

Small Solar System Bodies Studies in Taiwan — Pan-STARRS and Lulin 2-m Telescope —

Kinoshita Daisuke and Lulin 2-m Telescope Project Members
Institute of Astronomy, National Central University

August 2008

Abstract

Ohtsuka et al. (2006) performed both forward and backward 10,000-yr numerical integrations of the Kustaanheimo-Stiefel regularized equation of motion for (3200) Phaethon and 2005 UD, and pointed out that 2005 UD was probably the parent body of the daytime Sextantids meteor stream. Thus, 2005 UD is very likely a large member of the Phaethon-Geminid stream complex. We carried out photometric observations of 2005 UD using 1-m telescope at Lulin observatory, and found the similarity of surface colors with (3200) Phaethon. We also detected the surface color variation of 2005 UD during the rotation of the body. These observational results support the hypothesis that 2005 UD is likely to be a fragment of (3200) Phaethon. Recently, we carried out time-resolved spectroscopic observations of (3200) Phaethon using 1-m telescope at Lulin observatory together with newly installed low dispersion spectrograph "Hiyoyu". The purpose of the observation is to search for the surface inhomogeneity which may be a signature of the split of (3200) Phaethon and 2005 UD. The data analysis is still undergoing and we present the preliminary spectra. The Institute of Astronomy at National Central University is now constructing a 2-m telescope at Lulin observatory. The first generation instrument we plan to develop is the visible 4-color simultaneous imager. We report the current status of the telescope construction and the conceptual design of the instrument. The main scientific objective of 2-m telescope at Lulin observatory is the extensive follow-up observations for Pan-STARRS project. We also give the introduction to Pan-STARRS. Finally, we report current and future projects of the Taiwanese astronomical community, and then show the future prospect for the planetary sciences in Taiwan.

1 導入

台湾の国立中央大学天文研究所における最近の太陽系小天体の観測的研究の取り組み、Pan-STARRS 計画、それから観測天文学の基盤となる台湾国内の施設の建設について報告する。

2 これまでの取り組み

国立中央大学天文研究所は 1992 年に設立された台湾で最初の天文学教室である。現在、七名の教員がおり、太陽系、恒星、星形成、高エネルギー天文、宇宙線、系外銀河などの研究を行っている。七名の教員のうち、四名が太陽系に関する研究を行っている。また、二名が日本人である。研究所は、台湾中部に鹿林天文台 (120° 52' 25" E, 23° 28' 7" N, $H = 2862$ m) を持っており、現在、口径 1-m の望遠鏡、口径 50-cm の広視野望遠鏡四代からなる TAOS (Taiwanese-American Occultation Survey)、口径 40-cm 望遠鏡などの観測施設を運用している。さらに、天文以外にも、太空科学研究所や大気科学系など

他の研究設備も置かれている。

口径 1-m 望遠鏡 LOT (Lulin One-meter Telescope) は、2002 年に設置されたもので、現在、台湾国内にある最大の光学望遠鏡である (図 1)。有効口径が 1-m であり、F/8 のカセグレン焦点が利用可能である。主に、二つの観測装置が利用されている。一つは撮像カメラで、視野は 11 分角である。検出器には CCD を用いており、Princeton Instrument の PI1300B が使われている。ペルチェ冷却と水冷を併用して摂氏 -45° から -50° で運用している。二種類の読み出し時間が利用可能で、早い読み出しは 1 MHz で、遅い読み出しは 50 kHz で読み出している。Bessel システムの広帯域フィルターと、いくつかの狭帯域フィルターを備えている。もう一つの観測装置は、低分散分光器 "Hiyoyu" である (図 2)。“Hiyoyu”とは、鹿林付近に住する先住民である鄒族の言葉で虹を意味する。回折格子を用いたスリット分光器で、F 変換レンズと県立ぐんま天文台の GCS (Gunma Compact Spectrograph) のコピーである分光器から成っている。300 gr./mm と 1200 gr./mm の

二種類の回折格子が利用可能である。検出器は Apogee の AP-8 であり、スリットビューアには ST-8 を使っている。



Figure 1: 鹿林 1-m 望遠鏡。台湾中部の標高 2862-m の場所に設置されている。現在、台湾最大の光学望遠鏡である。
<http://www.lulin.ncu.edu.tw/> より。

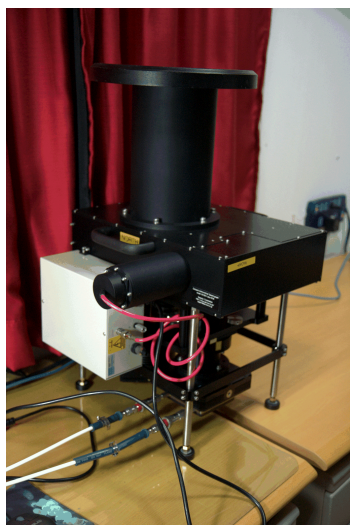


Figure 2: 鹿林 1-m 望遠鏡用の低分散分光器 “Hiyoyu”。分散素子は回折格子である。手前の電源から赤いケーブルで結ばれているのが波長校正光源であり、FeNeAr ホロカソードランプを用いている。下側に見えるのがスペクトルを記録する Apogee AP-8 であり、見えないがその奥にスリットビューアとして使っている SBIG ST-8 がある。

木下らは 2003 年後半より、1-m 望遠鏡と CCD カメラ PI1300B の性能評価を行い、CCD の読み出し雑音、A/D 変換係数、暗電流雑音、応答の線形性、システム変換係数、効率、背景の夜空の明るさ、限界等級などを調べた (Kinoshita et al. 2005)。

その後、木下らは 1-m 望遠鏡を用いた太陽系小天体の観測を本格的に開始する。特に、アポロ型近地球小惑星 (155140) 2005 UD の観測について紹介する。(155140) 2005 UD は Catalina

Sky Survey によって 2005 年秋に発見された天体で、発見後、大塚らによってその軌道が daytime Sextantids とよく似ており、daytime Sextantids の母天体である可能性が指摘された。さらに、大塚らは (155140) 2005 UD が (3200) Phaethon の分裂破片である可能性にも触れている (Ohtsuka et al. 2005)。大塚らは、(155140) 2005 UD と (3200) Phaethon の軌道積分を行い、両者の軌道進化の振る舞いがよく似ていることを示し、天体力学の面から (155140) 2005 UD が (3200) Phaethon の分裂破片である可能性を指摘した。この説明を観測から検証すべく、木下らは台湾の鹿林天文台の 1-m 望遠鏡を用い、(155140) 2005 UD の撮像観測を行った (Kinoshita et al. 2007)。R バンドでの測光観測により、光度変化が捉えられ、自転周期 5.23 時間および光度変化の振幅 0.44 等級が得られた。rubble-pile 構造を仮定すると、密度の下限値が $1.5 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ と求められた。また、多色測光からは (155140) 2005 UD の色指数が (3200) Phaethon のそれと非常に似ているという結果が得られた。これにより、(155140) 2005 UD が (3200) Phaethon の分裂破片であるという説明が観測的にも支持された。さらに、色指数の時間変化を調べてみると、(R-I) 色指数が自転の位相により変化していることが捉えられた (図 3)。木下らは、この色指数の自転の位相による変化を、分裂前の天体の表層物質と表面に露出していなかった物質の色の違いが見えている可能性を指摘した。

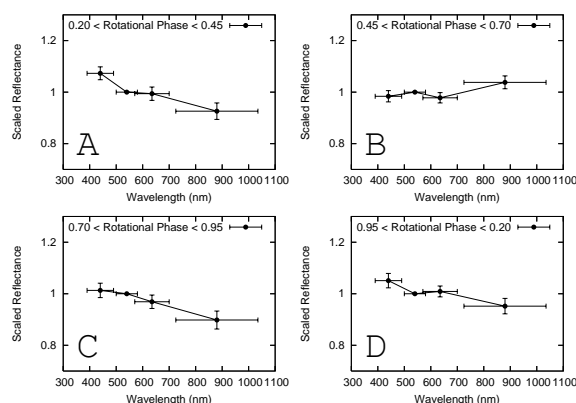


Figure 3: (155140) 2005 UD の表層反射特性。表面の大部分は F 型小惑星のような青いスペクトルを示しているが、一部分に C 型小惑星のような平らなスペクトルを示す領域が存在する。

木下らはさらに新たに 1-m 望遠鏡に取り付けた低分散分光器 “Hiyoyu” を用いて、2007 年 11-12 月に (3200) Phaethon の可視光低分散分光を行った。自転の位相によりスペクトルに変化が見られるかどうかを調べるのが最大の目的だった。現在、データ解析中である。

3 Pan-STARRS 計画

Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) は、全天の 75% を繰り返し観測する計画である。計画は PS1 および PS4 の二段階からなっている。PS1 は 1.8-m 望遠鏡一台のシステムで、ハワイのハレアカラ山頂に設置された (図 4)。PS4 は 1.8-m 望遠鏡四台によるシステムで、ハワイのマウナケア山頂に設置されることが検討されている。もともと PS1 は科学的な観測を目指さない純粋に工学的な試験のための望遠鏡であったが、科学的な観測も行うよう変更がなされた。しかし、PS1 の科学的観測のための運用経費は用意されていなかったため、Science Consortium が組織され、PS1 の運用経費は Science Consortium が負担することとなった。現在、Science Consortium には University of Hawaii, Max-Planck Society (Garching および Heidelberg), Johns Hopkins University, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Las Cumbres Observatory, Durham University, University of Edinburgh, Queen's University Belfast, National Central University (台湾の国立中央大学) が参加している。



Figure 4: ハレアカラ山頂に設置された PS1 望遠鏡。2008 年 11 月に ORR を達成する予定で、その後に 3π Steradian Survey を開始する。2008 年 11 月撮影。

プロトタイプである PS1 望遠鏡は、ハワイのマウイ島のハレアカラ山頂 ($203^{\circ} 44' 39''$ W, $20^{\circ} 42' 26''$ N, $H = 3068$ m) に設置された。1.8-m 広視野望遠鏡は補正光学系を三つ備え、視野は直径 3° である。GPC (Giga Pixel Camera) との組み合わせで 7 deg^2 の視野を達成する。GPC は、 600×600 ピクセルの OTA (Orthogonal Transfer Array) セルを用いたカメラである。 8×8 のセルが載ったチップを 60 個並べてある。総画素数は 14 億ピクセルである (図 5)。OTA は、積分中にピクセルの電荷を隣接す

るピクセルに移動させることができる新しい種類の CCD であり、この機能によりより精密な追尾が可能となる。GPC には、 g' , r' , i' , z' , y の五色のフィルターが用意されている。GPC は 2007 年夏に PS1 に取り付けられ、初めての観測が行われた。現在、光学系の調整および OTA モードの試験が行われている。PS1 建設にあたって、二つのソフトウェアがプロジェクトの責任で作られることになった。それらが IPP (Image Processing Pipeline) と MOPS (Moving Object Processing System) である。IPP は、観測データの一次処理、重ね合わせ、位置測定、測光などを行う。MOPS は、IPP の検出した天体の一覧を受け取り、移動天体を探し、軌道を決定する。

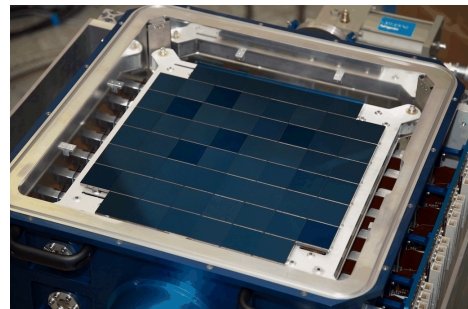


Figure 5: PS1 用の GPC1。 600×600 ピクセルの OTA セルが 8×8 載ったチップが 60 個敷き詰められている。Pan-STARRS のウェブサイトより。

PS1 システムは 2008 年 11 月に ORR (Operational Readiness Review) を達成する見通しで、その後、晴天夜 30 夜の移行期間を経たのち、PS1 の管理および運用の責任が PS1 Science Consortium に移される。科学的な観測は PS1 Science Consortium が行う。PS1 のサーベイは、 3π Steradian Survey, Medium Deep Survey, Solar System Sweet Spot Survey など、いくつかの部分に分けられる。それぞれのサーベイの観測時間の割合を表 1 に示す。半分以上の観測時間が 3π Steradian Survey に使われる。 3π Steradian Survey はその名の通り、全天の 75% の領域を観測するサーベイであり、五色でデータを得る。一晩に、同じ領域について二度の撮像を行う。この二度の撮像は TTI (Transient Time Interval) と呼ばれる時間間隔で行うことになっており、基本的に 30 から 60 分である。典型的には、一週間程度の間をおいて、同じ領域の撮像を再び行う。積分時間は 30 から 60 秒であり、限界等級は r' バンドで 22.7 mag 程度である。限界等級の詳細を表 2 に示す。太陽系天体の検出を主な目的としたサーベイは、他にも Solar System Sweet Spot Survey があり、夕方の西の空および明け方の東の空を観測する。近地球小惑星の検出を狙ったものである。なお、例外として external scientists として登録された少数の人がいるものの、観測データは基本的に

は Science Consortium のメンバーのみが利用できる。しかし、近地球小惑星については、検出された天体は直ちに国際天文学連合の小惑星中央局に報告されるため、世界中の研究者がその情報を利用して追跡観測を行うことが可能である。この点で、台湾と日本の協力を探ることは可能だと考えられる。

Pan-STARRS 計画は、空の広い領域を広視野カメラで効率的に観測し、多数の太陽系小天体を検出することが期待されている。さまざまな種類の太陽系小天体が知られているが、大雑把に言ってそれぞれのグループの既知天体の数が数百倍に増えると考えられている。例えば、現在、約 1000 個の天体が知られている太陽系外縁天体については、新たに 30000 個程度の天体が発見されると思われる。また、まったく想定されていない発見もあるかもしれない。Pan-STARRS は、現在の太陽系の描像を大きく書き換える可能性を持っていると言える。

4 鹿林 2-m 望遠鏡計画

Pan-STARRS は多数の天体を発見し、また軌道を精密に決定する能力を持つ。しかし、また、限界も当然存在する。例えば、個々の天体を詳しく調べようとしても、色指数を測定したり、光度変化を調べたりすることについては不向きである。異なるフィルターでの観測が時間的に離れて行われるからであり、同じ領域での観測は TTI の間隔をはさんで二度行われるだけだからである。国立中央大学天文研究所では、Pan-STARRS で発見された太陽系天体および変光する天体の追跡観測を効率的に行うために、新たな望遠鏡を建設している。鹿林 2-m 望遠鏡計画について紹介する。

鹿林 2-m 望遠鏡は、台湾中部の鹿林前山に建設する。現在、運用中の 1-m 望遠鏡の南側が建設予定地である。建設資金は、教育部(文部科学省に相当)、国家科学委員会、国立中央大学より得た。望遠鏡およびドームは教育部の「五年五百億計畫」の資金を使い、建物の建設には国立中央大学校務基金を用いる。観測装置の開発および鏡の再蒸着施設の建設には国家科学委員会からの補助金を使用する。日本円に換算して、合計六億円強の計画である。

望遠鏡は有効口径 2-m で、F/8 のカセグレン焦点を持つ。主鏡は、現在、ロシアの L-ZOS Optics 社で製作中である(図 6)。ガラス材には Astro-Sital を用い、表面精度は $1/15 \lambda$ (RMS) である。2009 年春に完成の予定である。主鏡は、同じくロシアの Lomo 社にてメッキが行われ、日本に送られる。望遠鏡本体の製作および設置は日本の西村製作所が担当する。撮像性能はハルトマン定数 0.35 arcsec, 指向精度は 2 arcsec (RMS), 追尾性能は 10 分間で 0.3 arcsec, 最大指向速度は 4 deg/sec である。

望遠鏡製作の現状は以下の通りである。望遠鏡の設計は 2007 年 12 月に完了した。ドームの



Figure 6: 現在、L-ZOS Optics 社で製作中の主鏡。有効口径 2-m で、表面精度は $1/15 \lambda$ (RMS)。ガラス材には Astro-Sital を用いる。2009 年春に完成予定。写真は 2008 年 6 月撮影。

設計は 2008 年 2 月に完了した。望遠鏡設置場所の地質調査は 2007 年冬に行っており、それを元にしたピラーの設計は 2008 年 5 月に完了した。台湾政府による建築許可が 2008 年 7 月に交付される予定であり、2008 年秋から建物の建築を開始する予定である。2010 年初めに望遠鏡の設置完了を予定している(図 7)。



Figure 7: 鹿林 2-m 望遠鏡完成時の想像図。

Pan-STARRS PS1 望遠鏡および鹿林 2-m 望遠鏡の主な狙いは太陽系天体と変光天体である。これらの天体は時間とともに明るさを変える。これらの天体の色指数を効率的に、そして精密に測定するため、鹿林 2-m 望遠鏡の第一期観測装置として、多色同時撮像カメラの開発を決めた。図 8 に、多色同時撮像カメラの概略を示す。

多色同時撮像カメラの狙いは主に二つあり、それらは (1) 地球大気の透過率の変動による影響を打ち消すことと、(2) 天体自身の明るさや色指数の変化による影響を打ち消すことである。フィルターを交換して撮像する従来の多色測光の手法では、あるバンドで観測し、フィルターを交換して、別のバンドで観測している間に、空の条件が変わったり、天体自身の明るさや色指数が変わってしまう可能性がある。多

Table 1: PS1 サーベイの種類と使われるフィルター、および観測時間の割合。

surveys	filters	time given
3 π Steradian Survey	g', r', i', z', y	56%
Medium Deep Survey	g', r', i', z', y	25%
Solar System Sweet Spot Survey	r'	5%
Stellar Transit Survey	i'	4%
Deep Survey of M31	g', r', i', z', y	2%
Calibration Fields	g', r', i', z', y	2%
PI Discretionary Time		6%

Table 2: PS1 3 π Steradian Survey の限界等級。等級は AB 等級で示して いる。

filter	bandpass (nm)	zero-point mag. (mag)	sky background (mag/arcsec ²)	exposure time (sec)	5 σ limiting mag. (mag)
g'	405-550	24.90	21.90	60	23.24
r'	552-689	25.15	20.86	38	22.71
i'	691-815	25.00	20.15	60	22.63
z'	815-915	24.63	19.26	30	21.59
y	967-1024	23.03	17.98	30	20.13

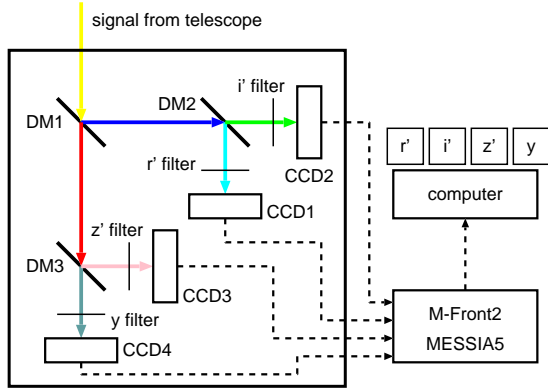


Figure 8: 鹿林 2-m 望遠鏡用の多色同時撮像カメラの概略。ダイクロイック・ミラーで光を分割し、四台の CCD カメラで撮像する。r', i', z', y の四色のデータを一度に得ることができる。

色同時撮像カメラは明るさの変わる天体の色指数を精密に決定するのに最適な装置である。多色同時撮像カメラでは、太陽系天体および変光天体の精密な色指数の測定に加えて、観測可能な夜数の増加や観測効率の向上も期待される。ここで、観測効率の違いについて議論したい。従来の多色測光の手法では、フィルターを替えて何度も観測することが必要である。したがって、一つの天体の色指数を得るためには、

$$T_c = (t_{exp} + t_{ro}) \times N_{band} \quad (1)$$

だけの時間が要請される。ここで、 T_c は従来の手法による多色測光で必要とされる実時間であり、 t_{exp} は典型的な積分時間、 t_{ro} は CCD の読み出し時間、 N_{band} は観測する測光バンドの数である。また、多色同時撮像カメラを使用する場合に必要な観測時間 T_s は、

$$T_s = \frac{t_{exp}}{E_{throughput}} + t_{ro} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 $E_{throughput}$ はダイクロイック・ミラーの存在を考慮した効率である。今、 $t_{exp} = 60$ sec, $t_{ro} = 8$ sec, $N_{band} = 4$, $E_{throughput} = 0.8$ を仮定すると、多色同時撮像カメラによる観測の方が 3.3 倍程度効率が良いことが分かる。

多色同時撮像カメラでは、ダイクロイック・ミラーによる光の分割に加えて、完全空乏型 CCD の活用による長波長側の感度の改善もその特徴とする。波長 $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$ での量子効率 $QE > 50\%$ を持つ CCD チップを利用することで、他の 2-m 級望遠鏡との差別化を図る。長波長側の高感度は、(1) 太陽系小天体の $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$

付近の鉱物の吸収、(2) 褐色矮星などの低温の天体、(3) 超新星やガンマ線バーストなどの宇宙論的距離にある天体の距離の見積りなどで利点が多い。CCDの読み出し回路については、日本の国立天文台と協力関係を築き、M-Front2およびMessia5を利用したいと考えている。

多色同時撮像カメラの開発は、2008年に観測装置全体の設計、CCDチップの発注、2009年にCCDチップの駆動試験および装置の製作、2010年初めの組み上げ、2010年の望遠鏡設置完了からあまり遅れずに観測装置の望遠鏡への取り付けを予定している。

5 まとめ

台湾の光赤外天文学は今まさに成長しているところである。現在、運用中の1-m望遠鏡で太陽系天体の観測を行っている。また、国立中央大学はPan-STARRS計画に参加しており、2008年終わりからPS1サーベイのデータにアクセス可能となる。さらに、現在、鹿林天文台に2-m望遠鏡を建設中であり、PS1サーベイの追跡観測に用いる予定である。口径2-mの望遠鏡は決して大きな望遠鏡ではないが、PS1サーベイとの組み合わせで、アジアの特色ある研究施設になるよう努力している。

References

- [1] Kinoshita, D., Chen, C.-W., Lin, H.-C., Lin, Z.-Y., Huang, K.-Y., Chang Y.-S., Chen, W.-P., “Characteristics and Performance of the CCD Photometric System at Lulin Observatory”, 2005, ChJAA, Volume 5, pp. 315-326.
- [2] Kinoshita, D., Ohtsuka, K., Sekiguchi, T., Watanabe, J., Ito, T., Arakida, H., Kasuga, T., Miyasaka, S., Nakamura, R., and Lin, H.-C., “Surface heterogeneity of 2005 UD from photometric observations”, 2007, A&A, 466, 1153-1158.
- [3] Ohtsuka, K., Sekiguchi, T., Kinoshita, D., Watanabe, J., “2005 UD and the Daytime Sextantids”, 2005, Central Bureau Electronic Telegrams, 283, 1.