

原始惑星系円盤におけるH₂O氷分布観測 と 30m望遠鏡計画への取り組み

本田充彦 (久留米大学)

Collaborators :

A.K. Inoue (Osaka Sangyo Univ.),

T. Kudo, M. Tamura, H. Terada,

N. Takato, M. Fukagawa (NAOJ)

T. Nakamoto (TITech),

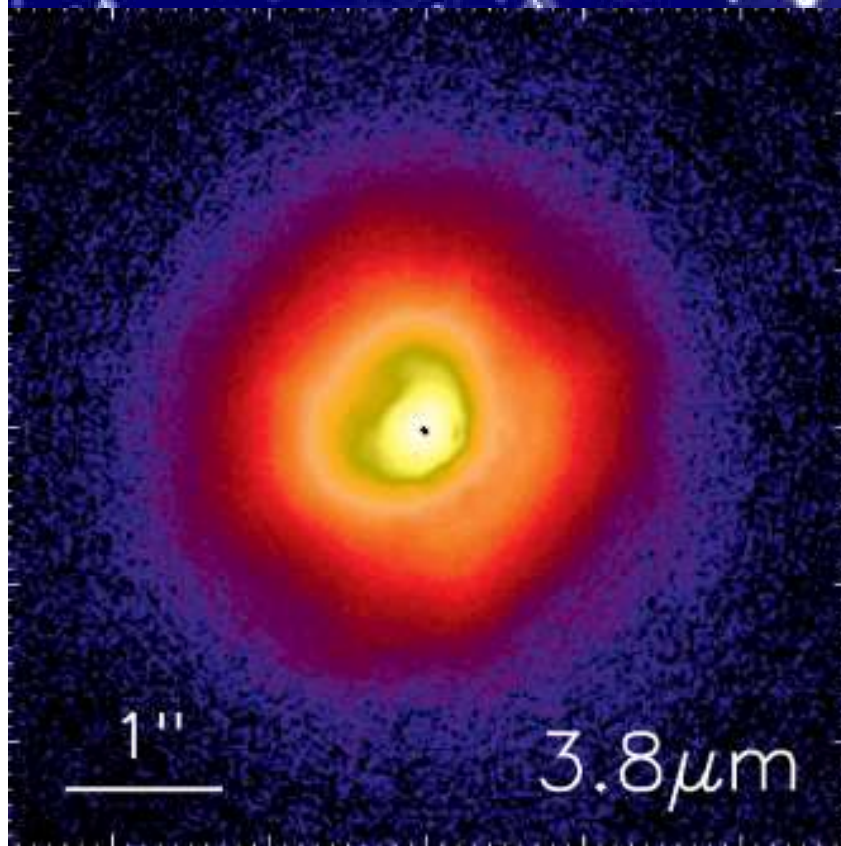
C. Packham (UTSA),

H. Kataza (ISAS/JAXA), Y.K. Okamoto

(Ibaraki U.), T. Miyata, K. Mori (UT),

et al.

せっかくなので、適宜質問お願いします。
途中で構いません。



Why I'm here ?

<http://www.subarutelescope.org/Observing/Proposals/Submit/policy.html>



Subaru Open Use Policy

1. Three Types of Open Use Program

There are three kinds of Open Use programs, depending on the requested telescope time

すばるTAC (すばるプログラム小委員会)



Members of the Time Allocation Committee

Chair: Masaru Kajisawa (Ehime University)

Members: Masayuki Akiyama (Tohoku University, High-z Galaxies)

Misato Fukagawa (NAOJ, Extrasolar Planets)

Mitsuhiko Honda (Kurume University, Star/Planet Formation and ISM)

Shinya Komugi (Kogakuin University, Nearby Galaxies)

Kei Kotake (Fukuoka University, Compact Object)

Kentaro Nagamine (Osaka University, Structure Formation and Cosmology)

Kouji Ohta (Kyoto University, General)

Youichi Ohya (ASIAA, AGN and Galaxies)

Toshiya Ueta (Denver University, Stars)

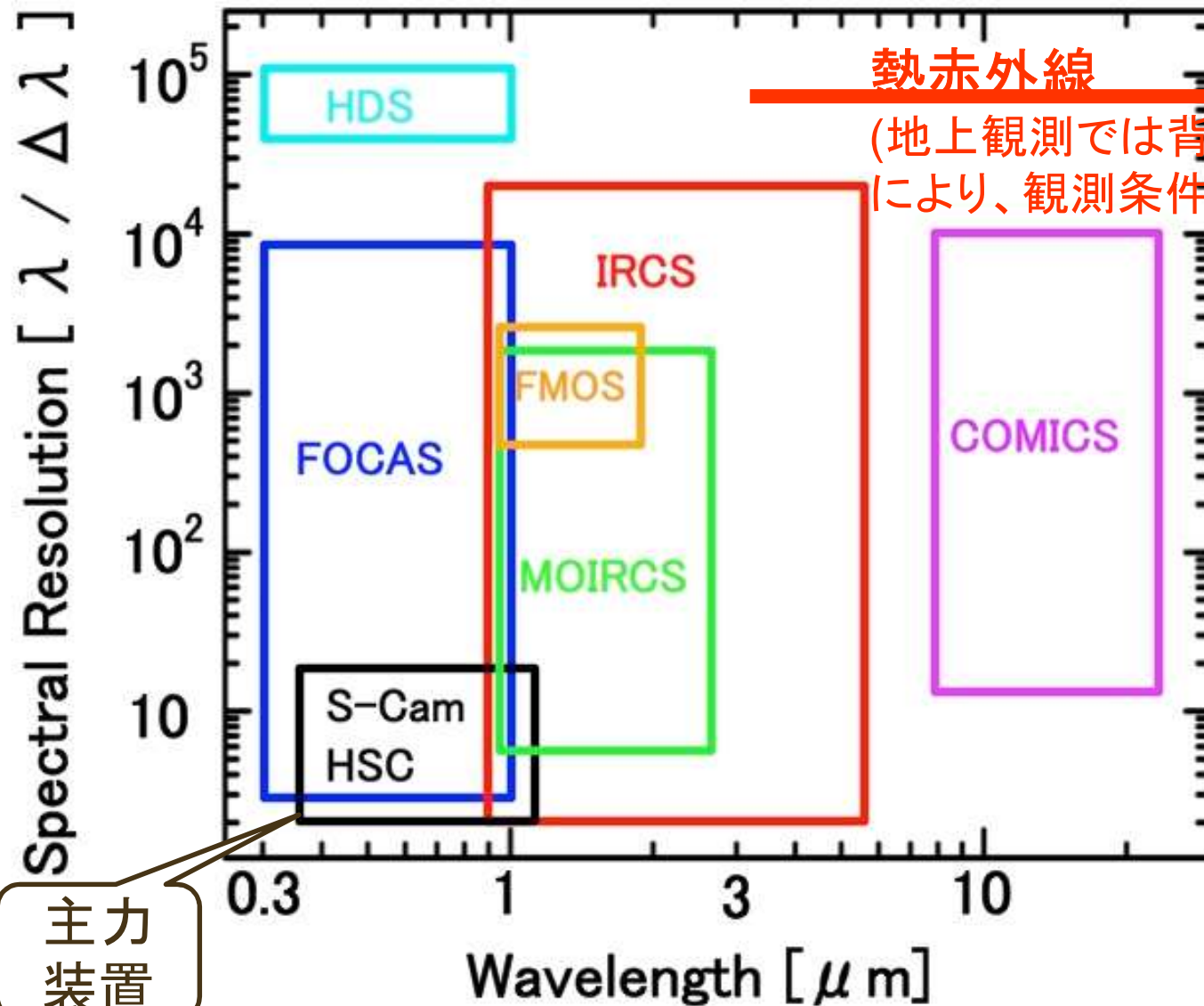
Fumi Yoshida (NAOJ, Solar System)

すばるの観測装置ラインナップ

可視光線

近赤外線

中間赤外線



熱赤外線

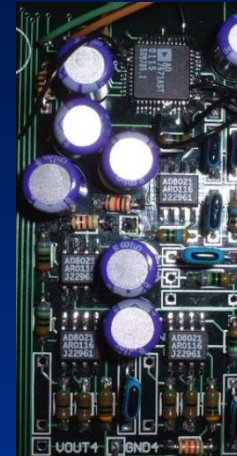
(地上観測では背景光の増加により、観測条件が激変)

~300K黒体
望遠鏡・装置・
空が輝く！
昼・夜の差が少

主力
装置

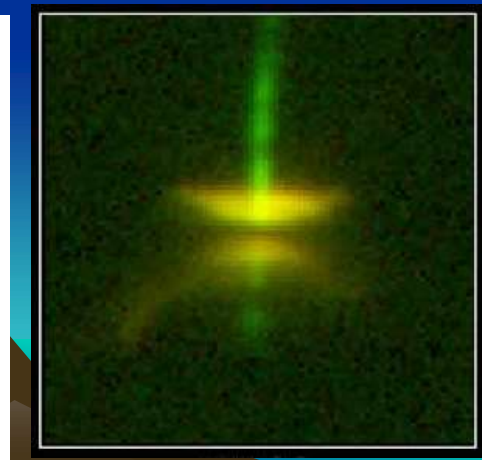
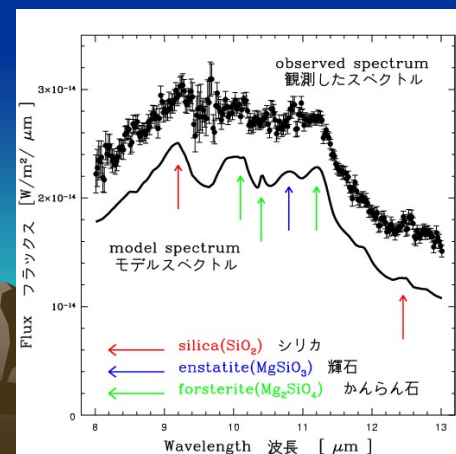
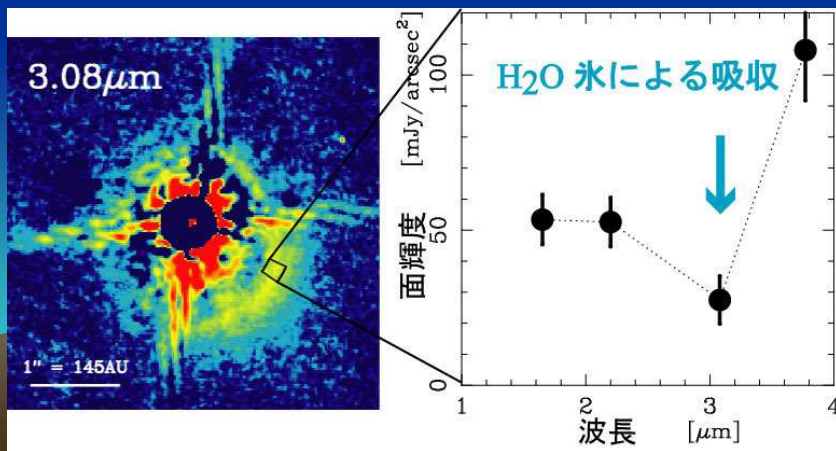
自己紹介

- 2005学位取得→学振→神奈川大→久留米大
- 熱赤外観測装置機能開発
 - Subaru/COMICS
 - 中間赤外線($\lambda=7\text{-}26\mu\text{m}$)
 - AMPADCボードの開発・実装
 - 観測効率の向上、ノイズ低減
 - 光学調整・装置性能評価
 - 直線偏光観測機能の立ち上げ
 - Gemini/NICI
 - 近赤外線($\lambda=1\text{-}5\mu\text{m}$)
 - H₂Oiceフィルタの作成・追加
 - Subaru/IRCS
 - 近赤外線($\lambda=1\text{-}5\mu\text{m}$)
 - 熱赤外偏光観測機能の立ち上げ
 - TMT/MICHI 要素技術開発



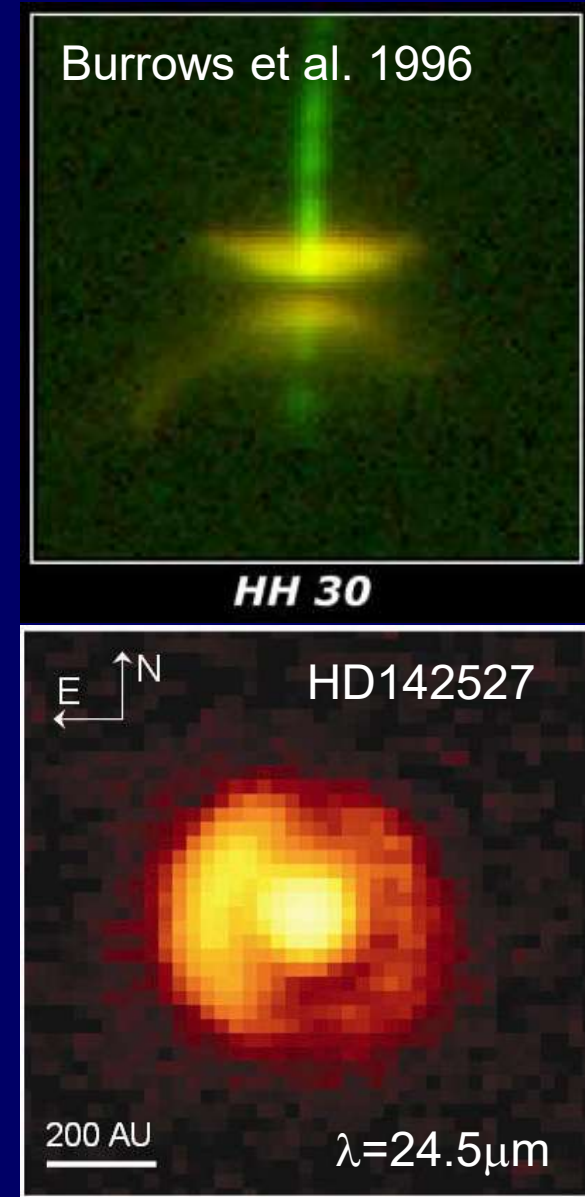
COMICS@カセ焦点

- 観測的アプローチ
 - 地上熱赤外観測装置に新機能を追加し、それを用いた観測的研究
 - ユーザレベルでは SST, Akari, ALMA も利用
- サイエンス ターゲット:
 - 若い星の周りの円盤
 - 原始惑星系円盤・残骸円盤 の温度・密度構造観測
 - 固体物質の分布・進化(時間的・空間的)の観測
 - これらを総合し、惑星形成過程・物質進化シナリオの検証・および精緻化



原始惑星系円盤とは？

- ◎ ガスと固体微粒子からなる若い星を取り囲む円盤
 - 降着円盤またはその名残
- ◎ 惑星系の母体
- ◎ 高角度分解能観測の進展により詳細構造が明らかに...
 - 2000年代1"を切る分解能 sub-arcsec
 - 2010年代 $\sim 0.1''$
 - MIR $\sim 0.4''$ (~ 60 AU)
 - NIR $\sim 0.1''$ (~ 14 AU)
 - 電波 $\sim 0.035''$ (~ 5 AU)
 - Gap, spiral $\rightarrow$ 形成中の惑星の存在？
 - 形成中の惑星候補天体も...



Fujiwara, Honda+2006

原始惑星系円 盤の例



SEEDS NIR protoplanetary disk gallery (Subaru/ HiCIAO)

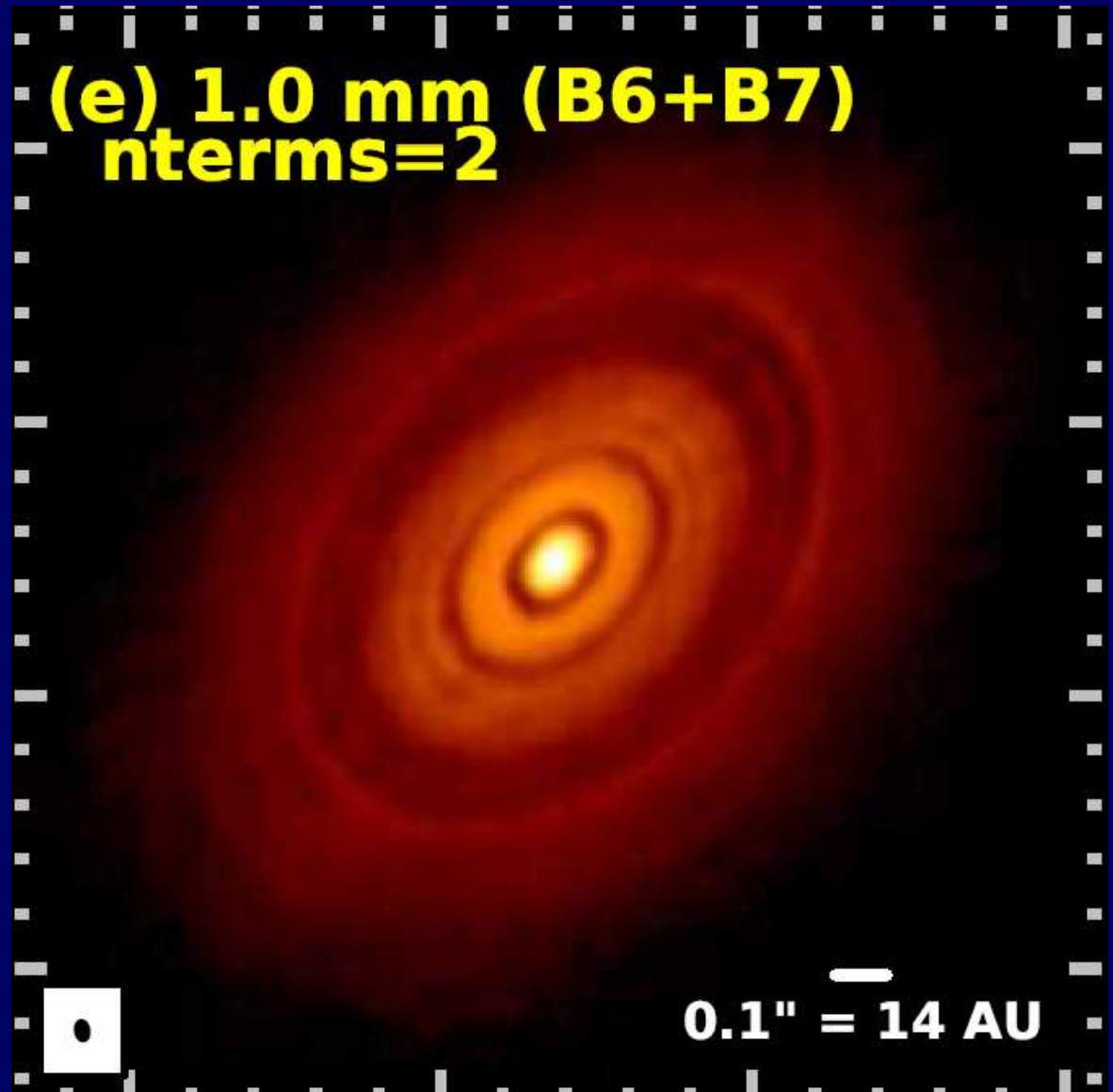
~0.1" beam, $\lambda=1.6\mu\text{m}$

HL Tau observed by ALMA

ALMA Partnership et al. 2014

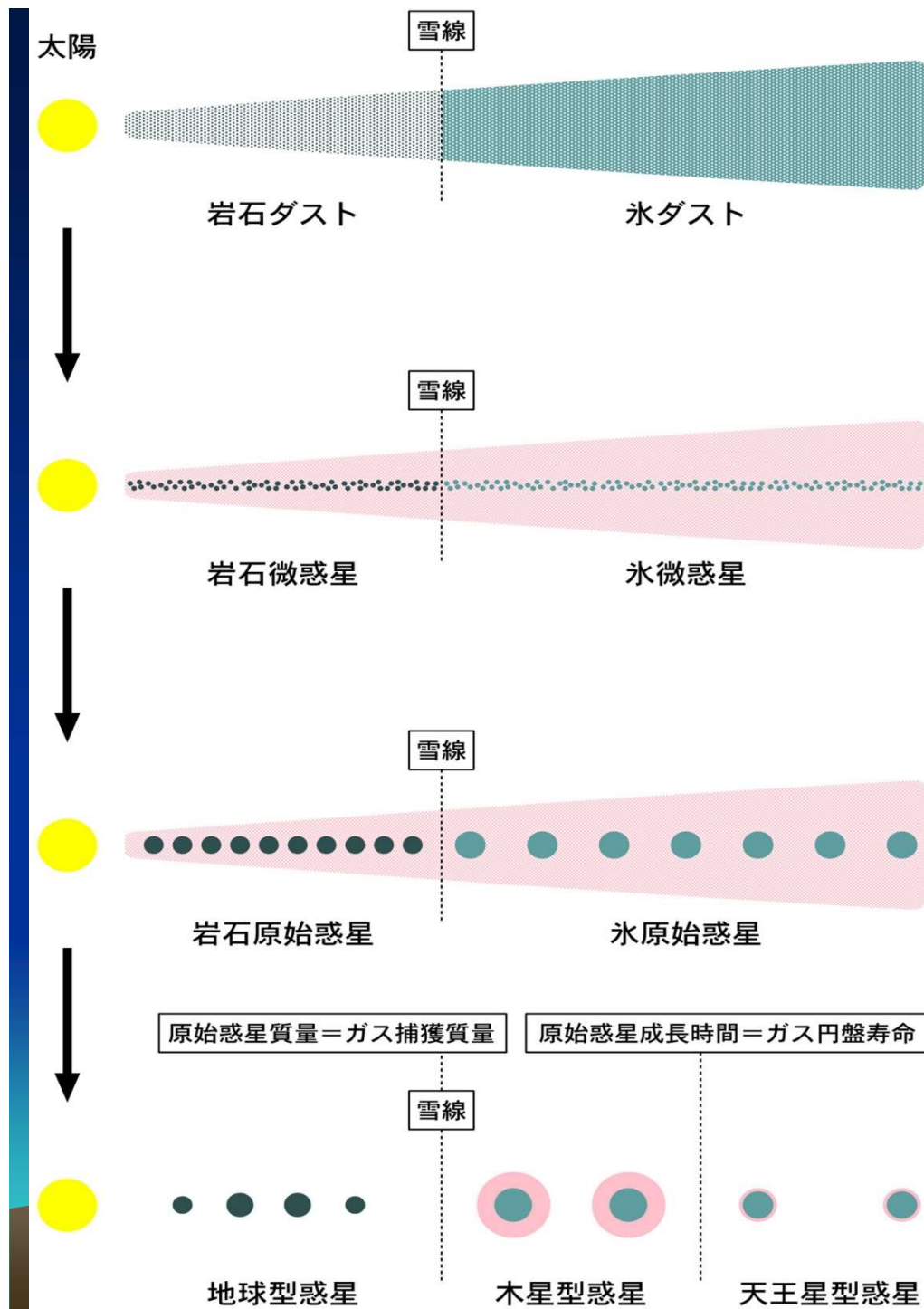
2014/11/6

Atacama Large
Millimeter &
submm Array
Band6 (1.28mm)
35mas(5AU) !!
CGでも銀河でもなく、
星惑星形成現場！





原始惑星系円盤における H₂O氷分布観測



惑星系はどのようにできる？ 太陽系形成論 (1970-80s Hayashiモデル)

原始惑星系円盤の形成

$\mu\text{m} \sim \text{mm}$ dust

観測

ダスト成長・沈殿

微惑星の形成

(kmサイズ)

観測的には未解明

原始惑星の形成 (数1000kmサイズ)

巨大衝突と月形成
水野・中沢プロセス
によるガス惑星形成

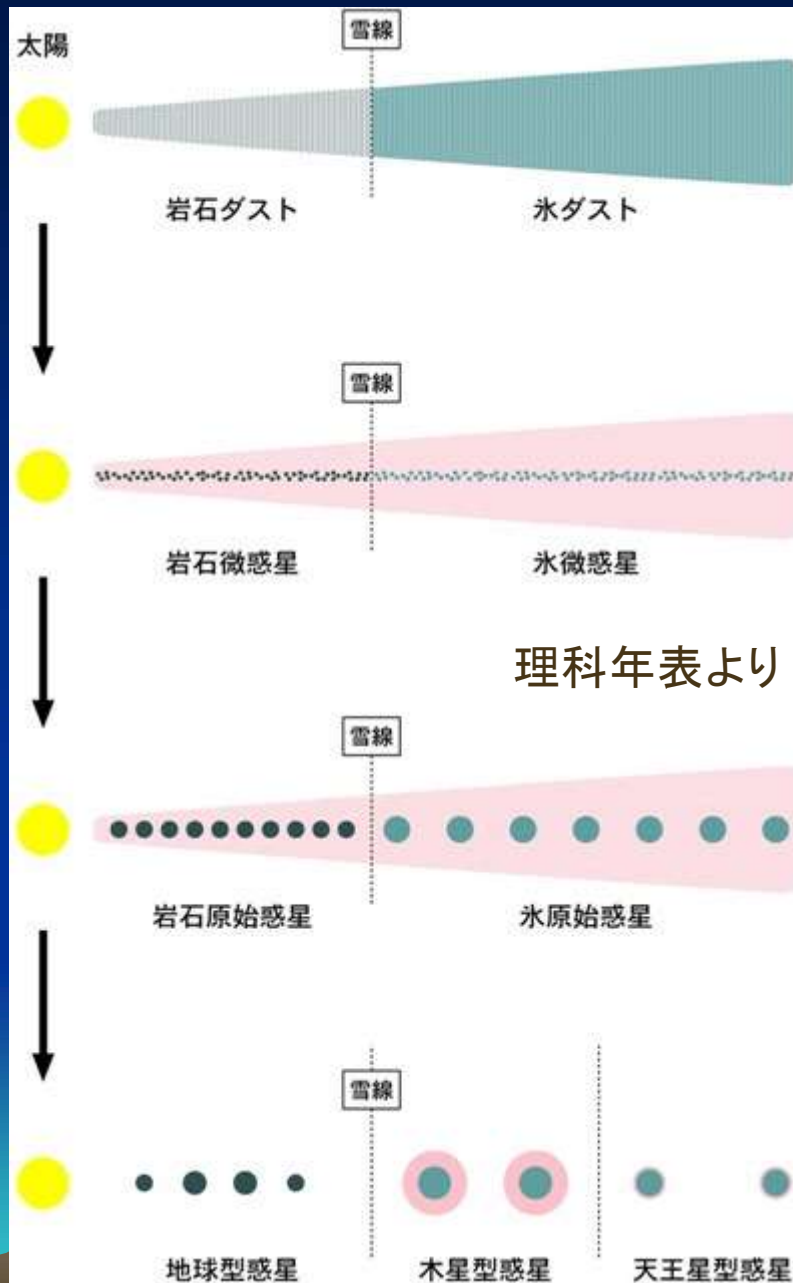
惑星系形成の最終段階

観測 11/33

N体計算

H₂O 氷の重要性

- 主要固体物質の一つ
 - 水氷とケイ酸塩(3:1)
 - 氷の中でもH₂Oが主
- 惑星形成で水氷は重要
 - **ガス惑星コア (~10M_E)形成**
 - T_{dust} ~140Kで昇華
→ 氷雪境界線(snow line)
地球型と木星型の境界
 - Snow line近辺で初期微惑星形成? (Lecar+2006)
 - 地球型惑星の水の起源
- 円盤の水氷分布の理解は重要...しかし観測的検証は非常に限定的
 - 特に雪線の直接観測は**未だ成されていない!**



太陽系の雪線は2.7-4.2AUといわれているが...

Snowline(雪線)直接観測の難しさ

(1) 非常に高い空間分解能が必要

ALMA Partnership et al. 2014

太陽系 $r=3\text{AU}$

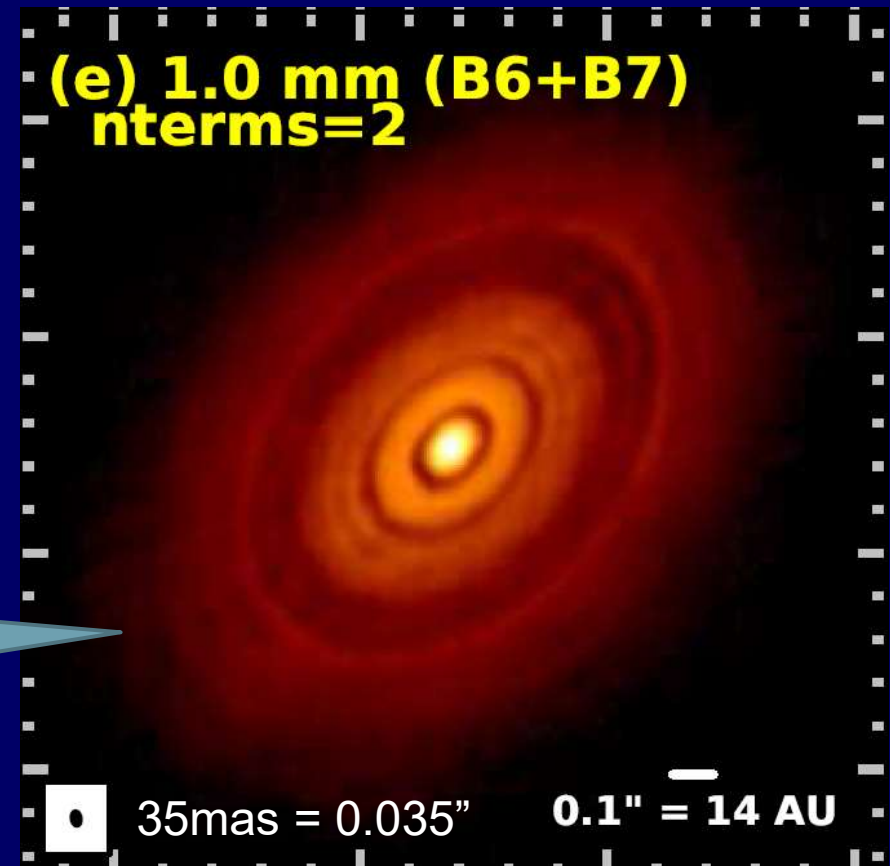
→ 20mas @ 140pc

ALMAの解像度でもギリギリ

(2) “ H_2O 氷”であるという証拠が必要

実はどんな物質が光っているか分かっていない!

分光的特徴(line放射・吸収)が望まれる



Snowline(雪線)直接観測への戦略

(1) 非常に高い空間分解能が必要

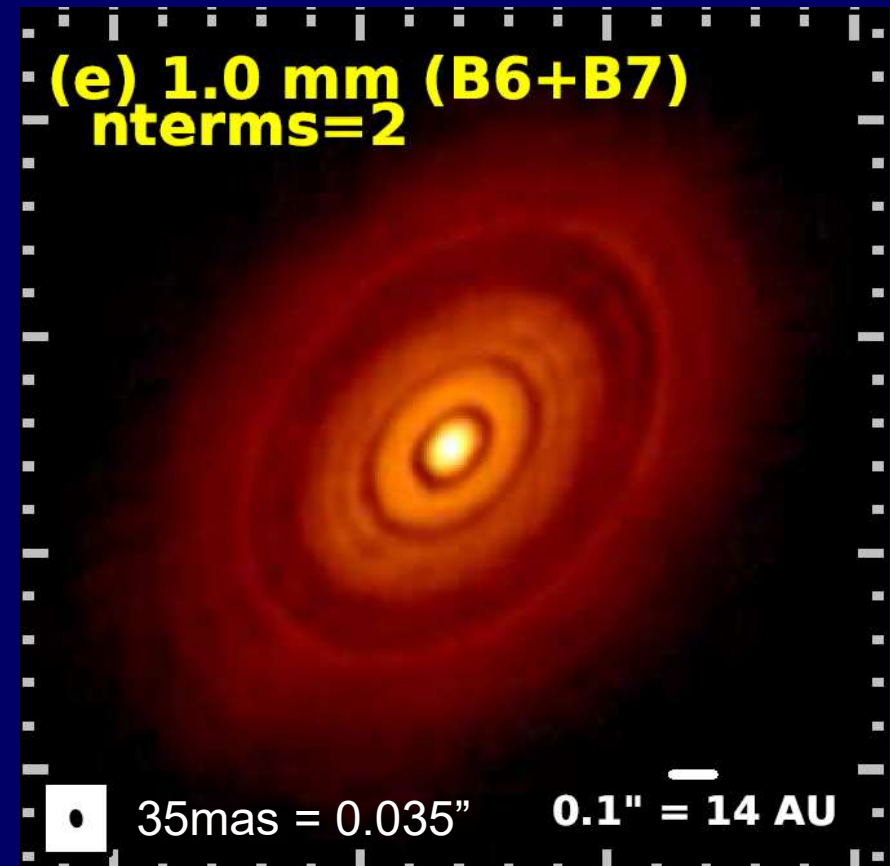
ALMA Partnership et al. 2014

太陽型星では難しいので、中質量の若い星(Herbig Ae/Be)を狙う

$$r_{\text{snow}} \propto \sqrt{L_{\odot}}$$

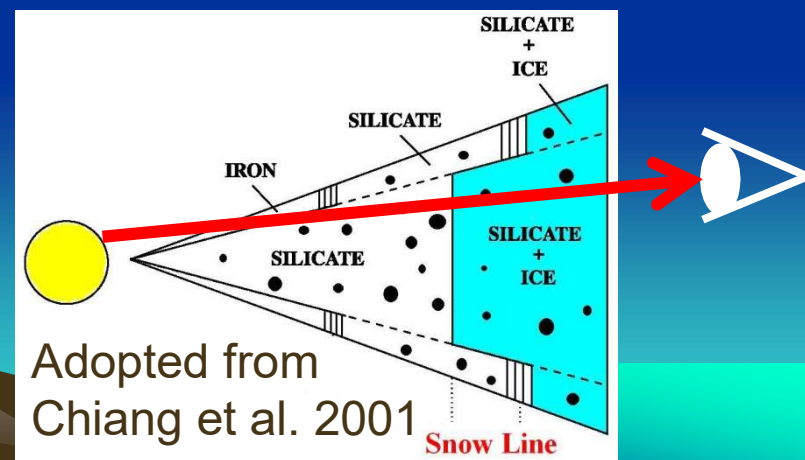
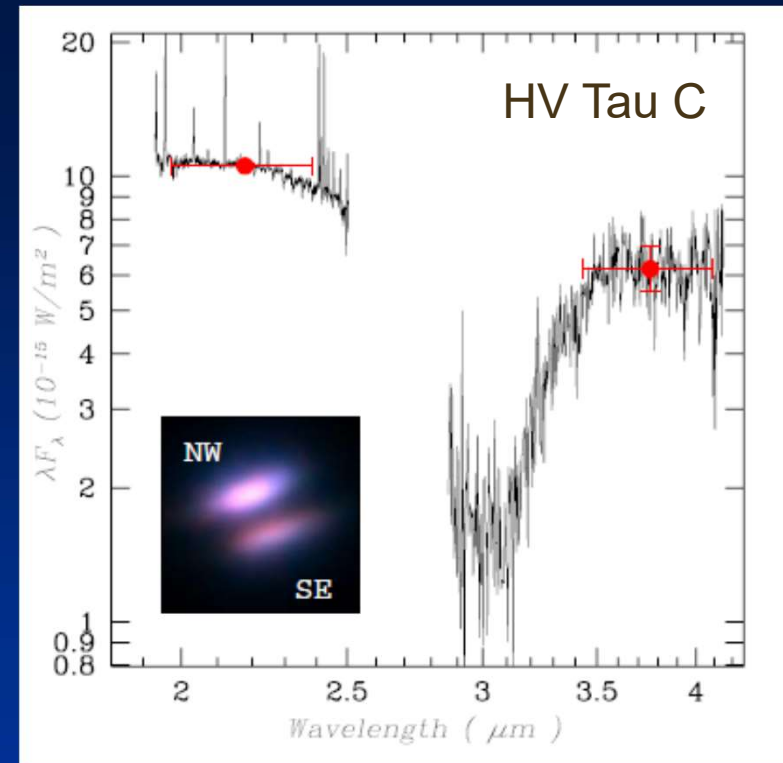
(2) “H₂O氷”であるという証拠が必要

H₂O ice/gas のline放射・吸収をとらえる



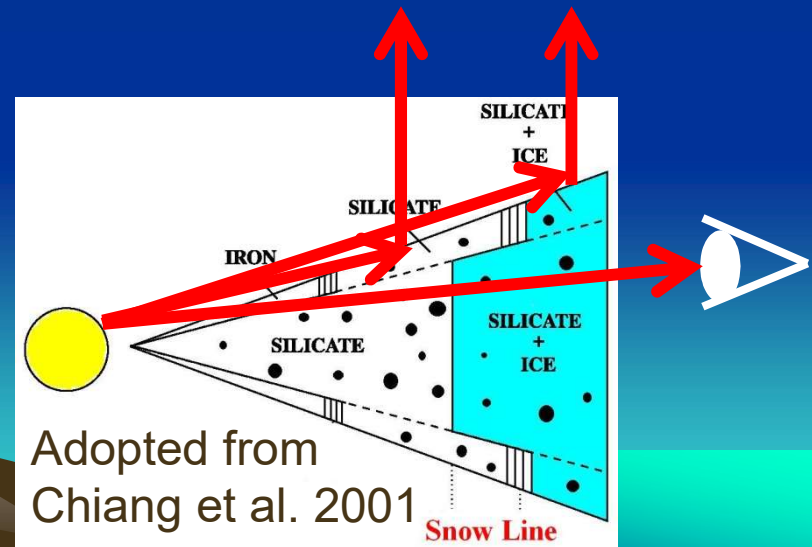
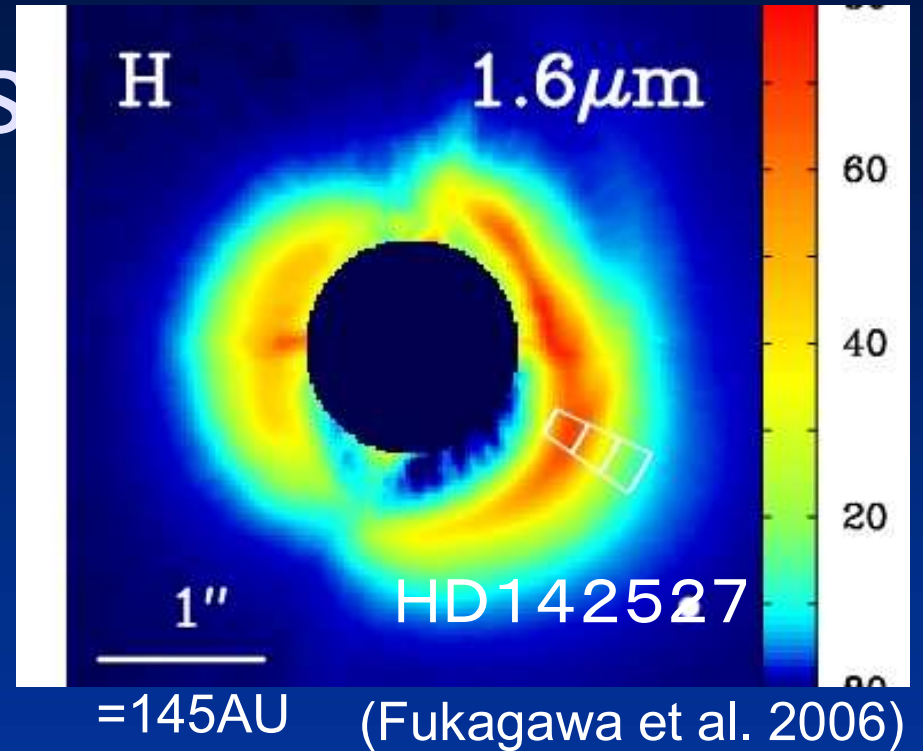
H₂O ice *IN* disks

- Protoplanetary disks
 - 3.1 μm absorption feature towards edge-on disks (OH stretching mode)
 - HKTauB, HVTauC (Terada+2007)
 - CRBR2422.8-3423 (Pontoppidan+2005)
 - Radial location of ice in disk is unknown for **edge-on disk**



H₂O ice *IN* disks

- Protoplanetary disks
 - 3.1 μm absorption feature towards edge-on disks (OH stretching mode)
 - HKTauB, HVTauC (Terada+2007)
 - CRBR2422.8-3423 (Pontoppidan+2005)
 - Radial location of ice in disk is unknown for **edge-on disk**
 - Absorption feature in scattered light from the **face-on disk** (Inoue, Honda, et al. 2008)

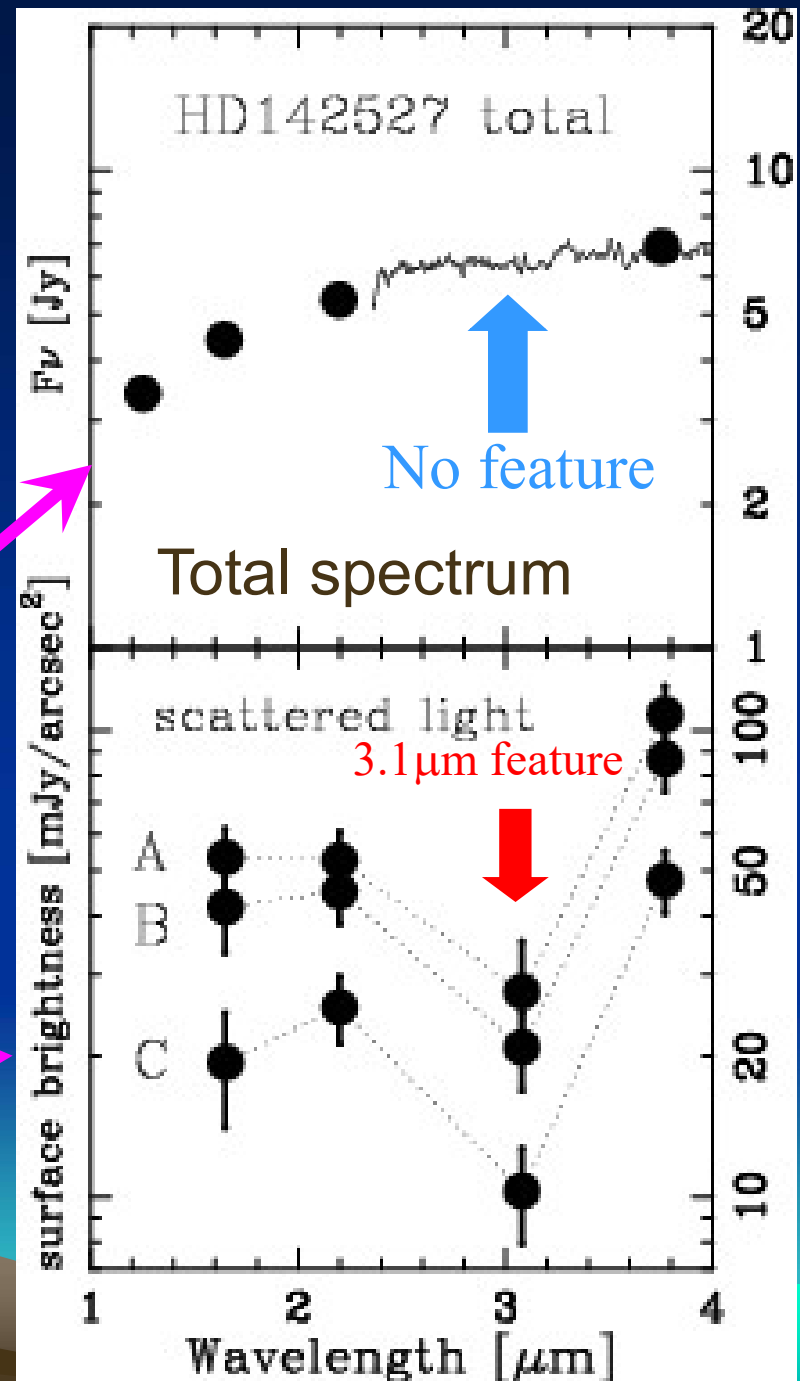
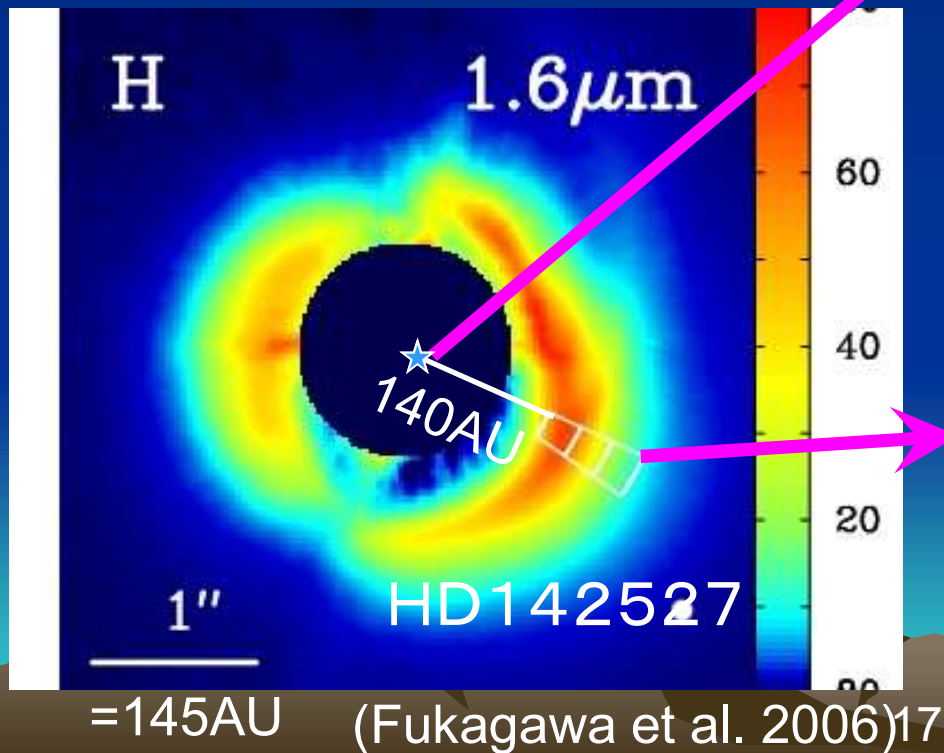


Ice in HD142527 disk

(Honda et al. 2009)

Water ice distribution can be traced **via scattered light spectroscopy** using $3.1\mu\text{m}$ absorption

... interrupted by CIAO/AO36 decomission...



Disk ice observations around Herbig Be star HD100546



Restart observations by installing
3.1um narrow-band filter to Gemini/NICI

- NICI on Gemini South
 - K, H₂O, L' imaging
 - 2012/3/30



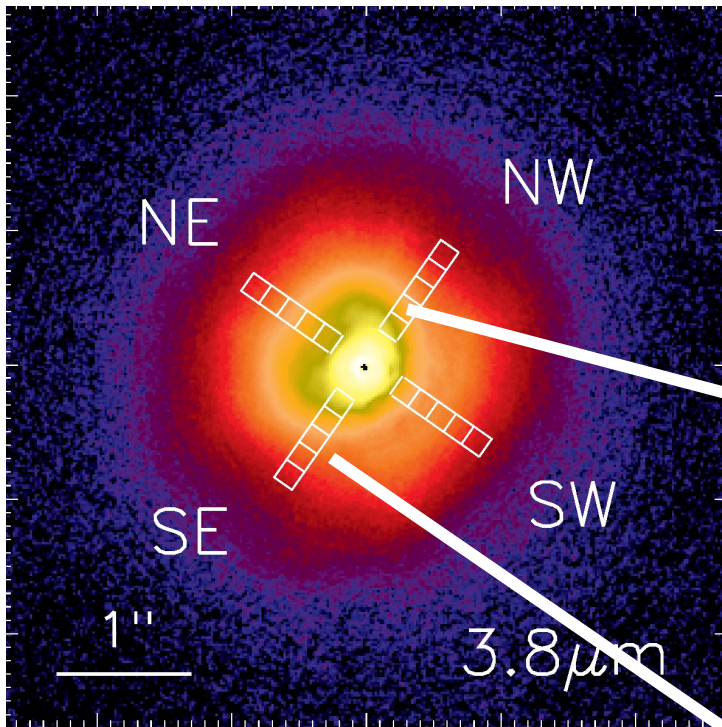
NICI = Near-Infrared
Coronagraphic Imager

Inst. rot. fixed (like ADI)
→ Better IWA

Better AO performance

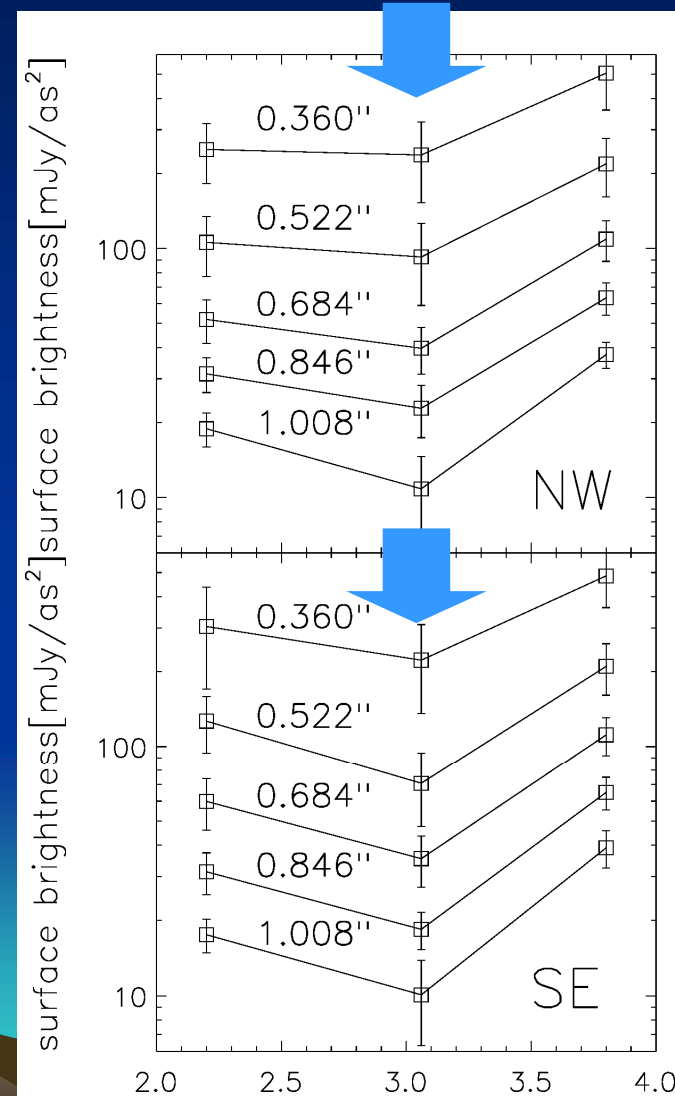
NICI on the Cassegrain focus

2-4 μ m “spectra” of HD100546 disk scattered light

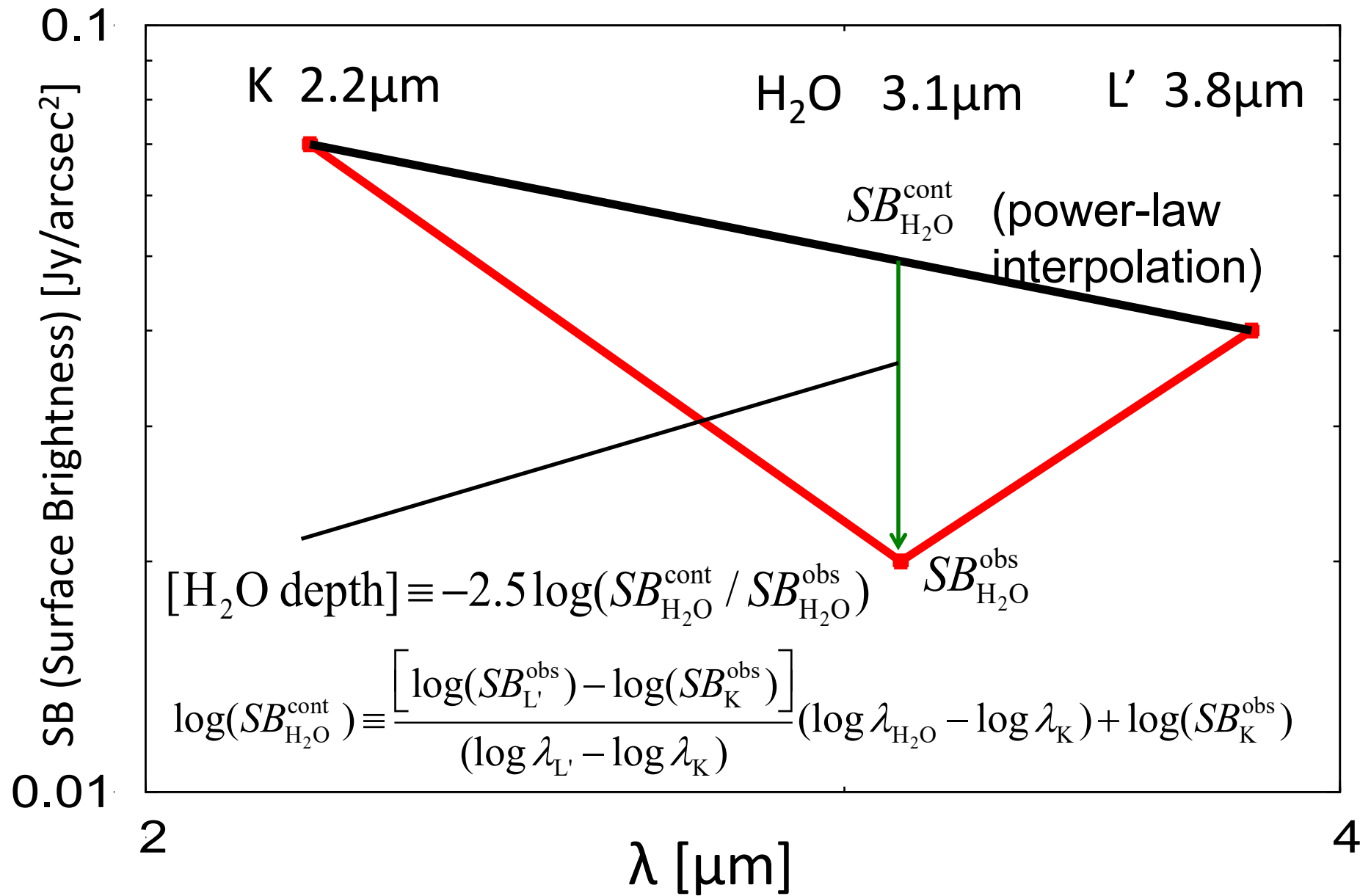


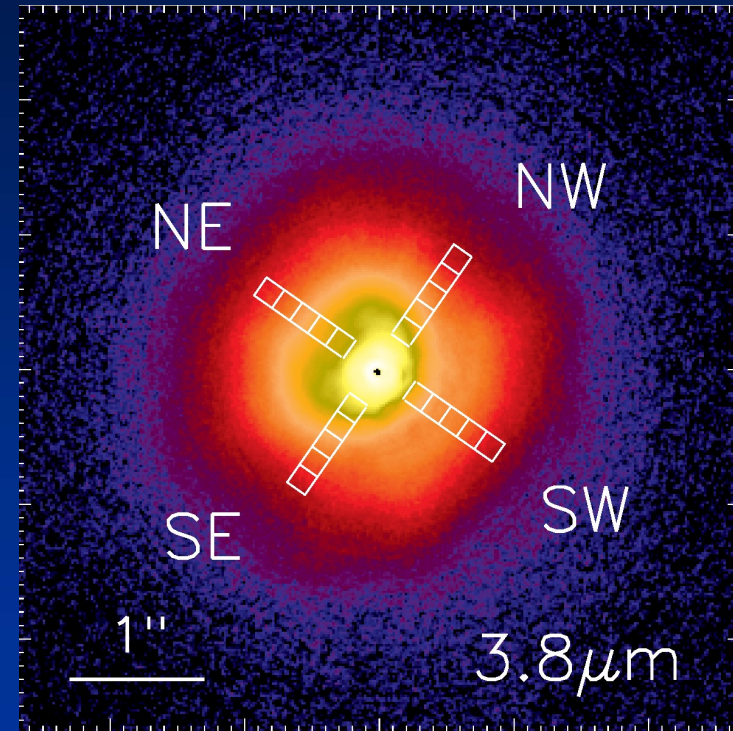
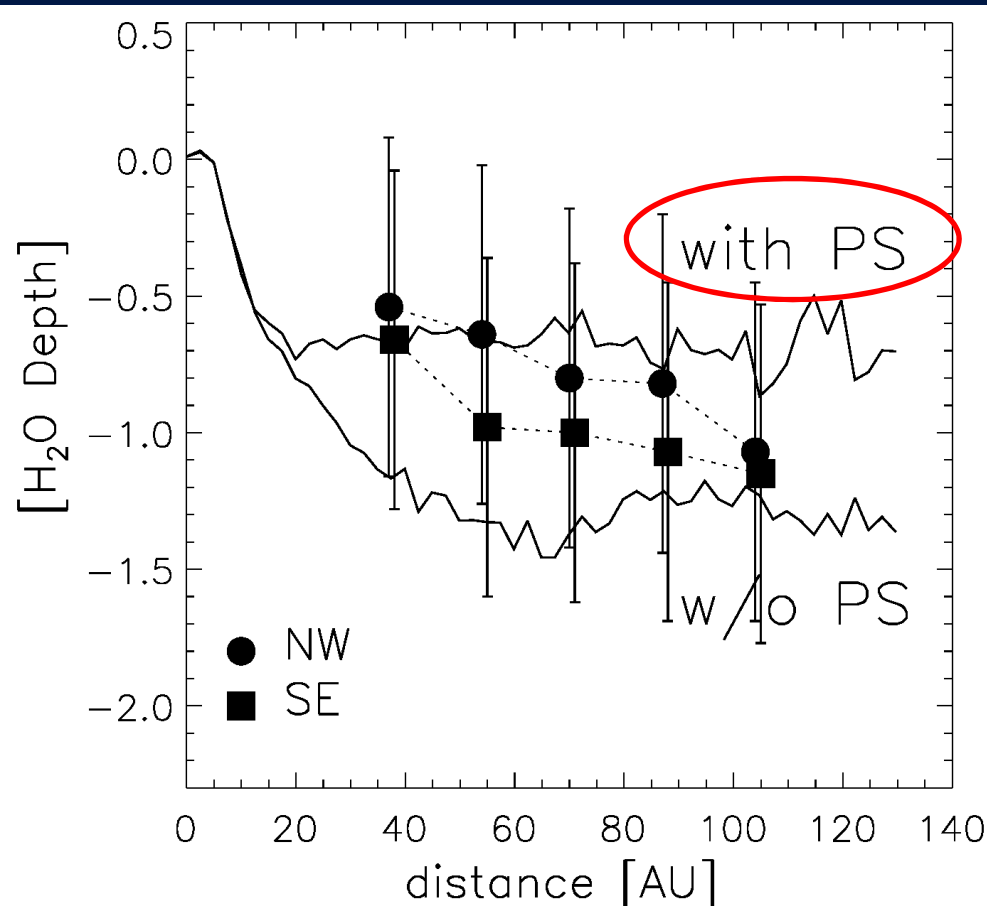
HD100546 disk by Gemini/NICI
(Honda et al. 2016)

shallow 3.1 μ m water ice
absorption detected as close as
~40AU to the star



H₂O absorption depth [H₂O Depth]

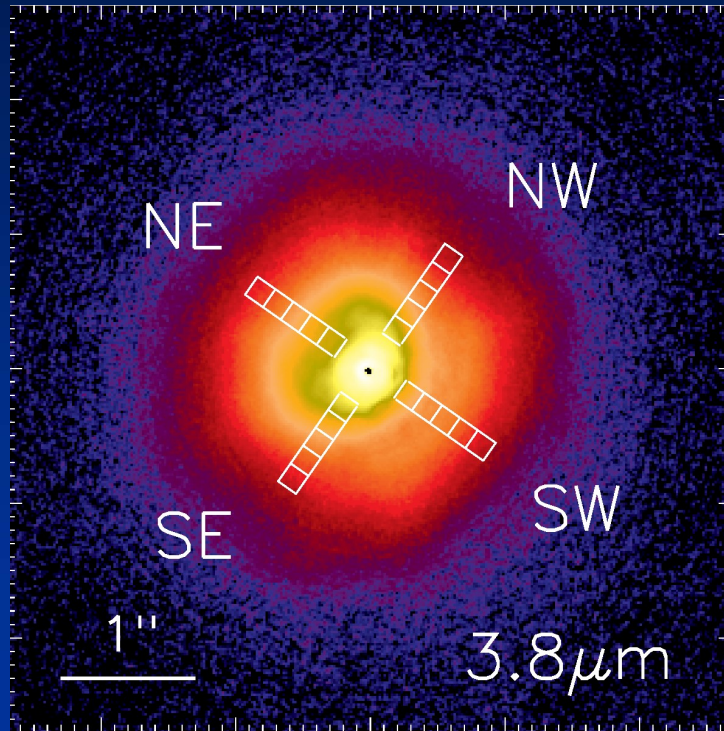




Observation is consistent with both models (unfortunately...)

- Need to reach as close as ~20AU(~0.2") to see "snow line"
- This time ~37AU(~0.4") → need improvement of IWA

Toward direct detection of H₂O snow line



HD100546 (Honda+ 2016)

Requires IWA~0.2'' around A-stars

→ Difficult for lucky imaging

→ Polarimetric Differential Imaging (PDI) provides better IWA

← proved by HiCIAO (SEEDS study) at J,H,K-bands

Recent high-contrast imager covers up to K-band ($\sim 2\mu\text{m}$)....

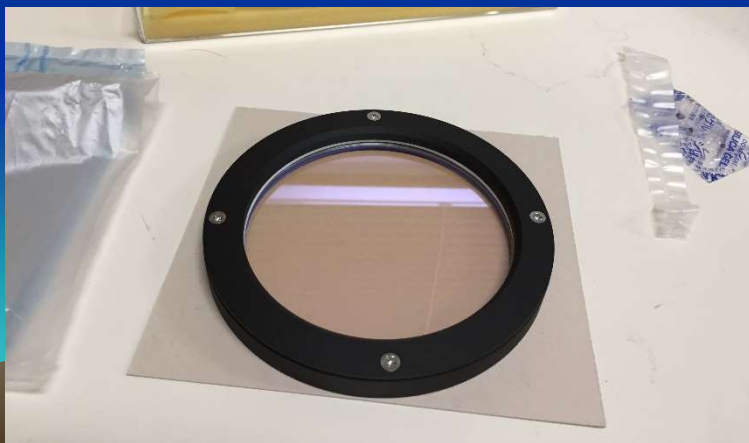
- Subaru/HiCIAO, Gemini/GPI, VLT/Sphere

- 3-5 μm capability has been omitted due to cost issue

Toward direct detection of H₂O snow line



IRCS+AO188 at Nasmyth
2-5μm Half-wave plate $\Phi=94\text{mm}$



Development of PDI capability of Subaru/IRCS at 2-5μm is on-going (unique among 8m-class telescope)

- Better IWA by PDI
- SEEDS disk survey follow-up
- Half-wave plate obtained in FY2015 (¥4.6M)
- Performance evaluation observing was made in June (last month!)

円盤近赤外散乱光観測によるsnowlineの 直接観測のこれまでと将来展望



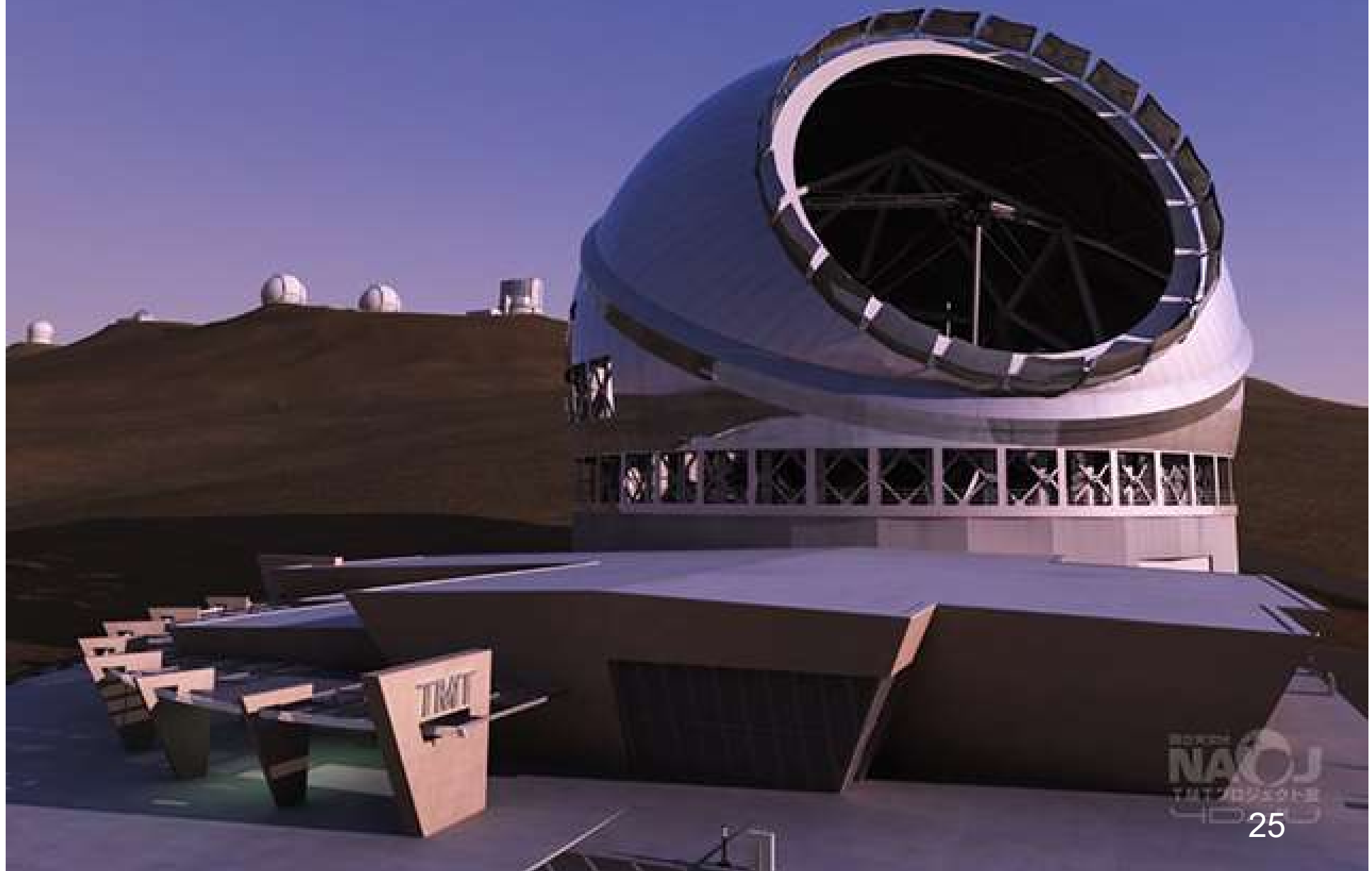
year	target	IWA	method
Honda+2009	HD142527	~1"(140AU)	Subaru/CIAO+AO36, Lucky imaging
Honda+2016	HD100546	~0.4"(40AU)	Gemini/NICI(AO88), Lucky imaging + ADI technique
Near future	TBD	~0.2"(20AU)	Subaru/IRCS+AO188, PDI (+ADI) imaging (+spectropol.)
In 10-15 yr...	TBD	~0.05"(5AU)	TMT/MICHI+MIRAO, PDI(+ADI) imaging(+spectropol.)

イマココ

モデル計算予想によると、若い中質量星円盤のsnowlineは
~20AU(~0.2")程度

→ 8m望遠鏡だと検出ギリギリ、30m望遠鏡ならば余裕

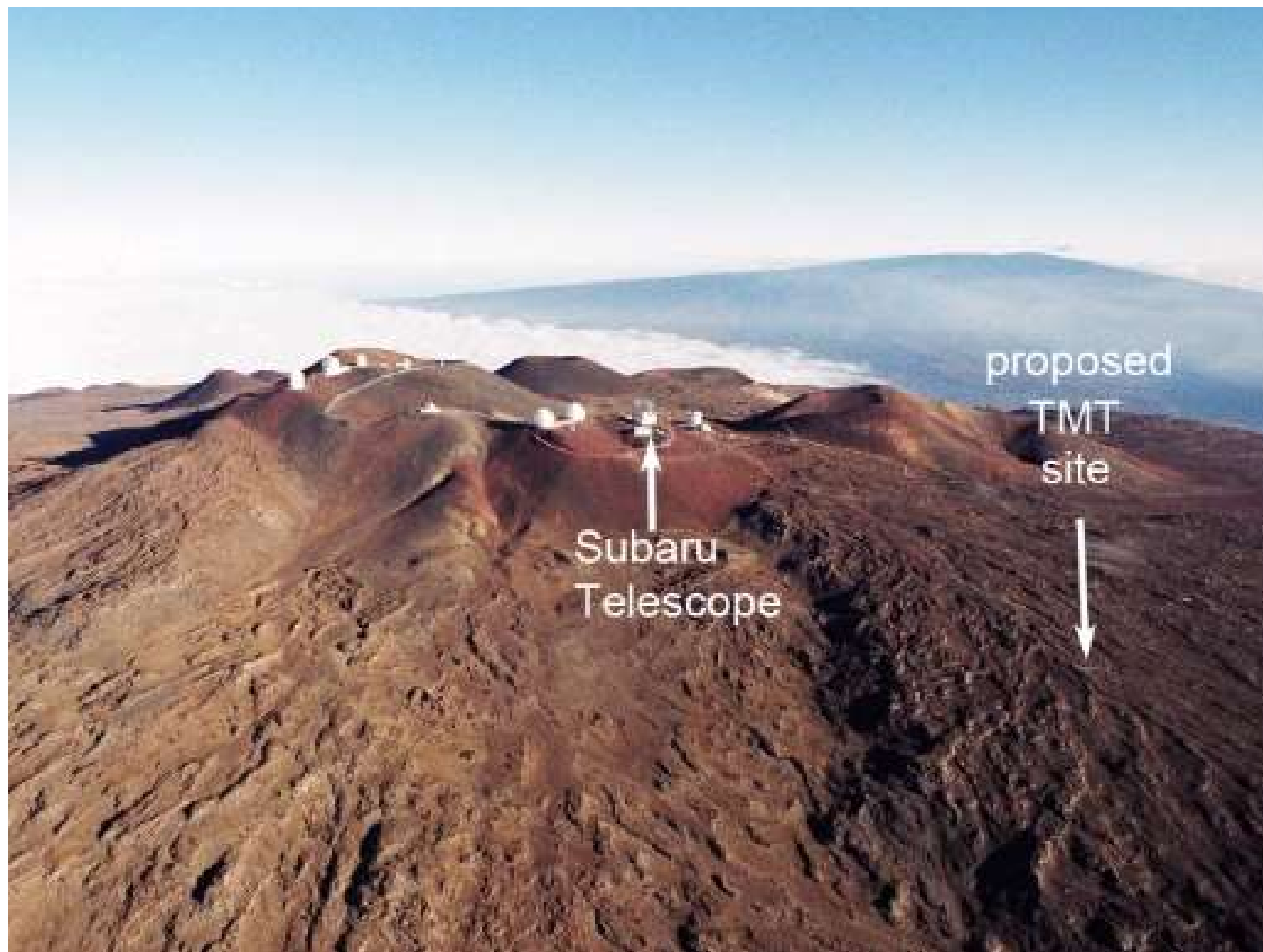
30M望遠鏡計画への取り組み



TMT (Thirty Meter Telescope)

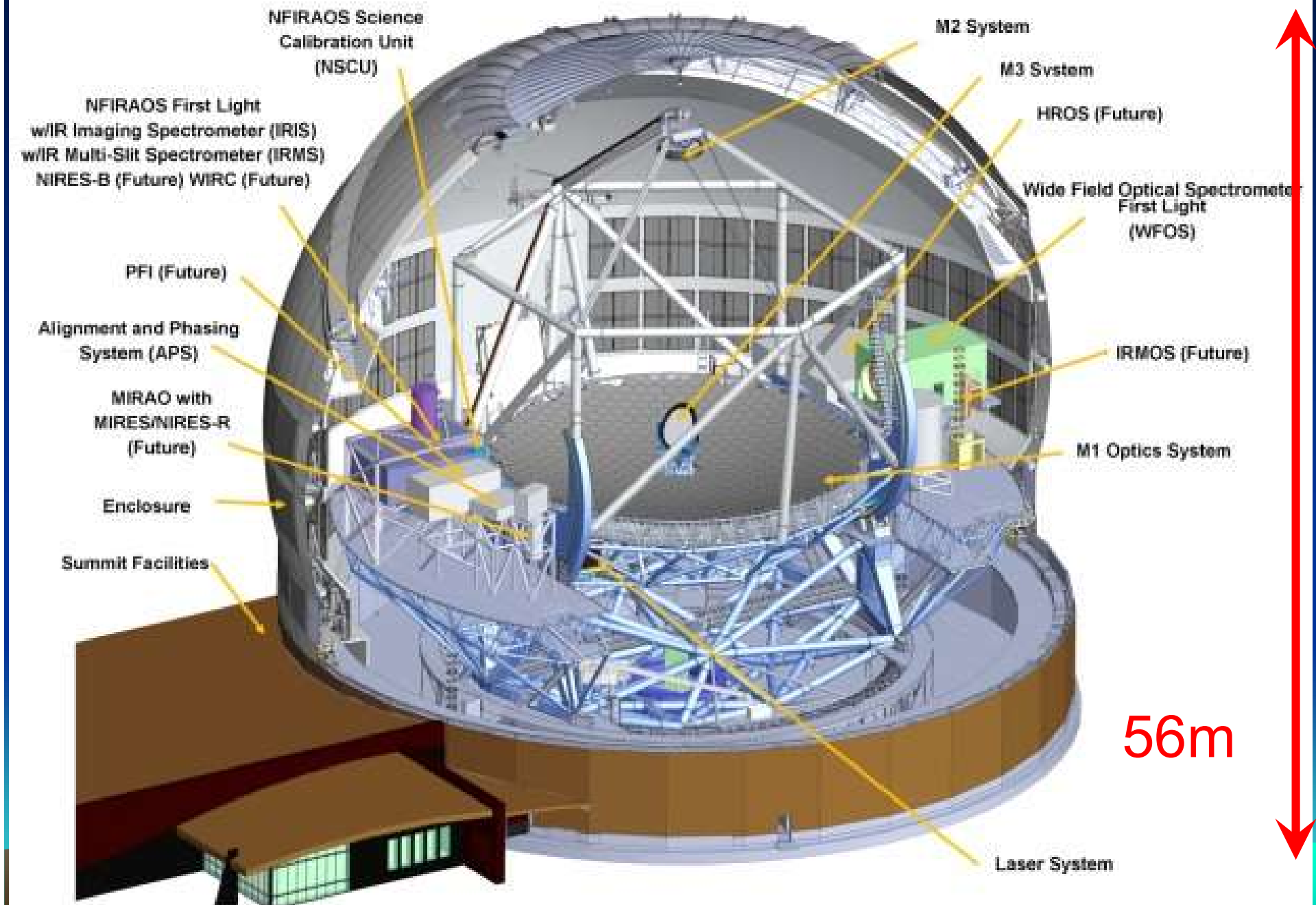
- 492枚の六角鏡で有効径30mの主鏡を構成する、国際望遠鏡プロジェクト
 - 米・カナダ・日本・中国・インド
 - ハワイマウナケア山頂 (すばるのとなり)
 - 2027年稼働予定
- 日本も計画に参画
 - 予算規模1500億超
 - 一国で実現困難
 - 20%分担で2014年
予算措置&建設開始





2015/4/26 TMT construction site
from Subaru telescope site

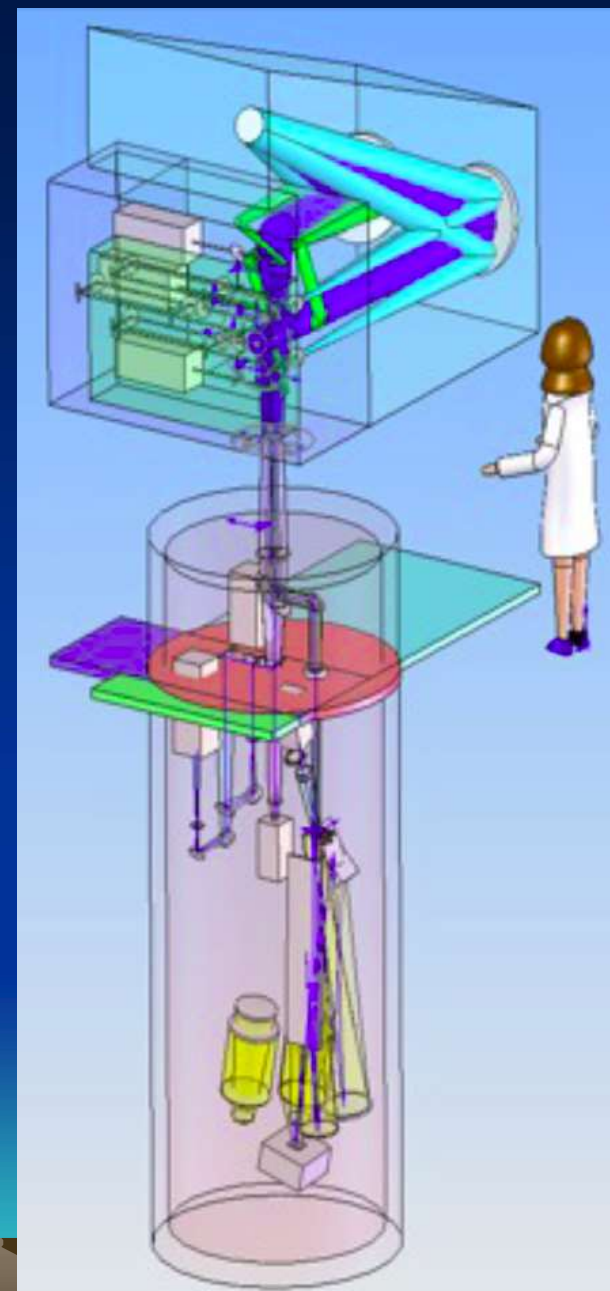




MIRES → MICH

(Mid-Infrared Camera,
High-disperser, and IFU)

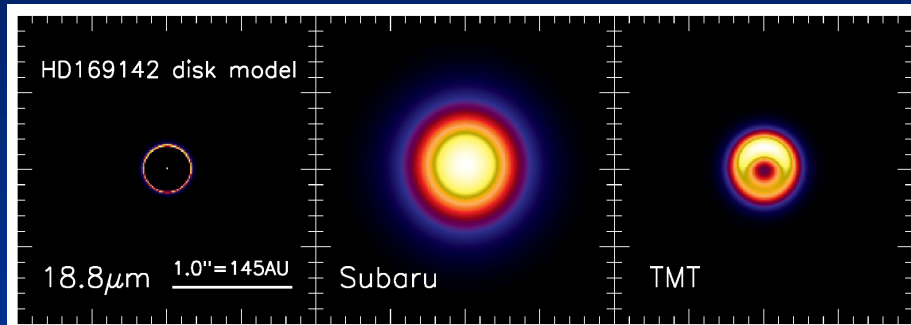
- 熱赤外3-26 μm の撮像, 高分散分光器($R=100000$), IFUを持つAO付汎用装置
 - ◉ 0.03" @ 3 μm , 0.08" @ 10 μm
- TMT 第2期装置として 日米チームで提案中
 - US: Chris Packham (UTSA)
 - Jp: Mitsuhiro Honda (Kurume)



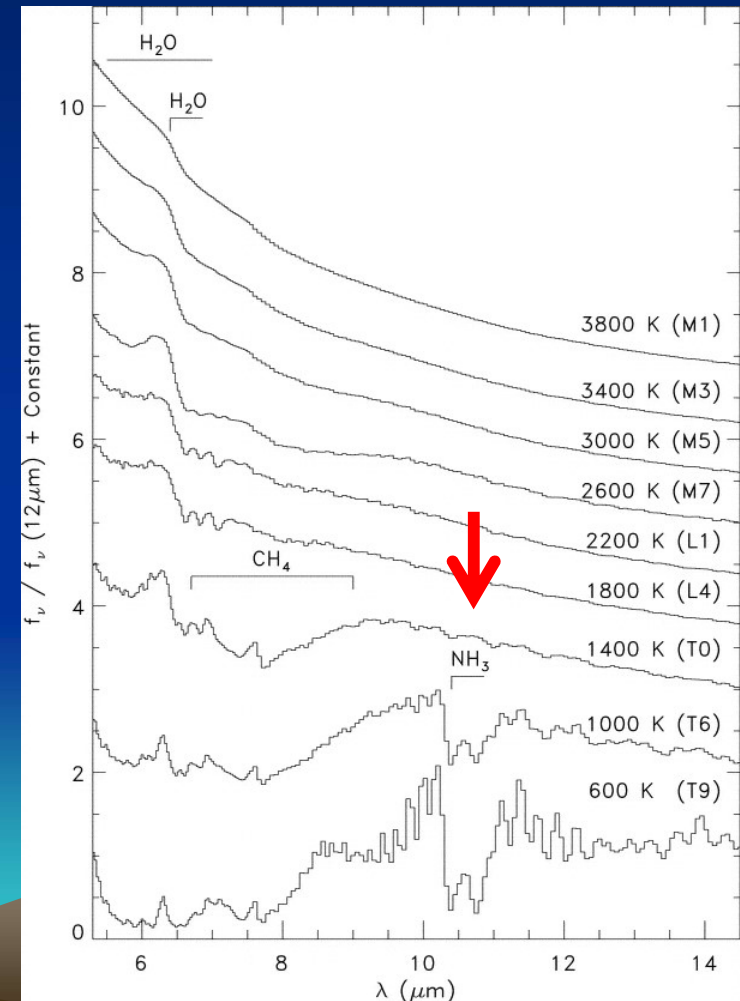
MICHIの目指すサイエンス

円盤・物質・有機分子・系外惑星

- 原始惑星系円盤・残骸円盤撮像



- 有機物・鉱物の円盤内分布
- 高分散分光による有機分子検出・と空間分布
 - HCN, C₂H₂, CH₄, etc...
- 木星型ガス惑星大気分光
 - NH₃吸収@10.5 μm
- もちろん系外銀河サイエンスも
- Collaboration大歓迎

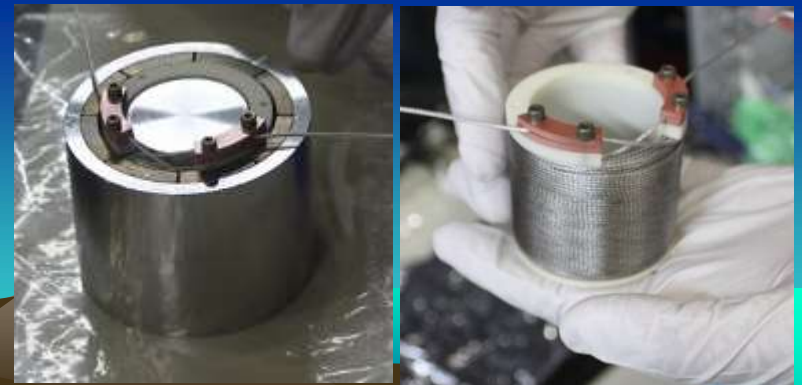
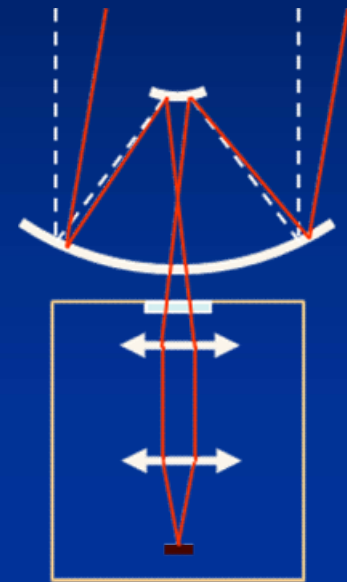
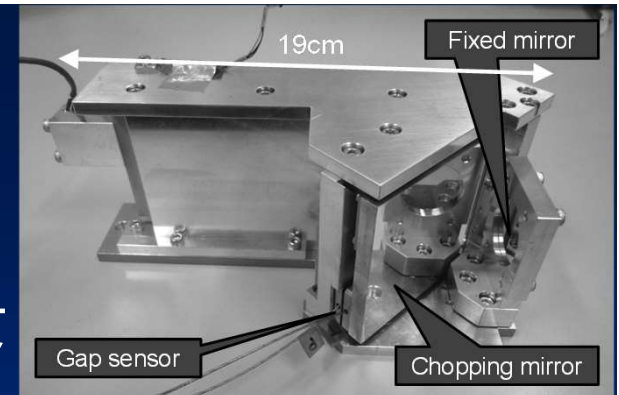


Cold chopper

- 地上中間赤外観測では、変動する背景光を高速($\sim 5\text{Hz}$)ビームスイッチ(chopping)で差分・除去
 - すばるでは常温・常圧下副鏡振動
 - TMTでは副鏡振動は難しい
 - 装置内(低温 $\sim 30\text{K}$, 真空下)チョッパ必要
- 低発熱($<1\text{W}$)・高ストロークな超伝導VCMの試作開始

H27—H30 科研費若手A(本田)
にて推進

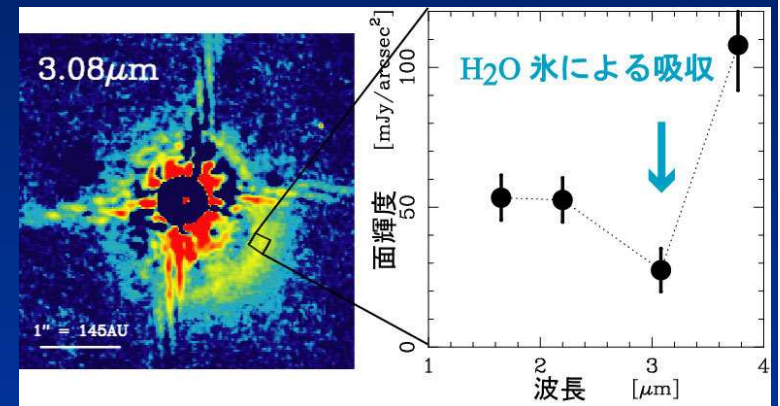
→ プロトタイプは東大の
TAO/MIMIZUKUに搭載？



まとめ

- 円盤のH₂Oスノーライン直接観測にむけて...

- 観測手法の確立
- snow line 検出は
さらなる高空間分解能必要
- 現在Subaru/IRCSへの
偏光観測機能搭載中



- 将来への取り組み

TMT(30m望遠鏡)用熱赤外観測装置

- 上記サイエンス実現として期待
- 基礎技術開発を推進中

