

# 太陽系小天体ケイ酸塩鉱物の 中間赤外線観測

大坪 貴文  
(東京大学総合文化)

「地上赤外線観測による太陽系内天体の観測戦略」

2016-09-07

@東京大学理学系研究科天文学教育研究センター講義室

## 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

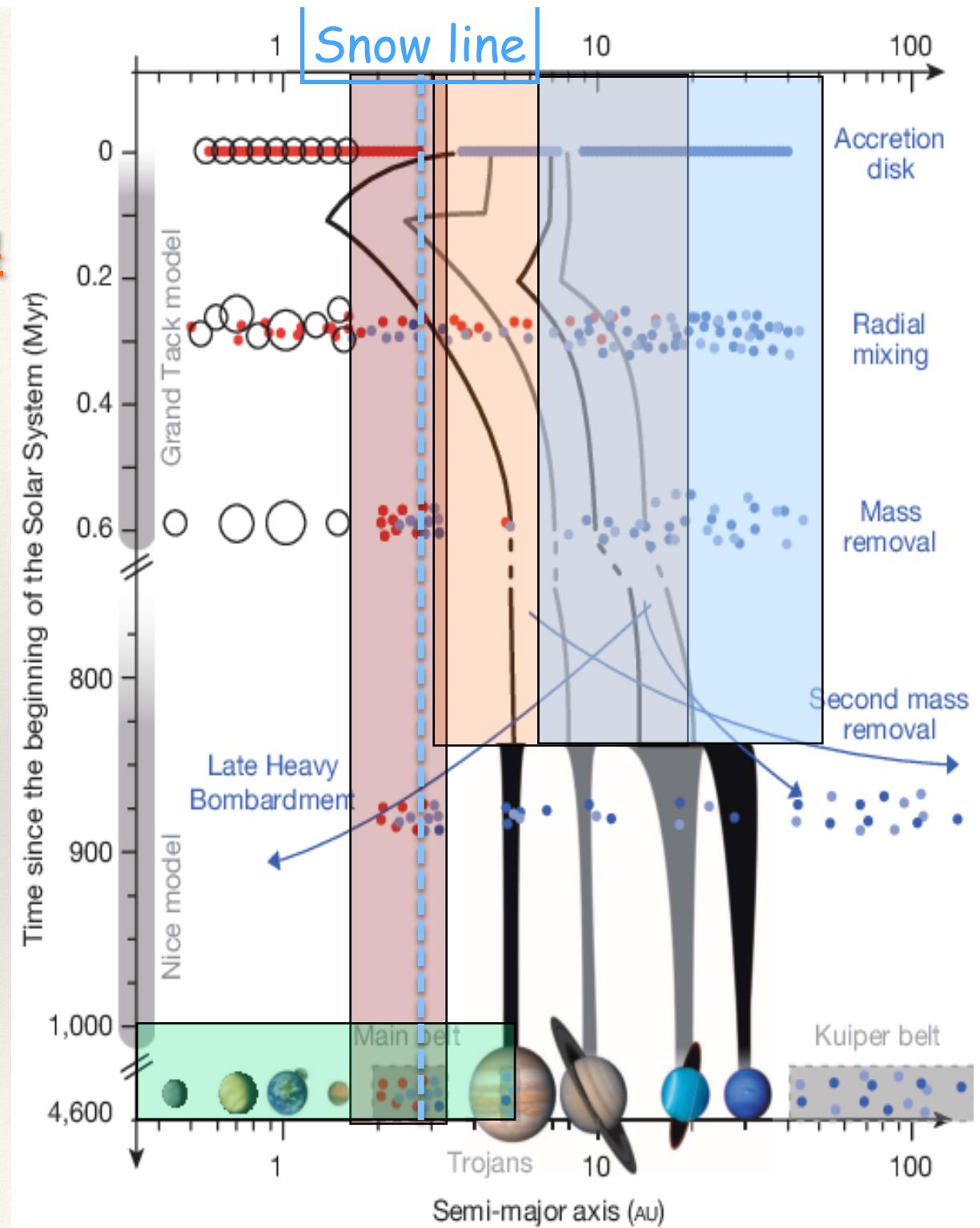
- ・氷、有機物、結晶質鉱物
- ・アルベド・サイズ

## 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



## ◆ 着眼点と観測・研究手法

- 氷・ダストの組成 – 分光観測
  - 氷 :  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , CO --- 近赤外線
  - ダスト : 結晶質シリケイト --- 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
- 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
- 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こっているか ( $\mu\text{m}$ -ダスト→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  
--> シリケイト？

## 1986年 - Halley彗星

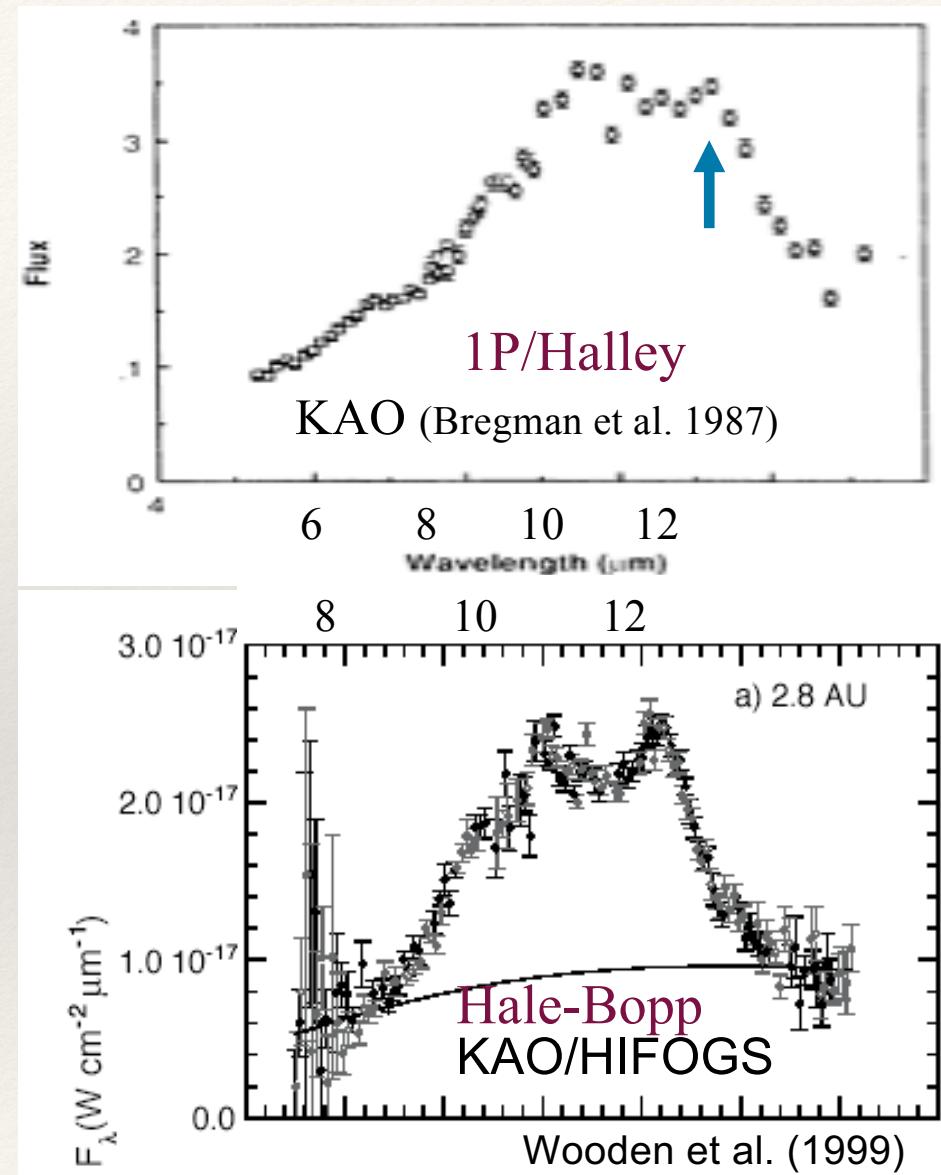
- $11.2\mu\text{m}$  のサブピークを検出  
(Bregman et al. 1987)

## 1987年 - Bradfield彗星

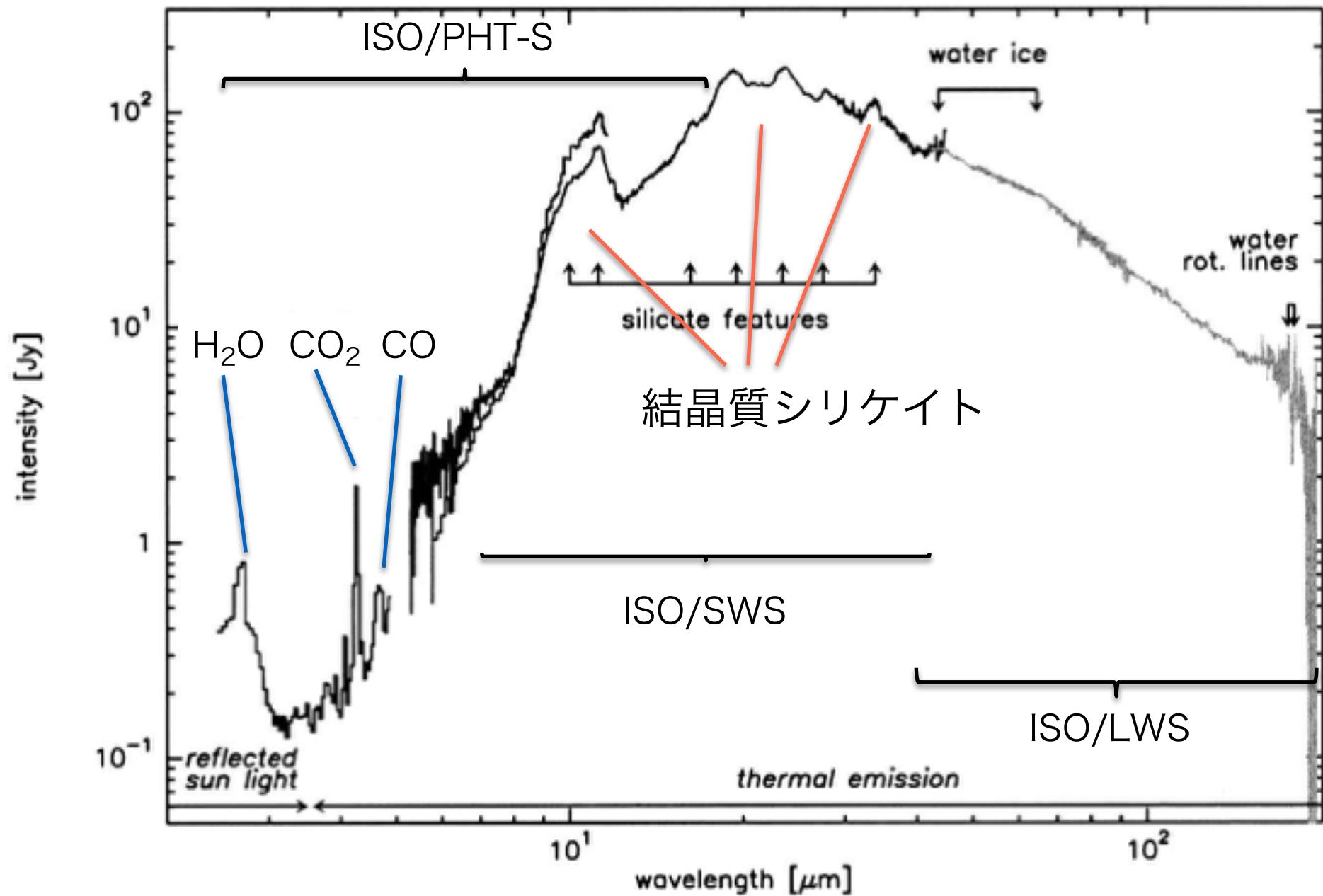
- $11.3\mu\text{m}$  のサブピーク  
結晶質olivine?  
(Hanner et al. 1990)

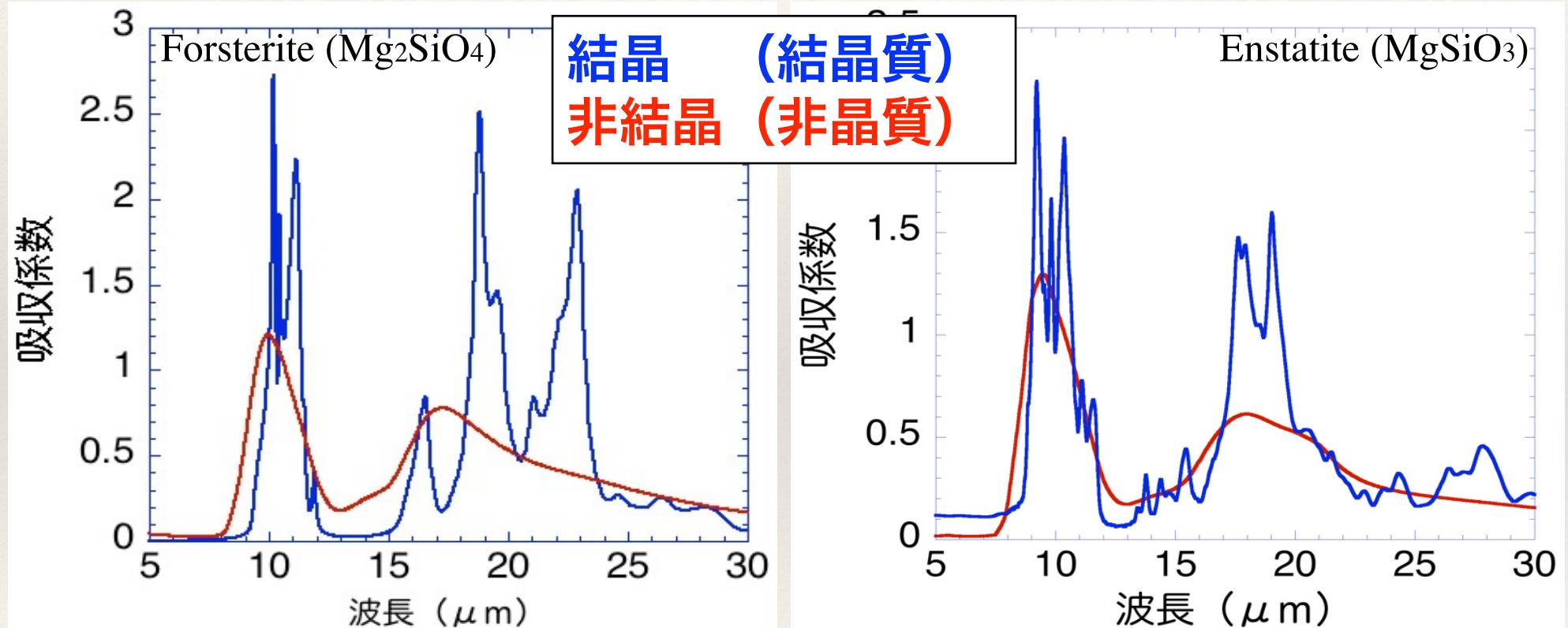
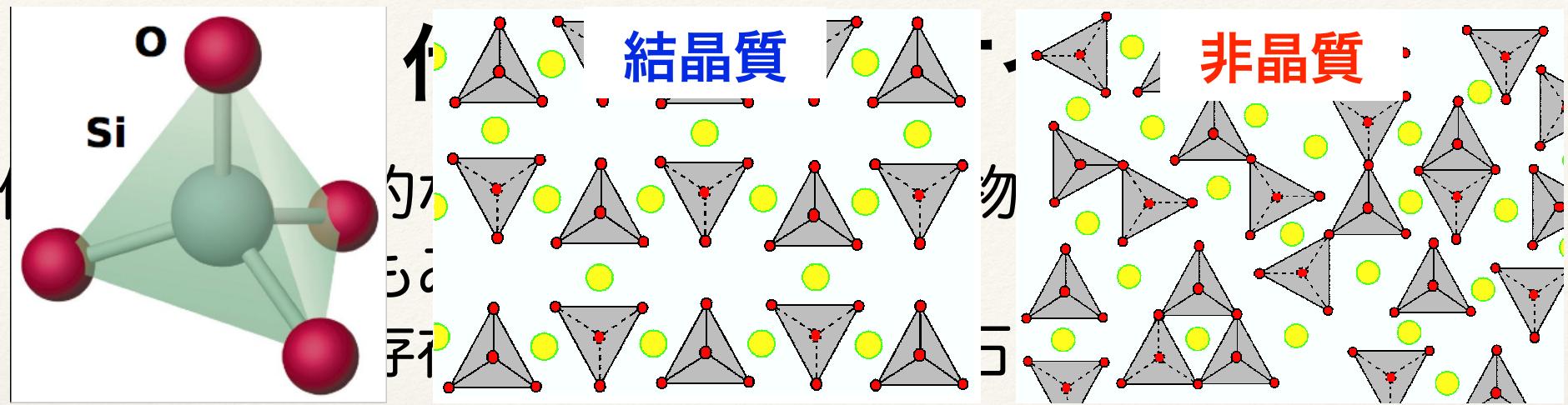
## 1997年 - Hale-Bopp彗星

- 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 O1 (Hale-Bopp) 7 Oct. 1996





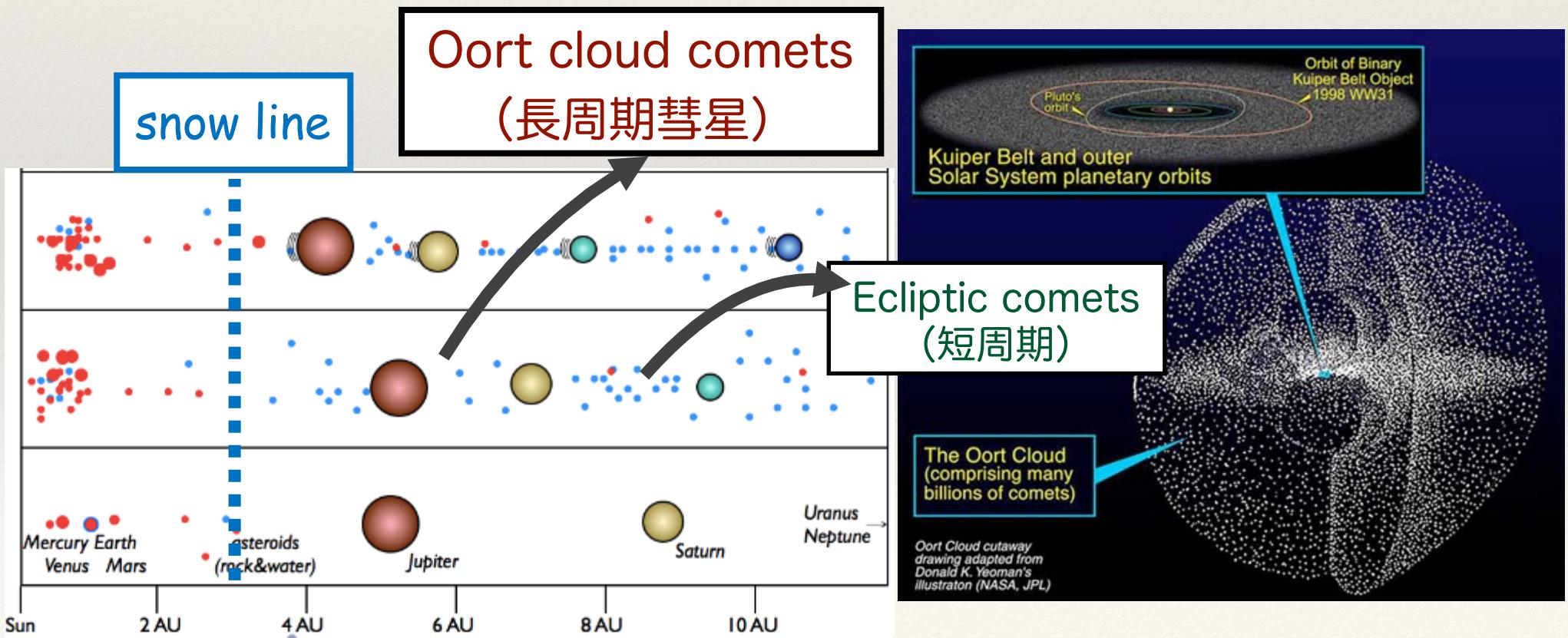
- olivine (カンラン石)  
 $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$

- pyroxene (輝石)  
 $(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$

# 彗星中の結晶質シリケイト

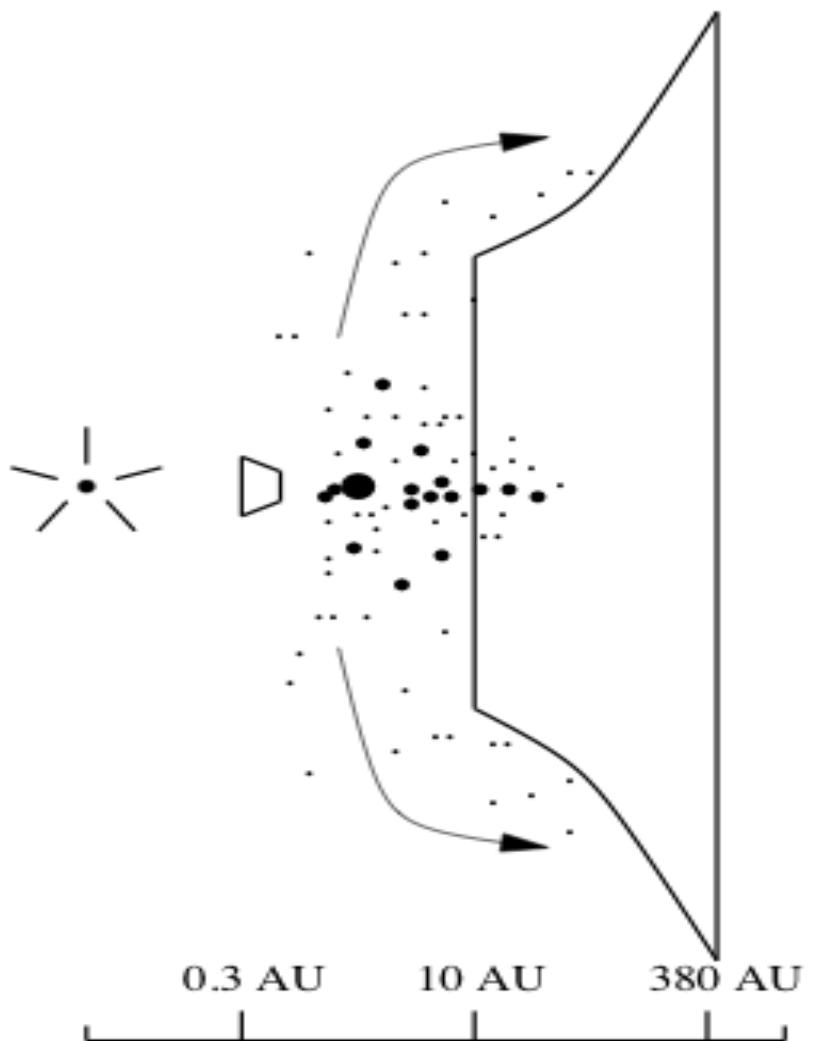
- 彗星 - 氷+塵 (dirty water-ice)

- 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 ( $T < 150$  K) である氷。星間塵は非晶質。
- 高温生成物 ( $T > 800$  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イトの起源

★ 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 ( $8\text{-}13 \mu\text{m}$ ;  $R\sim 250$ )
- 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)

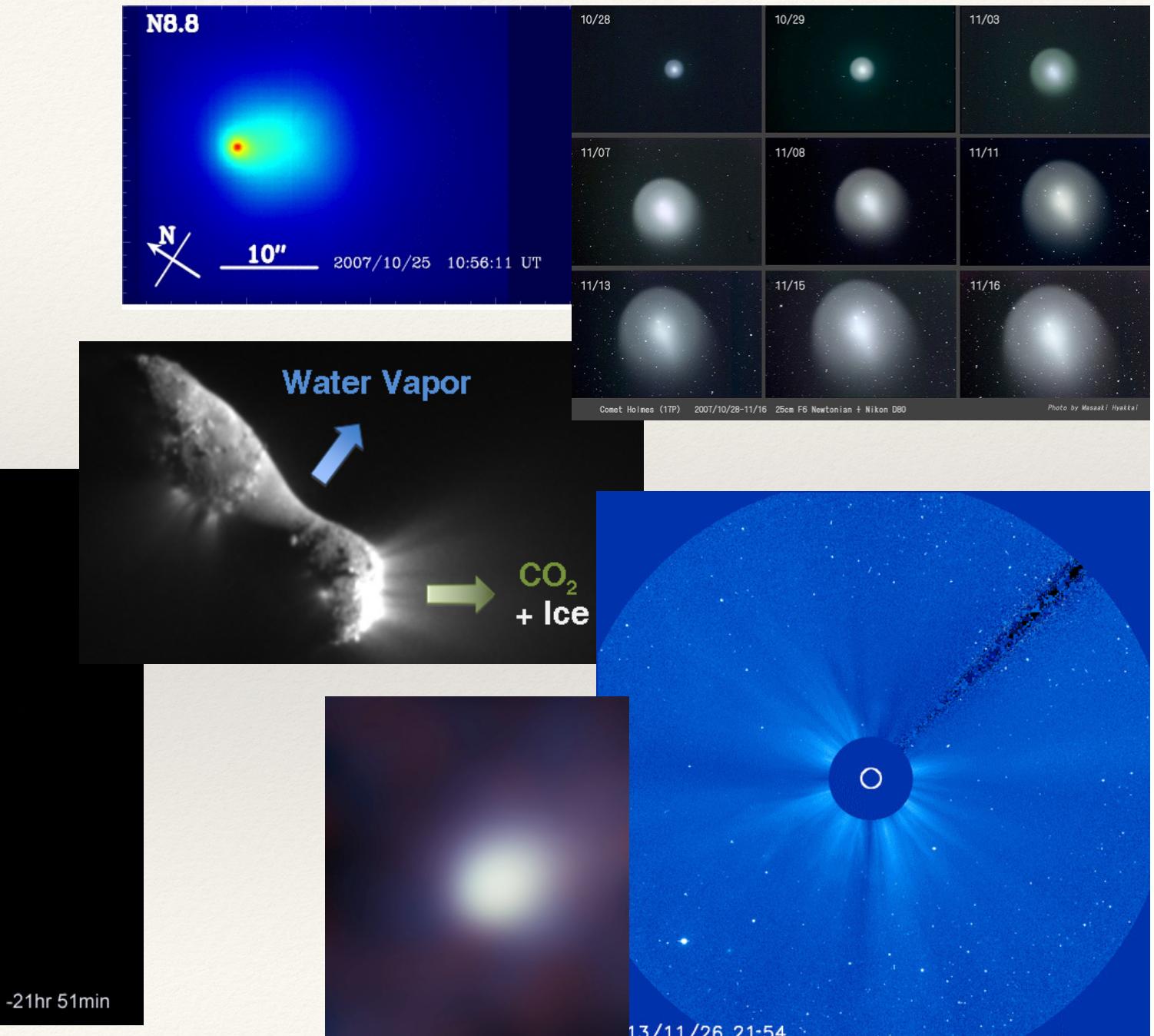
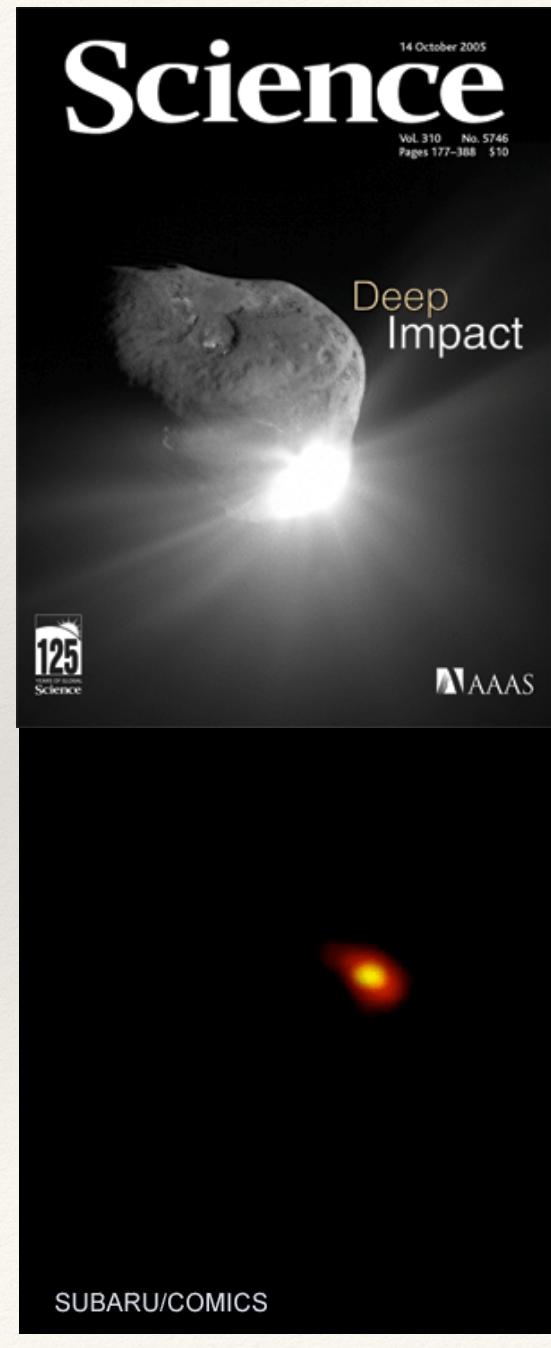
C/2012 S1 (ISON)  
C/2013 R1 (Lovejoy)  
C/2012 X1 (LINEAR)  
C/2011 L4, C/2012 K1 (PanSTARRS)

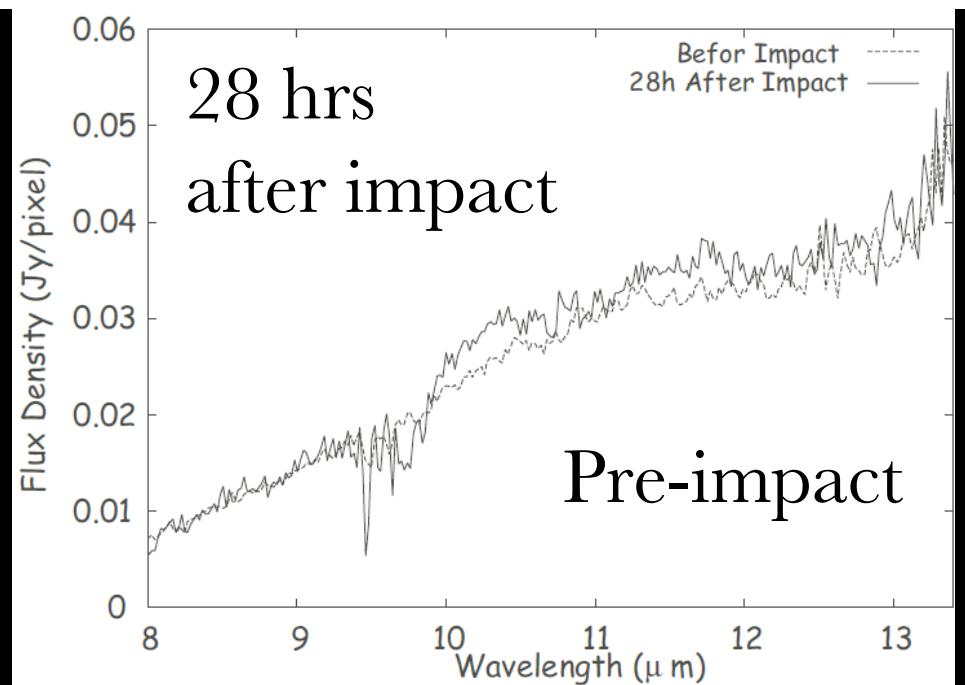
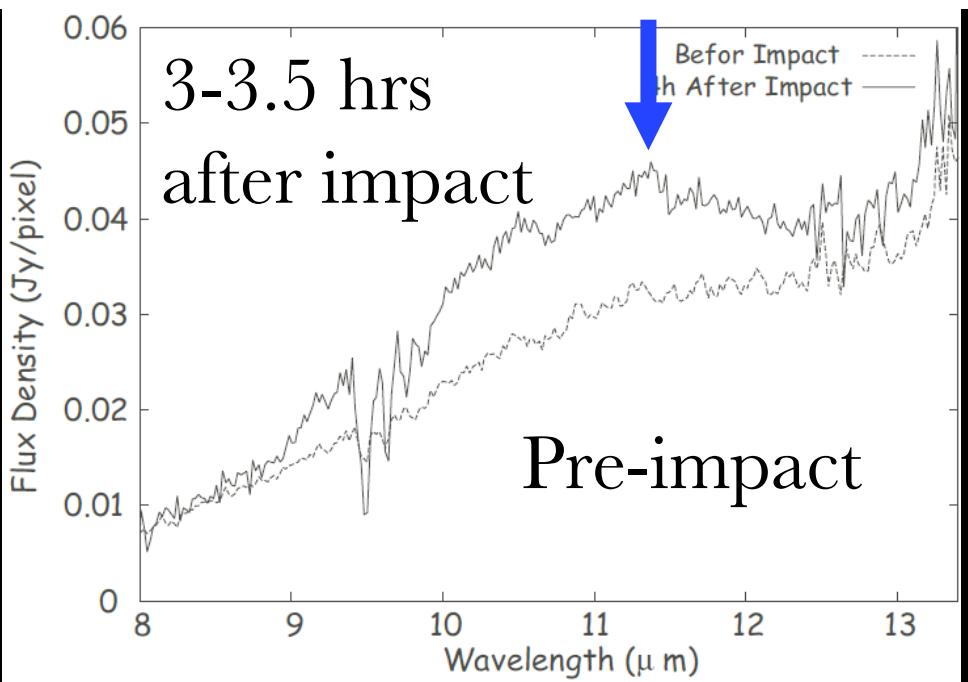
## *Ecliptic comets*

2P/Encke, 78P/Gehrels  
9P/Tempel → 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





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

2"

2 arcsec

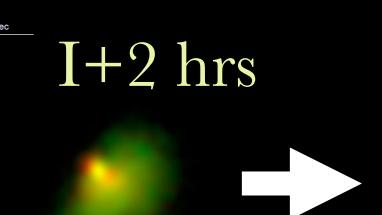
Pre-impact

SUBARU/COMICS

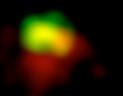
-21hr 51min



I+2 hrs



## Spectroscopy



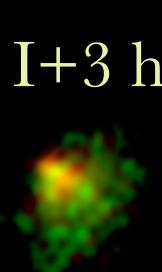
I+26 hrs

SUBARU/COMICS

+25hr 43min



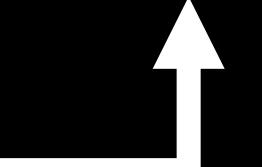
I+3 hrs

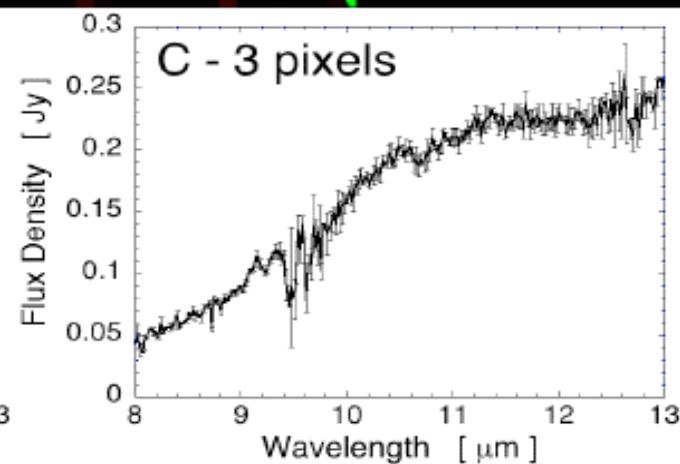
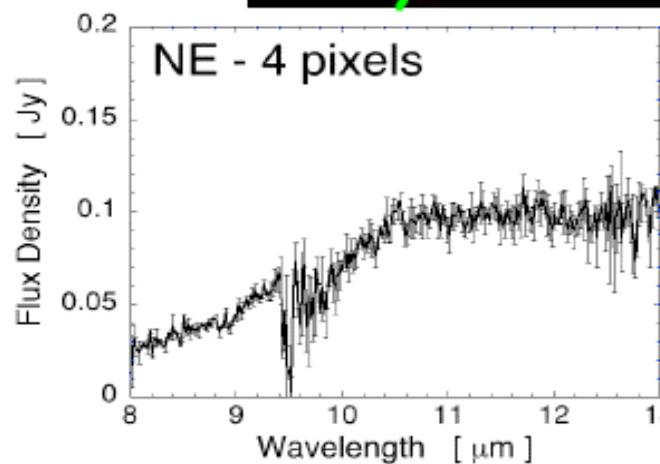
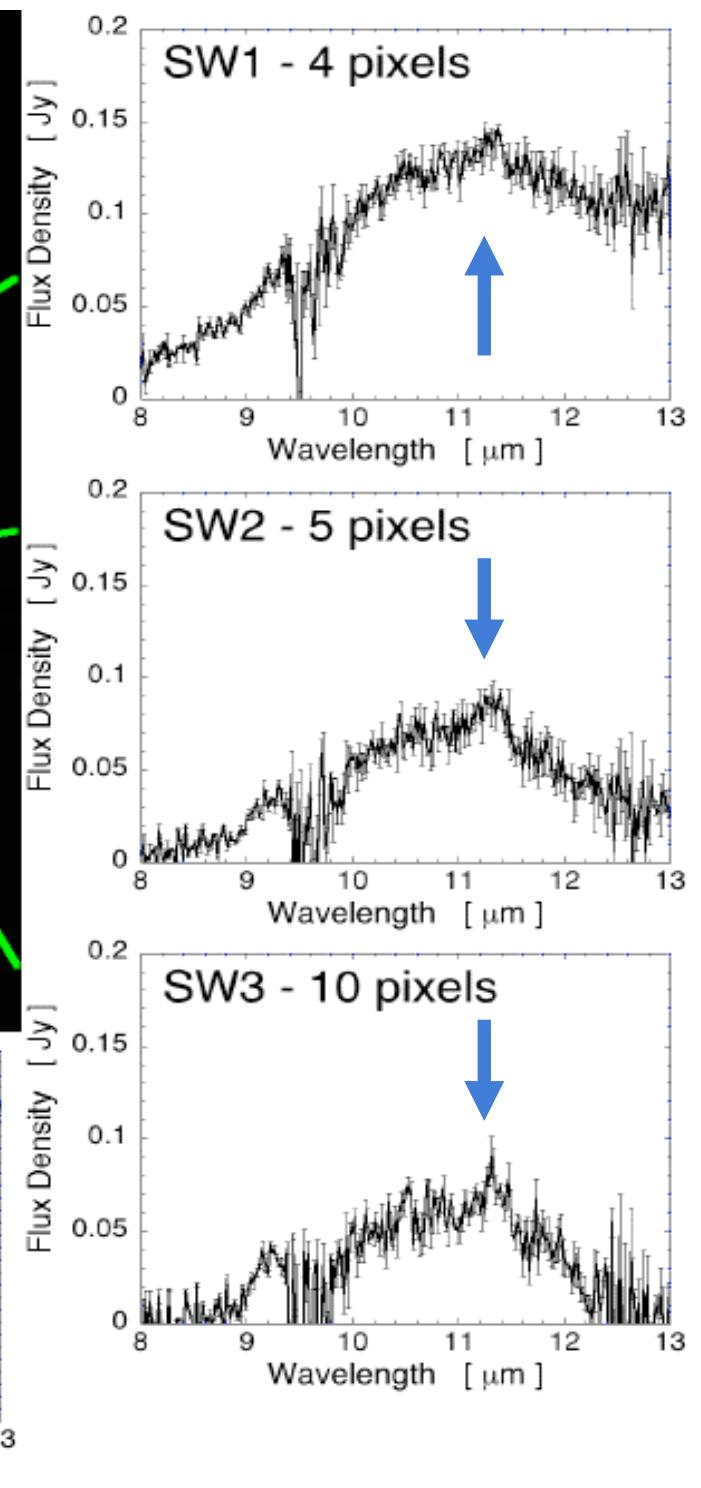
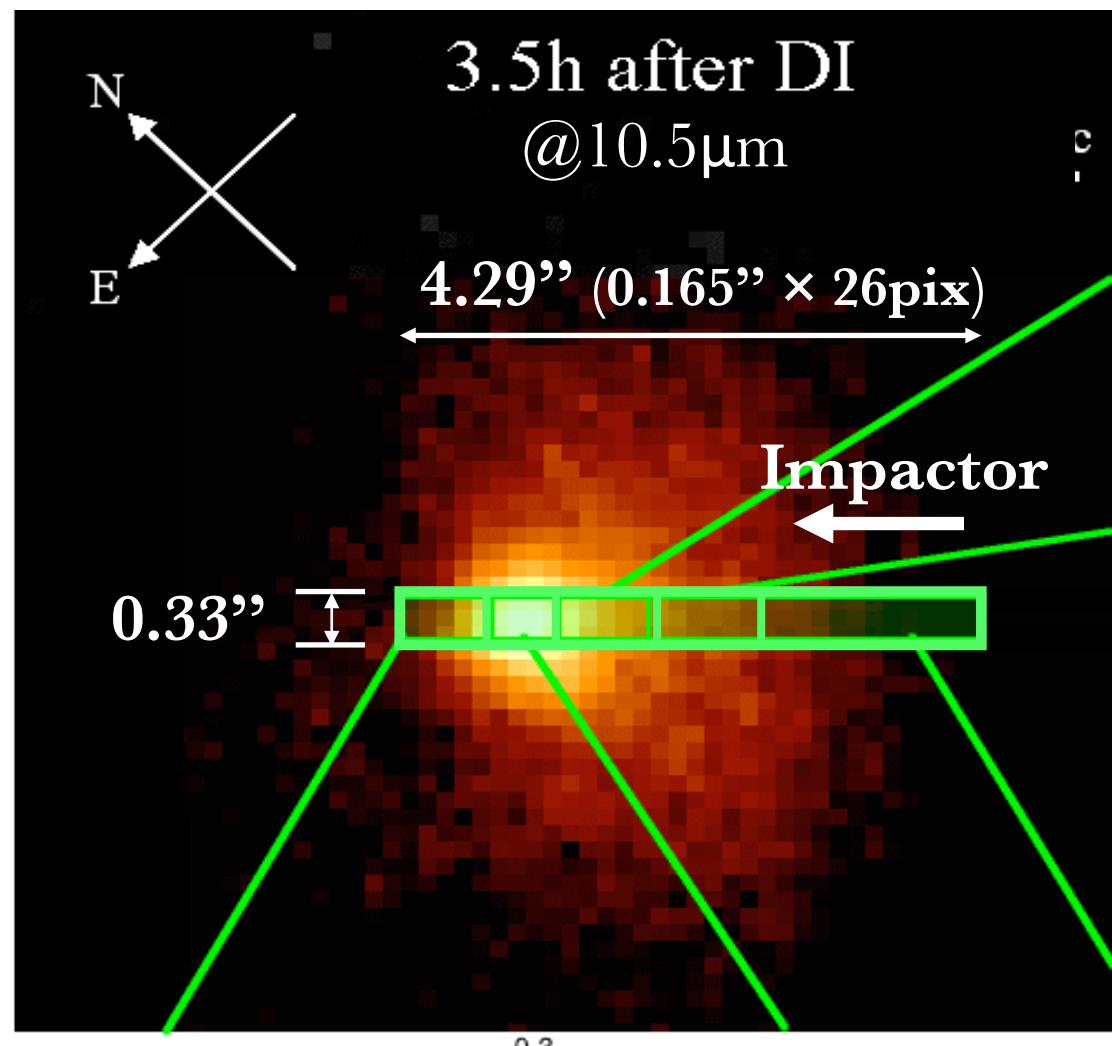


+03hr 00min

SUBARU/COMICS

+03hr 24min





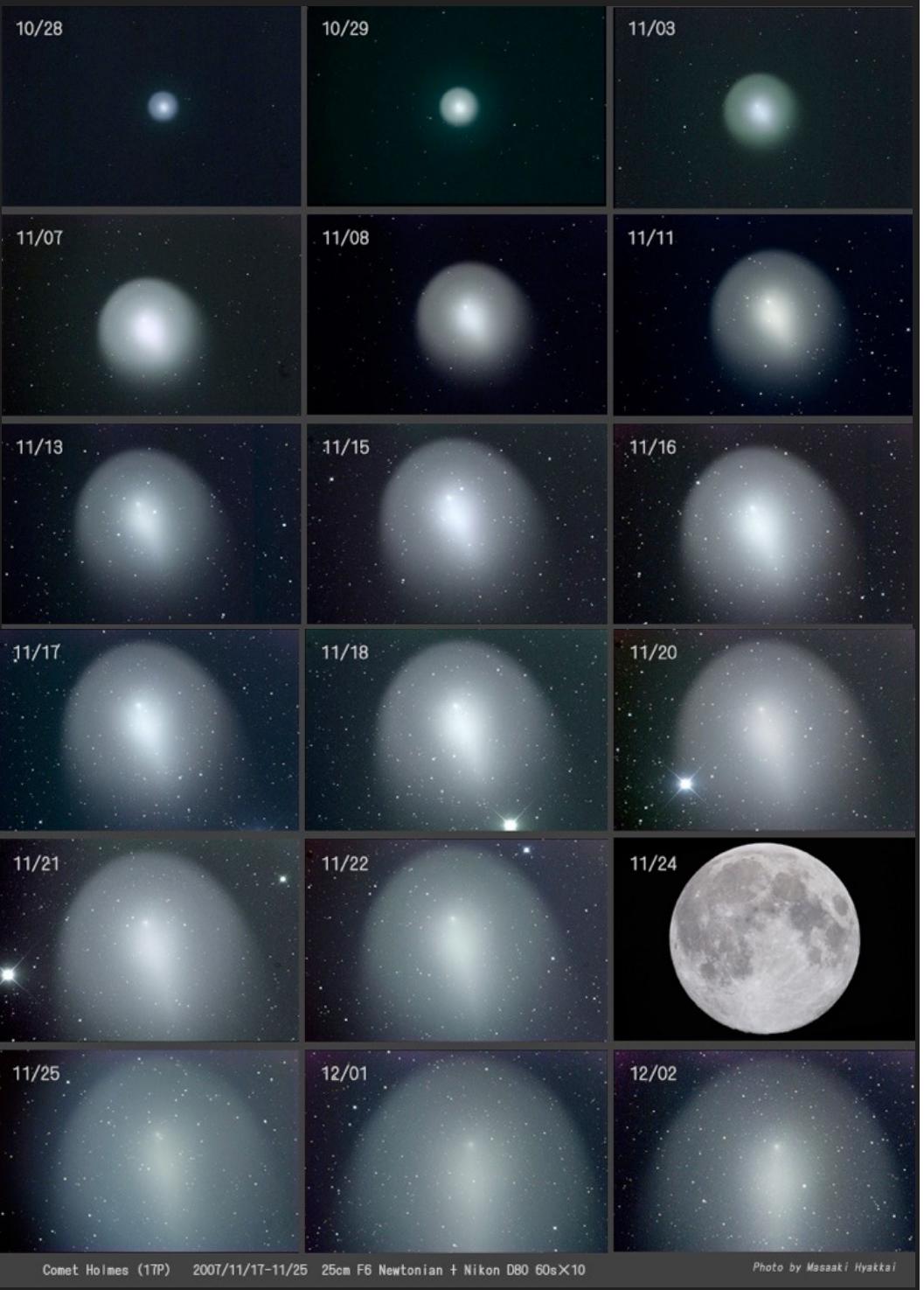
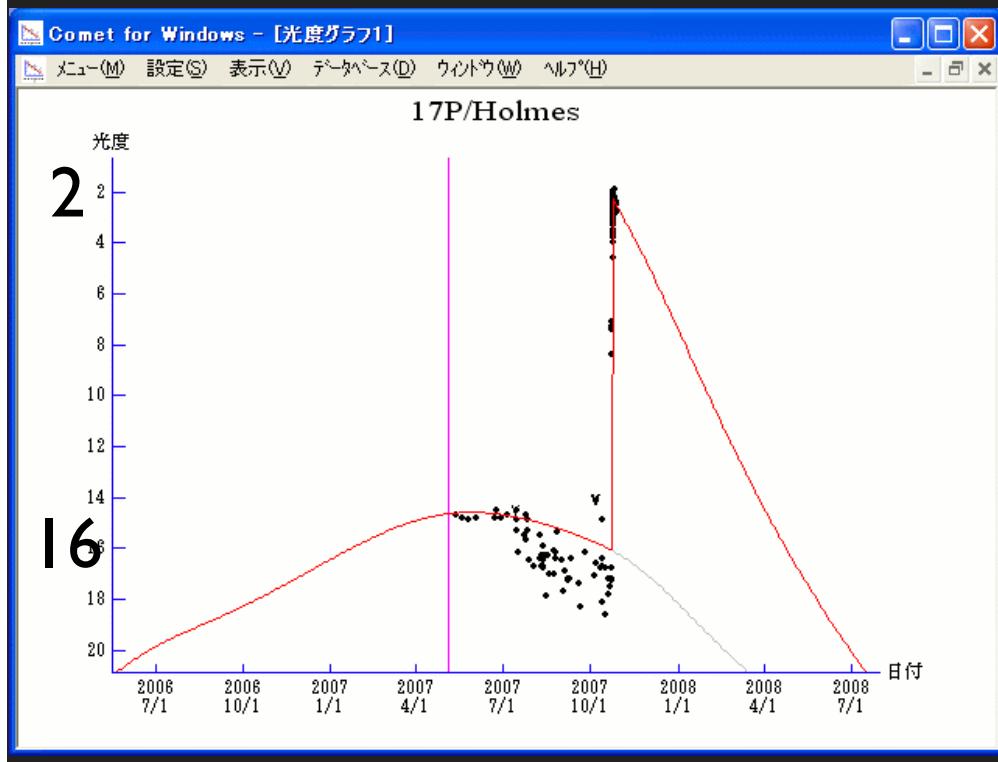
# 17P/Holmes

## 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



Comet Holmes (17P) 2007/11/17-11/25 25cm F6 Newtonian + Nikon D80 60s×10

Photo by Masaaki Hyakutake

# 17P/Holmes

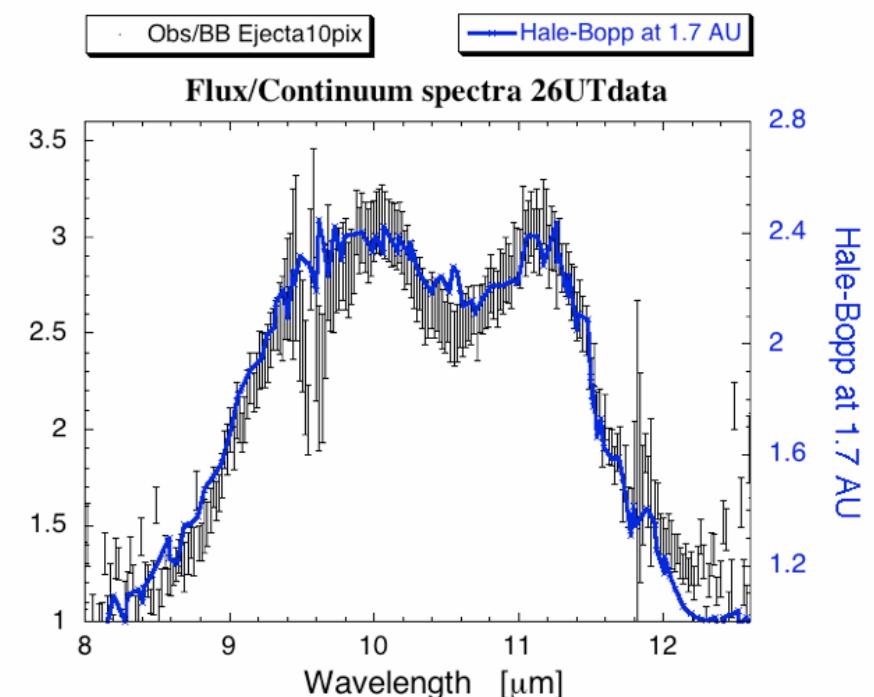
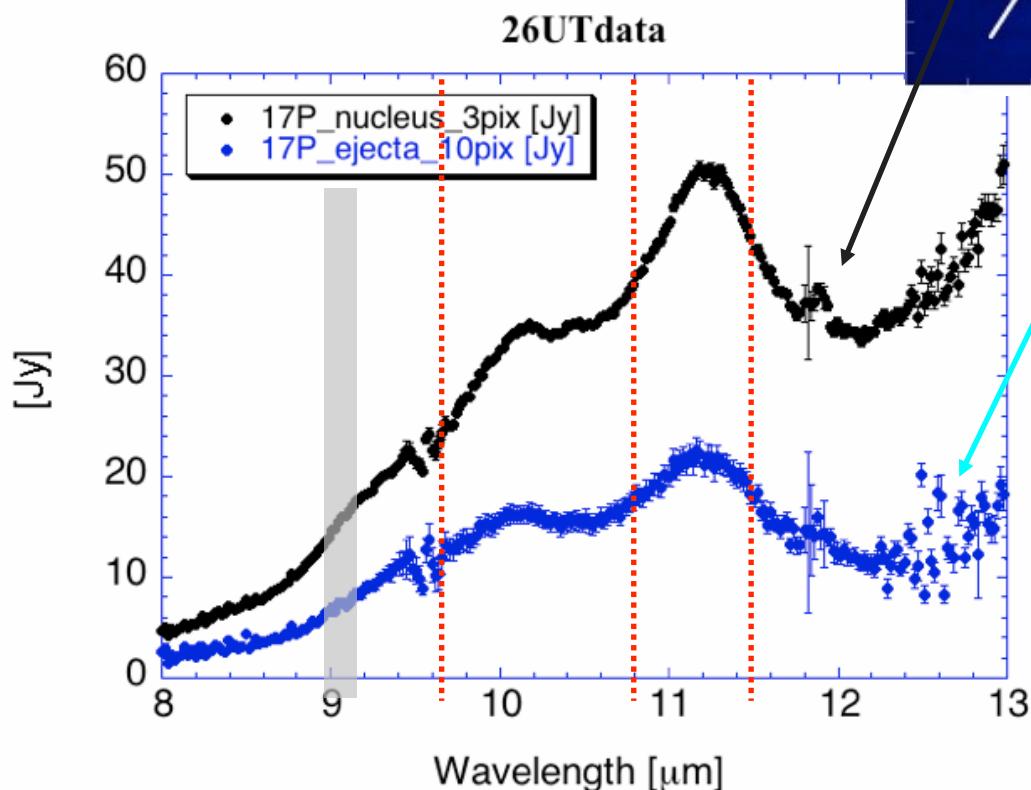
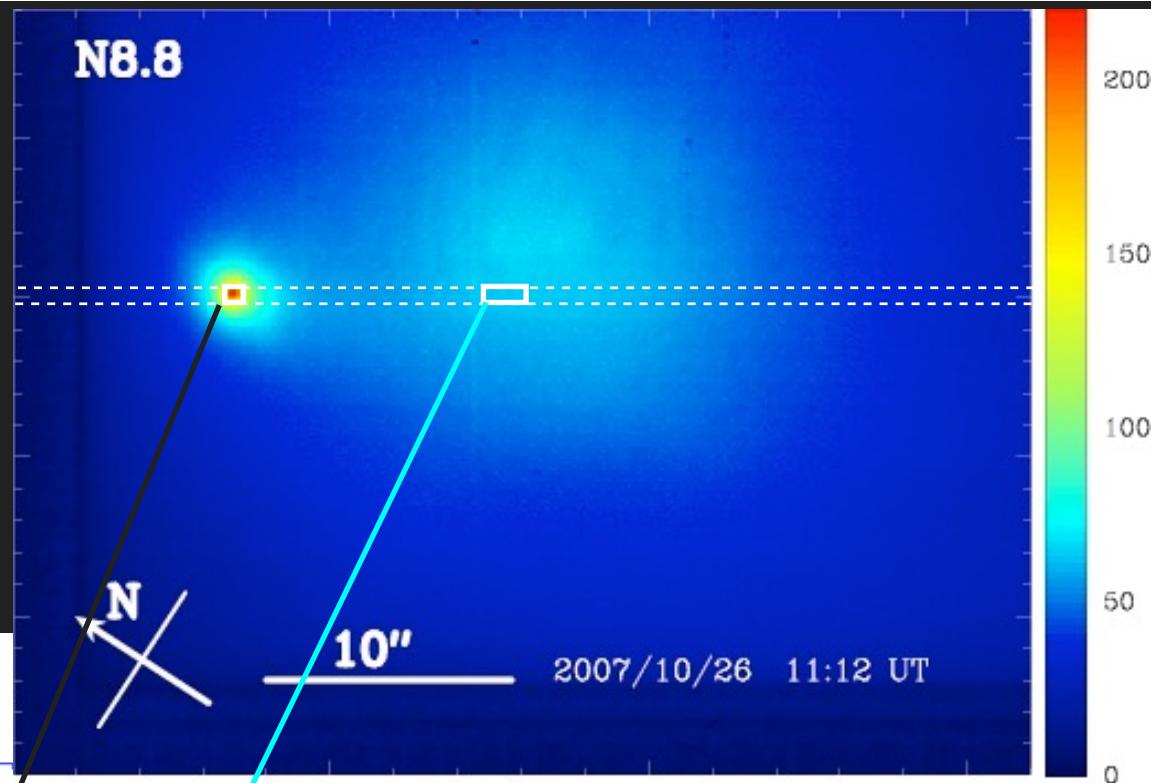
## Ecliptic comet

2007/10/26 UT

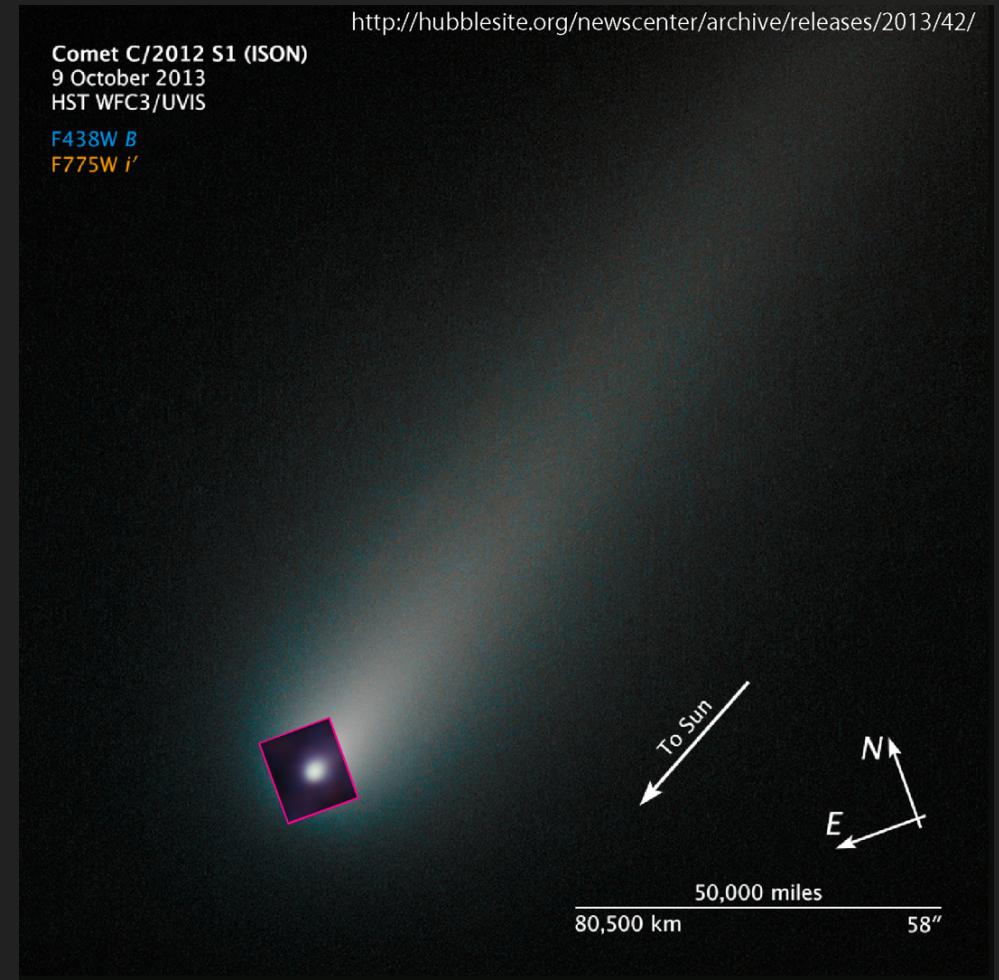
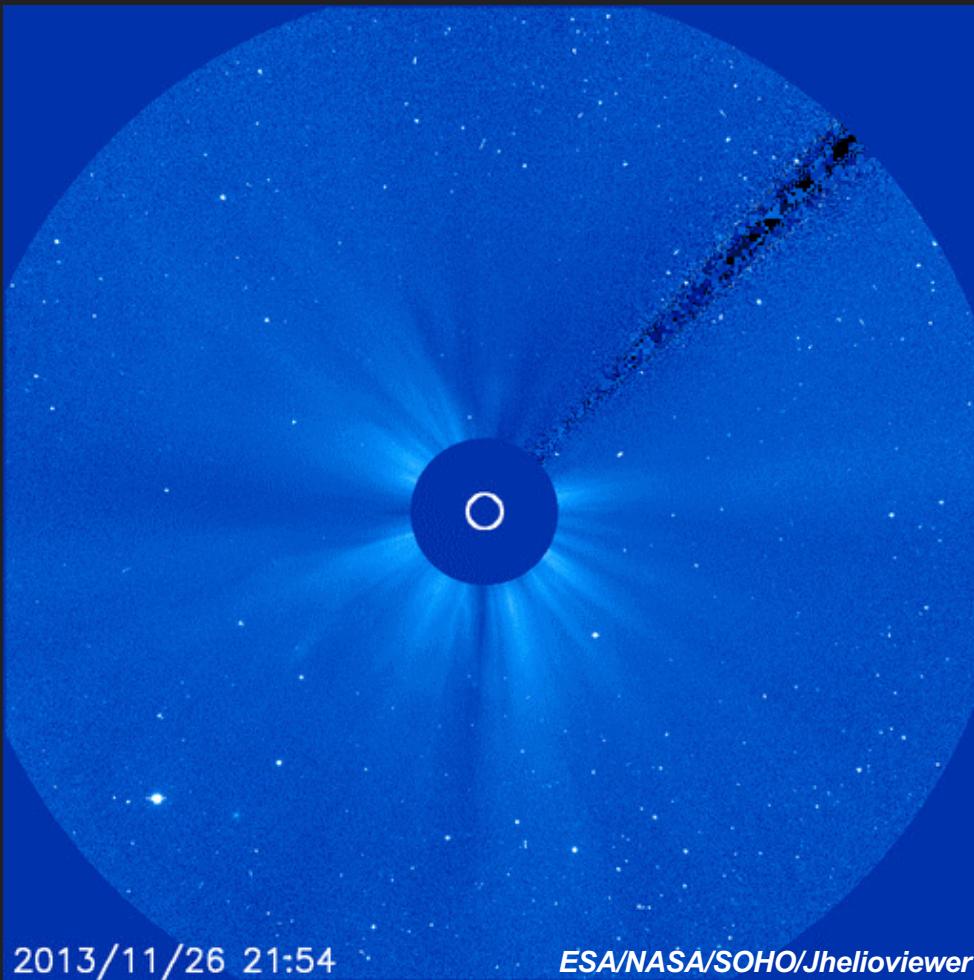
バースト後 2日

$r = 2.45 \text{ AU}$ ,  $T_{\text{BB}} = 177 \text{ K}$

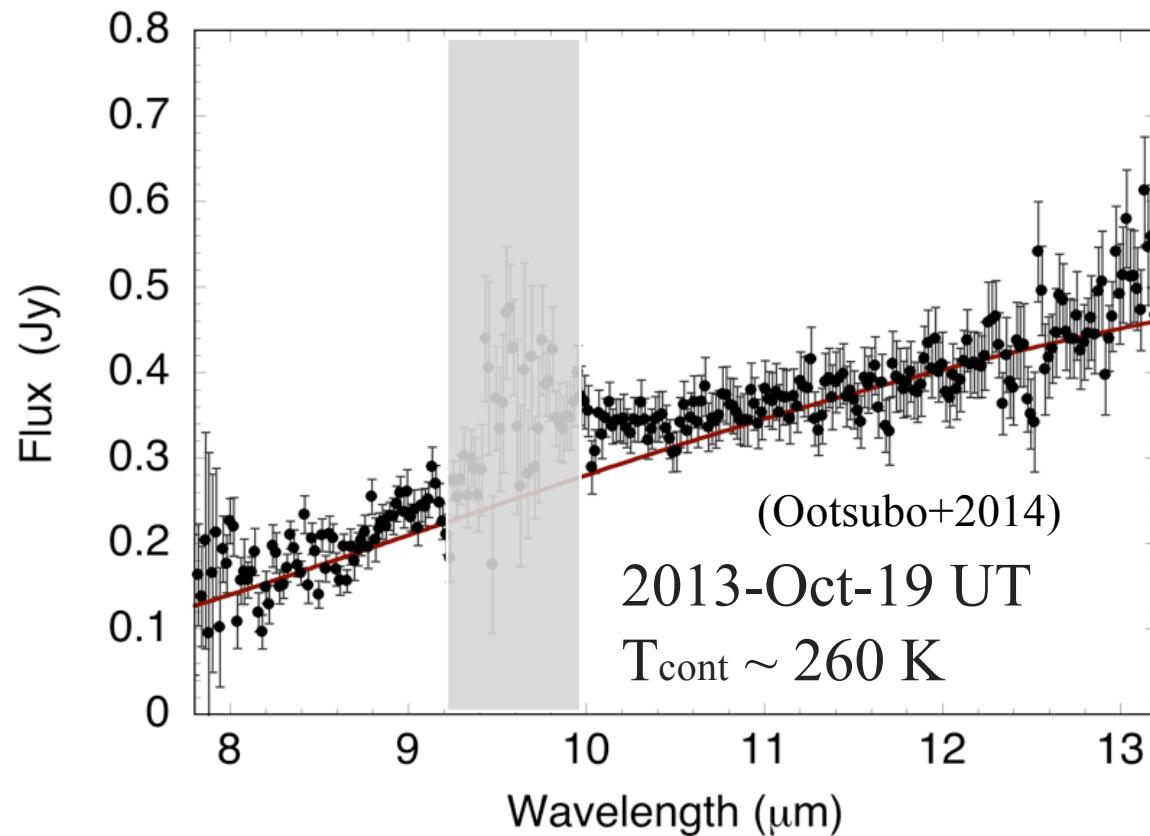
$\Delta = 1.62 \text{ AU}$



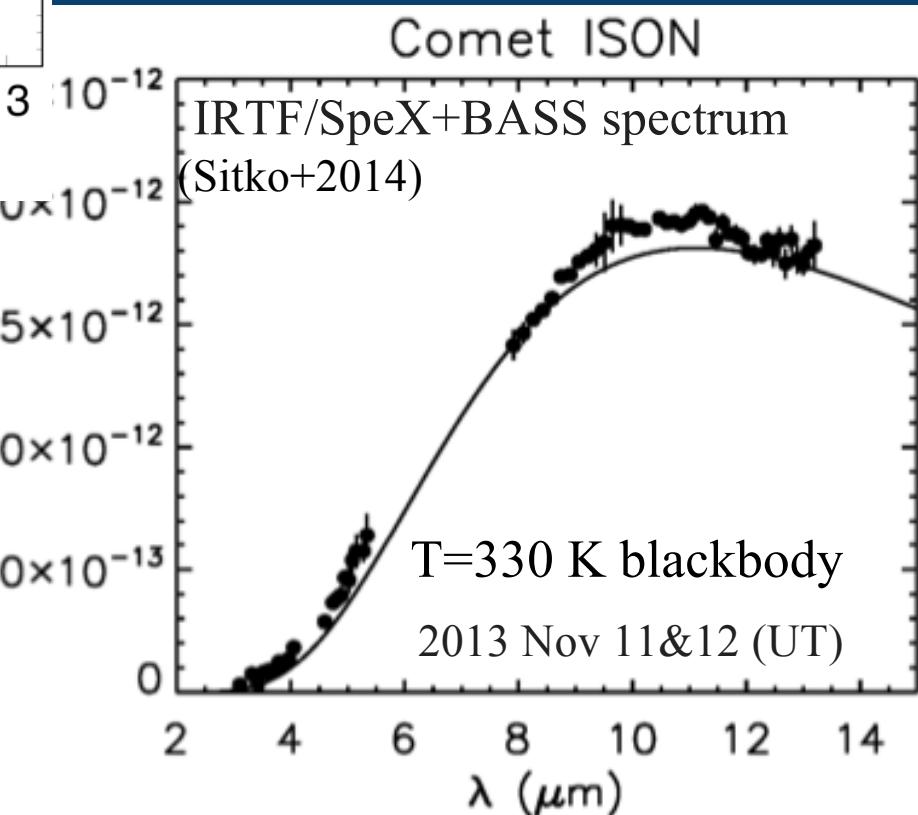
# アイソン彗星 C/2012 S1 (ISON) Oort comet



### Comet ISON observed with Subaru+COMICS



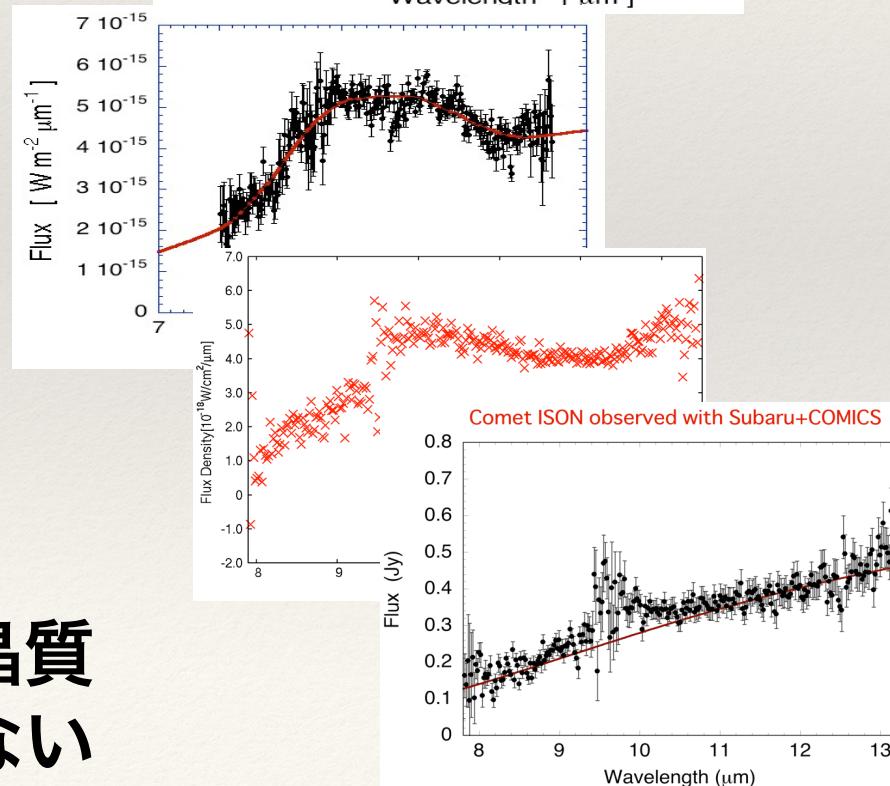
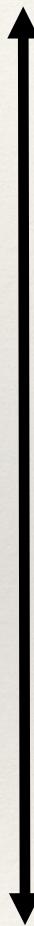
近日点通過 5 週間前  
結晶質オリビンは確認できず  
フィーチャ強度 < 10%



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%

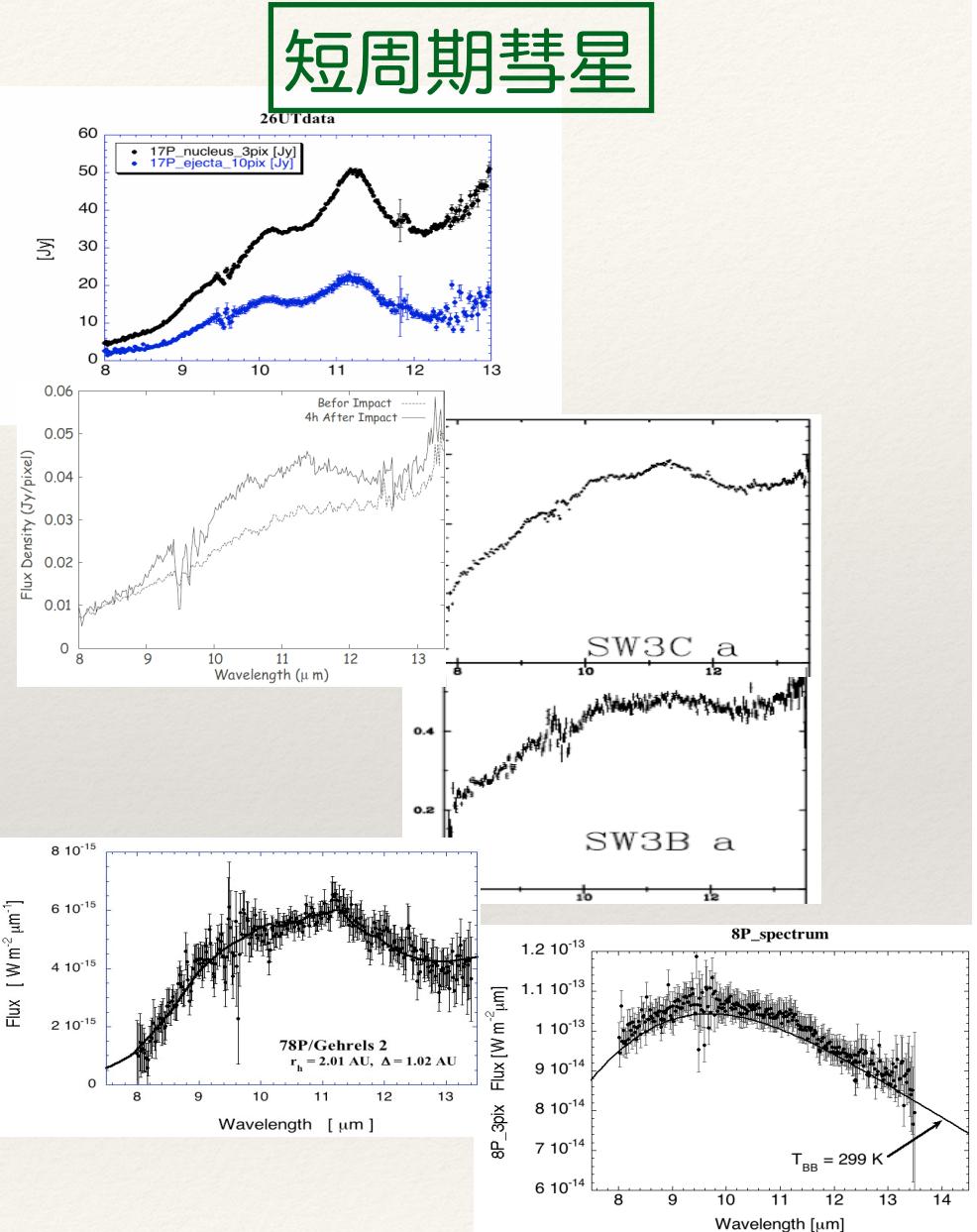
# 彗星の結晶質シリケイト

結晶質  
多い



結晶質  
少ない

短周期彗星

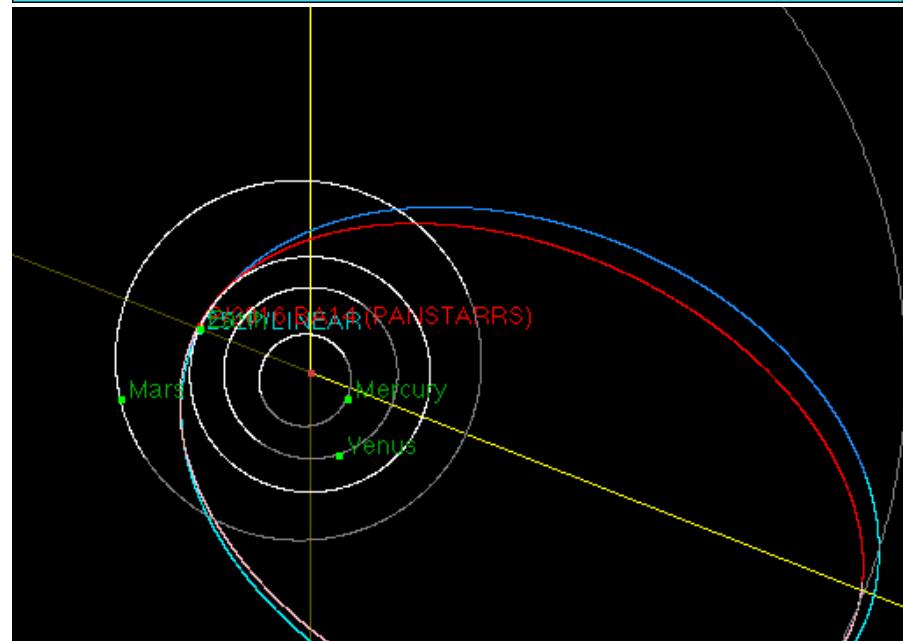
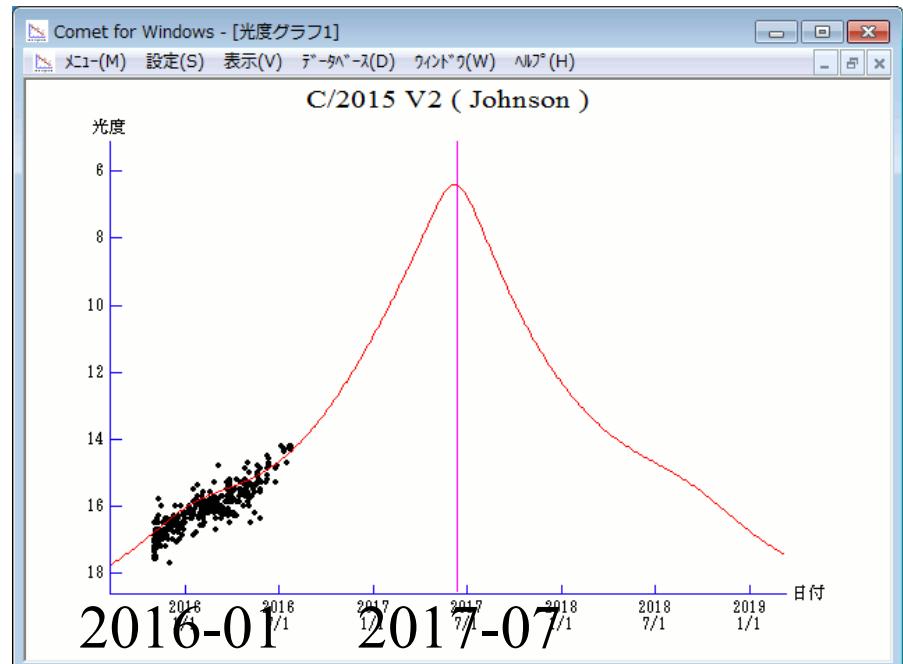


# 彗星シリケイトの中間赤外線観測

- ◆ 短周期彗星の通常活動で、結晶質シリケイトを確認。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)
- ◆ 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
- ◆ ただし、ダストの詳しい組成比・粒径の解明はまだ不定性大
- ◆ 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

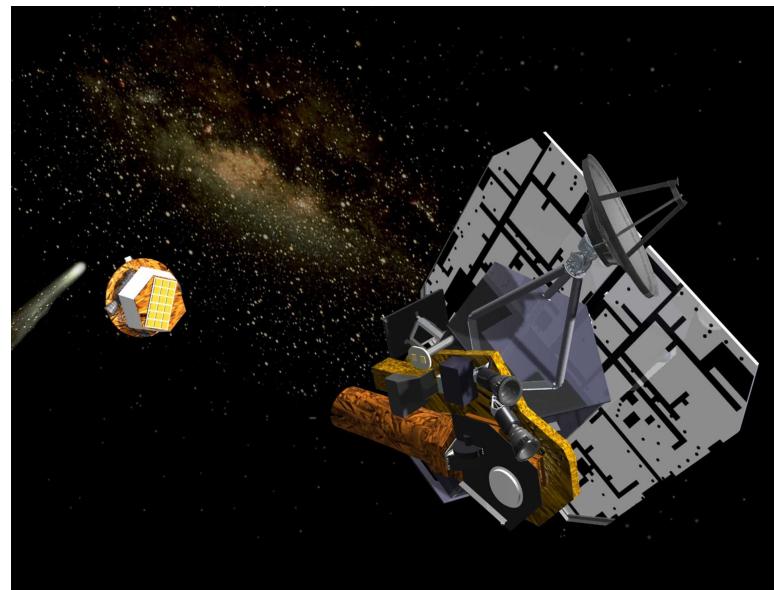
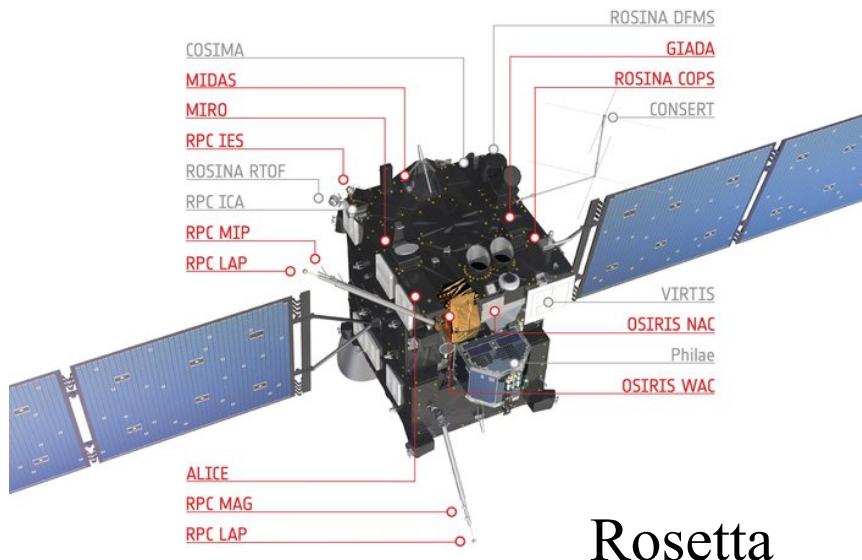
# Why We Need TAO?

- ・彗星は突然現れては消えていく
- ・近日点通過（前 | 中 | 後）それまでの観測も重要
  - 発見から時間をおかずには計画を立てないと、最適な位置での観測は難しい。
- ・北半球から観測できない場合も
  - すばるは北半球。南半球の望遠鏡は大変有効。
- ・日の出日の入り前後が観測好機の場合も多い
  - 昼間でも反太陽方向の観測できれば。。。。



# Why We Need TAO?

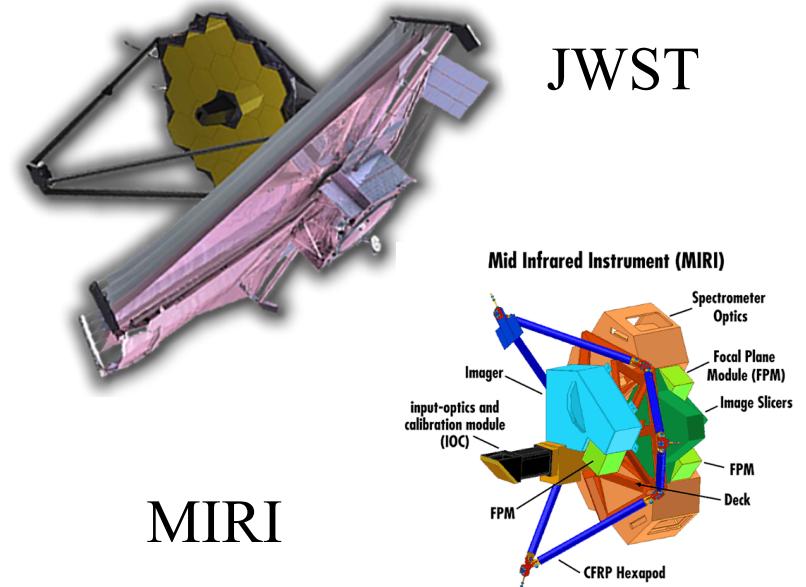
- 探査機での中間赤外線観測?
  - これまでの太陽系天体探査機には、中間赤外線分光観測を主要機能にしたものはない？
  - 中間赤外線装置は冷却が重要。 $\lambda > 10 \mu\text{m}$  は機械式ではなく冷却剤が必要となる。となると必然的に重量が増す。
  - クルージングフェーズが長い探査機では、現時点ではあまり現実的ではない。
- 中間赤外線観測は、まだまだ地上観測が有利&重要である。



Deep Impact

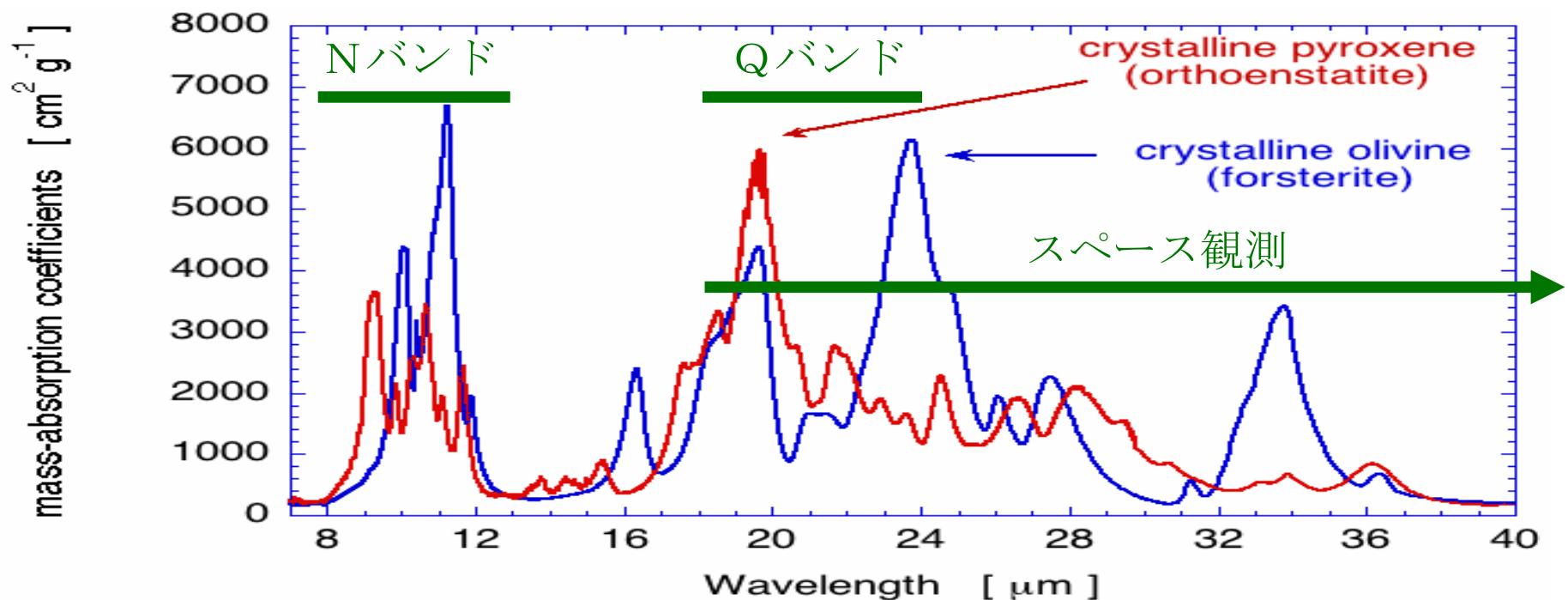
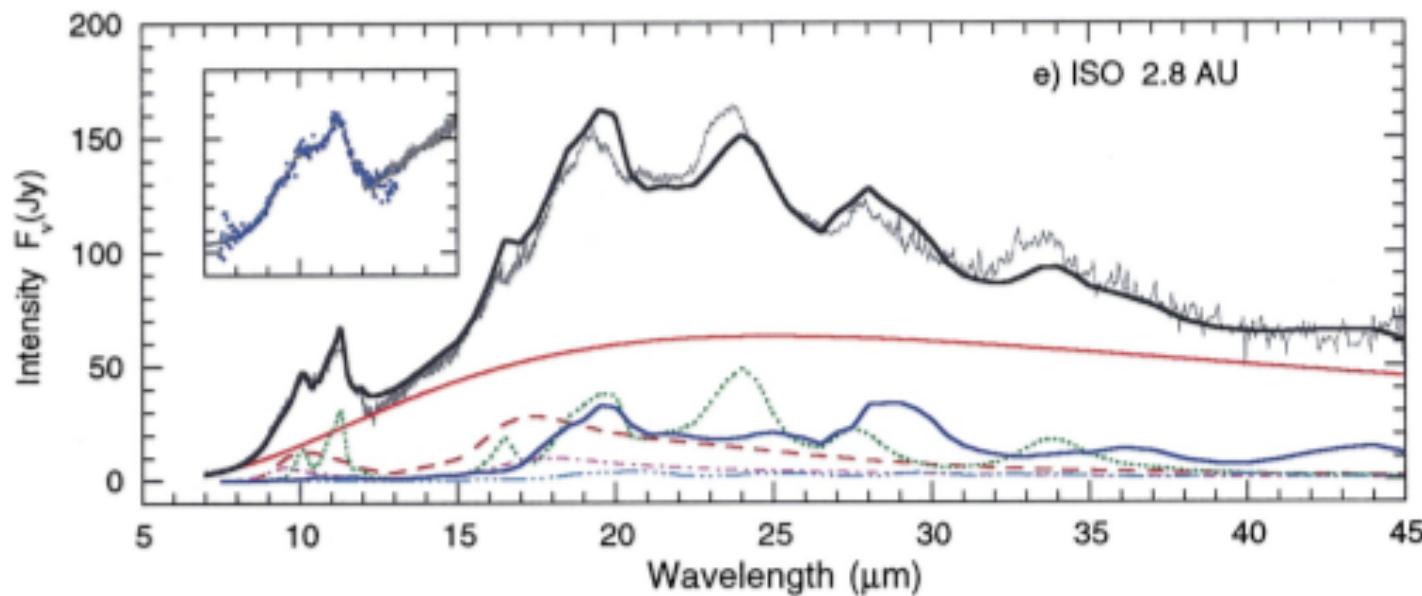
# Why We Need TAO?

- ・ 結晶質シリケイトの鉱物組成分離
- ・  $\lambda > 15 \mu\text{m}$  が成分分離には重要
  - $20 \mu\text{m}$  帯結晶質フィーチャ
  - サイズ分布の決定（なるべく長波長側まであるとよい）
- ・  $\lambda < 27 \mu\text{m}$  はJWST
  - ただし競争率が高く太陽系天体の観測数は多くないはず
  - 2018打上げ？太陽離隔の点で Visibility も大きく制限されるはず
- ・  $30 \mu\text{m}$  帯が受ければ、ダストのサイズ分布の大きいほうの決定にも大きな制限をつけられる

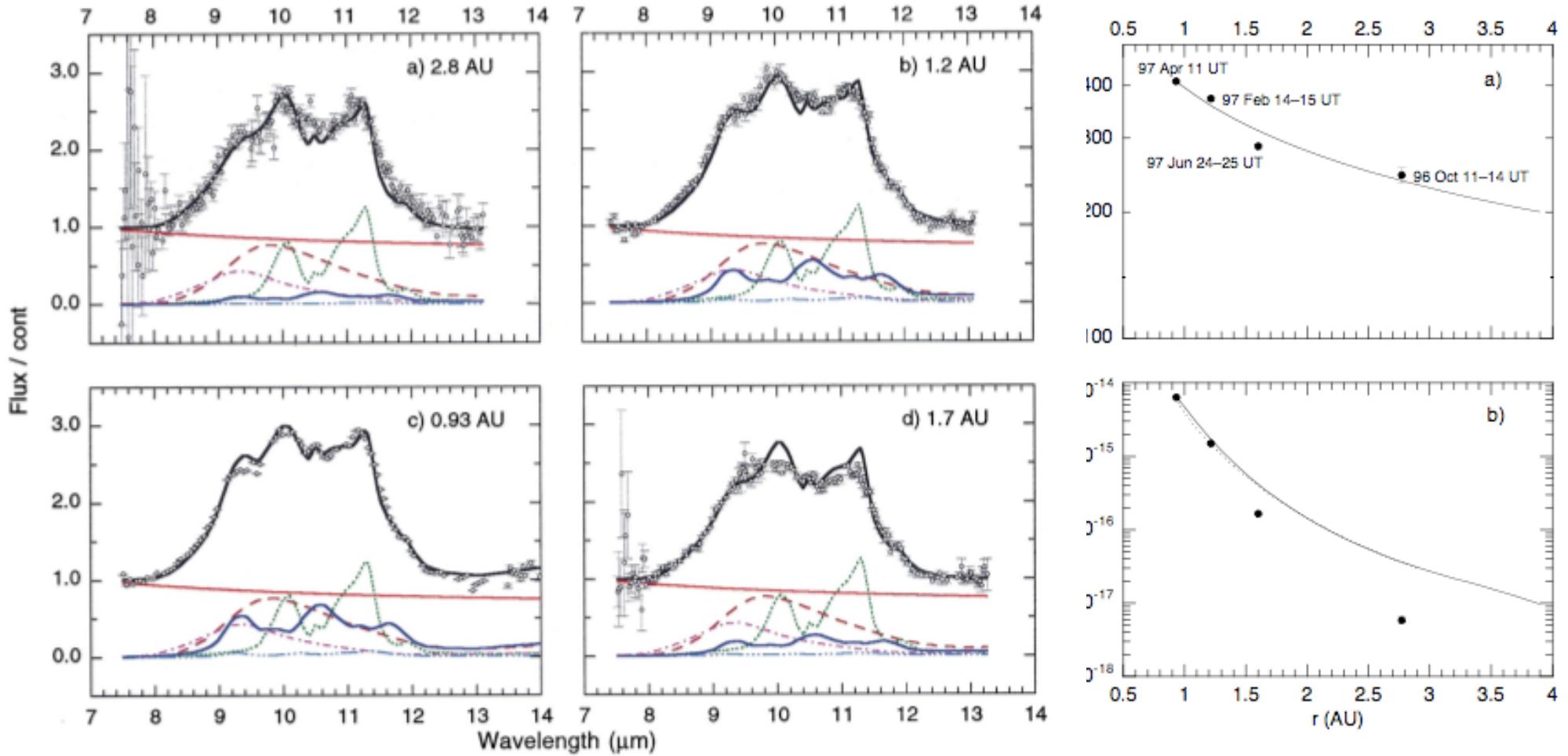


ch	Wavelength micron	pixel arcsec <sup>2</sup>	FOV arcsec <sup>2</sup>	R
1	5.0 – 7.7	0.196	3.00 x 3.87	2400-3700
2	7.7 – 11.9	0.196	3.50 x 4.42	2400-3600
3	11.9 – 18.3	0.245	5.20 x 6.19	2400-3600
4	18.3 – 28.3	0.273	6.70 x 7.73	2400-3600

# Why We Need TAO?



# 彗星の日心距離による変化



(Wooden et al. 1999)

# 彗星のモニタ観測

- 日心距離によるダストの温度変化
- シリケイト・フィーチャのピーク波長の変化？
- ダストサイズ、形状の変化？
- そもそも彗星の氷ダストは、どういう形で彗星核の内部に取り込まれているのか？
- 彗星核内部の（不）均一性。近日点通過前後の観測
  - 「その場」結晶化も起こっているのか？
    - sun grazing comet も狙える？
    - 昼間じゃないと無理かも。。。

# Subaru+COMICSとの比較

- **Subaru+COMICS**

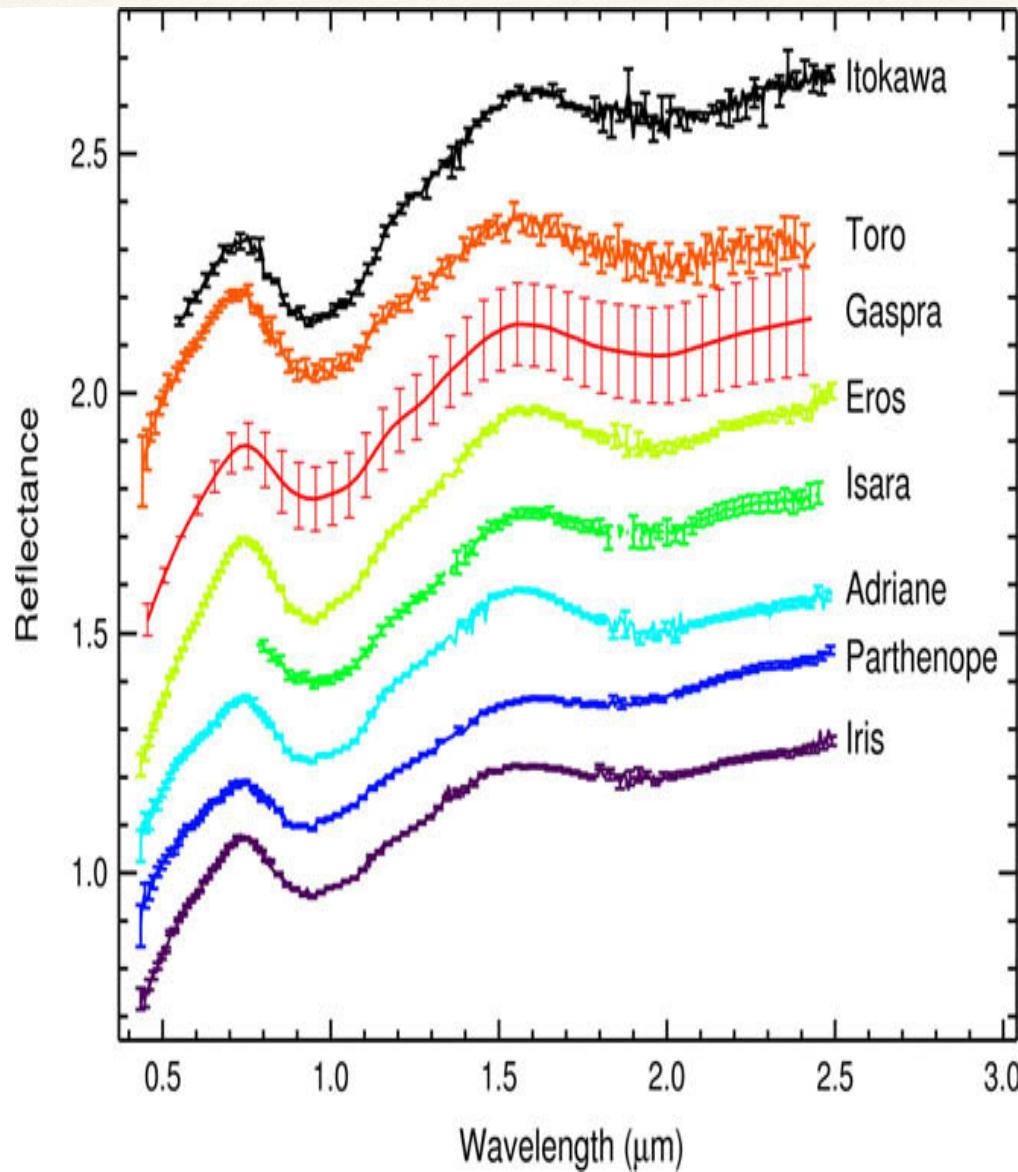
- N-band 分光 :  $V \sim 10 - 11 \text{ mag}$  &  $100 \text{ mJy} @ 10 \text{ micron}$
- heliocentric distance:  $r_h < 2 \text{ AU}$
- outburst of 17P/Holmes at 2.5 AU
- 彗星が明るい時期に、ハワイでは昼or高度が低いことが多い。
- 観測可能ターゲット数は、~5 targets/year 程度

- **TAO**

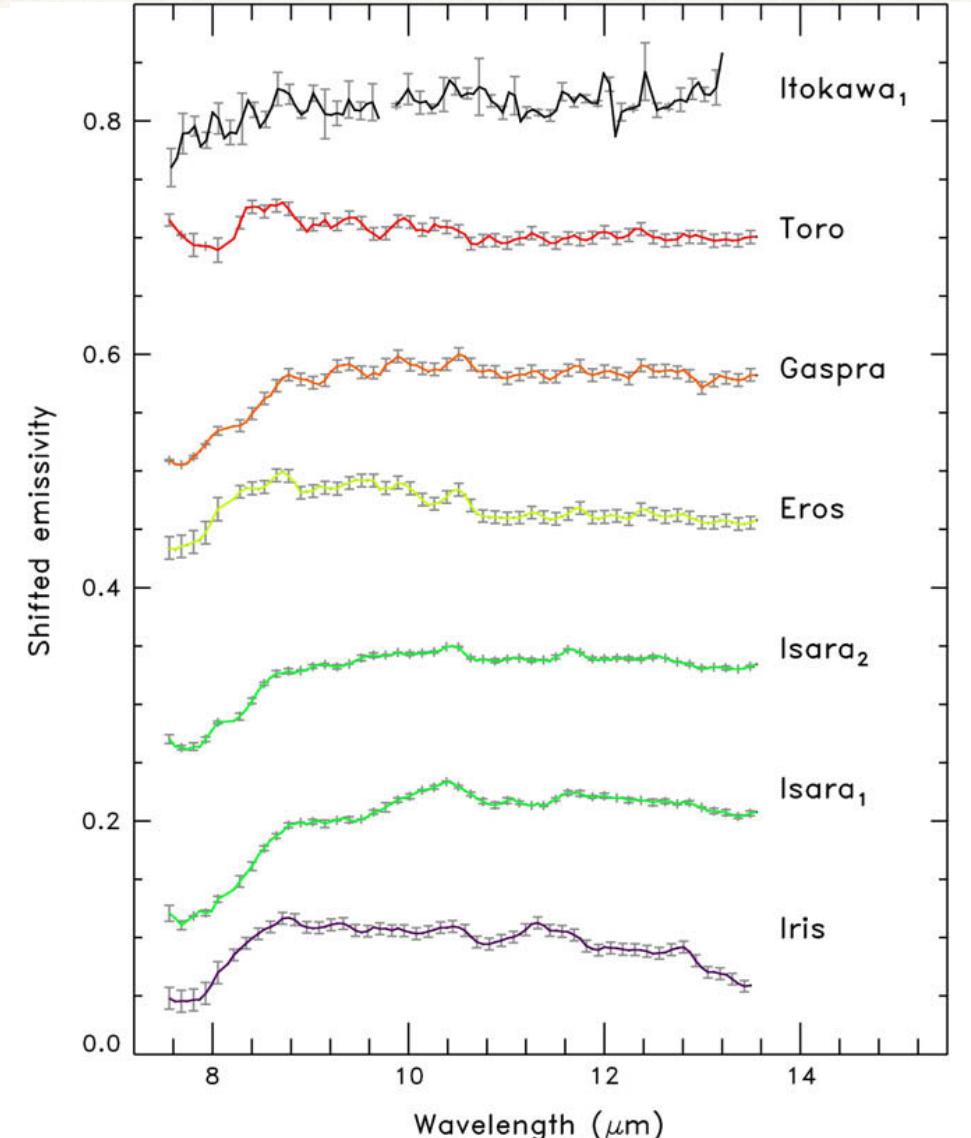
- 感度的にはターゲット数は**COMICS**と同等？
- しかし、観測時期をうまく考えればトータル3倍程度に？
- **COMICS**と相補的な観測計画が有効か
- 同じような日心距離で比較出来る観測数を大幅に増やせそう
- 日心距離変化も追いたい

# 小惑星の中間赤外線スペクトル

IRTF/Spe-X (V-NIR)



Spitzer/IRS (MIR)

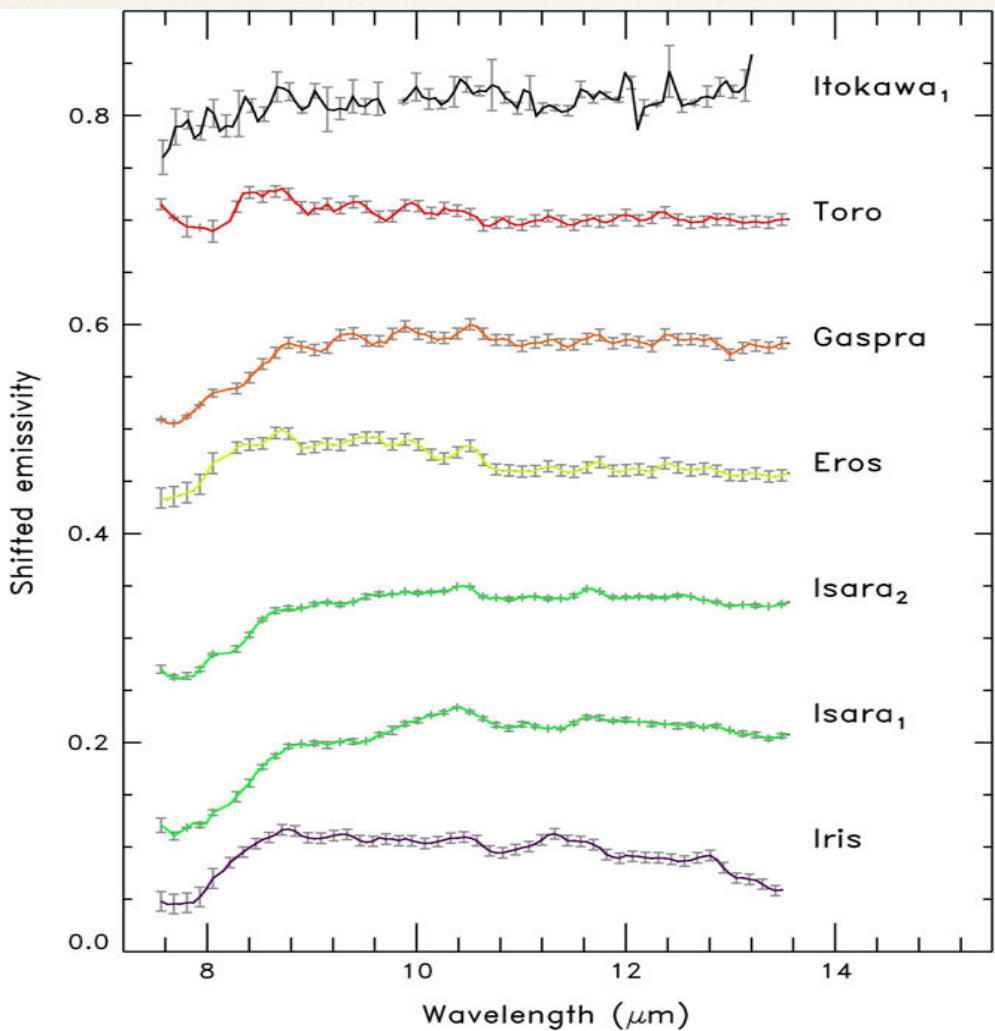


(Vernazza+2010)

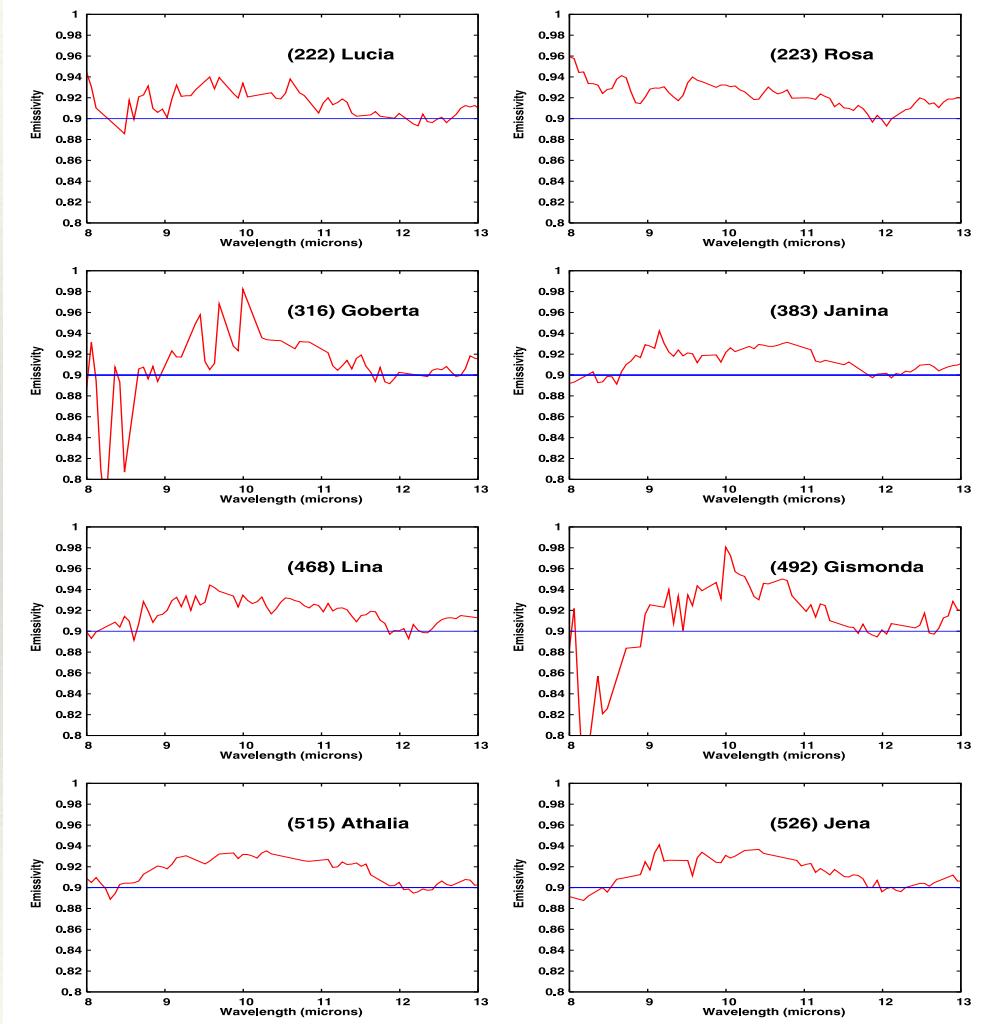
# 小惑星の中間赤外線スペクトル

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

小惑星表面のシリケイト・フィーチャの判別は難しい



(Vernazza+2010)



(Licandro+2012)