

TAO/MIMIZUKUによる 小惑星の近赤外線分光サーベイ計画



臼井 文彦, 上塚 貴史, 宮田 隆志 (東京大学),
長谷川 直 (宇宙航空研究開発機構),
高遠 徳尚 (国立天文台)

小惑星における「水」の存在

- 小惑星における水の存在

- 太陽系形成時の環境や地球の水の起源について重要な情報が得られる。
 - ✓ (1) Ceres : 含水鉱物 (Rivkin+ 2002)、水蒸気 (Küppers+2014)、etc
 - ✓ (4) Vesta : 含水鉱物 (Hasegawa+2003, Rivkin+2006, Russel+2015)
 - ✓ (24) Themis, (65) Cybele : H_2O 氷 (Campins+ 2010; Rivkin+ 2010; Licandro+ 2011)
 - ✓ など

- 含水鉱物 :

- OH基や H_2O を何らかの形で構造の中に含む鉱物。
小惑星内部で、**無水ケイ酸塩鉱物**と**(液体の)水**が反応して生成される。
- 水の昇華温度以上になっても安定に存在するので、生成後の温度変化によってリセットされない水の存在を示す重要なマーカーになる。
- $3\mu\text{m}$ 帯における吸収フィーチャ
 - ✓ 含水鉱物のOH基 ($2.7\text{--}2.8\ \mu\text{m}$)
 - ✓ 鉱物の構造水 ($2.95\ \mu\text{m}$)、 H_2O 氷 ($3.1\text{--}3.2\ \mu\text{m}$)

水の存在の探査には、多様な小惑星について含水鉱物の存在を調べることが重要である

C型小惑星と炭素質コンドライトの比較

(Hiroi+1996)

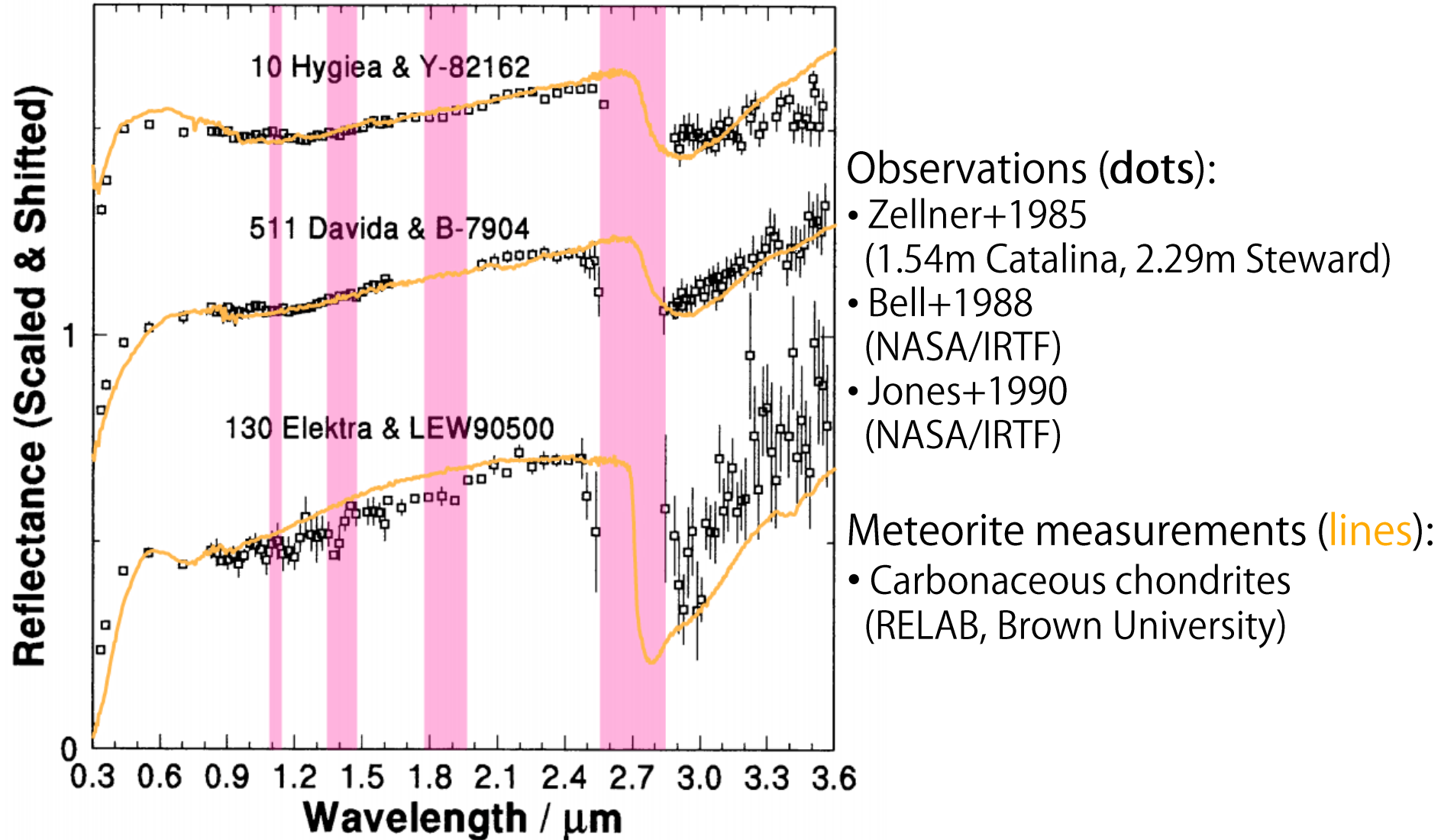


FIG. 3. Three sets of asteroid-meteorite counterparts that have similar overall reflectance spectra. All spectra are scaled to 1.0 at 2.37 μm and offset for clarity.

赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)

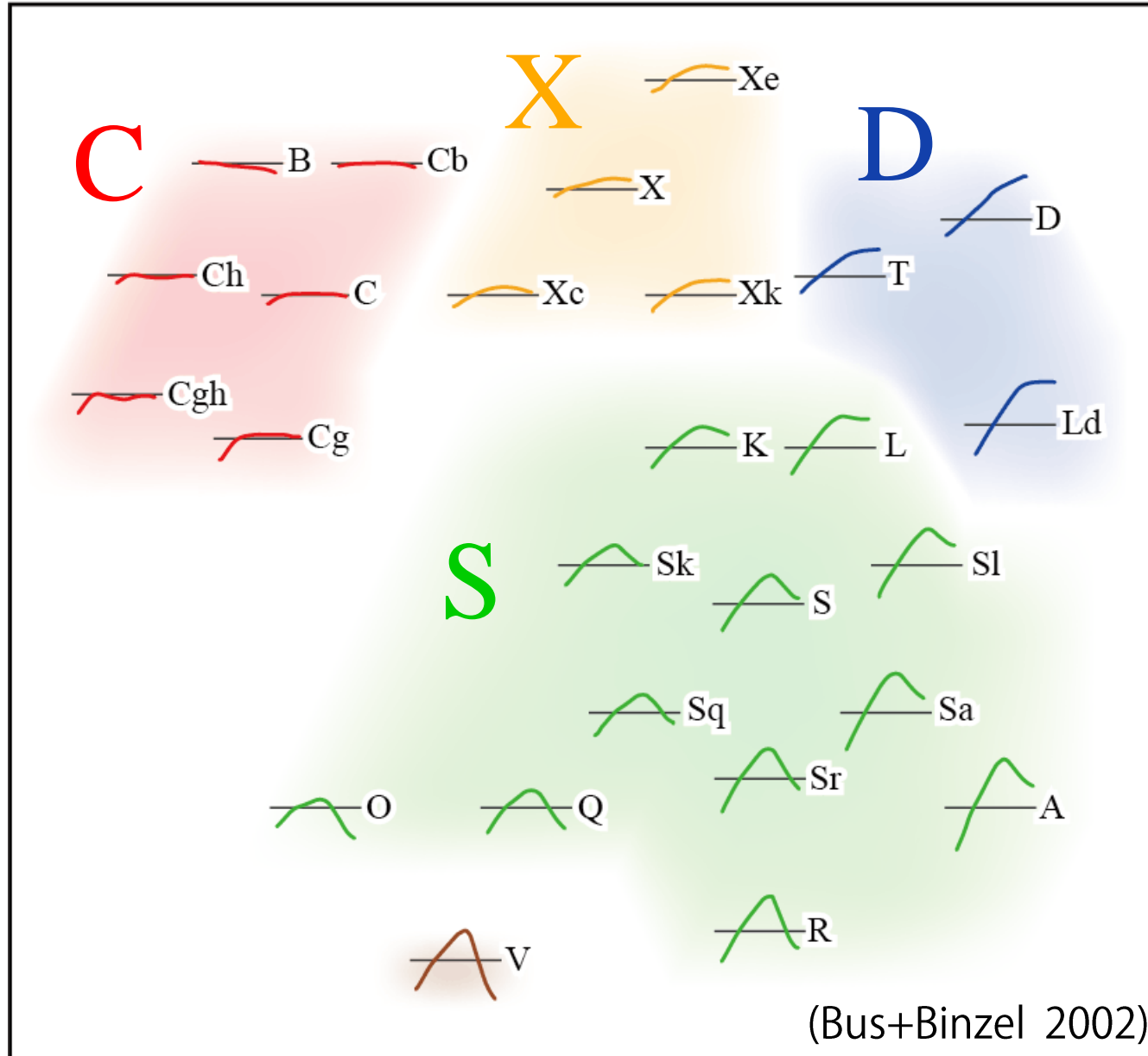
- 日本初の本格的な赤外線天文衛星
 - 2006年2月22日打ち上げ、2011年11月24日停波
 - 軌道：高度=約700km・太陽同期極軌道
 - サイズ：5.5×1.9×3.7m (パドル展開時)
 - 望遠鏡：Ritchey-Chrétien式 (主鏡68.5cm, SiC)
 - 冷却：液体ヘリウム (170 ℓ) + 機械式冷凍機
 - 観測装置：
 - ✓ 近・中間赤外線カメラ (IRC: InfraRed Camera) : 2--26 μm
 - ✓ 遠赤外線サーベイヤー (FIS: Far-Infrared Surveyor) : 50--180 μm
- あかりによる小惑星の近赤外線分光観測
 - IRC/NIRチャンネルを用いて66天体(147回)の指向観測を行った (メインベルトで40 kmサイズ以上の小惑星)
 - グリズム分光 (波長: 2.5--5 μm 、分解能: $R=120@3.6 \mu\text{m}$)
 - 1回の指向観測：約10分間 (積分時間：350-400秒)



小惑星における水・含水鉱物探査

- 赤外線天文衛星「あかり」による近赤外線分光観測
(Usui et al. in prep)
 - 小惑星66天体のスペクトルを観測した。
 - C型小惑星のほとんどで、2.7--2.8 μm に含水鉱物の吸収を**明確に**検出した。一方、観測したすべてのS型小惑星は明確な吸収を持たず、また、いくつかのX型、D型はC型に類似した吸収フィーチャーを持つことがわかった。
 - これは、従来の可視光によるものだけでなく、近赤外線の波長帯を含めた新たなスペクトル分類の可能性を示唆するものである。
- 含水鉱物のスペクトルの特徴を統計的に議論するには、より多くのサンプルが必要

小惑星の反射スペクトルの傾向 (0.4--0.9 μm)



小惑星のスペクトル分類

- Eight-Color Asteroid Survey (ECAS)
 - 0.3--1.1 μm (8バンド)の撮像データを解析
 - 589個の小惑星を14タイプに分類(Tholen 1984; Tholen 1989; Tholen+Barucci 1989)
- Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey II (SMASSII)
 - 0.44--0.92 μm の分光サーベイ
 - 1447個の小惑星を24タイプに分類(Bus 1999; Bus+Binzel 2002)
- Small Solar System Objects Spectroscopic Survey (S³OS²)
 - 0.49--0.92 μm の分光サーベイ
 - 820個の小惑星を分類 (Tholen/Bus分類に準拠)(Lazzaro+2004)
- Sloan Digital Sky Survey Moving Object Catalog (SDSS-MOC)
 - 0.354--0.913 μm (5バンド)の撮像データを解析
 - 63,468個の小惑星を9タイプに分類(Carvano+2010)

小惑星における水・含水鉱物探査

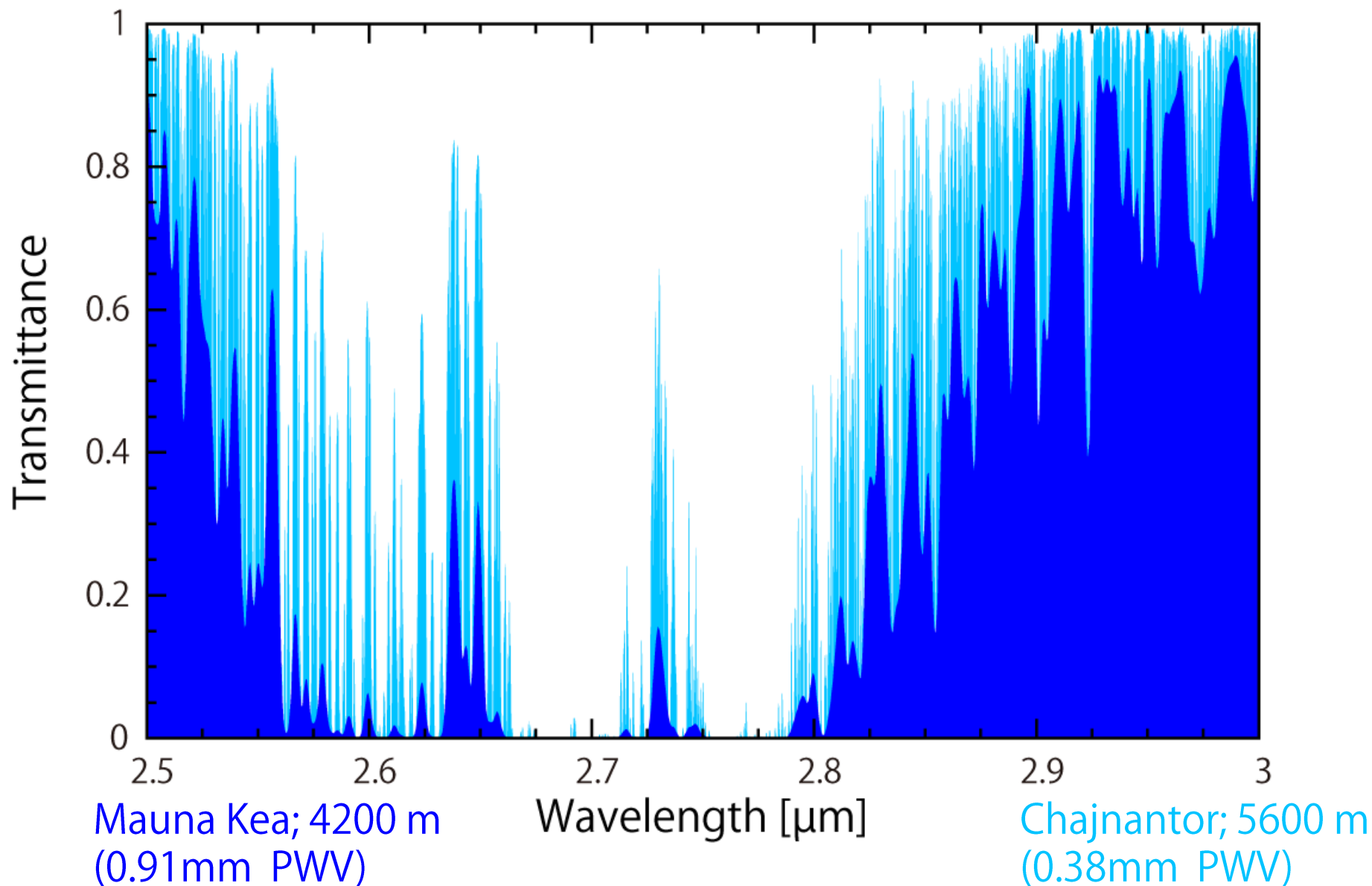
- 赤外線天文衛星「あかり」による近赤外線分光観測
(Usui et al. in prep)
 - 小惑星66天体のスペクトルを解析した。
 - C型小惑星のほとんどで、2.7--2.8 μm に含水鉱物の吸収を**明確に**検出した。一方、観測したすべてのS型小惑星は明確な吸収を持たず、また、いくつかのX型、D型はC型に類似した吸収フィーチャーを持つことがわかった。
 - これは、従来の可視光によるものだけでなく、近赤外線の波長帯を含めた新たなスペクトル分類の可能性を示唆するものである。
- 含水鉱物のスペクトルの特徴を統計的に議論するには、より多くのサンプルが必要
 - 成層圏もしくは宇宙からの観測：
 - ✓ SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy)
 - ✓ 気球望遠鏡、サブオービタル機
 - ✓ 宇宙望遠鏡：
 - JWST (James Webb Space Telescope) / NIRSpec : 1--5 μm (0.6--5 μm)
 - **地上観測による高精度の安定的な観測体制の確立へ向けて：**
 - ✓ TAO/MIMIZUKU

TAO/MIMIZUKU の利点

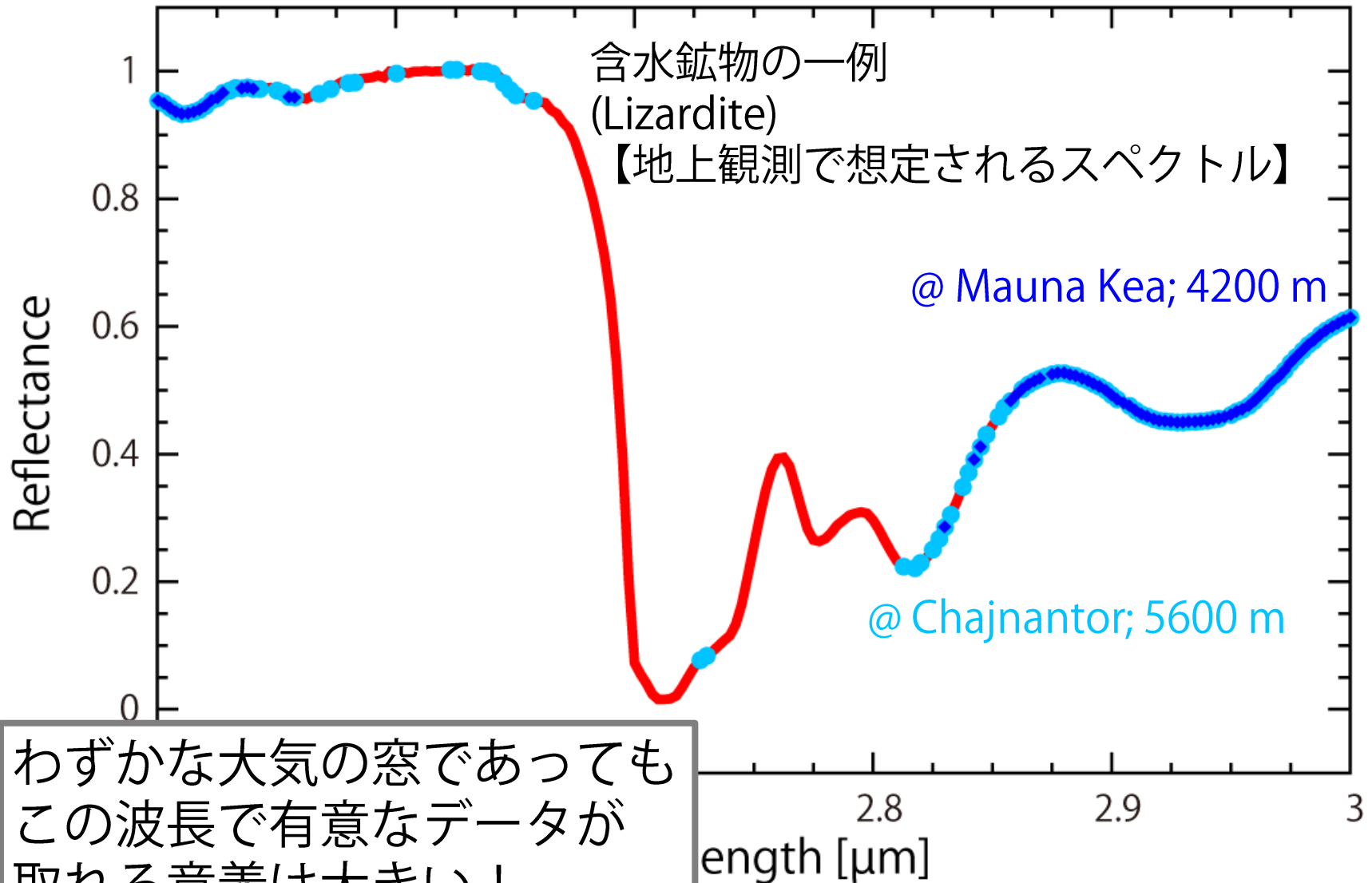
(小惑星分光観測の場合)

- TAOサイトの「地の利」を活かす
 - 標高5640 mの高地 + 砂漠気候により水蒸気量が低く、赤外線波長域における高い大気透過率を誇る
- 2--38 μm という広い波長範囲をカバーできる
 - 特に2--3 μm のデータが取得できる点が大いに有効
- 2視野同時観測で時間変動天体の高精度な観測が可能
 - 標準星との同時観測を行うことで、大気吸収補正の精度が向上する
 - 非恒星追尾での運用が実現可能か？
(天体の移動速度は、ほとんどが 5 arcsec/sec 以下 ← 地球近傍小惑星の場合)

地上観測における近赤外分光



地上観測における近赤外分光



わずかな大気の窓であっても
この波長で有意なデータが
取れる意義は大きい！

TAO/MIMIZUKU への 2--4 μm 分光モードの実装

- 仕様
 - 2.7 μm 帯分光： 2.4 -- 2.95 μm @ R=620
 - KL帯分光： 2.1 -- 4.0 μm @ R=210
- MIMIZUKU 近赤外線チャンネルにグリズム・スリットを挿入することで実現する
 - 科研費 基盤C「近赤外分光観測による小惑星の水・含水鉱物の探査」
2015年度から開発を開始
 - ✓ グリズム： Siプリズムを切削して製作 (製作中)
 - ✓ スリット： 2.7 arcsec幅 (seeing size \times 3) 反射スリットを専用開発 (完成)
 - ✓ フィルタ： 既製品を用いる (入手済み、透過率測定済み)
- 予想感度
 - 2.7 μm 帯の窓において、400 sec 積分で 1 mJy (20σ) レベルが達成される
→ メインベルトで50 kmサイズの小惑星まで観測可能
 - 50夜で300天体の分光サーベイが実現可能
→ IRTF/SpeX による分光サーベイ (Takir+2012、Rivkin+2015、etc) の
10倍の規模のデータベースを提供する

TAO/MIMIZUKUによる 小惑星の近赤外線分光サーベイ計画

- 近赤外線分光観測によって、可視光ではわからなかった小惑星の多様性が見えてきている。
 - C型小惑星における3 μm 帯の含水鉱物・氷の吸収の有無
→小惑星表層の鉱物種の特定につながる
 - 小惑星の新たなスペクトル分類の可能性を示唆
- より多くのサンプルを揃えることが今後の展開に本質
→ TAO/MIMIZUKU への2--4 μm 分光モードの実装
 - 2つのモード (2.7 μm 帯分光、KL帯分光)
 - 50夜で300天体の分光サーベイ (メインベルトで50 kmサイズの小惑星まで) を計画
- これによって、太陽系の進化、特に温度環境の変遷を
解き明かす大きな手掛かりが得られる。