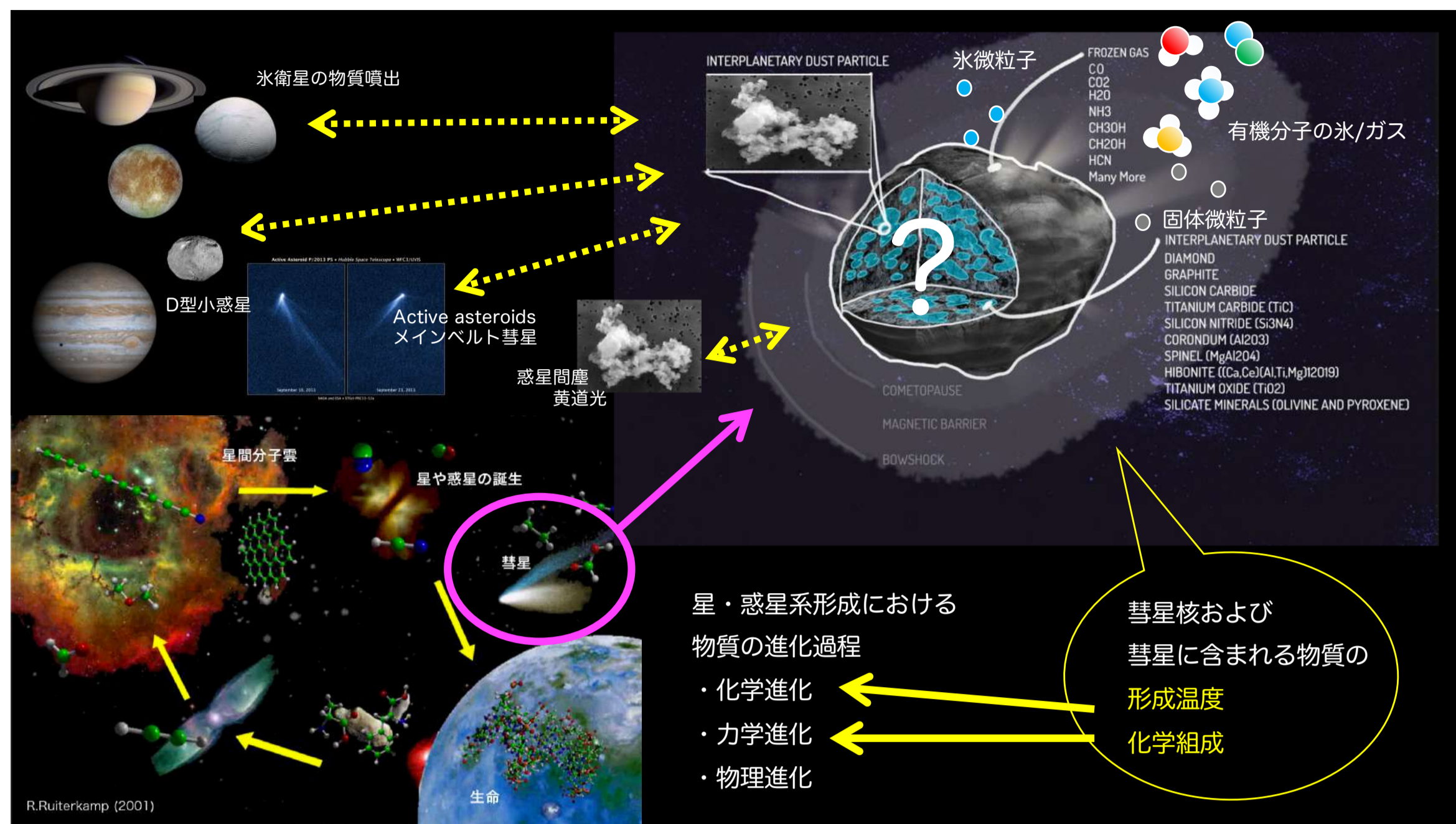


SPICA中間赤外線分光観測による彗星の水氷・ケイ酸塩鉱物探査

大坪貴文 (JAXA/ISAS), 小林仁美 (LLP京都虹光房), 癸生川陽子 (横浜国立大学), 高橋葵 (ABC), 河北秀世, 新中善晴 (京都産業大学), SPICA太陽系・系外惑星サイエンス検討班

赤外線天文衛星SPICAを用いた太陽系小天体の科学：彗星



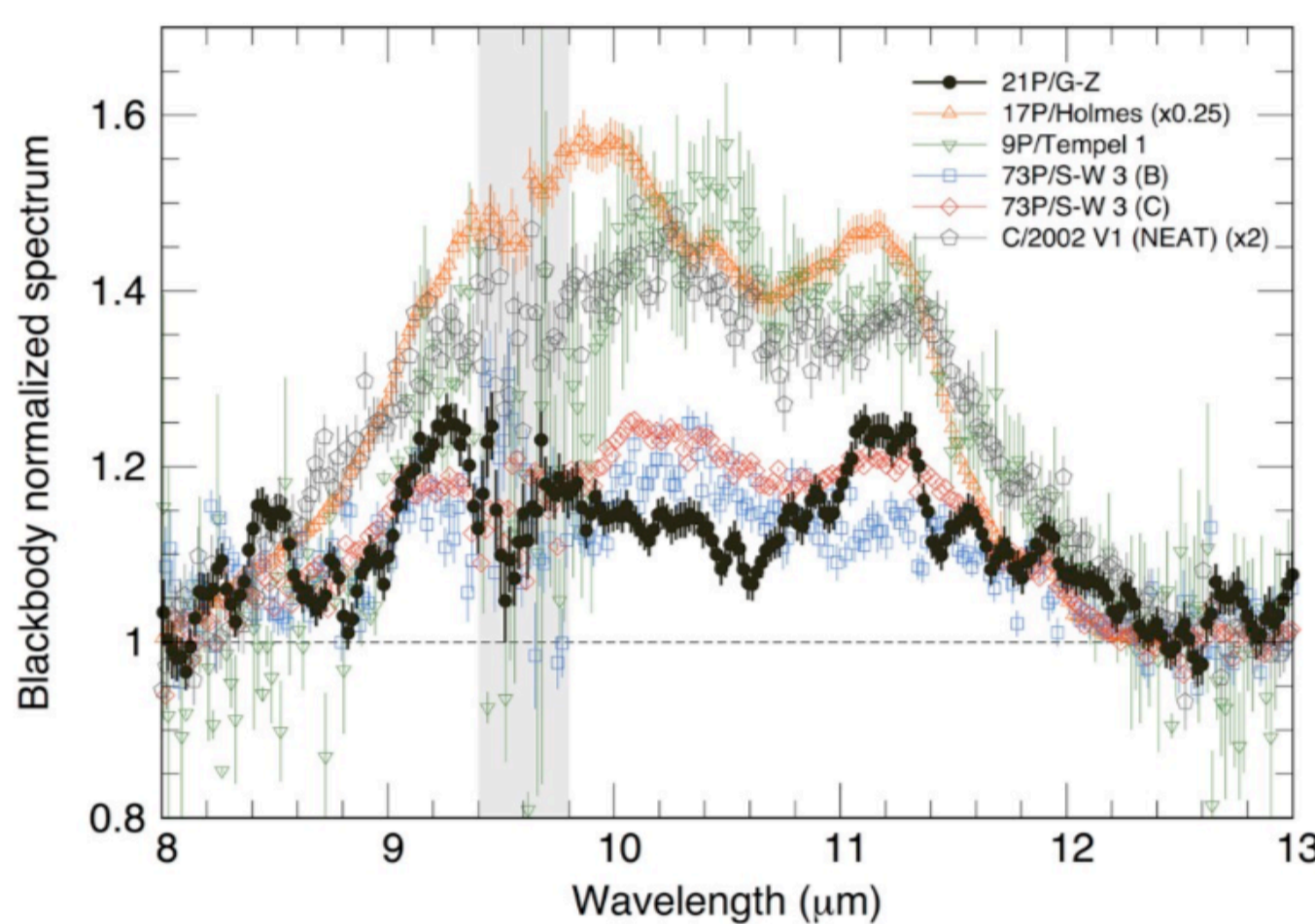
彗星は、惑星形成時期の原始太陽系星雲中で形成された氷微惑星の残存物であり、惑星による重力散乱で太陽系外縁部に飛ばされた後、最近再び太陽系の内側へと落ちてきた太陽系小天体だと考えられている。形成以降は太陽系外縁部に存在し熱的変成を比較的受けておらず、形成時の情報を保持した始原天体であると考えられており、その氷と鉱物の情報は形成時から現在へと至る太陽系の進化プロセスを理解するプローブになりうる。

これまで多くの彗星の中間赤外線スペクトル中に、結晶質ケイ酸塩による特徴的なフィーチャ(例えば11.2 μm)が検出されている。しかし、低温凝縮物の氷が主成分である彗星核に多くの結晶質鉱物が存在するには、原始太陽系円盤で高温の太陽近傍から雪線よりも遠い彗星核形成領域(~5-30au)まで物質が効率的に運ばれることが必要である。彗星のケイ酸塩鉱物における結晶質存在比は、この原始太陽系円盤での物質輸送効率のひとつの指標となると期待される。

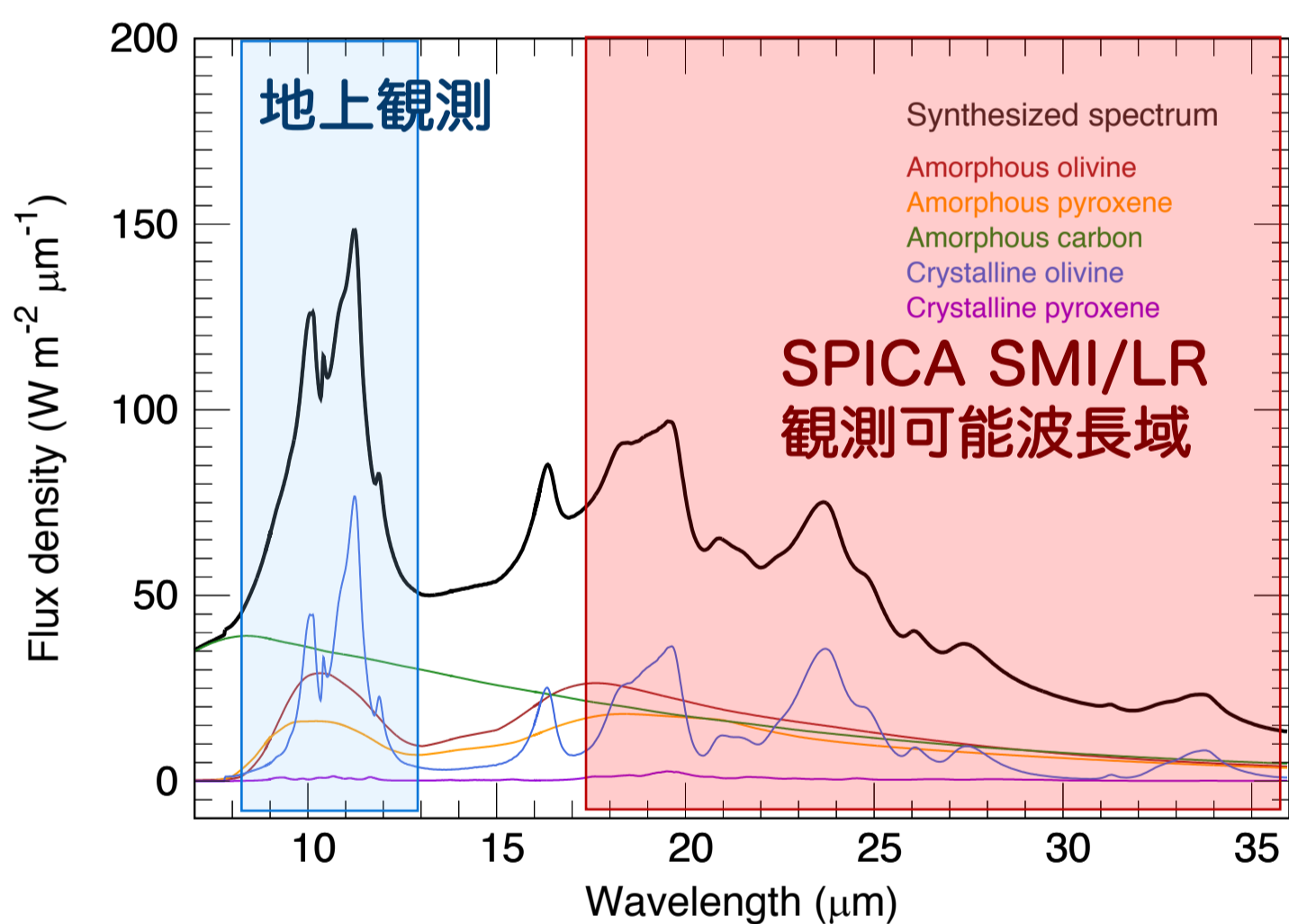
また、彗星はしばしばバーストを起こすが、その要因のひとつとして非晶質水氷の結晶化が考えられている。彗星コマ中には一酸化炭素やメタンなど水氷よりもさらに揮発性の高い分子が確認されており、こうした高揮発性分子が彗星核中にどのように長期間保持されるかについても、水氷の結晶構造は大きなヒントになる。しかし、非晶質氷・結晶氷の存在比に関してもまだ明確なことは分かっていない。

SPICAは12-230 μm の幅広い中間遠赤外線波長域において、高感度の分光観測が可能である。10-30 μm 帯および69 μm の結晶質ケイ酸塩フィーチャ、および40, 60 μm 帯の水氷のフィーチャをどのようにSPICAで検出し、彗星の起源と進化について探るのか、これまでの検討結果について紹介する。

彗星鉱物の化学組成および結晶質/非晶質



(上図) さまざまな彗星の地上観測による中間赤外線8-13 μm スペクトル。9.4-9.8 μm 付近はO₃の吸収に強く影響される(Ootsubo et al. 2020)。



(下図) Halley彗星の中間赤外線スペクトルをモデルで再現した例。地上観測の8-13 μm 領域は、フィーチャが混んでいるのに対し、23, 33 μm 付近はフォルステライトとのフィーチャが顕著である。SPICAのSMI/LRは17-36 μm 領域をカバーする。

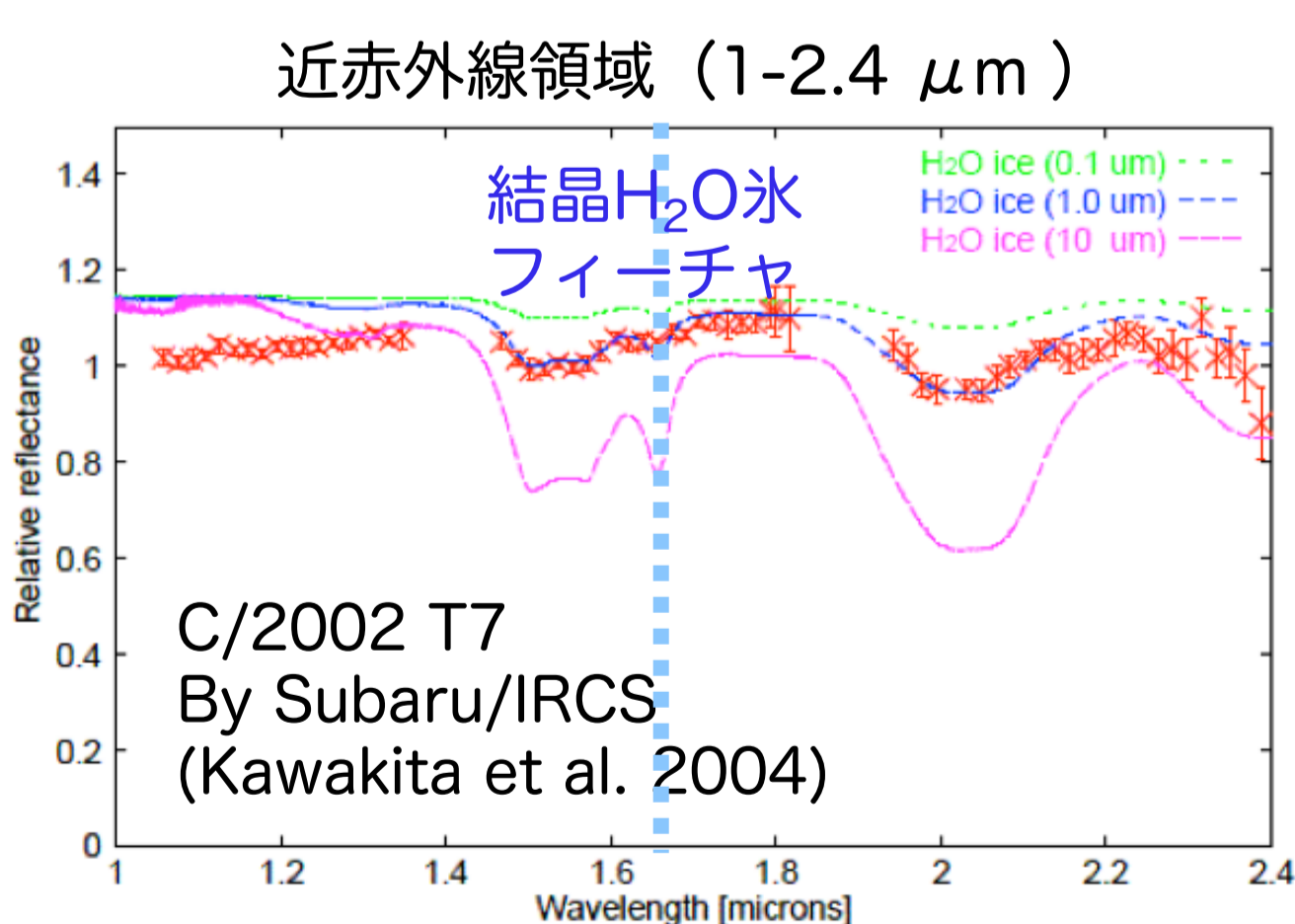
彗星固体微粒子の鉱物組成や結晶質/非晶質比は、その鉱物の形成温度の直接的な指標になると考えられている。鉱物種およびその状態は、彗星スペクトルの輝線フィーチャーから、モデルを介して明らかにするのが現在の主流の研究手法である

- 彗星固体微粒子の主成分であるケイ酸塩鉱物(シリケート)、例えばフォルステライト(Mg₂SiO₄)やエンスタタイト(MgSiO₃)などが、中間赤外線波長域でみせる特徴的なSi-O間の振動バンドフィーチャの検出が重要

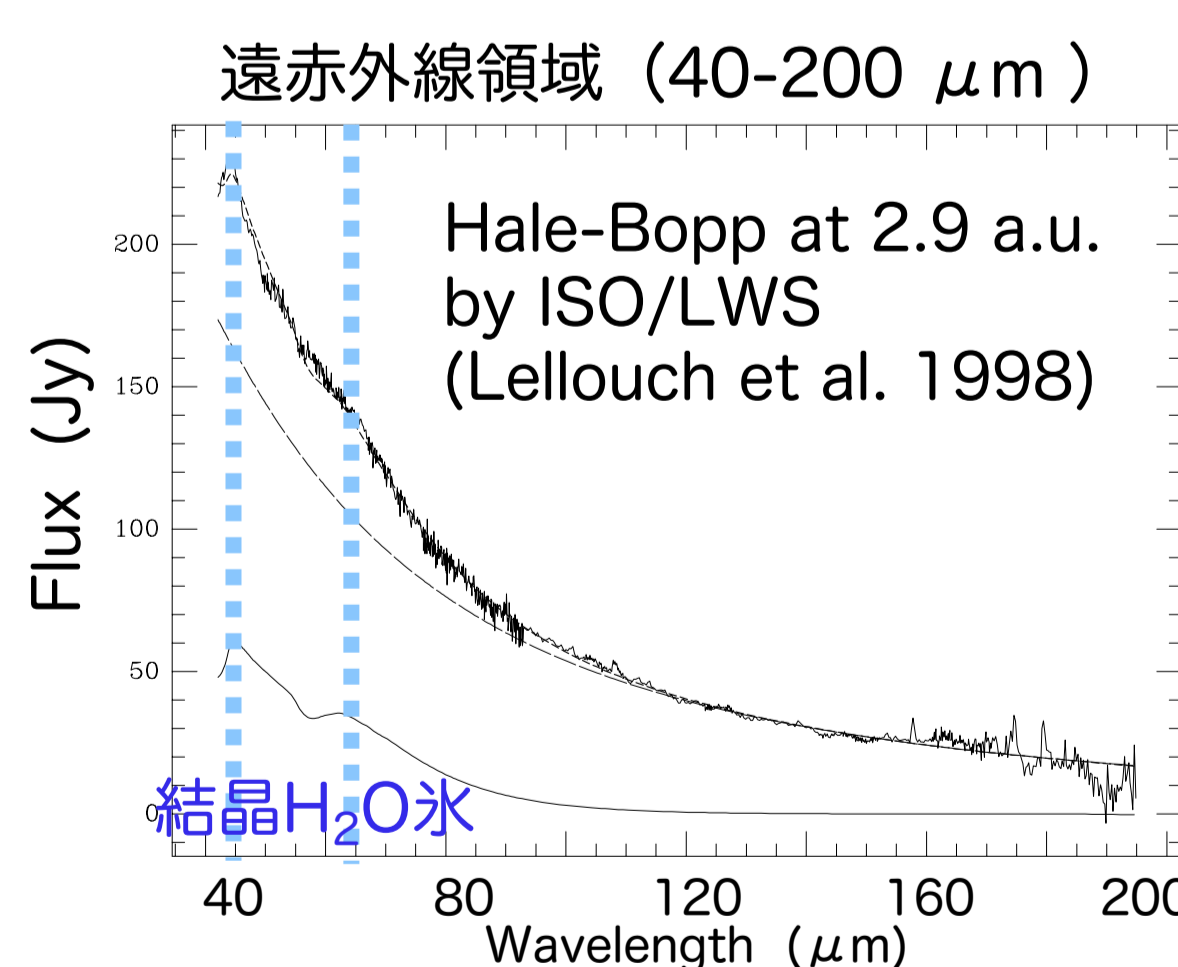
地上観測は大気吸収の影響を受けるため、大気の窓である8~14 μm 付近での観測に制限されてしまう。しかし、フォルステライト、エンスタタイトをはじめ、SiO₄を基本単位として持つ様々な鉱物種がこのSi-Oの振動放射を近い波長で出すため、8~14 μm 付近の観測だけでは鉱物種の分離が難しい。加えて9.6 μm 付近にはオゾン(O₃)の吸収があり、フィーチャーの形状特定を更に難しくしている。

- 15 μm よりも長波長側の、特に23 μm 、33 μm 、69 μm 付近では、フォルステライトがより顕著なフィーチャを示すため、これを検出できればフォルステライト・エンスタタイトを明確に分離することも可能である。この波長帯は地上観測が難しいため、大気の影響を受けないSPICAの中間・遠赤外線での分光観測が有効である

彗星H₂O氷の結晶質/非晶質



すばる望遠鏡+IRCSによって観測された彗星C/2002 T7の反射率スペクトル例



ISO/LWSによって観測されたHale-Bopp彗星の放射スペクトル例

H₂O snow line (~3au) 以遠の活動度やバースト現象のメカニズムはまだ明らかでない。非晶質H₂O氷の結晶化がトリガーになるという仮説が有力

- snow line以遠の彗星核近傍、彗星核表面のH₂O氷の吸収バンドの直接観測が必要

これまでの近赤外線領域の観測では、H₂O氷の結晶状態についてconclusiveな結果が得られていない

- H₂O氷は、近赤外線波長域以外に、44 μm と62 μm 付近にも輝線バンドを示す。太陽から遠方にある彗星の場合、近赤外線での太陽光散乱光の明るさは暗くなるが、熱放射スペクトルのピーク波長は $\geq 20\mu\text{m}$ にくるためSPICAの中間・遠赤外線での分光観測が有効である。

SPICAで期待される成果

ケイ酸塩鉱物の結晶質/非晶質性

SPICA/SMIは23 μm 、33 μm のフォルステライトのフィーチャをとらえることができる。過去の観測よりも精度よくケイ酸塩鉱物の結晶質比率、forsterite/enstatite比を明らかにすることで、彗星ダストの形成環境を知る手がかりが得られる

H₂O氷の結晶質/非晶質性

SPICA/SAFARIはISO以来初めて40~60 μm 帯での本格的な分光観測が可能な赤外線衛星であり、彗星の貴重な遠赤外線スペクトルが取得できる。ISOよりも数桁感度が良いSPICAであれば水氷が十分検出可能である

SPICAにより彗星核に含まれる物質の形成温度や化学組成が明らかになると、分子雲および原始惑星系円盤内での彗星核形成領域および物質の輸送過程などに制限が与えられ、モデルを介してさらなる深い理解へとつながると期待される。また彗星を始めた太陽系小天体全般的な観測と、それらの観測結果の比較から、今後の大型望遠鏡や探査計画へとつながることが期待される。