



# 南極赤外望遠鏡による 太陽系惑星観測

\*坂野井 健<sup>1</sup>, 鍵谷 将人<sup>1</sup>, 米田 瑞樹<sup>1,2</sup>  
笠羽 康正<sup>1</sup>, 岡野 章一<sup>1,2</sup>  
(1: 東北大・理・地物, 2: ハワイ大IfA)



37次越冬隊 1995-1997



# \* 内容

## 1. 科学ターゲット

1-1. 木星の衛星イオ火山活動

1-2. 木星の赤外オーロラ変動

1-3. 東北大学地物C領域(含PPARC)の取り組み

## 2. 南極望遠鏡を用いた惑星観測

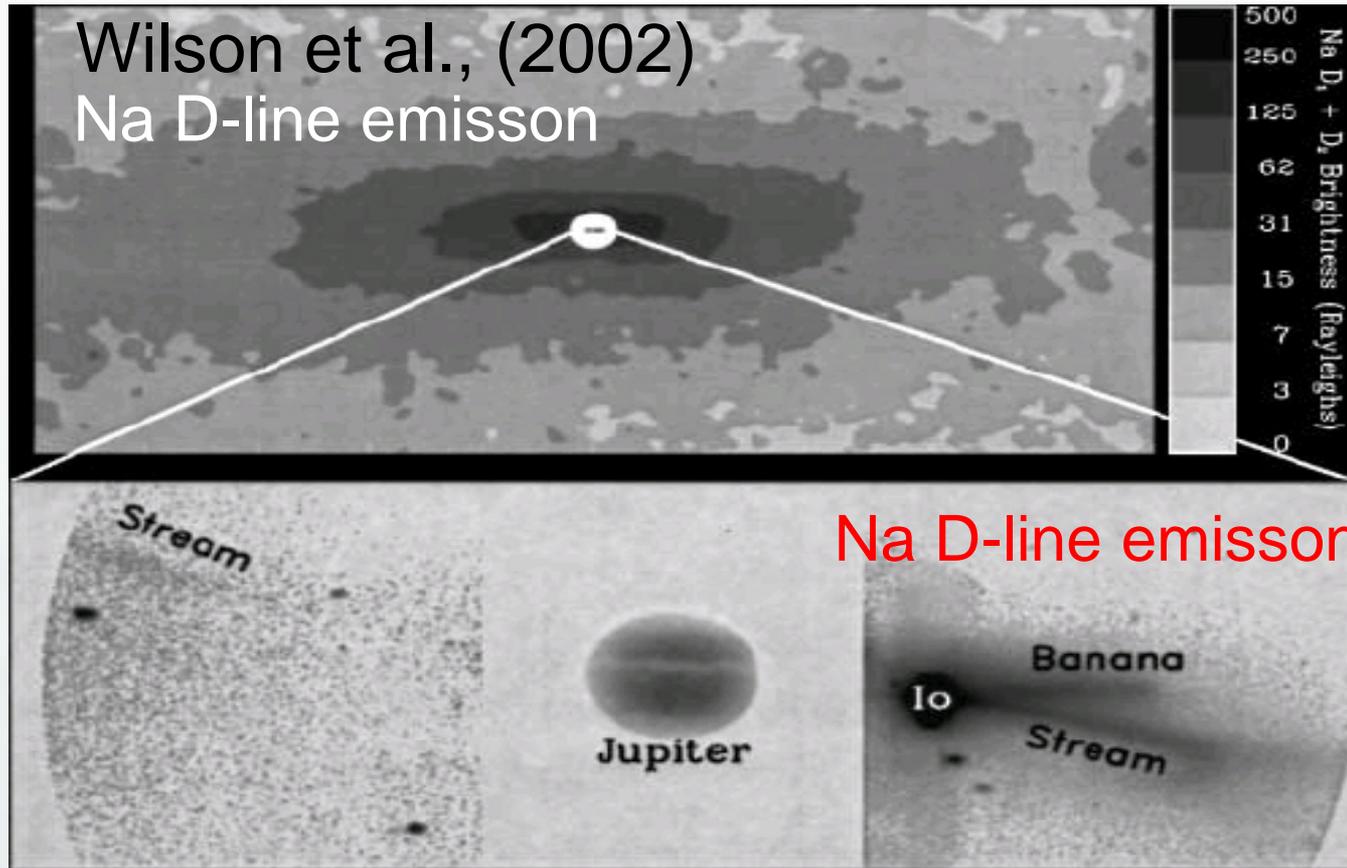
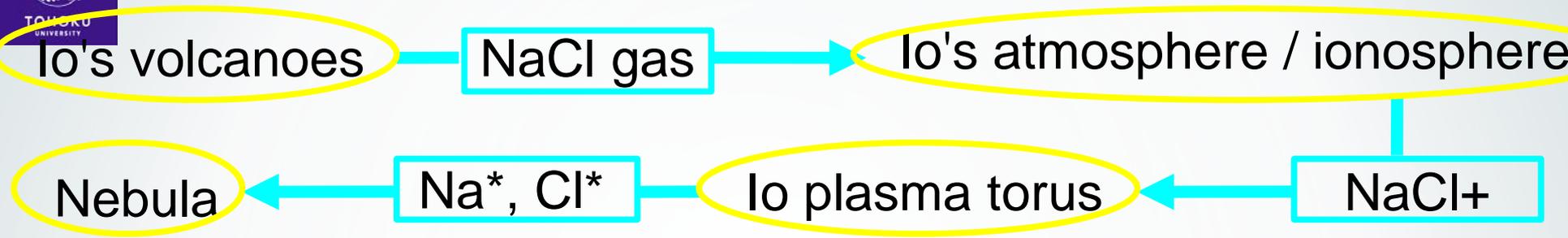
2-1. 動機とねらい

2-2. 観測検討





# イオ起源中性ナトリウムガスの磁気圏への拡散・輸送



D-line emissions of sodium nebula with a wide FOV (TOP) and small FOV (Bottom) (Wilson et al., 2002).

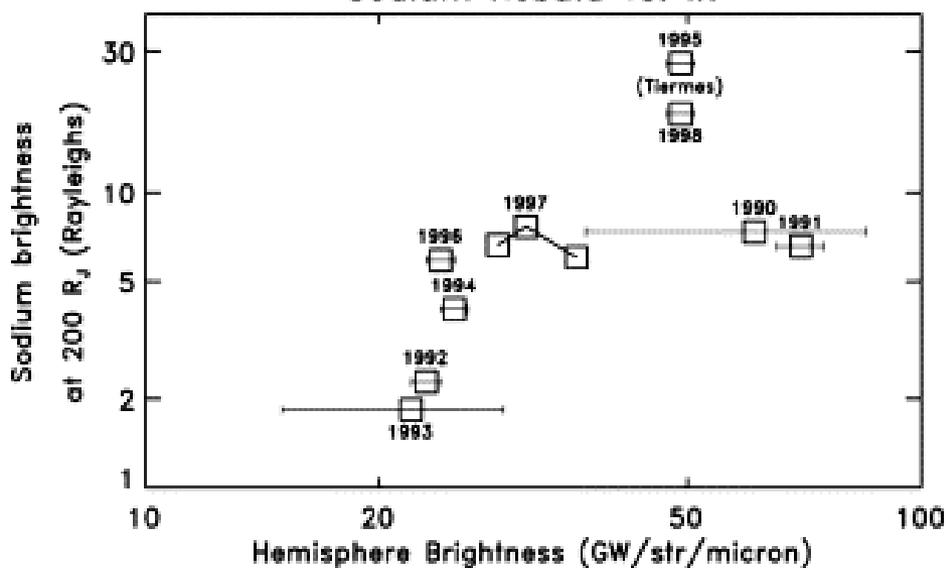


TOHOKU UNIVERSITY

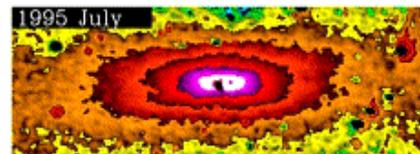
# Na分布の時間変動

Mendillo et al. (2004) found a positive correlation between brightness of the sodium nebula and Io's near infrared brightness which is a representative of Io's volcanic activity.

Sodium Nebula vs. IR



Tiermes Active



Na D-line emission

Loki Active

"Quiet"

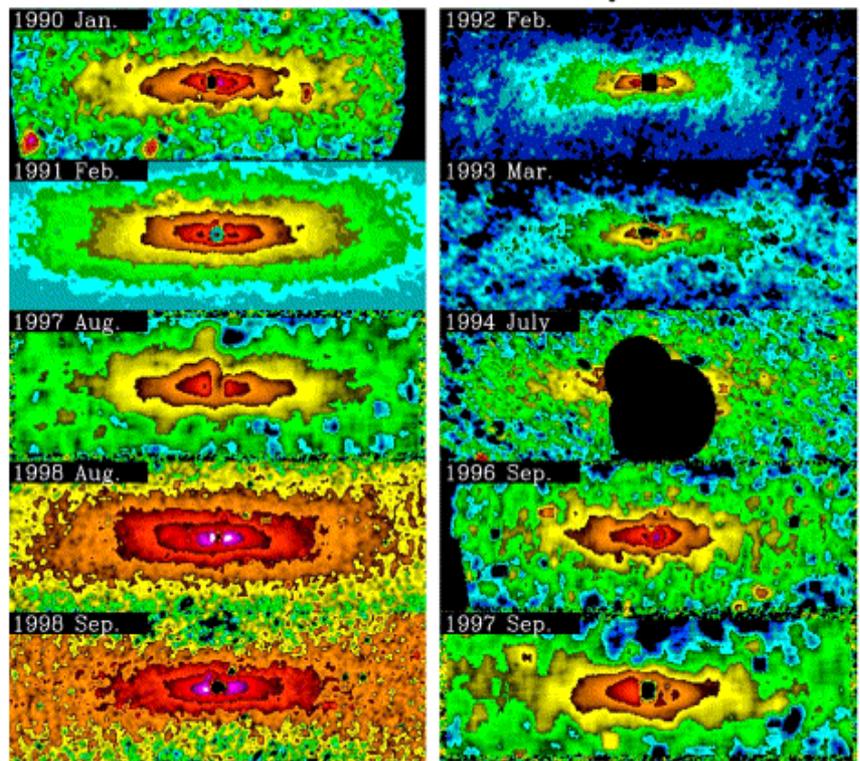
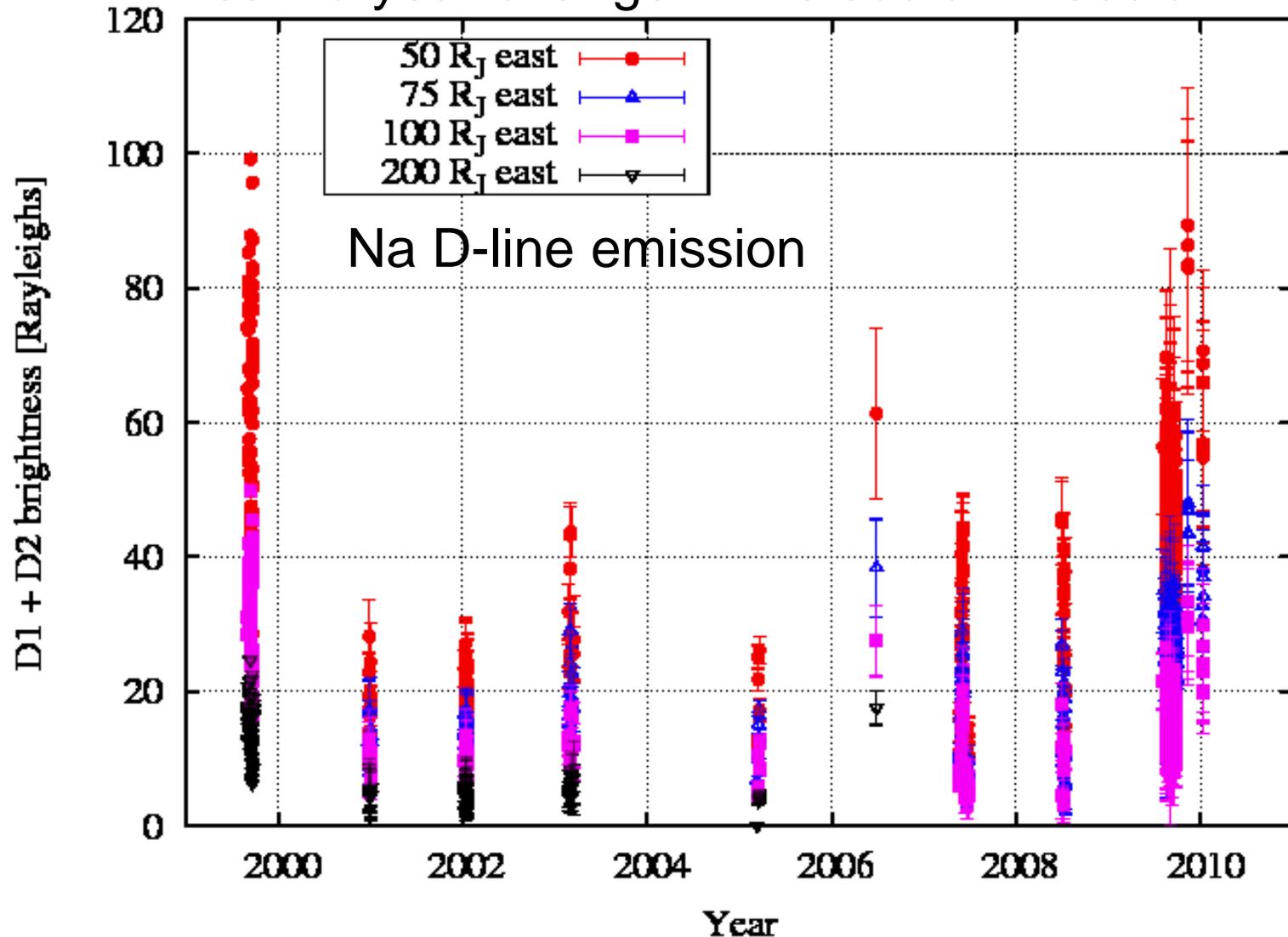


Fig. Summary of Jupiter's sodium nebula and Io's volcanic activity analysis for the period 1990-1998. (Mendillo et al., 2004 )

# 東北大学の長期(1999~現在)観測@ハワイ・ハレアカラ

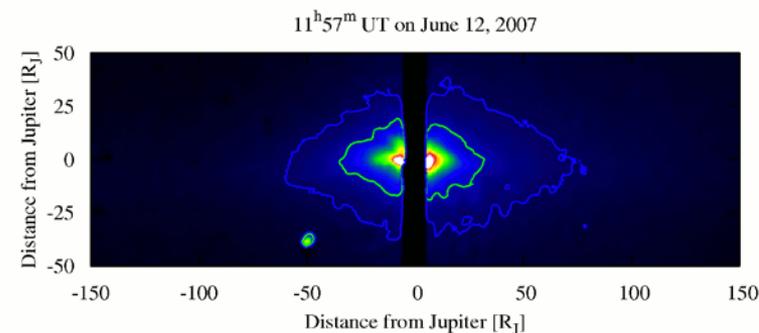
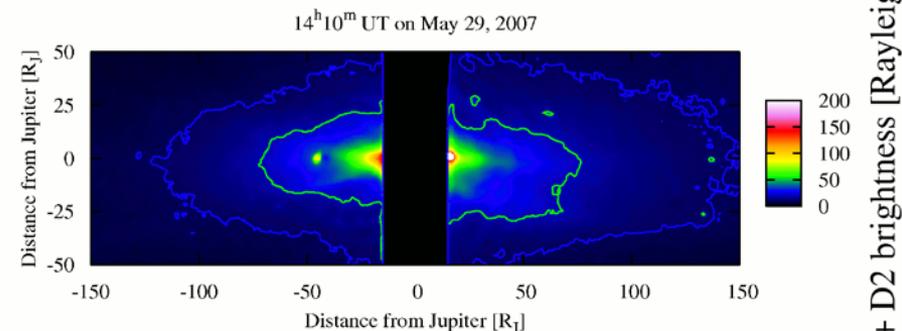
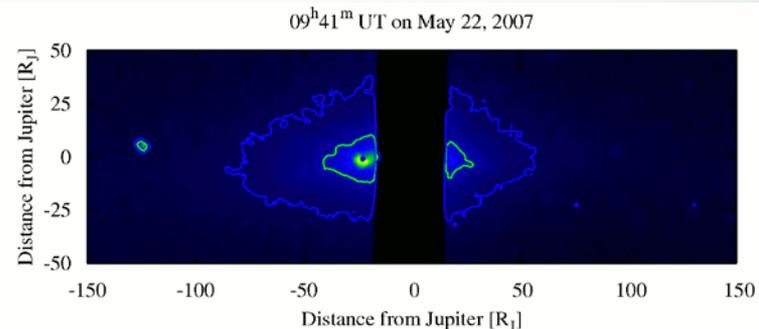
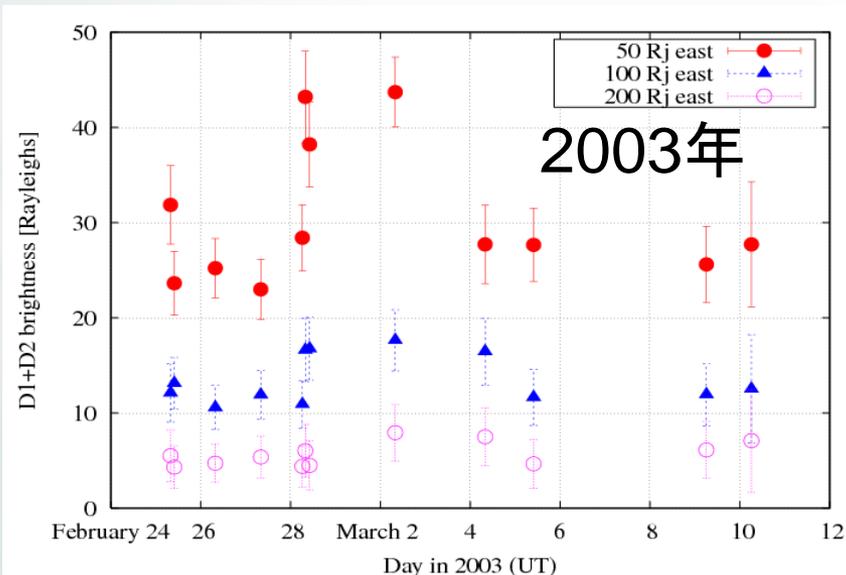
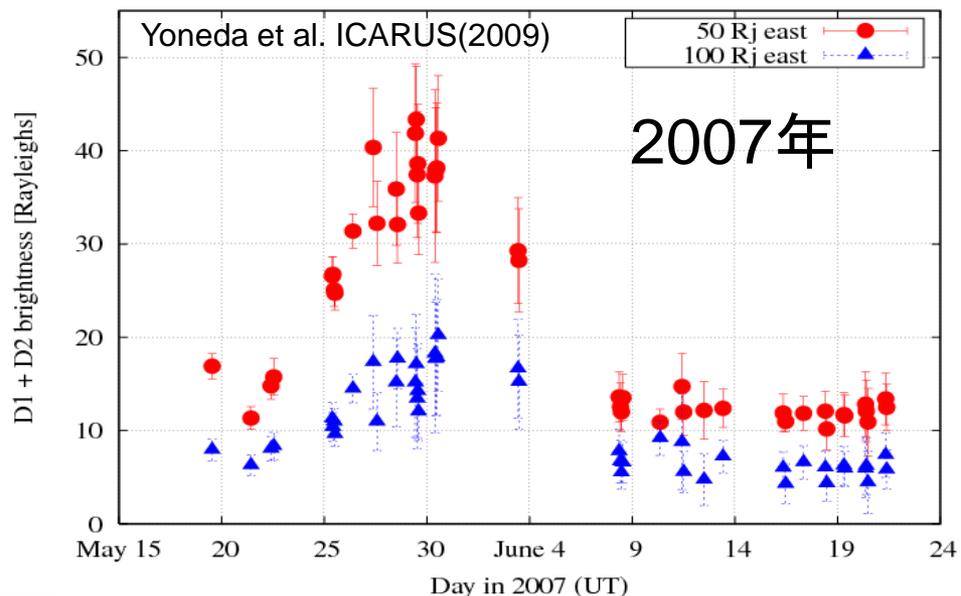
## Year-to-year change in the sodium nebula



Variations in D-line brightness of Jupiter's sodium nebula on the equatorial line from 1999 through 2008.

# アウトバースト(短期変動)

## Na D-line emission



Three images of Jupiter's sodium nebula obtained in May through June, 2007.

# Naネビュラ短期変動の原因

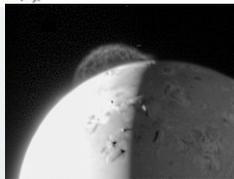
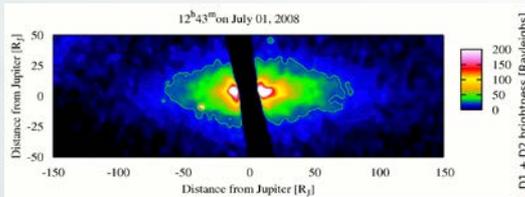
イオ火山活動の変動によるもの？

この解決には、Naネビュラ観測に加えて、イオ火山活動をモニターする必要がある。

従来、火山活動は近赤外線域( 2-5 microns)の熱輻射強度により測定されてきたが、近赤外線域では太陽光も無視できない。

従って、イオが木星の日陰にいるときの観測に限定される。このため、観測機会が限られる。

→ **南極望遠鏡による観測に期待**



広域Naネビュラ(可視)  
→ハワイ・ハレアカラ観測

イオ火山モニター  
→赤外観測

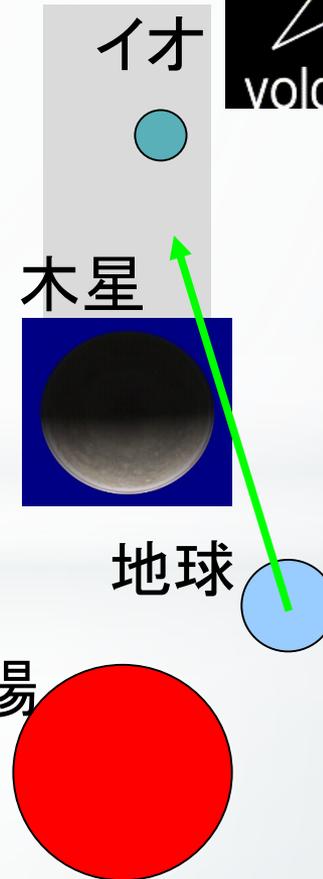
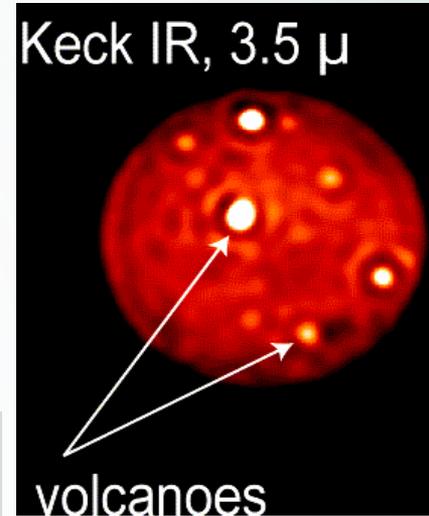


Fig. Geometry among Jupiter, Io, Earth, and Sun for observations of Io's volcanoes in near infrared.

# Mini-TAOによるイオ火山の中間赤外観測

We made mid infrared observations to monitor Io's volcanic activity because the solar flux in mid infrared is negligible.

12.2  $\mu\text{m}$ : Peak of thermal emission at 250 K  
 8.9  $\mu\text{m}$ : 320 K

Temperature achieved only with solar flux is

$$T = \left[ \frac{S}{r^2} \frac{1-A}{\varepsilon} \right]^{1/4}$$

S: Solar constant  
 R: Distance from the sun  
 A: Albedo  
 $\varepsilon$ : Emissivity  
 $\sigma$ : Stefan-Boltzmann constant

A=0.5 then T= 150[K]

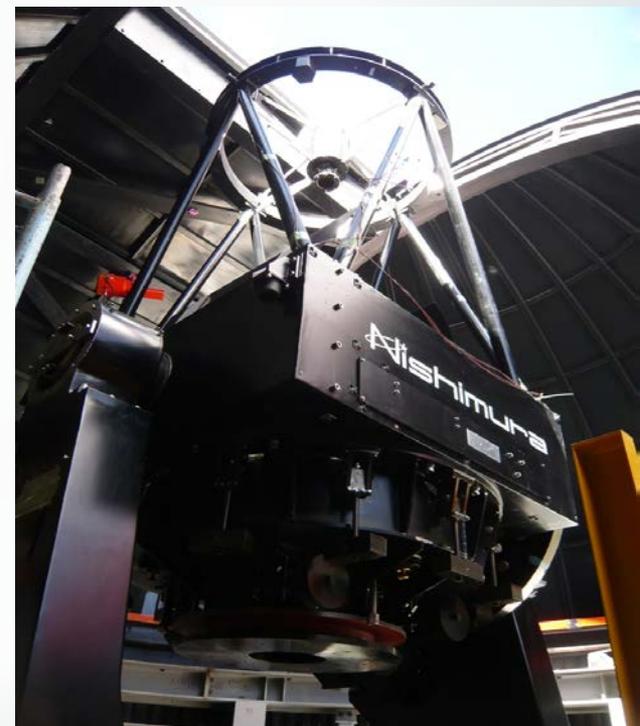


Fig. mini TAO 1-m telescope.

未だハワイ・ハレアカラのNaネ  
 ビュラ観測と同時観測に成功せず

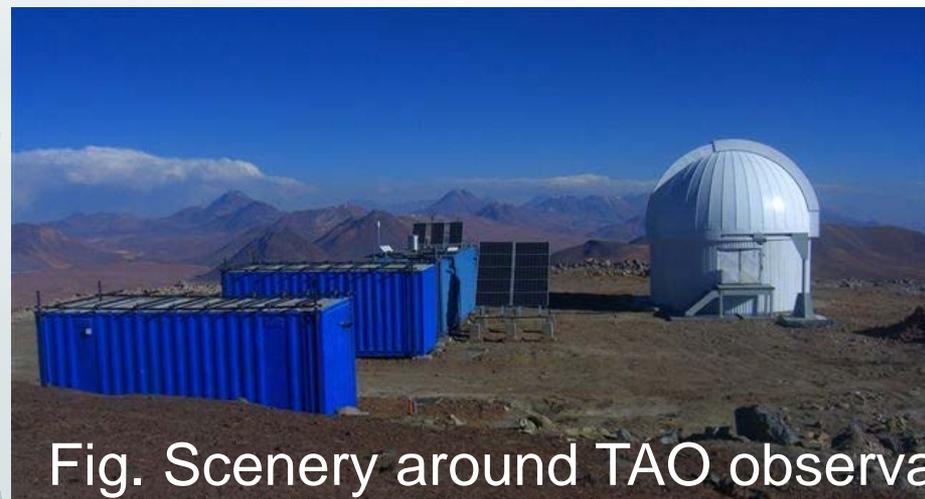
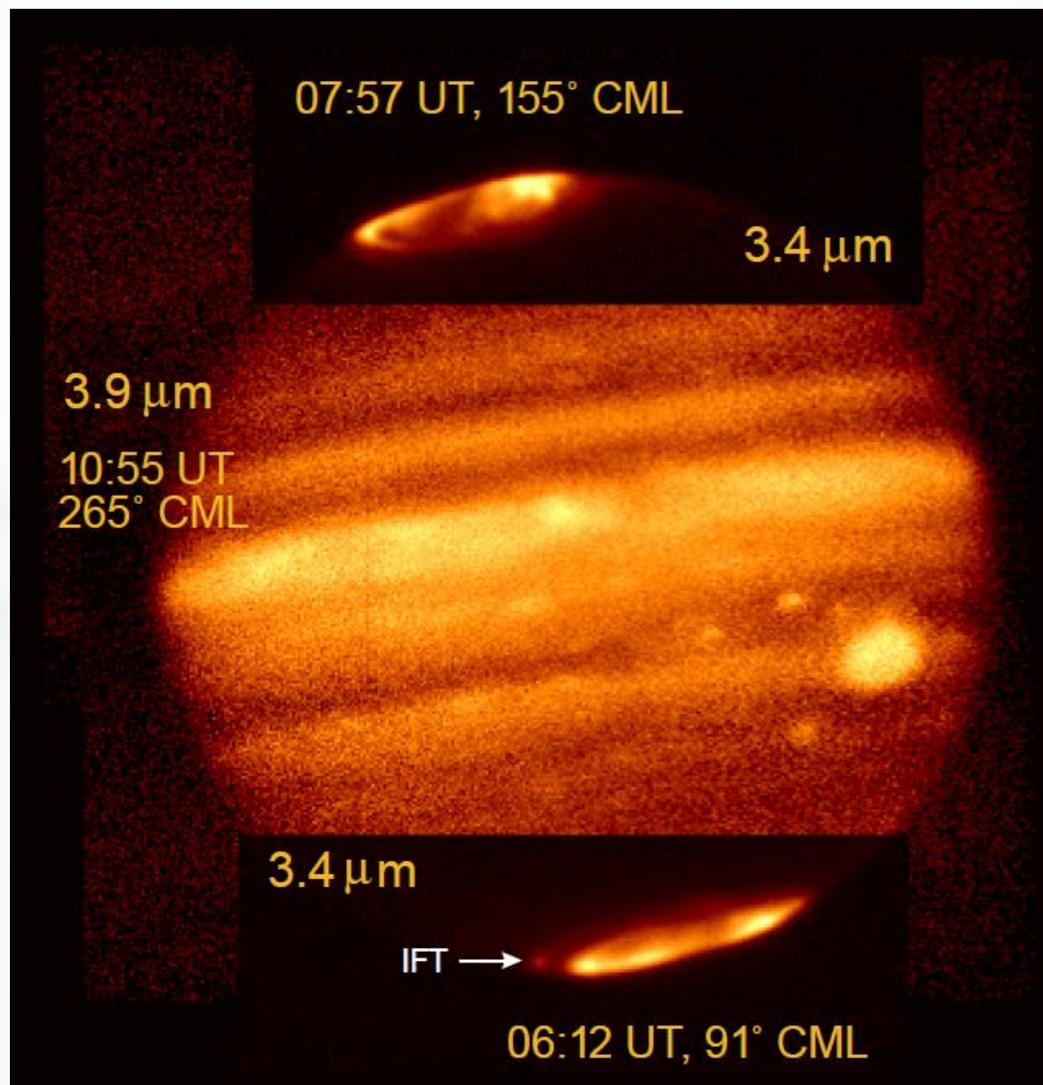
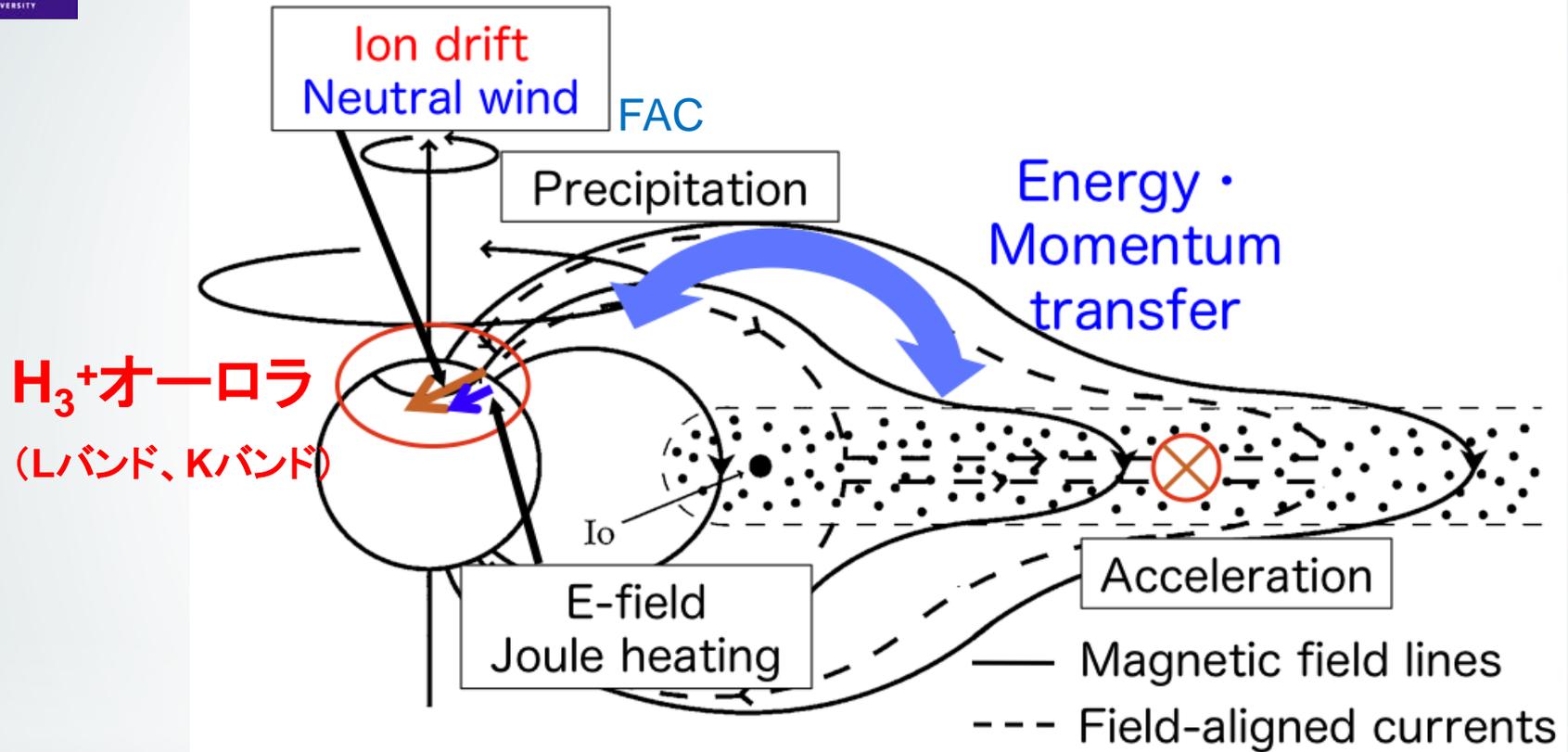


Fig. Scenery around TAO observatory

# 1 - 2. 木星の赤外オーロラ変動



# 木星オーロラに伴う磁気圏－大気圏結合



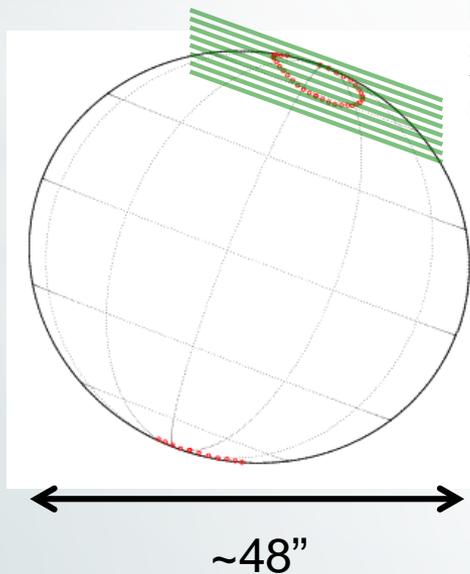
- \* 強大な磁場と巨大な磁気圏。
- \* 約10時間周期で共回転する磁気圏を形成。
- \* 衛星イオ起源プラズマが外側に輸送される。  
     角運動量保存から共回転遅延  
     動径方向電流で共回転方向にプラズマを加速(動径電流)
- \* 沿磁力線電流が形成され、オーロラが発生
- \* 降下電子と電離圏電波によるジュール加熱で高速中性風が発生

# IRTF (InfraRed Telescope Facility)

## CSHELL (赤外エシェル分光器)

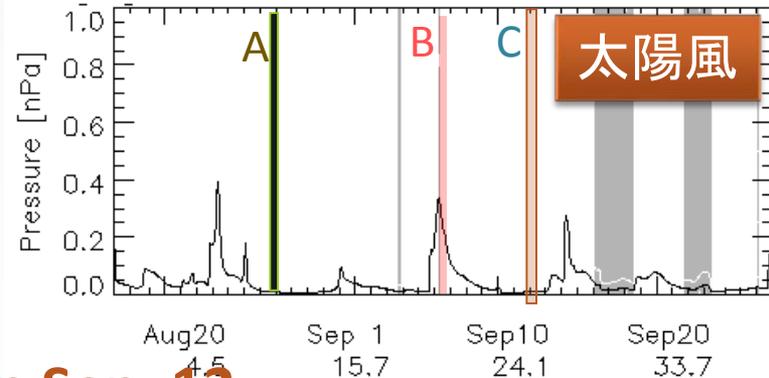
波長帯	1.0 ~ 5.5um
波長分解能	43000 (0.5" slit)
分光 波長範囲×空間	0.01um(@4um)×30"
撮像 FOV	30"×30"
撮像 空間分解能	0.2"/pix

$H_3^+$  Q(1,0<sup>-</sup>)  $v_2$  3.953um  
輝線の高分散分光観測  
(R~43000)



: InfraRed Telescope Facility

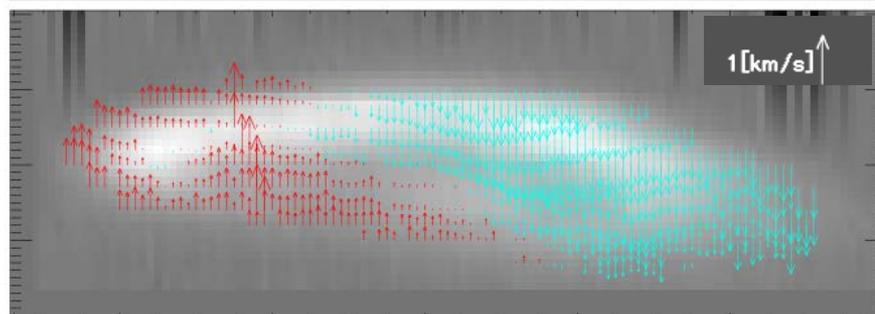
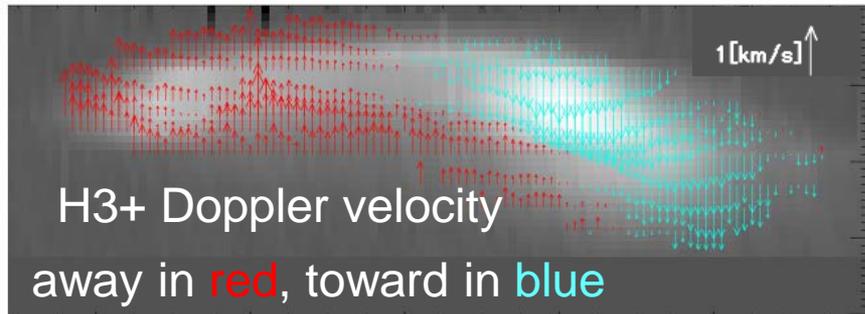
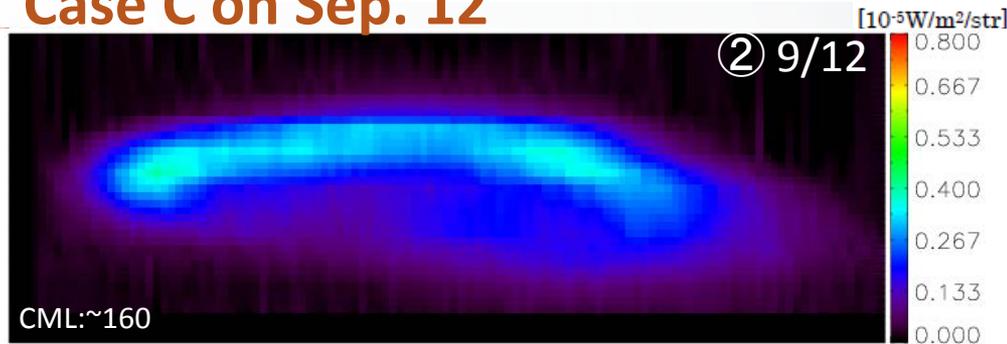
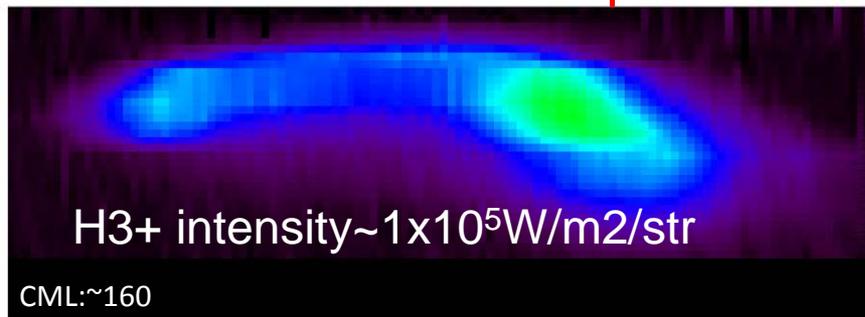
# \* H3+ auroral intensity and ion velocity map



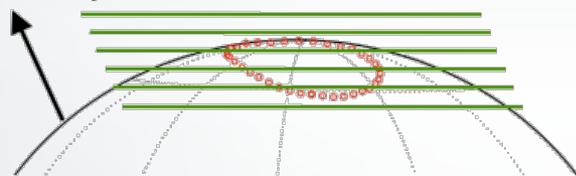
N-hemi.

Case B on Sep.5

Case C on Sep. 12



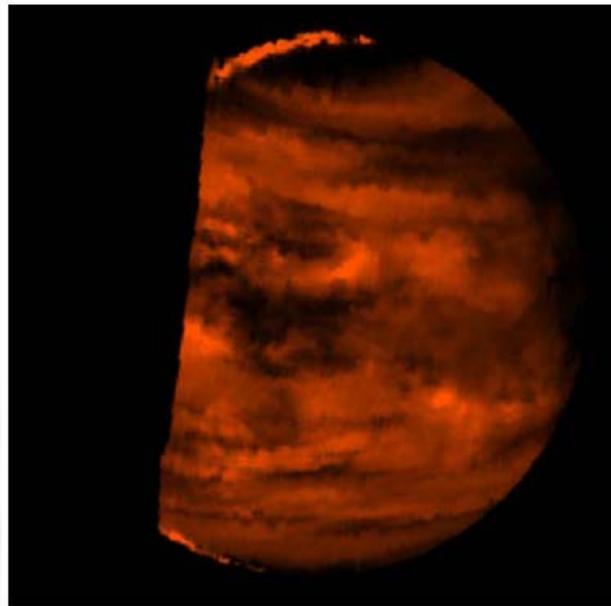
Celestial north pole



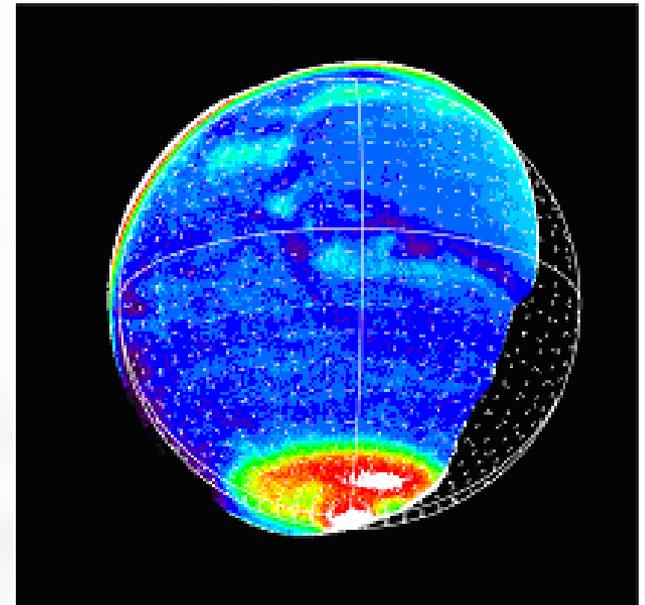
Good correspondence between solar wind pressure and auroral intensity in the dusk-side oval/polar cap region.

# その他の惑星赤外観測ターゲット

- \* Infrared measurement has advantages since there are many emissions and absorptions in the infrared range and solar flux is relatively small.

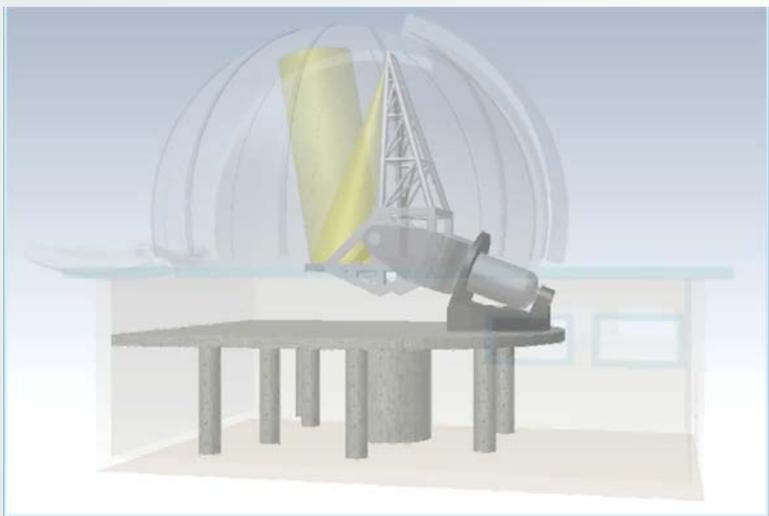


Venus cloud pattern  
at 2.3 $\mu$ m  
[ Galileo/NIMS]



H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> clouds on  
Mars [Subaru]

# 1-3. 東北大地物C領域 (含PPARC)の取り組み



透光板

グリッドミラー  
切り替えステーション

ベンチ支持フレクシヤ

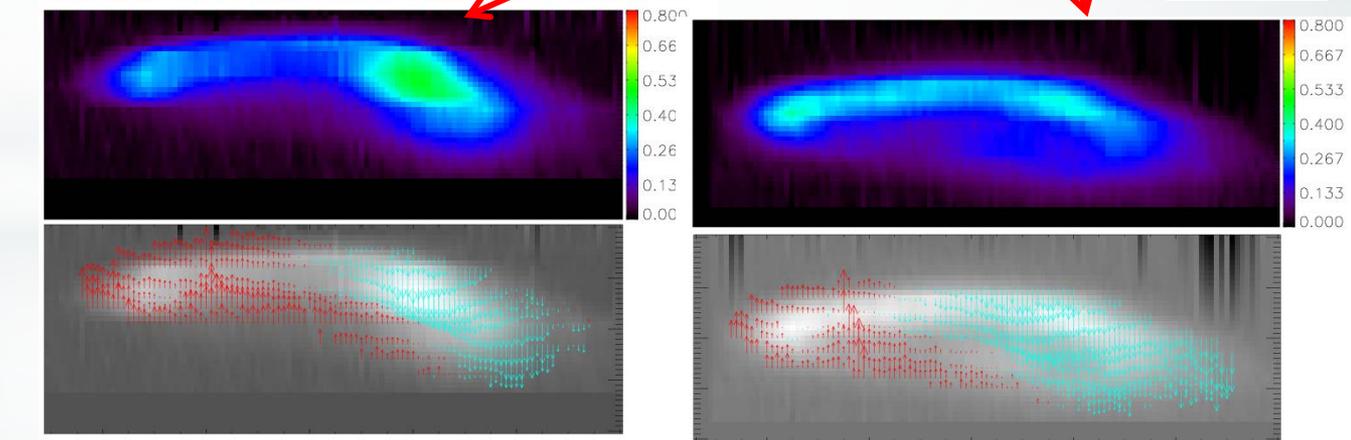
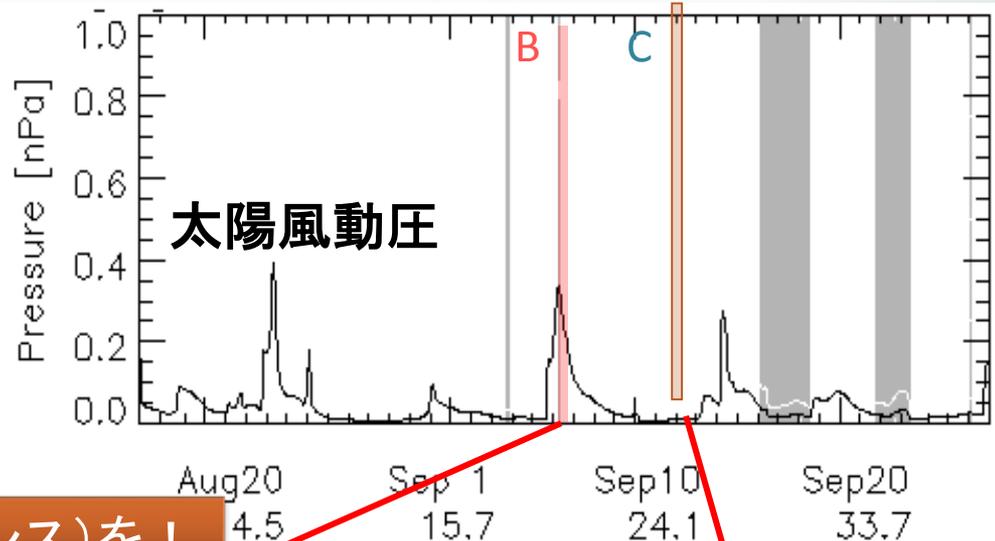
# これまでの観測に欠けているもの： 観測時間

2007年以降、IRTF ( $\Phi 3\text{m}$ )、SUBARU ( $\Phi 8.2\text{m}$ )等の大型望遠鏡を用いた公募観測を行ってきた。

しかし、年に数晩の観測から、木星オーロラの変動と太陽風の相関を明らかにすることは困難。

惑星大気・プラズマ現象の解明には連続観測は本質的。

もっと時間(チャンス)を！



IRTF

away in red, toward in blue

# \* 動機

## これまでの観測に欠けているもの： 光の量

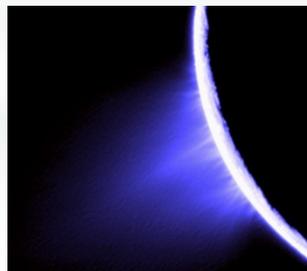
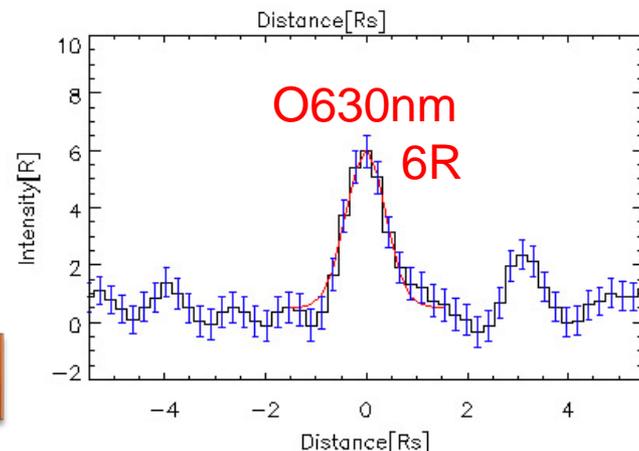
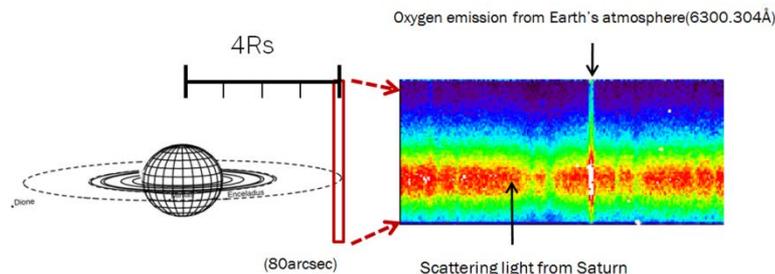
東北大学では、ハワイ・マウイ島ハレアカラ山頂(標高3000m)に、自前の2.6m観測ドームを建設し、40cm反射望遠鏡と可視エシェル分光器の観測を2006年から行っている。**[インターネットによる完全自動運用]**

観測ターゲットは、

- ・水星ナトリウムテール(立教大亀田氏と共同)
- ・土星エンケラドストーラス、等

\* エンケラドストーラス(O630、6R)の1データを  
得るのに**数日間の積分時間**が必要

\* 本来、時間変動や、衛星公転位相角との  
対応関係を知りたいが、光量が足りない。



もっと光(大口径)を！

# ねらいと計画

- ・現実的な条件の下で、できるだけ口径を大きく、
- ・連続観測(自動遠隔運用を含む)を可能とする。

このために、我々は以下の2プロジェクトを推進している。

## (1) 口径1.8m 非軸望遠鏡「PLANETS」

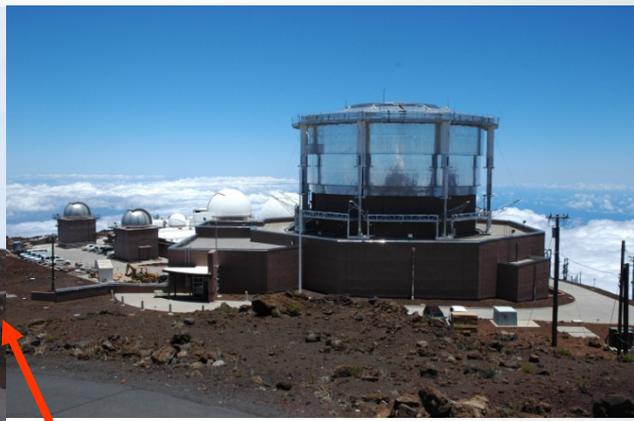
中口径ながら、オフセット(非軸)鏡を用いた低散乱光学系を生かし、明るい天体周りの希薄発光や、系外惑星観測を目指す。国際共同研究。

## (2) 飯舘60cm望遠鏡のハレアカラ移設

放射線汚染で運用が困難となった飯舘観測所にある60cm望遠鏡を、2013年度中にハレアカラに移設完了する予定で、現在進行中。小口径ながら、完全自動運用と、クーデ出力を生かした中大型観測装置と組み合わせて、連続観測を達成する。

# マウイ島ハレアカラ山頂サイエンスシティ

Altitude: 3055m



晴天率6割~8割

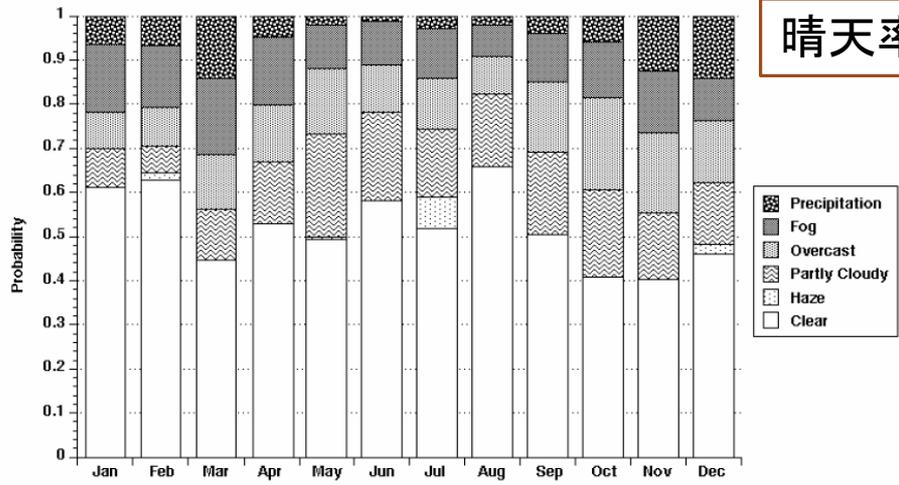


Figure 2-1. AMOS Weather Observations, 5-yr Average



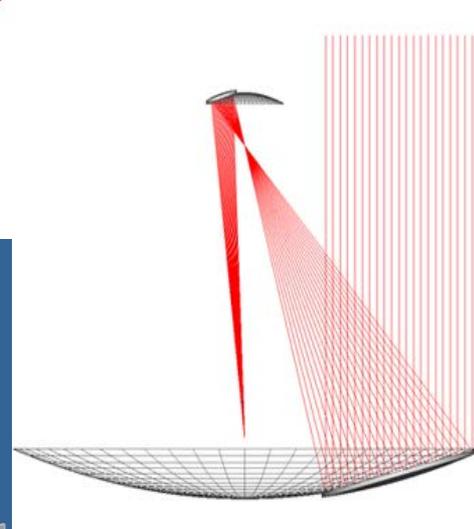
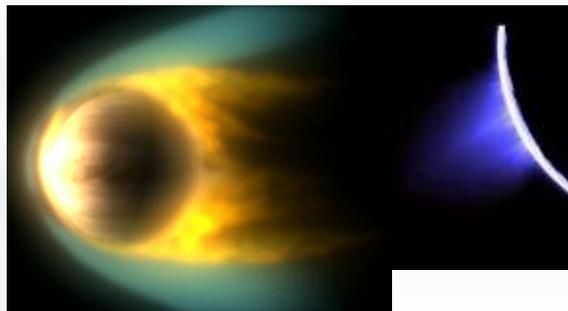
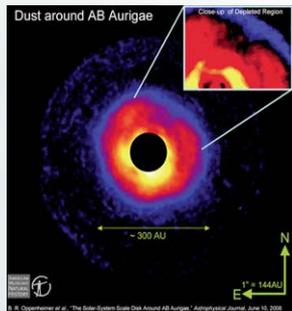
TOHOKU UNIVERSITY

# (1) PLANETS計画

PLANETS (Polarized Light from Atmospheres of Nearby Extra-Terrestrial Systems) 望遠鏡は、今まで不可能だった明るい天体近傍の暗い対象の観測を可能にするために、望遠鏡内の回折・散乱を極度に抑える非軸グレゴリアン光学系を採用し、最新の鏡面研磨技術を用いて製作し、コロナグラフと補償光学を用いて

**太陽系惑星の大気・プラズマ発光現象の連続観測**  
**系外惑星とその大気**  
**原始惑星円盤**

を分光撮像観測、偏光分光観測を行う。



**~1.8mφ telescope at Haleakala**

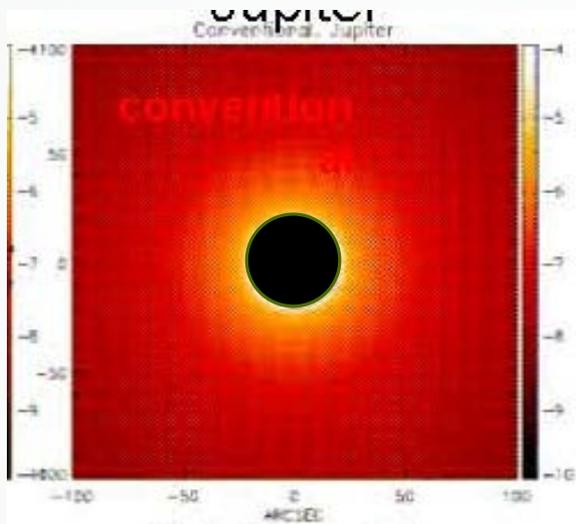
- Wide dynamic range  
**Off-axis with  $1/100\lambda$  smoothness**
- Coronagraph: **Gregorian-type**
- Polarization: **Equatorial mount**

**Disk around a young star**  
in polarized light  
(~300AU).  
A ring at 150AU might be

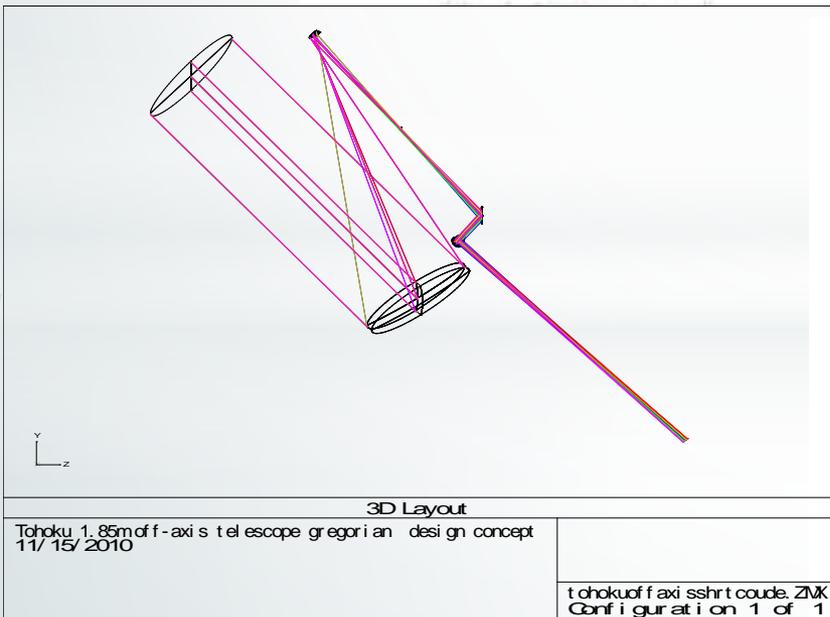
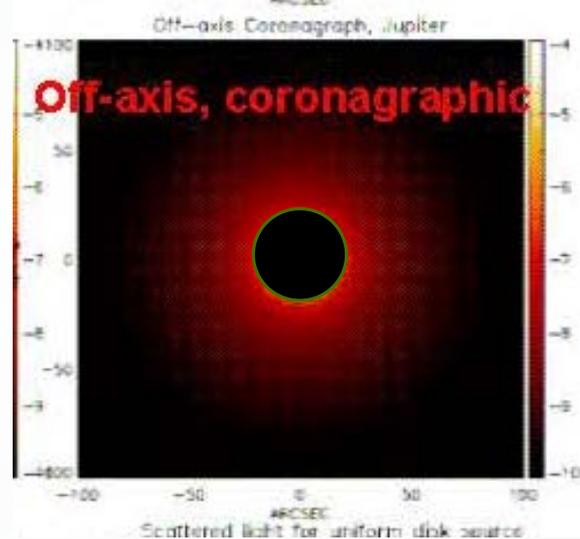
**Weak light close to Planets**  
scattered by the escaping  
atmosphere from Mars /  
Venus / Io / Enceladas

# PLANETS: 低散乱非軸光学系

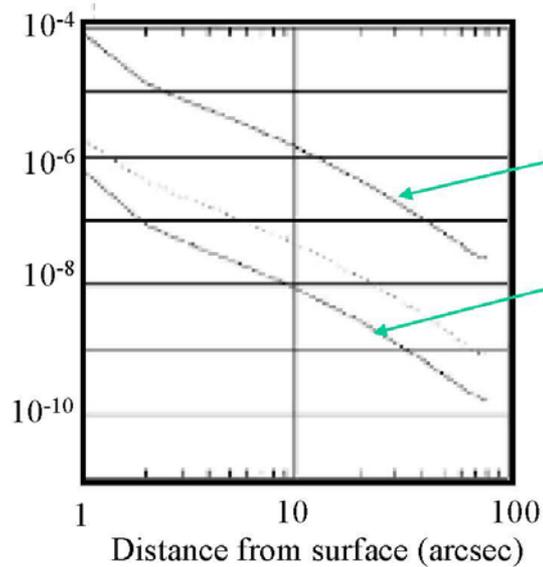
通常望遠鏡+コロナグラフ



非軸望遠鏡 (PLANETS)



Scattered light from uniform disk source



通常望遠鏡

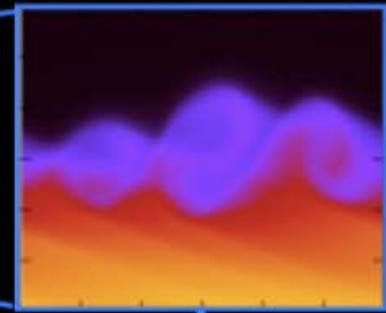
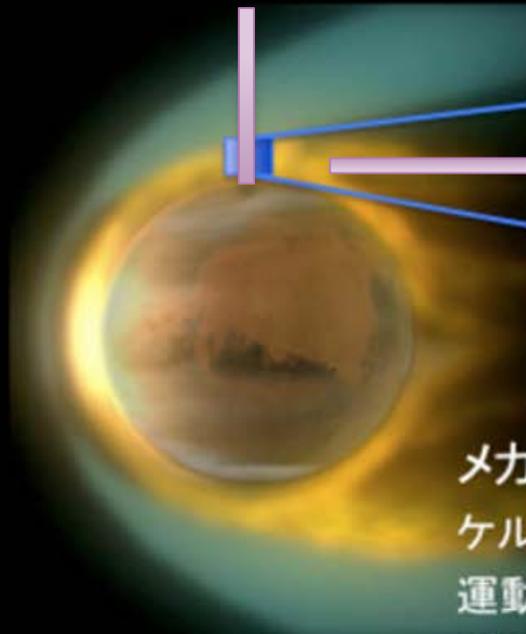
PLANETS望遠鏡



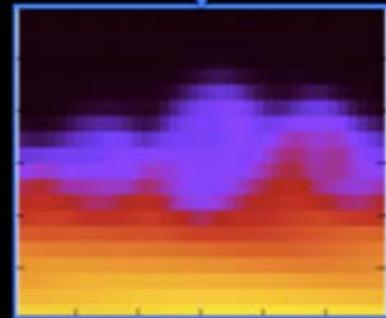
# 惑星電離圏・外圏大気の流出

## 電離圏イオン流出 - 太陽風から電離圏への運動量輸送

数値実験予測



15km分解能



メカニズムの有力候補:  
ケルビン-ヘルムホルツ不安定、  
運動論的アルフベン波、  
磁気再結合、  
プラズマ乱流など

27km分解能はこの倍程度  
Acceptable?

# 主鏡ブランク(東北大): 荒削まで完了



Melting furnace (Dec. 2010)

Glass blank arrived at Los Angeles (May 2011)

Criteria	Specification
Off-axis distance	1800 mm (see drawing #2)
Paraxial radius of the paraboloid	8.667 m, +0, - 1%
Surface error	10-20 $\mu$ RMS with a goal of 2-3 $\mu$ RMS
Grind: Front side	400 grit surface finish or finer, maximum roughness
Grind : Outer edge processing	fine grinding
Mechanical surface roughness:	200 nm RMS maximum
Edge geometry	must include safety pockets, fiducial and areas set aside for attachments (See Drawing #3 for exact positions).

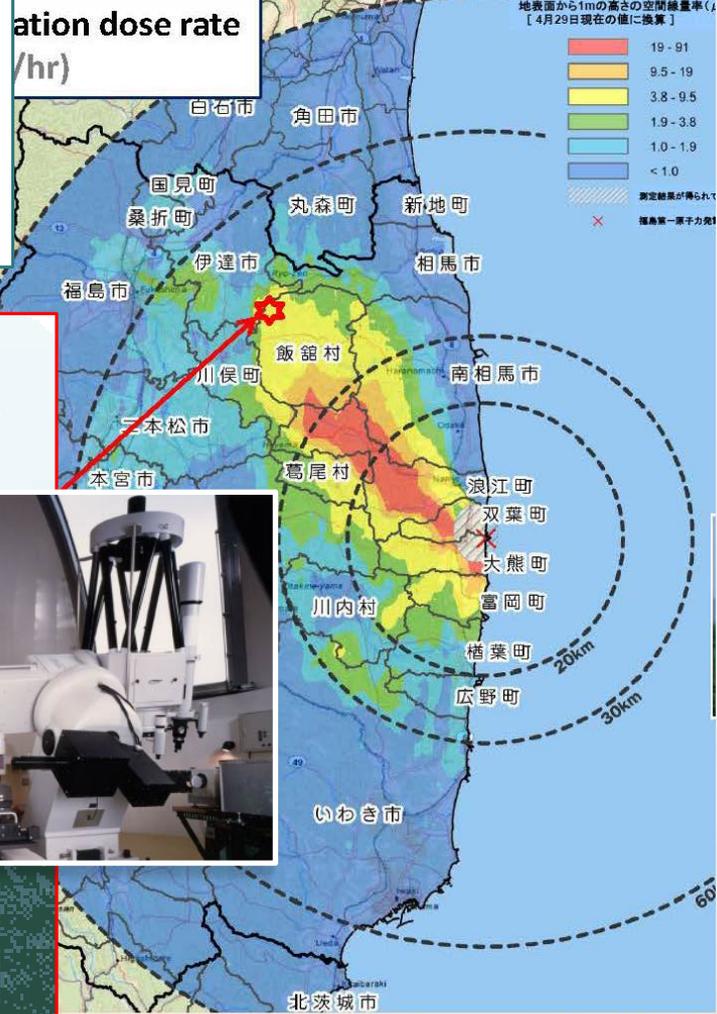
# (2) 飯館60cm望遠鏡の移設

Mid term: Integrat

## Radiation dose rate

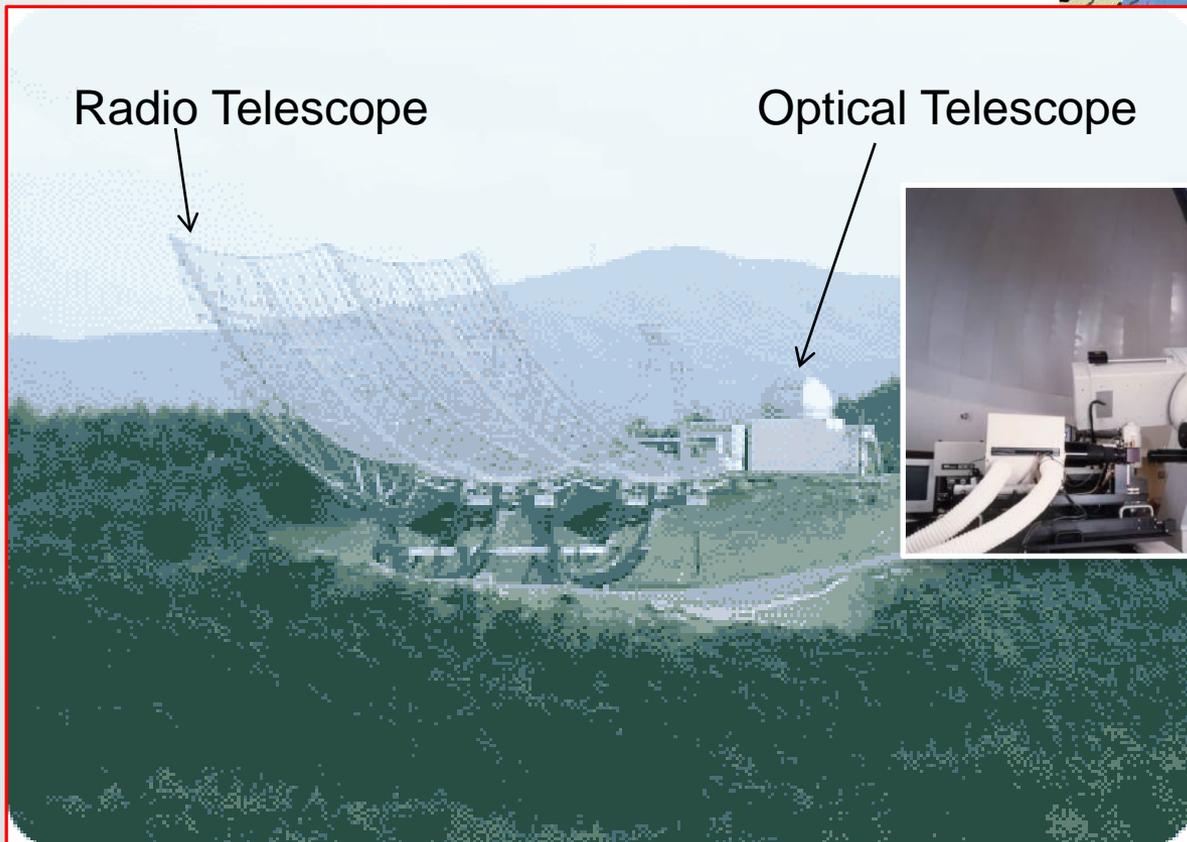
- Current value :  $3.5 \mu\text{Sv/hr} = \underline{30\text{mSv/yr}}$   
( $5 \mu\text{Sv/hr}$  1 year ago)
- Inside a building:  $0.2 \mu\text{Sv/hr}$

又部科子省及び不国ロロによる航空機センサーリングの結果  
(福島第一原子力発電所から80km圏内の線量測定マップ)



Radio Telescope

Optical Telescope





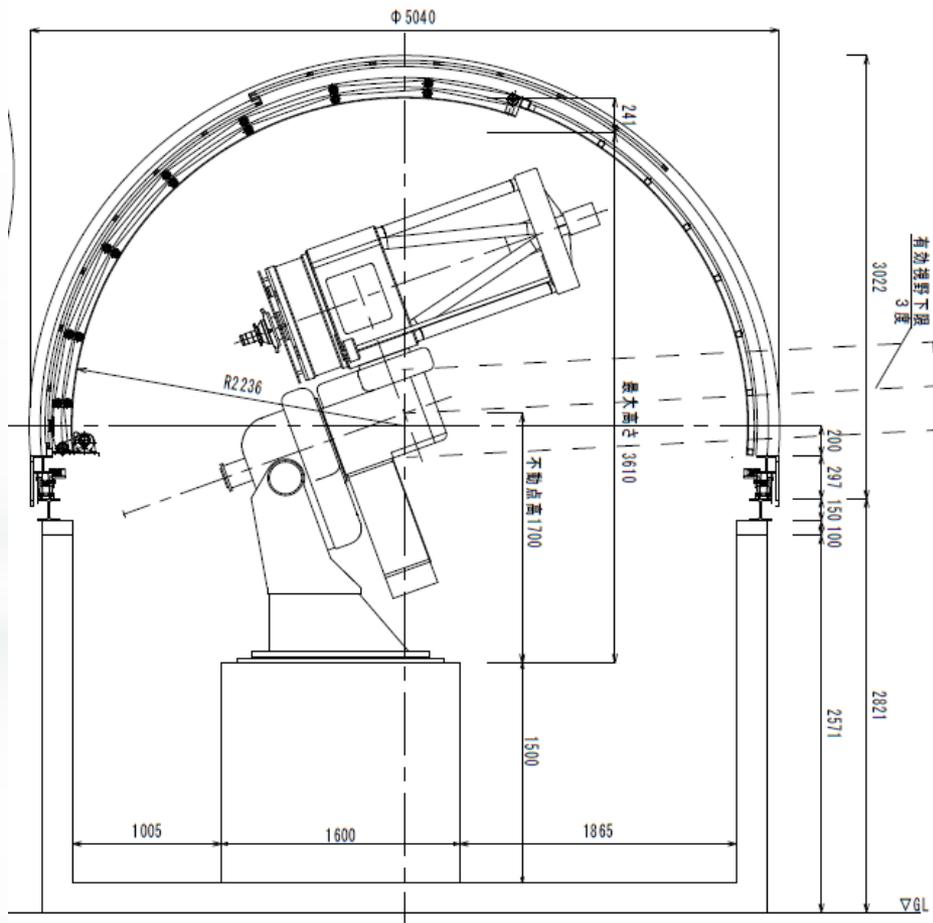
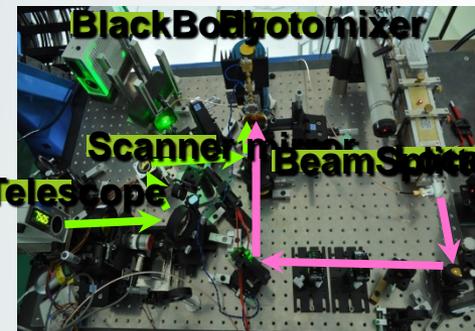
TOHOKU UNIVERSITY

# 2014年6月完成予定



## 観測装置

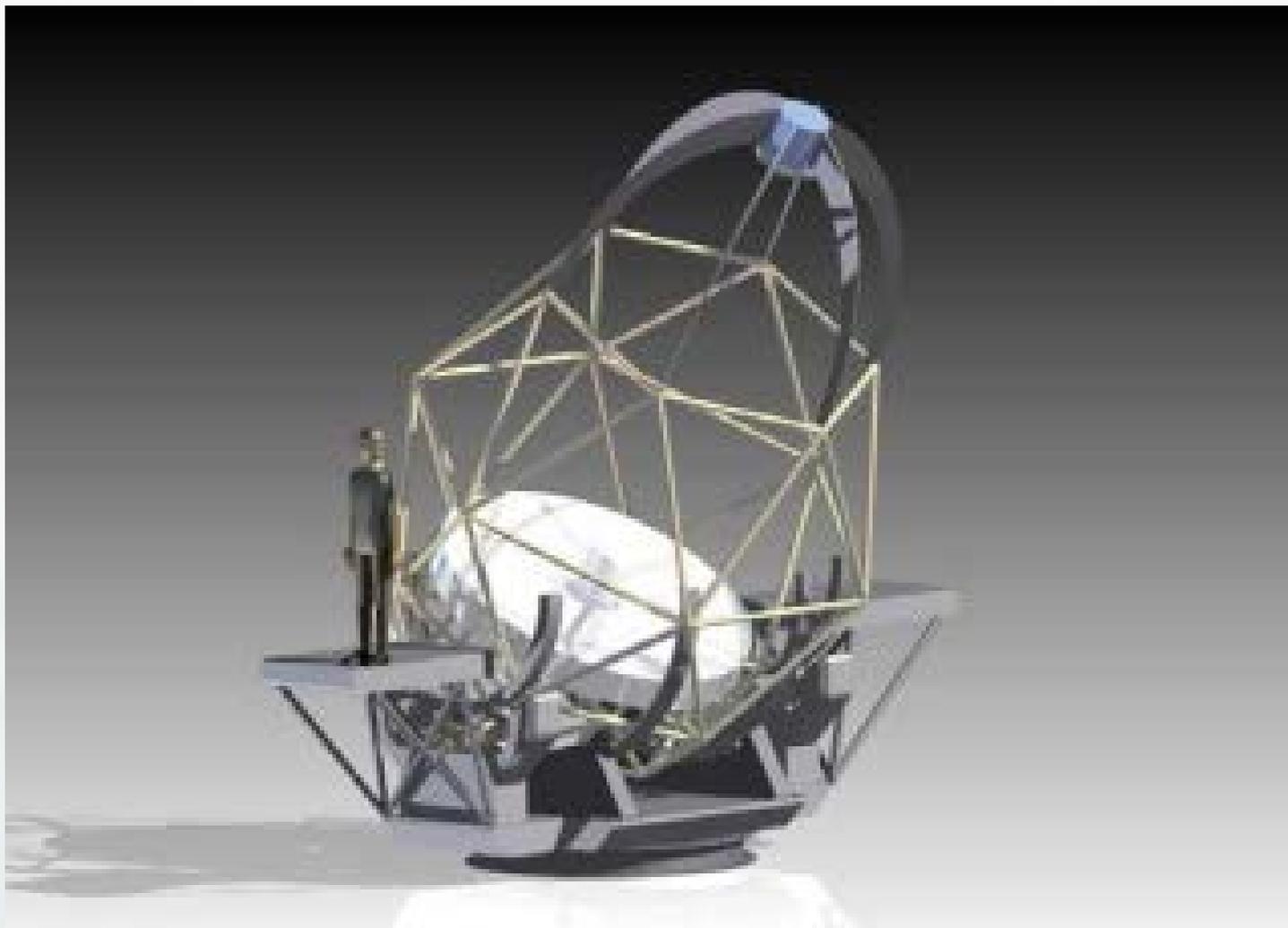
- 可視エシエル分光器
- 近赤外 (InSb: 1-4 $\mu$ m) エシエル分光器
- 中間赤外ヘテロダイン分光器





TOHOKU  
UNIVERSITY

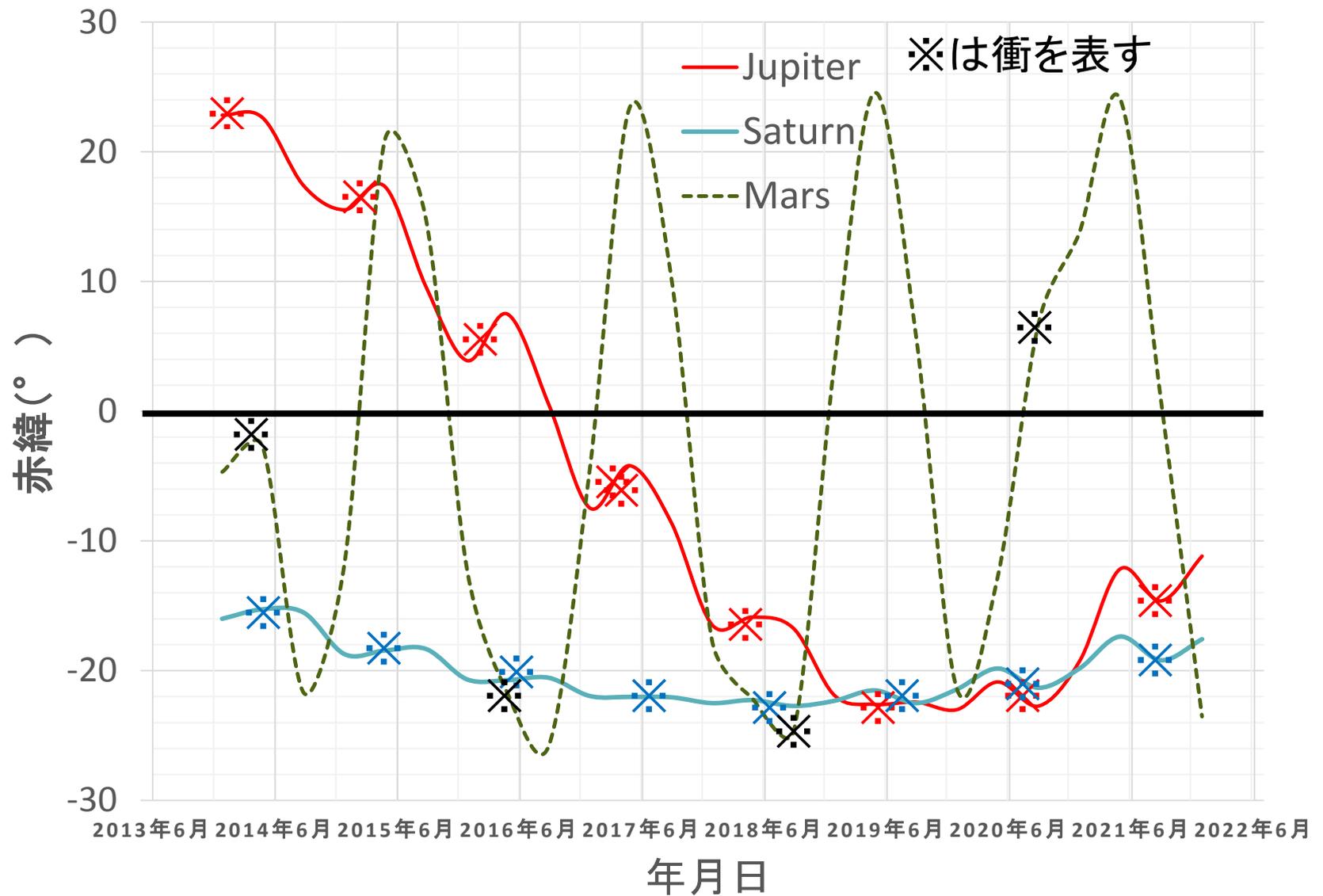
## 2. 南極望遠鏡を用いた惑星観測



# 2-1. 動機とねらい

- \* 惑星周辺の大気・プラズマ観測において、連続観測に基づく変動量を明らかにすることは本質的であり、観測機会の増加は重要である。
- \* 木星衛星イオ火山モニター：イオ火山の活動度を地上から赤外線リモートセンシングする。
- \* 木星オーロラ活動：H<sub>3</sub><sup>+</sup> (3.9 $\mu$ mまたは3.4 $\mu$ m)オーロラ発光を連続観測し、太陽風変動との対応関係を明らかにする。
- \* 南極では、ミッドウィンター前後の期間には、中低緯度ではなしえない「惑星の24時間連続観測」が可能である。

# 2-2. 観測検討





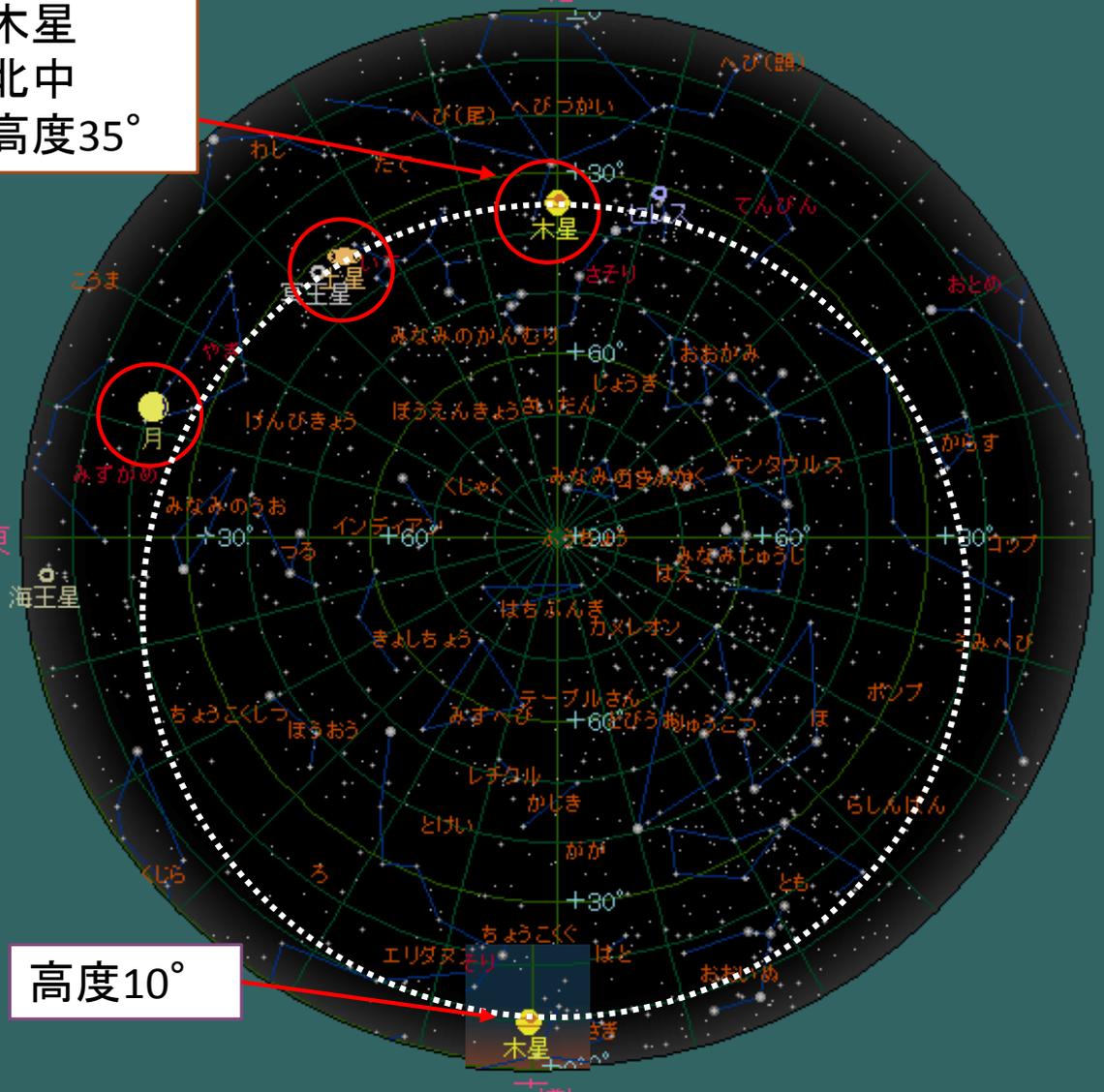
# 2019年の木星

- 木星でもっとも条件のよい2019年では、北中高度 $35^\circ$ 、南中高度 $10^\circ$ （薄明下）。
- 24時間観測が可能。
- 高度が低いいためシーイング等の影響が懸念される。

2019年06月22日05時30分 南極 どーむふじの星空

木星  
北中  
高度 $35^\circ$

東



高度 $10^\circ$

# まとめ

- \* 惑星大気・プラズマ観測において、連続観測に基づく変動量を明らかにすることは本質的。観測機会の増加は重要。
- \* 木星衛星イオ火山モニタリング
- \* 木星H3+ (3.9 $\mu$ mまたは3.4 $\mu$ m)オーロラ観測
- \* その他：金星中層・下層雲の近赤外リモートセンシングや火星のH2O雲、CO2雲などが観測ターゲット。
- \* ミッドウィンター前後の24時間連続観測から、惑星大気・プラズマ変動解明のブレイクスルーが期待できる。