

近赤外線分光観測による 小惑星の含水鉱物探査



臼井 文彦

神戸大学大学院 理学研究科
惑星科学研究センター

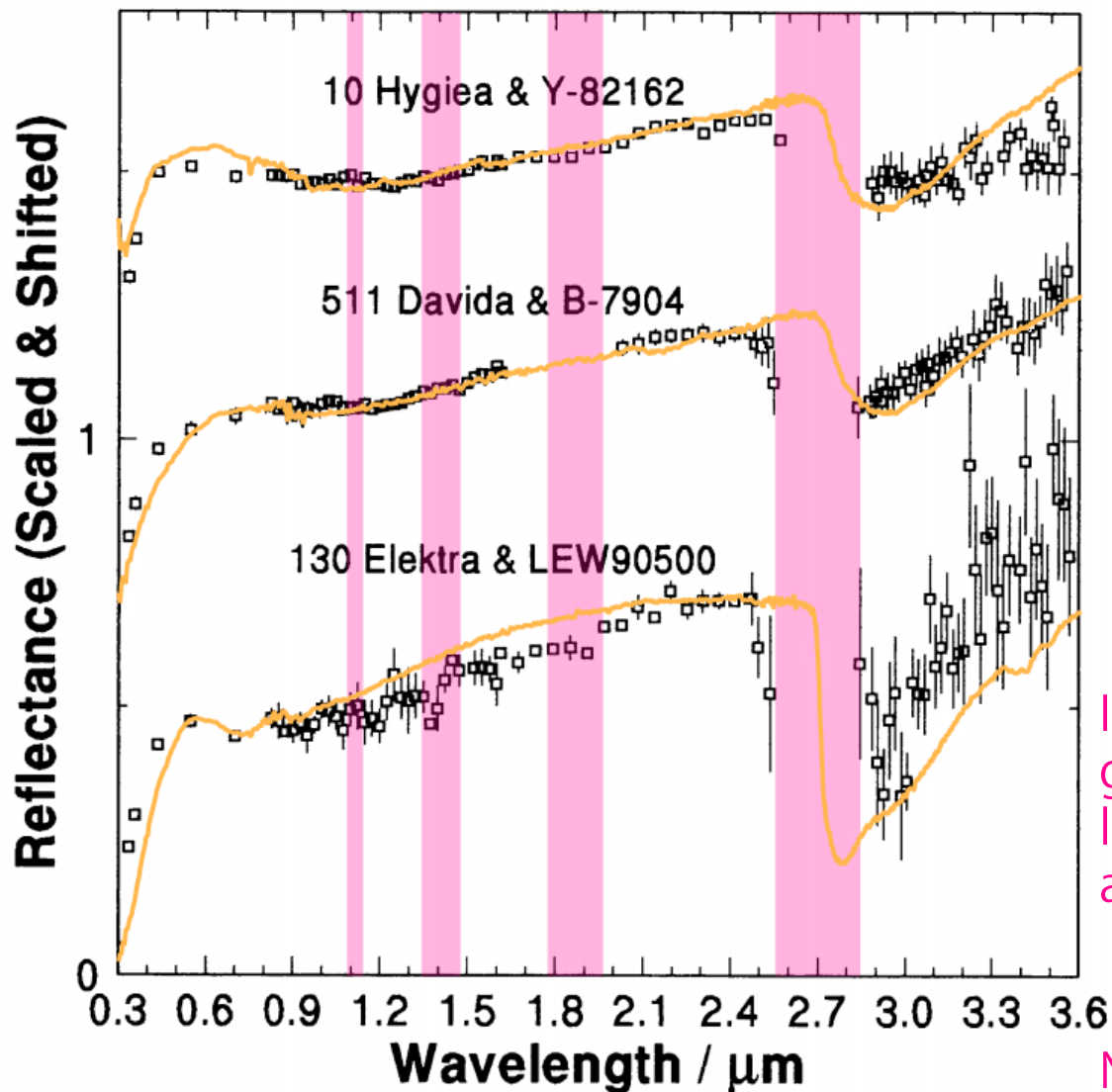
Existence of “water” in the solar system

- Existence of plenty of liquid water (as oceans)
 - Earth !
- Small deposits of water ice in craters
 - Mercury, Moon, etc
- Liquid water once covered large areas of surface
 - Venus, Mars
- Water droplets may form in certain gas layers
 - Jupiter, Uranus, Neptune
- Surface partially composed of ice (and liquid water may exist beneath surface)
 - Jovian satellites (Europa • Ganymede • Callisto) ,
Saturnian satellites (Titan • Enceladus) ,
Neptunian Satellite (Titania) , Uranian Satellite (Triton) , etc
 - Pluto (?)

Existence of “water” in the solar system

- Existence of “water” on asteroids
 - (1) Ceres : hydrated minerals (Rivkin+ 2002)、 water vapor (Küppers+2014)、 etc
 - (4) Vesta : hydrated minerals (Hasegawa+2003, Rivkin+2006, Russel+2015)
 - (24) Themis, (65) Cybele : water ice (Campins+ 2010; Rivkin+ 2010; Licandro+ 2011)
 - etc
- Hydrated minerals :
 - Any minerals containing OH or H₂O, which are formed in environments where **anhydrous rock** and **liquid water** are together (aqueous alteration).
 - They are found within chondrite matrix of meteorites.
 - Hydrated minerals are stable above the sublimation temperature of water ice.
 - Knowledge of the hydrated mineral is important for deducing the origin of Earth's water, and unraveling the processes in the earliest times of the solar system.
 - Diagnostic absorption features in 3 μm band :
 - ✓ Hydroxyl associated with hydrated mineral (2.7--2.8 μm)
 - ✓ H₂O ice (3.07 μm), etc
 - ✓ Other species (CO, CH₄, NH₃) are not stable on surfaces of asteroids.

Reflectance spectra of asteroids and meteorite (Hiroi+1996)



Observations (dots):

- Zellner+1985
(1.54m Catalina, 2.29m Steward)
- Bell+1988
(NASA/IRTF)
- Jones+1990
(NASA/IRTF)

Meteorite measurements (lines):

- Carbonaceous chondrites
(RELAB, Brown University)

Infrared observations with ground-based telescopes are limited by atmospheric absorption and thermal emission.

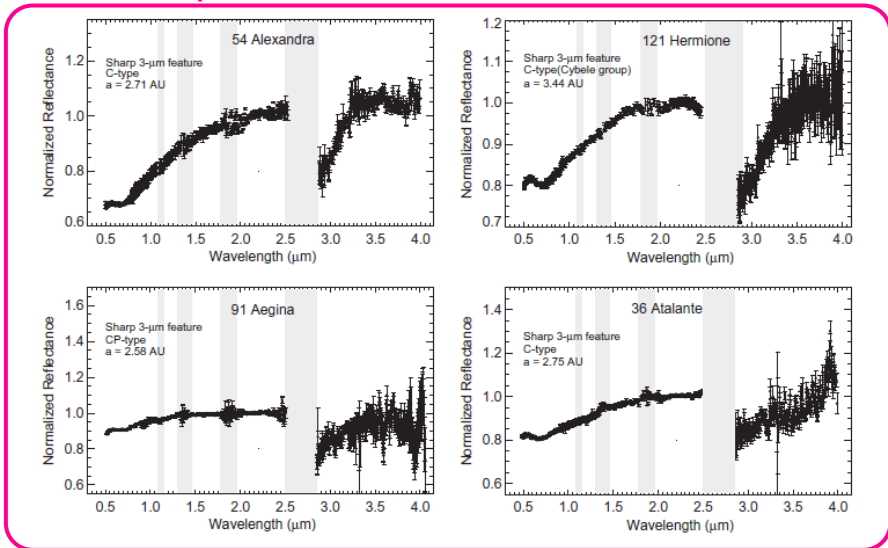


Need to send telescopes into space!

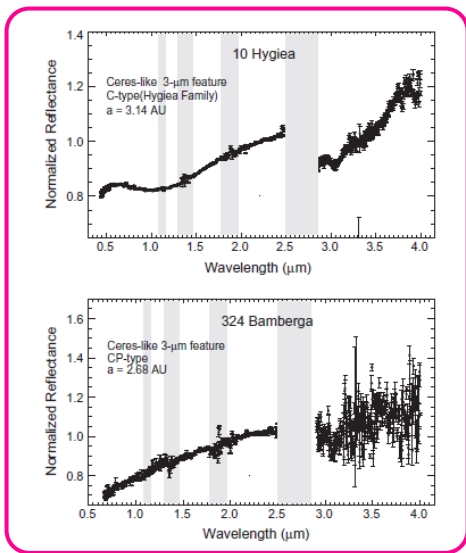
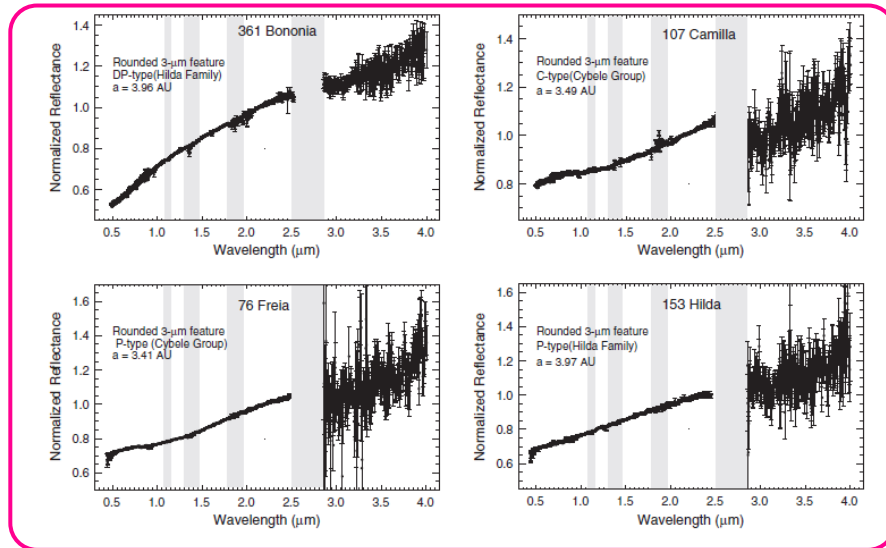
FIG. 3. Three sets of asteroid-meteorite counterparts that have similar overall reflectance spectra. All spectra are scaled to 1.0 at 2.37 μm and offset for clarity.

Vis to near-infrared spectra of C-type asteroids (Takir+2012, 2013)

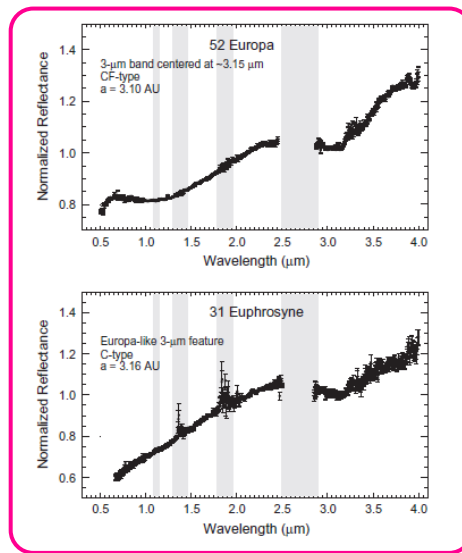
sharp (15)



rounded (8)



Ceres-like
(2)

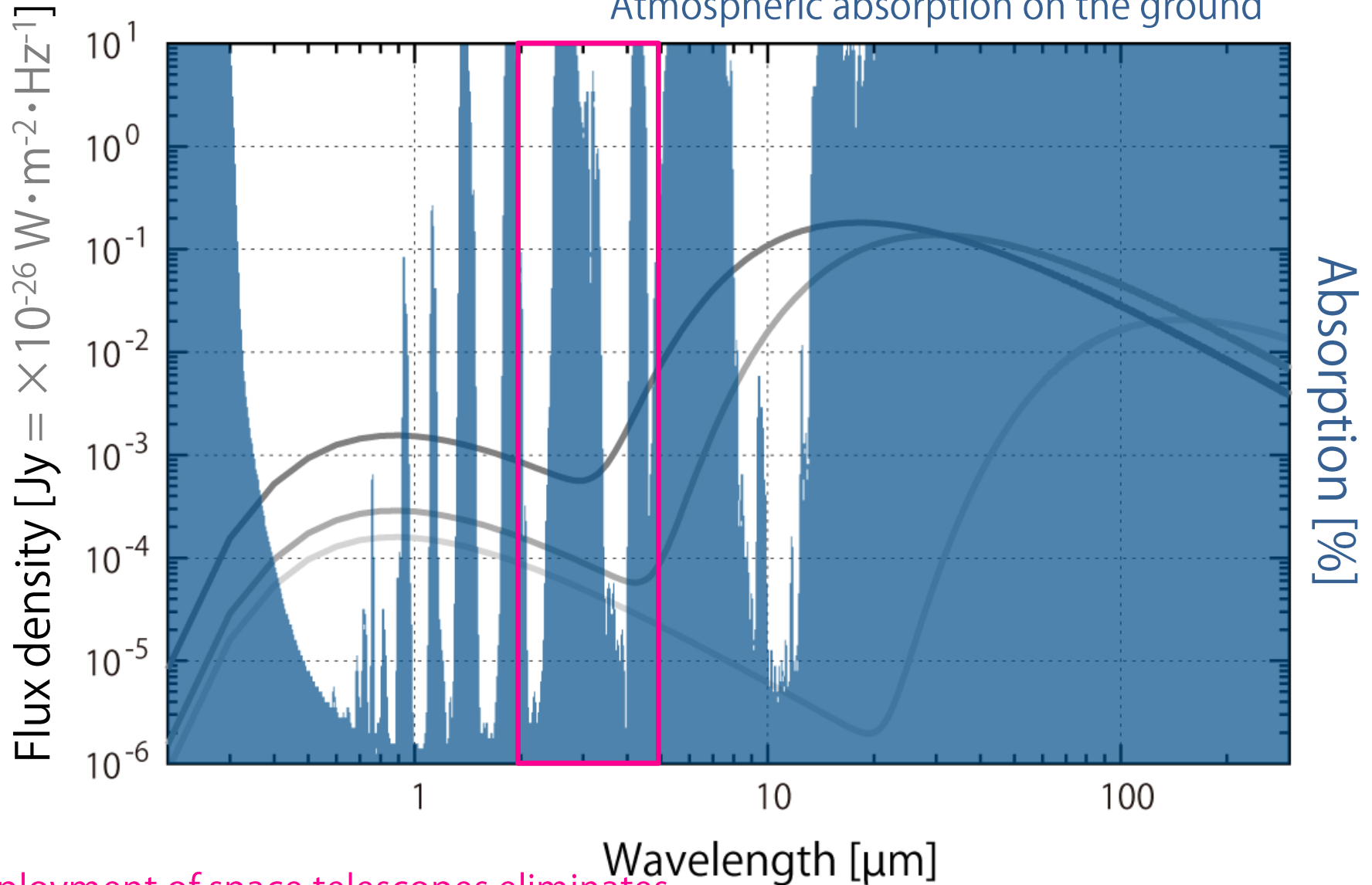


Europa-like
(3)

Classifying 3μm-band feature based on observations of 28 asteroids (IRTF/SpeX)

Model spectra of asteroids

Atmospheric absorption on the ground



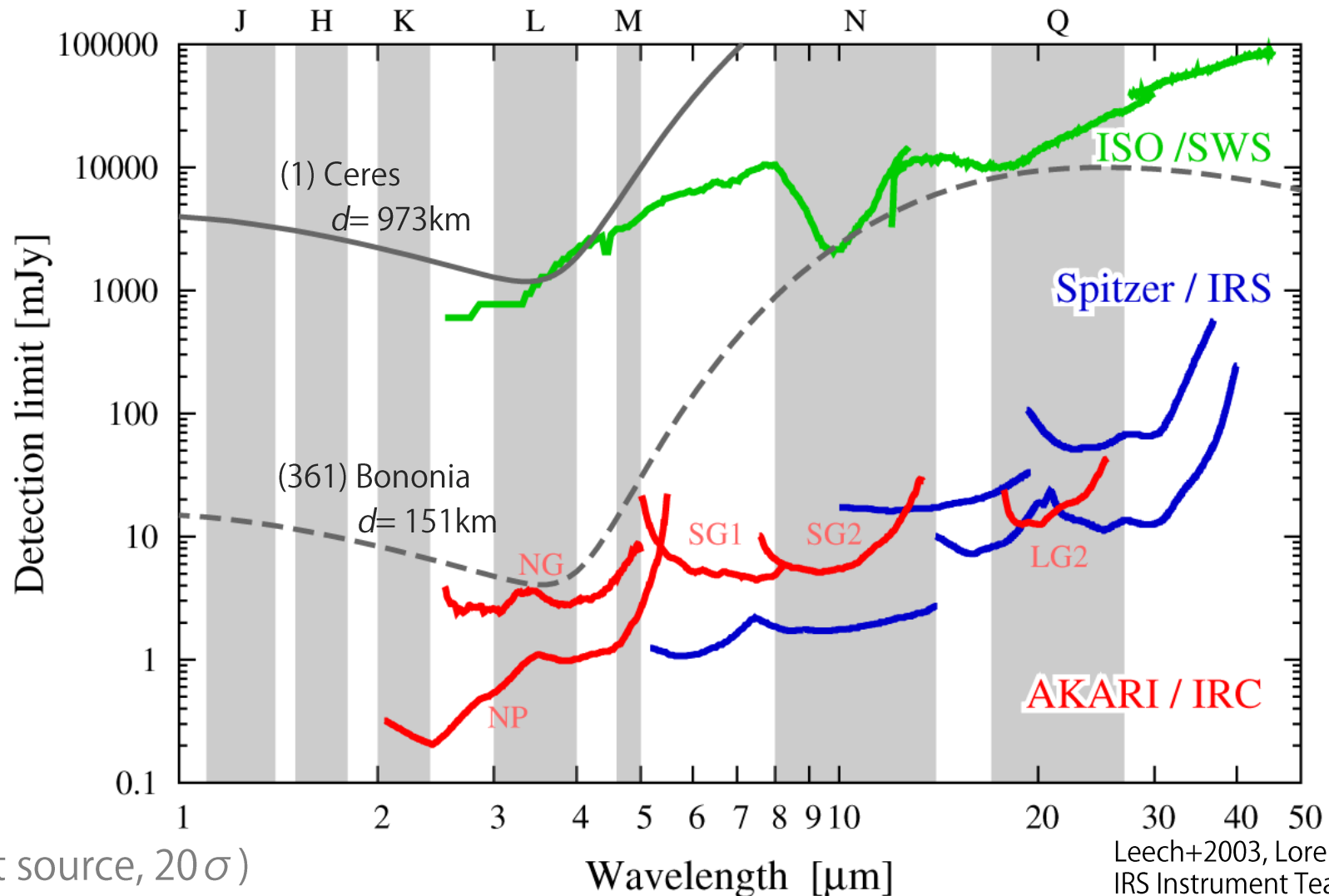
Deployment of space telescopes eliminates the problem of atmospheric absorption !

Infrared astronomical satellite AKARI



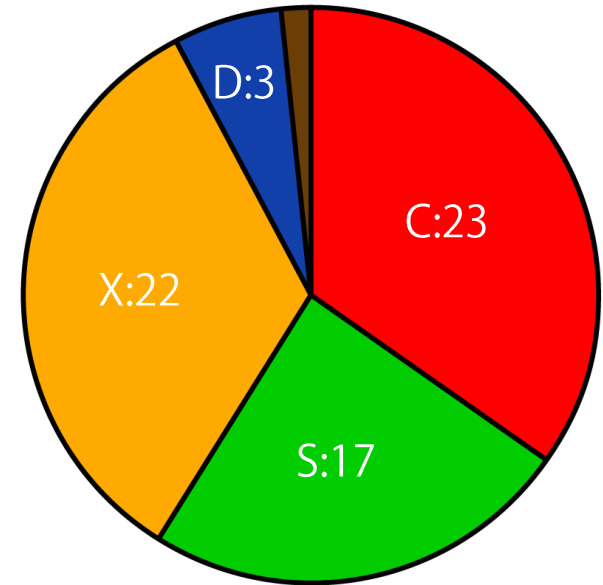
AKARI/IRC spectroscopic observations

- AKARI provides valuable spectroscopic data because of its high sensitivity and unique wavelength coverage (in 2.5--5 μm).



Near-infrared spectroscopy for asteroids with AKARI

- Observations for 66 asteroids (total 147 times) with IRC/NIR
 - Warm mission phase data (2008/05 -- 2010/02)
 - Wavelength coverage : 2.5--5 μm
Spectral resolution : $R=120@3.6\mu\text{m}$
 - Targets: main-belt to Hildas ($d > 40 \text{ km}$)
 - Determination of taxonomy :
 - ✓ ECAS (Tholen 1984; Tholen 1989; Tholen+Barucci 1989)
 - ✓ SMASSII (Bus 1999; Bus+Binzel 2002)
 - ✓ S^3OS^2 (Lazzaro+2004)
 - ✓ SDSS-MOC (Carvano+2010)



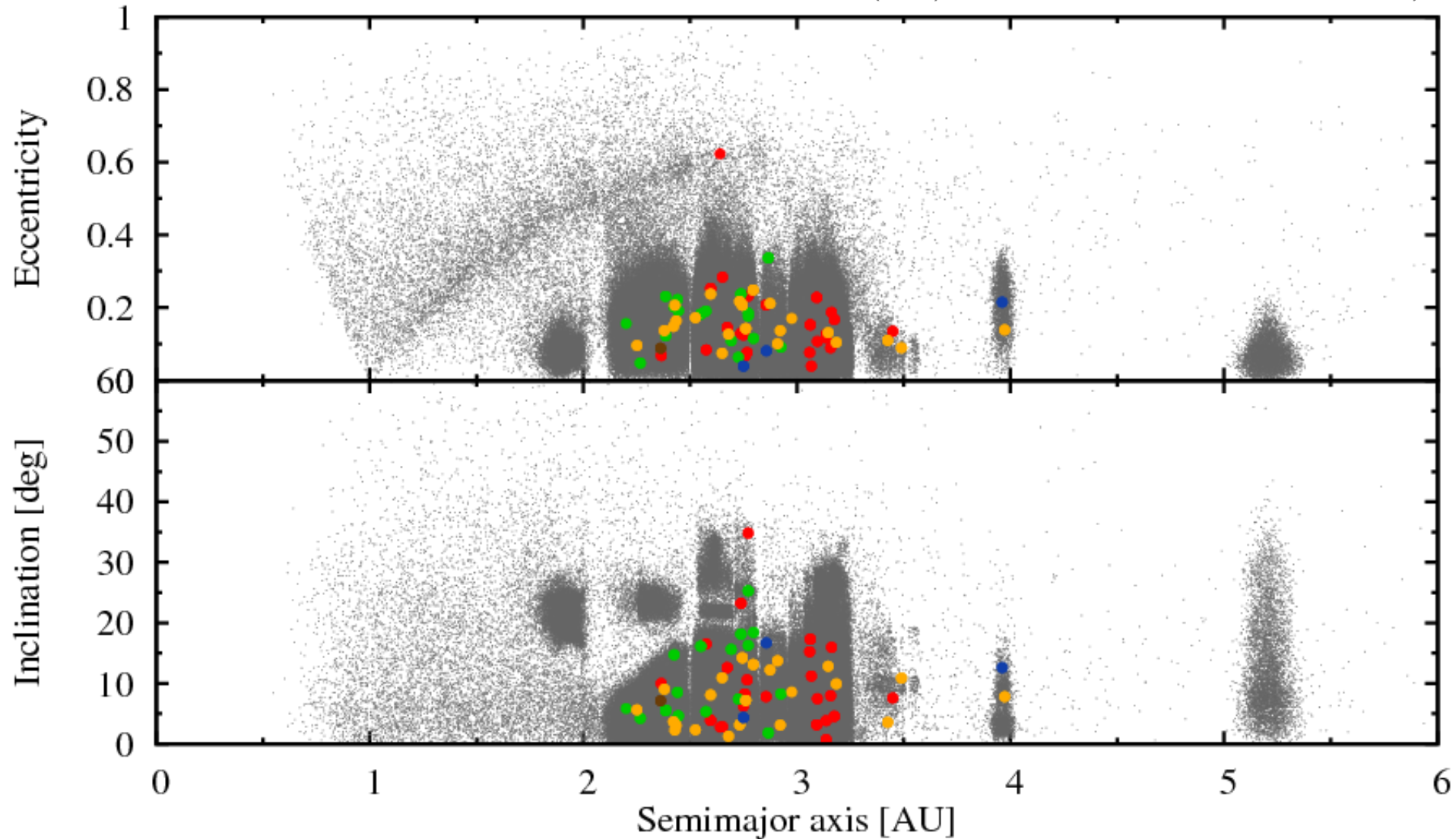
Taxonomy of asteroids for AKARI observations

- Data reduction
 - IRC Spectroscopy Toolkit for Phase 3 Version 20160331RC
 - Frame shift-and-add for moving objects (Ootsubo+2012)
 - Object positions : obtained from JPL/Horizons
 - Computed solar spectrum : corrected Kurucz model (Berk+1999)

Distribution of orbital elements of asteroids

C: 23, S: 17, X: 22, D: 3, V: 1 (total: 66 objects)

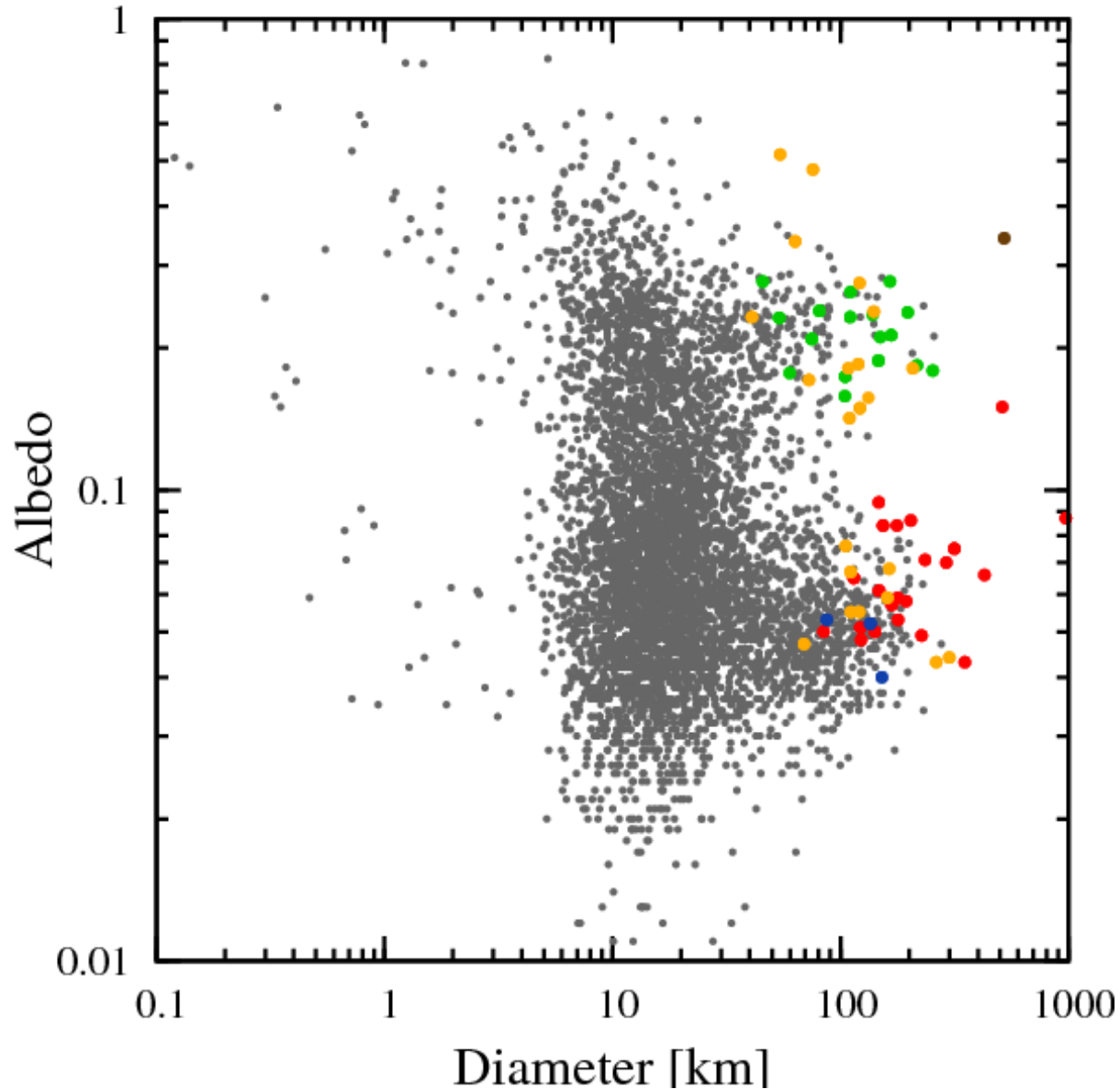
(645,292 asteroids with known orbits)



Distribution of size and albedo of asteroids

C: 23, S: 17, X: 22, D: 3, V: 1 (total: 66 objects)

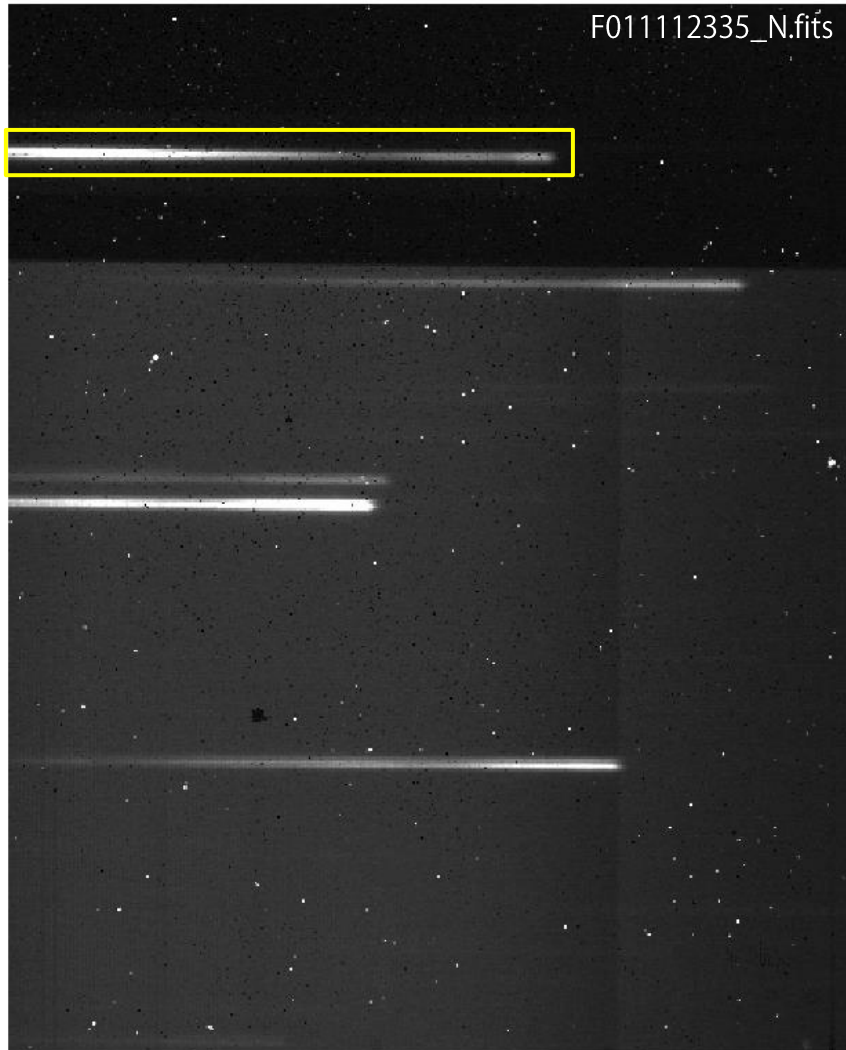
(5,199 asteroids identified with AKARI)



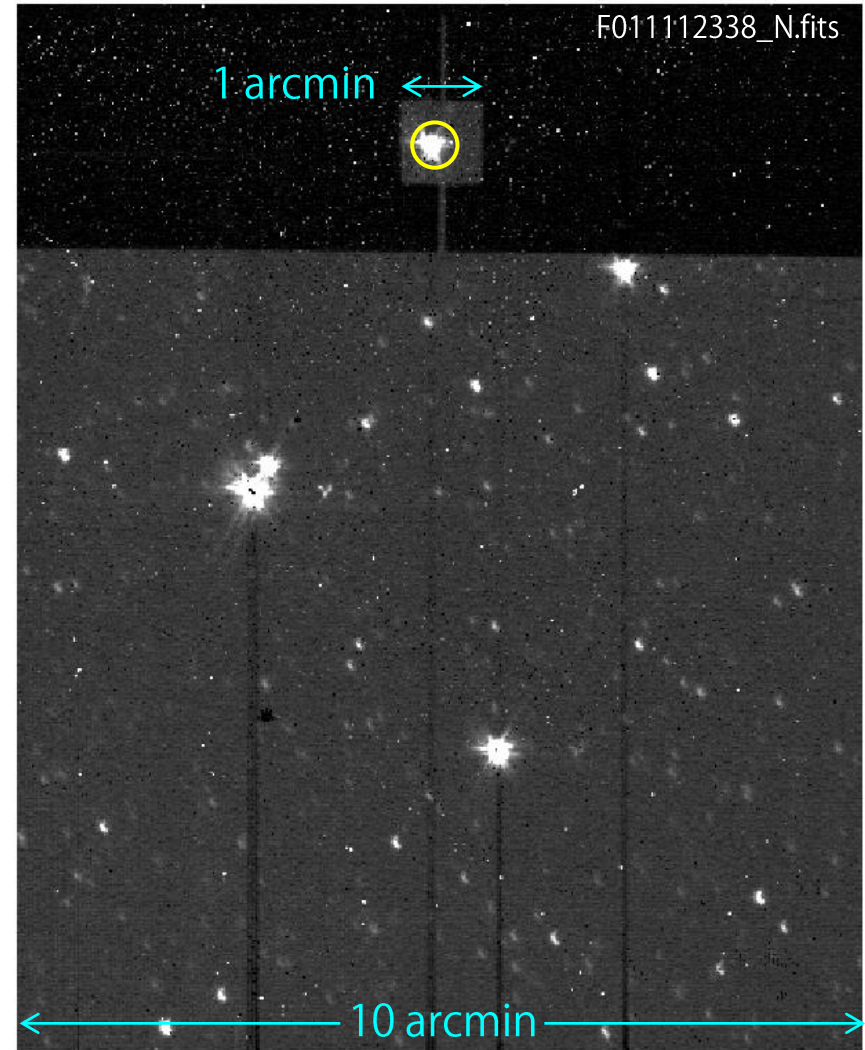
Example of data reduction : (511) Davida

ID=1520065-001, IRCZ4, b;Np, 2008/11/16_11:26:34

spec data (NG; 1/9)

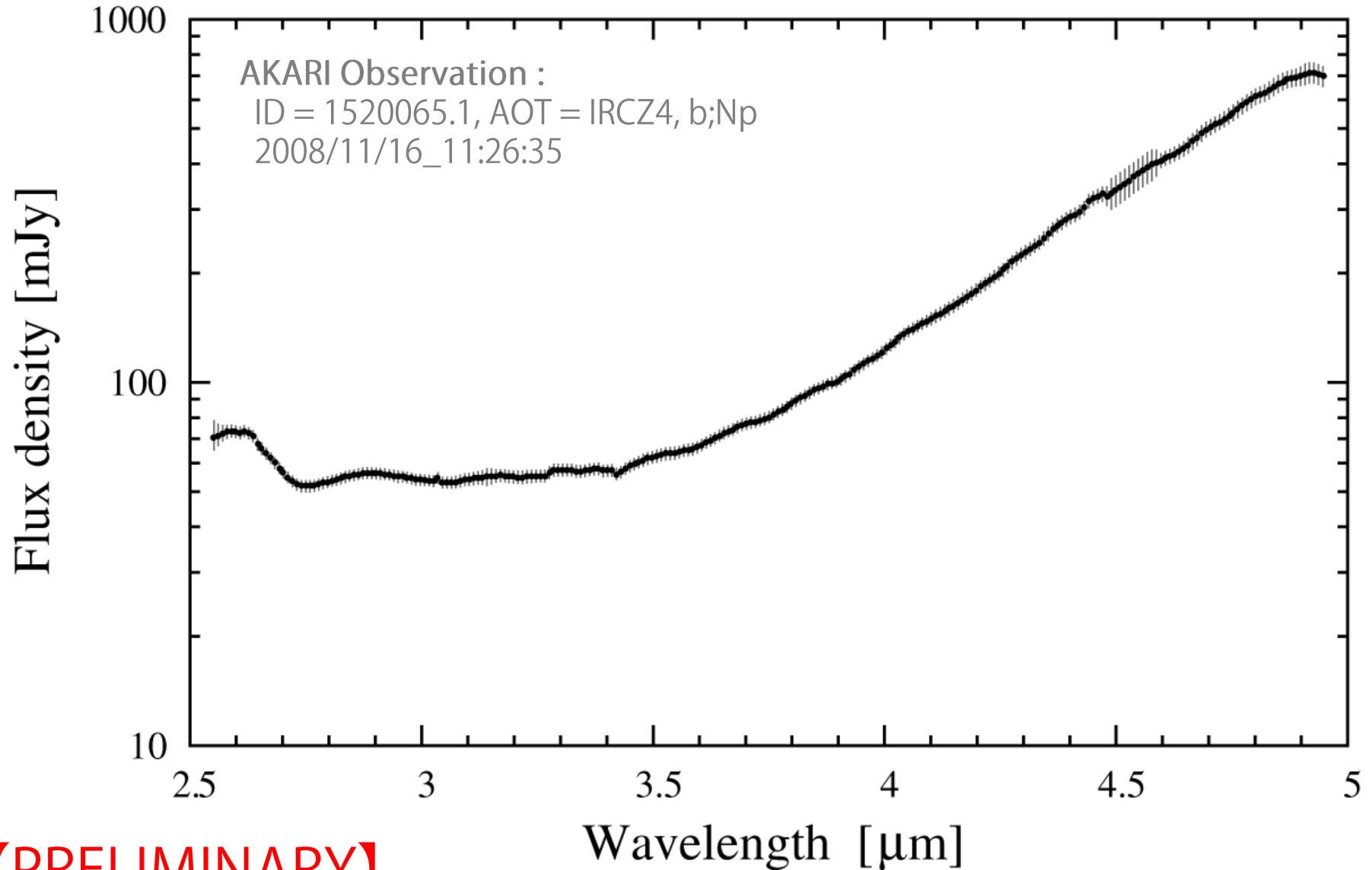


reference image (N3; 1/1)



Example of data reduction : (511) Davida

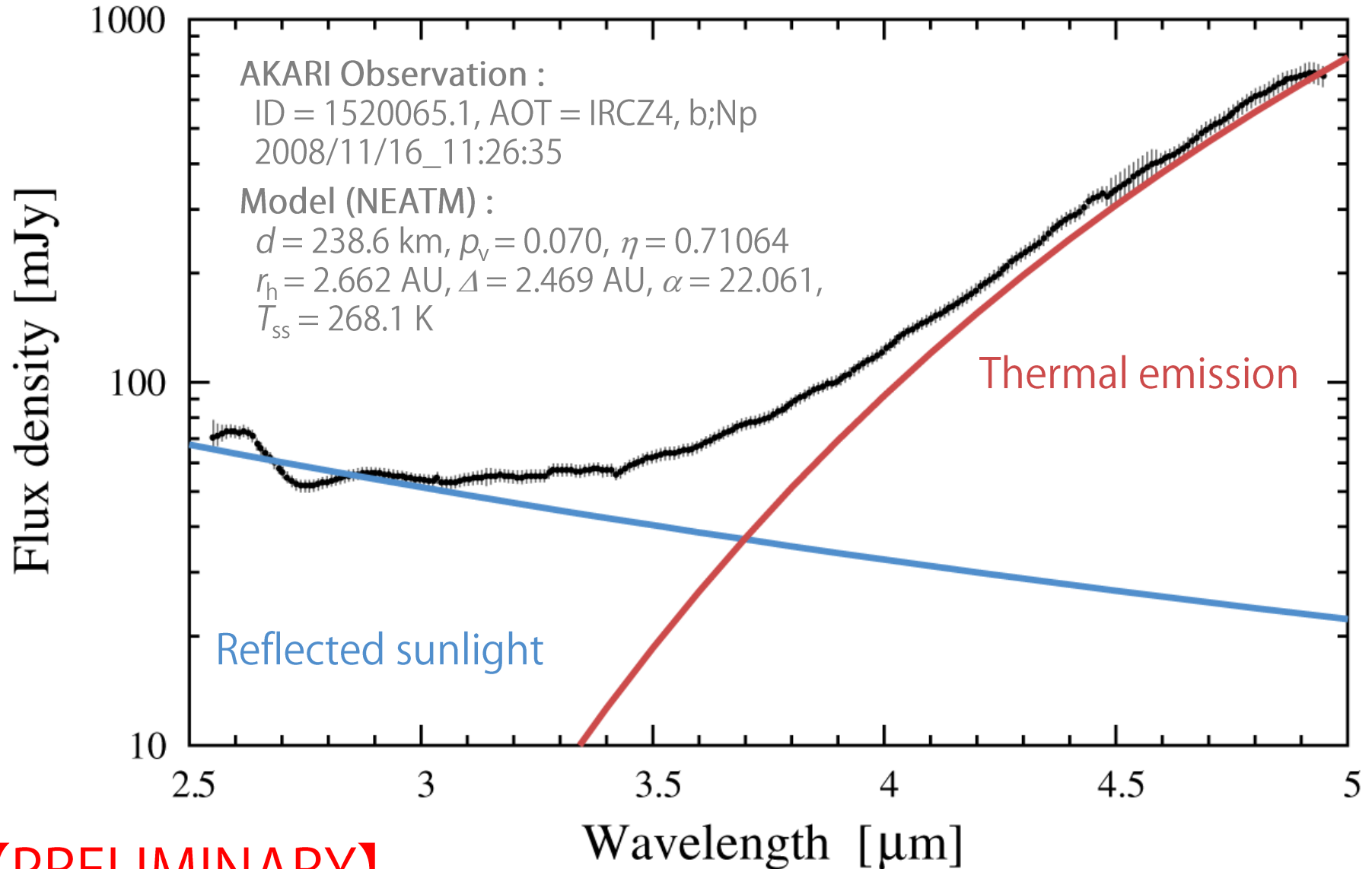
Near-infrared spectrum



【PRELIMINARY】

Example of data reduction : (511) Davida

Near-infrared spectrum

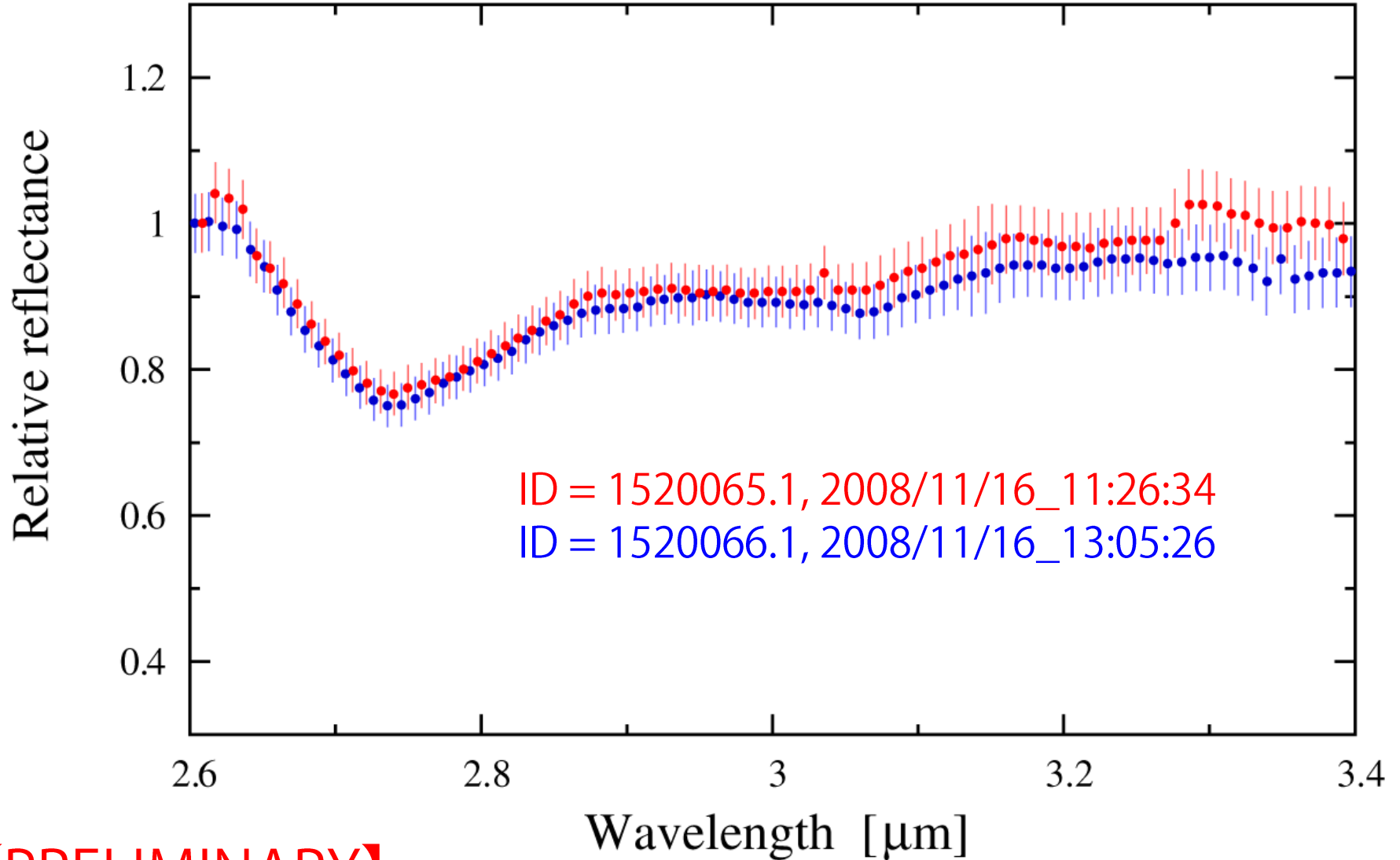


【PRELIMINARY】

Example of data reduction : (511) Davida

Reflectance spectrum

($P = 5.131$ hr)



[PRELIMINARY]

Near-infrared spectra of C-type asteroids

【PRELIMINARY】

Example of data reduction : (1) Ceres

Reflectance spectrum

($P = 9.07417$ hr)

【PRELIMINARY】

Near-infrared spectra of S-type asteroids

【PRELIMINARY】

Near-infrared spectra of X-type asteroids

【PRELIMINARY】

Albedo v.s. absorption strength in 2.7 μm band

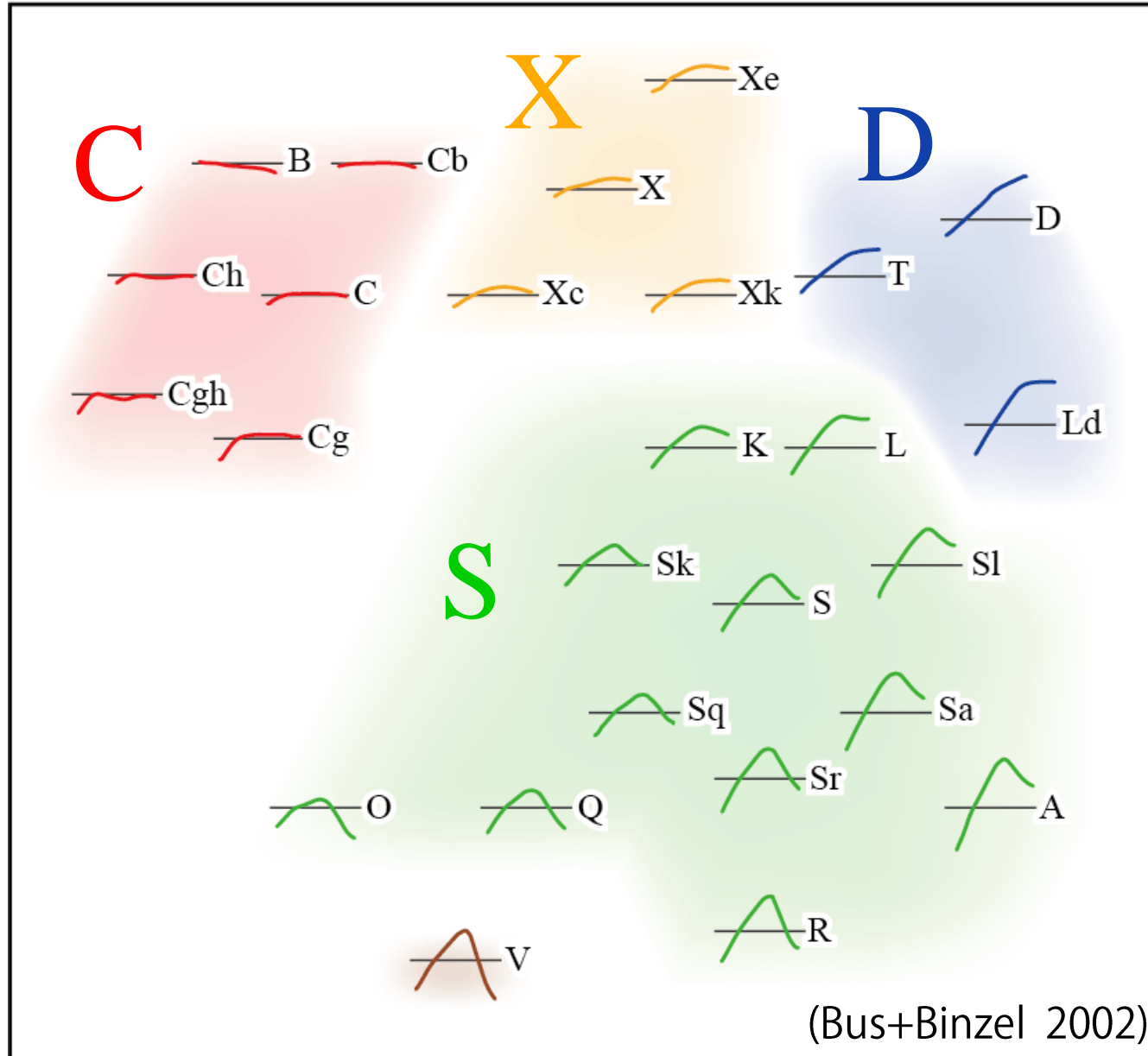
C: 23, S: 17, X: 22, D: 3, V: 1 (total: 66 objects)

【PRELIMINARY】

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

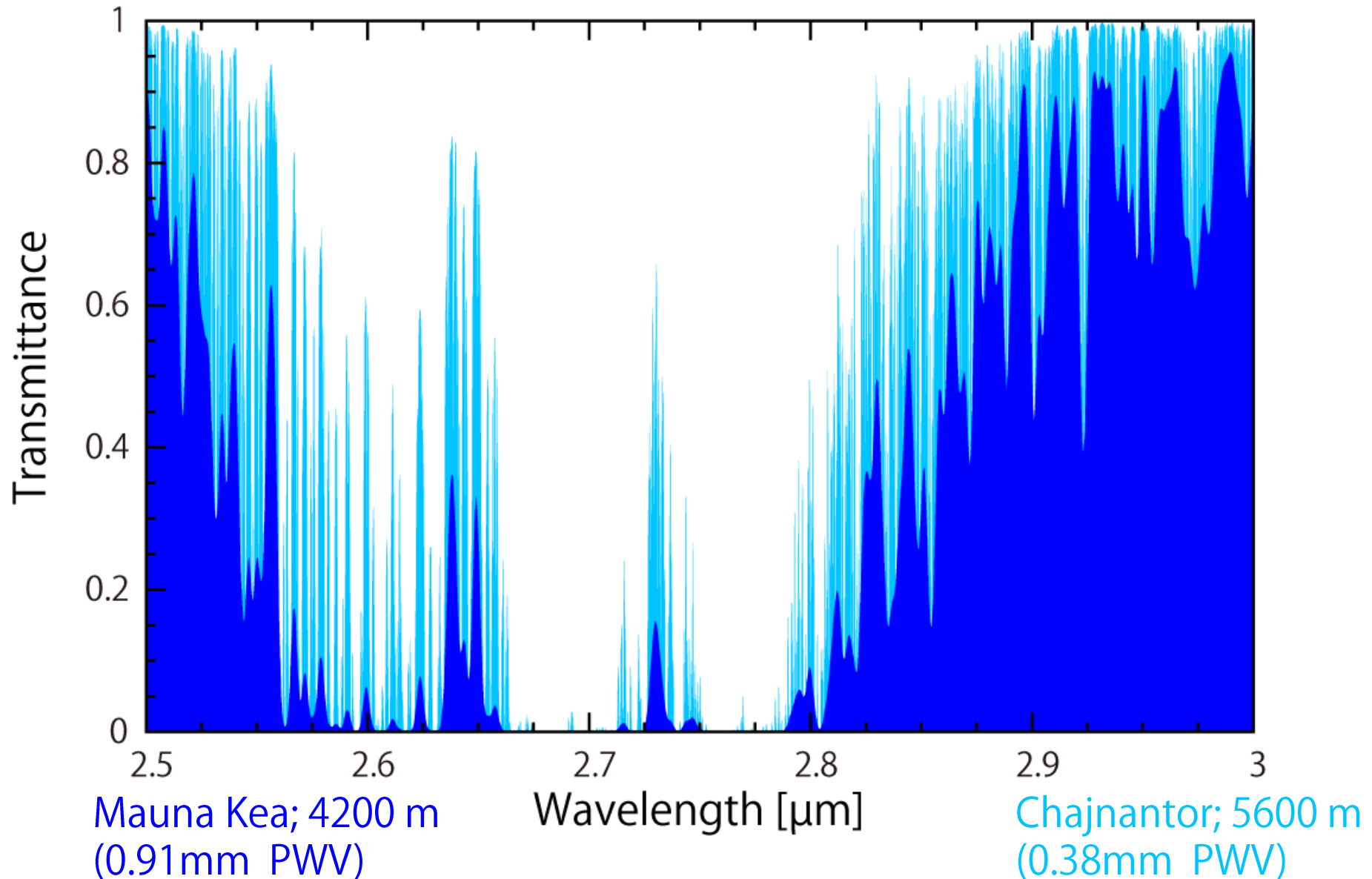
- 赤外線天文衛星「あかり」による近赤外線分光観測
(Usui et al. in prep)
 - 小惑星66天体のスペクトルを解析した。
 - C型小惑星のほとんどで、2.7--2.8 μm に含水鉱物の吸収を明確に検出した。一方、観測したすべてのS型小惑星は明確な吸収を持たず、また、いくつかのX型、D型はC型に類似した吸収フィーチャーを持つことがわかった。
 - これは、従来の可視光によるものだけでなく、近赤外線の波長帯を含めた新たなスペクトル分類の可能性を示唆するものである。
- 含水鉱物のスペクトルの特徴を統計的に議論するには、より多くのサンプルが必要
 - 成層圏もしくは宇宙からの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

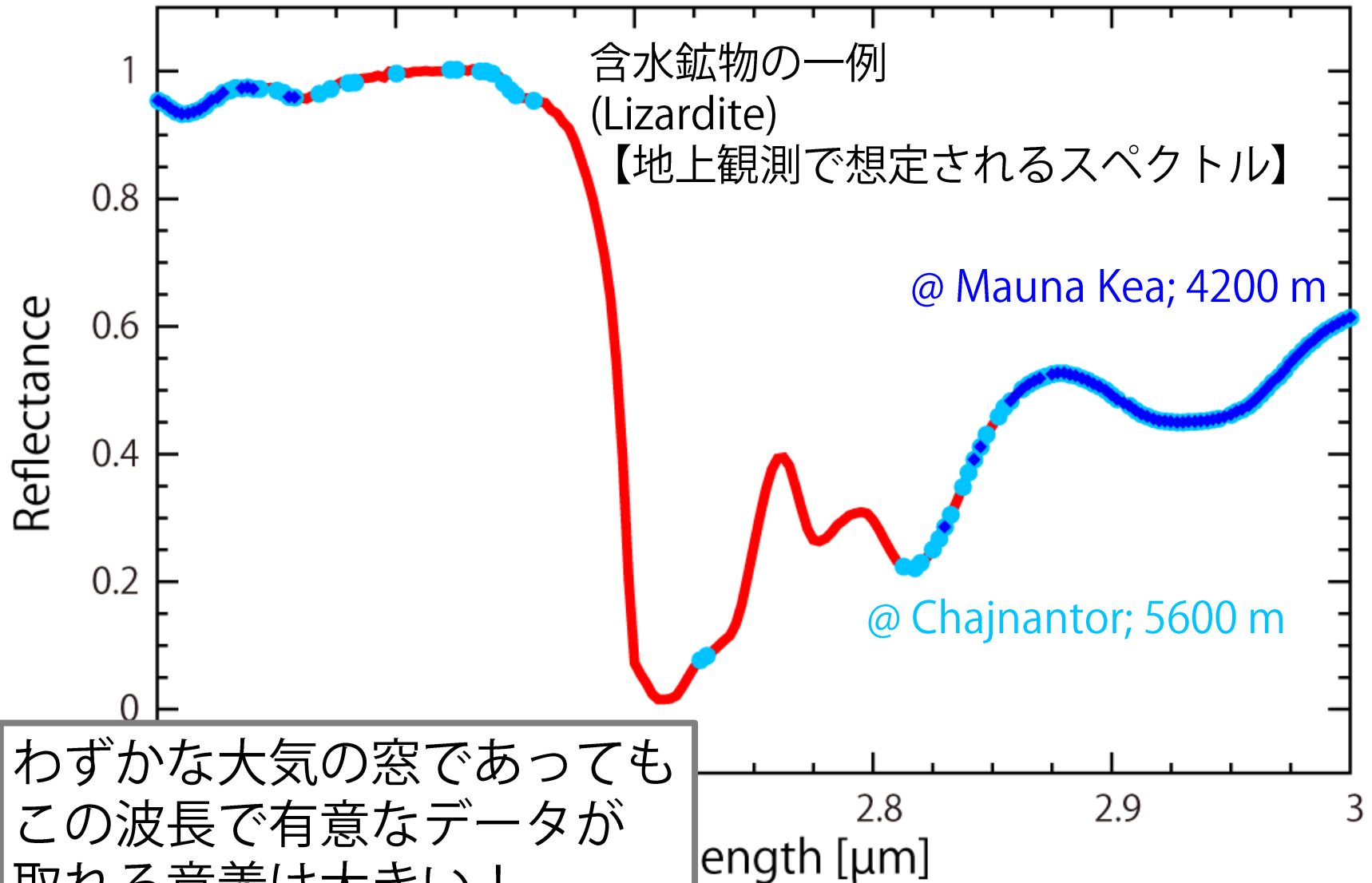
(小惑星分光観測の場合)

- 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必要
(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



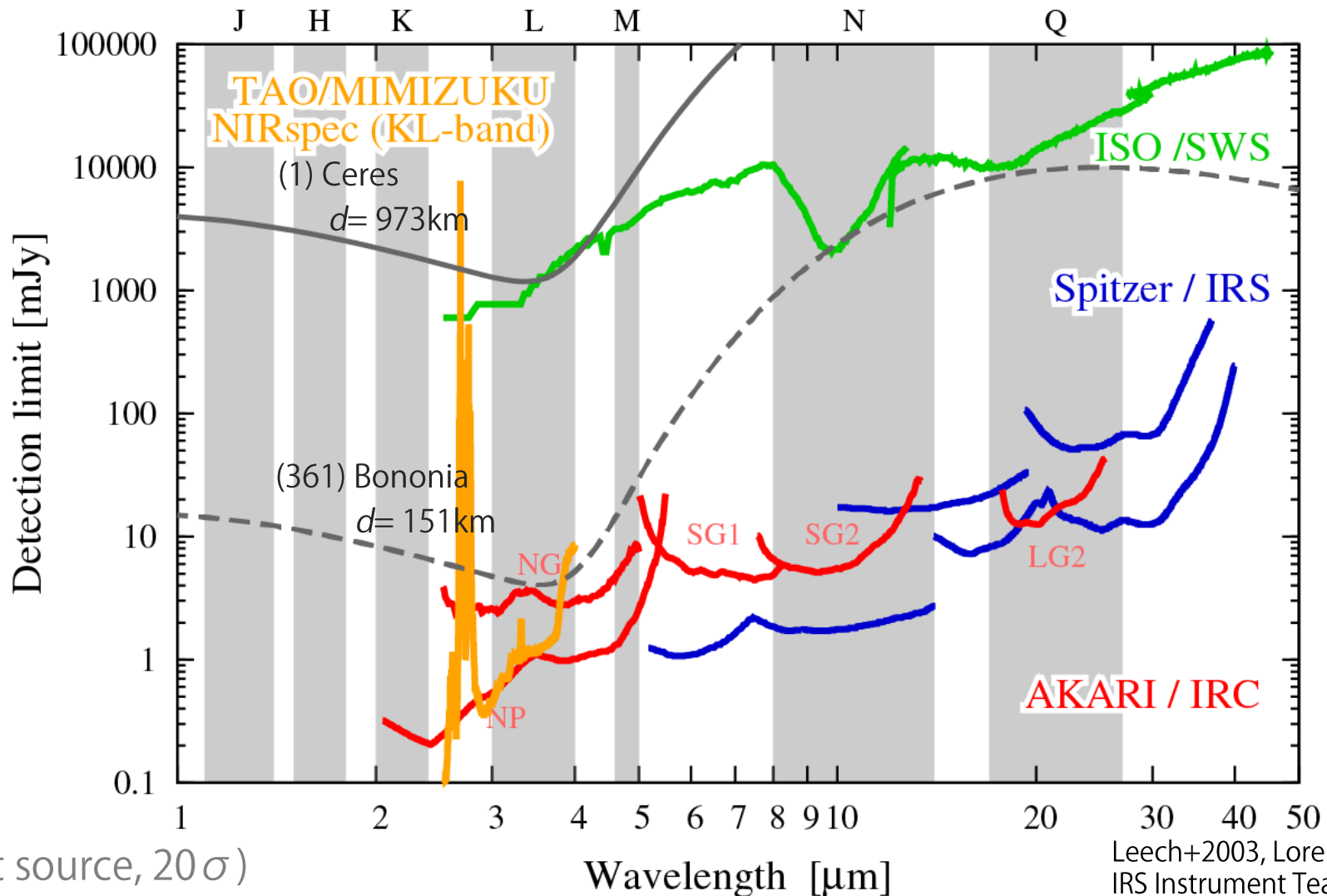
わずかな大気の窓であっても
この波長で有意なデータが
取れる意義は大きい！

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」
(長谷川直, 臼井文彦, 宮田隆志, 上塚貴史, 高遠徳尚)
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に開発 (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

AKARI/IRC spectroscopic observations

- AKARI provides valuable spectroscopic data because of its high sensitivity and unique wavelength coverage (in 2.5--5 μm).



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。