

大気を持たない小天体(彗星核/小惑星/外縁天体)の熱放射の観測

関口 朋彦（北海道教育大学・旭川校）

内容

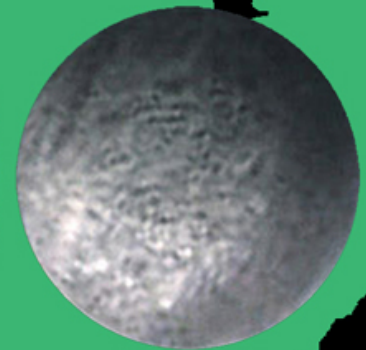
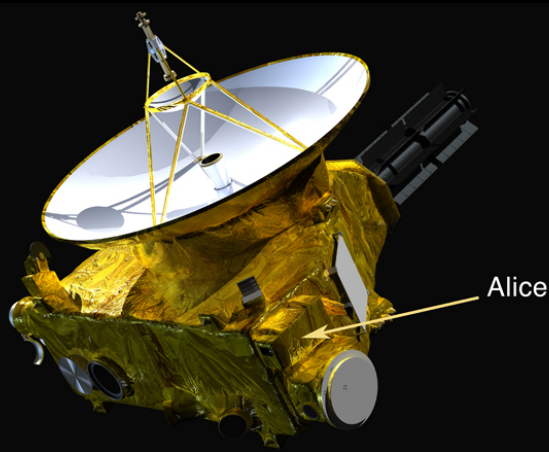
- ◆冥王星の大きさ測定 Before & After New Horizons
- ◆観測による小天体の大きさ測定と探査機答え合わせ
- ◆小天体の熱放射
- ◆ITOKAWA再び
- ◆小惑星の表面熱物性とはやぶさ2TIR
- ◆これからの観測

冥王星のサイズ見積もり: Before & After New Horizons

Stellar Occultations	= 1180 ± 5 km (1993)
Speckle interferometry	= 1350~1730 km (1987)
Charon Mutual Event	= 1178 ± 23 km (1994)
HST imaging	= 1160 ± 12 km (1994)

New Horizons = 1185 km

半径



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

Pluto

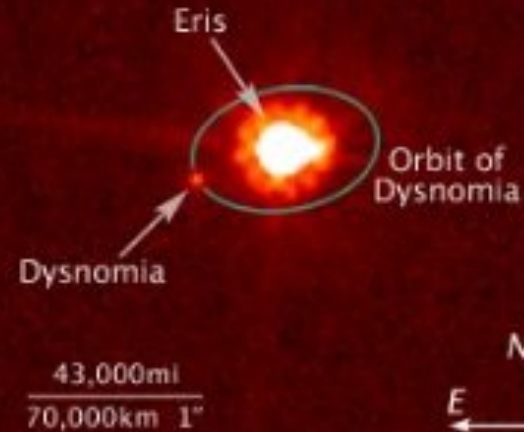
Pluto

Charon

Nix

Hydra

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)

小惑星のサイズ測定: 「赤外線」観測と「探査機」による"答え合わせ"

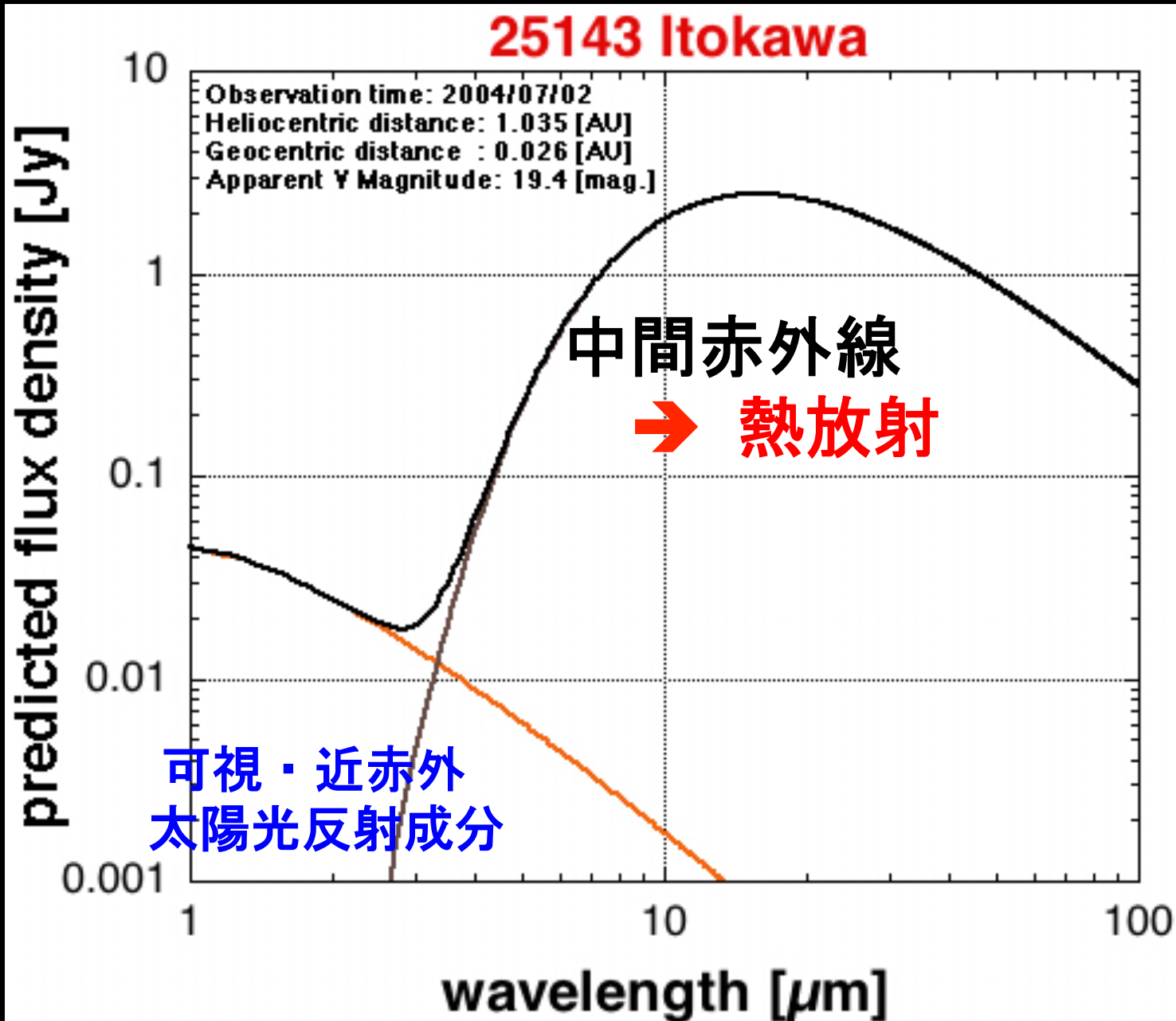
探査機	小惑星 (観測: 直径)	探査機計測結果
Galileo (1991)	ガスプラ (IRAS: 16km)	12 km → -28%
Galileo (1991)	イダ (IRAS: 33km)	28 km → -16%
NEAR (1997)	マチルダ (IRAS: 61km)	58 km → -5%
NEAR (1997)	エロス (UKIRT: 24km)	17 km → -40%

サイズ導出に, 天体形状の効果・自転は考慮していない

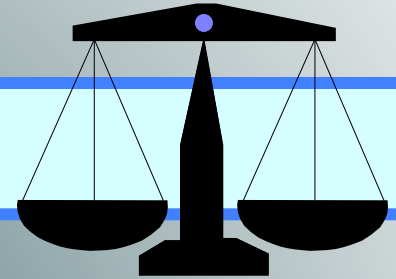
シンプルSTM: traditional Standard Thermal Model



赤外線観測 ⇒ 太陽光反射光 + 熱放射



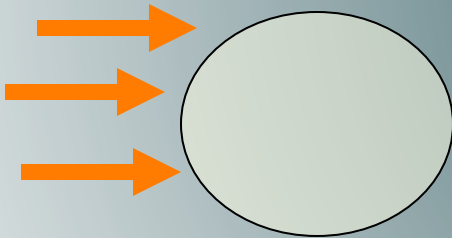
小天体のサイズとアルベドを同時に求める



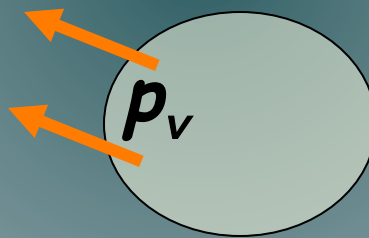
エネルギーバランス

1) [太陽放射] - [反射光] = [小惑星の熱放射]

[太陽定数]



[アルベド]

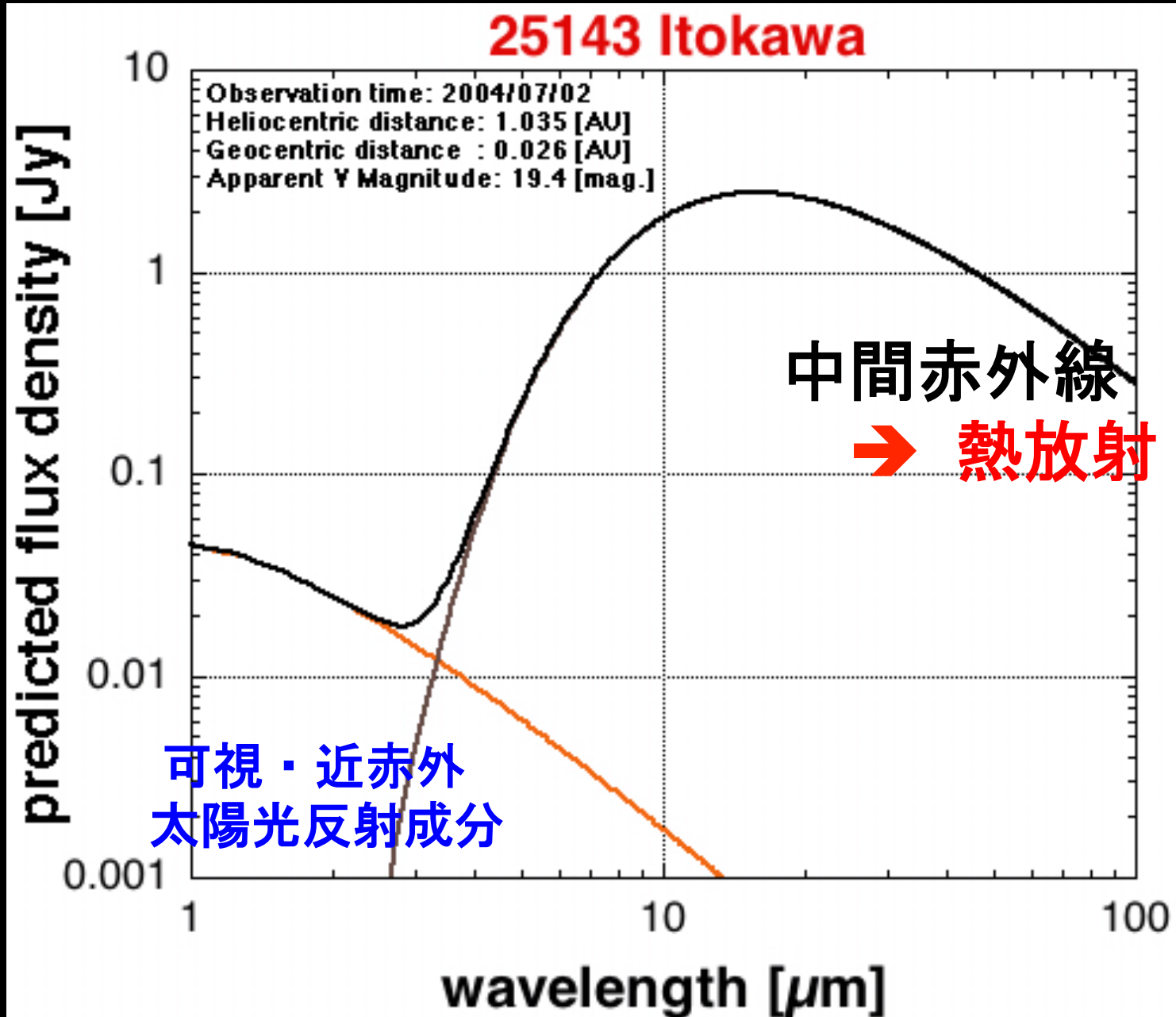


[表面積]



2) (太陽光反射フラックス) $\propto \pi r^2$ [断面積] $\times$ [アルベド] p_v

中間赤外線観測 ⇒ 熱放射の観測



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

ESO 3.6m望遠鏡



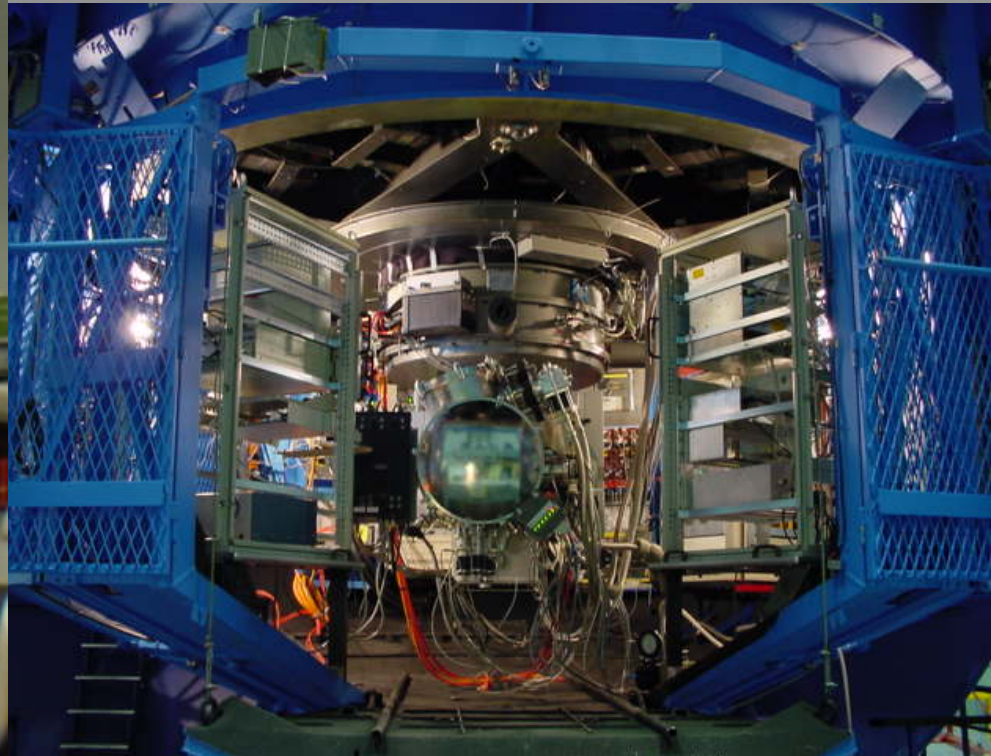
中間赤外観測装置 TIMMI2

Nバンド測光観測

Sekiguchi et al.2003

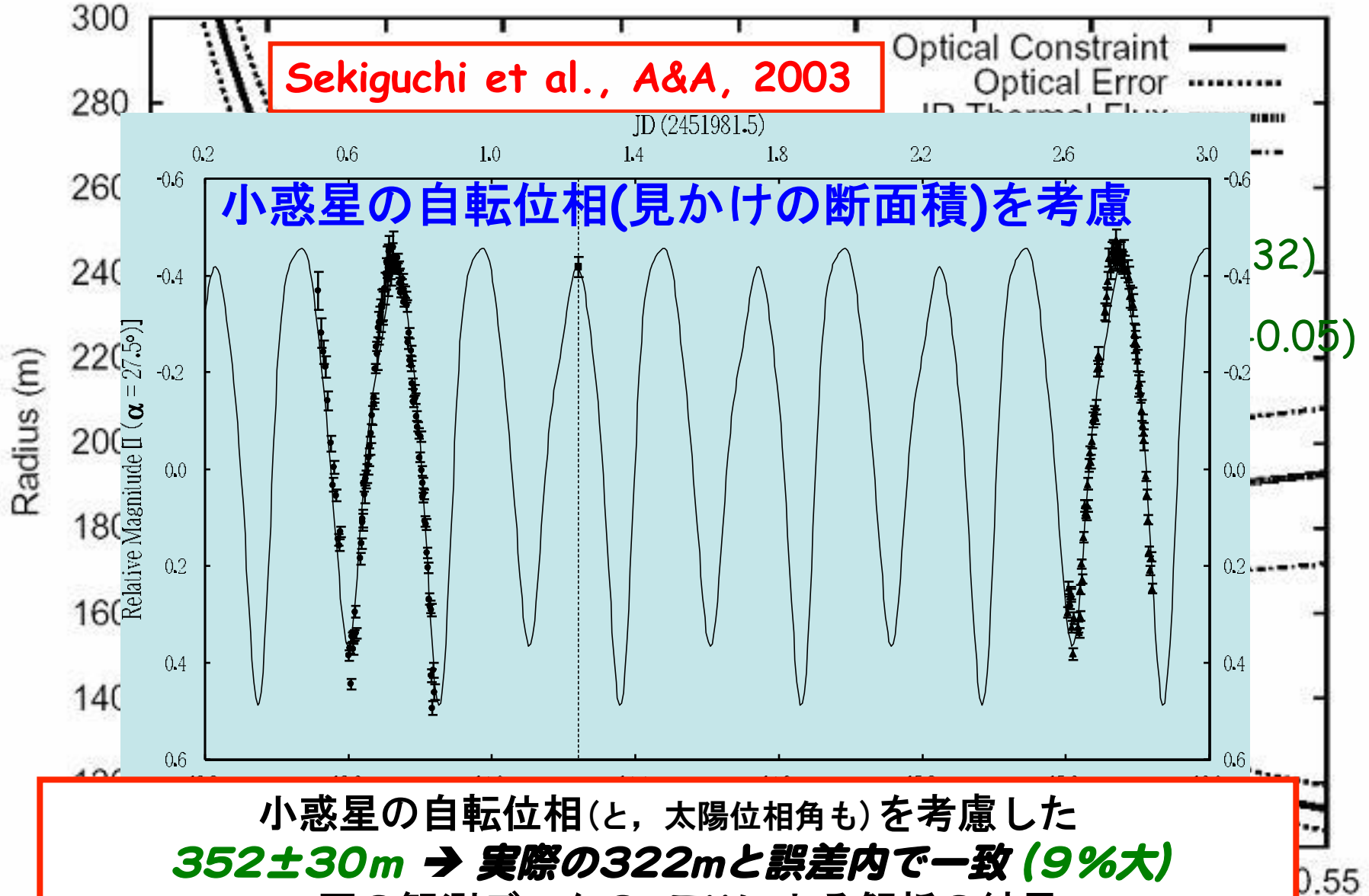
N・Qバンド測光観測

Mueller, Sekiguchi et al.2005



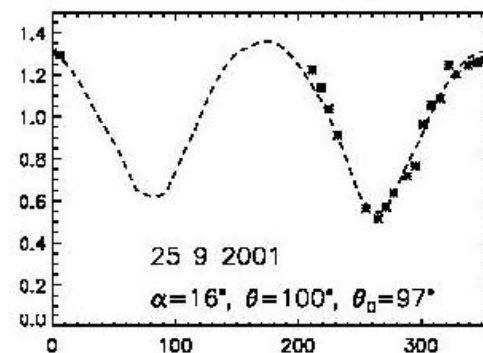
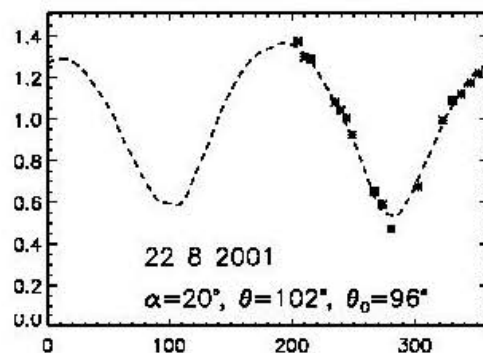
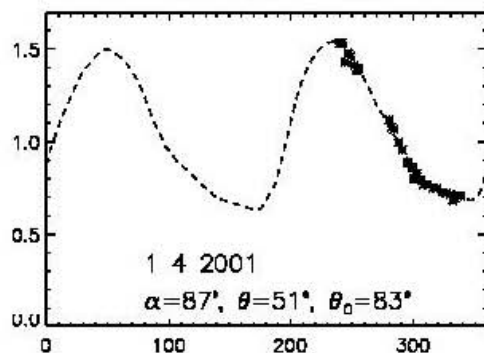
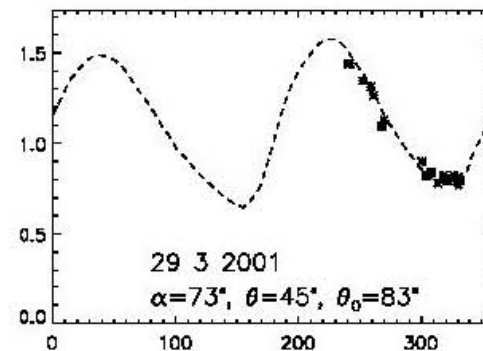
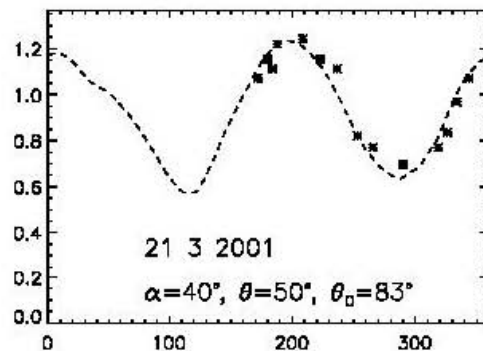
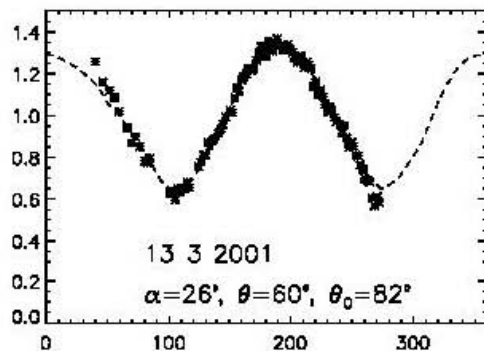
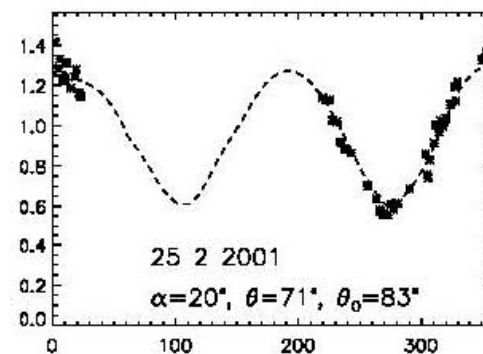
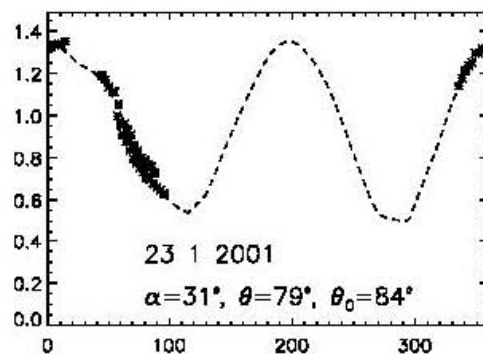
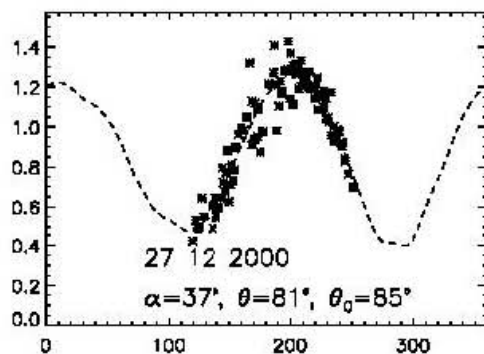
Itokawaのサイズとアルベドの導出

Sekiguchi et al., A&A, 2003



小惑星の自転位相(と、太陽位相角も)を考慮した
 $352 \pm 30m \rightarrow$ 実際の $322m$ と誤差内で一致 (9%大)
一回の観測データのSTMによる解析の結果

可視のライトカーブ(連続測光)観測から形状を求める

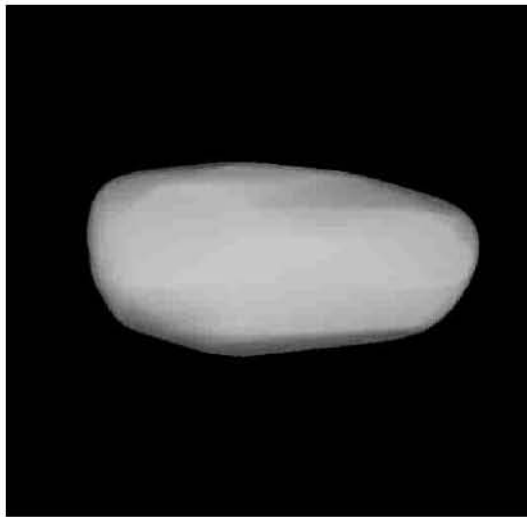


可視のライトカーブ(連続測光)観測による形状の推定

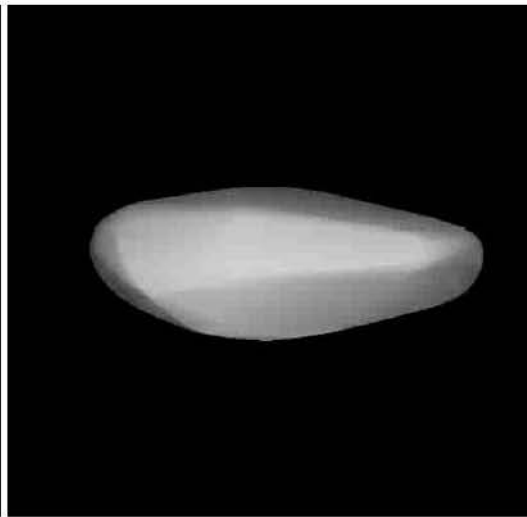
Kaasaleinen et al. 2003, Kaasaleinen et al. 2005

黄道面に対して

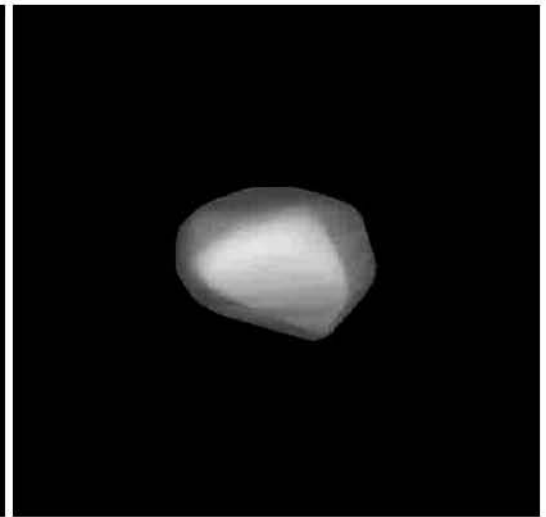
横から見た形状



上から見た形状



横から90°回転



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

TPM: ThermoPhysical Model of 951 Gaspra



Mueller & Lageros, 2002

- エネルギーバランス (太陽光入射 = 表面反射 + 熱放射)
- 観測時の幾何学的位置関係、距離、位相角

- 自転位相

- 小惑星の形状モデル
- 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)

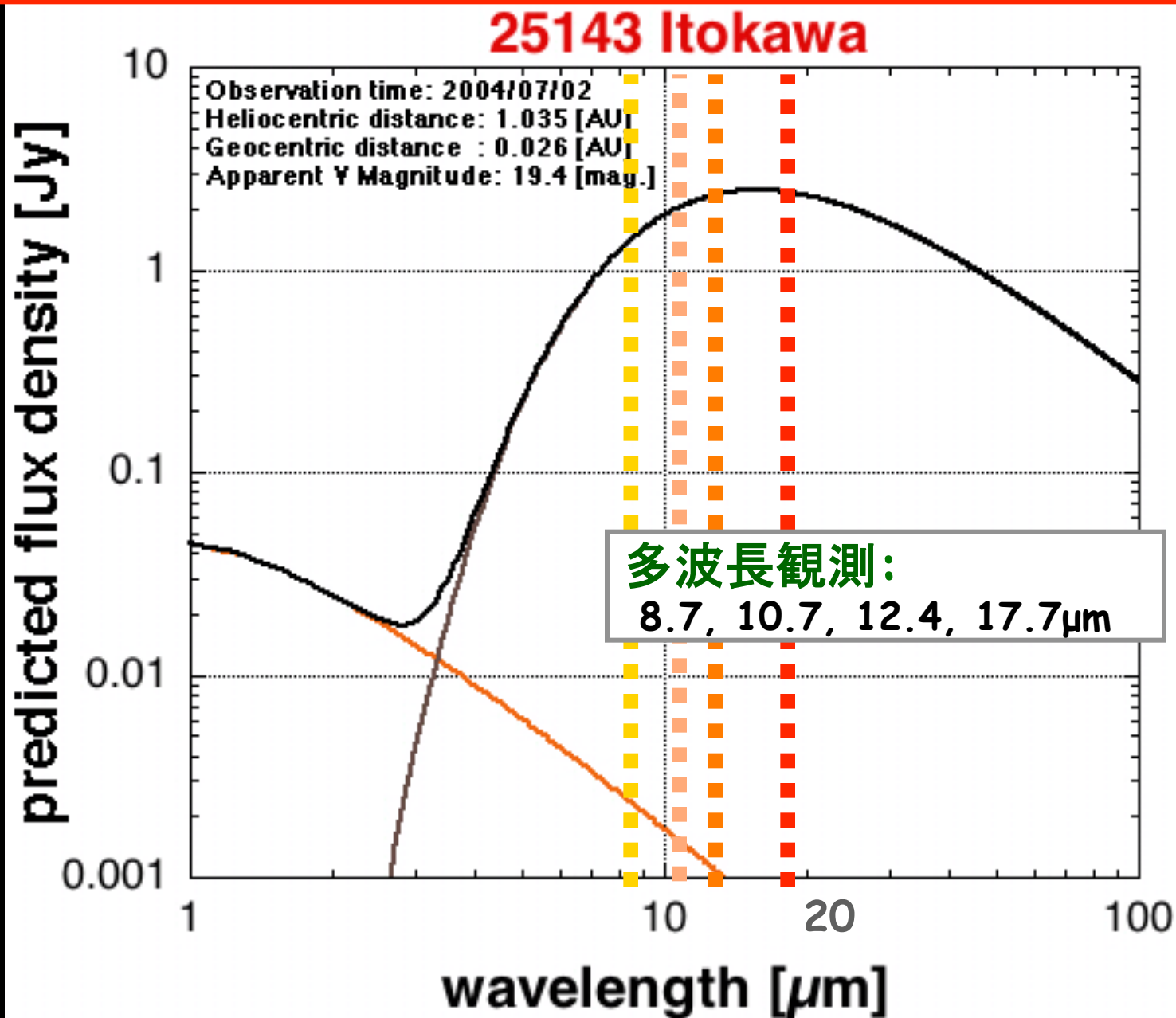
ESO 3.6m + TIMMI2による多波長, 広位相角, 多数回の中間赤外観測

No	Mid-Time (Day UT)	波長 Filter 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	"

中間赤外線観測

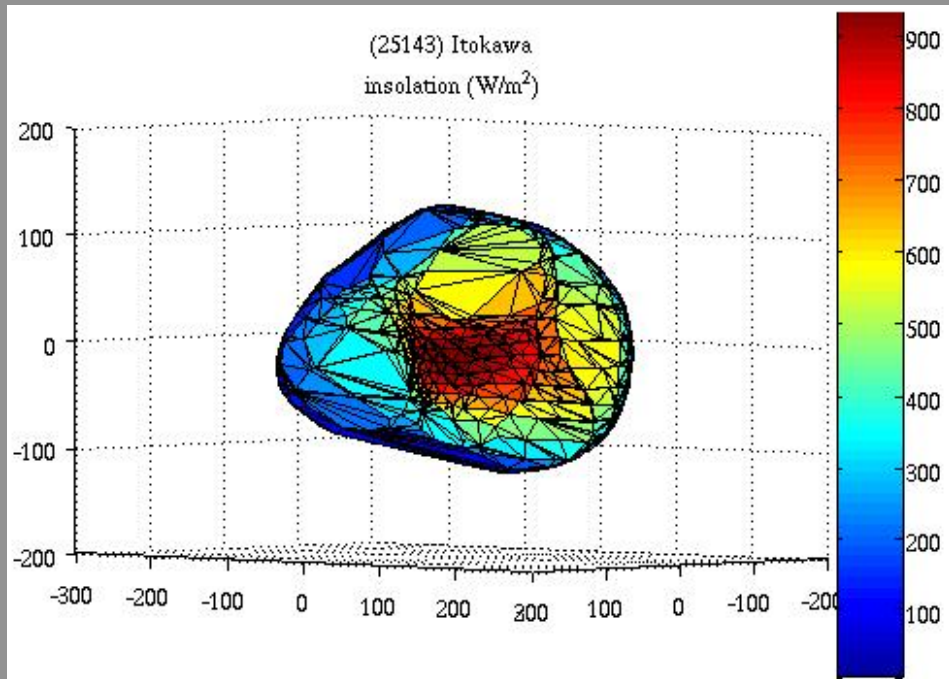


熱放射の観測

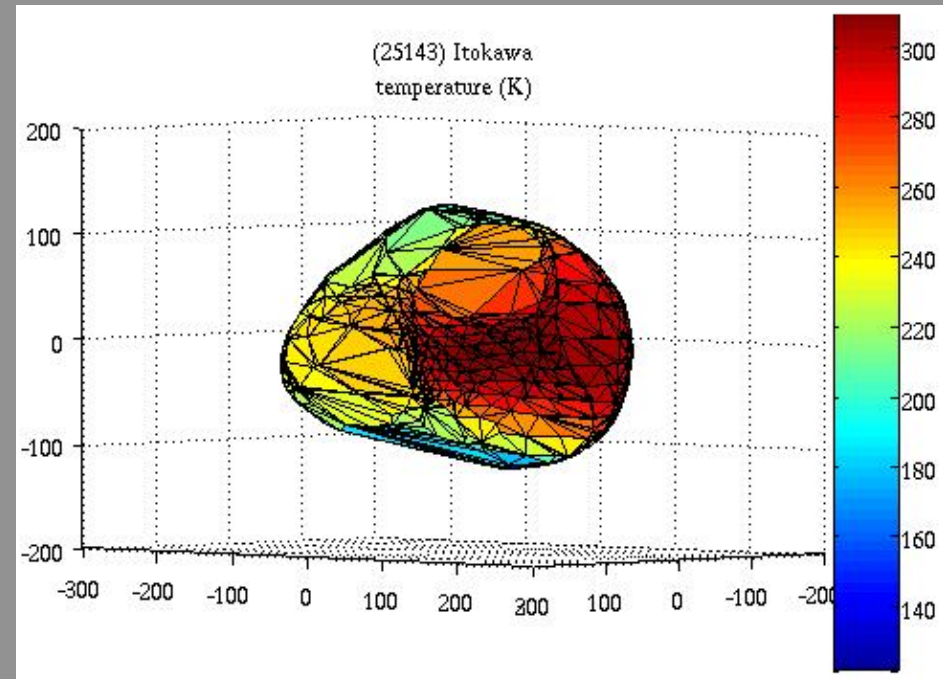


Itokawa の ThermoPhysical Model

太陽光入射フラックス



入射光と自転に対する温度分布

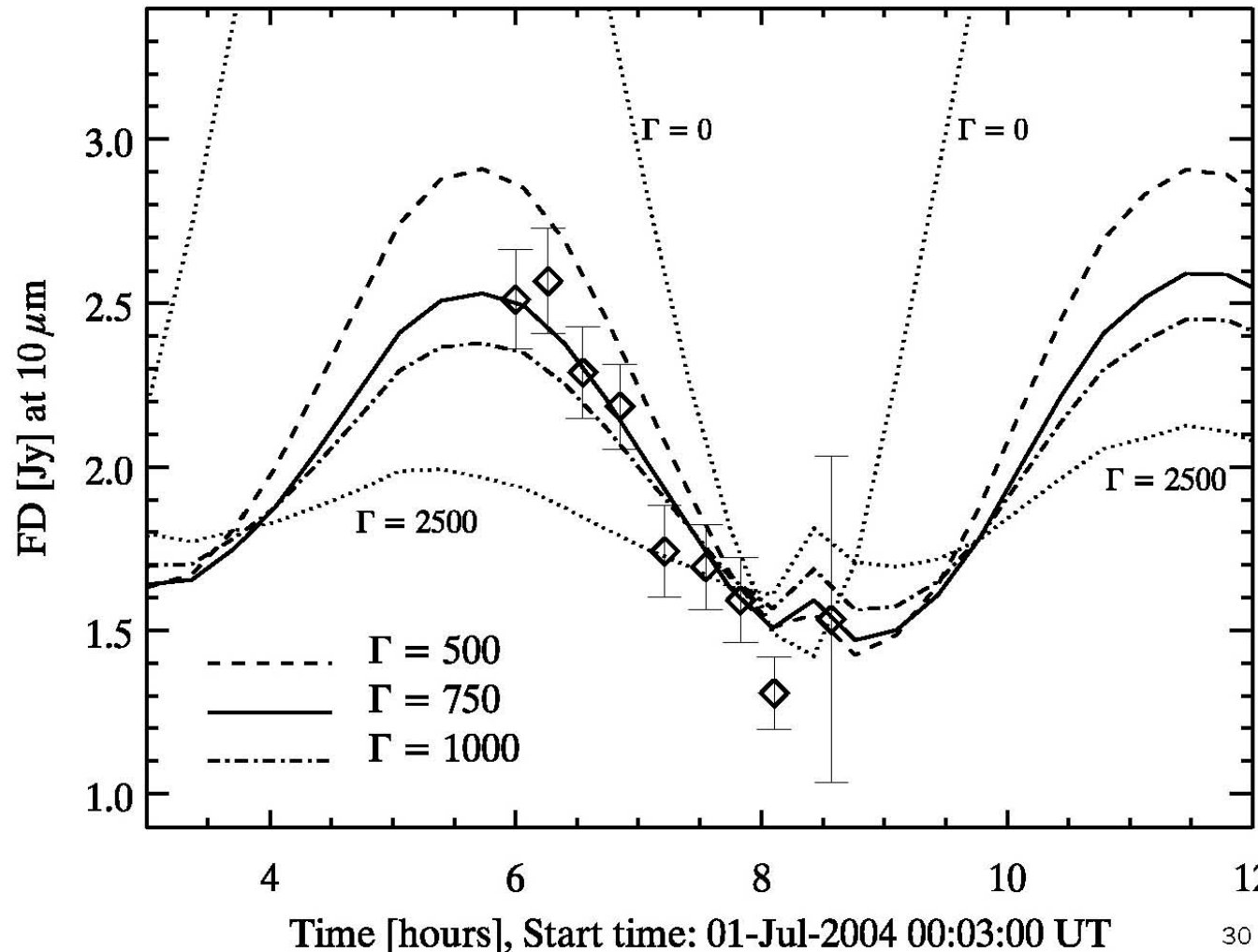


Mueller, Sekiguchi et al., A&A, 2005

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

熱慣性値

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



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

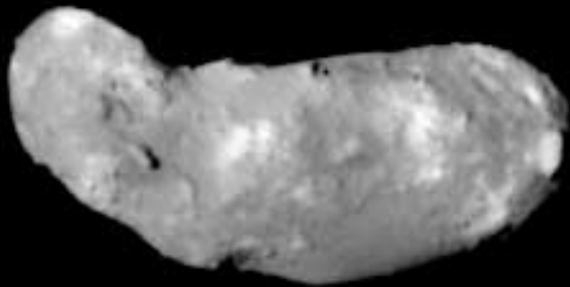
・月
 $\Gamma = 39$
(Keihm 1984)

・Itokawa
 $\Gamma = 750$

・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

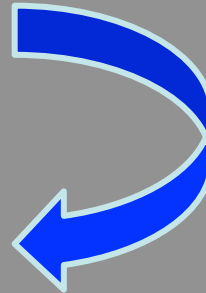
our study : 520x270x230m
(+/-50) (+/-30) (+/-20)

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

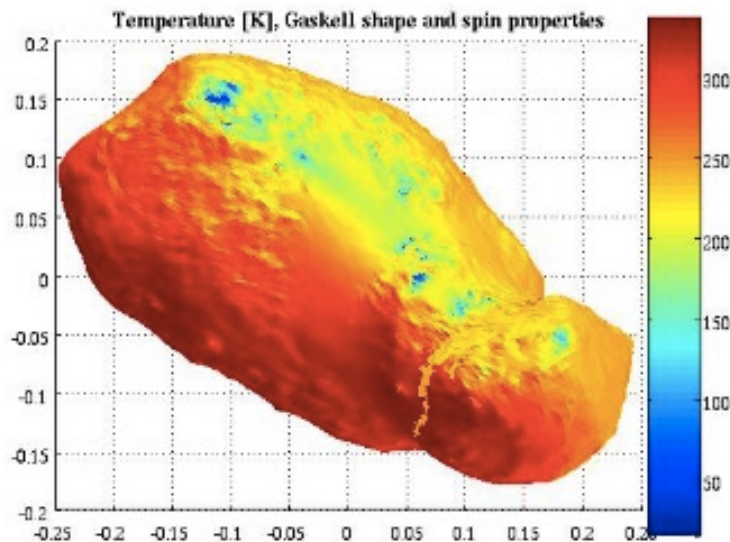
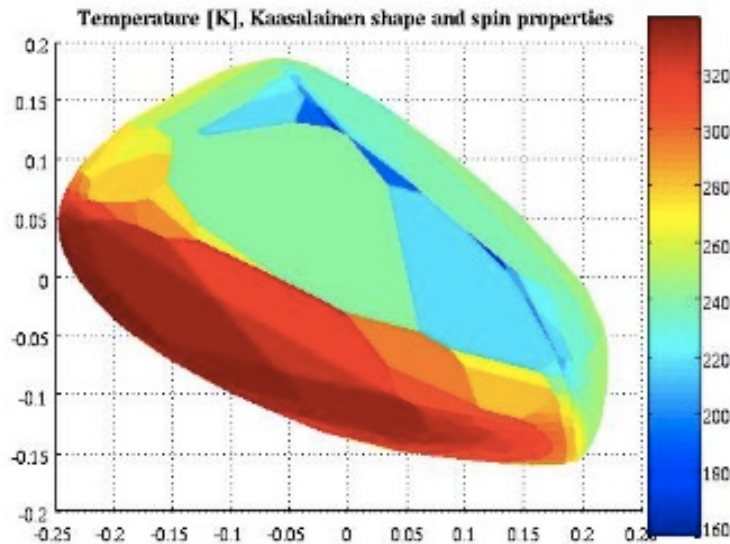
Itokawa の熱モデルの答え合わせ

入射光と自転に対する温度分布

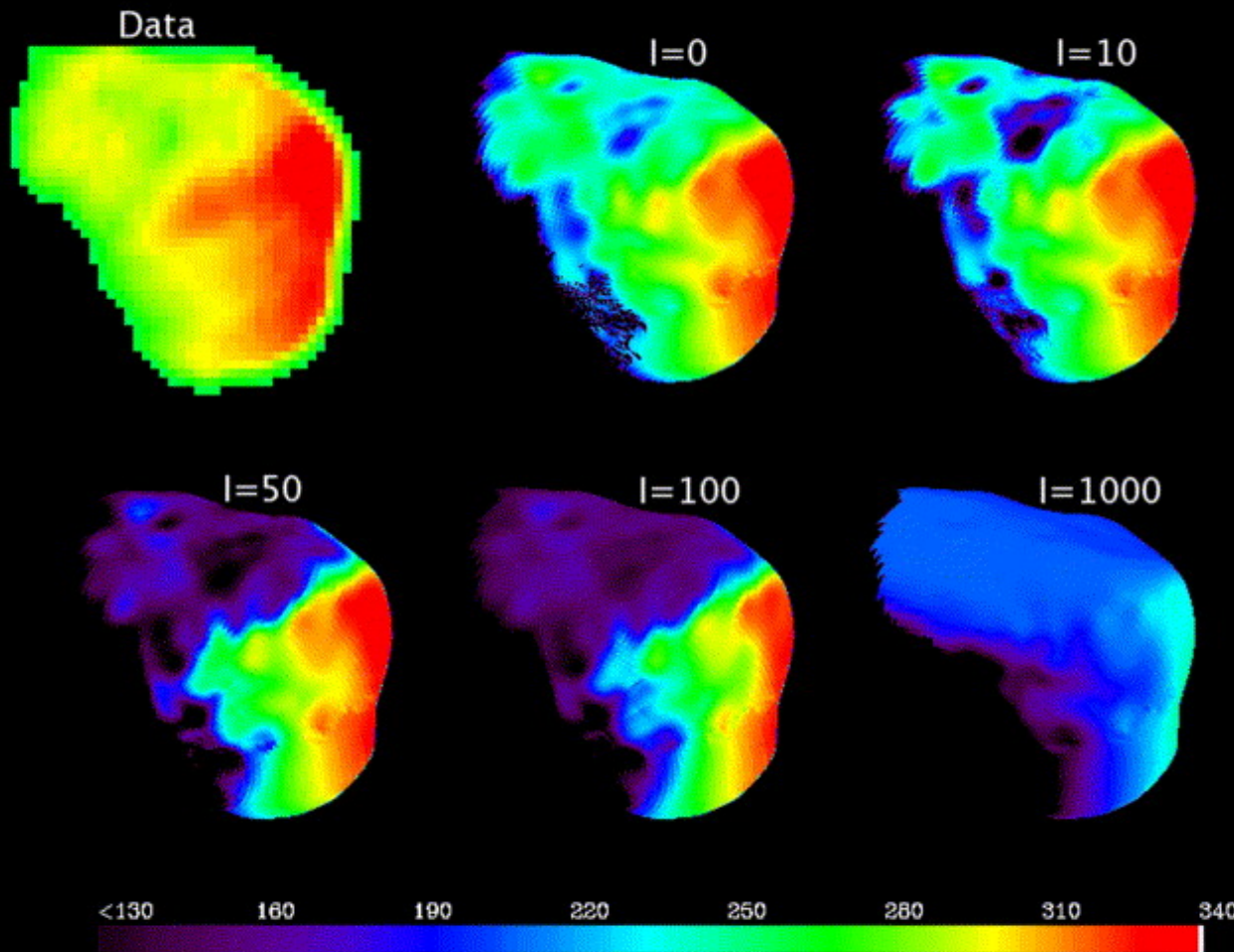
Mueller, Sekiguchi, Kasalainen, Abe, Hasegawa, 2005



Mueller, Usui, Hasegawa, 2014



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



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

Deep Impact探査機

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

人類の偉大なる一歩から読み取る月のレゴリス

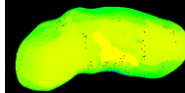


"That's one small step for a man, one giant leap for mankind."
Neil Alden Armstrong



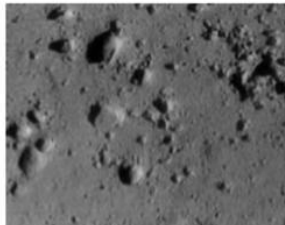
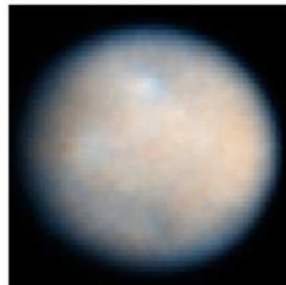
- 表面の土砂の空隙率や砂利の粒径を推定
はやぶさ2のTIR (Thermal InfraRed Imager)サイエンスへ

熱慣性 vs. 表層物理状態

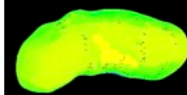


熱慣性: Γ [J m ⁻² s ^{-0.5} K ⁻¹]	表層物理状態
~ 10	超高空隙率の微細粒(~80%)?, セレス、火星の砂
~ 50	微細粒: 月レゴリス (粒径 50 ~ 100 μ m)
100 ~ 200	砂(d ~mm): 433Eros
200 ~ 400	砂利 (d ~cm): 25143Itokawa's Muses-Sea Regio
400 ~ 1000	岩片、岩石破片 (d < m): Itokawa's rough terrain
1000 ~ 2000	多孔質岩石
2000 ~	稠密な岩石

はやぶさ2 赤外線カメラ(TIR)の目的

25143 Itokawa	433 Eros	The moon	1 Ceres
$\Gamma = 600$	$\Gamma = 150$	$\Gamma = 50$	$\Gamma = 10$
			
Coarse regolith and boulders	Finer and thicker regolith	Mature and fine regolith	Very fine regolith ??

TIRの仕様緒元

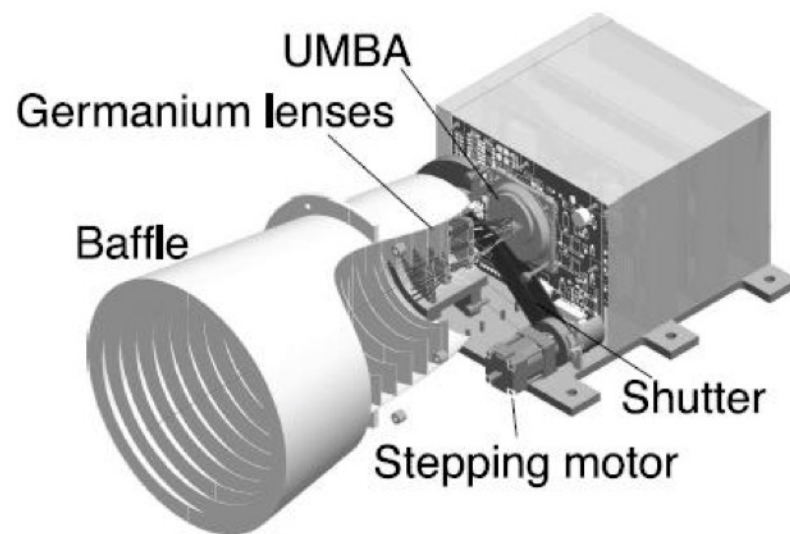
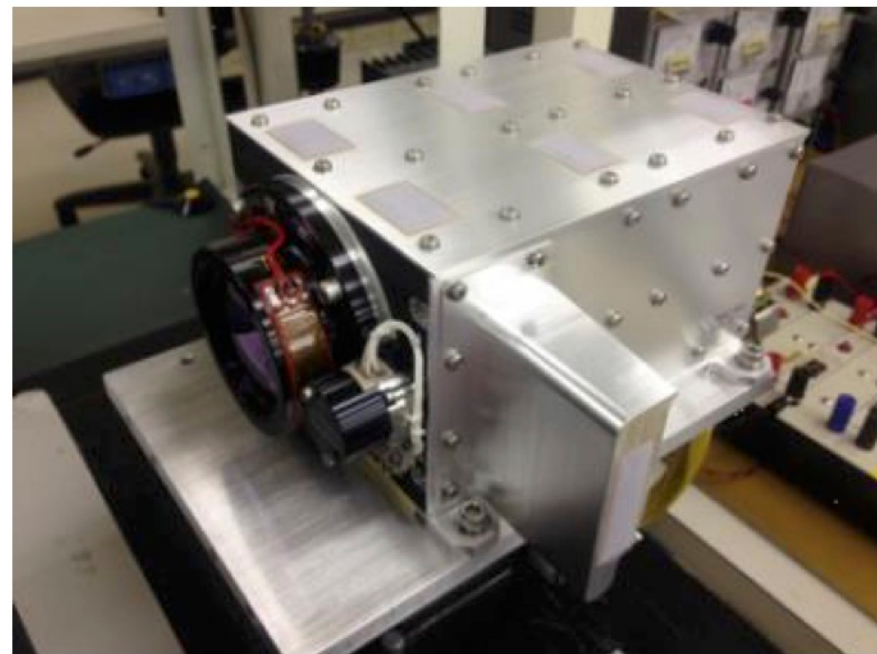


開発コンセプト

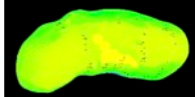
- ・小惑星サーモグラフィ: 広い温度範囲
- ・非冷却ボロメータ使用: 小型軽量化
- ・「あかつき」LIRと同設計: 短期開発
- ・積算: $M=1$ 枚/60秒 $\times$ 2^m 枚 ($m=0\sim7$)
 $N=2^n$ 枚 ($n=0\sim7$ 枚)

Table. Specifications of TIR (at EOL)

Mass	3280 g
Power	22W
Detector	NEC 320 bolometer (AR coating)
Wavelength	8-12 μ m
FOV	16° $\times$ 12°
IFOV	0.877mrad = 0.05°
Detection range	250-400K
Pixel numbers	344 $\times$ 260 (effective 320 $\times$ 240)
Temp. resolution	< 0.5K (@350K), < 0.6K (@250K)
Abs. temp accuracy	< 5K (@350K), < 6K (@250K)
Ge Lens F-value	1.4
MTF (@nyquist freq)	> 0.3
A/D Conversion	12 bit



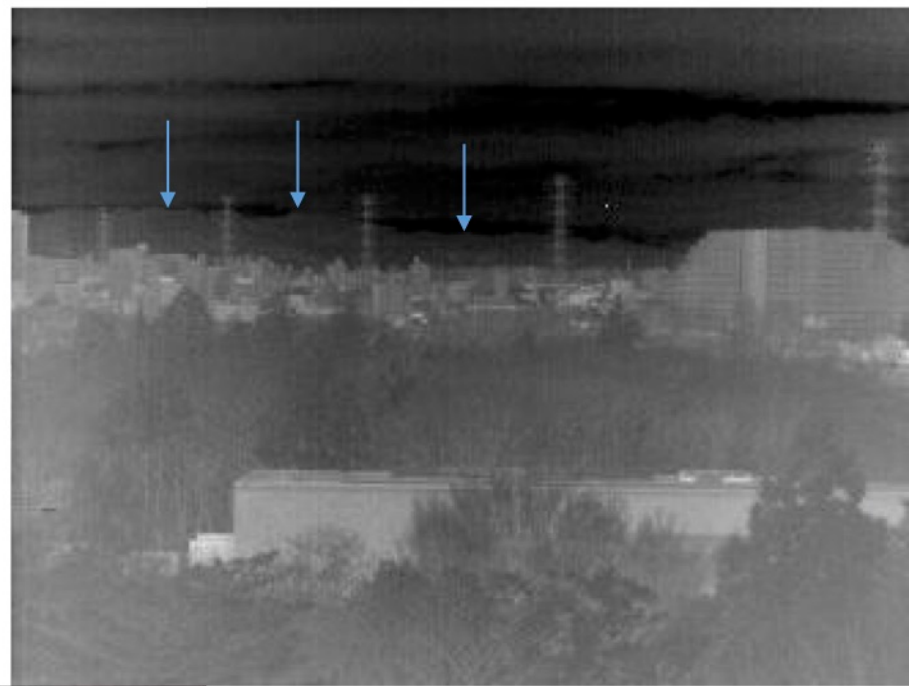
TIRによる風景写真(相模原市)

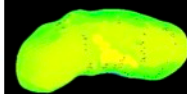


<デジカメ>



<TIR>





★天体自転に伴う温度変化と熱慣性

1999JU3 (P=7.6 Hr, D_{sun}=1AU)

- Max / Min 温度
- 最高到達温度の時間遅れ.

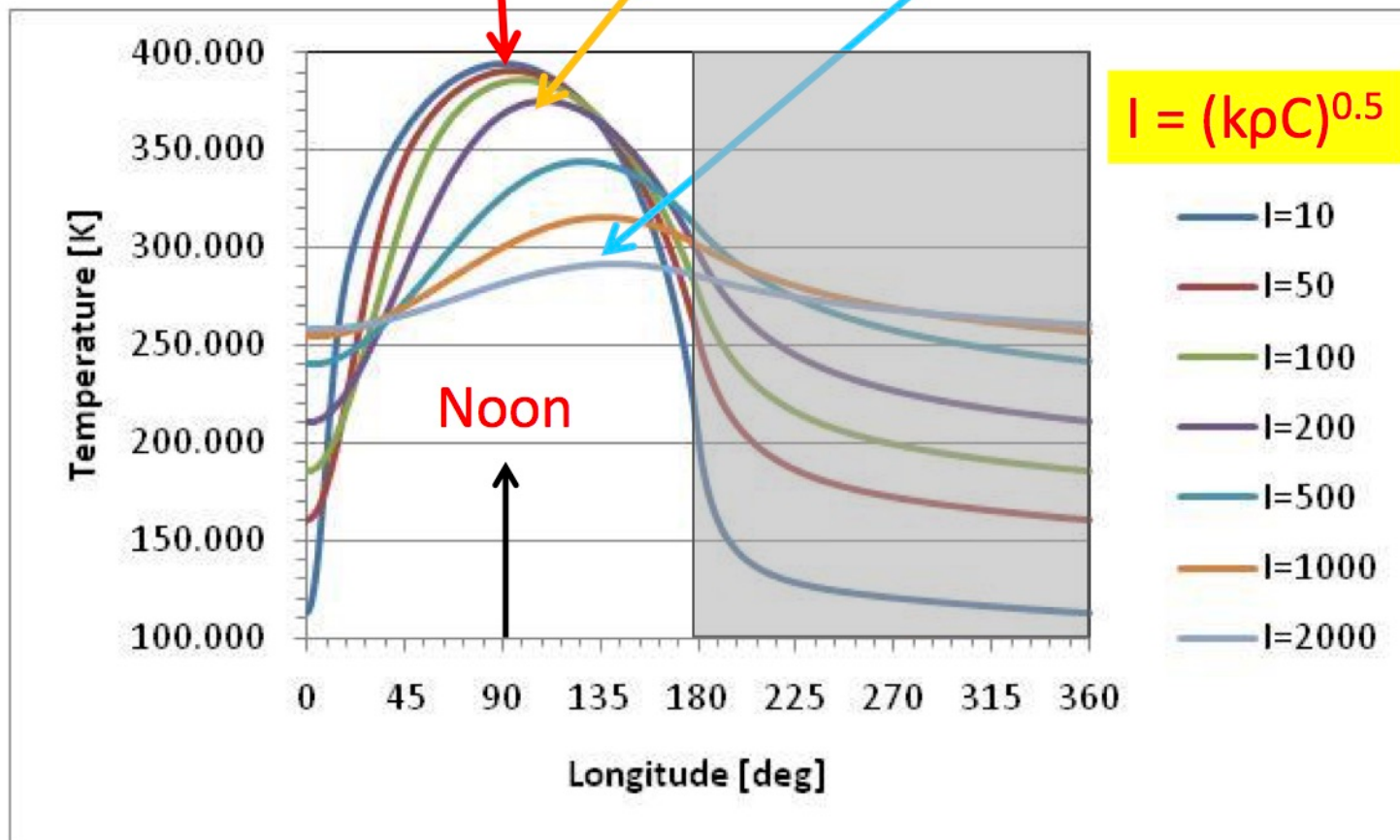
微細粒
(I =50)

砂利
(I =200)

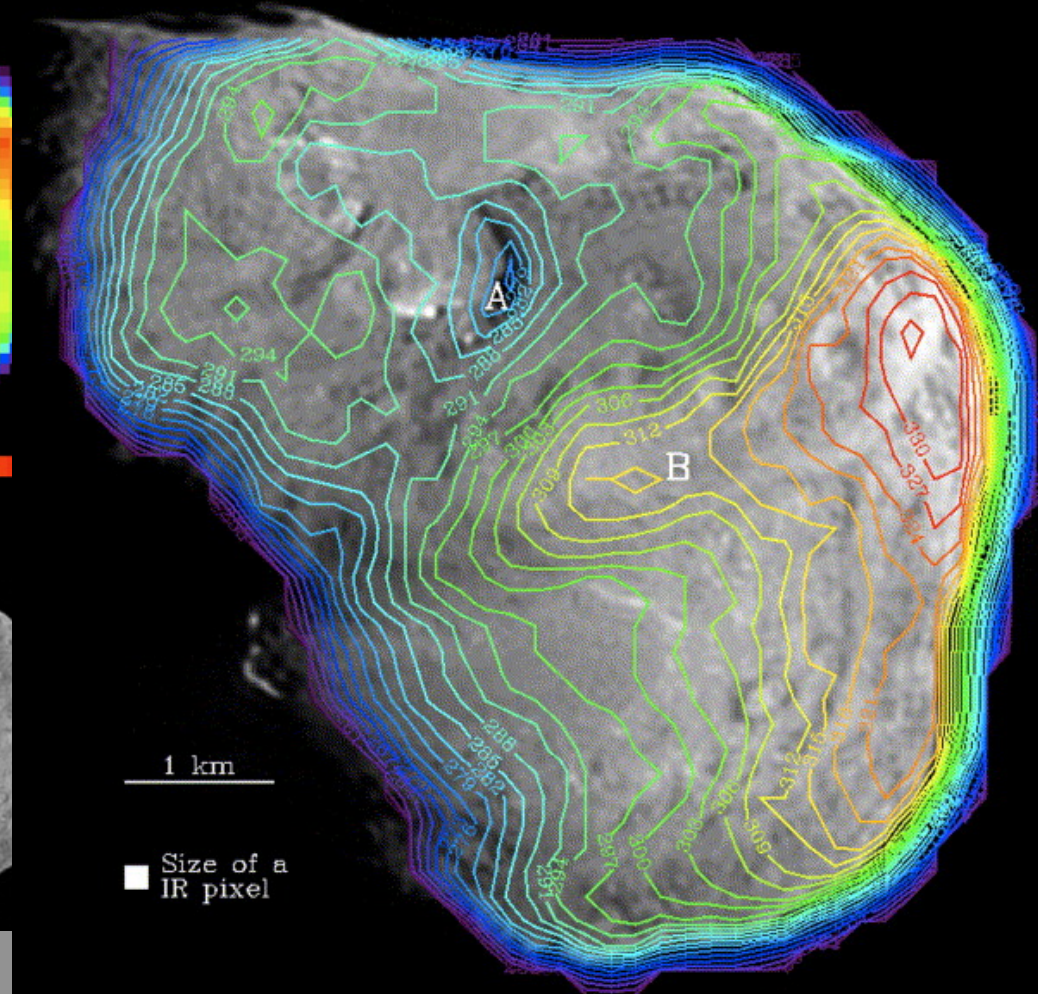
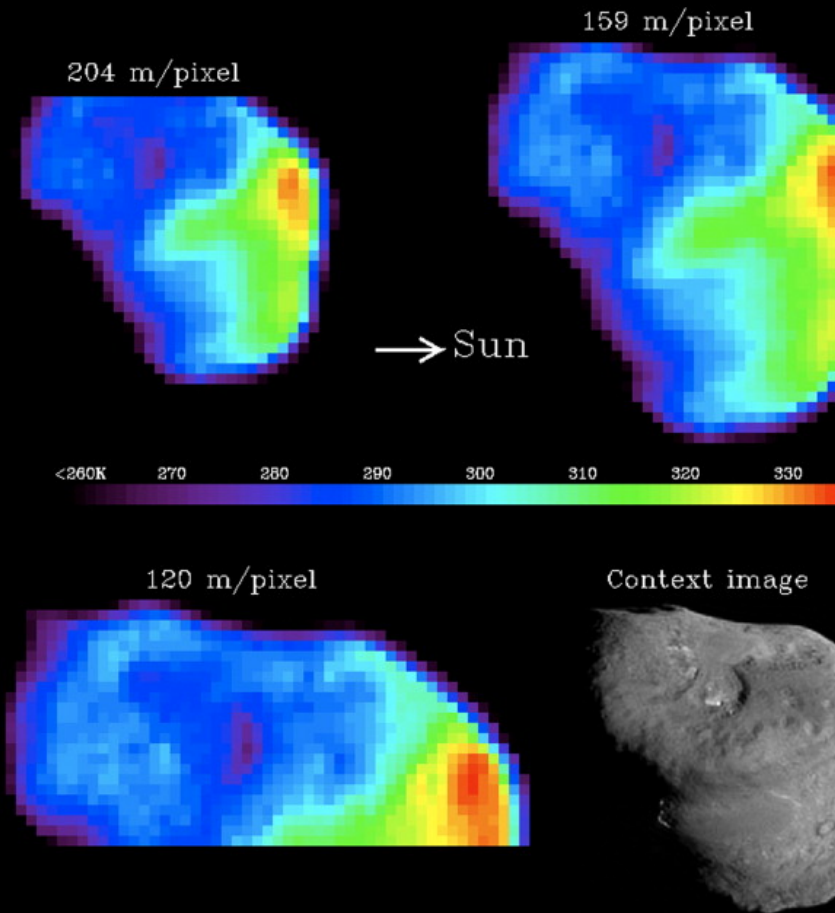
岩石
(I >1000)



Earth



彗星核の温度マッピング: 探査機 Deep impact



Groussin et al. 2007

Mini-TAOによる小惑星の熱放射観測

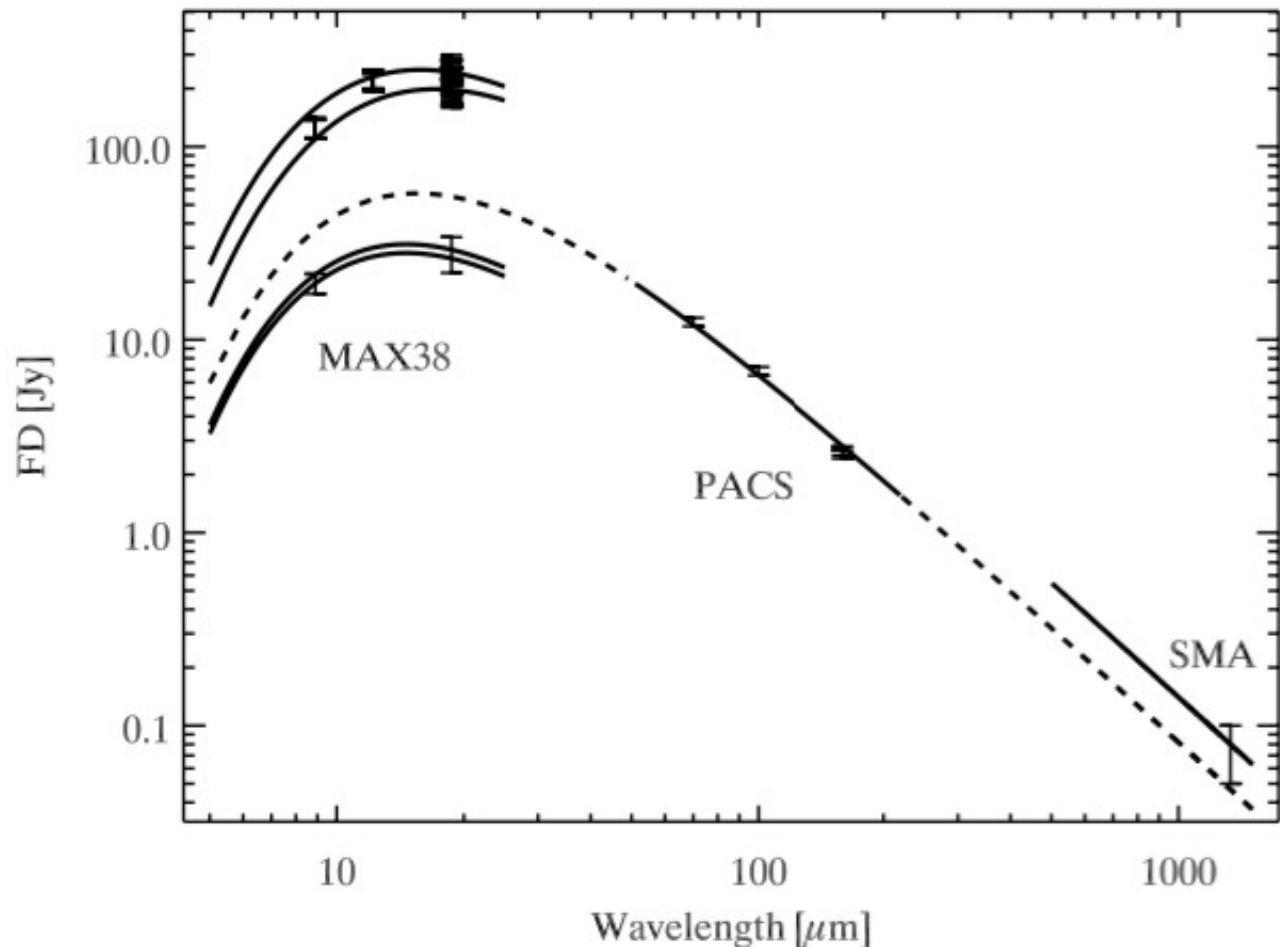
多波長

Mini-TAO (7.9, 8.8, 9.7, 10.3, 11.6, 12.5, 18.5 μm)

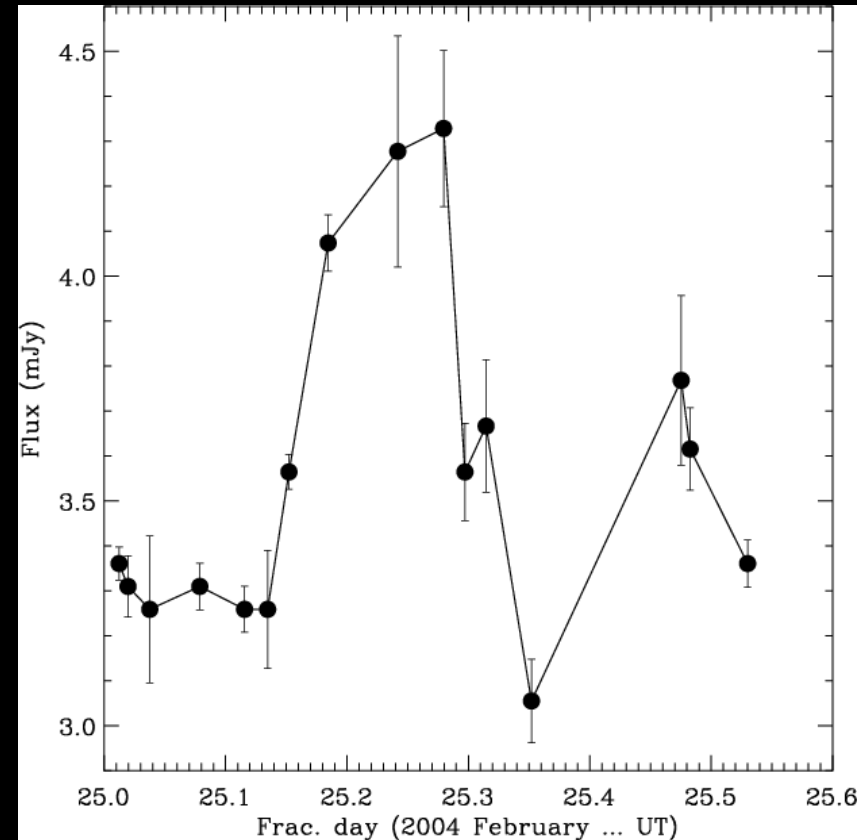
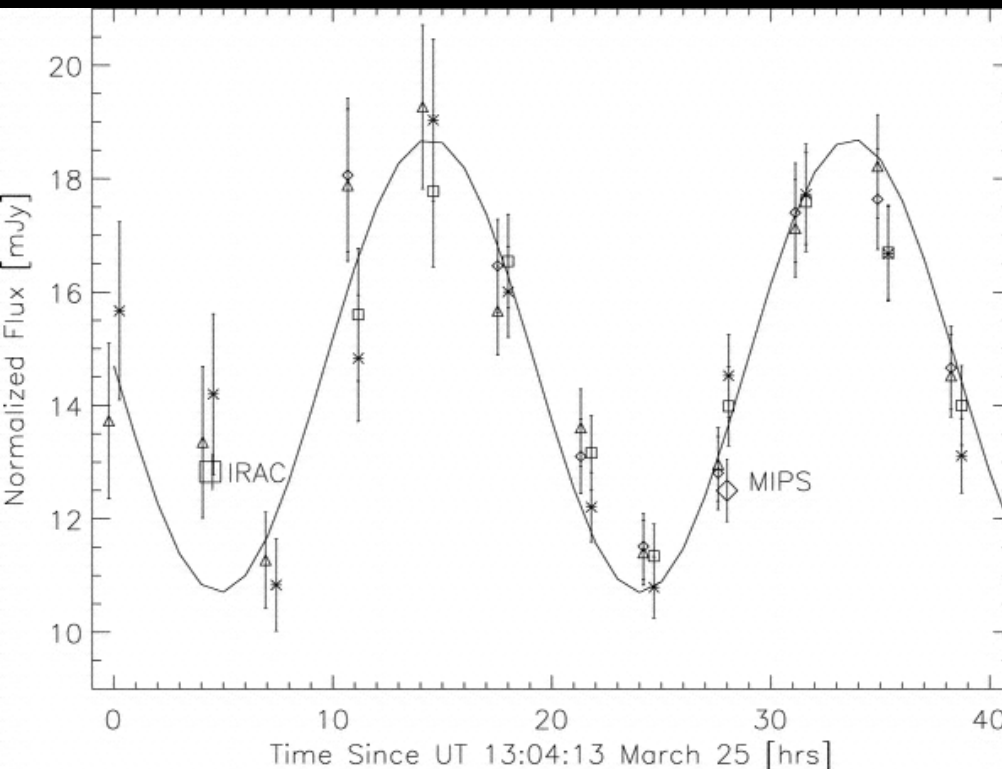
Herschel (70, 100, 160 μm)

SMA (1300-1359 μm)

Mueller, Miyata et al. (2013)



裸の(?) 彗星核の熱放射ライトカーブ

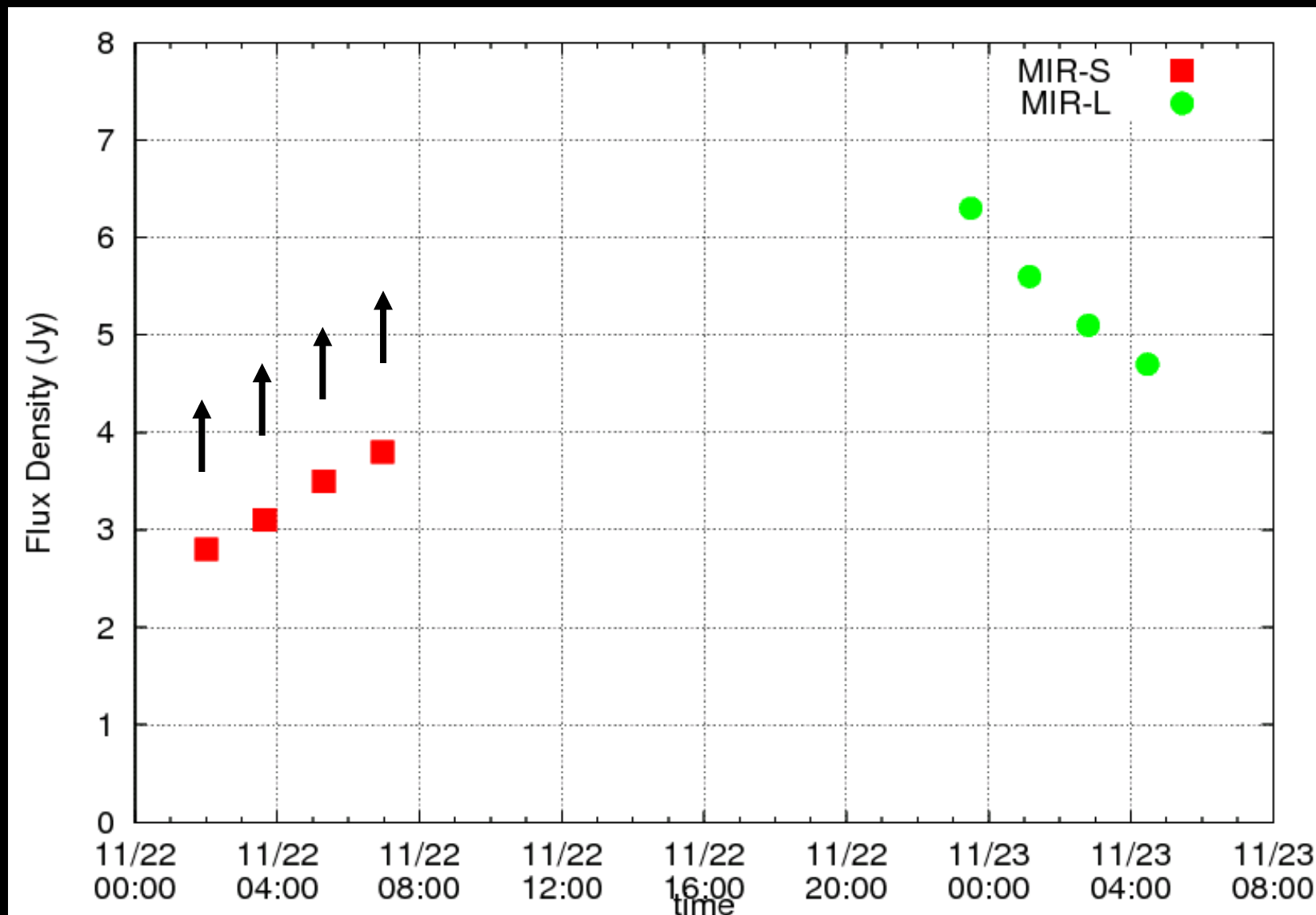


Rotationally Resolved 8 35 Micron *Spitzer* Space Telescope Observations of the Nucleus of Comet 9P/Tempel 1
Lisse et al. (2005)

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

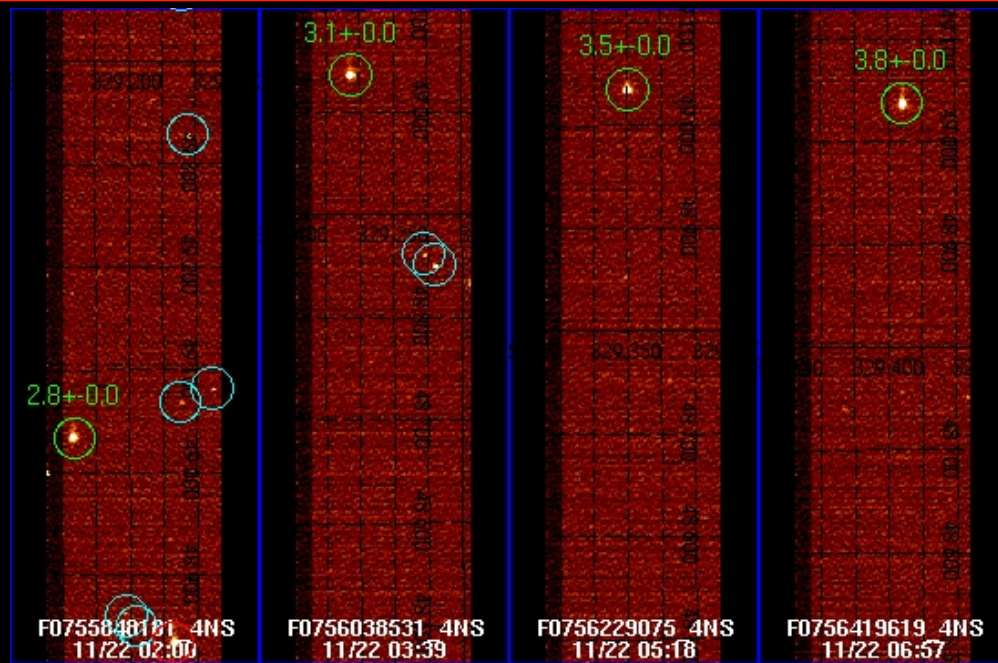
Spitzer 宇宙望遠鏡による二例のみ

裸の彗星核 (P/2006 HR30): 熱放射ライトカーブ



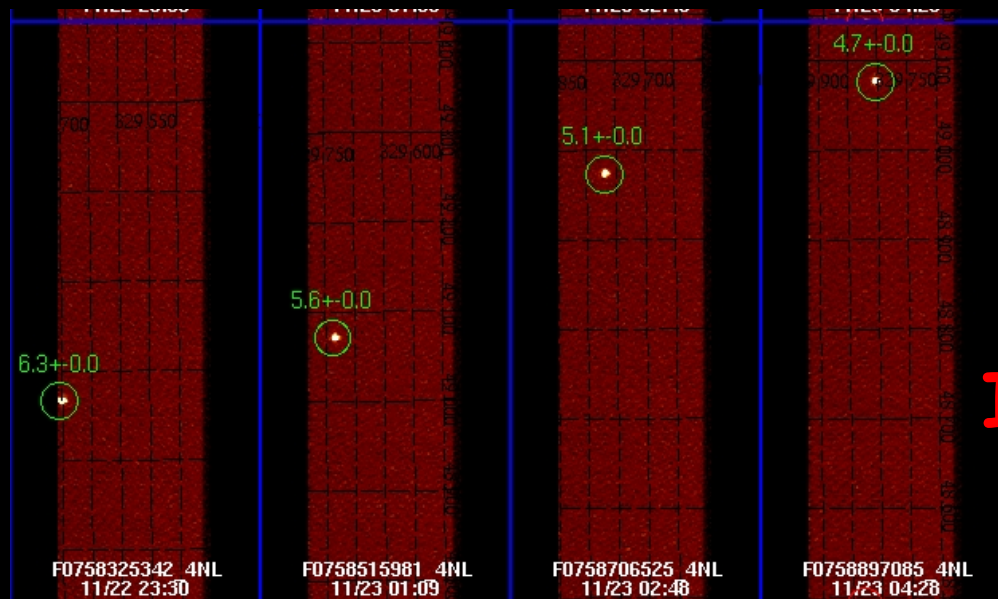
The Third result of thermal lightcurve for cometary nucleus
1) Deep Impact spacecraft, 2) Spitzer-S.T.

あかりの中間赤外線全天サーベイデータ



裸の彗星核天体
(太陽系の内側で比較的高温)
の天体

9 μm (MIR-S)
中間赤外短波長



18 μm (MIR-L)
中間赤外長波長

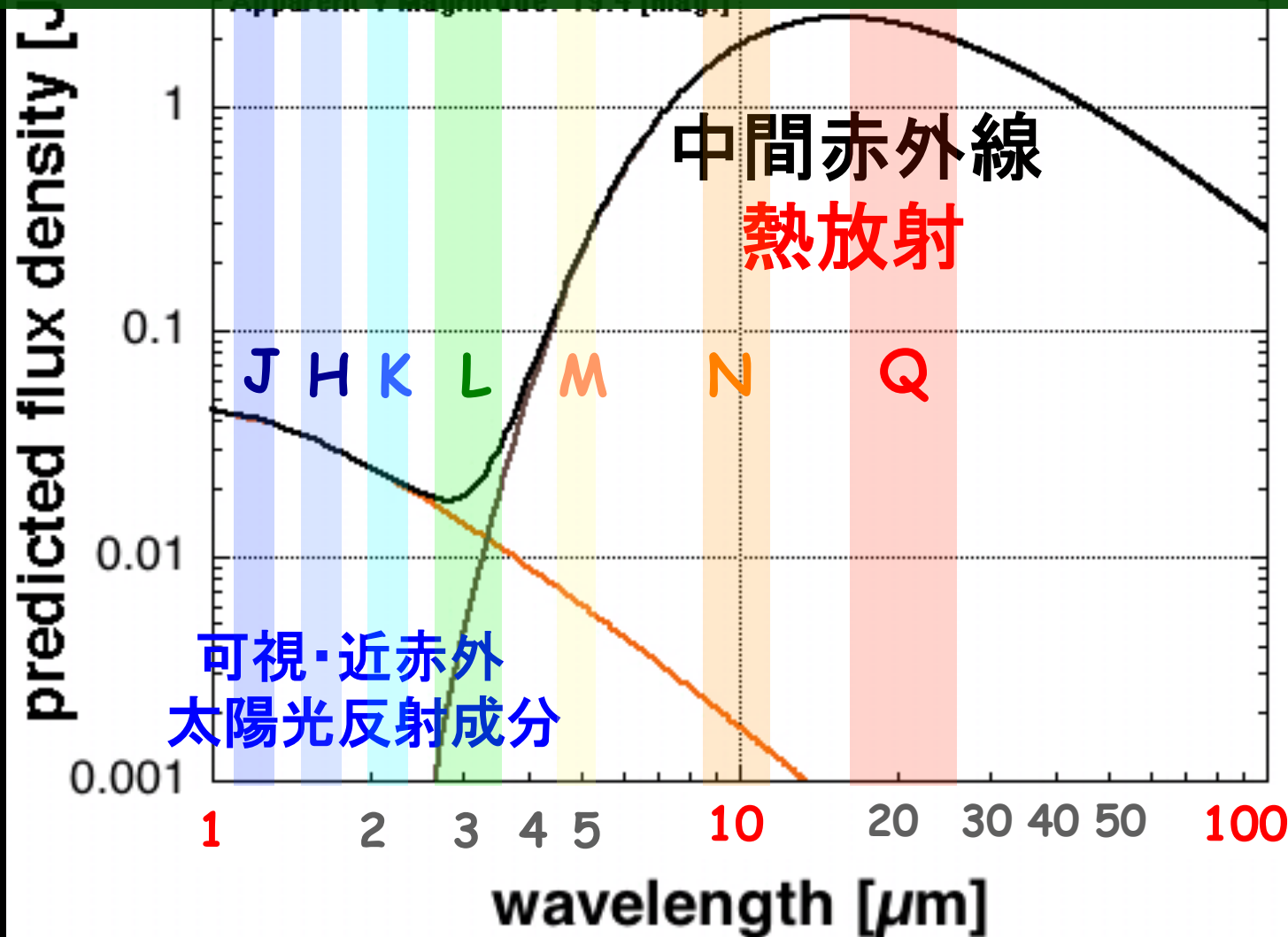
IRCサーベイ

小天体のサイズ&アルベド、表面熱物性を知るために

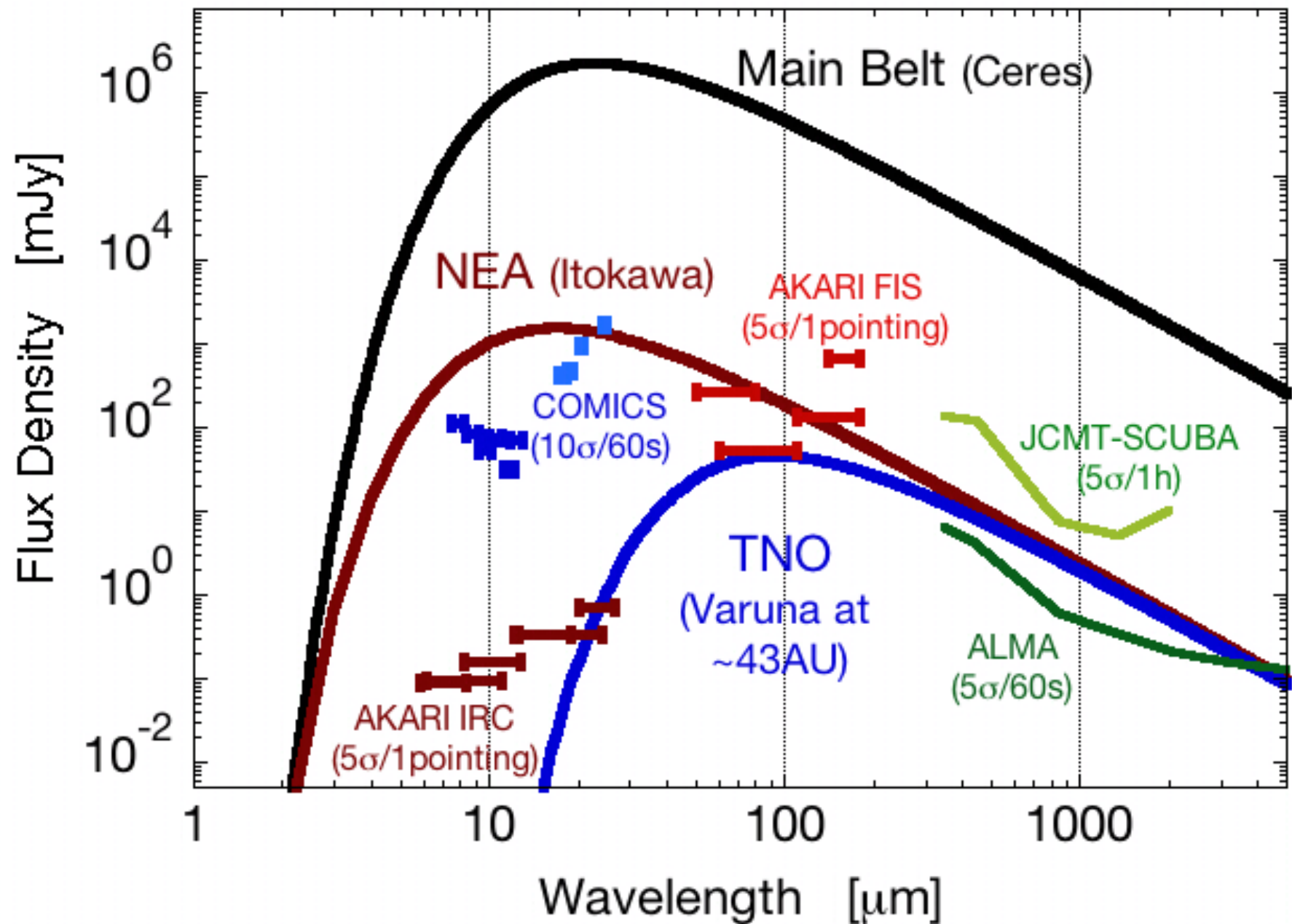
可視光でライトカーブを取って自転を知ろう

赤外線でライトカーブを取って熱放射時間変化を知ろう

まとめ



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



Surface Temperature of minor bodies

