

JSPS 頭脳循環プログラム「ハワイ惑星専用望遠鏡を核とした惑星プラズマ・大気研究変動の国際連携強化」に基づく研究成果

Summary of JSPS program on international collaboration for planetary plasma and atmospheric dynamics research based on Hawaiian planetary telescopes

坂野井健、鍵谷将人、中川広務、寺田直樹、黒田剛史、笠羽康正、小原隆博、三澤浩昭、土屋史紀（東北大学・大学院理学研究科）

T. Sakanoi, M. Kagitani, H. Nakagawa, N. Terada, T. Kuroda, Y. Kasaba, T. Obara, H. Misawa, F. Tsuchiya (Graduate school of Science, Tohoku University)

<Background> Understanding a variety of planetary atmosphere and plasma environments is important not only to clarify their own phenomena but also to examine universal planetary atmospheric environment in the past, present and the future.

<Aim> In this study, we carry out the observation and modeling studies as international collaborations to promote four younger scientists responsible for the next generation planetary study with world class field-of-view and capability.

<Promotion of young scientists> Associate professors Masato Kagitani and Hiromu Nakagawa stayed at Institute for Astronomy, Maui, Hawaii University for more than 1 year in total, and carried out the construction of 60-cm telescope facility at the Haleakala summit, installed the instruments on the telescope and obtained the spectroscopic data of Jupiter, Saturn, Venus and Mars. Assistant professor Terada Naoki stayed at Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales and (LAMOS) and an associate professor Takeshi Kuroda stayed at Max Planck Institute for Solar System Research (MPS) for the period more than 1 year in total, respectively, to develop a cross scale coupling model from the bottom to upper atmospheres in the planetary system.

<Result and Summary> We manufactured our own 60cm telescope facility at Haleakala summit, one of the best place in the world for astronomy, and started unique monitoring observations of planetary atmospheres, such as Jupiter and its satellite Io, Saturn, Venus and Mars, using high-resolution spectrometers. In addition, we succeeded to develop high-resolution and accurate cross-scale coupling models for planetary atmospheres. We are now having roles on international big projects, such as PLANETS, TAO, TMT projects and the future spacecraft missions like Juno, JUICE, MAVEN etc. This work is supported by the JSPS program: Promotion of the strategic research program for overseas assignment of young scientists and international collaborations “Intensification of international collaborations for planetary plasma and atmospheric dynamics research based on the Hawaiian planetary telescopes.”

JSPS頭脳循環プログラム

「ハワイ惑星専用望遠鏡を核とした惑星プラズマ・大気研究変動の国際連携強化」に基づく研究成果

Summary of JSPS program on international collaboration for planetary plasma and atmospheric dynamics research based on Hawaiian planetary telescopes

T. Sakanoi, M. Kagitani, H. Nakagawa, N. Terada, T. Kuroda  
Y. Kasaba, T. Obara, H. Misawa, and F. Tsuchiya  
(Tohoku Univ.)



第17回惑星圏研究会 Symposium on Planetary Science 2016 in Sendai  
場所: 東北大学青葉記念会館 日時: 2016年2月22-24日

計画概要

本研究は、下記の観測と理論の両輪における国際共同研究を推進する。

東北大学惑星プラズマ・大気研究センターならびに地球物理学専攻と、ハワイ大の天文学研究施設(以下IfA)との、ユニークな共同観測研究と先端装置開発の連携強化。

東北大学と、フランス国立科学センター・大気環境宇宙観測研究所(以下LATMOS)及びマックスプランク太陽系研究所(以下MPS)との理論研究の連携強化。

これにより、惑星プラズマ・大気研究の次世代を担う、世界水準の視野と実力をもつ人材を育成する。

さらに、惑星プラズマ・大気変動プロセスの一貫システマ的研究を可能とする国際研究拠点の確立を加速する。



メンバー体制

氏名	所属機関	所属部署	職名	専門分野	
坂野井 健	東北大学	大学院理学研究科	准教授	惑星超高層大気物理学	
担当研究者	菅羽 康正	東北大学	大学院理学研究科	教授	太陽系電波・赤外線科学
担当研究者	三澤 浩昭	東北大学	大学院理学研究科	准教授	惑星電波天文学
担当研究者	土屋 史紀	東北大学	大学院理学研究科	助教	惑星超高層大気物理学
担当研究者	小原 隆博	東北大学	大学院理学研究科	教授	惑星超高層大気物理学

受け入れ先の研究機関	氏名	職名	主な役割
米国・ハワイ大学天文学研究施設 (IfA)	J. Kuhn博士	教授	・ IfA管理のハワイ望遠鏡群による観測時間の提供と実験設備提供 ・ 機器開発ならびに将来計画の推進
フランス・国立科学センター大気環境宇宙観測研究所 (LATMOS)	F. Leblanc博士	研究員	・ 領域結合モデルの統合開発を指揮 ・ 火星のモデルと地上・探査機観測データとの比較
ドイツ・マックスプランク太陽系研究所 (MPS)	P. Hartogh博士	科学スタッフ	・ MPS側の受け入れ態勢をコーディネート
ドイツ・マックスプランク太陽系研究所 (MPS)	A. S. Medvedev博士	科学スタッフ	・ 火星・木星大気の大気波動・化学過程を含む大規模循環モデルの開発

惑星プラズマ・大気変動プロセスの一貫システマ的研究の意義

- 多様な惑星大気・プラズマ環境の理解は、そののみの興味にとどまらず、種々環境の大気・プラズマ過程の解明により、地球大気環境や普遍的惑星大気環境の現在・未来の理解につながる。
- 近年の光学・電波リモートセンシング観測から、惑星大気・プラズマ現象の変動が明らかになってきたが、観測量が限定的。定量的な理解のためには、観測と理論モデル・シミュレーションとの統合アプローチによる一貫システマ的研究が必要である。



課題1. 惑星プラズマ・大気結合の観測

若手研究者(鍵谷将人助教)をIfAに派遣

- 東北大とIfA・Kuhn博士を核とする国際連携により、ハワイ・マウイ島山頂観測拠点において40cm望遠鏡を連続運用し、巨大惑星のプラズマ・大気変動の観測研究を推進
- 新たな60cm望遠鏡と先端赤外線観測装置による、世界唯一の継続観測拠点の構築
- Sprint-A衛星やハッブル望遠鏡ならびに地上大型望遠鏡との国際共同観測に長期データを提供

**巨大惑星・木星の観測意義**

木星本体の巨大オーロラや、衛星イオの火山ガス噴出と磁気圏内への拡散、強力なプラズマ加速機構など、様々な時間スケールの実験現象の理解

(上段) 衛星イオ由来ナトリウムガス分布(中段)木星イオ火山噴出・イオン分布(下段)木星オーロラと風速分布。

**IfAの有する世界最高観測地での自前の観測拠点**

標高3065m、晴天率約7割のマウイ・ハレアカラ山頂の観測拠点を連続運用。さらに、60cm望遠鏡施設を新たに設置。

ハレアカラ山頂天文台群

(左) 標有40cm望遠鏡(右) 新たに日本より移設された60cm望遠鏡

**国際連携による将来発展**

先端赤外線分光器の開発と60cm望遠鏡により、世界唯一の木星赤外線連続観測拠点の構築

赤外線分光器開発

Sprint-A衛星やハッブル望遠鏡との国際共同観測に貢献ならびにIfAとの種々大型2m望遠鏡計画への参画

Sprint-A衛星による惑星観測

課題2. 惑星大気変動の観測

若手研究者(中川広務助教)をIfAに派遣

- 東北大超高分解能分光装置を、IfA・Kuhn博士らと連携しハワイ連続観測拠点に実装
- 生命・地殻活動の証拠たる火星メタン及び関連分子の精密計測を実現
- 生命を維持する地球型惑星の大気環境とその進化の理解に貢献

**赤外線世界一の波長分解能が必要**

既存測器では惑星からの信号と地球大気吸収との分離が不可能。本装置の波長分解能により初めて分離可能になるため、微量大気検出に最適。

既存最高性能の装置による火星メタン観測例 [1]

**自前望遠鏡でしか成し得ない十分な連続観測**

予測される激しい時間変化を捉え起源解明の為に、連続観測が必須。

発生したメタンが数ヶ月で消滅する熱帯計測事例 [2]

**IfAを核とする国際連携による複合同時観測**

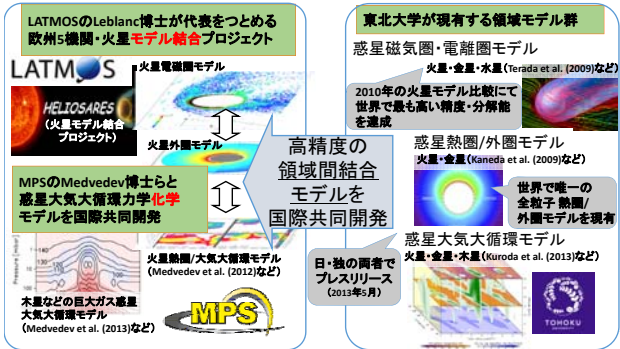
世界に3つしかない赤外線ヘテロダイングループが国際連携を加速し、ハレアカラ山頂観測施設との同時観測を企画。世界初の高分散分光による複合観測を実現し、火星メタン起源解明へ。

[1] Krasnopolsky, Icarus, 2004; [2] Lefevre et al., Nature, 2009

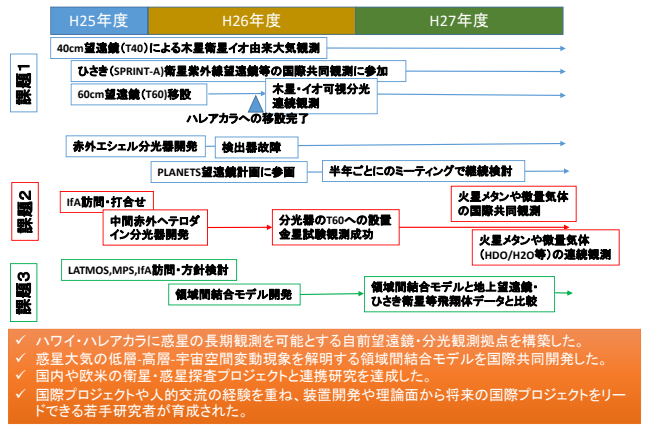
### 課題3. 惑星プラズマ・大気変動の理論研究

若手研究者(寺田直樹准教授)をLATMOSに派遣  
若手研究者(黒田剛史助教)をMPSIに派遣

- 東北大が現有する領域ごとのモデル群を基に、高精度の領域間結合モデルを国際共同開発
- 課題1と課題2との連携した統合的アプローチにより、惑星プラズマ・大気の結合過程や大気環境変動の一貫システム理解へ貢献



### 実績と成果: タイムチャート



### 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~

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。

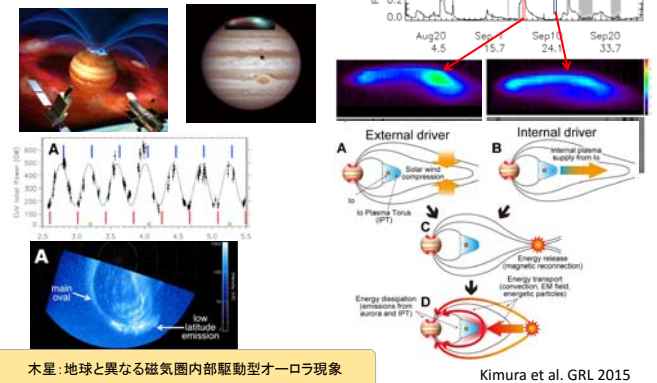
大気・プラズマの発光は、太陽光の共鳴散乱、電子衝突励起、レーリー散乱等。

可視域では、惑星(主星)に対して、観測対象の大気の明るさは $10^{-5}$  ~  $10^{-7}$ 。  
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

### 目指すサイエンス (2) 太陽・惑星・衛星間のエネルギー・物質輸送と相互作用を解明する

~連続観測・モニタリング観測、多点観測~



### ハワイ・ハレアカラ観測所 東北大観測施設 (標高3000m)

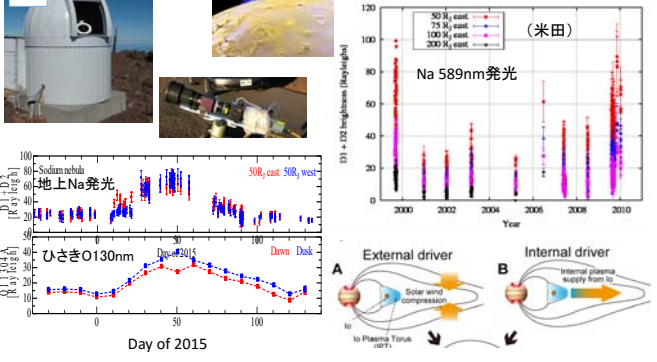
- 連続観測** - 現象の時空間変動観測と因果関係解明  
日々変動、季節・年・太陽サイクル変動
- フレキシブル** - タイムリーなタイムアロケーション  
国際協力、探査機・大型望遠鏡との共同観測
- ユニークな装置** - 可視・近赤外装置  
高分散分光  
高コントラストイメージング

- 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エル分光器
- 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



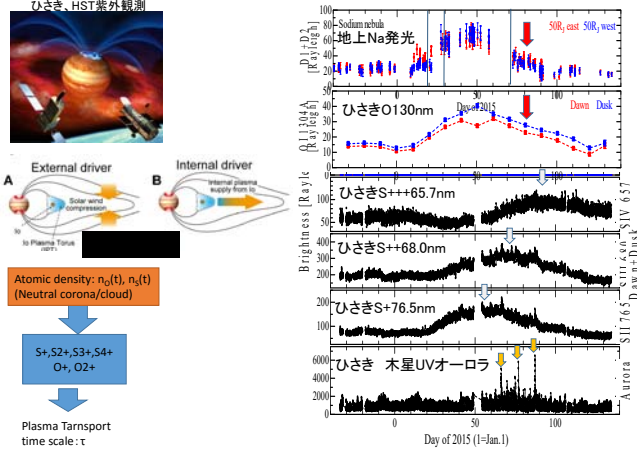
### 課題1. 成果:T40 木星衛星イオ Na雲の発光

広視野イメージャー+ひさき(米田、鍵谷、土屋、古賀)

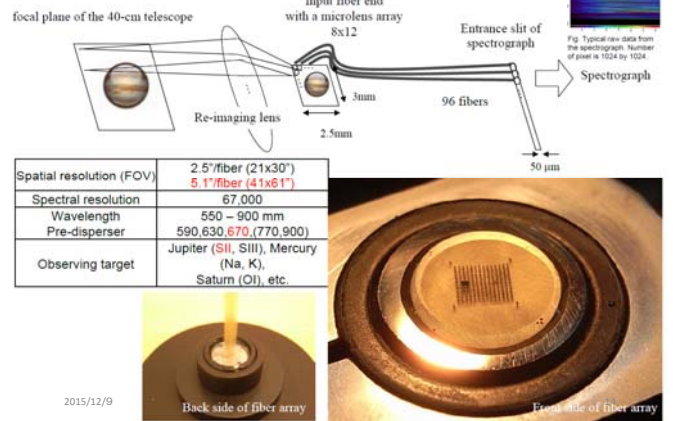




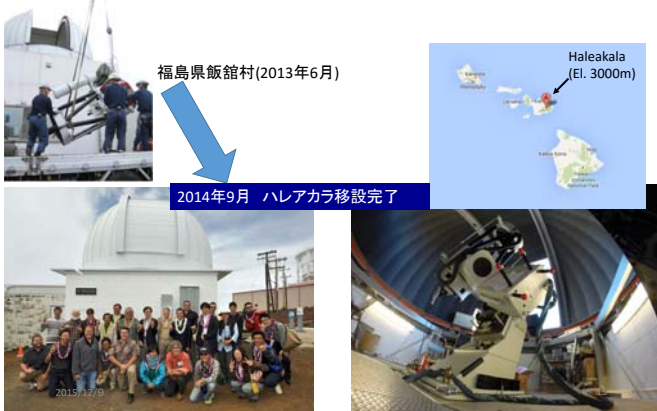
地上とひさき宇宙望遠鏡による木星オーロラ・衛星イオ観測(土屋、米田、古賀)



ファイバーバンドルによる可視高分散イメージング分光器の開発



課題1,2. 成果: 東北大60cm望遠鏡 (T60)の移設



ハレアカラT60の特徴

- ユニークな装置
- (1) ケ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



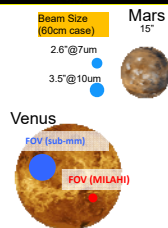
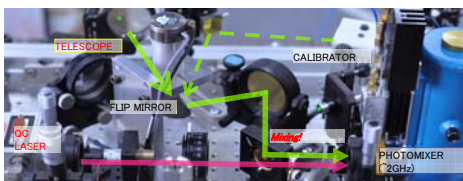
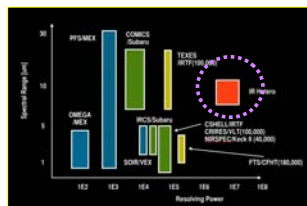
- (1) 可視高分散・中分散エシェル分光器・コロナグラフィメジャー (Vispec): (鍵谷, 小野) 0.4-0.9 $\mu$ m, FOV $\sim$ 10' /  $\lambda/\delta\lambda \sim$  50000, 3000
- (2) 中間赤外レーザーヘテロダイン分光器 (MILAH): (中川, 高見) 8-10 $\mu$ m,  $\lambda/\delta\lambda \sim 10^{5-7}$
- (3) 偏光イメージャー (DiPOL-2): (S. Berdyugina, 鍵谷, 前田) B, V, R 高精度偏光観測 (DoLP  $\sim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

[開発中またはゲスト装置]

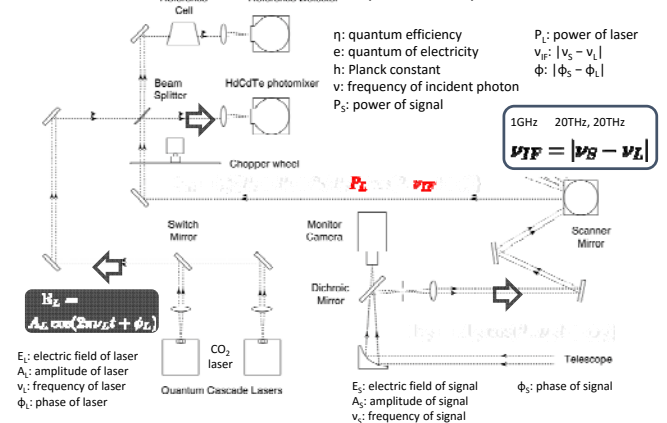
- 近赤外 (1-4 $\mu$ m) エシェル分光器・イメージャー (ESPRIT)  $\lambda/\delta\lambda \sim 20,000$
- 中間赤外 (7-12 $\mu$ m) エシェル分光器 (GIGMICS) 名古屋大  $\lambda/\delta\lambda \sim 40,000$
- 近赤外 (1-1.7 $\mu$ m) エシェル分光器 京都大  $\lambda/\delta\lambda \sim 200,000$

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

- 感量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 &  $\sim$ 10K)
- 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)

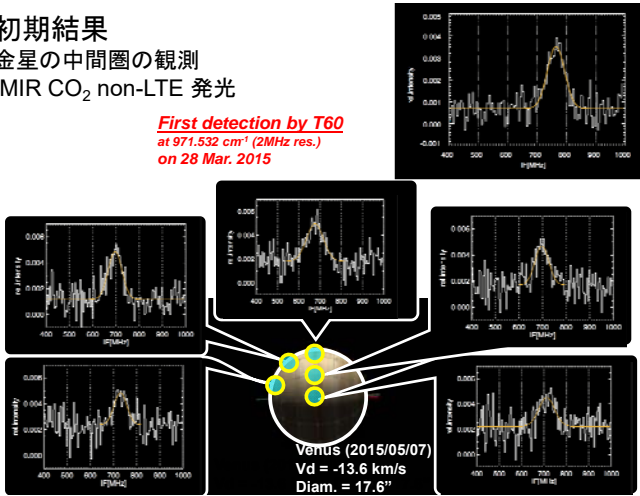


赤外ヘテロダイン分光器(MILAH)

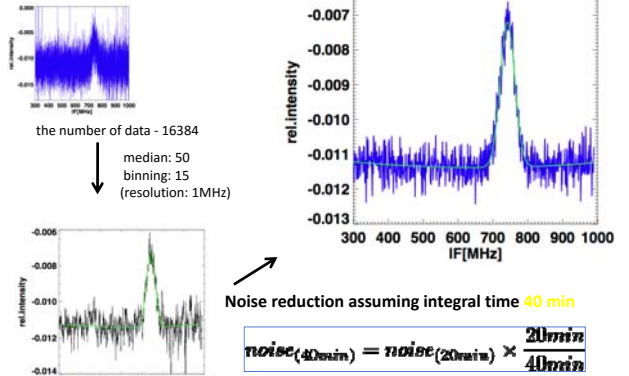


初期結果  
金星の中間圏の観測  
MIR CO<sub>2</sub> non-LTE 発光

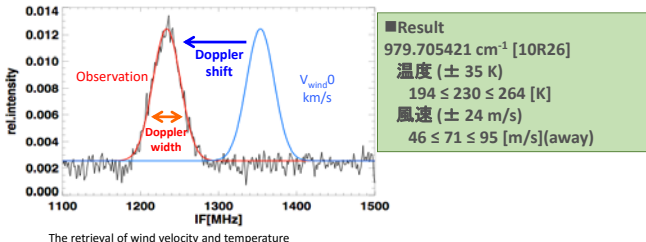
First detection by T60  
at 971.532 cm<sup>-1</sup> (2MHz res.)  
on 28 Mar. 2015



ノイズと平均化



金星大気温度と風速の見積もり



◇ Doppler width (temperature)

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

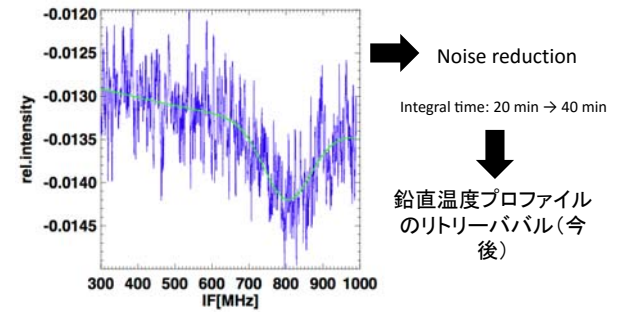
T<sub>kin</sub>: kinetic temperature  
m: molecular mass  
k<sub>B</sub>: Boltzmann constant  
α<sub>D</sub>: Doppler width  
ν<sub>0</sub>: frequency of CO<sub>2</sub> (0 km/s)

◇ Doppler effect of light (wind velocity)

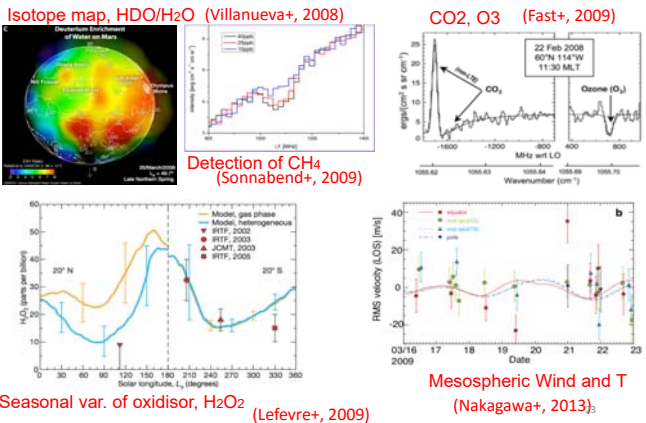
$$\nu_{obs} = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - (V/c)^2}}{1 - (V/c)}$$

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

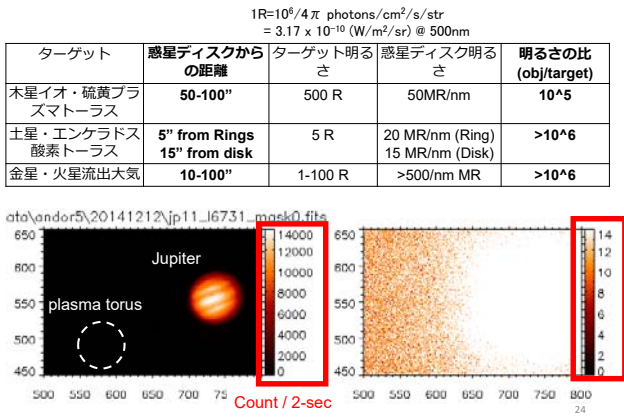
吸収線の観測結果



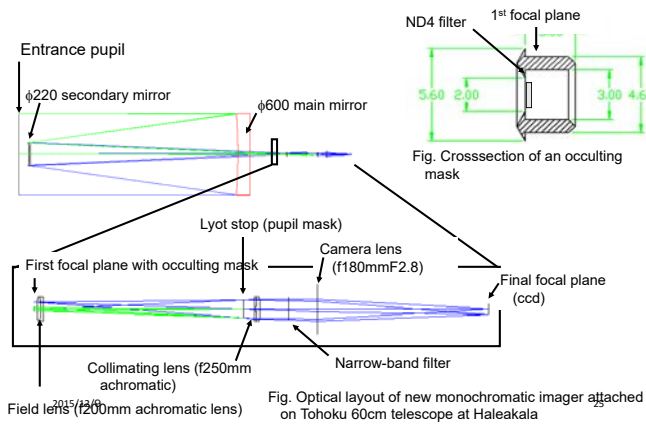
火星のヘテロダイン観測計画(2016年2月~)



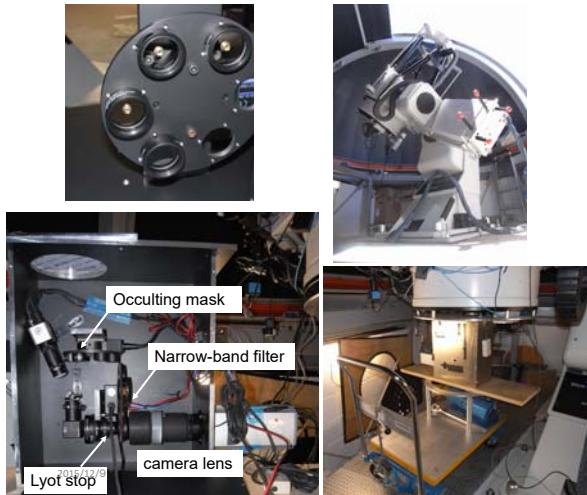
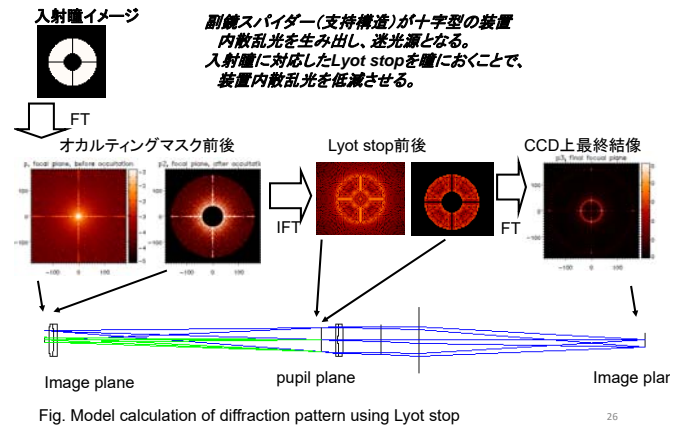
課題1. 成果: 広ダイナミックレンジ コロナグラフイメージャー (鎌谷)



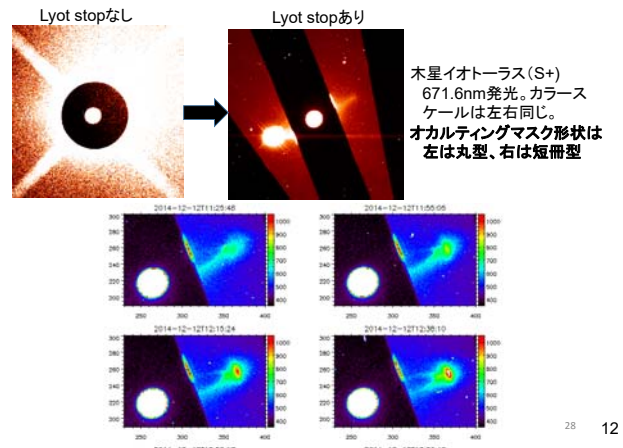
## コロナグラフィメジャー 光学レイアウト



## Lyot stopによる散乱光低減



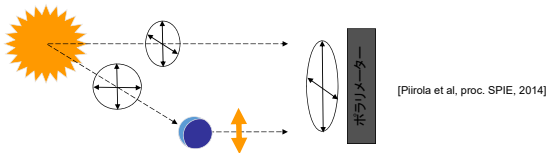
## コロナグラフの木星S+トールラス観測例



## 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

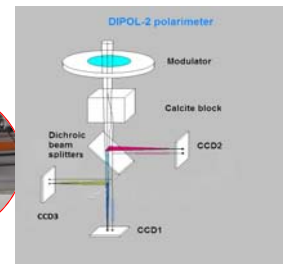
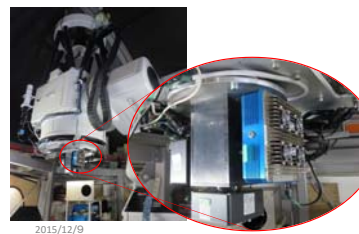
2015/12/9

29

## T60/DiPOL2による系外惑星観測

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

- 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  $\leq \sim 10^{-5}$
- 測定精度は光子数限界  $10^{10}$  フォトン



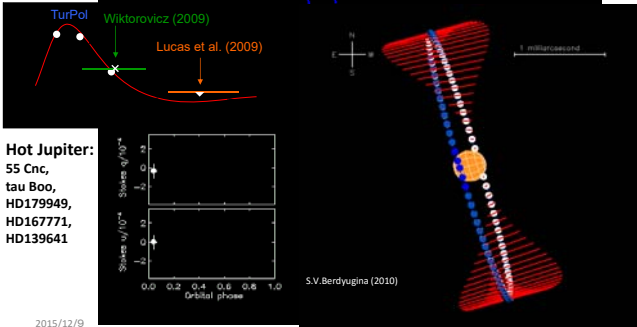
2015/12/9



### 観測例: HD189733b

Hot Jupiter: period=2.2d, a = 0.03AU, R~1.5R<sub>J</sub> [star: 7.7mag(V), K0/M4]

直線偏光度 = 10<sup>-4</sup> 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?



2015/12/9

### 最近の成果

#### < ターゲット >

- epsilon 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  
1~2 x 10<sup>-5</sup> (1時間積分値)  
(フォトン数2x10<sup>8</sup>/2-s exposure in B & V band.  
10<sup>10</sup> フォトン by 768 画像)

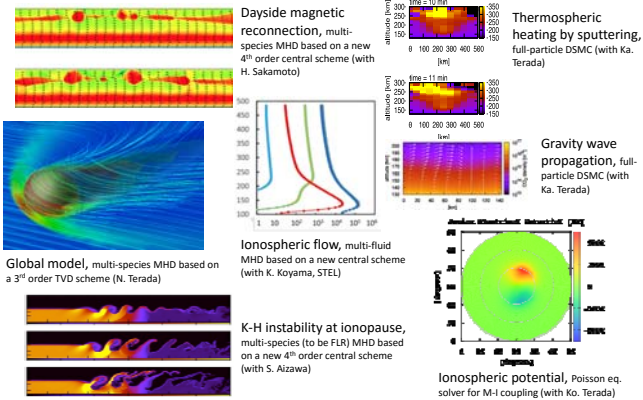
#### < 今年度実績 >

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

2015/12/9

32

### 課題3: Development of planetary magnetosphere-ionosphere-thermosphere models



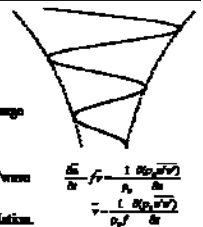
### What is the gravity waves (GWs)?

Small scale (wavelength of less than ~2000km), short period (less than ~1 day)

- Restoring force is a buoyancy.
- Atmosphere of Mars is mostly convectively stable (as on Earth) to support gravity wave existence.
- Possible sources are the topography, convection, dynamical instability of the flow, etc.
- Waves break in upper atmosphere and affect the atmospheric fields.



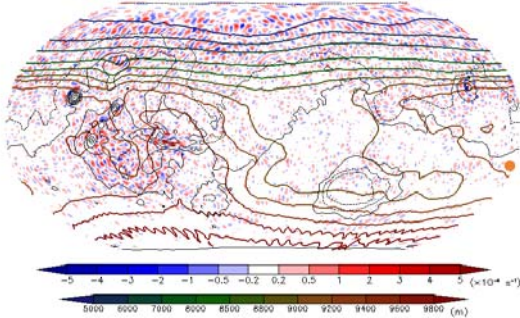
- Wave amplitude grow to maintain constant energy
- Wave amplitude increases too large and wave breaks
- Wave momentum deposited
- Force exerted on atmosphere ("wave drag")
- Drives a meridional (NS) circulation.



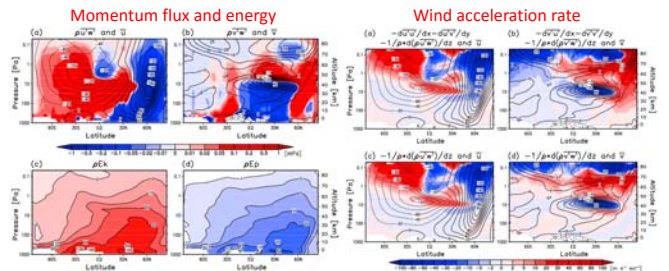
### Generation of GWs on Mars

Wind divergence (shade) and geopotential height (contour)

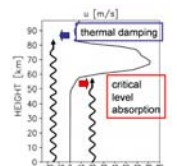
$\Delta w(gw)/\Delta z$  and  $Z_1$  at 260Pa, Sol 01, 00:12



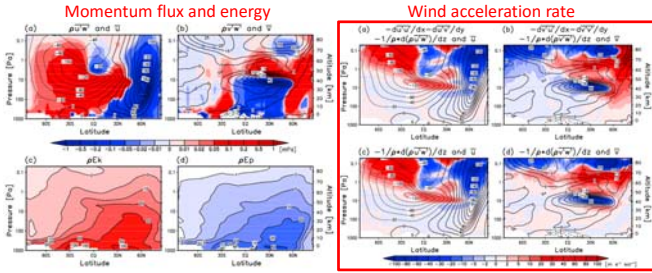
### Vertical propagation on Mars



- Zonal/meridional momentum fluxes propagate in principle to lag the flow, but the direction can change with dissipation/filtering of specific harmonics.
- GWs penetrate higher in the winter hemisphere, because of asymmetry of sources in lower and some other possibilities (propagation in horizontal direction is not clear...)



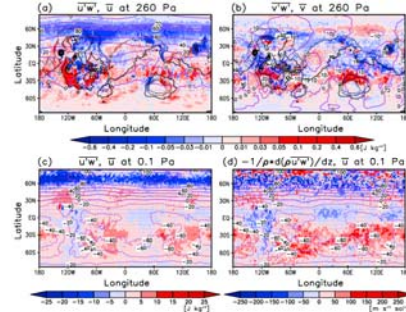
Vertical propagation  $a_x = \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'w'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'w'} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{w'w'})$   $a_y = -\frac{\partial}{\partial x} \overline{v'w'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'v'} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho \overline{v'w'})$



- The acceleration rates simulated in this model are comparable to those obtained from a GW drag parameterization [Yigit et al., 2008; Medvedev et al., 2011a, 2011b].
  - Clear relation is seen between wave dissipation and wind acceleration (~10Pa around equator).
  - Effects of horizontal propagation on the acceleration are much smaller than those of vertical propagation.
- GW drag parameterization [Medvedev et al., 2011b]
- $$\overline{w'w'} = \text{sgn}(z - z_0) \overline{w'w'}_{\text{max}} \exp\left[-(z - z_0)^2 / C_d^2\right]$$

Horizontal distribution of wave fluxes on Mars

Momentum fluxes and acceleration rate at 260 and 0.1 Pa



Note that these plots represent 20-sols averaged values!

- In low latitudes, sources are extremely localized both in space and time. (especially clear shapes along with the mountains are seen, even at much-smoother 0.1Pa)
- In northern mid-and high-latitudes, the distribution of the zonal flux is significantly smoother. (associated with the winter westerly jet, Kelvin waves)
- A high degree of horizontal inhomogeneity is seen in the acceleration rates of upper atmosphere.

## 学会発表・論文等の成果

[]は招待講演または特別講演

- 査読付き論文
- H25 (2013) 年度18件、H26 (2014) 年度18件、H27 (2015) 年度19件
- (例) Kuroda, T., A.S. Medvedev, E. Yigit and P. Hartogh (2015), A global view of gravity waves in the Martian atmosphere inferred from a high-resolution general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9213–9222.
- Sakanoi, T., Y. Kasaba, M. Kagitani, H. Nakagawa, J. Kuhn, S. Okano, Development of infrared Echelle spectrograph and mid-infrared heterodyne spectrometer on a small telescope at Haleakala, Hawaii for planetary observation, *Proceedings of SPIE*, 9147 (91478D-12), 2014.
- Aoki, S., H. Nakagawa, H. Sagawa, M. Giuranna, G. Sindoni, A. Aronica, and Y. Kasaba (2015), Seasonal variation of the HDO/H2O ratio in the atmosphere of Mars at the middle of northern spring and beginning of northern summer, *Icarus*, 260, 7–22, DOI:10.1016/j.icarus.2015.06.021.
- 国際学会: 計102件(3件)
- H25 (2013) 年度(10月以降) 20件、H26 (2014) 年度35件(3件)、H27 (2015) 年度55件
- (例) Misawa, H., F. Tsuchiya, K. Iwai, T. Obara, Y. Katoh, S. Sato, K. Kaneda, H. Kashiwagi, Observations of solar radio bursts using a high-resolution spectro-polarimeter, The 3rd Asia Oceania Space Weather Alliance Workshop, Fukuoka(The LUIGANS Spa & Resort), 2015年03月。(招待)
- 国内学会: 計256件(18件)
- H25 (2013) 年度(10月以降) 57件(5件)、H26 (2014) 年度72件(10件)、H27 (2015) 年度127件(3件)
- (例) Kagitani, M., T. Sakanoi, T. Obara, M. Yoneda, S. Okano, Y. Kasaba and H. Nakagawa, Observation of Planetary Atmosphere and Magnetosphere from the Haleakala Observations in Hawaii(invited), 2014年惑星圏研究会, 仙台, 東北大学, 2014年2月(招待)
- Terada, N., K. Masunaga, I. Yoshikawa, F. Tsuchiya, A. Yamazaki, K. Yoshioka, G. Murakami, T. Kimura, M. Kagitani, Y. Kasaba, T. Sakanoi, Y. Futama, K. Seki, F. Leblanc, J.-I. Chaufray, C. Tiao, and D. Shoto, Hisaki/EKCEED observation of solar-wind-driven atmospheric escape from Venus, 第136回地球惑星・地球惑星圏学会, 松本(キョウエイ文化ホール), 2014年10月。(招待・特別)
- 坂野井 健, ハワイハレアカラ望遠鏡による惑星大気的光赤外モニタリング観測(招待講演), 第5回可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 東北大学, 仙台, 12月7-9日, 2015.

## Webや印刷物による情報発信

Webによる情報発信 <http://c.gp.tohoku.ac.jp/~promotion/>

宮城の新聞印刷板2014年秋号 (宮城県中学生全員に配布)



宮城の新聞 Web版 (計5回配信)



報告書(計2冊)の作成

## 若手研究者の人材育成と国際共同研究の成果と実績 その1

[課題1]について、米国ハワイ大IfAに鍵谷将人助教を派遣(H25年度46日、H26年度152日、H27年度120日(現時点の予定)合計308日派遣し、ハワイ大 IfAのKuhn教授と協力して以下に示す研究を推進して成果を得た。

- 40cm望遠鏡(T40)を用いた衛星イオ火山由来プラズマ・大気の時空間変動を長期継続観測を達成した。
- ハレアカラ山頂への60cm望遠鏡(T60)移設作業を実現し、また新開発の可視分光器・イメージャーを設置し、木星とイオ電磁圏を長期継続観測で追跡しうる世界唯一の観測拠点を形成した。
- 「PLANETS」望遠鏡プロジェクトの開発と観測装置検討に、IfAを含む国際共同で従事した。
- ひさき衛星の紫外(オーロラ)・極端紫外(衛星イオ火山由来大気)データとT40,T60観測データを合わせ、木星プラズマ・大気結合の短中長期変動の解明を進めた。
- 米国・アリゾナ・キットピーク天文台望遠鏡を用いて、木星とイオ観測を達成した。

この結果、イオの火山活動に対応して火山ガスが木星磁気圏に供給され、中性ガスがイオン・プラズマ化され、加速していく振る舞いが明らかになつた。

## 若手研究者の人材育成と国際共同研究の成果と実績 その2

[課題2]について、米国ハワイ大IfAに、中川広務助教をH25年度15日間、H26年度152日間、H27年度200日間(現時点の予定)、合計367日間派遣し、ハワイ大 IfAのKuhn教授と協力して以下に示す研究を推進して成果を得た。

- ケルン大と共同で開発を進めてきた中間赤外ヘテロダイン分光器を、ハワイ・ハレアカラT60望遠鏡への設置した。
- 中間赤外ヘテロダイン分光器の試験観測とデータの評価のために、金星大気10μm観測を実施し、温度と風速を見積もった。
- 火星大気組成・速度・温度場を見積もるための分光観測を、H28年2-3月の火星接近時に行うための準備を進めている。信頼度の高いメタン・過酸水素・HDO/H2Oの観測データを元に、火星メタンの生成・消滅機構を明らかにし、その起源の解明を目指す。
- ケルン大学・NASAと共同で、マウナケアでの観測等の火星大気観測国際多拠点共同観測を行った。また、ケルン大学を訪問し、観測装置の検討を実施し、東北大の装置開発に反映した。
- EU火星研究プロジェクト「CrossDrive」の火星大気観測可視化ツール開発に貢献した。

この結果、2016年の火星接近時における中間赤外ヘテロダイン分光観測の準備が整った(H27年度末には初期結果が得られる予定)。また、機器開発やヨーロッパ・米国の惑星探査機プロジェクトに参加することで、強固な国際連携関係を築くことができた。



若手研究者の人材育成と国際共同研究の成果と実績 その3

[課題3]について、フランス国立科学研究センターの大気環境宇宙観測研究所 (LATMOS)に寺田直樹准教授を、H25年度35日間、H26年143日間、H27年度147日間(現時点の予定)、合計325日間派遣し、Leblanc博士と協力して以下を推進して成果を得た。

- ・惑星観測データと比較可能な磁気圏-電離圏-大気圏結合モデルを構築し、木星のプラズマ-大気結合システムにおける物質・エネルギー輸送過程とその短中長期時間変動の機構解明を進めた。
- ・火星・金星での高層大気-低層大気の上下結合を解明して、太陽系初期から続く宇宙空間への大気散逸の機構に与える影響を明らかにした。
- ・ひきき衛星観測データから、火星や金星の超高層大気中の宇宙空間に広がる酸素・炭素イオン等の分布と変動の解析を進めた。
- ・米国NASA火星探査機「MAVEN」との最新の成果に基づく国際共同研究を推進した。

また、ドイツ・マックスプランク研究所太陽系 (MPS)に黒田剛史助教を、H26年度17日間、H27年度101日館、H28年度185日間(現時点の予定)、合計303日間派遣し、Hartogh博士ならびにMedvedev博士と協力して以下を推進して成果を得た。

- ・火星・金星大気大循環モデルを発展させ、雲の生成消滅、凝結・降雪、化学物質循環、重力波など大気波動を包含掌握できる数値モデルへ発展させることで、課題2の観測結果解釈にも貢献可能とした。
- ・木星型・地球型惑星の領域結合モデルを構築し、地上・飛翔体観測成果と合わせ下層-上層大気間の動的・熱的結合と、その宇宙への大気散逸に与える影響を評価した。

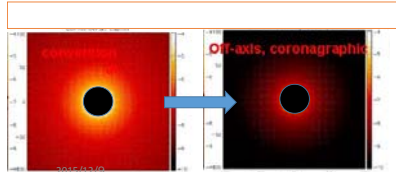
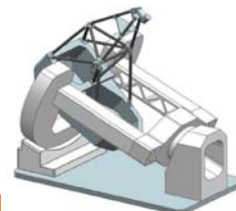
以上の理論・モデリング研究を元に、国内や欧米の惑星探査チームと密接な関係を築くことができ、これらのプロジェクトの科学的方向性を示唆できる理論集団を形成することが出来た。



2.1 PLANETS(坂野井、岡野、他)

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



科学課題と技術

- ・ 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、エッセル分光器)
  - ・ 偏光と分光偏光

2015/12/9

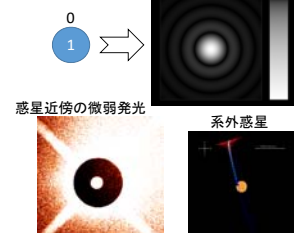
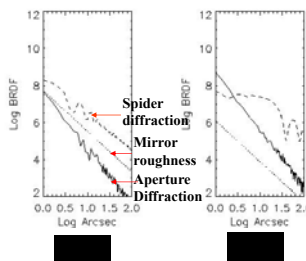
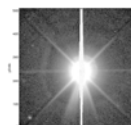
45



なぜ非軸光学系か？  
迷光・散乱光問題

・ 望遠鏡

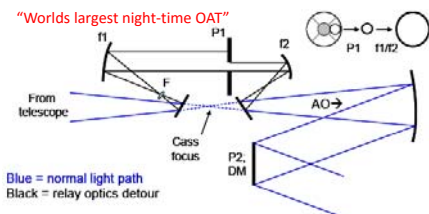
- ・ 回折(開口、スパイダー)
- ・ ミラー表面粗さ・ダスト



46



パロマー5m→1.5m(OAT)



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

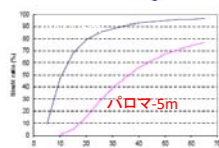
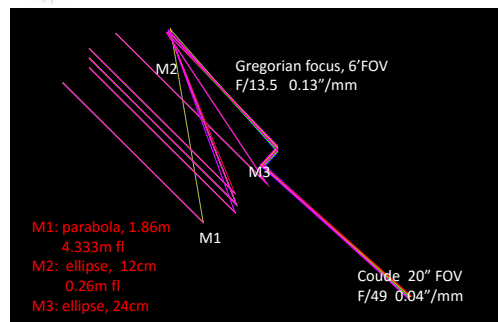


Fig. 1. Comparison of Strehl ratios achievable with the 5.1 Palomar 200 inch telescope (5.08 m diameter, bottom curve) and a sub-aperture of diameter 1.5 m (top curve) for a 10 x 10 arcsecond source.

2015/12/9



PLANETS optics



- M1: parabola, 1.86m, 4.333m fl
- M2: ellipse, 12cm, 0.26m fl
- M3: ellipse, 24cm

Gregorian focus, 6'FOV, F/13.5 0.13"/mm

Coude 20" FOV, F/49 0.04"/mm

(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

48

## 1.8m 主鏡 (オハラ・クリ アセラムZ-HS)

Φ=1850mm, t=100mm



Criteria	Specification
非軸線直径	1800 mm
放射面近軸半径	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
外縁研磨	fine grinding
面精度	200 nm RMS maximum
端処理	must include safety pockets, fiducial and areas set aside for attachments

49

## 主鏡の現状

最終研磨にむけた形状測定と誤差解析



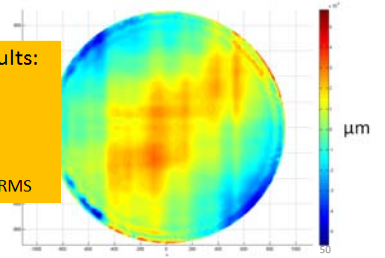
### Metrology Assessment

- 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



## 今後: 主鏡研磨

Harris/ITT  
イオンビーム研磨  
1回: rms=170μm  
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 λ/100  
自前で形状計測

### Pollution control



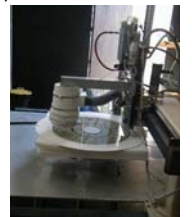
Confinement of atomized polisher particles  
Air washer – polisher recovering system.  
Immersion polishing.  
Noise level: open issue.



51

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

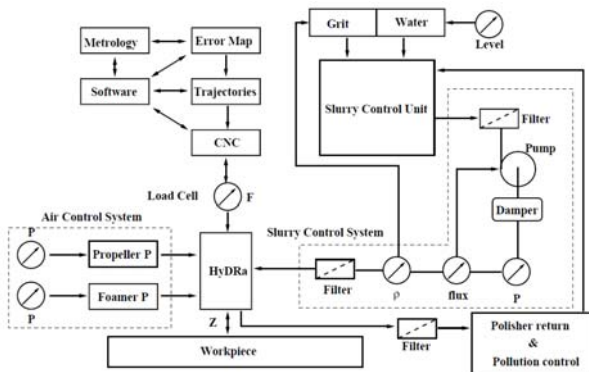
- 非磁性流体: 水にアルミナの粒子(粒径もパラメータ)を混ぜたものを使う
- 肝はノズルの構造で磨く面に平行の渦状高速噴流で研磨する



HyDra

Fluid Jet Ion Beam

## HyDraシステム



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

53

## HyDra研磨の今後

- 研磨レートは 8.2mm<sup>3</sup>/hr
- 主鏡研磨には2500 m<sup>3</sup> 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・カフレイの会社(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、主鏡の仕上げ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。

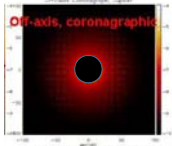
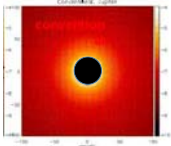
54



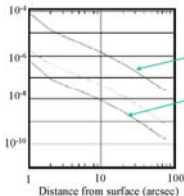
## 低散乱性能見積り

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

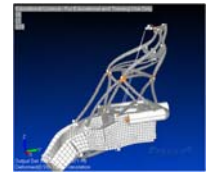
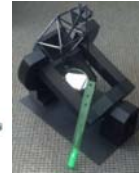
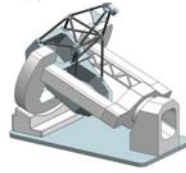
PLANETS望遠鏡

2015/12/9

55

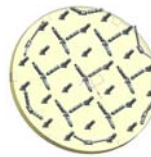


## PLANETS構造設計

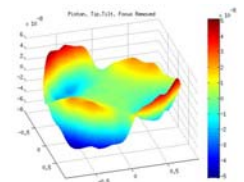


風による構造解析: 50Hzより高周波数の振動特性

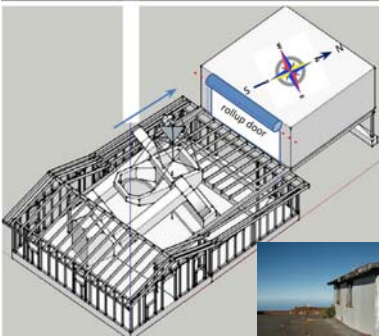
合計51個のロッドアクチュエータ



Example Surface Output



## 建物設計: スライディンググループ

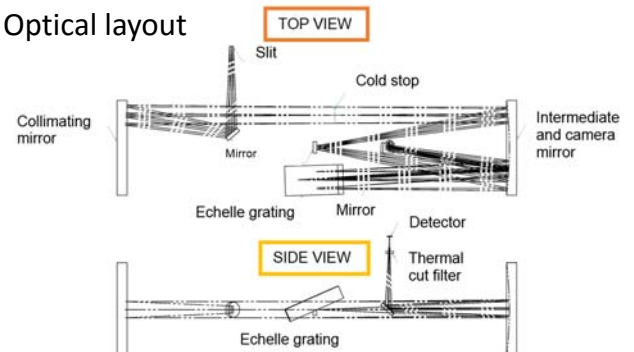


Univ. Chicago Neutron Observatory

2015/12/9

## 赤外エシェル分光器 (ESPRIT) の開発 (坂野井、他)

Optical layout

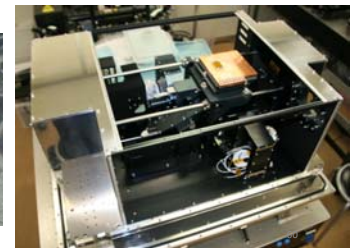
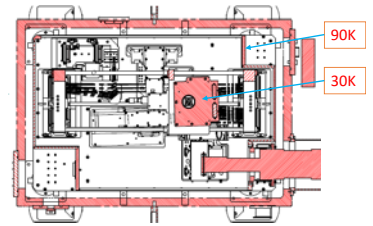


2015/12/9

58

## ESPRIT諸元表

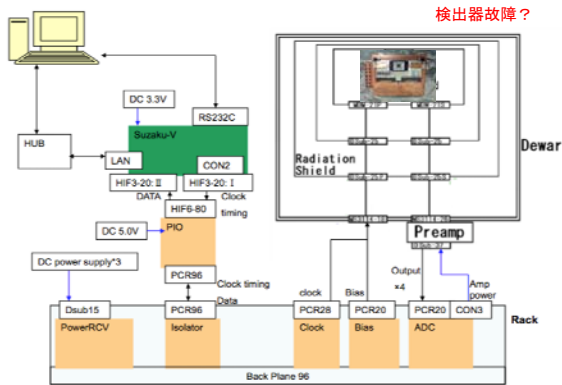
Parameter	Value
検出器	レイセオン InSb 256x256(プレートスケール0.3"arcsec/pix)
波長分解能	~20,000
入射F値	F12
スリット・開口	スペクトルモード: スリット長50" (5.4mm) イメージモード: 80" 開口
グレーティング	リチャードソン#53*453: プレズ角 71°, 31.6 gr/mm, サイズW=130 x D=23 mm
グレーティング駆動機構	角度範囲 65° - 80° (1 - 4 μm) 安定度 1" / 5min 真空ピコモータによる駆動
コリメータ・カメラミラー	f= 270mm
コールドストップ	直径 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



2015/12/9



## ESPRITエレクトロニクス:ブロック図



## 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: ずばる 8m, IRTF 3m

岡山、飛騨、京都 3.8m

ひさき・EXCEED [EUUV 宇宙望遠鏡]

[火星] Mars Express, MAVEN ExoMars / TGO (2017-)

[金星] あかつき (2015-)

高経度30m電波アンテナ

アタカマ 第六: Mini-TAO, TAO 6.5m

[木星] Juno (2016-), JUICE (2030-)

火星サンプルリターン

### 若手研究者の人材育成と国際共同研究の成果と実績: まとめ

#### <若手研究者の人材育成>

- ・ 鍵谷得人・中川広務助教および担当研究者が、ハレアカラ山頂のTGOや分光器などの自前の観測拠点を活用し、海外機器搬入・設置ならびに実験・観測・継続運用を、現地研究者と協力して行うことで、今後の地上観測・探査機探査計画に不可欠な人材が育成された。
- 国内・海外研究と実務レベルでの交流を深め、国内外のより本格的かつ大型の地上望遠鏡 (PLANETSやTAO,TMT等) や、惑星探査計画 (木星、火星、金星探査機) 等の国際共同研究へと発展している。
- ・ 寺田直樹准教授・黒田剛史助教および担当研究者が、惑星大気領域間モデル開発を推進し、先端的見による火星・金星科学の示唆をすることができる国際的な理論集団のリーダーを育成された。
- 現在進行中または将来の日米欧などの国際的な火星・木星・金星探査機ミッションの科学的方向性を提示し、強い国際リーダーシップを発揮することができるようになった。

#### <成果のまとめ>

- ・ 世界的な観測最前地であるハレアカラに望遠鏡拠点を構築し、世界最高水準の赤外分光技術を組み合わせたユニークな連続観測を展開した。
- ・ 国内外の大型地上・探査機観測計画を推進している。
- ・ 同時に、他に類を見ない高精度・高分解能の領域間結合モデルの開発を達成した。
- ・ これにより、東北大学は、観測と理論の両輪を統合した惑星プラズマ・大気の一貫システムの研究が可能とするユニークな研究拠点となった。