

# (3200) Phaethonの可視スペクトルと その自転位相への依存性

Full rotationally phase-resolved visible reflectance spectroscopy of  
3200 Phaethon

○大塚勝仁<sup>1</sup>, 伊藤孝士<sup>2</sup>, 木下大輔<sup>3</sup>, 阿部新助<sup>4</sup>, 澤井恭助<sup>4</sup>, 船橋和博<sup>4</sup>,  
加藤遼<sup>4</sup>, 宮坂正大<sup>5</sup>, 長谷川直<sup>6</sup>, 中村智樹<sup>7</sup>, 陳文屏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京流星観測網, <sup>2</sup>国立天文台天文シミュレーションプロジェクト, <sup>3</sup>台湾国立中央大学天文研究所,  
<sup>4</sup>日本大学理工学部航空宇宙工学科, <sup>5</sup>東京都庁, <sup>6</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>7</sup>東北大学  
大学院理学研究科地学専攻

こちらをご覧ください [\*Planetary and Space Science\*, \*\*191\*\*, 104940, 2020.](#)

# コアタイムでの議論 – zoomとSlack

以下の時間帯に著者の何名かがzoom会議内で対応いたします。

(1) 2020年11月12日(木) 18:00頃-JST

- ミーティングID: 820 6014 6504
- パスコード: [秋季講演会プログラムhtml形式をご覧ください\(P-D2-A39\)](#)

(2) 2020年11月13日(金) 18:00頃-JST

- ミーティングID: 856 2446 3595
- パスコード: [秋季講演会プログラムhtml形式をご覧ください\(P-D2-A39\)](#)

Slackのワークスペースも開設いたしました。

- [3200phaethon.slack.com](https://3200phaethon.slack.com)

# 摘要 / abstract

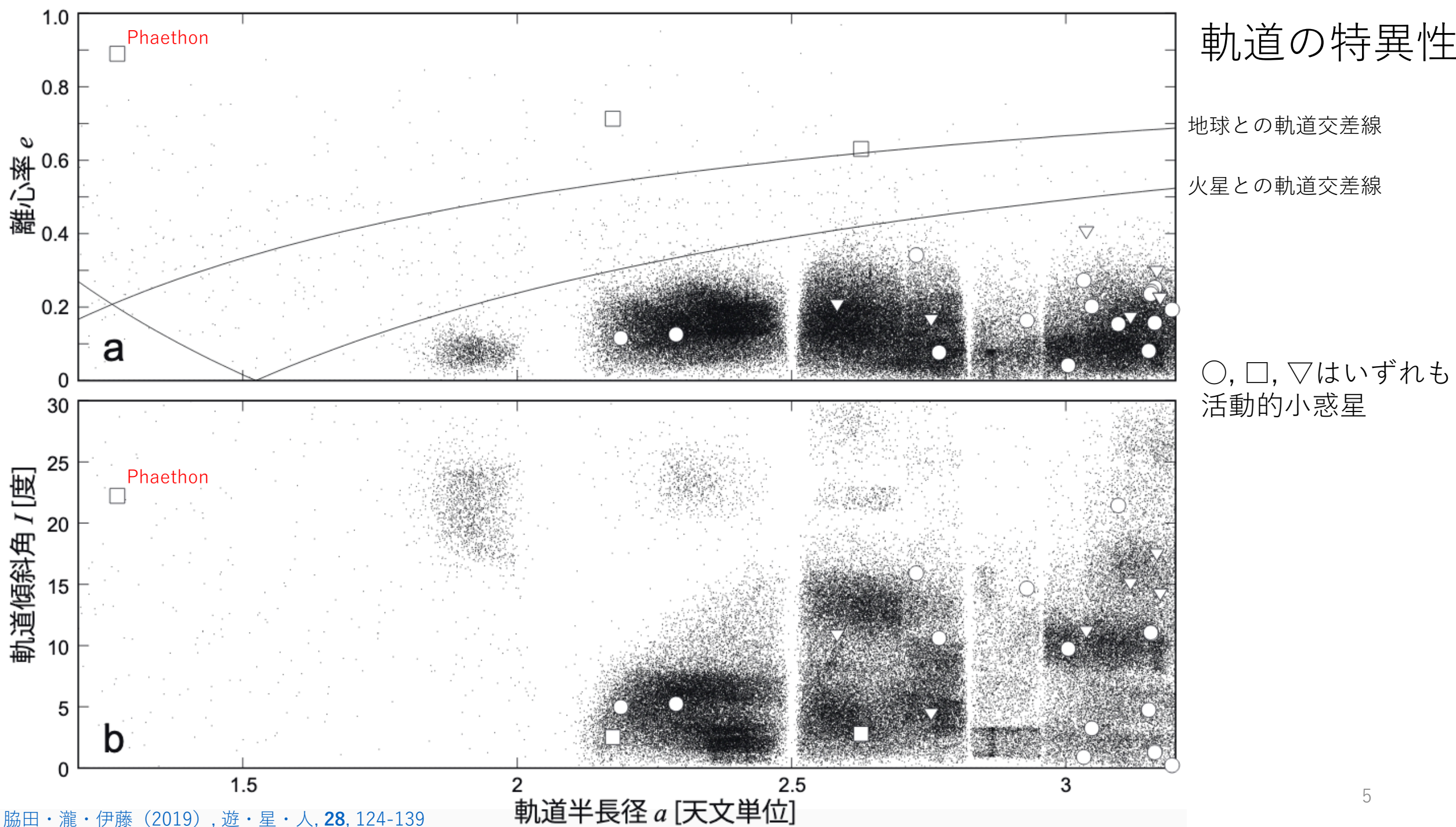
近地球小惑星(3200) Phaethonの表面状態の情報を得るべく実施した観測結果を報告する。2007年の冬にこの天体が地球に接近した際に私達は台湾国立中央大学(NCU)の鹿林天文台にある口径 1 m望遠鏡を用い、可視域での分光観測を二夜にわたり実施した。また同時期に、日本国内(宮坂観測所)に於いてRバンドでの測光観測をも実施した。その結果得られたスペクトルの勾配は波長  $0.55 \mu\text{m}$  の位置を中心として  $-5.0\% / 0.1 \mu\text{m}$  から  $0.6\% / 0.1 \mu\text{m}$  であり、B型からC型の表面色を示唆するものであった。また、スペクトル勾配はこの小惑星の自転と共に変化していた。これはこの天体の表面に組成の不均一性が存在することを示す。Phaethonは一般にはB型小惑星であると認識されているが、特定の経度領域ではC型的な表面を持つことが予期される。

# (3200) Phaethonの特異性と重要性

以下で引用する文献は  
代表的なもののみ

- 近太陽小惑星 (near-Sun asteroid) [Ohtsuka et al. \(2009\)](#)
- 活動的小惑星 (active asteroid) [脇田・瀧・伊藤 \(2019\)](#)
- ふたご座流星群の母天体とされる [Abe et al. \(2020\)](#)
- 大離心率 ( $e > 0.9$ ), 高軌道傾斜角 ( $I > 20$ 度) [von Zeipel-Lidov-Kozai\(古在\)周回状態 Ito & Ohtsuka \(2019\)](#)
- (2) Pallasを起源とする説あり [de León et al. \(2010\)](#)
- 衝突破片があるとされる (2005 UD) [Ohtsuka et al. \(2006\)](#)
- 青いスペクトル (B/F型) ← 今回の着目点 [Licandro et al. \(2007\)](#)
- 強い直線偏光度 ( $P_r > 50\%$ ) [Ito et al. \(2018\)](#)
- 潜在的な衝突危険性 (potentially hazardous object) [Yoshikawa & Nakamura \(1994\)](#)
- フライバイ探査のターゲット ([DESTINY+](#)) [Arai et al. \(2018\)](#)

# 軌道の特異性



この研究では – 可視波長帯で

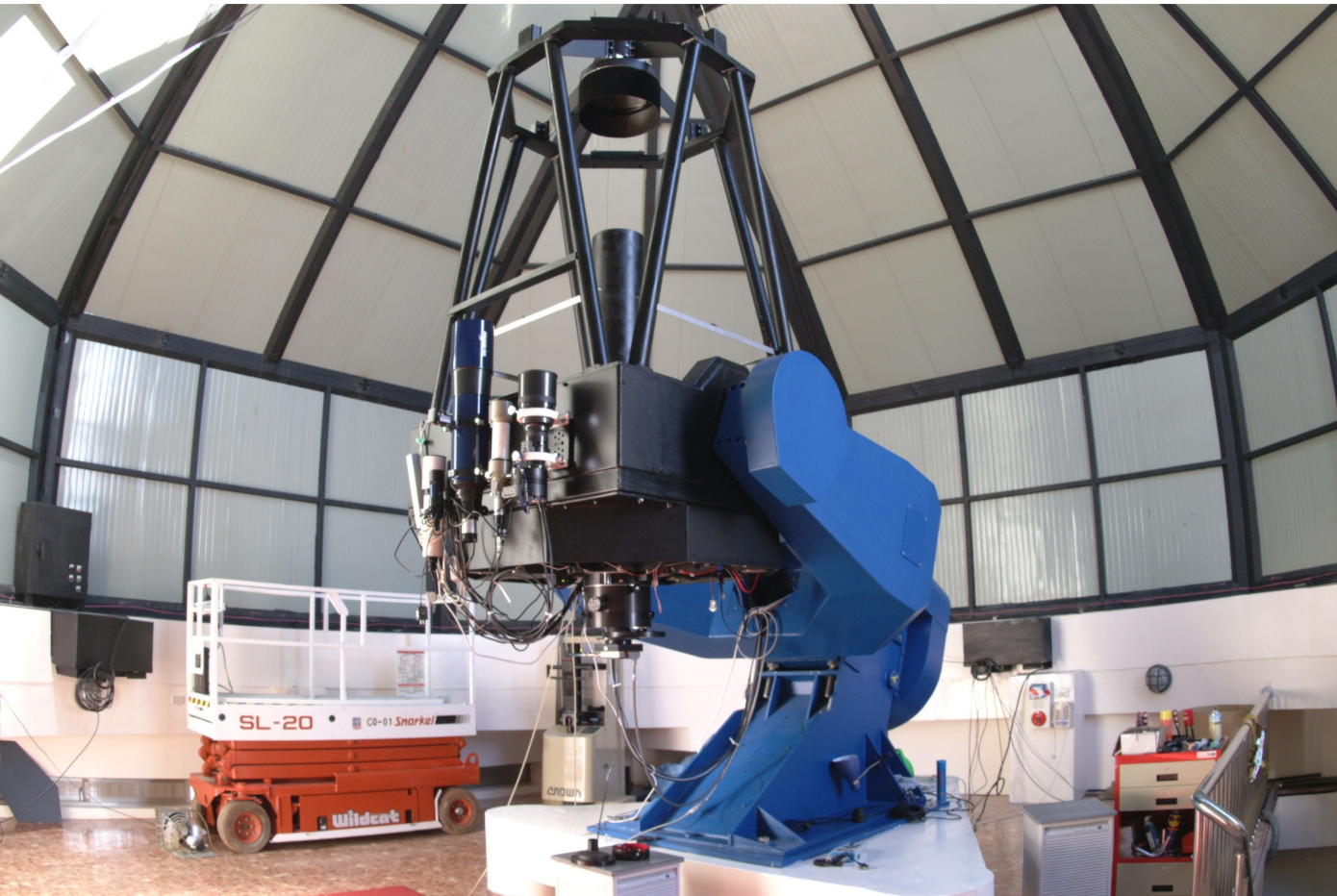
- Phaethonの分光観測を行った
  - 1自転周期を覆う高い時間分解能の測定
- Phaethonの光度曲線を取得した
  - 自転周期の精密な確定（追試）
- 結果 - Phaethonのスペクトルは時間変化する
  - 天体表面の不均質性を示す
  - この天体の成因と進化を反映するはず



# 分光觀測 – 台灣NCU鹿林天文台 1m望遠鏡

2007年11月30日-12月1日

<http://www.lulin.ncu.edu.tw/>



[https://www.youtube.com/watch?v=Cx4\\_AY5v\\_uM](https://www.youtube.com/watch?v=Cx4_AY5v_uM)





# 分光器 “Hiyoyu”

- 台湾原住民族のひとつ、[鄒族](#)の言語で「虹」を意味する

## 機材の詳細

**Table 1**

Specification of the spectrograph, Hiyoyu.

collimating lens	focal length = 240 mm
camera lens	focal length = 200 mm
dispersion element	reflective grating 300 gr mm <sup>-1</sup> (or 1200 gr mm <sup>-1</sup> )
slit size	390" × 1.5" (projected on the sky)
detector	1k-CCD Apogee AP-8 (Kodak KAF-1001E)
resolving power $R(\lambda / \Delta\lambda)$	~ 330 at $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$
spectral range	0.38–0.76 $\mu\text{m}$ (or 0.50–0.90 $\mu\text{m}$ )
wavelength calibration lamp	Fe-Ne-Ar hollow cathode lamp
slit viewer	SBIG ST-8 (for target acquisition and auto-guiding)

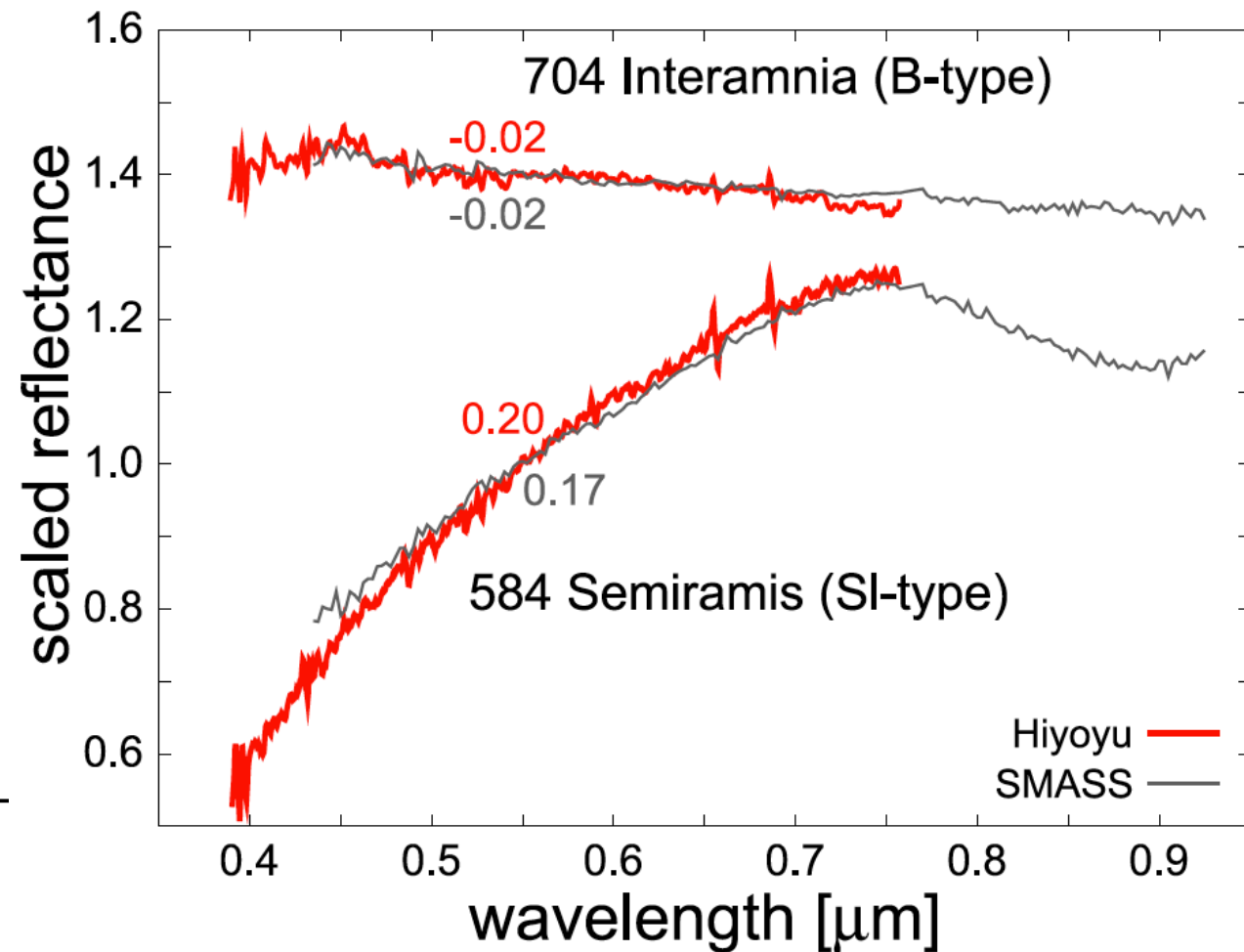


Fig. 1. 分光器Hiyoyuの性能を実証するの試験的な分光観測の結果。メインベルト小惑星 (548) Semiramis, (704) Interamnia の可視スペクトルを示し、300秒積分のフレームを4枚ずつ重ねた。SMASS IIの結果 ([Bus & Binzel 2002](#); 灰色)と良い一致を示す。詳しくは[こちら](#)の論文の図1を参照のこと。。



# スペクトルの airmass 依存性

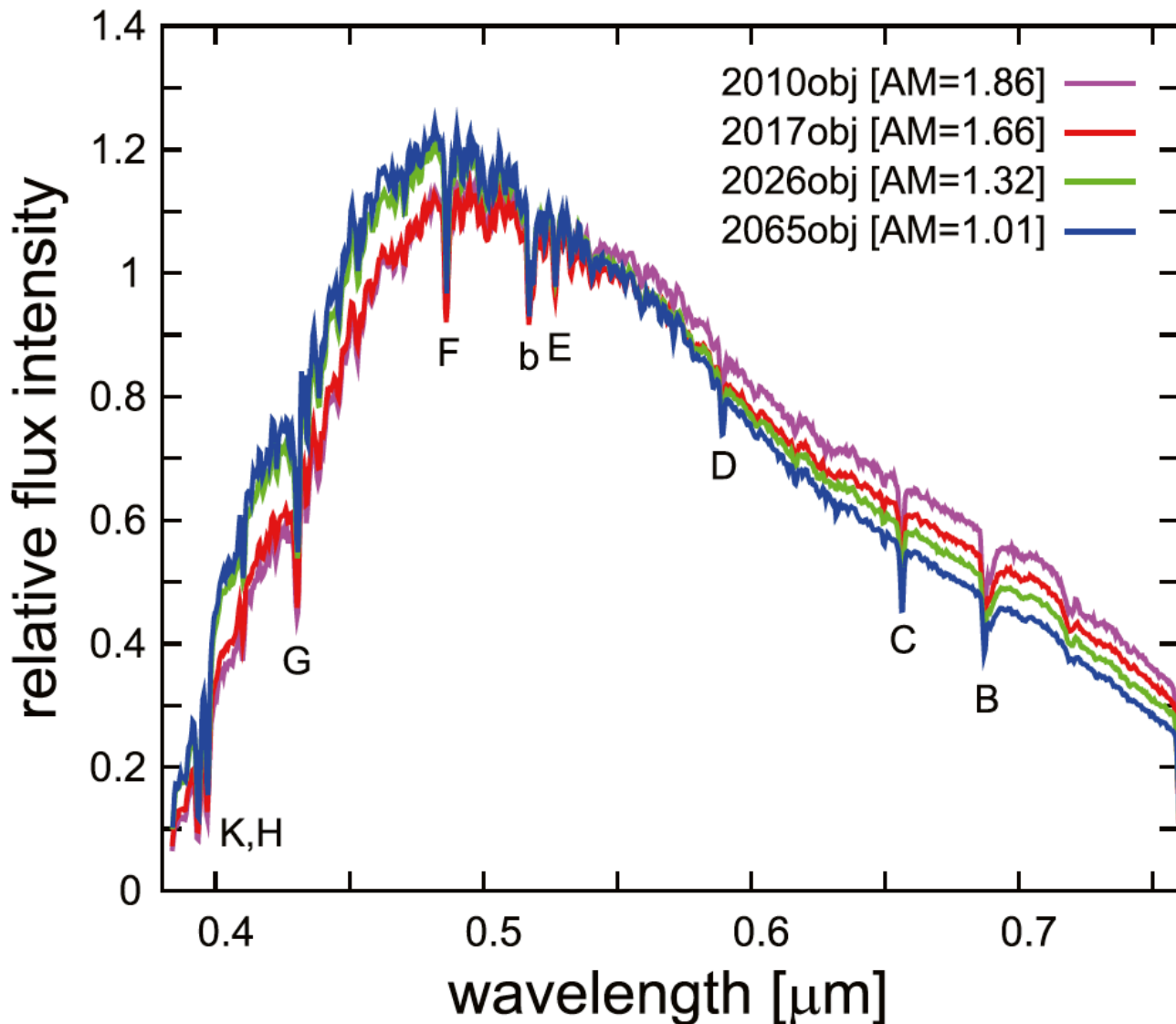


Fig. 2. 太陽類似星 (G2V) HD 30455 のスペクトルの airmass (AM) 依存性。2007年12月1日の測定値で、波長  $0.55 \mu\text{m}$  で規格化されている。詳しくは [こちらの論文の図2](#) を参照のこと。

# 時間変化するスペクトル

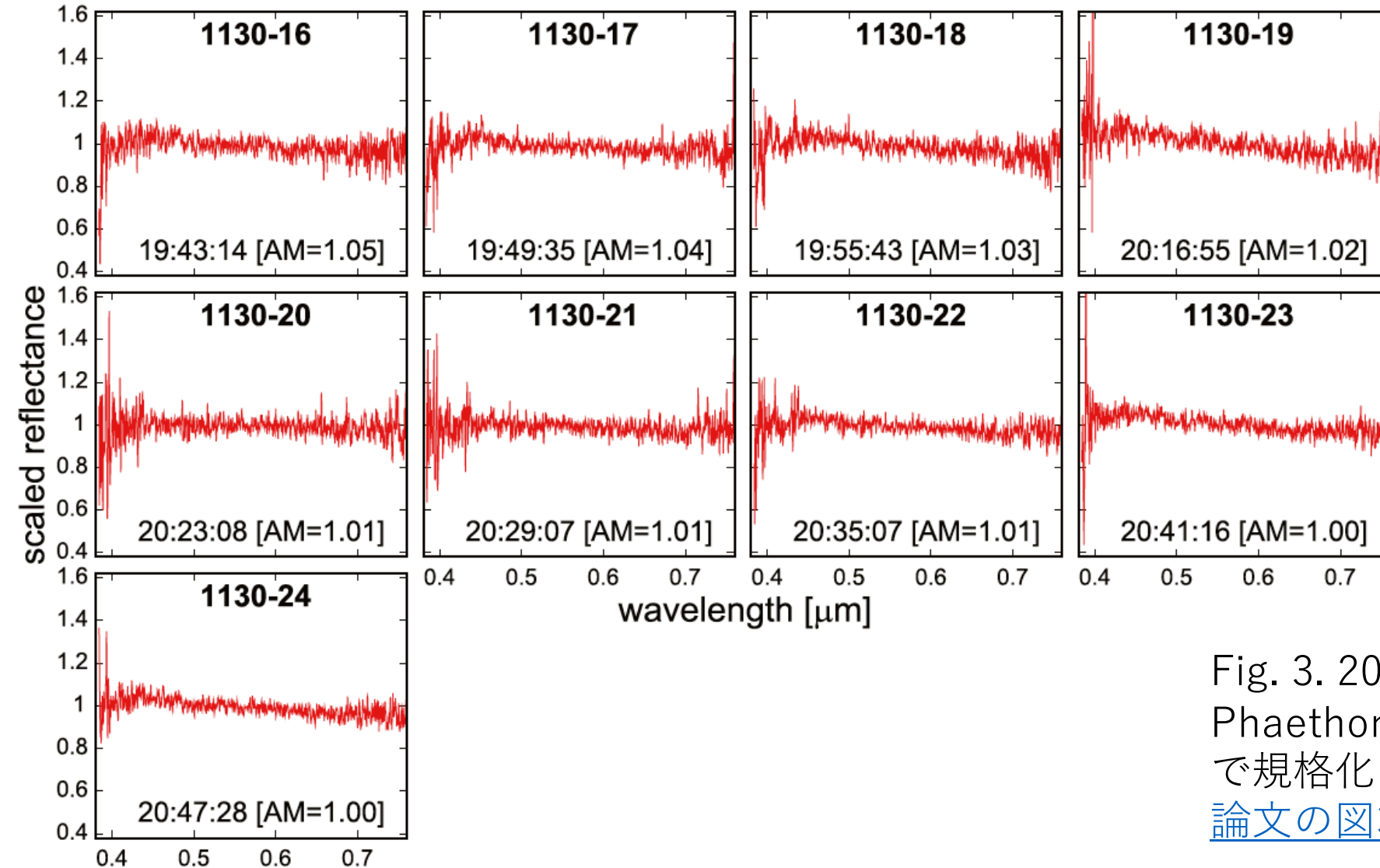


Fig. 3. 2007年11月30日に取得された Phaethon のスペクトル。波長  $0.55 \mu\text{m}$  で規格化されている。詳しくは [こちらの論文の図3](#) を参照のこと。

# 時間変化するスペクトル

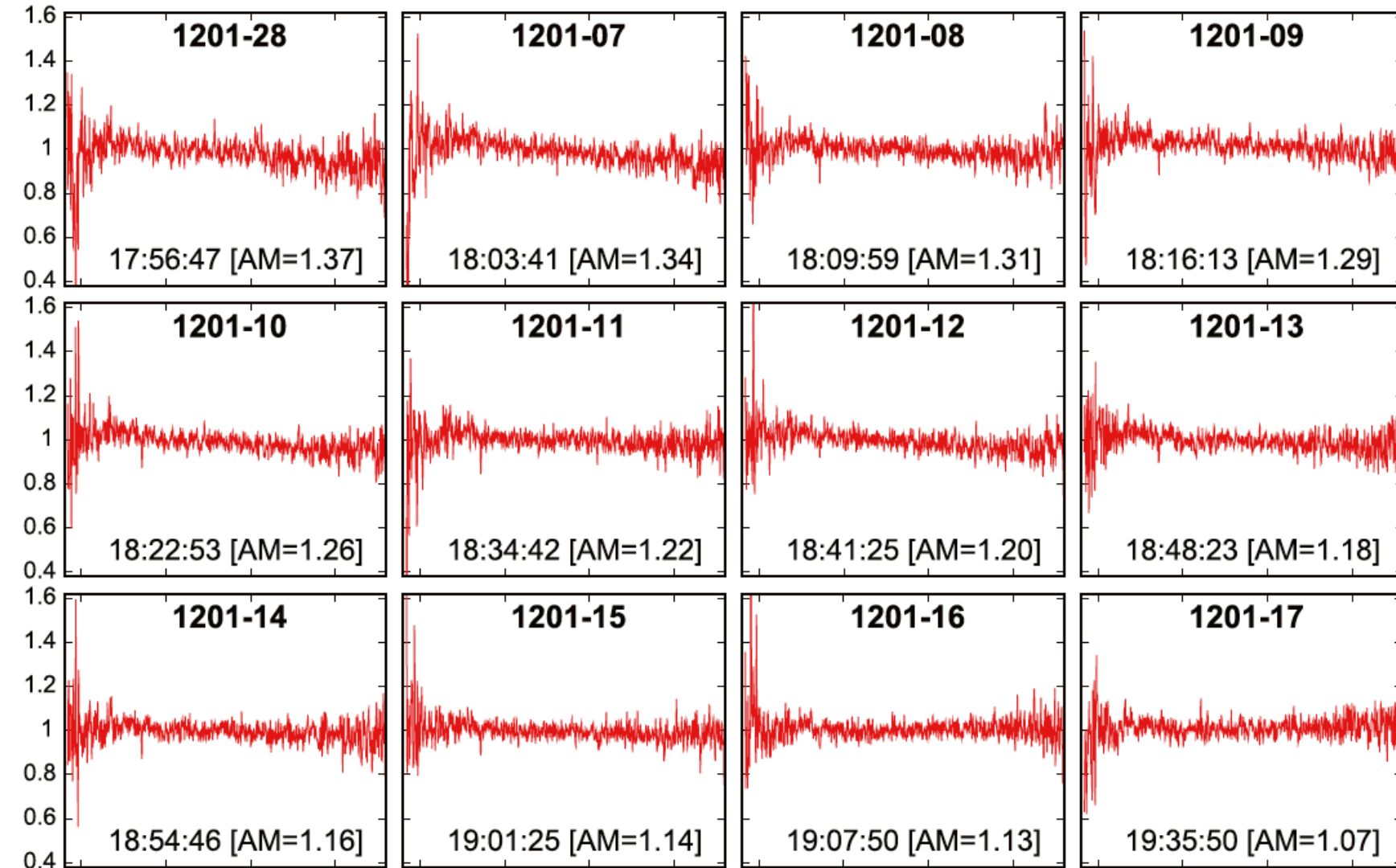


Fig. 4. 2007年12月1日に取得されたPhaethonのスペクトル (1)。波長  $0.55 \mu\text{m}$  で規格化されている。詳しくは[こちらの論文の図4](#)を参照のこと。

# 時間変化するスペクトル

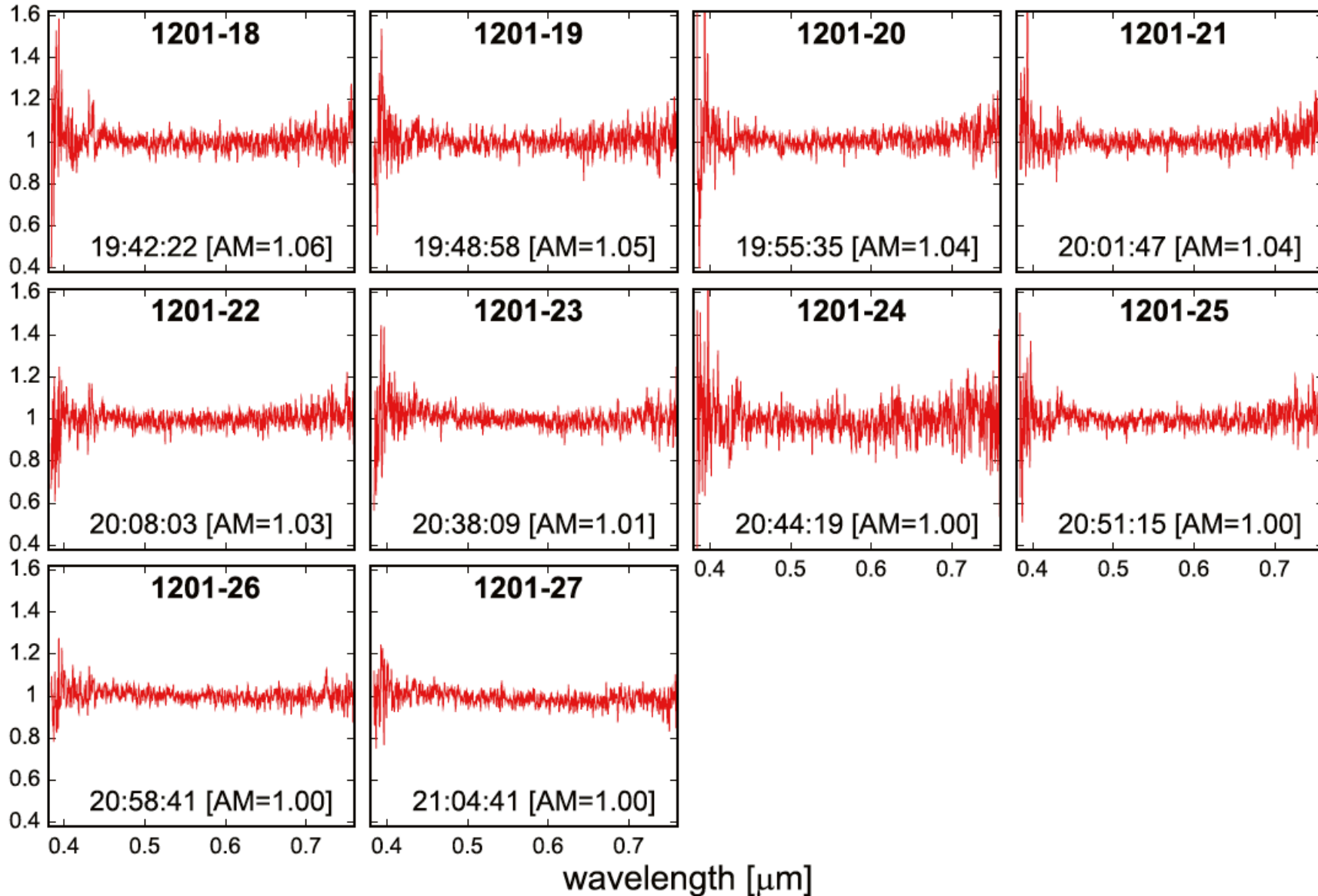


Fig. 4. 2007年12月1日に取得されたPhaethonのスペクトル (2)。波長  $0.55 \mu\text{m}$  で規格化されている。詳しくは[こちらの論文の図4](#)を参照のこと。



**Table 3**

Results of the spectroscopic observations of Phaethon in the 2007 return.

Sp ID	JD [LTC] 2454434.5+	$\Delta$ au	$r$ au	$\alpha$ deg	RP	$S'_{0.55}$ %/0.1 $\mu\text{m}$
1130-16	0.820337	0.2343	1.0850	59.30	0.465	- 2.9 $\pm$ 0.2
1130-17	0.824747	0.2342	1.0849	59.31	0.495	- 2.6 $\pm$ 0.2
1130-18	0.829006	0.2341	1.0849	59.32	0.523	- 3.5 $\pm$ 0.2
1130-19	0.843730	0.2339	1.0846	59.35	0.621	- 5.0 $\pm$ 0.3
1130-20	0.848048	0.2338	1.0846	59.36	0.650	- 0.5 $\pm$ 0.2
1130-21	0.852203	0.2337	1.0845	59.37	0.678	- 1.7 $\pm$ 0.2
1130-22	0.856370	0.2336	1.0844	59.38	0.705	- 2.5 $\pm$ 0.2
1130-23	0.860642	0.2336	1.0844	59.39	0.734	- 4.0 $\pm$ 0.2
1130-24	0.864948	0.2335	1.0843	59.40	0.762	- 3.1 $\pm$ 0.2
1201-28	1.746509	0.2176	1.0704	61.71	0.636	- 2.6 $\pm$ 0.3
1201-07	1.751301	0.2175	1.0703	61.72	0.668	- 4.3 $\pm$ 0.3
1201-08	1.755677	0.2175	1.0703	61.73	0.697	- 2.5 $\pm$ 0.2
1201-09	1.760006	0.2174	1.0702	61.74	0.726	- 1.9 $\pm$ 0.2
1201-10	1.764636	0.2173	1.0701	61.76	0.756	- 3.0 $\pm$ 0.2
1201-11	1.772843	0.2172	1.0700	61.78	0.811	- 1.8 $\pm$ 0.2
1201-12	1.777508	0.2171	1.0699	61.79	0.842	- 2.8 $\pm$ 0.2
1201-13	1.782346	0.2170	1.0698	61.80	0.874	- 1.8 $\pm$ 0.2
1201-14	1.786780	0.2169	1.0698	61.82	0.904	- 1.7 $\pm$ 0.2
1201-15	1.791398	0.2168	1.0697	61.83	0.935	- 1.4 $\pm$ 0.2
1201-16	1.795855	0.2167	1.0696	61.84	0.964	0.1 $\pm$ 0.2
1201-17	1.815301	0.2164	1.0693	61.90	0.094	- 0.1 $\pm$ 0.2
1201-18	1.819839	0.2163	1.0692	61.91	0.124	- 1.0 $\pm$ 0.3
1201-19	1.824422	0.2162	1.0692	61.92	0.155	- 0.6 $\pm$ 0.3
1201-20	1.829018	0.2162	1.0691	61.94	0.185	0.6 $\pm$ 0.2
1201-21	1.833324	0.2161	1.0690	61.95	0.214	- 0.6 $\pm$ 0.3
1201-22	1.837676	0.2160	1.0690	61.96	0.243	- 0.2 $\pm$ 0.2
1201-23	1.858581	0.2156	1.0686	62.02	0.382	- 2.0 $\pm$ 0.2
1201-24	1.862864	0.2156	1.0686	62.03	0.411	- 0.6 $\pm$ 0.4
1201-25	1.867679	0.2155	1.0685	62.04	0.443	- 0.6 $\pm$ 0.2
1201-26	1.872842	0.2154	1.0684	62.06	0.477	- 1.8 $\pm$ 0.2
1201-27	1.877009	0.2153	1.0683	62.07	0.505	- 2.1 $\pm$ 0.2

Note: Sp ID: spectrum ID.

JD [LTC]: Julian Date, light-time corrected.

 $\Delta$  and  $r$ : geocentric and heliocentric distances (in au). $\alpha$ : phase angle (in degree).RP: rotational phase from initial epoch, 0 phase at JD [LTC] 2454434.5 (= 0<sup>h</sup> UTC [LTC], 30 November, 2007). $S'_{0.55}$ : spectral gradient, centered at  $\lambda_c = 0.55 \mu\text{m}$  (in %/0.1  $\mu\text{m}$ ), along with 1 $\sigma$ -deviation of the slope determination.

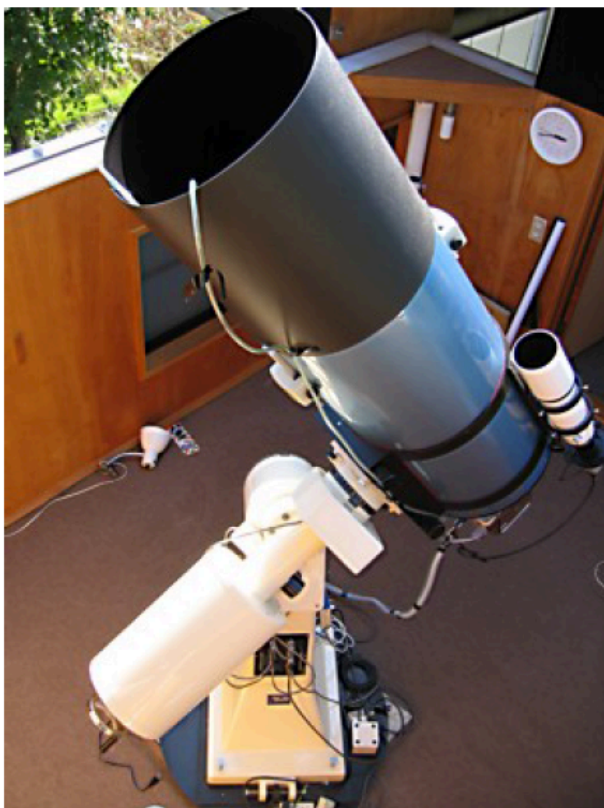
Table 3. 分光観測の詳細。

詳しくは [こちらの論文の表3](#) を参照のこと。

- Sp ID : スペクトル番号
- JD : Julian Date (light-time補正入り)
- $\Delta$  : 地心距離 (au)
- $r$  : 日心距離 (au)
- $\alpha$  : 太陽位相角 (度)
- RP : 自転位相 (rotational phase: 0-1)
- $S'_{0.55}$  : 波長0.55 $\mu\text{m}$ を中心としたスペクトルの平均的な傾き (%/0.1 $\mu\text{m}$ )

# 光度曲線観測 - 宮坂天文台0.36m望遠鏡

## 小淵沢36cm望遠鏡



望遠鏡 口径36cm F8 リッチークレティアン  
赤道儀 ドイツ式、自動導入

冷却CCDカメラ

SBIG STL-1001E

画素数 1024x1024

受光面サイズ 24.6x24.6mm

ピクセルサイズ 24x24  $\mu\text{m}$



2007年11月30日-12月1日  
鹿林での分光観測と同時

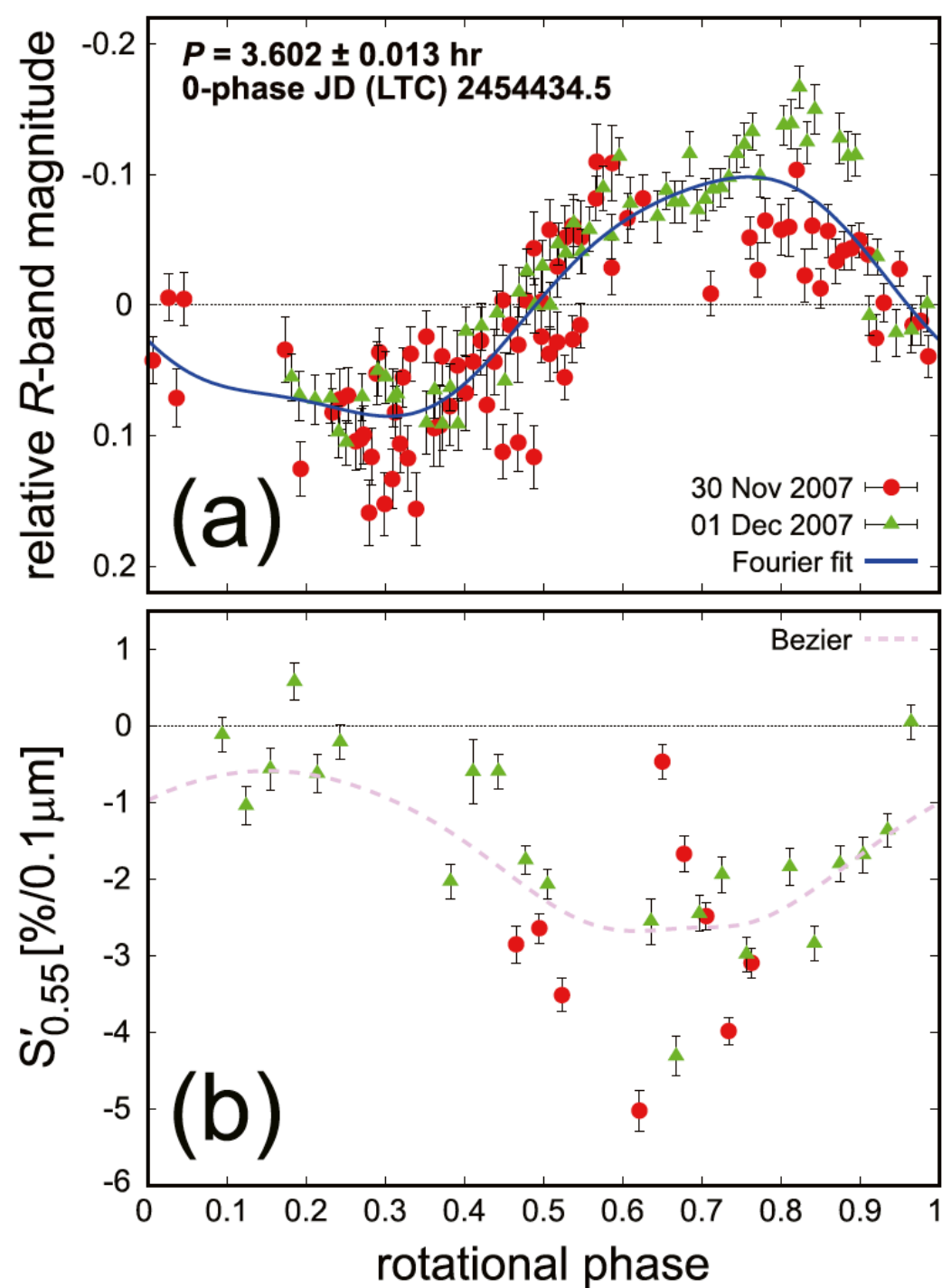


Fig. 5.

- (a) Phaethonの相対測光結果 ( $R$ バンド)。一山(single-peaked)であり、自転周期 $3.602 \pm 0.013$  時間と推定された。横軸は自転位相(0-1)。青線は3次のフーリエ級数によるフィット曲線を示す。
- (b) 前述した分光観測結果から得られる  $S'_{0.55}$  の値の自転位相への依存性を描画したもの。

詳しくは [こちらの論文の図5](#) を参照のこと。

# まとめ

- Phaethonの高時間分解能観測を実施した
  - 2007年11月30日-12月1日
  - 分光観測(鹿林天文台,台湾) + 光度曲線観測(宮坂観測所,日本)
- スペクトルの傾き  $S'_{0.55}$  が自転により変化する
  - この天体の表面に不均質が存在する事を示す
- $S'_{0.55}$  の極値は
  - 自転位相 0.0-0.3 で極大 ~ -0.5 % /0.1 $\mu$ m
    - ✓ ここにC型(または未変成な)領域が存在する可能性
  - 自転位相 0.5-0.8 で極小 ~ -3 % /0.1 $\mu$ m
- 不均質の可能な要因は？
  - 組成・物性の不均質(熱変成の程度差を含む)