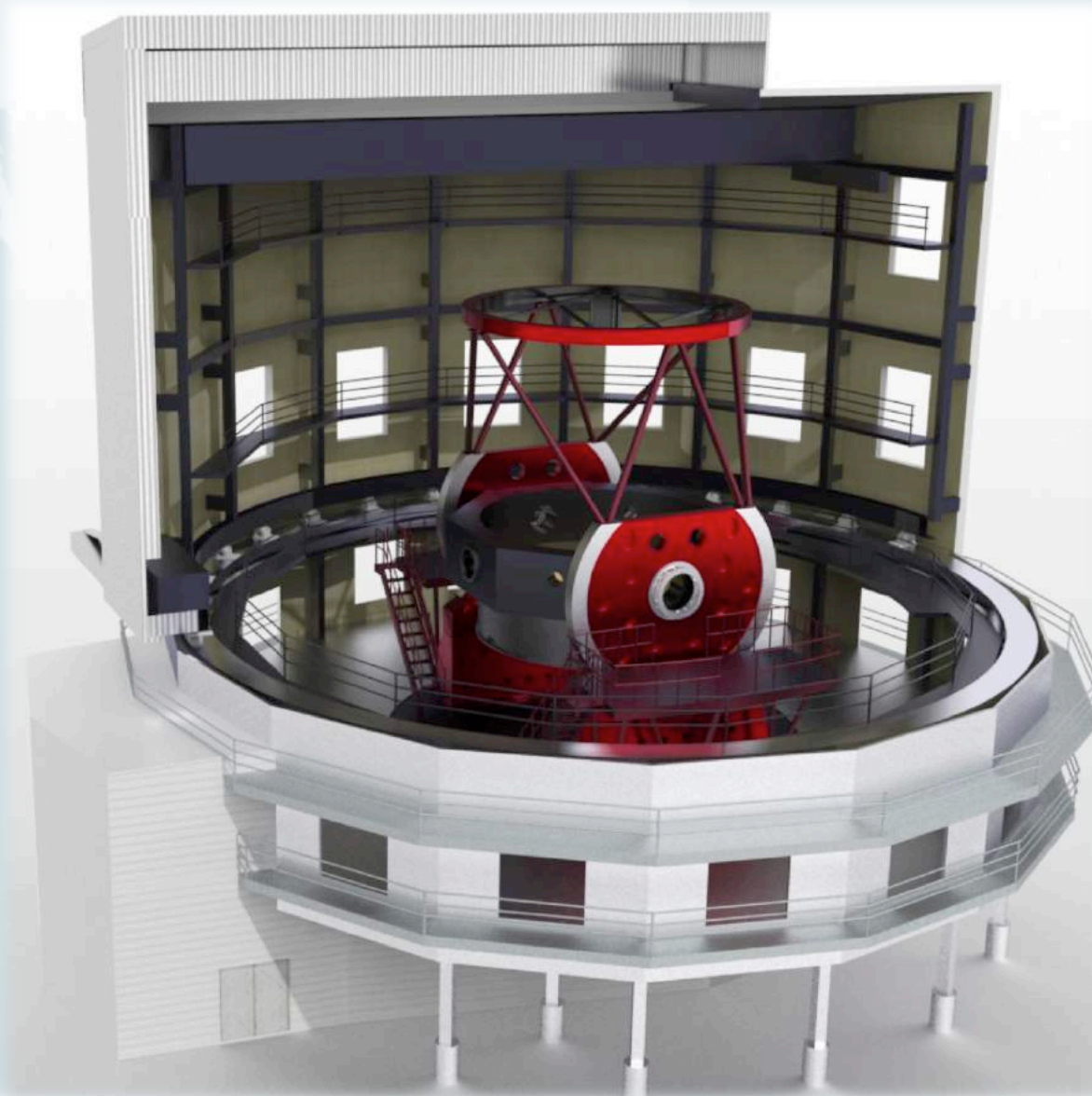


南天の日周運動





# TAO 6.5m望遠鏡





# TAO 6.5m望遠鏡



## □ 2013年度補正予算で本格始動！

### □ 口径6.5m

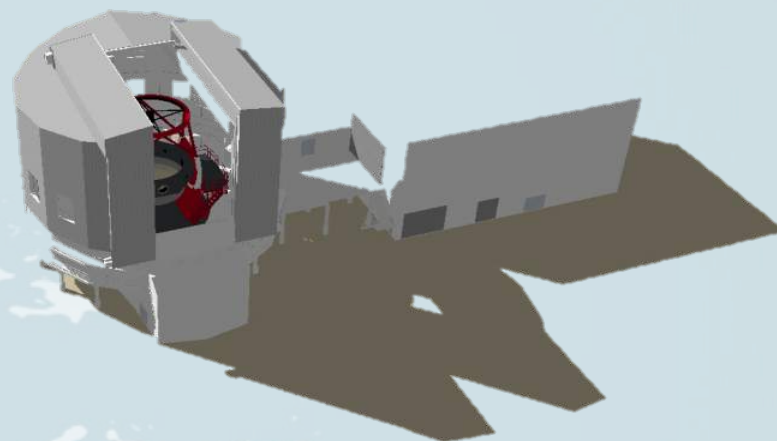
- ✓ Magellan 6.5m (チリ)がモデル
- ✓ 国内企業を中心に製作が開始

### □ 光学パラメータ

- ✓ 口径6.5m, 赤外線観測に最適化
- ✓ F/12.2, Ritchey-Chretien光学系
- ✓ 基本的にすばる望遠鏡と同じ
- ✓ 視野 $\phi 25'$

### □ 焦点

- ✓ 装置は基本交換なし
- ✓ 焦点切り替えは第三鏡の回転で実施
- ✓ ナスミス 近赤外線
- ✓ ナスミス 中間赤外線
- ✓ ベントカセグレン 高分散分光器  
(Y-band, カトリカ大との共同開発)
- ✓ ベントカセグレン  
(U-band、国内共同開発)







# TAOプロジェクト：進捗状況



架台・エンクロージャ・蒸着機器・観測装置日本国内で製作調整中



望遠鏡架台写真：西村製作所提供



西明石

能勢

つくば  
みらい

三鷹  
↓  
ハワイ

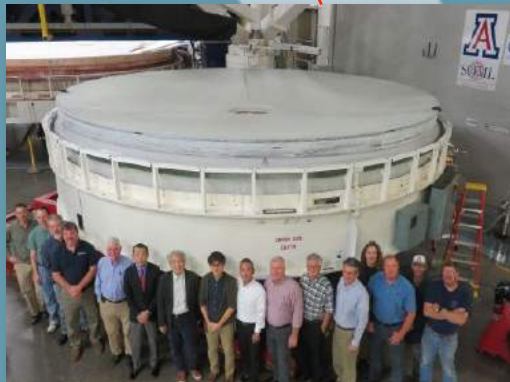




# TAOプロジェクト：進捗状況

## アリゾナ

現地研究棟：完成、運用中  
道路：年度内に拡張工事



鏡・能動制御  
アリゾナで製作調整中



## アタカマ



# 6.5m 望遠鏡

Nishimura CO.,LTD.



- 組立・調整・仮組中@西明石
- 年内に分解、2018年チリへ輸送



パラメータ詳細



写真提供 Nishimura CO.,LTD.





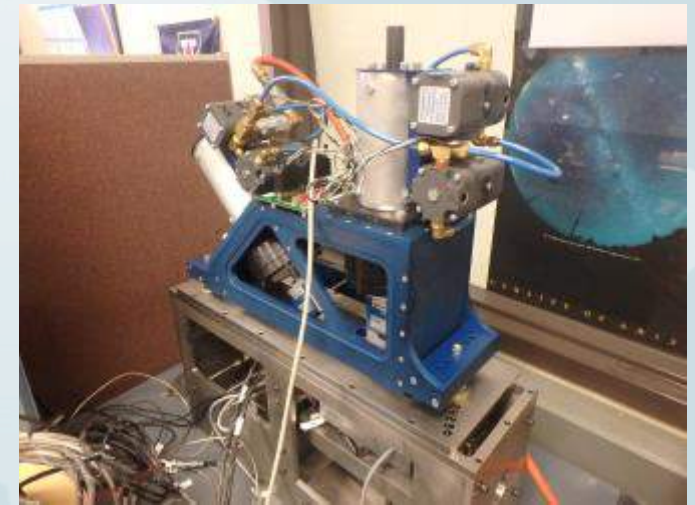
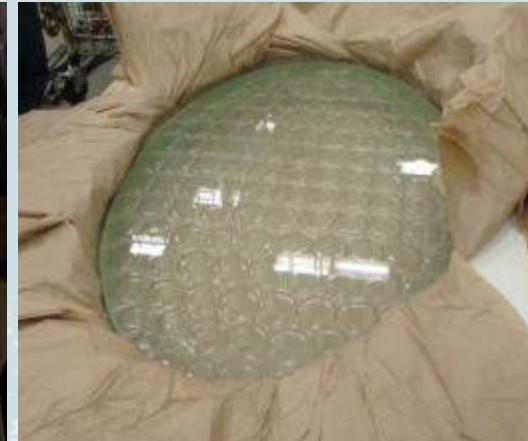




# 光学系（能動光学系部分含む）



- アリゾナ大学にて製作
- 現在、ツーソンで能動光学システムの組立中、年内に総合光学試験
- 主鏡セル冷却配管も完了

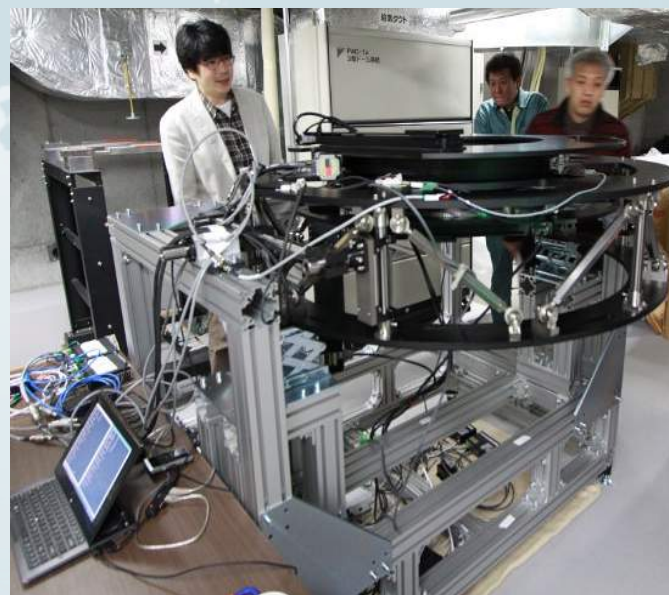
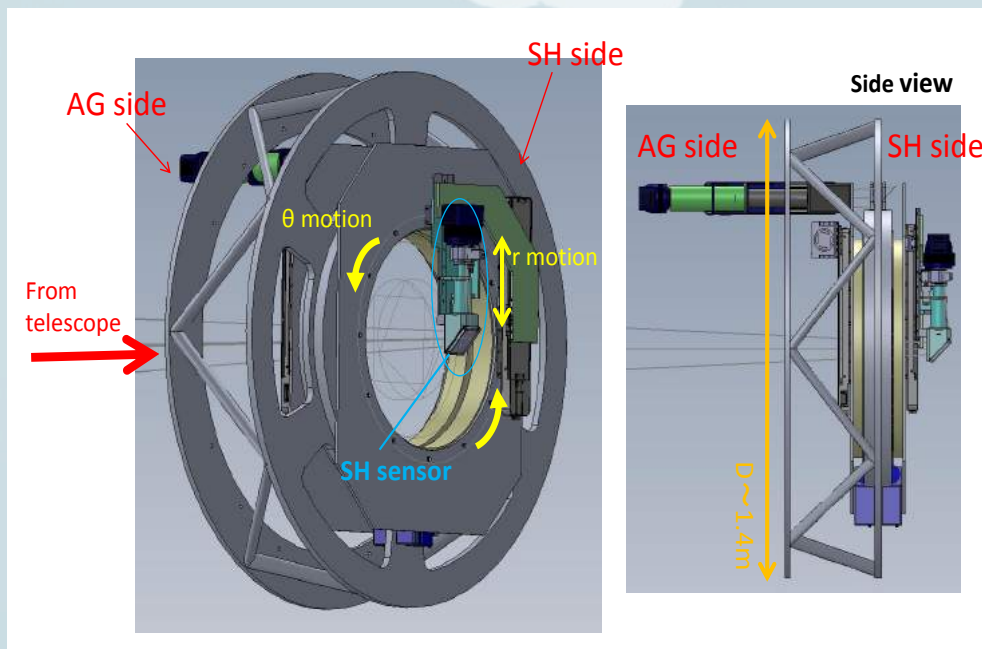
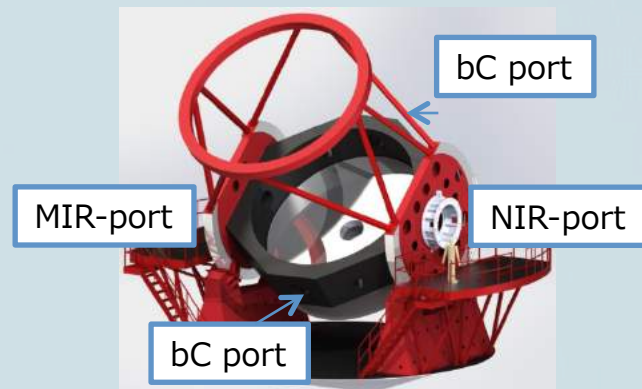




# Autoguider / Shack-Hartmann



- AGとSHを各々の焦点に準備
  - 総計4台のAGSHシステムを準備
- 設計性能
  - AG : 重心測定誤差 rms 0.02"(16mag)を達成
  - SH : 波面再生誤差10%以下を達成
- NIR-port用のハードウェア (AGSH#1) 完成
- ソフトウェアの検討も終了





# ソフトウェア

Nishimura CO.,LTD.

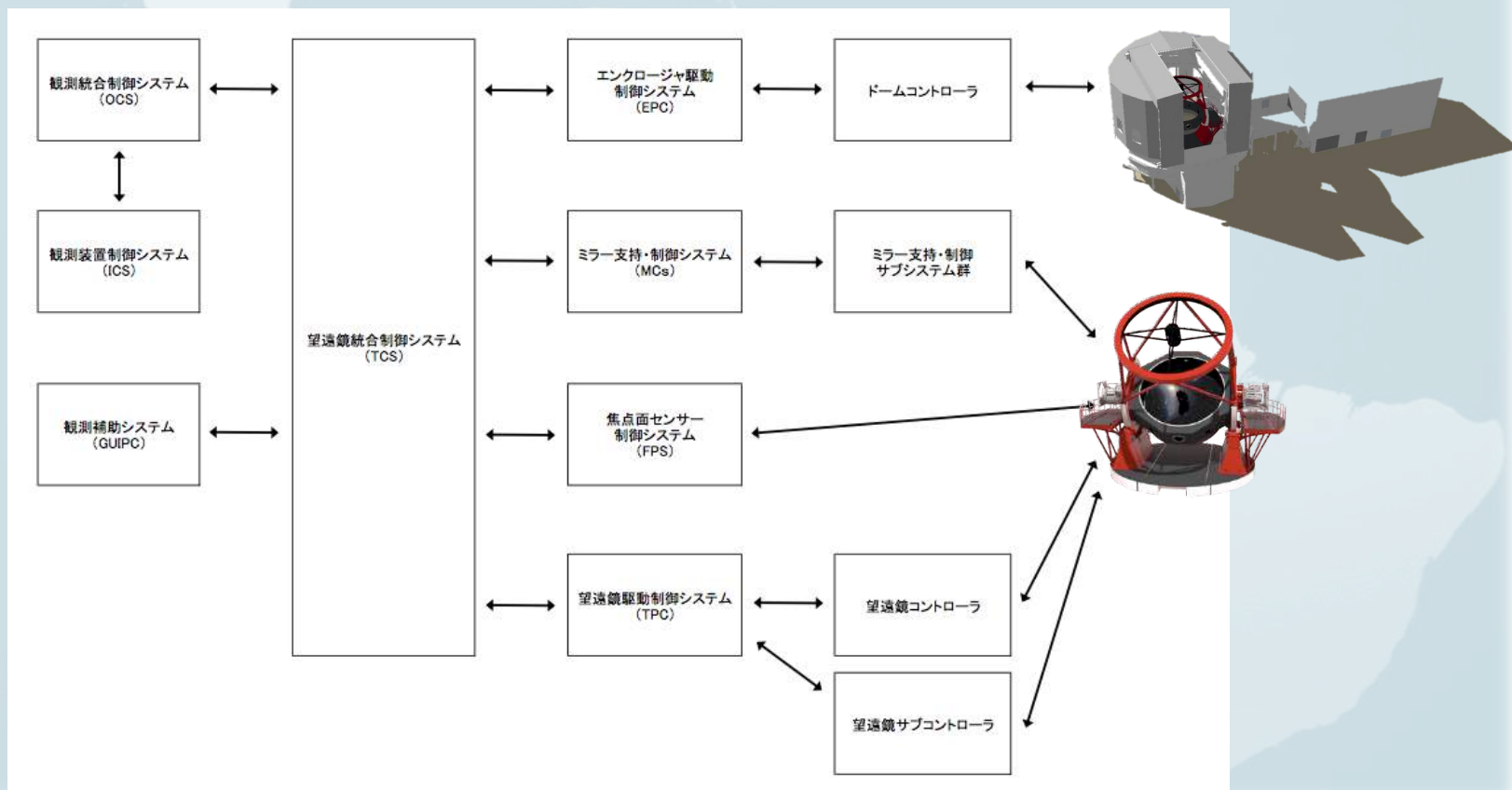


## □ 望遠鏡制御(TCS)

- ✓ 基本設計完了
- ✓ アリゾナ大学担当部分の主鏡コントローラとのIF確認
- ✓ 今年度からコーディング

## □ 観測統合制御システム(OCS)

- ✓ 基本設計完了



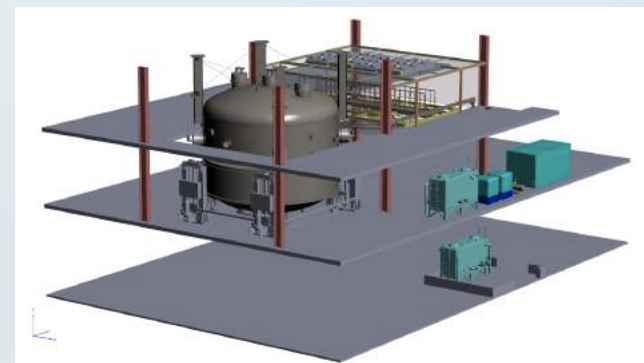
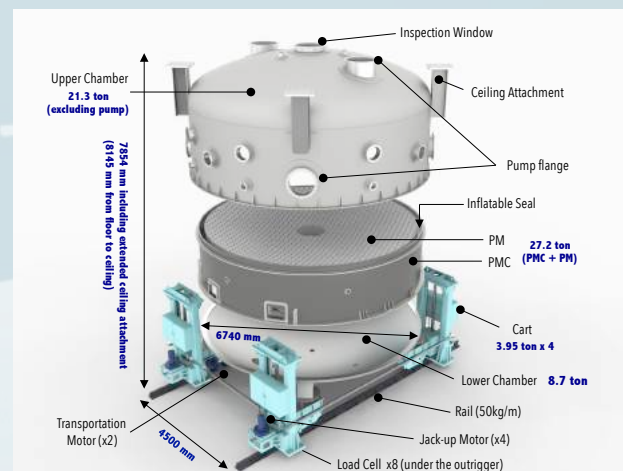




# 蒸着装置



- Magellanタイプの蒸着システムを採用
  - ✓ セルに搭載したまま主鏡蒸着/セルが真空容器の一部を兼ねる
- アルミコート(100nm)の基礎試験完了
  - ✓ THzでの観測を想定し、より厚い成膜(150-200nm)を試験中
- チャンバーの基本設計終了
- 洗浄システム・セル用自走台車も完成



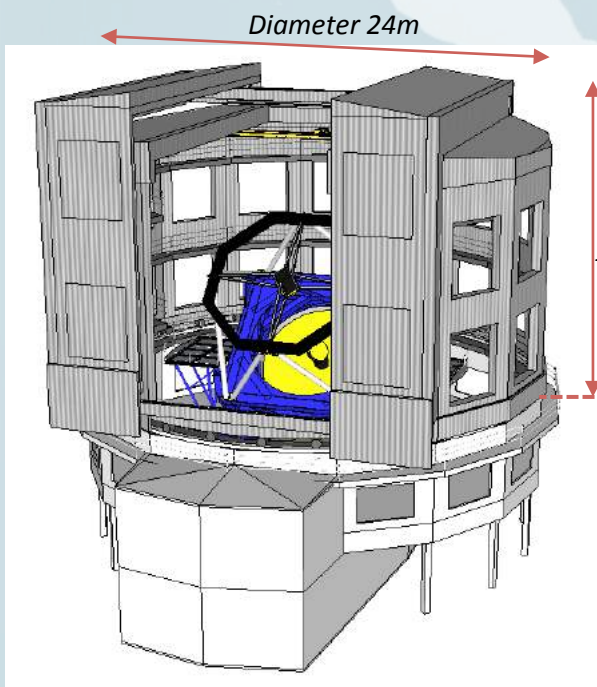


# エンクロージャー

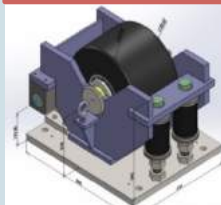
Nishimura CO.,LTD.



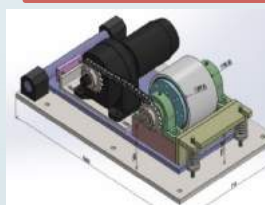
- カルーセルタイプのエンクロージャーを採用
- ベンチレーション窓による換気（冷房なし）
- 台車30台、駆動輪12台で駆動
- 設計完了、骨格構造は製作済み
- 2017年度内に解体、  
2018年度現地組み立て



Boogie carts x30



Driving wheels x12







# 現地サイト（山麓～）



- 山頂の地盤調査終了
  - ✓ 精密測量(2015/10)、整地（2017/10～）
- 山頂アクセス道路
  - ✓ 拡張計画を精密化
  - ✓ 業者の選定済
- 山麓施設
  - ✓ サンペドロデアタカマ市内で運用
  - ✓ 2014/11に竣工式典
  - ✓ ASTEチームも使用中







# 輸送



## Kobe

- Telescope Mount
- AGSH
- Enclosure



## Yokohama

- Lifting Cart
- Cleaning system
- Coating Chamber



## Los Angeles

- Mirror Cell
- actuators
- M1/M2/M3

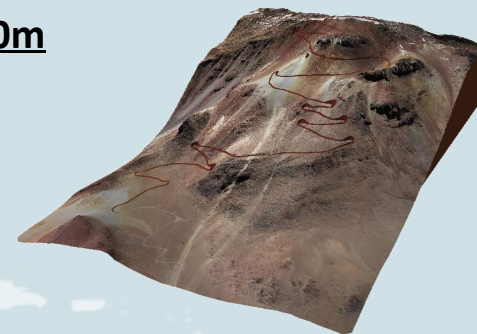


## Antofagasta

@5000m

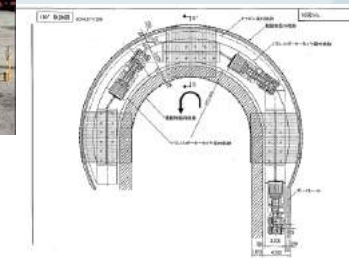
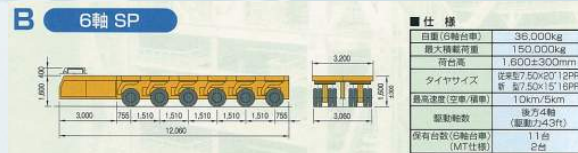


Built-in test



## Summit

Construction

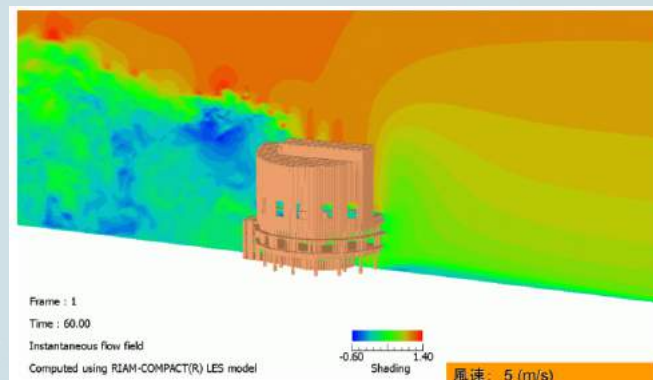




# 現地サイト (~山頂)

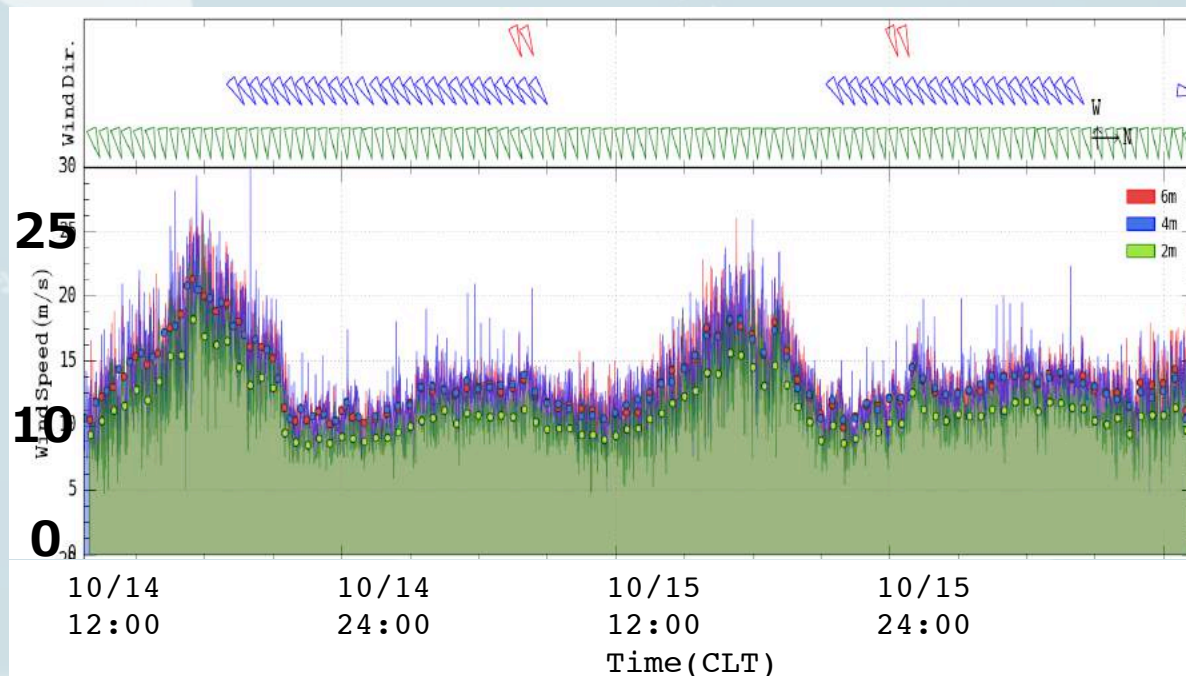
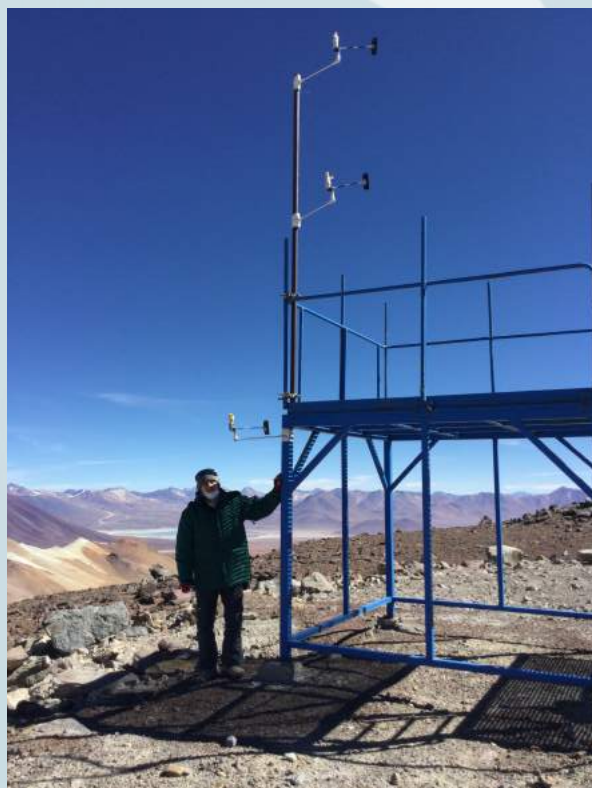


- 山頂施設基本設計完了
  - ✓ チリ仕様への設計変更も終了
- 山頂での風況測定



山頂2016.10

九州大学応用力学研究所・内田研究室  
 環境GIS研究所との共同研究



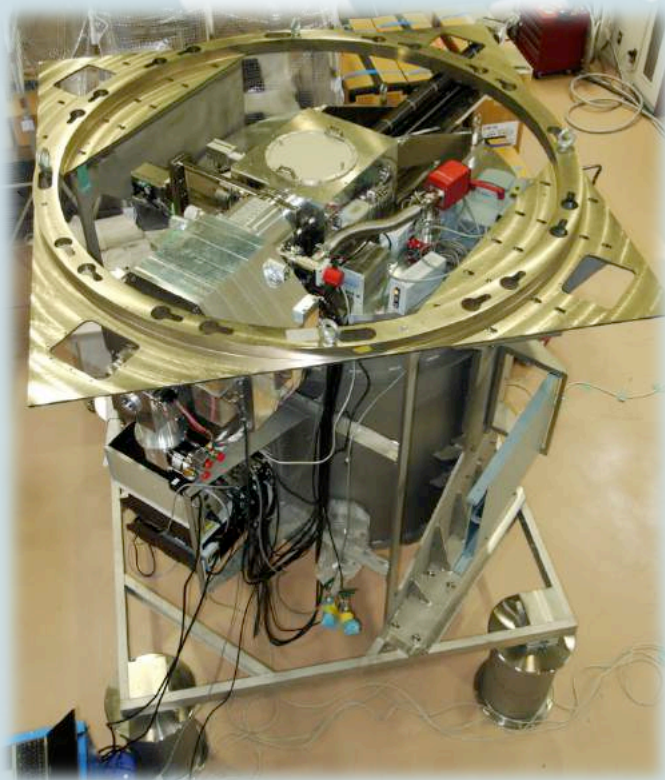




## 観測装置



- 2つの観測装置
  - ✓ NIR Multi-object spectrograph/Imager (**SWIMS**)
  - ✓ MIR Imager/Spectrograph (**MIMIZUKU**)
- 2009年度補正予算で製作費用が措置。(～2010年度)
- 2017年ほぼ完成→**すばる望遠鏡**での試験観測







# 近赤外線 2 色同時多天体分光器



## SWIMS

Simultaneous-color **W**ide field **I**nfrared **M**ulti-object **S**pectrograph

□ 広い視野: 9.6'  $\Phi$  with 4K x 4K pixels (0.096arcsec/pix)

□ **2バンド同時撮像分光**

短波長側: 0.9-1.4 $\mu$ m

長波長側: 1.5-2.5 $\mu$ m

多様なフィルターバンド

□ 多天体分光

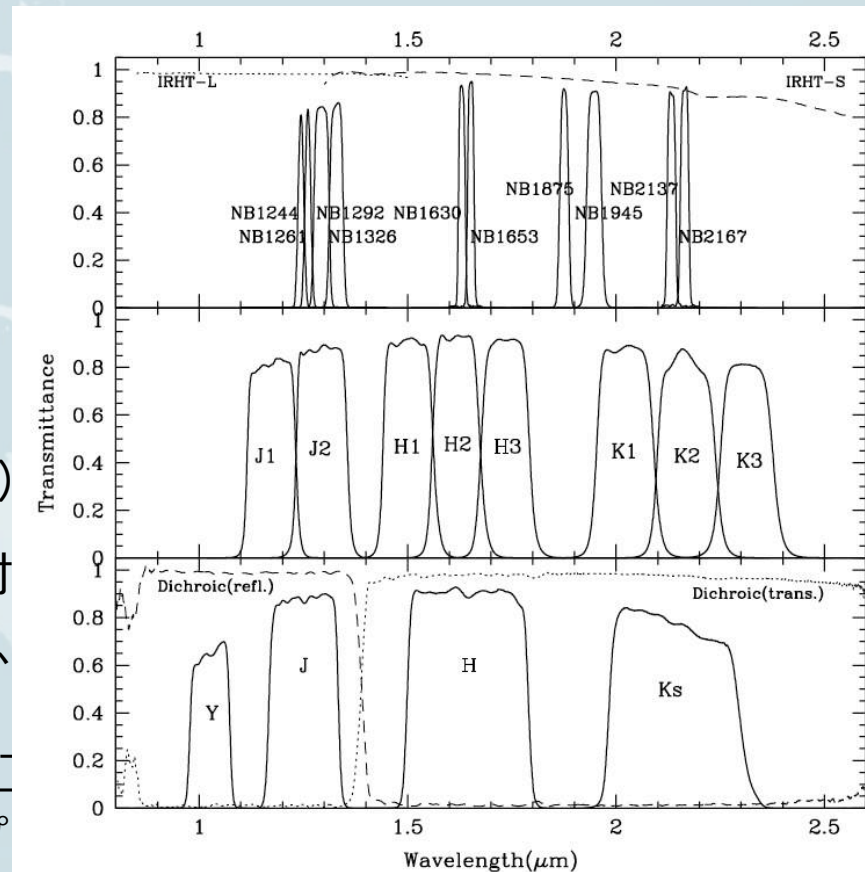
冷却スリットマスク

最大30天体

0.9-2.5 $\mu$ m 全域を一気に分光 (R $\sim$ 1000)

□ IFU module (面分光ユニット) 検討

□ Members : 本原、小西、高橋、加藤、寺尾、大橋、河野 (館内、尾崎 (NAOJ)、吉川 (虹住重、センチンシア、オブ





# 近赤外線 2 色同時多天体分光器



SW / MS

近赤外線

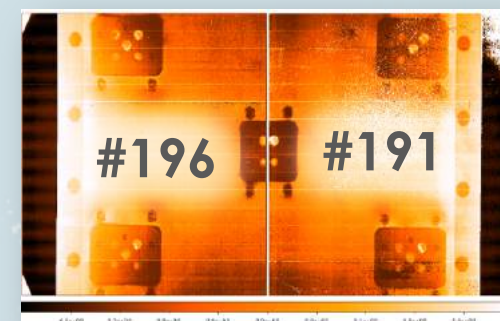
広視野

2波長域同時

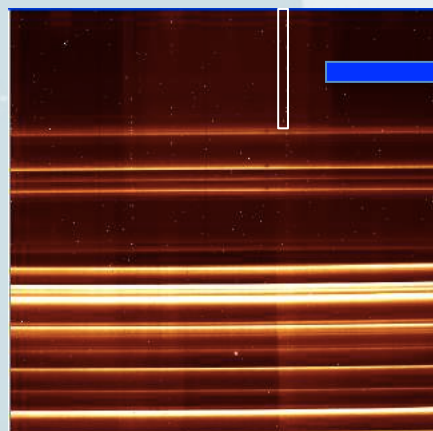
多天体分光

- 総合冷却試験 (@三鷹)
  - ✓ ほぼすべてのコンポーネントの動作・冷却性能を確認
  - ✓ ピンホールを使った撮像・分光試験
- 2017年の試験観測 (@すばる) に向けて  
ハワイ観測にて機能試験中

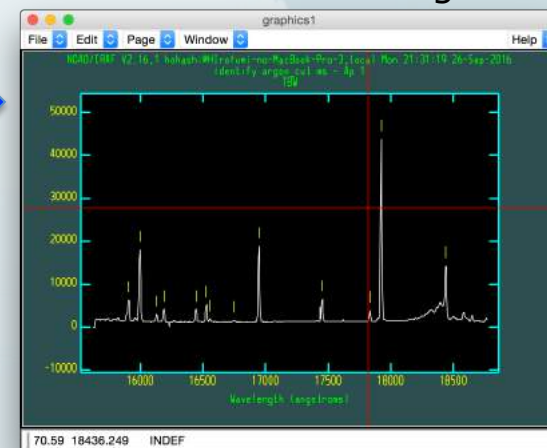
## ▼ピンホール撮像



## ▼ピンホール分光



## 1次元スペクトル (Argon)









# SWIMSによる観測

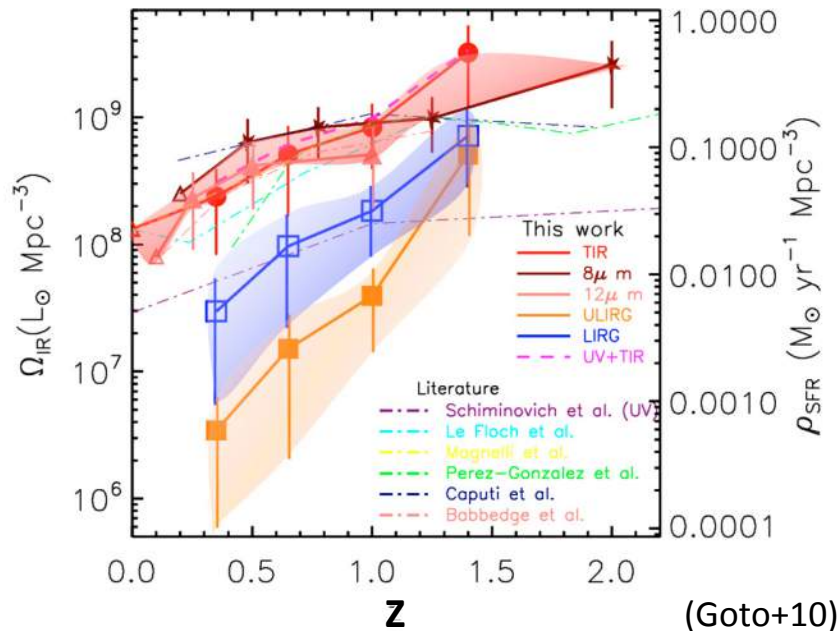


SWIMS

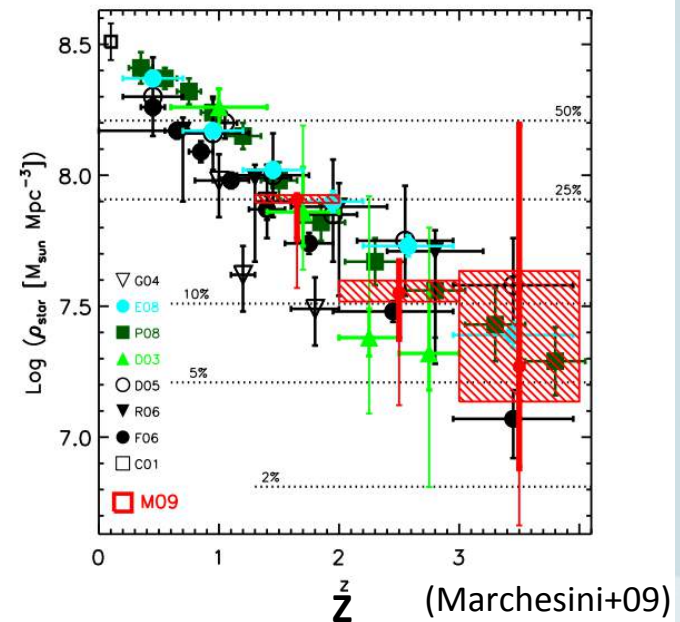
## □ Z=1~3の広視野サーベイ計画

星形成率の歴史

ions with the AKARI



星の総量



- ✓ 現在の星の総量の約半分が形成された時代
- ✓ dusty galaxyが増加、爆発的星形成 ( $>100-1,000 M_{\text{sun}}/\text{yr}$ )
- ✓  $z \sim 2$ に多くのAGNが分布

**この時代、なぜ銀河は活動的な状態を維持できたのか？**



# SWIMSによる観測

**SWIMS**

## □ $z=1\sim 3$ の広視野サーベイ計画

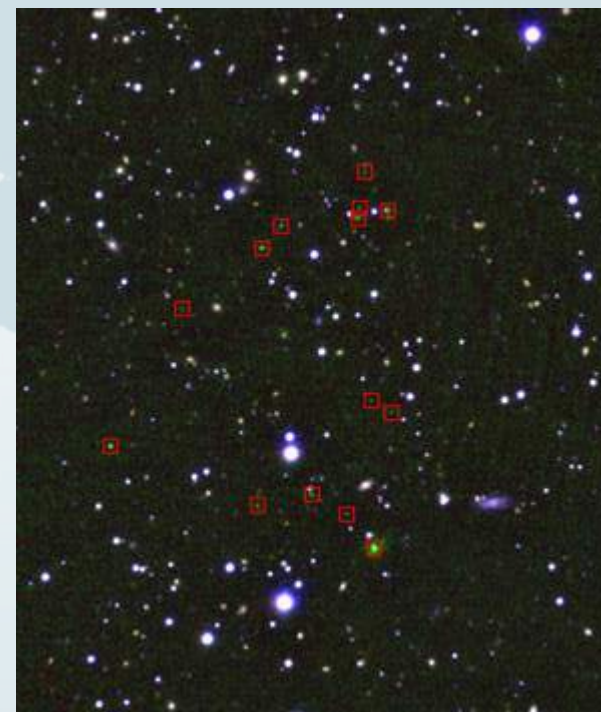
### ✓ $z\sim 1-3$ の包括的な銀河カタログの作成をおこなう

#### ① 多色近赤外線撮像サーベイ

- $> 3 \text{ deg}^2$  ( $\sim 7 \times 10^7 \text{ Mpc}^3$ )
- $> 100$  clusters, 20,000 galaxies
- 400 nights

#### ② 多天体分光ユニットによる近赤外線分光 フォローアップ

- $R \sim 500 - 1,000$
- $> 2,000$  galaxies
- 400 nights



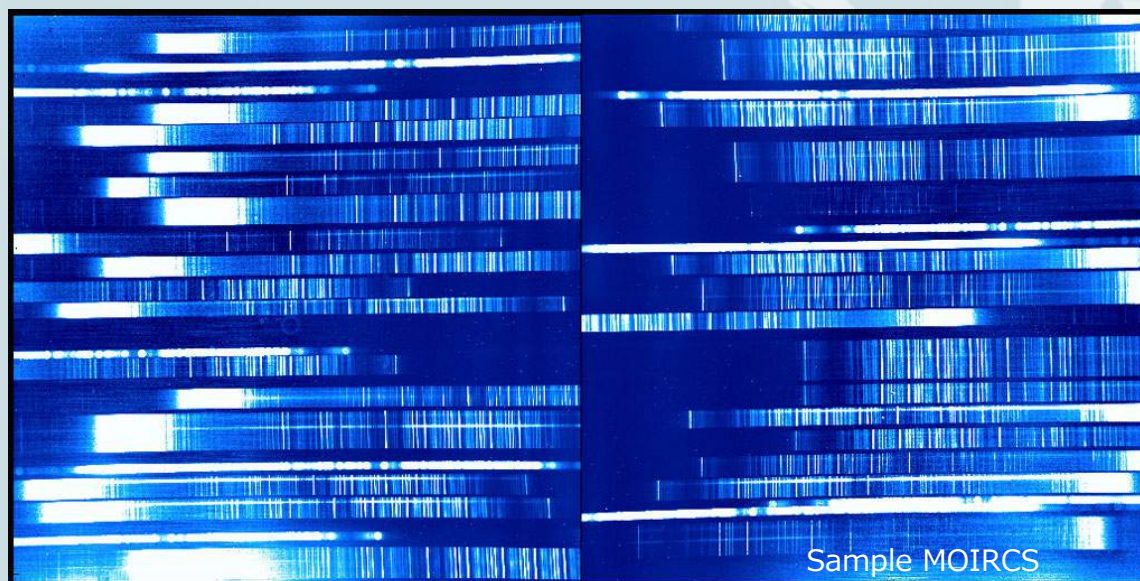
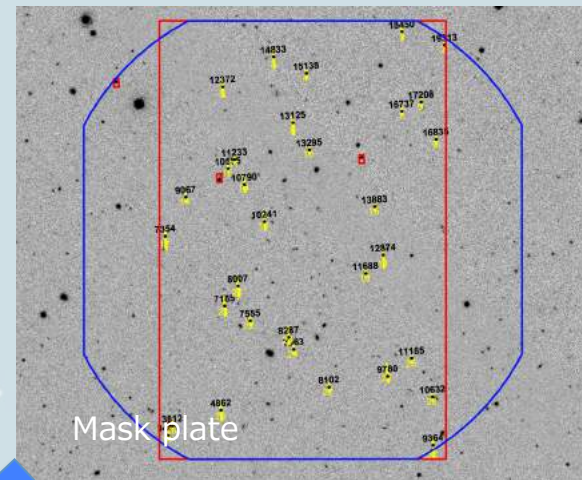
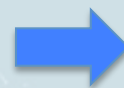
すばる望遠鏡多天体分光装置の画像

### ✓ 望遠鏡の運用時間をサーベイ観測へ集中的に投入する





# SWIMS/MOSUを用いた大質量星クラスターの多天体分光観測



- 狭帯域フィルターによる候補天体のピックアップ
- MOSUによる分光観測
  - ✓ タイプ、サブクラス同定
  - ✓ 北天@すばる望遠鏡
  - ✓ 南天@TAO
- サンプル数の増大
- 大質量星クラスターの統計的、系統的研究





# 中間赤外線分光撮像装置



Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing the UnKnown Universe

□ 高い解像度: 0.3" @10um, 1.0" @30um

□ 30um帯観測

短波長側: 6-26um

長波長側: 26-38um

近赤外バンド: 2-6um

□ 高精度測光／分光観測

撮像感度: 30mJy@10um/ 130mJy@20um/ 0.5Jy @30um

分光感度: 150mJy@10um/ 0.6mJy@20um/ 1.5Jy @30um

波長分解能: R~250 (N-band/Q-band/30um-band)

□ Members: 宮田、酒向、上塚、内山、森、山口、石田 (浅野、内山、岡田)  
住重、鈴木商館





# 中間赤外線分光撮像装置



中間赤外線

高解像度

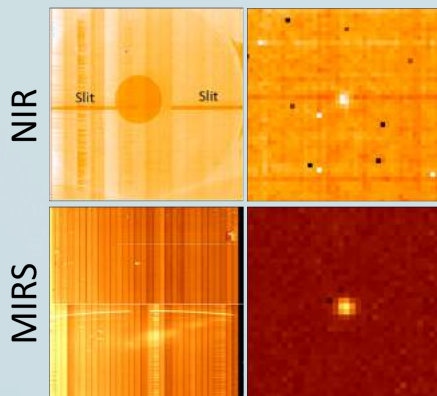
広波長カバー

高精度モニタ

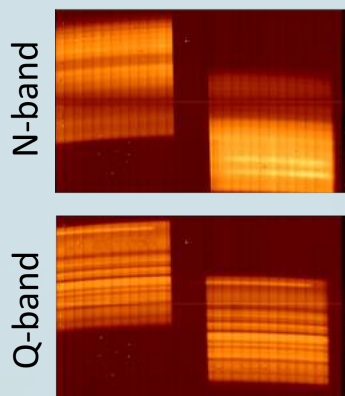
- ❑ 冷却試験、傾斜試験を実施、問題なし
  - ❑ 検出器駆動システム完成
  - ❑ 光学系再製作完了
  - ❑ フィールドスタッカー動作試験終了
- ➔ 現在ハワイ観測所へ向かう海の上



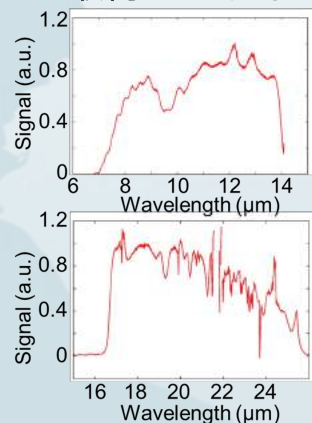
全体 ピンホール像



分光イメージ



取得スペクトル

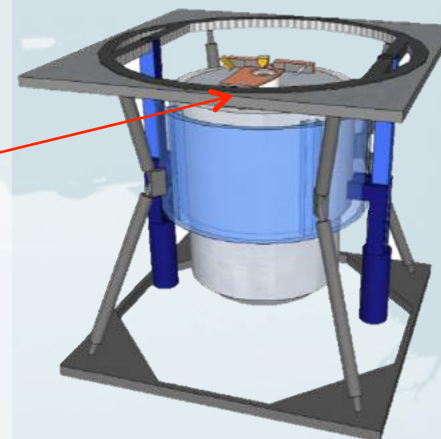
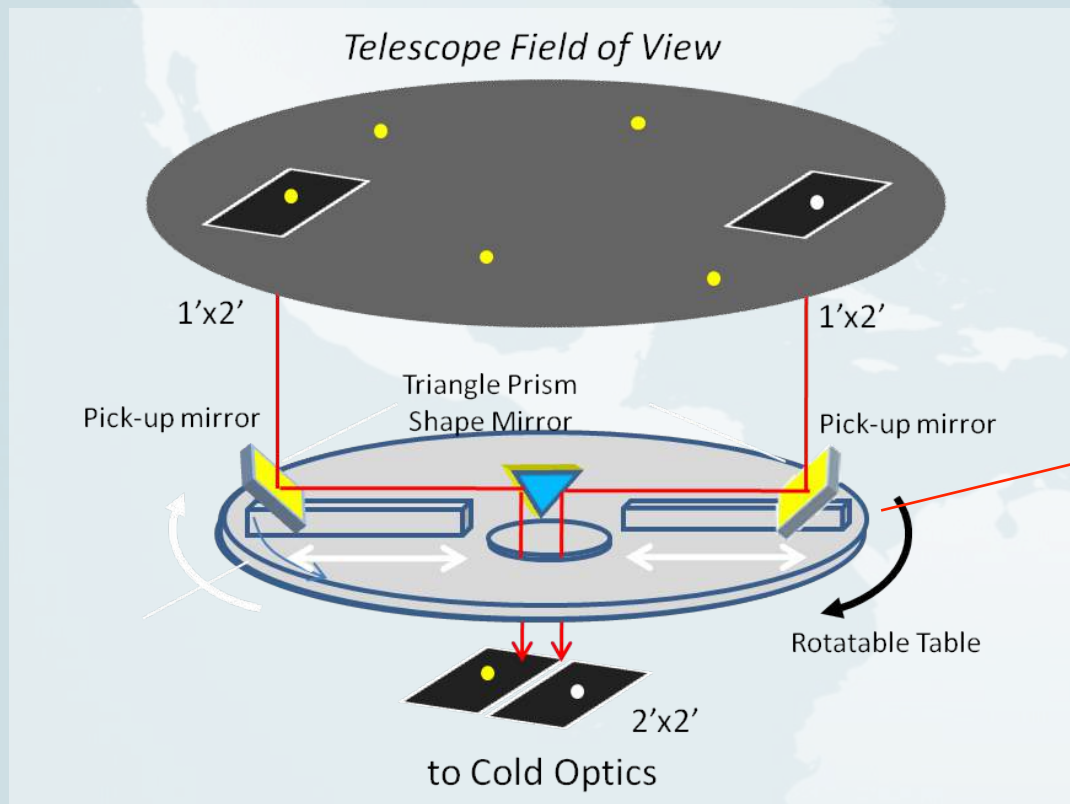




# 中間赤外線分光撮像装置



## □ Field Stacker



- ✓ 2台のピックアップ鏡により、 $\phi 25'$ 以内の任意の2視野（基準光源と目標天体）を同時観測
- ✓ 地球大気の変動の影響を除去
- ➔ 高精度の測光、分光観測を実現





# MIMIZUKUによる観測

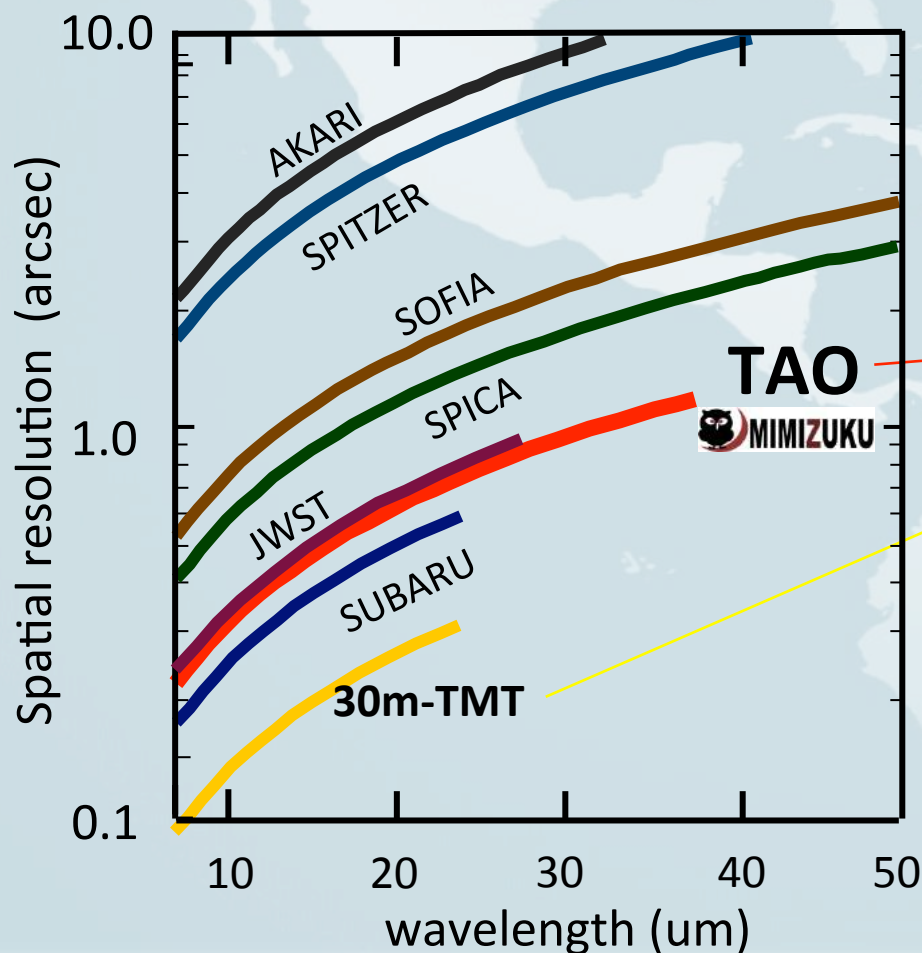


## □ 広い波長範囲で高解像度

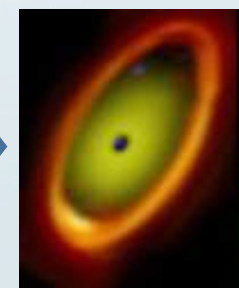
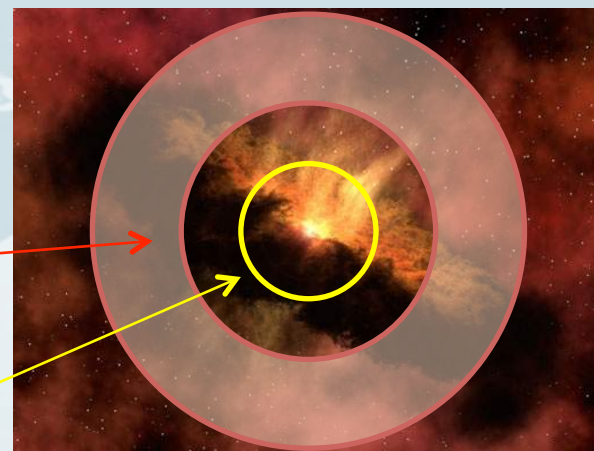


$\lambda=10\mu\text{m}$  @30m-TMT : 解像度 $0.1''$  → hot/warm inner領域 < 10AU

$\lambda=30\mu\text{m}$  @6.5m-TAO : 解像度 $1.0''$  → cold outer領域 < 100AU



原始惑星系円盤  $d=100\text{pc}$





# MIMIZUKUによる観測

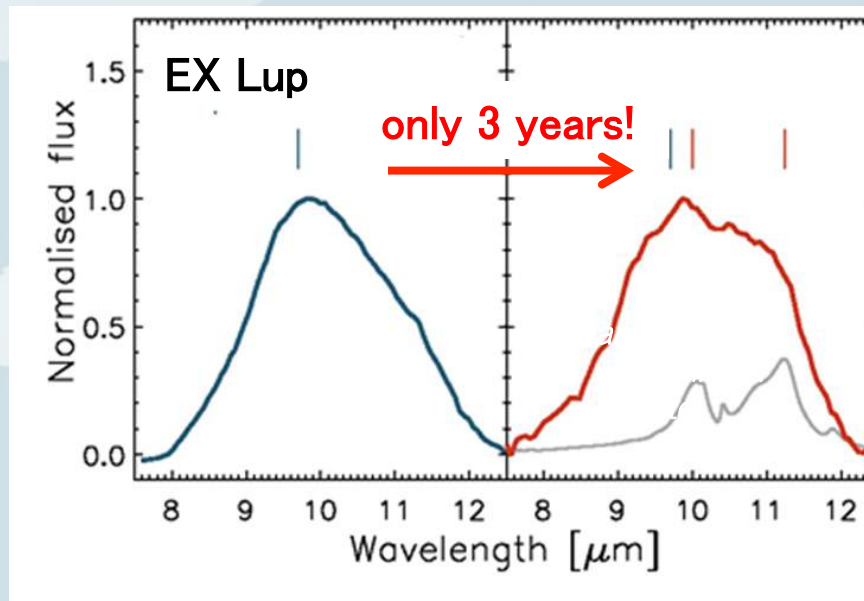


## □ 高精度な測光/分光観測



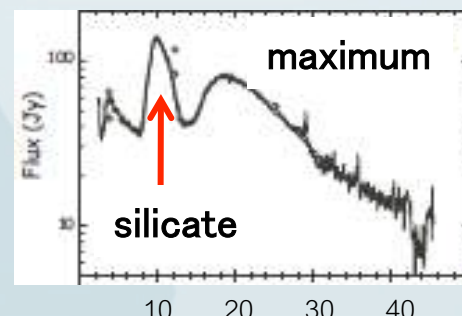
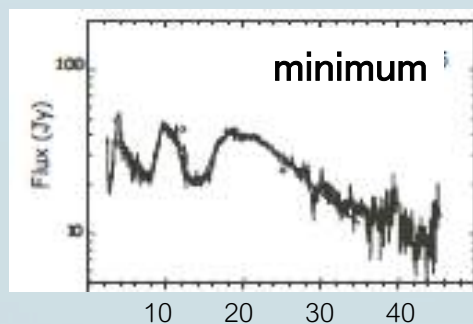
中間赤外線源の多くは短時間に変光？→惑星やダストの起源への手がかり

### ✓ 原始惑星系円盤



Abraham+ 2009

### ✓ 晩期型星の周囲のダスト(AGB stars, WR stars, LBVs...)



Onaka+ 2002



# TAO望遠鏡の観測時間運用

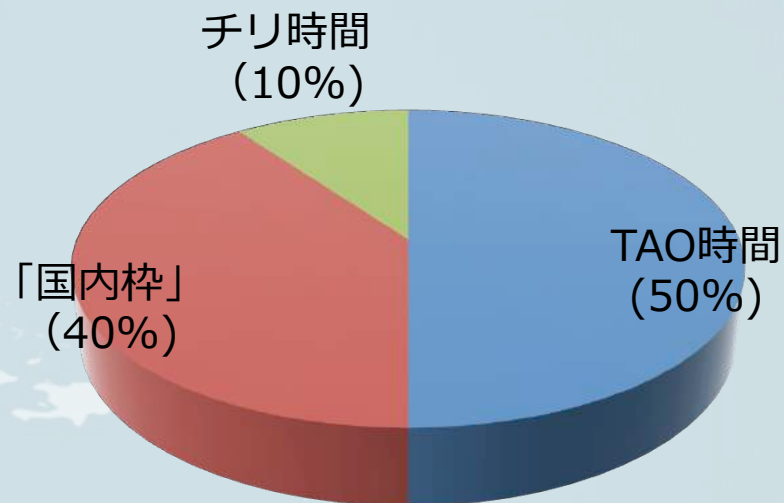


## □サイエンス観測時間の配分

- ✓ 50% : TAO プロジェクト時間
- ✓ 40% : 全国の大学等へ公開
- ✓ 10% : チリ時間

## □「国内枠」の活用

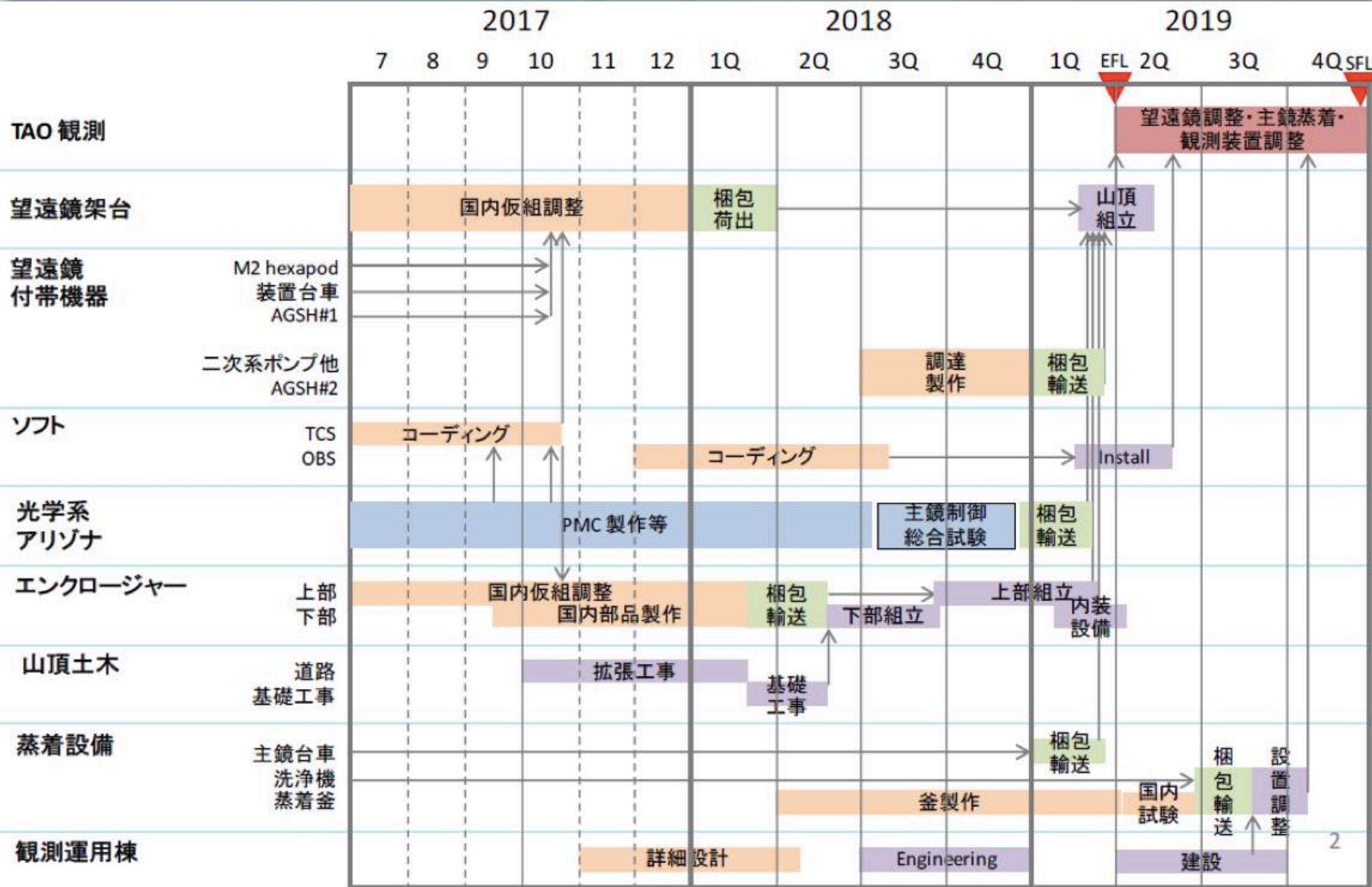
- ✓ 「国内枠」 ≠ 「共同利用」
- ✓ 大学望遠鏡
- ✓ 学生教育、次世代研究者育成
- ✓ TAO望遠鏡の特徴を最大限活用する
  - : 赤外線観測性能、南半球
- ✓ 他の望遠鏡との関係
  - : シナジー、すみ分け、共通化
- ✓ 効率的な運用・観測
  - : プログラム審査、観測運用プロセスの最適化







# スケジュール



少しでも高く  
ちょっとでも遠く  
一歩でも前へ

TAO Project

*Adios hasta luego !*