

太陽系小天体の熱放射観測

*Thermal Infrared Observations of Minor Bodies
in the Outer Solar System.*

内容

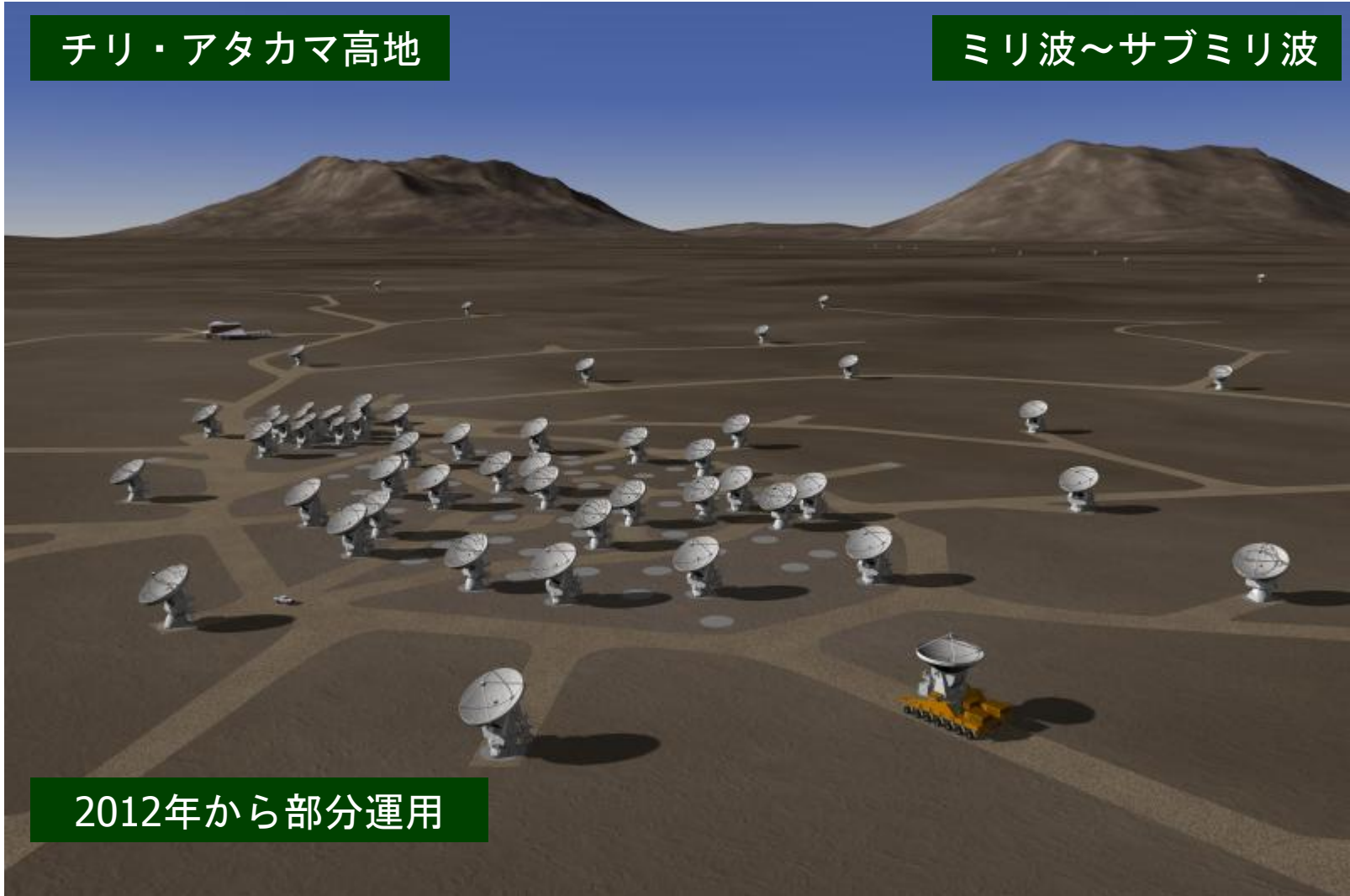
関口 朋彦（北海道教育大学・旭川校）

- ◆ 関口のこれまでの仕事、今の仕事
- ◆ 準惑星エリスについて・冥王星より大きい？
- ◆ 太陽系小天体の大きさ測定
 - イトカワの中間赤外線熱放射の地上観測の例
- ◆ あかり衛星での遠赤外線測光観測
- ◆ あかり衛星での近赤外線分光観測

ALMA (Atacama Large Millimeter & submillimeter Array)

チリ・アタカマ高地

ミリ波～サブミリ波



2012年から部分運用

ALMA (2011年10月20日)



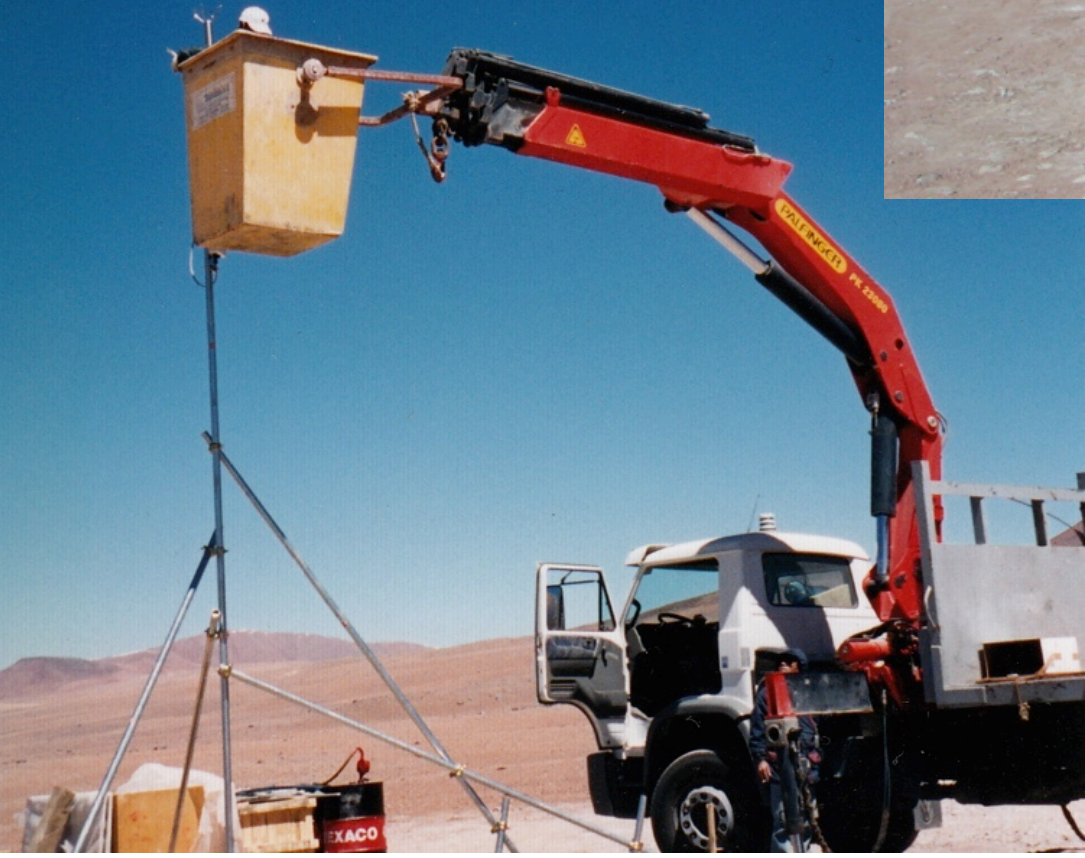
ASTEプロジェクト

2002年3月6日

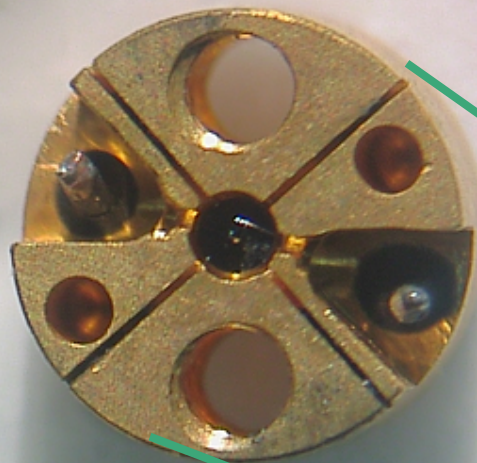


2002年3月:チリ、アタカマ ASTEサイトにて

関口、岩下、宮澤(干)、Juan

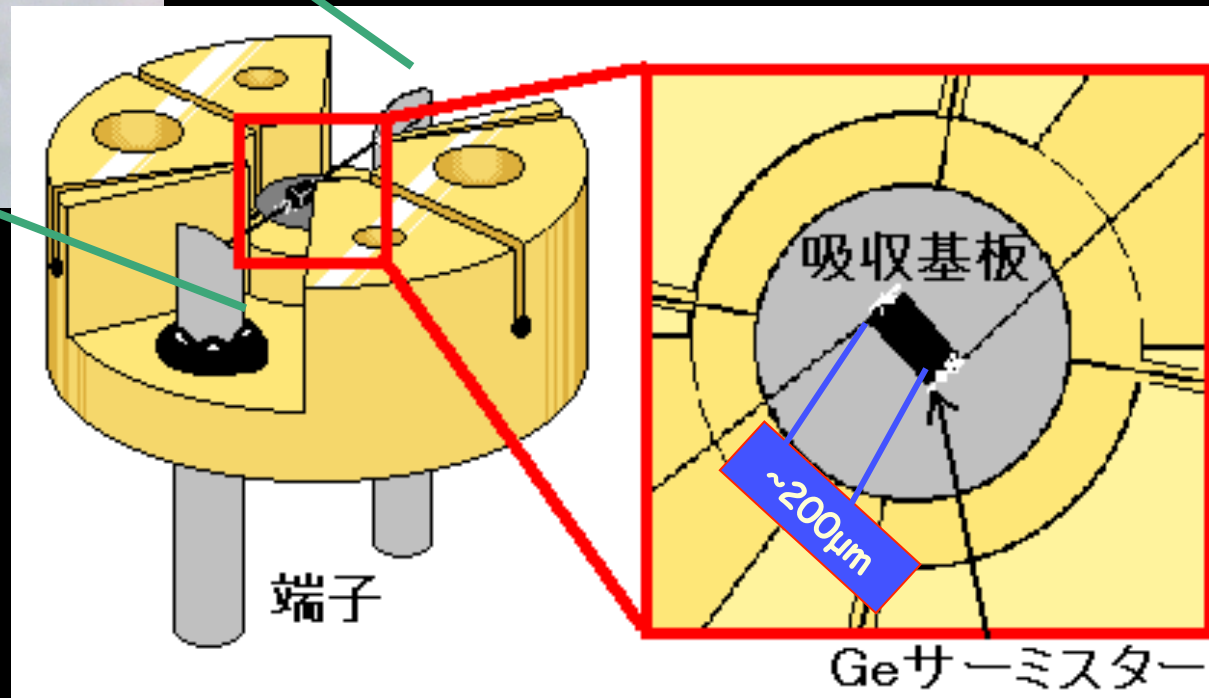


Ge コンポジットボロメータ



D~5mm

ダイヤモンドの薄膜上に
Biを蒸着させ、Geサー
ミスタの温度変化を
読む



端子

吸収基板

~200μm

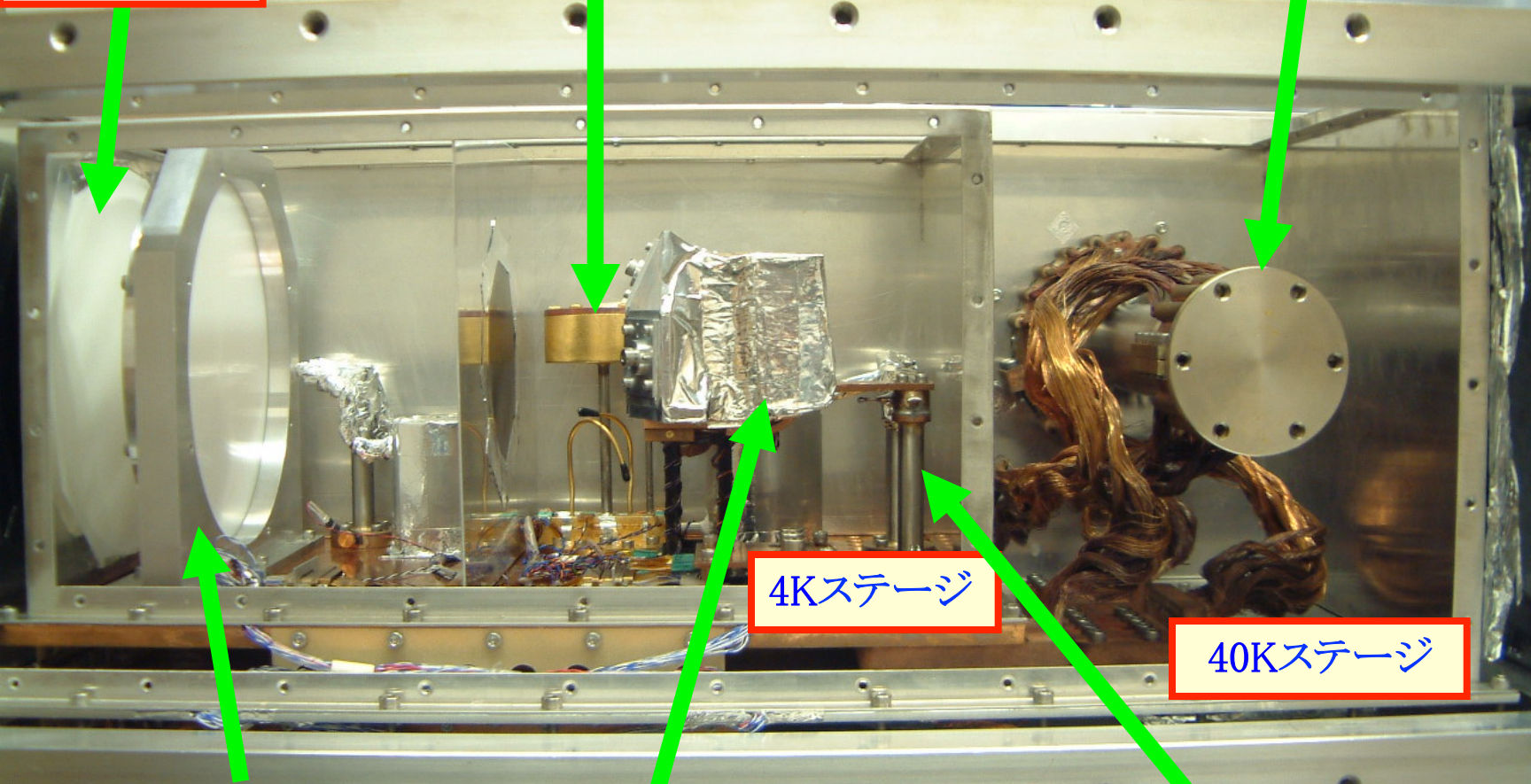
Geサーミスター

3色ボロメータ クライオスタット内部

開口窓
(150mm)

He3/He4 クライオポンプ

冷凍機ヘッド



300
mm

ポリエチレンレンズ

ボロメータ部

ヒートスイッチ

ACA 12mアンテナ性能評価試験 2: 絶対指向精度性能

位置測定用光学望遠鏡の窓穴

→ 4月から 北海道教育大旭川校

- 1) 光学望遠鏡による指向精度測定の流れ
- 2) Tpointによる解析
- 3) 指向精度性能の長期間安定性

太陽系小天体の熱放射観測

*Thermal Infrared Observations of Minor Bodies
in the Outer Solar System.*

内容

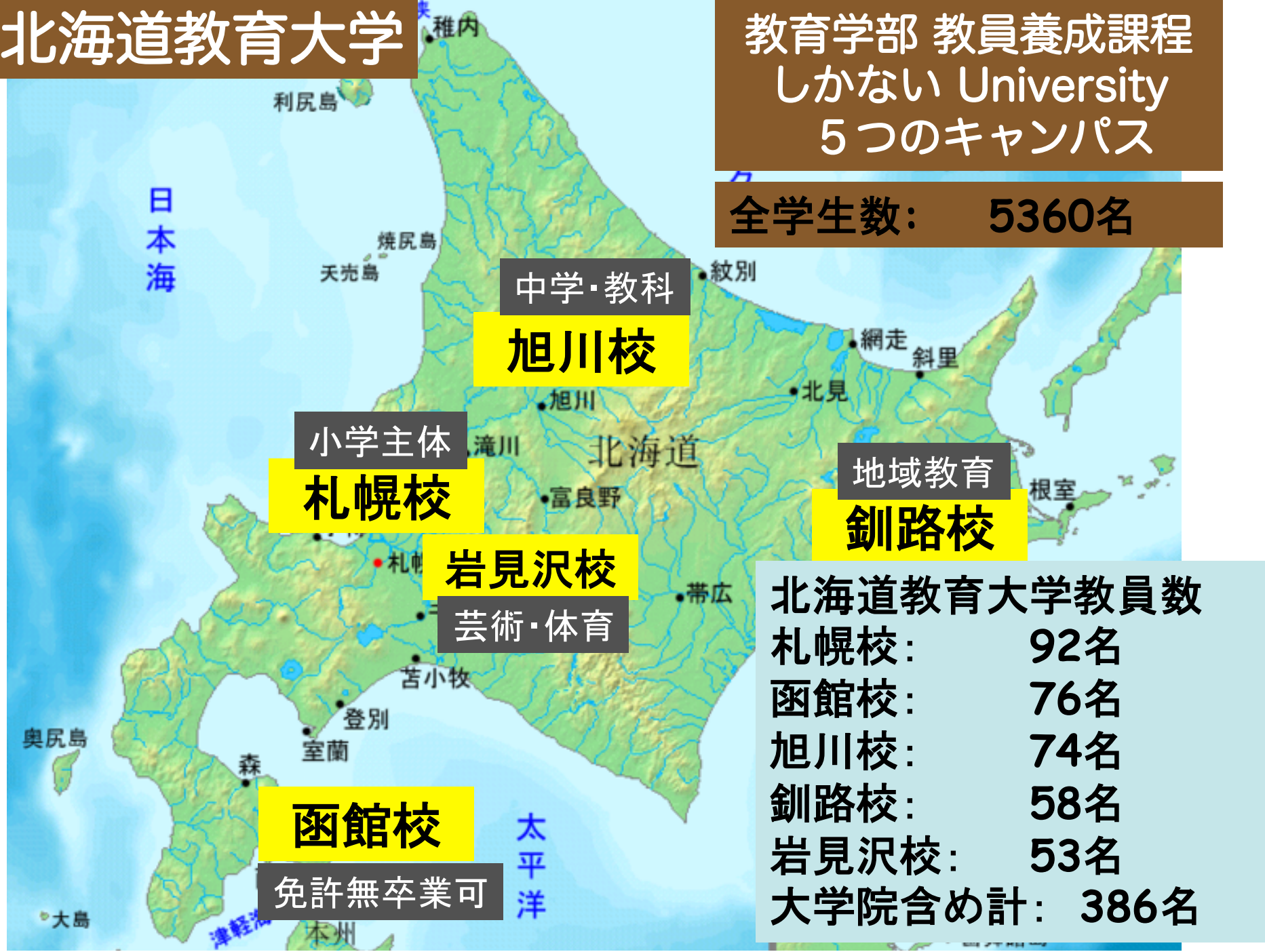
関口 朋彦（北海道教育大学・旭川校）

- ◆ 関口のこれまでの仕事、今の仕事
- ◆ 準惑星エリスについて・冥王星より大きい？
- ◆ 太陽系小天体の大きさ測定
 - イトカワの中間赤外線熱放射の地上観測の例
- ◆ あかり衛星での遠赤外線測光観測
- ◆ あかり衛星での近赤外線分光観測

北海道教育大学

教育学部 教員養成課程
しかない University
5つのキャンパス

全学生数: 5360名



中学・教科
旭川校

小学主体
札幌校

地域教育
釧路校

岩見沢校
芸術・体育

函館校
免許無卒業可

北海道教育大学教員数

札幌校:	92名
函館校:	76名
旭川校:	74名
釧路校:	58名
岩見沢校:	53名
大学院含め計:	386名

北海道教育大学 担当科目

前期担当科目

- 1) 地学概論 I : 基礎天文学 / 1年生
- 2) 基礎地学実験 : 実験 (ケプラー、分光、HR図、星座早見盤) / 2年生
- 3) 中学校理科実験 I : 中学校で行う実験 (オムニバス) / 3年生
- 4) 理科教材開発実習 : 教材開発 (オムニバス) / 4年生
- 5) 現代と科学 : 教養科目 (オムニバス) / 2年生
- 6) 地学演習 : 4年生卒論セミナー / 4年生
- 7) 地学実験 I : 研究室セミナー / 1年生~4年生
- 8) 天体物理学特論 I : 大学院科目 / 修士

後期担当科目

- 1) 天体物理学 : 天文学 / 3年生
- 2) 基礎地学実験 : 実験 (ケプラー、分光、HR図、星座早見盤) / 2年生
- 3) 初等理科 : 小学校理科 (オムニバス) / 2年生
- 4) 理科教材開発研究 (オムニバス) / 3年生
- 5) 中学校理科実験 II : 理科教育実験 / 3年生
- 6) 地学実験 II : 4年生卒論セミナー / 4年生
- 7) 天体物理学特論 II : 大学院科目 / 修士

集中講義 地学野外実習 : 流星観測 (宿泊集中講義) / 2年生

通年 教育フィールド研究 : 地域密着科目

隔年 倫理人権 : 教員養成大学の学生としての道徳

北海道教育大学 業務(!?)

地方小規模大学ならどこでも同じかもしれないが、それにしても教員養成大学特有の業務が多い

- 教員免許更新講習：現役教員に対する講義（夏休みがなくなる）
- 教科書執筆：理科基礎実験書、「新しい北海道の理科」
- 教育実習の授業見学（夏休み期間に5人分）、中学校挨拶廻り
- へき地校実習への引率
- 各実習のめあて、各実習の報告書の添削・採点
- 入試：問題作成、小論文採点、推薦(25名)面接
- 委員：理科教育専修代表（専修長）、入試委員、学生委員
- 研究室配属は1年生入学時点から！

太陽系小天体の熱放射観測

*Thermal Infrared Observations of Minor Bodies
in the Outer Solar System.*

内容

関口 朋彦（北海道教育大学・旭川校）

- ◆ 関口のこれまでの仕事、今の仕事
- ◆ 準惑星エリスについて・冥王星より大きい？
- ◆ 太陽系小天体の大きさ測定
 - イトカワの中間赤外線熱放射の地上観測の例
- ◆ あかり衛星での遠赤外線測光観測
- ◆ あかり衛星での近赤外線分光観測

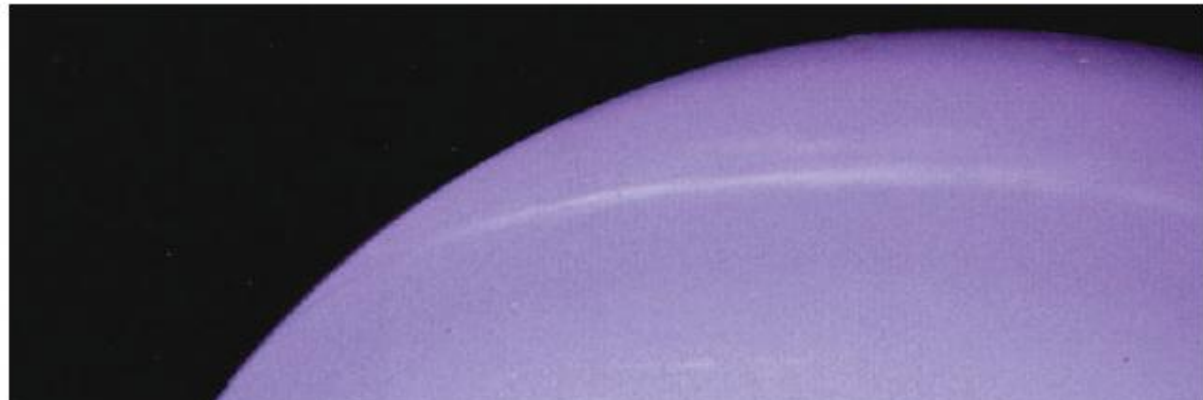
NEWS

Nature 2005年11月

Astronomers reject the term 'planet'

An expert panel charged with ending the debate over what is and isn't a planet has come up with a radical solution: end use of the term altogether, unless it is accompanied by a qualifier.

Debates on nomenclature are common in science, but the planet question is one of the few to have spilled into the public arena. Researchers have argued over the status of Pluto for decades, for example, with some claiming that it is not a fully fledged planet. Similar rows have raged in recent years over how to describe



太陽系小天体の熱放射観測： Erisのサイズ測定を例に

System to free-roaming objects in deep space, is too diverse to justify a single moniker. Instead, the researchers want to define different types of 'planetary object', such as terrestrial planets, including Earth, and extrasolar planets, which orbit stars other than the Sun.

"If we're going to use the word planet we should put an adjective in front of it," says Alan Marsden, a panel member and an astronomer



NATURE 2005, Sept. 22 the California Institute of Technology in Pasadena, who has recently been courting

on 12 September, would end such arguments. UB313 and Pluto would be known as Trans-

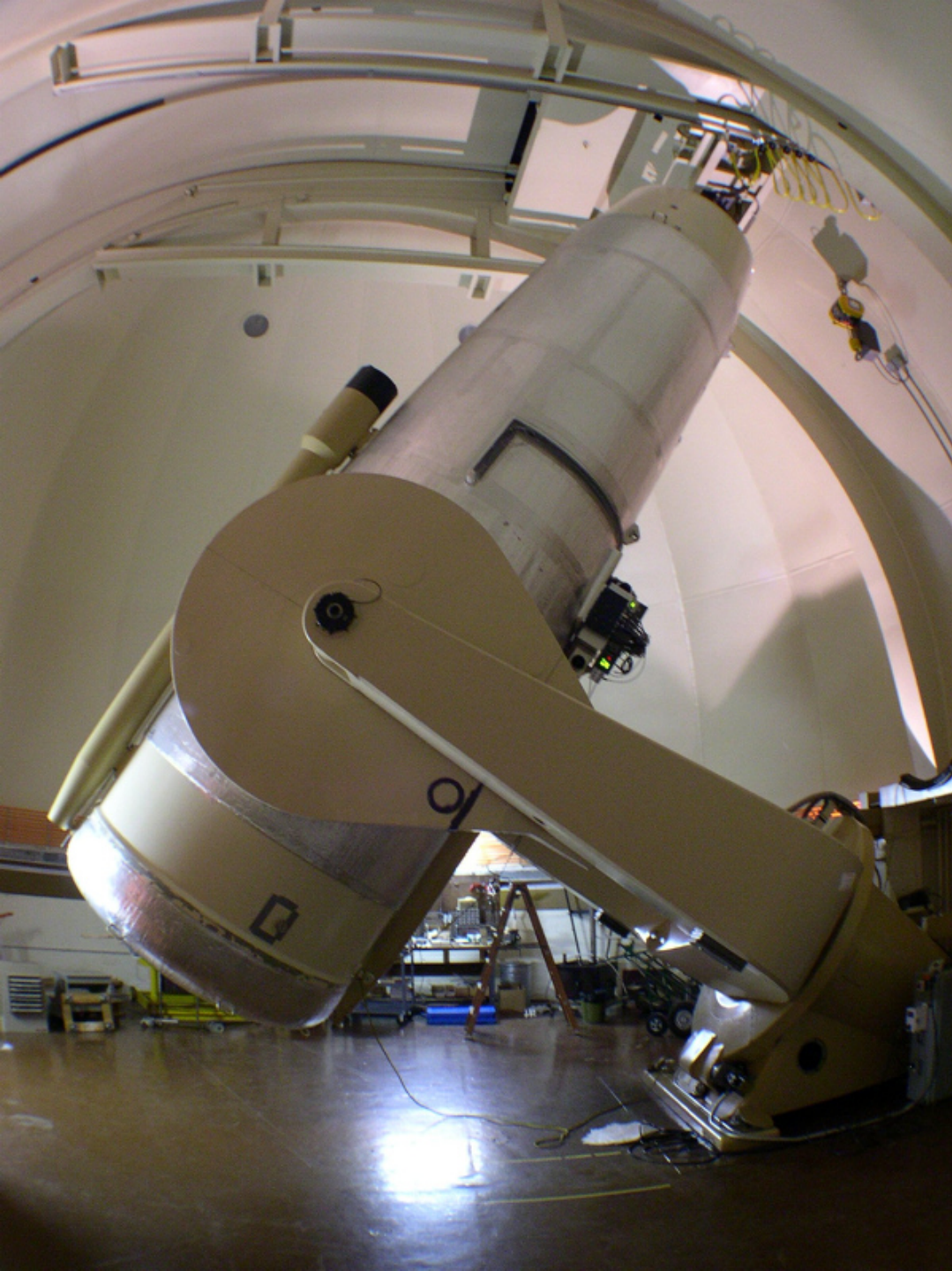
Eris のミリ波連続波観測

F. Bertoldi, W. Altenhoff, A. Weiss, K. Menten, C. Thum

"The trans-neptunian object UB313 is larger than Pluto" *Nature*, 2005



IRAM 30m, Pico Veleta, Spain
Institut de **R**adio **A**stronomie **M**illimétrique



Eris の発見

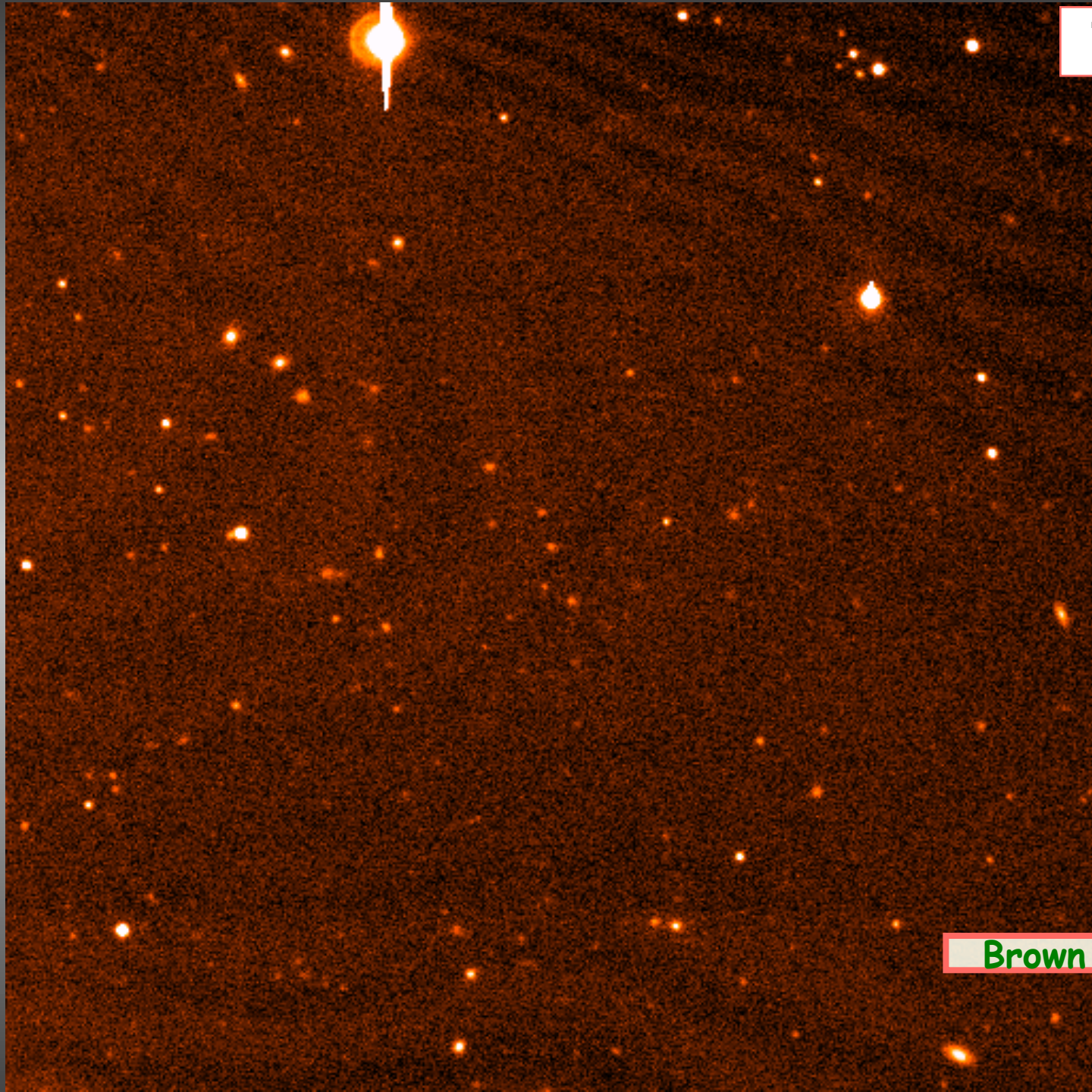
可視広視野撮像観測

Brown et al. 2005 ApJ

Samuel Oschin
1.22m シュミット望遠鏡
1949年製

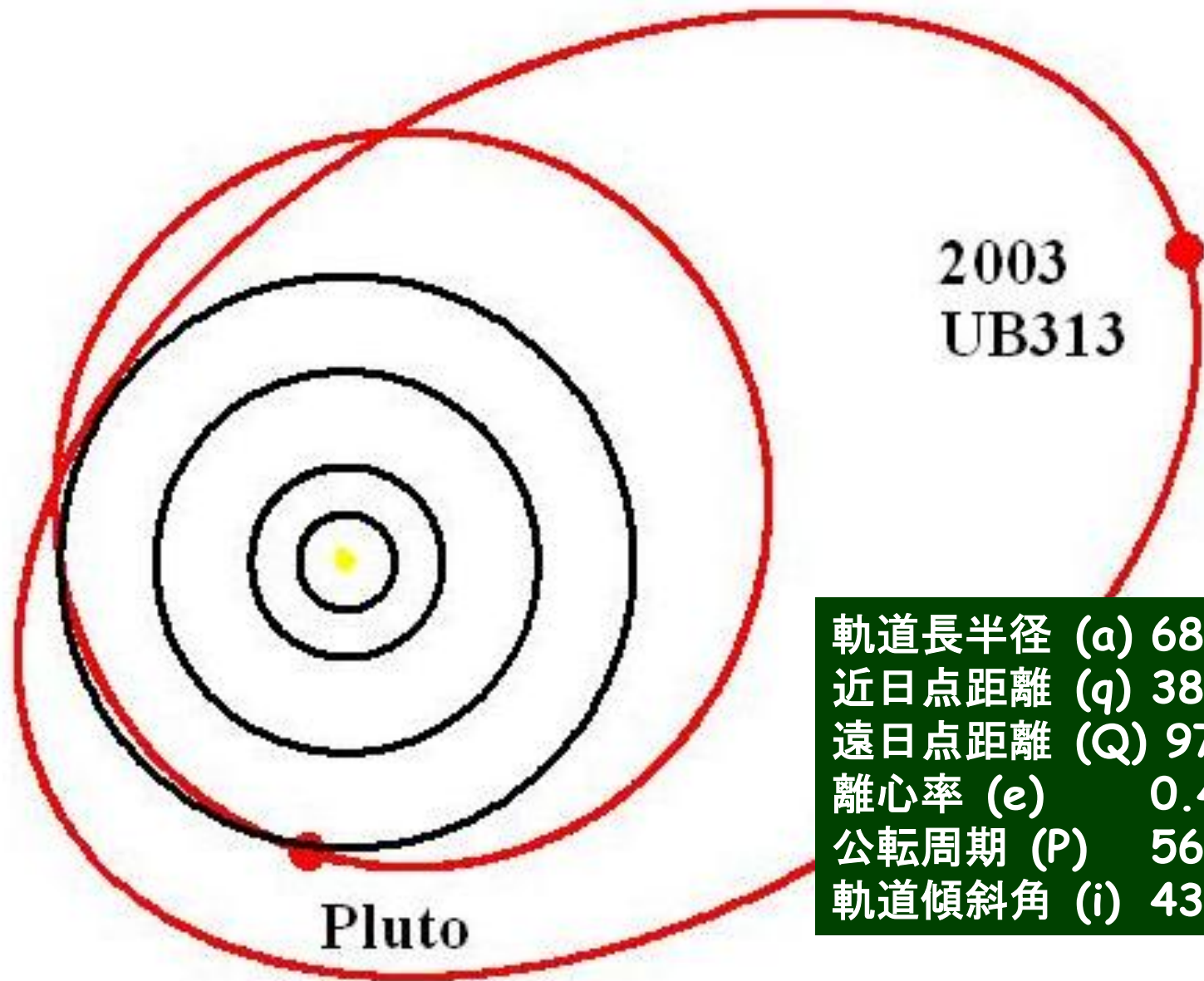
10平方度を一度に撮像

可視撮像観測



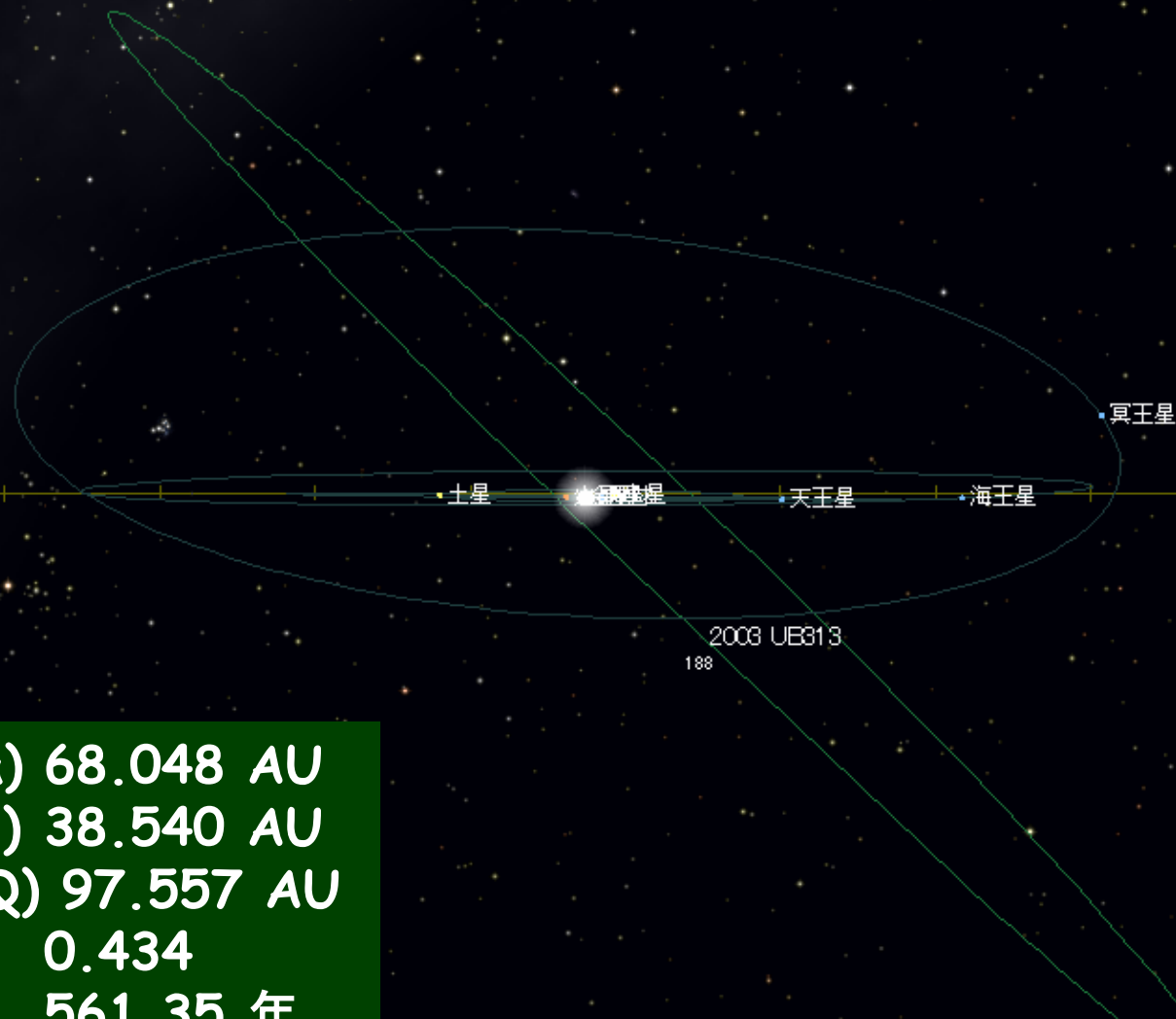
Brown et al. 2005 ApJ

Erisは他のTNOsよりちょっと遠い



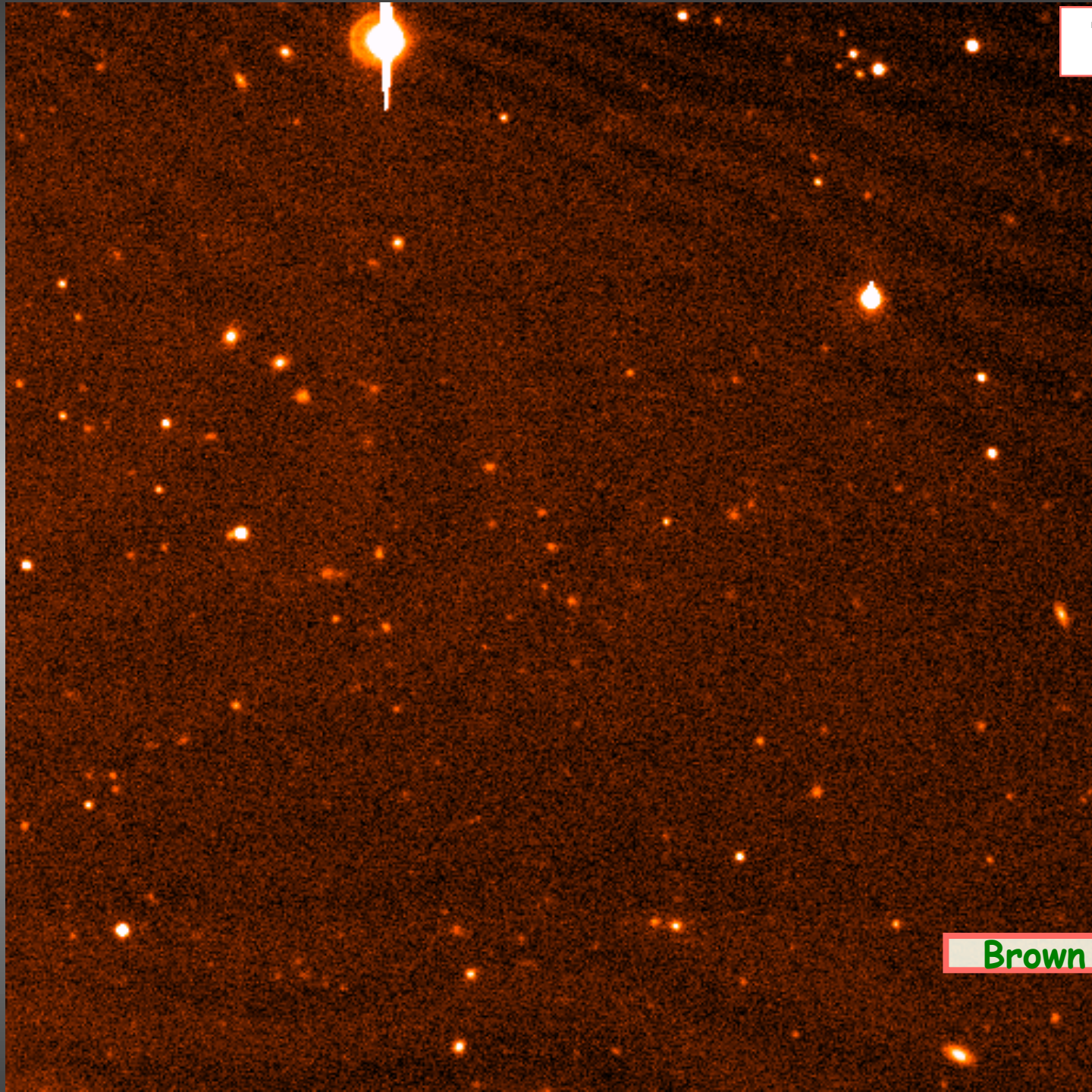
軌道長半径 (a)	68.048 AU
近日点距離 (q)	38.540 AU
遠日点距離 (Q)	97.557 AU
離心率 (e)	0.434
公転周期 (P)	561.35 年
軌道傾斜角 (i)	43.87 度

散乱TNO: Scattered Disk 天体



軌道長半径 (a) 68.048 AU
近日点距離 (q) 38.540 AU
遠日点距離 (Q) 97.557 AU
離心率 (e) 0.434
公轉周期 (P) 561.35 年
軌道傾斜角 (i) 43.87 度

可視撮像観測



Brown et al. 2005 ApJ

可視撮像観測

空間分解能～ **シーイングサイズ** or 装置依存

例えばマウナケア(ハワイ)やアタカマ(チリ)でベスト 0.5''

各地のシーイング

ハワイ, チリ

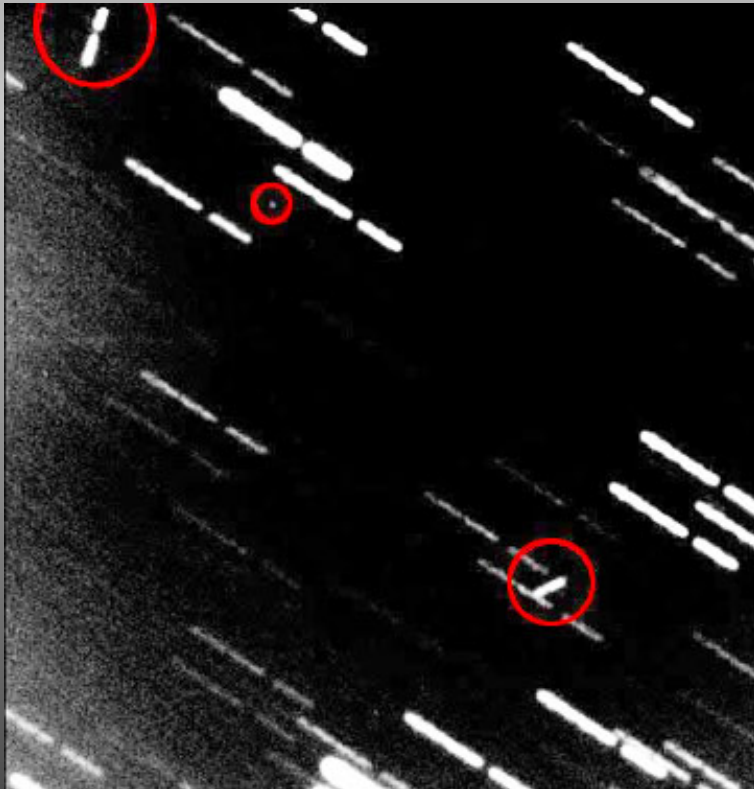
0.5–1.5秒角

岡山(瀬戸内)

1秒角 程度

木曾観測所

3秒角 程度



1秒角の空間分解能は50AU

の距離では $3.6 \times 10^4 \text{ km}$

点光源は天王星海王星半径

($2.5 \times 10^4 \text{ km}$)より大きい。

土星サイズ($r=6 \times 10^4 \text{ km}$)でやっと3

–4分割できる程度

可視撮像観測（可視測光観測）

大きさ・組成はわかりません

太陽系天体：

可視～近赤外線 → 太陽光反射

反射光のフラックス

→ 天体の大きさ×アルベド

Keck 10m (近赤外分光) ⇒

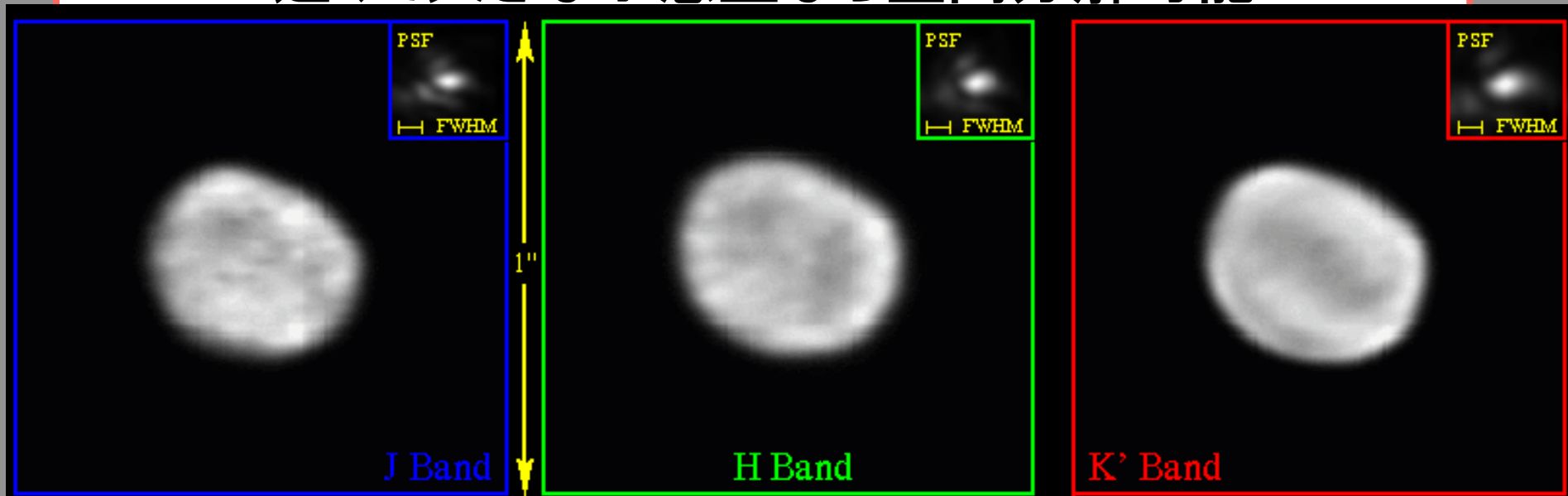
物質科学(組成)

IRAM 30m (ミリ波熱放射) ⇒

サイズ測定

小惑星のマッピング: Vestaの例

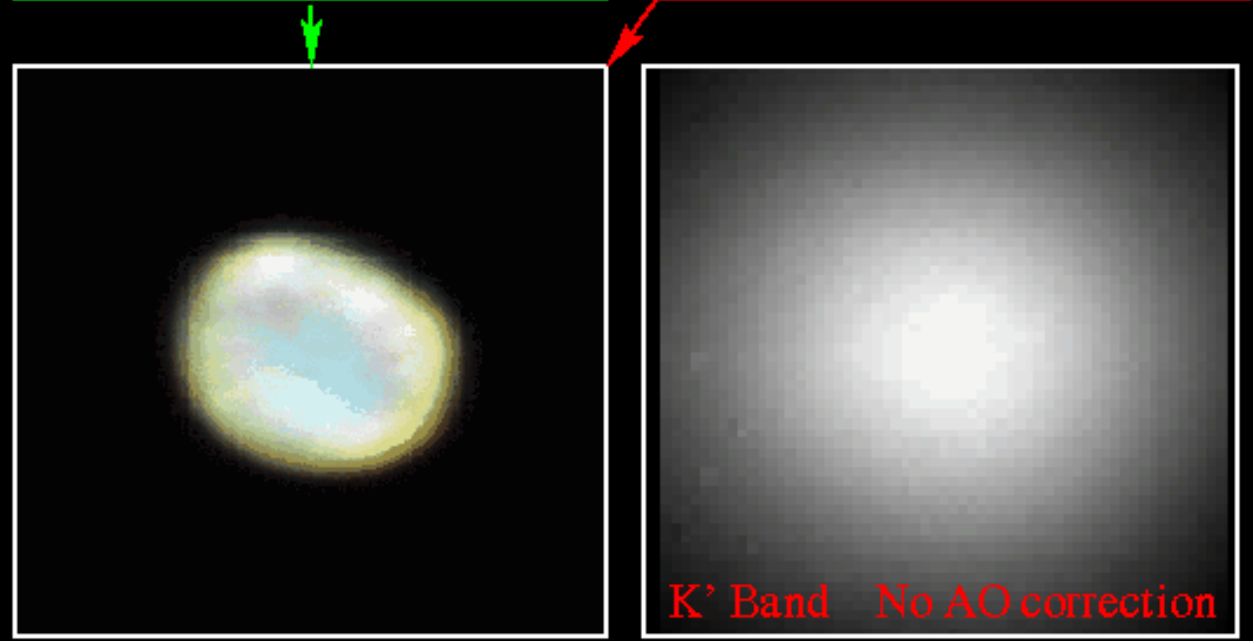
近くて大きな小惑星なら空間分解可能



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)

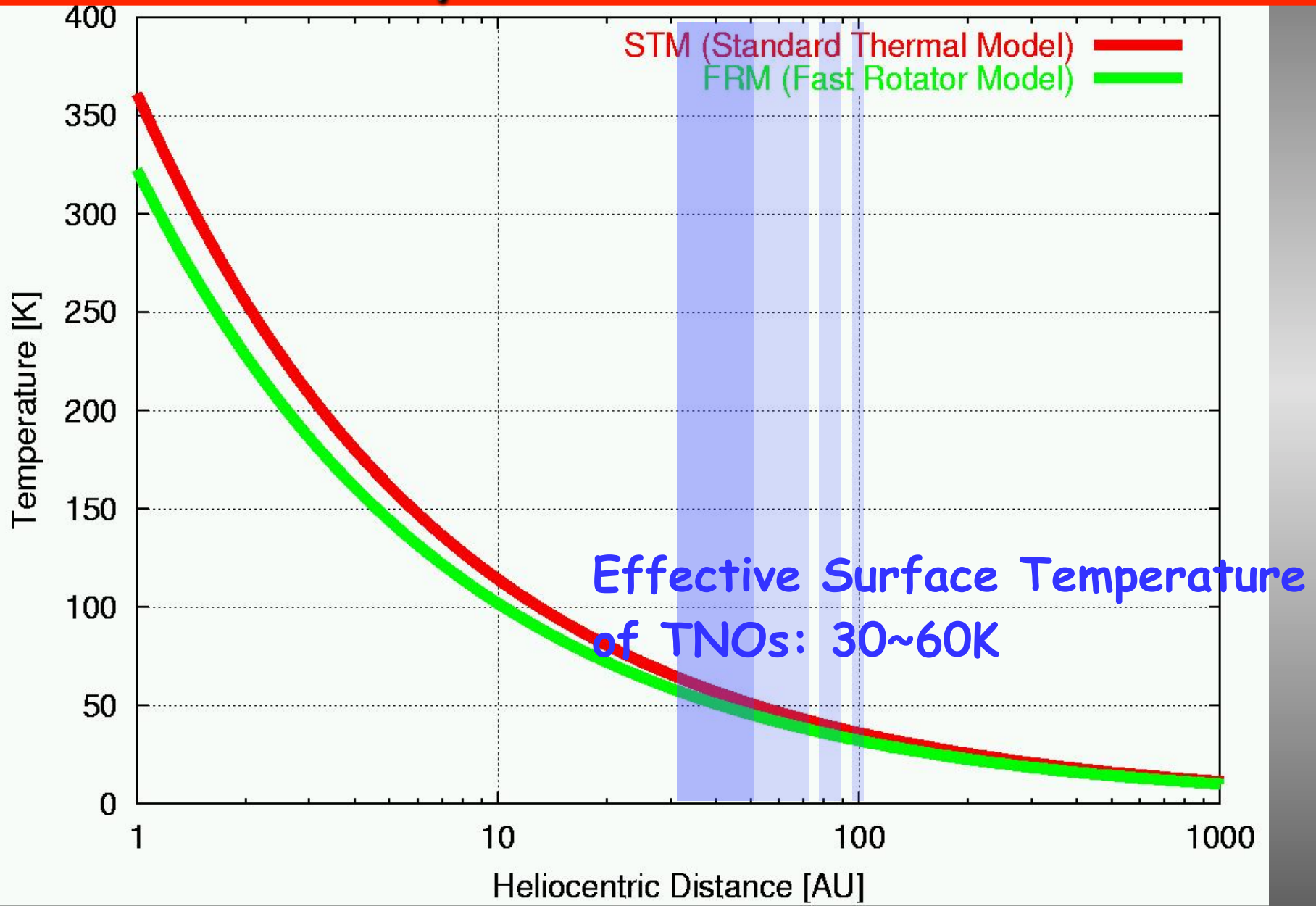


なぜミリ波？

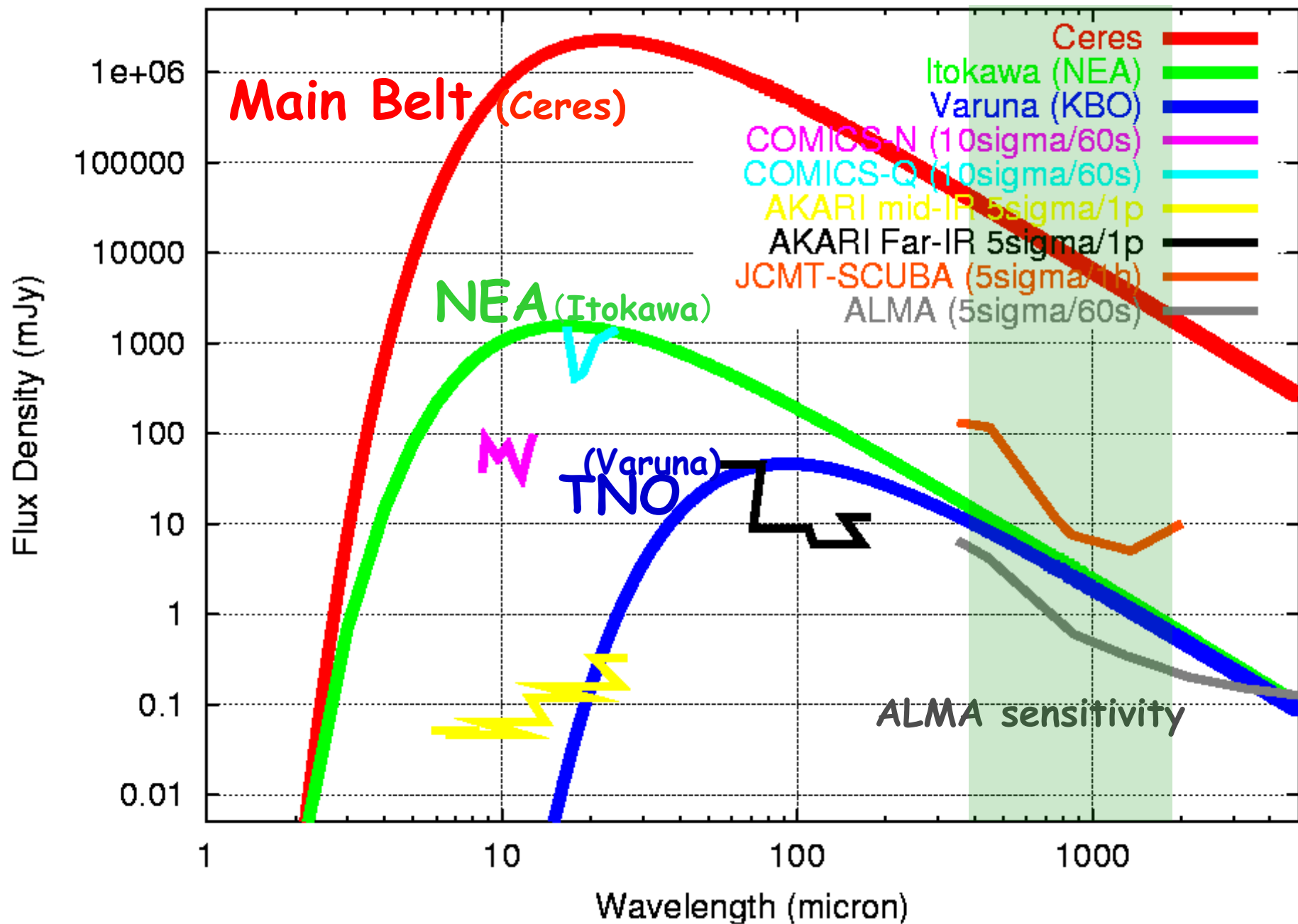
(ほんとはサブミリ、遠赤外の方がいいけど)



Surface Temperature of minor bodies



小天体の熱放射と装置感度



IRAM 30mによるErisの熱放射の観測

1.27 ± 0.26 mJy @ 250 GHz

2005年8月 19.8, 23.8, 24.8, 27.8日

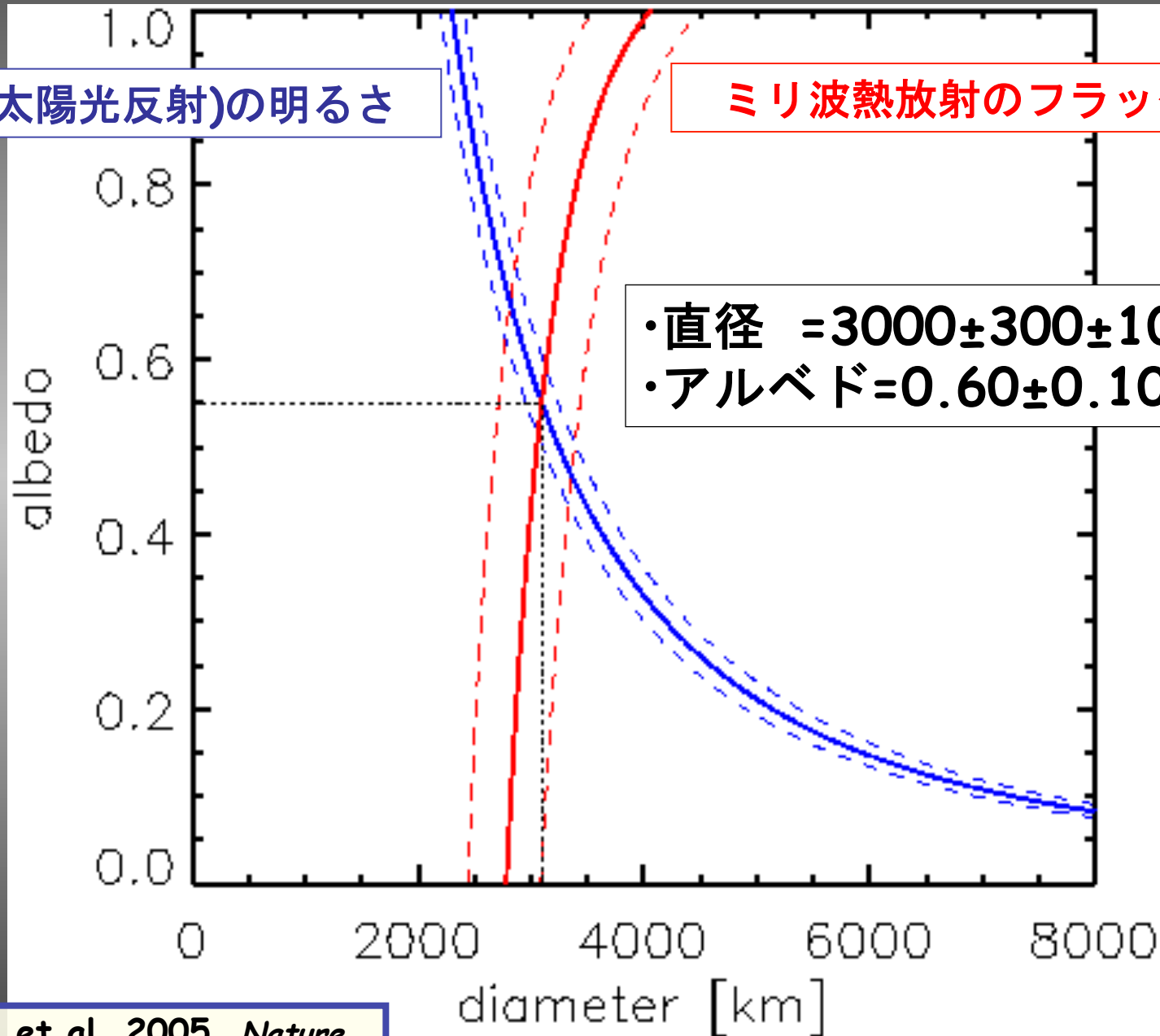
周波数: 250GHz (帯域210—290GHz)

積分時間: 5.64時間 (on-off 観測 on-source)

サイズとアルベドの決定

可視(太陽光反射)の明るさ

ミリ波熱放射のフラックス



準惑星のサイズ・アルベド・(温度)

Bertoldi et al. 2005, *Nature*

Table 2 | Properties of 2003 UB₃₁₃, Pluto, Charon and Ceres

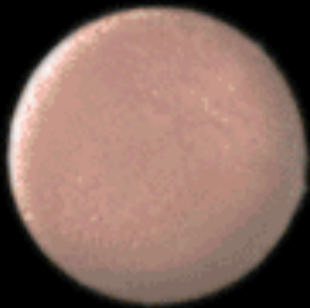
Case	$q = A/p$	d (km)	p	T_b (K)
2003 UB ₃₁₃ , fast rotation	1	$3,136^{+263}_{-276}$	$0.54^{+0.11}_{-0.08}$	23.2
2003 UB ₃₁₃ , fast rotation	0.9	$3,094^{+268}_{-286}$	$0.55^{+0.11}_{-0.08}$	23.7
2003 UB ₃₁₃ , slow rotation	0.9	$2,859^{+231}_{-241}$	$0.65^{+0.11}_{-0.08}$	26.9
Pluto	0.9	$2,328 \pm 48$	0.62 ± 0.02	~36
Charon	0.9	$1,242 \pm 42$	0.37 ± 0.01	40
Ceres	0.4	913 ± 43	0.10 ± 0.01	164

Derived diameter, d , red geometric albedo, p , and brightness temperature, T_b , for different assumptions on rotation and phase integral, q . At mm wavelengths, fast rotation applies for objects seen equator-on and rotating with a period smaller than 40 h, whereas slow rotation applies for those seen pole-on, independent of the rotation period. Data for Pluto^{3,7,12}, Charon^{3,7,12} and Ceres¹³ are shown for comparison. Note that for Pluto the red albedo varies between ~0.49 and ~0.75 within each rotation period; for p and T_b we quote mean values.

結果：2003 UB₃₁₃は冥王星より大きい!?

UB 313
3000 km

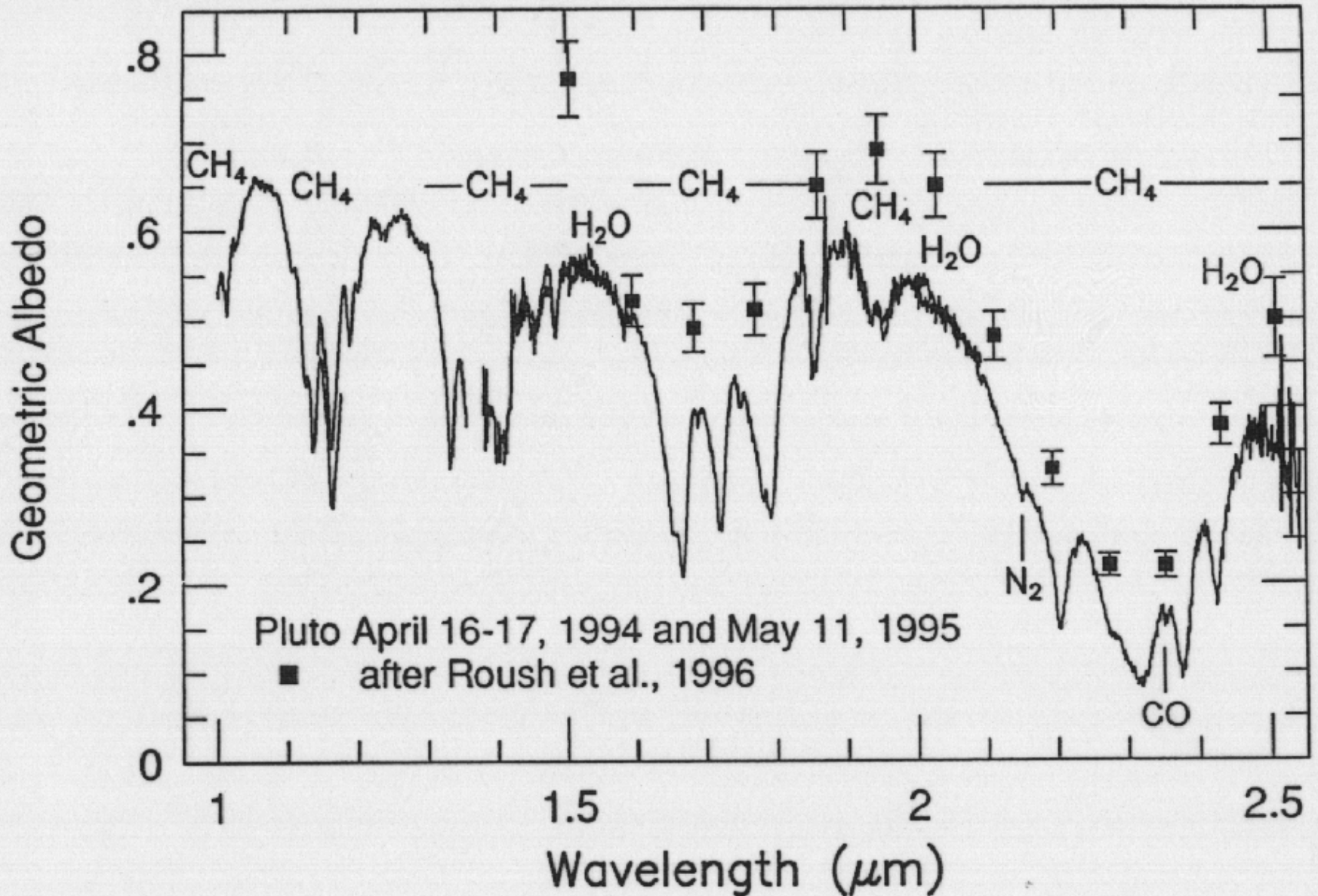
Pluto/Charon
2300/1200 km



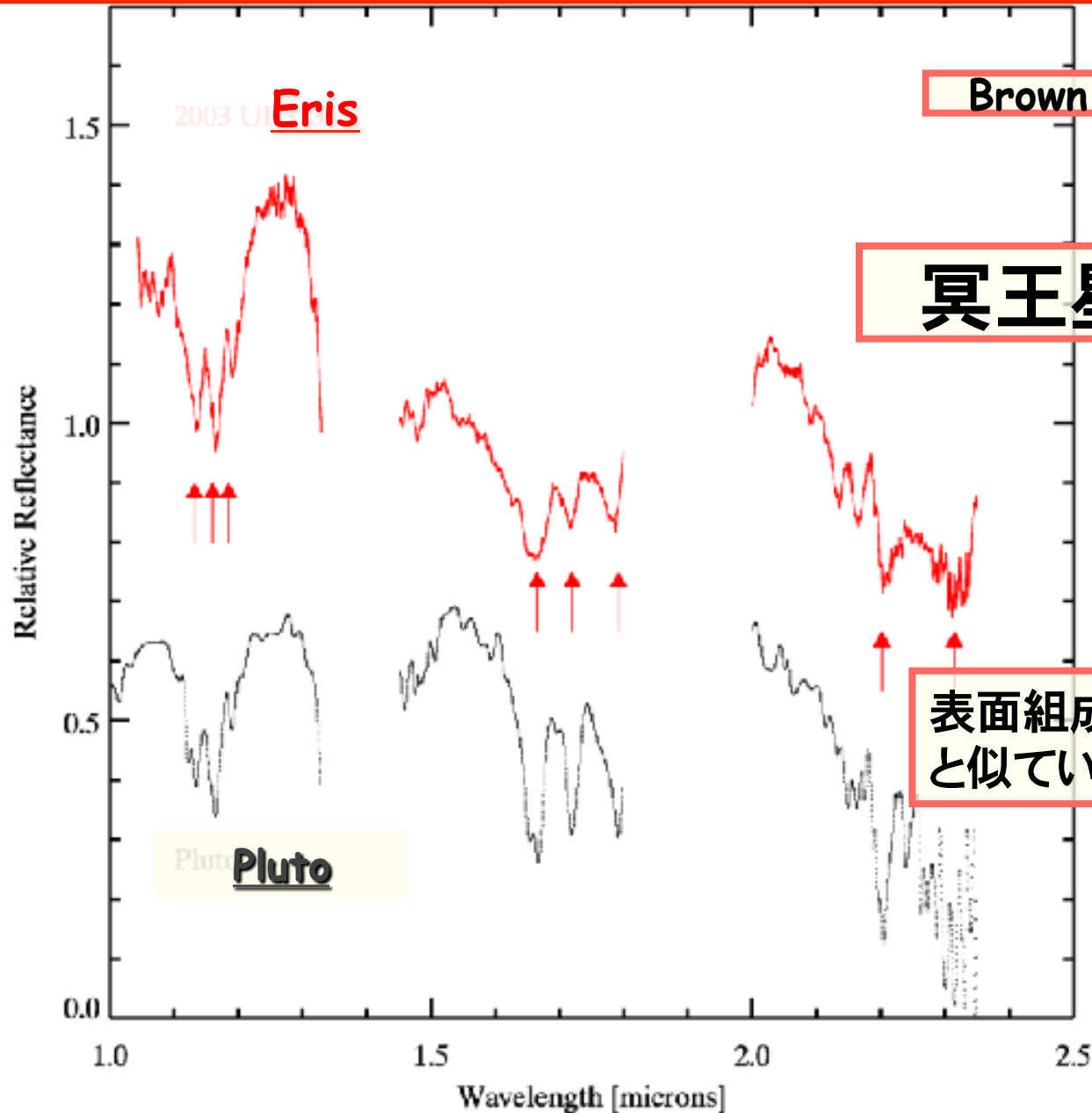
Moon
3500 km
Earth
12800 km



冥王星の表面組成：近赤外線分光

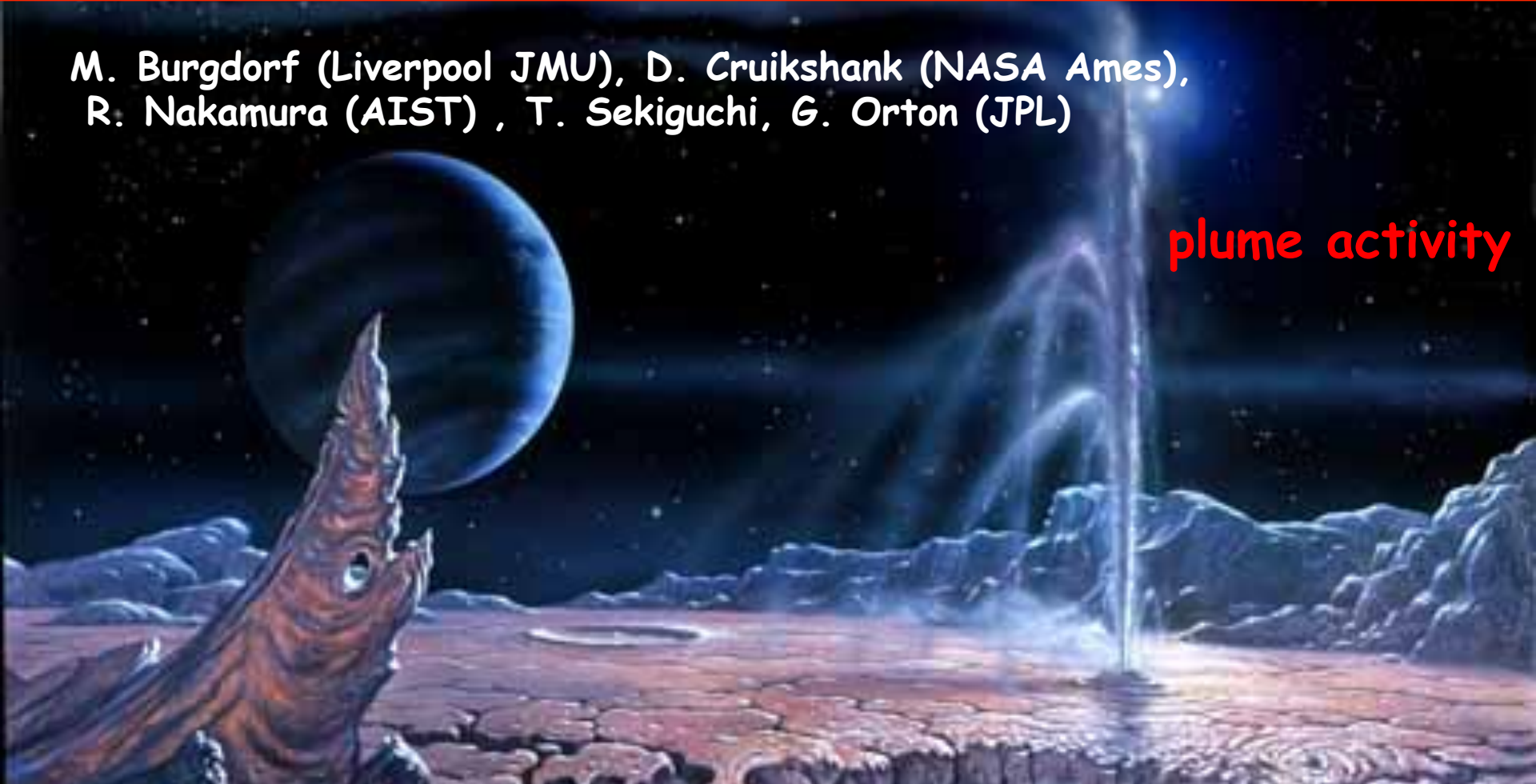


近赤外線スペクトル



Triton (D~2700km): the biggest TNO?

M. Burgdorf (Liverpool JMU), D. Cruikshank (NASA Ames),
R. Nakamura (AIST), T. Sekiguchi, G. Orton (JPL)



plume activity

retrograde orbit: captured satellite
originally from Kuiper Belt

Surface: covered with Interior material

The background image shows the surface of Triton, Neptune's moon, with a reddish-brown hue and numerous dark, linear features. A bright, white plume is visible in the center-left, circled in white with an arrow pointing to it.

Triton

(Neptune's moon)

Activities

Eruption of N₂ gas

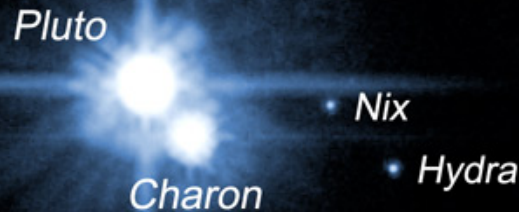
Triton's Plume
(Voyager II, NASA)

Pluto \doteq Eris ??

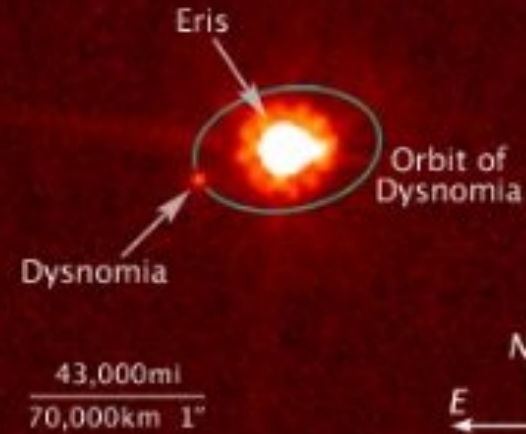
HSTによる直接撮像

Pluto System ■ February 15, 2006
Hubble Space Telescope ■ ACS/HRC

Pluto



Eris



Dwarf Planet Eris and Satellite Dysnomia ■ August 30, 2006
Hubble Space Telescope ■ ACS/HRC

NASA, ESA, and M. Brown (California Institute of Technology)

STScI-PRC07-24

Size determination of Eris with HST

Brown et al. 2006 ApJ

Diameter: 2400 \pm 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

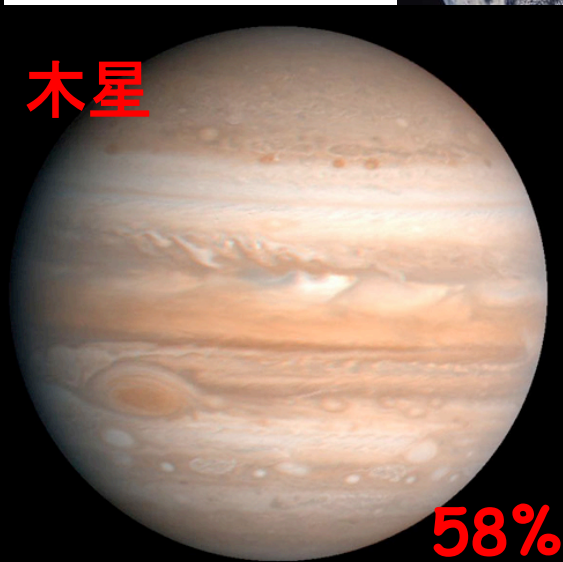
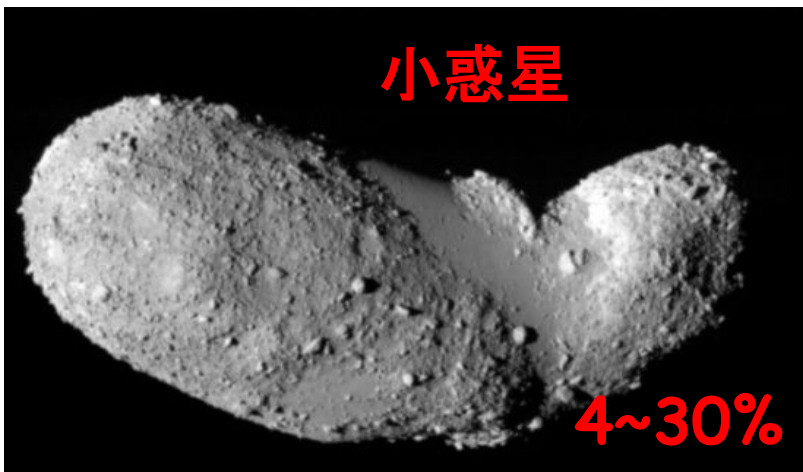
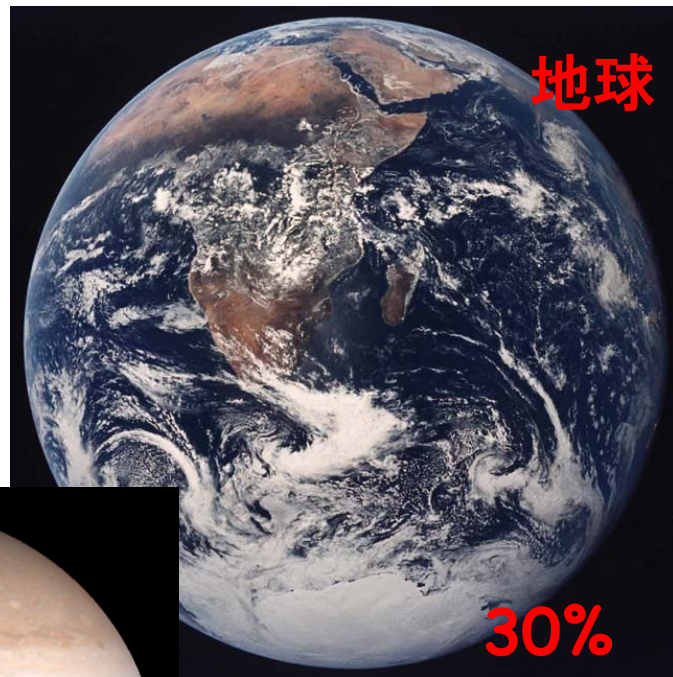
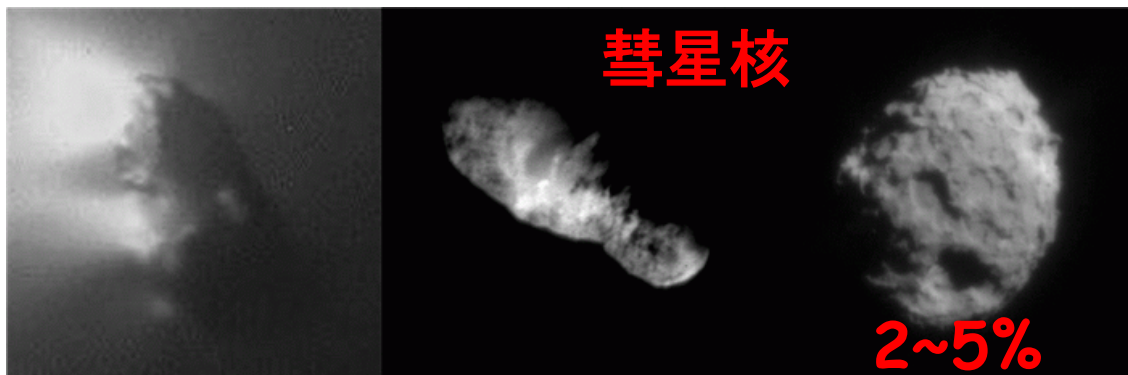
Image Size of Eris: 0.034 arcsec.
→ 2400km

Deconvolution technique

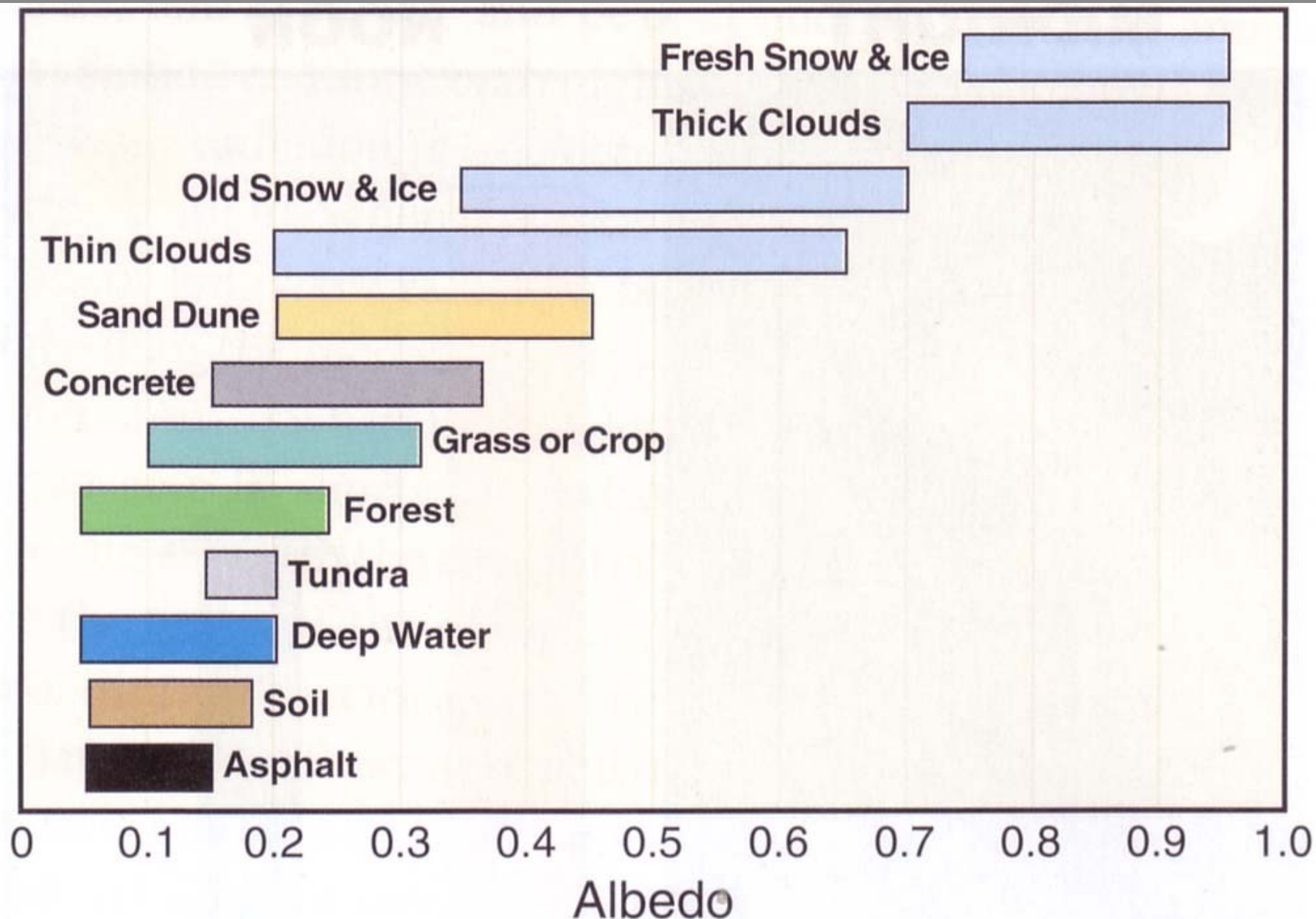
TMT:
0.015"@K

ALMA~0.01"
(長基線・短波長)

太陽系天体のアルベド



表面物質のアルベド



Size determination of Eris with HST

Brown et al. 2006 ApJ

Diameter: 2400 \pm 100 km

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



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

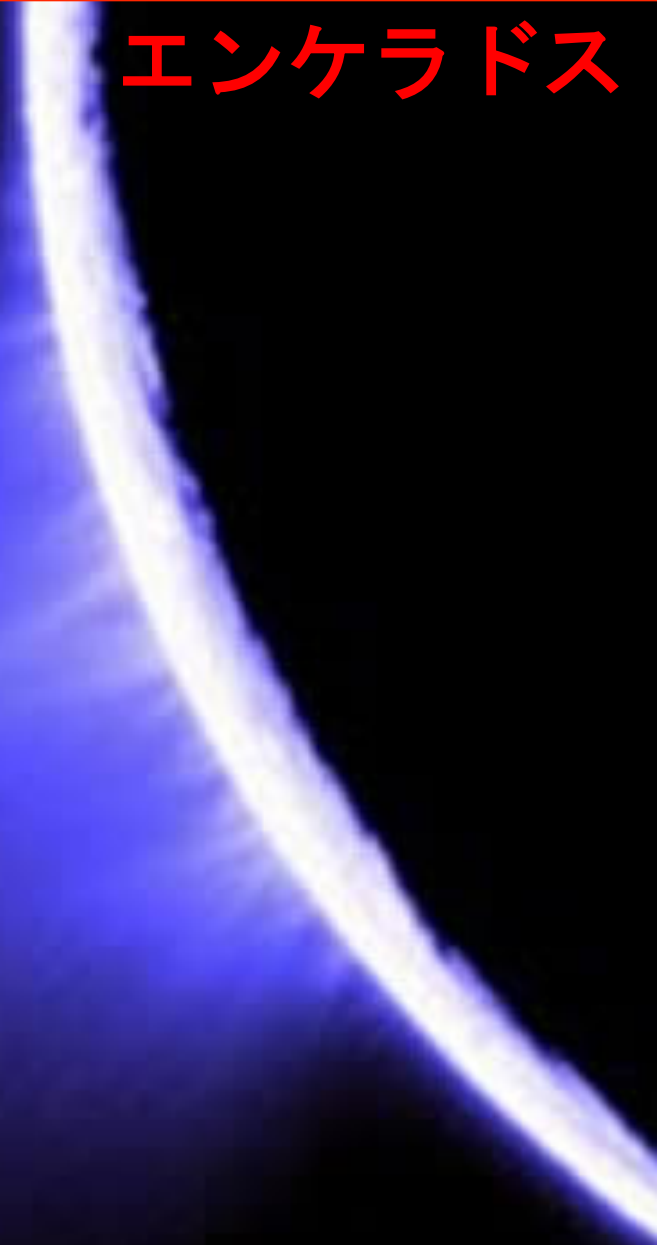
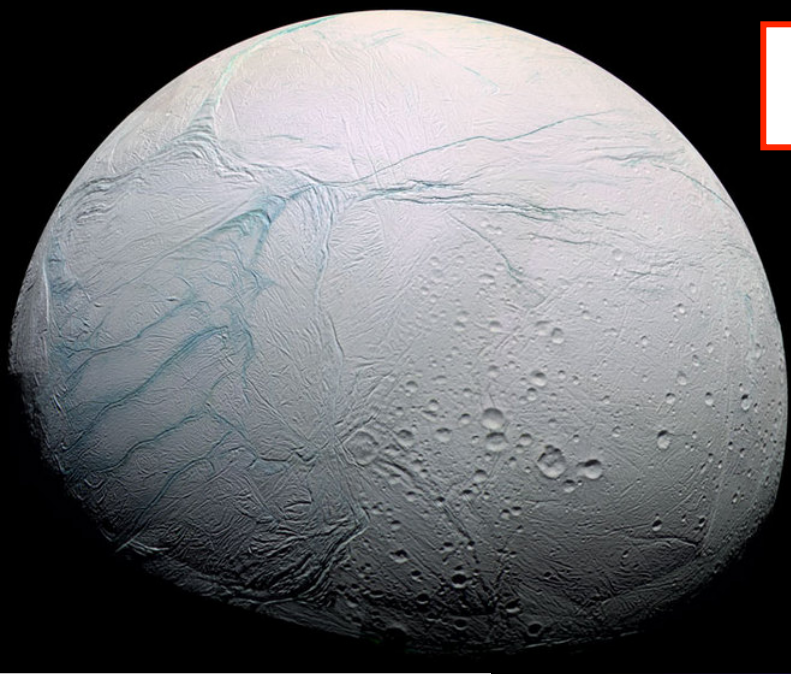
Pixel Size of HST: 0.027 arcsec.
→ 1875km

Image Size of Eris: 0.034 arcsec.
→ 2400km

Deconvolution technique

地質活動(ガス噴出)する衛星

エンケラドス



熱放射の観測から大きさを求める方法の検証

太陽光反射(可視光)の明るさと熱放射のフラックスとから大きさとアルベドを決定する

探査機でこれまで直接大きさの測られた小惑星で検証してみよう



太陽系小天体の熱放射観測

*Thermal Infrared Observations of Minor Bodies
in the Outer Solar System.*

内容

関口 朋彦（北海道教育大学・旭川校）

- ◆ 関口のこれまでの仕事、今の仕事
- ◆ 準惑星エリスについて・冥王星より大きい？
- ◆ 太陽系小天体の大きさ測定
 - イトカワの中間赤外線熱放射の地上観測の例
- ◆ あかり衛星での遠赤外線測光観測
- ◆ あかり衛星での近赤外線分光観測

Eros

Gaspra

Ida

Mathilde

50 km

<http://s>

小惑星: 直

Gaspra (

Ida (27

Mathilde

Eros (10

Itokawa

Dawn?
Vesta??

径

(28%+)

(16%+)

(5%+)

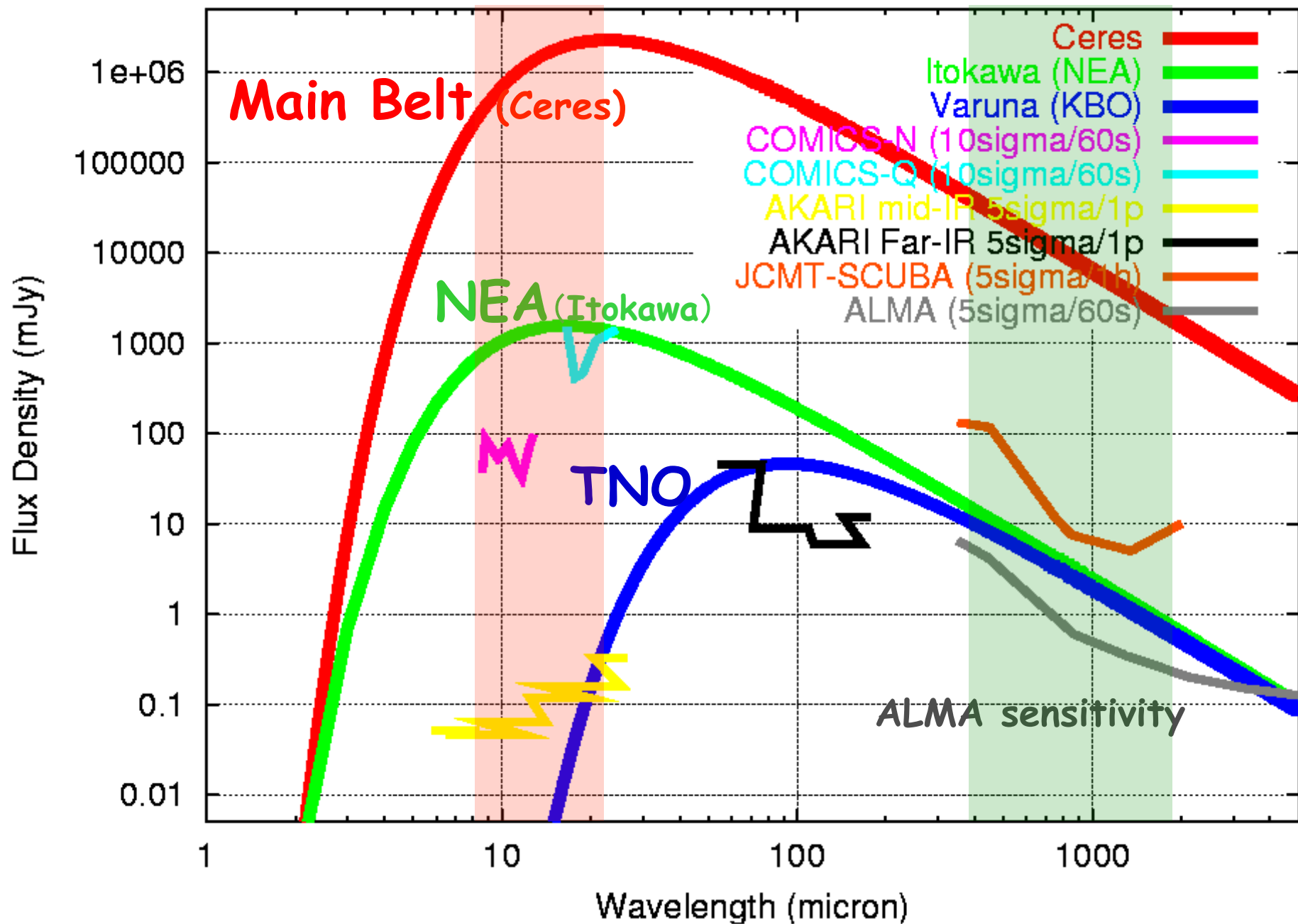
(40%+)

(5)

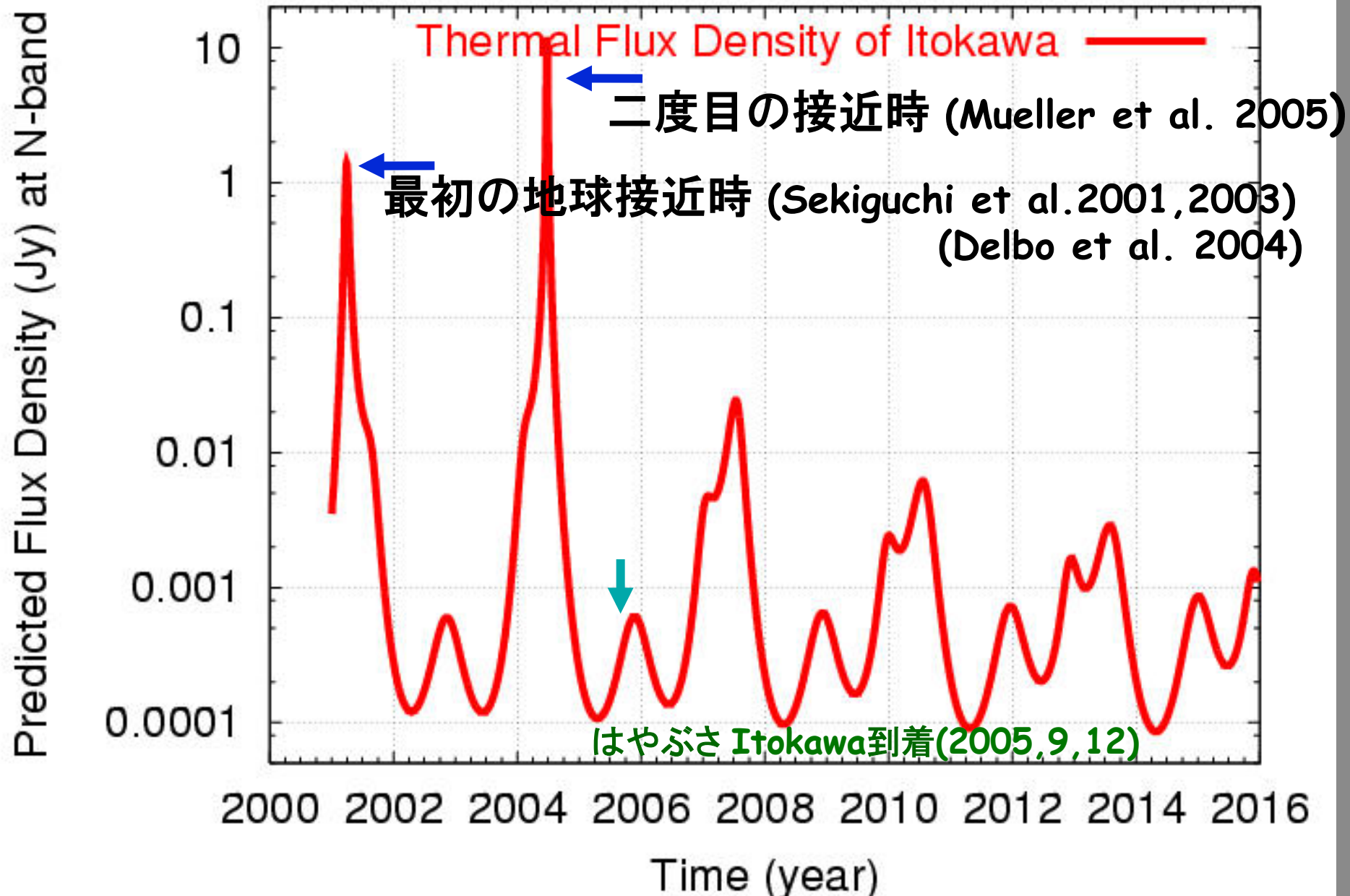


近い(200-300K)は中間赤外

遠い(数10K)は遠赤・電波



Itokawa の N-バンドフラックスの経年変化



Sekiguchi et al. *Astronomy & Astrophysics*, (2003)

**Thermal observations of MUSES-C mission target
(25143) 1998 SF₃₆[★]**

T. Sekiguchi^{1,2}, M. Abe³, H. Boehnhardt², B. Dermawan⁴, O. R. Hainaut², and S. Hasegawa³

¹ National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Japan
e-mail: t.sekiguchi@nao.ac.jp

Mueller, Sekiguchi et al. *Astronomy & Astrophysics*, (2005)

**Thermal infrared observations of the Hayabusa spacecraft target
asteroid 25143 Itokawa[★]**

T. G. Müller¹, T. Sekiguchi², M. Kaasalainen³, M. Abe⁴, and S. Hasegawa⁴

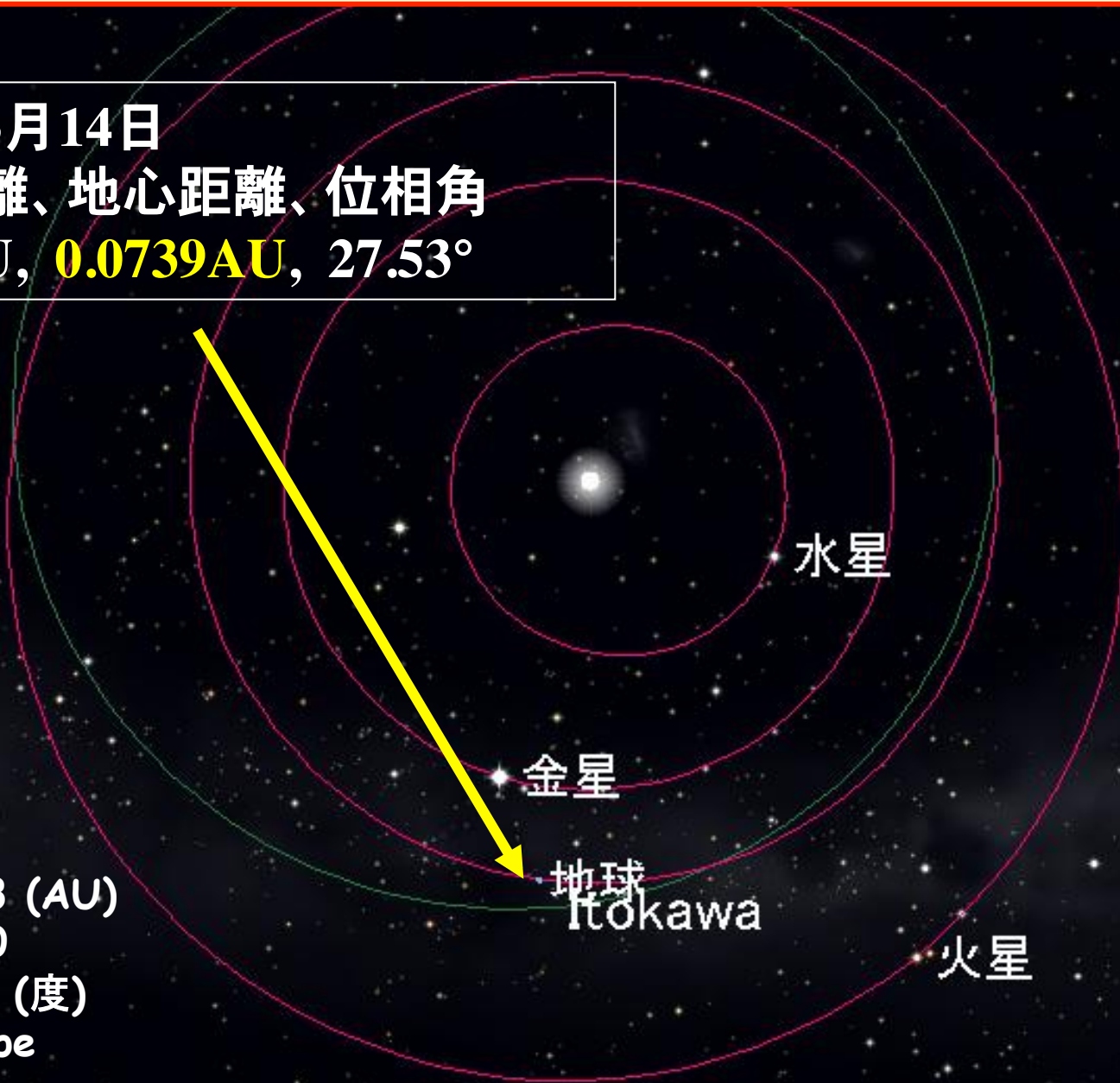
¹ Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Giessenbachstraße, 85748 Garching, Germany
e-mail: tmueller@mpe.mpg.de

² National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan
e-mail: t.sekiguchi@nao.ac.jp

地球に最接近時に観測

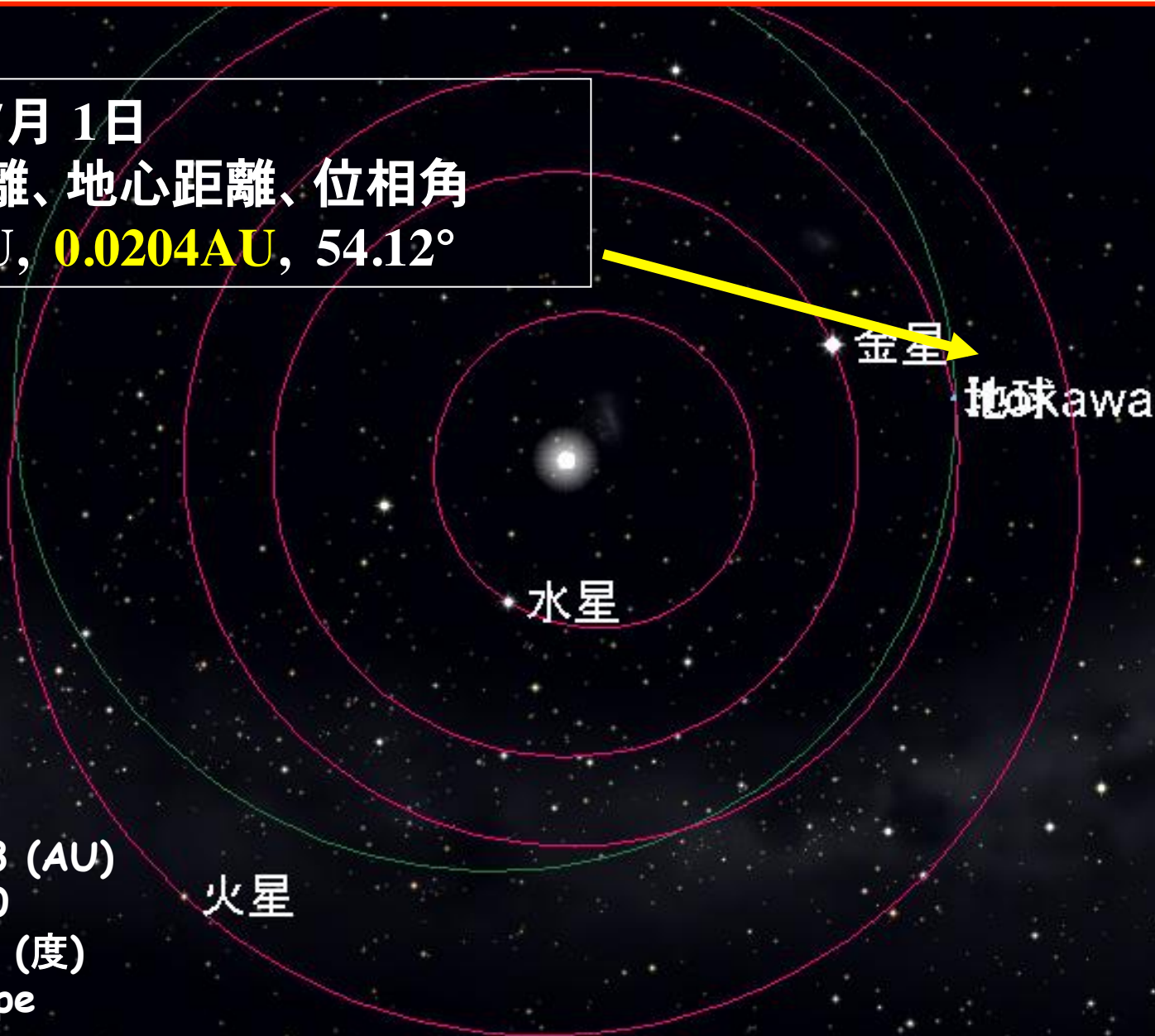
2001年3月14日
日心距離、地心距離、位相角
1.059AU, **0.0739AU**, 27.53°

$a = 1.323$ (AU)
 $e = 0.280$
 $i = 1.728$ (度)
Apollo-type



地球に最接近時に観測

2004年7月 1日
日心距離、地心距離、位相角
1.029AU, **0.0204AU**, 54.12°



$a = 1.323$ (AU)
 $e = 0.280$
 $i = 1.728$ (度)
Apollo-type

観測

チリ ESO La Silla 観測所

ESO 3.6m望遠鏡



Hayabusa 探査機ターゲット Itokawa の熱放射測光



口径: 3.6m

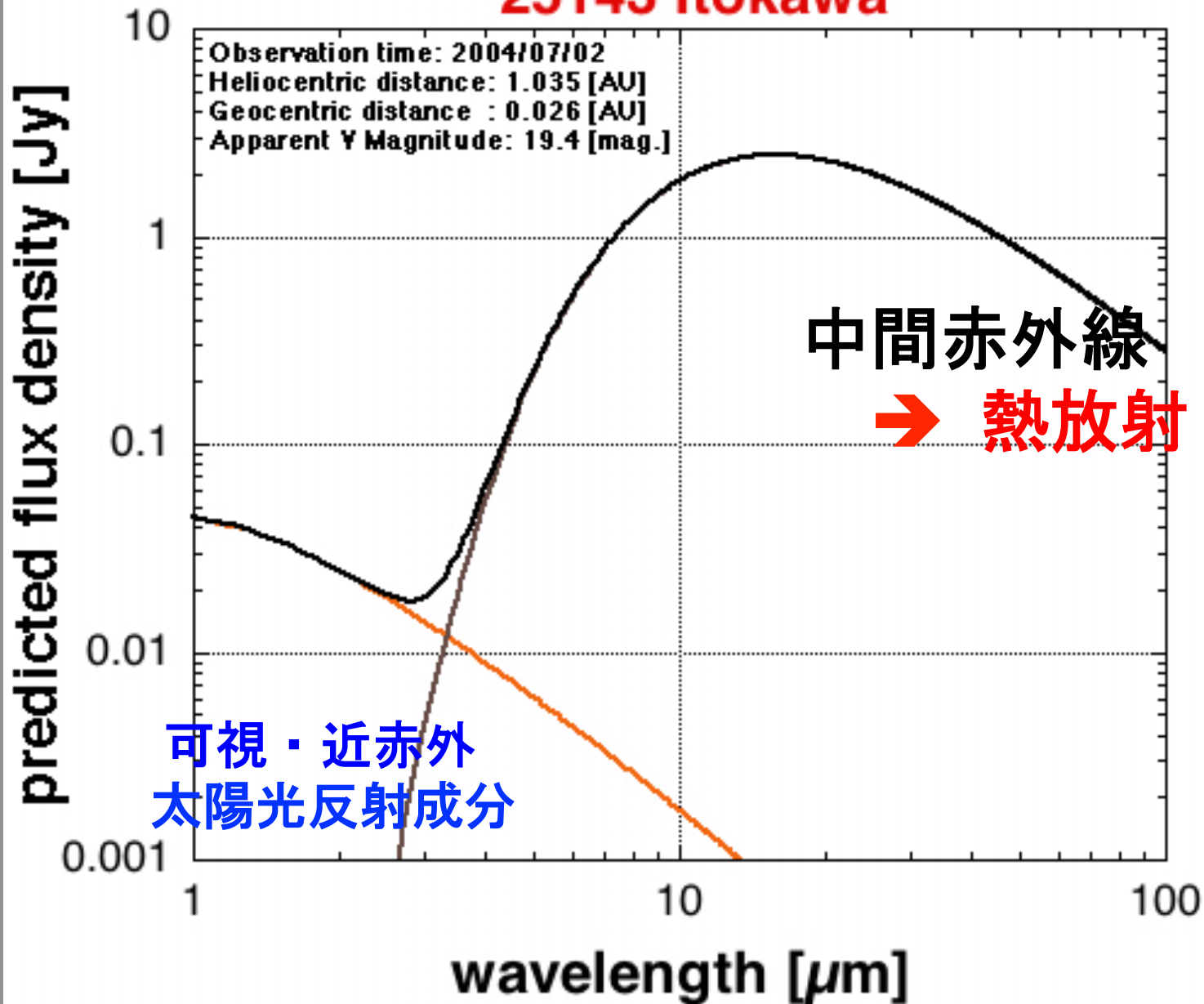
1 14 '99

中間赤外線観測



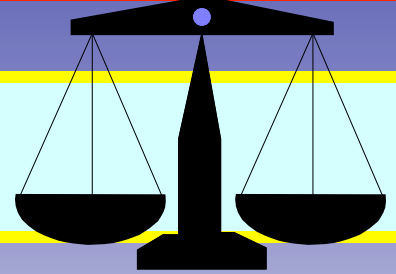
熱放射の観測

25143 Itokawa



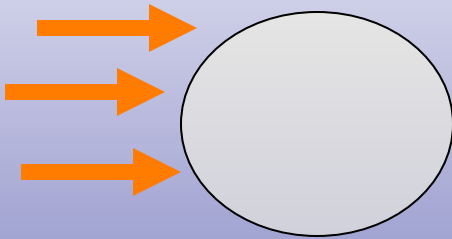
サイズとアルベドを同時に決める

-エネルギーバランス

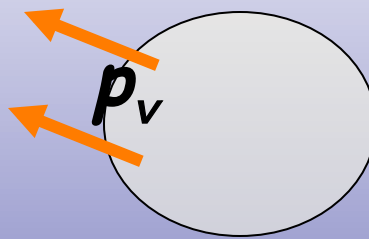


1) [太陽放射] - [反射光] = [小惑星の熱放射]

[太陽定数]



[アルベド]



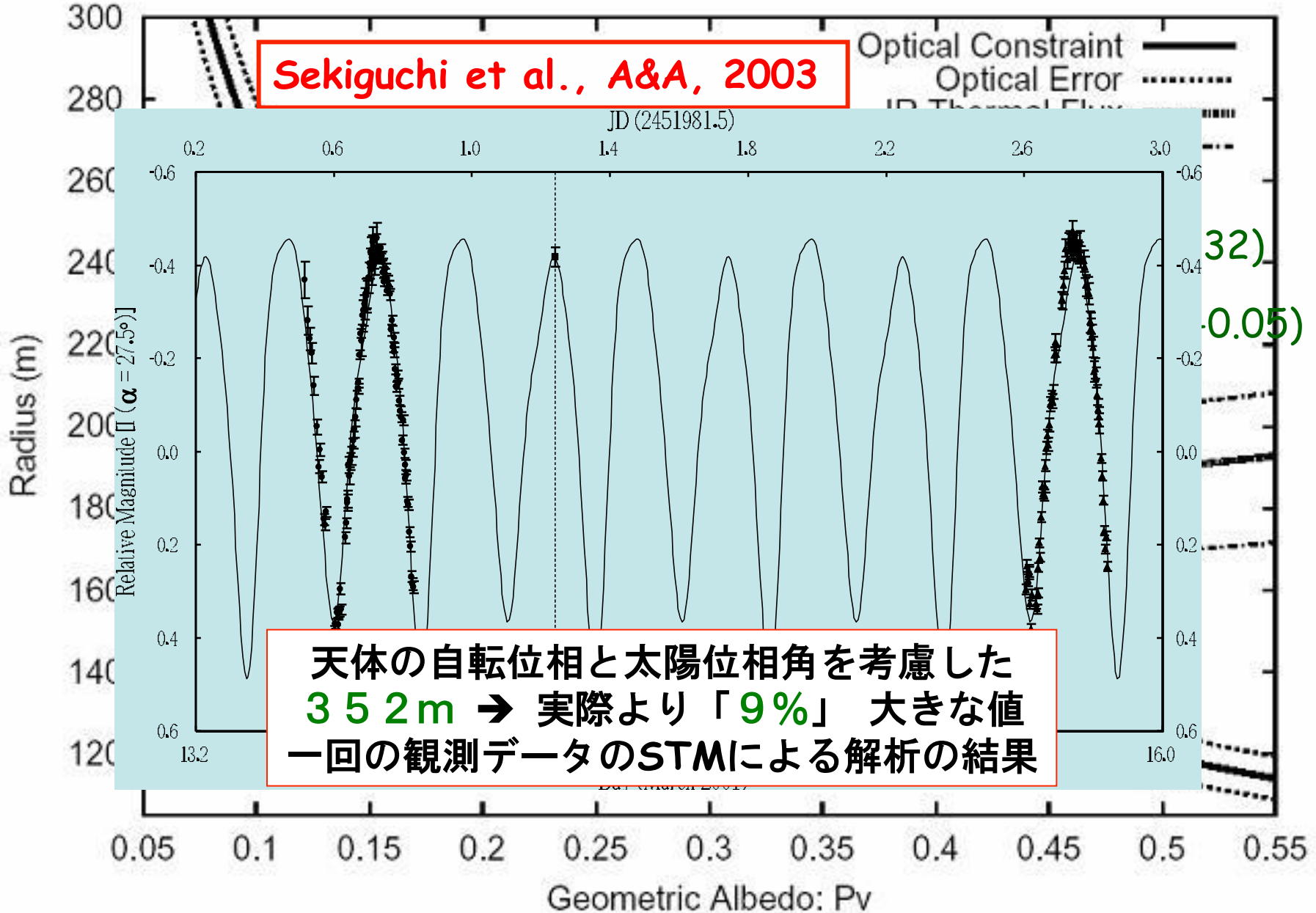
[表面積]



2) (可視での明るさ) \propto [断面積] \times [アルベド]

Itokawaのサイズとアルベドの導出

Sekiguchi et al., A&A, 2003



Hayabusa 探査機ターゲット Itokawa の熱放射測光

ESO 3.6m望遠鏡



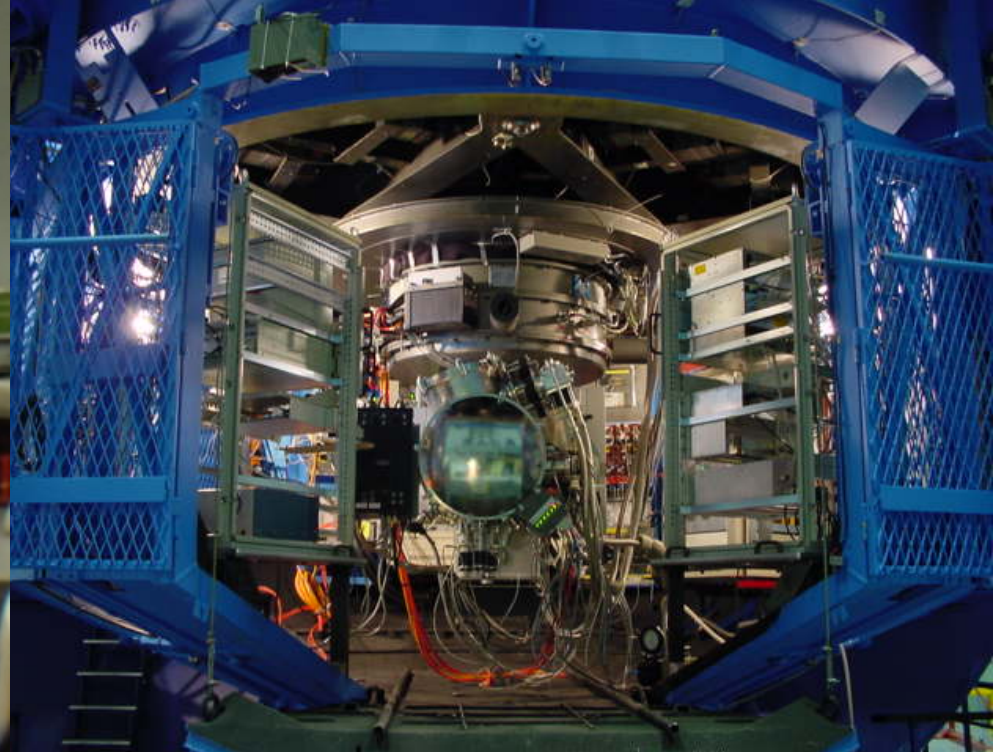
中間赤外観測装置 TIMMI2

Nバンド測光観測

Sekiguchi et al.2003

N・Qバンド測光観測

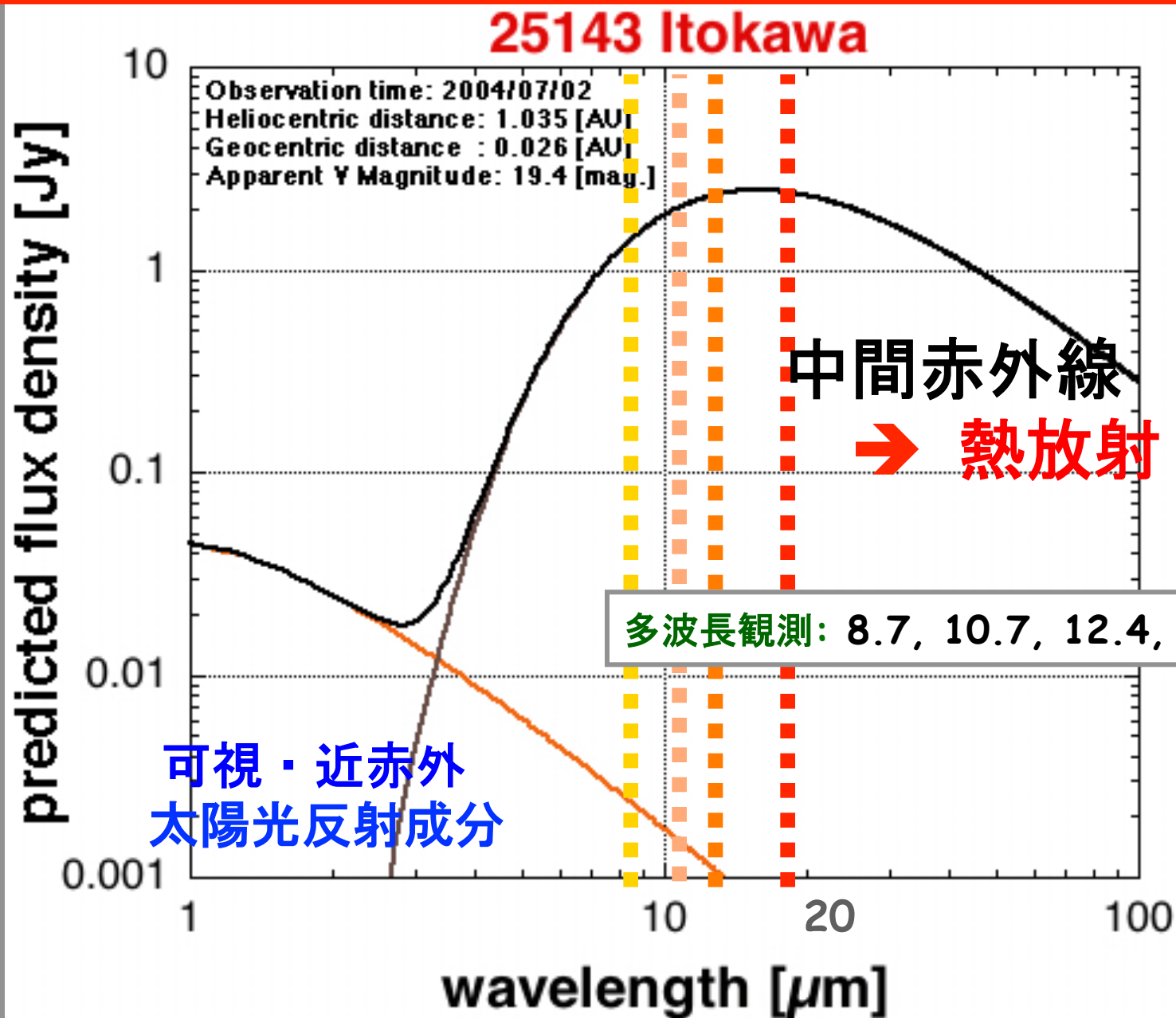
Mueller, Sekiguchi et al.2005



中間赤外線観測



熱放射の観測



同じ望遠鏡・装置による多波長、多位相角、多数回の間接赤外観測

No	Mid-Time (Day UT)	Filter 波長 Band	r [AU]	Δ [AU]	α [°] 太陽位相角	Remarks
01	2001/Mar/14 05:50	N11.9	1.059232	0.073897	+27.54	Sekiguchi et al. (2003)
02	2001/Apr/08 09:27	N11.9	0.983221	0.053606	108.33	Delbo (2004)
03	2001/Apr/08 09:42	N10.4	0.983198	0.053633	108.35	and priv. comm.
04	2001/Apr/08 10:01	N12.9	0.983169	0.053667	108.37	"
05	2001/Apr/08 10:18	N8.9	0.983142	0.053698	108.38	"
06	2001/Apr/08 10:34	N11.9	0.983117	0.053728	108.40	"
07	2001/Apr/09 09:28	N12.9	0.981024	0.056409	109.93	"
08	2001/Apr/09 09:45	N9.8	0.980999	0.056441	109.95	"
09	2001/Apr/09 10:03	N10.4	0.980972	0.056475	109.96	"
10	2001/Apr/09 10:18	N11.9	0.980949	0.056504	109.98	"
11	2001/Apr/09 10:32	N11.9	0.980928	0.056530	109.99	"
12	2004/Jul/01 06:03	N1	1.028243	0.020164	-54.63	this work
13	2004/Jul/01 06:19	N1	1.028279	0.020193	-54.56	"
14	2004/Jul/01 06:36	N1	1.028318	0.020224	-54.49	"
15	2004/Jul/01 06:54	N1	1.028359	0.020257	-54.41	"
16	2004/Jul/01 07:16	N2	1.028409	0.020298	-54.31	"
17	2004/Jul/01 07:36	N2	1.028454	0.020335	-54.22	"
18	2004/Jul/01 07:53	N12.9	1.028492	0.020367	-54.15	"
19	2004/Jul/01 08:09	N12.9	1.028529	0.020397	-54.08	"
20	2004/Jul/01 08:37	Q1	1.028592	0.020450	-53.95	"

可視ライトカーブ観測による形状の推測

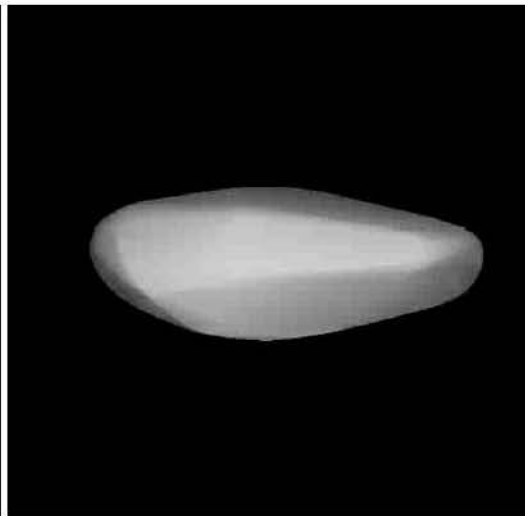
Kaasaleinen et al. 2003, Kaasaleinen et al. 2005

黄道面に対して

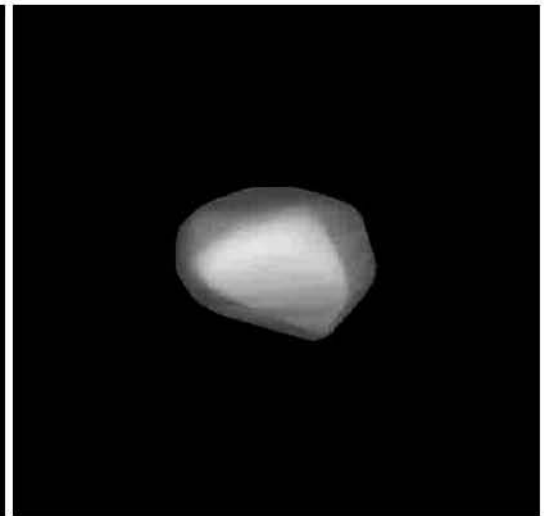
横から見た形状



上から見た形状

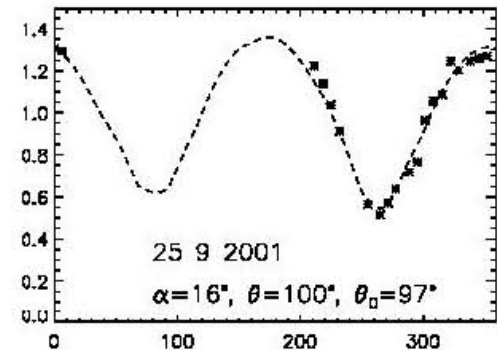
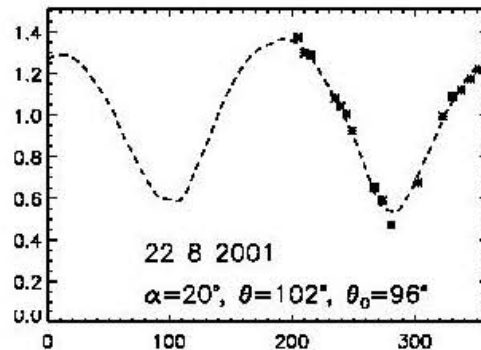
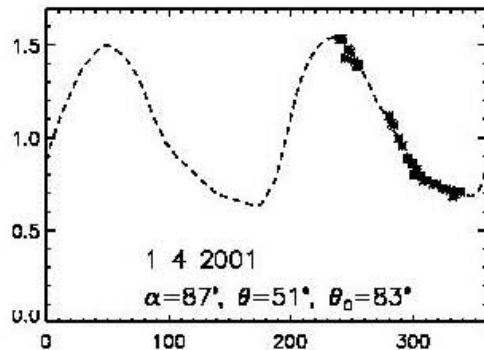
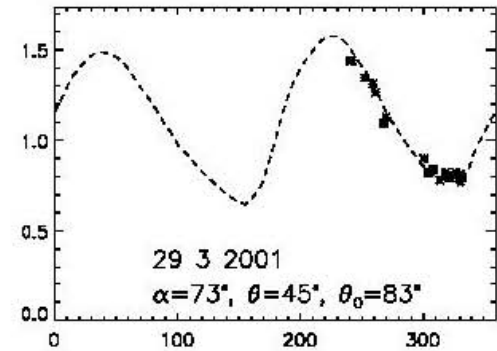
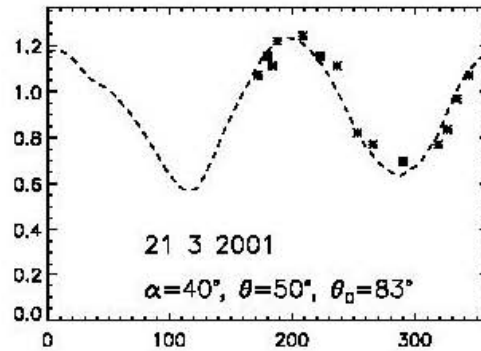
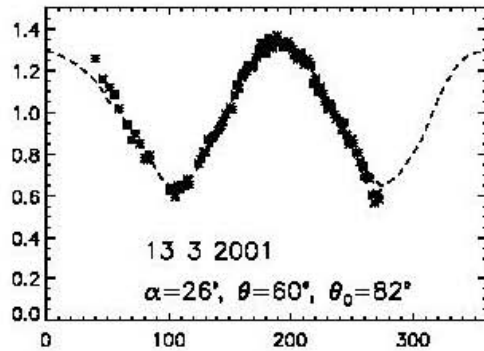
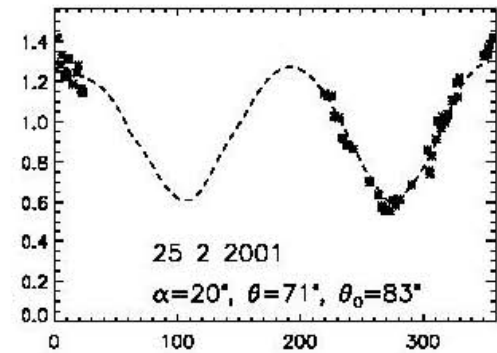
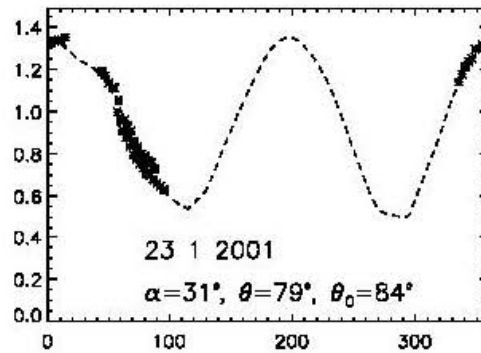
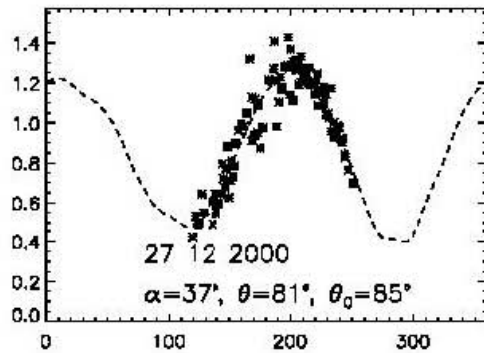


横から90°回転



Kaasalainen et al. 2003, Shape model through lightcurve inversion technique

可視のライトカーブ(連続測光)観測から形状を求める



Hayabusa探査機による直接探査撮像



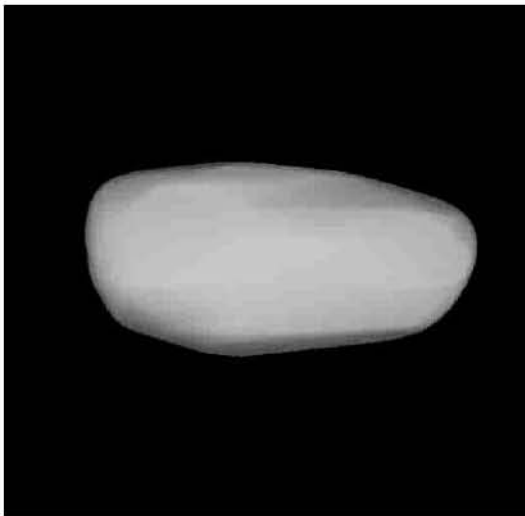
Release 051101-1 ISAS/JAXA

可視ライトカーブ観測による形状の推測

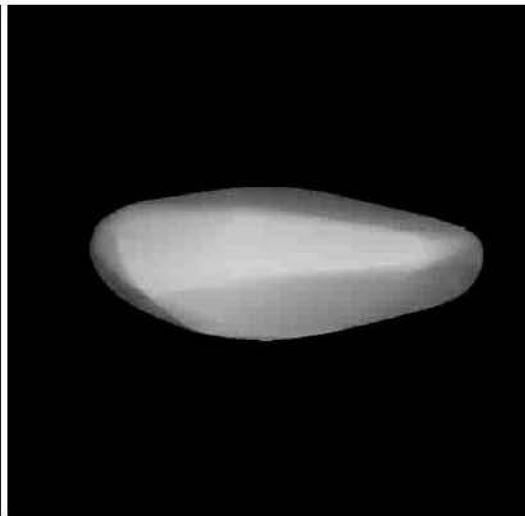
Kaasaleinen et al. 2003, Kaasaleinen et al. 2005

黄道面に対して

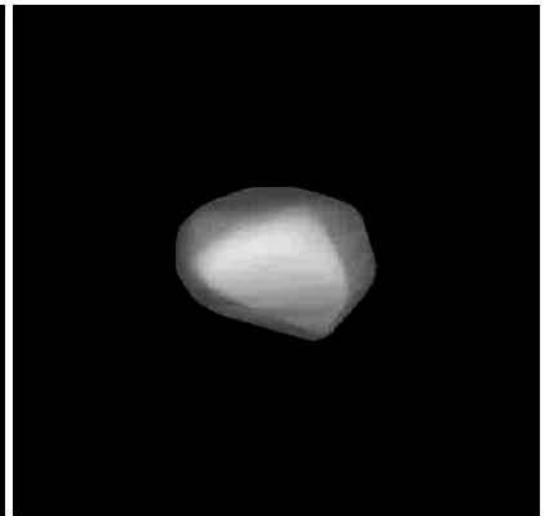
横から見た形状



上から見た形状



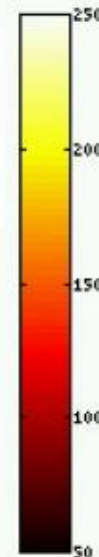
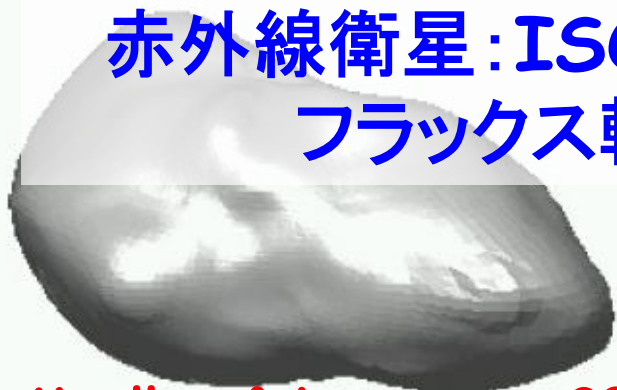
横から90°回転



Kaasalainen et al. 2003, Shape model through lightcurve inversion technique

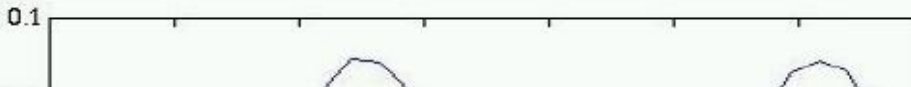
解析：小惑星の熱放射モデル

赤外線衛星：ISO, Herschel, AKARI の
フラックス較正標準光源モデル



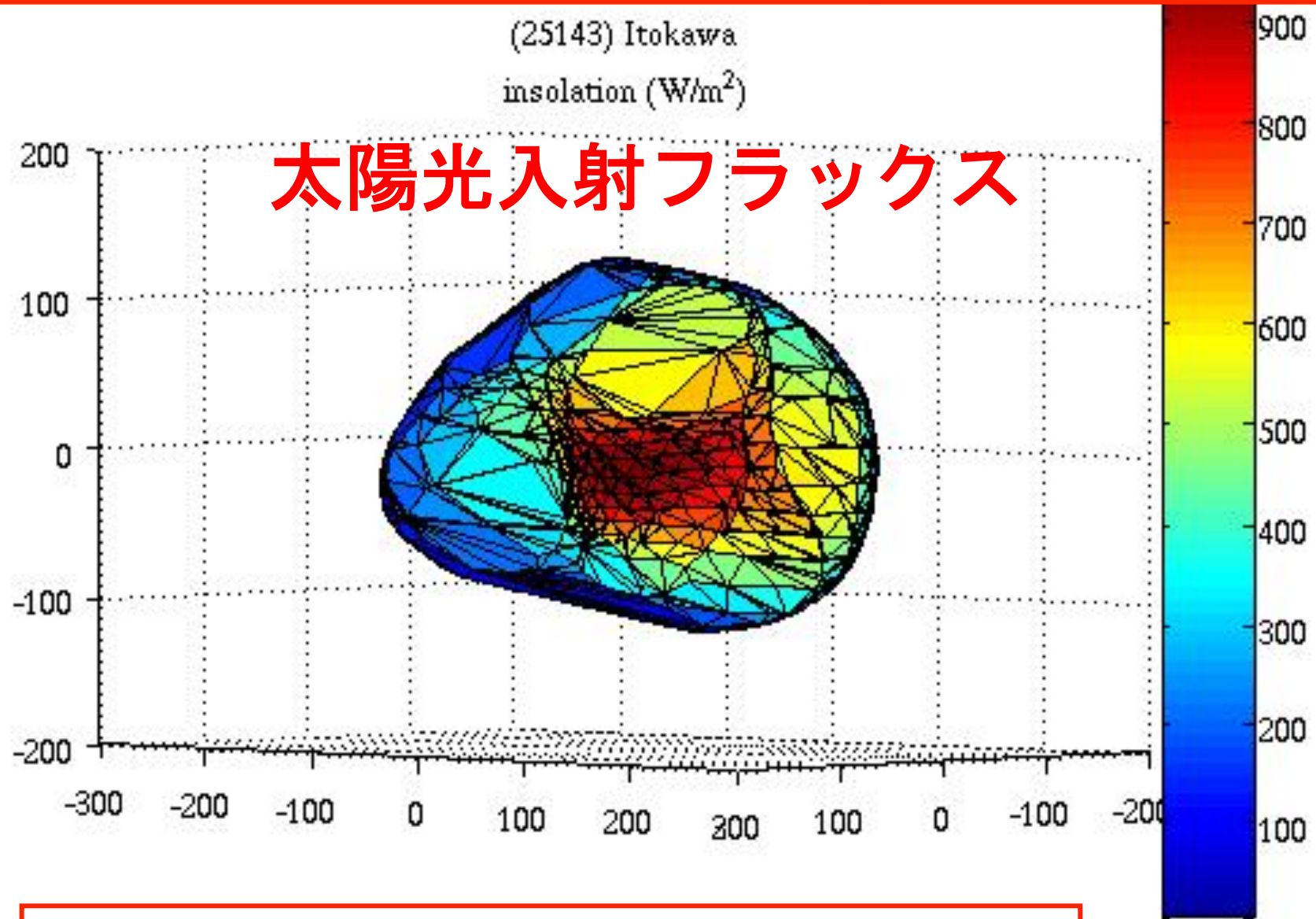
Mueller & Lagerros, 2002

赤外線衛星のキャリブレーション精度を左右するモデル



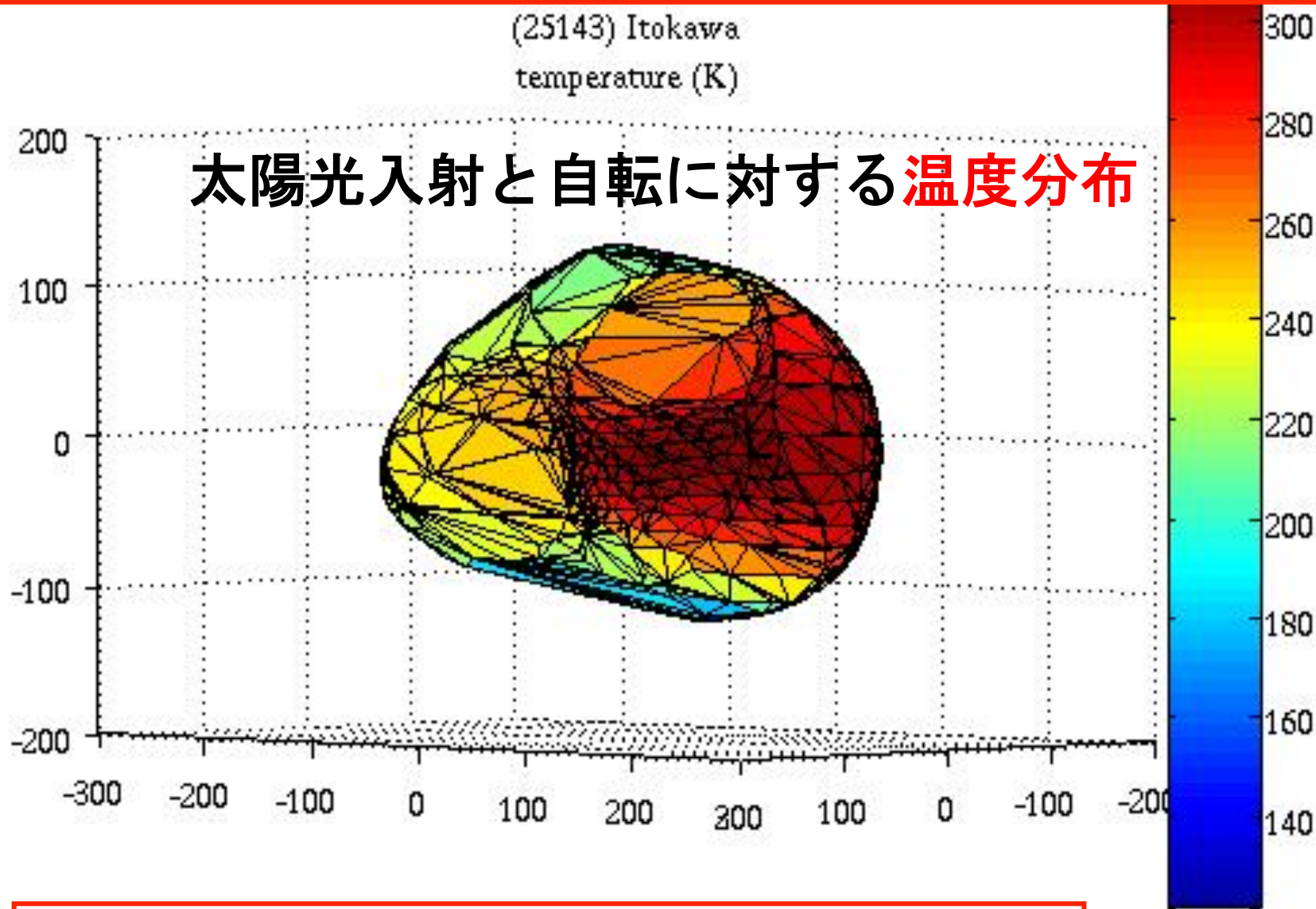
- エネルギーバランス(太陽光入射=表面反射+熱放射)
- サイズと形状
- 観測時の幾何学的位置関係、距離、位相角
- 回転軸、回転ベクトルと自転周期
- 表層の熱伝導特性(1次元熱伝導、熱慣性、二次元分布)

熱物理モデル (ThermoPhysical Model)



Mueller, Sekiguchi et al., A&A, 2005

熱物理モデル (ThermoPhysical Model)

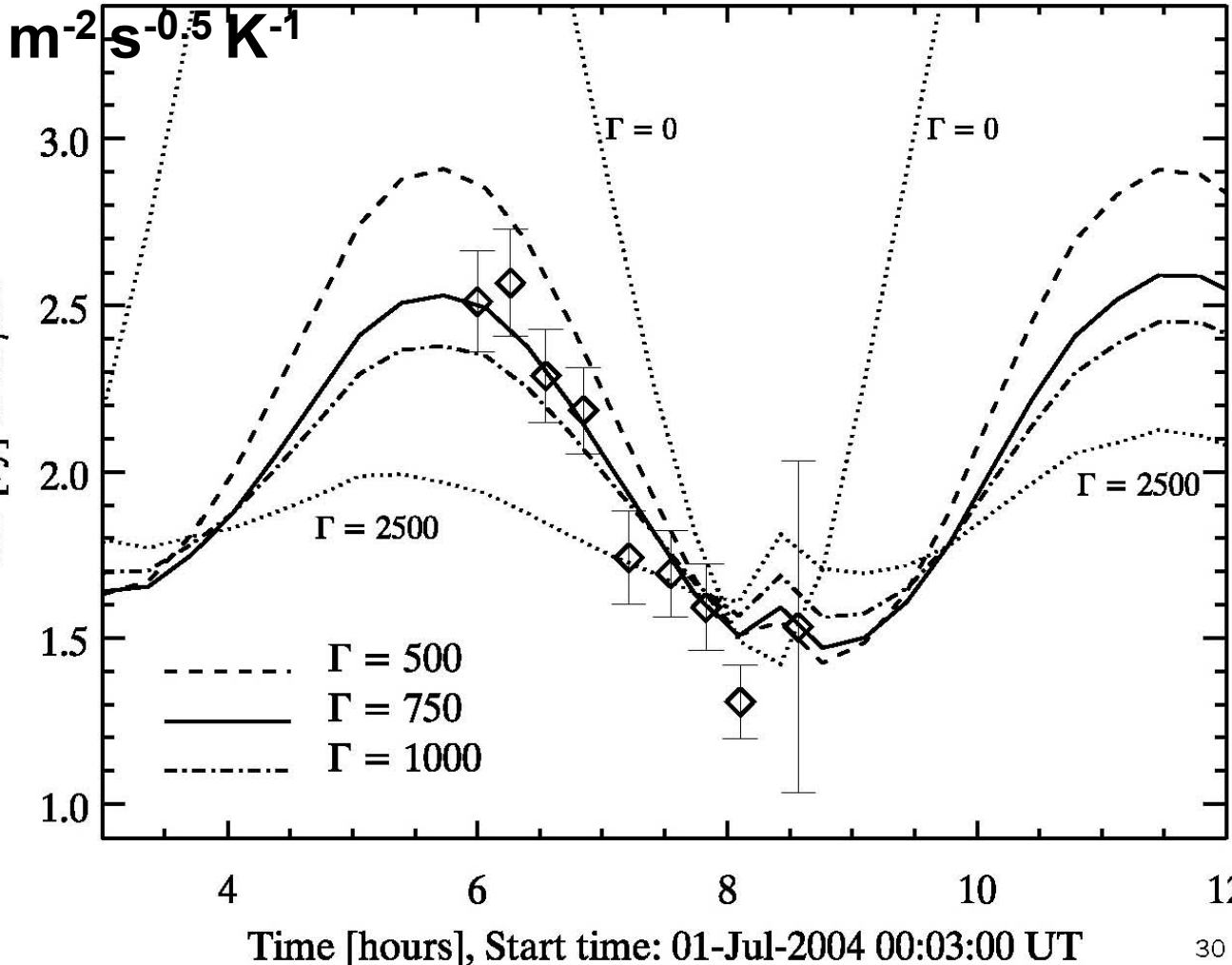


Mueller, Sekiguchi et al., A&A, 2005

熱慣性値($\Gamma = \sqrt{\kappa\rho c}$)の最適化フィッティング

熱慣性

$\Gamma = 750 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$



• レゴリス小惑星
 $\Gamma = 10-15$
(Mueller et al.1999)

• 月
 $\Gamma = 39$
(Keihm 1984)

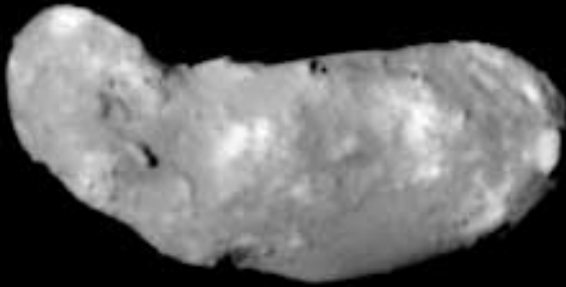
• Itokawa
 $\Gamma = 750$

$\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$

• 金属質
 $\Gamma = 10000$
(Mueller, Sekiguchi et al.2005)

Imaging by Hayabusa Spacecraft

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



JAXA / ISAS



Hayabusa: 540x270x210m

our study : 520x270x230m
(+/-50) (+/-30) (+/-20)

Mueller and Sekiguchi et al. (2005, A&A)

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

Hayabusa 探査機による直接測定

Lunar & Planetary Science Conference

2006年3月13-17日、ヒューストン

1. Itokawaの体積 $V=1.74 \times 10^7 \text{ m}^3$ (撮像結果)

→ 有効直径 $D=322 \text{ m}$

(Maruya et al., Gaskell et al., Demura et al.)

本研究: 有効直径= $0.32 \pm 0.03 \text{ km}$ (- 0.6%)

2. Itokawa の表層熱特性 (X線装置のラジエーターの測定)

→ 熱慣性の大きな角礫岩的な熱特性 (Okada et al.)

本研究: 小惑星レゴリスと金属質の中間の比較的岩石質の多い表面

∴ 探査機測定は本研究結果と一致することが確かめられた

Eros

Gaspra

Ida

Mathilde

50 km

<http://ssc>

小惑星: 直

Gaspra(1)

Ida(27.9)

Mathilde

Eros (10)

Itokawa

本研

Itokawa
状及び自

径

(28%+)

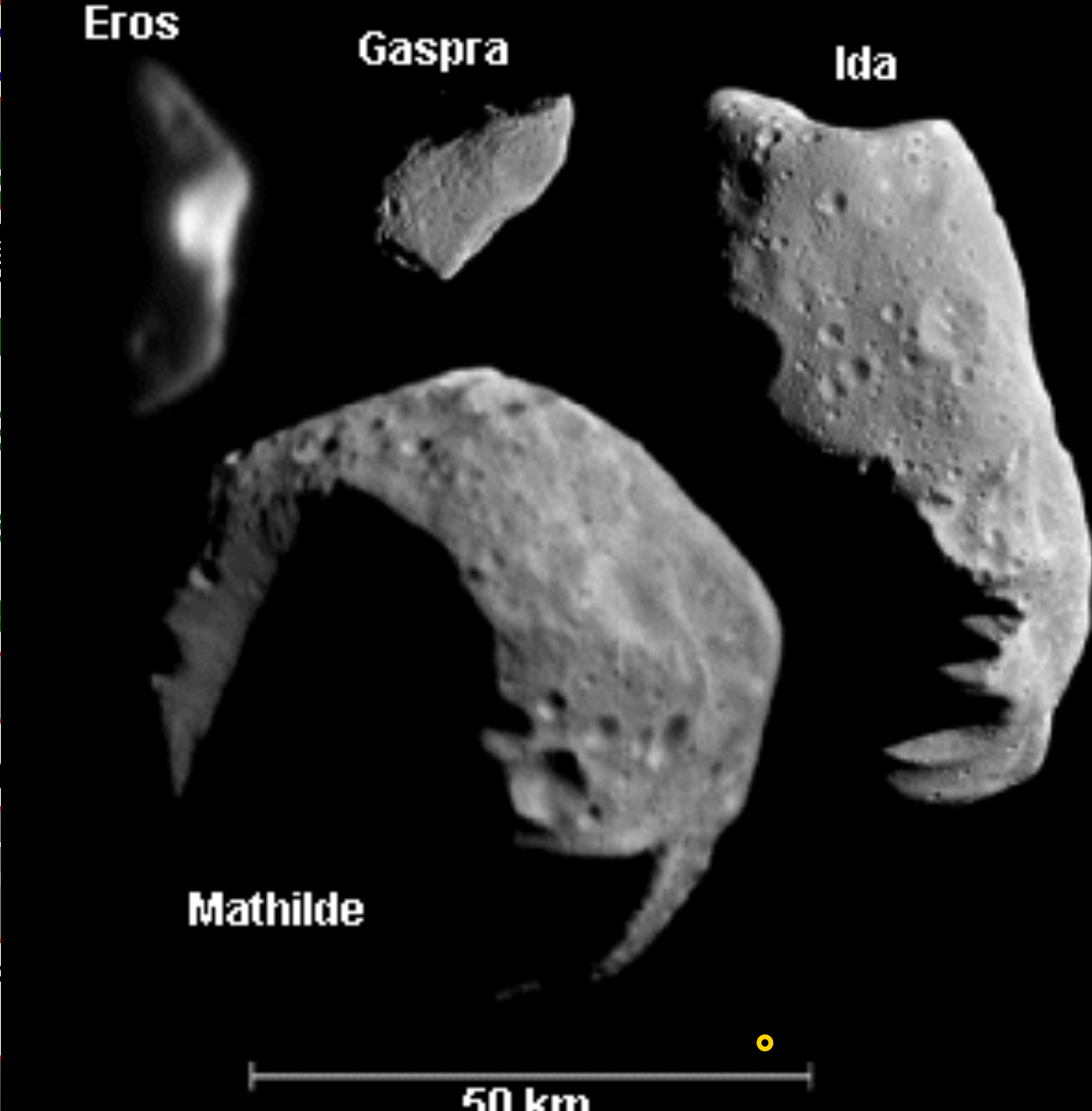
(16%+)

(5%+)

(40%+)

0.6%-)

測し、形



太陽系小天体の熱放射観測

*Thermal Infrared Observations of Minor Bodies
in the Outer Solar System.*

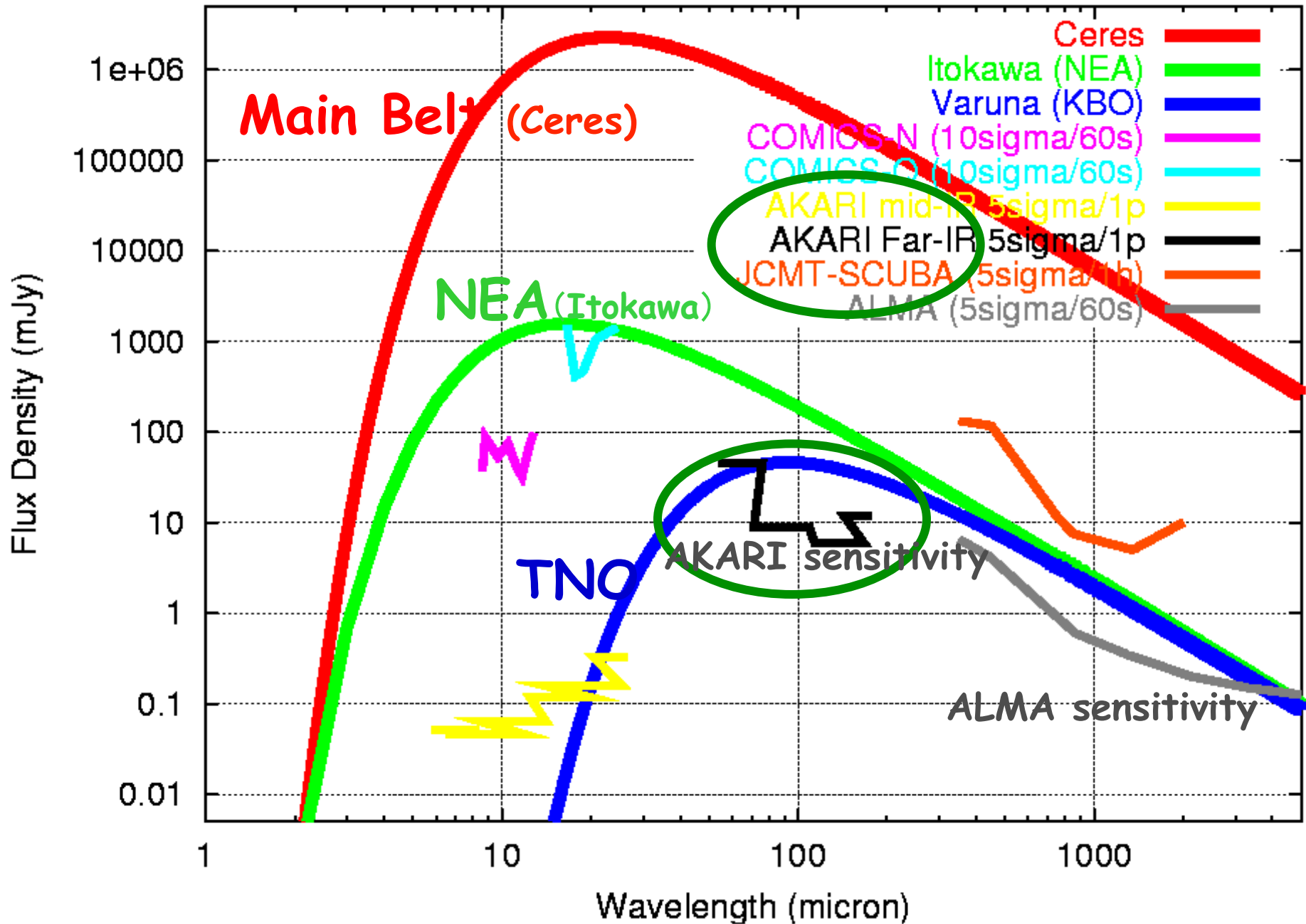
内容

関口 朋彦（北海道教育大学・旭川校）

- ◆ 関口のこれまでの仕事、今の仕事
- ◆ 準惑星エリスについて・冥王星より大きい？
- ◆ 太陽系小天体の大きさ測定
 - イトカワの中間赤外線熱放射の地上観測の例
- ◆ あかり衛星での遠赤外線測光観測
- ◆ あかり衛星での近赤外線分光観測

微惑星候補天体のサイズ測定→

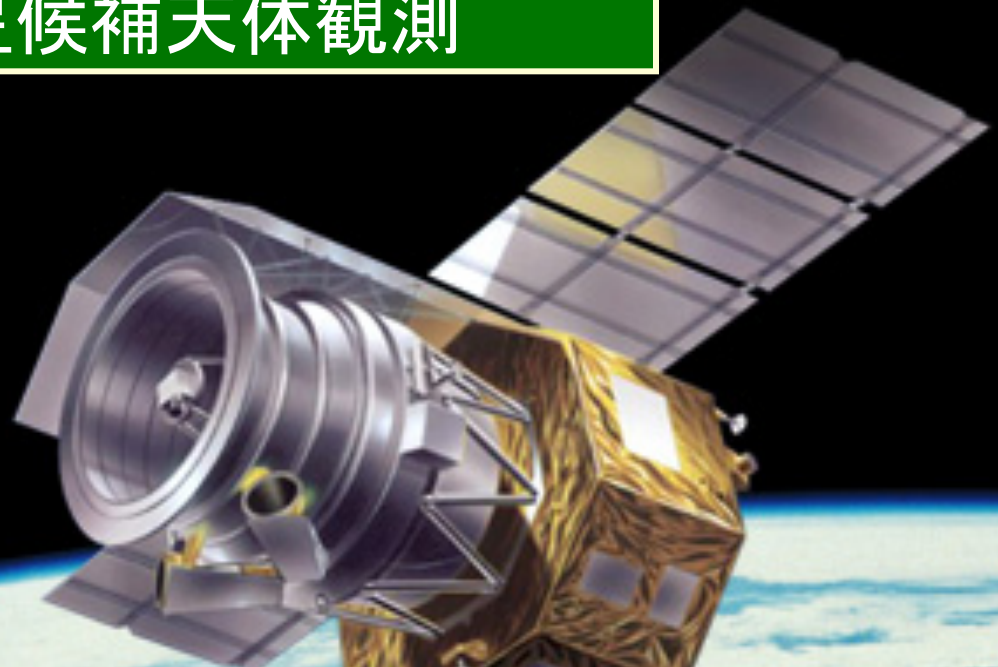
AKARI ALMA



あかりによる微惑星候補天体観測

関口 朋彦 (北海道教育大 旭川校)

AKARI | ASTRO-F



○ 遠赤外線測光観測 (90um帯)

2006年末—2007年: FIS (遠赤外線サーベイ観測装置)

16天体 (Eris含む)

➤ **ケンタウルス天体 (4天体)**, **遠方準惑星 (3天体)**, **散乱TNOs (2天体)**, **他のTNOs (7天体)**

○ 中間赤外線測光観測 (9um, 18um)

2007年: IRC (近・中間赤外線カメラ 観測装置)

➤ **ケンタウルス天体 (5天体)** Chiron, Asbolus, Thereus, Amycus, 2003 CO1 5天体

○ 近赤外線分光観測 (2.5—5um)

2007年1月15日: IRC (近・中間赤外線カメラ 観測装置)

➤ **特異小惑星 (不活動彗星核) (1天体)** P/2006 HR30 1天体

赤外線衛星：あかり (ASTRO-F) とスピッツァー (SST)

IRAS (Infrared Astronomy Satellite) 衛星
1983年にアメリカ、イギリス、オランダによって打ち上げ。世界初の赤外線天文衛星。
赤外線全天マップ・彗星の発見・小惑星のサイズアルベドカタログを作成



掃天(サーベイ)型 (→ 現代版IRAS衛星)

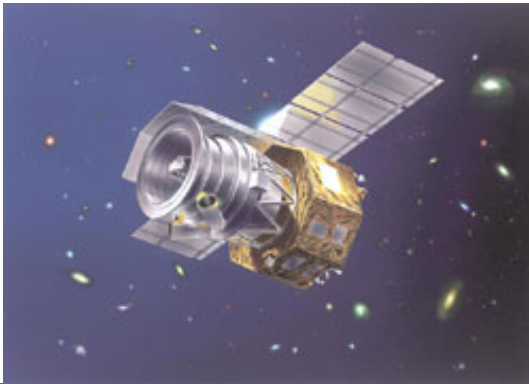
あかり (ISAS/JAXA)

打ち上げ: 2006年2月22日 MV-8

口径70cm

近-中間赤外: 1.8~26um

遠赤外: 63um, 80um, 149um, 161um



時期的にも感度的にもちょっと不利

最近はWISE衛星

天文台型(ポインティング)

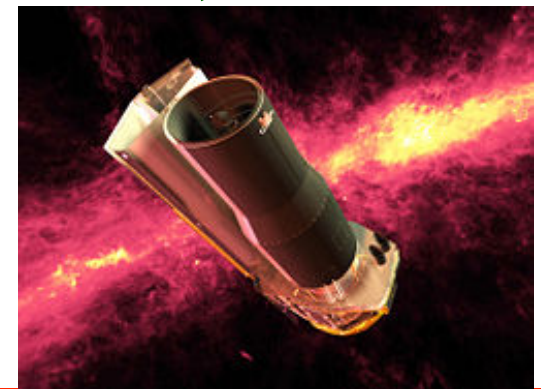
Spitzer S. Tel. (NASA)

打ち上げ: 2003年 8月25日

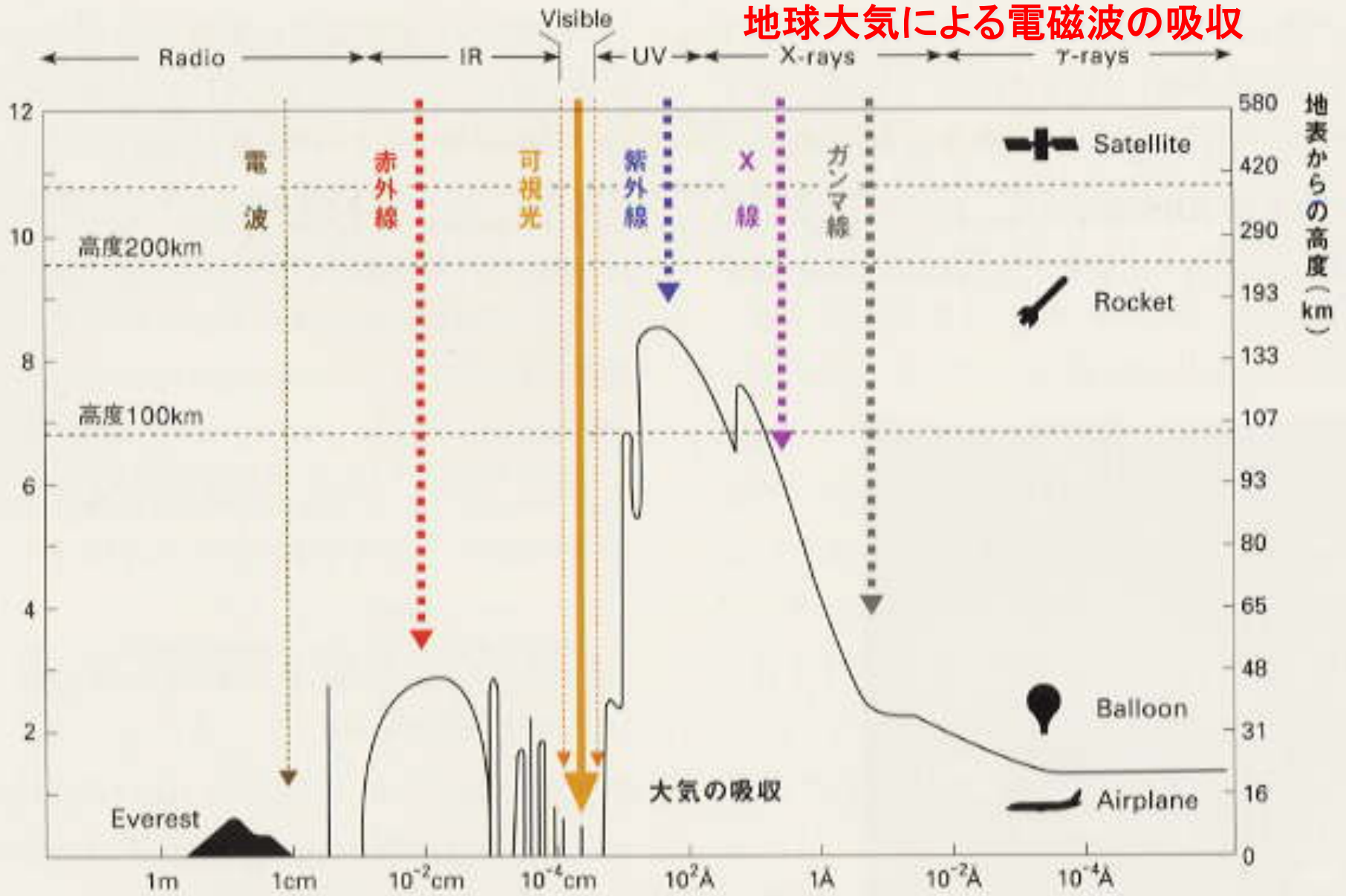
口径85cm

近-中間赤外: 3.8~24um

遠赤外: 70um, 160um



地球大気による電磁波の吸収

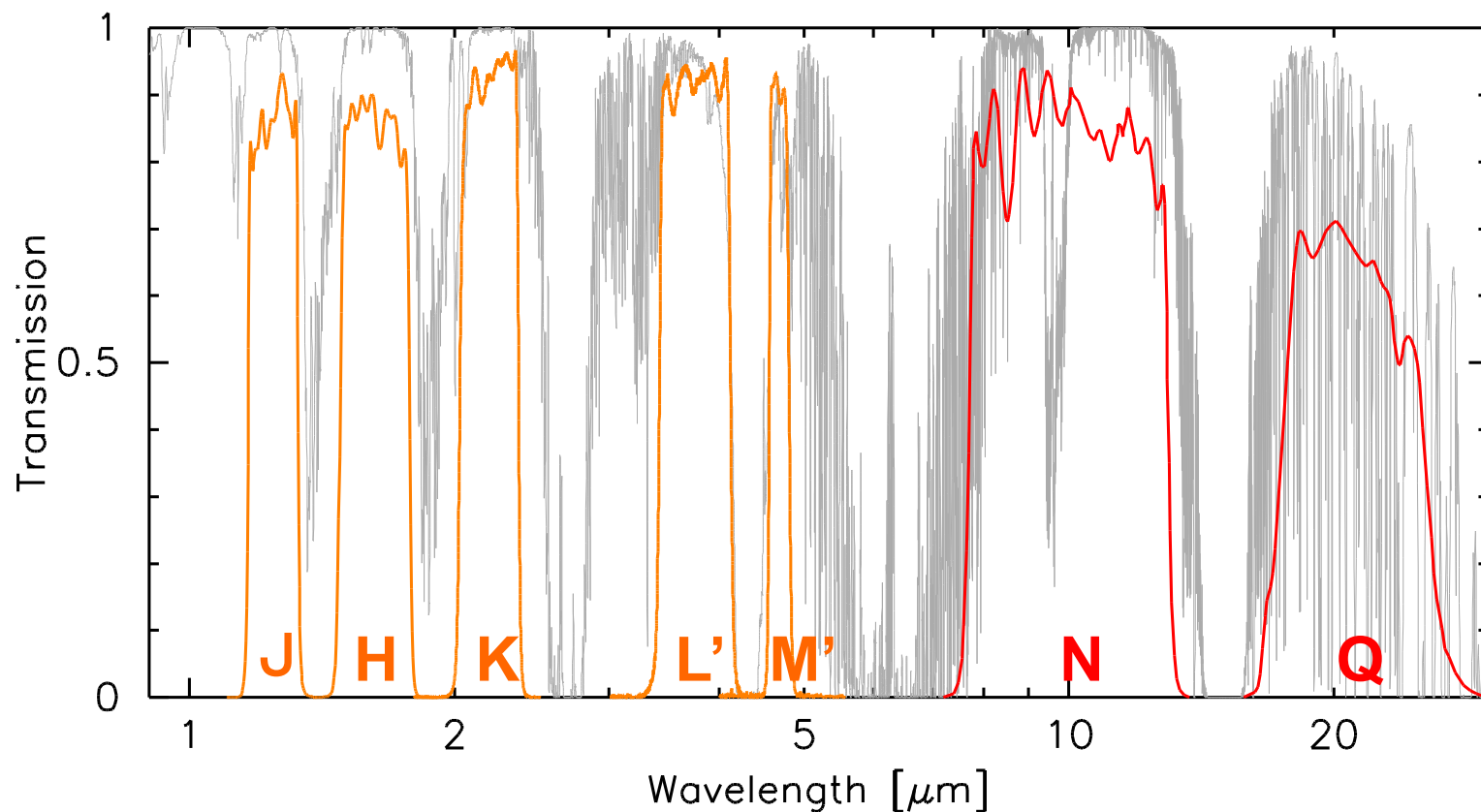


長い・冷たい

波長

短い・熱い

地上からは大気の窓でしか観測できない



ハワイ・マウナケア山頂の大気透過率

赤外線天文衛星

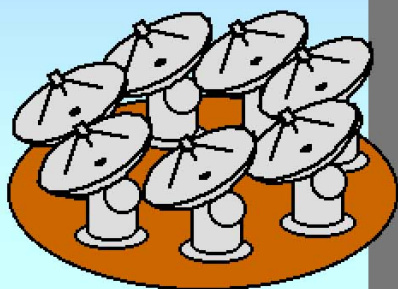
X線天文衛星

地上から観測できない波長域

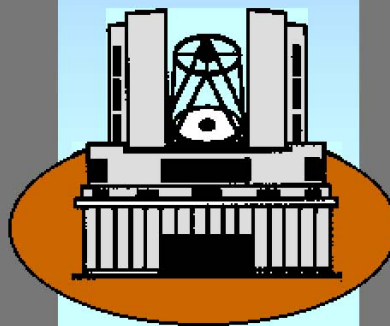
赤外線
大気吸収

紫外線～X線～ γ 線
大気による吸収
地上からは見えない

ALMA



すばる望遠鏡



1cm 1mm 0.1mm 10 μ m 1 μ m 100nm 10nm 1nm 0.1nm

センチ波 ミリ波 サブミリ波

赤外線 可視光 紫外線

X線

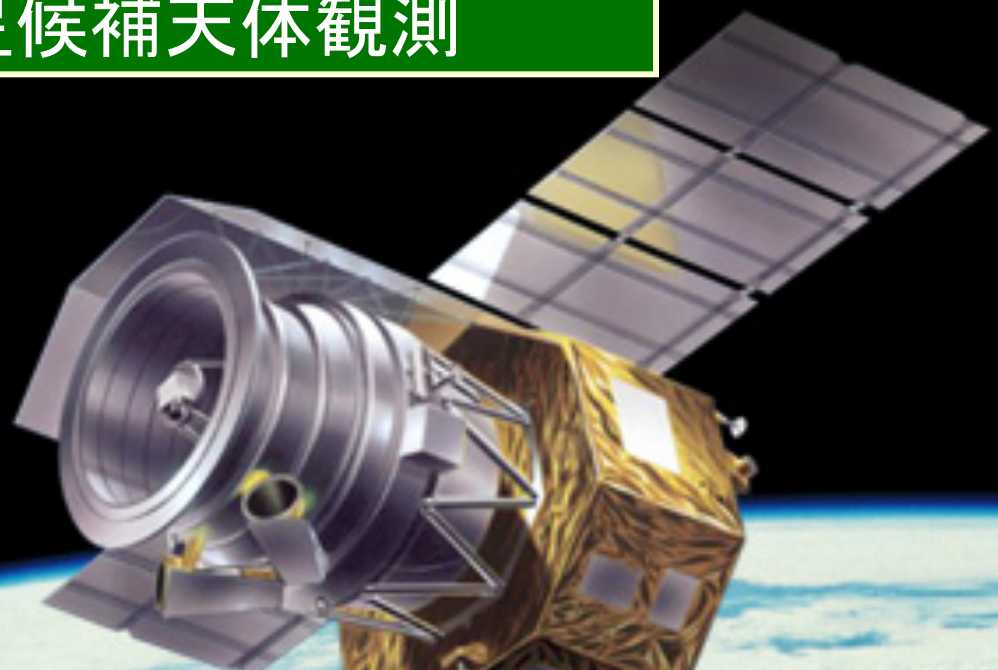
電磁波の波長 λ



あかりによる微惑星候補天体観測

関口 朋彦 (北海道教育大 旭川校)

AKARI | ASTRO-F



○ 遠赤外線測光観測 (90um帯)

2006年末—2007年: FIS (遠赤外線サーベイ観測装置)

16天体 (Eris含む)

➤ ケンタウルス天体 (4天体), 遠方準惑星 (3天体), 散乱TNOs (2天体), 他のTNOs (7天体)

○ 中間赤外線測光観測 (9um, 18um)

2007年: IRC (近・中間赤外線カメラ 観測装置)

➤ ケンタウルス天体 (5天体) Chiron, Asbolus, Thereus, Amycus, 2003 CO1 5天体

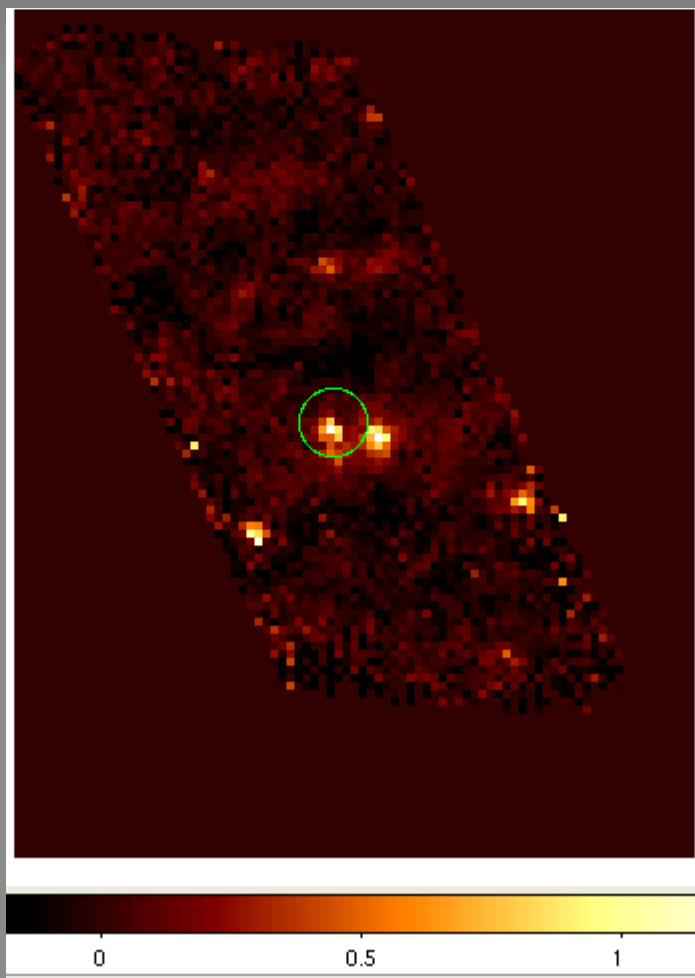
○ 近赤外線分光観測 (2.5—5um)

2007年1月15日: IRC (近・中間赤外線カメラ 観測装置)

➤ 特異小惑星 (不活動彗星核) (1天体) P/2006 HR30 1天体

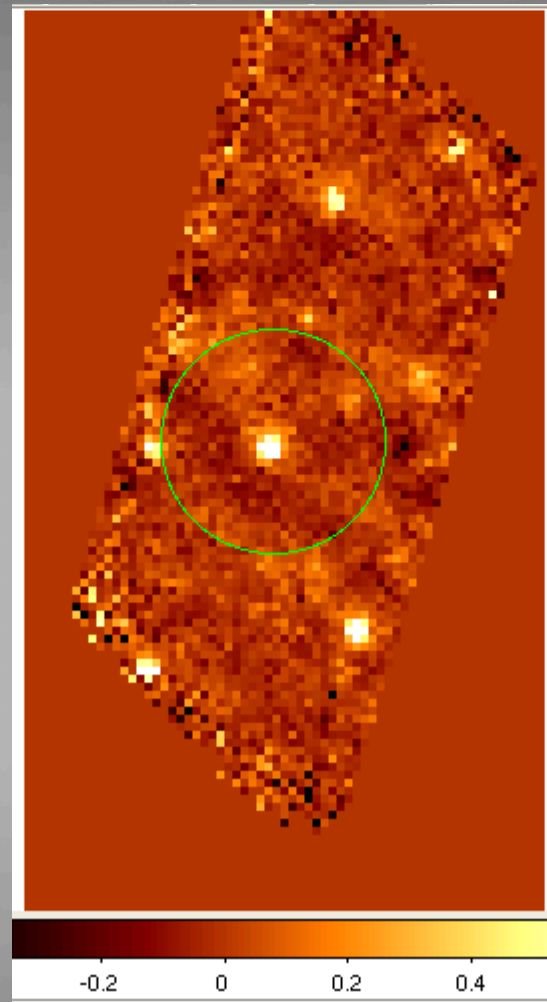
ケンタウルス天体の測光: サイズとアルベド

~20分角



Chariklo

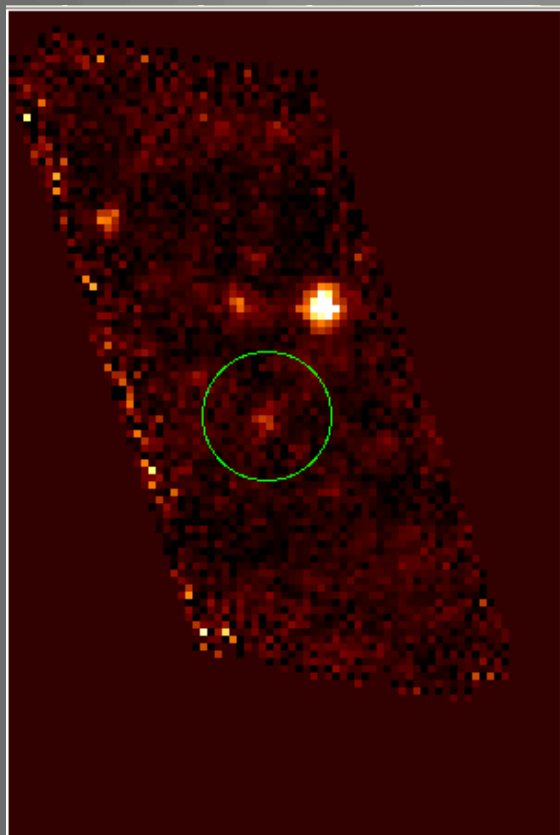
有効直径: 219 (+30-34)km
アルベド: 0.08 (+0.03-0.02)



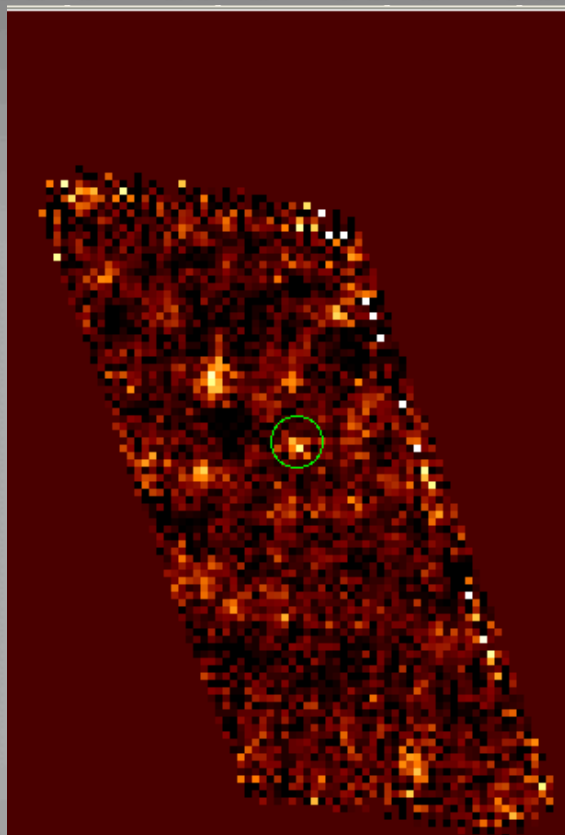
Chiron

有効直径: 250 (+34, -39)km
アルベド: 0.07 (± 0.02)

カイパーベルト天体のサイズとアルベド



2007年1月27日



2007年7月27日

Huya (2000 EB173)

$a=39.7\text{AU}$

$e=0.28$

$i=15.46^\circ$

直径:

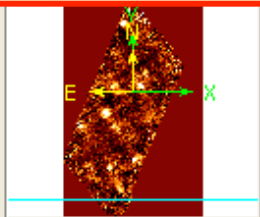
$D=384\text{km}$ (+98 -134)

幾何学アルベド:

$p_v=0.10$ (+0.13 -0.04)

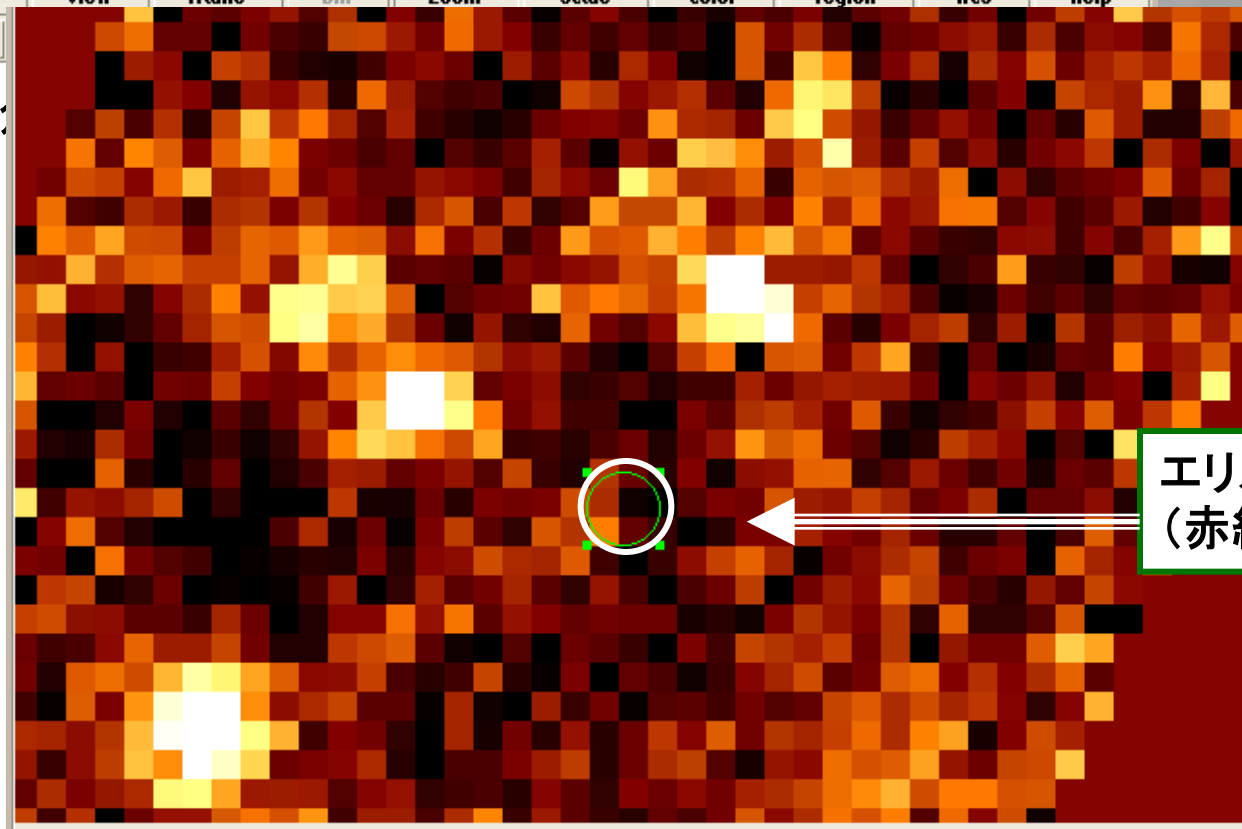
Erisの撮像スキャン結果(波長: 85 μ m)

File
Object
Value
WCS
Physical X Y
Image X Y
Frame1 Zoom 4.000 Angle 0.000



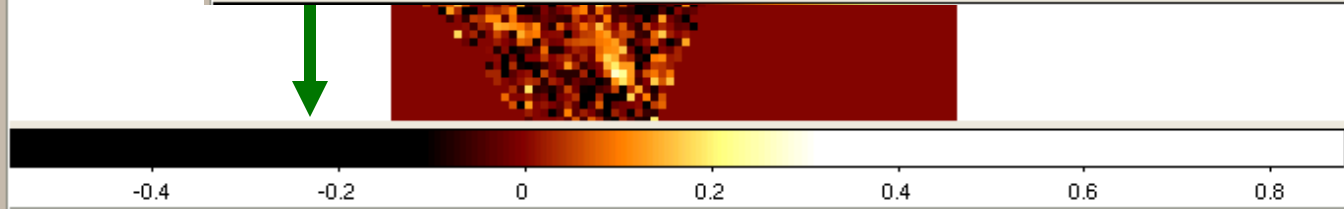
file edit view frame bin zoom scale color region wcs help
center align

15秒

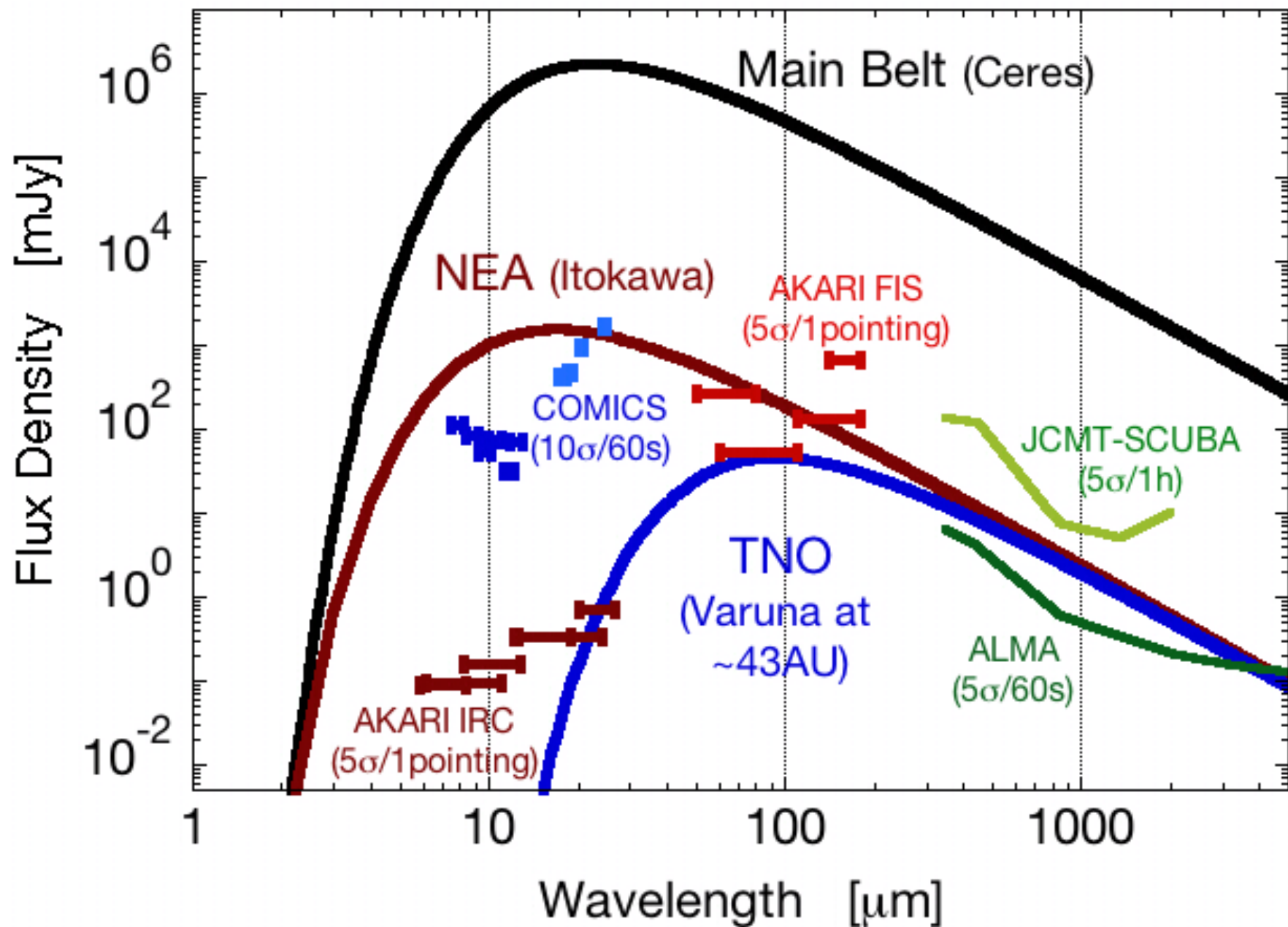


~5分角

エリスの位置
(赤経・赤緯座標)

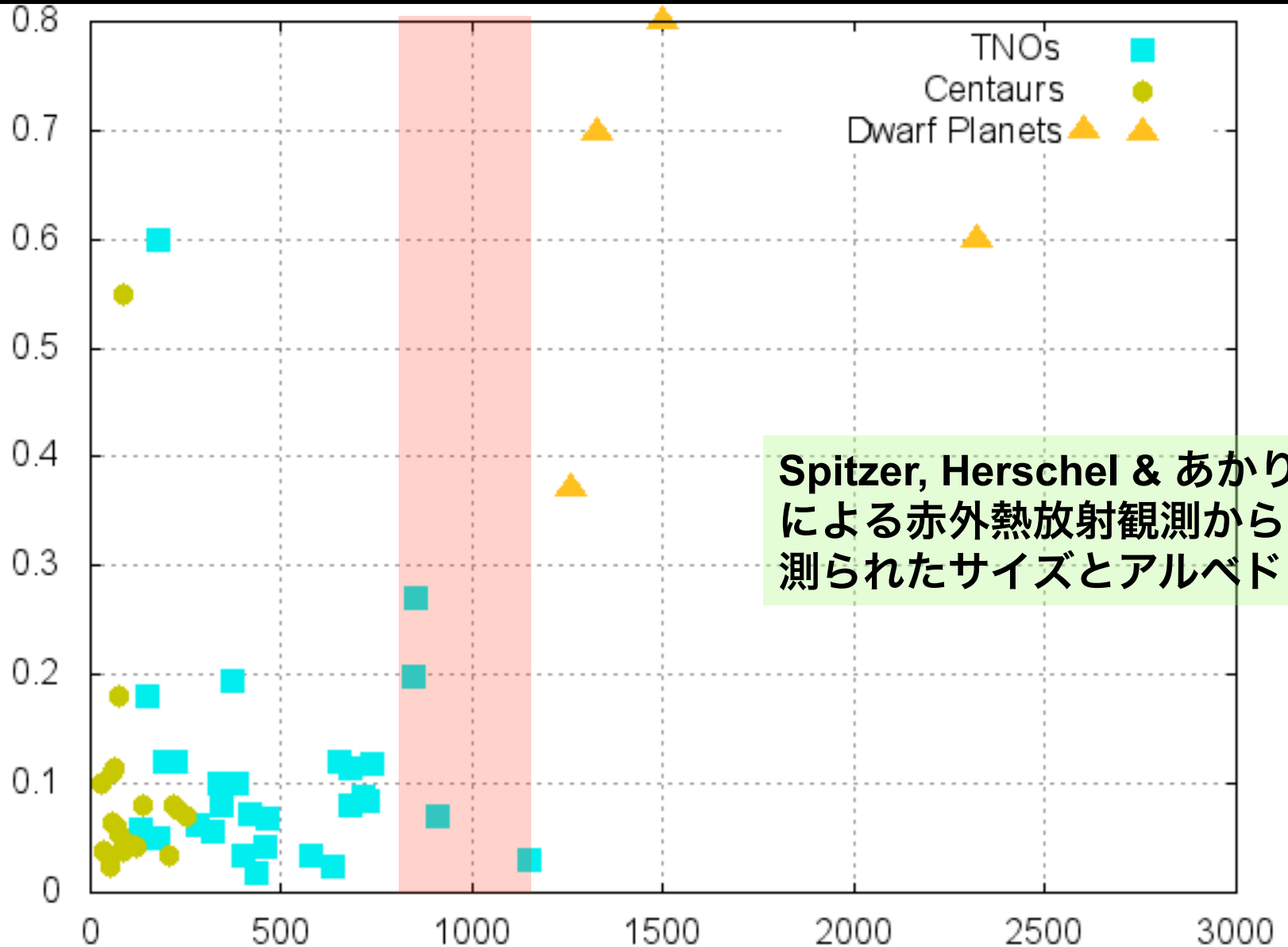


Why AKARI-FIS?....TNO low temperature



外縁天体の大きさとアルベド

ジオメトリック アルベド

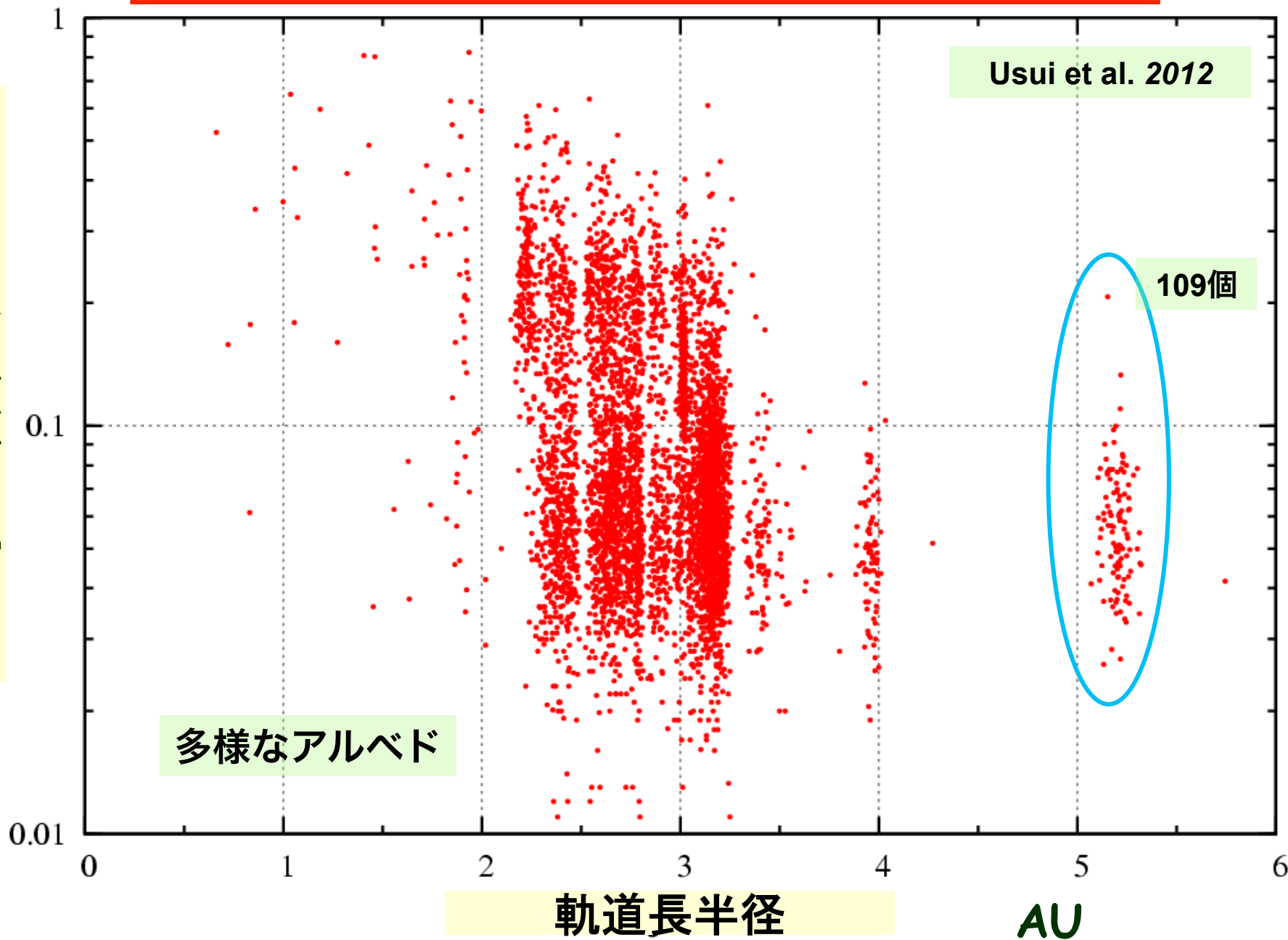


Spitzer, Herschel & あかり
による赤外熱放射観測から
測られたサイズとアルベド

直径 (km)

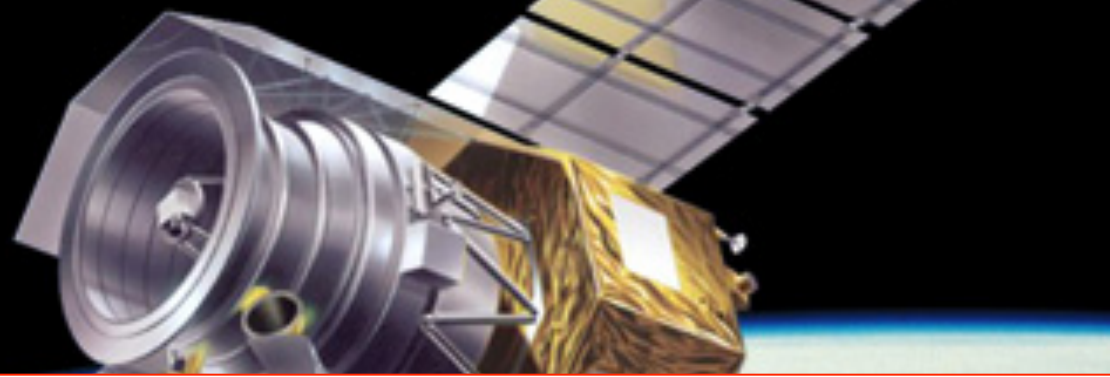
小惑星の軌道長半径とアルベド

ジオメトリック アルベド



あかりによる太陽系外縁天体と特異小惑星の 中間—遠赤外線測光観測

AKARI | ASTRO-F



・研究のまとめ

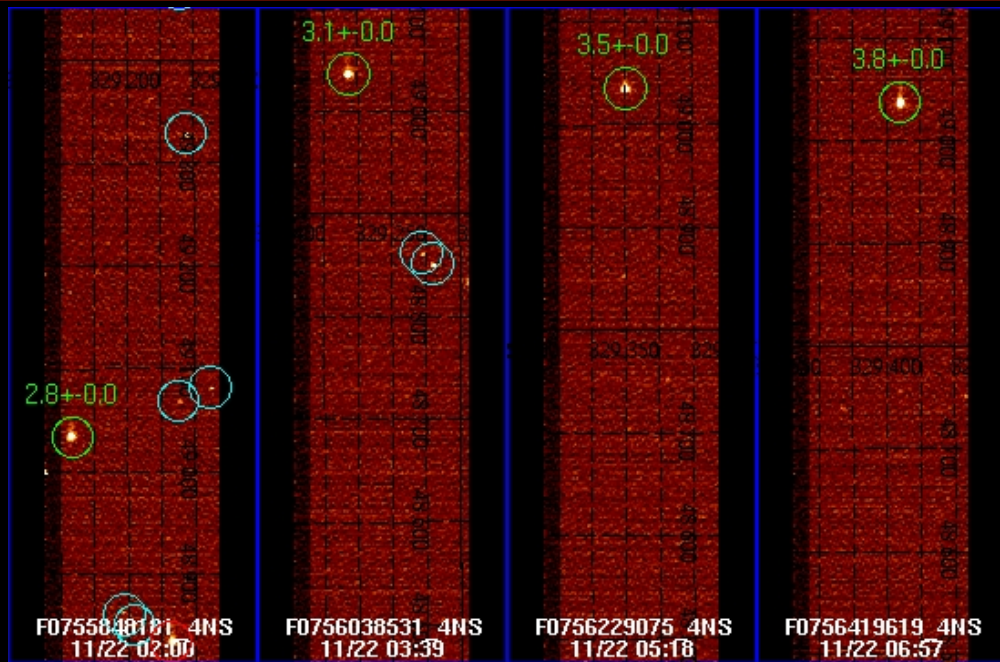
あかりによる外縁天体の遠赤外線・中間赤外線測光を行った。
測光観測から大きさとアルベドを求めた。

大きな遠方天体は高アルベドの傾向がありそうである。

今後は

分光観測(2.5—5 μm)の解析と**サーベイデータ**(10 μm)の解析へ

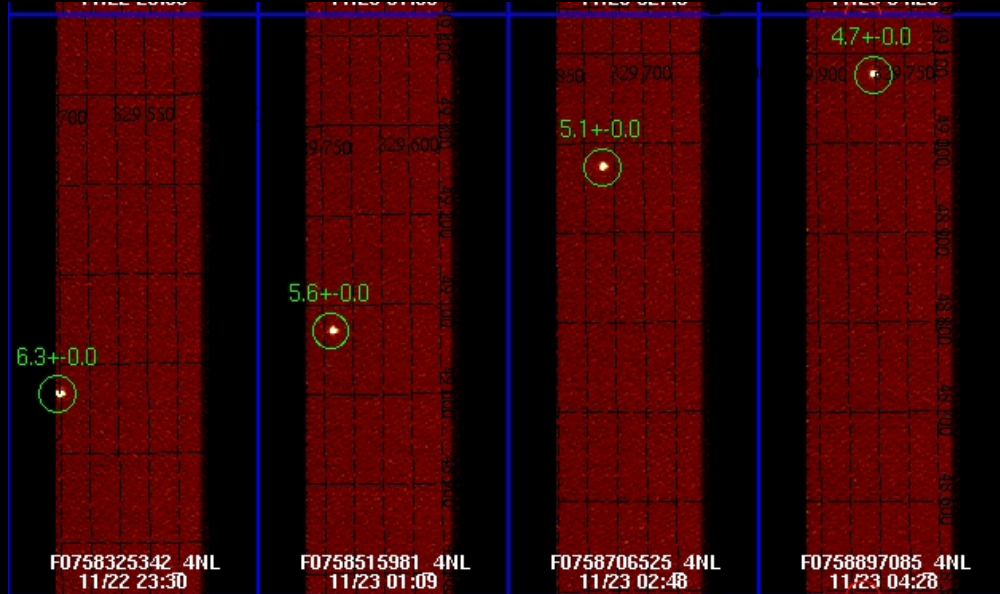
あかりの中間赤外線の全天サーベイデータ



IRCサーベイ

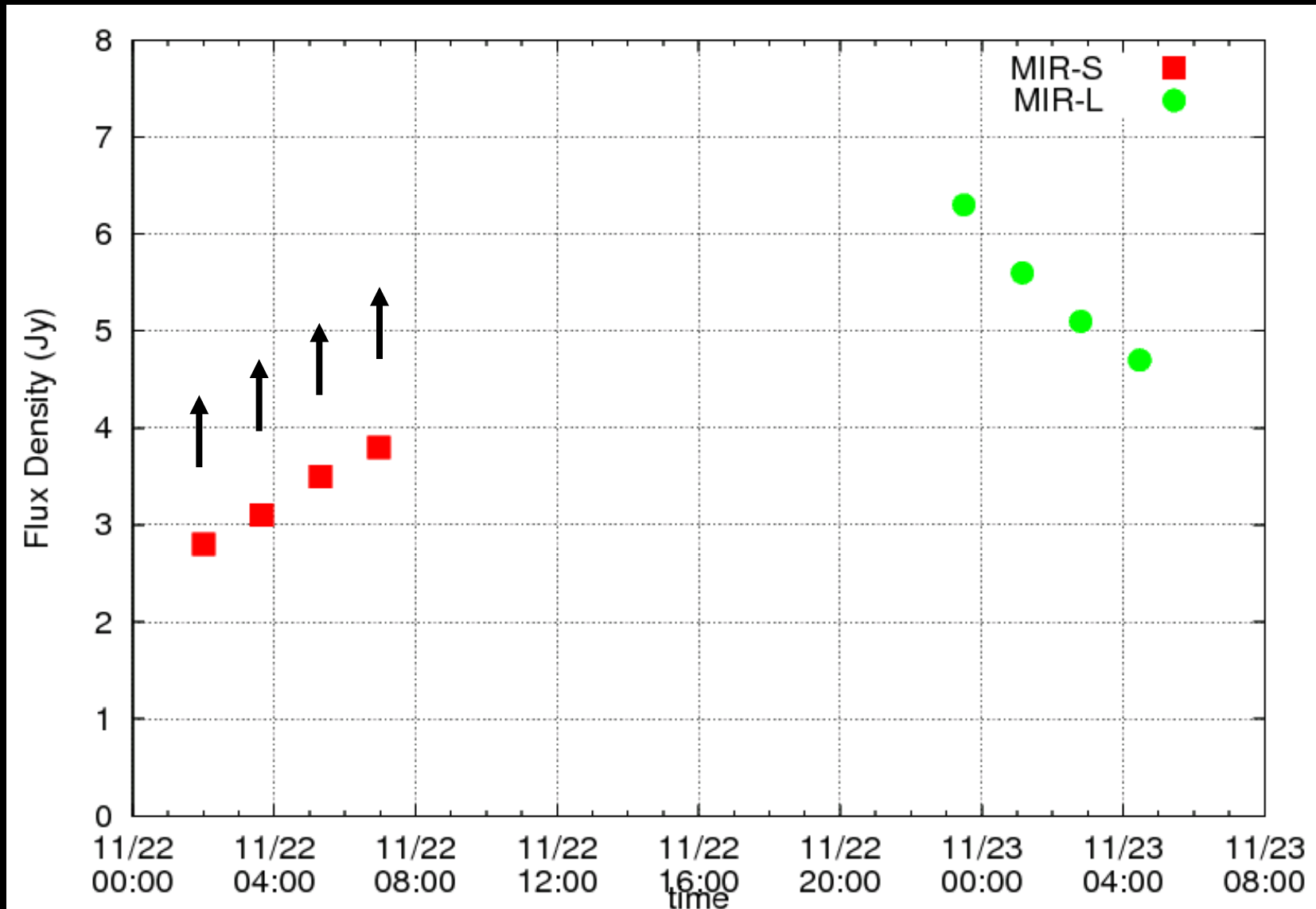
裸の彗星核天体
(内側で比較的高温)
の検出例

9 μm (MIR-S)
中間赤外短波長



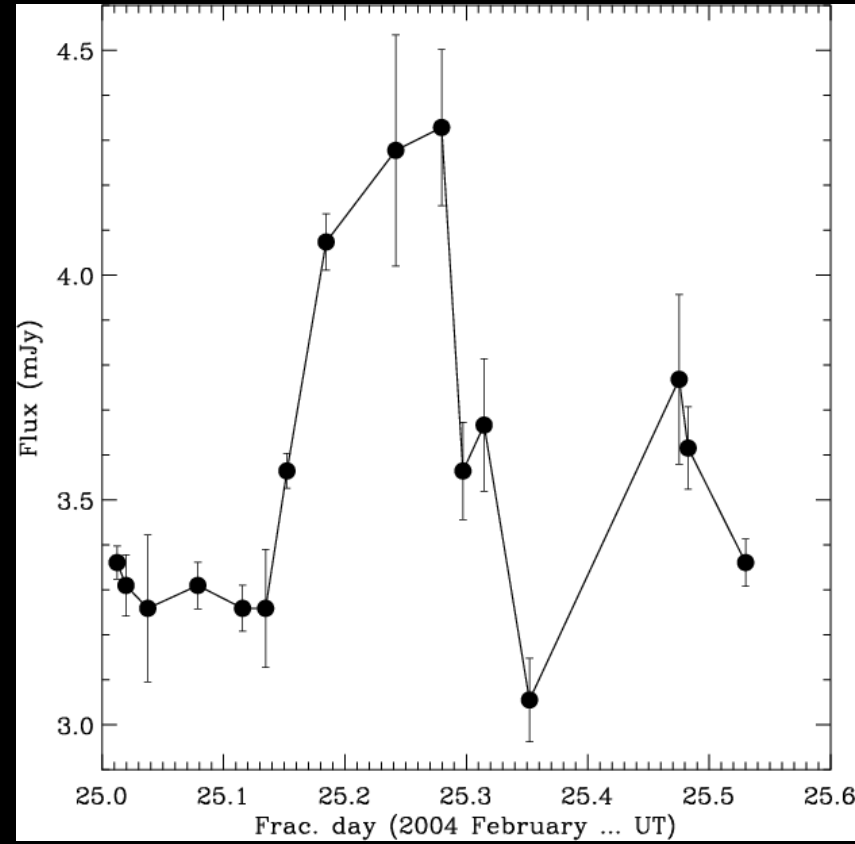
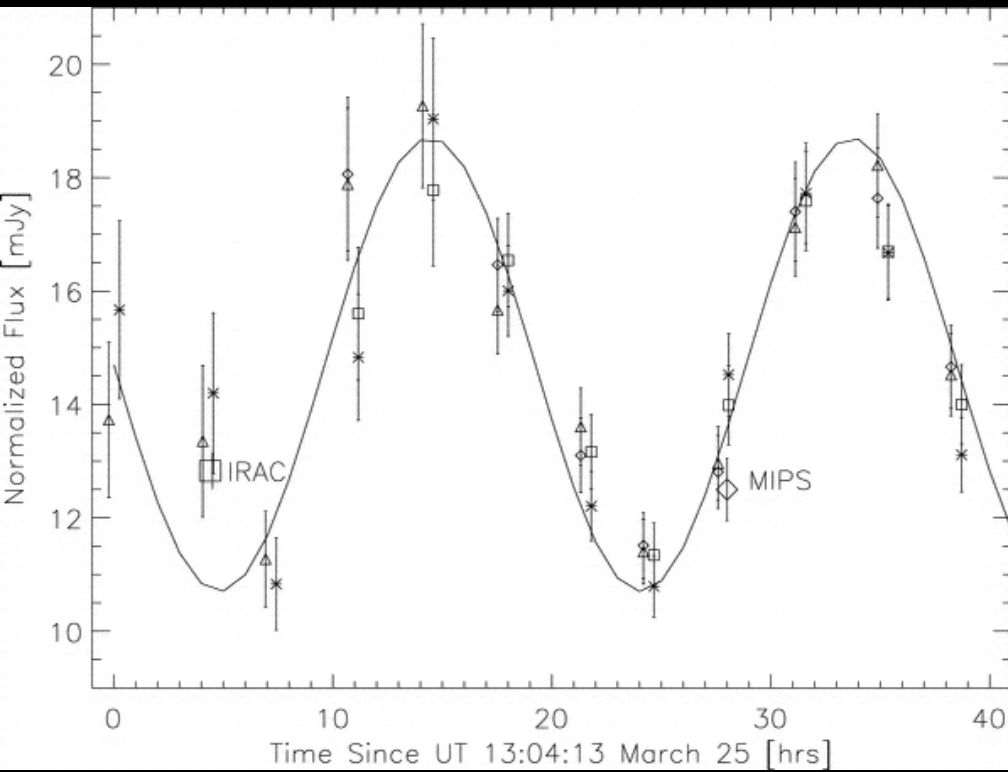
18 μm (MIR-L)
中間赤外長波長

裸の彗星核 (P/2006 HR30): 熱放射ライトカーブ



The Third result of thermal lightcurve for cometary nucleus
1) Deep Impact spacecraft, 2) Spitzer-S.T.

裸の彗星核の熱放射ライトカーブ： 2例のみ

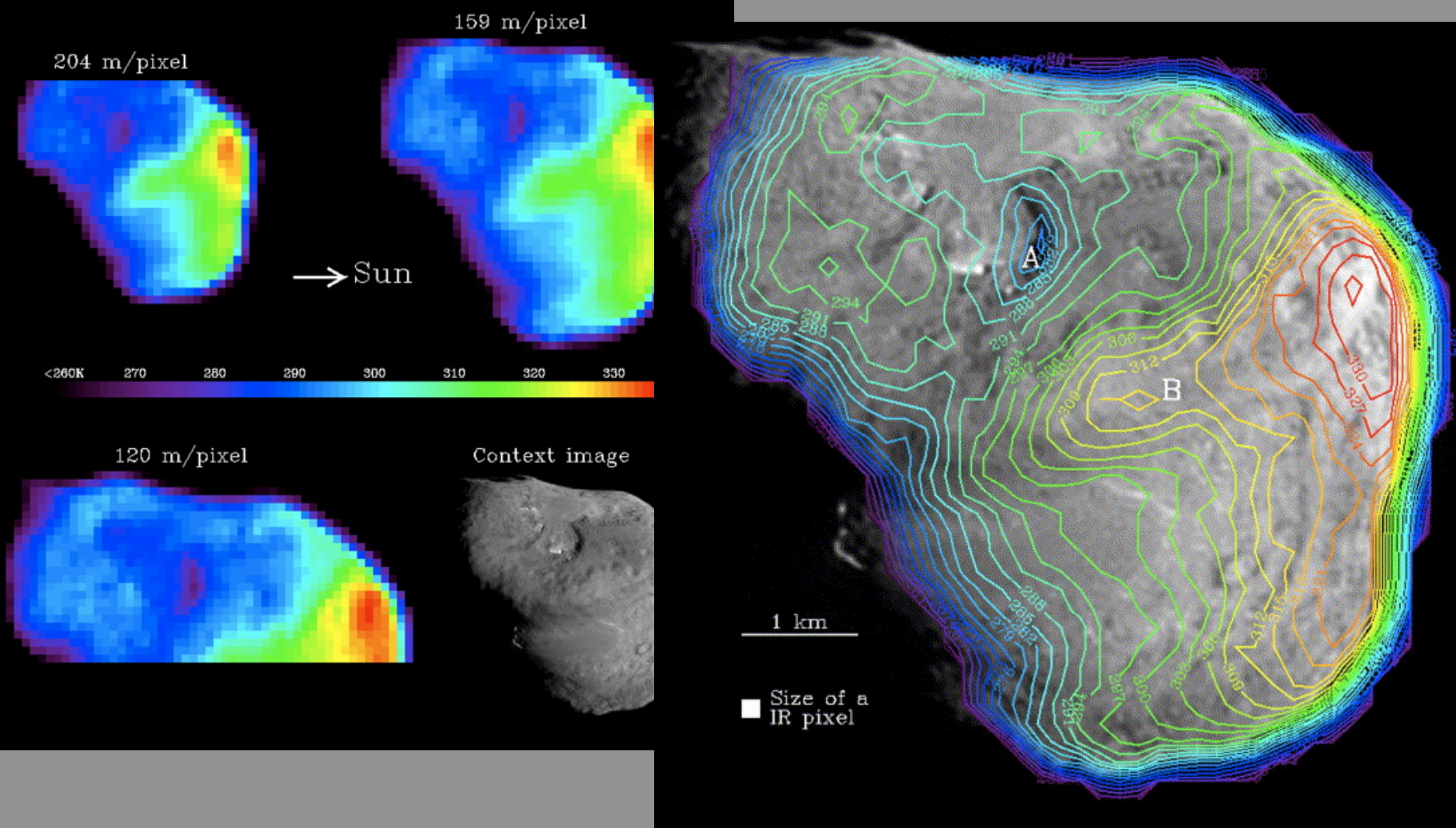


Rotationally Resolved 8 35 Micron *Spitzer* Space Telescope Observations of the Nucleus of Comet 9P/Tempel 1
Lisse et al. (2005)

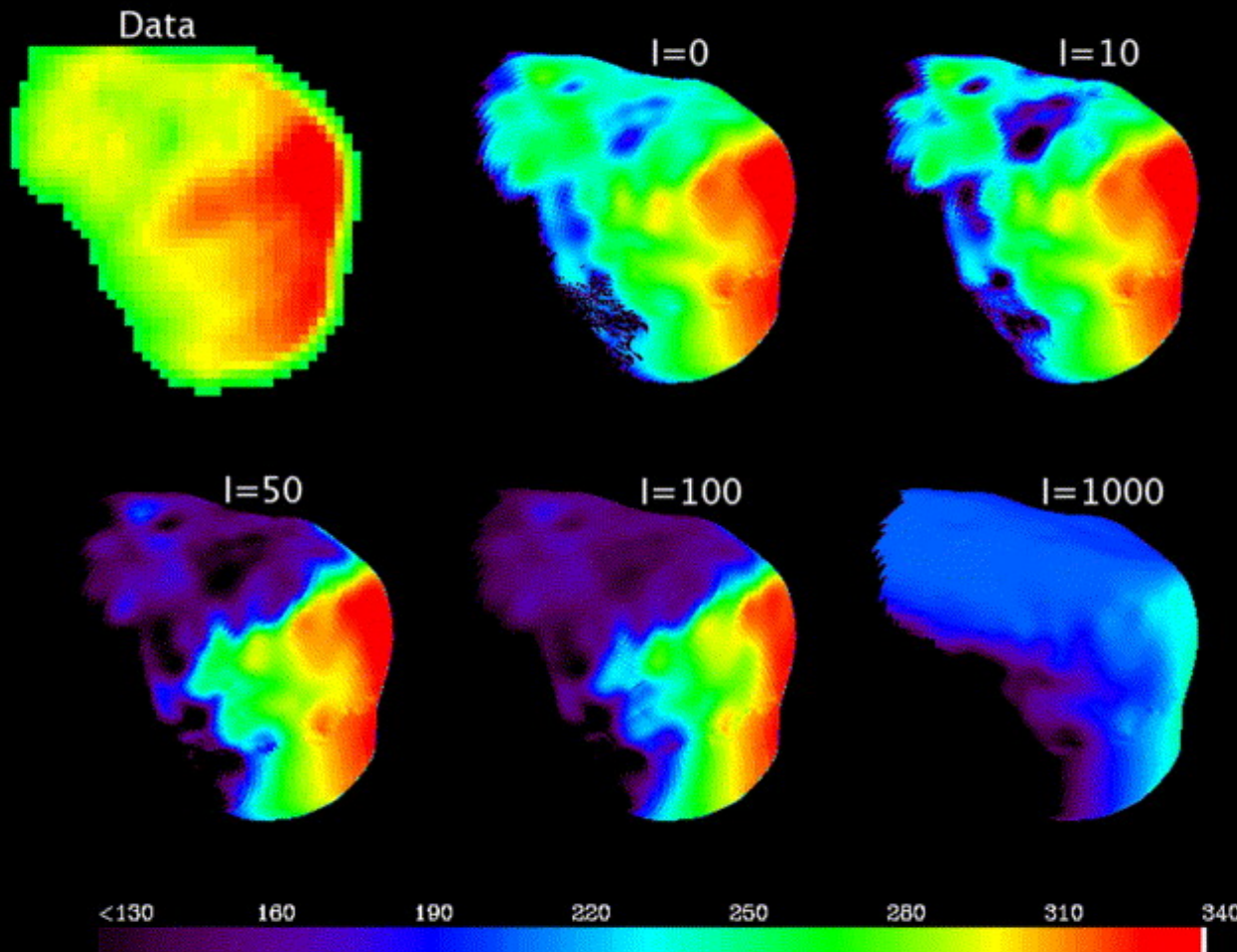
Spitzer Space Telescope observations of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko
Lamy et al. (2008)

Spitzer 宇宙望遠鏡による二例のみ

彗星核の温度マッピング： 探査機 Deep impact



熱慣性値 ($\Gamma = \sqrt{\kappa\rho c_p}$) の導出



• レゴリス小惑星
 $\Gamma = 10-15$
(Mueller et al. 1999)

• 月
 $\Gamma = 39$
(Keihm 1984)

• Itokawa
 $\Gamma = 750$
(Mueller, Sekiguchi et al. 2005)

• 金属質
 $\Gamma = 10000$
(Mueller et al. 2005)

熱慣性 : $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-0.5} \text{K}^{-1}$

Tempel 彗星の彗星核の熱慣性値
→ $0 \sim 10 [\text{J m}^{-2} \text{s}^{-0.5} \text{K}^{-1}]$
Groussin et al. 2007

Deep Impact探査機

人類の偉大なる一歩から読み取る月のレゴリス

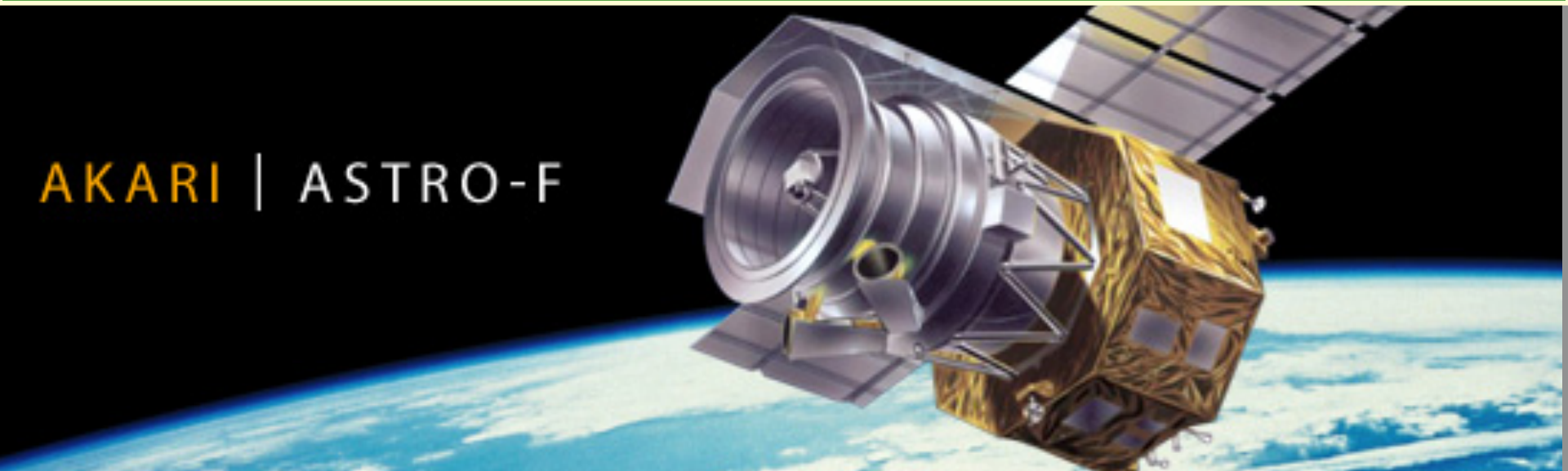


"That's one small step for a man, one giant leap for mankind."
Neil Alden Armstrong

- 表面の土砂の空隙率や砂利の粒径を推定
はやぶさ2のTIR (Thermal InfraRed Imager)
を念頭としたサイエンスへ

あかりによる特異小惑星(?)／彗星核(?)の 近赤外線観測

AKARI | ASTRO-F

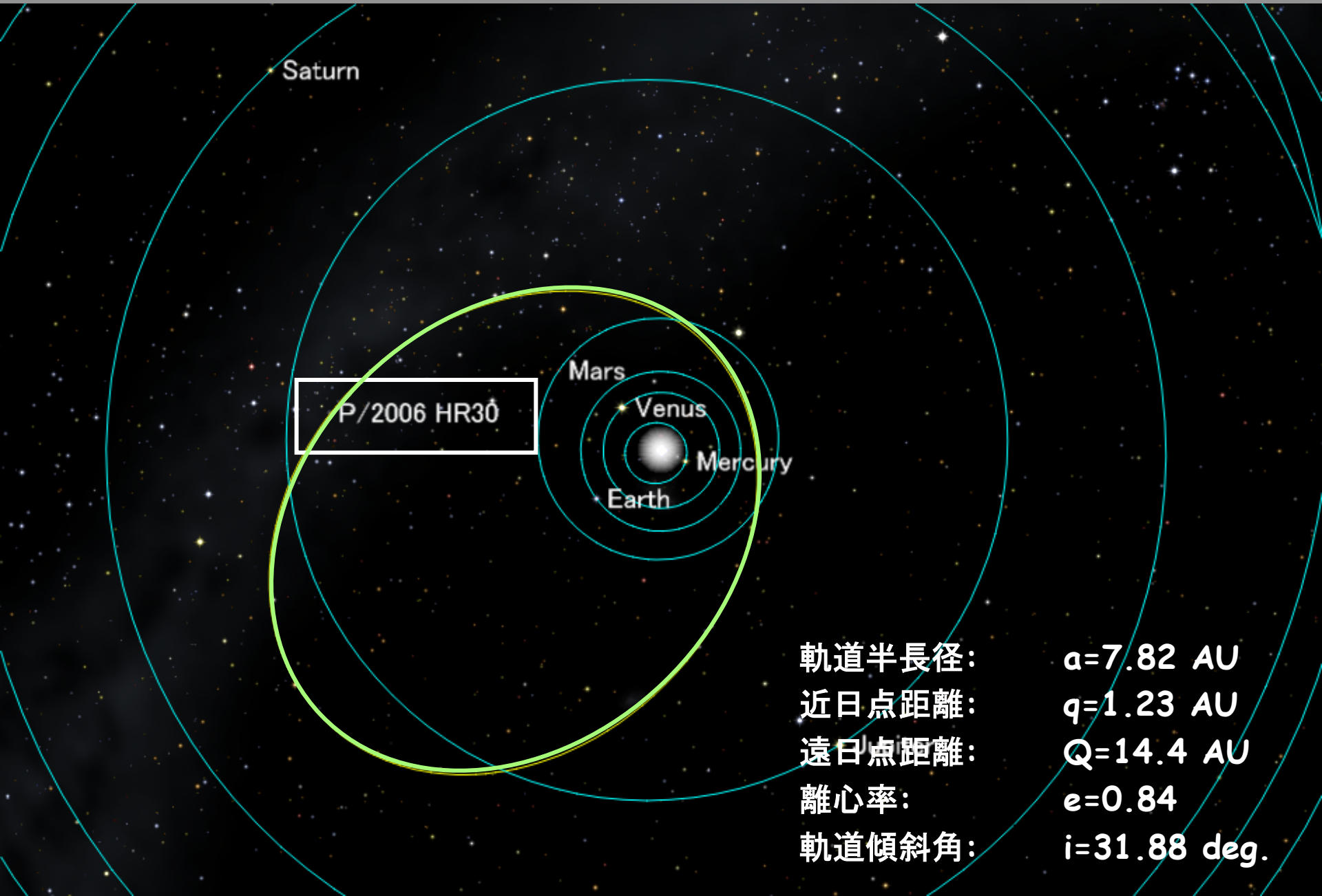
The image shows the AKARI satellite in space, with the Earth's horizon visible in the background. The satellite is a gold-colored cube with various instruments and a large lens-like structure protruding from one side. The text 'AKARI | ASTRO-F' is overlaid on the left side of the image.

• ちょっと手をつけかけていた私の興味

オールトから落っこちてきたかもしれない岩石天体

特異小惑星/コマなしの彗星核:

P/2006 HR30

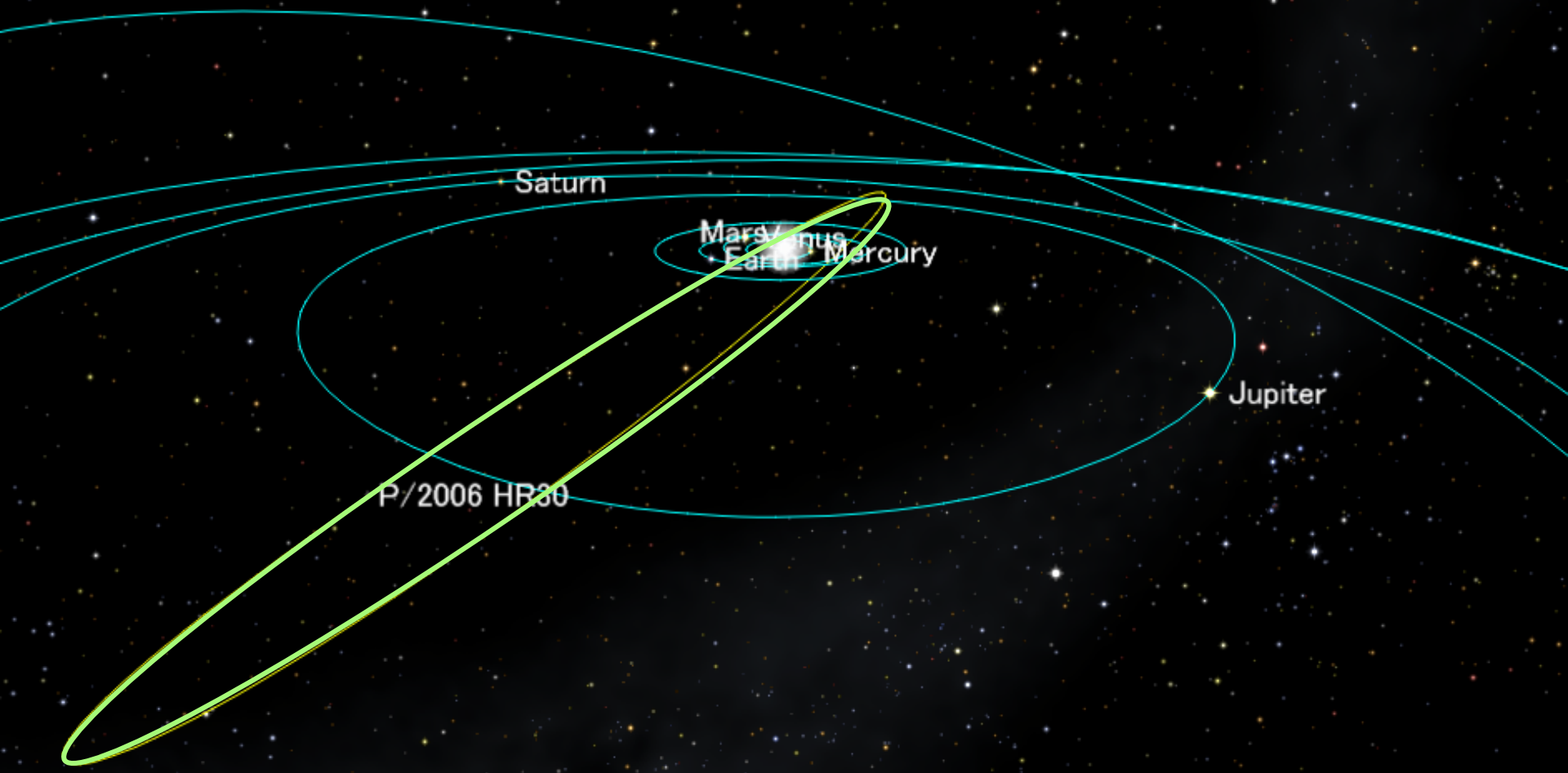


軌道半長径: $a=7.82$ AU
近日点距離: $q=1.23$ AU
遠日点距離: $Q=14.4$ AU
離心率: $e=0.84$
軌道傾斜角: $i=31.88$ deg.

裸の彗星核:

P/2006 HR30

軌道半長径:	$a=7.82$ AU (木星-土星)
近日点距離:	$q=1.23$ AU (地球-火星)
遠日点距離:	$Q=14.4$ AU (土星-天王星)
離心率:	$e=0.84$
軌道傾斜角:	$i=31.88$ deg.



特異小惑星/コマなしの彗星核:

P/2006 HR30

もともと**特異小惑星**として発見・登録される

Saturn

その後のモニター観測で**一時期だけ彗星活動**が認められる

その後、ずっと**コマや尾を持たない小惑星状**として観測される

→ 大部分の期間は小惑星として観測される彗星登録天体

→ **裸の彗星核天体**

コマに隠されて見ることのできない「**彗星核**」を直接観測できる

← **普通の彗星では無理**

P/2006 HR30

軌道半長径: $a=7.82$ AU

近日点距離: $q=1.23$ AU

遠日点距離: $Q=14.4$ AU

離心率: $e=0.84$

軌道傾斜角: $i=31.88$ deg.

新たな小惑星グループ

Jewitt (AJ, 2005)

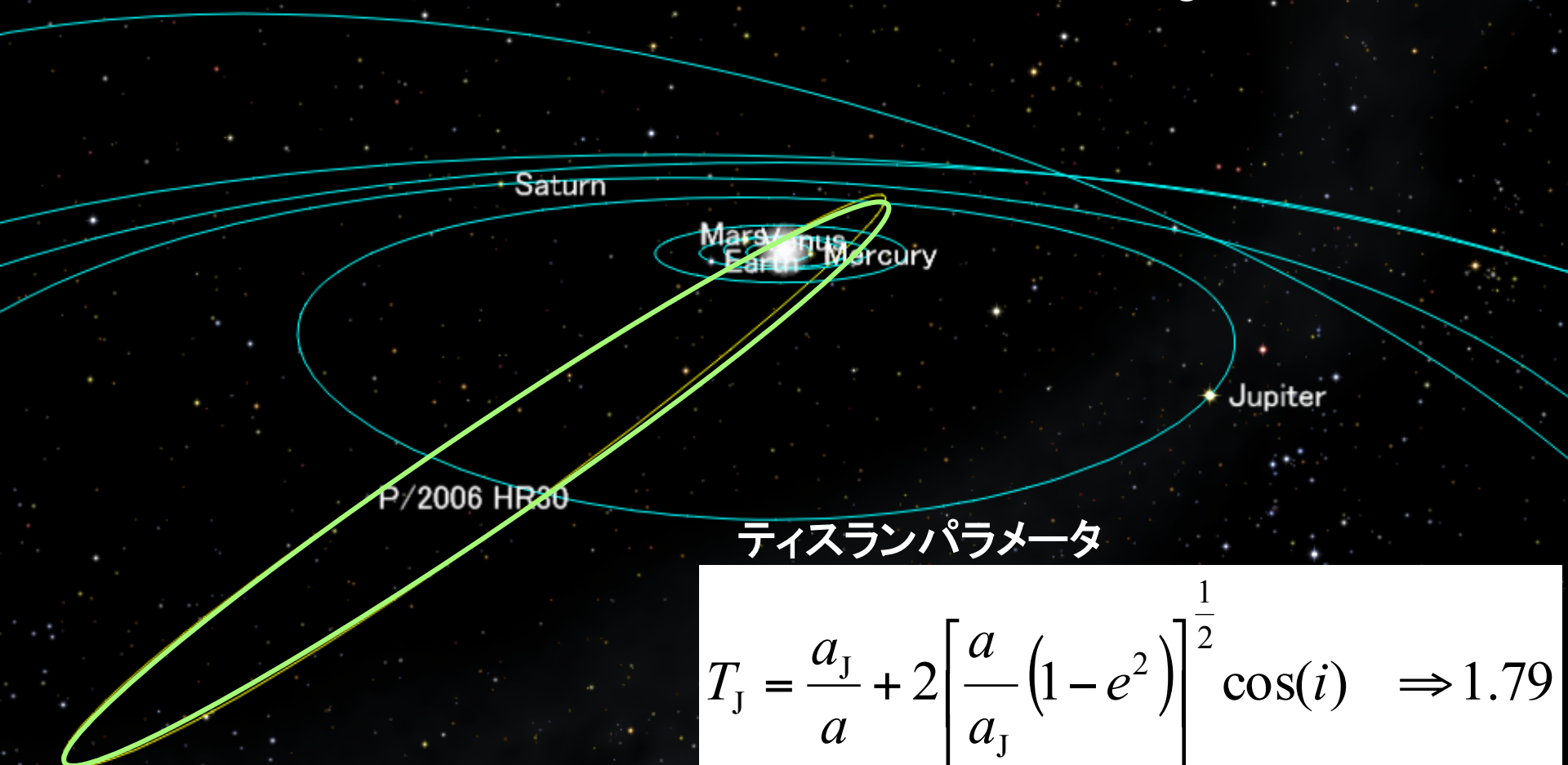
ダモクロイド

Name	a^a (AU)	e^b	i (deg) ^c	q^d (AU)	T_J^e
20461 Dioretsa (1999 LD ₃₁)	23.777	0.900	160.4	2.390	-1.542
2000 HE ₄₆	23.985	0.902	158.38	2.355	-1.508
1999 LE ₃₁	8.163	0.472	151.88	4.310	-1.310
C/LINEAR (2002 CE ₁₀) ^f	9.816	0.791	145.46	2.047	-0.853
(65407) 2002 RP ₁₂₀	55.940	0.956	119.11	2.473	-0.845
2000 DG ₈	10.786	0.793	129.43	2.231	-0.631
C/LONEOS (2001 OG ₁₀₈) ^f	13.30	0.925	80.26	0.994	0.597
2000 AB ₂₂₉	52.497	0.956	68.72	2.292	0.773
1997 MD ₁₀	26.740	0.942	59.04	1.543	0.975
C/LINEAR (2002 VQ ₉₄) ^f	218.161	0.969	70.50	6.800	1.095
5335 Damocles (1991 DA)	11.834	0.867	62.10	1.573	1.143
2002 XU ₉₃	67.426	0.689	77.88	20.983	1.173
1998 WU ₂₄	15.221	0.907	42.56	1.419	1.404
1999 XS ₃₅	18.079	0.948	19.47	0.948	1.411
2000 KP ₆₅	88.323	0.963	45.62	3.274	1.613
1996 PW	287.127	0.991	29.76	2.547	1.732
2003 WG ₁₆₆	5.160	0.644	55.41	1.838	1.873
2003 WN ₁₈₈	14.566	0.849	26.94	2.200	1.933
(15504) 1999 RG ₃₃	9.634	0.775	35.13	2.164	1.946
2004 DA ₆₂	7.709	0.467	52.23	4.107	1.993

裸の彗星核:

P/2006 HR30

軌道半長径:	$a=7.82$ AU (木星-土星)
近日点距離:	$q=1.23$ AU (地球-火星)
遠日点距離:	$Q=14.4$ AU (土星-天王星)
離心率:	$e=0.84$
軌道傾斜角:	$i=31.88$ deg.



ティスランパラメータ

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[\frac{a}{a_J} (1 - e^2) \right]^{\frac{1}{2}} \cos(i) \Rightarrow 1.79$$

どこからやって来たか

ティスランパラメータ: T_J によって天体の起源を評価する

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[\frac{a_J}{a} (1 - e^2) \right]^{\frac{1}{2}} \cos(i)$$

•メインベルト小惑星

$$T_J > 3$$

•トロヤ群小惑星

$$T_J \sim 3$$

•木星族彗星

$$2 < T_J < 3$$

カイパーベルト起源

•ハレー型彗星

及びダモクロイド

$$T_J < 2$$

オールト起源

新たな小惑星グループ

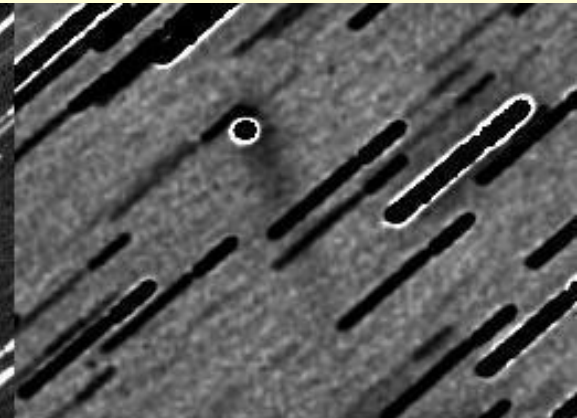
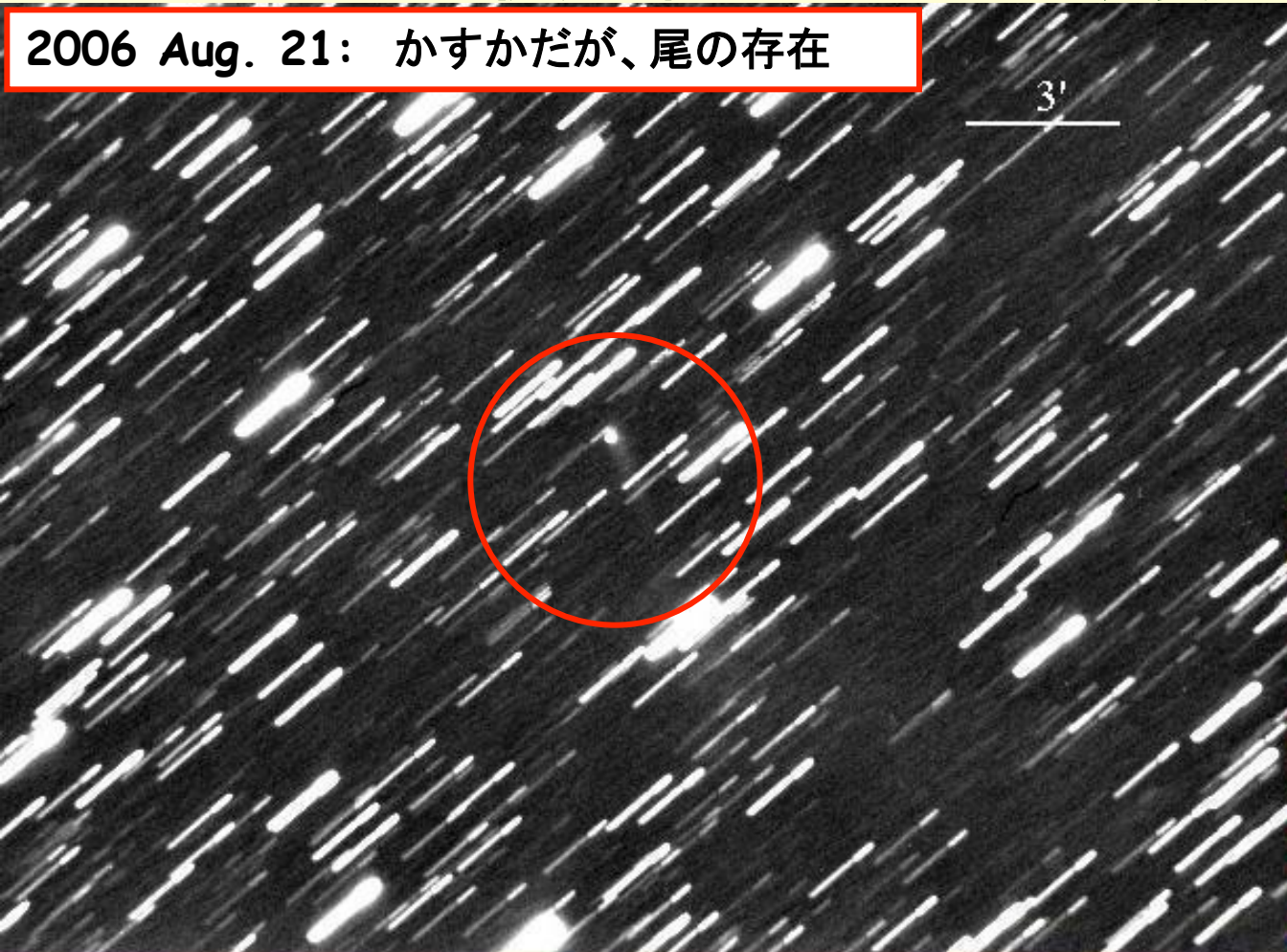
Jewitt (AJ, 2005)

ダモクロイド

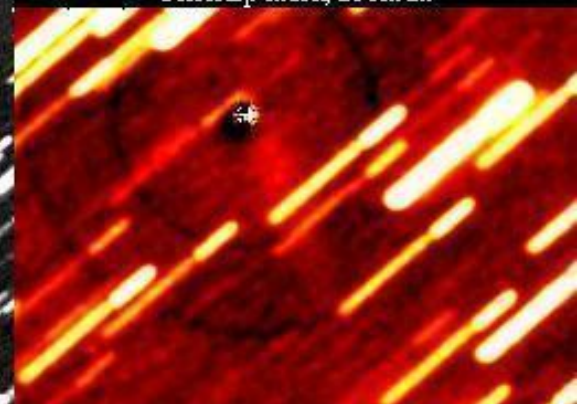
Name	a^a (AU)	e^b	i (deg) ^c	q^d (AU)	T_J^e
20461 Dioretsa (1999 LD ₃₁)	23.777	0.900	160.4	2.390	-1.542
2000 HE ₄₆	23.985	0.902	158.38	2.355	-1.508
1999 LE ₃₁	8.163	0.472	151.88	4.310	-1.310
C/LINEAR (2002 CE ₁₀) ^f	9.816	0.791	145.46	2.047	-0.853
(65407) 2002 RP ₁₂₀	55.940	0.956	119.11	2.473	-0.845
2000 DG ₈	10.786	0.793	129.43	2.231	-0.631
C/LONEOS (2001 OG ₁₀₈) ^f	13.30	0.925	80.26	0.994	0.597
2000 AB ₂₂₉	52.497	0.956	68.72	2.292	0.773
1997 MD ₁₀	26.740	0.942	59.04	1.543	0.975
C/LINEAR (2002 VQ ₉₄) ^f	218.161	0.969	70.50	6.800	1.095
5335 Damocles (1991 DA)	11.834	0.867	62.10	1.573	1.143
2002 XU ₉₃	67.426	0.689	77.88	20.983	1.173
1998 WU ₂₄	15.221	0.907	42.56	1.419	1.404
1999 XS ₃₅	18.079	0.948	19.47	0.948	1.411
2000 KP ₆₅	88.323	0.963	45.62	3.274	1.613
1996 PW	287.127	0.991	29.76	2.547	1.732
2003 WG ₁₆₆	5.160	0.644	55.41	1.838	1.873
2003 WN ₁₈₈	14.566	0.849	26.94	2.200	1.933
(15504) 1999 RG ₃₃	9.634	0.775	35.13	2.164	1.946
2004 DA ₆₂	7.709	0.467	52.23	4.107	1.993

P/2006HR30 の観測： あかり以外 可視光撮像 → 低活動度の彗星

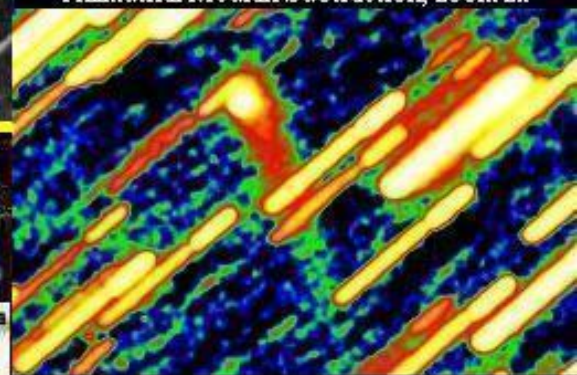
2006 Aug. 21: かすかだが、尾の存在



Unsharp mask, zoom 2x



Azimuthal Median Subtraction, zoom 2x



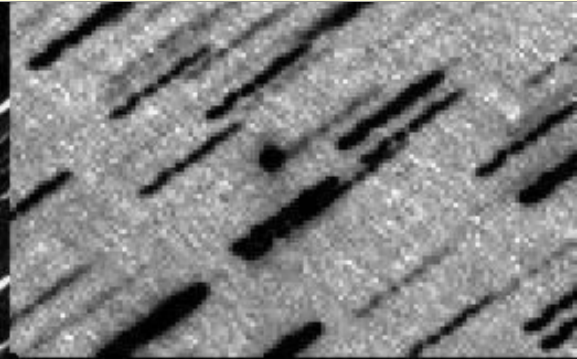
False colors palette, zoom 2x

P/2006 HR30 (Siding-Spring) 2006, August 21.98
Average of 37 unfiltered exposures, 120 seconds each
Newton, D= 0.45m, f/4.4 + CCD FLI IMG-1001E
G. Sostero & L. Donato (Remanzacco Obs., Italy)
<http://www.afamweb.com> <http://cara.uai.it>

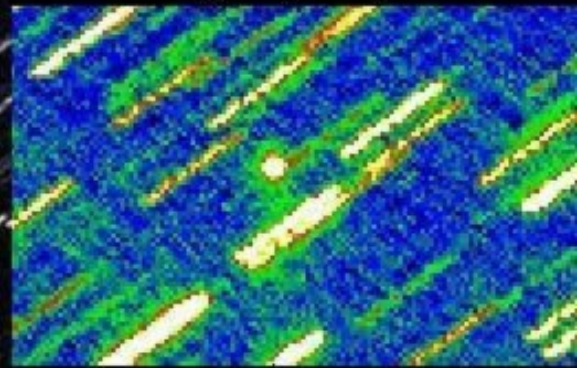


P/2006HR30 の観測: あかり以外 可視光撮像: コマなしの彗星核

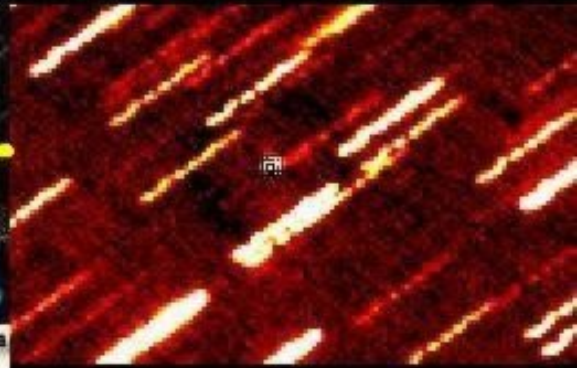
2006 Aug. 31: ほとんど尾は見えない



Negative palette, 2x



False colors palette, 2x



Azimuthal median subtraction, 2x

Delta= 1.12 AU, R= 2.04 AU, Phase= 15.6 deg

P/2006 HR30 (Siding Spring) 2006, Aug. 31.81
Average of 22 unfiltered exposures, 120 seconds each
Newton, D= 0.45m, f/4.3 + FLI IMG1001E

L. Donato and V. Gonano (AFAM-Remanzacco Obs)
<http://www.afamweb.com> <http://cara.uai.it>



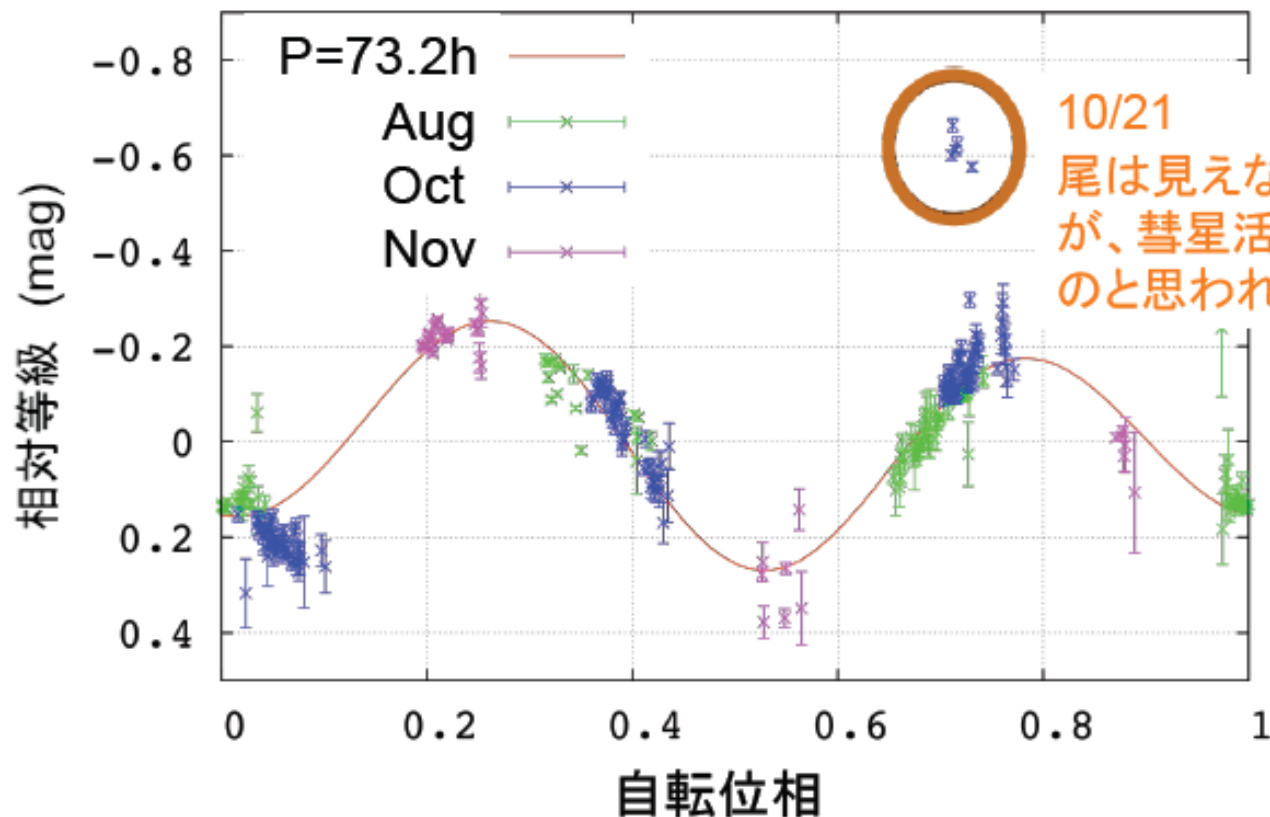
ASSOCIAZIONE FRIULANA
DI ASTRONOMIA
E METEOROLOGIA

P/2006 HR30 の可視光ライトカーブ

木曾観測所

12

自転周期



東大地惑: 縫田修論

周期は $P=73.2\text{h}$

不活動彗星:裸の彗星核

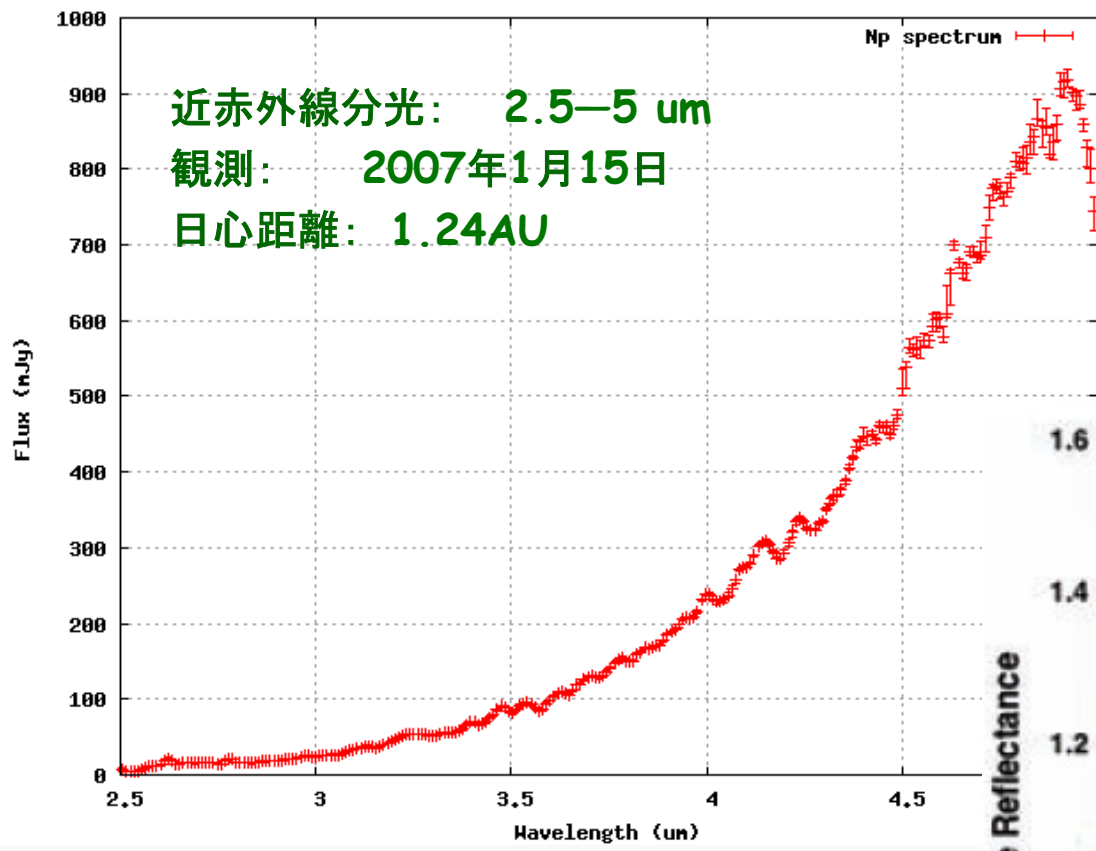
Good sample for remnant panetesimal

コマに隠れて見えない彗星核を地上から直接観測できる唯一の手段（地上以外→探査機）

小さく暗いため、地球（及び太陽）に近づくものだけ、またその期間だけ観測可能になる。

数は多くないが、毎年見つかっているので、今後はPan-STARRSのような超広視野の大規模サーベイが走り出すと、このようなオールト雲小惑星又は不活動彗星核がコンスタントに発見される可能性が大きい。

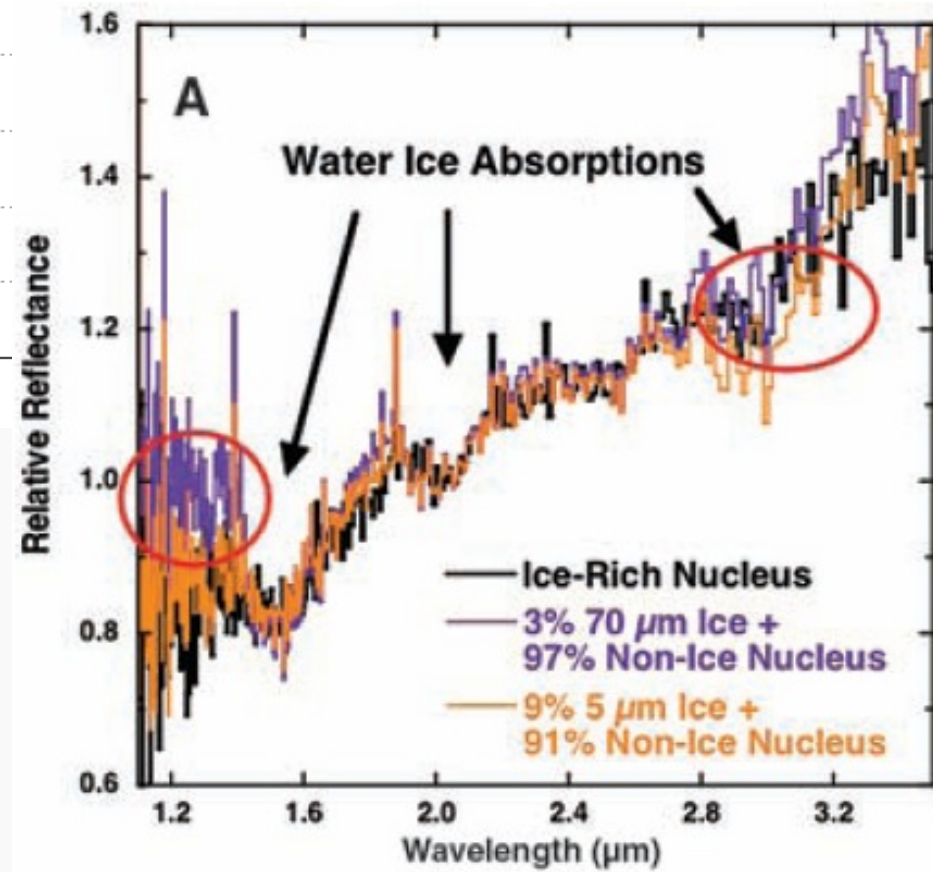
P/2006 HR30 のあかりIRC近赤外線分光 (2.5—5 μm)



9P/Tempel 1:
Deep Impact
(sunshine et al. 2006)

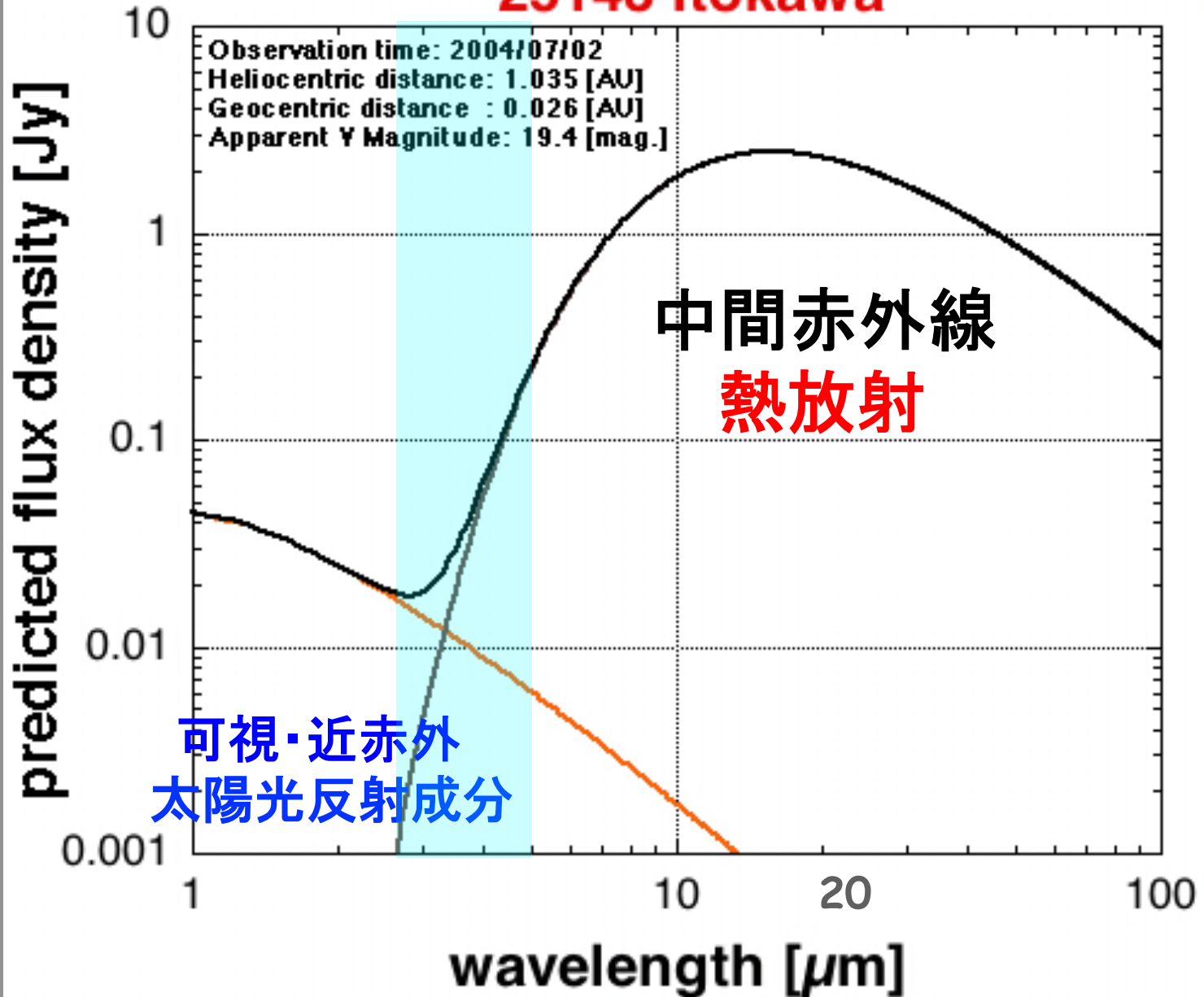
Deep Impact探査機は短い波長域のみ (1.2—3.2 μm)

Spitzer宇宙望遠鏡はこの波長域の分光器を持っていない



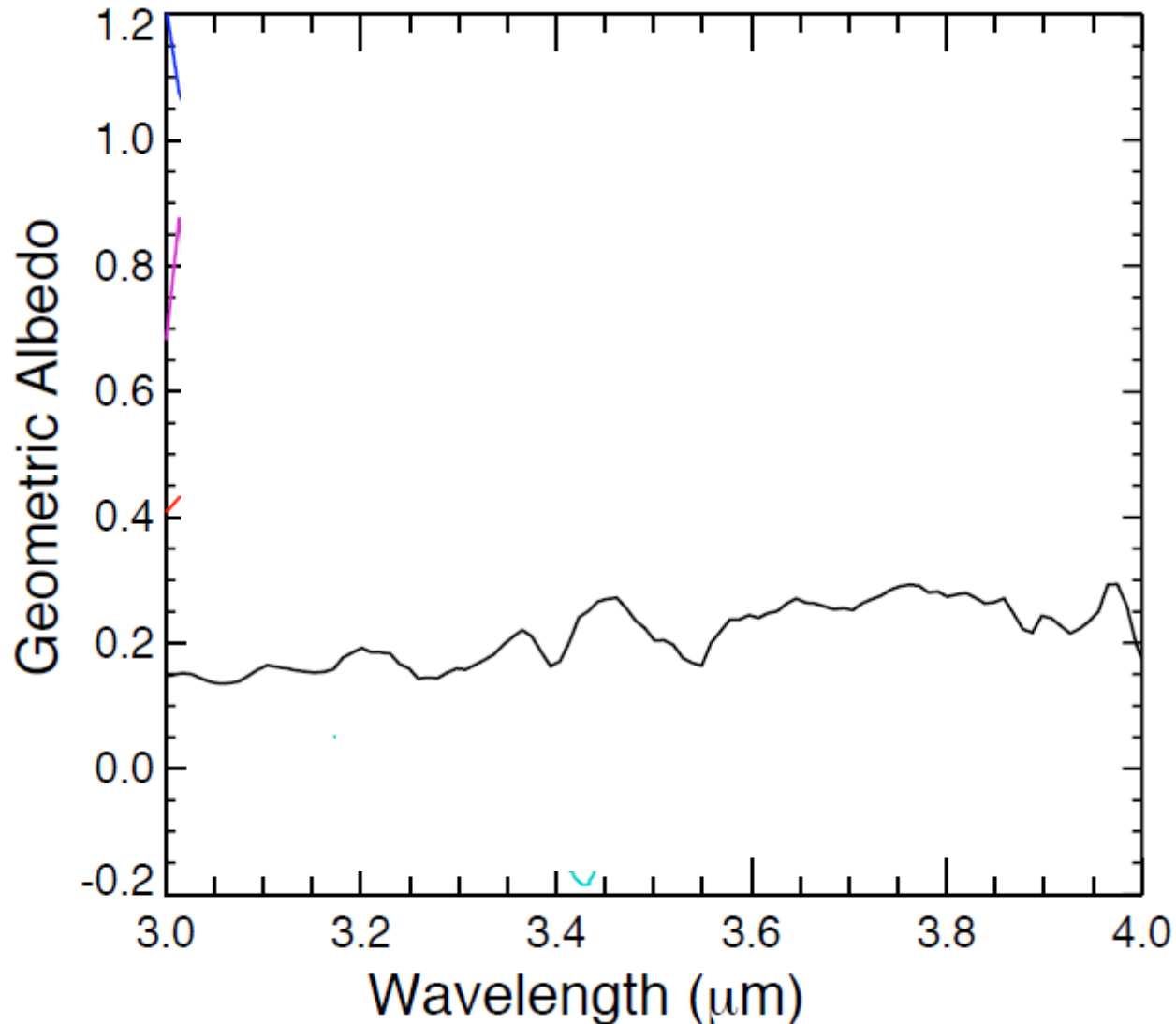
近赤外線観測 ⇒ 太陽光反射光 + 熱放射

25143 Itokawa



裸の彗星核の近赤外分光

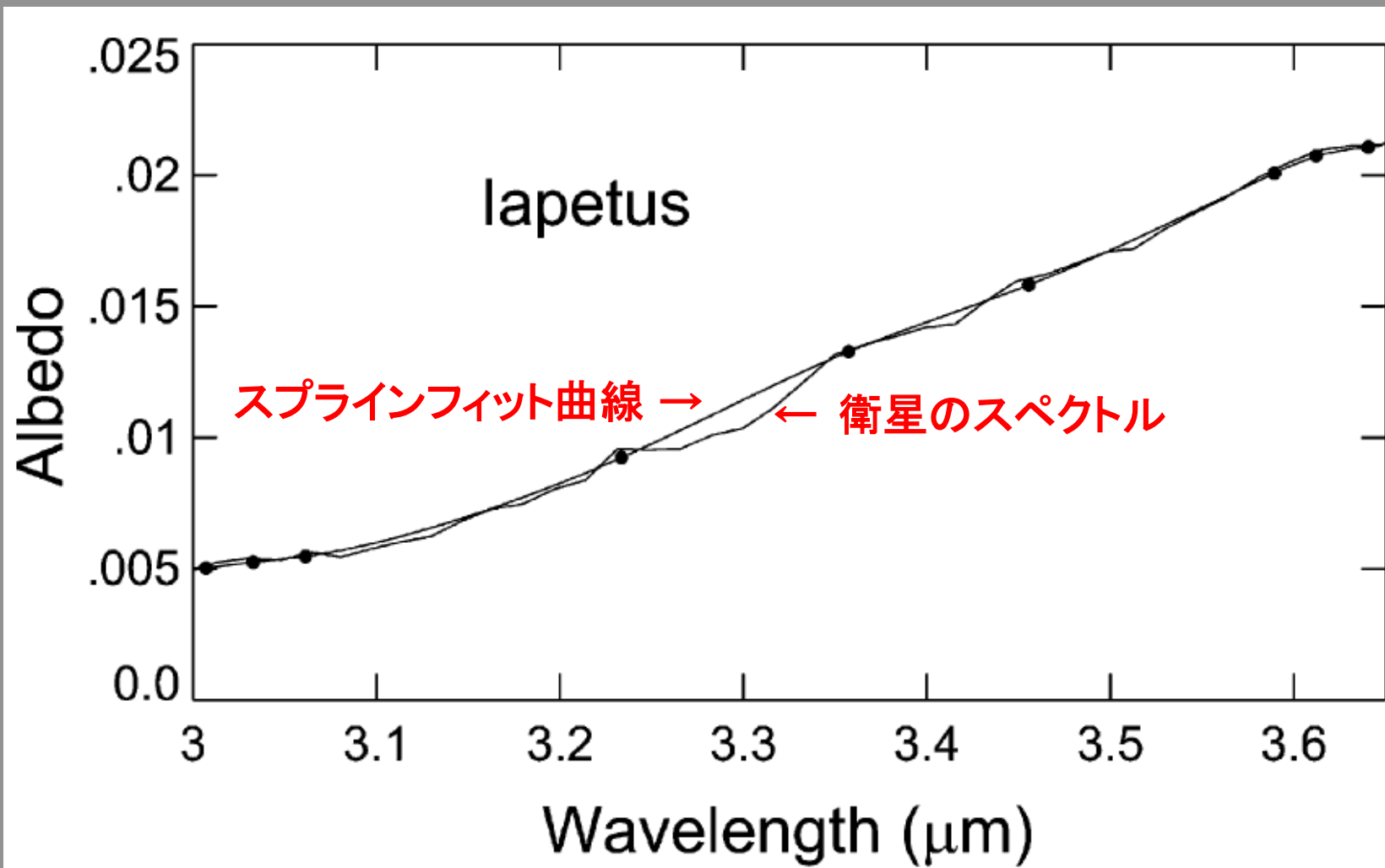
小惑星の標準熱モデル(STM)を適用し、熱放射成分を差し引きした結果
→ 太陽光反射成分のみ



カッシーニ探査機による土星の氷衛星の観測

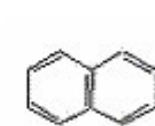
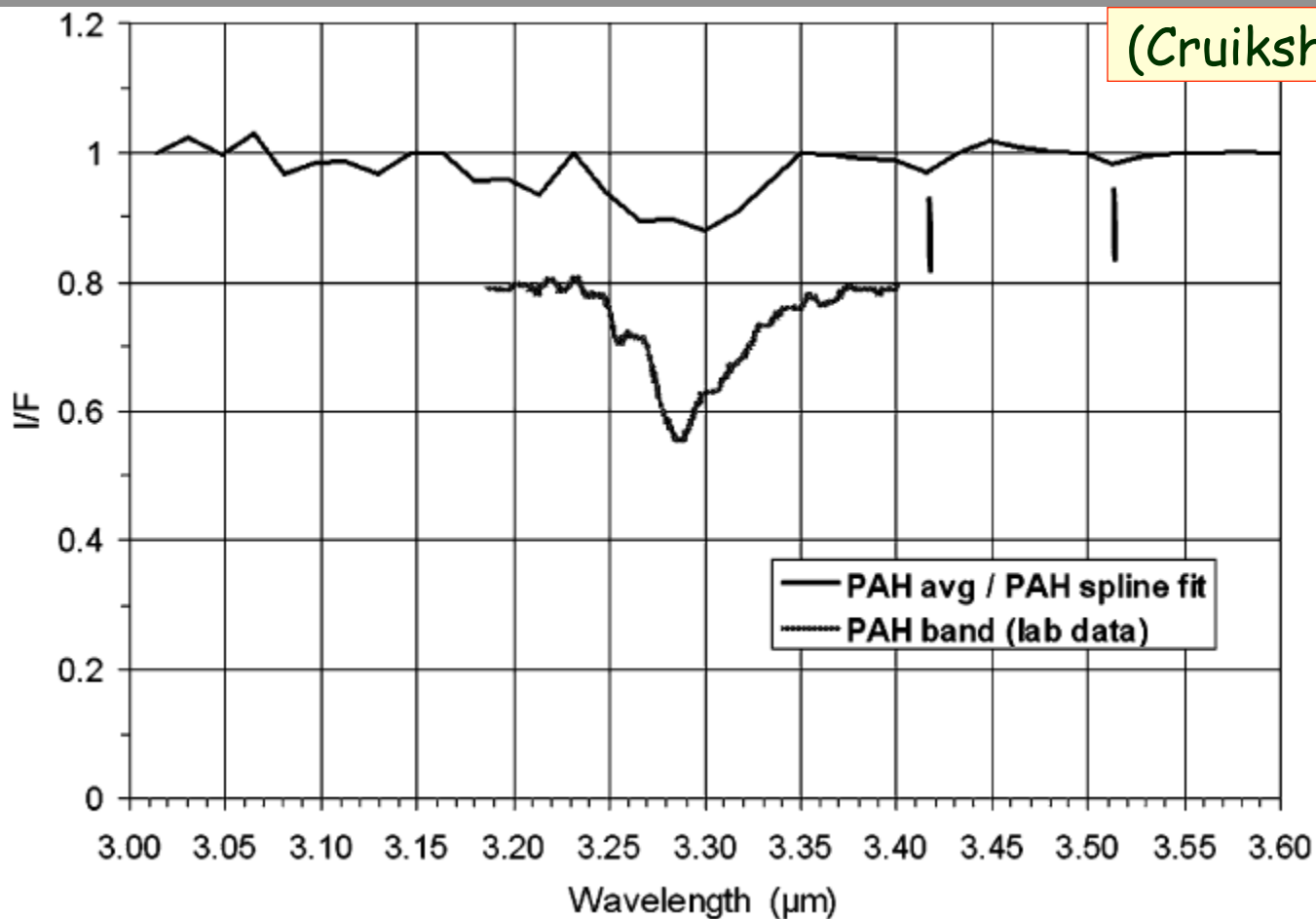
同じ波長域のスペクトル (これ以外に同じ波長では比べられない)

(Cruikshank et al. 2008)

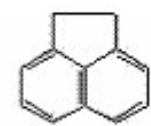


カッシーニ探査機による土星の氷衛星イアペタスの観測

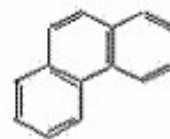
(Cruikshank et al. 2008)



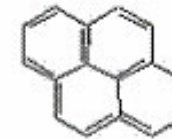
Naphthalene



Acenaphthene

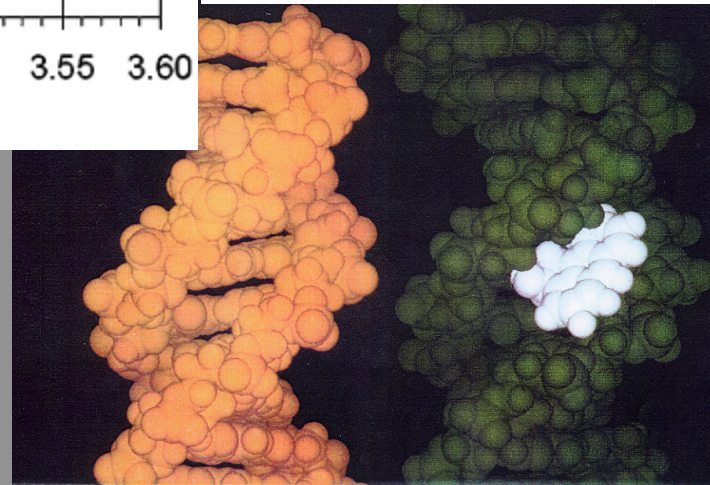


Phenanthrene



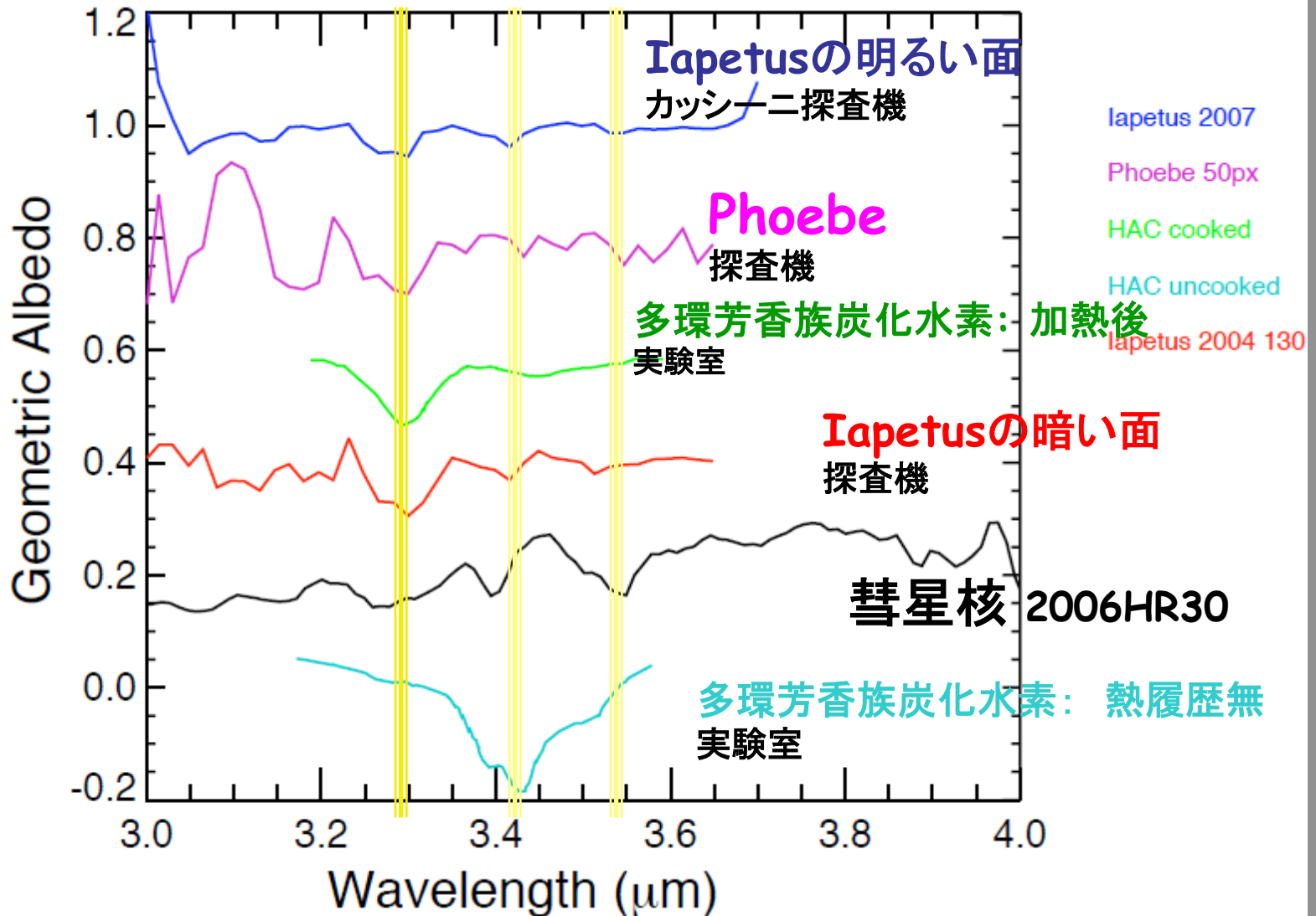
Pyrene

PAH (多環芳香族炭化水素) の
C-H伸縮の振動吸収バンドの検出



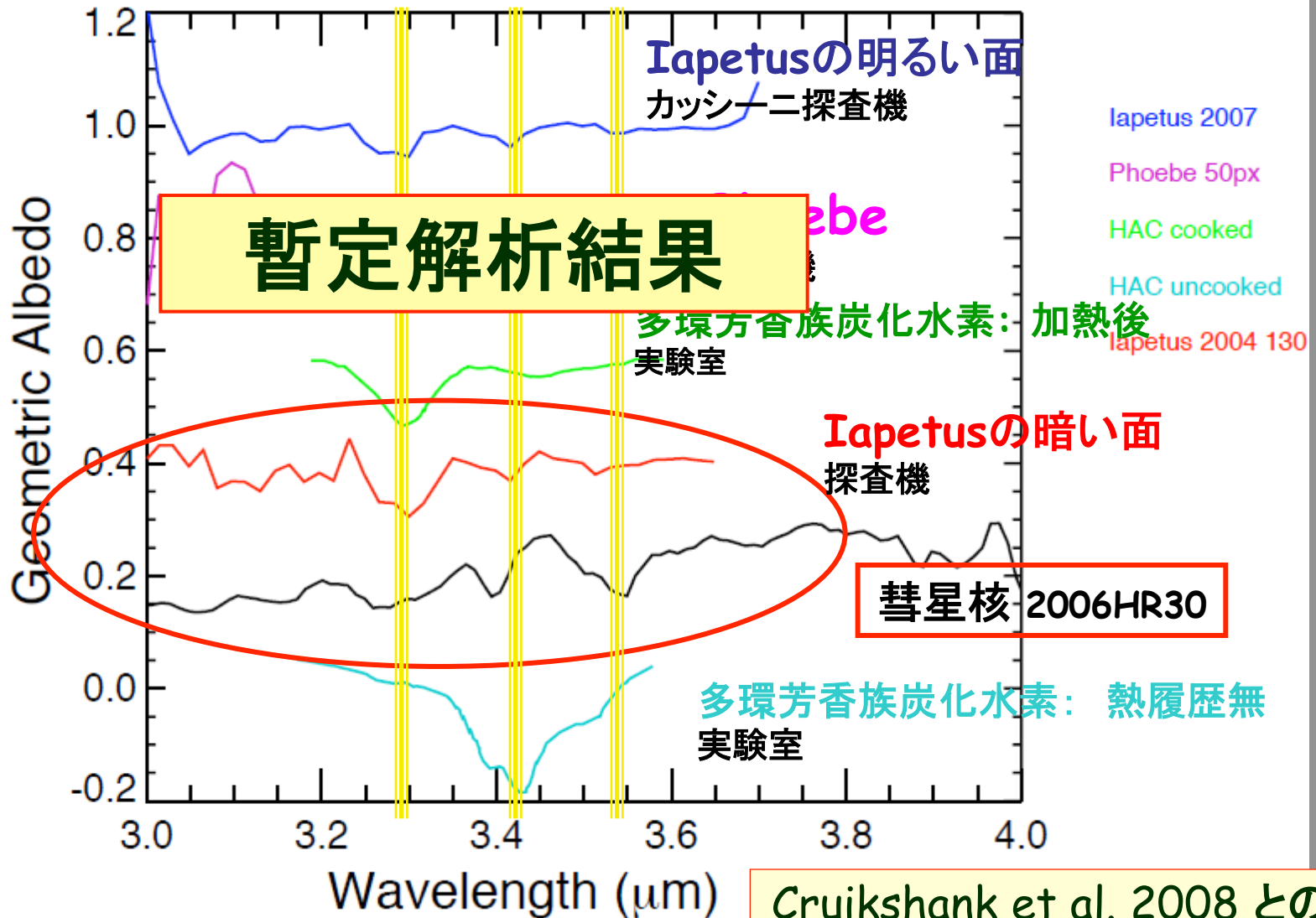
カッシーニ探査機の近赤外分光結果との比較

P/2006 HR30、土星の衛星 及び 実験室 PAH データと比較



カッシーニ探査機の近赤外分光結果との比較

P/2006 HR30、土星の衛星 及び 実験室 PAH データと比較



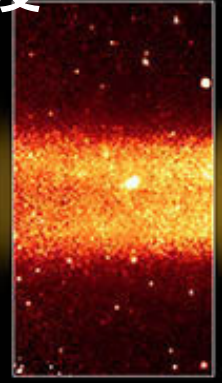
最近の太陽系トピックス

SST news, Nature news
アストロアーツ天文ニュース

- 拡がり: 128—207 土星半径
- 幅: 600万km
- 厚さ: 120万km
- 傾き: 27度



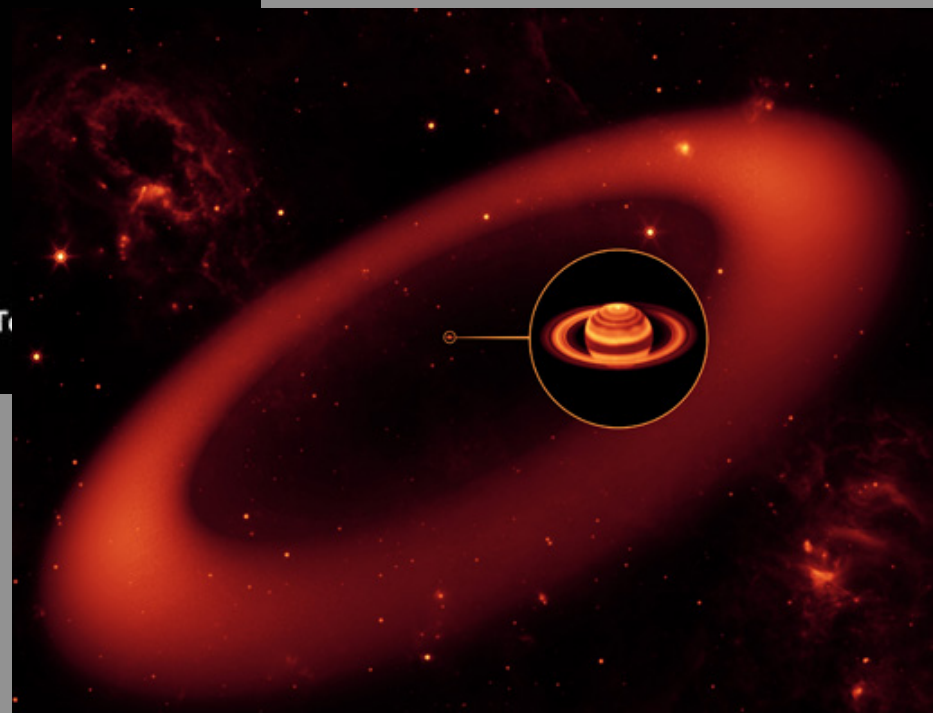
**SSTによる新たな
巨大な土星の環の発見**



Dust Ring

Infrared View of Saturn's Largest Ring
NASA / JPL-Caltech / A. Verbiscer (Univ. of Virginia)

Spitzer Space T



土星最大の環

Saturn

ひろがり:
128—207 土星半径

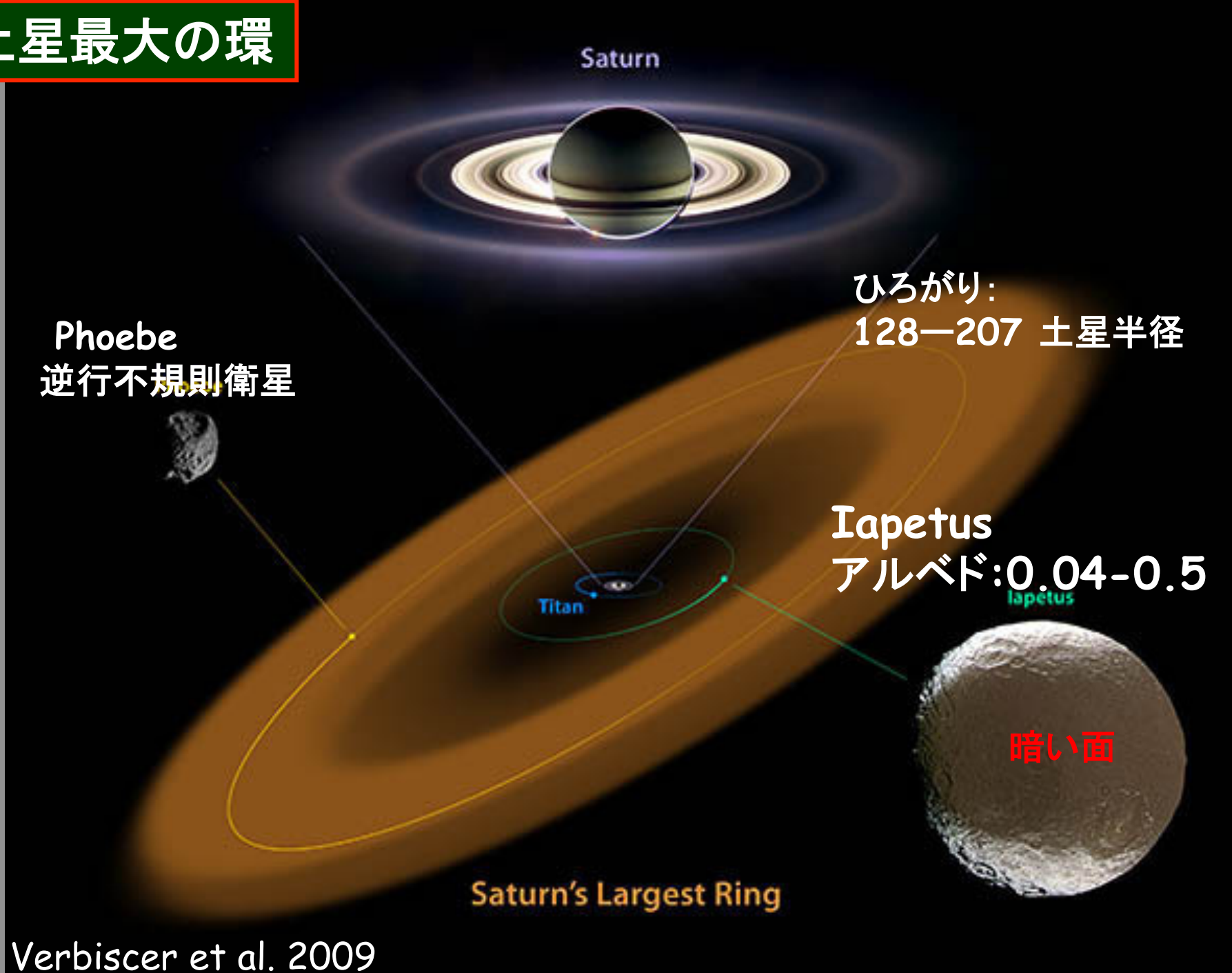
Phoebe
逆行不規則衛星

Iapetus
アルベド:0.04-0.5

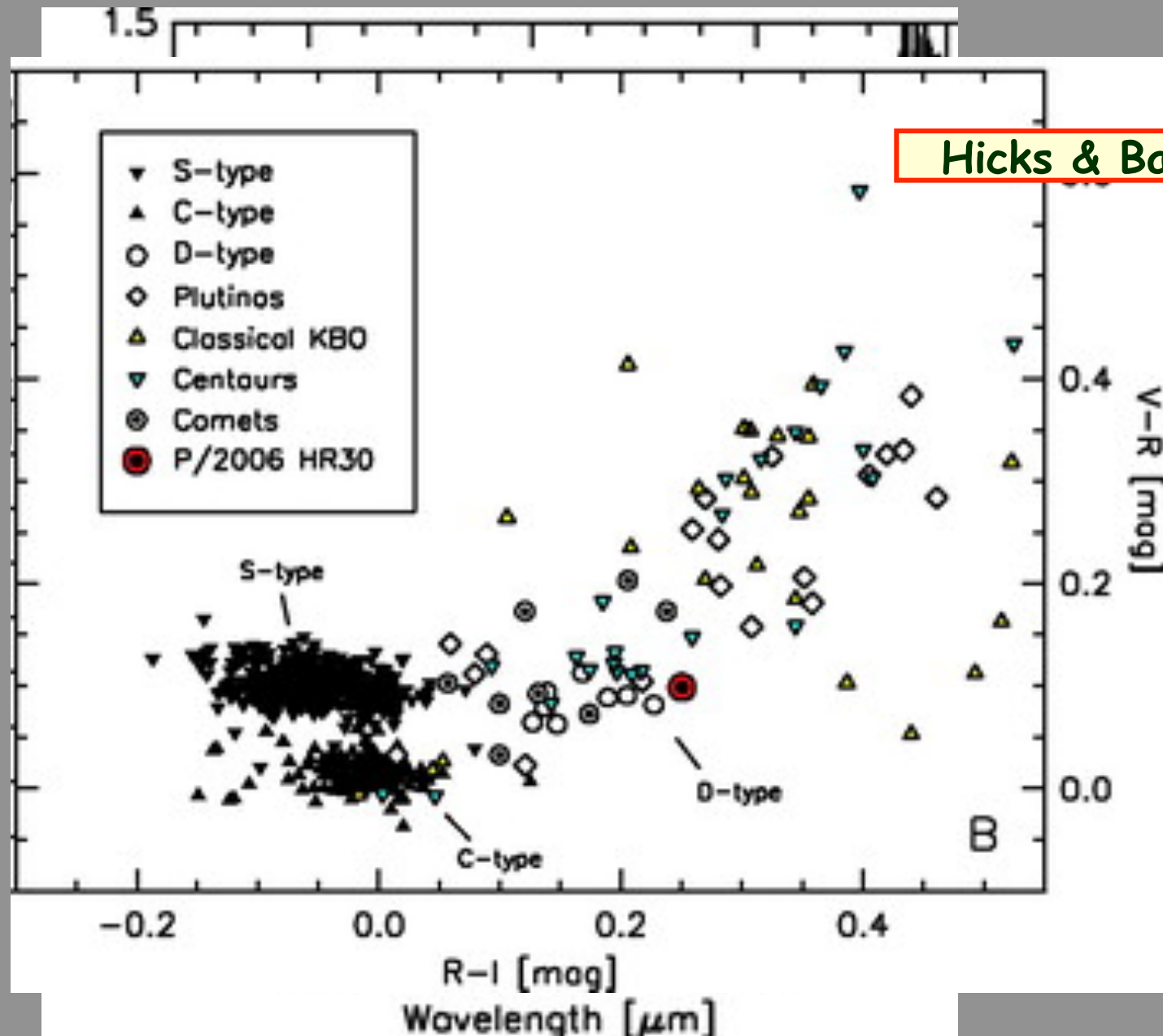
暗い面

Saturn's Largest Ring

Verbiscer et al. 2009

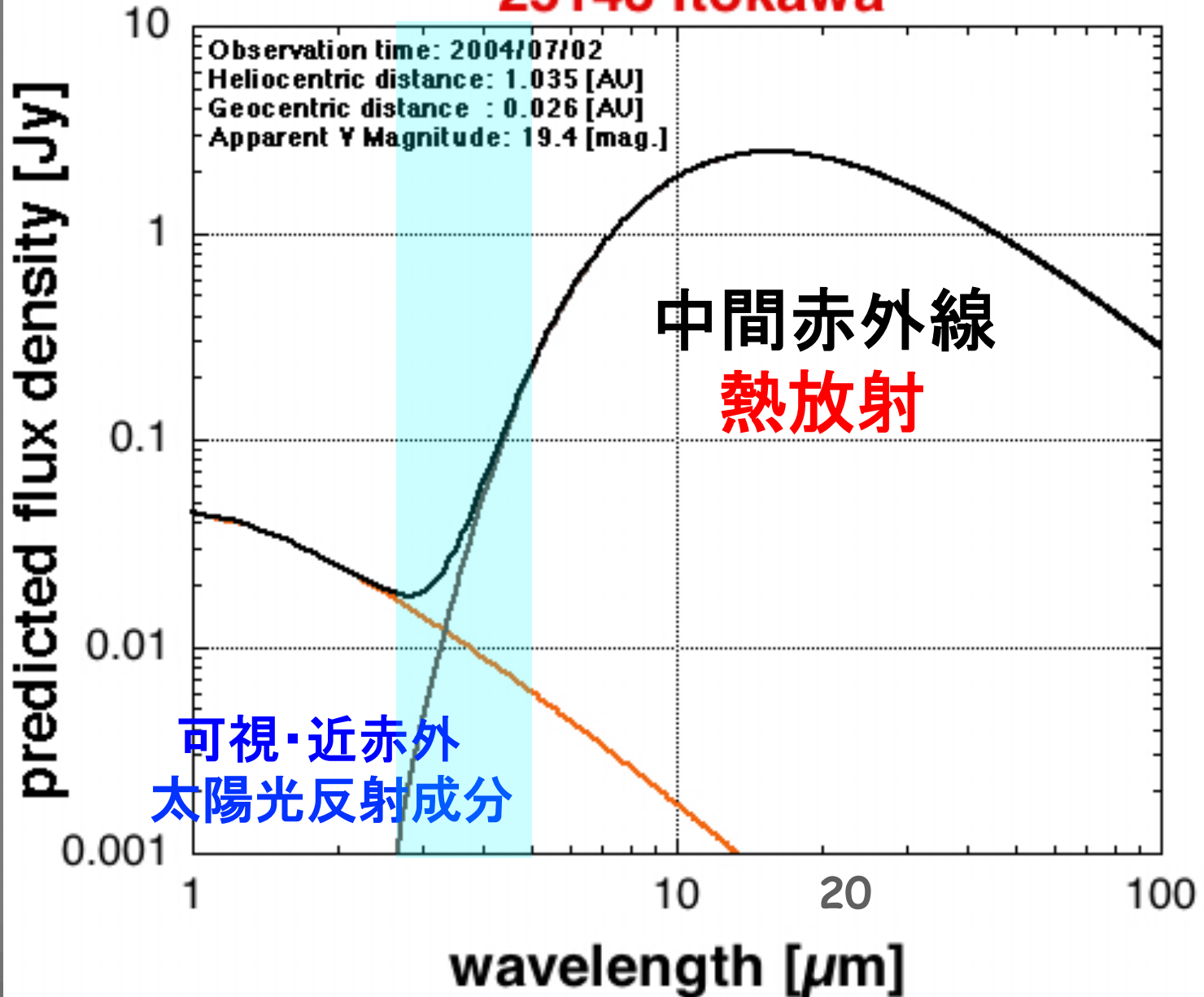


P/2006HR30 の観測：あかり以外 可視光スペクトル → D型小惑星



近赤外線観測 ⇒ 太陽光反射光 + 熱放射

25143 Itokawa



まとめ

あかりによるP/2006HR30の近赤外線分光

・観測

特異小惑星として発見され、一時期だけ彗星活動が認められた裸の彗星核天体P/2006HR30の近赤外線分光観測を行った

・結果

暫定解析の結果、土星の氷衛星(一つは逆行するPhoebe)で観測されたPAH(多環芳香族炭化水素)が彗星核にも存在する可能性
(→ 土星最大の環の関連)

・今後の展望

あかりによる小惑星観測(主にメインベルトとNEAs)の今後の解析結果と比較検討が望まれる

・現状の問題点

分光結果には熱放射成分の寄与が大きいため、太陽光反射の吸収スペクトルを議論するには、この波長の熱放射率(emissivity)を考慮に入れる必要がある

特異小惑星/コマなしの彗星核:

P/2006 HR30

もともと**特異小惑星**として発見・登録される

Saturn

その後のモニター観測で**一時期だけ彗星活動**が認められる

その後、ずっと**コマや尾を持たない小惑星状**として観測される

→ 大部分の期間は小惑星として観測される彗星登録天体

→ **裸の彗星核天体**

コマに隠されて見ることのできない「**彗星核**」を直接観測できる

← **普通の彗星では無理**

P/2006 HR30

Mars

Venus

Mercury

Earth

軌道半長径: $a=7.82$ AU

近日点距離: $q=1.23$ AU

遠日点距離: $Q=14.4$ AU

離心率: $e=0.84$

軌道傾斜角: $i=31.88$ deg.

短周期彗星

軌道長半径・軌道傾斜角：小

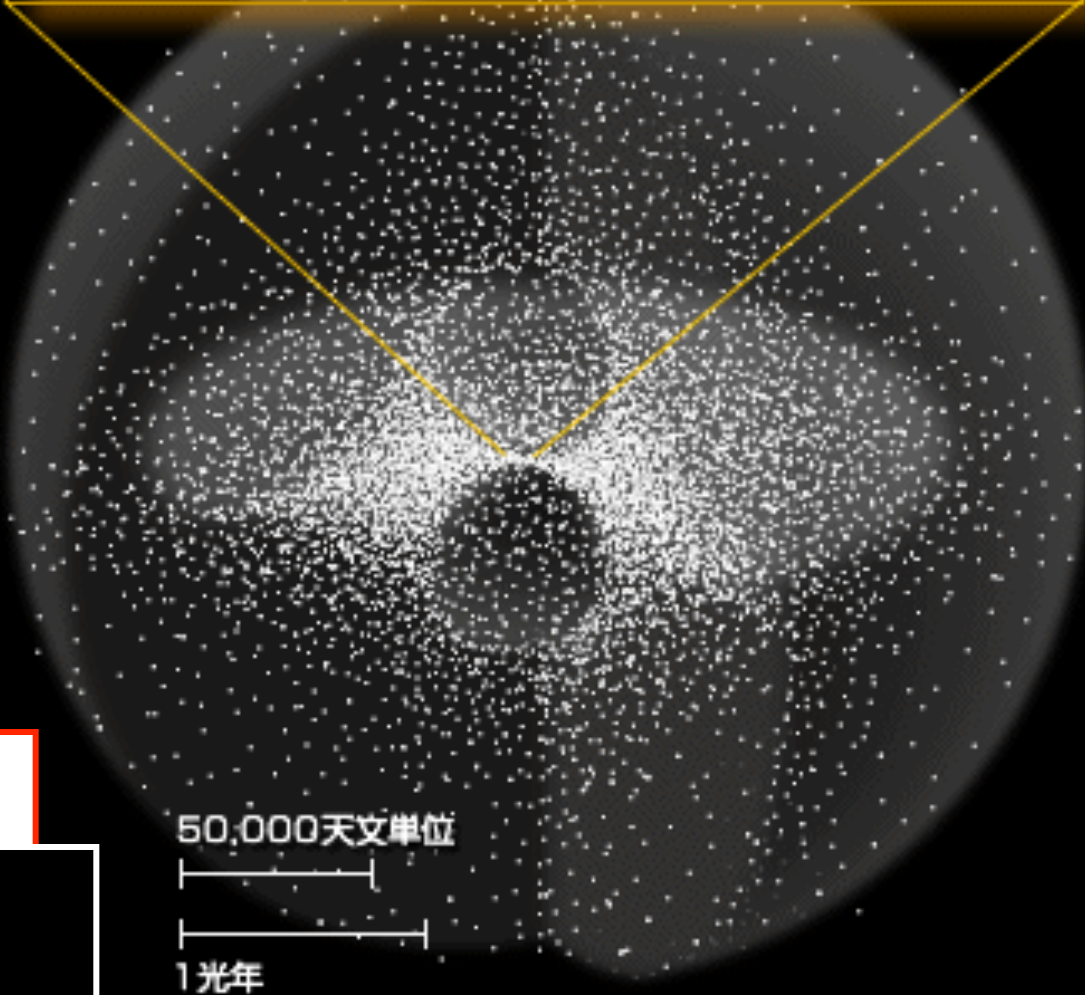
カイパーベルト



オールトの雲

長周期彗星

軌道長半径・軌道傾斜角：大



観測：エリスや外縁天体のサイズ(&アルベド)を求める

2006年末ー2007年：FIS(遠赤外線サーベイ観測装置)

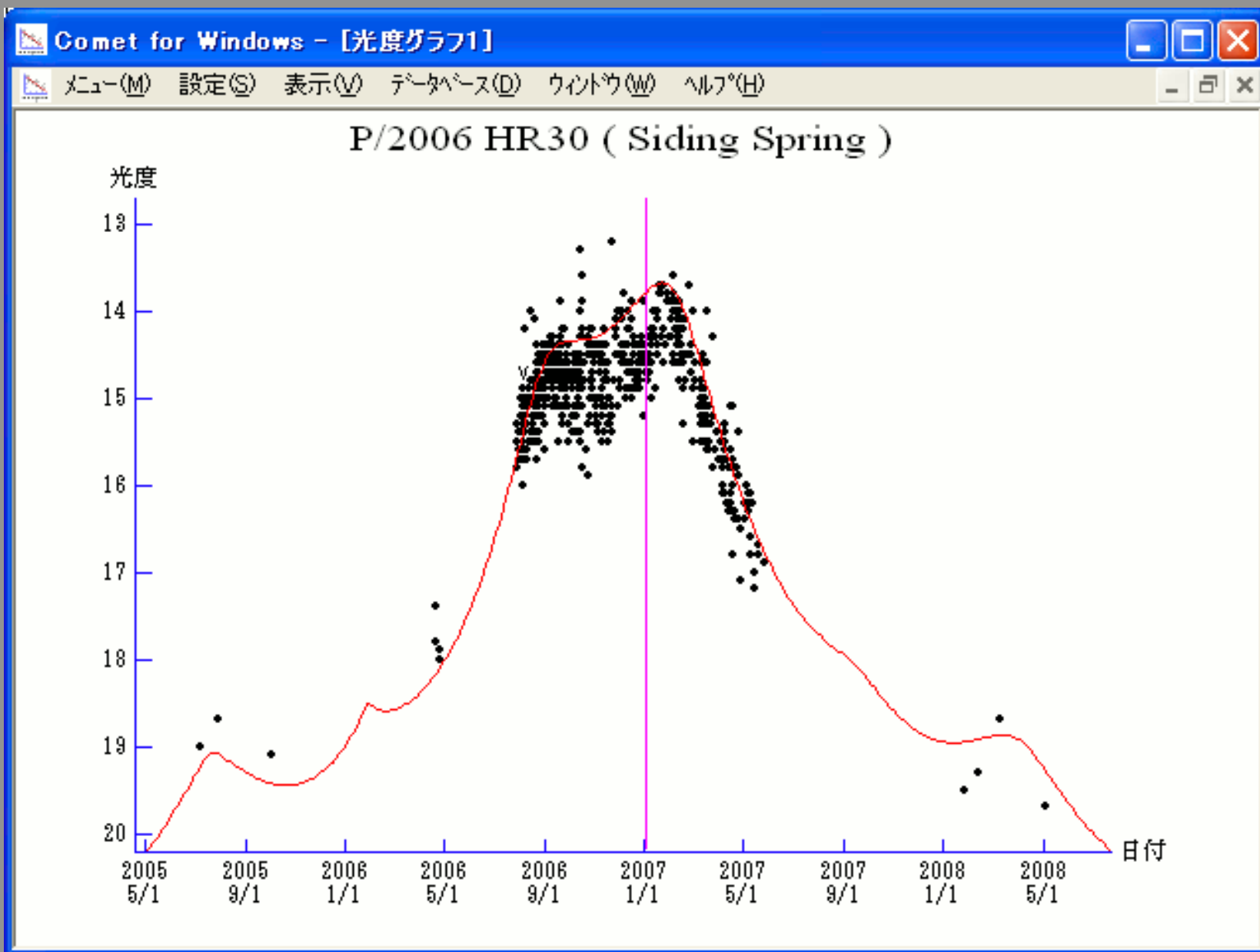
観測天体：16天体

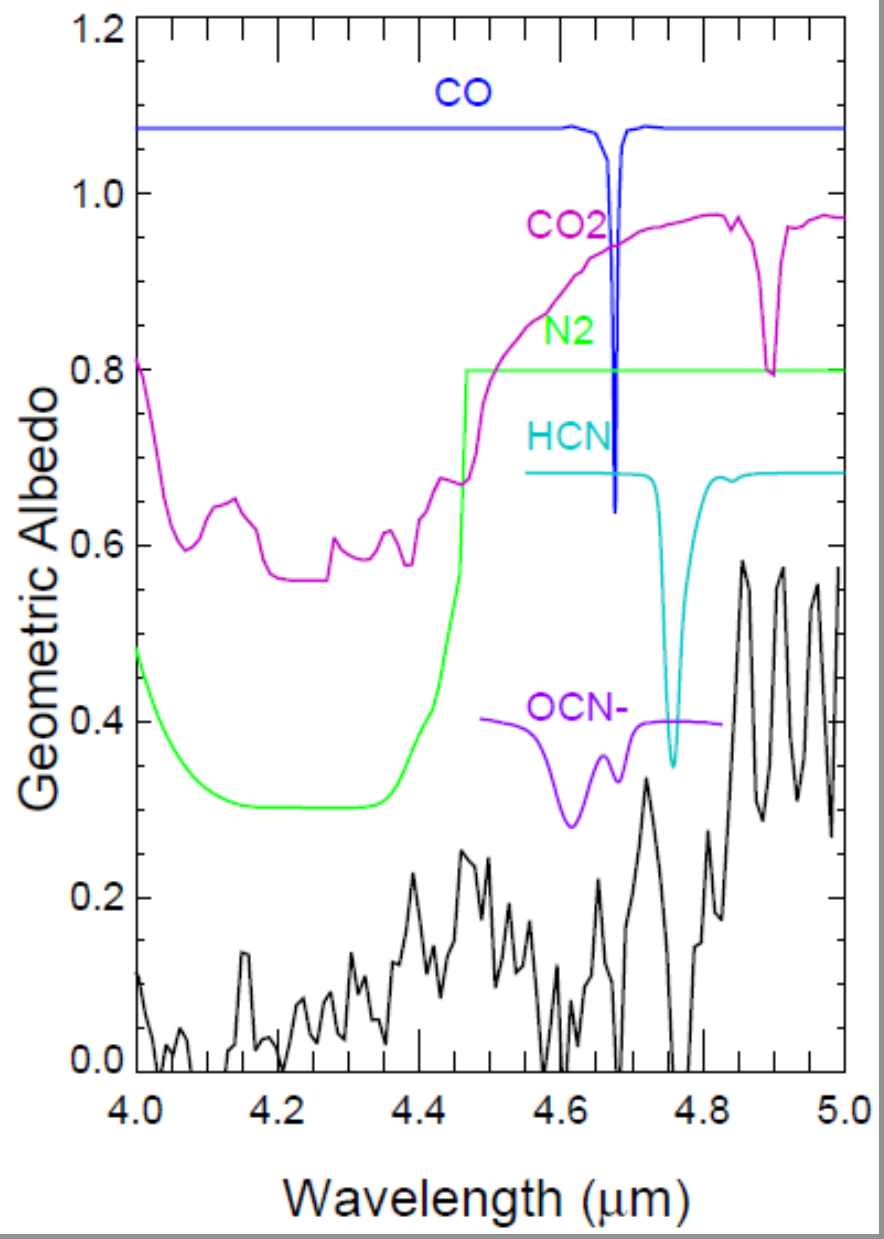
- **ケンタウルス天体 (4天体)** Chiron, Chariklo, Thereus, 2003 CO1
- **準惑星(候補)TNOs (3天体)** Eris, Haumea, Makemake
- **準惑星にされていない散乱TNOs (2天体)** Sedna, 2005 RN43
- **他のTNOs (7天体)**
Huya(2000 EB173), Orcus(2004 DW), 2002 TX300,
2002 UX25, 2004 GV6, 2005 RM43, 2005 RR43

2007年：IRC(近・中間赤外線カメラ 観測装置)

- **ケンタウルス天体 (5天体)** Chiron, Asbolus, Thereus, Amycus,
2003 CO1
- 2006 HR30 (グリズム分光)

打ち上げ後のあかり感度





観測天体: 2006 HR30

特異小惑星~不活動彗星核

メインベルト以外の小惑星

- 地球近傍小惑星(アポロ、アモール、アテン)
地球軌道近くを公転
- トロヤ群小惑星
木星軌道を公転
- 遠方小天体(TNOs)
海王星以遠の軌道
- ケンタウルス天体
外惑星領域を黄道面近くで公転
- 彗星軌道小惑星(ダモクロイド)
軌道傾斜角が大きく、オールト雲彗星のような軌道を持つ特異小惑星

P/2006 HR30 あかりIRC近赤外線分光 (2.5—5 μ m)

- あかりの観測波長(2.5—5 μ m)は地球大気の窓ではないために、地上観測は存在しない
 - これまでこの波長域では分光観測例はない
 - 大気圏外の観測のみ(惑星探査機と今回のあかり)
 - カッシーニで観測された土星の氷衛星との比較を行う

探査機との直接比較が可能となった

天文地上観測としては他では類を見ない科学研究

Itokawa: 同一の装置(ESO3.6m+TIMMI2)によって、もっとも集中的に地上での熱観測がなされた小惑星

本研究のまとめ

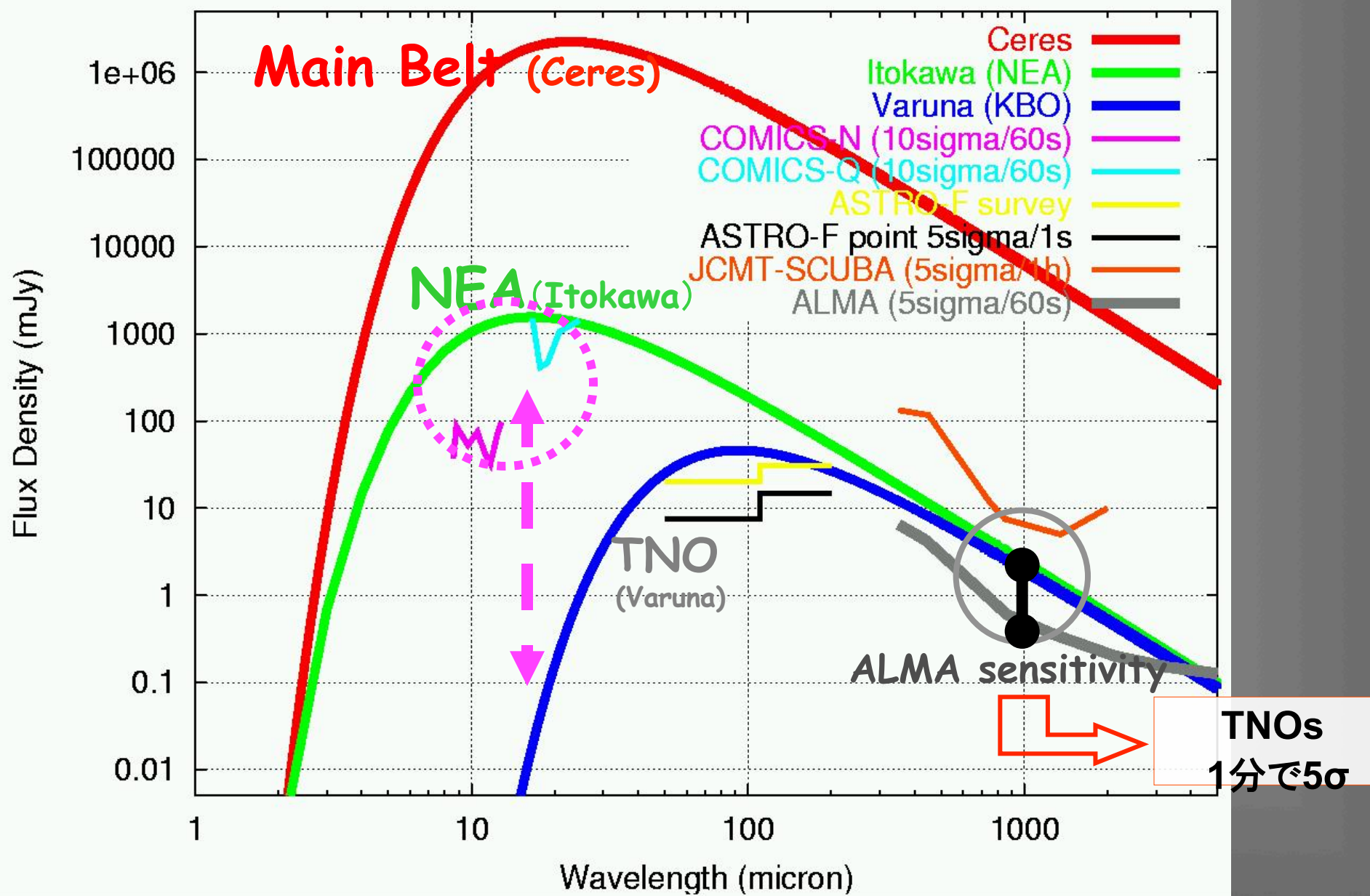
- 初めて地上の熱赤外の観測にTPMを適用して探査機データと直接比べることが可能となった
- 多波長(今回4波長)、多位相角(太陽直下時、上弦・下弦の月状態時)での観測データの取得によって小惑星の大きさ、放射フラックス、表層熱特性の高精度での推定が可能
- フラックスを予想するモデルとしての有効性を検証

Thermo-Physical Model (TPM)

ISO, Akari(ASTRO-F)でのフラックスキャリブレーションに用いられる小惑星の放射フラックスモデル

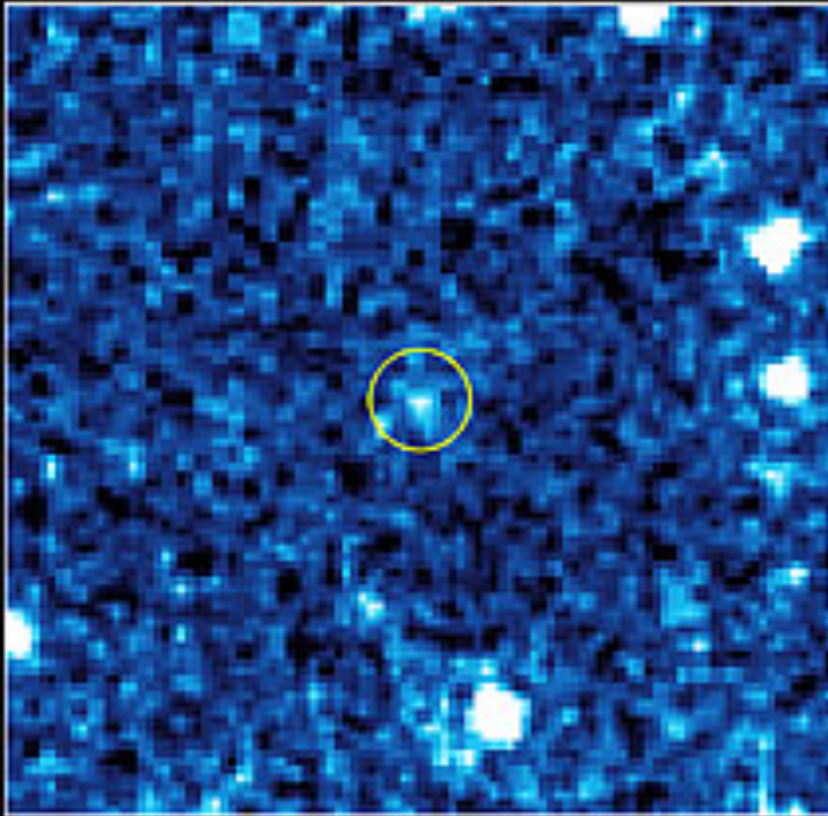
いろいろ位相角、多波長でのデータが必要であるが、フラックスを予想するモデルとしての有効性を確証
(精度は1%以内)

低温天体からの熱フラックス = ALMA

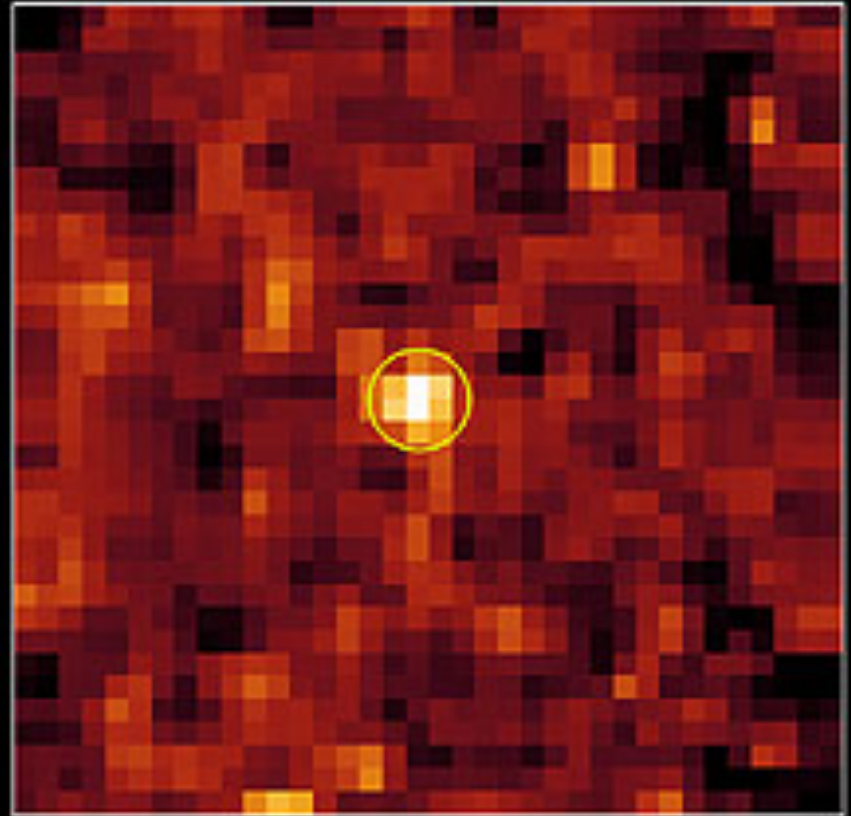


スピッツァーによる TNO (2002AW197) の観測 (2005)

24 microns



70 microns



Kuiper Belt Object 2002 AW₁₉₇

NASA / JPL-Caltech / J. Stansberry (Univ. of Arizona)

Spitzer Space Telescope • MIPS

sac2004-21a

直径:

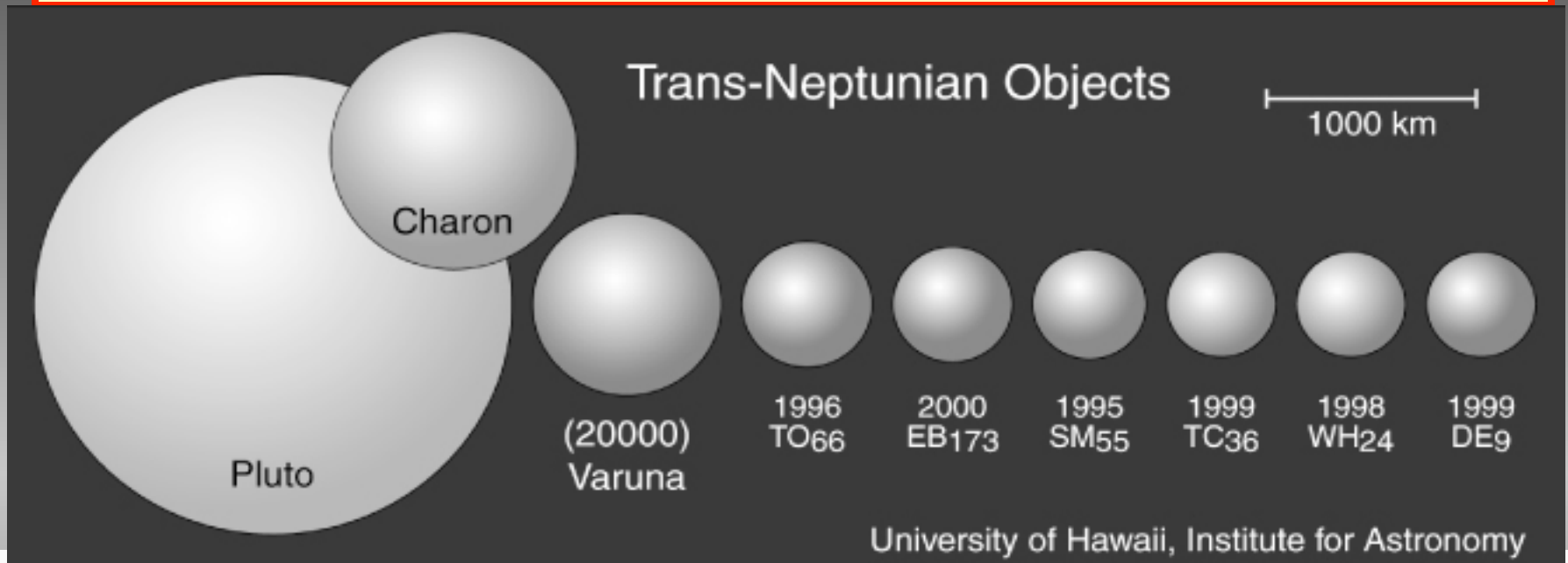
D=734.6km (+116.4 -108.3)

幾何学アルベド:

pv=0.1177 (+0.0442 -0.0300)

Image Credit: J. Stansberry (Univ. of Arizona)
Wavelength: 24 (blue image), 70 (red image) microns
Exposure Date: 2004 April 13
Image Scale: 2.5 x 2.5 arcmin

カイパーベルト天体のサイズ



Object	class	Diameter [km]	Albedo (pV) [%]	wavelength [microns]	Telescope	References
Chiron	Centaur	180	14 ⁺⁶ ₋₃	10/20 μm	IRTF	Campins <i>et al.</i> (1994)
Pholus	Centa	160	12 ⁺⁴	1000	IRAM	Alouf & Stumpff (1995)
Chariklo	Centa					(1993)
1993 SC	TNO	164	2.2	50 μm	ISO	(1998)
1996 TL ₆₆	TNO	316	3.0	90 μm	ISO	Thomas <i>et al.</i> (2000)
Varuna	TNO	900	7 ⁺³ _{-1.5}	850 μm	JCMT	Jewitt & Aousel (2001)

微惑星のサイズ分布

Physical Quantities of Planetesimals

→ Basic Parameters for Formation Theory of Planetary Systems

However, TNOs
unresolved

Typical apparent size = **0".02**
TNO: 19308 (1996 TO66)
Sekiguchi et al. A&A, 2002

- Shape
- Mass (=density)
- Composition
- Temperature
- **Size (& albedo)**

- Optical
- "binary"
- near-IR
- Thermal
- **Thermal**

観測：エリスや外縁天体のサイズを求める

2006年末ー2007年：FIS(遠赤外線サーベイ観測装置)

観測天体：16天体

➤ ケンタウルス天体 (4天体)

Chiron, Chariklo, Thereus, 2003 CO1

➤ 準惑星(候補)TNOs (3天体)

Eris, Haumea, Makemake

➤ 準惑星にされていない散乱TNOs (2天体)

Sedna, 2005 RN43

➤ 他のTNOs (7天体)

Huya(2000 EB173), Orcus(2004 DW), 2002 TX300,
2002 UX25, 2004 GV6, 2005 RM43, 2005 RR43

Size & Albedo of EKBOs

Centaurs/TNOs: Trans-Neptunian Objects

1000 km

数%-10数% 数%-10数%

Charon

Albedo Diversity ???

Pluto: 50%--70%

Charon: 30%--40%

1996 TL66 2000 EB173 1995 SM55 1999 TC36 1998 WH24 1999 DE9

Jewitt's Webpage

University of Hawaii, Institute for Astronomy

Chiron	Centaur	180	14^{+6}_{-3}	10/20 μm	IRTF	Campins <i>et al.</i> (1994)
		168	13^{+4}_{-3}	1200 μm	IRAM	Altenhoff & Stumpff (1995)
Pholus	Centaur	189	4.4 ± 1.3	20 μm	IRTF/UKIRT	Davies <i>et al.</i> (1993)
Chariklo	Centaur	302	4.6 ± 1.0	20 μm	UKIRT	Jewitt & Kalas (1998)
1993 SC	TNO	172	2.2	90 μm	ISO	Gilman <i>et al.</i> (2000)
1996 TL66	TNO	316	3.0	90 μm	ISO	Thomas <i>et al.</i> (2000)
Varuna	TNO	900	$7^{+3}_{-1.5}$	850 μm	JCMT	Jewitt & Aussen (2001)

Measurement of P/Halley by Giotto:

4% albedo

Largest known Kuiper Belt objects

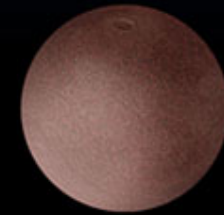
大きさは比べ



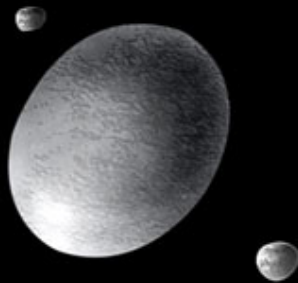
"Xena"
(2003 UB313)



Pluto



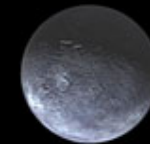
2005 FY9



2003 EL61



Sedna



Quaoar

