

Tomo-e Gozenで迫る
秒スケールでの可視突発天体探査

東京大学 博士1年

有馬 宣明

2019/07/09

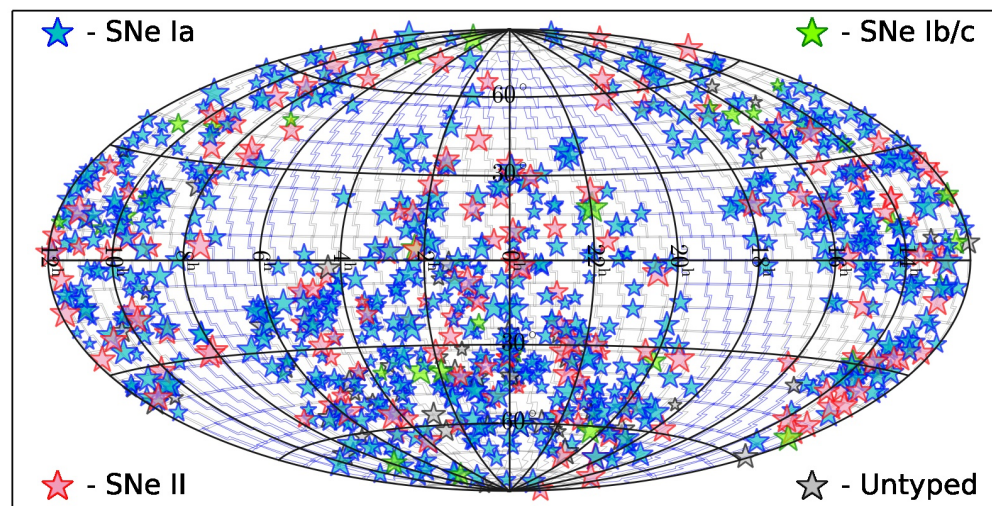
Contents

- 現在の可視突発天体探査
- Tomo-e Gozen の強み
- これまでの2Hz データ観測と結果
- 今後の展望
- まとめ

現在の可視突発天体探査

- 現在稼働中の世界の可視光サーベイ
 - ASAS-SN (All-Sky Automated Survey for Supernovae) 2014～
チリ・中国・豪州・ハワイ・南アフリカなど世界中に24台の望遠鏡
 - ATLAS (The Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System) 2015～
 - ZTF (The Zwicky Transient Facility) 2017～

ほぼ全天をカバー => 多くの超新星、変光星、AGN、小惑星の発見



ASAS-SN ホームページより

現在の可視突発天体探査

- 現在稼働中の世界の可視光サーベイ

- ASAS-SN (All-Sky Automated Survey for Supernovae) 2014～
チリ・中国・豪州・ハワイ・南アフリカなど世界中に24台の望遠鏡
- ATLAS (The Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System) 2015～
- ZTF (The Zwicky Transient Facility) 2017～

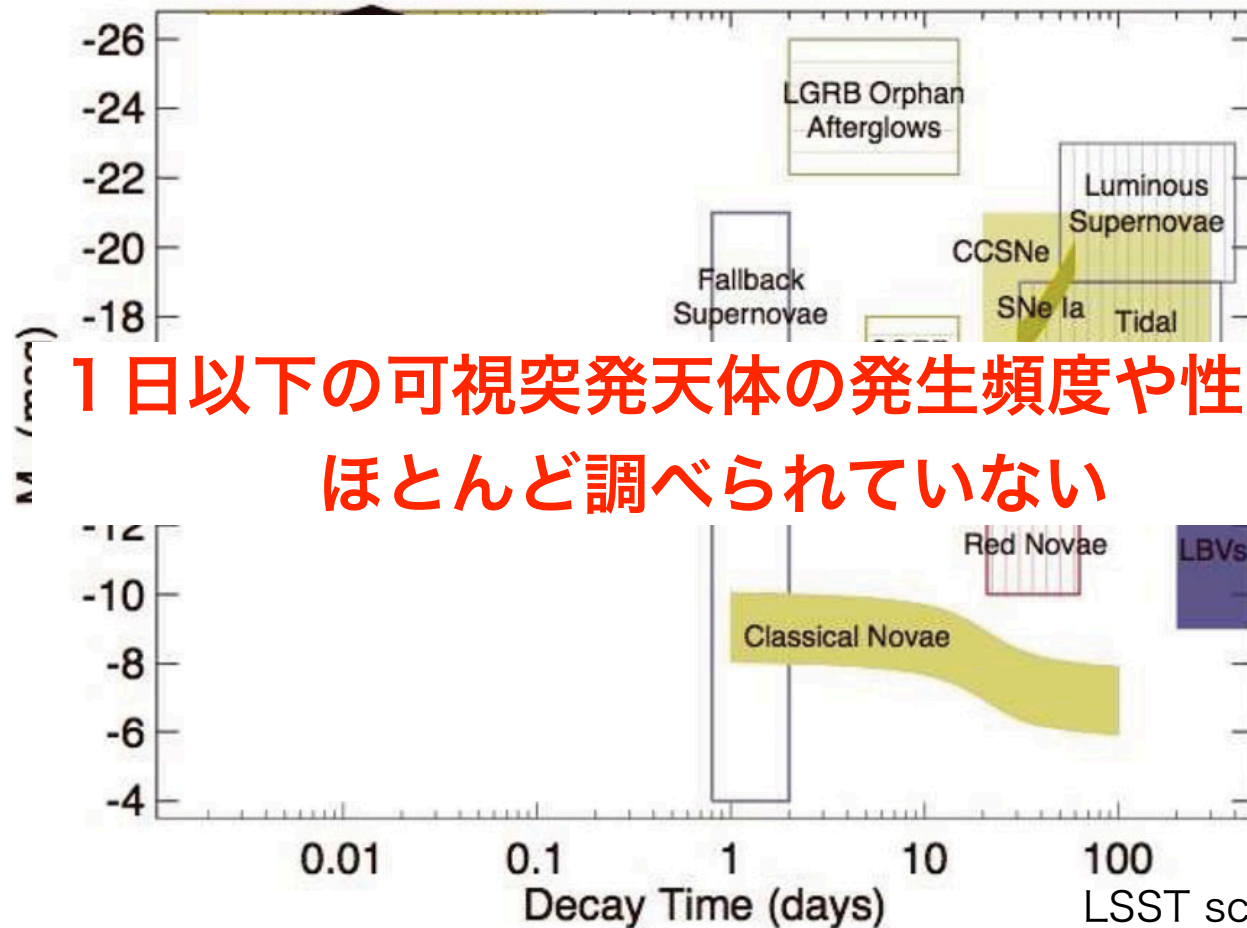
ほぼ全天をカバー => 多くの超新星、変光星、AGN、小惑星の発見

	ATLAS	ASAS-SN	Pan-STARRS	ZTF	LSST	Tomo-e
No. of filters	2	2	5	3	5	-
FoV (deg ²)	30	4.5	7	47	9	20
Survey rate (deg ²)	3000	960	-	3760	1000	3500
5 σ lim. mag in r	19.3	17.3	21.5	20.5	24.7	18
Telescope (m)	0.5	4 x 0.14	1.8	1.2	6.5	1.05
No. of telescopes	2(6)	5	2	1	1	1

現在の可視突発天体探査

- ターゲット天体の光度変動タイムスケール
=> 数日、ないしは数時間より長いものに最適化された観測戦略

A phase space of optical transients



1日以下の可視突発天体の発生頻度や性質は
ほとんど調べられていない

LSST science book 2009より

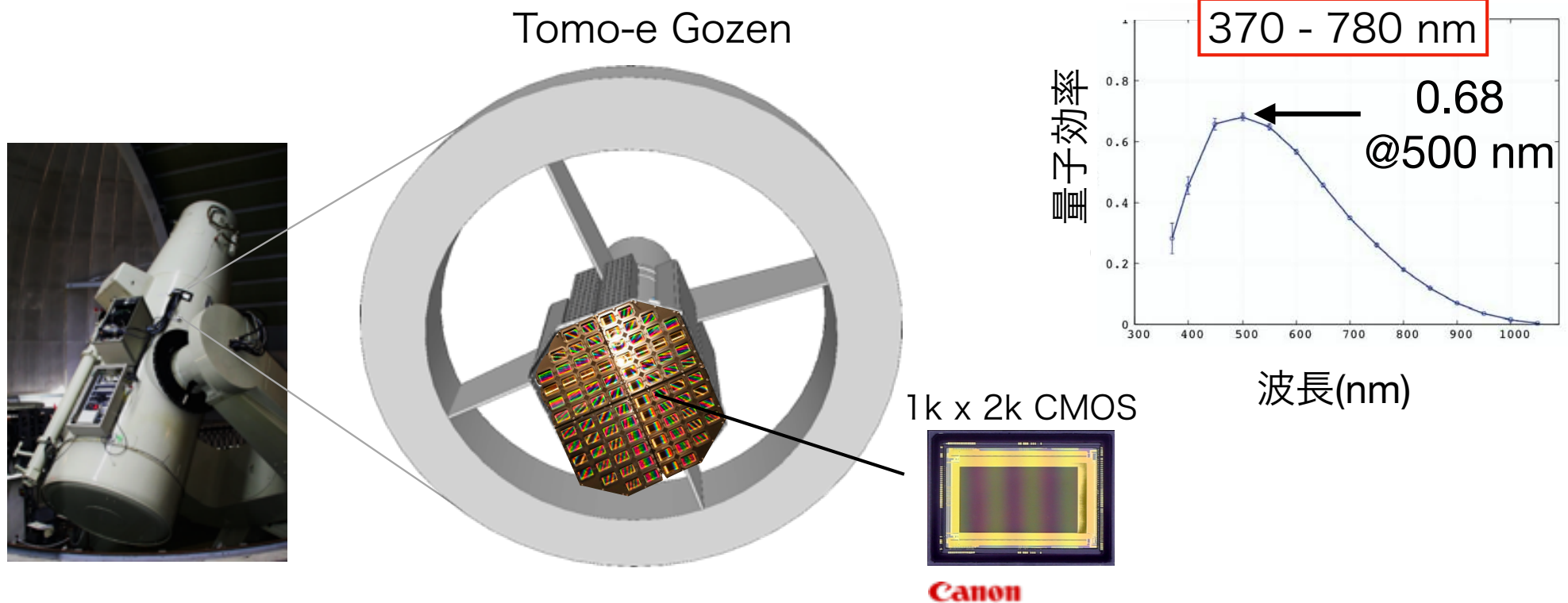
これまでの可視突発天体探査

- 秒スケールでの光度変動を示す現象
=> 可視光突発天体観測のフロンティアと言える
- 原理的には、1露光あたりの時間間隔 = 探査可能なタイムスケール
- CCDの読み出し時間による制約：典型的に10~20秒程度かかる

Tomo-e Gozen は秒スケールでの探査を可能にする！

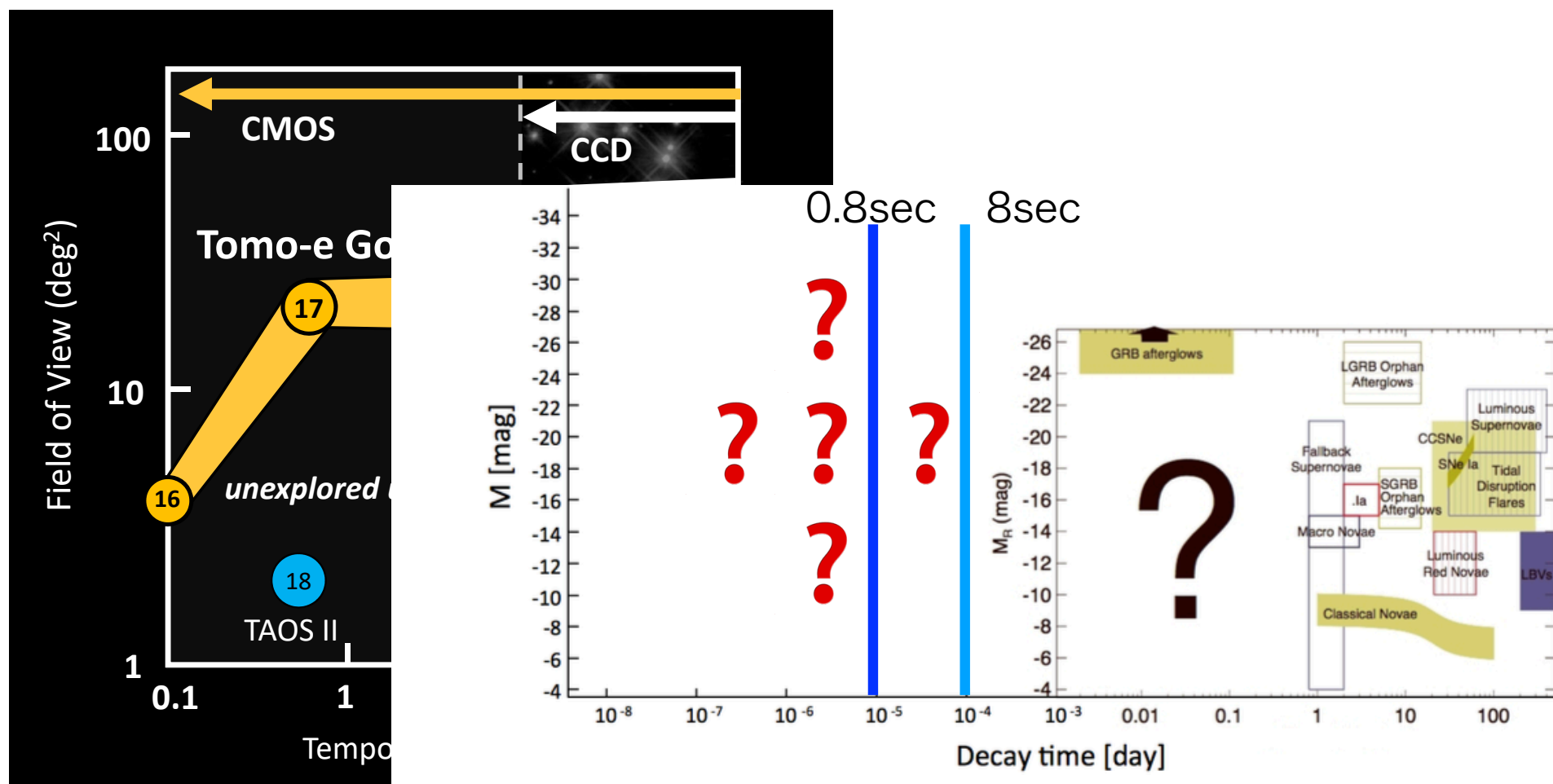
Tomo-e Gozen の強み

- CMOSセンサによる最大2Hz 高速読み出し (full-frame読み出し時)
=> 可視光のサーベイ望遠鏡では初のCMOSカメラ
- 20 deg^2 という広視野 (直径9 deg)
=> 可視望遠鏡ではZTF(47 deg^2)、ATLAS(30 deg^2)に次ぐ



Tomo-e Gozen の強み

- Tomo-e にしかできないサイエンス
=> 広視野 x 2Hz 高速撮像



(c) 菊池修論2016より一部改変

これまでの2Hz データ観測と結果

- Tomo-e PM(プロトタイプ)による試験観測 (2016年度 菊池修論)

目的: FRB(Fast Radio Burst)の可視光成分の検出

- FRBとは

✓ 継続時間が 0.1-10 ミリ秒で Flux = 0.1-1 Jy @GHz

✓ 視線方向の自由電子の量($DM = \int n_e ds = 300-1500 \text{ pc cm}^{-3}$)

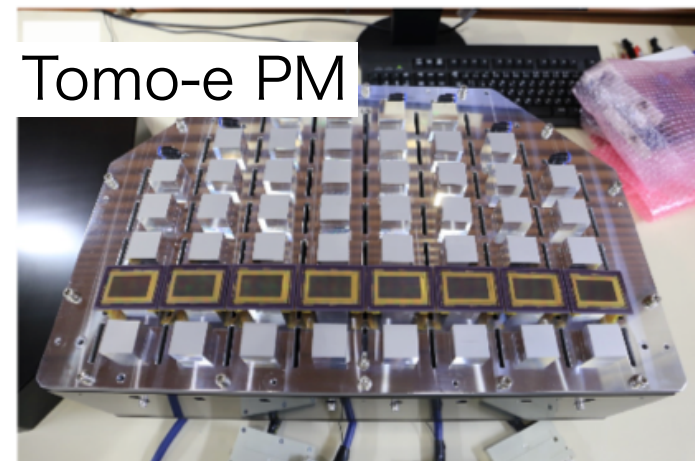
=> 宇宙論的距離に由来

✓ 頻度 $\sim 10^3-10^4$ /sky/day

- Tomo-e PM: CMOSセンサを8チップ搭載したTomo-e 試作機

=> FoV は約 1.9 deg^2

- 銀河面から離れた特定の領域の
2Hz による定点モニター観測

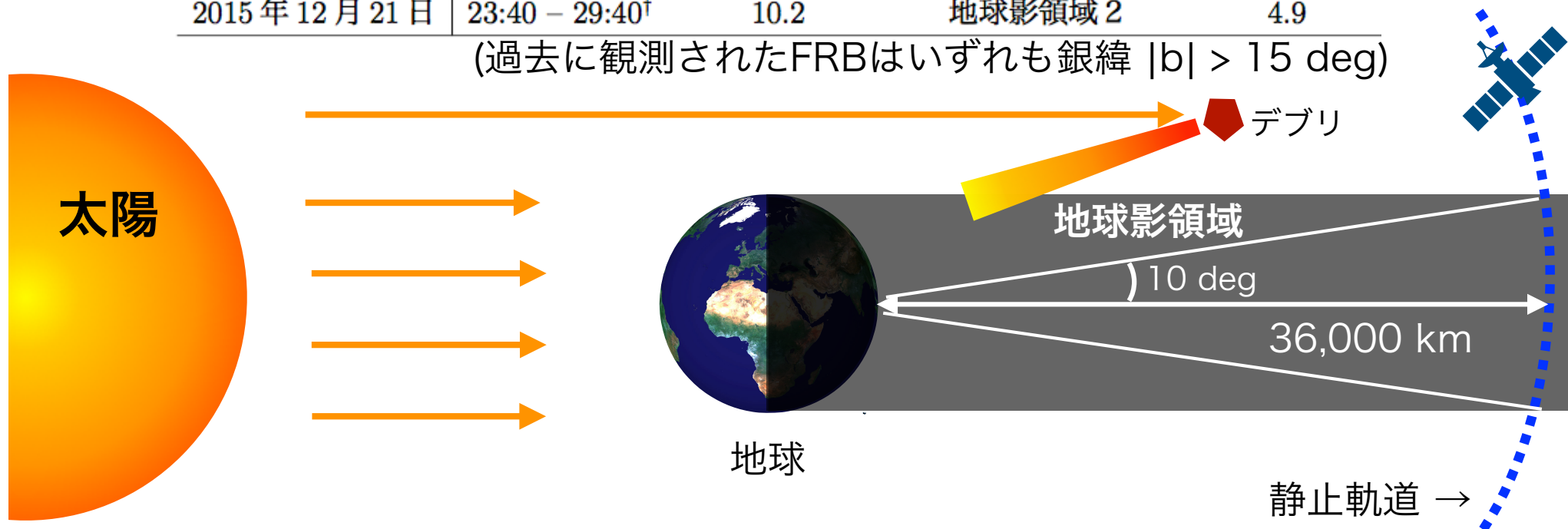


これまでの2Hz データ観測と結果

- Tomo-e PM(プロトタイプ)による試験観測 (2016年度 菊池修論)

日付 (JST)	時刻 (JST)	月齢 (24時)	観測領域	観測時間 [h]
2015年12月7日	19:30 – 22:40	25.9	高銀緯領域	3.2
2015年12月7日	28:00 – 30:00	25.9	おとめ座銀河団領域	2.1
2015年12月8日	20:30 – 23:20	26.9	高銀緯領域	2.8
2015年12月8日	27:30 – 28:50	26.9	おとめ座銀河団領域	1.3
2015年12月18日	19:20 – 23:10	7.2	地球影領域1	3.8
2015年12月19日	19:00 – 27:40	8.2	地球影領域2	8.6
2015年12月21日	23:40 – 29:40 [†]	10.2	地球影領域2	4.9

(過去に観測されたFRBはいずれも銀緯 $|b| > 15 \text{ deg}$)



これまでの2Hz データ観測と結果

- Tomo-e PM(プロトタイプ)による試験観測 (2016年度 菊池修論)
地球影領域 1 (RA: ± 4 deg)と領域2 (RA: 13-21 deg)
 - 太陽光の反射によって光る人工天体やスペースデブリの検出の除去
 - 高軌道にあるものほど見かけの速度が遅い => 点源のように映る

高度 [km]	影半径 [deg]	地球影領域 1	地球影領域 2	備考
2000	-	×	×	低軌道
5000	65.2	×	×	
10000	36.5	×	×	
20182	18.2	×	△	GPS 衛星軌道
35786	10.2	×	○	静止衛星軌道

- 連続したフレームの差分画像から探査 => 計1,423イベントが検出
=> 流星:596, cosmic ray:460, 人工天体:260, 電氣的なエラー: 93,
その他: 14 (内9イベントが 周囲0.3'以内のSDSS 銀河に隣接)
- 地球影領域 1 でも 1 つのフラッシュ候補天体を発見! (約 2 ヶ月の観測)

これまでの2Hz データ観測と結果

- Richmond et al. 2019 (in prep.)
Tomo-e PMによる2Hz データを用いた秒スケール(1.5-11.5 秒)での突発天体探査
- 2016年3月~4月の計 8 晩の地球影領域の観測
=> 約48時間分の2Hz データを取得
- 360枚の連続したフレーム(=180秒分)に対し主に以下の方法で探す



検出回数が
3回以上20回以下



検出間隔が
3フレーム以上
開かない



($m + 1$)等級
よりも明るい
 m : 限界等級

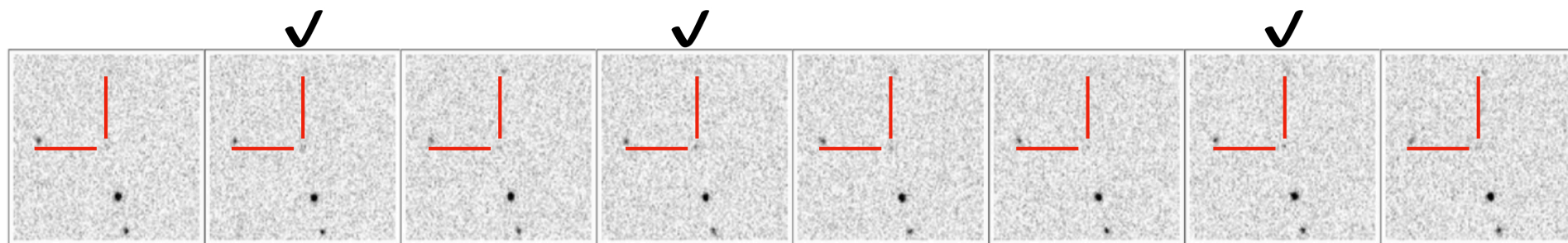


最も近い天体から7
pixels (8.3")
以上離れている

=> 57個の突発天体候補が残った

これまでの2Hz データ観測と結果

- 57個の突発天体候補
 - その多くが限界等級よりもわずかに暗い「普通の星」
- 2MASSとDigitized Sky Survey の画像に全ての counterpart が存在
=> シーイングが良くなった瞬間に運良く数フレームで受かったもの



Michael+2019(in prep.)

Fig. 5. Cutouts centered on a candidate of March 30, 2016. The object was detected in the second, fourth, and seventh images in this sequence, but is present in all of them. Each cutout is 130 arcseconds on a side, with North up, East left. Time runs from left to right.

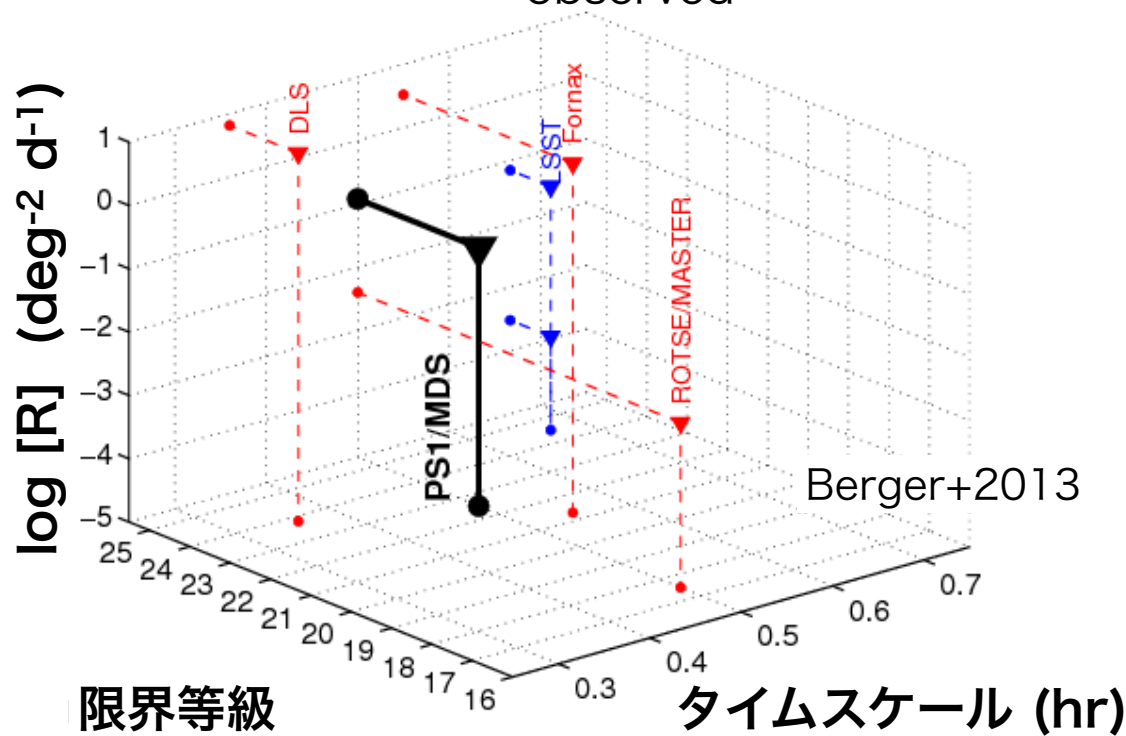
- 残りの少数は、非常に悪いシーイングにより本来の位置からオフセットした位置に現れた明るい星

これまでの2Hz データ観測と結果

- 可視光秒スケール突発天体の個数の制限

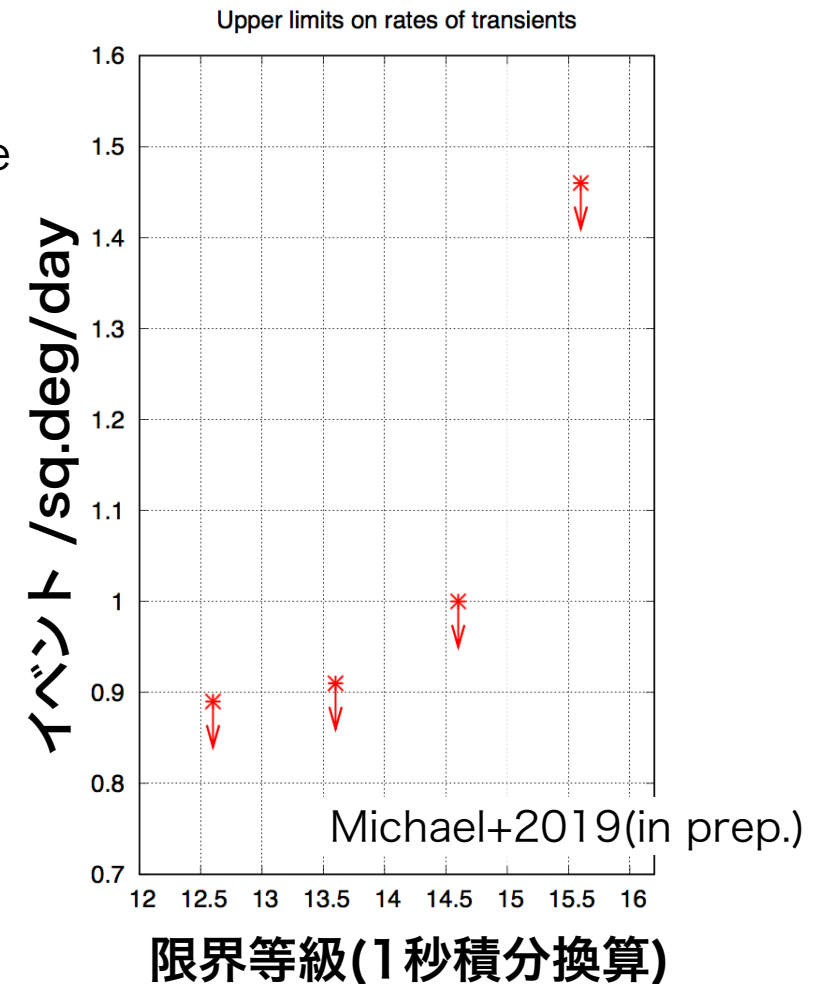
$$R = N/E_A$$

events deg⁻² day⁻¹ # of events observed areal exposure



Fluence*	V = 12.6	V = 13.6	V = 14.6	V = 15.6
Rate	0.89	0.91	1.00	1.46

* Equivalent limiting mag in 1-sec exposure.



今後の展望

- Full Tomo-eでの観測
 - 現時点では地球影領域0.5 時間のデータのみ(2019/05/29)
 - 梅雨の期間(6~8月)にはサーベイ観測がしにくい
 - => 一時的に晴れた時間を狙ってモニター観測をしてデータを集める
- 地球影領域で発見した1つのTomo-e フラッシュ
 - => 観測時間を数倍にしたら増えるか？
- (84 chips) x (5 hours) ~ 4×10^2 [chip * hour] ~Richmond+19
 - 10 days: (50 hours) ~ 4×10^3
 - 100 days: (500 hours) ~ 4×10^4

timescale	< 0.5 sec	1.5-11.5 sec	e.g.) 1min
Tomo-e PM	菊池修論	Richmond+19	
Full Tomo-e	(予定)	(予定)	(予定)

まとめ

- 2Hz 連続観測は(今の所)Tomo-e にしかできない突発天体探査
=> 未だ探査されていない新たなパラメータスペース
(今現在はTomo-e の独り舞台。実際、ZTFグループも羨んでいた)
- Full Tomo-e による観測はTomo-e PMの視野の10倍
=> 観測時間がプロトタイプの1/10倍でデータが溜まる
- 地球影領域を積極的に観測する
=> 太陽光の反射による人工天体やデブリの検出を排除できる
- Tomo-e PMで発見した地球影領域でのTomo-e フラッシュ
=> Full Tomo-e による観測でデータを集め、統計的に検証する