

# ハワイハレアカラ望遠鏡による 惑星大気の 光赤外モニタリング観測

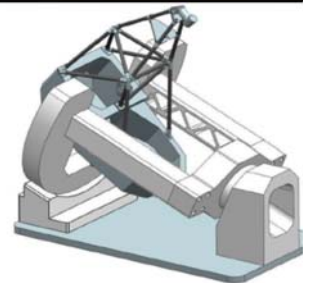
2015/12/7

## 坂野井 健 (東北大理)

鍵谷将人, 中川広務, 高見康介, 前田春暁, 小野紘夢, 岡野章一, 小原隆博, 笠羽康正, 土屋史紀 (東北大理)  
JEFF KUHN, JOE RITTER, ISABELLE SCHOLL(ハワイ大IFA)  
米田瑞生, S. BERDYUGINA (ドイツ・ケーペンハウワー研)



第5回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ  
日時：2015年12月7日(月) - 12月9日(水)  
場所：東北大学理学研究科 青葉サイエンスホール  
招待講演



## 内容

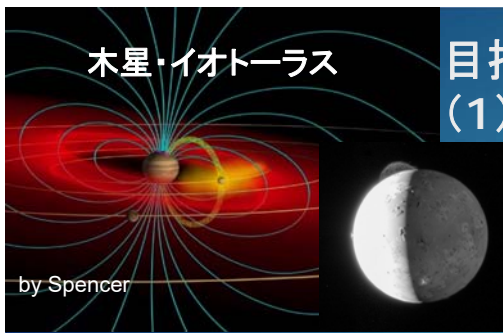
2

### 観測の狙い

- ▶ 太陽系惑星・衛星の連続モニタリング観測の意義

### 東北大学のハワイ・ハレアカラ観測施設

- ▶ T40(40cm望遠鏡)
  - 広角単色イメージャー(1-1)
  - 可視ファイバー・エシエル分光器(1-2)
- T60 (60cm望遠鏡)
  - 赤外高分散ヘテロダイン分光器 (2-1)
  - 可視エシエル分光器・コロナグラフ(2-2)
  - 多波長偏光カメラ(2-3)
- ▶ 現在進行中の計画
  - 1.8m非軸望遠鏡PLANETS(3-1)
  - 近赤外エシエル分光器ESPRIT(3-2)



## 目指すサイエンス

(1) 明るい天体周辺(天体中)の  
微弱光観測

～高ダイナミックレンジ・高分散分光～

3

主に太陽系天体の惑星(主星)の周りの衛星起源ガスや流出大気などを捉える。

大気・プラズマの発光は、太陽光の共鳴散乱、電子衝突励起、レーラー散乱等。

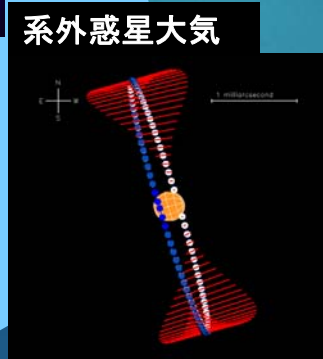
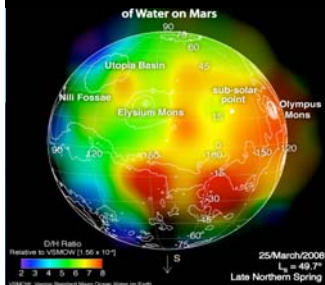
可視域では、惑星(主星)に対して、  
観測対象の大気の見え方は $10^{-5}$   
～ $10^{-7}$ 。

惑星本体(例:木星直径～  
40arcsec)に近いほど、太陽連続  
光と装置散乱光との分離が問題。

- コロナグラフ系
- 高分散分光系



## 火星 HDO/H<sub>2</sub>Oマップ

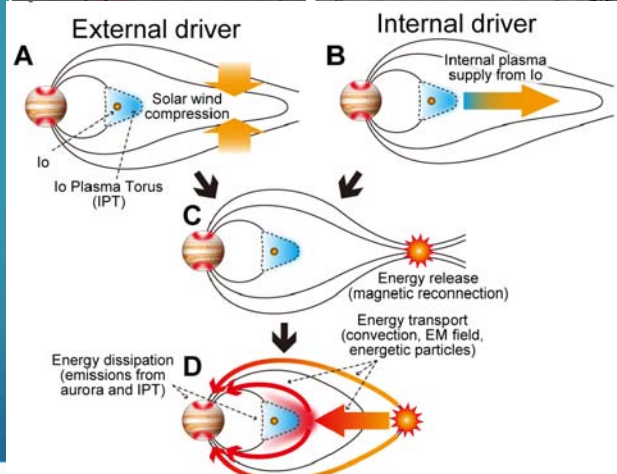
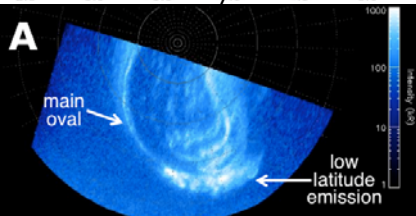
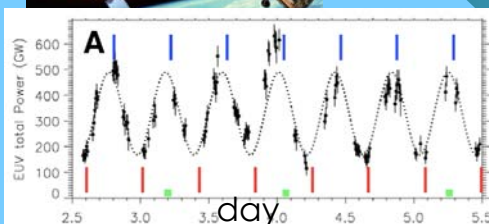
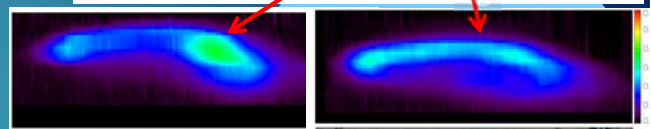
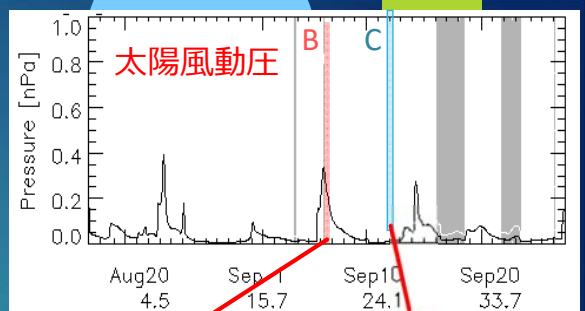


2

## 目指すサイエンス

(2) 太陽-惑星-衛星間のエネルギー・物質  
相互作用を解明する

～連続モニタリング観測、多点観測～



木星：地球と異なる磁気圏内部駆動型オーロラ現象

Kimura et al. GRL 2015

# ハワイ・ハレアカラ観測所 東北大観測施設

▶ **連続観測** – 現象の時空間変動観測と因果関係解明  
日々変動、季節・年・太陽サイクル変動

▶ **フレキシブル** – タイムリーなタイムアロケーション  
国際協力、探査機・大型望遠鏡との共同観測

▶ **ユニークな装置** – 可視・近赤外装置  
高分散分光  
高コントラストイメージング

1999- 広視野単色カメラ

2006- T40: 40cm シュミットカセグレン望遠鏡  
可視ファイバーエシェル分光器

2014- T60: 60cm カセグレン・クーデ望遠鏡  
可視・赤外高分散分光器, 偏光カメラ, etc.

2017(予定)- PLANETS: 1.8m グレゴリアン・クーデ望遠鏡  
可視・赤外高分散分光器, 偏光カメラ

JSPS 頭脳循環を加速するプログラム (2013-2015): 7700万円  
科研費基盤B一般、海外学術

ポインタ 20° 19'59.59" N 156° 31'21.16" W 高度 0m

Image NASA  
© 2008 Europa Technologies  
Image © 2008 TerraMetrics  
Image © 2008 DigitalGlobe  
ストリーミング 100%



T40



T60



PLANETS  
1.8m

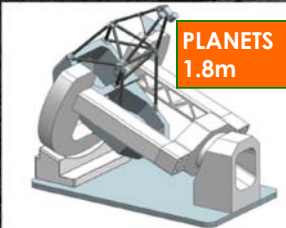
# ハレアカラ観測所 (標高3000m)



T40



T60



PLANETS  
1.8m



Faulkes North



Solar-C 0.5m



AEOS  
3.7m



Pan-Starrs 1.8m



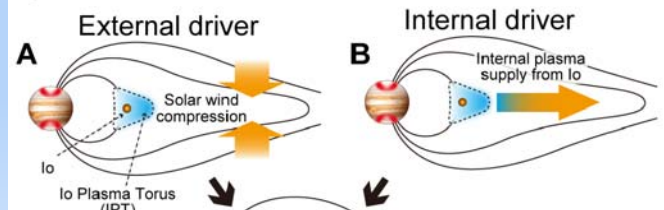
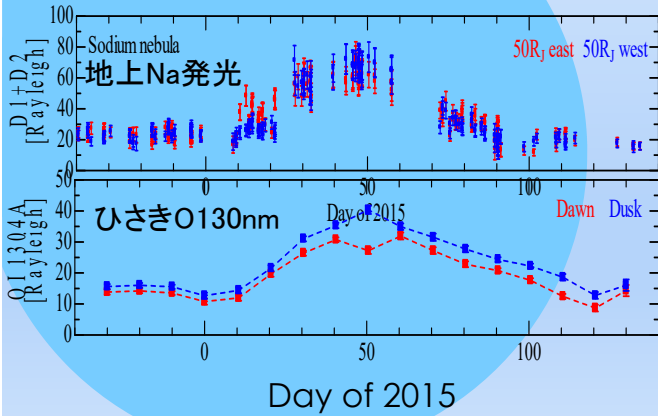
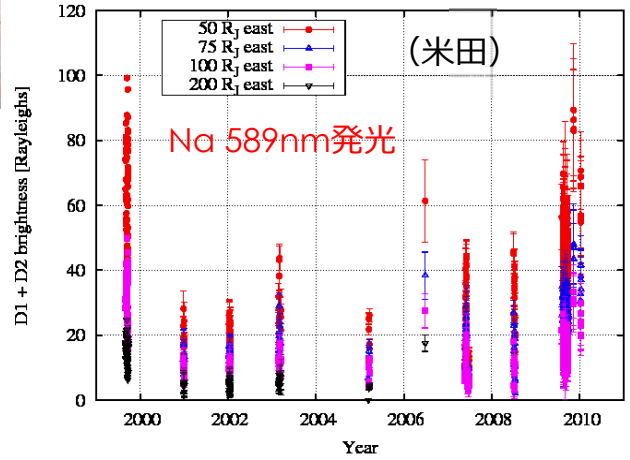
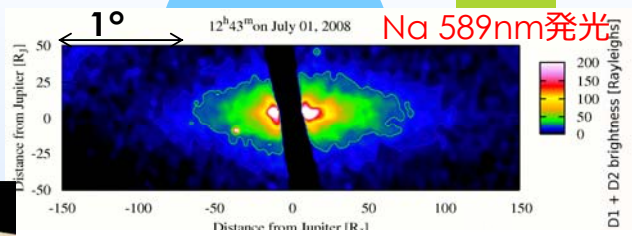
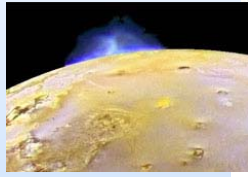
DKIST  
4m



# 1-1. T40

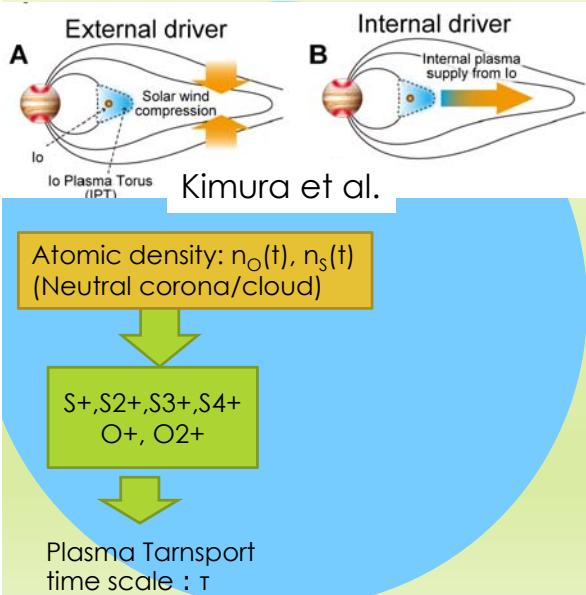
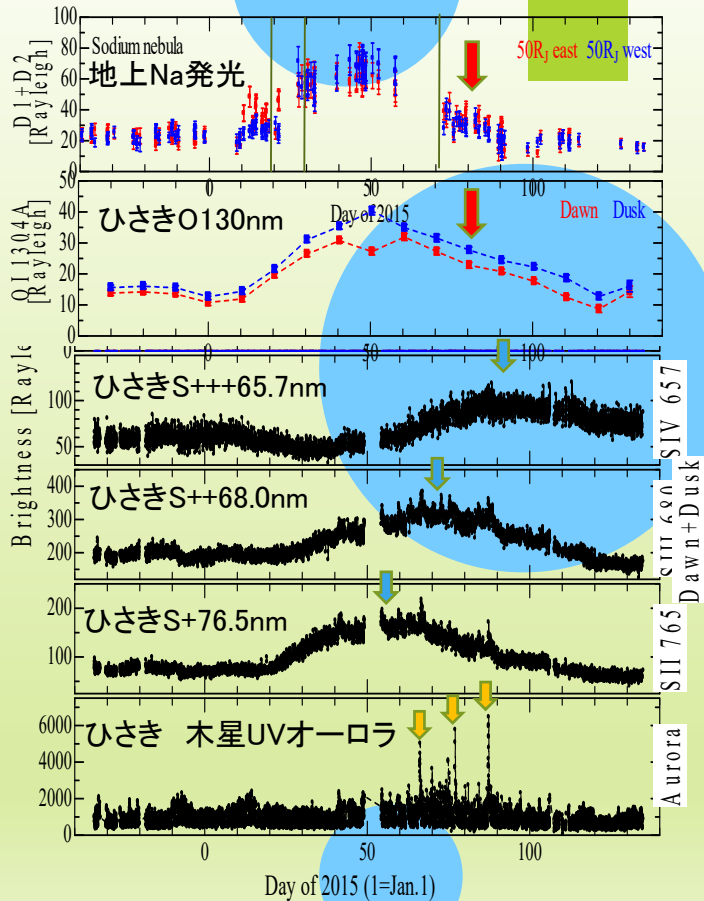
広視野イメージャー+ひさき  
(米田、鍵谷、土屋、古賀)

木星衛星イオ  
Na雲の発光

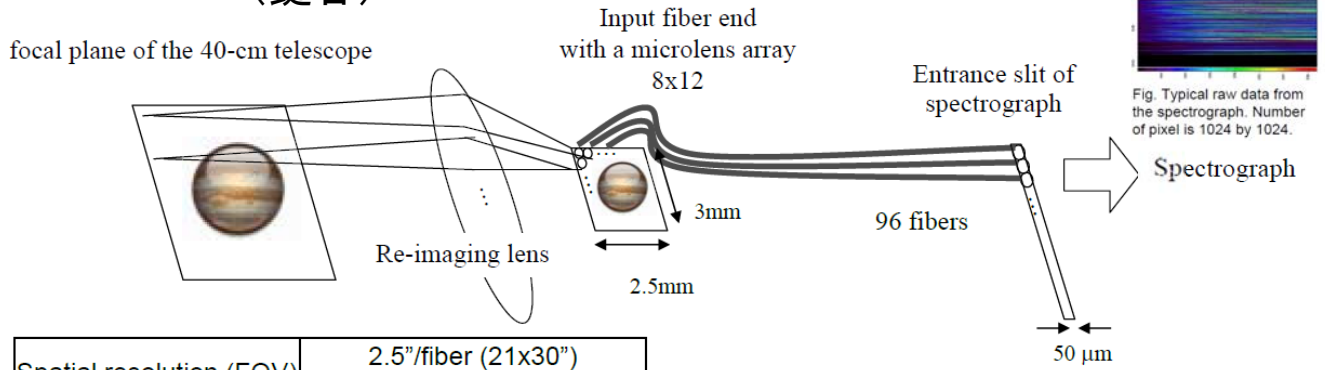


# 地上とひさき宇宙紫外望遠鏡 (土屋、米田、古賀)

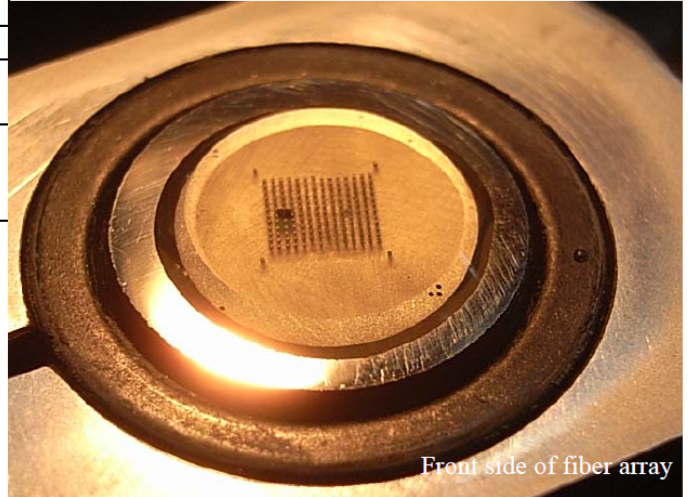
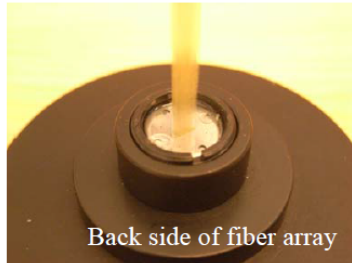
ひさき、HST紫外観測



# 1-2. T40 可視ファイバー・エシェル分光器 ( $\lambda/\Delta\lambda \sim 67,000$ ) (鍵谷)



Spatial resolution (FOV)	2.5"/fiber (21x30") 5.1"/fiber (41x61")
Spectral resolution	67,000
Wavelength	550 – 900 nm
Pre-disperser	590, 630, 670, (770, 900)
Observing target	Jupiter (SII, SIII), Mercury (Na, K), Saturn (OI), etc.



## 2. 東北大60cm望遠鏡 (T60)

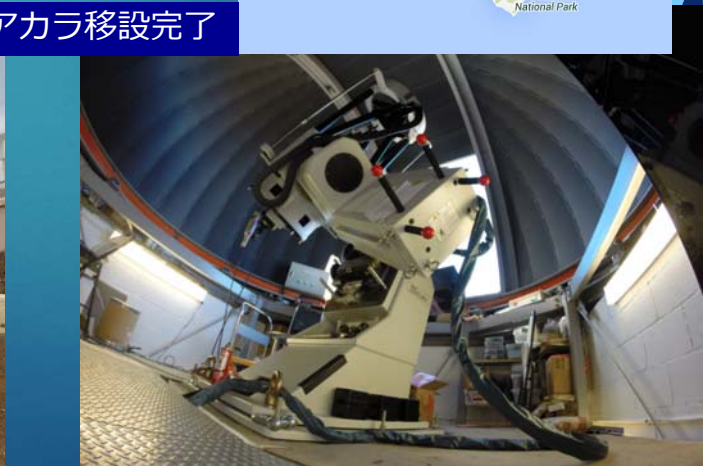
10



福島県飯舘村(2013年6月)



2014年9月 ハレアカラ移設完了



# ハレアカラT60の特徴

## ▶ ユニークな装置

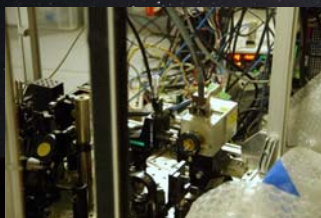
- (1) クーデ焦点に大型高分散分光器
- (2) 赤外高分散分光器
- (3) 赤道儀 – 偏光観測可能
- (4) 日本から遠隔制御



- (1) 可視高分散・中分散エシェル分光器・コロナグラフィメジャー (Vispec): (鍵谷, 小野)  
0.4–0.9 $\mu\text{m}$ , FOV $\sim 10'$  /  $\lambda/\delta\lambda \sim 50000, 3000$
- (2) 中間赤外レーザーヘテロダイン分光器 (MILAHl): (中川, 高見)  
8–10 $\mu\text{m}$ ,  $\lambda/\delta\lambda \sim 10^{6-7}$
- (3) 偏光イメージャー (DiPOL-2): (S. Berdyugina, 鍵谷, 前田)  
B, V, R 高精度偏光観測 (DoLP  $\sim 10^{-5-6}$ )

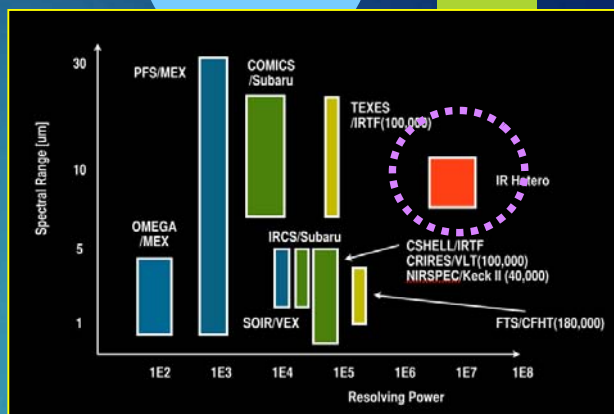
### [開発中またはゲスト装置]

- 近赤外(1-4 $\mu\text{m}$ ) エシェル分光器・イメージャー (ESPRIT)  
 $\lambda/d\lambda \sim 20,000$
- 中間赤外 (7-12 $\mu\text{m}$ ) エシェル分光器 (GIGMICS) 名古屋大  
 $\lambda/d\lambda \sim 40,000$
- 近赤外 (1-1.7 $\mu\text{m}$ ) エシェル分光器 京都大  
 $\lambda/d\lambda \sim 200,000$



## 2-1. 中間赤外ヘテロダイン分光器 (中川、高見) ( $\lambda/\Delta\lambda > 10^6$ )

- ▶ 惑星微量気体の高感度検出
- ▶ 温度と風速の遠隔探査(誤差 $\sim 10$  m/s &  $\sim 10\text{K}$ )
- ▶ 鉛直プロファイル推定(分解能 $\sim 5$  km)
- ▶ 有機分子・水系分子の検出
- ▶ 小型軽量 (飛翔体・気球搭載可能性)



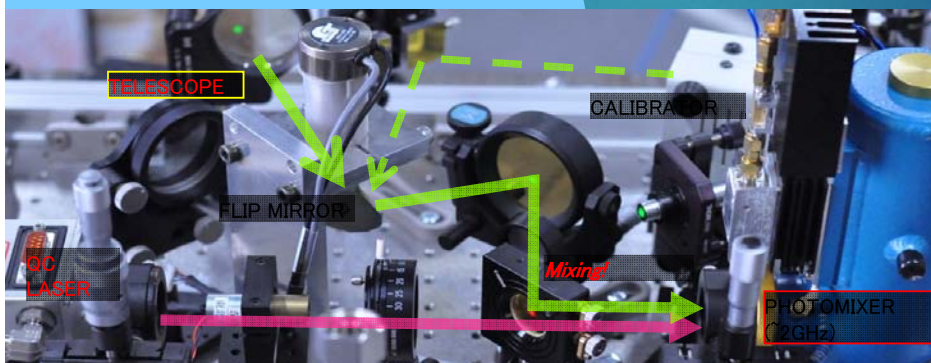
Beam Size (60cm case) Mars 15"

- 2.6" @ 7 $\mu\text{m}$
- 3.5" @ 10 $\mu\text{m}$

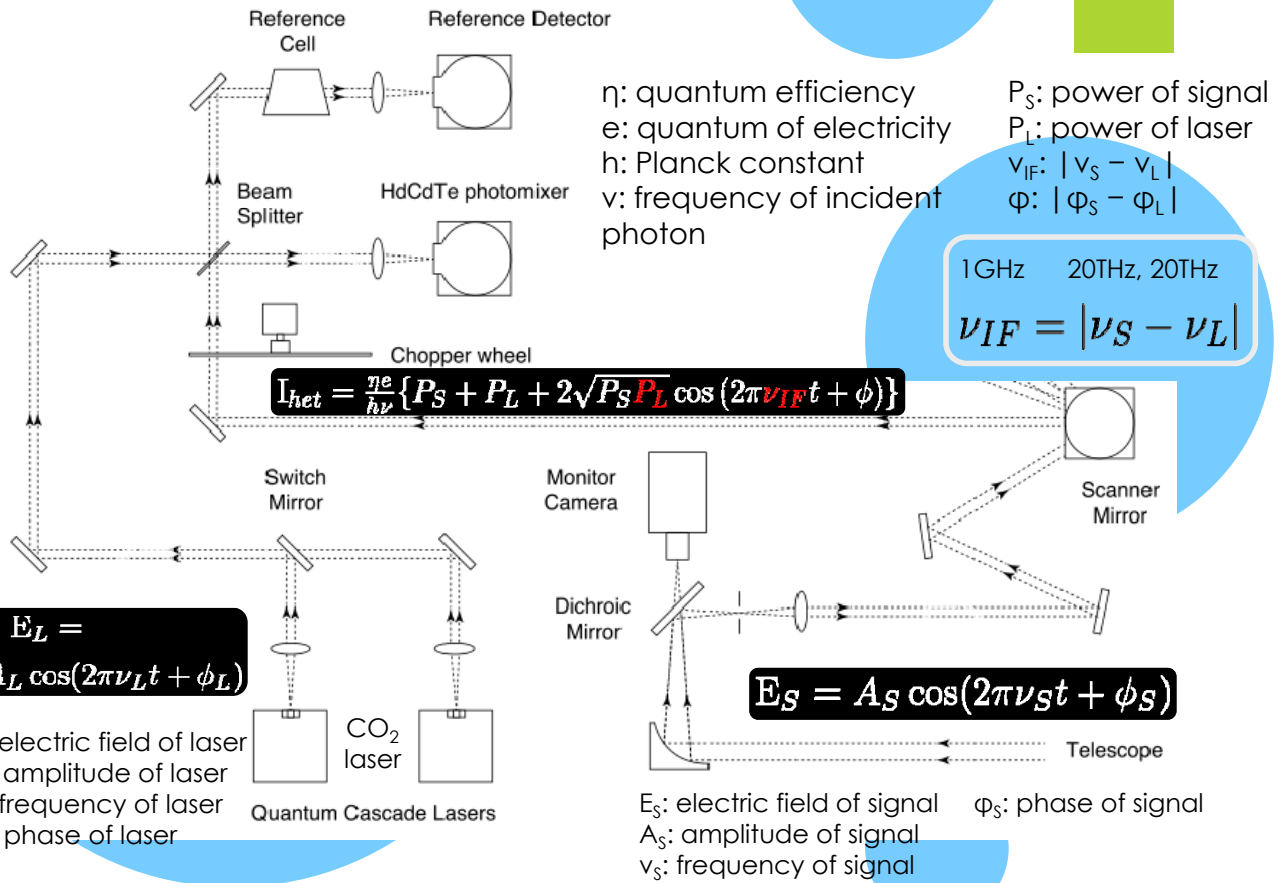


Venus

- FOV (sub-mm)
- FOV (MILAHl)

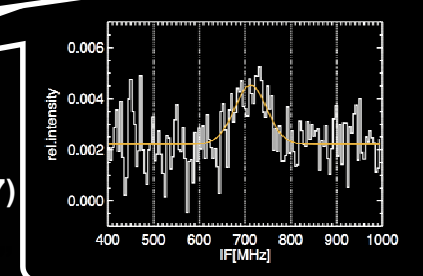
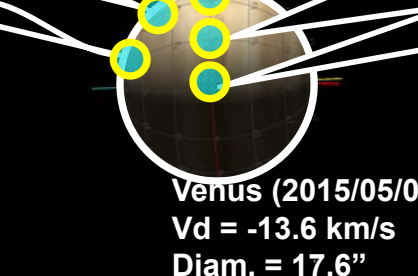
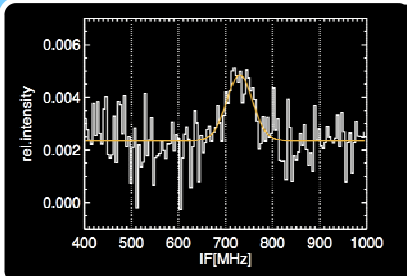
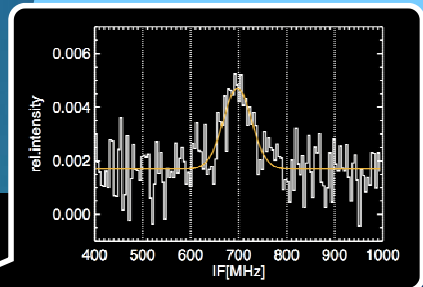
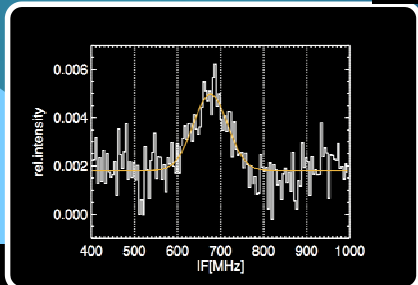
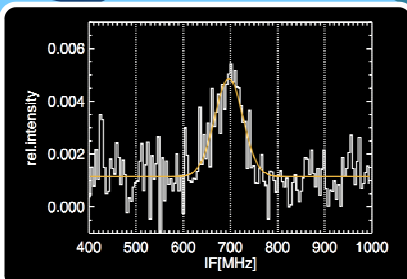
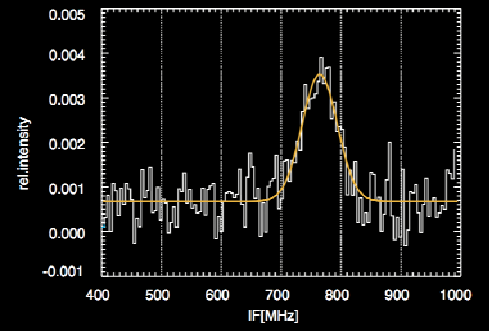


# 赤外ヘテロダイン分光器(MILAHI)



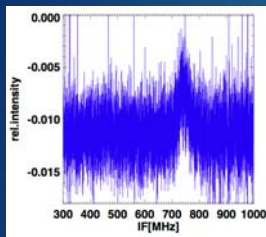
## 初期結果 金星の中間圏の観測 MIR CO<sub>2</sub> non-LTE 発光

**First detection by T60**  
 at 971.532 cm<sup>-1</sup> (2MHz res.)  
 on 28 Mar. 2015



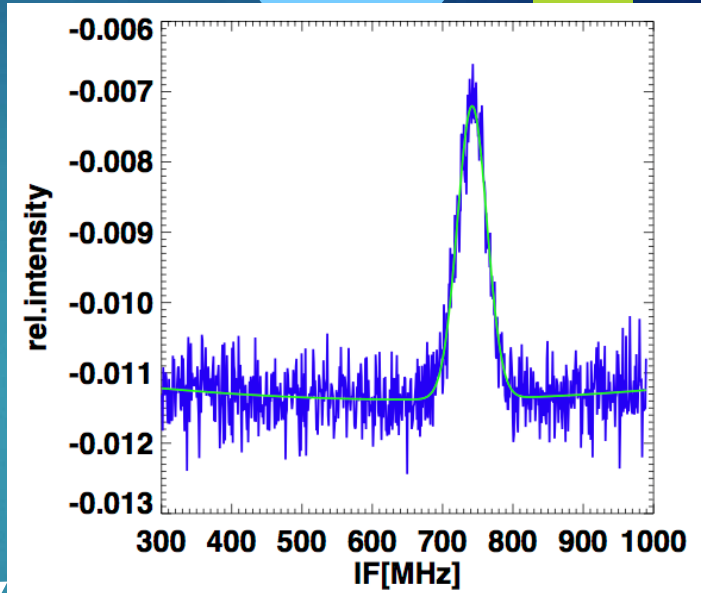
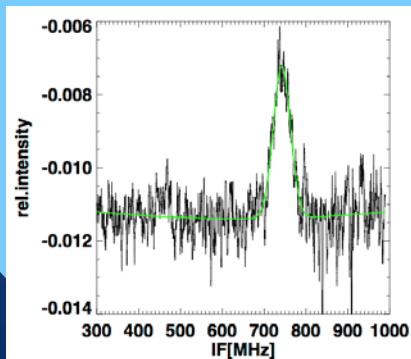
Venus (2015/05/07)  
 Vd = -13.6 km/s  
 Diam. = 17.6''

# ノイズと平均化



the number of data -  
16384

median: 50  
binning: 15  
(resolution:  
1MHz)

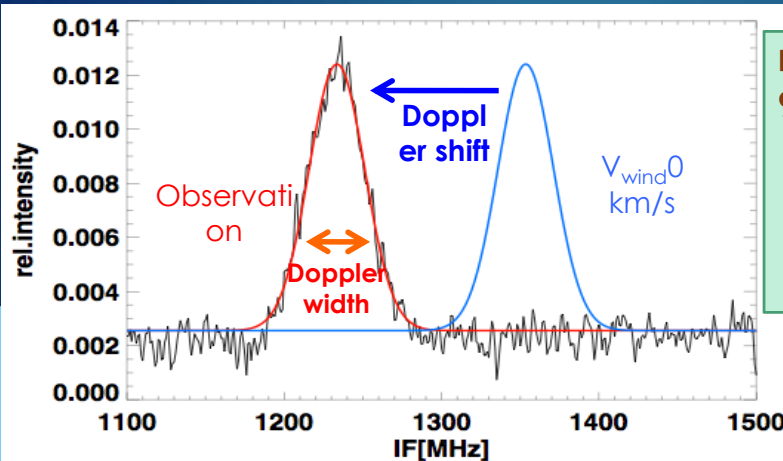


Noise reduction assuming integral time **40 min**

$$noise_{(40min)} = noise_{(20min)} \times \frac{20min}{40min}$$

# 温度と風速の見積もり

16



## Result

979.705421 cm<sup>-1</sup> [10R26]

温度 (± 35 K)

194 ≤ 230 ≤ 264 [K]

風速 (± 24 m/s)

46 ≤ 71 ≤ 95 [m/s](away)

The retrieval of wind velocity and temperature

$$\alpha_D = 2\nu_0 \left( \frac{2k_B T_{kin}}{mc^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

T<sub>kin</sub>: kinetic temperature  
m: molecular mass  
k<sub>B</sub>: Boltzmann constant  
α<sub>D</sub>: Doppler width  
ν<sub>0</sub>: frequency of CO<sub>2</sub> (0 km/s)

❖ Doppler effect of light (wind velocity)

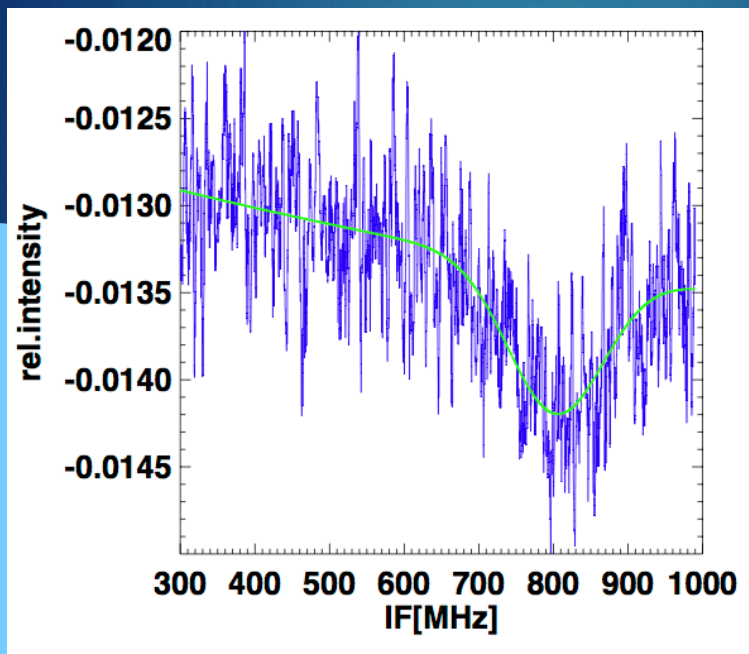
$$\nu_{obs} = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (V/c)^2}}{1 - (V/c)}$$

ν<sub>obs</sub>: frequency of observed line  
V: wind velocity  
c: velocity of light



# 吸収線の観測結果

17



Noise reduction

Integral time: 20 min → 40 min

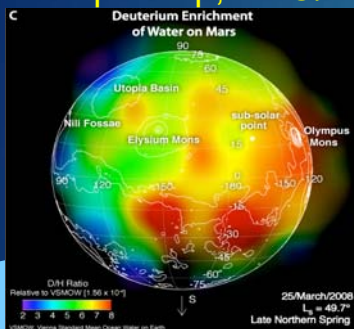


鉛直温度プロファイル  
のリトリーバル  
(今後)

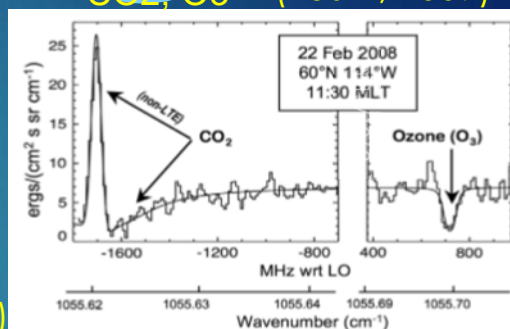
# 火星のヘテロダイン観測計画 (2016年2月~)

18

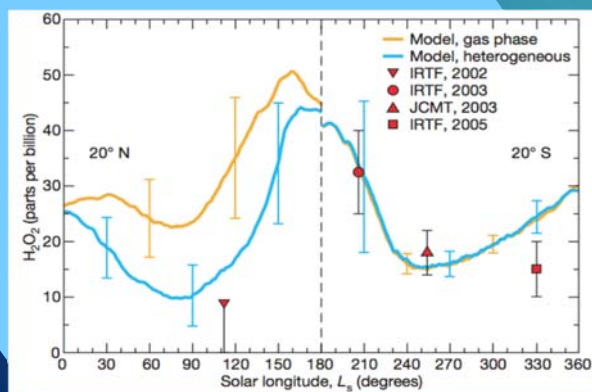
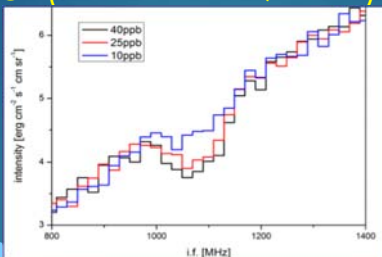
Isotope map, HDO/H<sub>2</sub>O (Villanueva+, 2008)



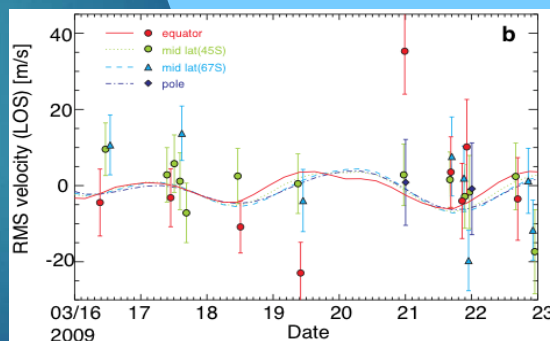
CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> (Fast+, 2009)



Detection of CH<sub>4</sub> (Sonnabend+, 2009)



Seasonal var. of oxidisor, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Lefevre+, 2009)



Mesospheric Wind and T (Nakagawa+, 2013)

# 1-2. 広ダイナミックレンジ コロナグラフィージャー (鍵谷)

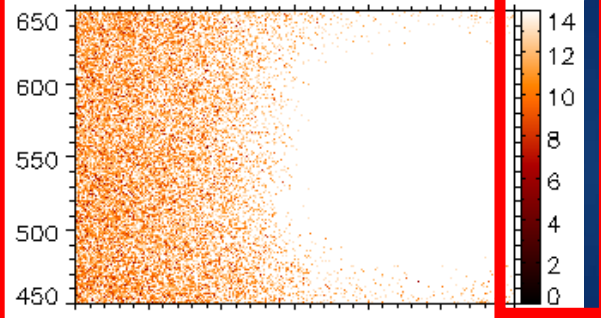
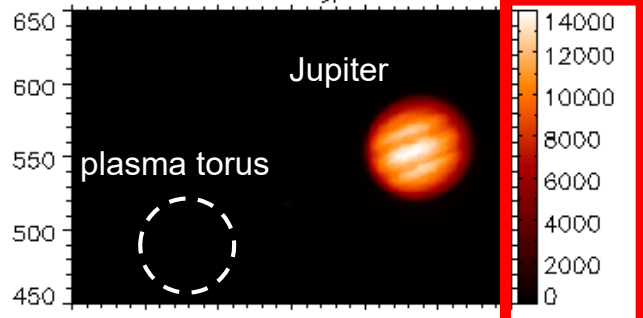
19

$$1R = 10^6 / 4\pi \text{ photons/cm}^2/\text{s}/\text{str}$$

$$= 3.17 \times 10^{-10} \text{ (W/m}^2/\text{sr) @ 500nm}$$

ターゲット	惑星ディスクからの距離	ターゲット明るさ	惑星ディスク明るさ	明るさの比 (obj/target)
木星イオ・硫黄プラズマトーラス	50-100"	500 R	50MR/nm	$10^5$
土星・エンケラドス酸素トーラス	5" from Rings 15" from disk	5 R	20 MR/nm (Ring) 15 MR/nm (Disk)	$>10^6$
金星・火星流出大気	10-100"	1-100 R	$>500/\text{nm MR}$	$>10^6$

ata\andor5\20141212\jp11\_l16731\_mask0.fits

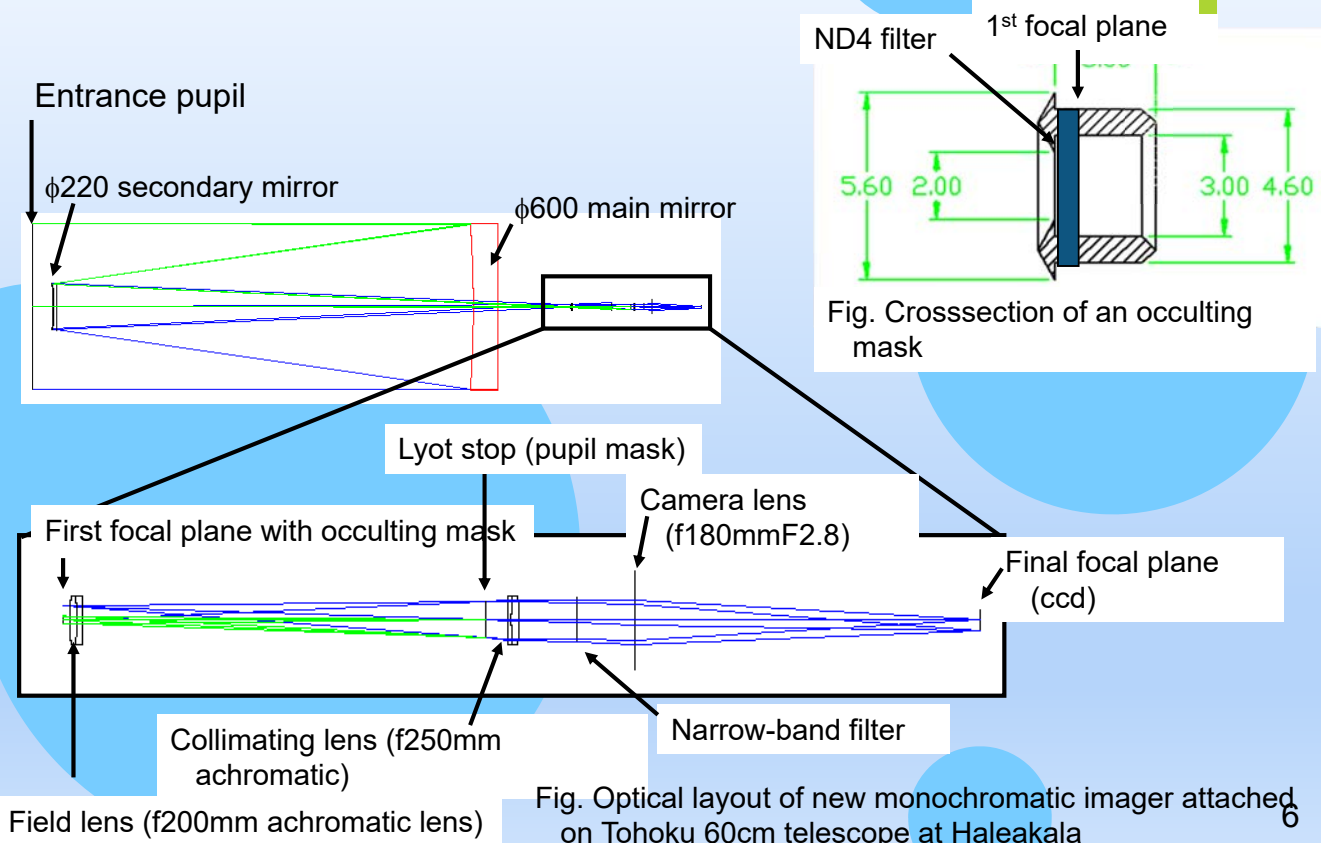


Count / 2-sec

3

# コロナグラフィージャー 光学レイアウト

20



6

# Lyot stopによる散乱光低減

21

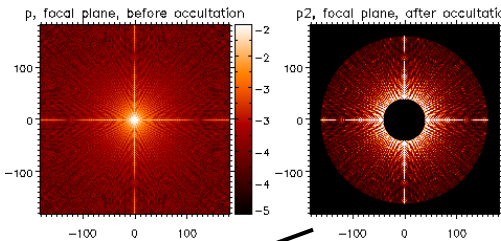
入射瞳イメージ



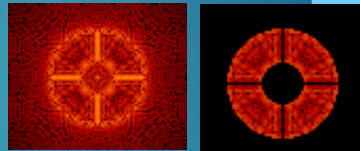
副鏡スパイダー(支持構造)が十字型の装置内散乱光を生み出し、迷光源となる。入射瞳に対応したLyot stopを瞳におくことで、装置内散乱光を低減させる。

FT

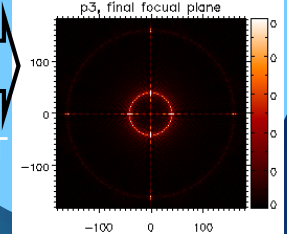
オカルティングマスク前後



Lyot stop前後



CCD上最終結像



IFT

FT

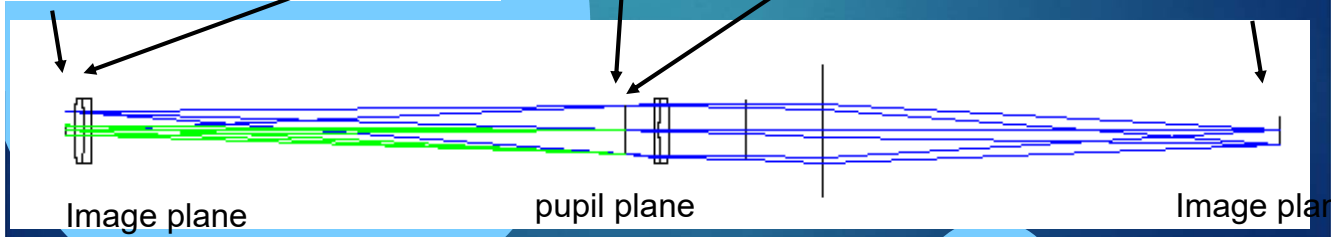
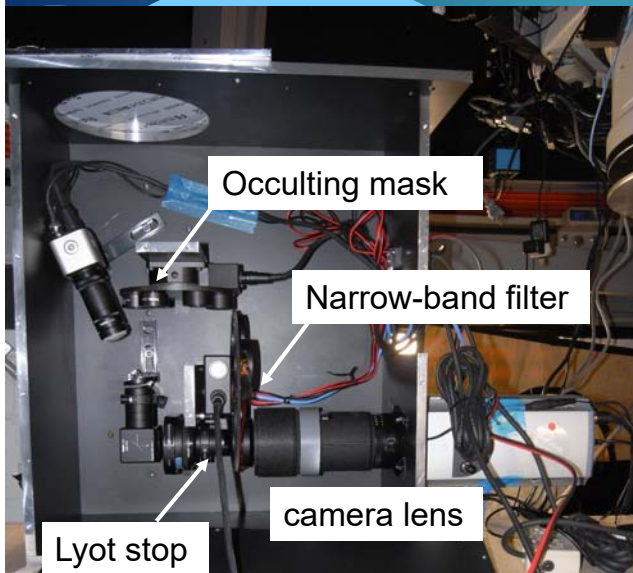
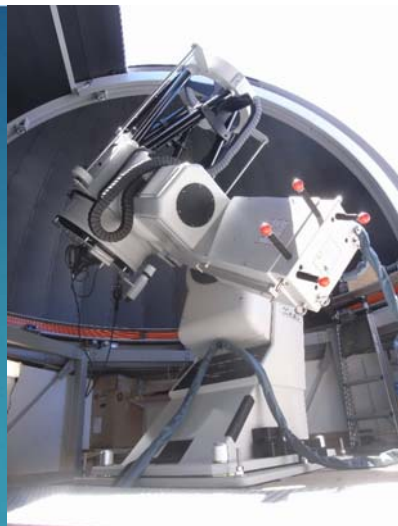


Fig. Model calculation of diffraction pattern using Lyot stop

10

22

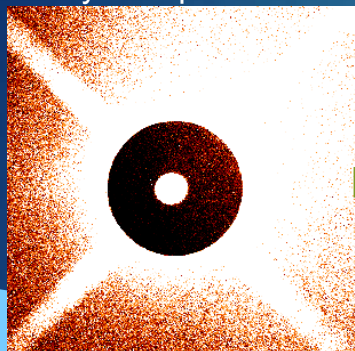
2015/12/9



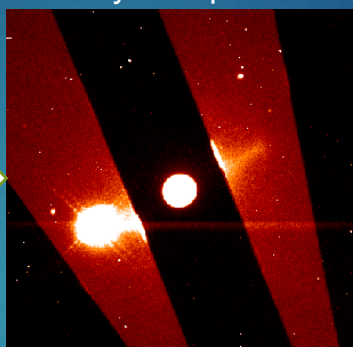
7

# コロナグラフの木星S+トールス観測例

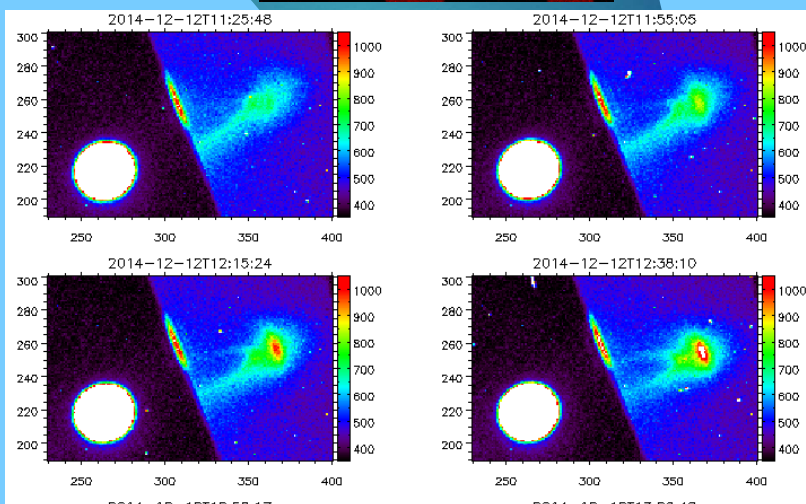
Lyot stopなし



Lyot stopあり



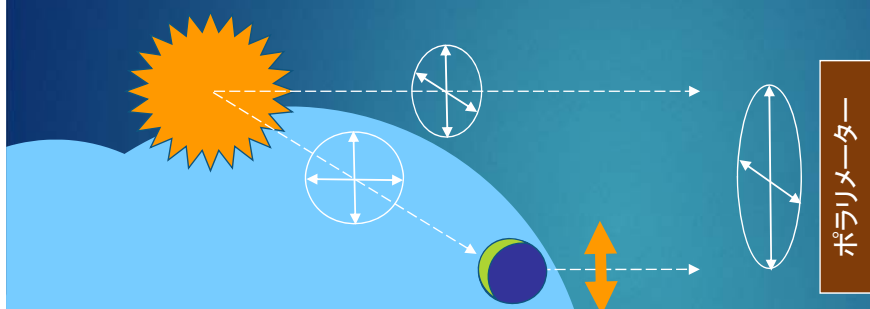
木星イオトールス(S+)  
671.6nm発光。カラースケールは左右同じ。  
オカルティングマスク形状は左は丸型、右は短冊型



# 1-3. 系外惑星偏光観測（鍵谷、前田）

## 系外惑星の反射光を検出

c.f.トランジット法、ドップラー法、直接検出



## Concept: 系外惑星の“大気散乱光”を主星光と一緒にとる

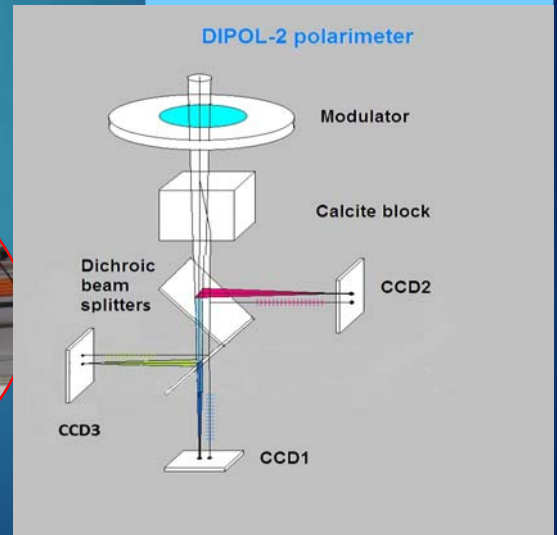
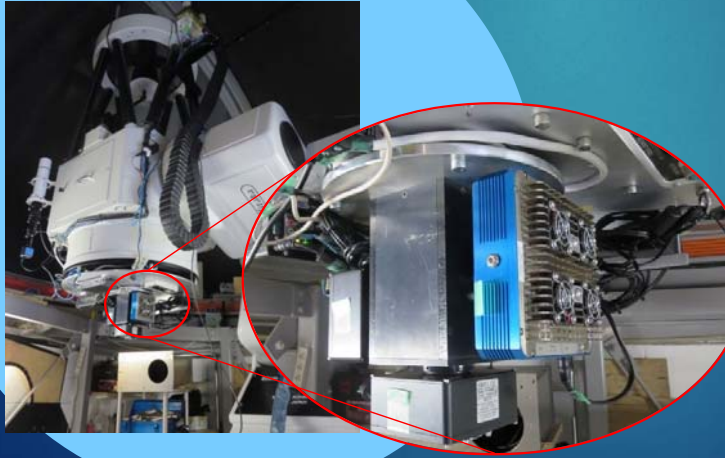
- ▶ 偏光: 散乱する面に直交 (90°) で最大  
系外惑星の公転で周期変動
- ▶ 主星からの光は '非偏光' (または系外惑星公転周期とは別の変動特性) を仮定

# T60/DiPOL2による系外惑星観測

25

B, V, Rの3チャンネル偏光カメラ (design by V. Pirola)

- ▶ 方解石ブロック + 45-deg. 回転 1/2 波長板  
‘電場2成分’の同時観測
- ▶ シンプルな光学系で低装置偏光  $< \sim 10^{-5}$
- ▶ 測定精度は光子数限界  $10^{10}$ 光子

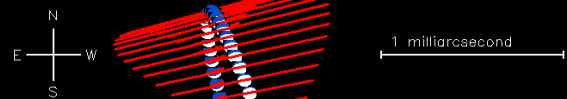
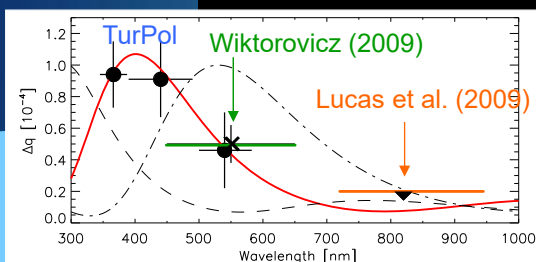


## 観測例: HD189733b

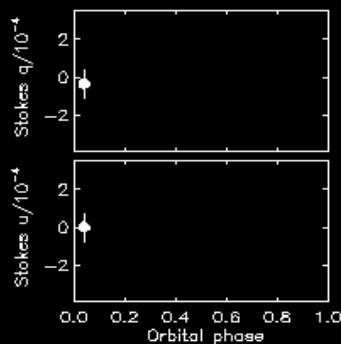
Hot Jupiter: period=2.2d,  $a = 0.03\text{AU}$ ,  $R \sim 1.5R_J$  [star: 7.7mag(V), K0/M4]

直線偏光度 =  $10^{-4}$  order

B,V,R強度はLambert-Rayleigh大気散乱モデルと整合的  
→ Rayleigh散乱が支配的?



Hot Jupiter:  
55 Cnc,  
tau Boo,  
HD179949,  
HD167771,  
HD139641



S.V.Berdyugina (2010)

2016/2/9

# 最近の成果

27

## < ターゲット >

- ▶ upsilon And: 3 hot Jupiters (4.1 mag)
- ▶ tau Boo: hot Jupiter (4.5 mag)
- [other candidates Wasp-3b (10.6mag), ...]

## < 解析結果 >

- ▶ 偏光度の測定精度: 59の無偏光標準星を計測  
 $1 \sim 2 \times 10^{-5}$  (1時間積分値)  
(フォトン数 $2 \times 10^8$ /2-s exposure in B & V band.  
10<sup>10</sup> フォトン by 768 画像)

## < 今年度実績 >

- ▶ DiPOL2/T60を用いて54晩実施。
- ▶ UH88(Mauna Kea) & WHT 4.2m (La Palma) も使用。

2015/12/9

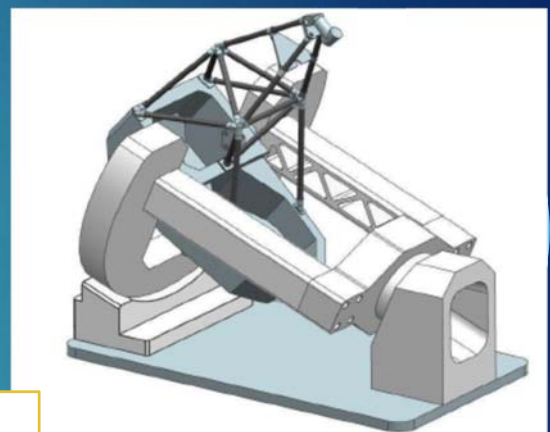


## 2.1 PLANETS (坂野井、岡野、他)

28

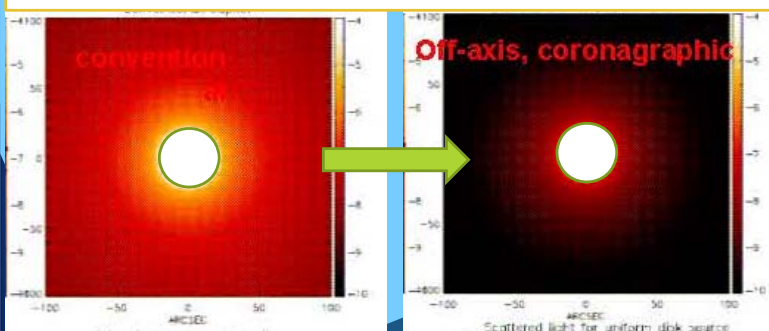
口径1.8-m非軸望遠鏡

- ハワイ大IfA, ドイツケーペンハウワー研ほかとの共同研究
- ハレアカラ山頂のUH既存建物を改築
- 2017年完成を目指す



通常望遠鏡

非軸望遠鏡 (PLANETS)



## ▶ 科学課題

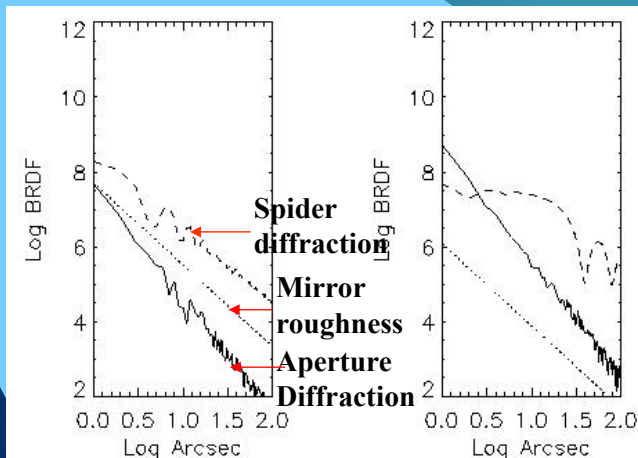
- ▶ 太陽系天体 惑星や小天体近傍の大気・プラズマ
- ▶ 系外惑星大気
- ▶ “Imaging” circumstellar environments

## ▶ 技術実証

- ▶ 世界最高レベルの低散乱光学系
- ▶ 観測好適地
- ▶ コロナグラフ系
- ▶ 高分散分光（ヘテロダイン、エシェル分光器）
- ▶ 偏光と分光偏光

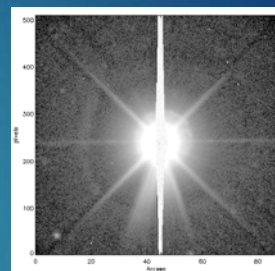
## ▶ 望遠鏡

- ▶ 回折（開口、スパイダー）
- ▶ ミラー表面粗さ・ダスト

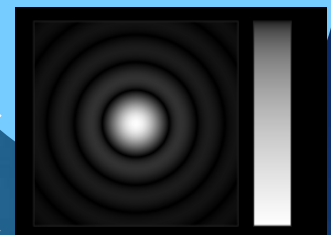


0.5m

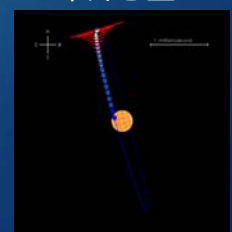
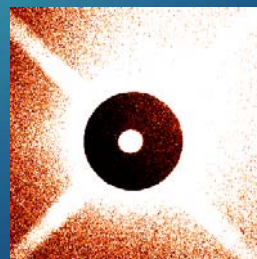
4.0m



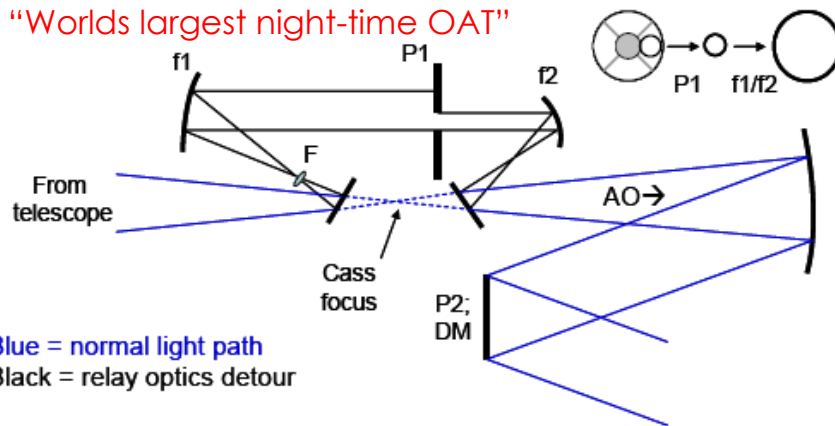
惑星近傍の微弱発光



系外惑星



"Worlds largest night-time OAT"



Blue = normal light path  
Black = relay optics detour

- ▶ パロマ-5mの一部を取り出した'OAT'1.5mで、より良好なストレール比を実現

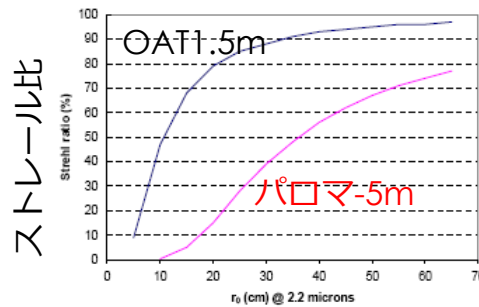
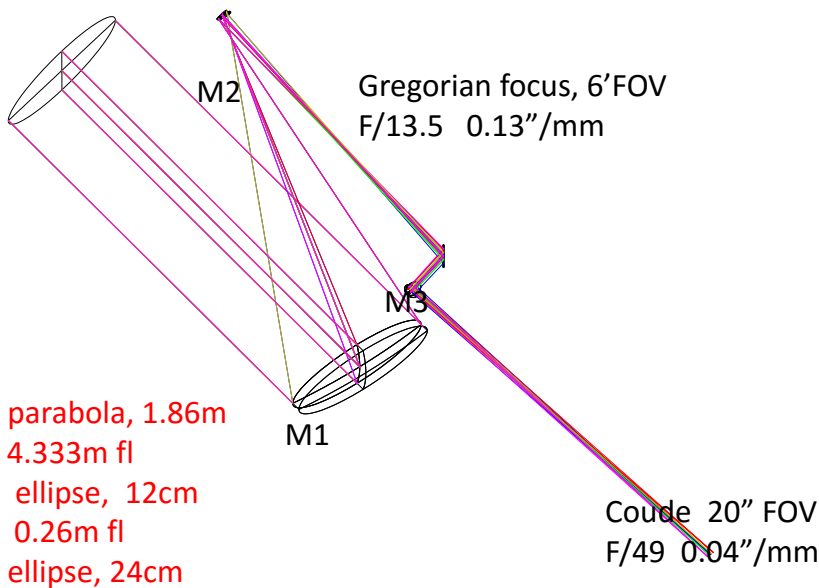


Fig. 1. Comparison of Strehl ratios obtainable with the full Palomar 200 inch telescope (5.08 m diameter; bottom curve) and a sub-aperture of diameter 1.5 m (top curve) for a 16 x 16 element corrector.

2015/12/9



(たぶん) 世界で最大の (\*夜間) 非軸望遠鏡  
(\*太陽望遠鏡を除く)

2015/12/9



# 1.8m 主鏡 (オハラ・クリアセラムZ-HS)

Φ = 1850mm, t=100mm

33



溶融炉  
(Dec. 2010)



ガラスブランク  
ロサンゼルス到着 (May 2011)



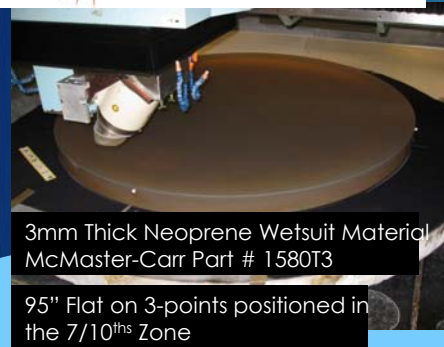
Harris/EXELISにて荒削り  
(July 2012)

Criteria	Specification
非軸鏡直径	1800 mm
放物面近軸半径	8.667 m, +0, - 1%
荒削り精度	10-20 μ RMS with a goal of 2-3 μ rms
表面研磨	400 grit surface finish or finer, maximum roughness
外端研磨	fine grinding
面精度	200 nm RMS maximum
端処理	must include safety pockets, fiducial and areas set aside for attachments

# 主鏡の現状

34

最終研磨にむけた形状測定と誤差解析



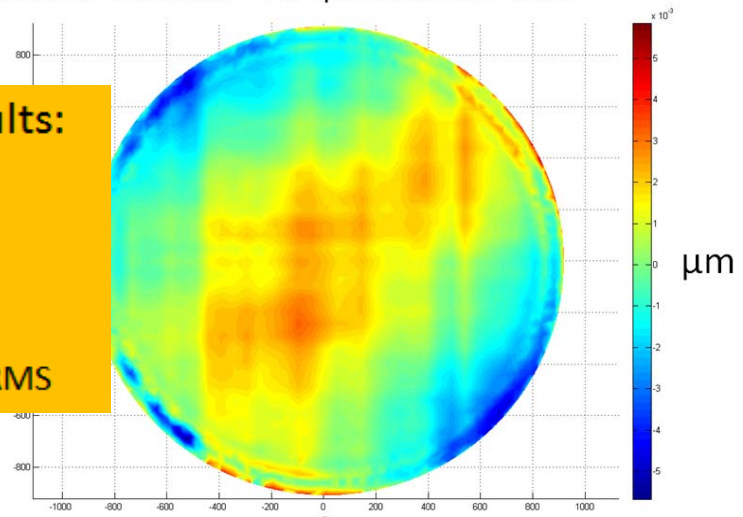
## Metrology Assessment

- Average of 2 Orientations Clipped to CA
- Generation Contract – All specifications met

### Profilometry results:

11.53 μm P-V  
1.45 μm RMS

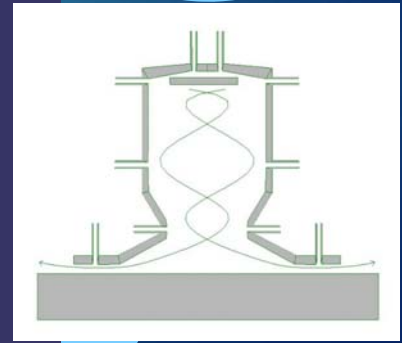
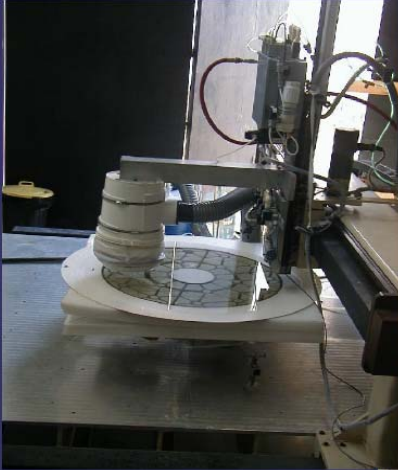
Specification 2.0 μm RMS



Harris/ITT  
 イオンビーム研磨  
 1回: rms=170 $\mu$ m  
 2回: rms=125nm  
 3回: rms=45nm  
 形状計測：SCOTSテスト

HyDraテクノロジー  
 流体研磨  $\lambda/100$   
 自前で形状計測

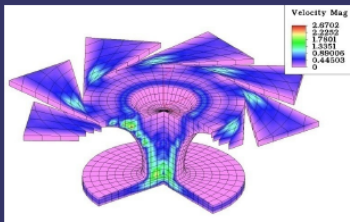
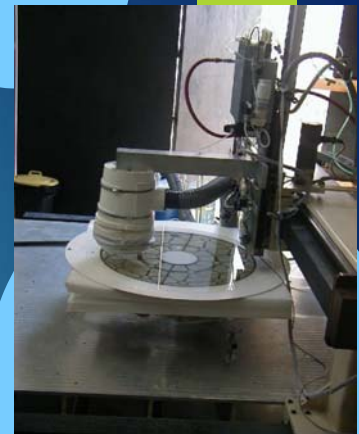
### Pollution control



Confinement of atomized polisher particles.  
 . Air washer – polisher recovering system.  
 . Immersion polishing.  
 . Noise level: open issue.

## HyDRa (Instituto de Astronomía, UNAM, Mexico) の特徴

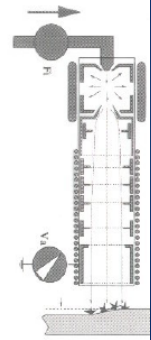
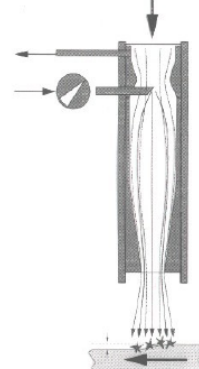
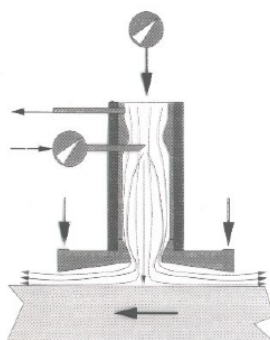
- ・非磁性流体：水にアルミナの粒子(粒径もパラメータ)を混ぜたもの)を使う
- ・肝はノズルの構造で磨く面に平行の渦状高速噴流で研磨する

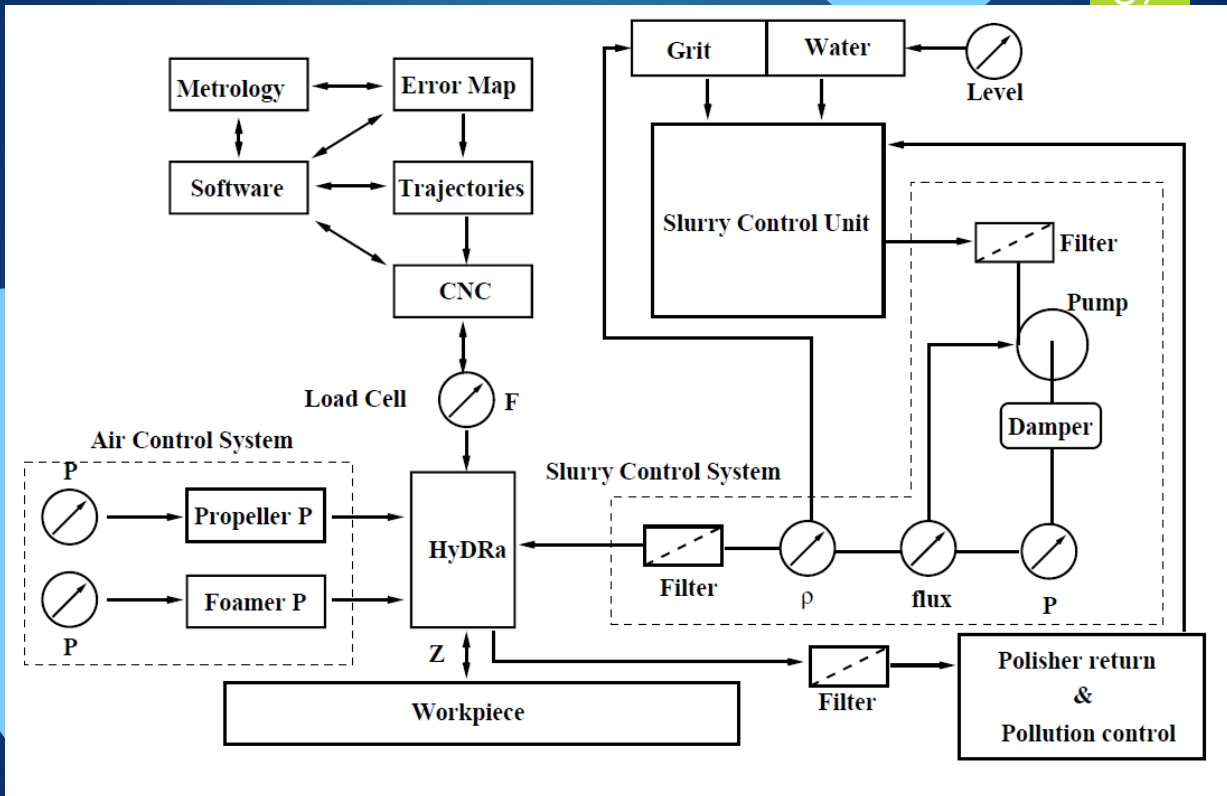


HyDRa

Fluid Jet

Ion Beam



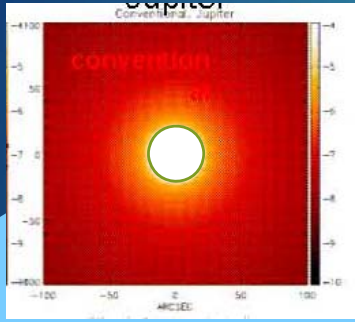


(Ruiz, E., et al. (2013), Vol. 21, No. 17, DOI:10.1364/OE.21.020334, OPTICS EXPRESS 20334)

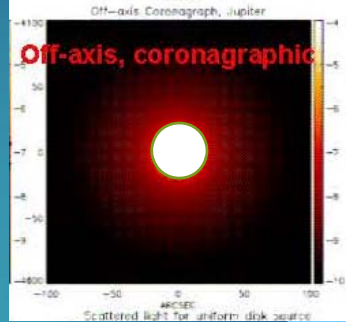


- ▶ 研磨レートは  $8.2\text{mm}^3/\text{hr}$
- ▶ 主鏡研磨には  $2500\text{ m}^3$  必要なので、HyDRa時間で280時間必要
- ▶ 具体的な研磨方法
  - ▶ メキシコUNAM[流体研磨]とカナダDynamic Structures Ltd. (DSL)[ロボットアーム]の技術を用いる。
  - ▶ マウイ・カフルイの会社（光学研磨）HnuとDSLが共同で新しい会社を立ち上げて、HnuにHyDra設備一式（ロボットアーム1台と光学検査タワー）を設置し、主鏡の仕上研磨を行うことで合意。
  - ▶ 主鏡はHarris/ITTからHnuへ直接送られる。

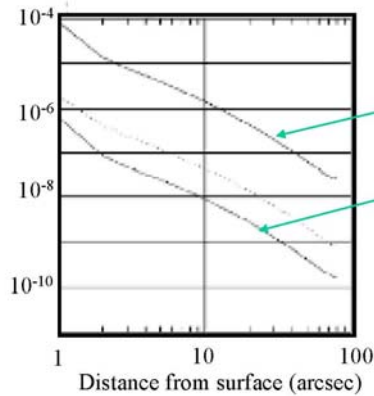
通常望遠鏡+コロナグラフ



非軸望遠鏡+コロナグラフ (PLANETS)



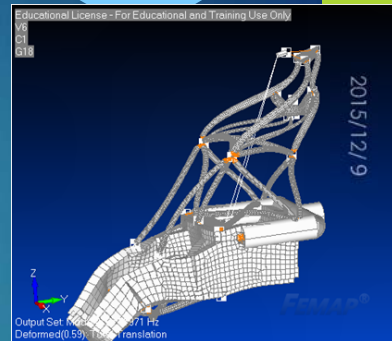
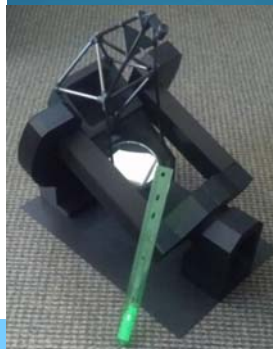
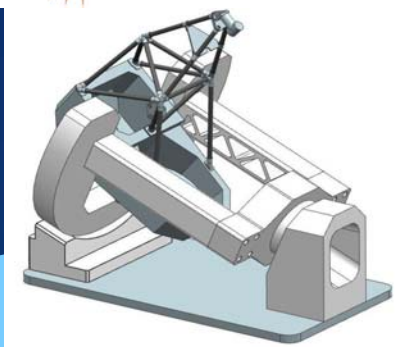
Scattered light from uniform disk source



通常望遠鏡

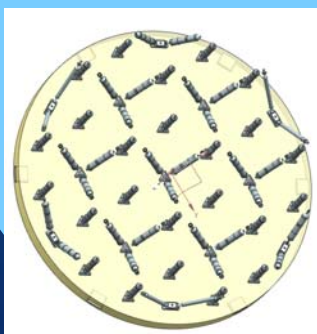
PLANETS望遠鏡

2015/12/9

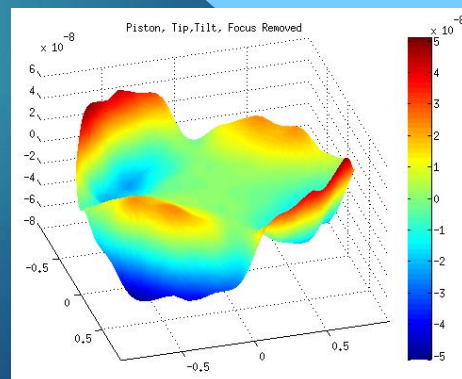


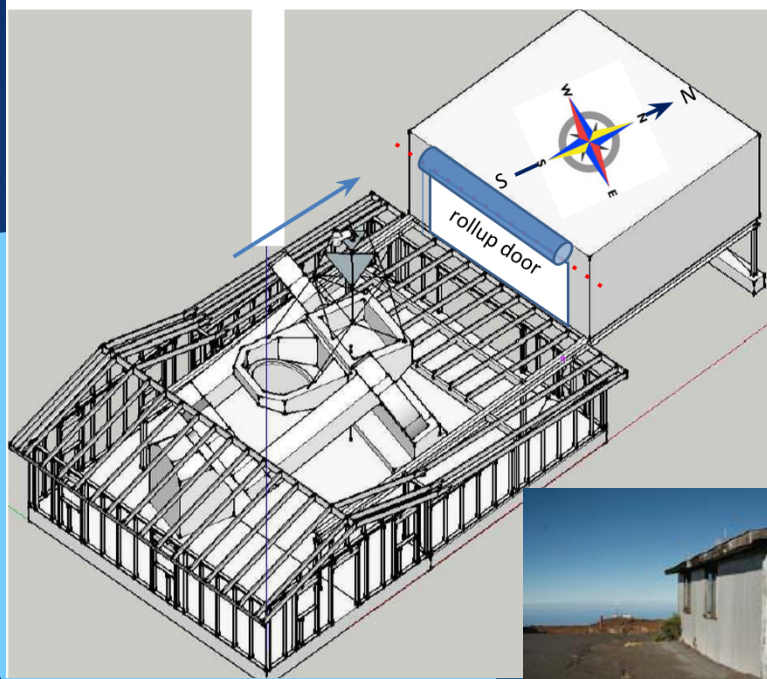
風による構造解析：50Hzより高周波数の振動特性

合計51個のロッドアクチエータ



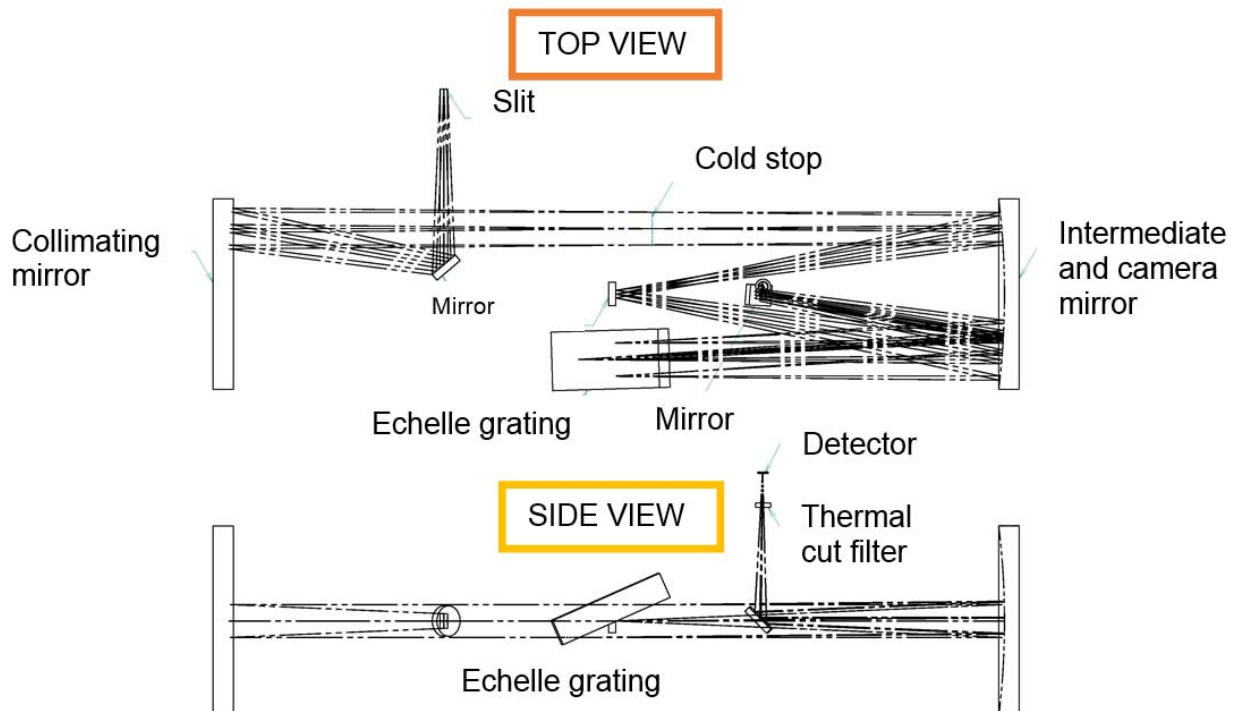
Example Surface Output





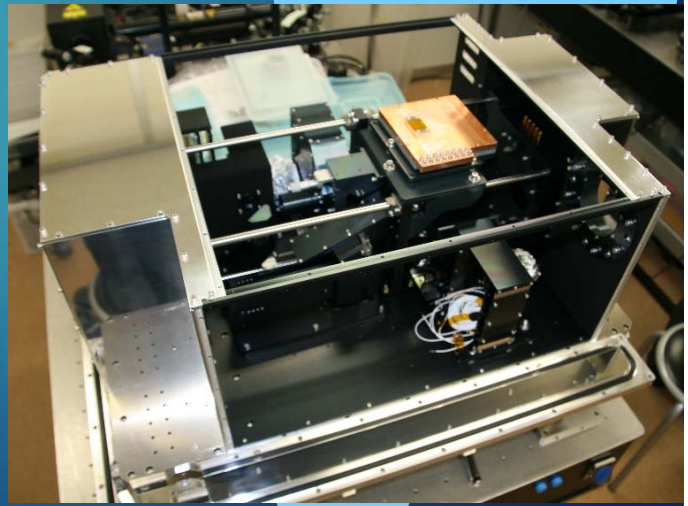
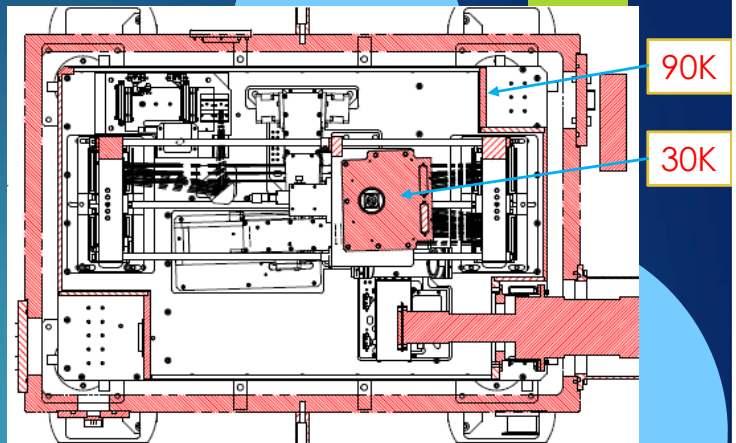
Univ. Chicago Neutron Observatory

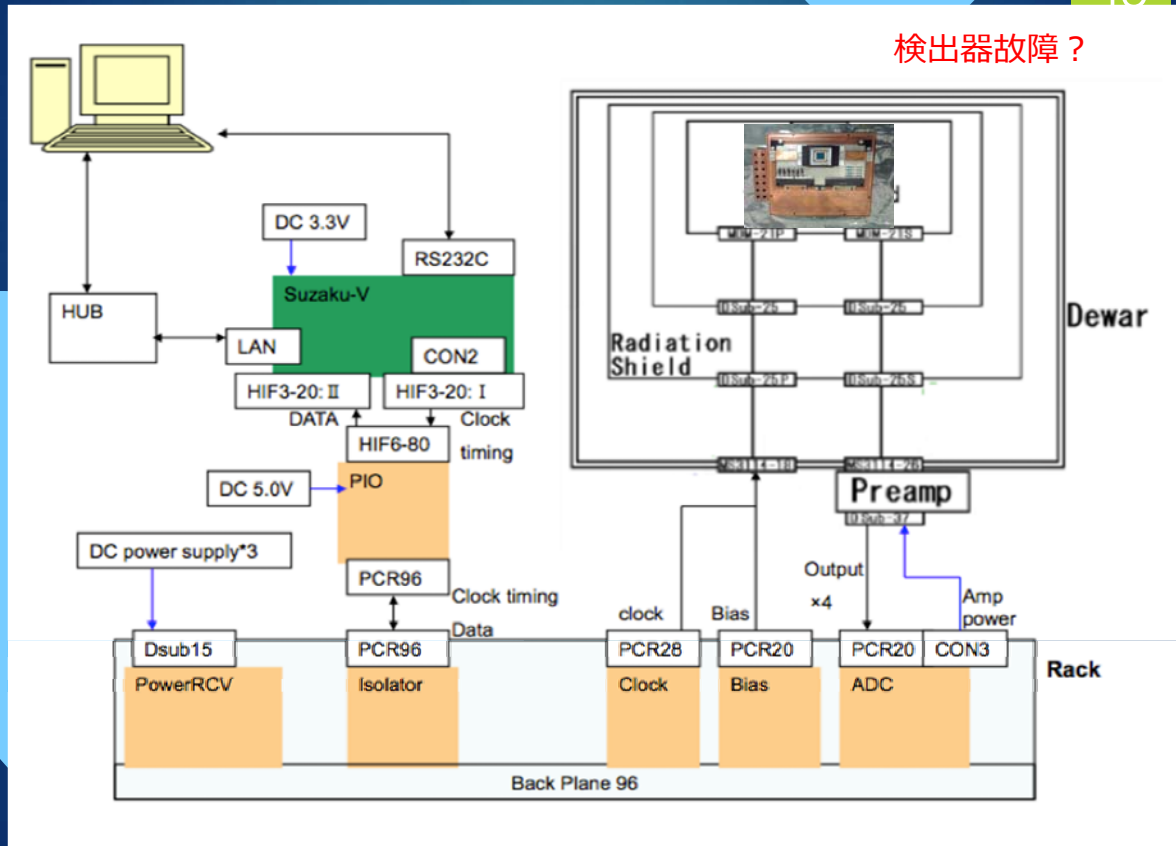
## 2-2.赤外エシエル分光器 (ESPRIT)の開発 (坂野井、他)



# ESPRIT諸元表

Parameter	Value
検出器	レイセオン InSb 256x256(プレートスケール0.3"arcsec/pix)
波長分解能	~20,000
入射F値	F12
スリット・開口	スペクトルモード : スリット長50'' (5.4mm) イメージモード: 80''開口
グレーティング	リチャードソン#53*453 : ブレーズ角 71°, 31.6 gr/mm, サイズW=130 x D=23 mm
グレーティング駆動機構	角度範囲 65°- 80°(1 - 4 μm) 安定度 1'' / 5min 真空ピコ モータによる駆動
コリメータ・カメラミラー	f= 270mm
コールドストップ	直径 22.5mm (ビーム系)
フィルターターレット	8フィルタ/段、2段、真空モータ駆動
サーマルカットフィルタ	4μm カット (コーニングC9574)
温度	30K (検出器) , 90K (ラジエーションシールド)
冷凍機	ヘリウムGMサイクル・住重SRDK-408S-F50
サイズ・重量	~800x500x400mm・~150kg





## おわりに：共同研究ご興味ある方はぜひお願いします

東大  
立教大  
九州国際大  
国立天文台  
広島大学  
名古屋大  
京都大  
京都産業大  
千葉工大



ハワイ大  
コロラド大  
JPL  
ケーペンハウ  
ワー研  
ケルン大  
パリ天文台  
レスター大



マウナケア：すばる 8m, IRTF 3m



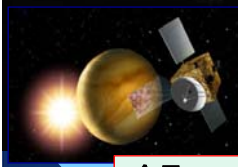
ひさき・EXCEED  
[EUV 宇宙望遠鏡]

岡山、飛騨、京都 3.8m

飯館30m電波アン  
テナ



アタカマ  
東大：Mini-TAO,  
TAO 6.5m



[金星]  
あかつき  
(2015-)



[火星]  
Mars Express, MAVEN  
ExoMars / TGO (2017-)  
火星サンプルリターン

[木星]  
Juno (2016-)  
JUICE (2030-)

