

太陽系小天体研究の展望

Small Solar System Bodies

関口 朋彦（北海道教育大学）

内容

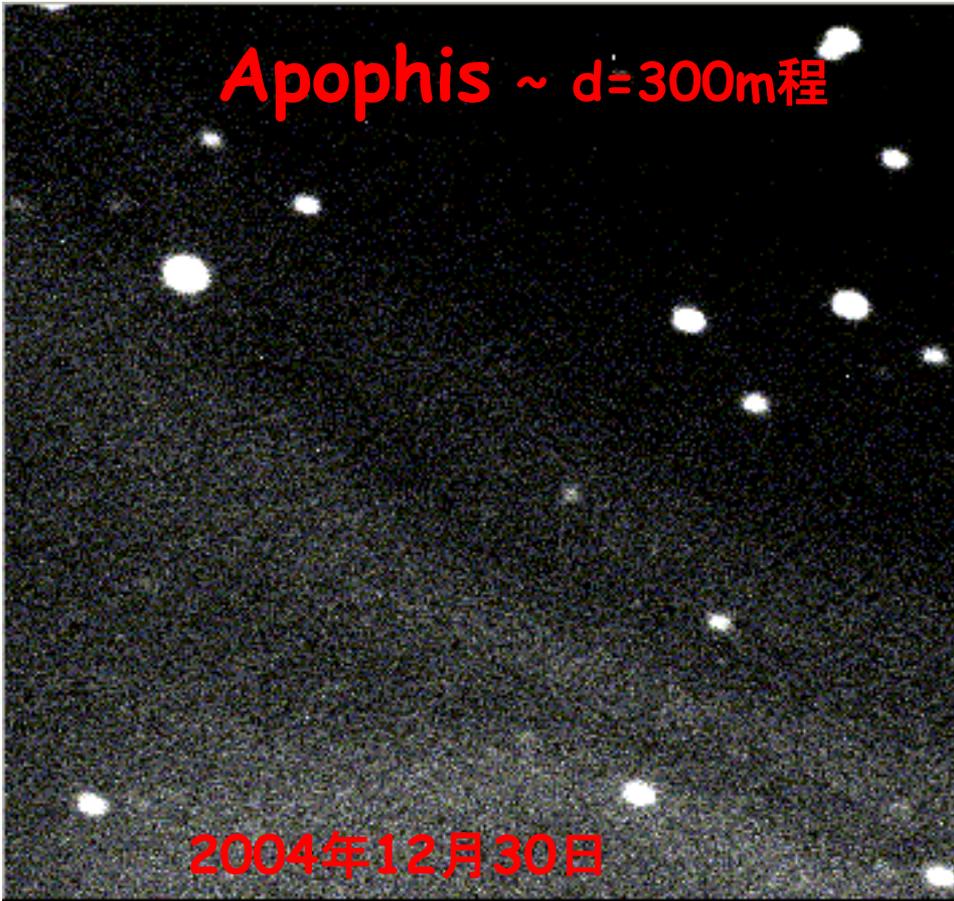
- ◆ 太陽系移動天体に対する望遠鏡の指向追尾精度
- ◆ 探査機ミッションによる太陽系小天体の研究
- ◆ 大口径、広視野、広帯域分光、高空間分解能、中間・遠赤外、スペース、小口径機動力の観測諸々
- ◆ やっぱり大口径の深く遠く

太陽系天体観測のための望遠鏡仕様

- 移動天体である

近地球小惑星 アポフィス
移動量: 1時間に 40° 程度

Apothis ~ d=300m程



2004年12月30日

上空 32,500 km

軌道長半径: 0.922 AU
近日点距離: 0.746 AU
遠日点距離: 1.099 AU
公転周期: 0.89 年
323.5日
軌道傾斜角: 3.33°

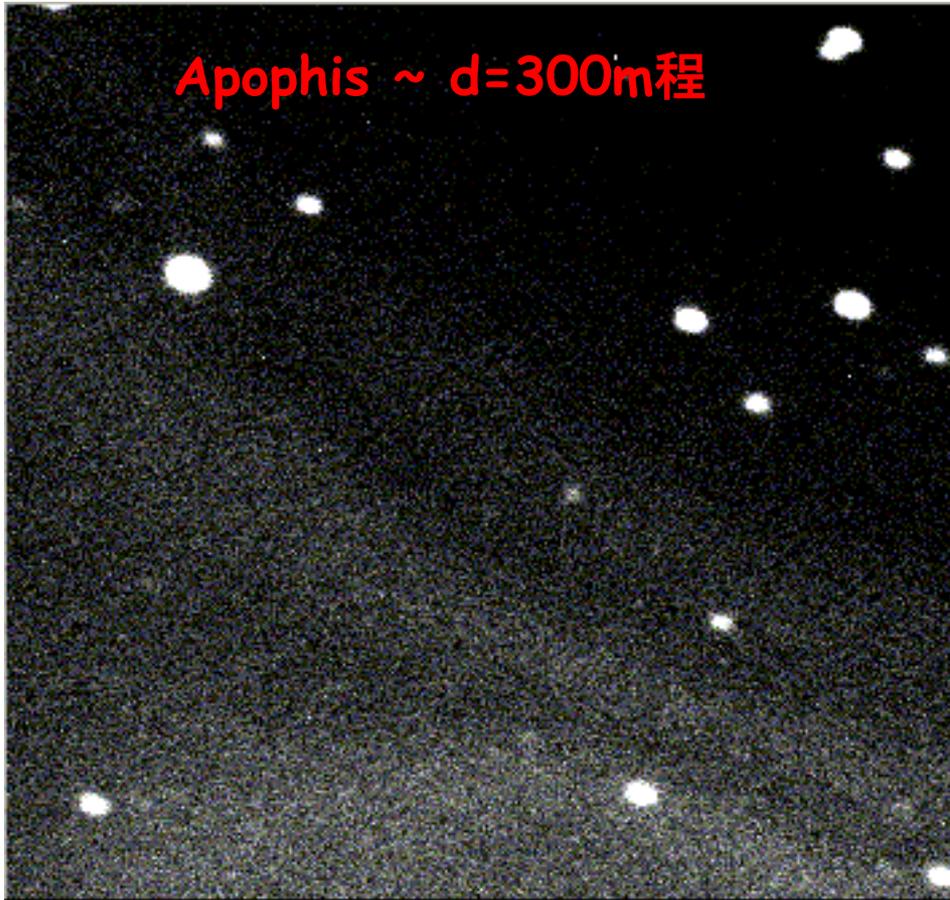
太陽系天体観測のための望遠鏡仕様

- 移動天体である: 追尾性能

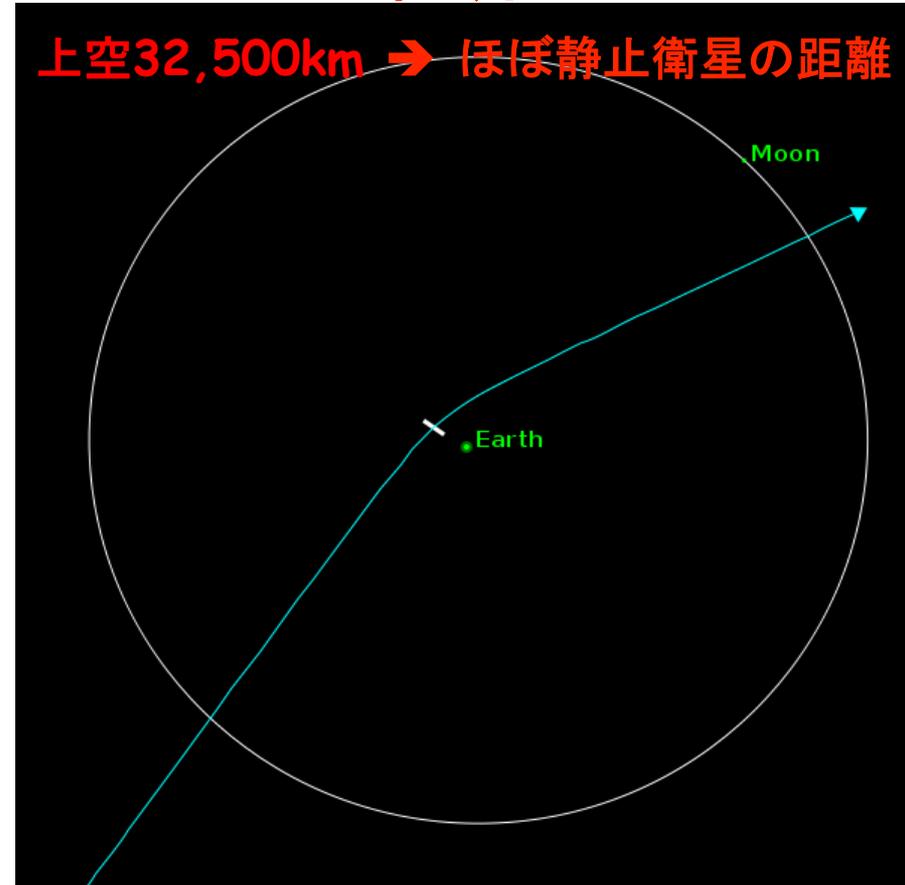
- 近地球型小惑星Apophisが、2029年地球に近接遭遇の際、≒ **40 deg/hr**
 - 望遠鏡への要求追尾仕様の最大値
 - シーイングサイズを保持して非恒星追尾が可能であること

2029年4月13日

Apophis ~ d=300m程



上空32,500km → ほぼ静止衛星の距離





JAXA at Trojan
in 2030



NASA New Horizons
Pluto in July 2015

Pluto
July 14, 2015

NEPTUNE
1 mission



URANUS
1 mission

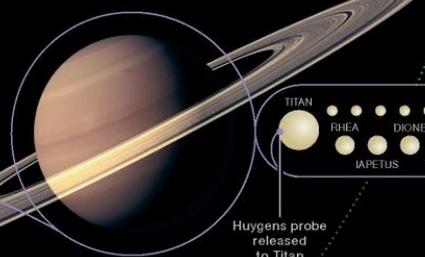


First craft
to approach
Neptune

First craft
to approach
Uranus

Passes Saturn's
orbit June 6, 2008

SATURN
5 missions



Discovers
additional
Saturn ring



Huygens probe
released to
Titan

Exploration
of Saturn's
moons

NASA Cassini
2004 - 2017



Exploration
of Jupiter's
moons

ESA JUICE 2027

NASA Dawn at Ceres
in Feb 2015



NASA Dawn at Vesta
Jul 2011- Aug 2012

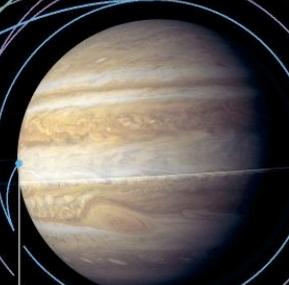


ESA Rosetta 2014

ASTEROIDS
& COMETS
17 missions



JUPITER
9 missions



NEAR Shoemaker
becomes first probe
to orbit and touch
down on an
asteroid, 443 Eris,
February 12, 2001.



Asteroid
Ida flyby;
discovery
of Dactyl



Mission
ends upon
impact
September 21,
2003

NASA Juno in 2016

太陽系小天体研究 と 太陽系探査ミッション

First craft to cross
the asteroid belt

Adapted from National Geographic

太陽系小天体の研究 / 探査機 (これまで)

大型月探査(Apolloなど) / 外惑星探査(Voyager, Pioneer)に続き

※火星/金星探査なども

- ハレー彗星探査 1986年

- Giotto, Vega I/II, すいせい/さきがけ, ICE 小天体探査の幕開け

- 彗星探査

- Deep Space 1 –2001年 彗星核撮像/イオンエンジン NASA
- Stardust –2004年 宇宙塵採取!! NASA
- Deep Impact –2005年 370kgのインパクトー! NASA

- 小惑星探査

- NEAR-Shoemaker –Eros 1999-2000年 直接撮像 NASA
- はやぶさ – Itokawa 2005-2010年 サンプルリターン!! JAXA
- Dawn – Vesta 2011年 → Ceres 2015年 NASA

- 土星とその衛星タイタン、エンケラドス、フェーベ...

- Cassini-Huygens タイタンの大気と表面調査、降下機ホイヘンス
タイタンに炭化水素の湖沼とCH₄循環??
エンケラドスに水蒸気噴出, NaCl...
5.8トン, 原子力電池3基, **34億ドル!!** NASA, ESA

太陽系小天体: 今後の探査計画

- 彗星探査

- Rosetta– 2016年 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星核に着陸！ ESA

- 小惑星探査

- Dawn– Ceres 2015年到着！ NASA

小惑星には水があるのか？

- はやぶさ2– 1993JU3へ 2014年打ち上げ！ 2018年到着！ JAXA

始原的 C型小惑星 探査

- OSIRIS-REx– Bennu (1999RQ36)へ 2016年打ち上げ！ 2019年到着！

(→ 将来的な小惑星有人探査の足掛かり) NASA

- トロヤ群ソーラーセイルミッション 2022年打ち上げ(!?)

2031年到着！ 2036年地球帰還 JAXA(お家芸(?)宇宙帆船による)

- Don Quijote, 2013/2015?? ESA

- 冥王星探査

- New Horizons– 2015年冥王星に到着！ NASA

外縁天体の探査: 氷微惑星(集合体)

- 木星のガリレオ衛星探査

- JUICE– 2022年打ち上げ！ 2033年到着！ ESA

太陽系小天体の地上からの光/赤外観測

探査機で行けるものは限られている

- 探査機で行くことができた一つのサンプル(天体)を地上の望遠鏡によって多数個のデータを取得することによって一般化へ
(もし探査機ミッションでサイエンスが終わるなら光赤外の望遠鏡も電波の望遠鏡も太陽系小天体に向けられないことになってしまう)

また、

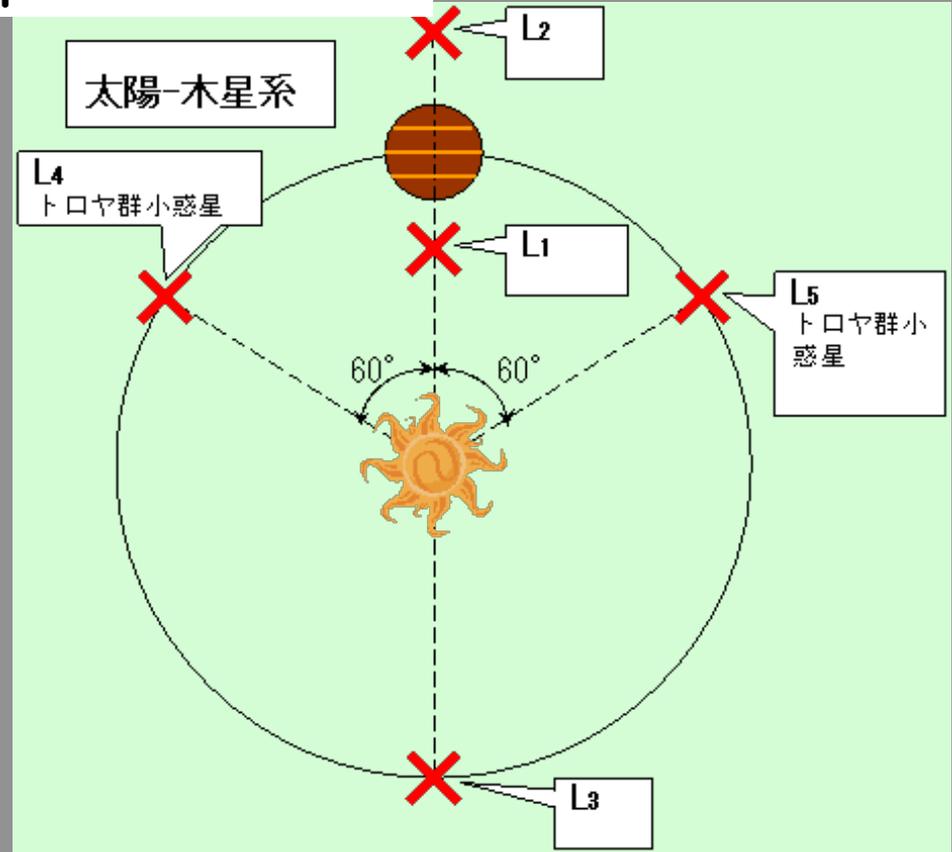
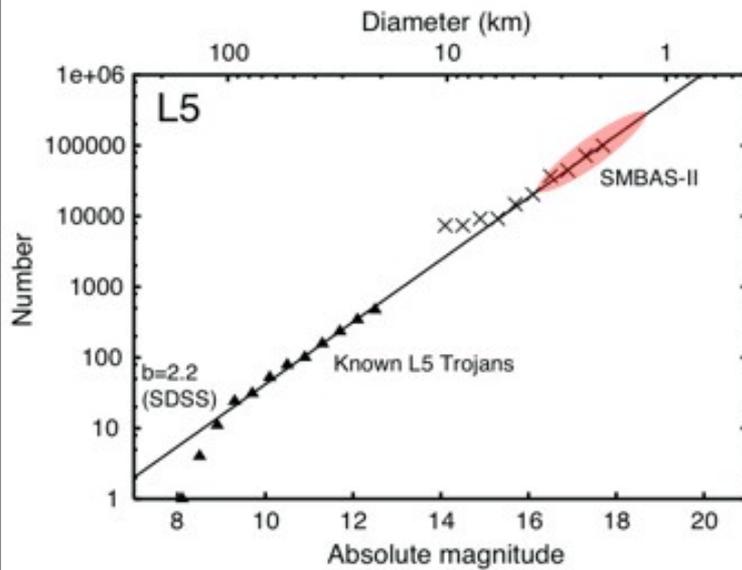
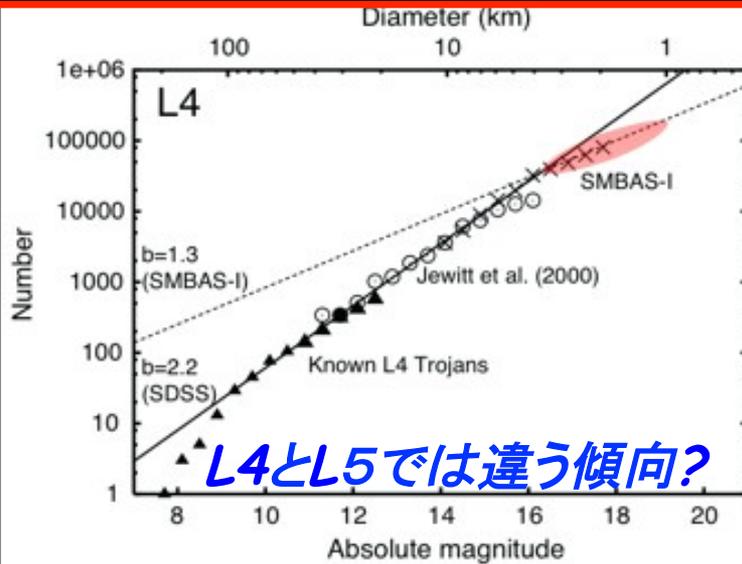
– ミッションに対する支援観測もある

- 自転周期がわからないと探査機はランダーを持って行けない
- 自転位相がわかっていないといけない
- 表面状態がわかっていないとランダー／サンプルリターンができない
- アルベドがわかってないとカメラが設計できない

広視野

トロヤ群小惑星のサイズ分布

Yoshida et al, 2007
Suprime-Cam



トロヤ群小惑星はカイパーベルトからやってきたのか?

Horner et al, 2013

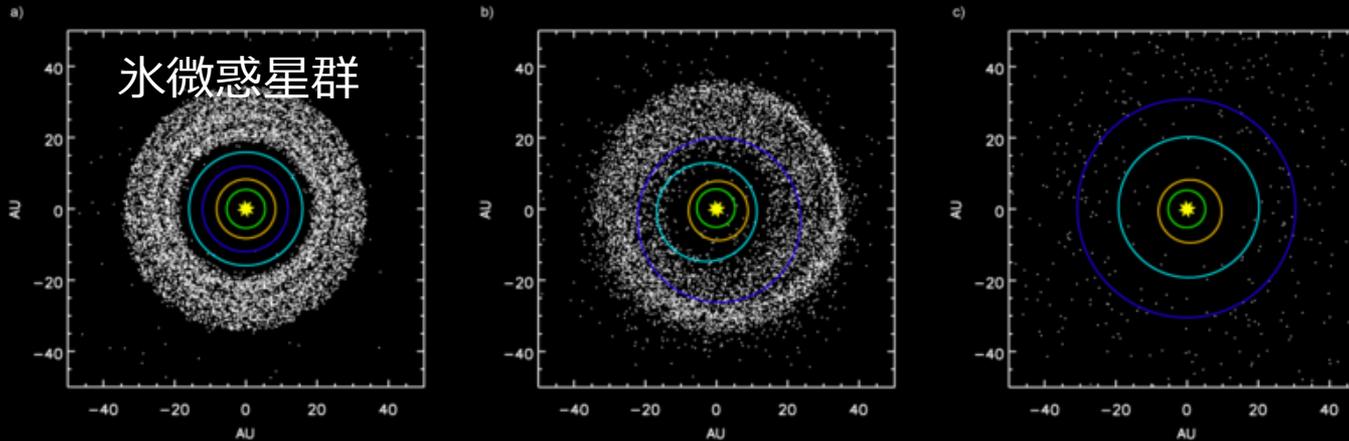
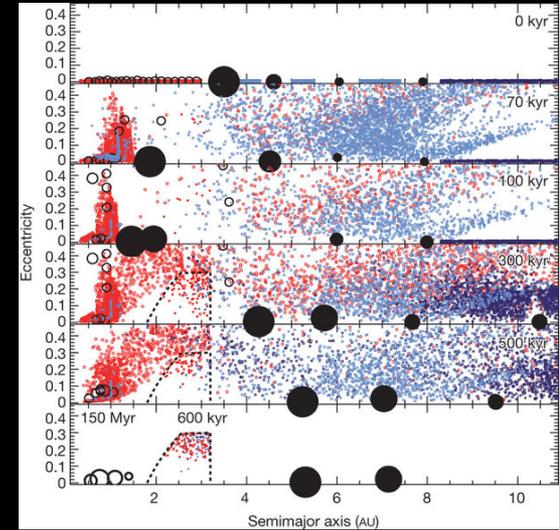
Marchis et al, 2006

太陽系形成論：現代版シナリオ＝惑星大移動

1. 原始太陽系円盤内でのガス惑星移動
(Grand tack 仮説: Walsh et al., 2011)

2. 数億年後に軌道不安定化
(Niceモデル/Jumping Jupiter 仮説)

Gomes et al. 2005, Morbidelli et al. 2005, Brasser et al., 2009



木星
土星
天王星
海王星

トロヤ群

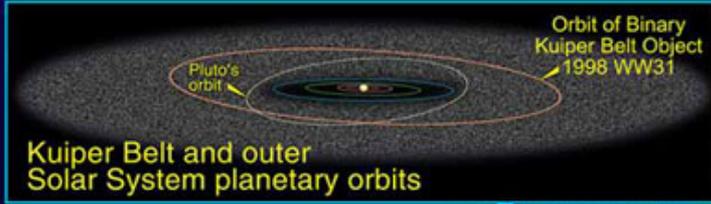
⇒

散乱・捕獲された
カイパーベルト天体

Dynamical Evolution of Our Solar System

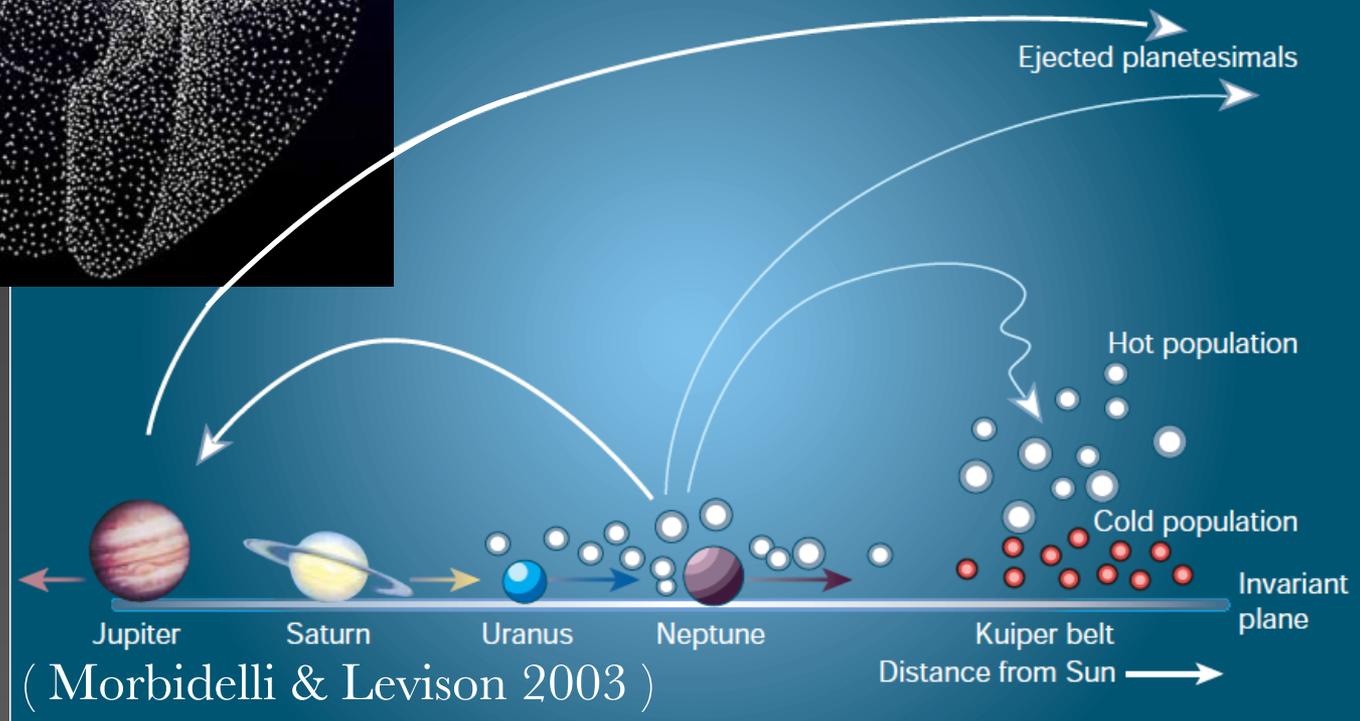
Giant planet migration
(Malhotra 1993; Morbideli et al. 2004, 2005)

Scattered, Resonance Captured



The Oort Cloud
(comprising many billions of comets)

Oort Cloud cutaway
drawing adapted from
Donald K. Yeoman's
illustration (NASA, JPL)



Not yet understood of Inner-Oort cloud

広視野

天体検出と分裂彗星核

73P/Schwassmann-Wachmann 3の分裂核

Fuse et al, 2007
32'.5 x 23'
Suprime-Cam

Magnification Image of Small Fragments



広視野による天体検出には、一般的な科学的目的の他、
スペースガードの意味合いも大きい。

Suprime-Cam (R)
May 11, 2006

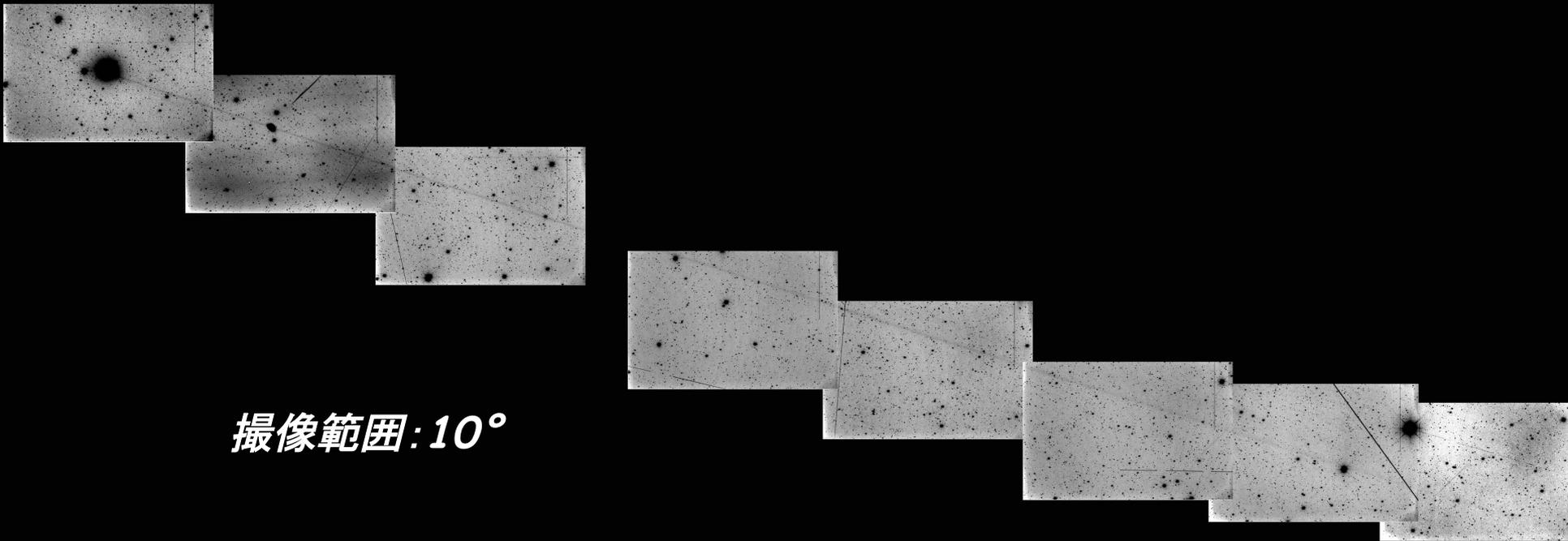
広視野

天体検出と彗星の尾

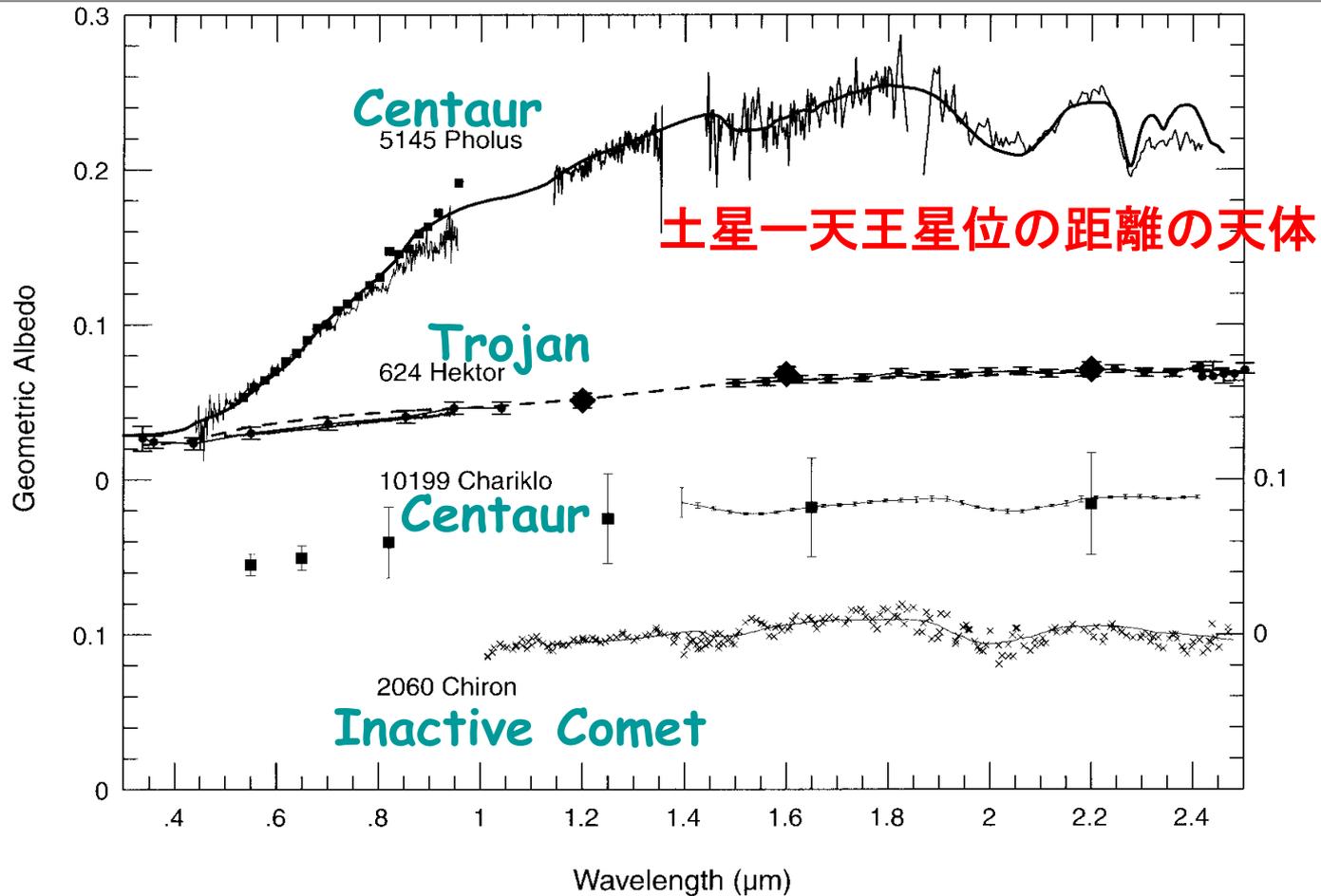
10P/ Tempel 2 のダストトレイル

アマチュアによる彗星
ダストトレイルの検出
口径:25.4 cm

撮像範囲:10°



広帯域の波長範囲



氷小天体の可視-近赤スペクトル比較

Barucci et al, 2006

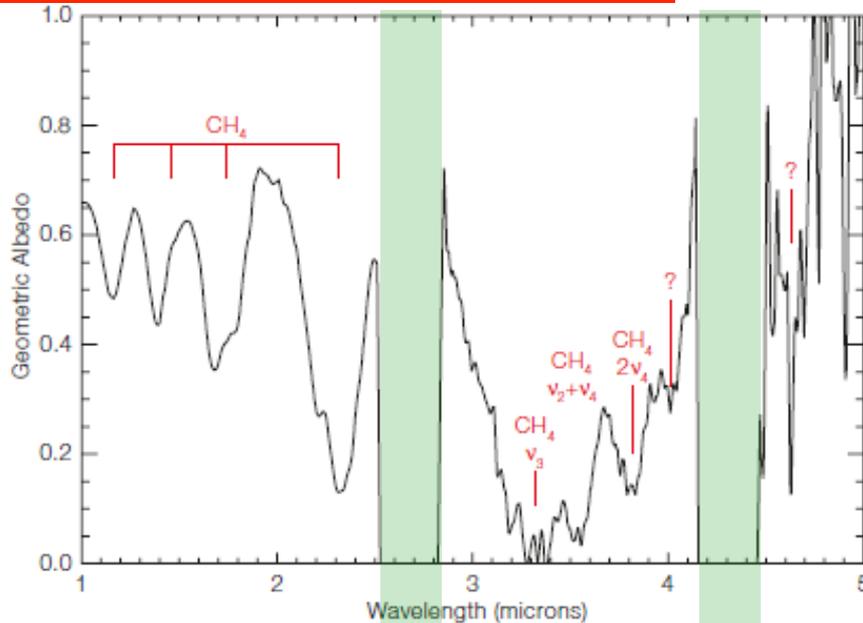


Figure 1: Pluto's spectrum in the range of wavelengths 1–5 μm . The species responsible for the absorption bands detected in our spectrum are marked in the figure. No object flux is measured in the atmospheric absorption bands at 2.5–2.8 and 4.1–4.4 μm .

Pluto's near-IR spectrum

どちらもV14等

Triton's near-IR spectrum

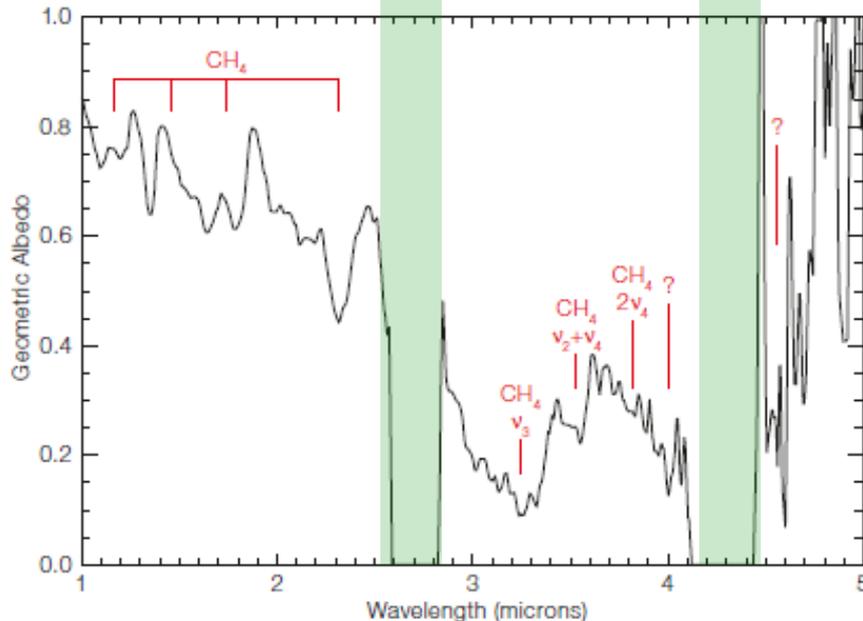
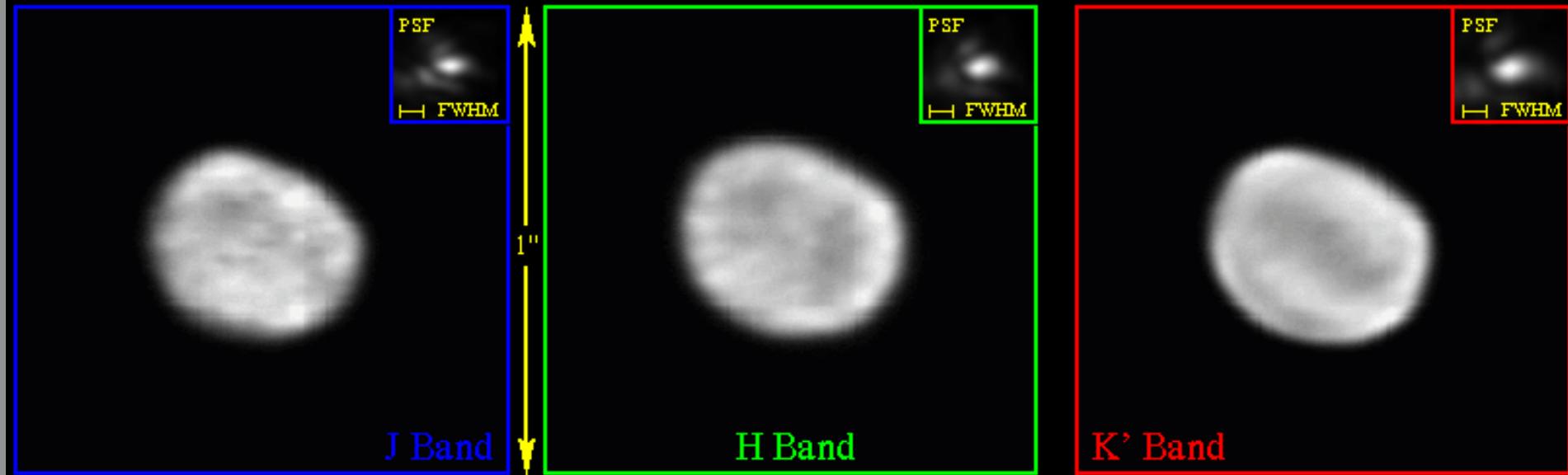


Figure 2: Triton's spectrum in the range of wavelengths 1–5 μm . The species responsible for the absorption bands detected in our spectrum are marked in the figure. No object flux is measured in the atmospheric absorption bands at 2.6–2.8 and 4.1–4.4 μm .

CH4 absorption

高空間分解能

小惑星のマッピング: Vestaの例 近い大きな小惑星なら空間分解



Vesta, Keck AO first light
resolution ~ 50 mas
integration times:

J=3x2sec, H=3x2sec, K'=12x2sec
(with ND3 in all cases)

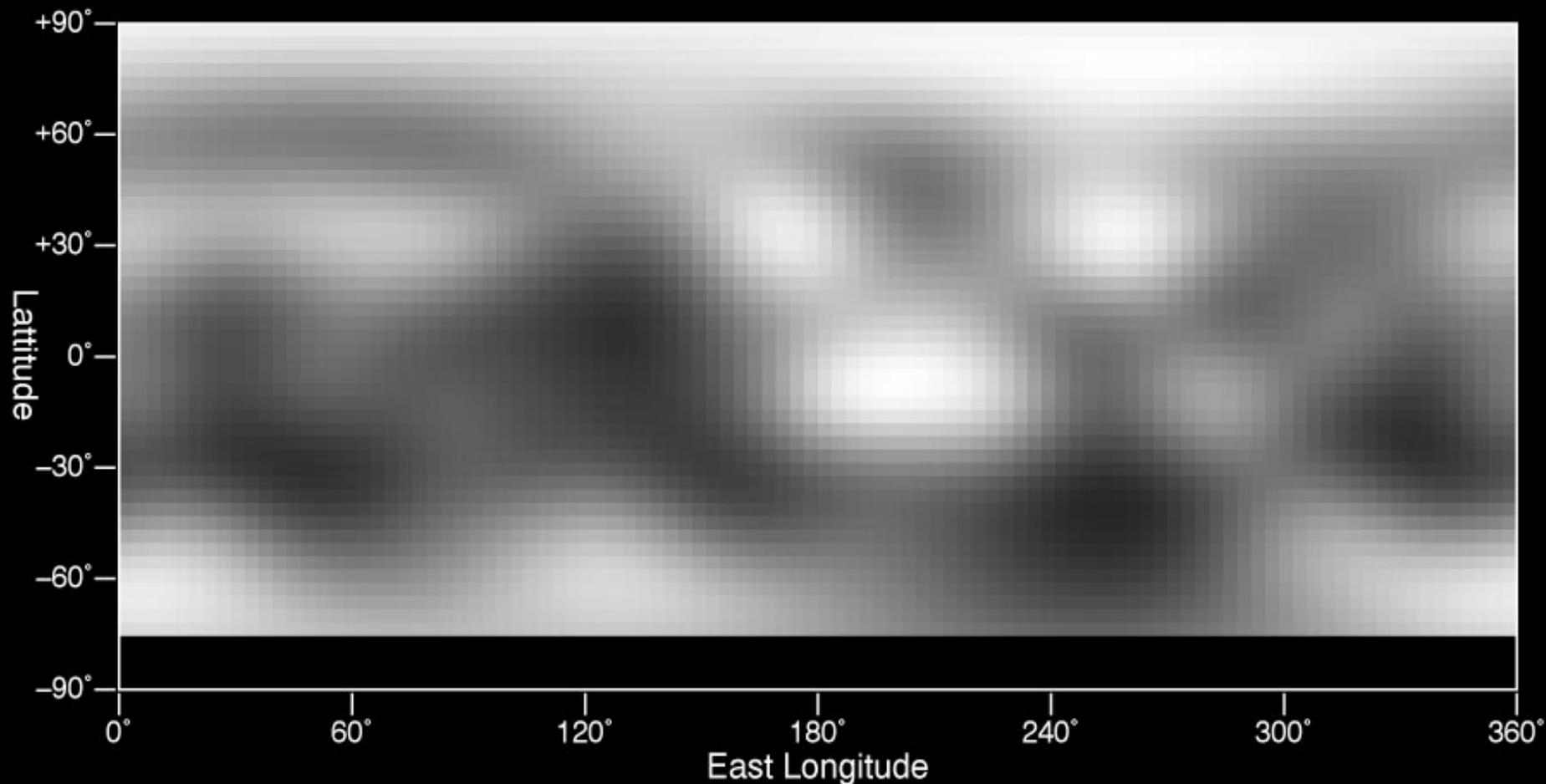
Images deconvolved with maximum
likelihood algorithm

(Obtained on Keck II Telescope with
Keck AO and KCam on 02/06/1999)



K' Band No AO correction

冥王星のアルベドマップ (HST)



Surface Map of Pluto
Hubble Space Telescope • Faint Object Camera

Size determination of Eris with HST

Diameter: 2400 ±100 km

Geometric Albedo: $P_v = 86\% \pm 7\%$



Image is smaller than 2 pix. of HST-CCD!!

Pixel Size of HST: 0.027 arcsec.
→ 1875km

Image Size of Eris: 0.034 arcsec.
→ 2400km

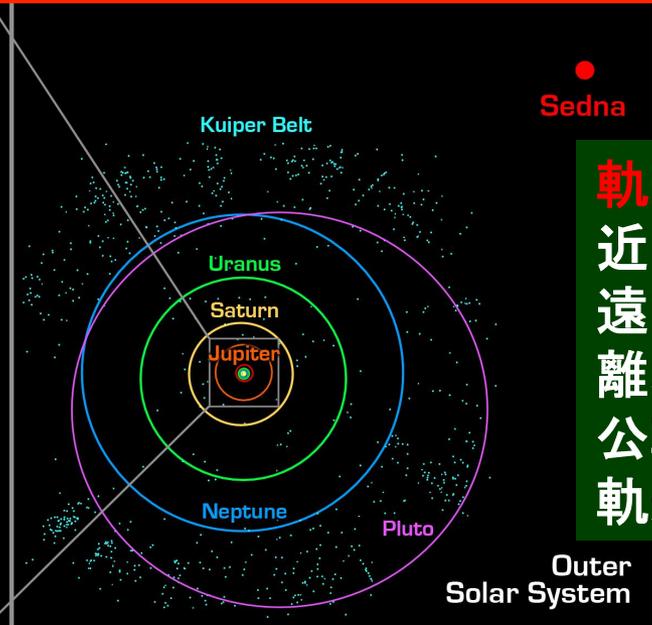
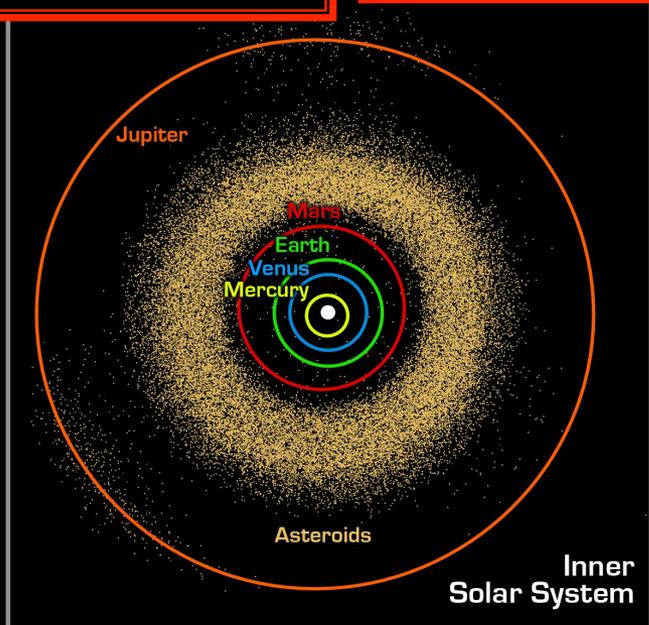
TMT:
0.015"@K

Deconvolution technique

Brown et al. 2006

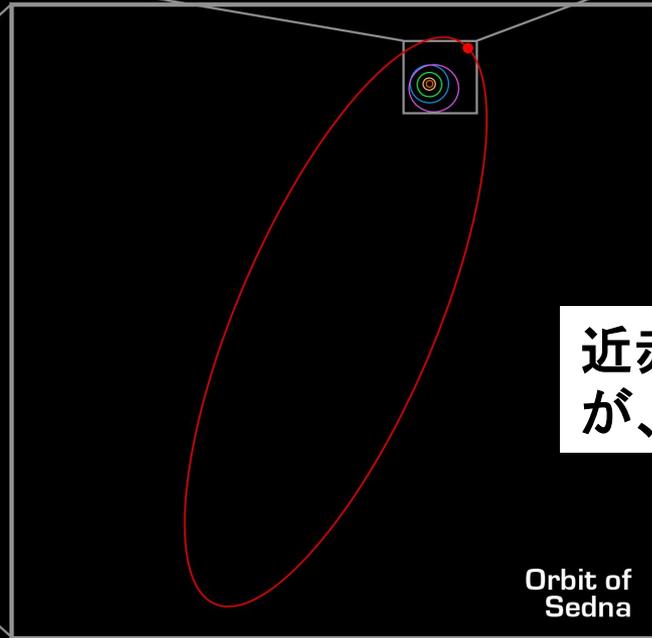
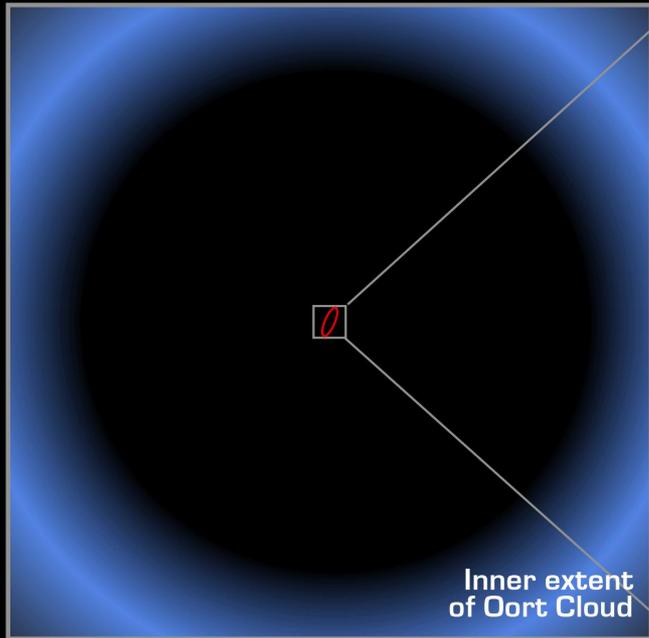
大口徑

内部オールト雲天体の近赤分光



Sedna

軌道長半径:	510 AU
近日点距離:	76 AU
遠日点距離:	976 AU
離心率:	0.850
公転周期:	11527年
軌道傾斜角:	11.9°



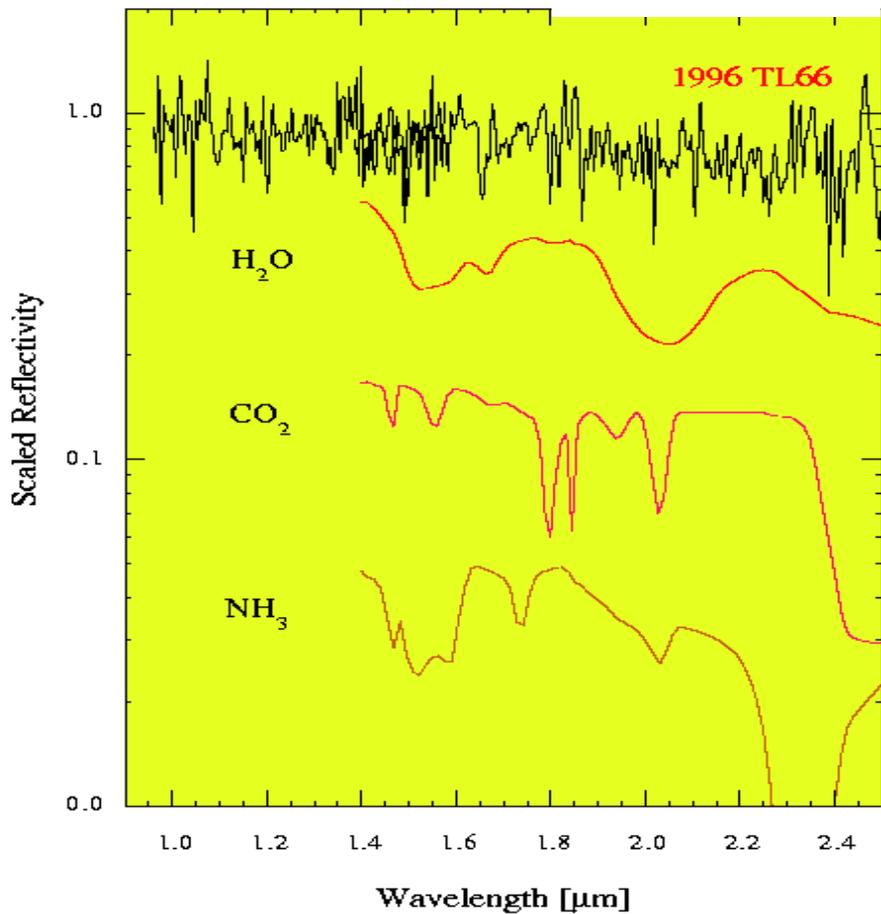
今は87AUで
V21等台

近赤外では約1等位明るい
が、見たいのはその吸収

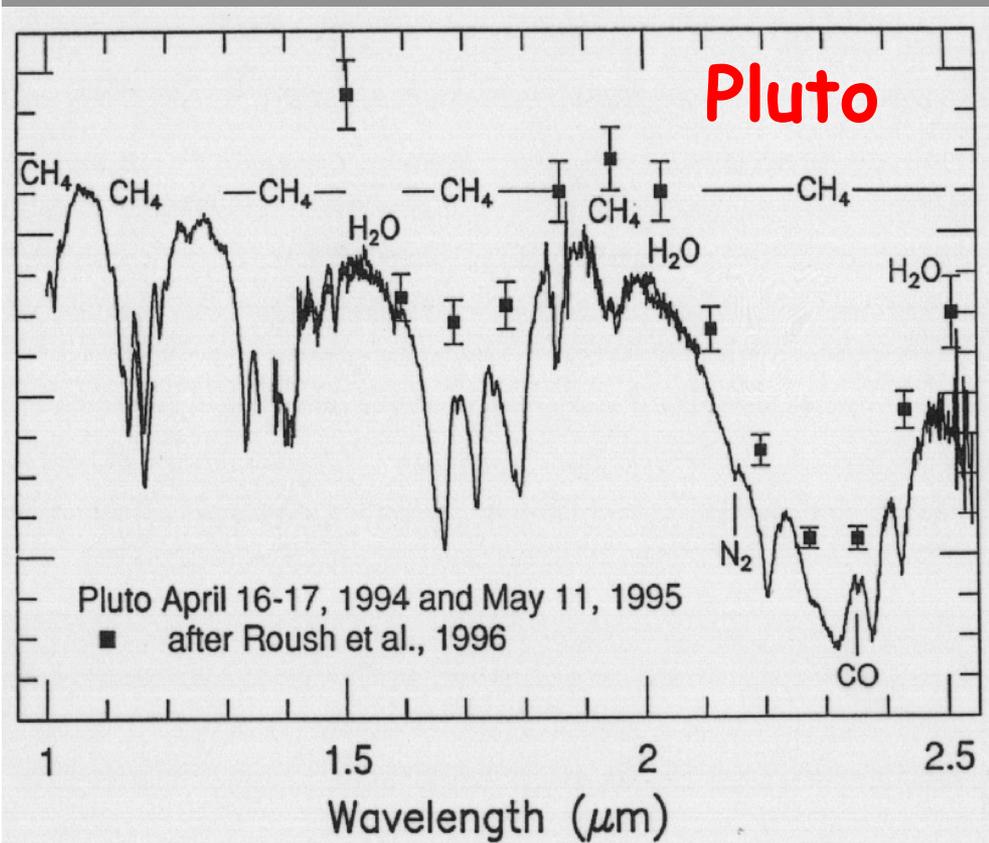
Near-IR Spectroscopy of TNO

V21等

TNO
1996 TL66

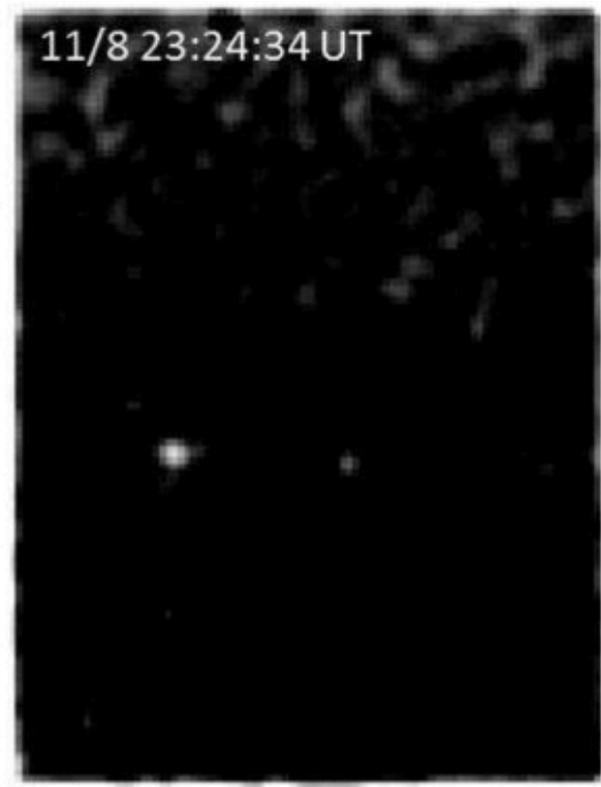
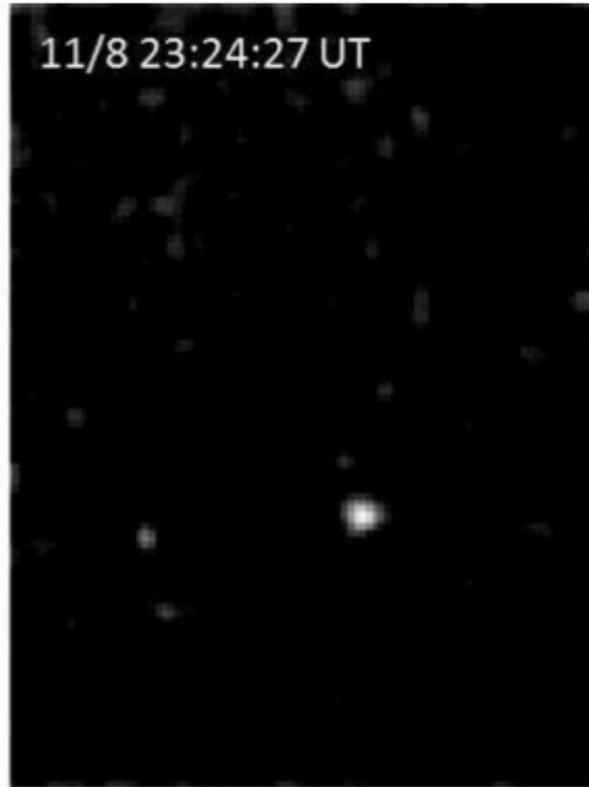
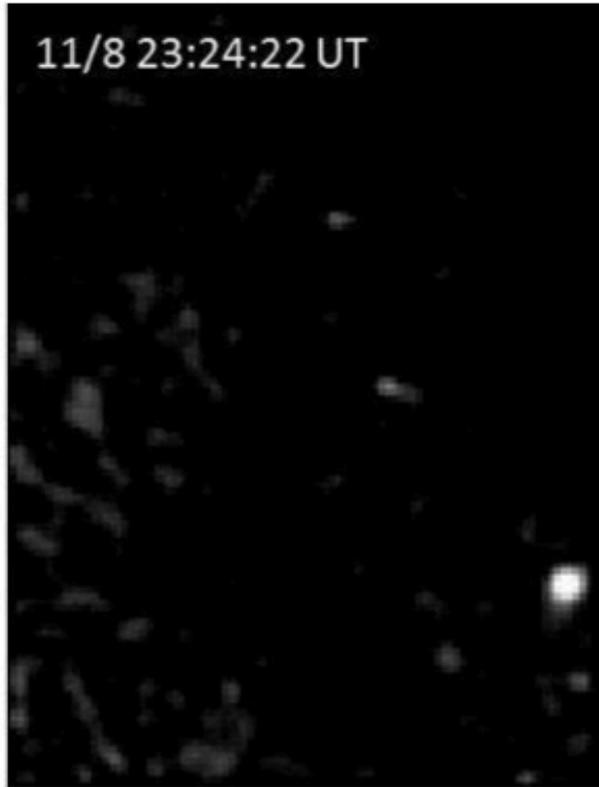


from Luu and Jewitt (1998). Ap. J. Lett



中間赤外・遠赤外

小天体の大きさ測定



TAO-MAX38による小惑星の測光観測

Mueller, Miyata et al., 2013 in press

中間赤外・遠赤外

はやぶさ小惑星 Itokawa の熱放射測光

ESO 3.6m望遠鏡

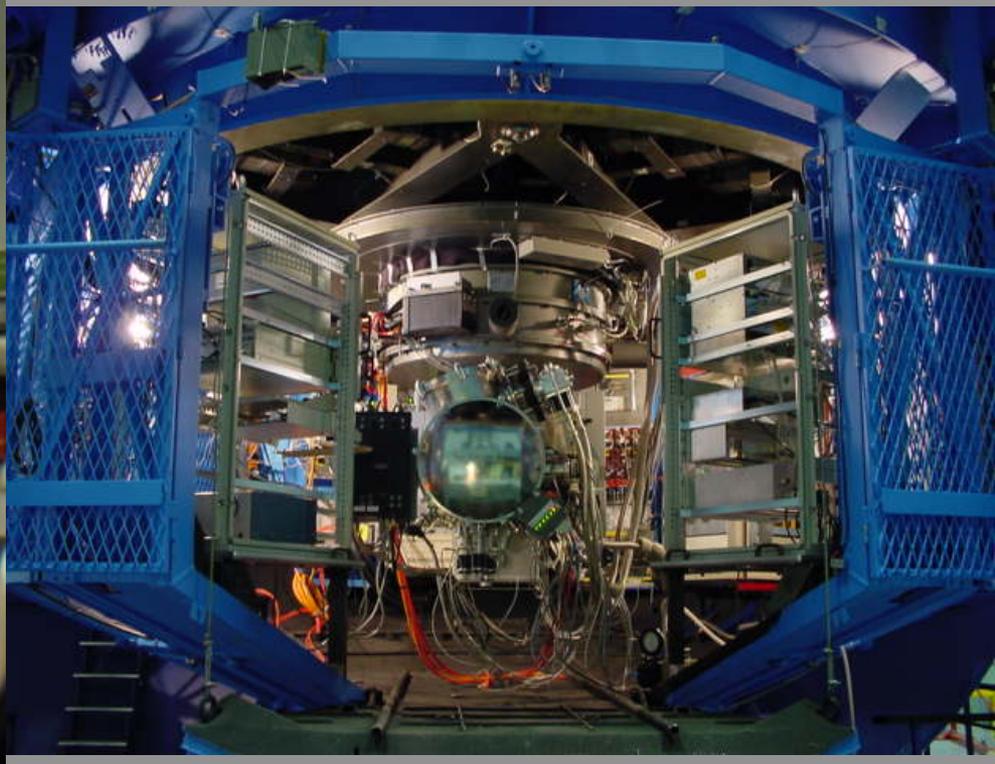
中間赤外観測装置 TIMMI2

Nバンド測光観測

Sekiguchi et al.2003

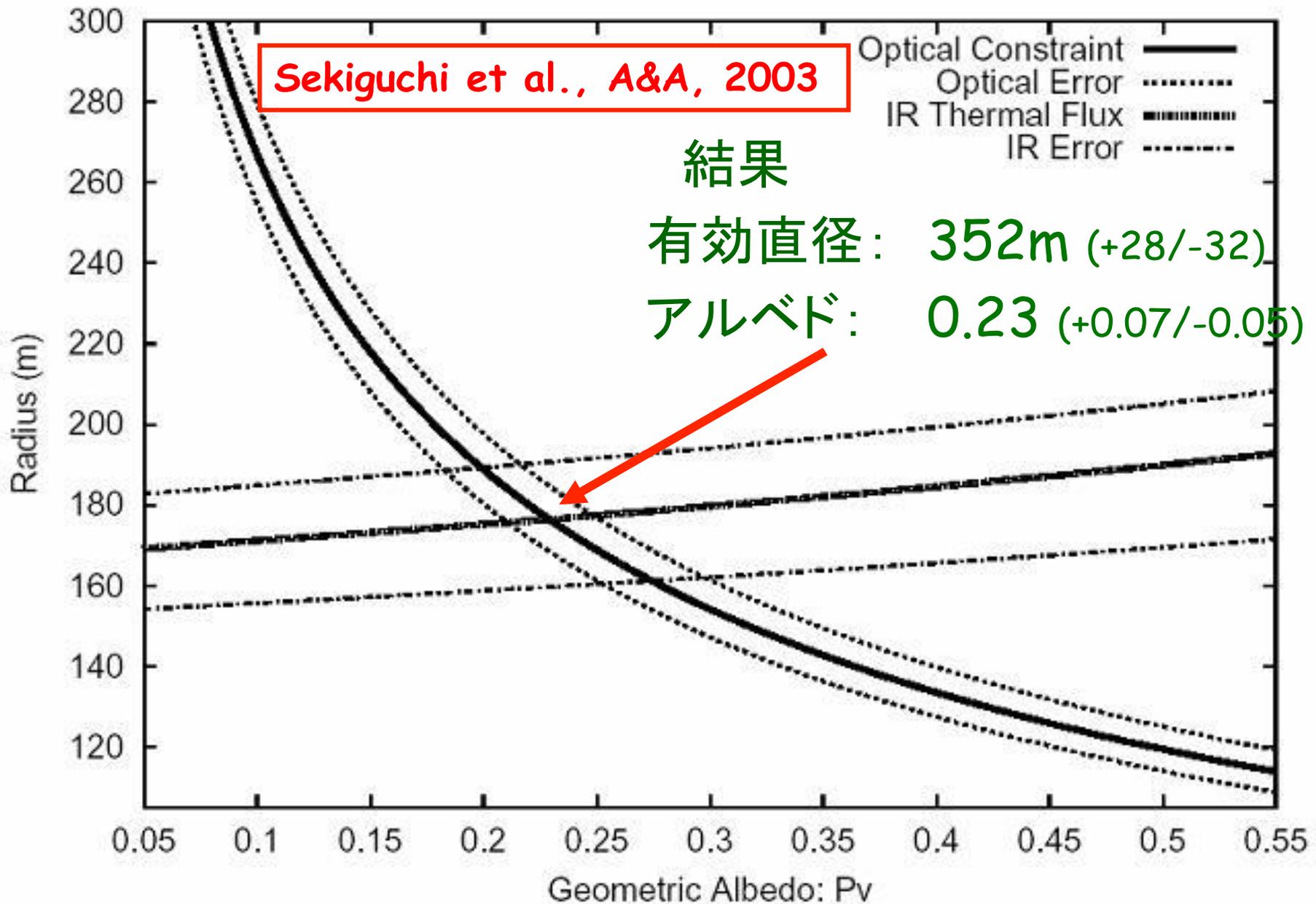
N・Qバンド測光観測

Mueller, Sekiguchi et al.2005



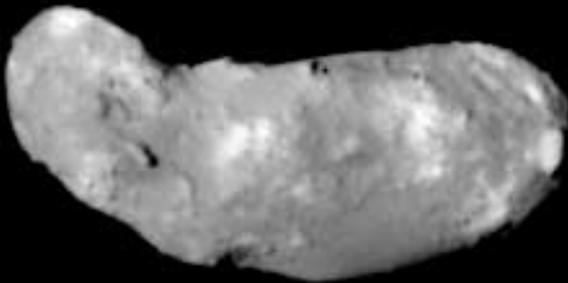
Itokawaのサイズとアルベドの導出

Sekiguchi et al., A&A, 2003



Imaging by JAXA Hayabusa Spacedraft

http://www.jaxa.jp/press/2005/09/20050914_hayabusa_j.html



JAXA / ISAS



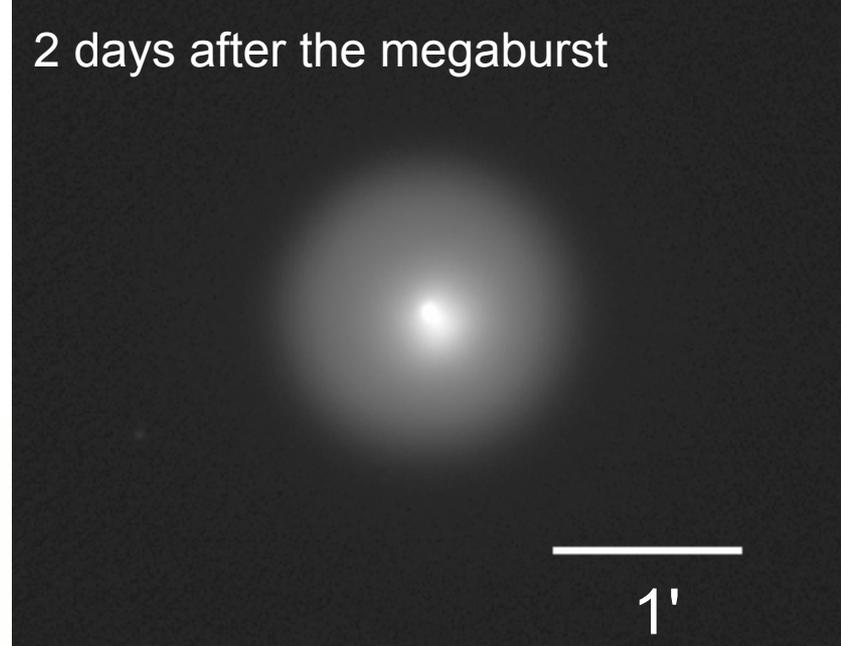
Hayabusa: 540×270×210m

our study : 520×270×230m
(+/-50) (+/-30) (+/-20)

Thermal observations allow us to determine the size for unresolved small objects (for **km-size!**)

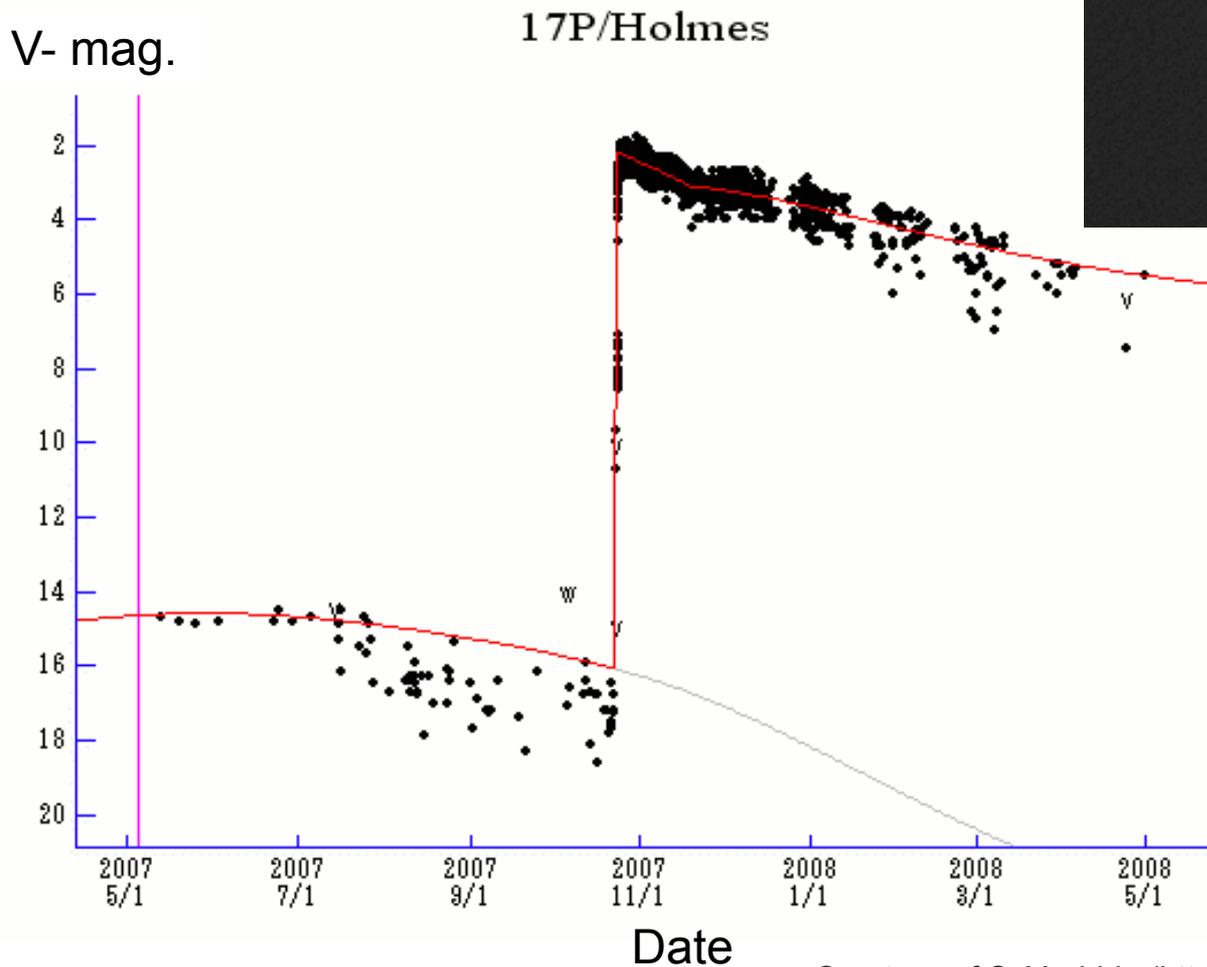
中小口径(機動力)

2 days after the megaburst



Ishiguro et al., 2010

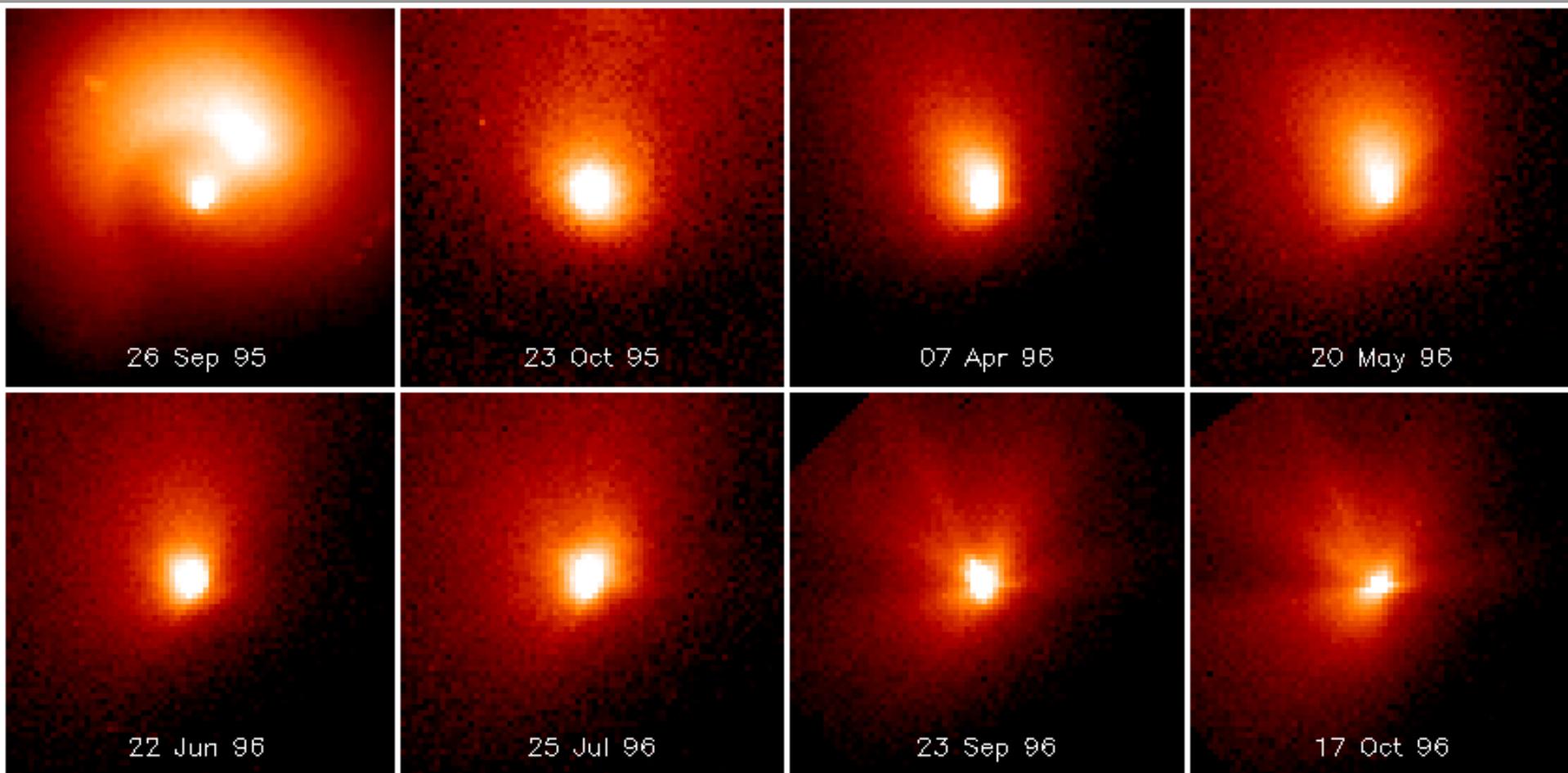
Brightness Variation in Optical



Courtesy of S. Yoshida (<http://www.aerith.net/>)

中小口径(機動力)

C/Hale-Boppの日変化



中小口径(機動力)

メインベルトの衝突天体 P/2010 A2



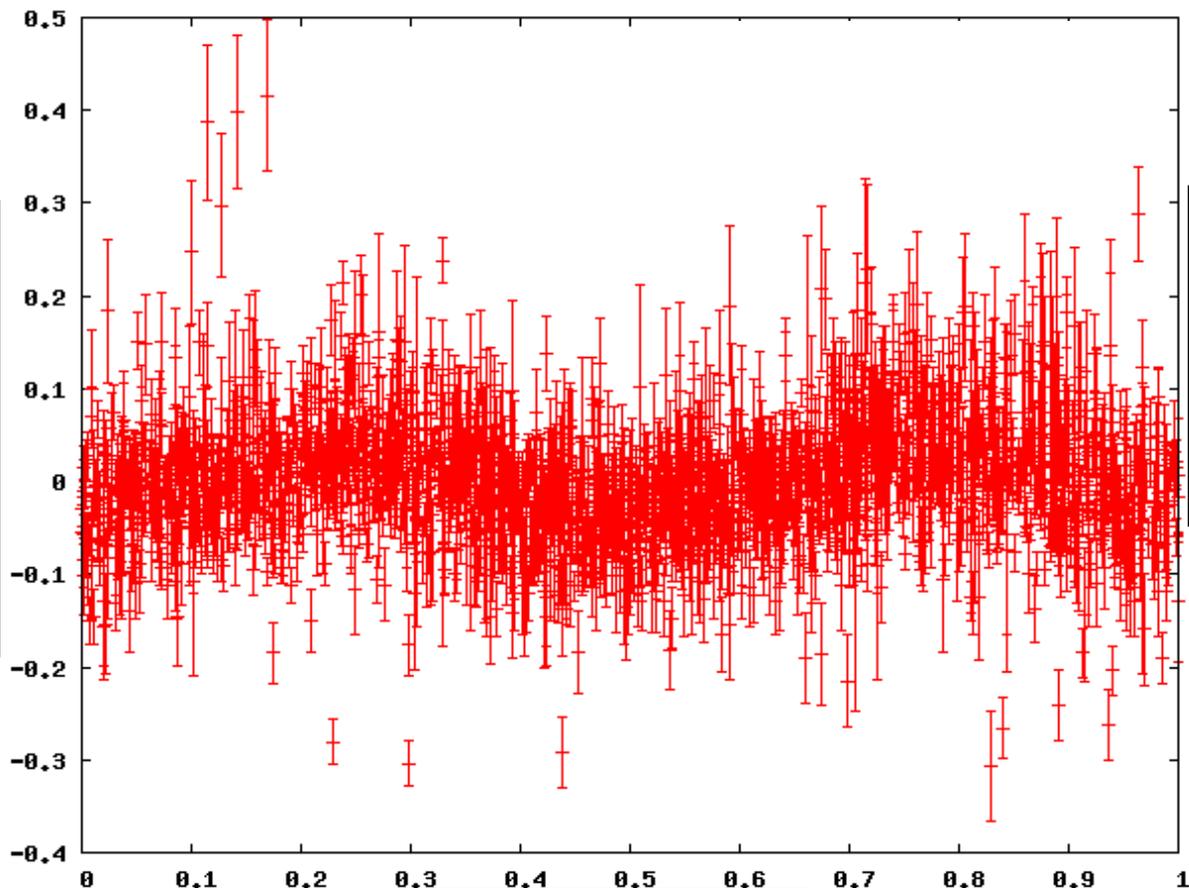
中小口径(機動力)

例)三鷹50cm, 木曾1m, 石垣1m, Lurin1m...

はやぶさ2ターゲット1999JU3のライトカーブ

石黒さん(ソウル大)
priv. comm.

Relative magnitude



Rotational phase

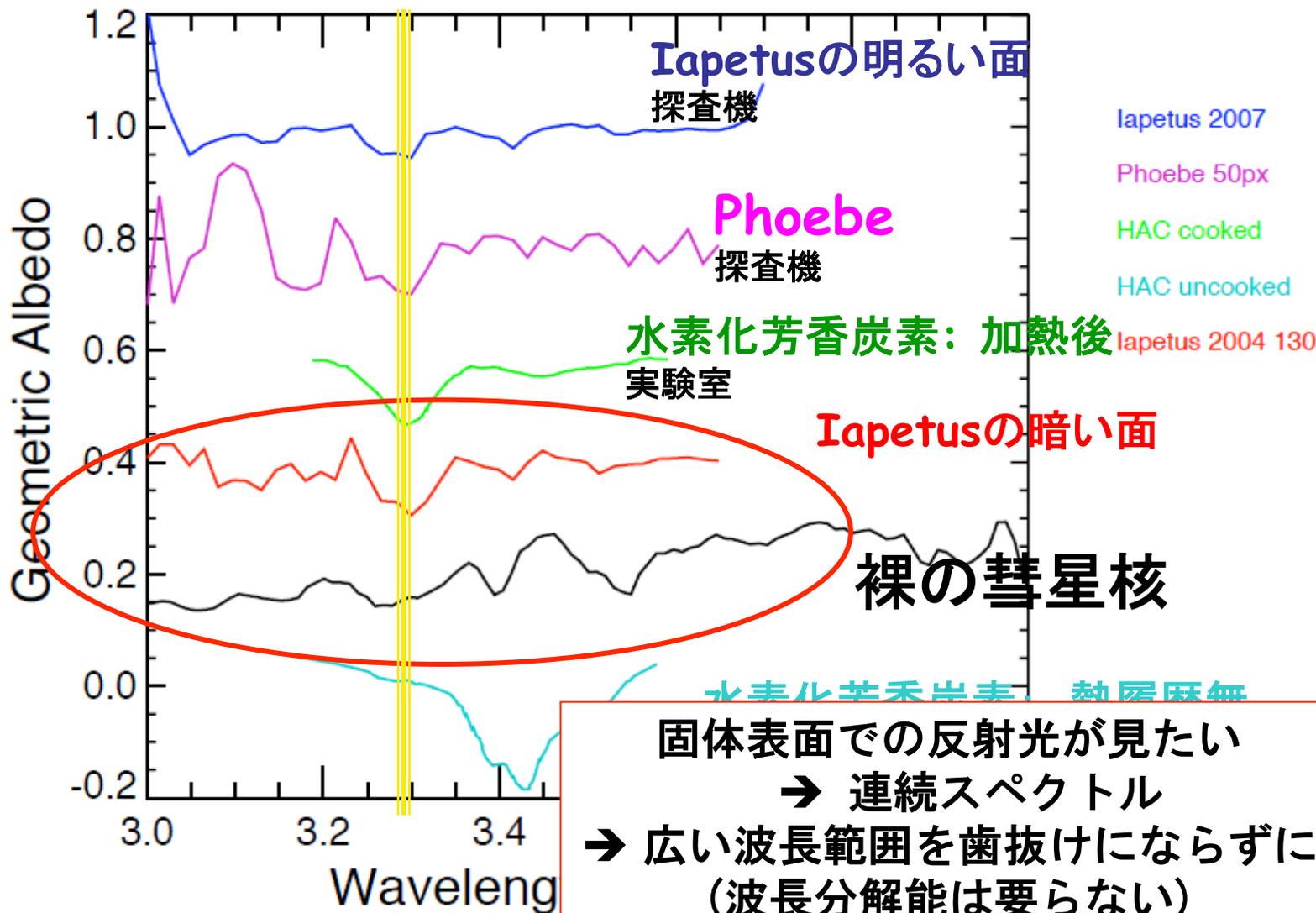
中小口径による
観測(自転の導出)は
太陽系小天体の科学的
議論に全てに必要

(2007 - 2012) All lightcurve data folded with 7.629 hr period

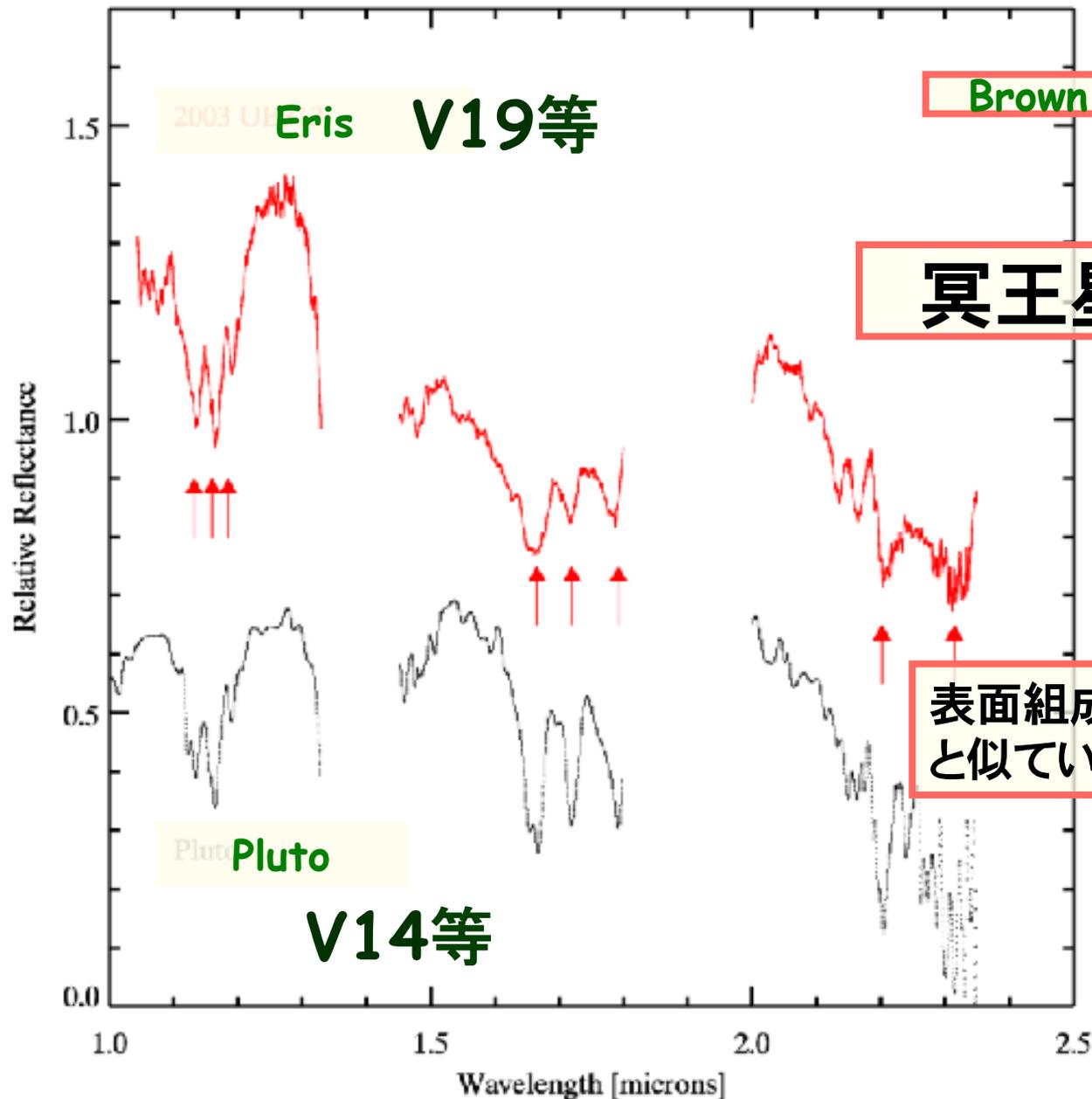
スペース

赤外分光 (大気の窓の外)

探査機 Cassini による土星の低アルベド衛星、及び Hydrogenated Aromatic Carbon の実験室データと AKARI による彗星核分光



準惑星エリスの近赤外線スペクトル (Keck)



より深くより遠く

広がる私たちの太陽系

8-10mクラス

⇒カイパーベルト領域(30AU-50AU?)
の小天体のサイエンス

Sedna, 2008KV42 (Inner-Oort Cloud 天体),
Eris (Scattered Disk 天体) の発見

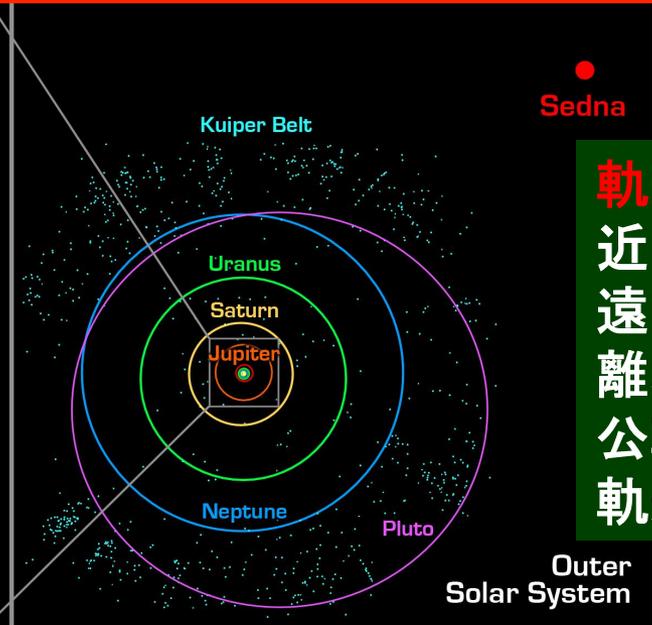
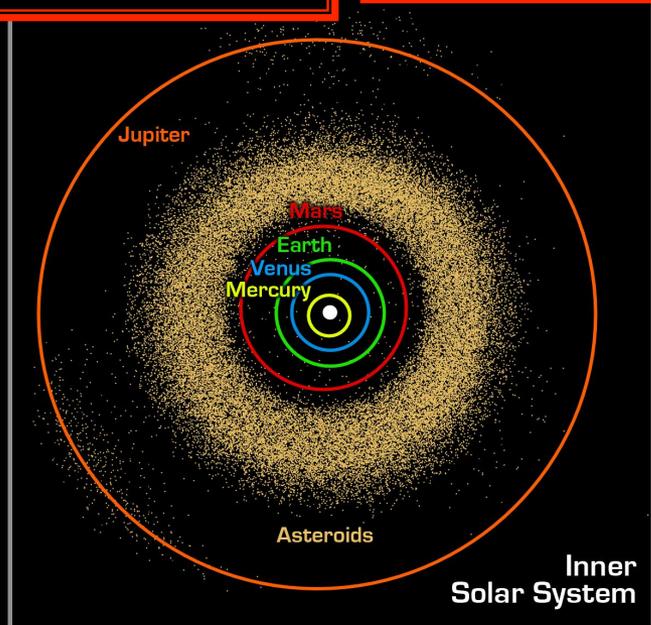
見える太陽系はカイパーベルトからオールト雲へ

TMT

⇒内部オールト雲領域(数100AU-1000AU?)
の小天体のサイエンスへ

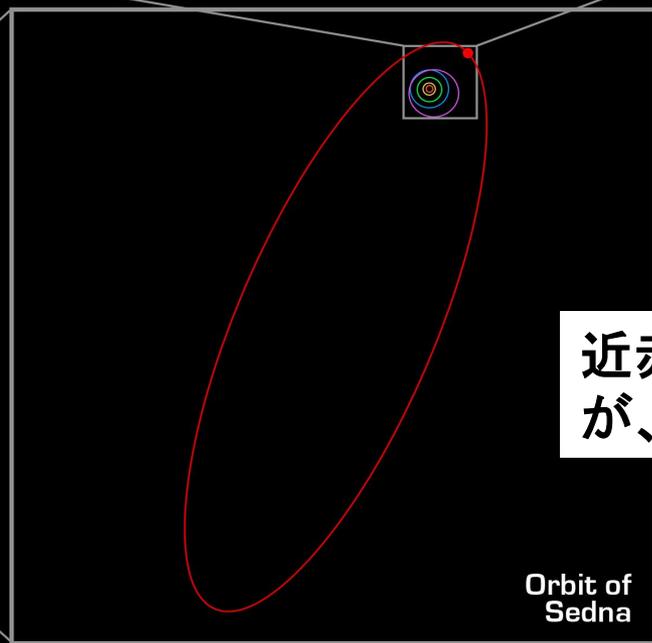
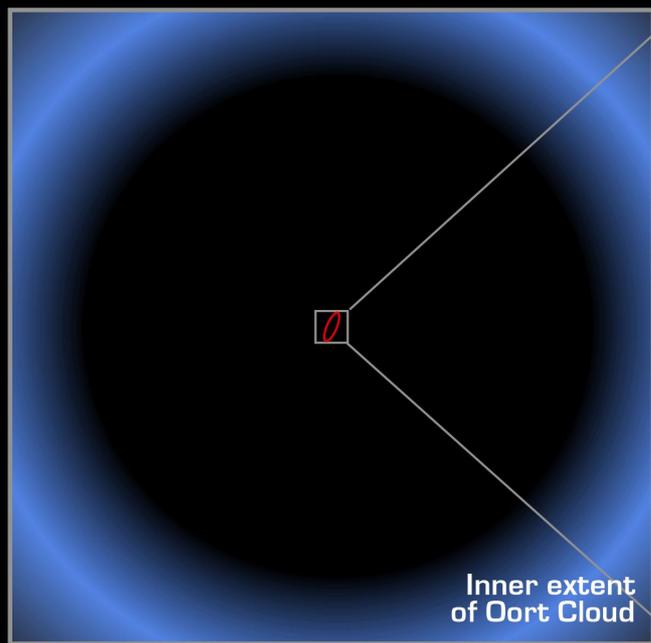
大口徑

内部オールト雲天体の近赤分光



Sedna

軌道長半径:	510 AU
近日点距離:	76 AU
遠日点距離:	976 AU
離心率:	0.850
公転周期:	11527年
軌道傾斜角:	11.9°

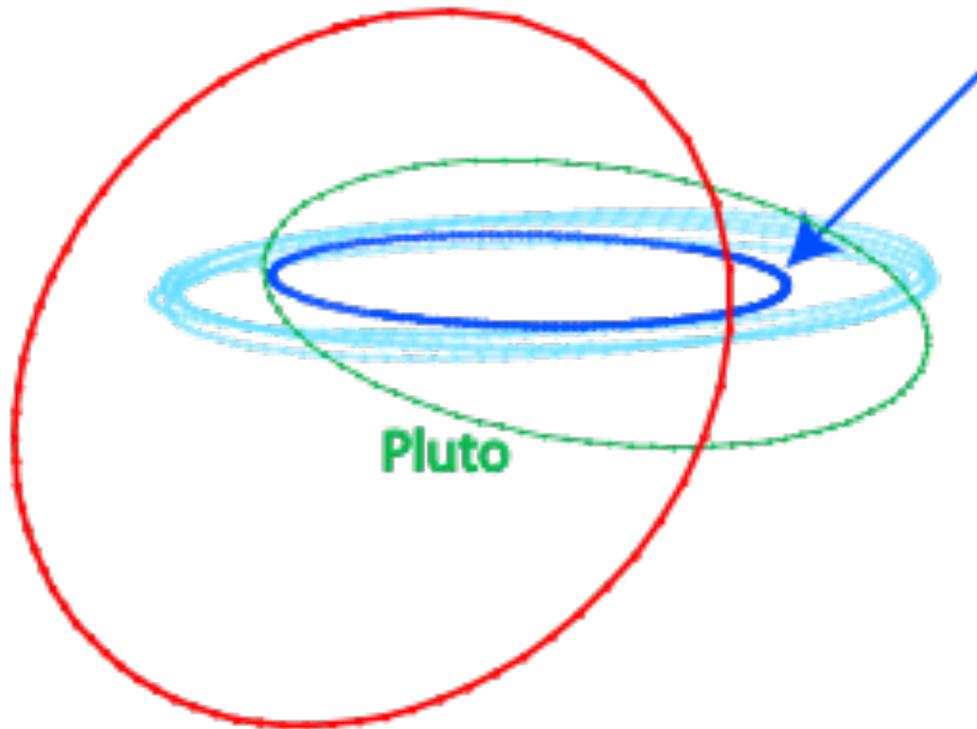


今は87AUで
V21等台

近赤外では約1等位明るい
が、見たいのはその吸収

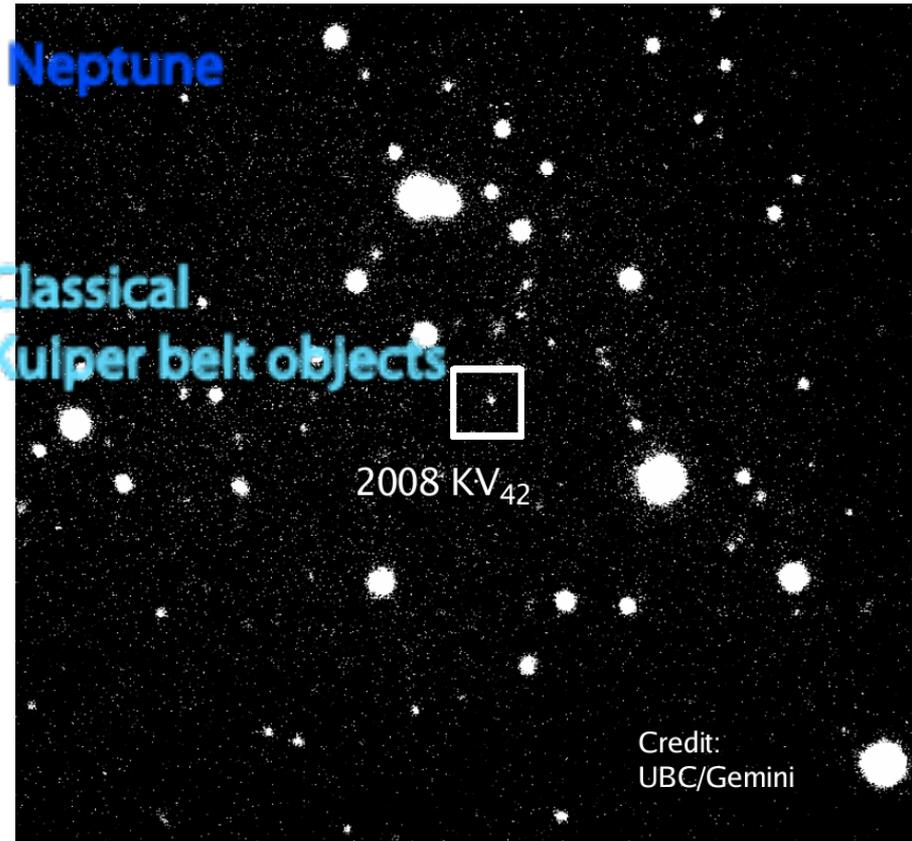
逆行TNO → Scattered TNO? Inner Oort Cloud?

2008 KV42



Neptune

Classical
Kuiper belt objects



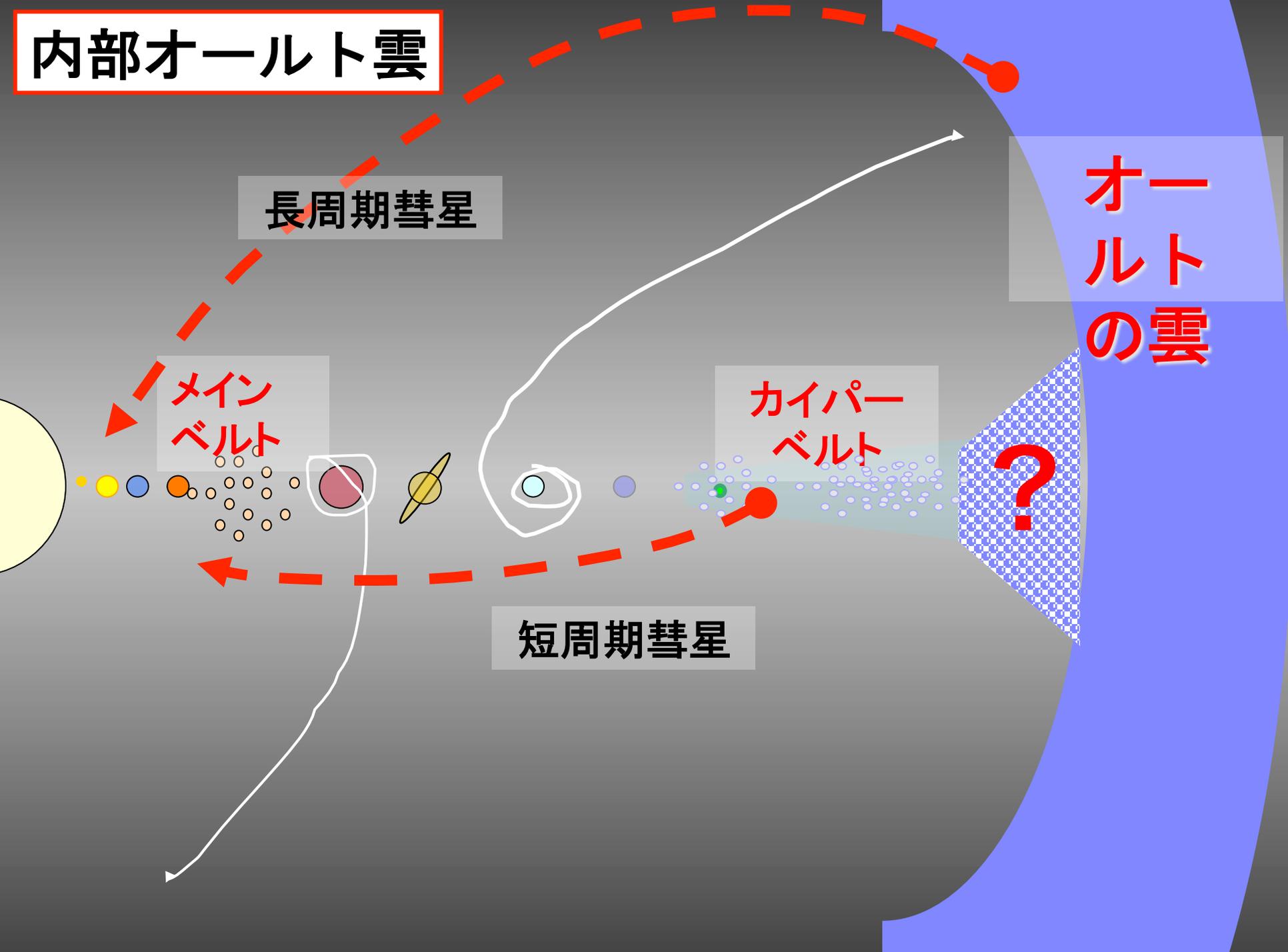
Credit:
UBC/Gemini

Semi-major axis: $a=45.5$ AU
Aphelion: $Q=70.595$ AU
Perihelion: $q=20.3$ AU
Eccentricity: $e=0.553$
Inclination: $i=103.503^\circ$

V24等

近赤外では約1等位明るい
が、見たいのはその吸収

内部オールト雲



長周期彗星

メイン
ベルト

カイパー
ベルト

短周期彗星

?

オールトの雲

太陽系小天体の地上からの光/赤外観測

探査機で行けるものは限られている

- 探査機で行くことができた一つのサンプル(天体)を地上の望遠鏡によって多数個のデータを取得することによって一般化へ
(もし探査機ミッションでサイエンスが終わるなら光赤外の望遠鏡も電波の望遠鏡も太陽系小天体に向けられないことになってしまう)

また、

– ミッションに対する支援観測もあり

- 自転周期がわからないと探査機はランダーを持って行けない
- 自転位相がわかっていないといけない
- 表面状態がわかっていないとランダー／サンプルリターンができない
- アルベドがわかってないとカメラが設計できない

太陽系小天体研究の展望

Small Solar System Bodies

関口 朋彦（北海道教育大学）

内容

- ◆ 太陽系移動天体に対する望遠鏡の指向追尾精度
- ◆ 探査機ミッションによる太陽系小天体の研究
- ◆ 大口径、広視野、広帯域分光、高空間分解能、中間・遠赤外、スペース、小口径機動力の観測諸々
- ◆ やっぱり大口径の深く遠く