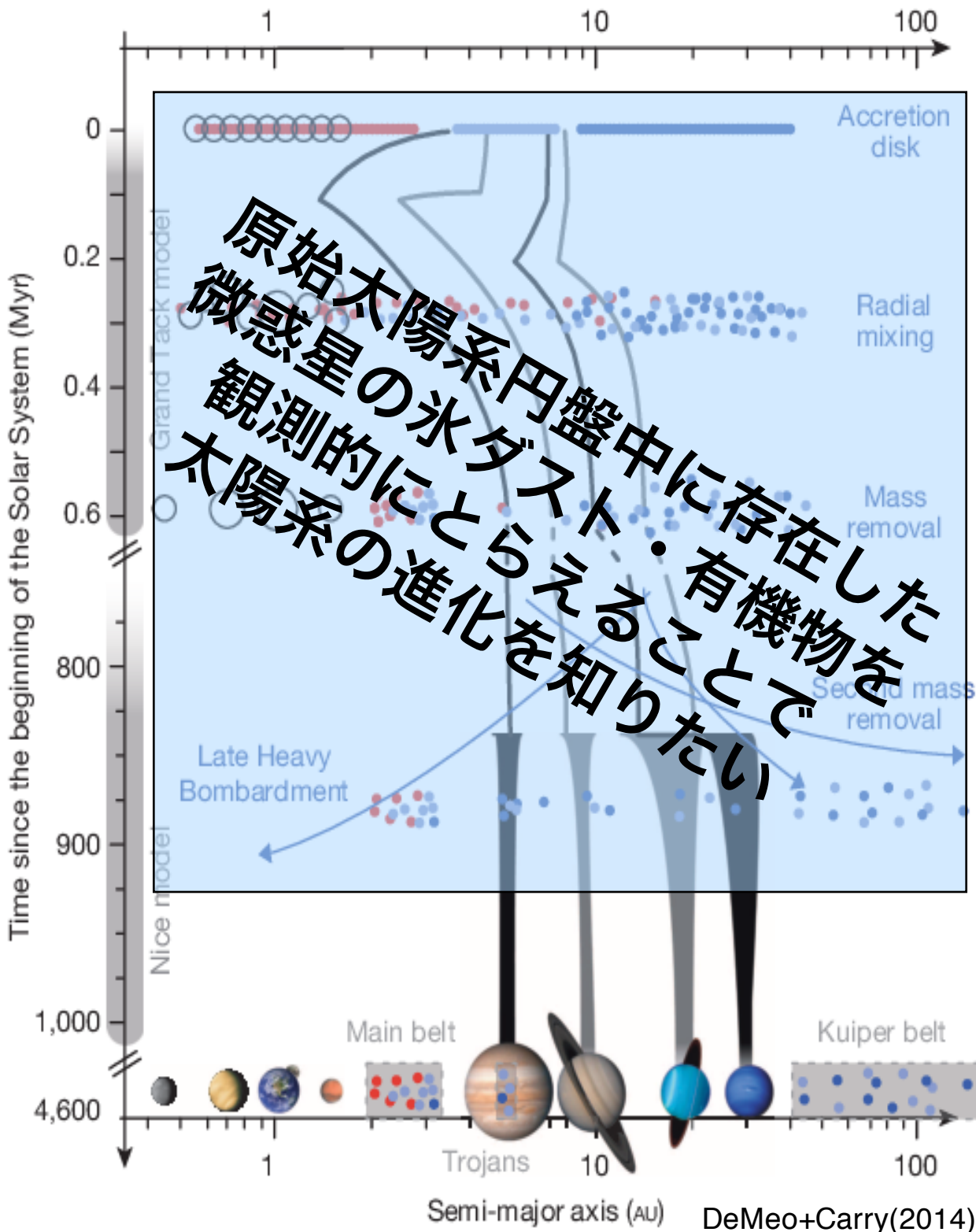
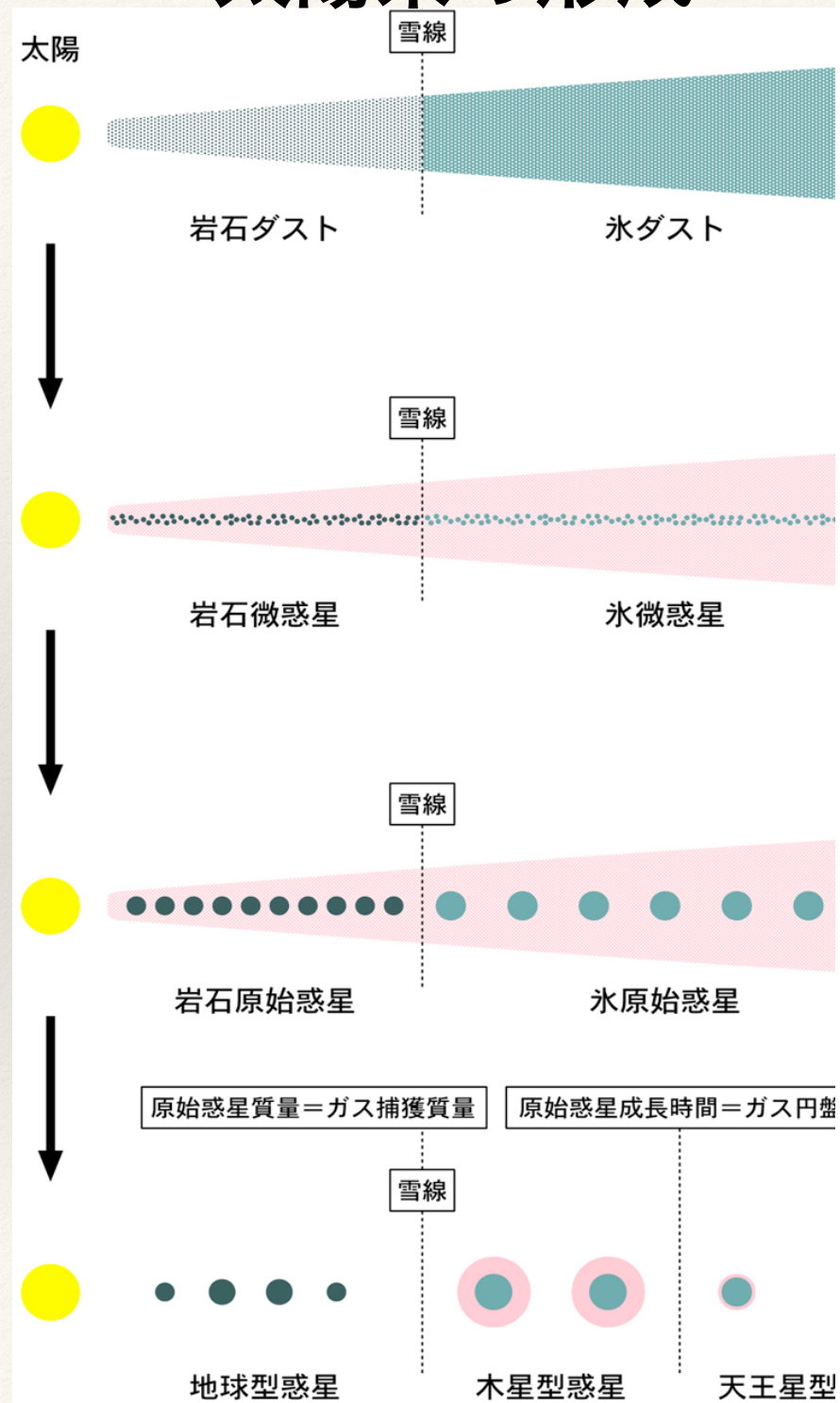


# 氷ダストの赤外線観測で探る 太陽系小天体の進化

大坪 貴文  
(東京大学総合文化)

# 太陽系の形成



# A. 小惑星：岩石小天体

- 表面組成（氷・有機物）探査
- アルベド・サイズ・形状

# B. オールト（長周期）彗星

- 氷、有機物、結晶質鉱物

# C. 木星族（短周期）彗星 ・氷天体

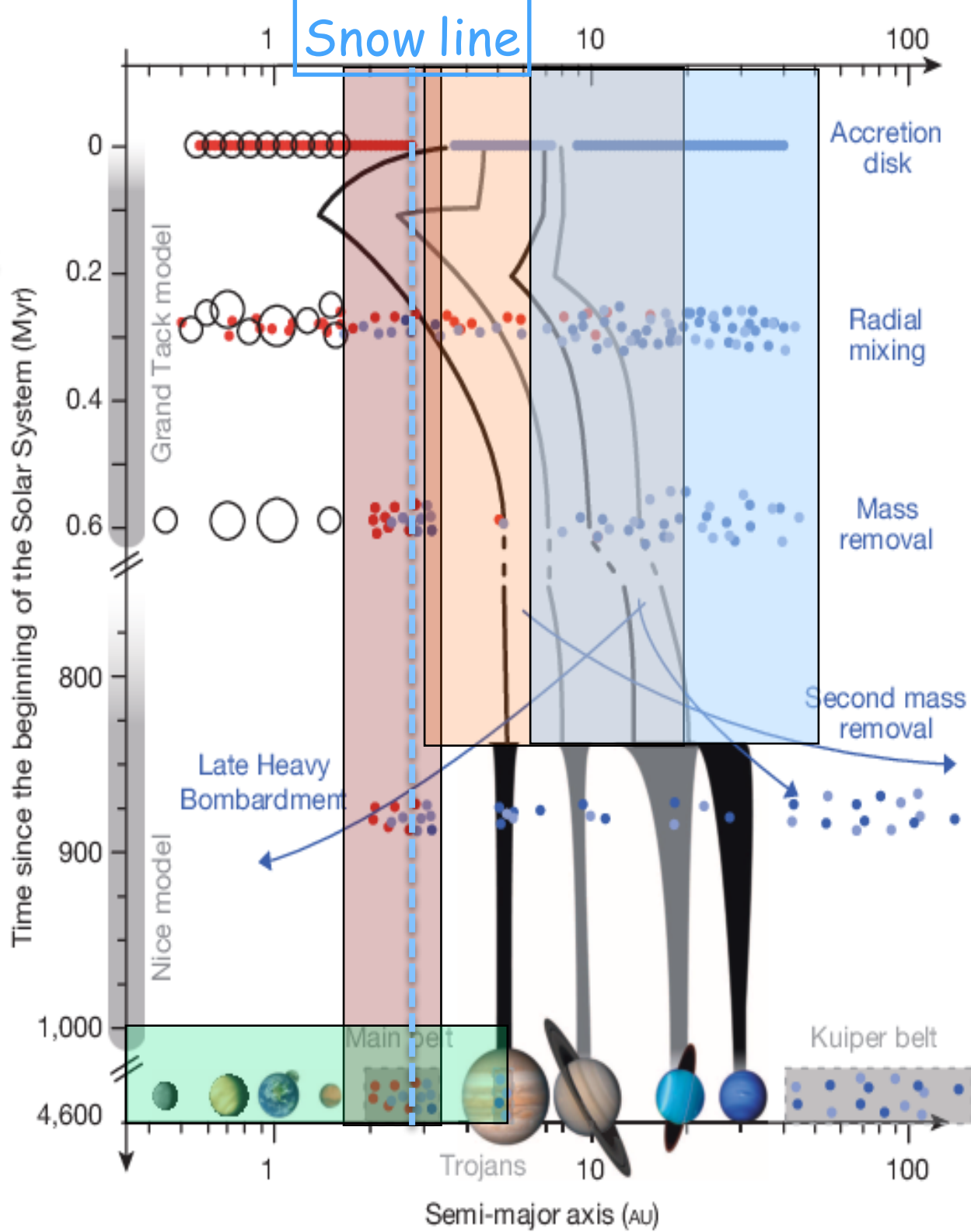
- 氷、有機物、結晶質鉱物
- アルベド・サイズ

# D. 惑星間塵（黄道光）

- 結晶質鉱物、含水鉱物  
空間分布

→ 赤外線観測が有効

- 日心距離に応じた力学進化・熱進化の違い
- 系外惑星系円盤の温度分布を考えるヒント



## ◆ 太陽系に関して（私が）知りたいこと

- 微惑星・惑星ができるまでの過程、最近の進化
- 惑星の素材としての氷・ダストの力学的・熱的進化
- 地球への水・有機物の供給源・供給過程

## ◆ 赤外線で何を観測するか？

- 太陽系内小天体起源の氷ダストの赤外線観測
  - 彗星・小惑星・外縁天体
    - 惑星・微惑星形成時の情報
  - 惑星間塵（黄道光）
    - 最近の太陽系の力学的進化

## ◆ 着眼点と観測・研究手法

- 氷・ダストの組成 – 分光観測
  - 氷 :  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  --- 近赤外線
  - ダスト : 結晶質シリケート --- 中間赤外線
- 空間分布と氷ダストの供給源の対応  
中間赤外線、遠赤外線での撮像観測
- 粒径分布 – 氷ダスト成長、衝突の歴史
- 原始惑星系円盤、系外黄道光（残骸円盤）との比較

# 彗星

- 微惑星の名残であり、太陽系初期の記憶を比較的保存している始原的な天体
- 氷がダストを閉じこめている
- 原始惑星系円盤の中で何が起きているか ( $\mu\text{m}$ -ダスト $\rightarrow$ km-微惑星の成長) を知るひとつの手がかり

- 水 (氷) ・有機物
- 固体微粒子 (結晶質鉱物)
- サイズ分布・組成

塵集積・微惑星形成  
メカニズムのヒント



# 彗星の中間赤外線分光観測

## 1970年 - Bennett彗星

- ・  $10\mu\text{m}$  超過を彗星で初めて検出  
--> シリケート？

## 1986年 - Halley彗星

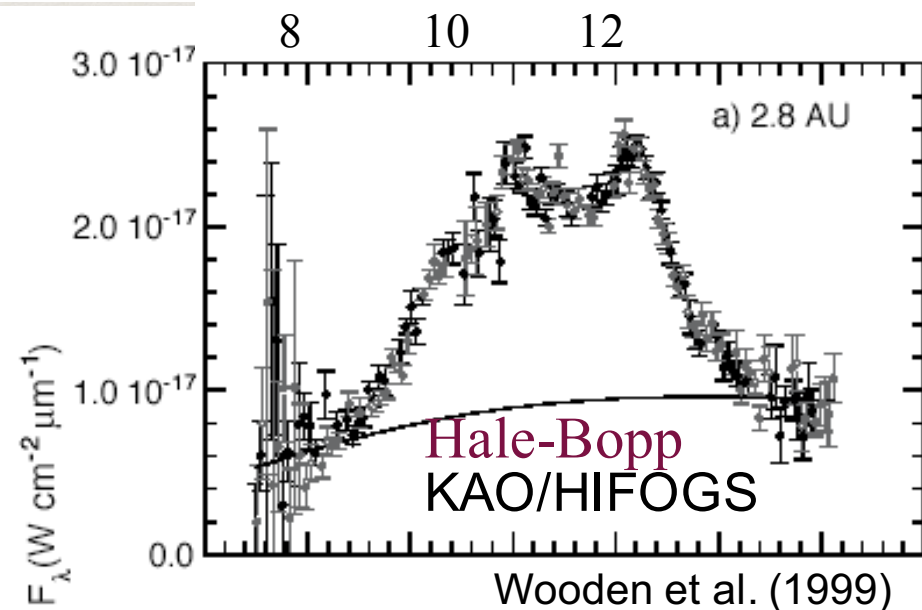
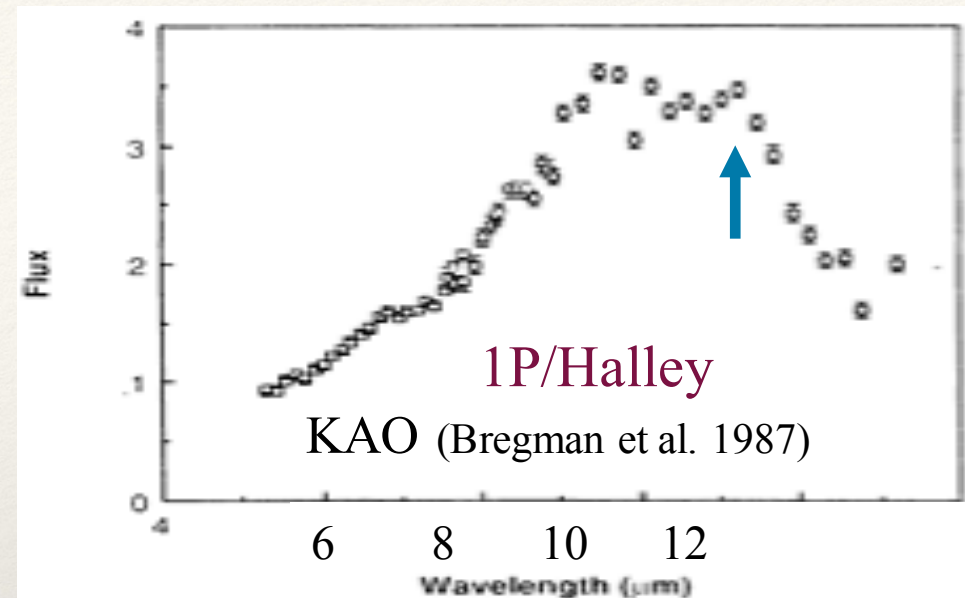
- ・  $11.2\mu\text{m}$ のサブピークを検出  
(Bregman et al. 1987)

## 1987年 - Bradfield彗星

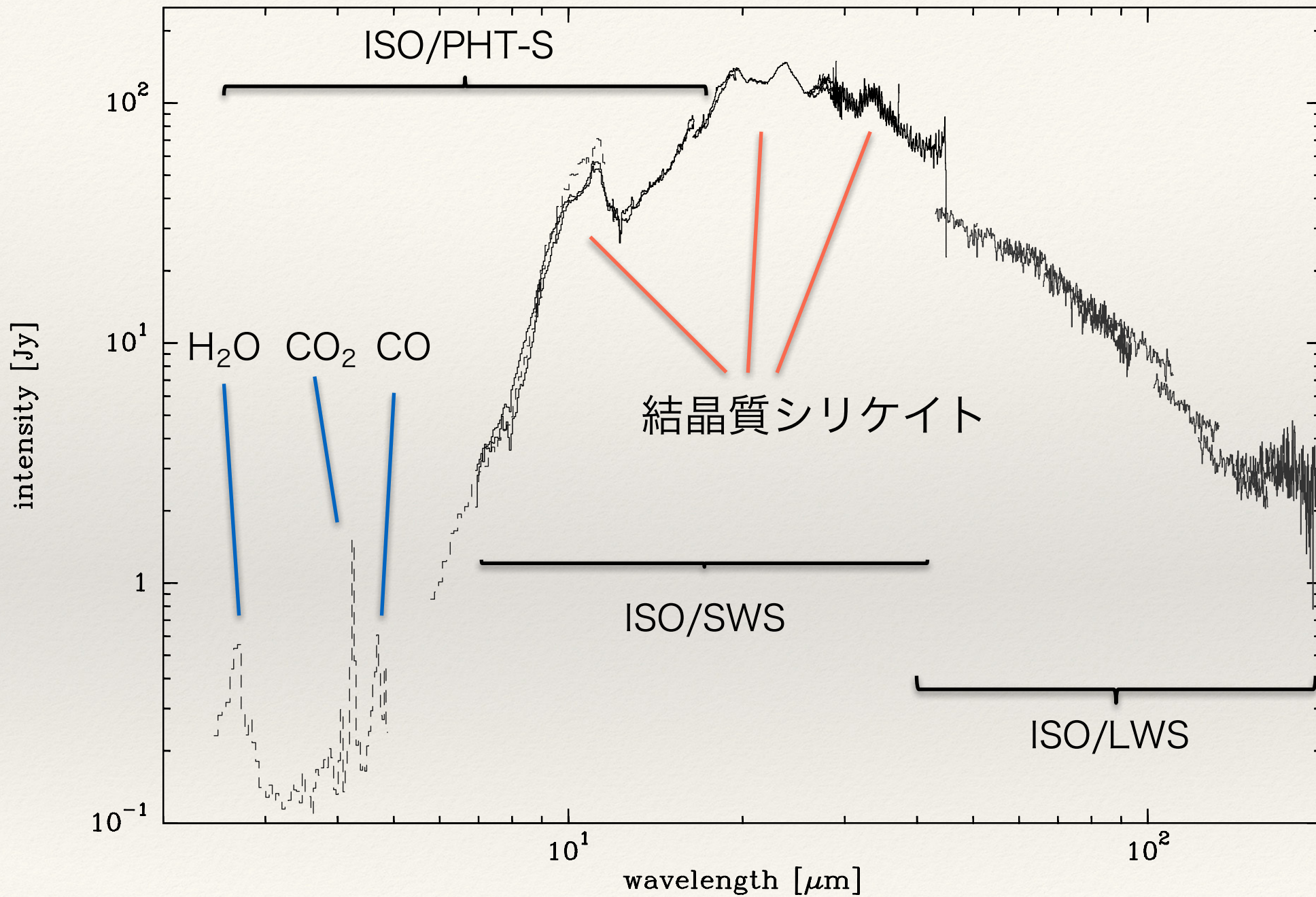
- ・  $11.3\mu\text{m}$ のサブピーク  
結晶質olivine？  
(Hanner et al. 1990)

## 1997年 - Hale-Bopp彗星

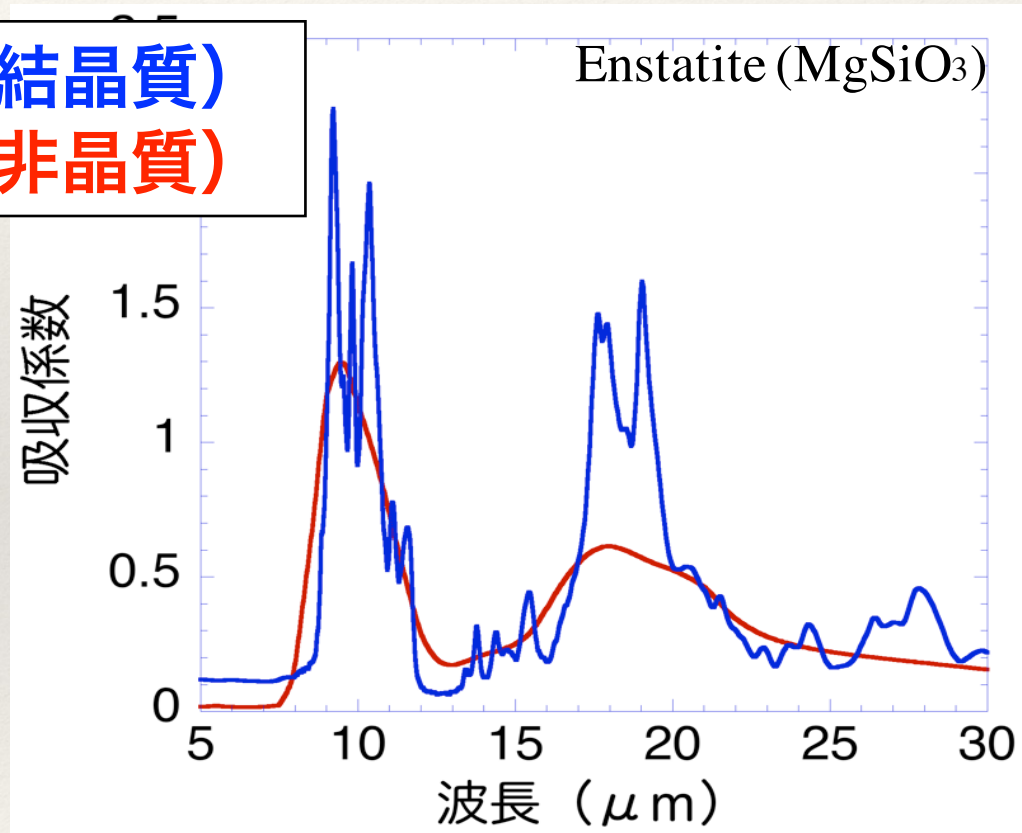
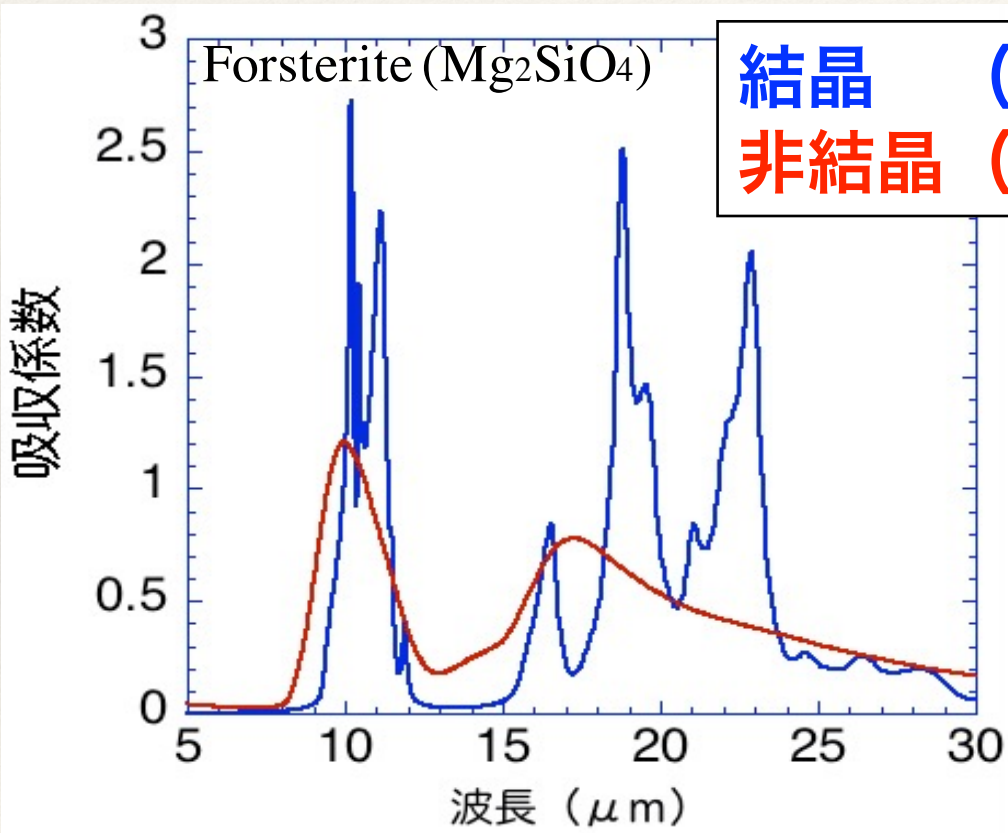
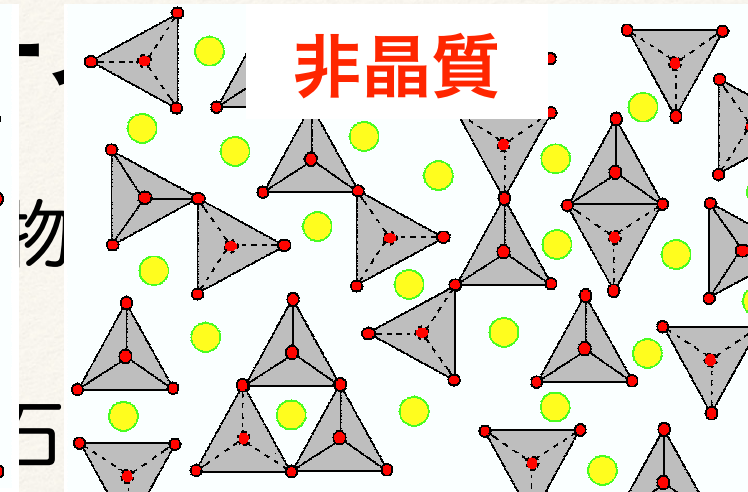
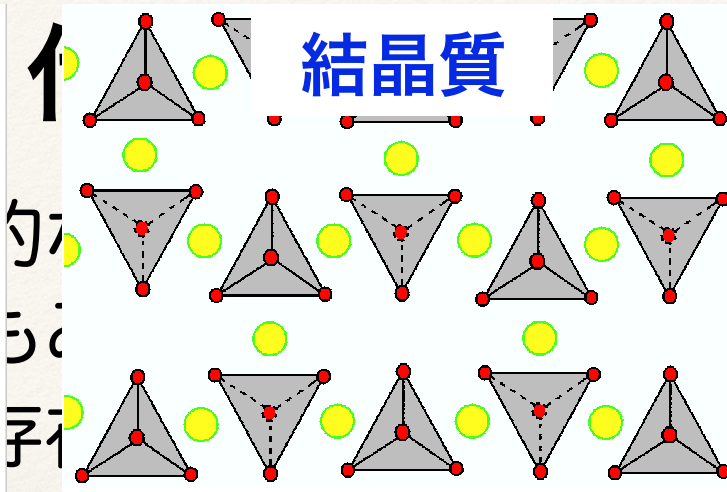
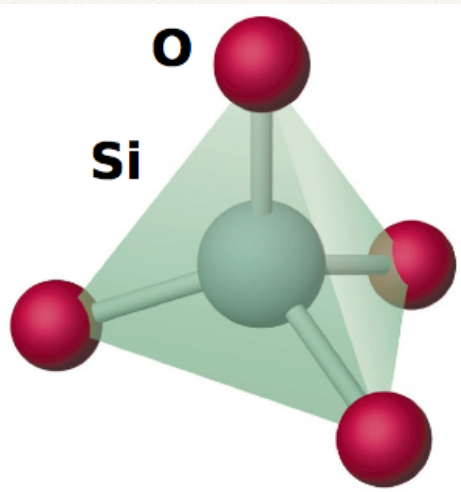
- ・ 結晶質olivine + pyroxene？  
ISO による赤外線スペクトル  
彗星ダスト研究の教科書的存在



C/1995 01 Hale-Bopp

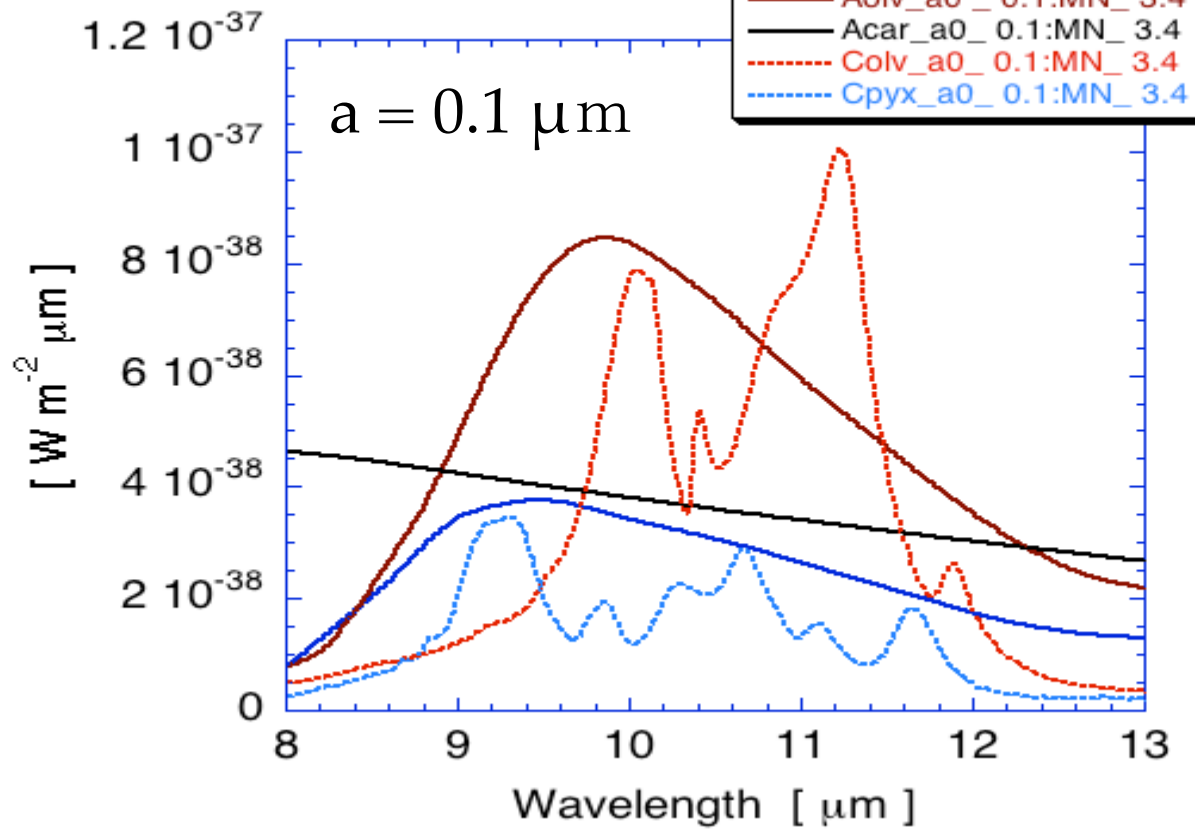
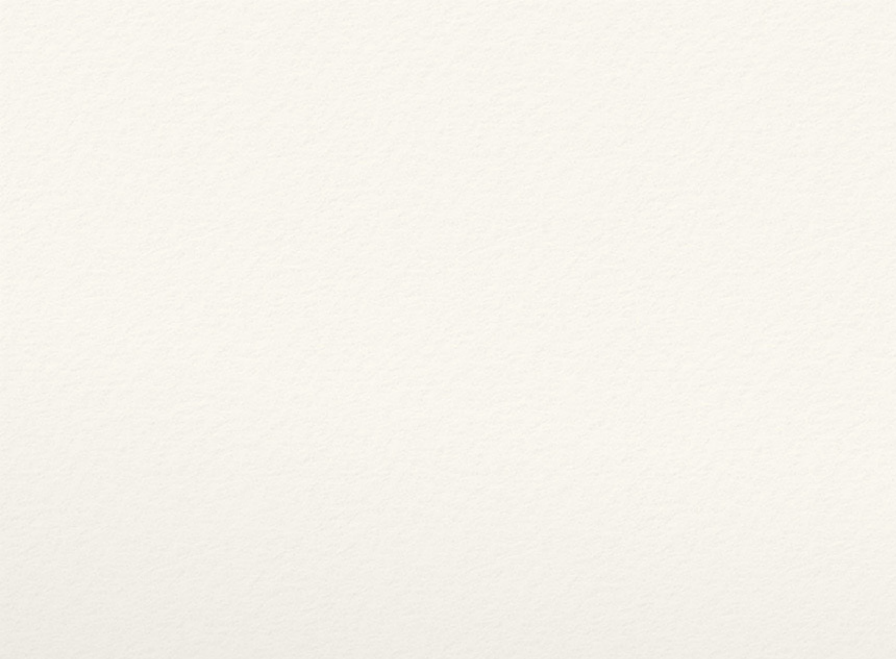




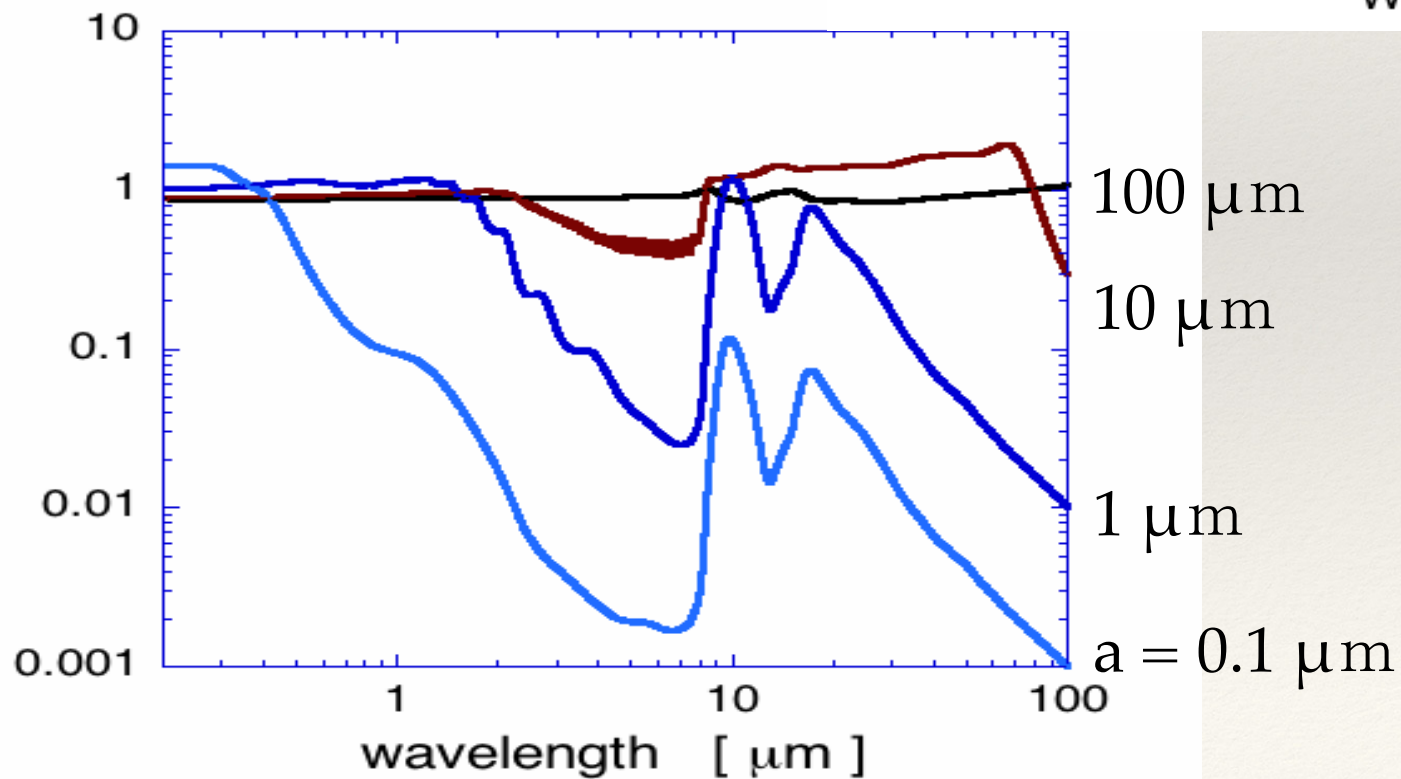


• olivine (カンラン石)  
(Mg,Fe) $_2$ SiO $_4$

• pyroxene (輝石)  
(Mg,Fe)SiO $_3$



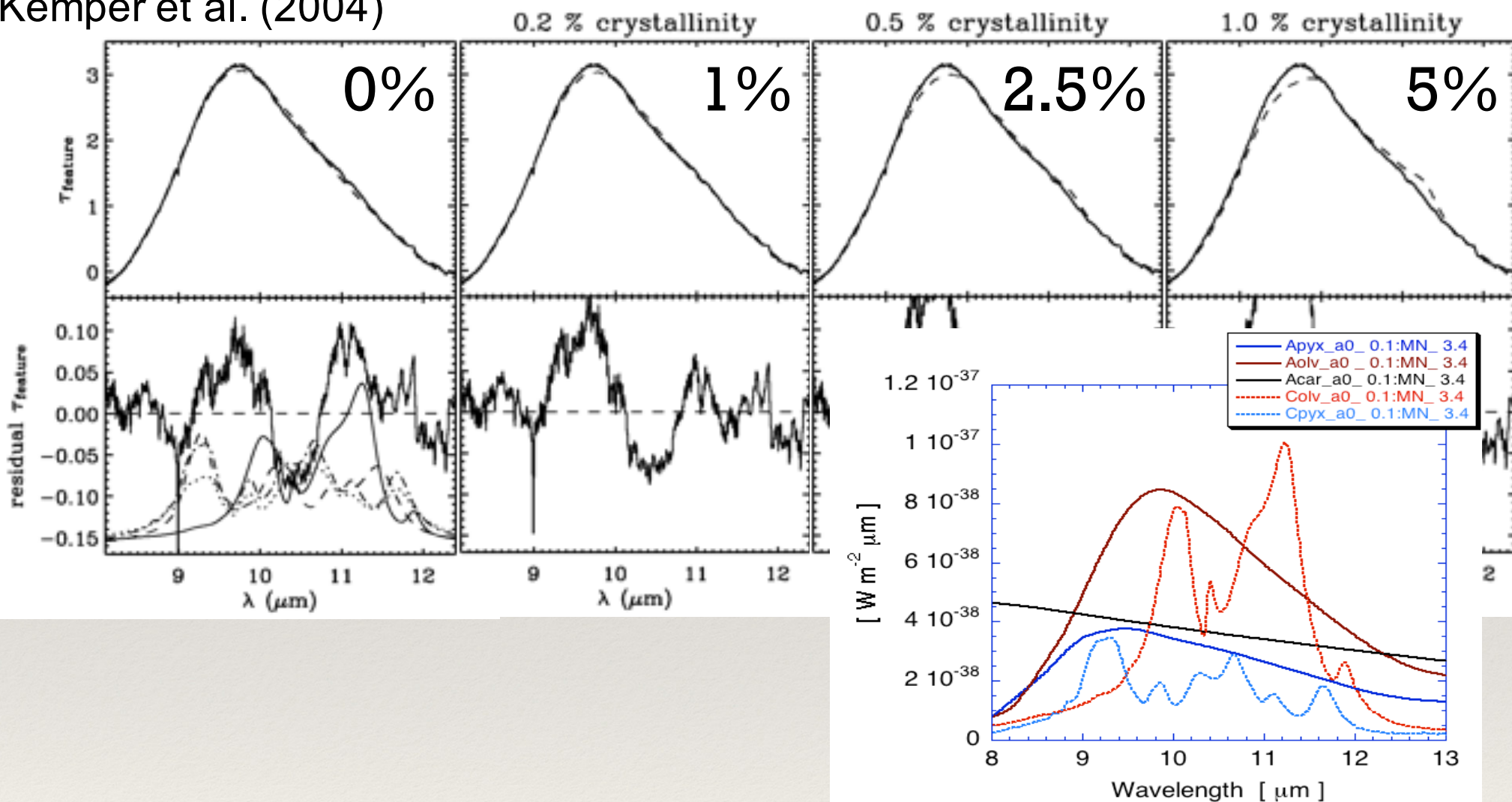
**Qabs  
for amorphous olivine**



100  $\mu\text{m}$   
10  $\mu\text{m}$   
1  $\mu\text{m}$

# 星間空間のシリケイト

Kemper et al. (2004)

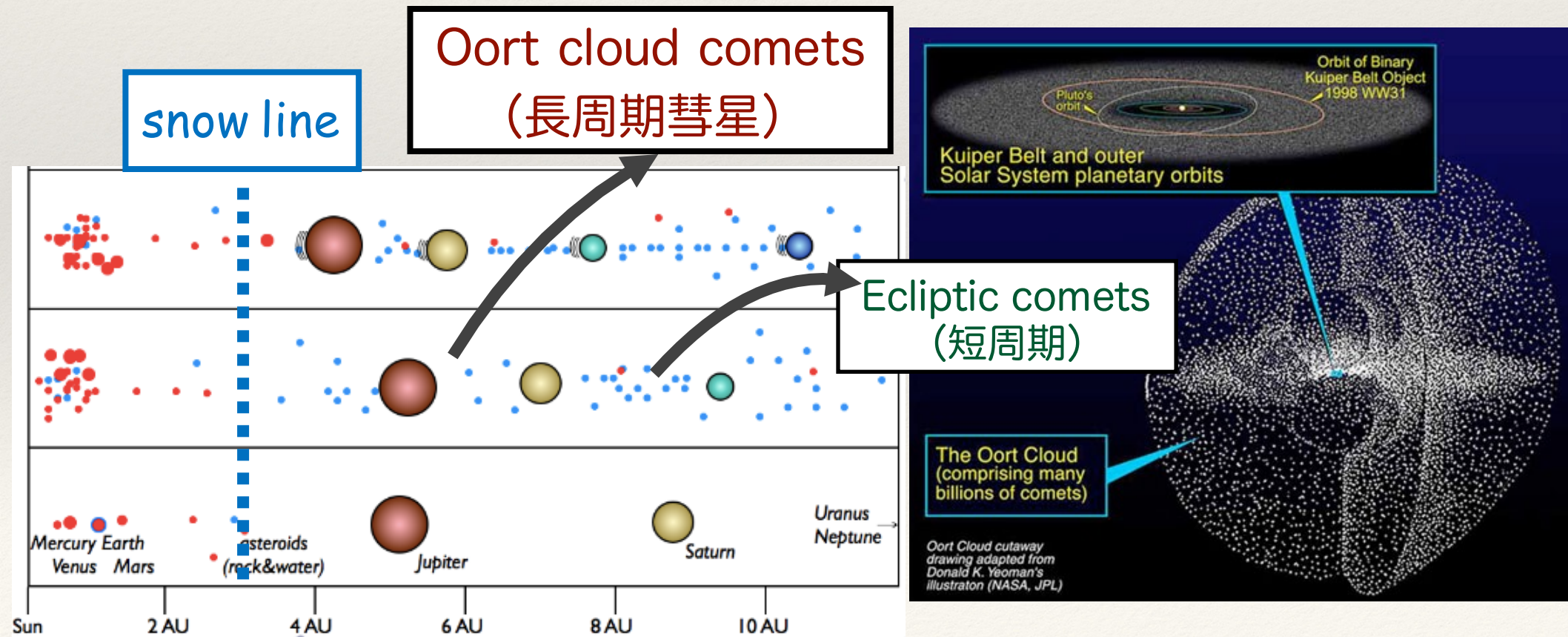


- 星間空間は非晶質
- 結晶質シリケイトは太陽系内で作られた？

# 彗星中の結晶質シリケイト

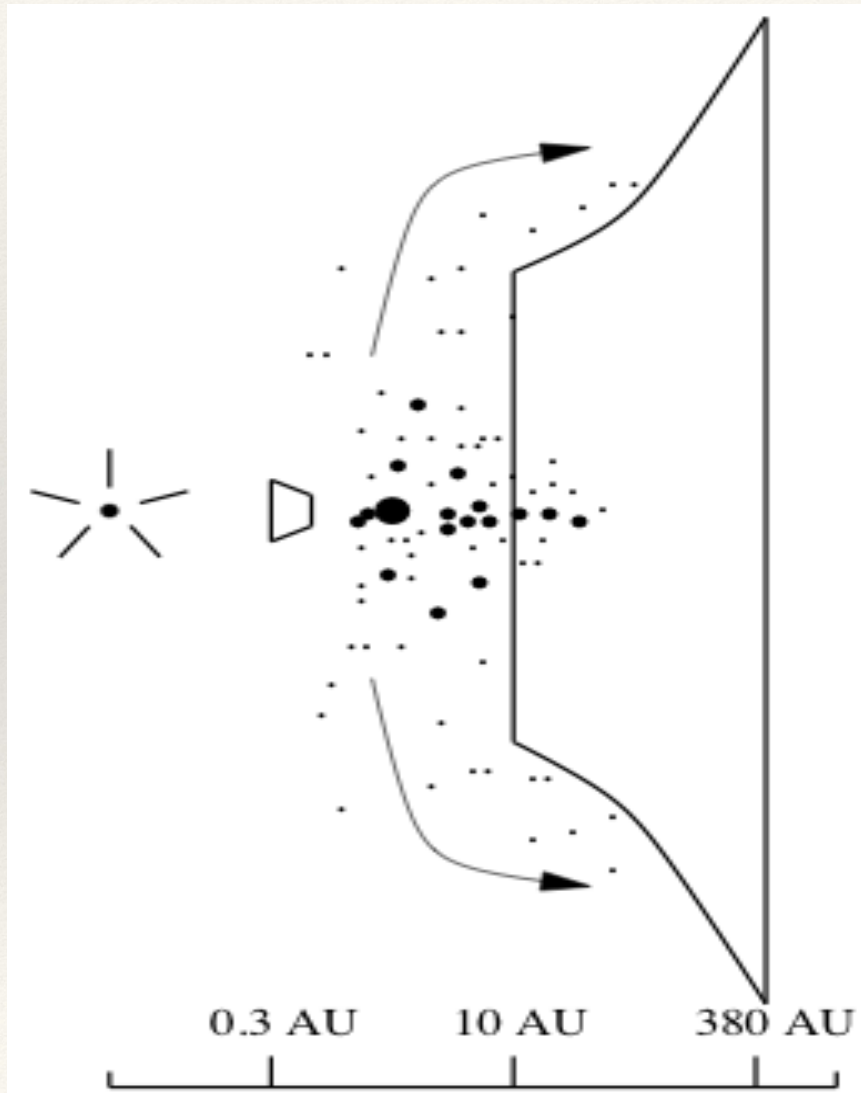
## • 彗星 - 氷+塵 (dirty water-ice)

- 多くの彗星で結晶質シリケイトの存在が確認されている
- 殆どは低温凝縮物 ( $T < 150 \text{ K}$ ) である氷。星間塵は非晶質。
- 高温生成物 ( $T > 800 \text{ K}$ ) である結晶質シリケイトはどこから？
- OCs (長周期) と ECs (短周期) の差は？



# 彗星中の結晶質シリケートの起源

★ 彗星塵は何らかの要因で内側の領域から運ばれた？



原始太陽系星雲の乱流輸送によって内側から外側へ

(Bockelee-Morvan et al. 2002)

微惑星衝突と原始木星による重力散乱で外側の領域へ

(Bouwman et al. 2003)

原始太陽からのOutflowによって内側から外側へ (X-wind)

(Shu et al. 1996)

# 彗星の中間赤外線分光観測

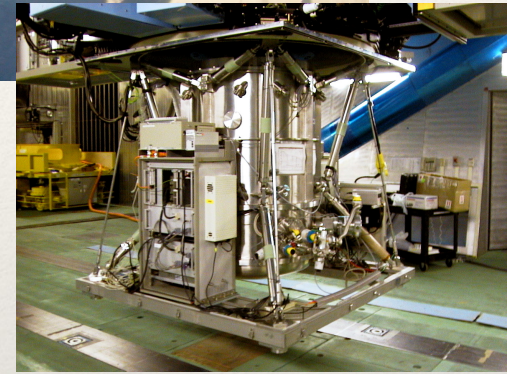
- すばる望遠鏡 + COMICS  
中間赤外線低分散分光 (8-13  $\mu\text{m}$ ;  $R \sim 250$ )
- これまでに観測した彗星



## *Oort cloud comets*

C/2001 Q4, C/2002 V1 (NEAT)  
C/2001 RX14 (LINEAR)  
C/2004 Q2 (Machholz)  
C/2007 N3 (Lulin)

C/2012 S1 (ISON)  
C/2013 R1 (Lovejoy)  
C/2012 X1 (LINEAR)  
C/2011 L4, C/2012 K1 (PanSTARRS)

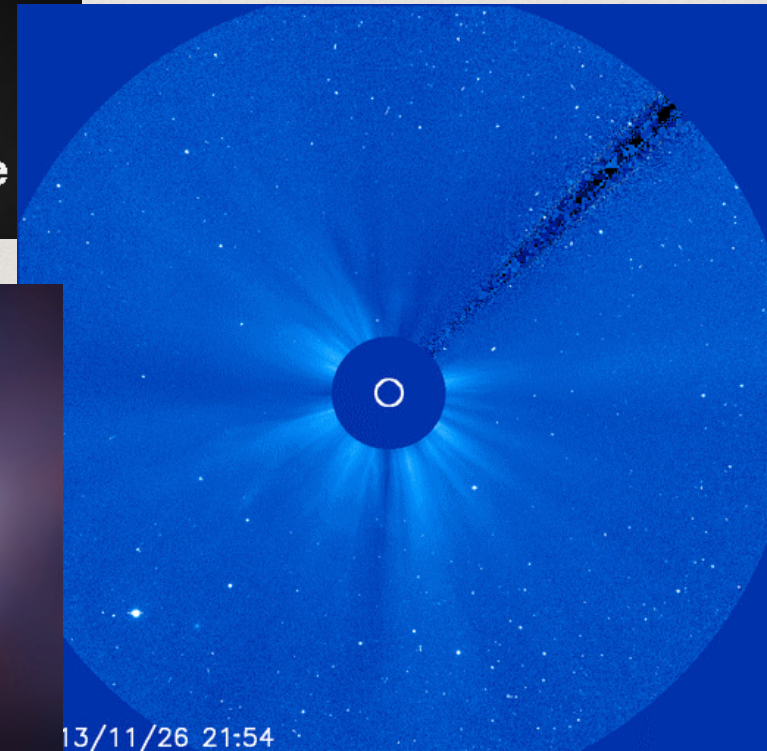
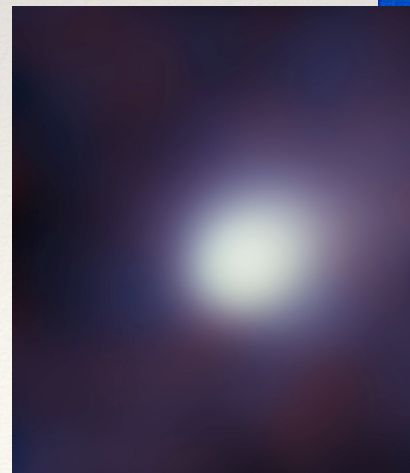
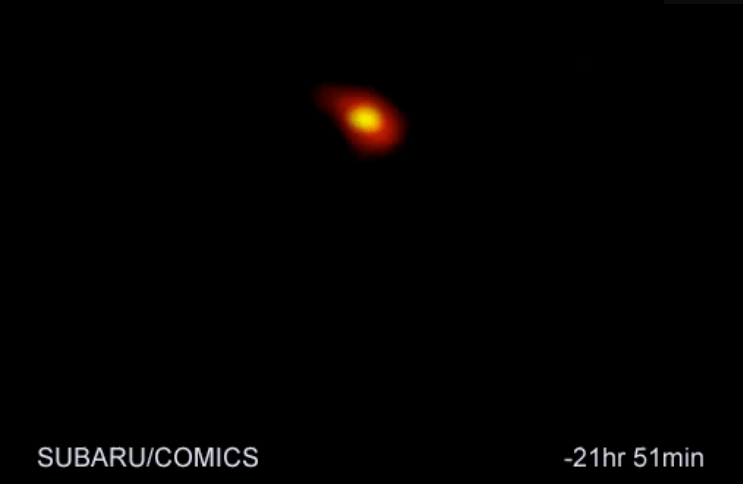
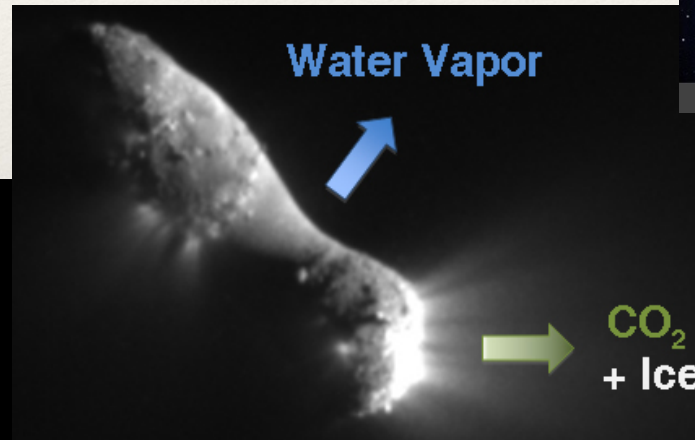
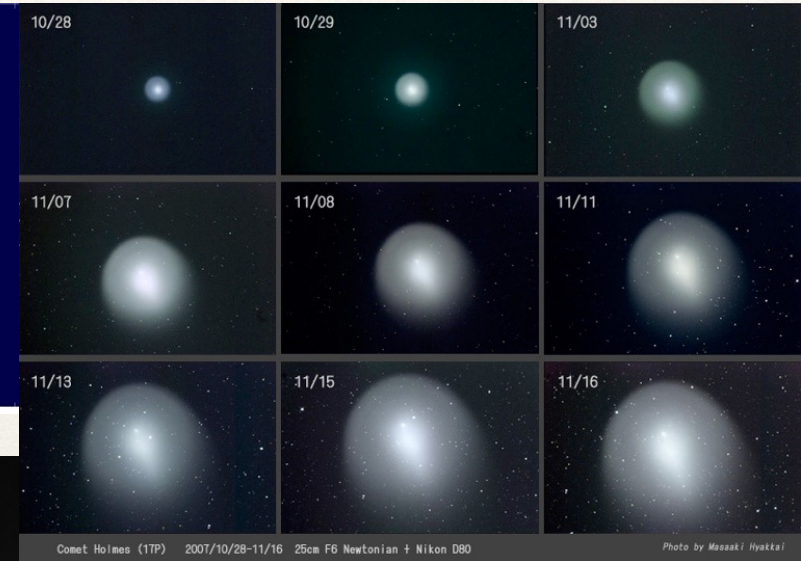
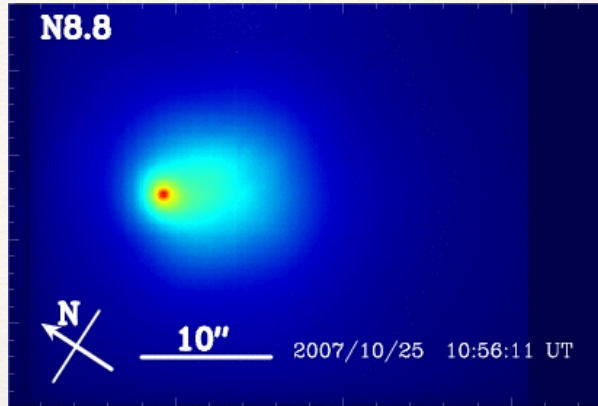


## *Ecliptic comets*

2P/Encke, 78P/Gehrels  
9P/Tempel  $\rightarrow$  Deep Impact  
21P/Giacobini-Zinner  
73P/Schwassmann-Wachmann

4P/Faye, 17P/Holmes, 8P/Tuttle  
144P/Kushida  
10P/Tempel, 103P/Hartley

# 彗星ダストの赤外線観測



# Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1

M. F. A'Hearn,<sup>1\*</sup> M. J. S. Belton,<sup>2</sup> W. A. Delamere,<sup>3</sup> J. Kissel,<sup>4</sup> K. P. Klaasen,<sup>5</sup> L. A. McFadden,<sup>1</sup> K. J. Meech,<sup>6</sup> H. J. Melosh,<sup>7</sup> P. H. Schultz,<sup>8</sup> J. M. Sunshine,<sup>9</sup> P. C. Thomas,<sup>10</sup> J. Veverka,<sup>10</sup> D. K. Yeomans,<sup>5</sup> M. W. Baca,<sup>9</sup> I. Busko,<sup>11</sup> C. J. Crockett,<sup>1</sup> S. M. Collins,<sup>5</sup> M. Desnoyer,<sup>10</sup> C. A. Eberhardy,<sup>8</sup> C. M. Ernst,<sup>8</sup> T. L. Farnham,<sup>1</sup> L. Feaga,<sup>1</sup> O. Groussin,<sup>1</sup> D. Hampton,<sup>12</sup> S. I. Ipatov,<sup>1</sup> J.-Y. Li,<sup>1</sup> D. Lindler,<sup>13</sup> C. M. Lisse,<sup>1,14</sup> N. Mastrodemos,<sup>5</sup> W. M. Owen Jr.,<sup>5</sup> J. E. Richardson,<sup>7,10</sup> D. D. Wellnitz,<sup>1</sup> R. L. White<sup>11</sup>

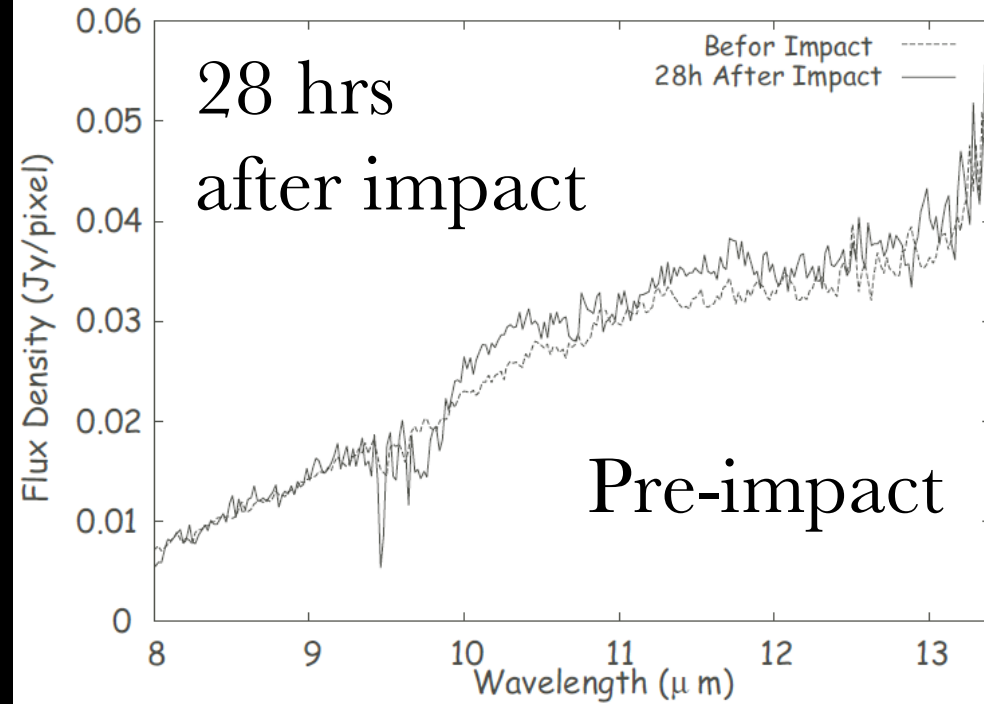
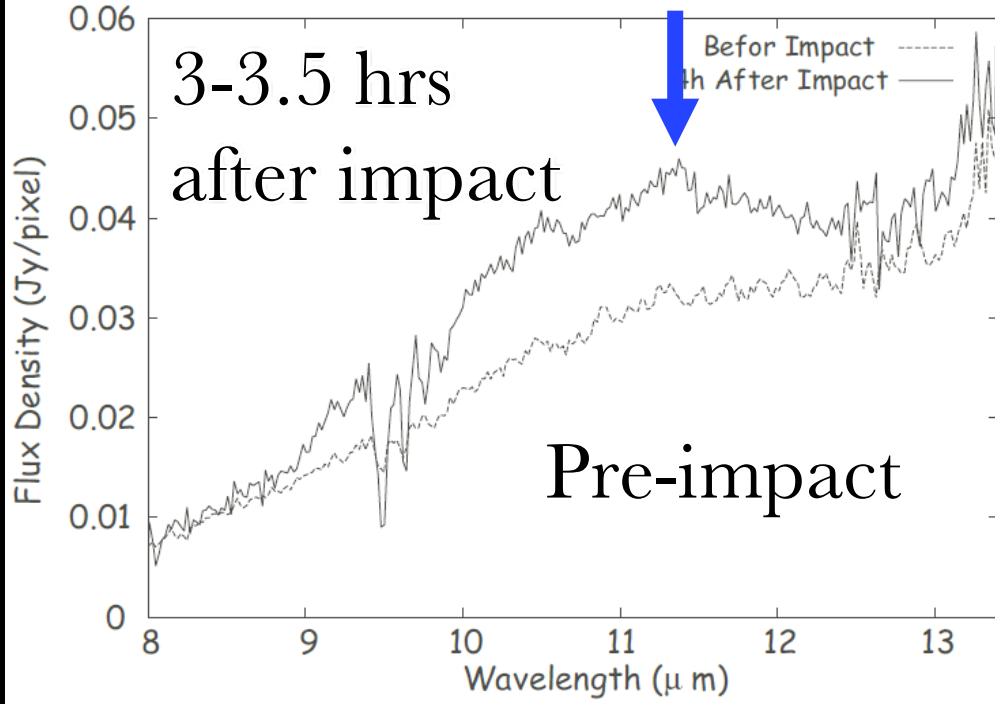
Deep Impact collided with comet Tempel 1, excavating a crater controlled by gravity. The comet's outer layer is composed of 1- to 100-micrometer fine particles with negligible strength (<65 pascals). Local gravitational field and average nucleus density (600 kilograms per cubic meter) are estimated from ejecta fallback. Initial ejecta were hot (>1000 kelvins). A large increase in organic material occurred during and after the event, with smaller changes in carbon dioxide relative to water. On approach, the spacecraft observed frequent natural outbursts, a mean radius of  $3.0 \pm 0.1$  kilometers, smooth and rough terrain, scarps, and impact craters. A thermal map indicates a surface in equilibrium with sunlight.

## Deep Impact ミッションの主な目的

- 彗星表面の探査
- 衝突実験（彗星核の内部構造）
- 彗星内部物質の観測  
氷（揮発性物質） & ダスト







(Sugita et al. 2005; Ootsubo et al. 2006)

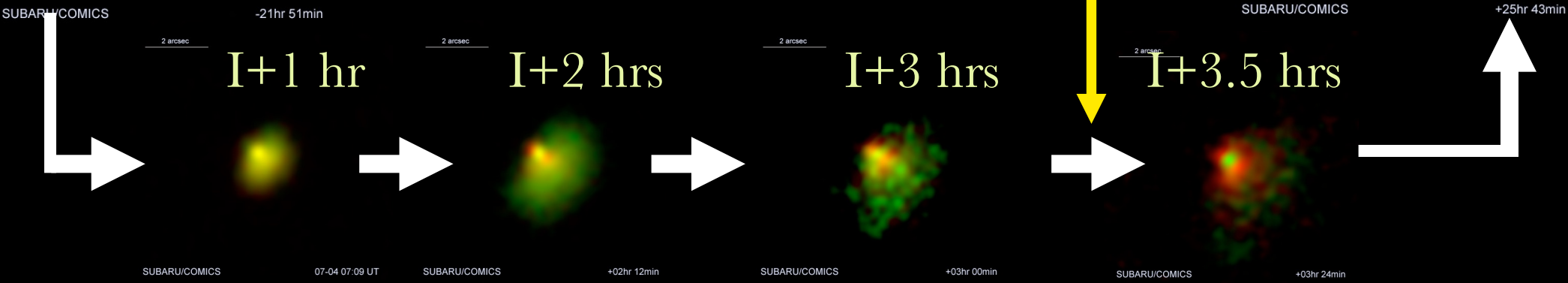
2 arcsec  
2''

2 arcsec

Pre-impact

I+26 hrs

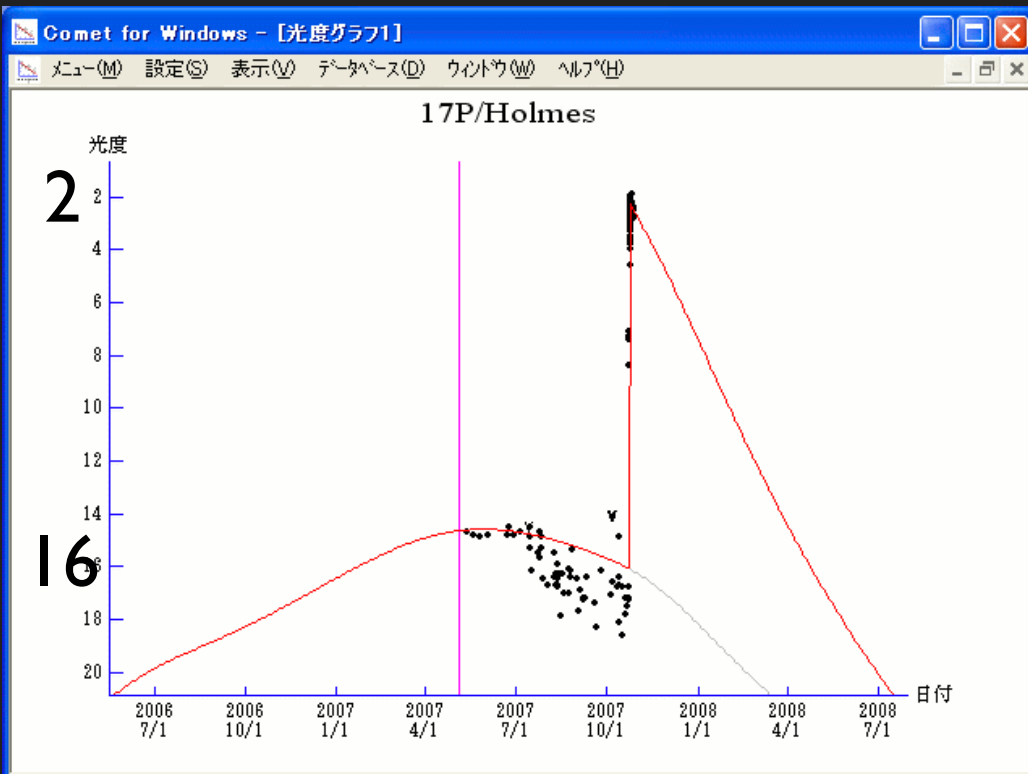
Spectroscopy



# 17P/Holmes Ecliptic comet

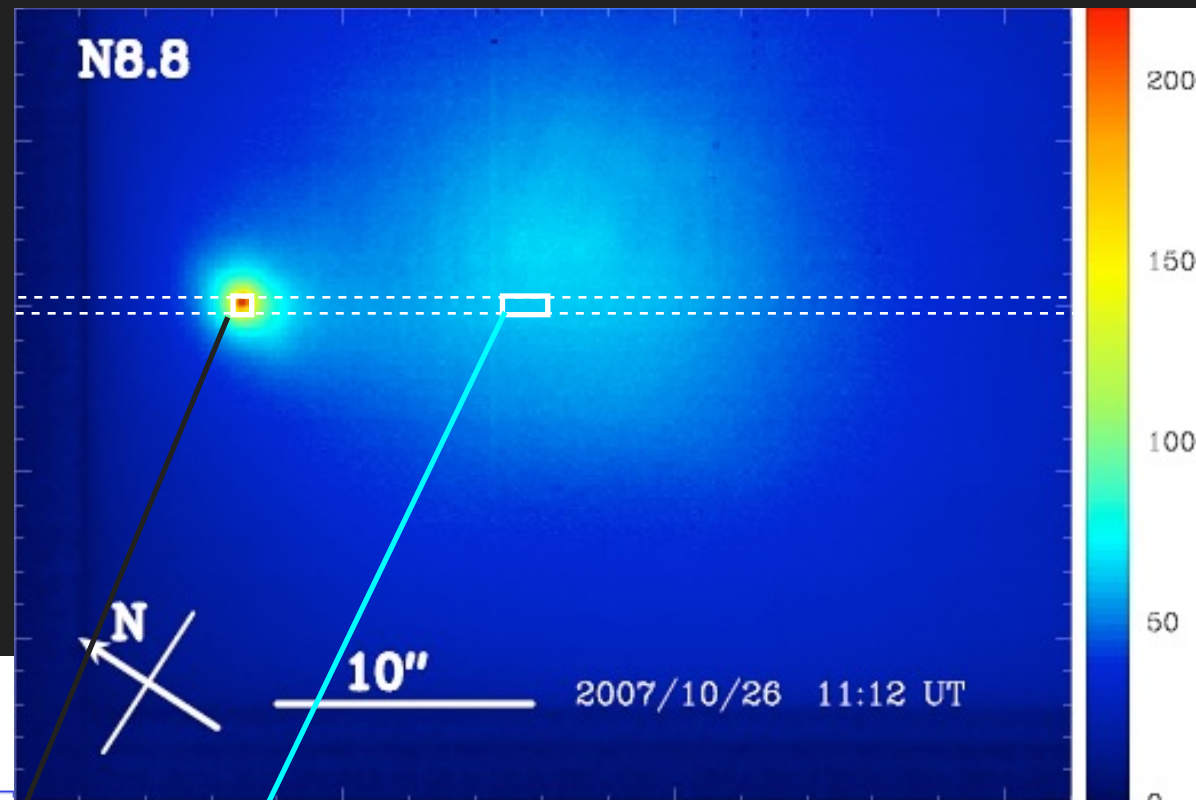
突然のアウトバースト  
(2007/10/24UT)

- ・ 対称に広がる薄いコマ
- ・ 彗星核から一方向に放出された塵雲

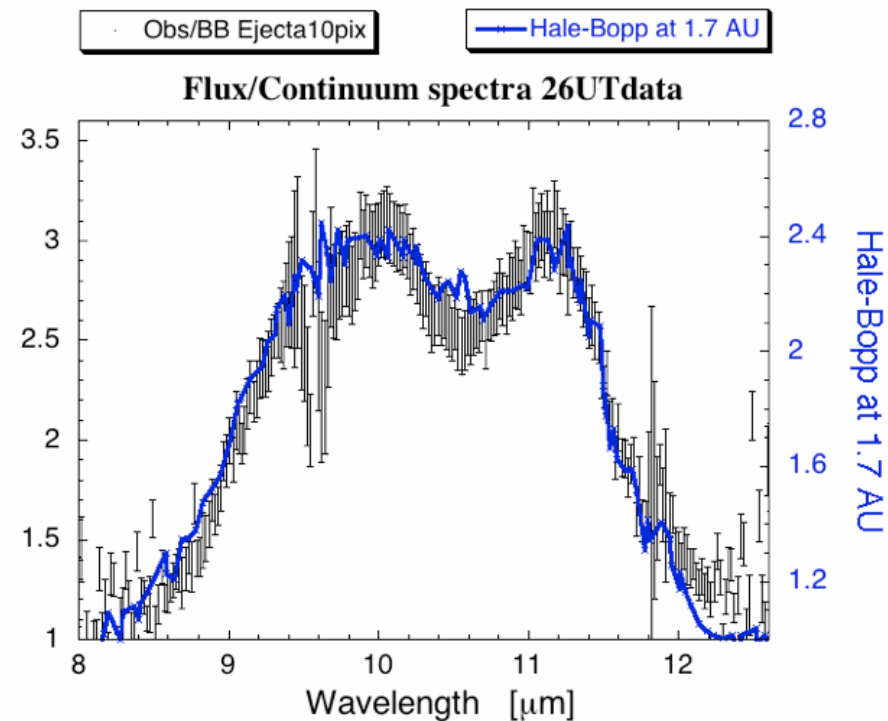
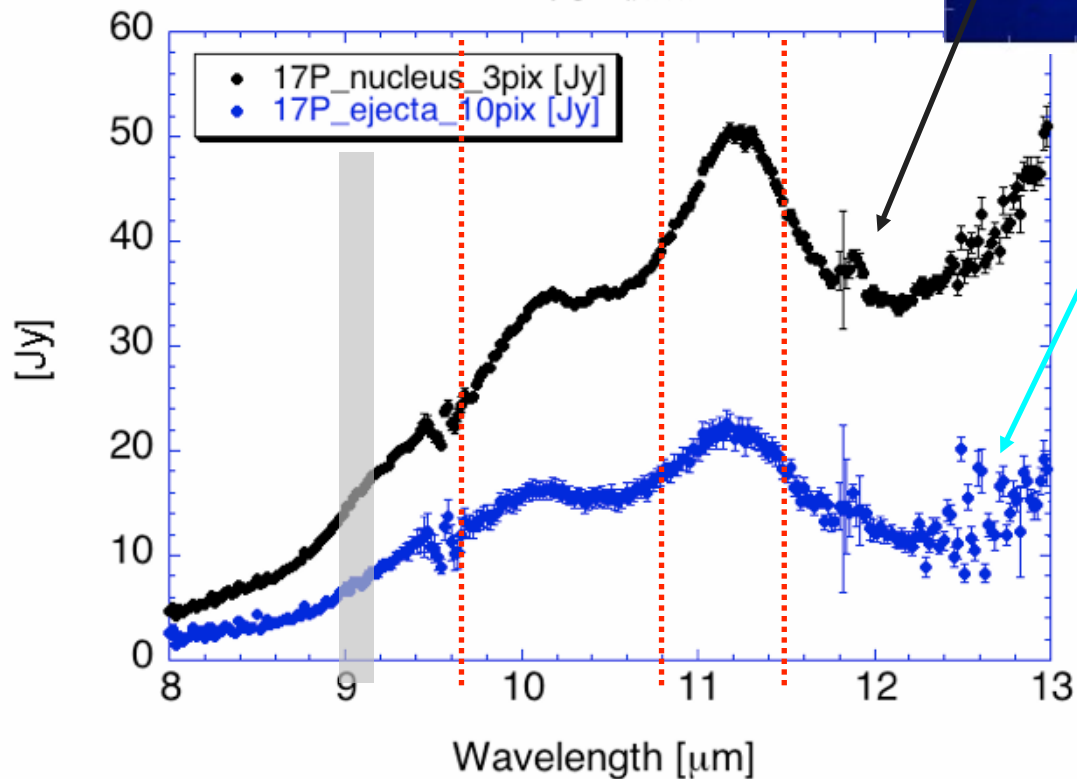


# 17P/Holmes Ecliptic comet

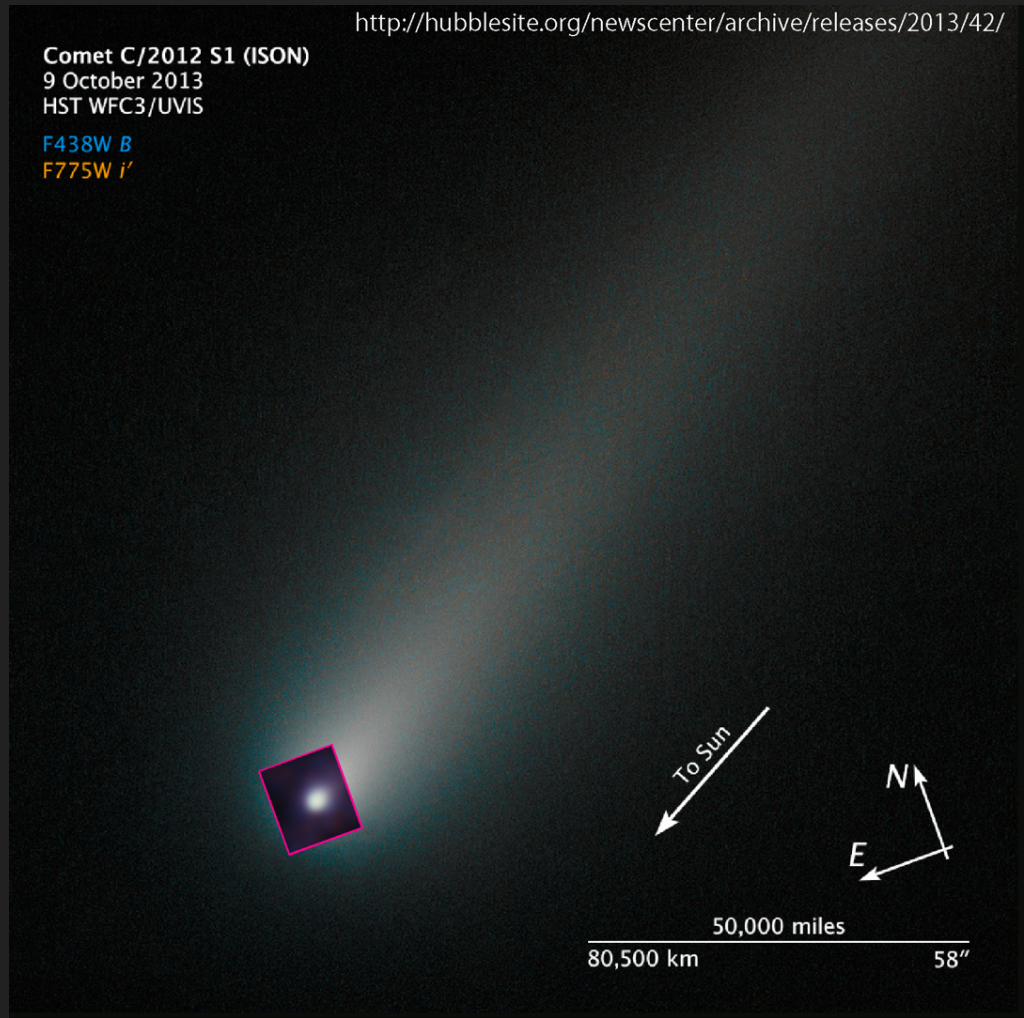
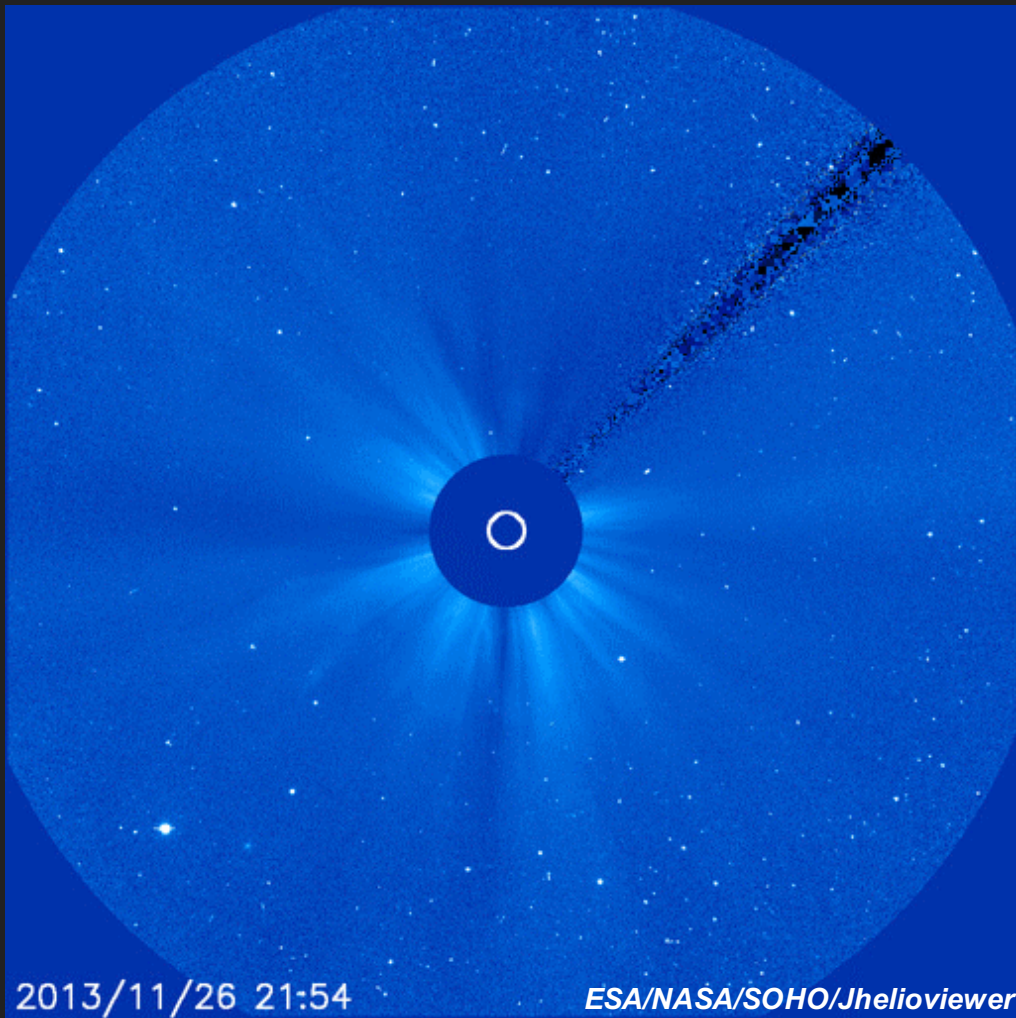
2007/10/26 UT  
バースト後 2日  
 $r = 2.45$  AU,  $T_{BB} = 177$  K  
 $\delta = 1.62$  AU



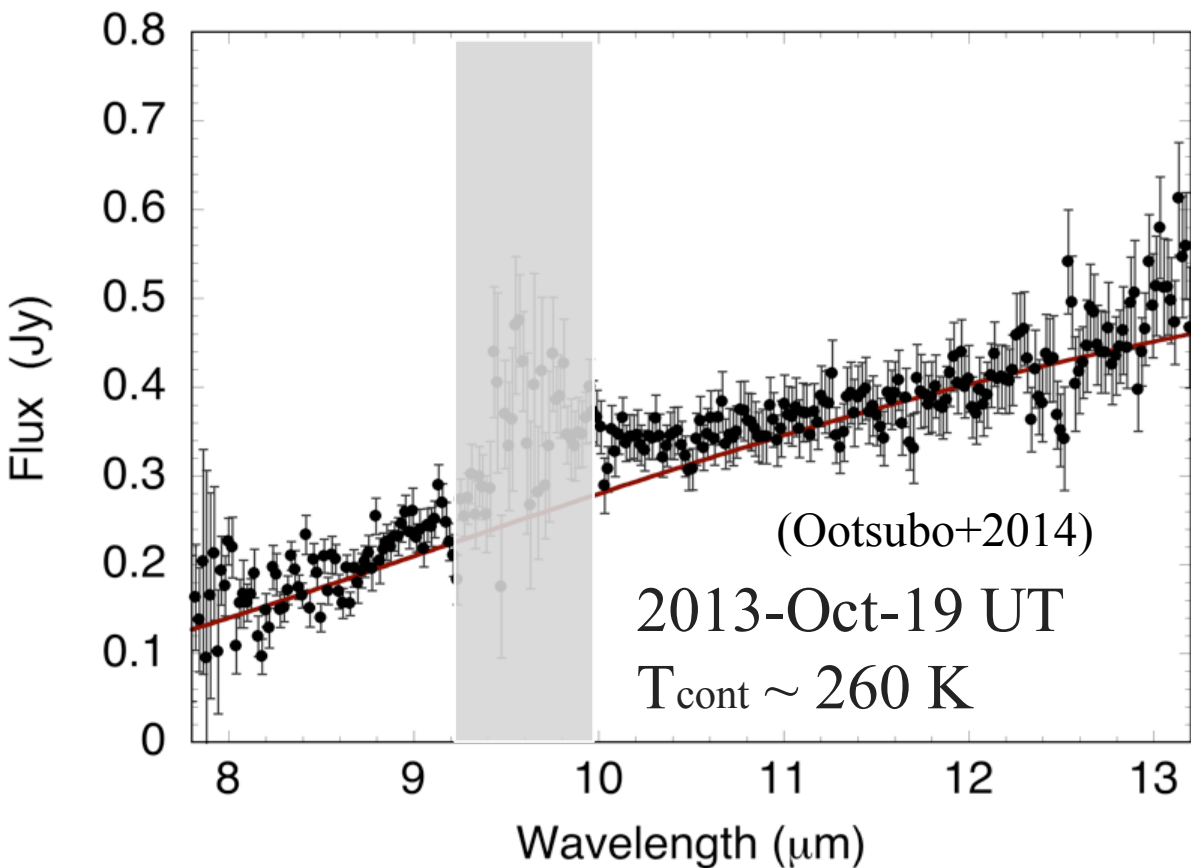
26UTdata



# アイソン彗星 C/2012 S1 (ISON) Oort comet



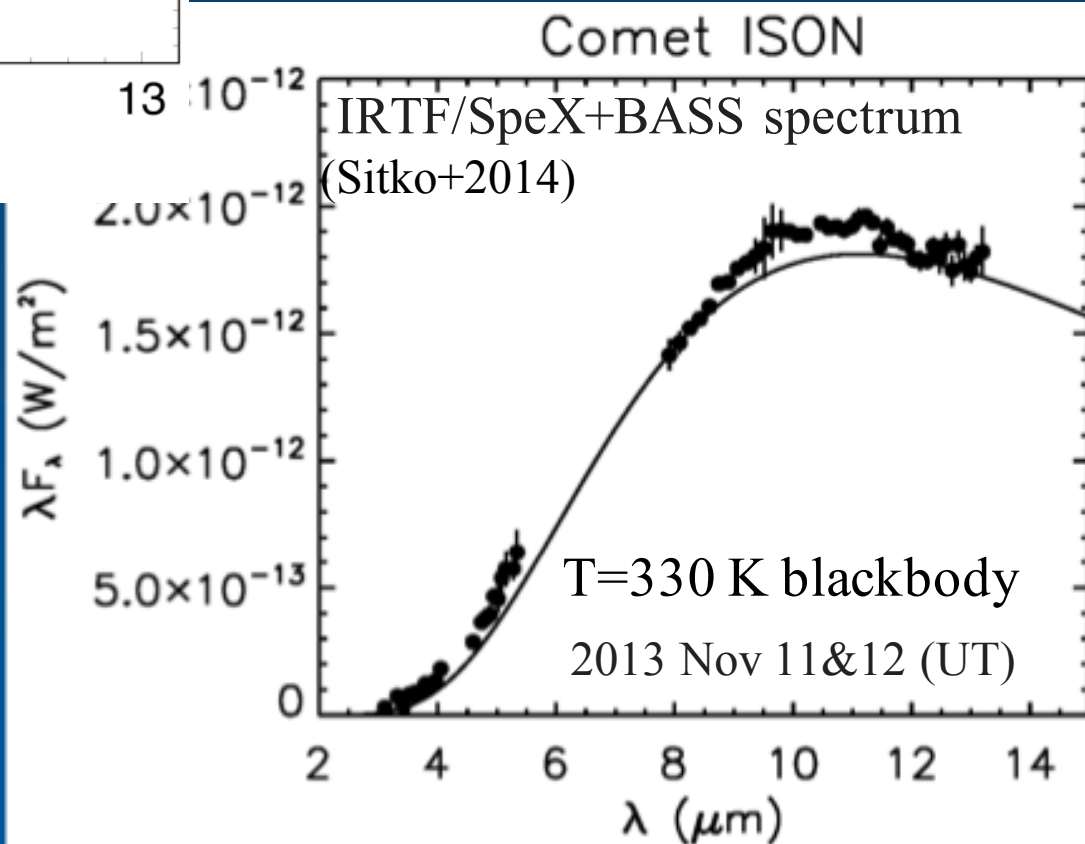
# Comet ISON observed with Subaru+COMICS



近日点通過5週間前  
結晶質オリビンは確認できず  
フィーチャ強度 < 10%



近日点通過2週間前  
結晶質オリビンをわずかに確認  
フィーチャ強度 ~ 10%



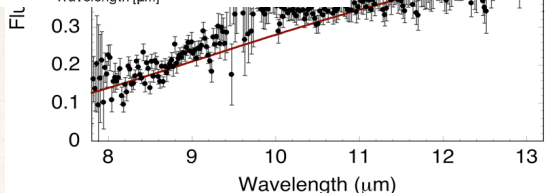
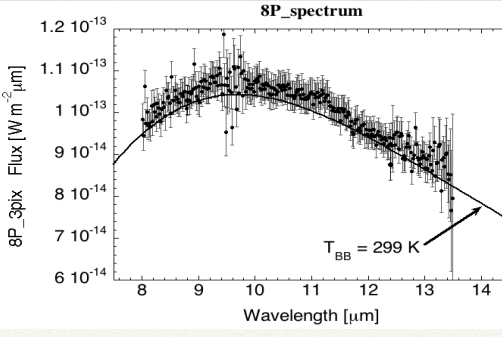
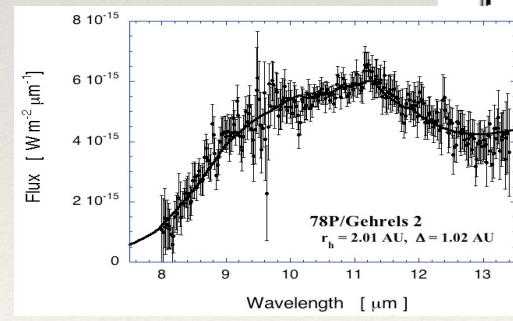
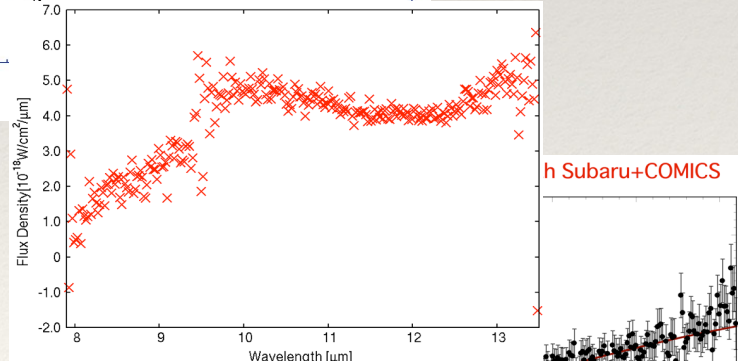
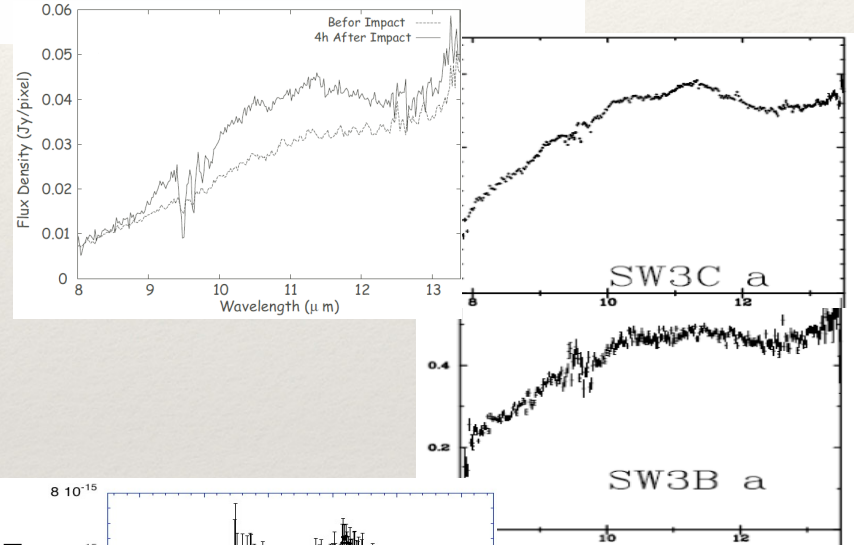
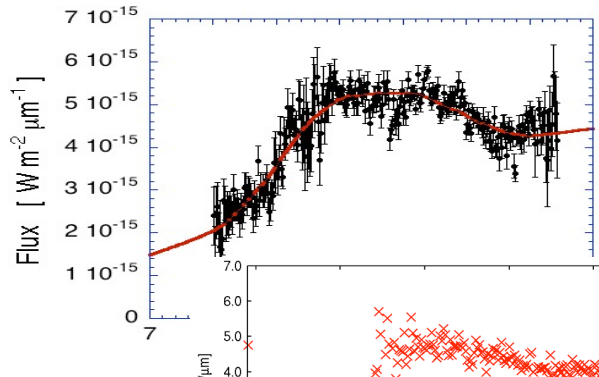
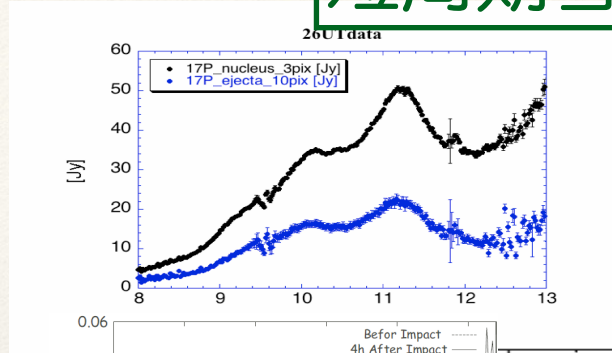
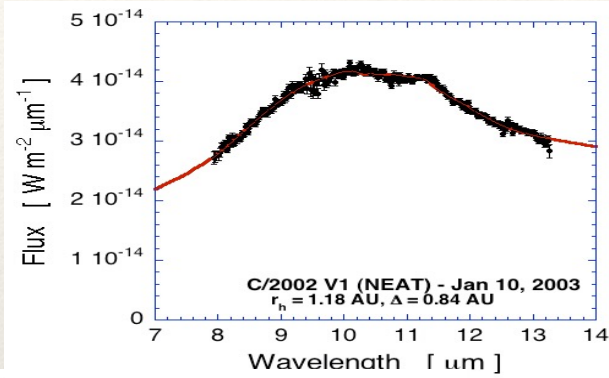
# 彗星の結晶質シリケイト

長周期彗星

短周期彗星

結晶質  
多い

結晶質  
少ない

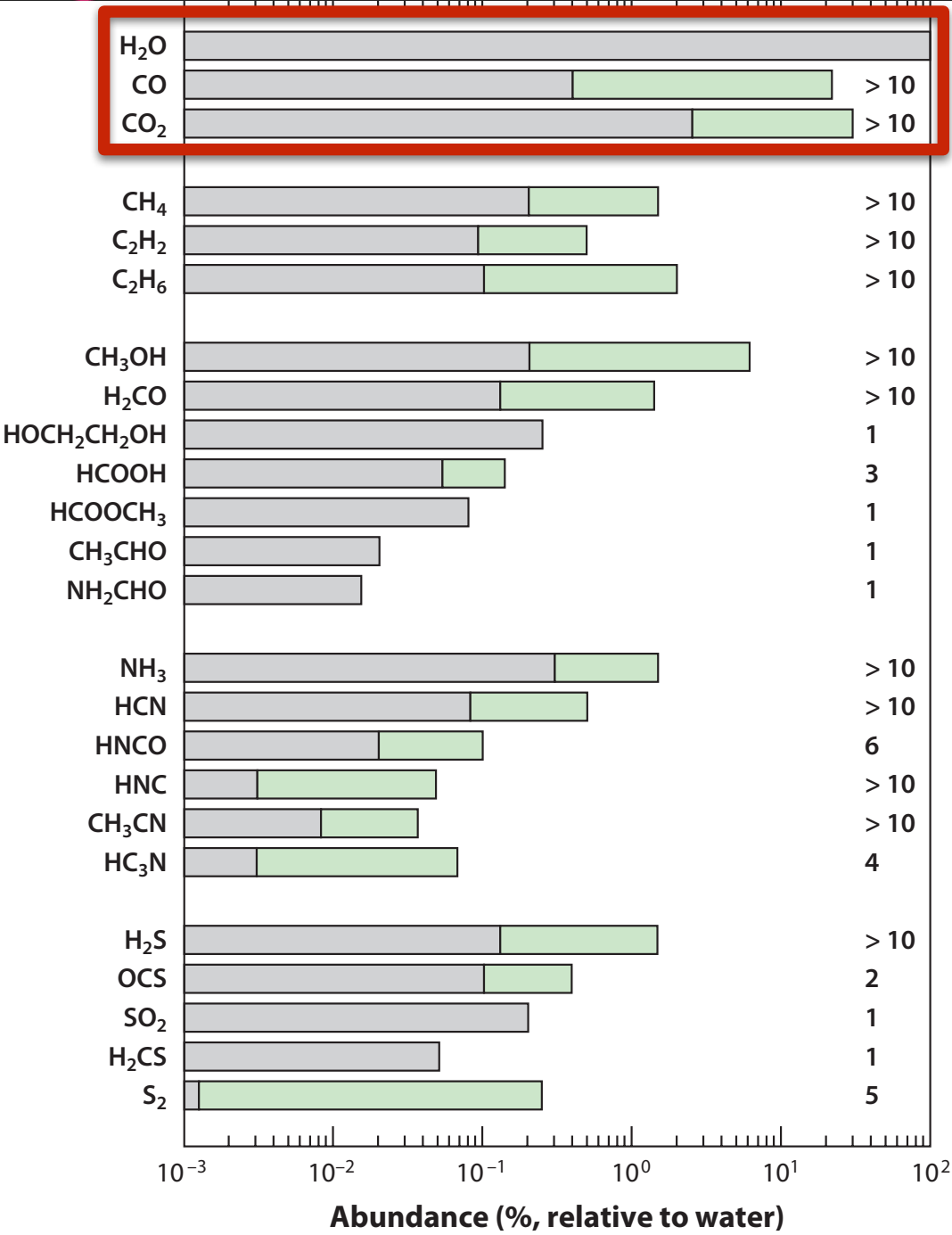


# 彗星シリケートに関する現状認識

- ◆ 長周期彗星と短周期彗星を比較し、原始太陽系星雲中での微惑星形成時のダストについて情報を得つつある。
- ◆ 短周期彗星の通常活動で、結晶質シリケートを確認。初めて定量的に結晶質/非晶質比を求めた(Watanabe+2006)。
- ◆ これまでの観測から、短周期彗星でも彗星核内部では結晶質が十分に存在している (Oort comets に近い) 可能性が考えられる。(Sugita+2005; Ootsubo+2007; Kadono+2007)
- ◆ 短周期彗星に関しては、彗星核表面での粒径分布の成長についても今後は考慮が必要
- ◆ 長周期彗星と短周期彗星は、
  - (1) もともと比較的近い領域で形成 and/or
  - (2) 原始太陽系星雲中では十分に物質がかき混ぜられていたという可能性が高い



# Chemical composition of comets



## Cometary CO<sub>2</sub> and CO

- \* The most abundant species in cometary ices after H<sub>2</sub>O.
- \* While CO can be accessed in radio and near-IR domains from the ground-based observatories, CO<sub>2</sub> cannot be observed due to the severe absorption by the telluric atmosphere.
- \* To detect cometary CO<sub>2</sub> directly, **observations from space are needed !!**

(Mumma+Charnley, ARAA, 2011)

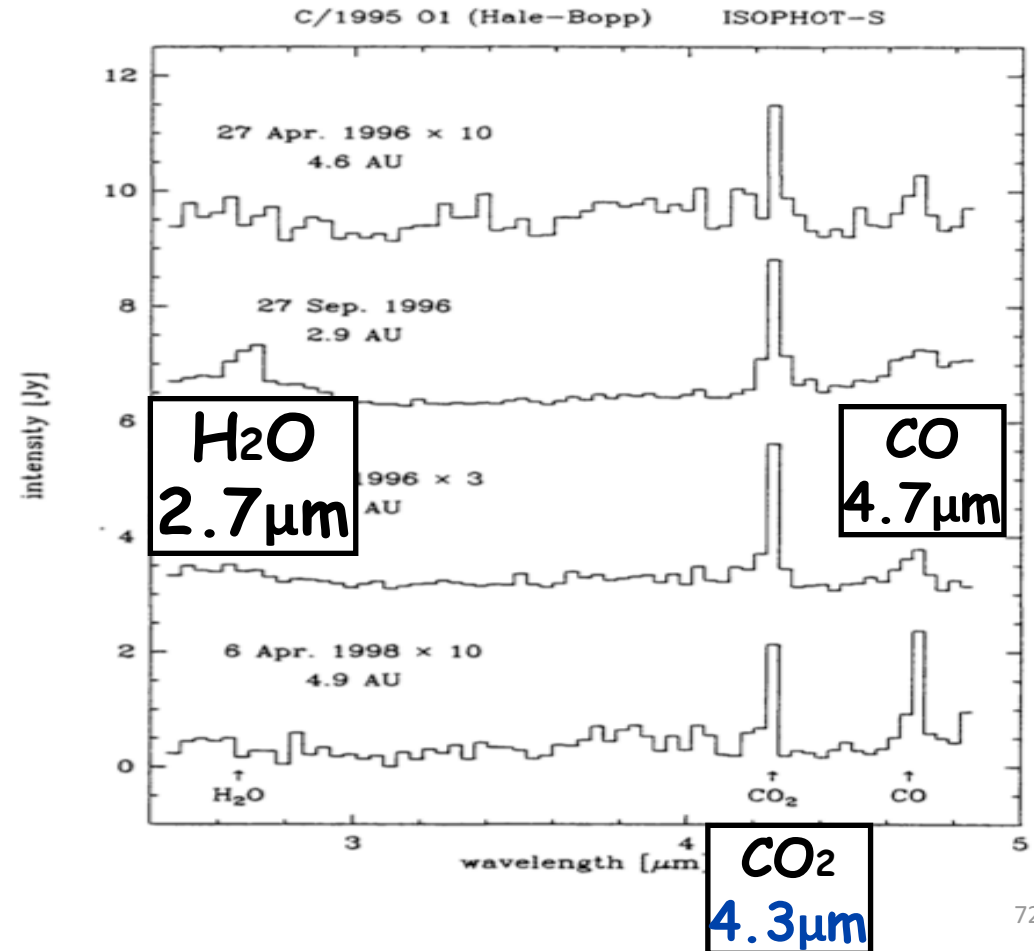
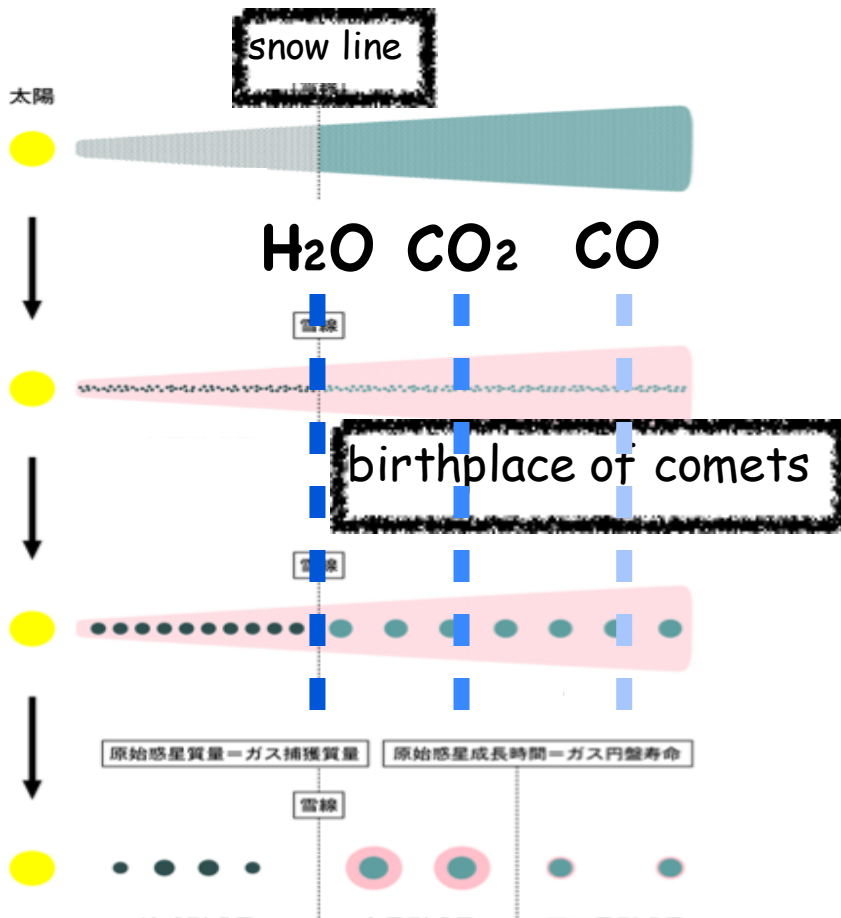




# AKARI Near-IR Spectroscopic Survey for CO<sub>2</sub> in Comets

## Comets

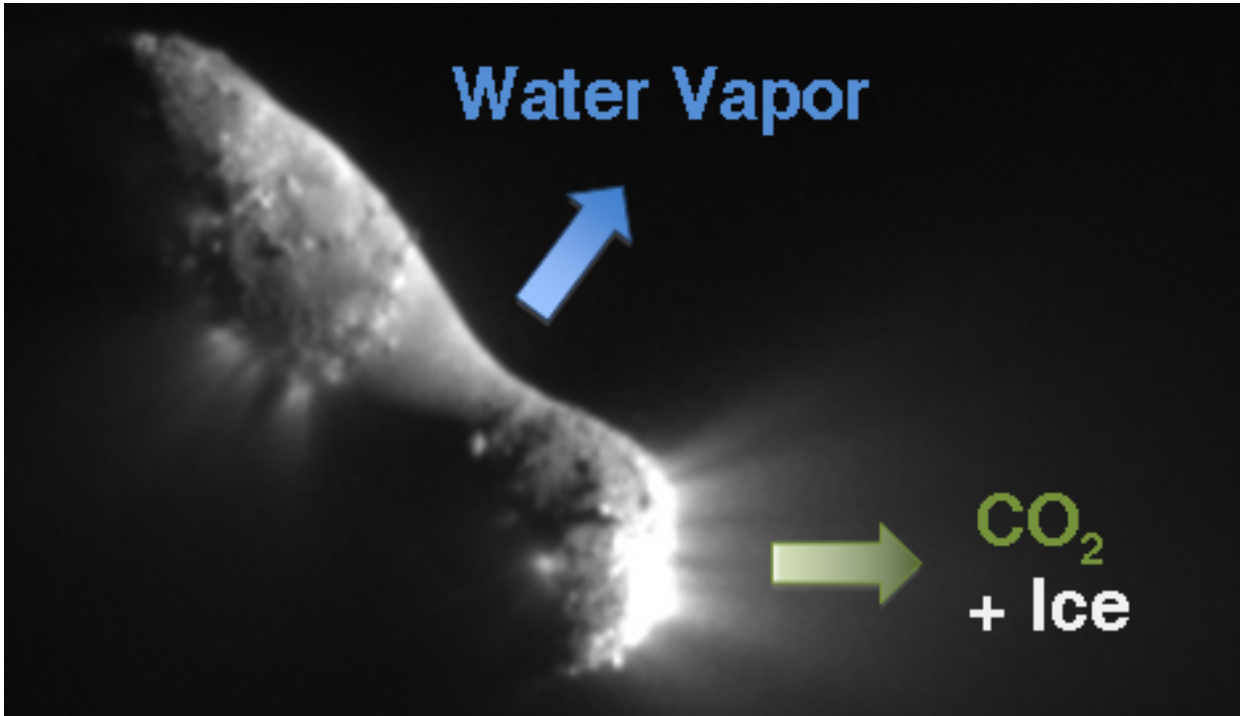
- primordial icy materials and refractory dust grains
- cometary ices (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO... )
- the oxidation environment in the early solar nebula
- link with interstellar ices



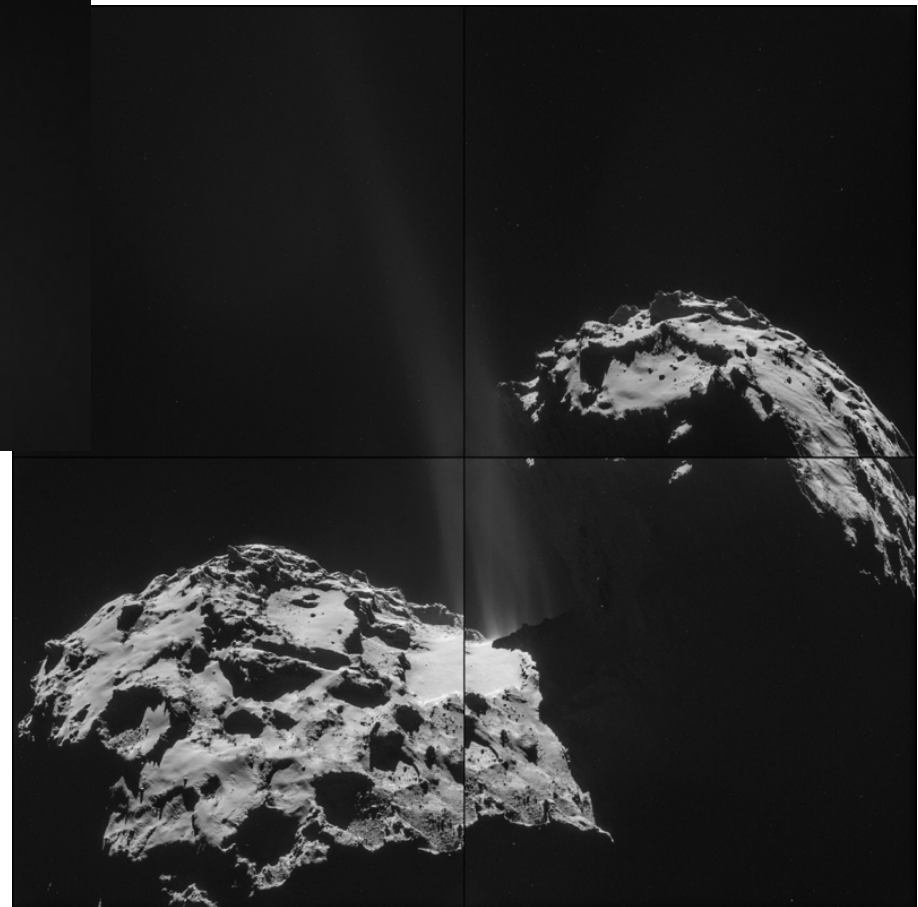


# Driving force of comet activity

103P/Hartley by Epoxi (NASA)



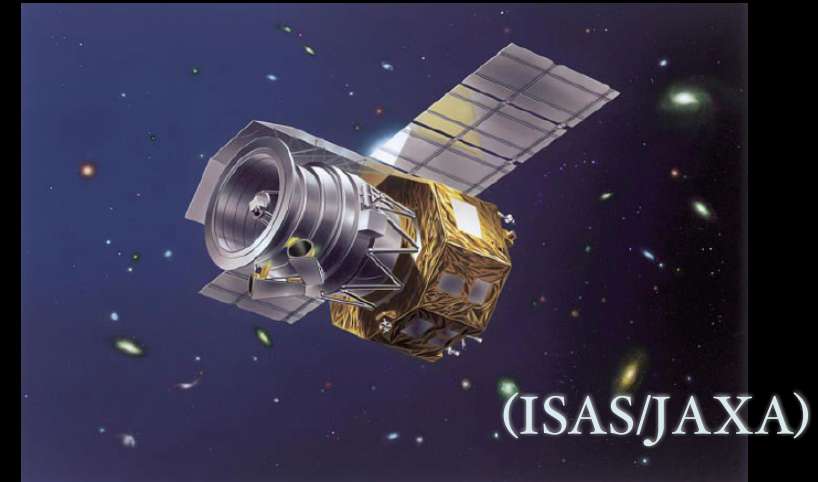
**CO<sub>2</sub> is the main driving force of comet activities!!**



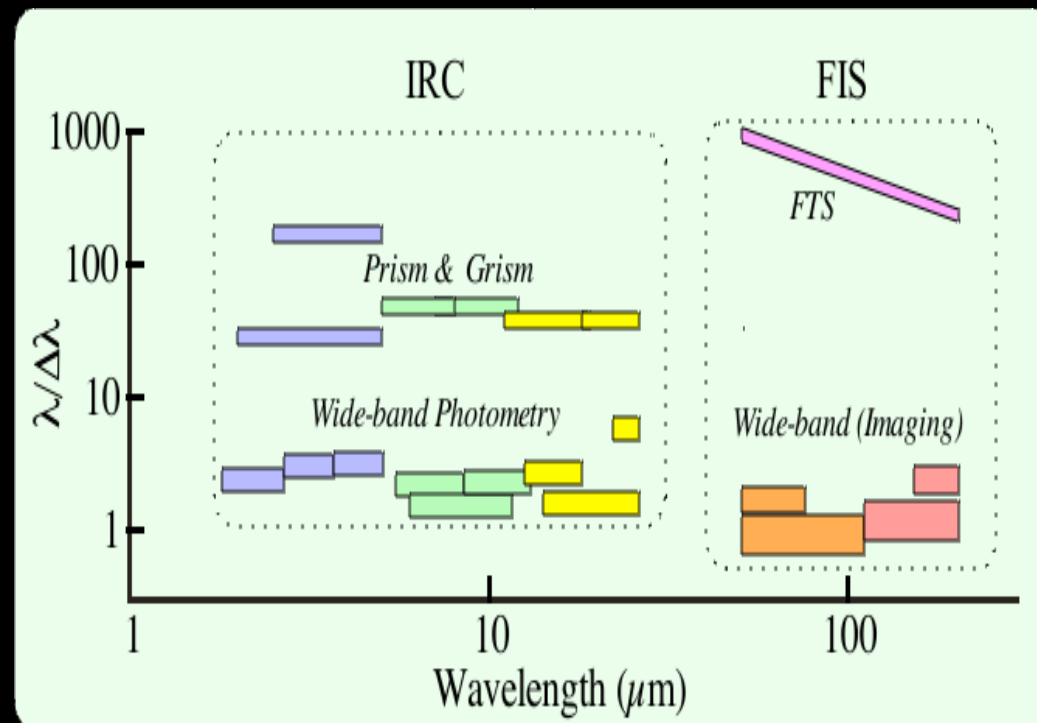
67P/CG by Rosetta (ESA)

# AKARI

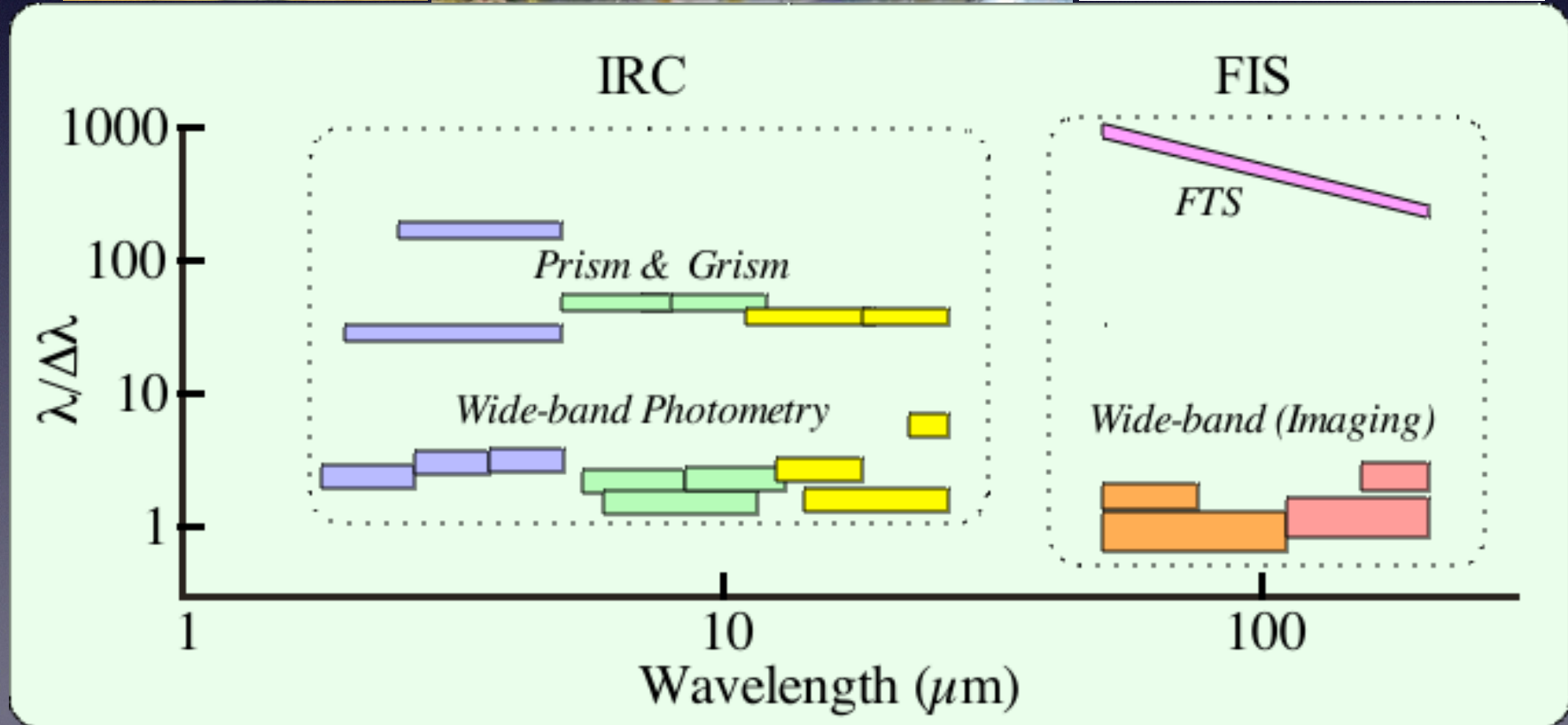
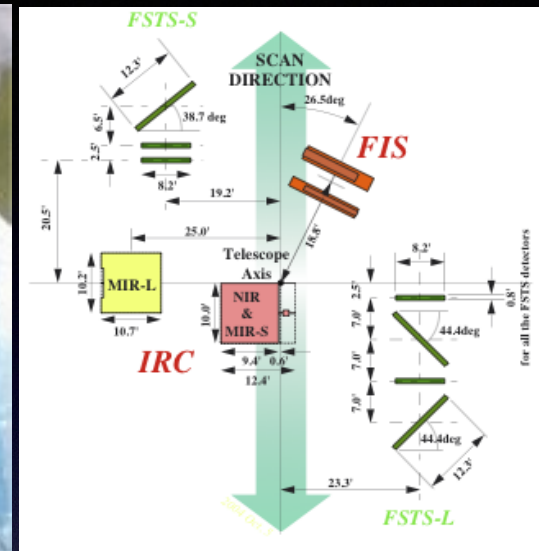
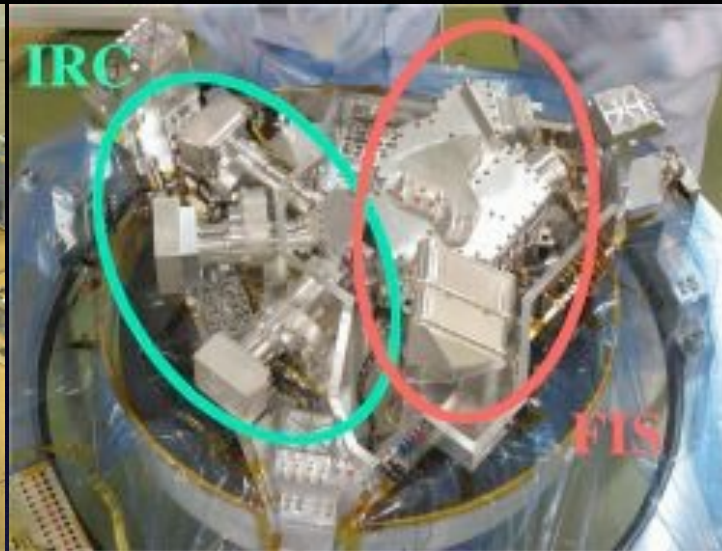
- Japanese infrared satellite
- launched on Feb 22, 2006 (JST)
- two focal-plane instruments
  - Far-Infrared Surveyor (FIS)
  - Infrared Camera (IRC)
- all-sky observations until August 2007 (> 1 year)
- imaging + spectroscopy



**Small-scale structures  
in  
AKARI all-sky maps**



# FIS + IRC





# Observations - target comets

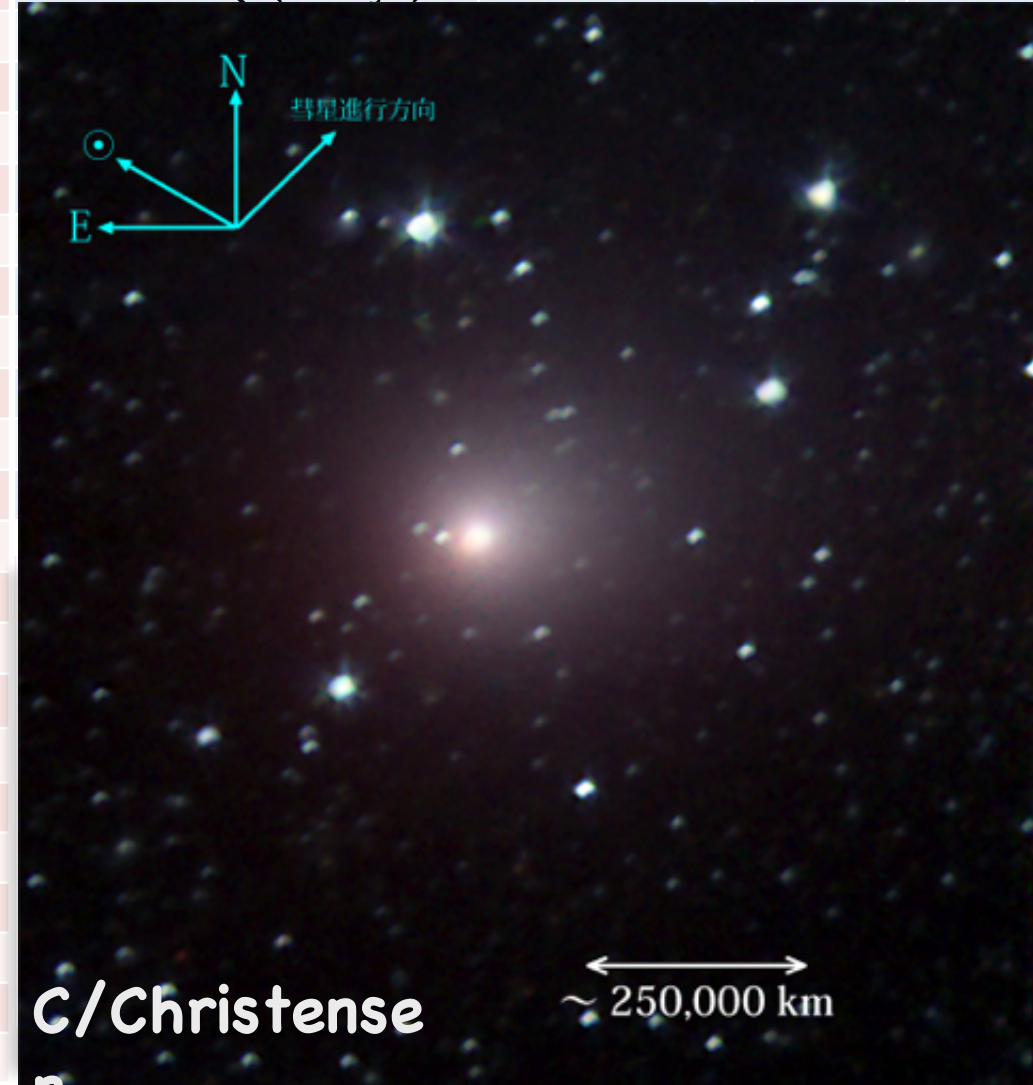
C/Lulin



|              |               |      |      |
|--------------|---------------|------|------|
| 118P/S-L 4   | Sep 8.8 2009  | 2.22 | 1.99 |
| 144P/Kushida | Apr 18.5 2009 | 1.70 | 1.37 |
| 144P/Kushida | Apr 18.6 2009 | 1.70 | 1.37 |
| 157P/Tritton | Dec 30.1 2009 | 1.48 | 1.11 |
| 157P/Tritton | Dec 30.3 2009 | 1.48 | 1.11 |

(Oort cloud comets)

| Object                 | UT Date       | $r_h$ [AU] | $\Delta$ [AU] |
|------------------------|---------------|------------|---------------|
| C/2006 OF2 (Broughton) | Sep 16.7 2008 | 2.43       | 2.21          |
| C/2006 OF2 (Broughton) | Mar 28.1      | 3.20       | 3.04          |
| C/2006 Q1 (McNaught)   | Jun 3.6 2008  | 2.78       | 2.59          |



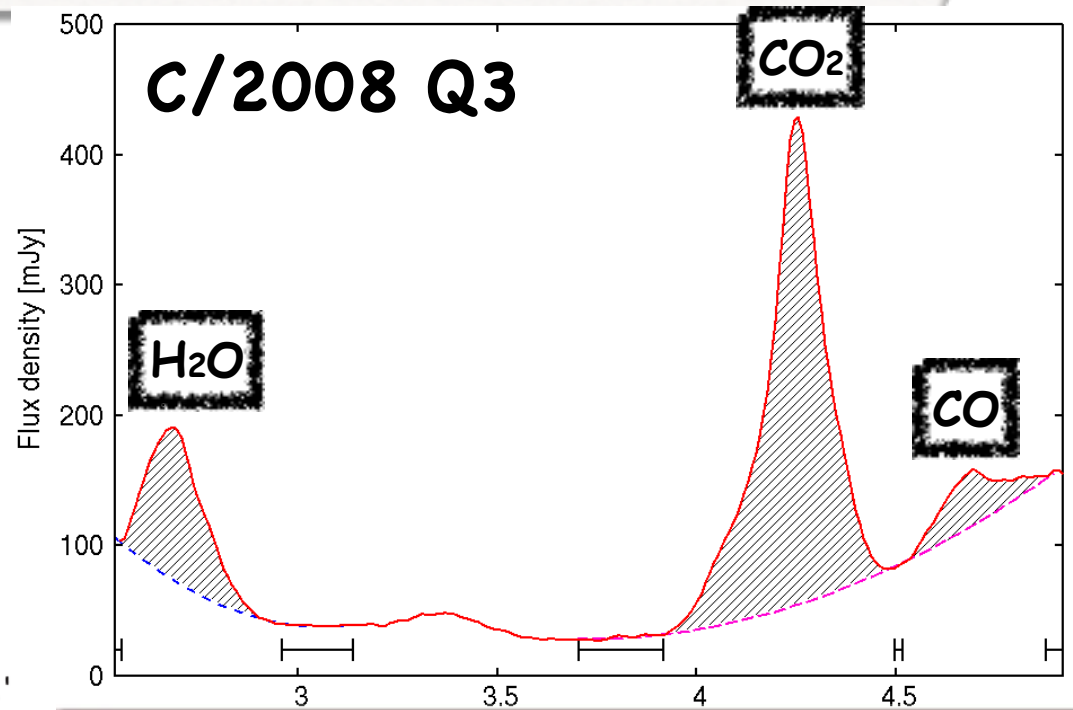
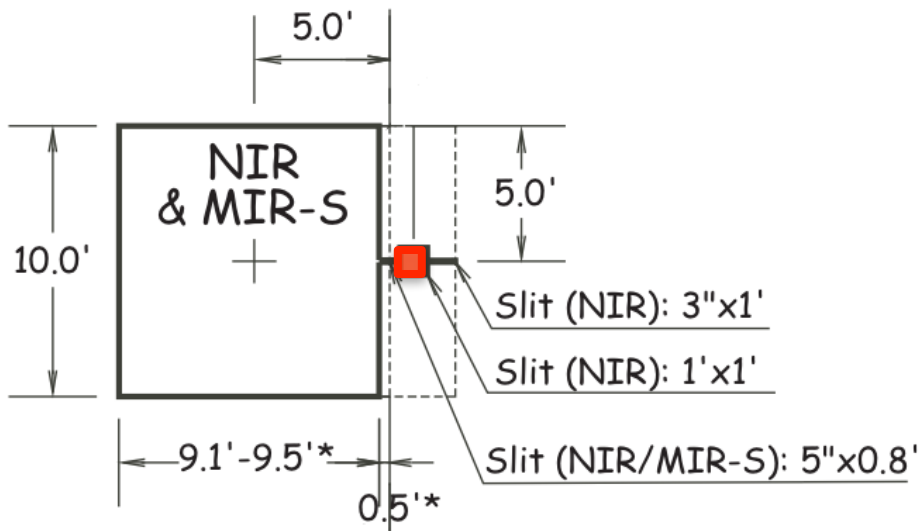
C/Christense

~ 250,000 km



# Observations - AKARI/IRC

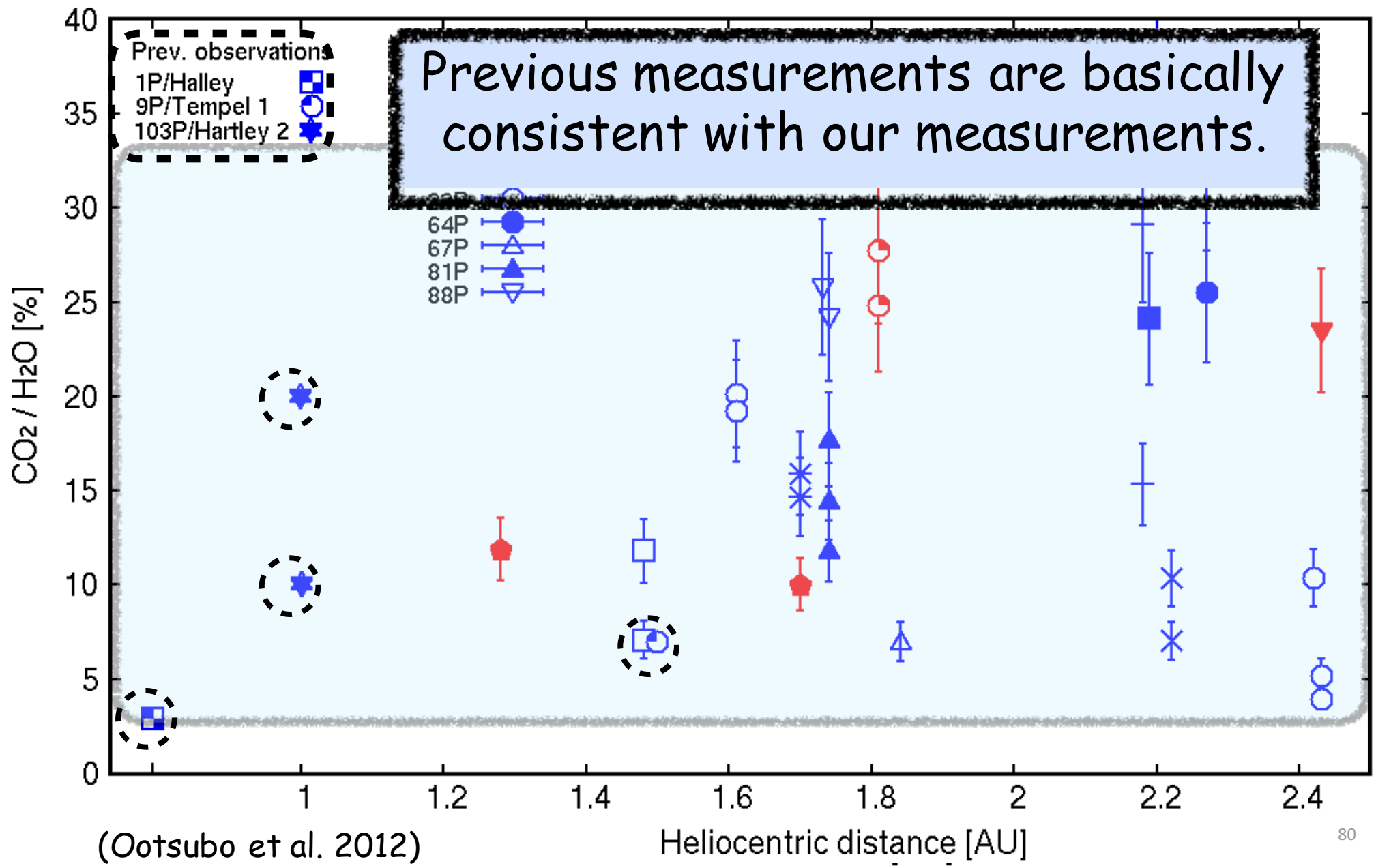
| (1)<br>Channel | (2)<br>Name | (3)    | (4)<br>$\lambda_{ref}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | (5)<br>Wavelength<br>( $\mu\text{m}$ ) | (6)<br>$\lambda_c$<br>( $\mu\text{m}$ ) | (7)<br>$\Delta\lambda$<br>( $\mu\text{m}/\text{pix}$ ) | (8)<br>Dispersion<br>( $\mu\text{m}/\text{pix}$ ) |
|----------------|-------------|--------|---|--|---|--|---|
| NIR            | N2          | filter | 2.4   | 1.9–2.8                                | 2.34                                    | 0.71   | —   |
|                | N3          | filter | 3.2   | 2.7–3.8                                | 3.19                                    | 0.87   | —   |
|                | N4          | filter | 4.1   | 3.6–5.3                                | 4.33                                    | 1.53   | —   |
|                | NP          | prism  |   | 1.8–5.2                                | —                                       | —  | 0.06 @3.5 $\mu\text{m}$                           |
|                | NG          | grism  |   | 2.5–5.0                                | —                                       | —  | 0.0097  |





# Results of CO<sub>2</sub> Mixing Ratio (gas production rate ratio CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O )

insufficient H<sub>2</sub>O sublimation





# Comparison with interstellar ices

$CO_2/H_2O = 11\% - 24\%$  ( $X_{median} = 17\%$ )  
for AKARI comet samples

Abundance Medians and Lower and Upper Quartile Values of Ices with Respect to Water ice (Oberg et al. 2011)

| Ice Feature      | Low Mass            | High Mass      |
|------------------|---------------------|----------------|
| H <sub>2</sub> O | 100                 | 100            |
| CO               | $38^{61}_{20}$ (29) | $13^{19}_7$    |
| CO <sub>2</sub>  | $29^{35}_{22}$      | $13^{22}_{12}$ |

Comets < **low-mass protostars**

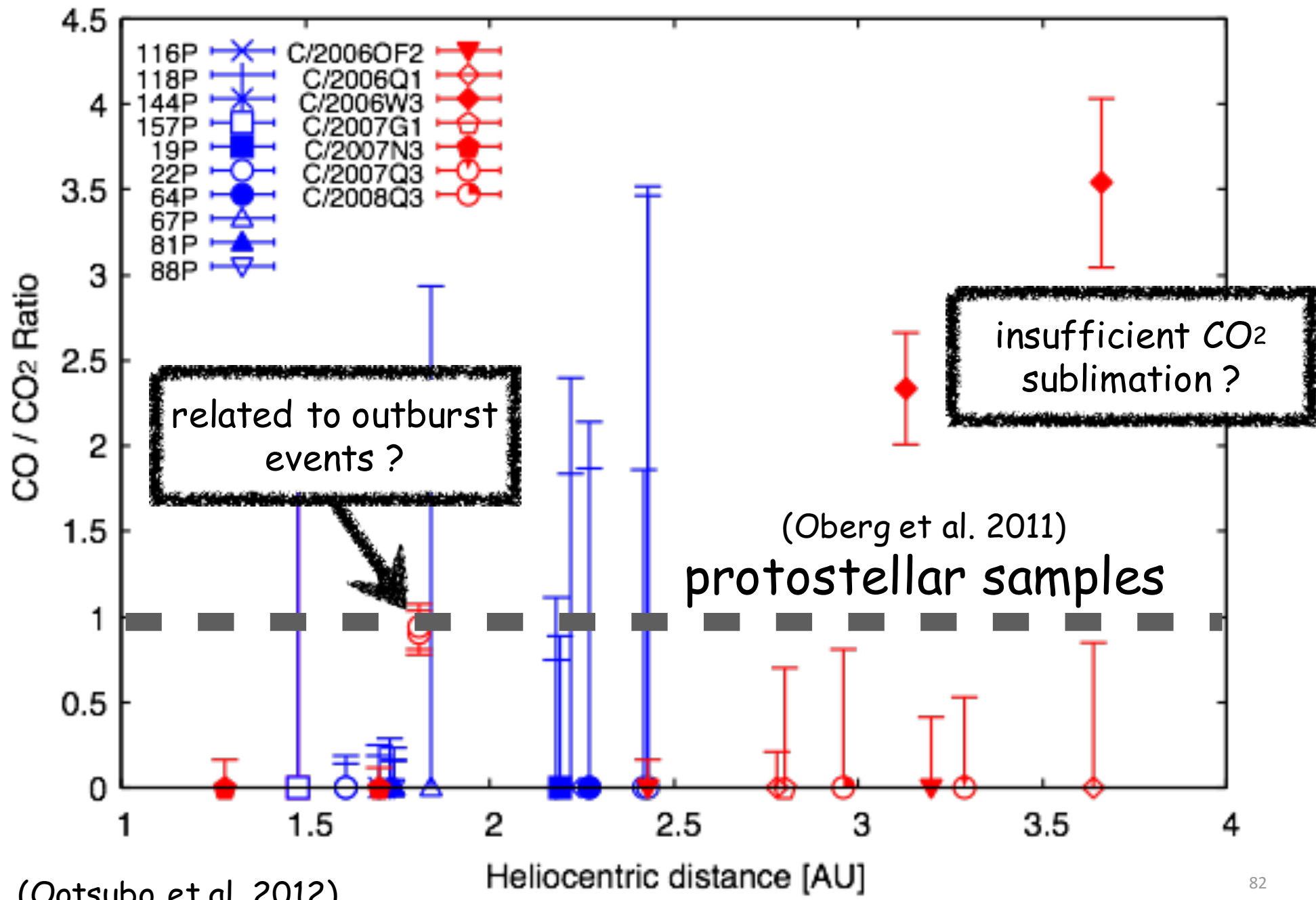
Comets ~ **high mass protostars**

Cometary ices were altered in the early solar nebula ?





# CO/CO<sub>2</sub> ratio



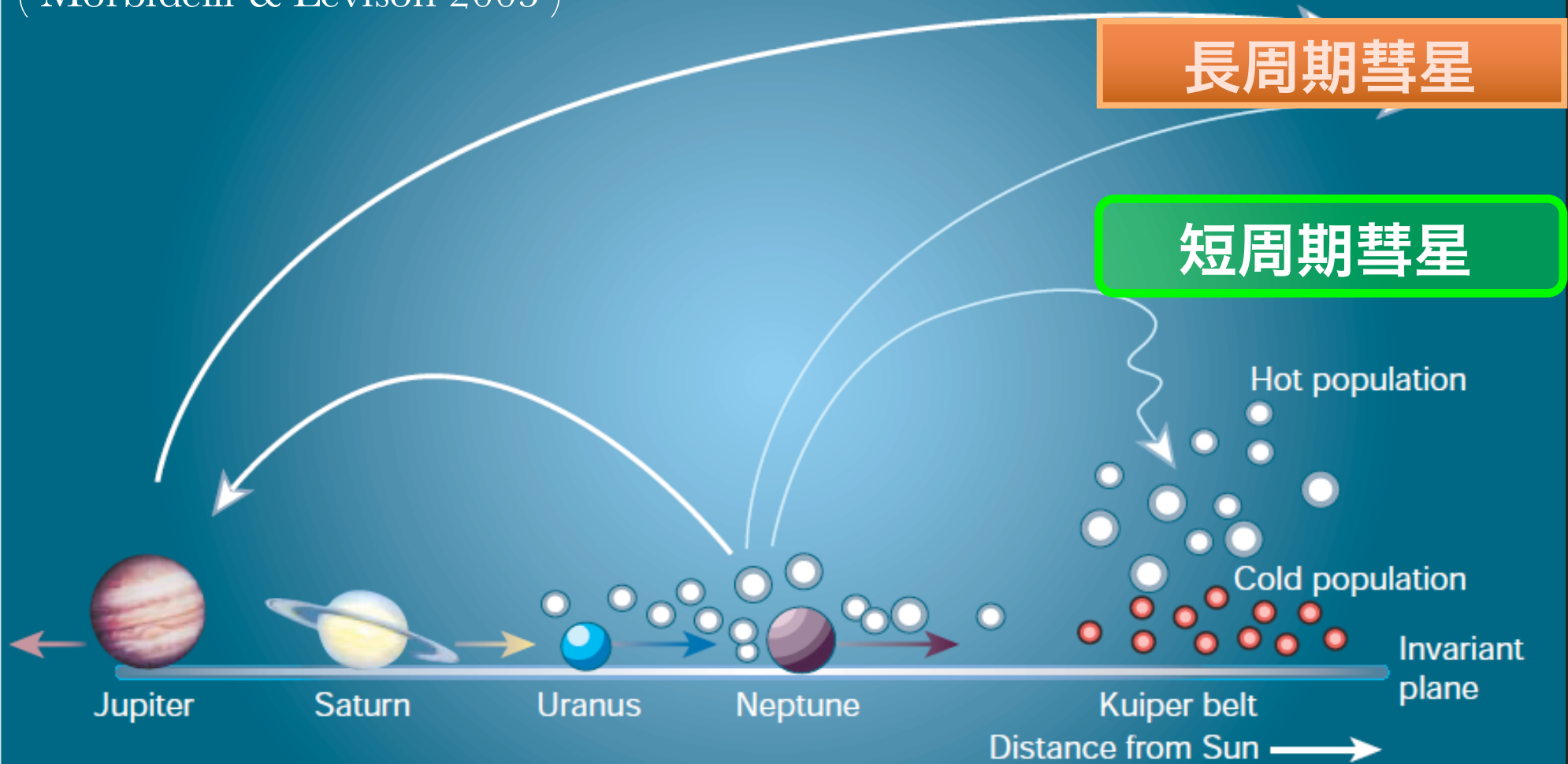
(Ootsubo et al. 2012)



# Summary for comet ice

- AKARI/IRCによる彗星18天体の近赤外線 (2.5–5  $\mu\text{m}$ ) 観測
- AKARI/IRC は  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  を同時に観測した
- これまでで最大の彗星  $\text{CO}_2$  観測データベース
  
- $\text{CO}_2$ 
  - 18彗星のうち 17 天体で検出 (29P/SW1 at 6 AU 以外)
  - $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  は  $< 4\text{--}30\%$  の幅でばらついている
  - 長周期・短周期で明確な差は見られていない (サンプル少だが)
- $\text{CO}$ 
  - 検出はわずかに 3 彗星 (29P, C/2006 W3, C/2008 Q3)
  - $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$  比はほとんど上限値のみ得られている
  
- 彗星における  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}/\text{CO}_2$ 
  - $\text{CO}_2$ : 低質量星周囲の氷よりも depleted
    - 微惑星形成時点での熱的要因 (彗星核の形成場所を示唆?)
  - $\text{CO}/\text{CO}_2 < 1$  --- 原始太陽系星雲は酸化するか?

( Morbidelli & Levison 2003 )

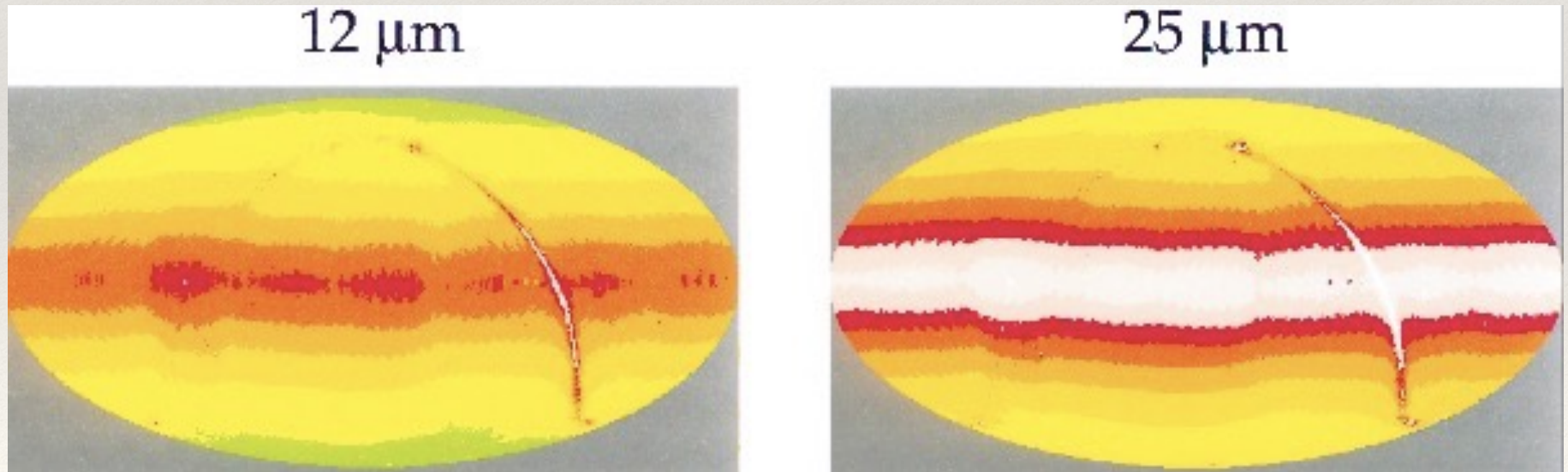


## 長周期彗星と 短周期彗星

- ・ 氷もダストも内部の組成の違いは大きくない
- ・ それぞれのカテゴリー内でのばらつきが大きい
- ・ それほど遠い領域で形成されたわけではなさそう and/or
- ・ 原始太陽系星雲中で物質が十分にかき混ぜられていた？

# 黄道光・黄道光放射

- Interplanetary dust (particles) (惑星間塵)
  - 惑星間空間に広く分布する sub- $\mu\text{m}$ ~mmサイズの固体微粒子
  - 特に**中間-遠赤外線**波長帯では非常に卓越した前景光
  - **彗星、小惑星起源**、外縁天体起源、および星間空間起源
  - 太陽系小天体及び塵の最近の力学的進化を知る手がかり
  - 系外惑星系・系外黄道光との比較対象という点でも重要

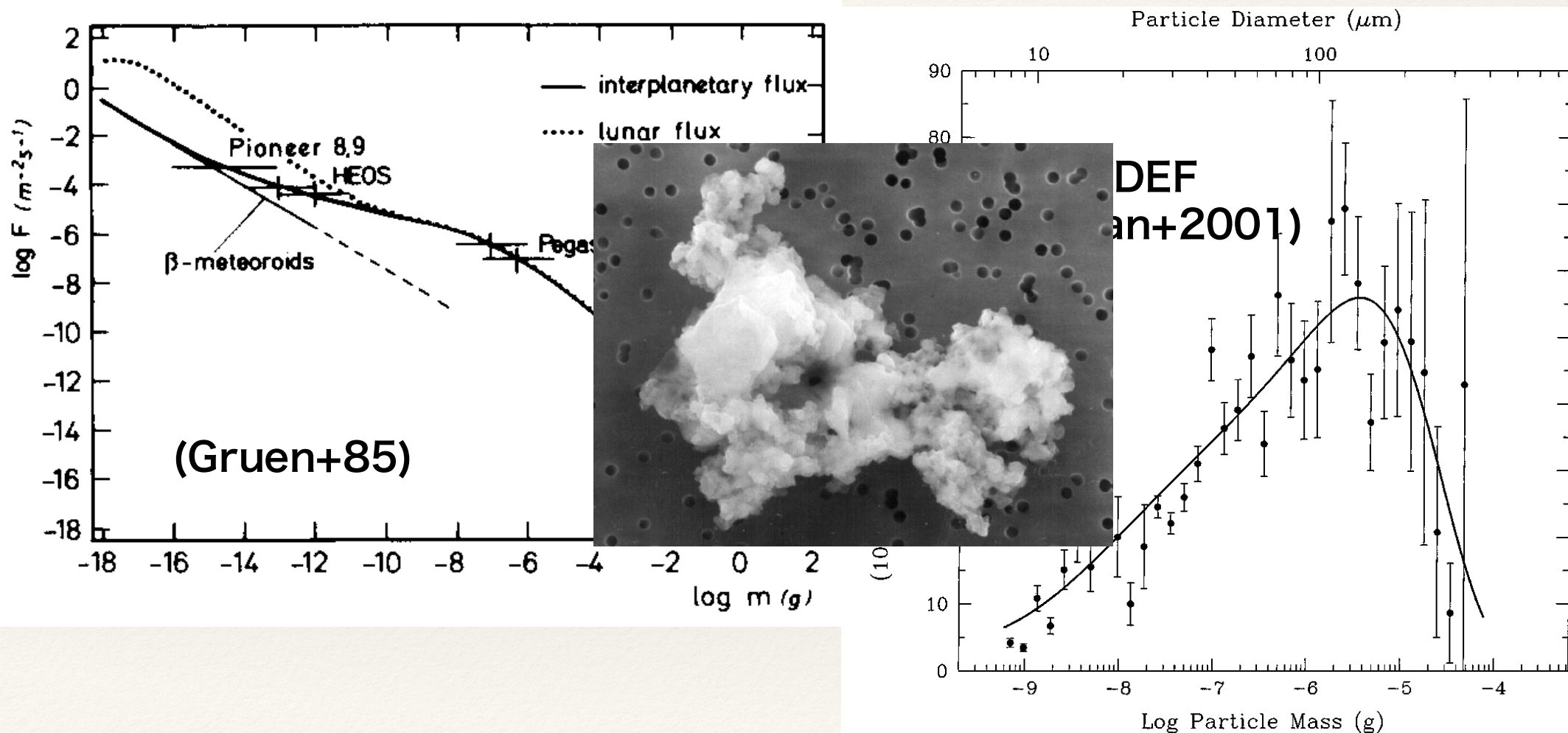


DIRBE mission-averaged sky maps (in Ecliptic coordinates)

(Kelsall+ 1998)

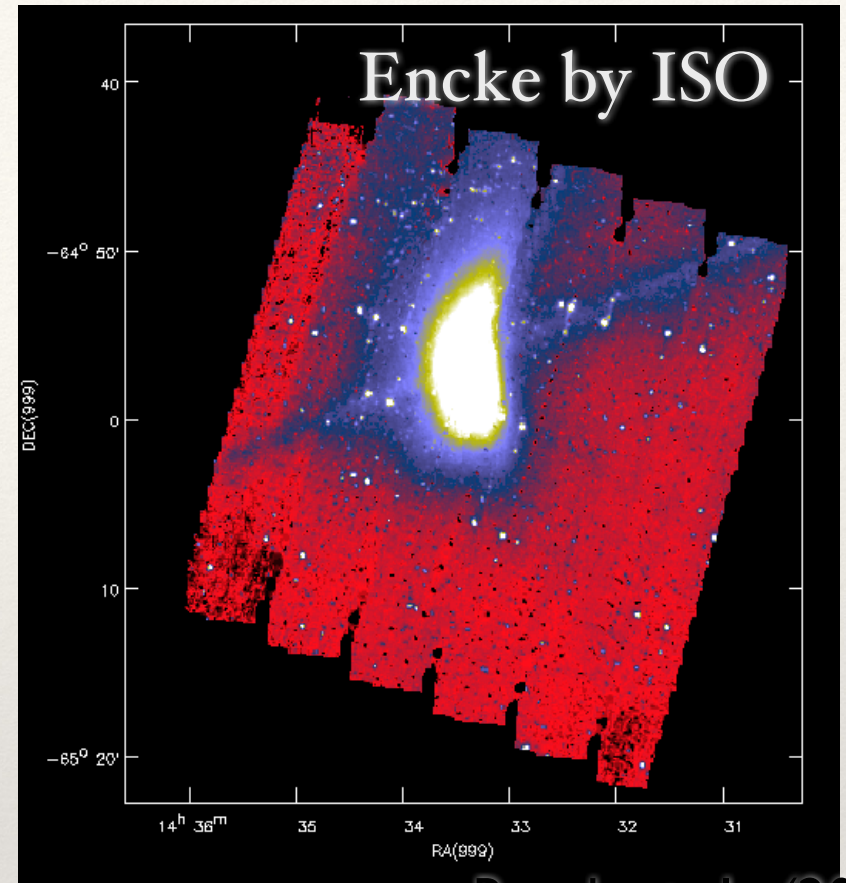
# 惑星間塵の粒径分布

- Interplanetary dust (particles) (惑星間塵)
  - 惑星間空間に広く分布する sub- $\mu\text{m}$ ~mmサイズの固体微粒子

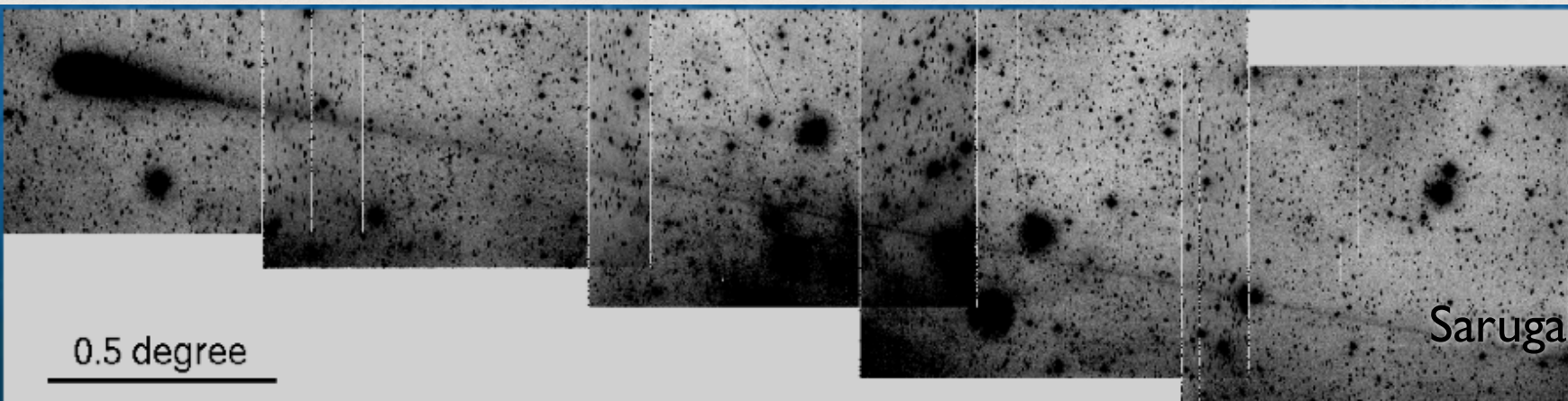


# 惑星間塵の供給源：彗星

- 1 AU付近では、おそらく短周期彗星がメインの供給源 (Nesvorny+2011)
- 彗星ダストトレイルの発見など、大きめ ( $> 100\mu\text{m}$ ) のダストが惑星間空間に供給されていることが分かってきた



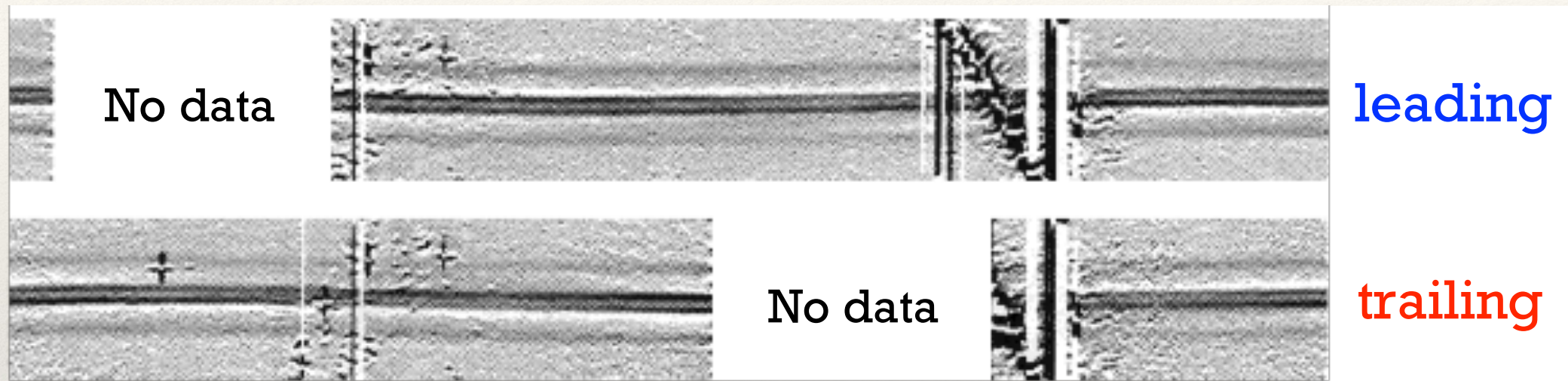
Reach et al. (2000)



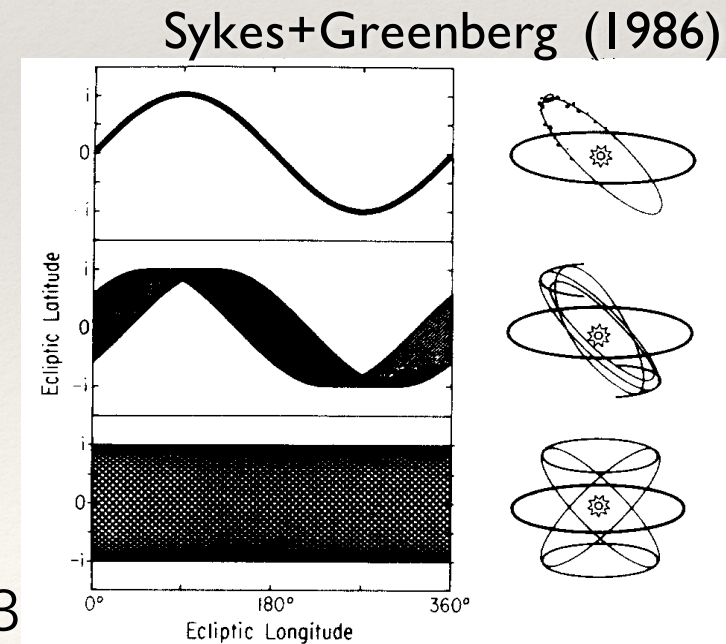
Sarugaku et al. (2007)

# 惑星間塵の供給源：小惑星

- 小惑星ダストバンド (Low et al. 1984, Sykes et al. 1988)



- メインベルト内の小惑星族での衝突起源？
  - ここ最近 ( $< 10^7$ 年) 程度以内の衝突
    - $\pm 1.4^\circ$  band
      - Beagle family origin ? ( $< 15$  Myr ago)
    - $\pm 2.1^\circ$  band
      - Karin cluster origin ? (5.8 Myr ago)
    - $\pm 10^\circ$  ( $\pm 9.35^\circ$ ) band
      - Veritas family origin ? (8.3 Myr ago)
- (Nesvorny et al. 2003)



# ZL observed with AKARI

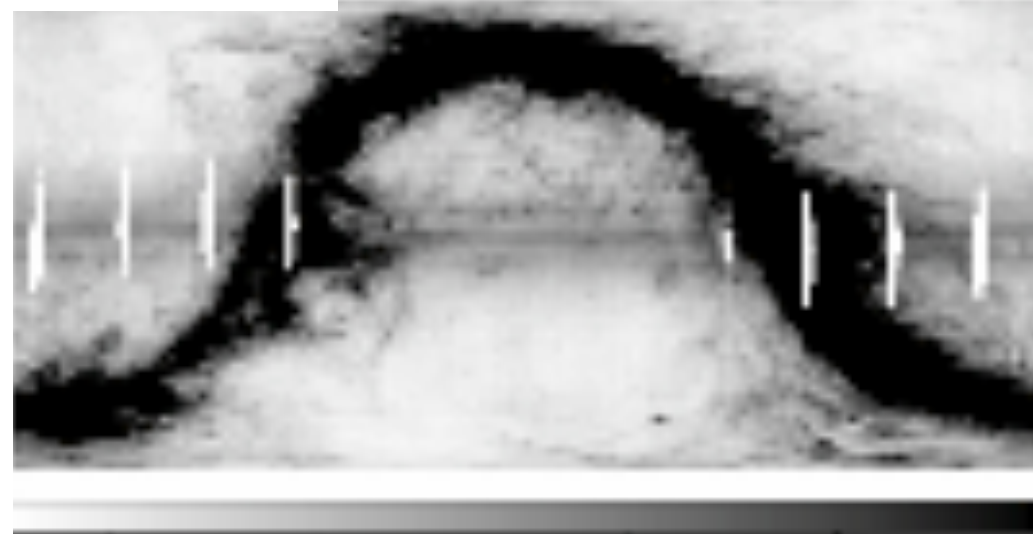
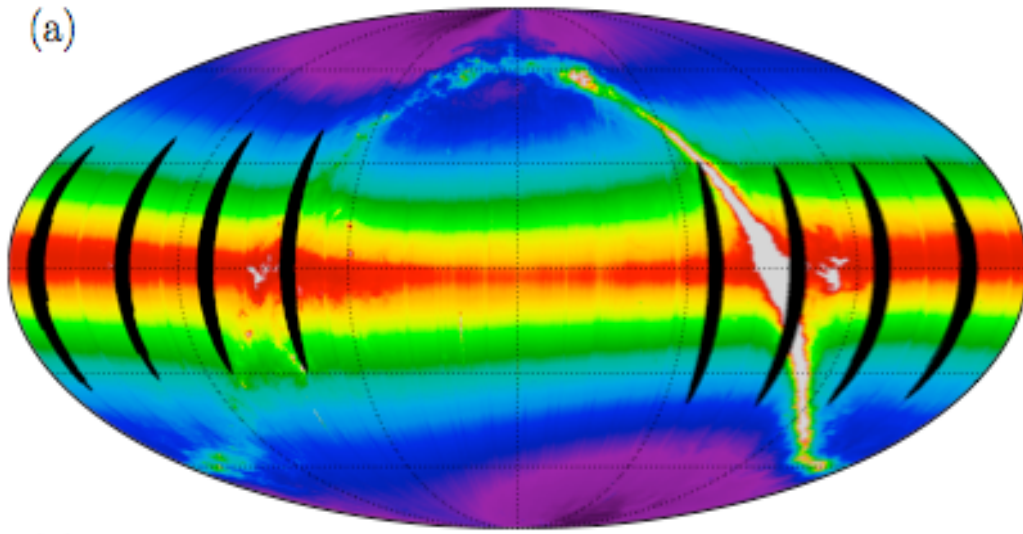
## 18 & 90 $\mu\text{m}$ -band

Pyo et al. 2010

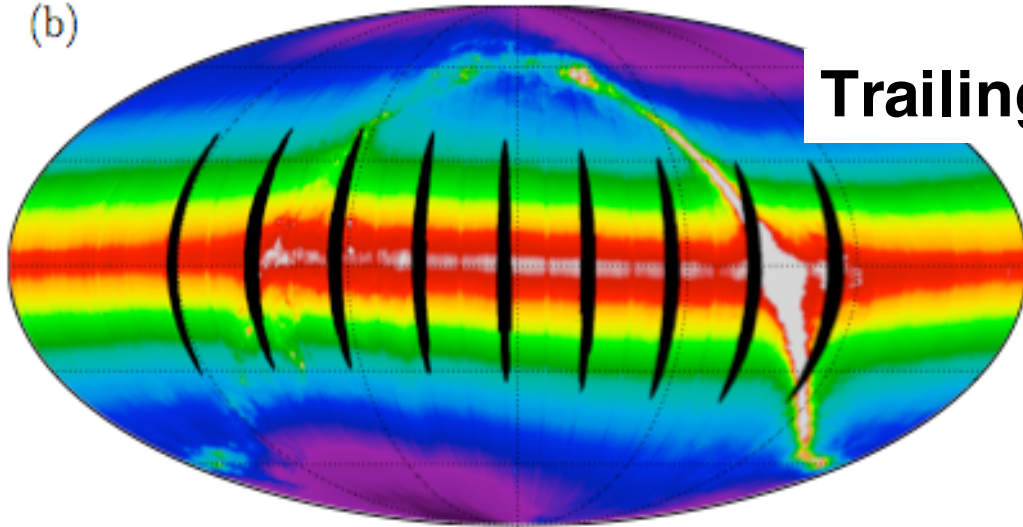
Leading direction

Ootsubo et al. 2015

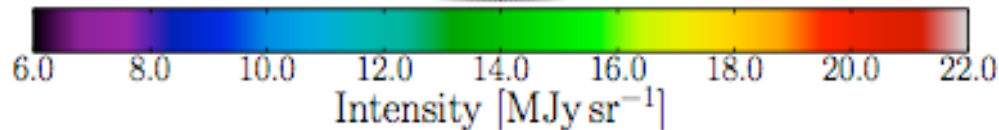
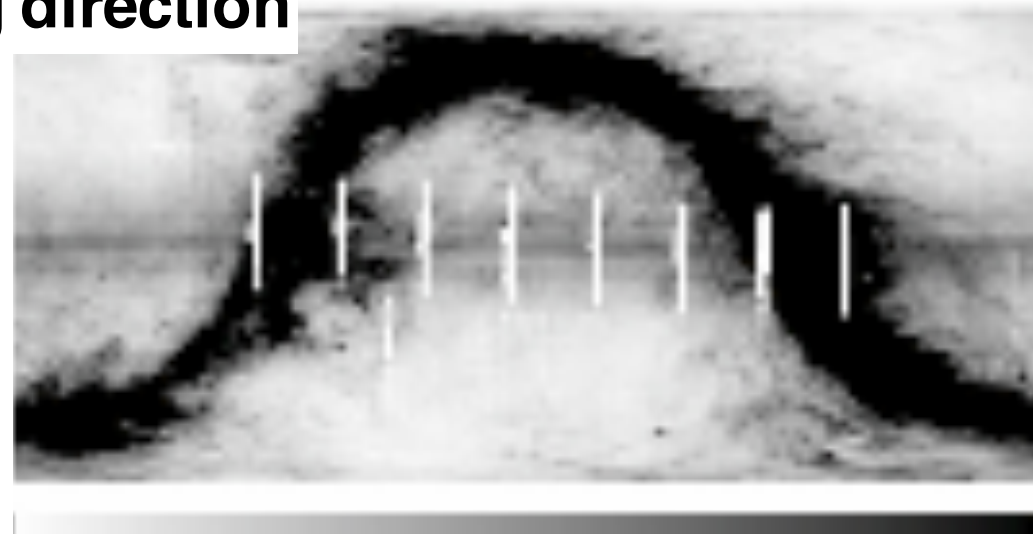
(a)



(b)

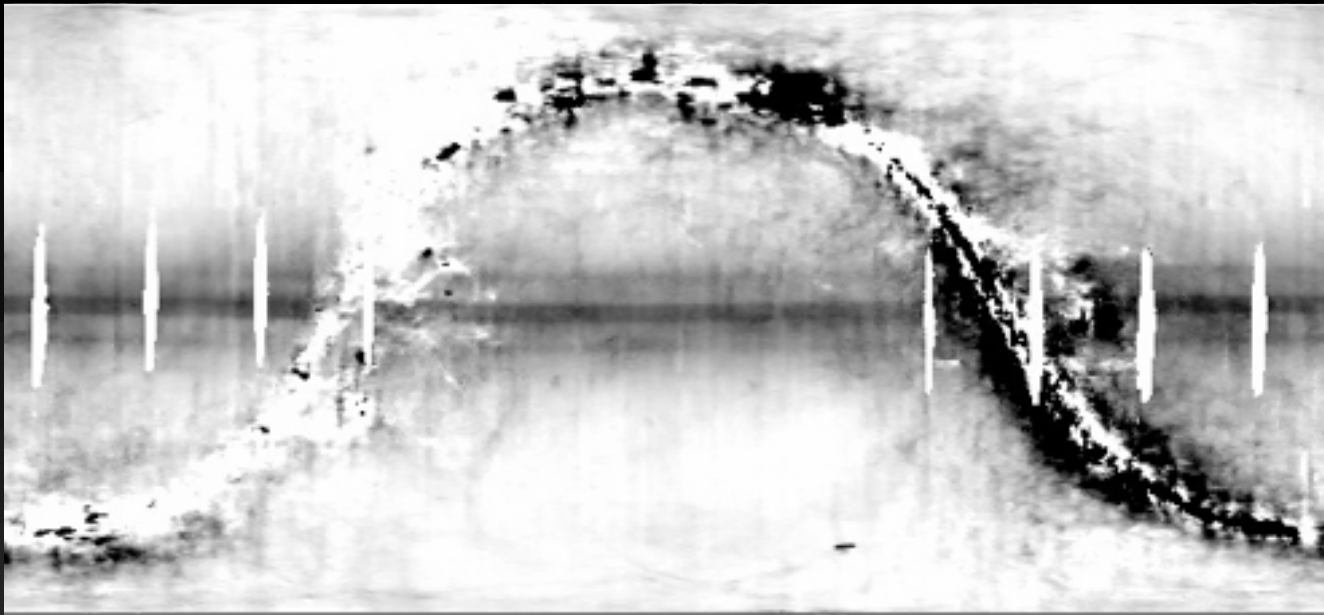


Trailing direction

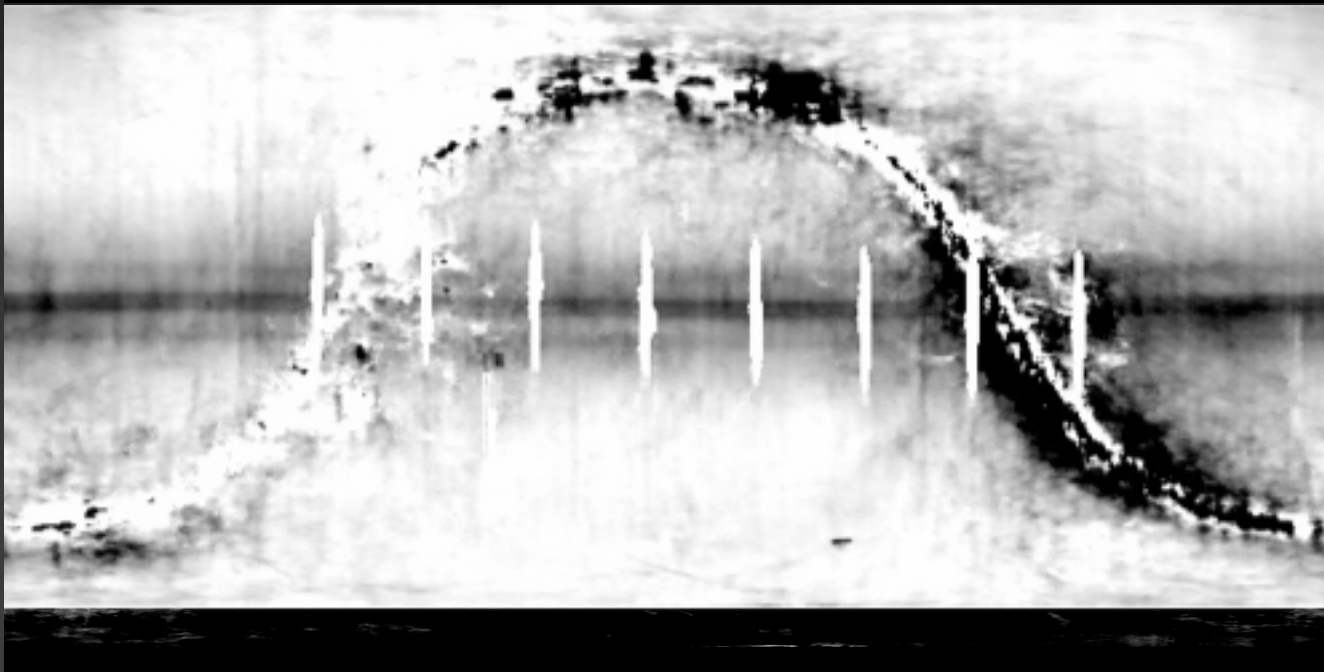




leading

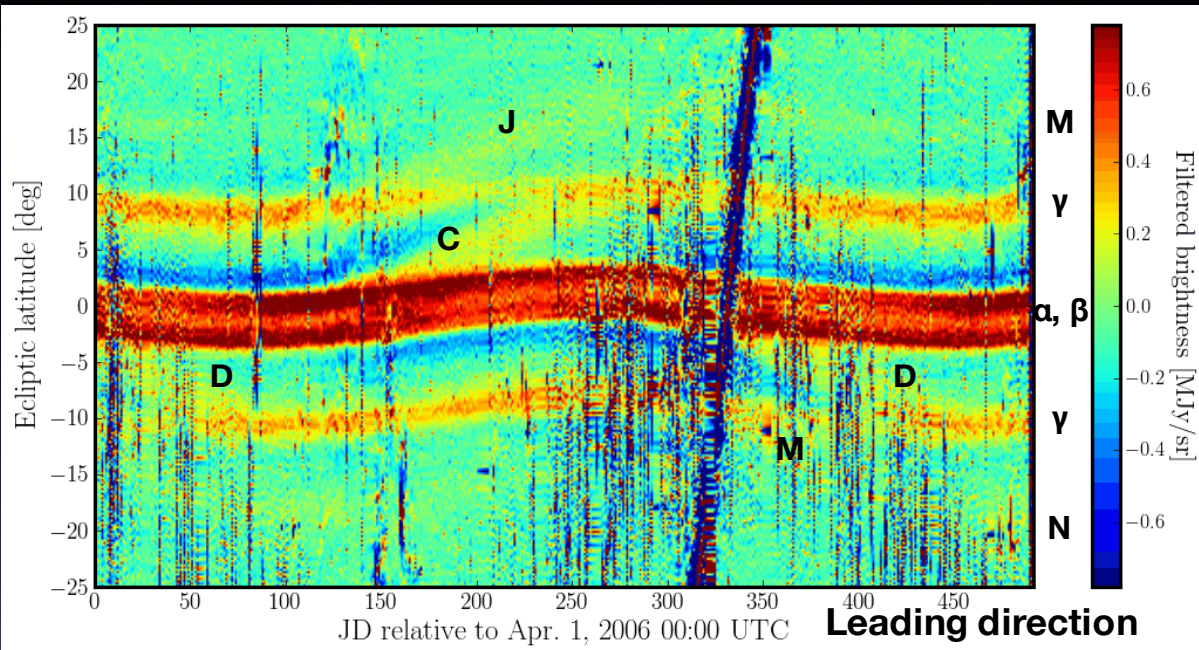


trailing



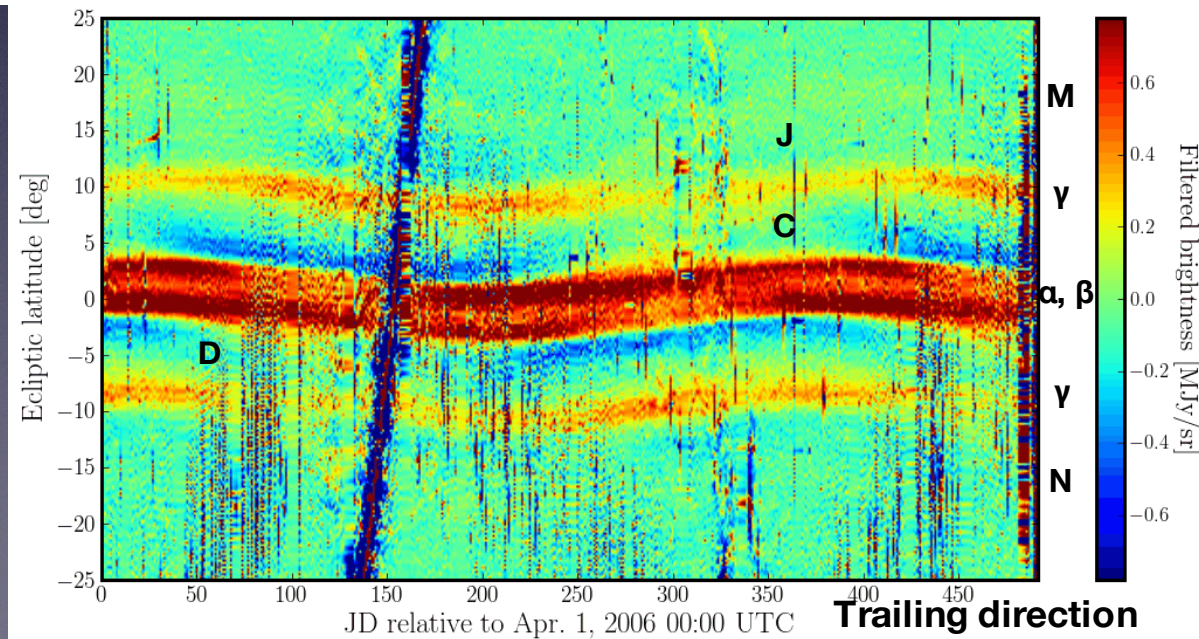
- clear detection of  $\pm 1.4^\circ$  and  $\pm 10^\circ$  dust bands in far-IR
- trailing direction  $< 10\%$  brighter than leading direction

# Dust bands observed with IRC

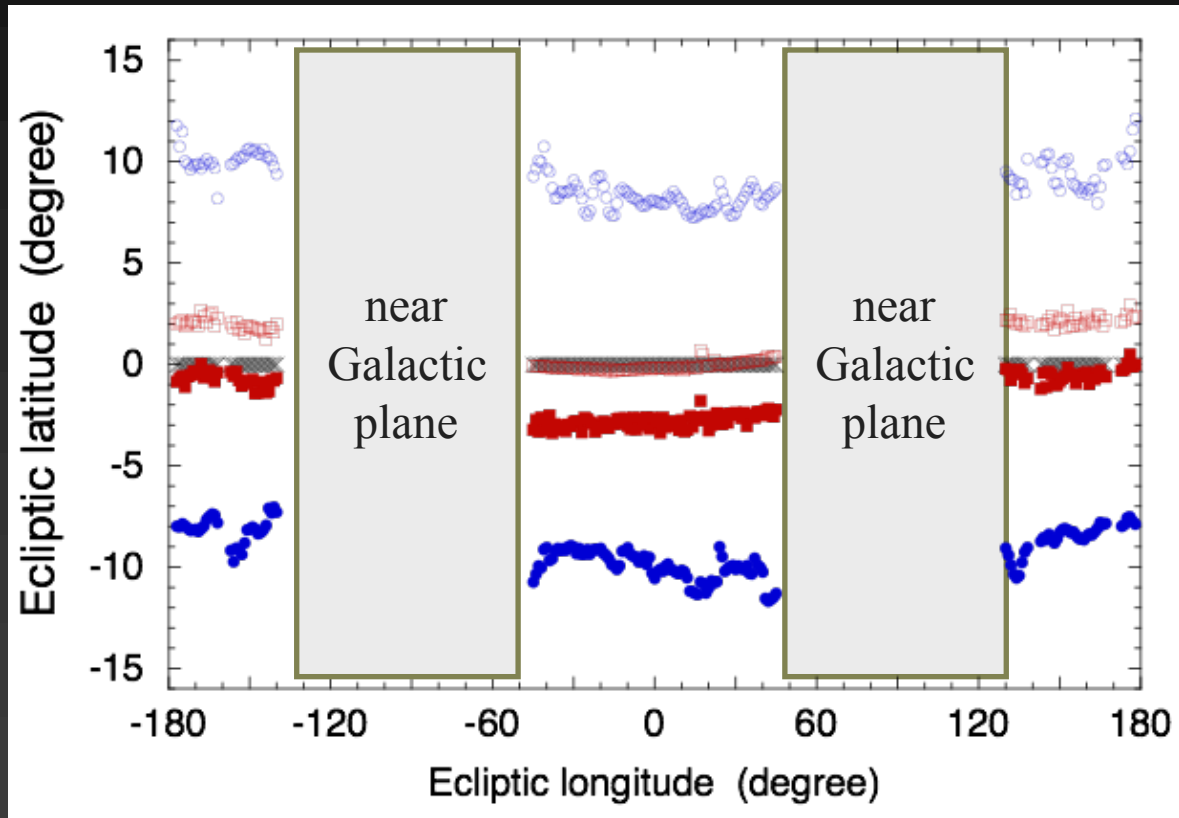
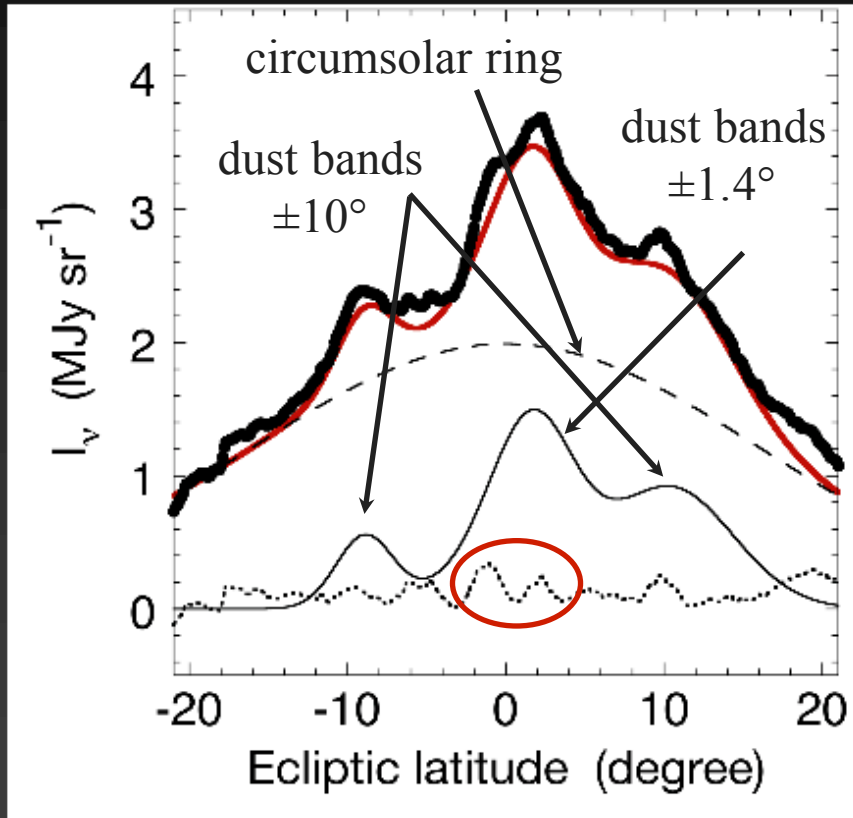
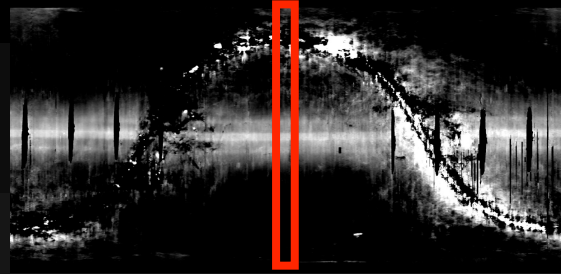


Observed by  
**AKARI L18W-band**  
(18 $\mu$ m)

Pyo et al. 2009

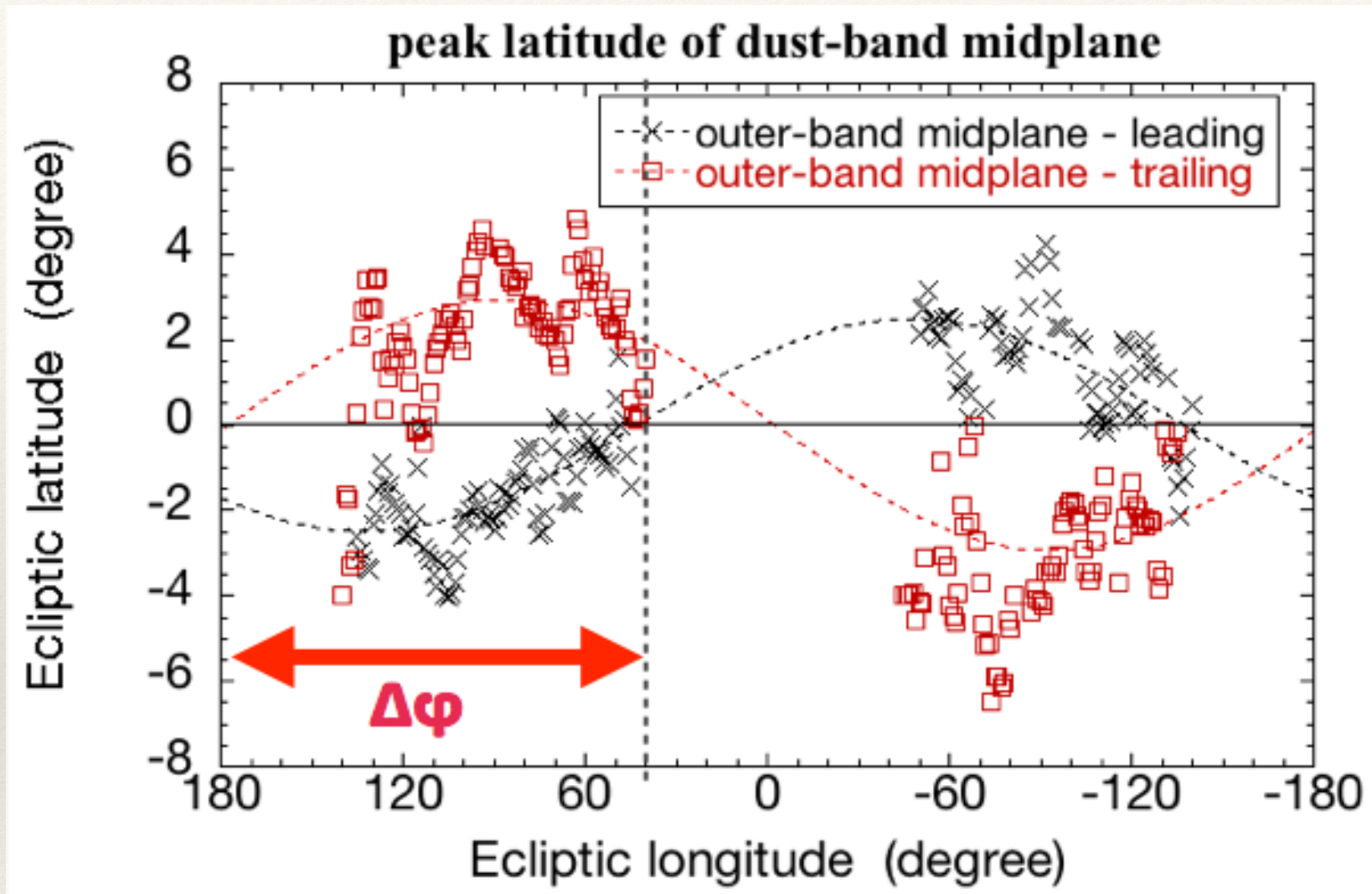


# AKARI dust band profile



- A 5-Gaussian fit to the latitude profiles (circumsolar ring + dust band pair x 2)
- intensity, latitude, and widths

# ダストバンドまでの距離



$$R = (\tan(\Delta\phi/2) + 1)^{1/2}$$

AKARI/FIS ( $90\mu\text{m}$ )

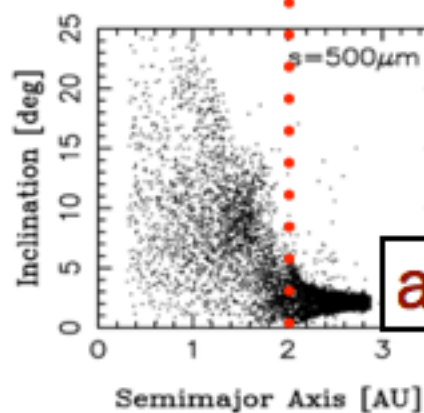
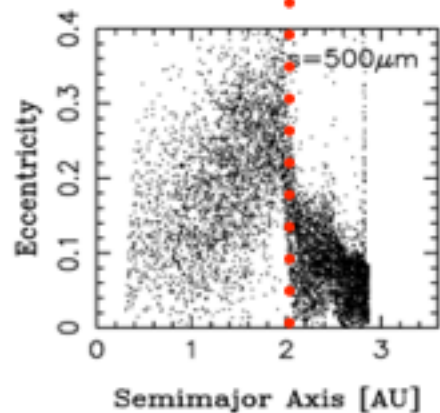
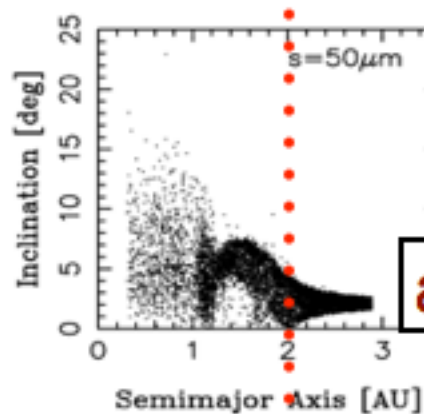
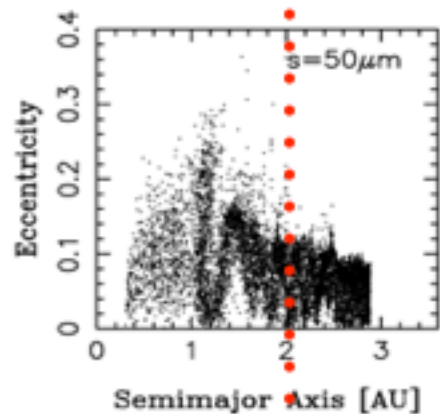
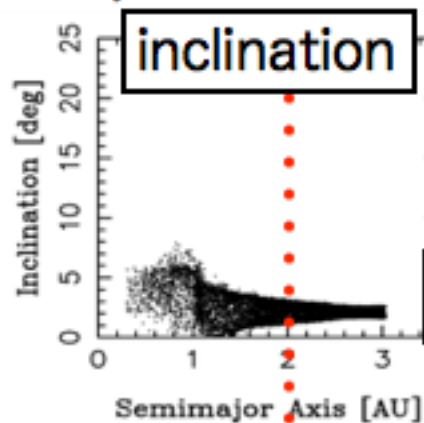
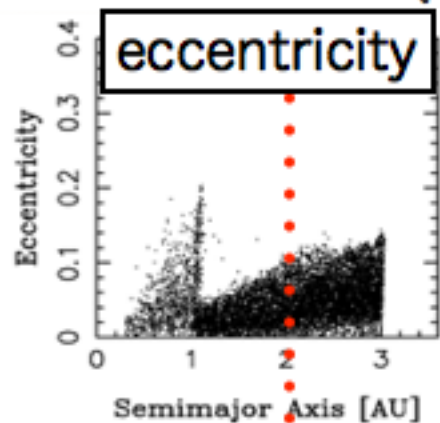
$\pm 1.4^\circ$ : 1.86 AU

$\pm 10^\circ$ : 2.16 AU

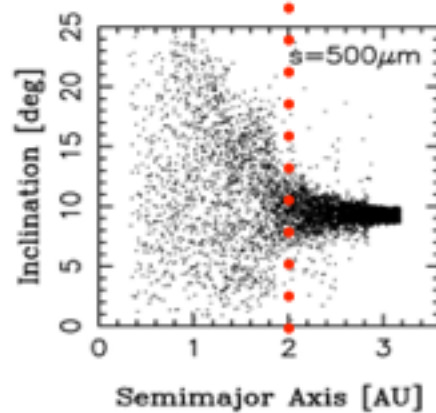
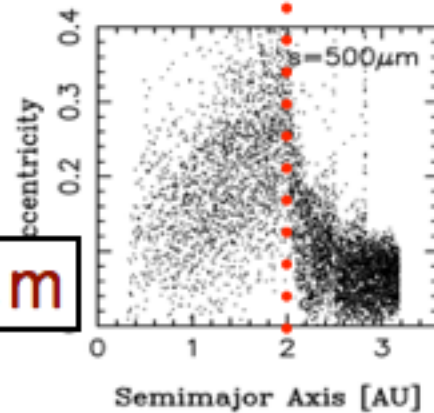
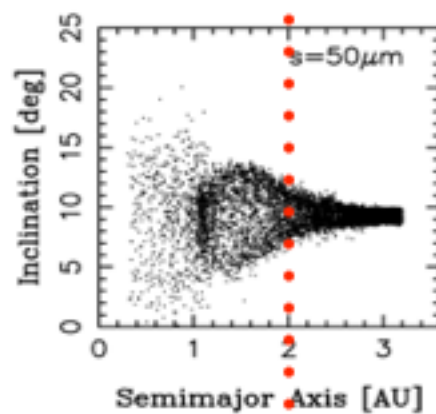
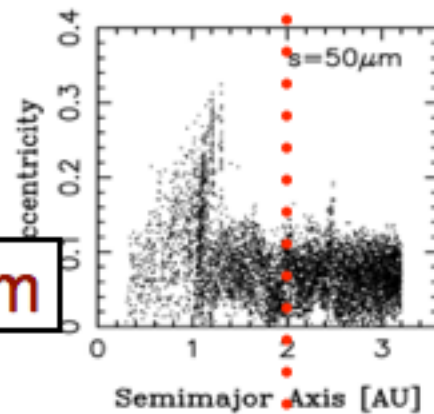
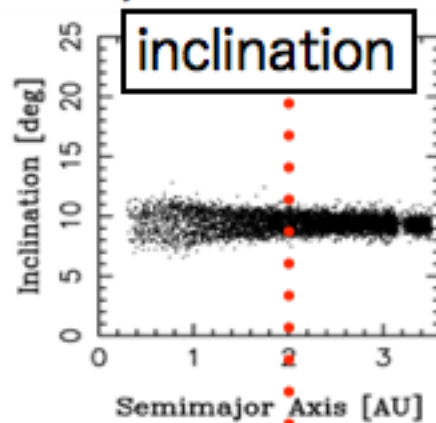
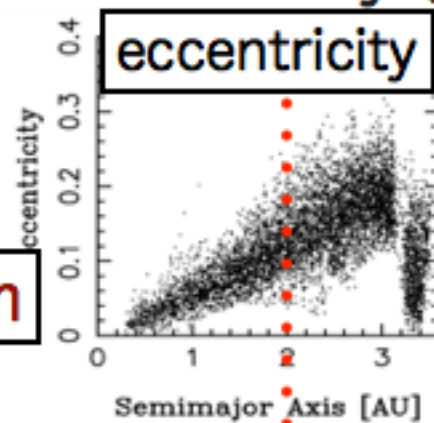
# ダストバンドまでの距離

(Nesvorny+2006)

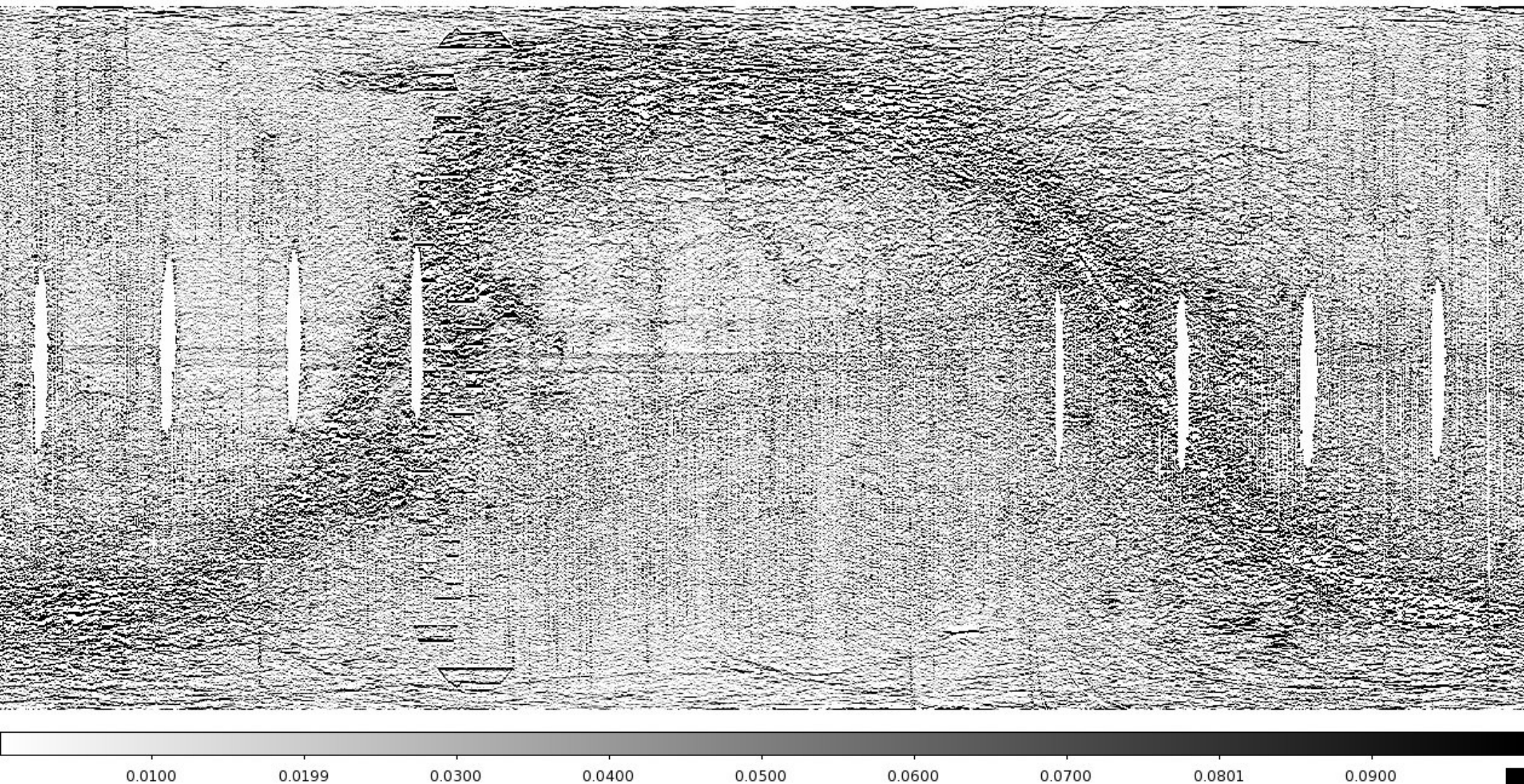
## Karin cluster ( $\pm 2.1^\circ$ ; $\sim 2.87$ AU)



## Veritas family ( $\pm 9.3^\circ$ ; $\sim 3.17$ AU)



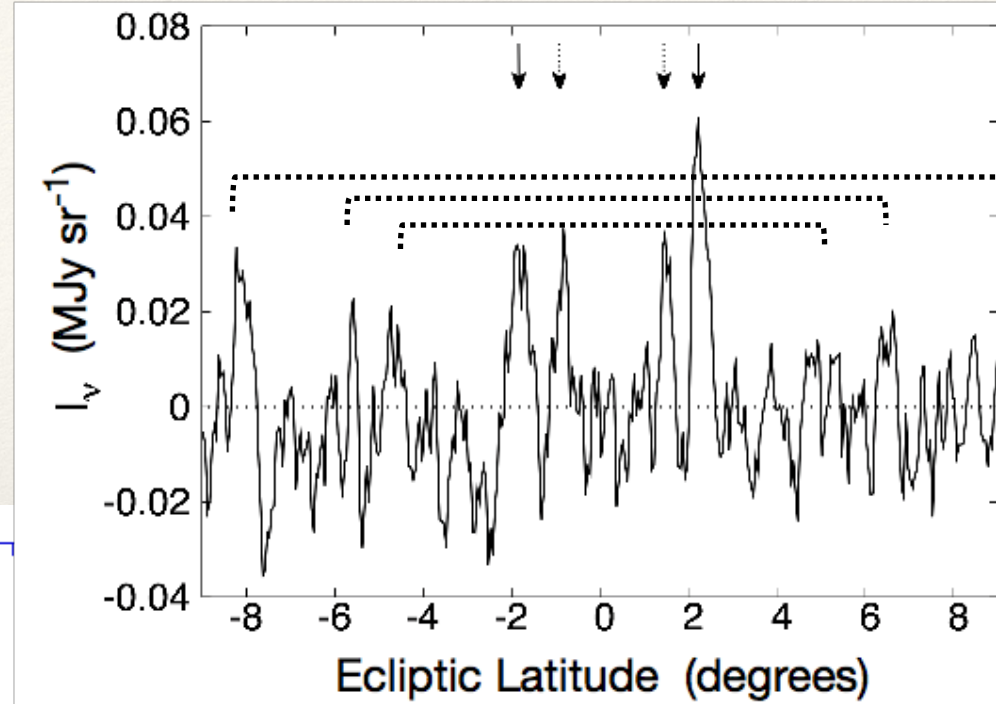
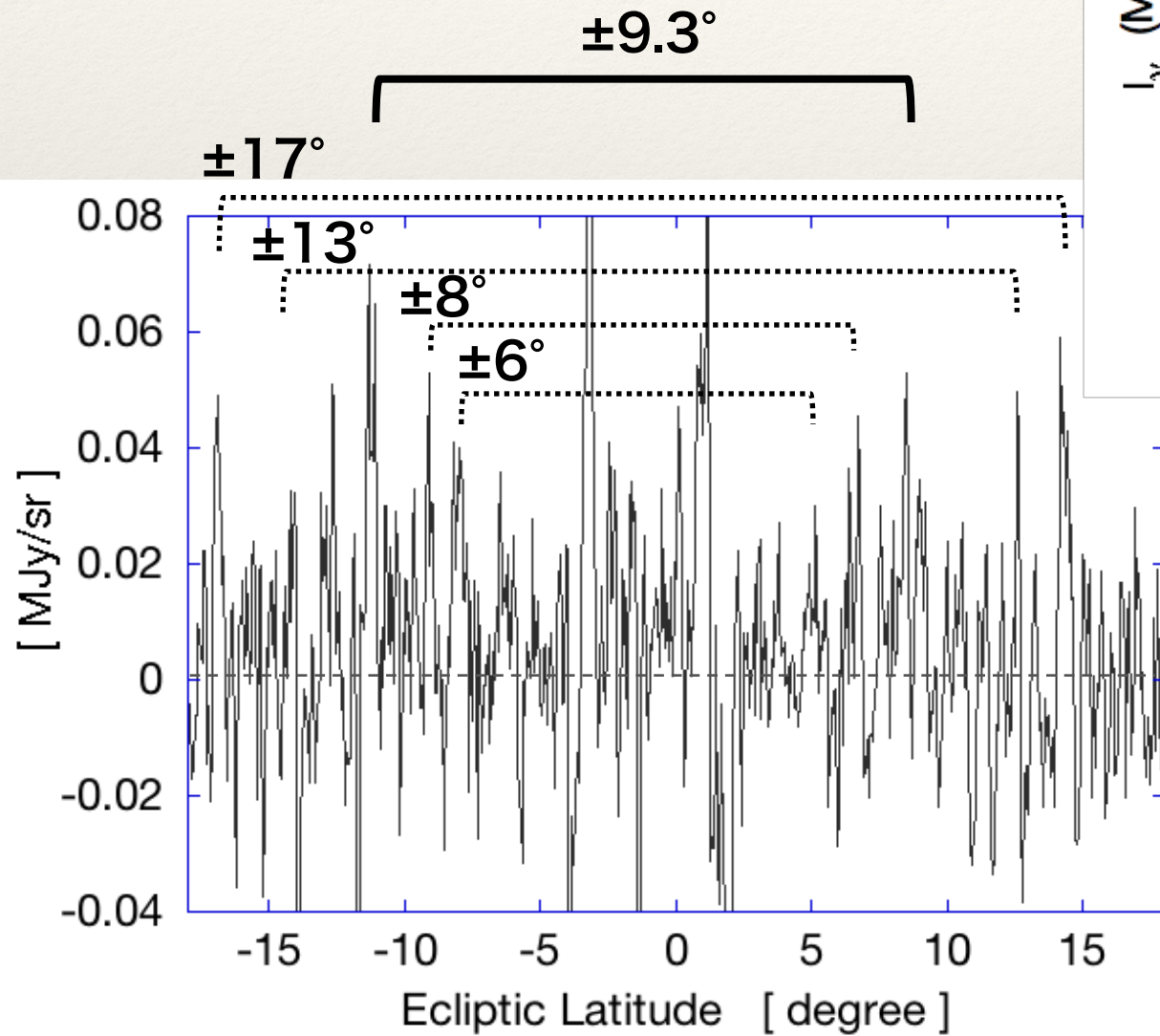
# image enhanced (filtered) AKARI map



黄緯方向に $2^\circ$ よりも大きな構造を boxcar-average subtraction で除去した $90\mu\text{m}$ 全天画像

# 更に微細なダストバンド構造

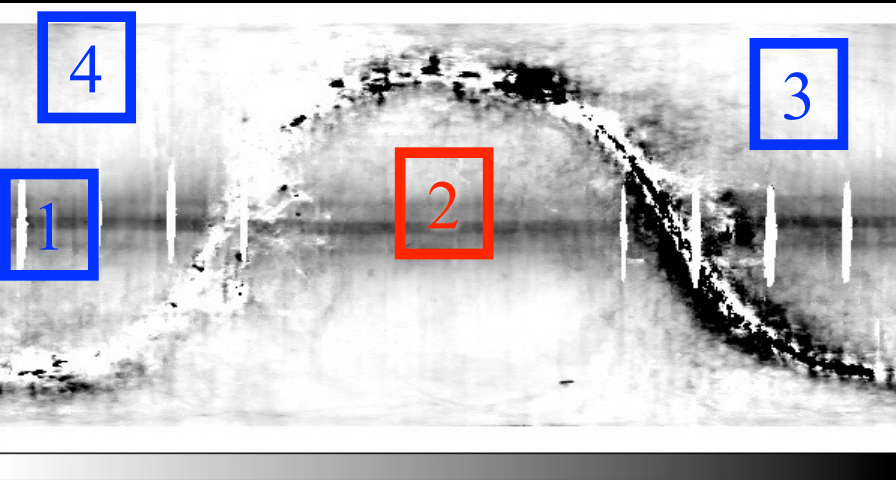
Image enhanced (filtered)  
latitude profiles



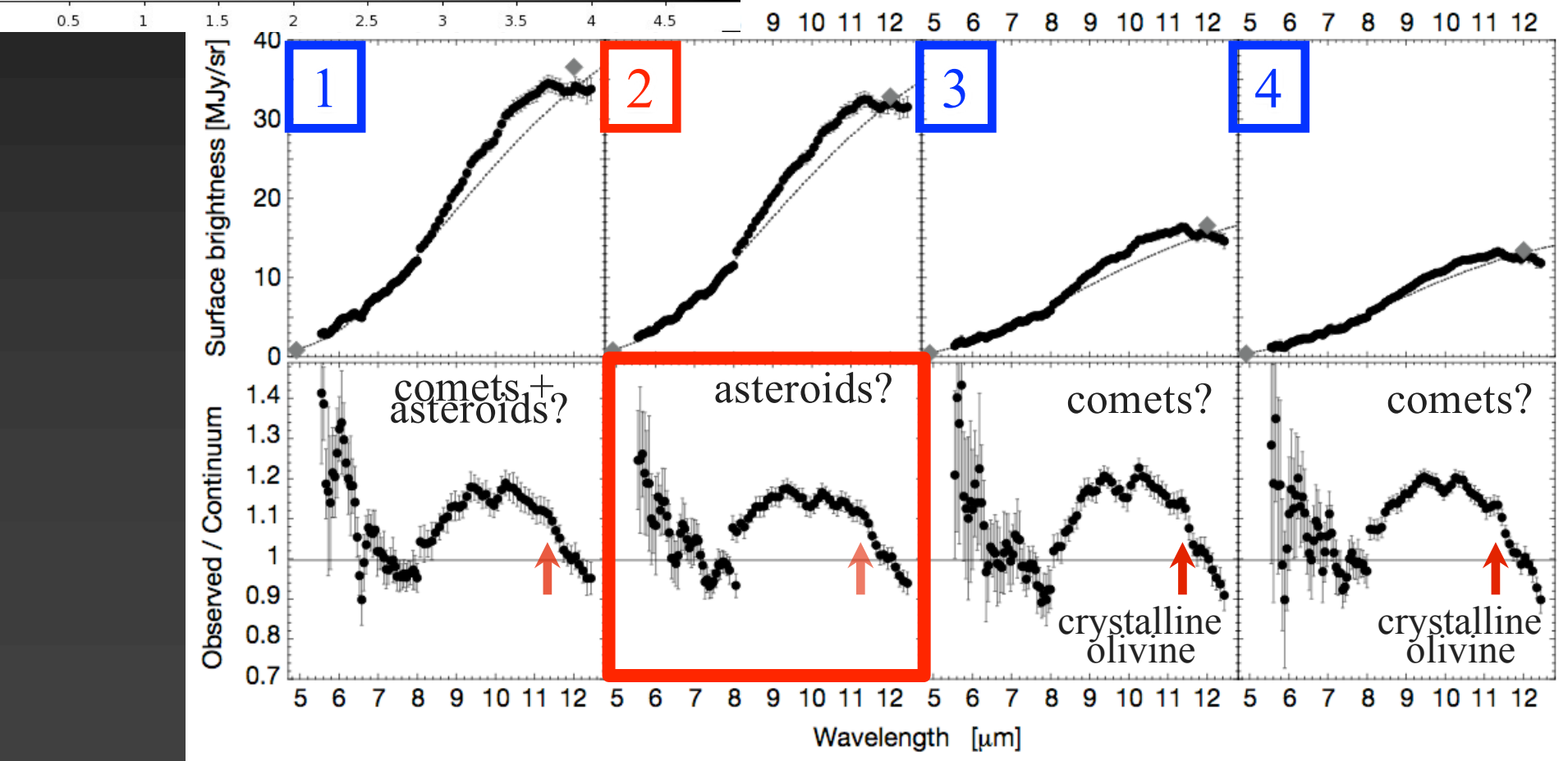
黄経  $125^\circ$

黄経  $355^\circ$

# AKARI/IRC mid-IR ZE spectra

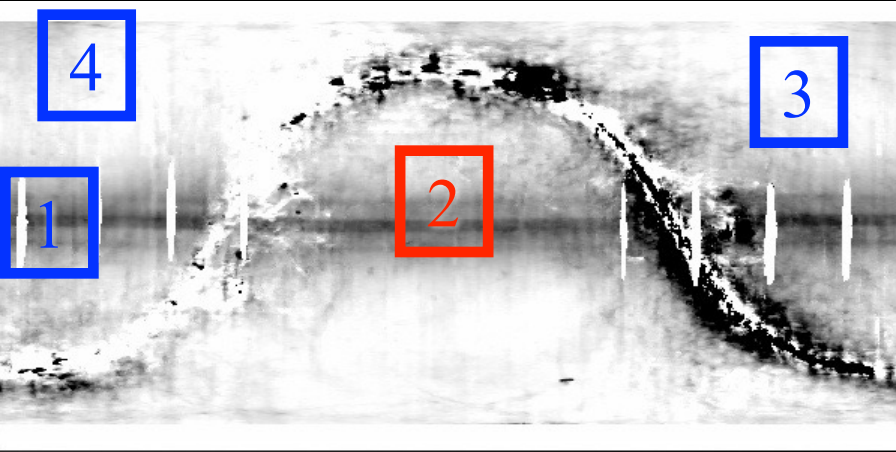


| Ecliptic latitude<br>(degree)         | BB temperature<br>$T$ (K) | optical depth<br>$10^{-7} \tau$ | feature strength<br>$\Delta_{\text{sil}}$ |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|
| -1.0                                  | $274.9 \pm 1.4$           | $1.14 \pm 0.04$                 | $15.8 \pm 0.4$                            |
| 10.0                                  | $275.4 \pm 1.2$           | $1.07 \pm 0.03$                 | $14.9 \pm 0.3$                            |
| 50.0 <span style="color:red">◦</span> | $287.3 \pm 1.9$           | $0.43 \pm 0.02$                 | $18.2 \pm 0.3$                            |
| 70.0                                  | $286.4 \pm 1.7$           | $0.36 \pm 0.01$                 | $18.0 \pm 0.2$                            |



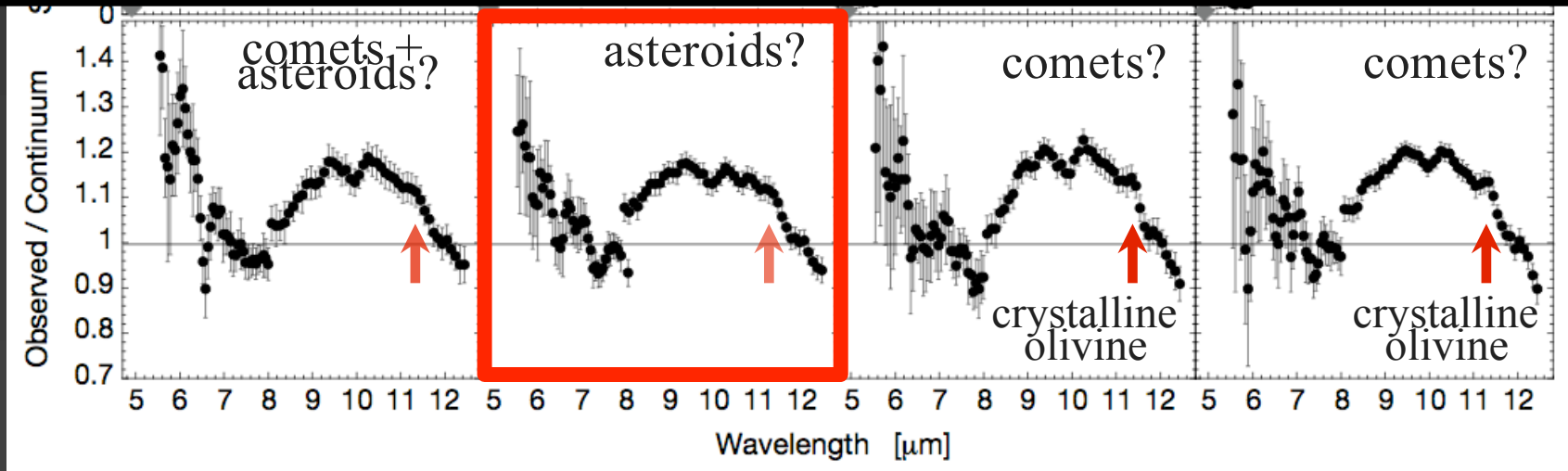


# AKARI/IRC mid-IR ZE spectra



| Ecliptic latitude<br>(degree) | BB temperature<br>$T$ (K) | optical depth<br>$10^{-7} \tau$ | feature strength<br>$\Delta_{\text{sil}}$ |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|
| -1.0                          | $274.9 \pm 1.4$           | $1.14 \pm 0.04$                 | $15.8 \pm 0.4$                            |
| 10.0                          | $275.4 \pm 1.2$           | $1.07 \pm 0.03$                 | $14.9 \pm 0.3$                            |
| 50.0                          | $287.3 \pm 1.9$           | $0.43 \pm 0.02$                 | $18.2 \pm 0.3$                            |
| 70.0                          | $286.4 \pm 1.7$           | $0.36 \pm 0.01$                 | $18.0 \pm 0.2$                            |

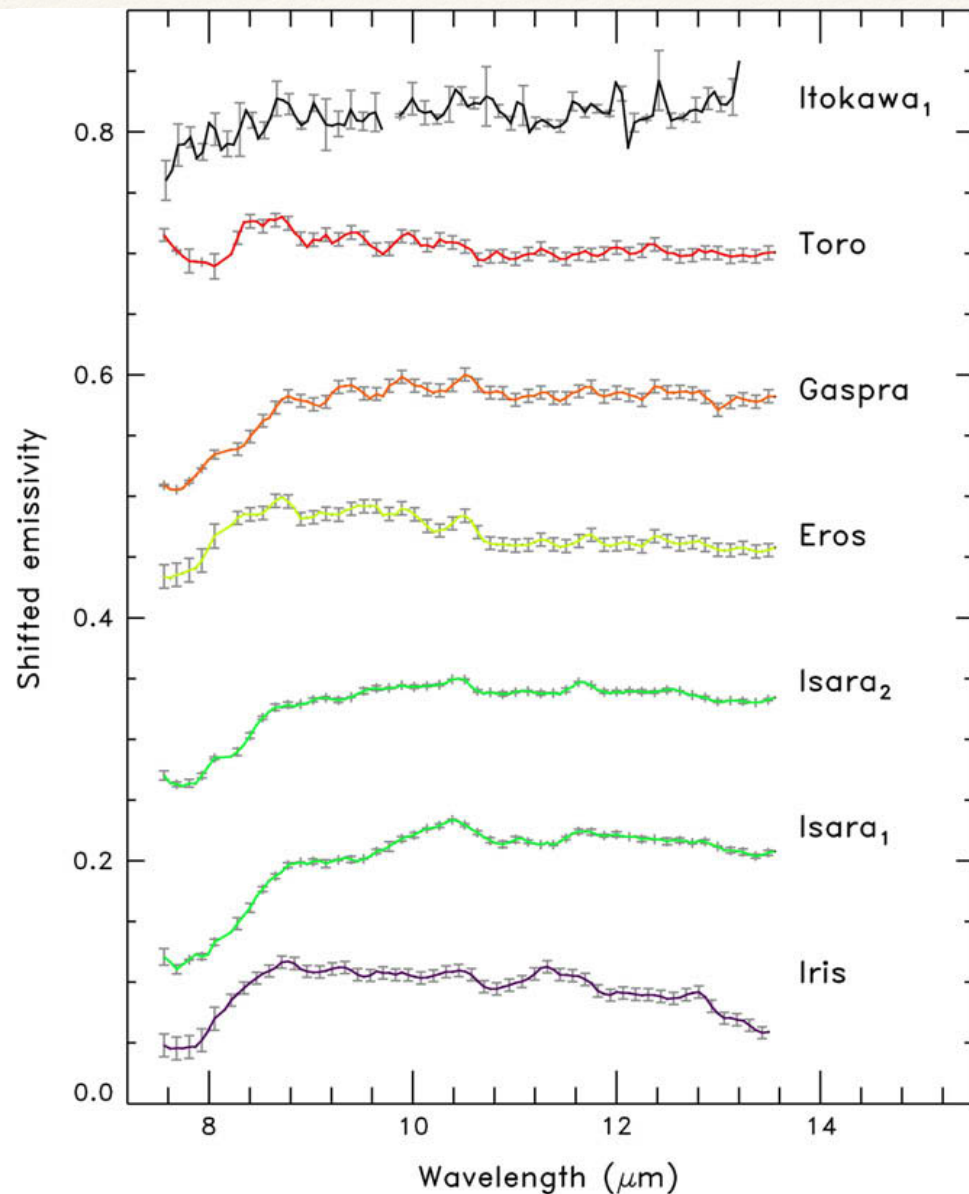
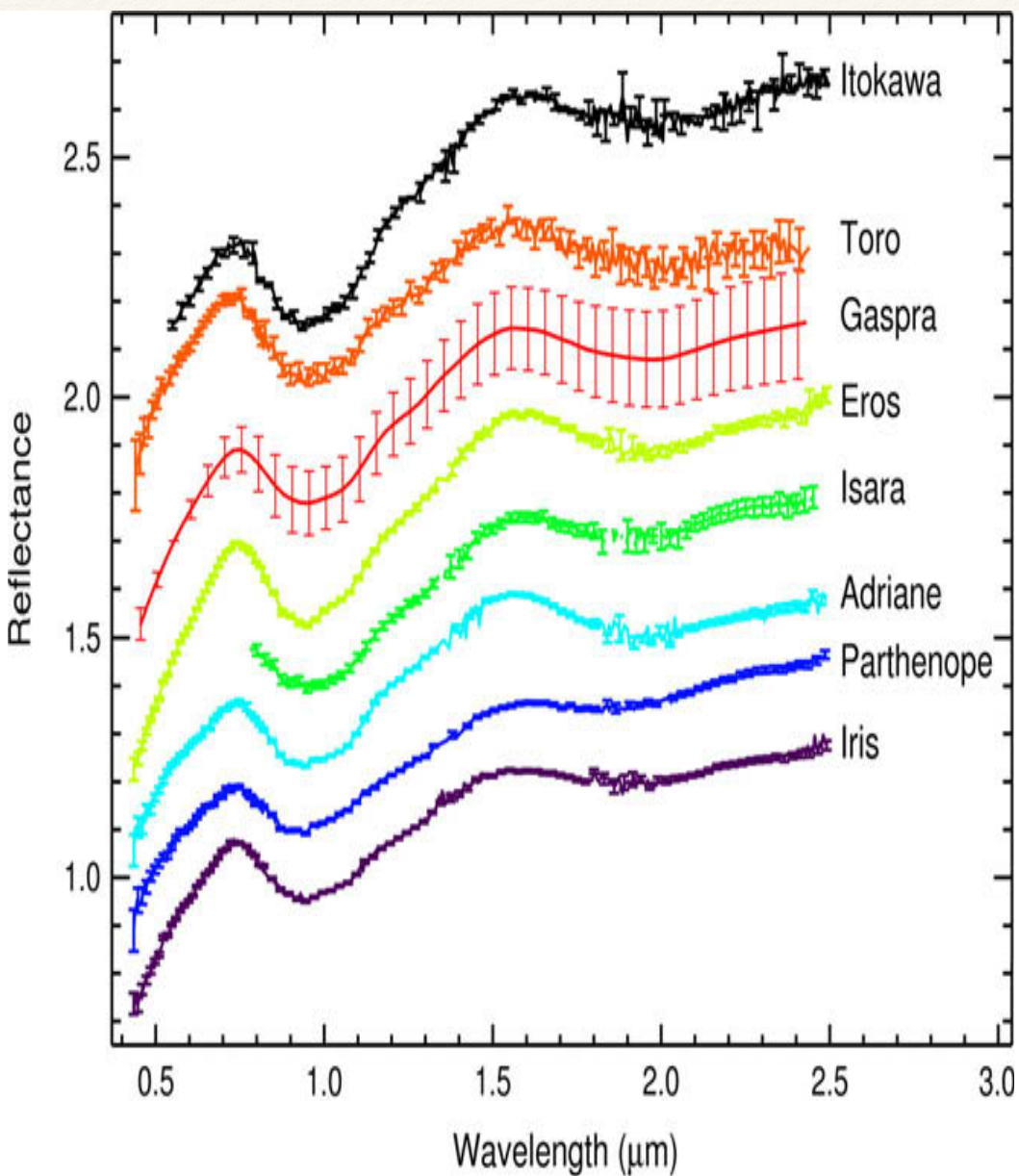
- $\pm 1.4^\circ$  band - Beagle family (C-type?) (< 10 Myr ago)
- $\pm 2.1^\circ$  band - Karin cluster (S-type?) (5.8 Myr ago)
- $\pm 10^\circ$  band - Veritas family (C-type?) (8.3 Myr ago)



# 小惑星起源ダストの赤外線スペクトル

IRTF/Spe-X (V-NIR)

Spitzer/IRS (MIR)

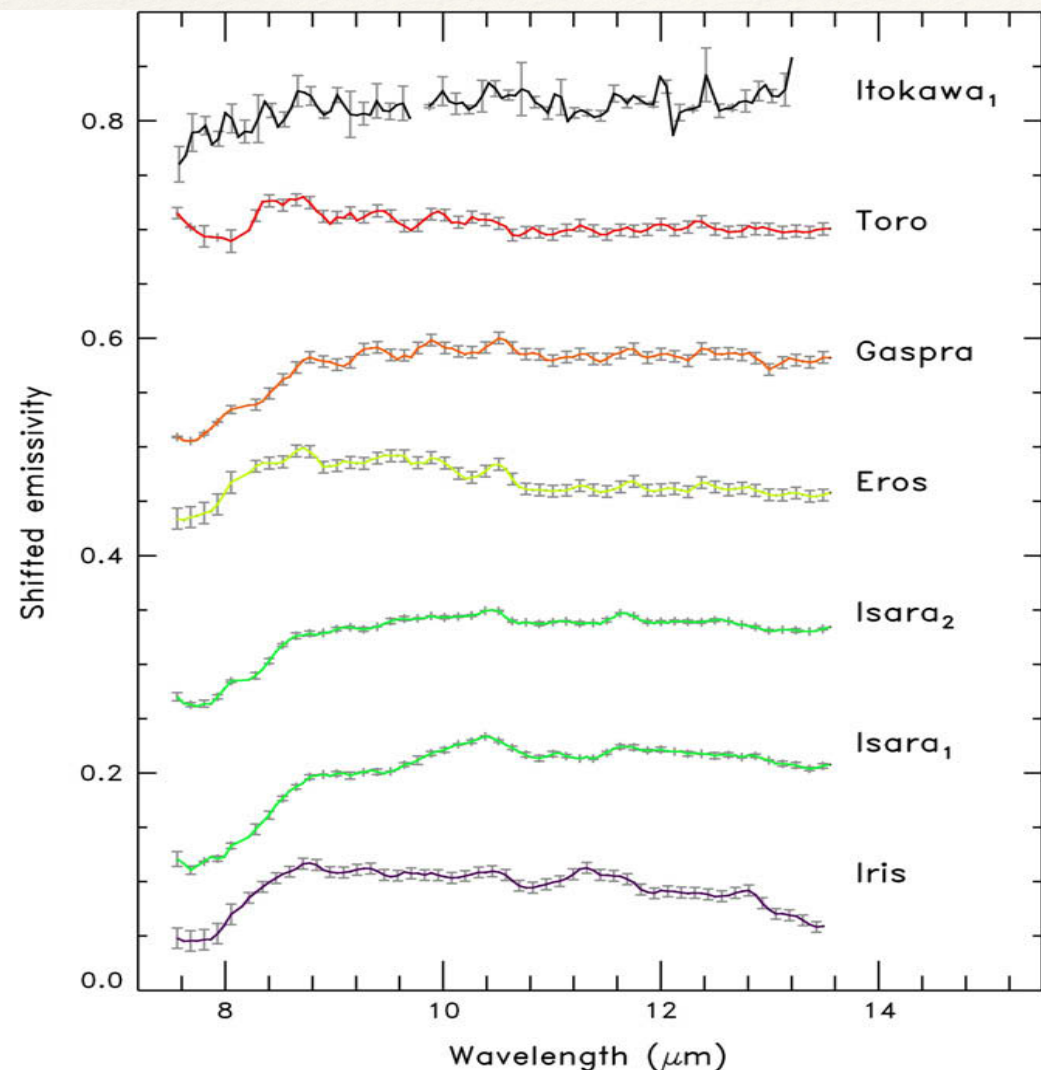


(Vernazza+2010)

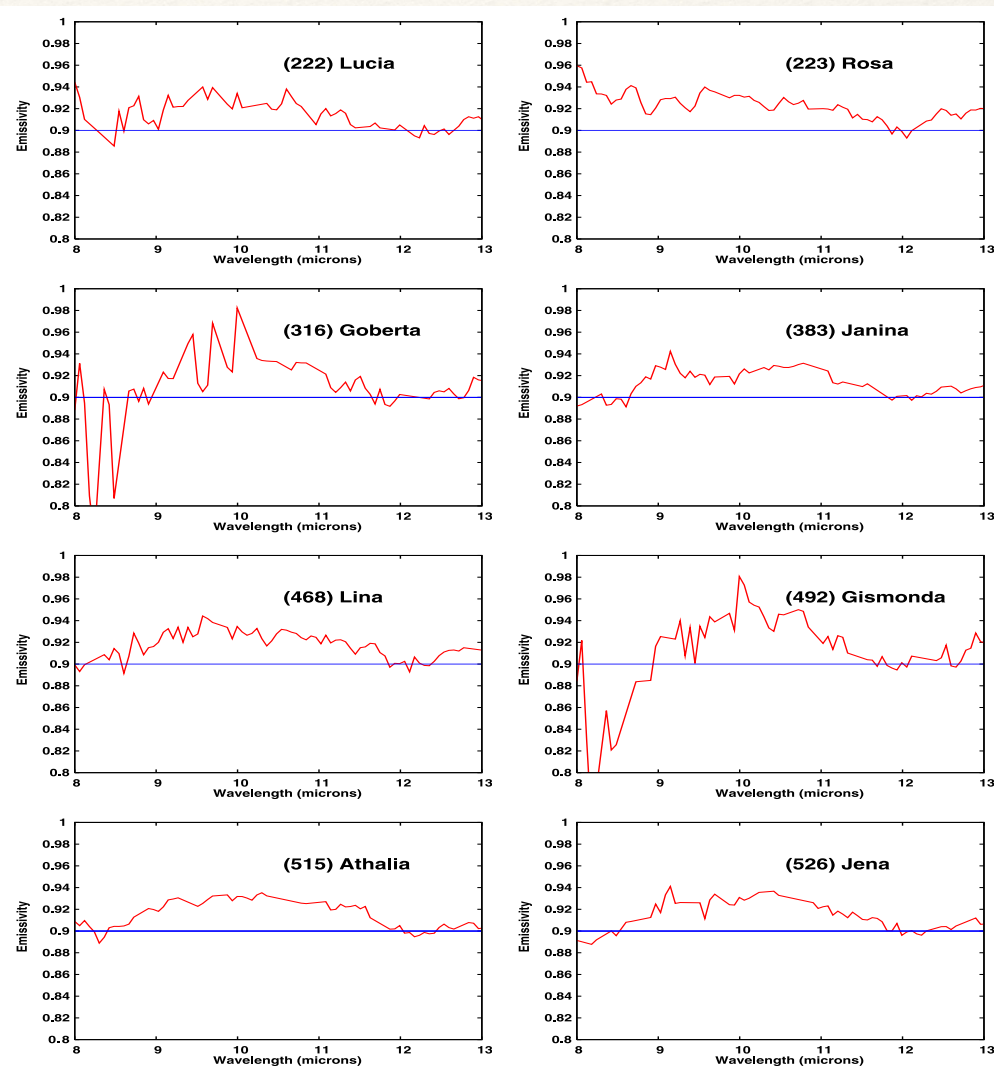
# 小惑星起源ダストの赤外線スペクトル

Spitzer/IRS (8-13  $\mu\text{m}$ ) --- feature < 5%

小惑星表面のシリケート・フィーチャの判別は難しい

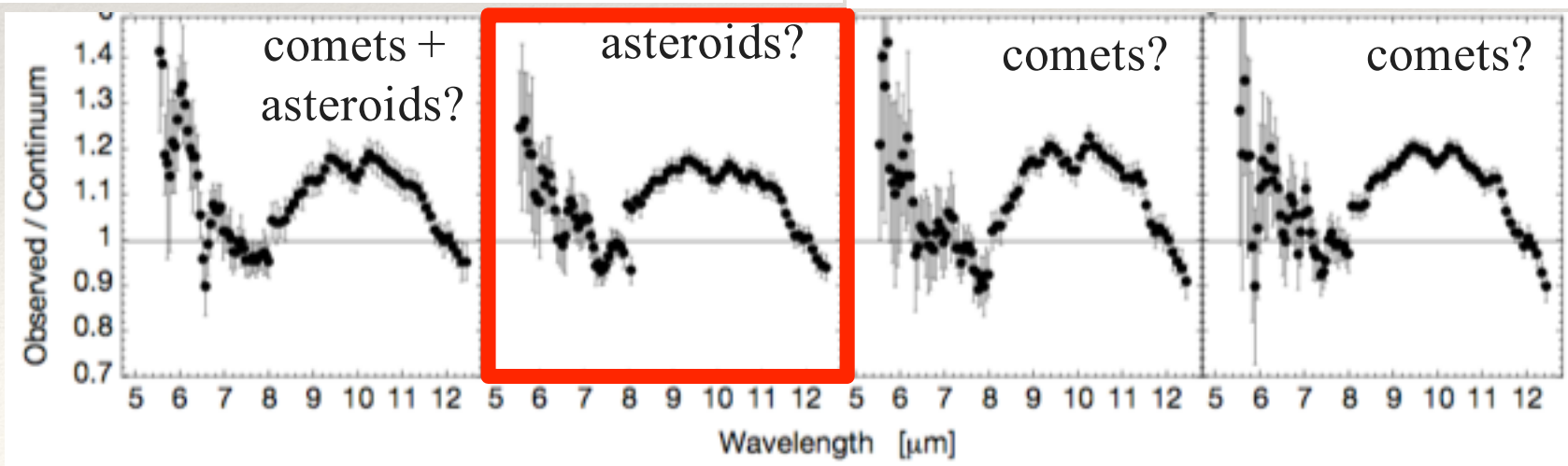
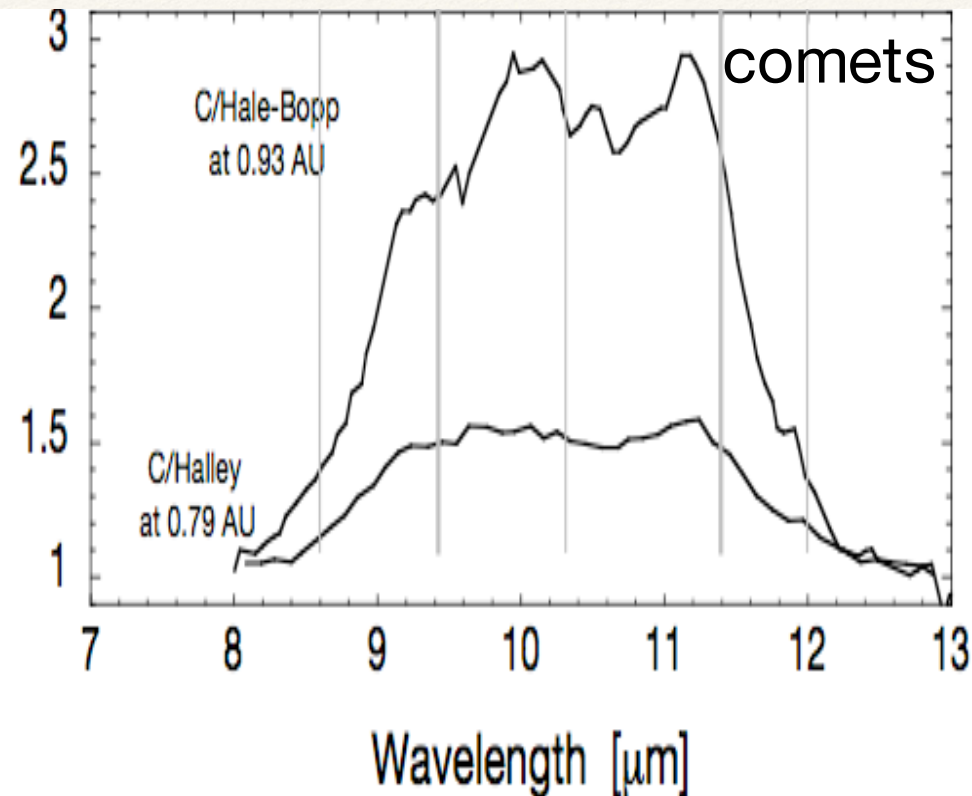
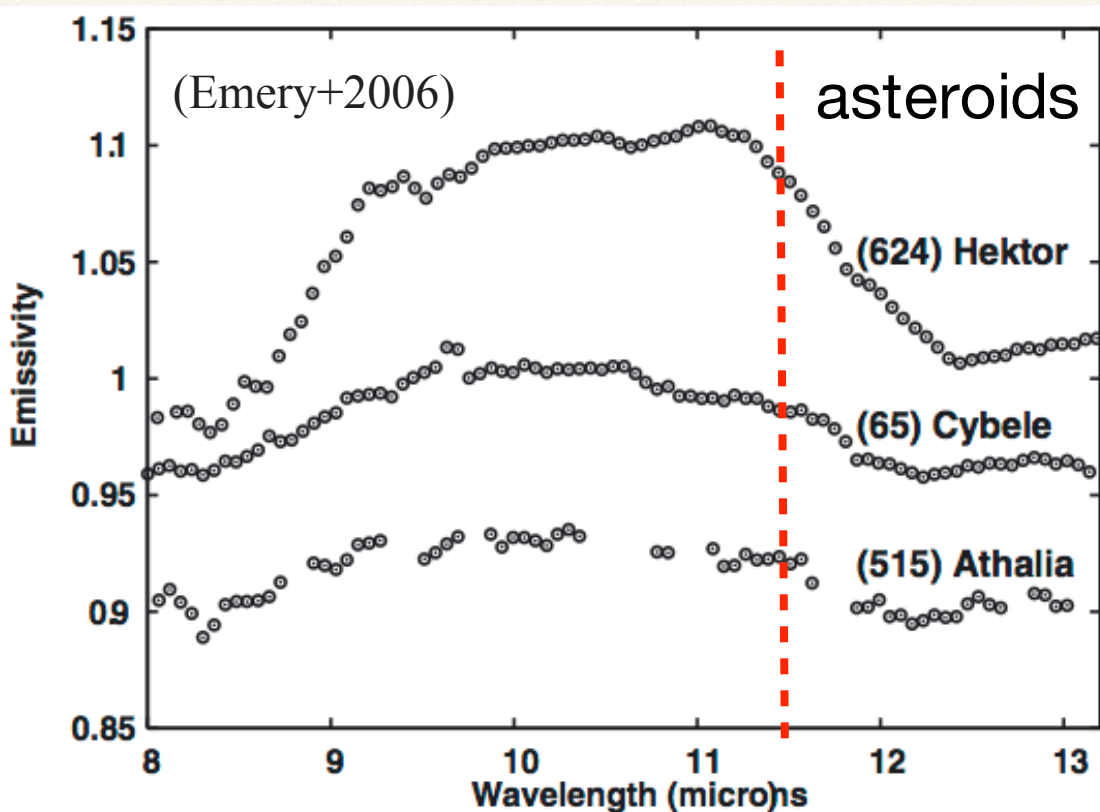


(Vernazza+2010)

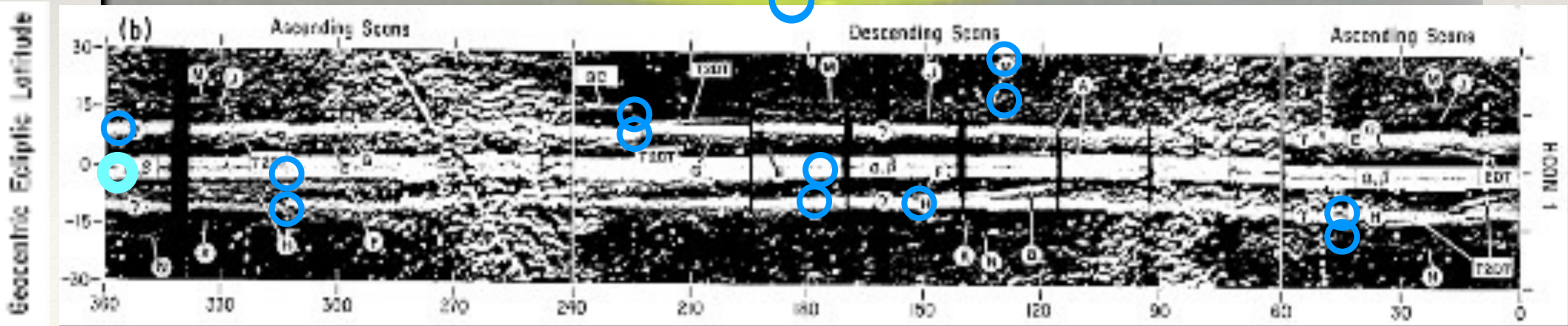
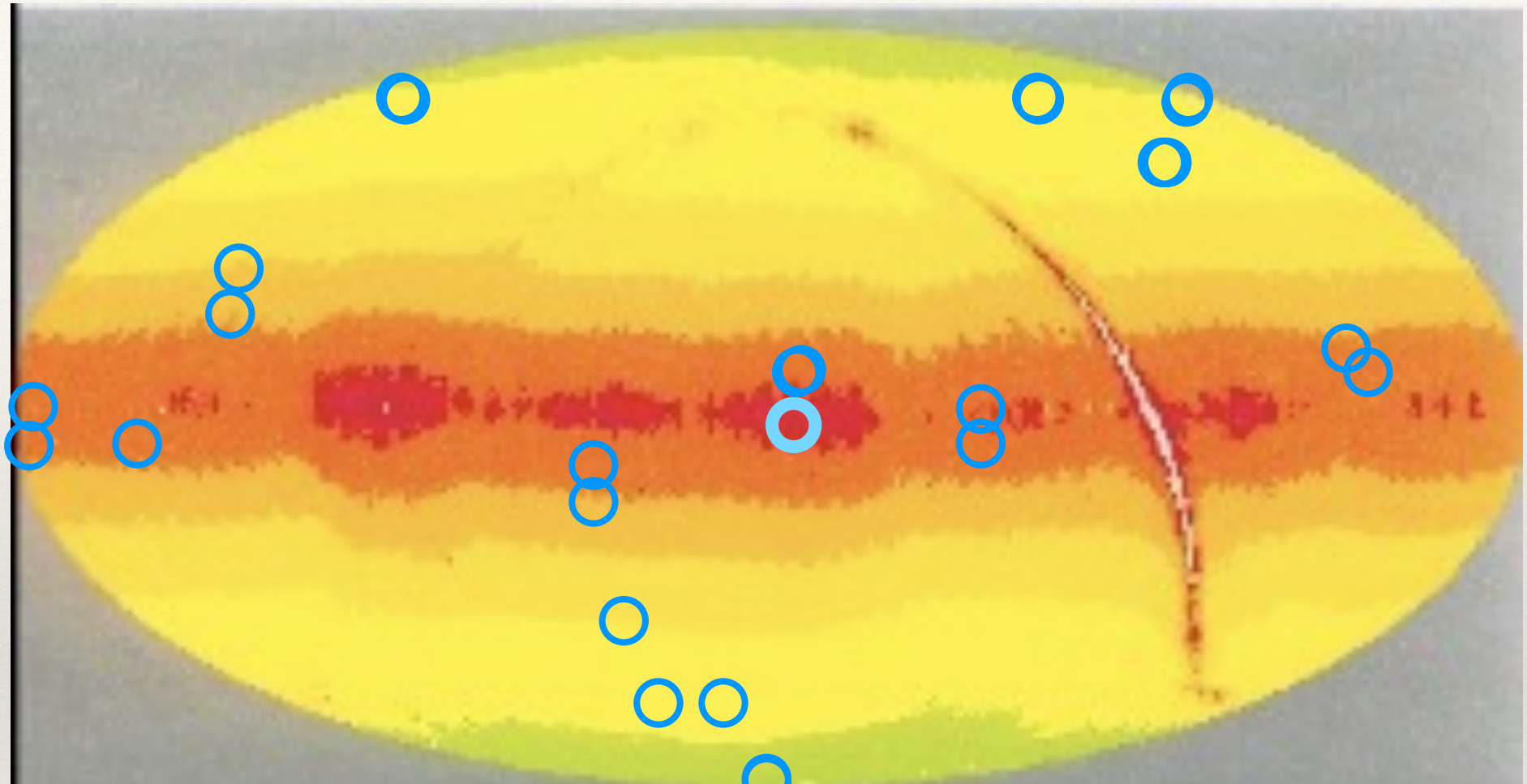


(Licandro+2012)

# 小惑星起源ダストの赤外線スペクトル



# 「あかり」による黄道光分光観測



# 本日のまとめ（1）

## ★ 彗星

### すばる望遠鏡による中間赤外線観測（シリケート）








- 結晶質の割合に関して、長周期彗星と短周期彗星で差は比較的小さい。(1) もともと比較的近い領域で形成 and/or (2) 原始太陽系星雲中で十分に物質がかき混ぜられていたという可能性が高い
- 一方で、長周期彗星の間ではばらつきが大きい
- どういう属性と相関があるのかを知るのが今後のステップ

### 「あかり」による近赤外線観測（ $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ ）

- 現時点で世界最大の彗星主要3分子のデータベース
- こちらも長周期彗星と短周期彗星の差は見えなかった
- どうやら  $\text{CO}$  よりも  $\text{CO}_2$  の方が多いようである
- 原始太陽系円盤中の環境は酸化の？

# 本日のまとめ (2)

## 黄道光 (惑星間塵)

-  遠赤外線で小惑星ダストバンドの検出
  -   $\pm 1.4^\circ$ ,  $\pm 2.1^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$  ( $9.3^\circ$ ) の小惑星ダストバンド
  -   $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $13^\circ$ ,  $17^\circ$  などの微細バンド構造の抽出
-  「あかり」 中間赤外線分光スペクトル
  -   $9\text{-}11\ \mu\text{m}$  シリケート・フィーチャの検出
  -  小惑星/彗星による供給源の差が見えている
  -  S-type/C-type の差？