



# 東京大学アタカマ天文台 (TAO)計画

東京大学 天文学教育研究センター

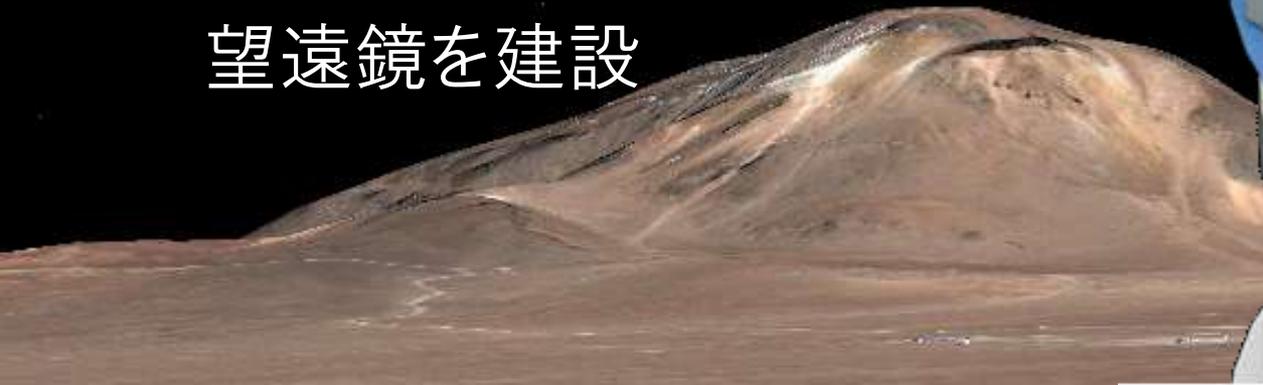
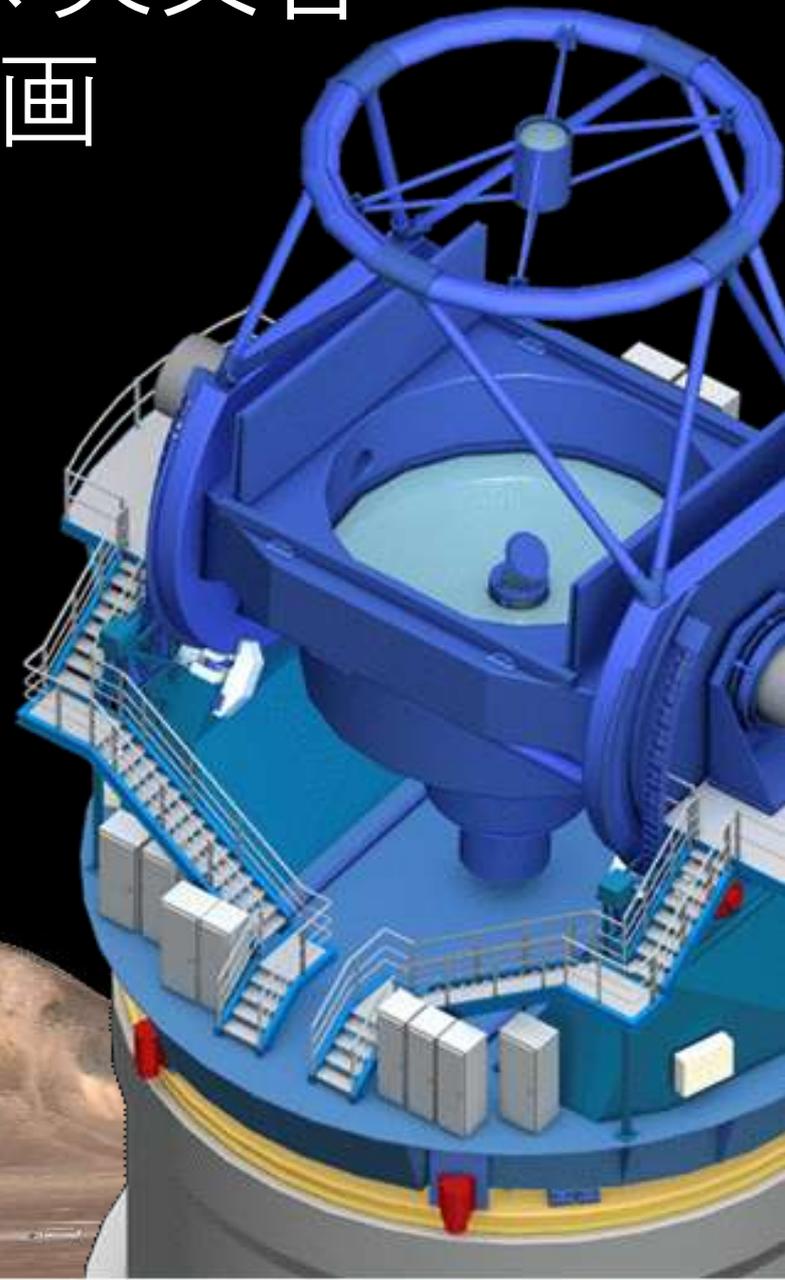
酒向重行、TAO計画グループ

# アウトライン

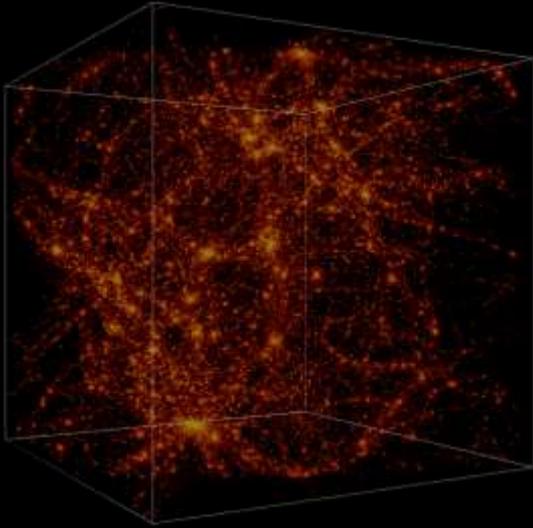
- はじめに
- 赤外線で見える宇宙
- TAO計画のあゆみ
- miniTAOの今
- miniTAOからTAOへ

# 東京大学アタカマ天文台 (TAO)計画

- 世界最高所の天文台
- 南米チリ アタカマ高地  
チャントール山
- 標高5,640m
- 口径6.5mの大型赤外線  
望遠鏡を建設



# TAOが切り開く宇宙



## Origins of Galaxies and Planets

Where do we come from? Where are we going?



the Univ. of Tokyo Atacama Obs.

# TAO

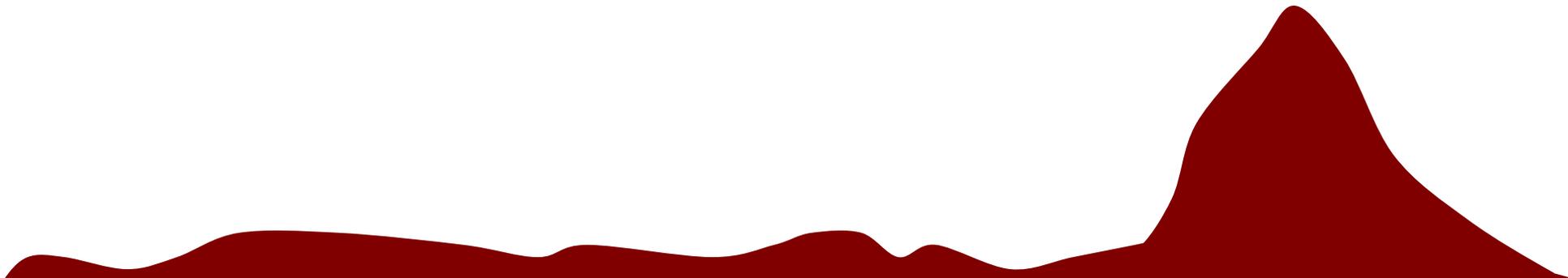
# 口径1.0-m miniTAO 望遠鏡

TAOサイトの開拓を目的としたパイロット望遠鏡



# 赤外線で見える宇宙

我々は、なぜアタカマに辿り着いたのか？



# 次の10年に託された課題

## □ 銀河の誕生と進化

近赤外線多色広視野撮像で探る銀河の進化, 多天体分光サーベイで探る $z \sim 2$ 銀河の星形成史, 遠方赤外線銀河のダスト放射物理の解明, サブミリ波銀河と隠された星形成史, Pa で探る近傍宇宙の星形成パノラマ, 超巨大質量ブラックホール進化, Fe ii/Mg ii 輝線強度比の測定による第一世代星形成時期の推定, ダストに埋もれた活動銀河核の探査, 変光現象で探る活動銀河核の構造と進化, 近赤外超新星サーベイ, 近傍超新星の測光・分光観測, Ia型超新星による宇宙膨張測定, 活動銀河核の変光観測による宇宙膨張測定, 宇宙論的な観測

## □ 惑星の誕生と進化

トランジット観測による系外惑星の性質解明, トランジット周期変動(TTV)法, 小・中質量星の星惑星形成, 大質量星の星惑星形成, 星と星間物質, 星間ダストの供給問題, 大質量星の進化とダスト形成, 中小質量星の進化とダスト形成, 分子雲におけるダスト形成, 原始惑星系円盤の時間変動, 太陽系内小天体, 金星, 木星, 彗星, 小惑星

# 次の10年に託された課題

## □ 銀河の誕生と進化

ダークマターに支配された暗黒の宇宙で、銀河はどのように生まれ、そして現在の姿へと進化しえたのか？ 銀河の進化を支えた立役者とは？

深宇宙の広域探査

赤方偏移



高感度  
赤外線  
観測

## □ 惑星の誕生と進化

存在の普遍性が確固たるものとなった系外惑星。同時に見えてきた多様性は何が引き起こしているのか？ 生命につながる手がかりとは？

惑星のゆりかごの探査

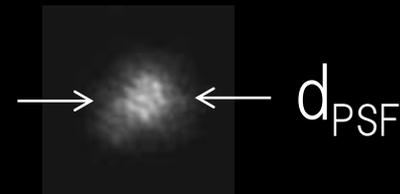
透過力



高感度  
赤外線  
観測

# 赤外線望遠鏡の感度

$$\frac{\text{signal}}{\text{noise}} \propto \frac{F_{\text{天体}} A_{\text{大気}} A_{\text{望遠鏡}} A_{\text{装置}} D^2 t_{\text{積分}}}{\sqrt{F_{\text{背景}} d_{\text{PSF}}^2 D^2 t_{\text{積分}}}}$$



# 赤外線望遠鏡の解像度



回折限界

$$d_{\text{PSF}} \sim \lambda / D$$



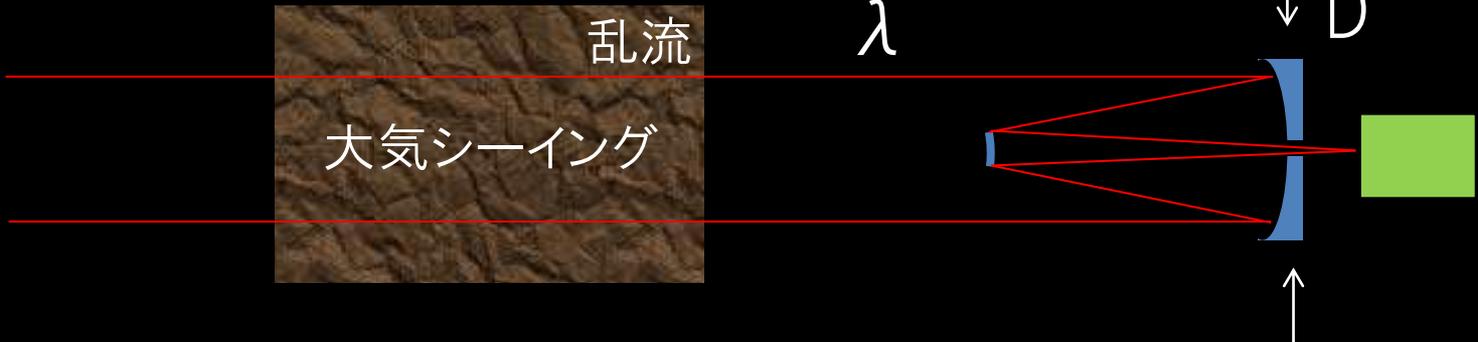
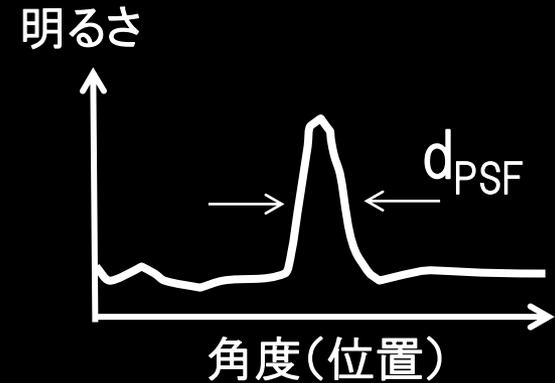
大気乱流で悪化



測定されるPSF

余分な背景成分が混入するため  
感度も劣化する

point spread function



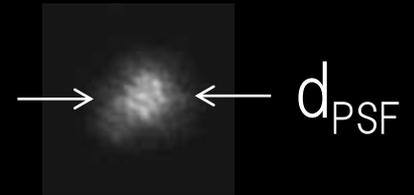
# 高感度の赤外線観測に向けて

大型望遠鏡 + 高感度観測装置

望遠鏡の運用方法

$$\frac{\text{signal}}{\text{noise}} \propto \frac{F_{\text{天体}} \cdot A_{\text{大気}} \cdot A_{\text{望遠鏡}} \cdot A_{\text{装置}} \cdot D \cdot \sqrt{t_{\text{積分}}}}{\sqrt{F_{\text{背景}} \cdot d_{\text{PSF}}}}$$

好条件の観測サイト  
→ チリアタカマ



$F_{\text{天体}}$

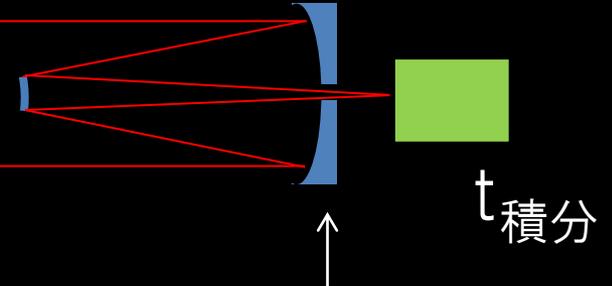
$A_{\text{大気}}$

$A_{\text{望遠鏡}}$

$A_{\text{装置}}$

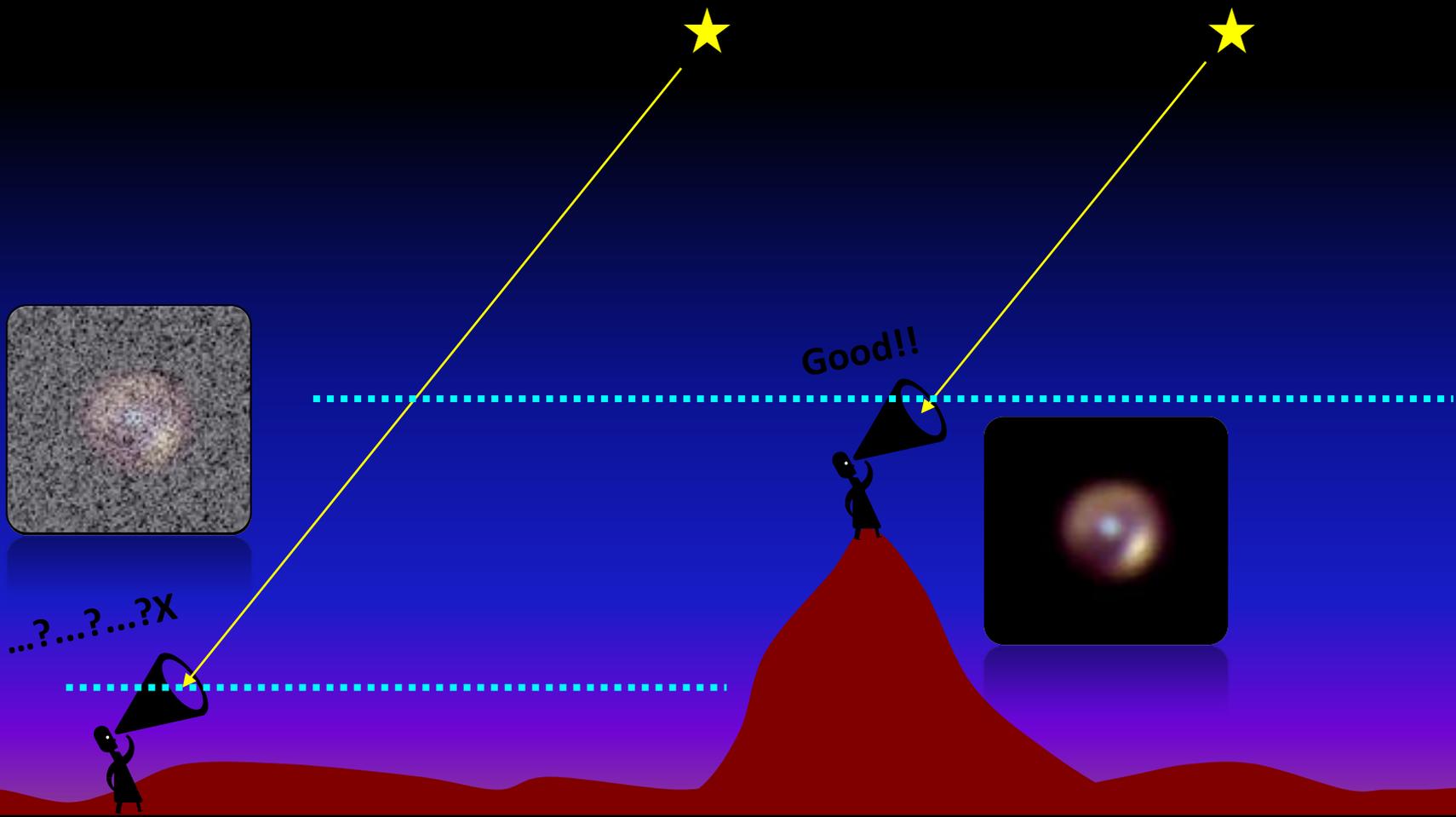


$F_{\text{背景}}$



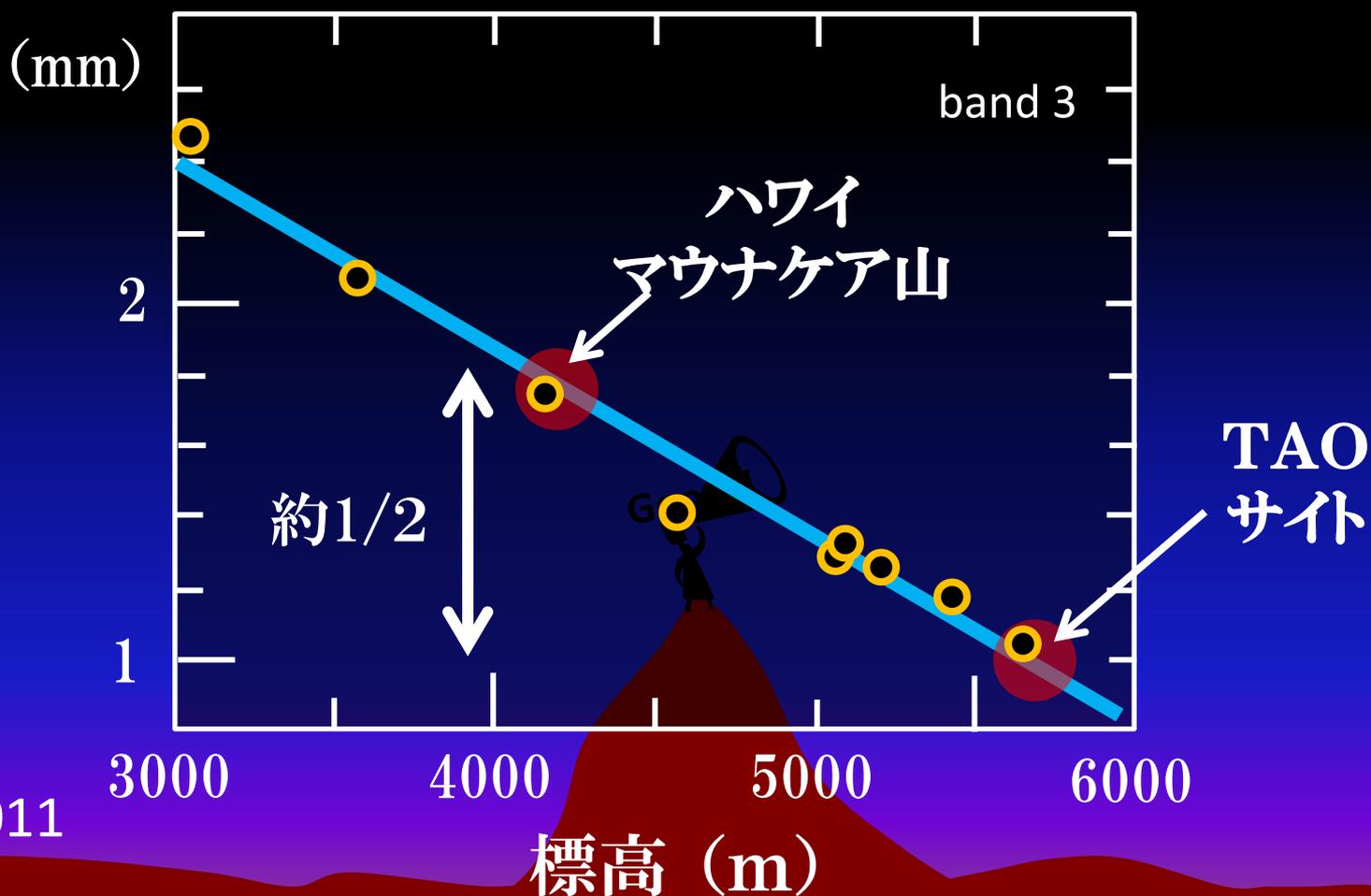
# 地球大気による赤外線吸収

- ・ 地球の大気(分子、電離ガス)などにより、宇宙からの電磁波は吸収される。
- ・ 標高の高い場所では、上空の大気が薄くなるため吸収の影響が減少する。



# 上空の水蒸気量と標高の関係

可降水量 PWV (precipitable water vapor)



# 地球大気の窓

赤： VLT望遠鏡サイト

標高2600m (PWV = 2.0mm)

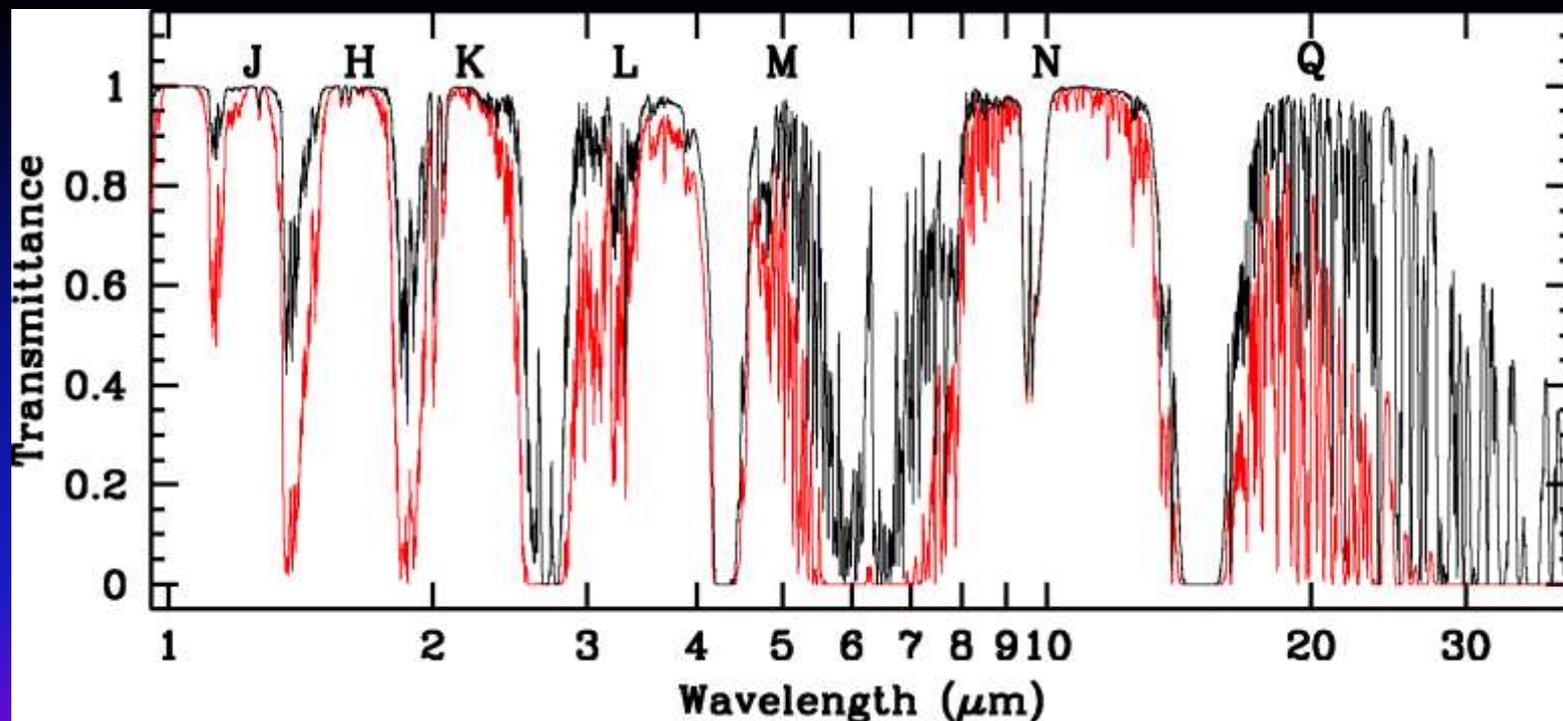
黒： TAOサイト

標高5640m (PWV = 0.5mm)

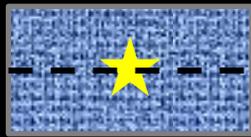
可視光

近赤外線

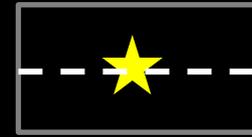
中間赤外線



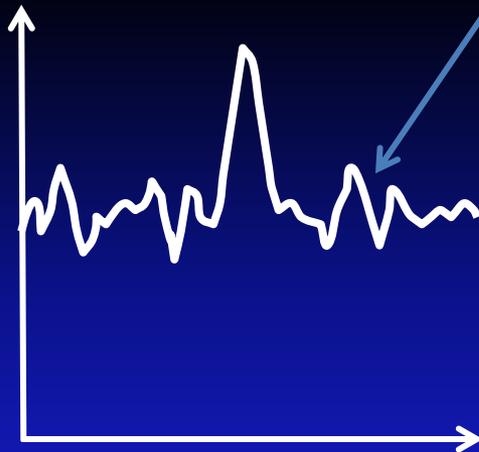
# 背景放射によるノイズ



ポアソンノイズ  
 $\propto \sqrt{(\text{光子数})}$



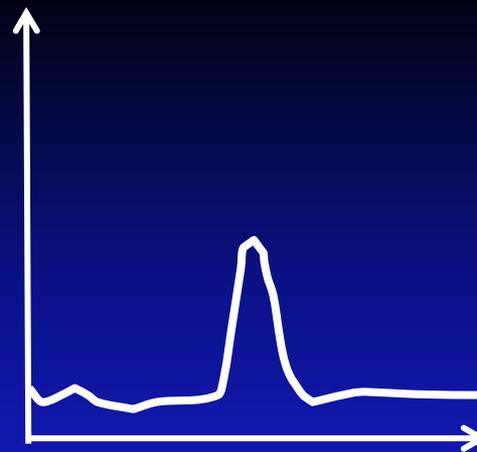
明るさ



天体

背景放射

明るさ



天体

背景放射

# 背景放射の強度

光子数

(photons  $s^{-1} m^{-2} \mu m^{-1} arcsec^{-2}$ )

地球大気からの熱放射

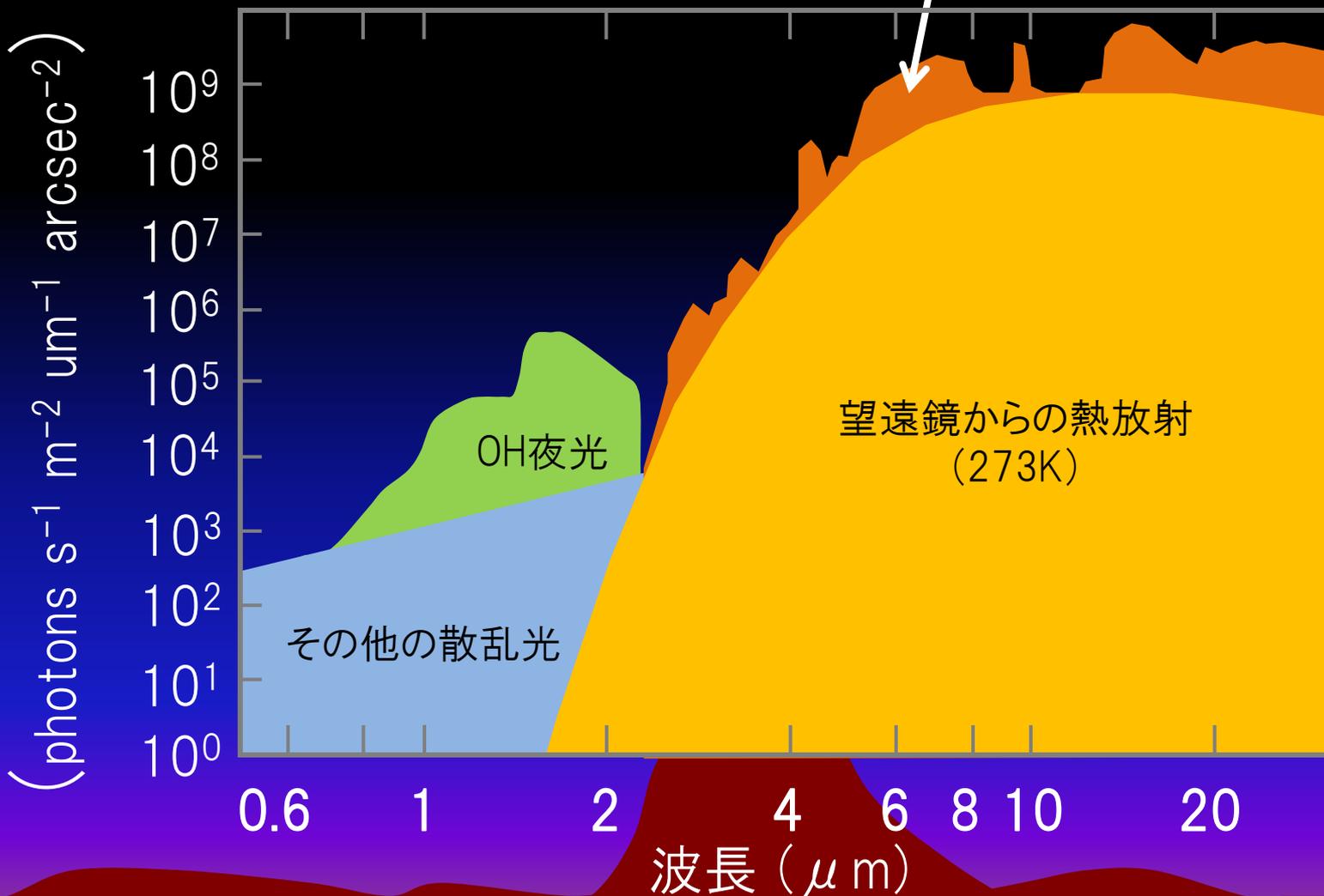
望遠鏡からの熱放射  
(273K)

OH夜光

その他の散乱光

0.6 1 2 4 6 8 10 20

波長 ( $\mu m$ )



# 大気シーイング

シーイングサイズ  $\propto \lambda^{-1/5}$

シーイングサイズ(可視光)

ハワイ・マウナケア山	0.6秒角
岡山観測所	1.5秒角
東京	2.0秒角

成層圏

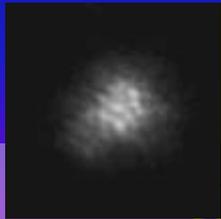
高度10,000m



ジェット気流

対流圏

ゆらいだ像

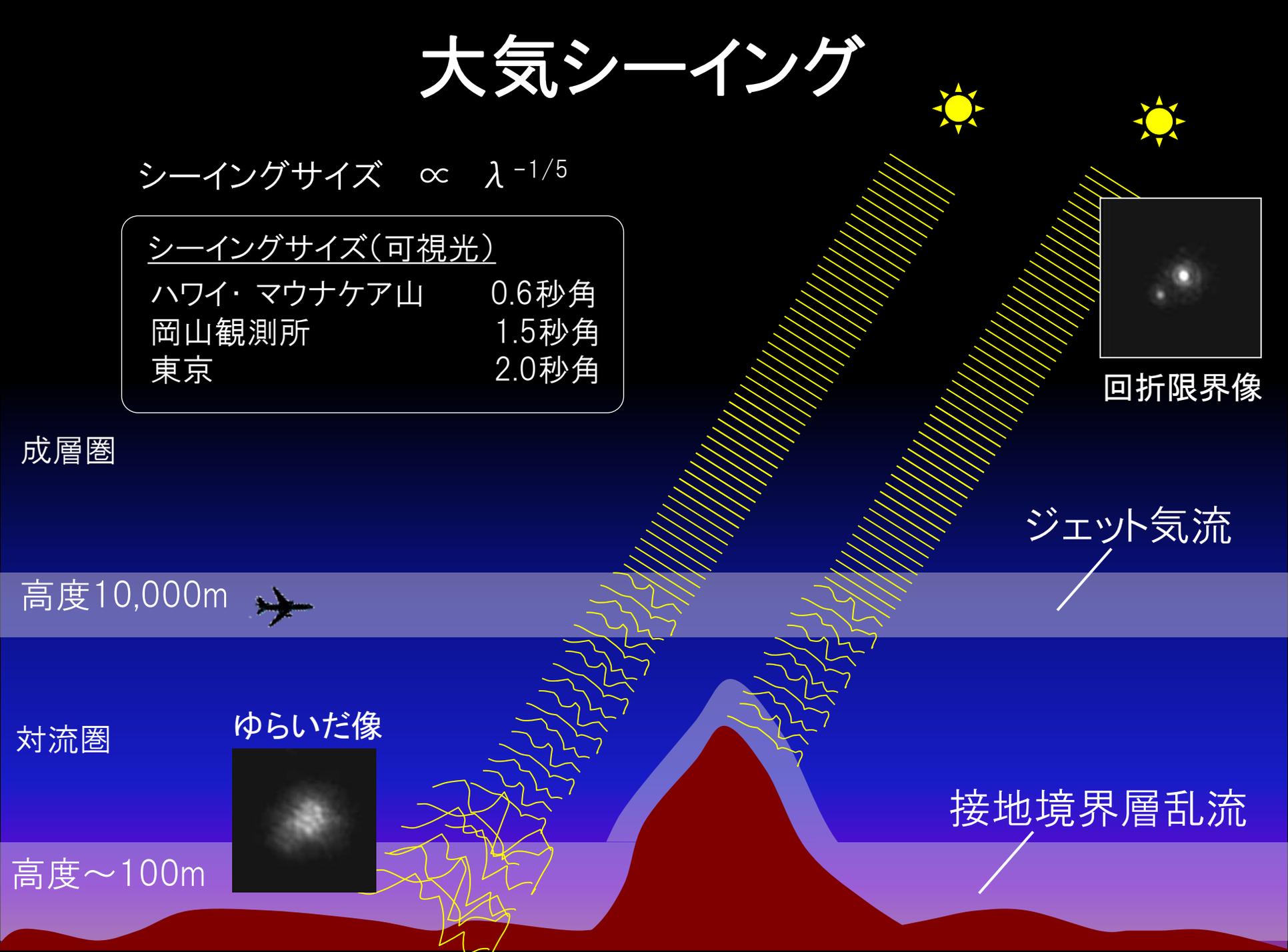


高度~100m

接地境界層乱流



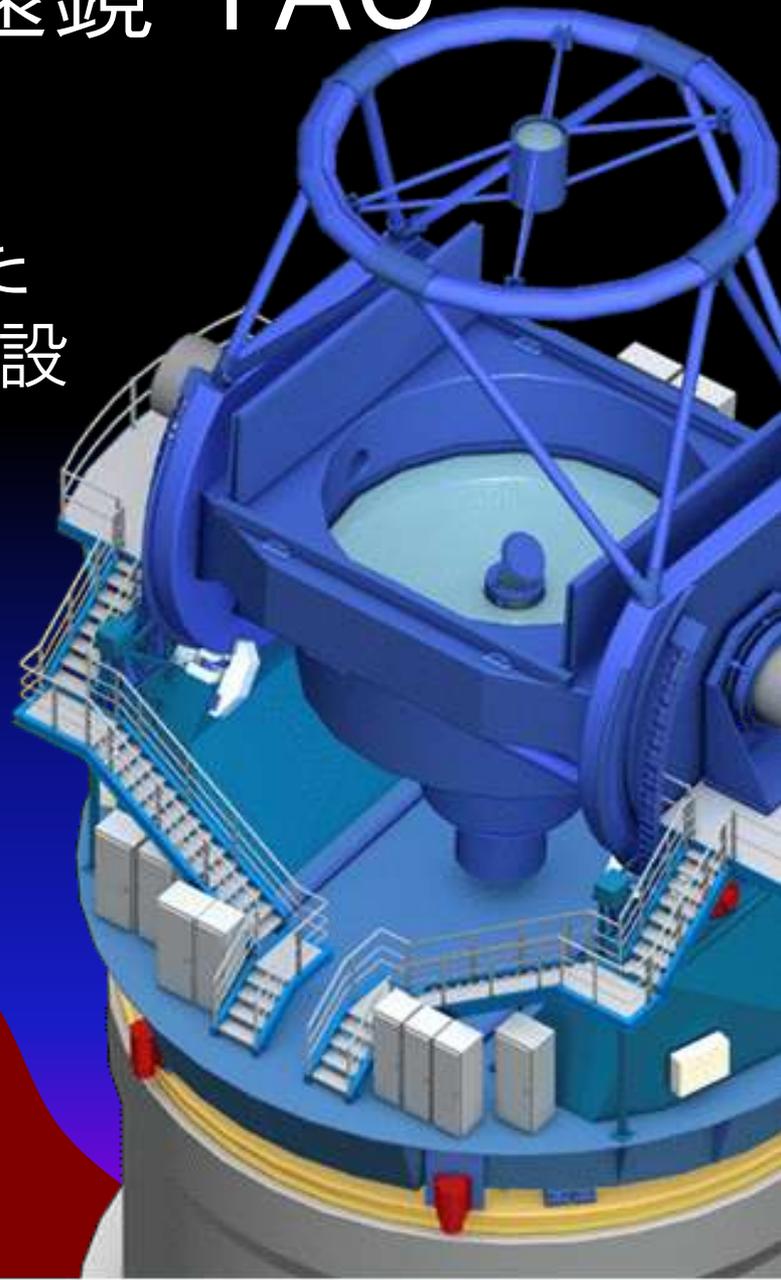
回折限界像



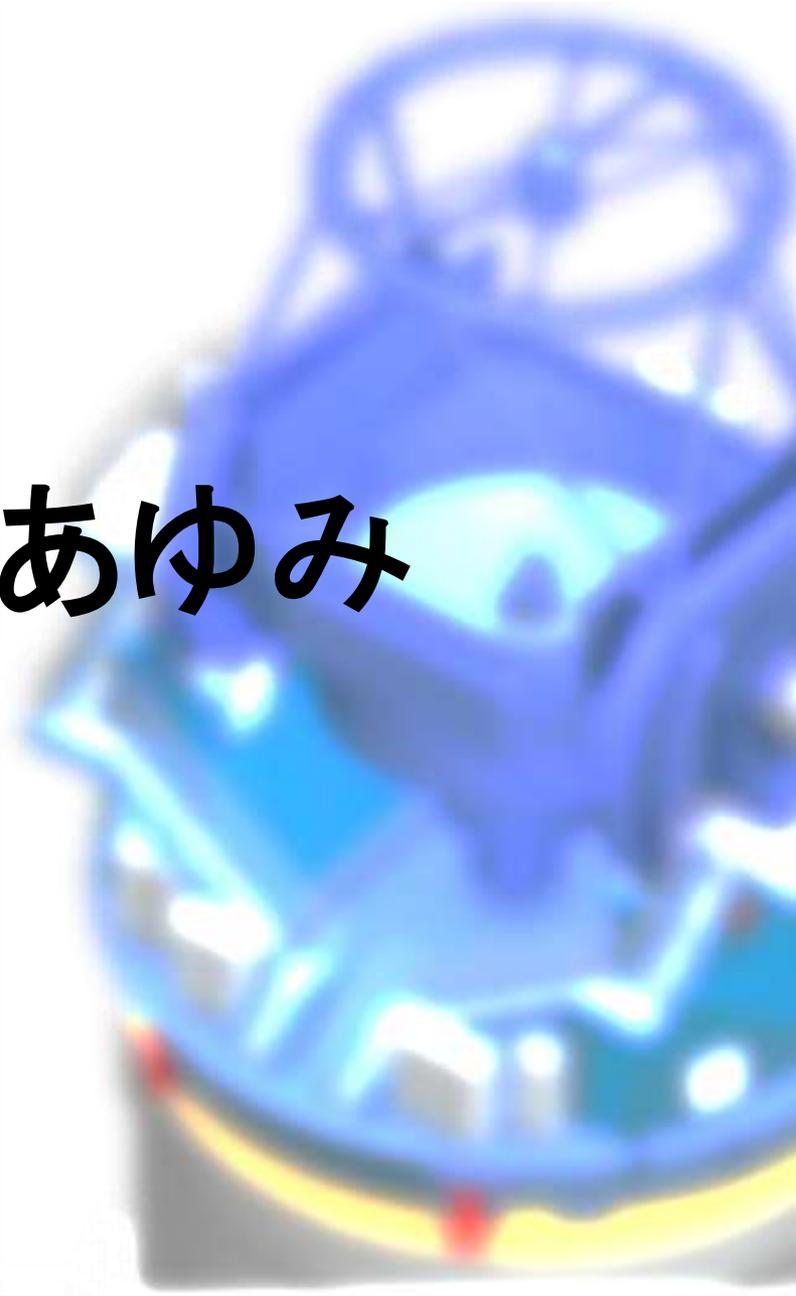
# 高感度赤外線望遠鏡 TAO

地球上で最も赤外線観測に適した  
サイトに、大型赤外線望遠鏡を建設  
する計画

チリ共和国 アタカマ高地  
チャナントール山 標高5,640m

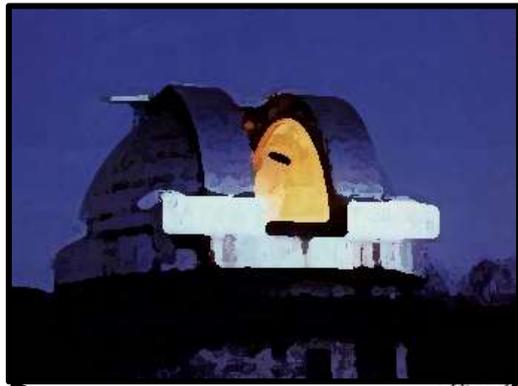


# TAO計画のあゆみ



# 東京大学 天文学教育研究センター

木曾観測所（長野県木曾町）



諸隈講演

東京大学アタカマ天文台  
TAO（チリ共和国）



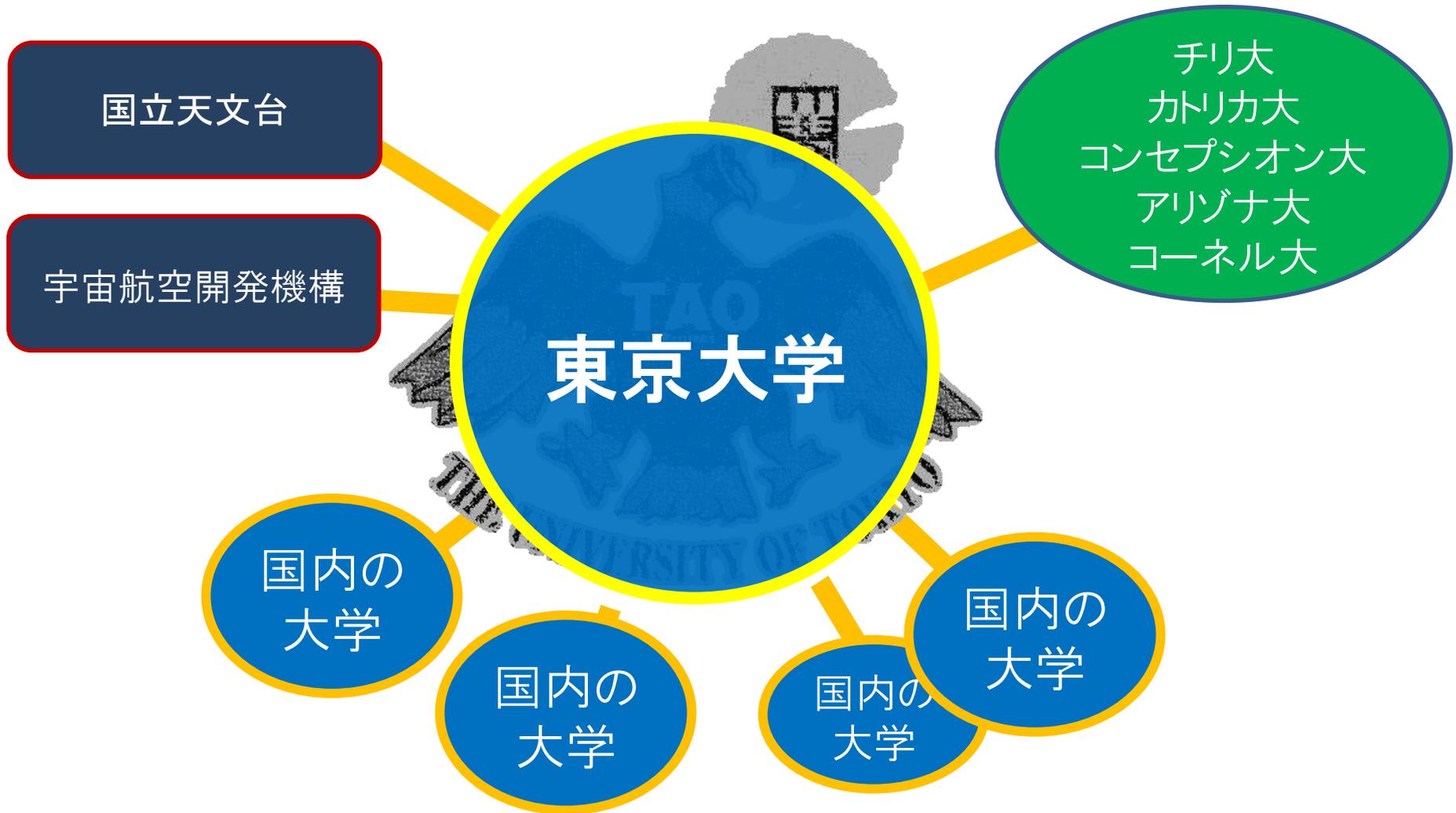
本部（東京都三鷹市）

# 東大天文センターのTAOメンバ

- 教授(3名) 吉井 (P.I.、センター長)、土居、河野
- 准教授(4名) 川良、田中、宮田、本原
- 助教(6名) 田辺、峰崎、酒向、諸隈、田村、小西
- 研究員(5名) 高橋、越田、上塚、松永、三戸
- 技術職員(4名) 青木、征矢野、樽沢、加藤
- 大学院生(>5名) 中村、浅野、内山、舘内、岡田 …

敬称略

# TAO計画の推進体制

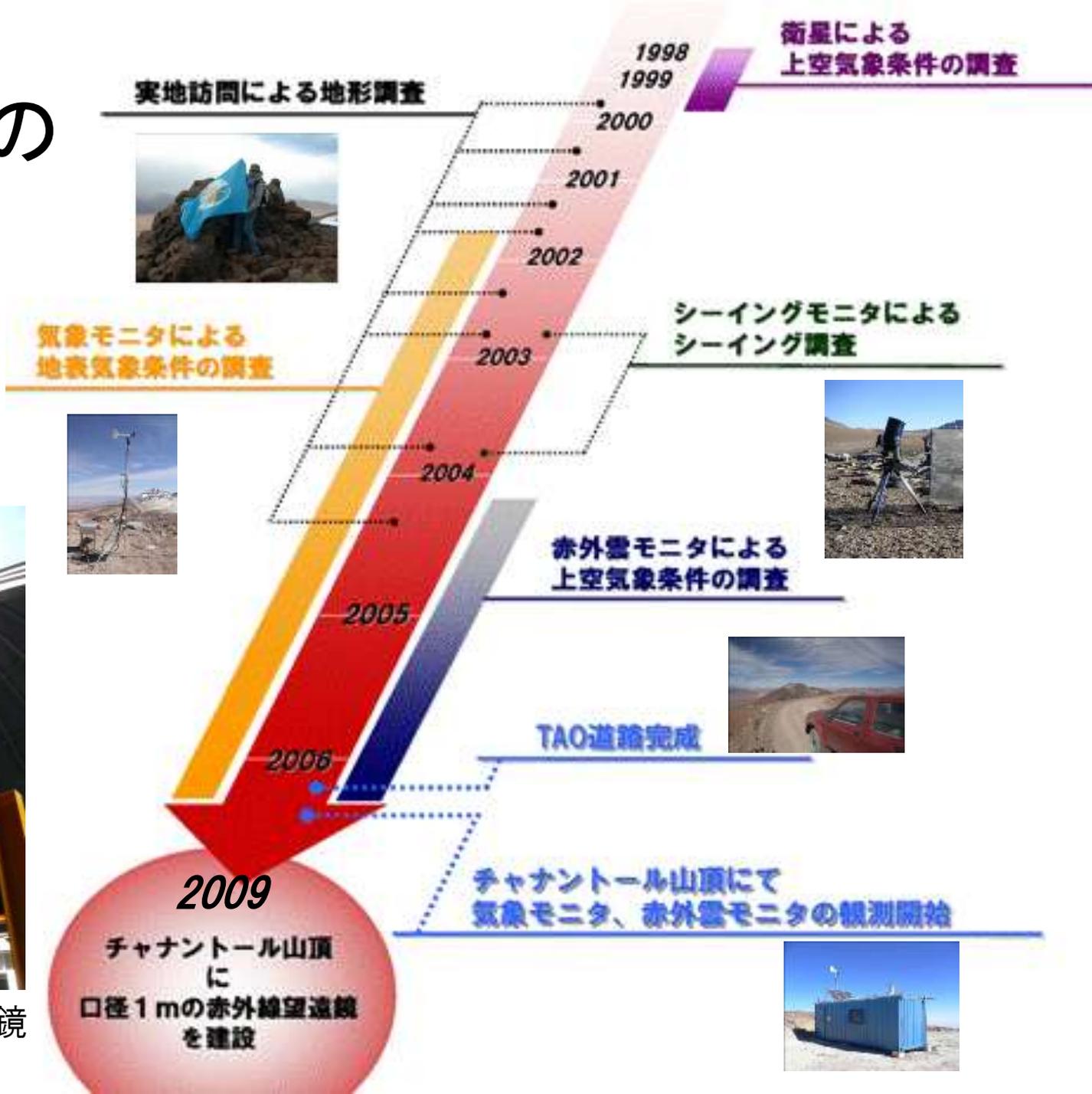


## 大学主体の体制

# TAO計画の 歩み



口径1m miniTAO望遠鏡





The images are from Google Earth and Google Map

世界で最も乾燥した町

# サンペドロ・デ・アタカマ

TAO計画のベースキャンプ



年間降水量は10mm



**ÁREA DE INTERÉS**  
**PROHIBIDO EL INGRESO SIN PERMISO**  
PROYECTO

Solicitar anticipadamente autorización  
To obtain an entrance permit, please contact...

Tránsito riesgoso para la salud sin equipo  
y asistencia médica en caso de accidente.  
Access to the site without adequate equipment  
difficult to provide medical aid and rescue.

Prohibido cazar, capturar especies, o generar  
Hunting animals in the area is strictly forbidden.

Prohibido destruir o afectar patrimonio cultural  
It is forbidden to destroy or harm the cultural heritage.

2002

Reached the Summit of Mt. Chajnantor

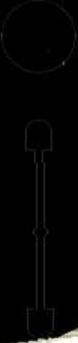


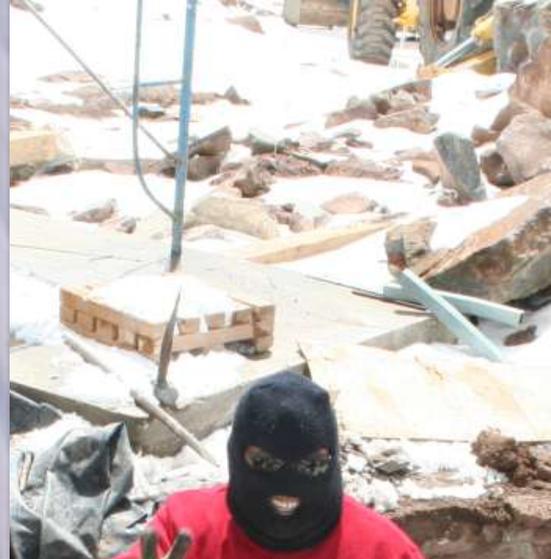
2006



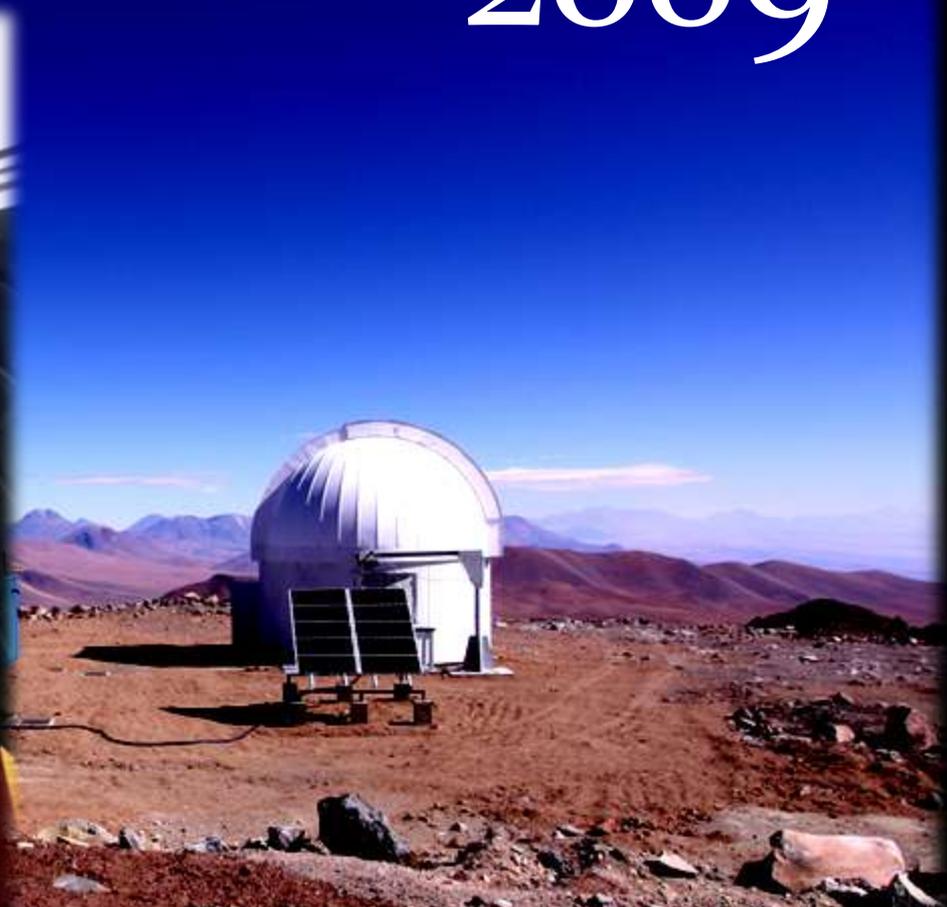
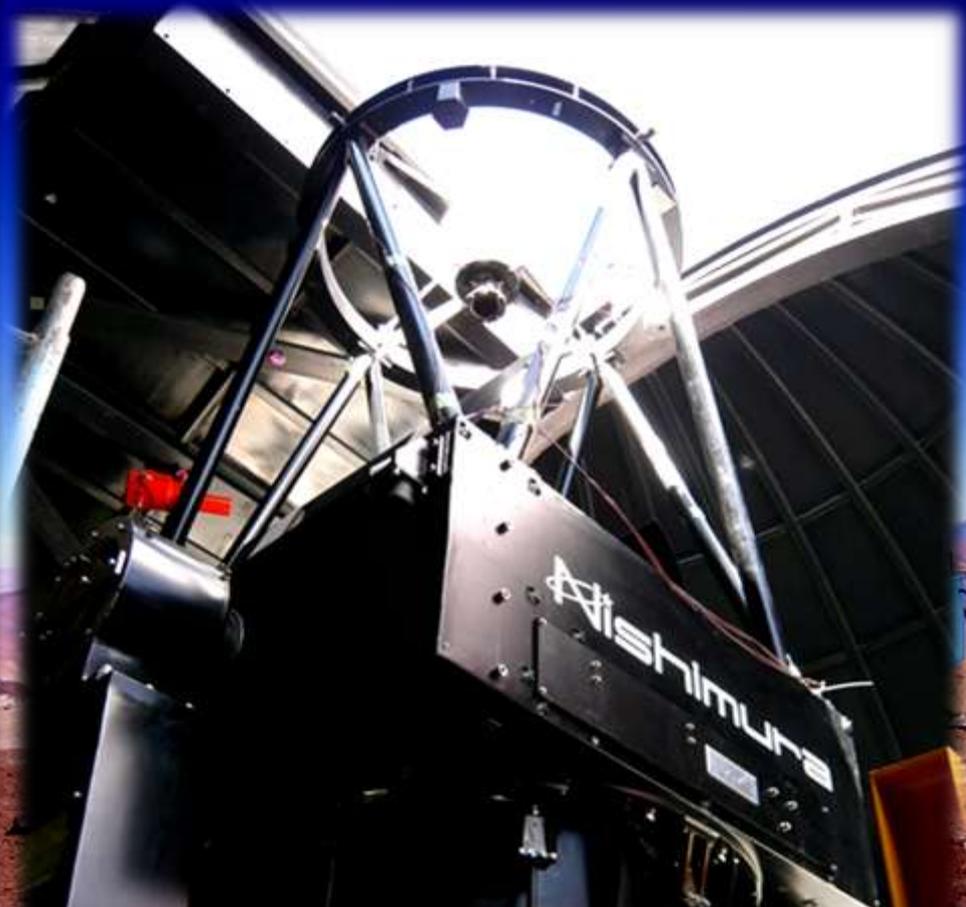
# Road to the TAO

5.7 km to the summit





2009



In prior to the 6.5-m TAO telescope,

Completion of the 1.0-m miniTAO

2009年、  
miniTAO望遠鏡は、  
ギネスブックに  
「世界最高所の望遠鏡」  
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



© GUINNESS WORLD RECORDS LIMITED 2009. THIS CERTIFICATE CANNOT BE REPRODUCED WITHOUT EXPRESS WRITTEN PERMISSION BY GUINNESS WORLD RECORDS LIMITED. ALL RIGHTS RESERVED. THE NAME GUINNESS WORLD RECORDS LIMITED AND ANY OF ITS SERVICES ARE TRADEMARKS OF GUINNESS WORLD RECORDS LIMITED. www.guinnessworldrecords.com

# miniTAOの開所式

# 記念切手を発行

2010年7月7日

チリ共和国サンティアゴにて

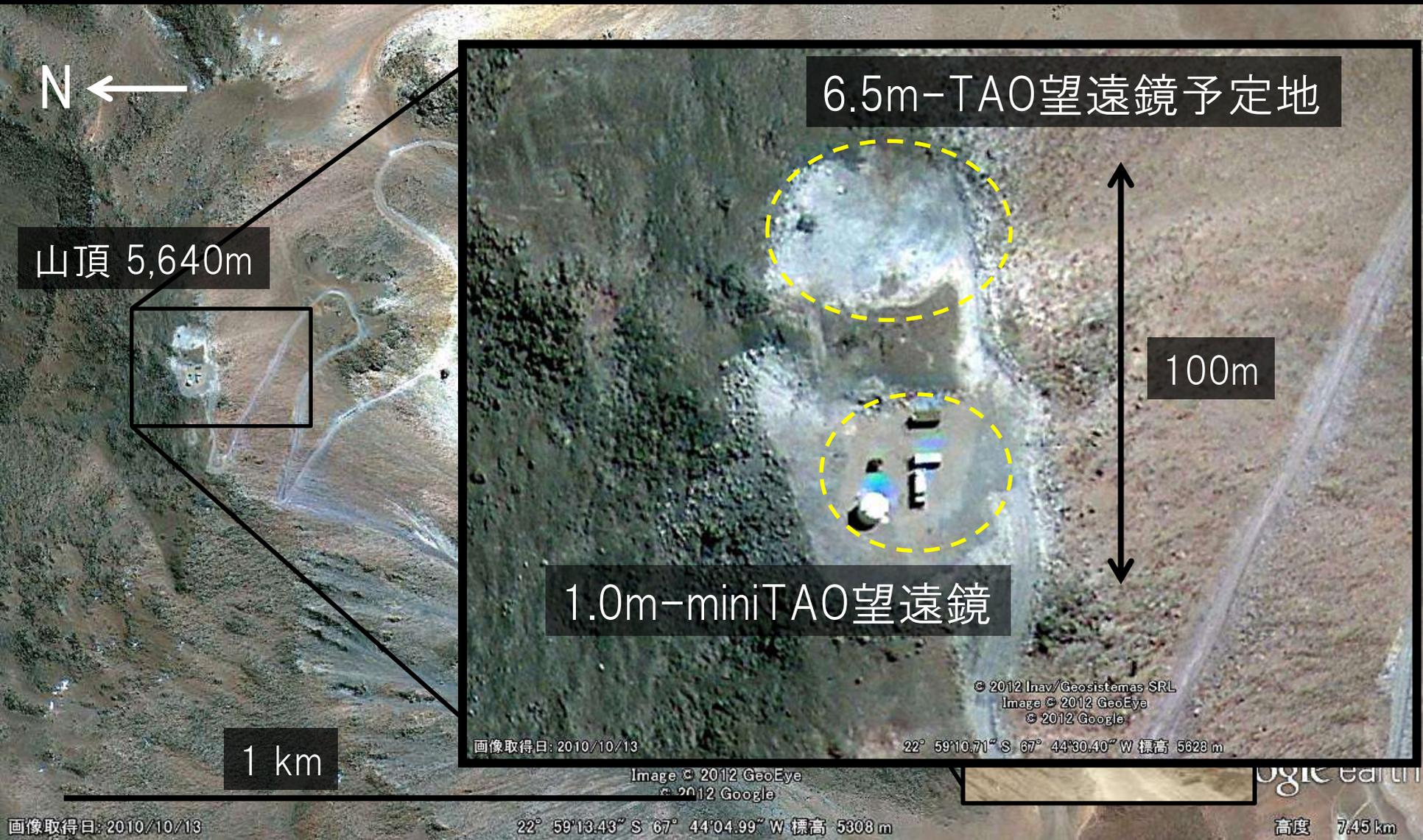
東京大学、チリ科学省、外務省、在チリ日本  
大使館、各種企業関係者（参加者 約140名）



# miniTAOの今



# チャナントール山 標高5,640m



N ←

山頂 5,640m

1 km

6.5m-TAO望遠鏡予定地

100m

1.0m-miniTAO望遠鏡

© 2012 Inav/Geosistemas SRL  
Image © 2012 GeoEye  
© 2012 Google

画像取得日: 2010/10/13

22° 59'10.71" S 67° 44'30.40" W 標高 5628 m

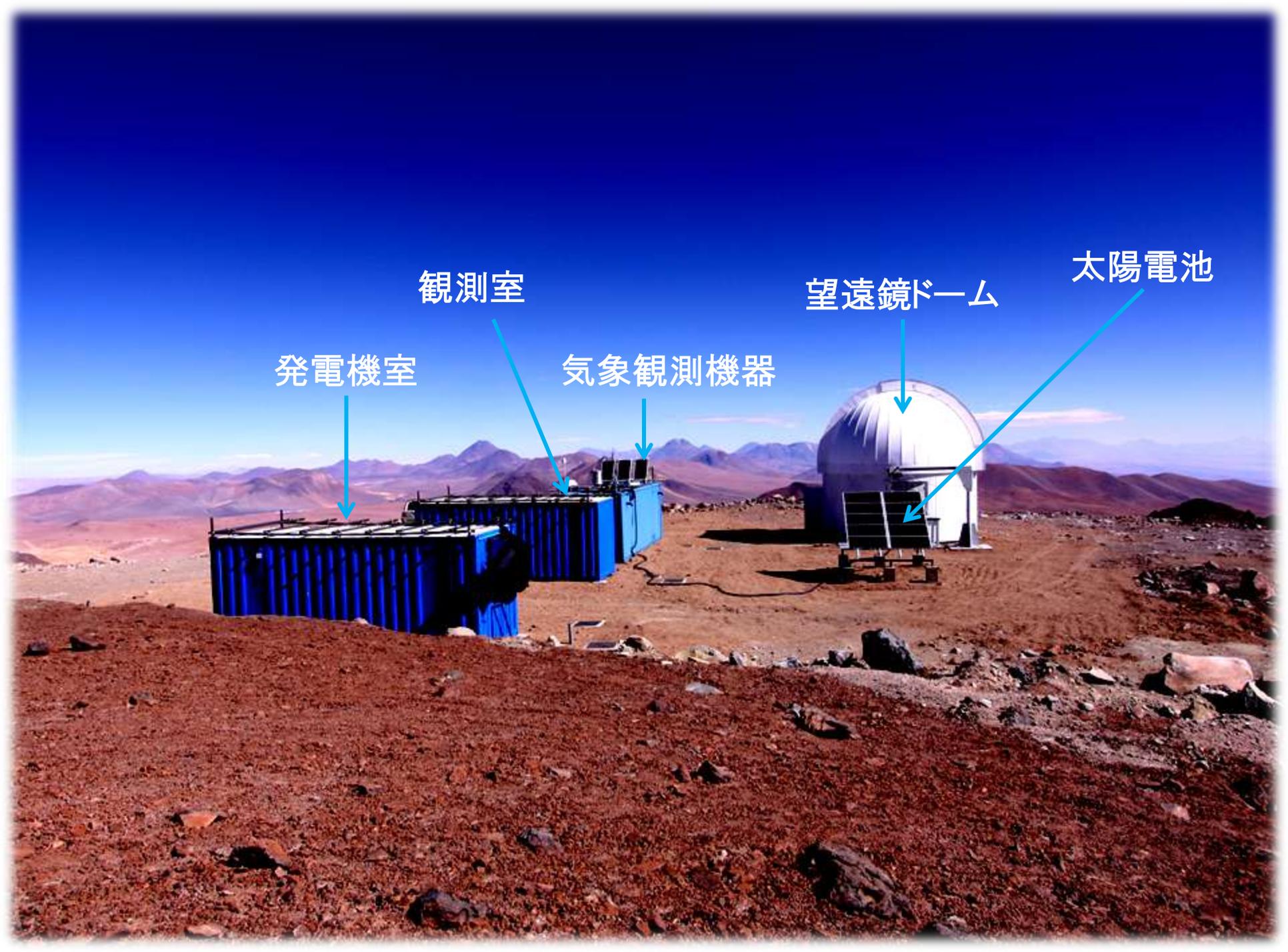
Image © 2012 GeoEye  
© 2012 Google

22° 59'13.43" S 67° 44'04.99" W 標高 5308 m

Google Earth

高度 7.45 km

画像取得日: 2010/10/13



発電機室

観測室

気象観測機器

望遠鏡ドーム

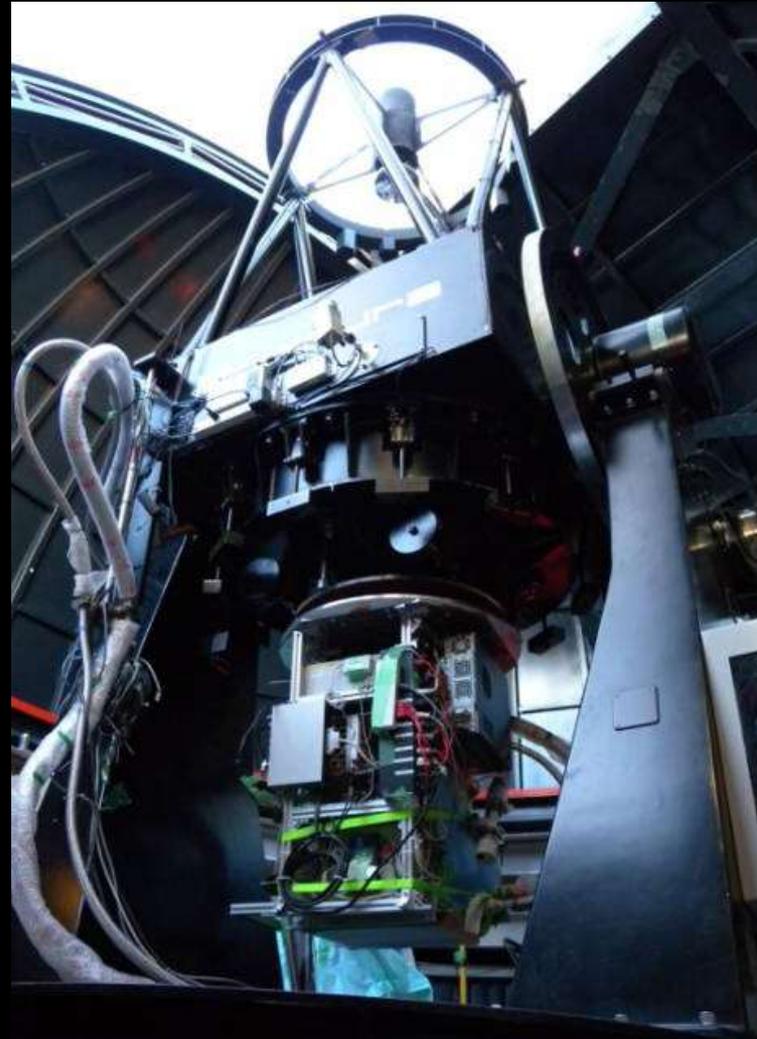
太陽電池

日が沈むと、



# miniTAO望遠鏡

- TAOに向けた科学的、技術的試験望遠鏡
- 口径1.0m
- リッチークレチアン光学系
- 視野  $\phi 10'$  , F/12
- 観測装置
  - 近赤外線装置 **ANIR**  
(小西講演)
  - 中間赤外線装置 **MAX38**  
(浅野講演)
- 突発天体、太陽系内天体にも対応



# 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
- 燃烧式トイレ、水道なし
- インターネット完備

息苦しい 夜は8時間 頭痛がする  
眠い お肌カサカサ お腹が痛い  
早く帰りたい 狭い 寒い 足がむくむ

本当は曇ればよいと思っている

酸素常時吸入

ポテトチップスを食べすぎる



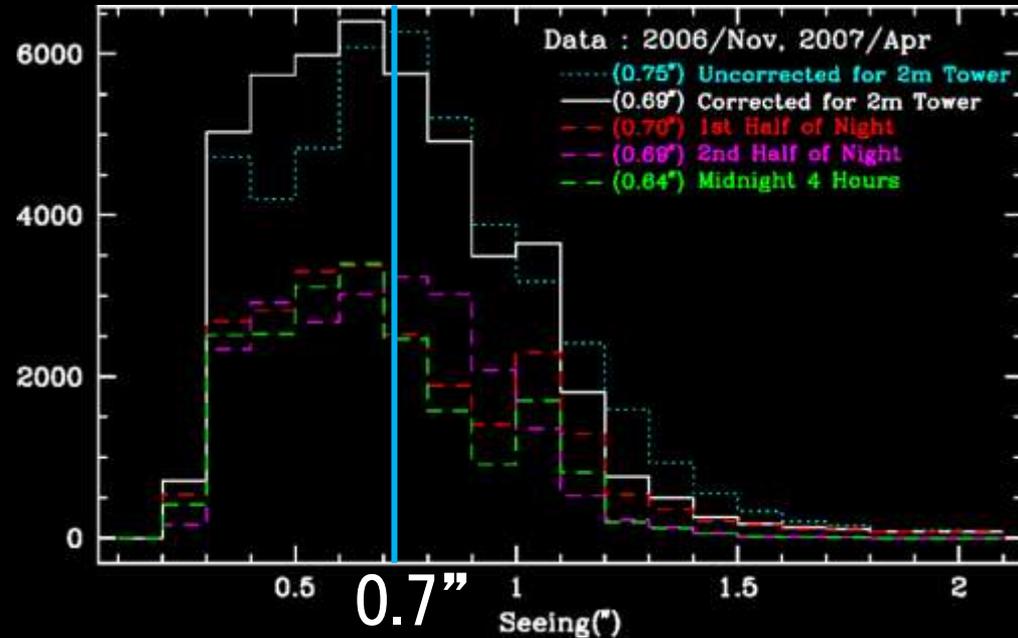
ドームスリットを  
開けると、



# サイト調査の結果



- 気温  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  —  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 晴天率 82% (測光夜63%)
- 可降水量 (PWV) 0.5-0.25mm
- 風速 10 m/s (typ.)
- シーイング  $0.69''$  (median, 可視)



可視シーイングサイズ測定結果

Motohara+ 2008, Miyata+ 2008

世界で最も赤外線観測に適したサイトの1つと言える

# 高山による問題

## 高山症状

- 集中力低下、体力の消耗
- イライラする。すぐに喧嘩。

- ⇒ ・ 酸素吸入を義務化  
(標高～4,000mまで回復)
- ・ 山頂作業は4人、車2台以上で
  - ・ 山頂滞在は8時間まで

## ハードウェア障害

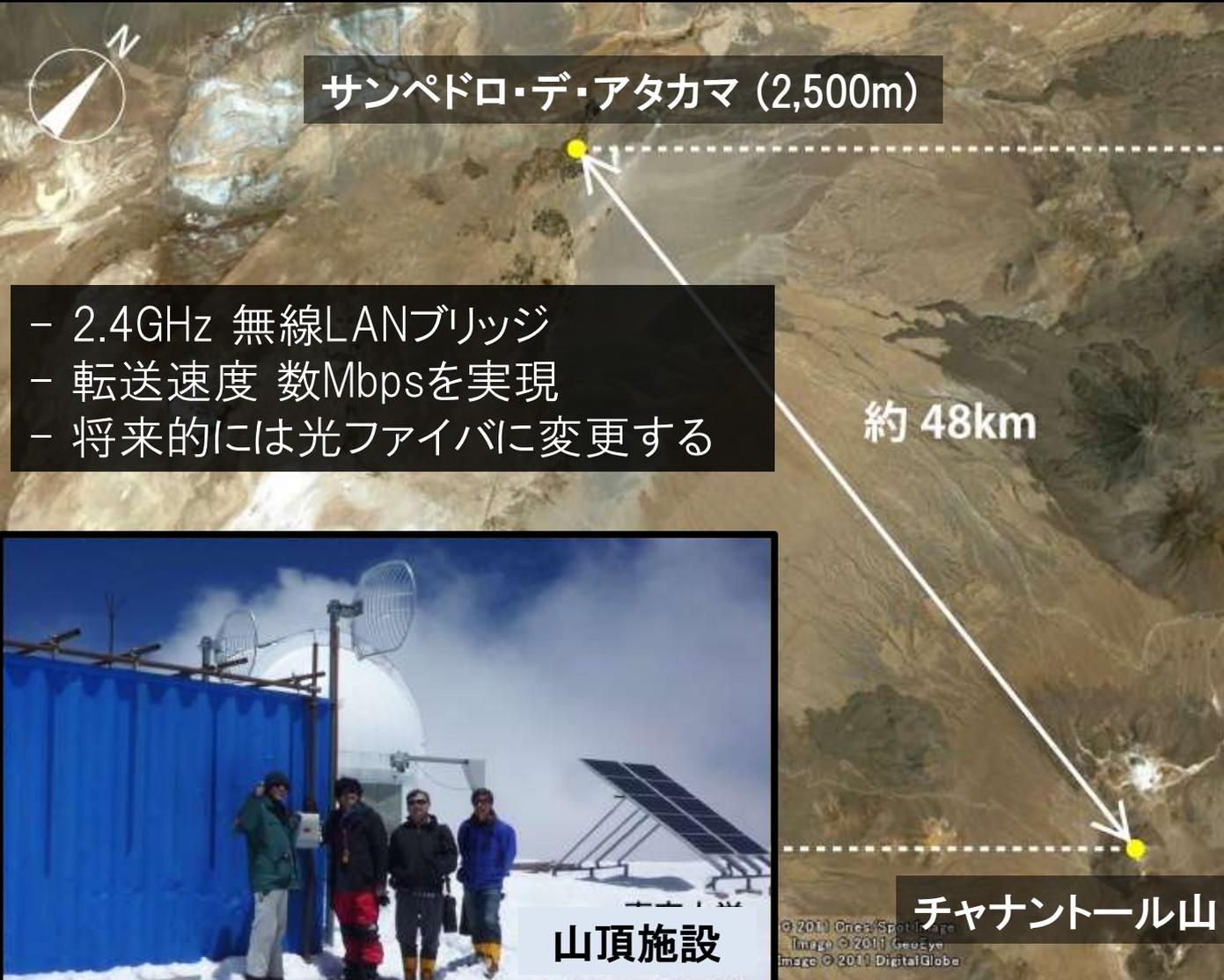
- HDDの機械的クラッシュ  
⇒ SSDに変更
- 空気への放熱効率の低下(熱暴走)
- 低温、強い紫外線

## 往復4時間の運転



# 山頂とサンペドロを無線LANで接続

2011年6月



サンペドロ・デ・アタカマ (2,500m)

- 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する

約 48km

チャナントール山 (5,640m)

サンペドロの山麓施設



山頂施設

© 2011 GeoEye  
Image © 2011 GeoEye  
Image © 2011 DigitalGlobe

© 2010 Google

# サンペドロ仮山麓施設



1.0m-miniTAO用山麓施設  
遠隔観測を行う



山麓から見たminiTAO



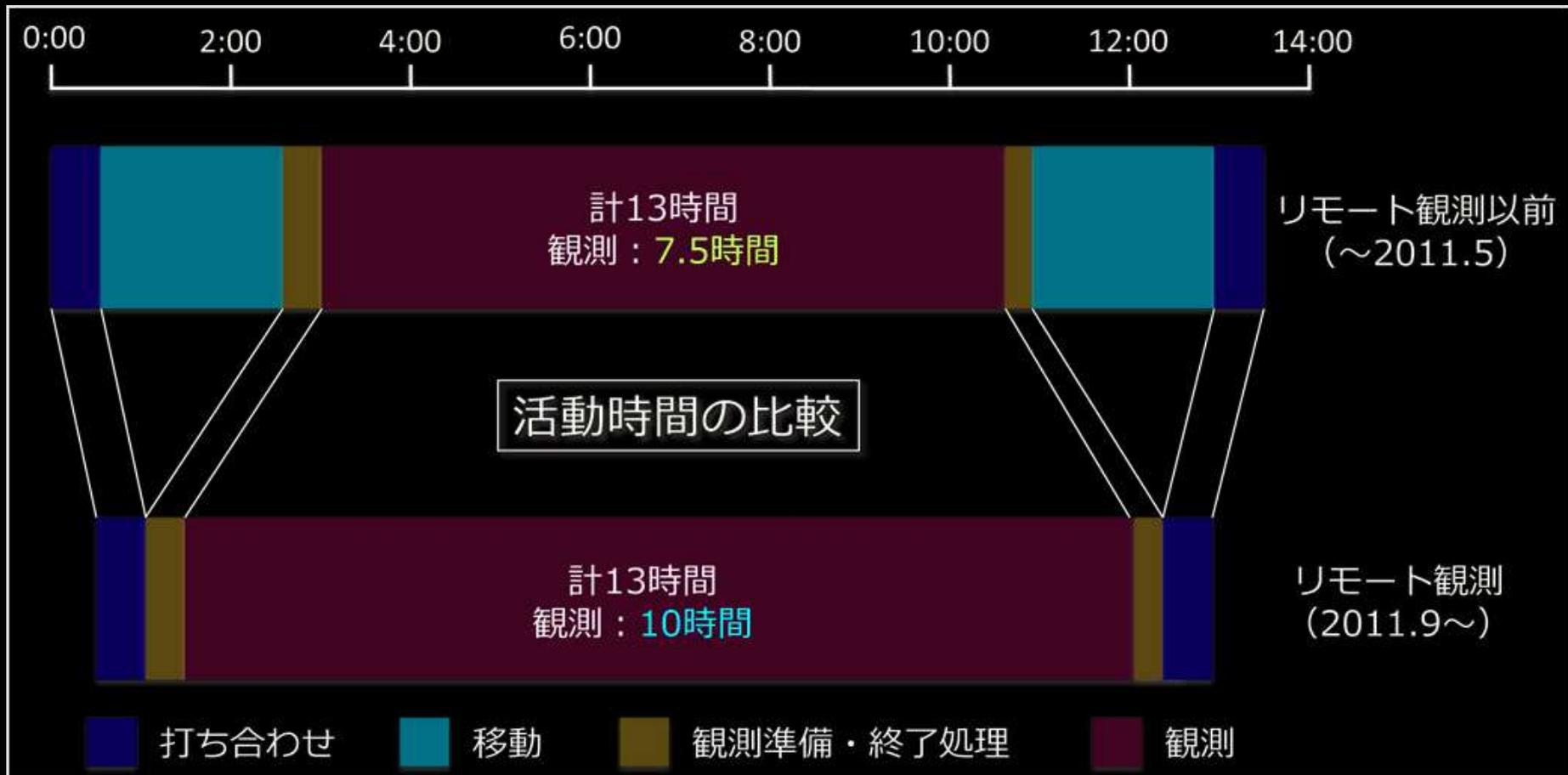
無線LANアンテナ



6.5m-TAO用山麓施設 建設予定地

# 山麓からの遠隔観測の効果

2011年6月より開始



# 最近2年間のアタカマでの活動

## 2010年

- ・ 5-6月 (2か月) 観測 スタッフ + PD 5人, 大学院生 3人  
うち、組織的若手派遣 2人(2か月以上)  
4人(2か月未満)
- ・ 7月7日 開所式
- ・ 9-10月 (2か月) 観測 スタッフ + PD 7人, 大学院生 3人  
うち、組織的若手派遣 2人(2か月以上)  
3人(2か月未満)

## 2011年

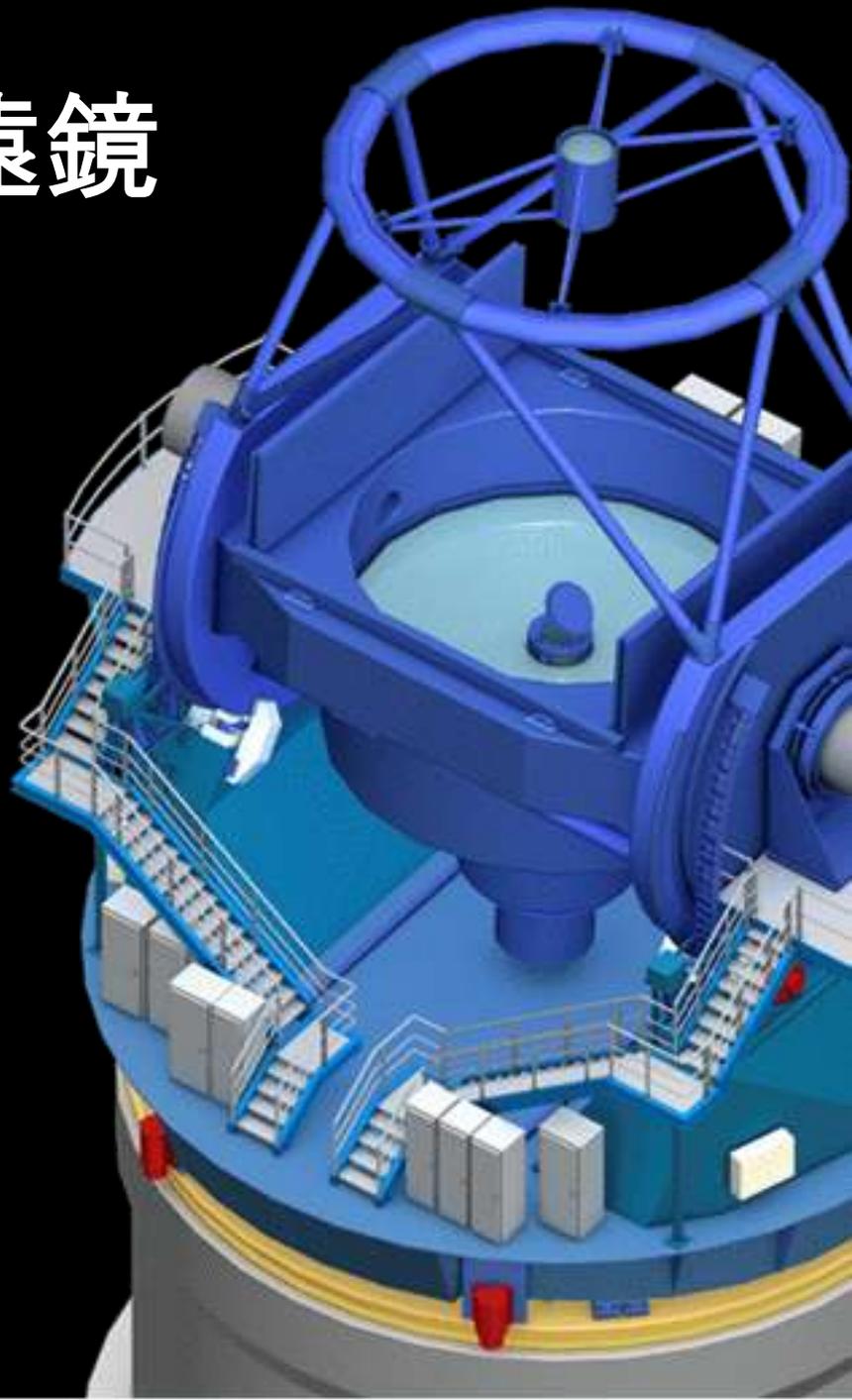
- ・ 2月 (1週間) 整備 スタッフ 2人
- ・ 4-6月 (2か月) 観測 スタッフ + PD 8人, 大学院生 5人  
うち、組織的若手派遣 2人(2か月以上)  
5人(2か月未満)
- ・ 9-11月 (2か月) 観測 スタッフ + PD 10人, 大学院生 6人  
うち、組織的若手派遣 2人(2か月以上)  
5人(2か月未満)
- ・ 12-1月 (2か月) 整備 組織的若手派遣 1人(2か月以上)

**mini-TAOからTAOへ**



# 6.5m-TAO望遠鏡

- 口径6.5m
  - Magellan 6.5m (チリ)がモデル
  - EIE (イタリア)で初期検討
  - 国内企業で本検討開始
- 光学パラメータ
  - 口径6.5m, 赤外線仕様
  - F/12.2, Ritchey-Chretien光学系
  - 基本的にすばる望遠鏡と同じ
  - **視野  $\phi 25'$**
- 3焦点
  - ナスミス 赤外
  - ナスミス 可視
  - カセグレン中間赤外
- 予算措置後、6年間で建設



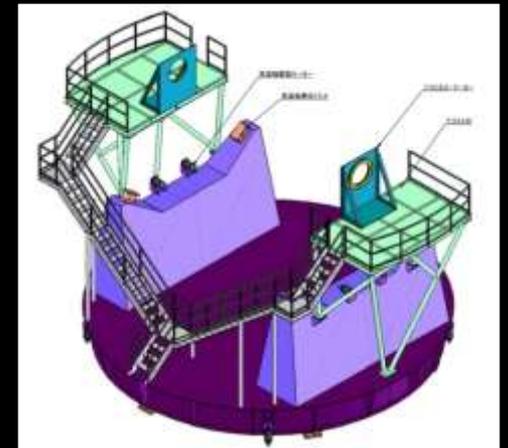
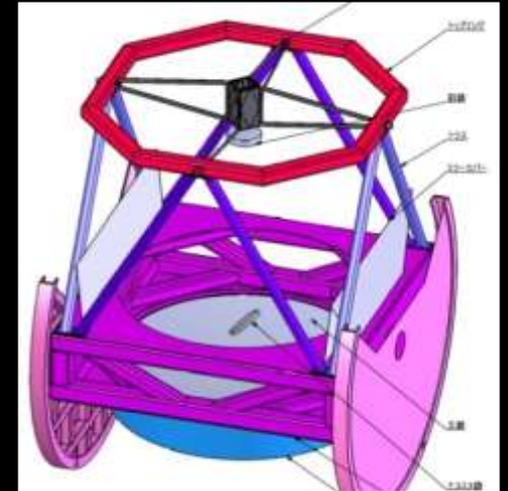
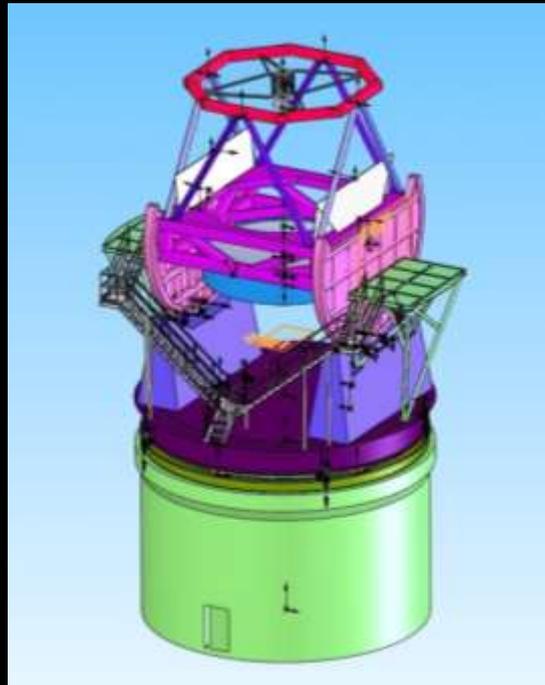
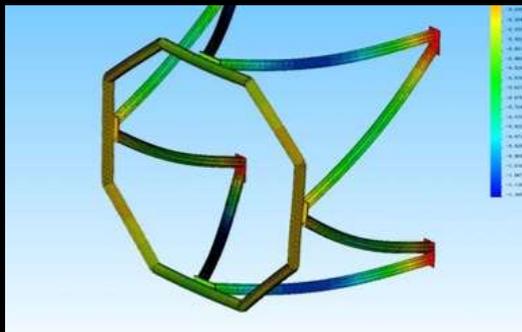
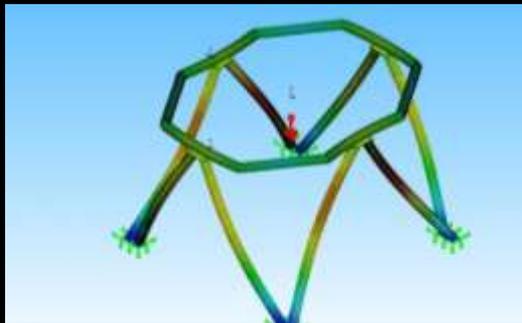
# 6.5m-TA0の設計検討

現在、シミュレーションによる設計検討を進めている。

基本パラメータ（サイズ、重量など）

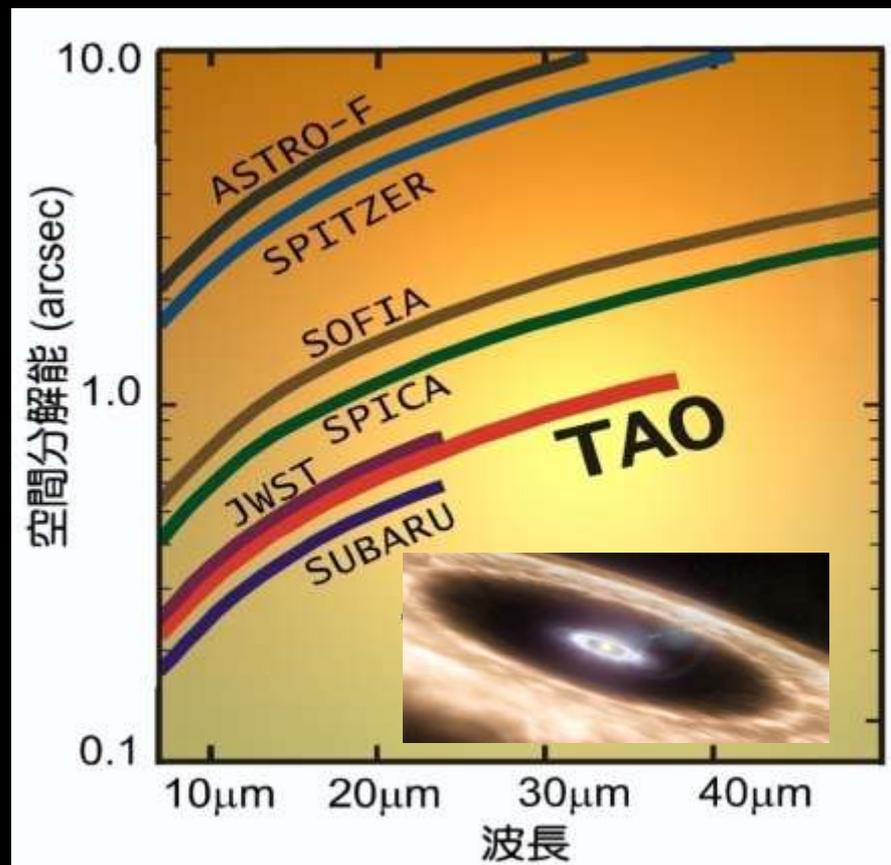
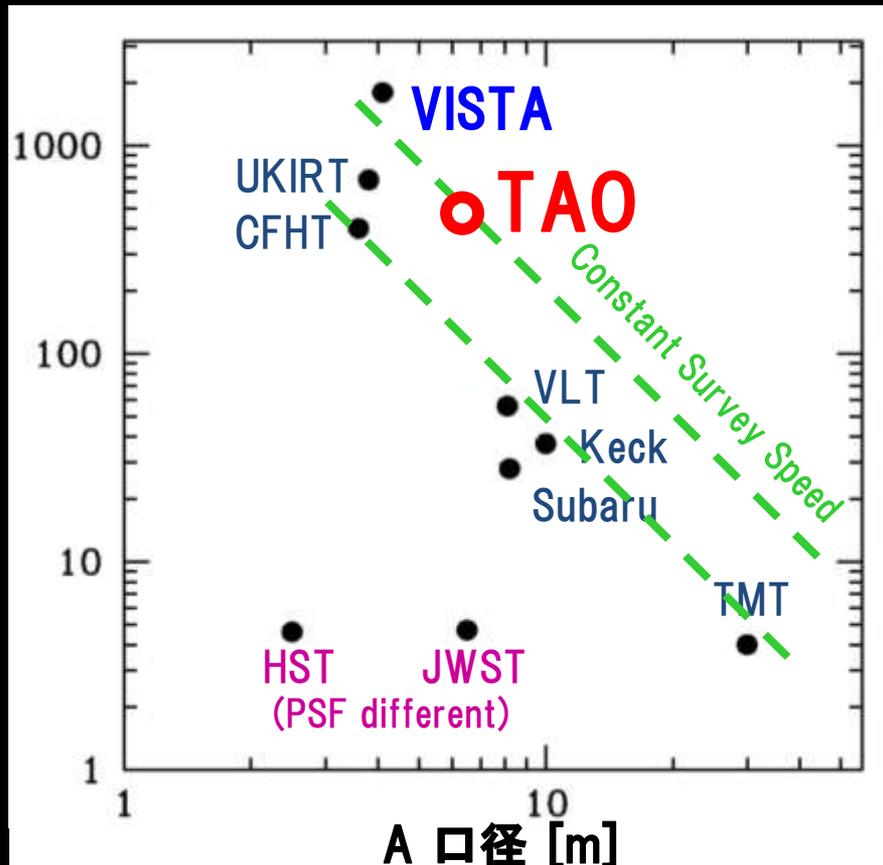
駆動機構の設計

FEM計算・・・



# 6.5m-TAOの科学的戦略

$\Omega$  視野面積 [arcmin<sup>2</sup>]



近赤外線: 広視野

中間赤外線: 高空間分解能

# 現在、2台の観測装置を開発中

近赤外線装置  
SWIMS



中間赤外線装置  
MIMIZUKU



# TAO装置開発用の新実験棟



東京大学天文学教育研究センター(三鷹)の敷地内に、2011年3月に完成

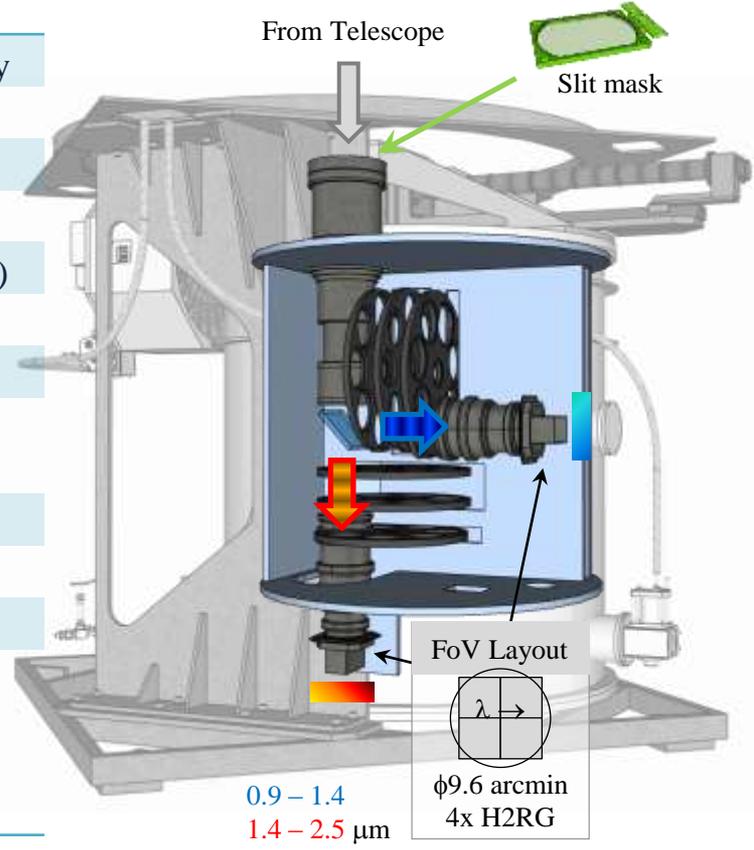
# 近赤外線広視野多天体分光器

## Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph

広視野 + 近赤外線 2色同時観測 + 多天体分光ユニット

### Specifications of SWIMS

Observation Mode	Imaging and multi-object spectroscopy
Dimensions, weight	2.0 x 2.0 x 2.0 m <sup>3</sup> , 2.5 tons
Field of View	$\phi 9.6$ arcmin
Spatial Resolution	0.12 arcsec/pixel
Wavelength Range	0.9-1.4 / 1.4-2.5 $\mu\text{m}$ (blue/red channel)
Detector	MCT 2k x 2k x 8
Filters (broad-band, narrow-band)	Y, J, H, K <sub>s</sub> , N129, N133, N1875, N195
Spectral Resolution	Blue : R ~ 700 – 1,000 Red : R ~ 500 – 900
Number of slit masks	~ 20 (including long slit masks)
MOS multiplicity	~ 30 objects/mask
Expected Total Throughput	Imaging: 31%, Spectroscopy: 20%
Expected limiting AB magnitudes	
Imaging (1hr, S/N=5)	Y=25.0, J=24.2, H=23.4, K <sub>s</sub> =23.7
Spectroscopy (1hr, S/N=5, R=1,000)	Y=23.3, J=22.4, H=22.2, K <sub>s</sub> =21.9

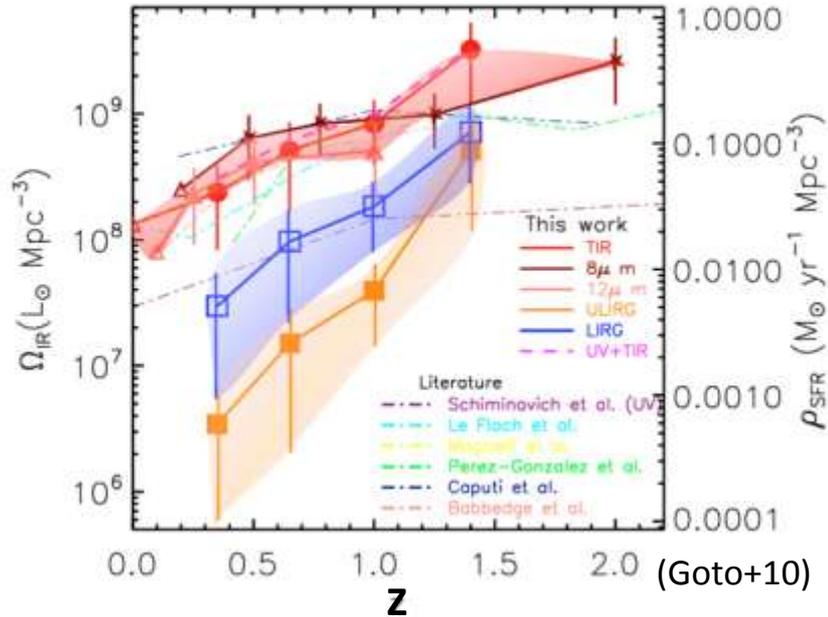


Wide-field image slicer-type IFU (~100arcsec<sup>2</sup>) in a conceptual design phase.

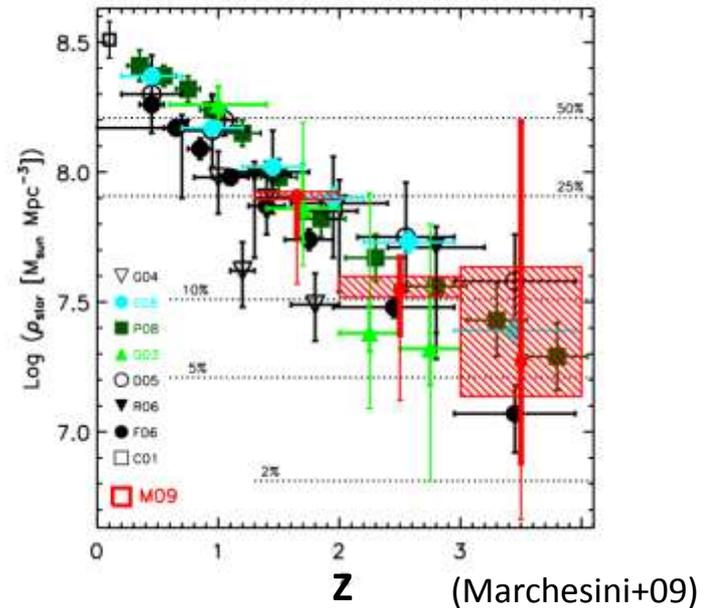
# Redshift $\sim 3-1$

*the era of dramatic galaxy evolution*

星形成率の歴史



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

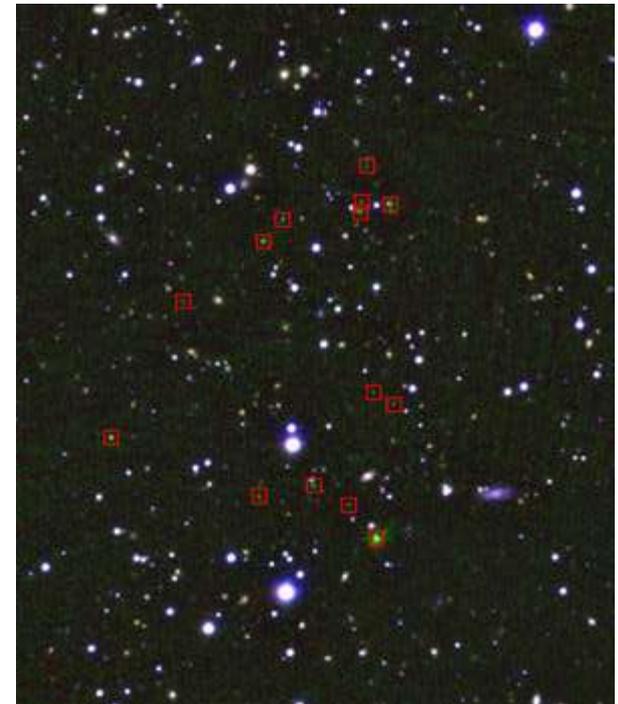
- $z \sim 1-3$ の包括的な銀河カタログの作成をおこなう

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



# 中間赤外線観測装置

# MIMIZUKU

Mid-Infrared Multifield Imager  
for gaZing the UnKown Universe

高解像度 + 30  $\mu$ m帯観測 + 高精度測光/分光観測

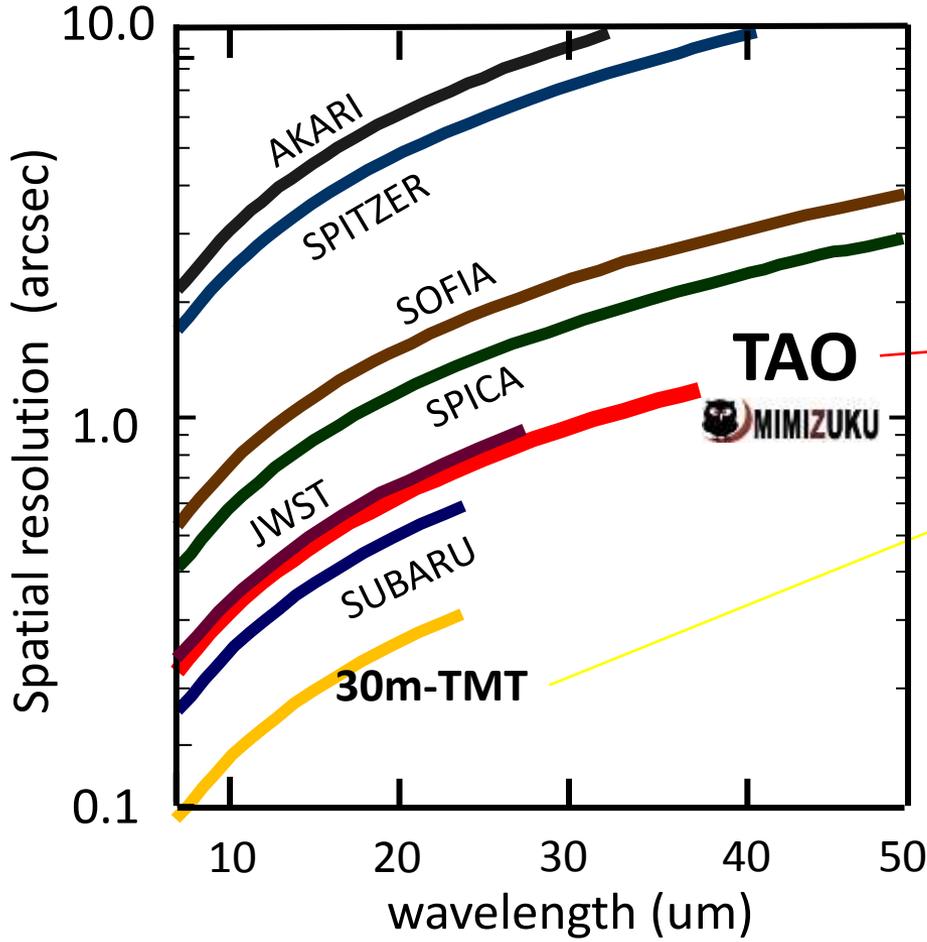
## Specifications of MIMIZUKU

Observation Mode	Imaging and spectroscopy
Dimensions, weight	2.0 x 2.0 x 2.0 m <sup>3</sup> , 2.3 tons
Channel / Wavelength coverage	NIRchannel : 2-6 $\mu$ m MIR-S channel: 6-26 $\mu$ m MIR-L channel: 26-38 $\mu$ m
Detector	InSb 1k / Si:As 1k / Si:Sb 1k
Field of View	2'x2' (normal mode) 1'x2' x2fields (w/ Field Stacker)
Spatial Resolution	0.3" @10 $\mu$ m / 1.0" @30 $\mu$ m
Spectral Resolution	R ~ 250 (N-band/Q-band/30 $\mu$ m-band)
1sig1sec Sensitivity	
Imaging (R~10)	30mJy@10 $\mu$ m/ 130mJy@20 $\mu$ m/ 0.5Jy @30 $\mu$ m
Spectroscopy (R~250)	150mJy@10 $\mu$ m/ 0.6Jy @20 $\mu$ m / 1.5Jy @ 30 $\mu$ m

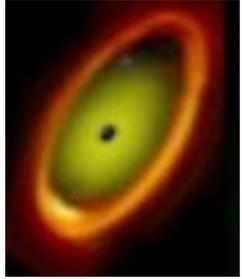
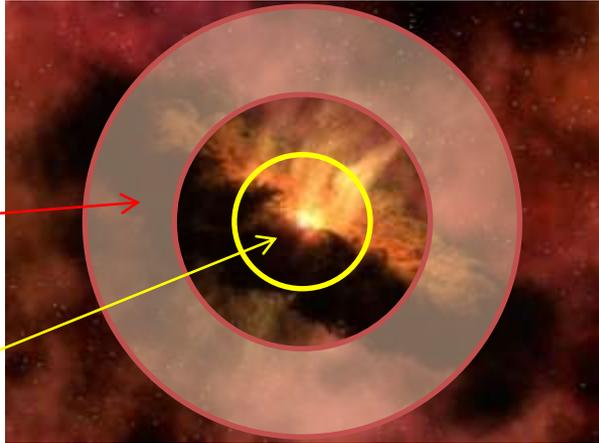


## 広い波長範囲に高解像度

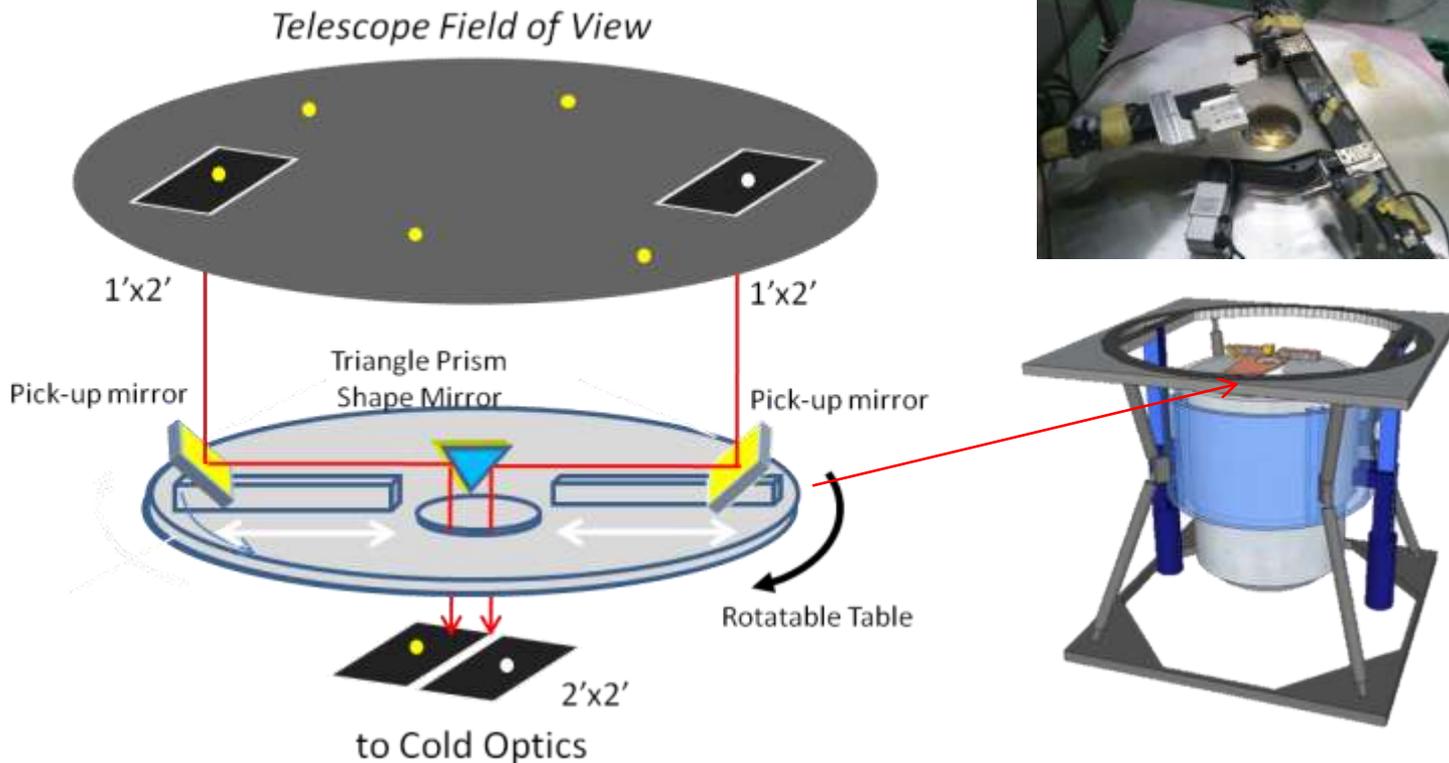
$\lambda = 10 \mu\text{m}$  @30m-TMT : 解像度0.1"  $\rightarrow$  hot/warm inner領域 < 10AU  
 $\lambda = 30 \mu\text{m}$  @6.5m-TAO : 解像度1.0"  $\rightarrow$  cold outer領域 < 100AU



原始惑星系円盤 d=100pc



2台のピックアップ鏡により、 $\phi 25'$  以内の任意の2視野を同時観測

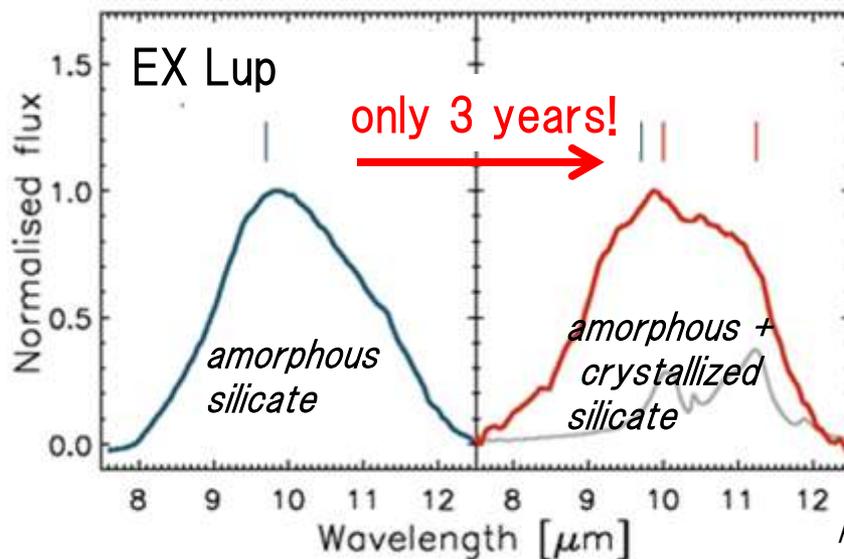


基準光源(天体)と同時に、目標天体を観測できる  
地球大気の変動の影響を除去

➔ 高精度の測光、分光観測を実現

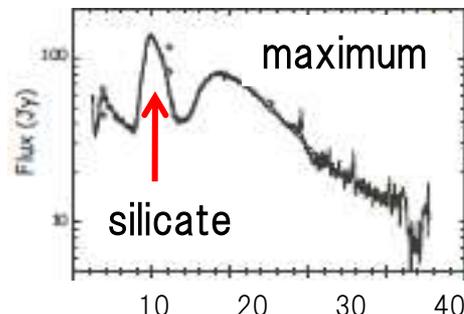
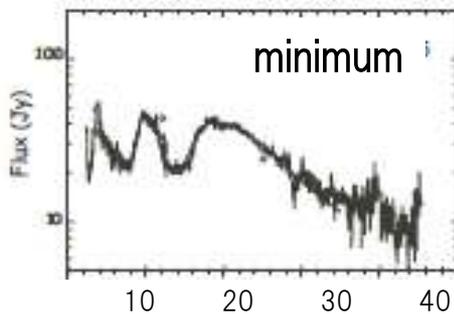
中間赤外線源の多くは短時間に変光しているようだ  
惑星やダストの起源への手がかり

✓ 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

Wavelength [um]

# チリのピニェラ(Piñera)大統領が日本を訪問

日本—  
(横浜、

TAO



東  
(京

TAO



President Piñera..., stating that the Tokyo Atacama Observatory (TAO) Project, a cooperation project in the field of astronomy, is well-received in Chile.

[http://www.mofa.go.jp/region/latin/chile/apec2010\\_sm.html](http://www.mofa.go.jp/region/latin/chile/apec2010_sm.html)

...ピニェラ大統領は、mini-TAO望遠鏡の完成は学術交流の象徴として高く評価しており、口径6.5メートルの大型赤外線望遠鏡の実現にはチリ政府においても大きな期待を抱いていると述べました。

[http://www.u-tokyo.ac.jp/public/archive2010\\_j.html](http://www.u-tokyo.ac.jp/public/archive2010_j.html)



# 本講演の内容

- 赤外線で宇宙を見る
- TAO計画のあゆみ
- miniTAOの今
- miniTAOからTAOへ

観測成果 ⇒ 近赤外線(小西)、  
中間赤外線(浅野)