

# Measuring M31 distance - Time domain astronomy in M31 -

---

アンドロメダ銀河の距離測定と時間軸天文学

**Fumihiko Naokawa (直川史寛)** Tohoku University (東北大学)

with K. Hotokezaka [1], K. Masuda [2], S. Sugiyama [1], M. Takada [1], K. Wong [1],  
N. Yasuda [1], R. Lupton [4], K. Kashiyama [5], Y. Suzuki [6], S. Janssens [1]

[1] UTokyo [2] Osaka Univ. [3] Princeton Univ. [4] Tohoku Univ. [5] Univ. of Hyogo [6] NAOJ

# Motivation (研究動機)

## 🎲 Hubble tension ハッブル定数問題

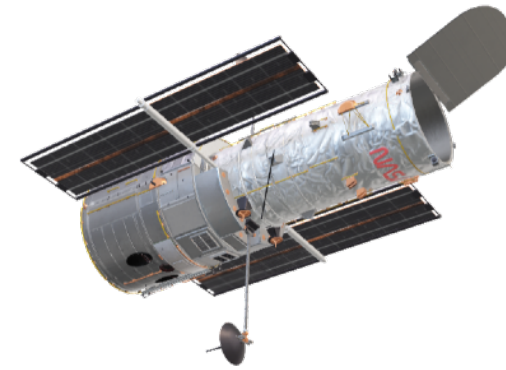
- discrepancy of  $H_0$  (the present Hubble constant)  
Local universe vs early universe (CMB)
- New physics ? 標準モデルの綻びか?  
beyond  $\Lambda$ CDM, standard particle physics ?
- Systematics ? それとも系統誤差か?  
ex) Cepheid problem ?
- Local distance ladder 近傍距離はしご  
only 3 galaxies accessible for calibration

## 🎲 This project

- We aim to add M31 as a new calibrator.
- We have to determine the absolute distance to M31.
- Subaru/HSC is an unique facility for this end.

すばる望遠鏡でアンドロメダ銀河までの絶対距離を高精度に測定し、4つ目のアンカー銀河へ！

Local universe



$$H_0 = 73.29$$

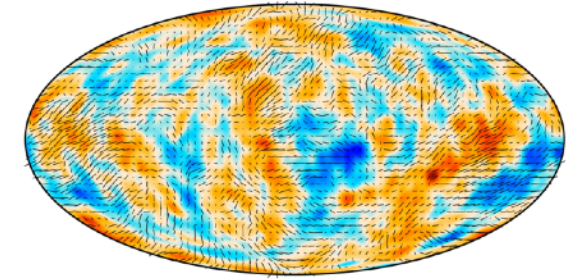
Murakami et al. (2023)

$5.7\sigma$

$$H_0 = 67.37$$

Planck (2018)

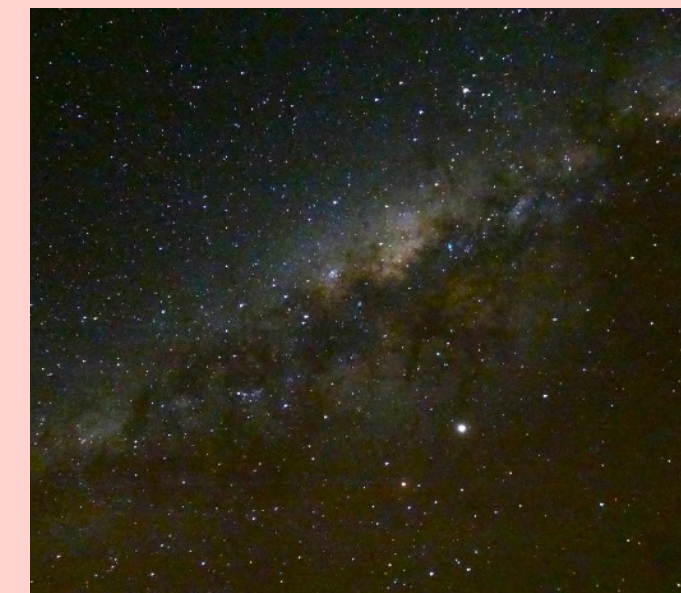
early universe



Planck Collaboration A&A 641, A1(2020) ©ESO 2020

近傍宇宙由来の測定と、初期宇宙(CMB)由来の測定とで現在のハッブル定数の値が有意に不一致

Milky way (天の川銀河)



© ナオカワ天文台

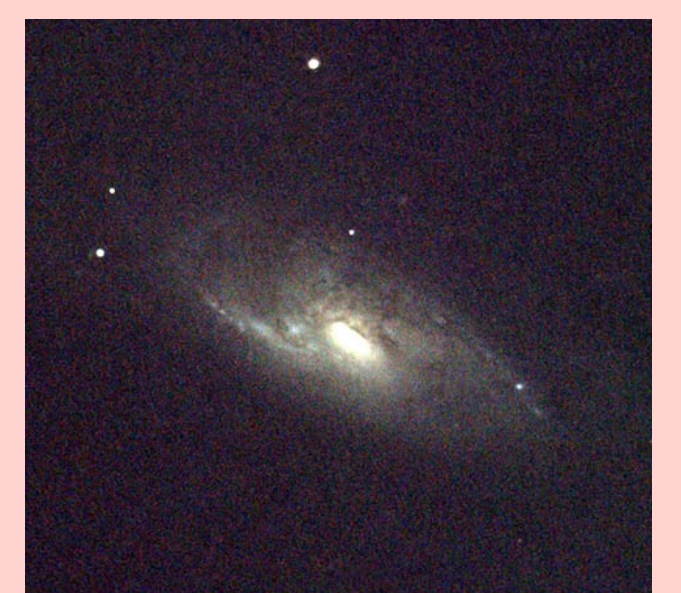
セファイドの校正に使える銀河(アンカー)は現状3つ。

LMC (大マゼラン)



© ナオカワ天文台

NGC4258 (M106)



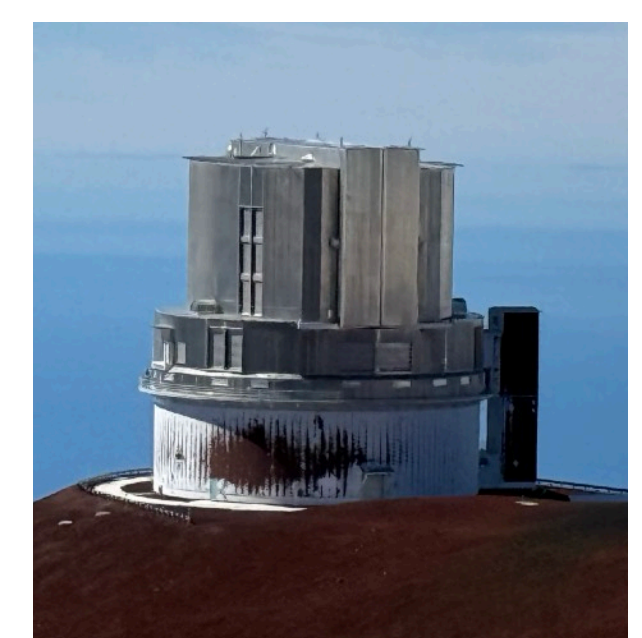
© 東京大学 駒場観測所, 滝澤勉

M31 (アンドロメダ)



© 東京大学 駒場観測所, 滝澤勉





with



# Geometrical distances & anchor galaxies (幾何距離とアンカー銀河)

Anchor Galaxies : Galaxies with absolute (geometric) distance measurements for Zero-point calibration of relative distance indicators.

アンカー銀河：セファイドなどの距離指標天体のゼロ点校正に必要な絶対(幾何)距離が測定されている銀河

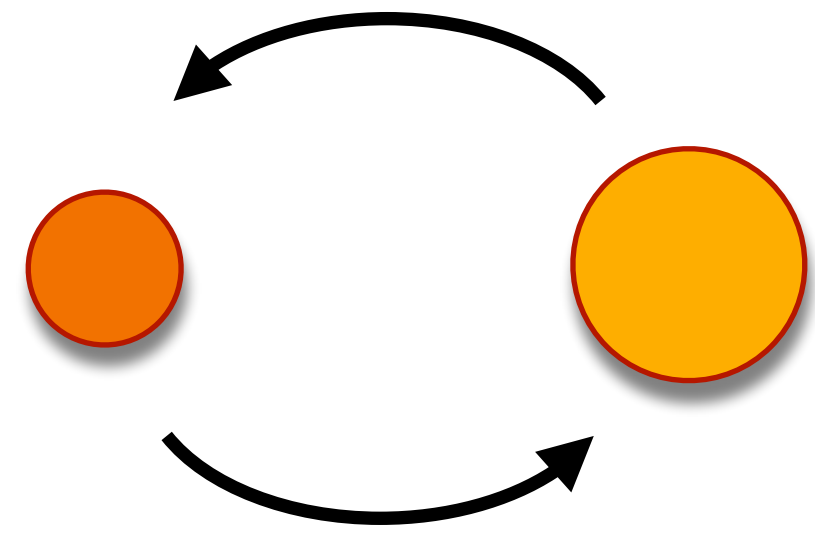
	Milky way (天の川銀河)	LMC (大マゼラン)	M31 (アンドロメダ銀河)	NGC4258 (M106)
現状 利用可能なアンカー銀河 Accessible anchor galaxies				
	© ナオカワ天文台	© ナオカワ天文台	© 東京大学 駒場観測所, 滝澤勉	© 東京大学 駒場観測所, 滝澤勉
Distance (距離)	~ 10 kpc	~ 50 kpc	~ 0.7 Mpc	~ 7.6 Mpc
Precision (精度)	~ 1 % Gaia, HST	~ 1.5 % Pietrzynski et al. 2019	~ 4.5 % Vilardell et al. 2010	~ 1.3 % Reid et al. 2019
Method (手法)	Parallax (年周視差)	Eclipsing Binary (食連星)	Eclipsing Binary (食連星)	Water Maser (水メーザー)

~O(100) systems are requested for  $\lesssim 1\%$  precision  
 $\lesssim 1\%$  の精度達成のためには 数百個の食連星系が必要

2 systems of Eclipsing Binary (2個の食連星系)

# Eclipsing Binary method (食連星法)

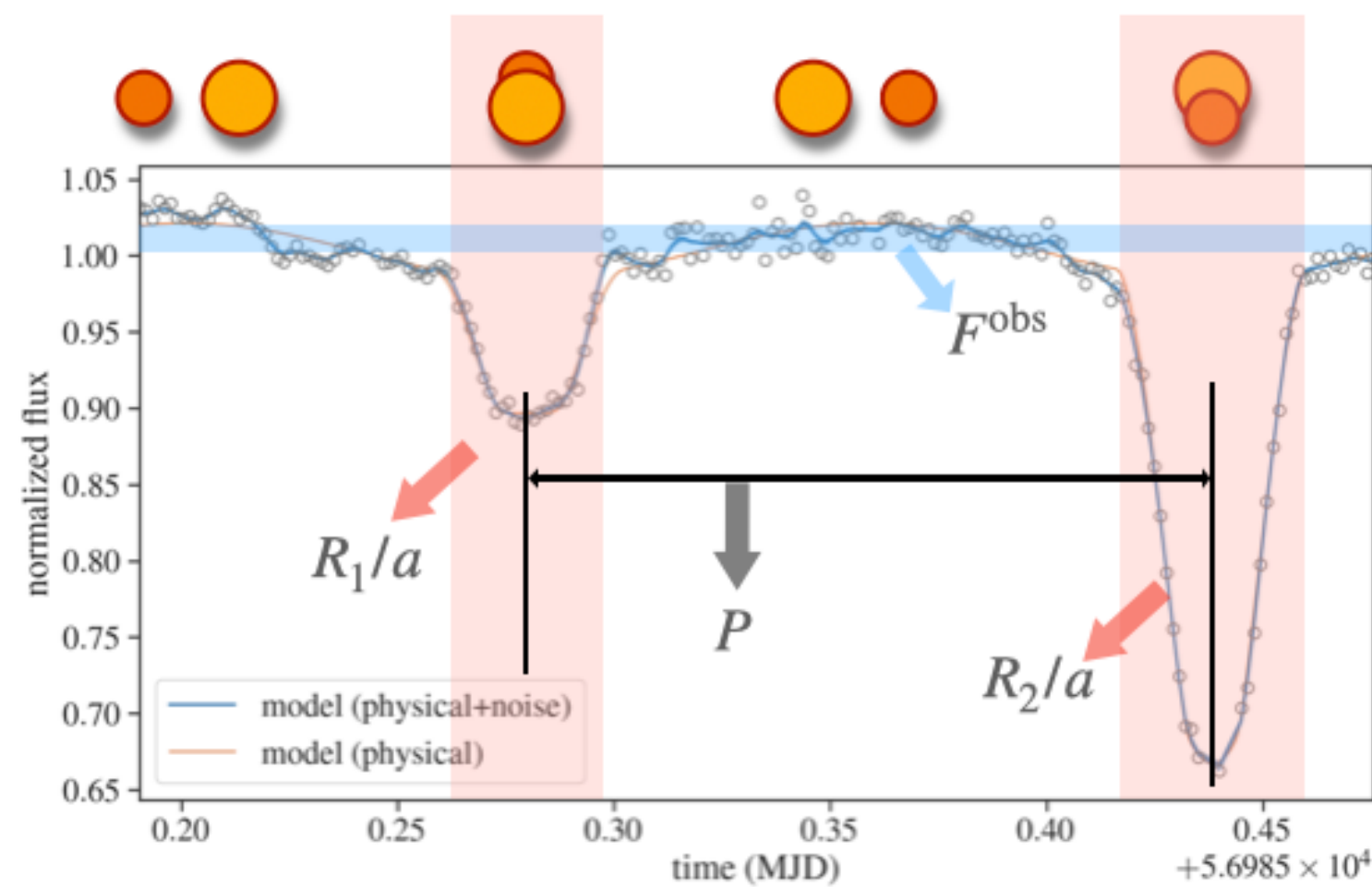
## Geometric Distance to Eclipsing Binary (分離食連星の幾何距離測定)



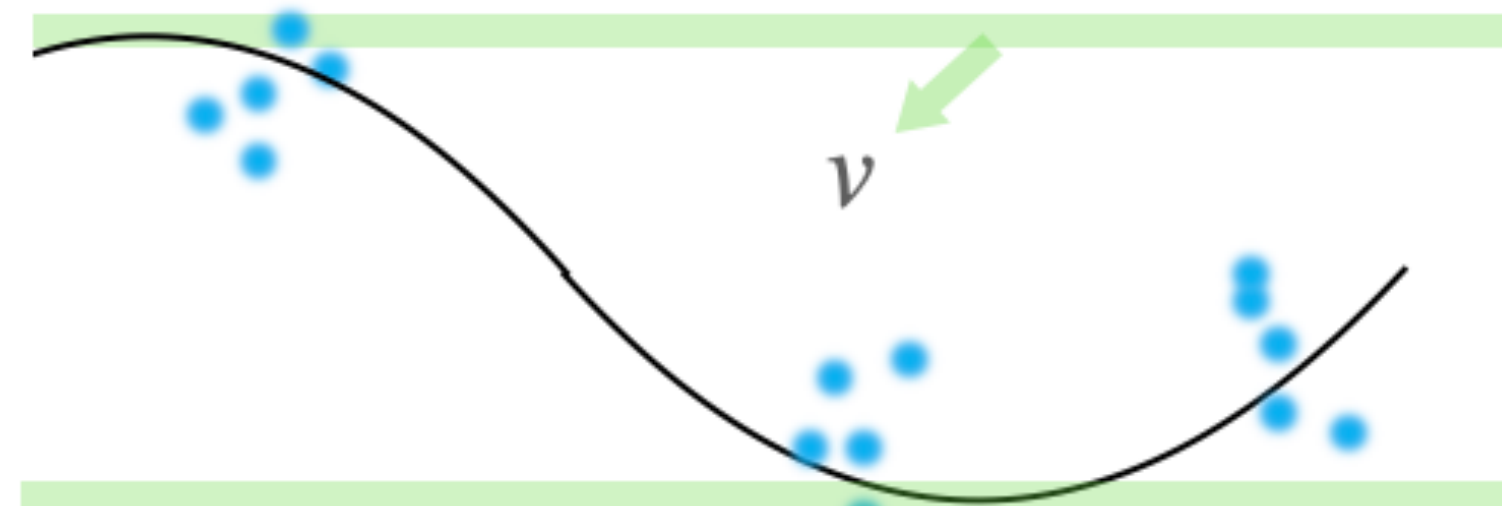
$$d^2 = \frac{1}{4\pi^2} \frac{F}{F^{\text{obs}}} \left( \frac{R}{a} \right)^2 P^2 v^2$$

- $d$  : geometric distance (絶対距離)
- $F$  : absolute flux (絶対フラックス)
- $F^{\text{obs}}$  : apparent flux (観測フラックス)
- $R$  : star radius (天体半径)
- $a$  : semi major axis (軌道長半径)
- $P$  : Period (周期)
- $v$  : radial velocity (視線速度)

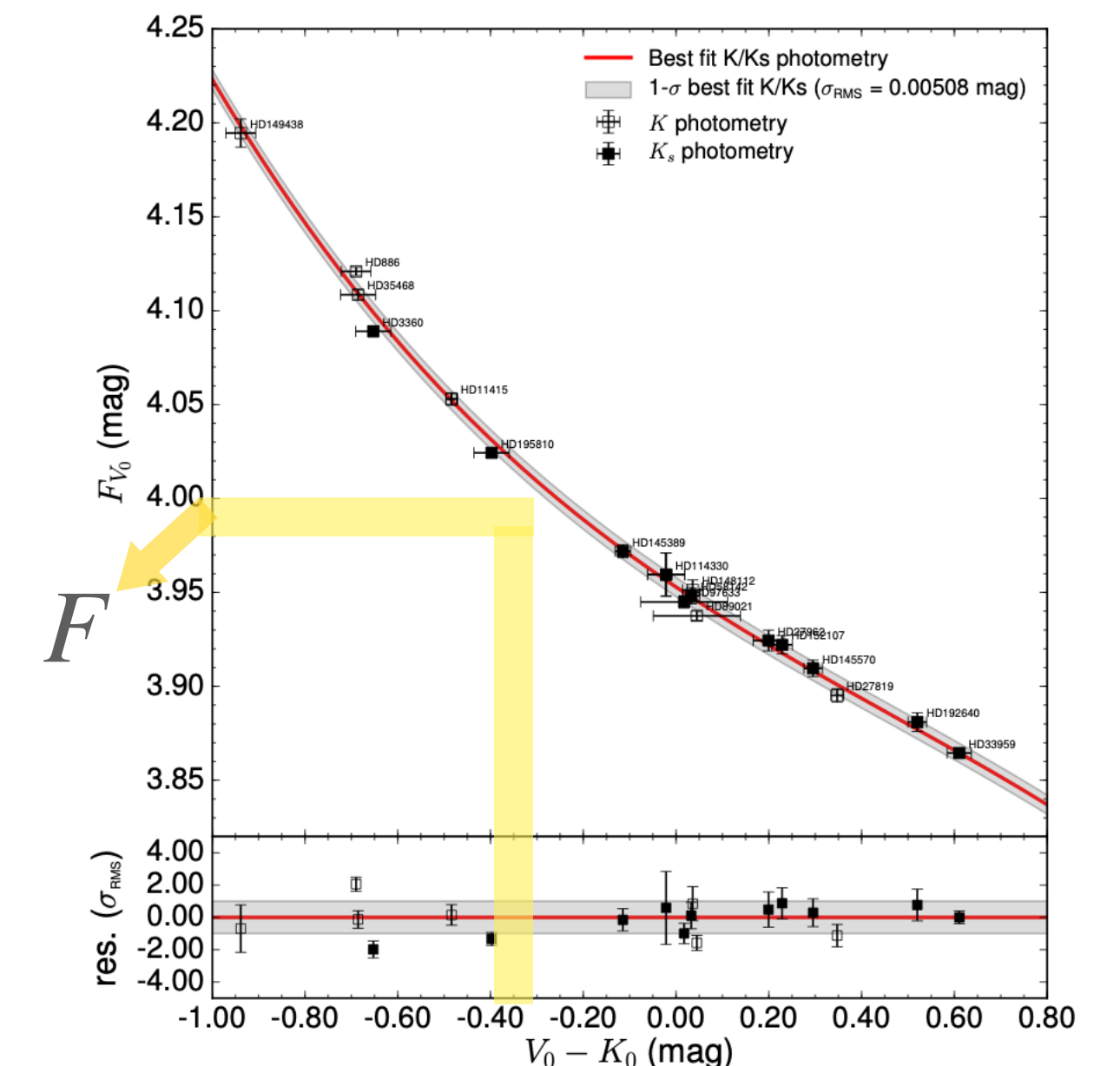
### ① light curve (光度曲線)



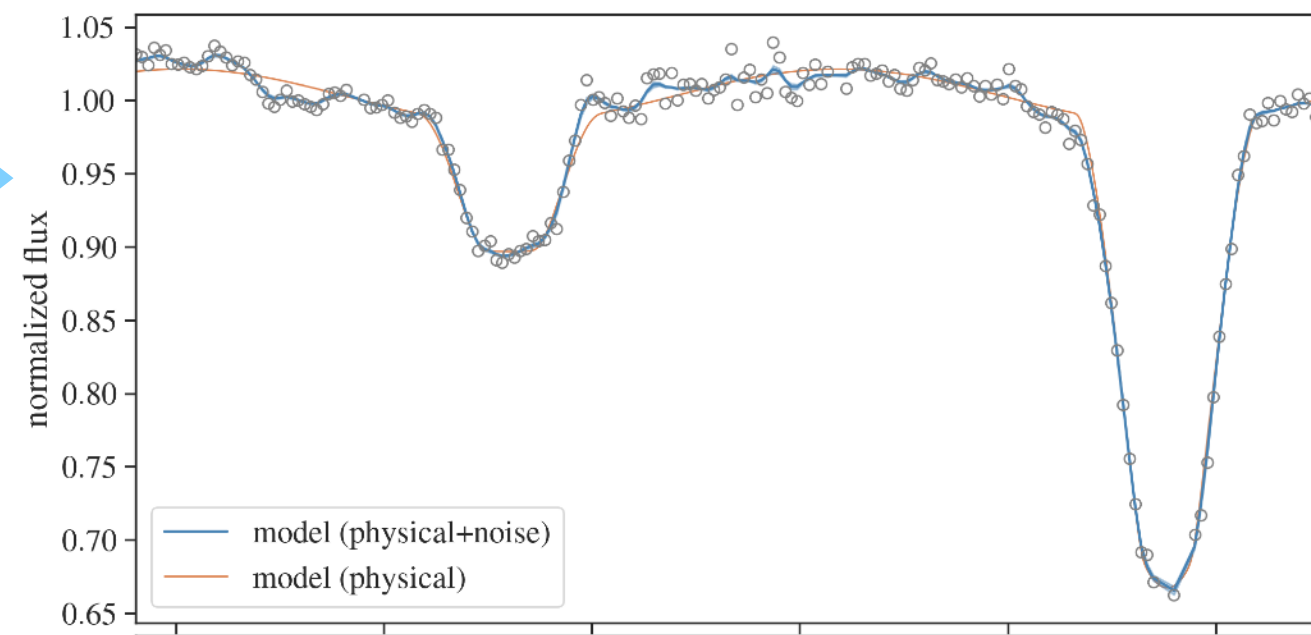
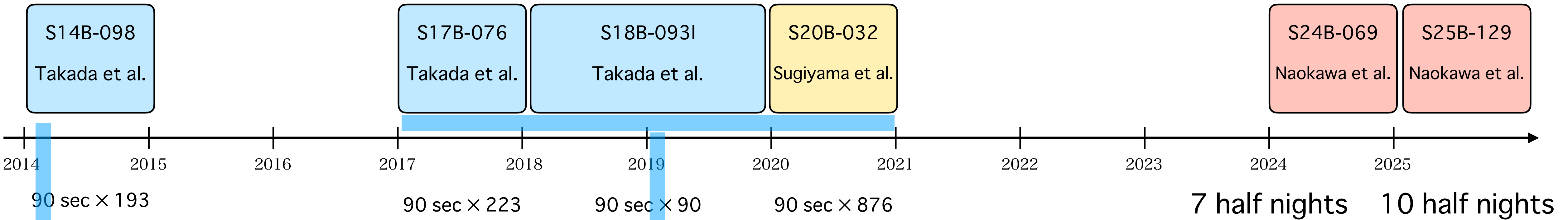
### ② radial velocity (視線速度)



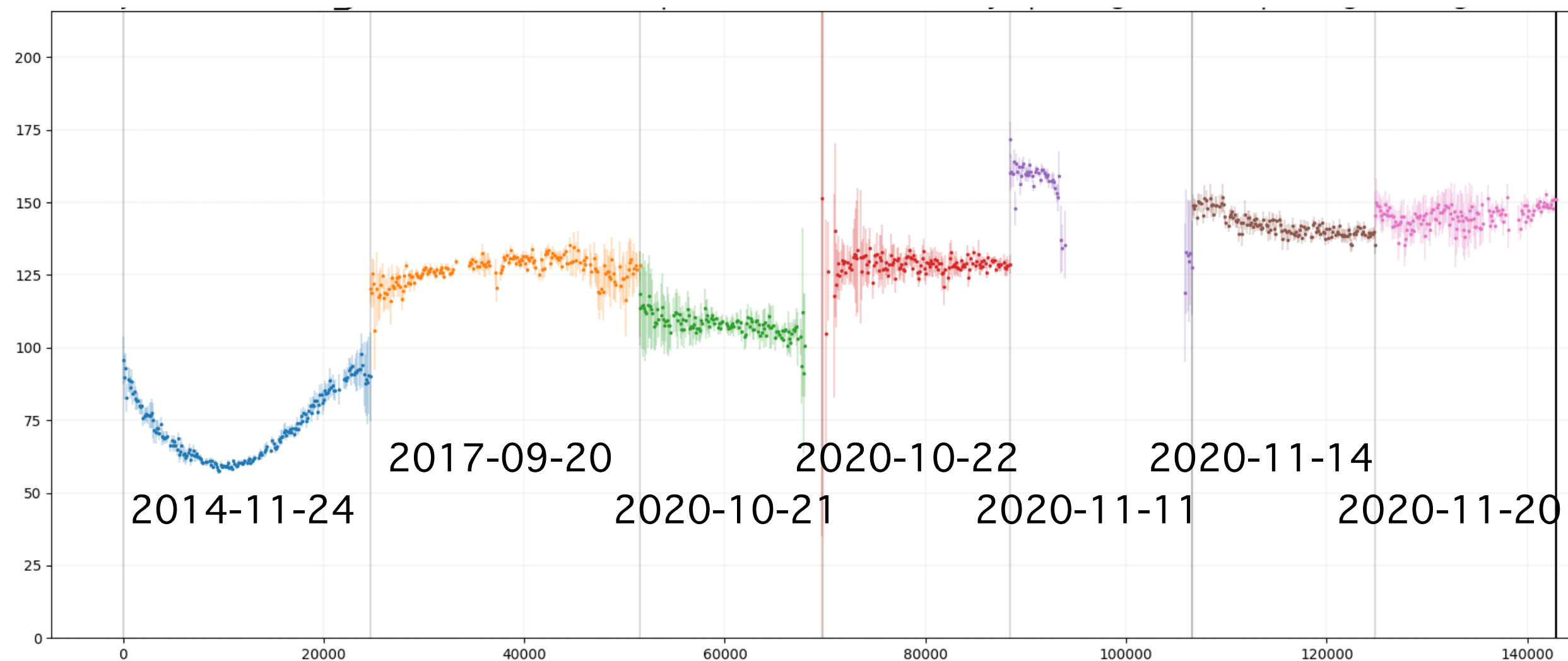
### ③ colour-surface brightness relation (色-表面輝度)



# M31 archive data by Subaru HSC (すばる望遠鏡 HSC による過去のデータ)



We proposed  
continuous large-scale monitoring !!  
連続的で大規模な時系列観測を提案



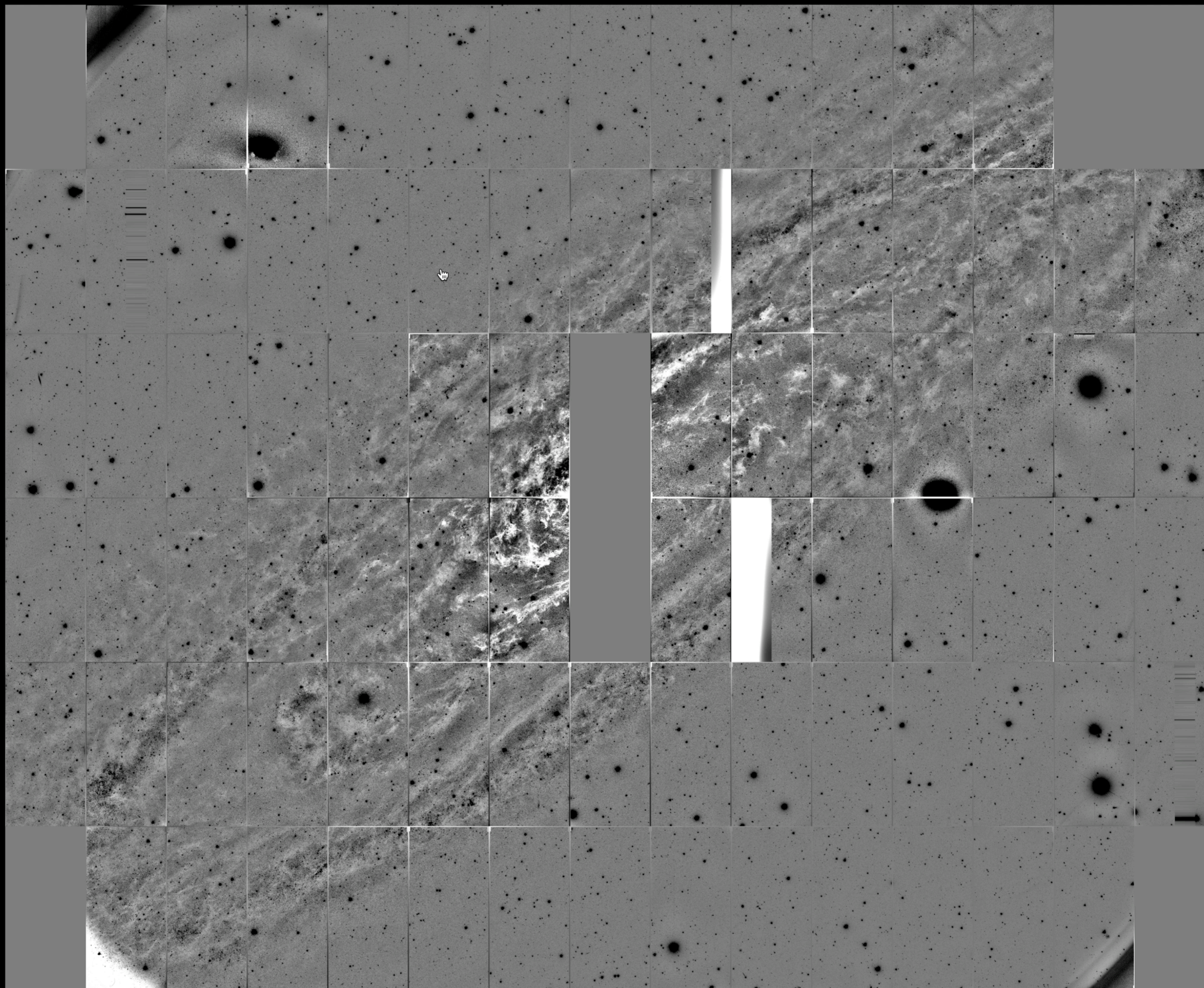
However, archival data is ..

- not enough to cover ~ 5 days period.
- not consecutive.

アーカイブデータは総量が足りず連続的でもない。



Subaru HSC  
S24B-069  
Naokawa et al.  
2024-11-28  
visit = 341350



# M31 time-domain survey using Subaru HSC (サブール HSC による M31 の時間軸サーベイ)



Primary Reduction  
(1次処理)

**hscPipe v8**

Bosch et al. (2018)

Image Subtraction  
(画像差分解析)

Massive Data Analysis

Sugiyama et al. (2026)

Image Subtraction

Alard & Lupton (1998)

Niikura et al. (2019)

**hscPipe v8**

S24B-069

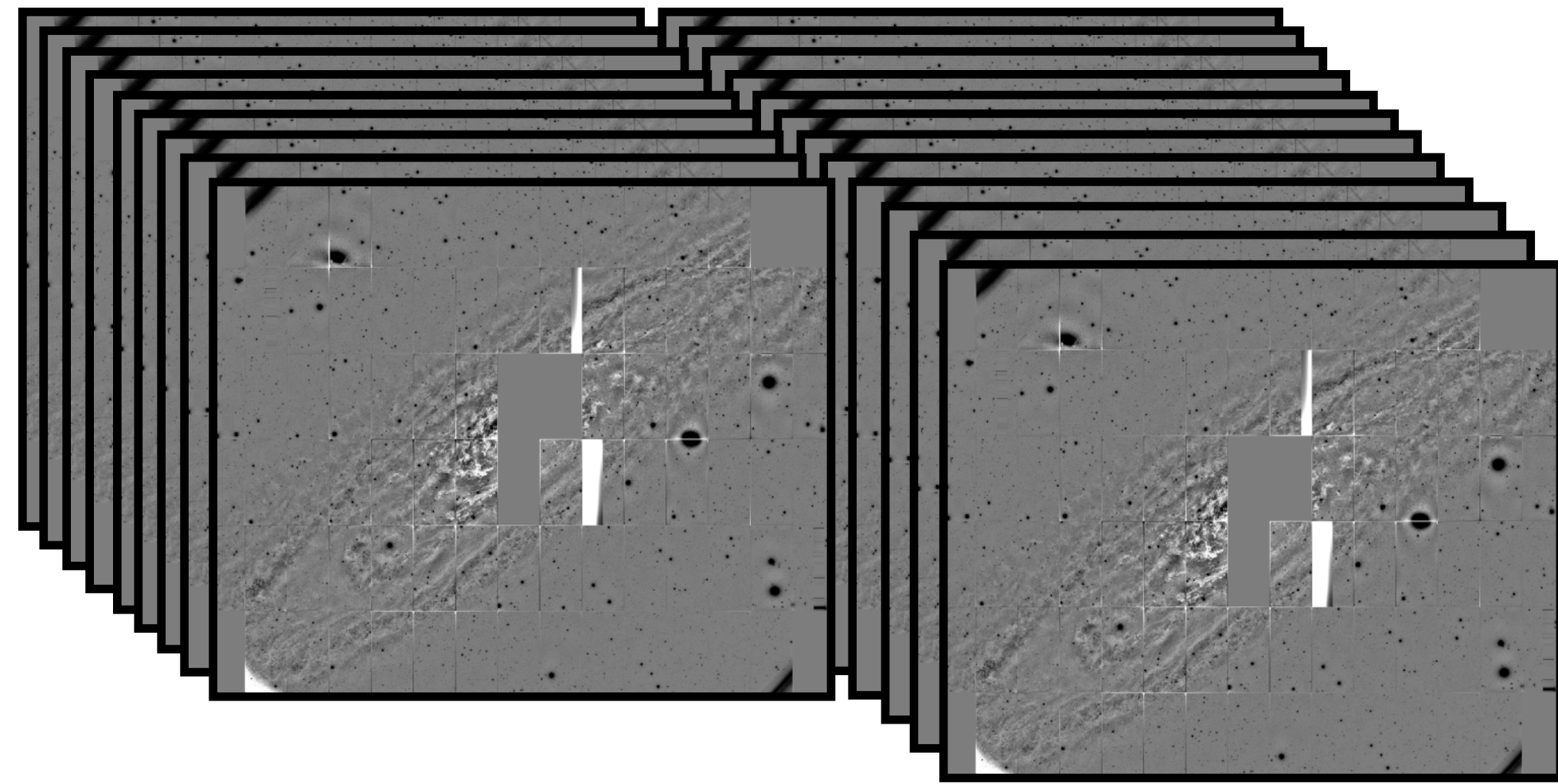
Naokawa et al.

S25B-129

Naokawa et al.

2024

2025



2024B

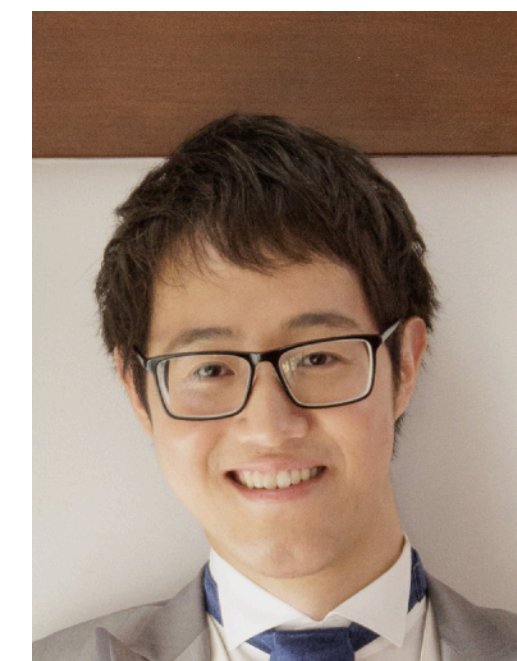
90 sec × 930 visits  
spanning 6 nights

2025B

90 sec × 1241 visits  
spanning 10 nights



N. Yasuda  
安田氏 (IPMU)



S. Sugiyama  
杉山氏 (IPMU)  
from HP of Sugiyama-san

from HP of IPMU

<https://db.ipmu.jp/member/personal/439ja.html>

# M31 main survey using Subaru HSC (すばる HSC による M31 の時間軸サーベイ)



Primary Reduction  
(1次処理)  
**hscPipe v8**  
Bosch et al. (2018)

Image Subtraction  
(画像差分解析)

Massive Data Analysis

Sugiyama et al. (2026)

Image Subtraction

Alard & Lupton (1998)

Niikura et al. (2019)

**hscPipe v8**

Flux (フラックス)

Period (周期) 1.6 day

mag ~ 22

Period (周期) 2.7 day

mag ~ 22

Period (周期) 3.9 day

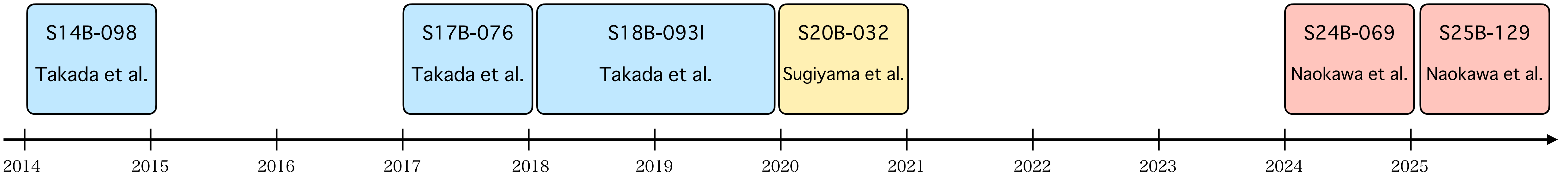
mag ~ 22.5

Phase (位相)

The radec and other information of these known Eclipsing Binaries are from Vilardell et al. (2010)

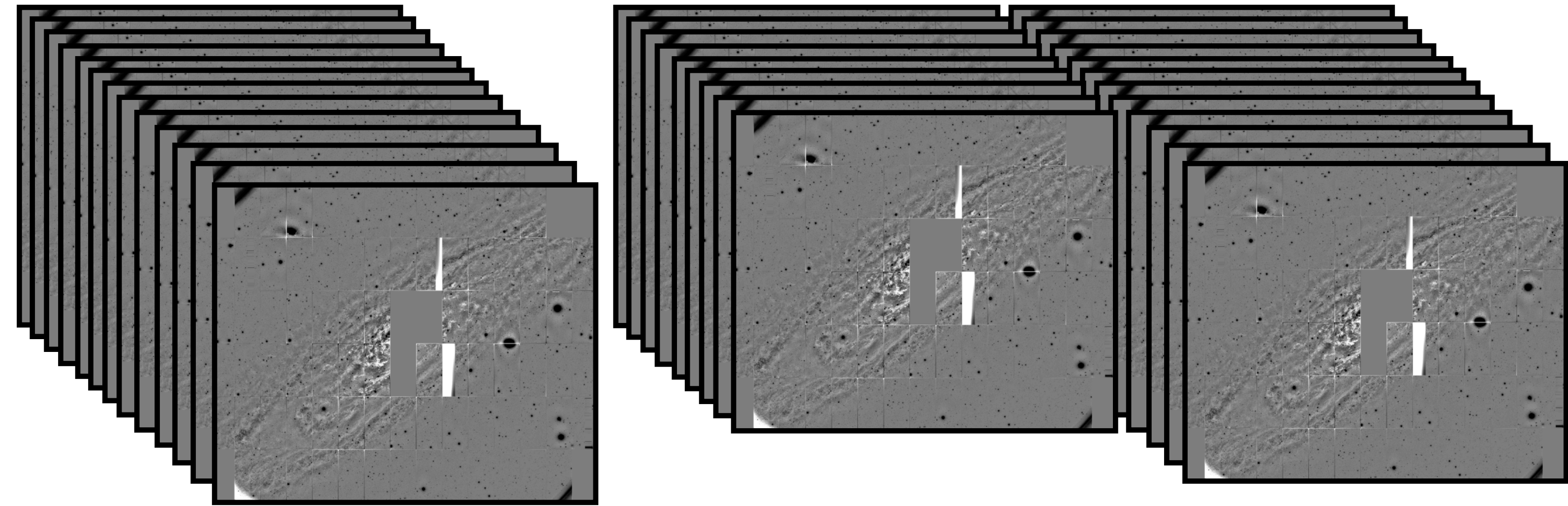
Preliminary

# M31 time-domain survey using Subaru HSC (すばる HSC による M31 の時間軸サーベイ)



In total, ~3600 visits of uniform & homogeneous time-domain dataset of M31.

アンドロメダ銀河の広範囲に対する 3600 枚もの統一規格時系列データ



archive  
90 sec × 1382 visits

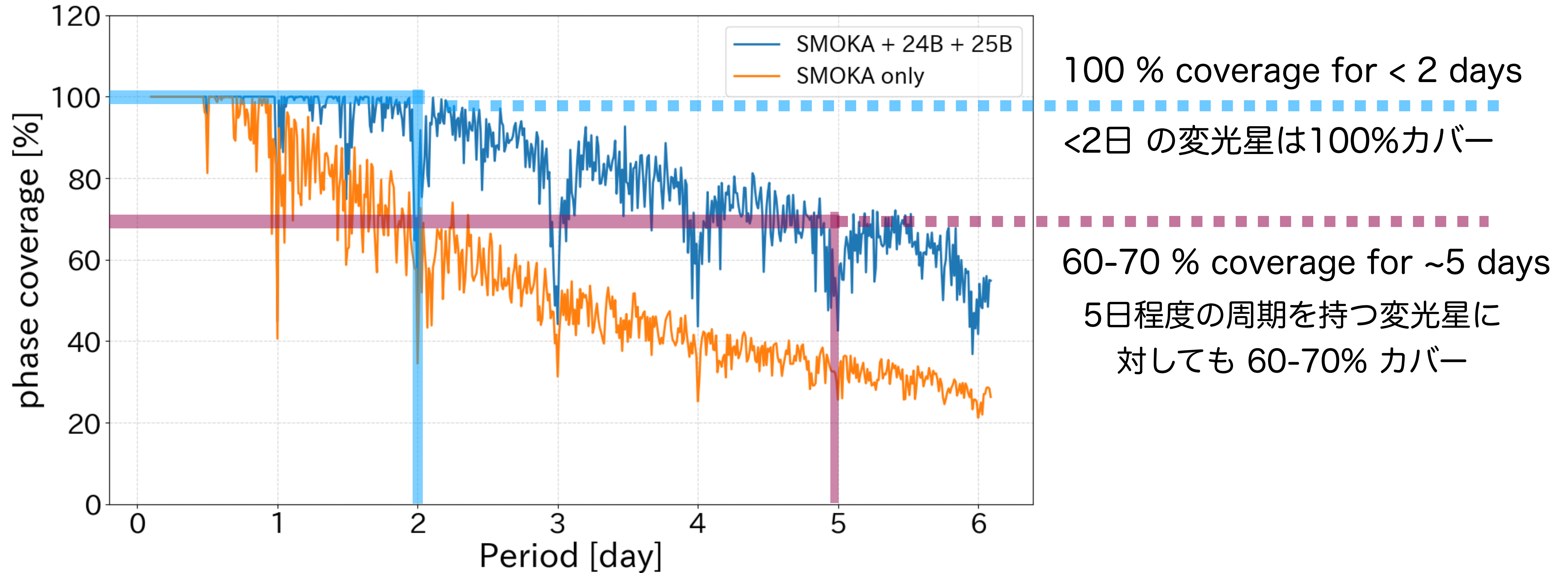
2024B  
90 sec × 930 visits

2025B  
90 sec × 1241 visits

This is a legacy data !!! 色々なことに利用可能!

## Phase coverage of periodic variable stars (< 6 days)

短周期 (<6日) 変光星に対する 位相カバー率

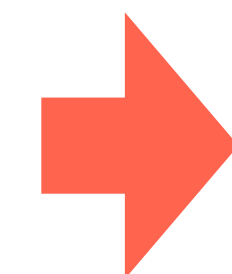
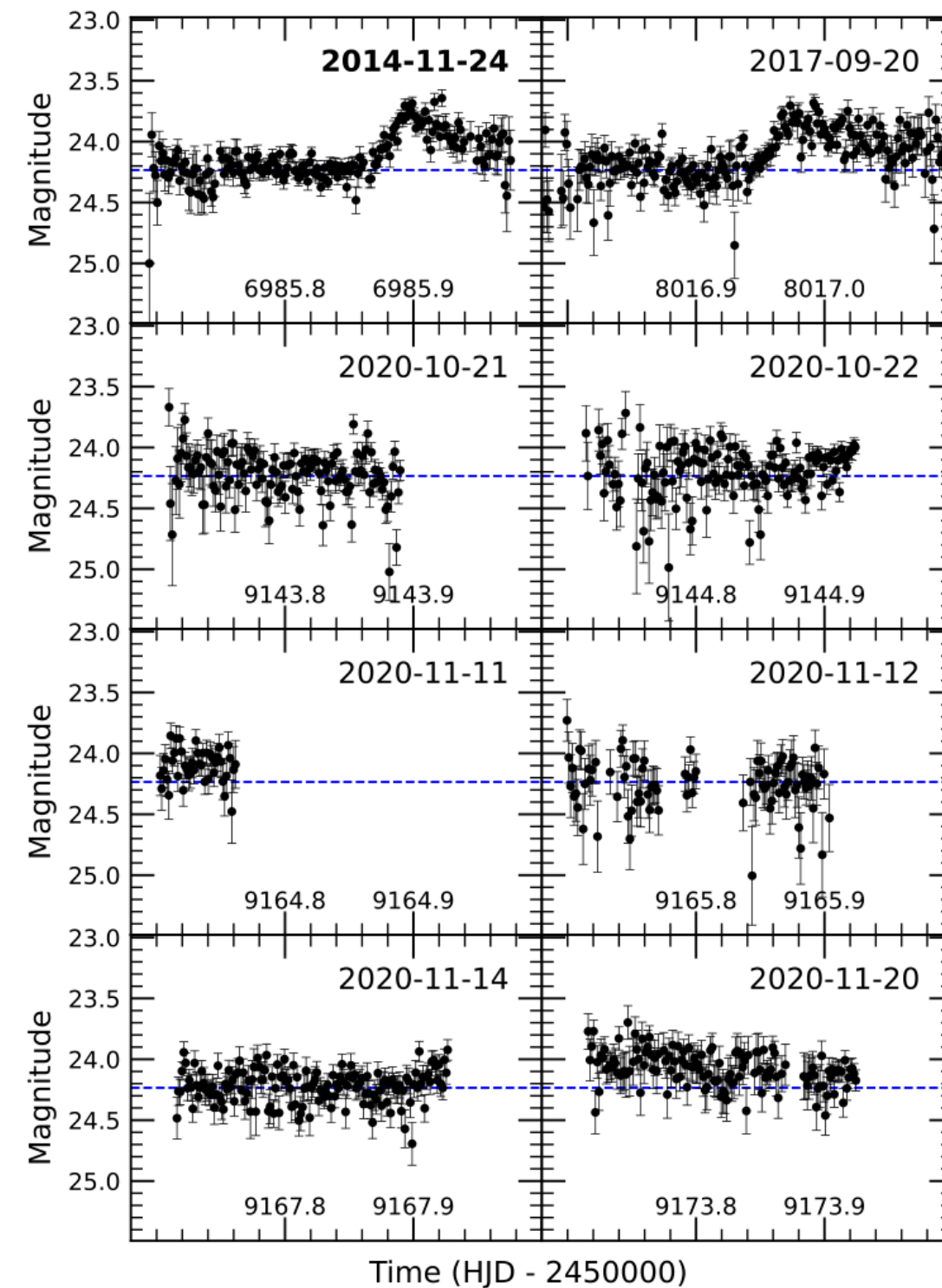
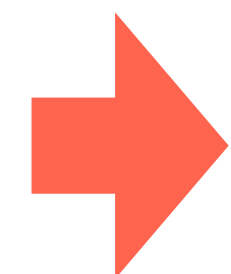
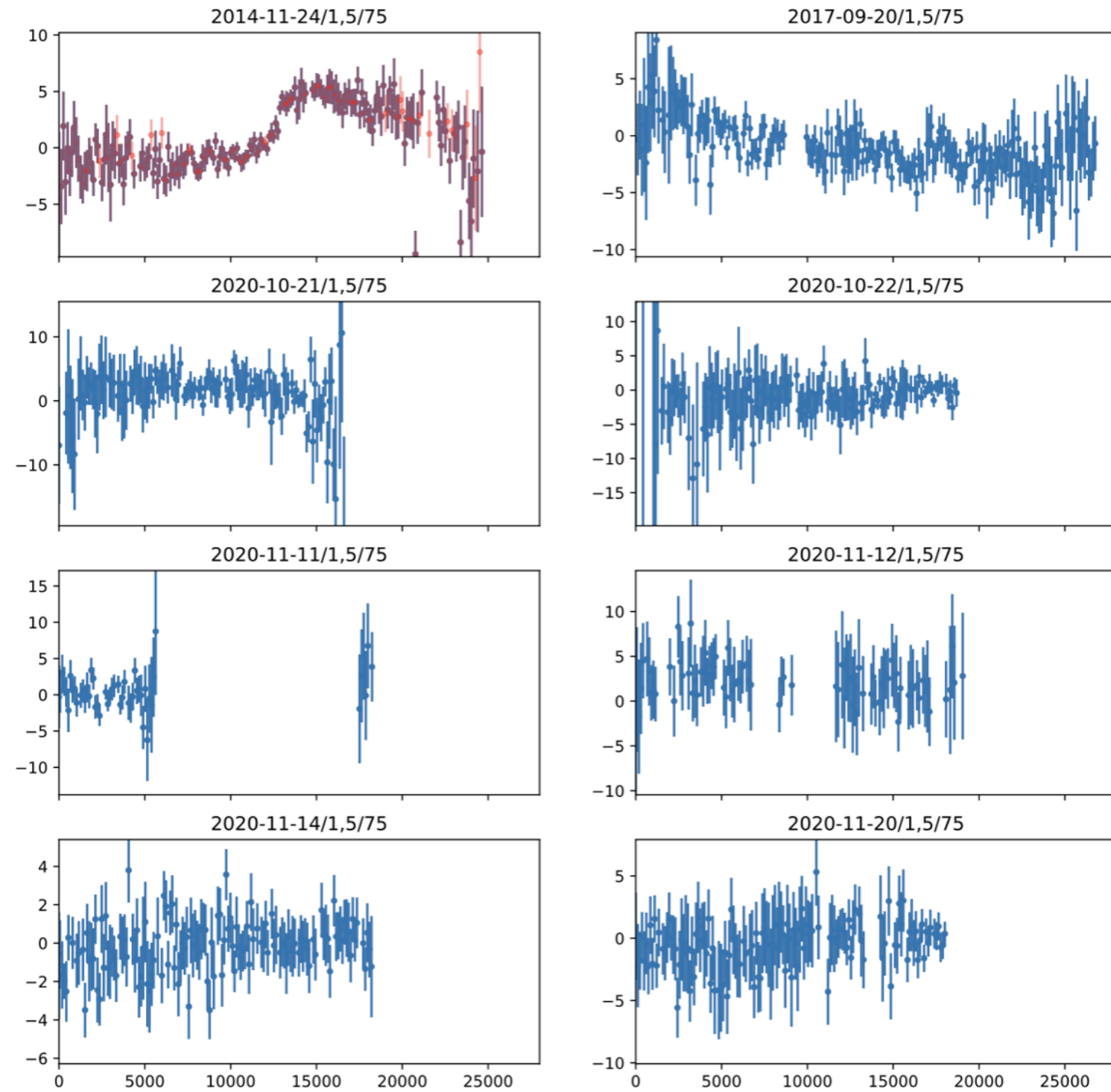


# Case 1 : Independent tests of Microlensing & PBH candidates

## マイクロレンズ & 原始ブラックホール 候補事象の独立検証



S. Sugiyama  
杉山 氏 (IPMU)



Now, we are checking variabilities of these candidates using 24B/25B data.

24B と 25B のデータを用いて 周期変動の有無を独立に検証中

~ 12 event candidates reported from 2014-2020 data

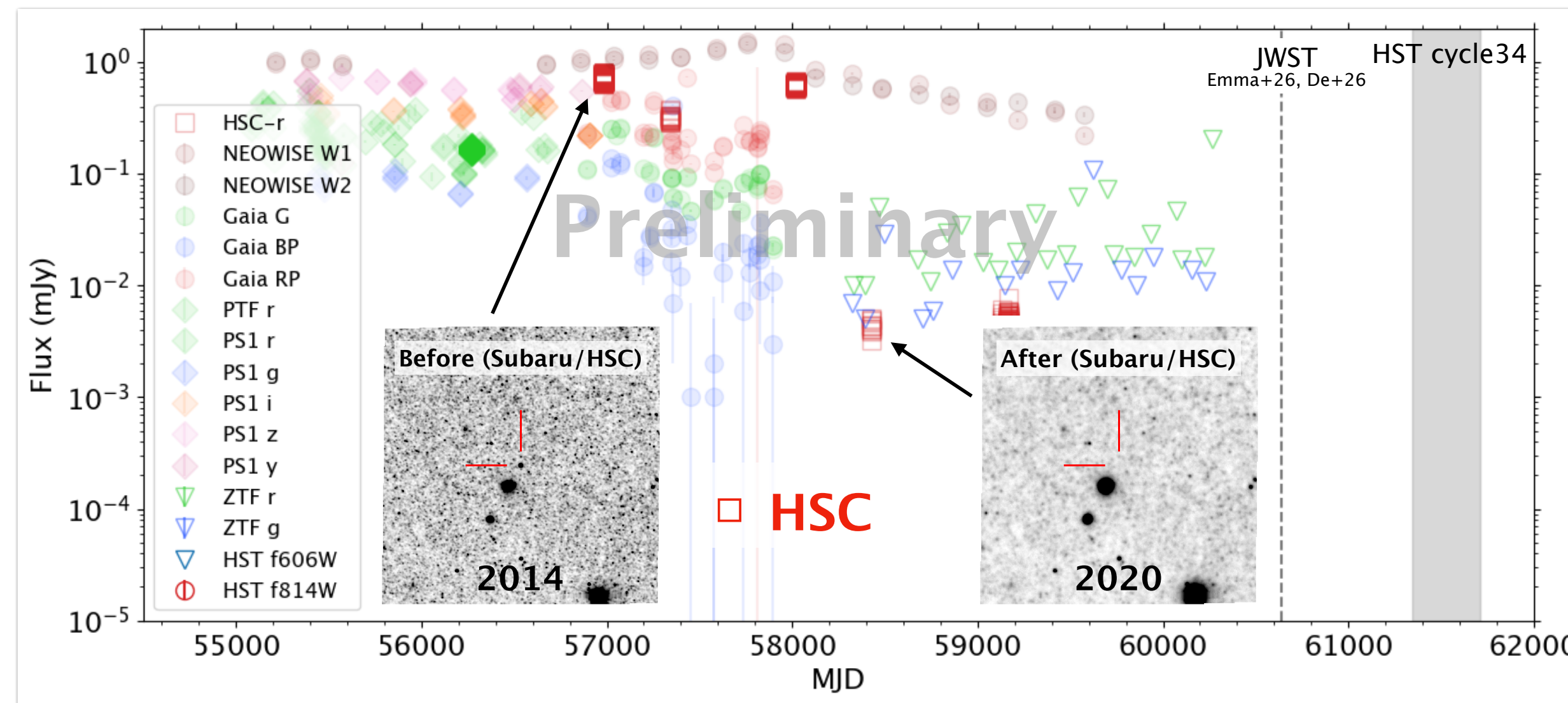
2014-2020年のデータから12事象の候補

Contamination of variable stars ?

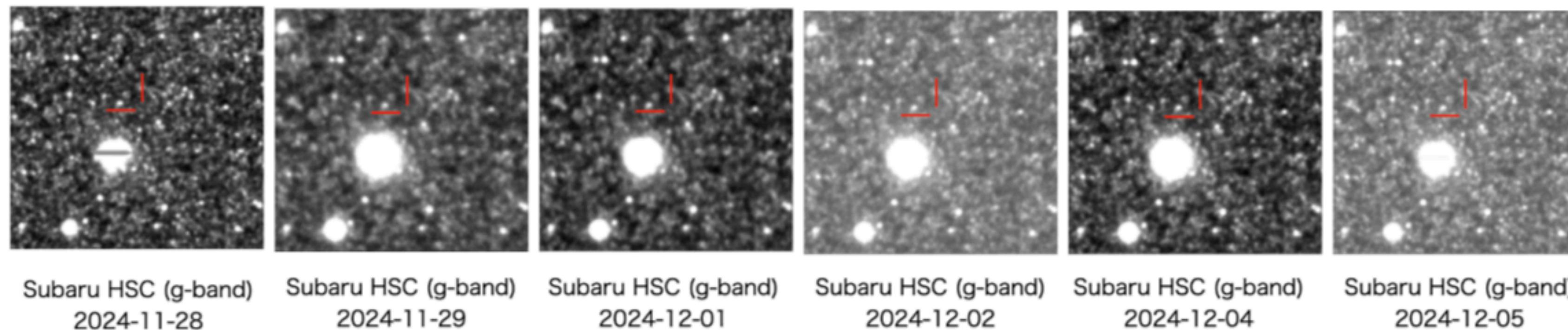
候補は全て変光星だという指摘

# Case2 : Failed supernova candidate in M31 (失敗型超新星候補天体の光度曲線)

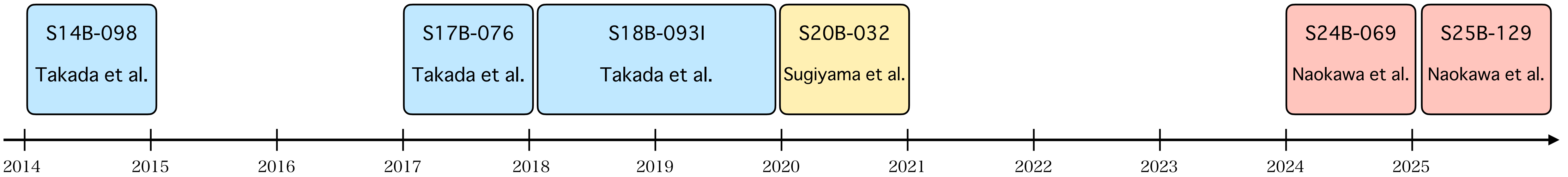
De et al. 2026 + Subaru archive



S. Toshikage  
(Tohoku Univ.)  
敏蔭 氏 (東北大)



# M31 time-domain survey using Subaru HSC (すばる HSC による M31 の時間軸サーベイ)



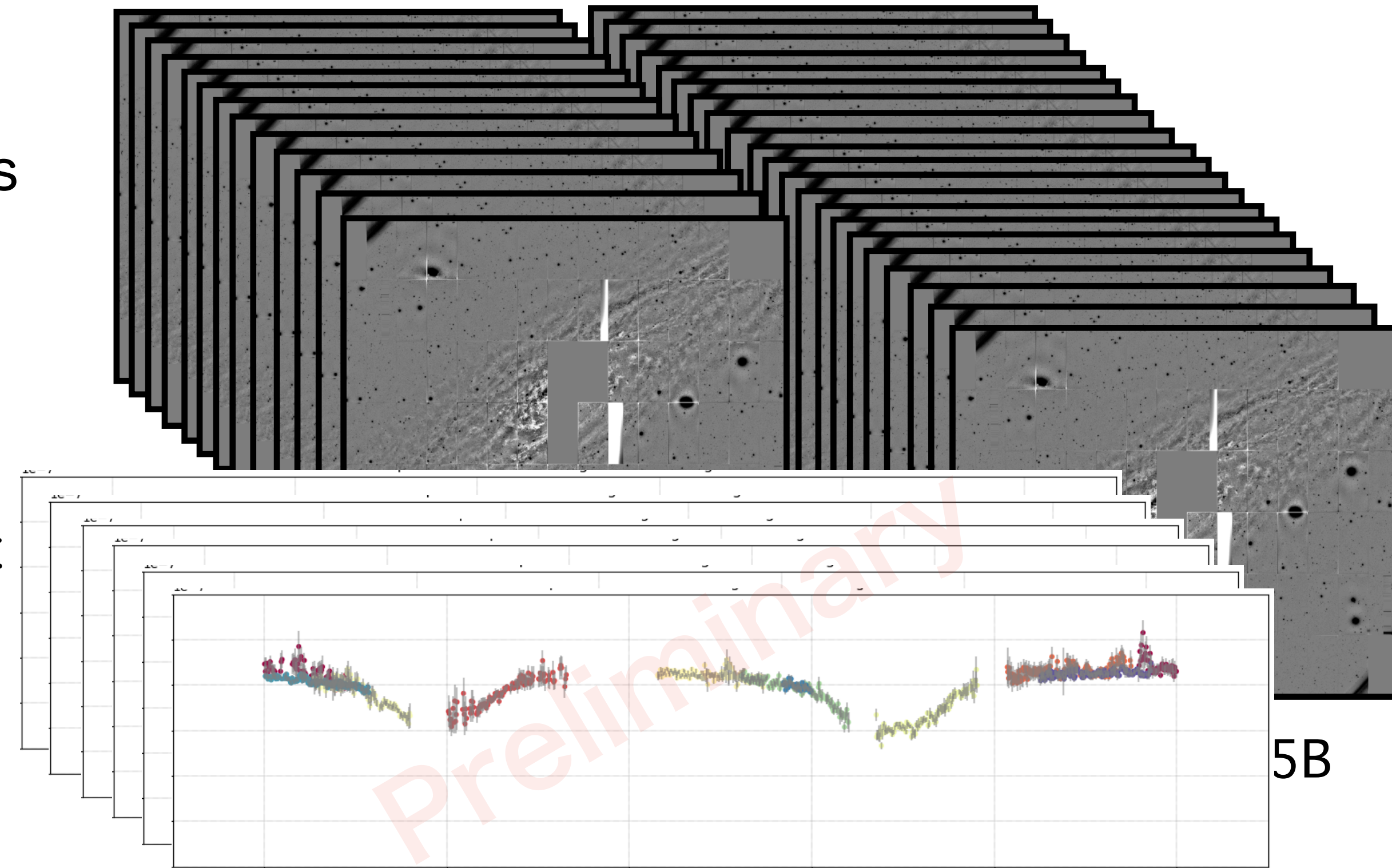
This is a legacy data !!!, but...

The data size is too large. Time domain survey requires specialities, large computational & storage resources.

このような大規模レガシーデータの時間軸解析は  
専門技術 + 計算資源 + 容量 が必要

In the future, we would like to share the science output like light curves with the community. ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒

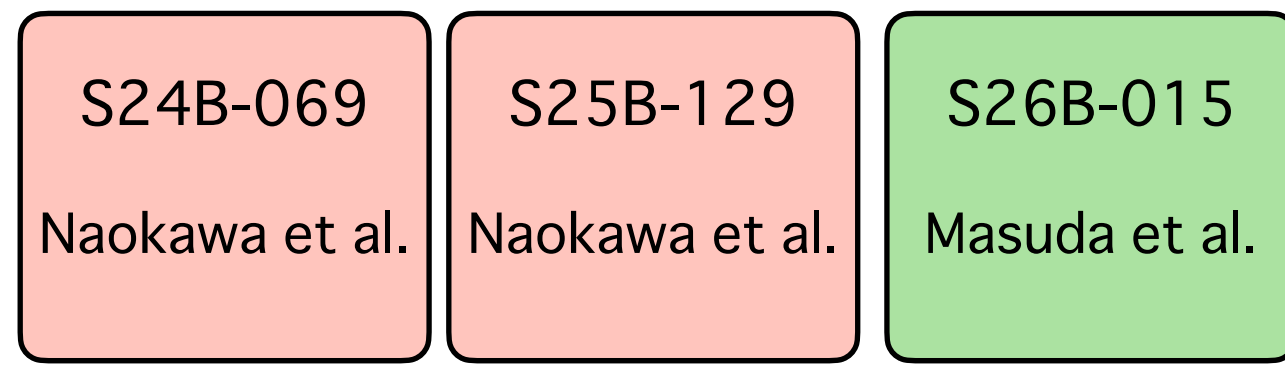
将来的に光度曲線などの生成物時代を公開したい ⇒ ⇒ ⇒



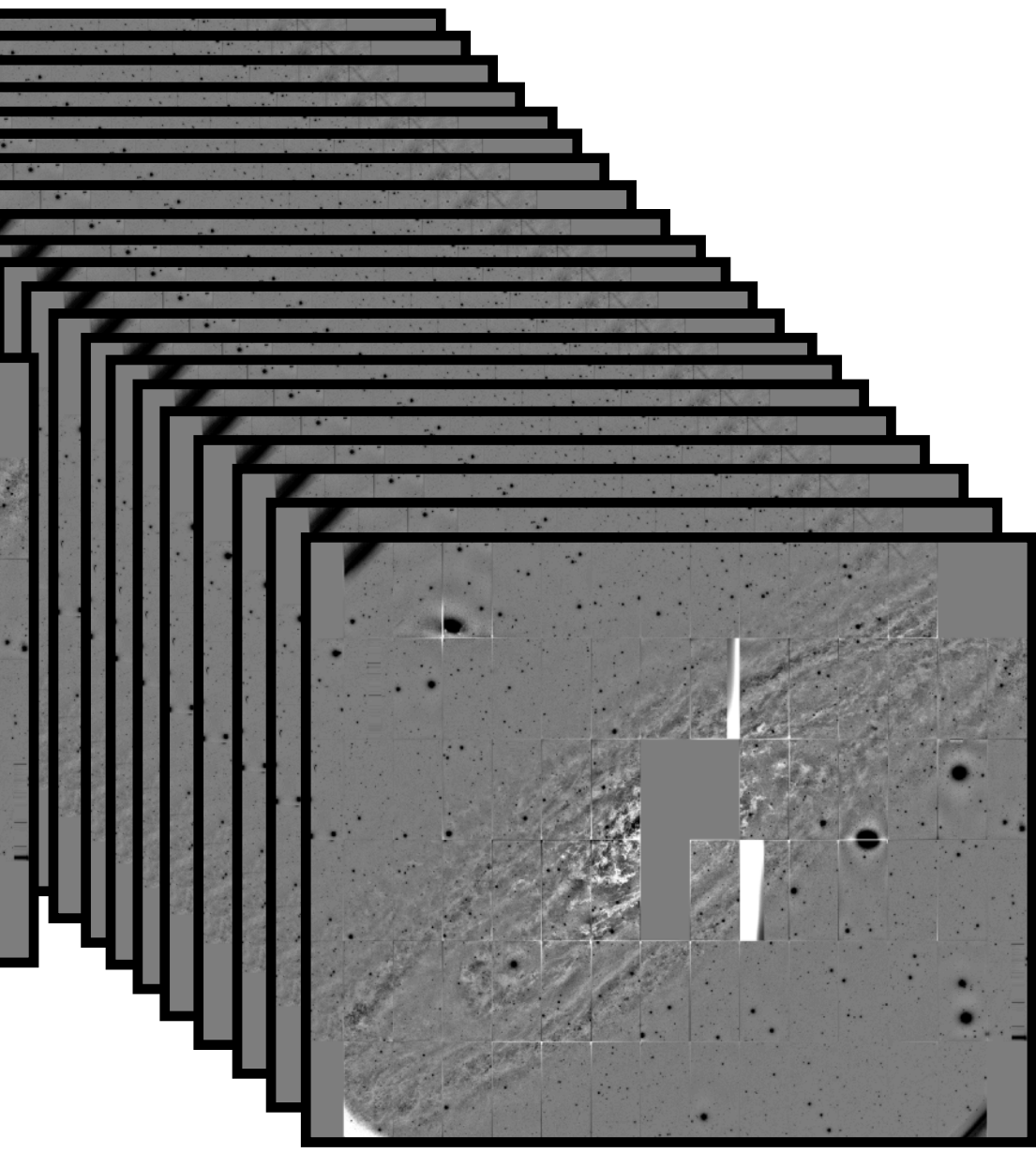
Already started discussions with the Astronomical Data Center (ADC) at NAOJ  
国立天文台 ADC の方々と議論を開始している。

The radec of these known Eclipsing Binaries are from Vilardell et al. (2010)

# M31 time-domain survey using Subaru HSC (すばる HSC による M31 の時間軸サーベイ)

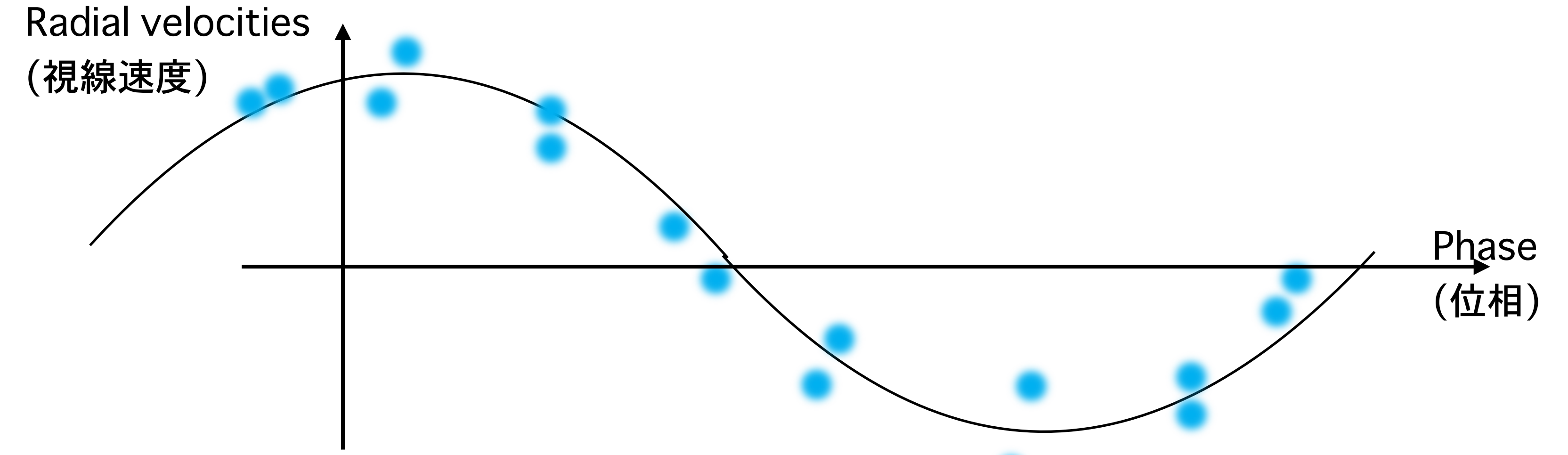


2024 2025



24B + 25B

New 'Ōnohi'ura PFS proposal for radial velocities accepted !!  
4 half nights (視線速度測定のため PFS 4半夜 採択)



For the Radial Velocity observation  
0.25 night × 8 or 0.125 night × 16 is better than 0.5 night × 4  
効率的な視線速度の測定のためには、より刻める観測モードが必要。

One Humble Request to the Committee すばる委員会へのお願い

# Summary

- The largest ever time domain survey of M31 using Subaru HSC.  
すばる HSC を用いたアンドロメダ銀河 (M31) の大規模時間軸サーベイを遂行している。
- We obtained continuous ~2200 visits with 90 sec exposure each in 24B & 25B.  
過去2年間で 90秒露光を 約 2200回 連続的に観測した。
- With archival data, we can explore wide variety time-domain astronomy in M31.  
アーカイブデータも合わせると、M31における様々な時間軸天文学を推進可能。
- In the future, we would like to share the light curves with communities.  
将来的には、光度曲線等をレガシーデータとして公開したい。
- A more flexible mode of PFS ('Ōnohi'ura) is required for cadence observations.  
より時間を刻んだ 観測モードが PFS (オーノヒウラ) に求められている。

Let's establish legacy dataset of M31 in time-domain !