

木曾Tomo-e Gozenによる短時間変動現象の探査

さこう しげゆき

酒向 重行（東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター、次世代ニュートリノ科学・マルチメッセンジャー天文学連携研究機構）

にいのう ゆう

新納 悠（東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター）

Tomo-e Gozenコラボレーション



東京大学大学院 理学系研究科附属 天文学教育研究センター



木曽観測所

長野県木曽郡

1.0mシュミット望遠鏡

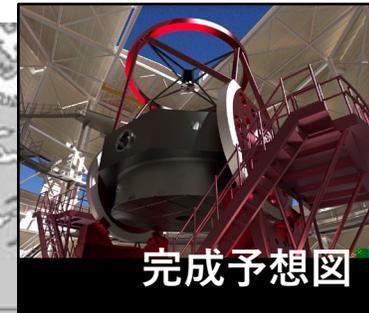


アタカマ観測所

チリ共和国アタカマ高地, 標高5,640m

東京大学アタカマ天文台(TAO)

6.5m望遠鏡 (2024年度完成予定)

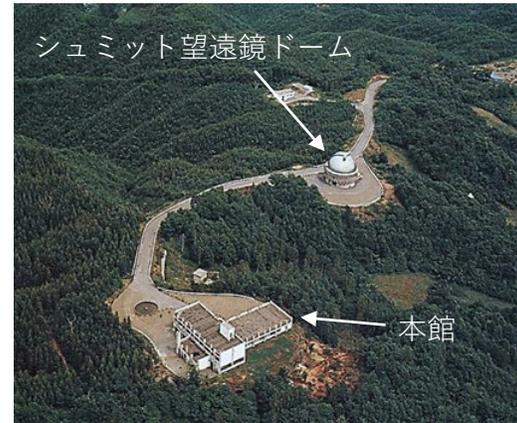


本部

東京都三鷹市

観測所施設

- 1974年設立
- 暗い空, 標高 1132 m
- 研究室, 実験室, 宿泊施設, 食堂
- 常駐スタッフ 6名



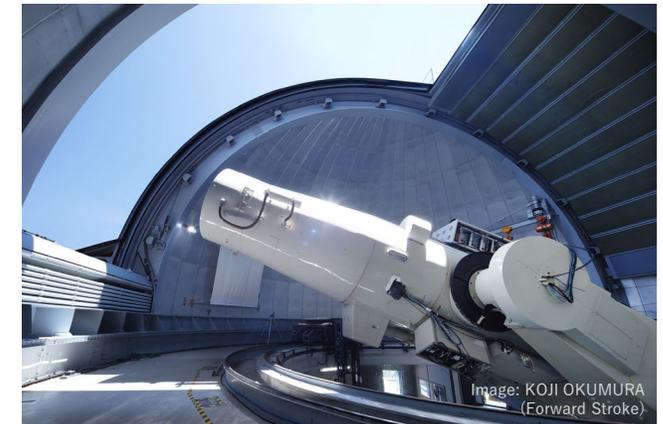
105 cmシュミット望遠鏡

- 超広視野 $\phi 9^\circ$
- 主鏡 $\phi 150$ cm球面
- 補正レンズ $\phi 105$ cm
- F比 3.1

大学共同利用は2017年に終了
現在、共同研究ベースで運用中



シュミット望遠鏡ドーム



105 cmシュミット望遠鏡

1. Tomo-e Gozen計画の概要

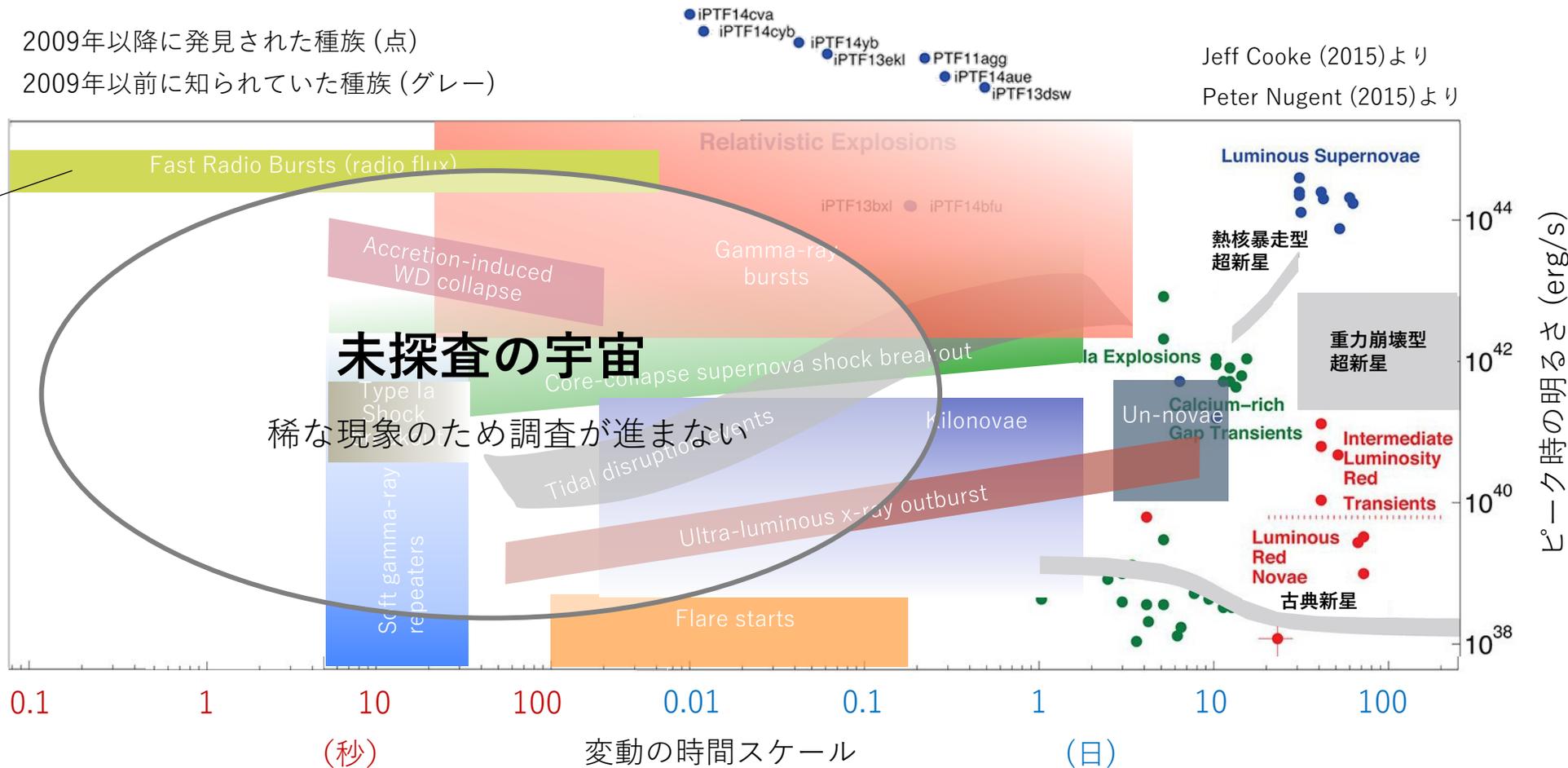
宇宙の短時間変動に着目した天文学を「タイムドメイン天文学」とよぶ

可視光で明るさが変動する天体

2009年以降に発見された種族 (点)
 2009年以前に知られていた種族 (グレー)

Jeff Cooke (2015) より
 Peter Nugent (2015) より

理論
 モデル



宇宙の短時間変動に着目した天文学を「タイムドメイン天文学」とよぶ

可視光で明るさが変動する天体

2009年以降に発見された種族 (点)

2009年以前に知られていた種族 (グレー)



Peter Nugent (2015)より



世界初の**広視野動画カメラ**による高頻度の時間軸サーベイ

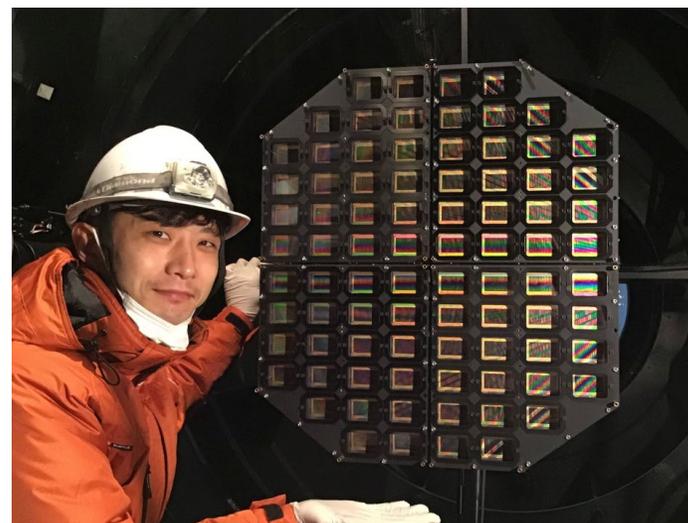
T O M O E G O Z E N



Sako et al. 2018

カメラ概要

- 視野 20平方度
- 84台のCMOSセンサ (190メガ画素)
- 2フレーム/秒の動画
- 可視光単色
- 2019年10月より観測開始



望遠鏡焦点に搭載されたトモエゴゼンカメラ
84台のCMOSセンサが並ぶ



東京大学木曾観測所
105cmシュミット望遠鏡
Image: KOJI OKUMURA
(Forward Stroke)



「巴御前出陣図」
東京国立博物館蔵
Image: TNM
Image Archives

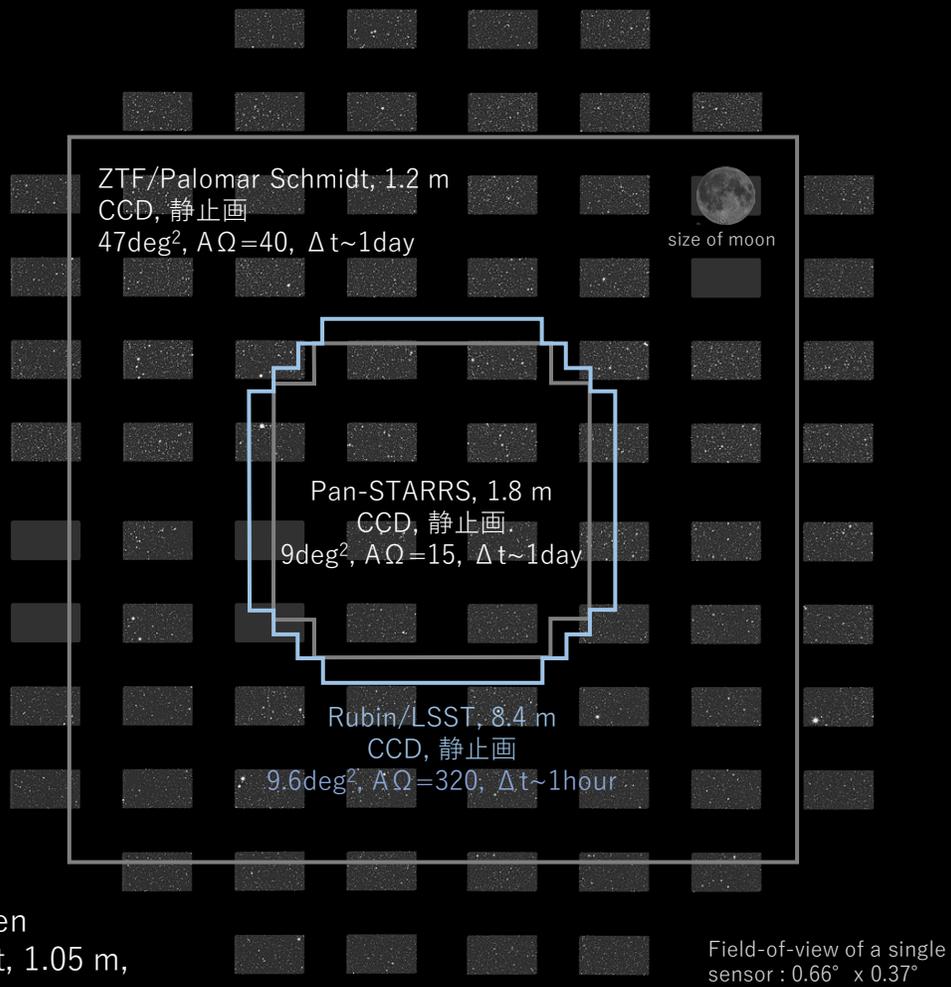
データの出力と処理

- 毎夜30TBの画像ビッグデータ
- カメラと直結したオンサイトの計算処理システム
- CPU 200コア, ストレージ 1PB
- 機械学習・最適化アルゴリズムによる逐次処理とアラート生成
- SINET6に接続



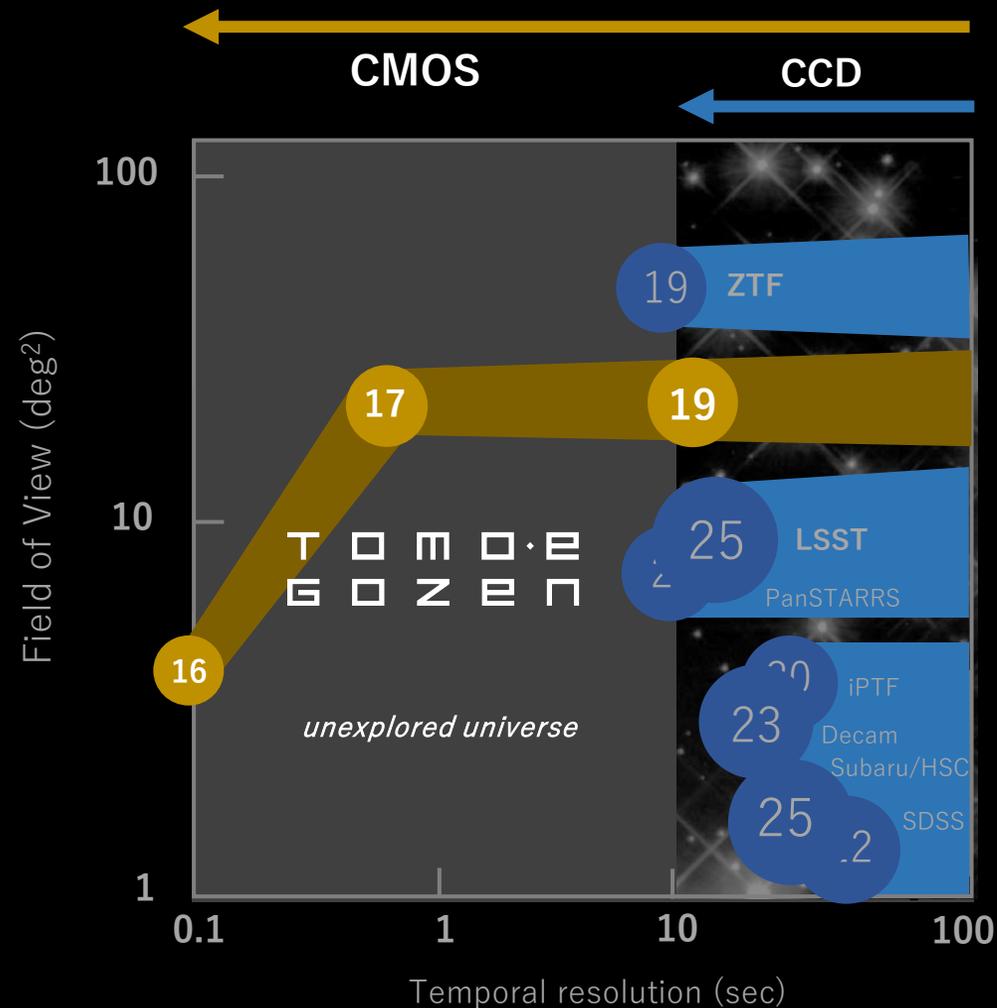
トモエゴゼン計画の研究グループ, 約50名が参加

視野の比較



Tomo-e Gozen
Kiso Schmidt, 1.05 m,
CMOS, 動画
20deg², AΩ=28, Δt>sub-sec

突発現象の探査能力



The numbers in the circles show limiting magnitudes.

Tomo-e Gozenによる秒スケールの全天動画サーベイ

データの取得方法

- 気象条件の自己判断による「自動スケジューリング+自立運転」, 「遠隔操作可」
- 20平方度/ポインティング, 0.5秒 x 18フレームの動画
- 晴天夜のほぼ毎日 (年間~100夜)

サーベイ領域

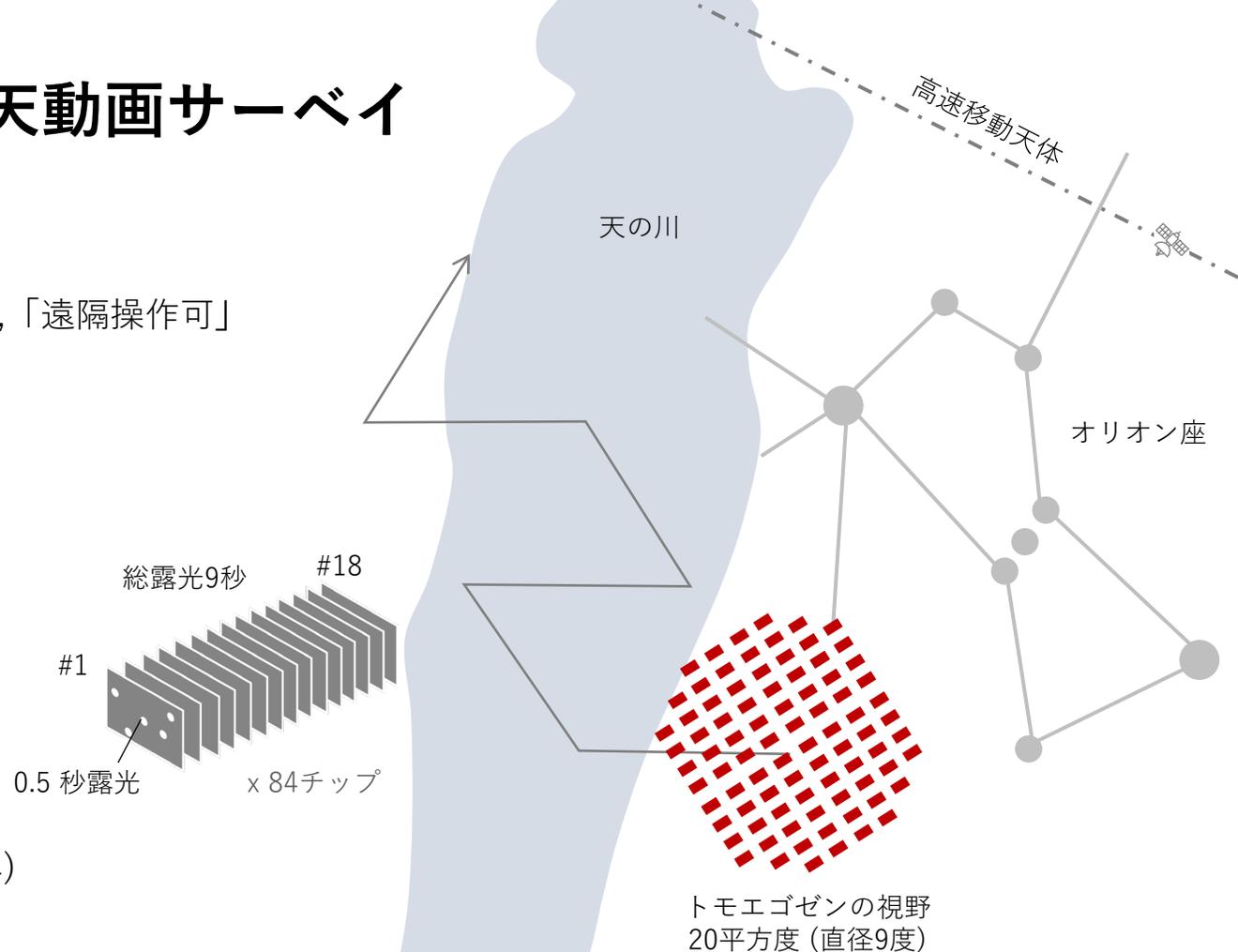
1. 12,000平方度 (全天, 高度 $>35^\circ$), 1回/夜, 3時間で完了
2. 3,000平方度 (深夜南中領域), <10 回/夜 (高頻度)

達成感度

- <17 等級, <18 等級 (スタック時), 3秒角分解能 (シーイング限界)
- 1回の全天スキャンで**約1億天体を検出**

空の広域を動画にて高感度・高解像度で監視する世界唯一のデータ

特定の天体を狙っているわけではない。対象は夜間の「空」。



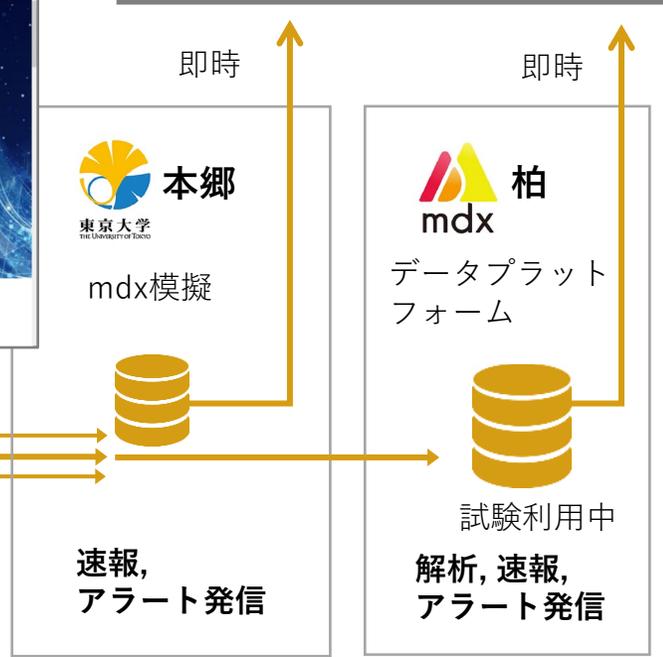
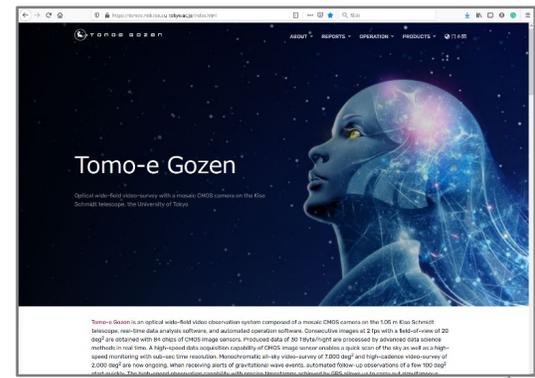
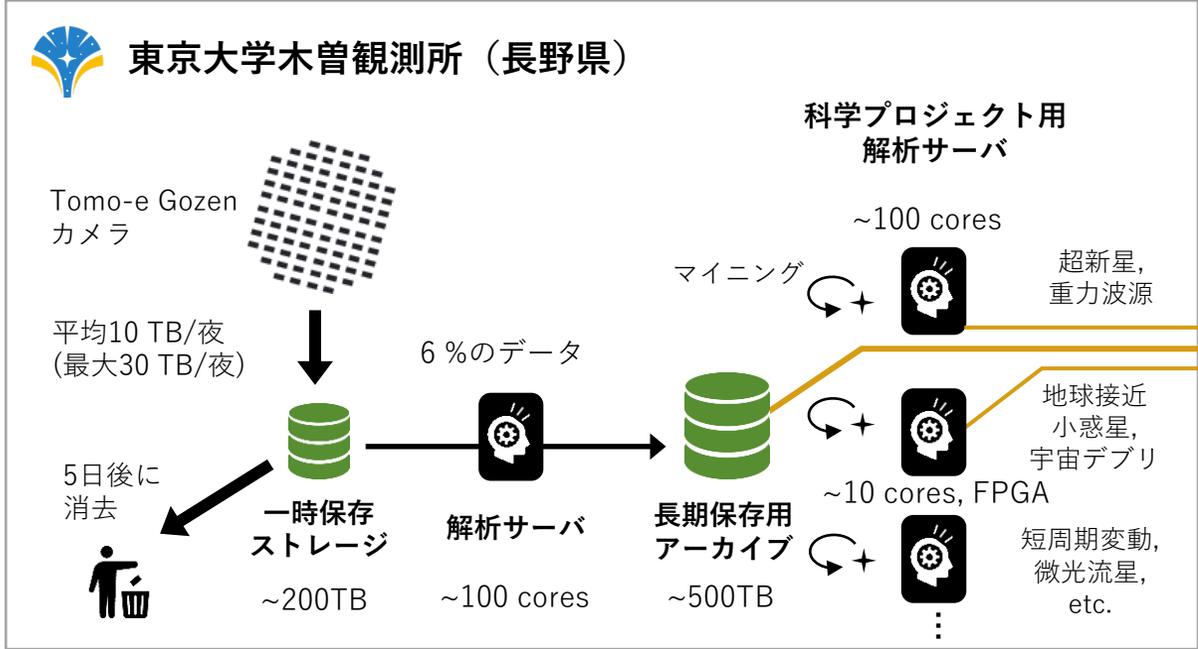
1台のCMOSセンサで取得した動画データ, 2 frames/sec



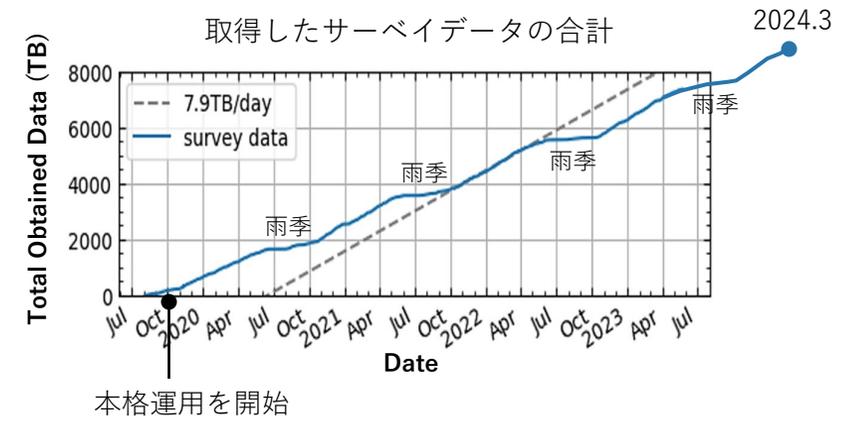
Tomo-e Gozenのデータフロー

データの一部を公開（共同研究者へは即時に全公開）
<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/>

インターネット



データ取得3年後から順次公開



機械学習モデルによる突発現象の検出の高精度化

過去のサーベイ画像と比較することで突発現象を検出。

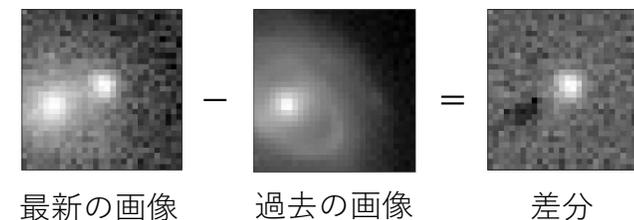
問題点

- Tomo-e Gozenの広域サーベイデータの中には、1夜に**~10件**の突発現象が含まれるが、**~10⁶件**の誤検出が発生する。

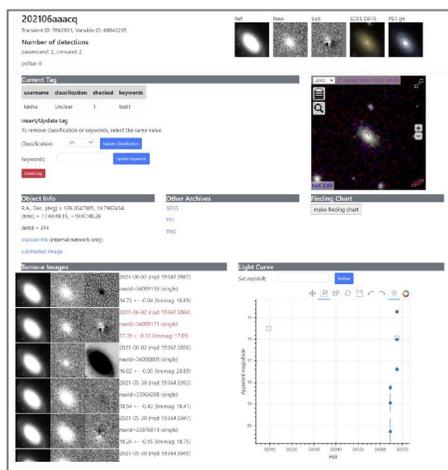
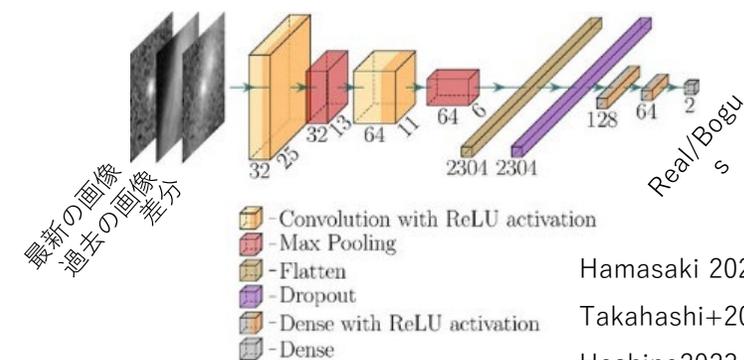
対策

- **機械学習モデル(CNN, VAT)**でReal/Bogus分類 → **誤検出を~10²件に低減。**
- 天体カタログの情報を併用した**機械学習モデル(Random forest)**で精度を更に向上。
- 観測後の数分以内に情報公開

超新星の検出例



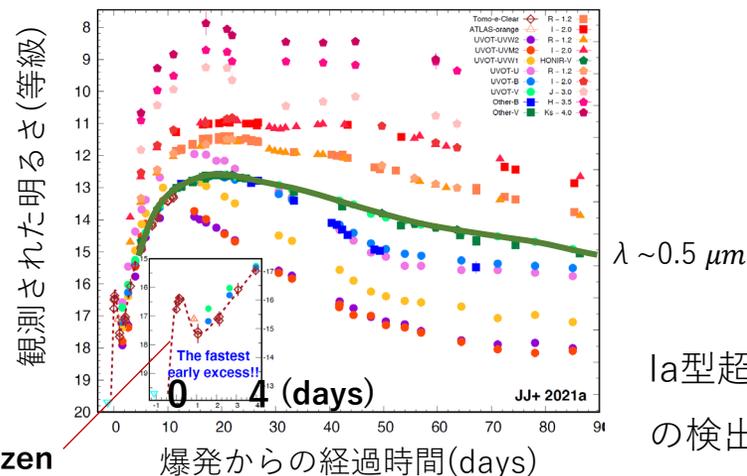
畳み込みニューラルネットワーク(CNN)によるReal/Bogus分類モデル



突発現象候補を確認するためのウェブビューア

Tomo-e Gozen

SN 2020hvfのライトカーブ



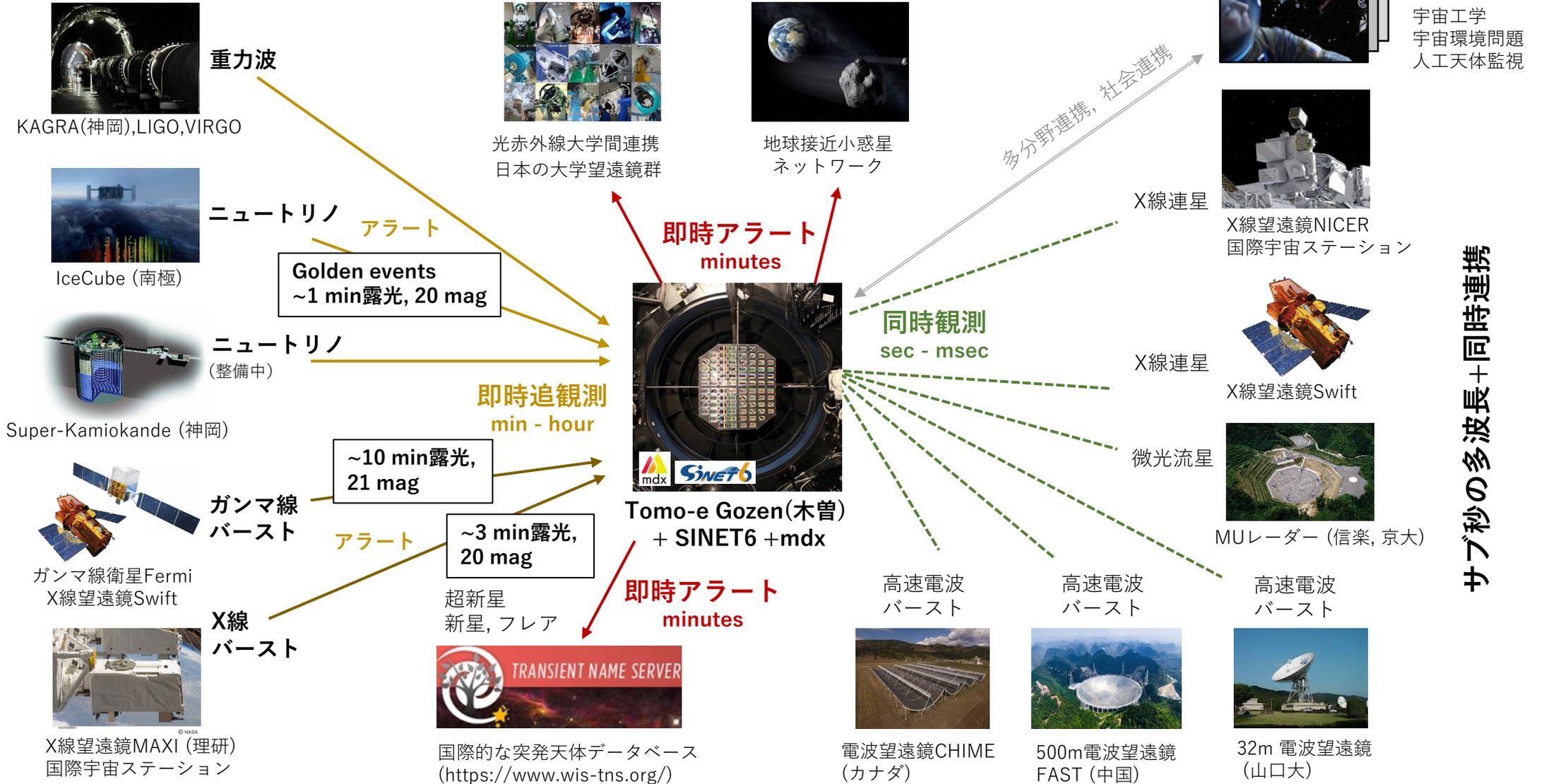
SN 2020hvfの想像図



即時の情報共有によるタイムドメイン観測の連携

マルチメッセンジャー

高エネルギー観測連携



Tomo-e Gozenによる代表的な科学論文

論文のテーマ

1. Urakawa et al. `Shape and Rotational Motion Models for Tumbling and Monolithic **Asteroid 2012 TC4**: High Time Resolution Light Curve with the Tomo-e Gozen Camera' The Astronomical Journal, Volume 157, Issue 4, article id. 155, 13 pp. (2019).
地球接近小惑星
2. Arimatsu et al. `New Constraint on the Atmosphere of (50000) Quaoar from a **Stellar Occultation**' The Astronomical Journal, Volume 158, Issue 6, article id. 236, 7 pp. (2019).
太陽系外縁小天体
3. Richmond et al. `An optical search for **transients lasting a few seconds**' Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol 72, 1, id.3 (2020)
未知のフラッシュの探査
4. Ohsawa et al. `Relationship between Radar Cross Section and Optical Magnitude based on Radar and Optical Simultaneous Observations of **Faint Meteors**' Planetary and Space Science, Vol 194, id. 105011 (2020)
微光流星
5. Morokuma et al. `Follow-up observations for **IceCube-170922A**: Detection of rapid near-infrared variability and intensive monitoring of TXS 0506+056' Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol 73, 1, pp.25-43 (2021)
ニュートリノ
6. Sasada et al. `J-GEM optical and near-infrared follow-up of **gravitational wave** events during LIGO's and Virgo's third observing run' Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol 2021, 5, id.05A104, 23 pp. (2021)
重力波
7. Jiang et al. `Discovery of the Fastest Early Optical Emission from Overluminous **SN Ia 2020hvf**: A Thermonuclear Explosion within a Dense Circumstellar Environment' The Astrophysical Journal Letters, Vol 923, 1, L8 (2021)
超新星
8. Nishino et al. `Detection of highly correlated optical and X-ray variations in **SS Cygni** with Tomo-e Gozen and NICER' Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 3, 6 pp (2022)
わい新星
9. Niino et al. `Deep simultaneous limits on optical emission from **FRB 20190520B** by 24.4 fps observations with Tomo-e Gozen' The Astrophysical Journal, Volume 931, Issue 2, id.109, 7 pp. (2022)
高速電波バースト
10. Beniyama et al. `Video observations of tiny **near-Earth objects** with Tomo-e Gozen' Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 4, 27 pp. (2022)
地球接近小惑星
11. Aizawa et al. `Fast optical **flares from M dwarfs** detected by a one-second-cadence survey with Tomo-e Gozen' Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 5, pp.1069-1094 (2022)
M型星フレア

2. Tomo-e Gozenとマルチメッセンジャー観測

重力波の可視対応イベントの探査

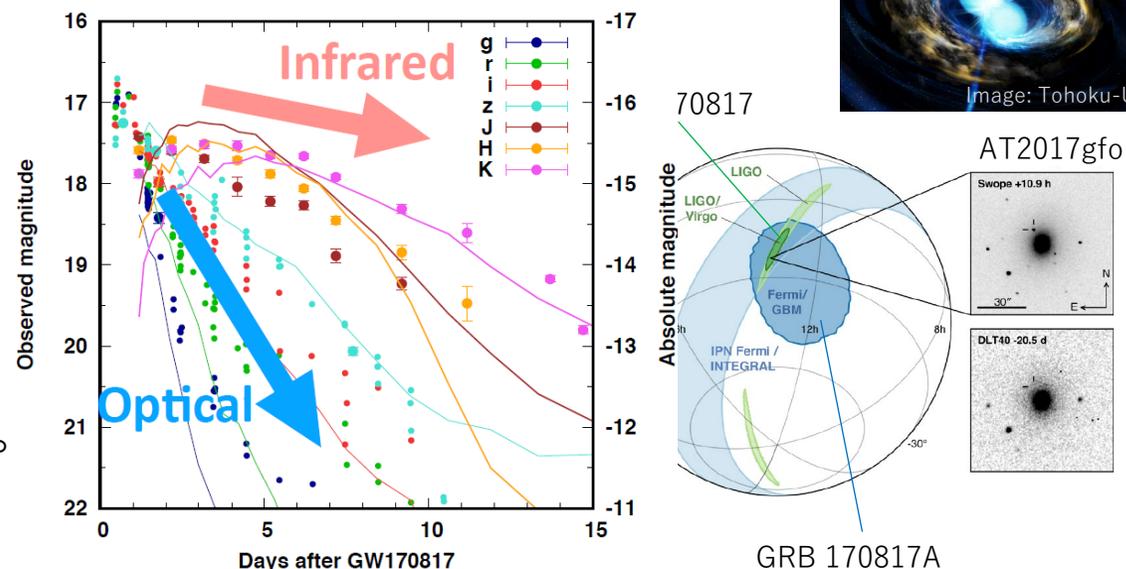
中性子星連星(BNS)合体 GW170817

- 重力波と電磁波の両方で検出。これまで唯一。
- 40Mpc, 可視光にて17mag (発見時)
- 数10日間かがやき続ける[‡] (kilonovaと呼ばれる)。
- GW170817[†]が中性子星連星合体の典型とは限らない。
サンプルを増やす必要がある。

[†] Tomo-e Gozenの完成以前に発生。

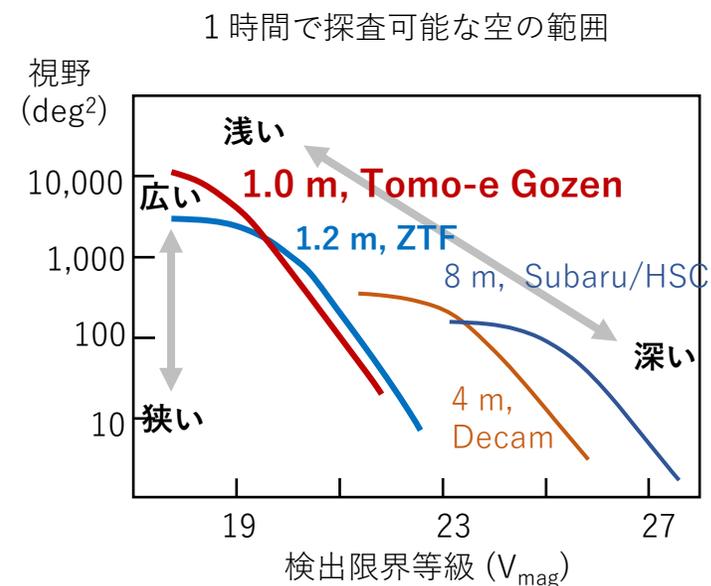
[‡] 合成されたr過程元素を含む放射性重元素の崩壊を熱源とした可視赤外線で明るい電磁波放射。

ランタノイド少 → 青いkilonova
ランタノイド多 → 赤いkilonova



Tomo-e GozenによるGW対応天体の探査

- 20平方度の**広い視野**と**迅速な追観測**が可能 (限界等級 20 mag)。
- 突発天体の検出パイプラインを利用してGW対応天体候補を搜索。
- GWの位置決定精度が低い場合に大きなアドバンテージ。
- BNSの場合、 $D < \text{約} 100\text{Mpc}$ が必要。

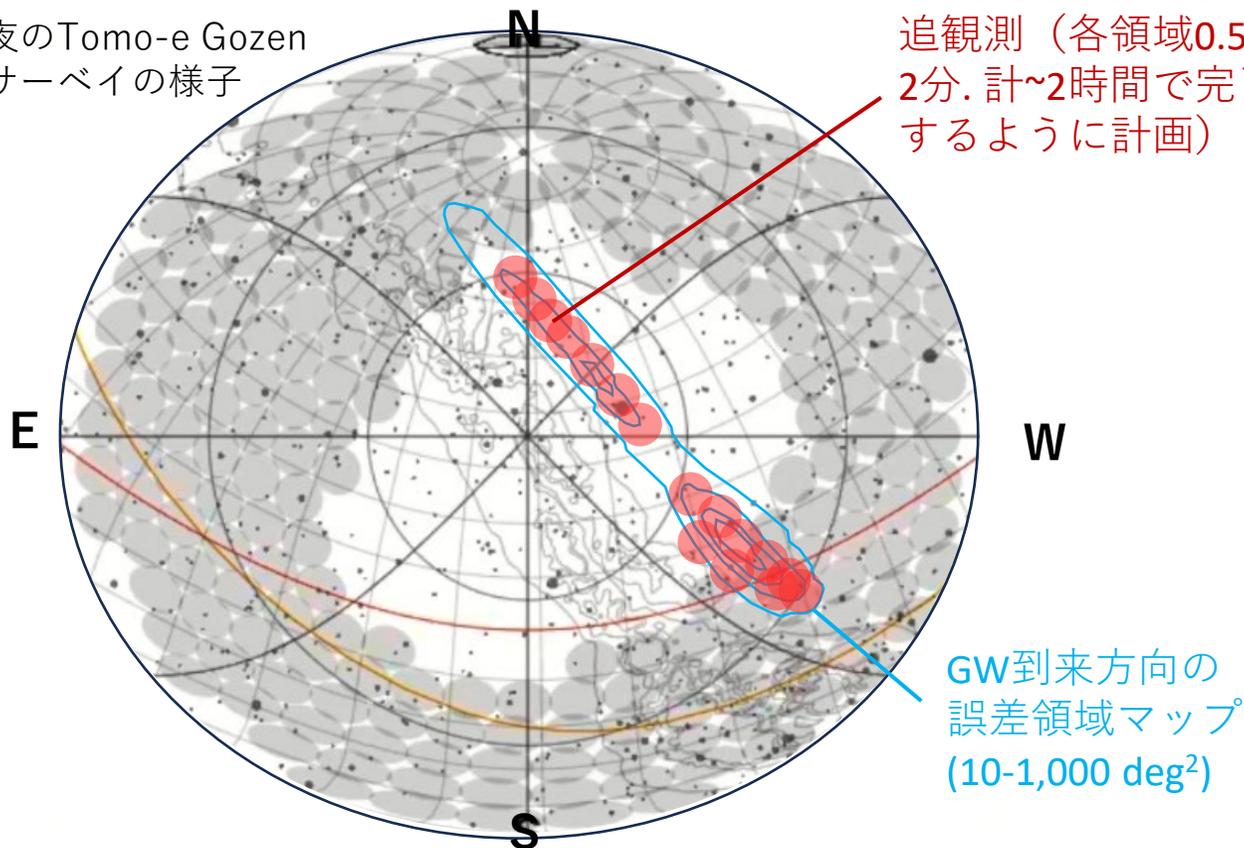


Tomo-e Gozenによる重力波の即時追観測のながれ

通常時は広域動画サーベイを無人かつ自立的に進めている。

GWアラートを受信すると速やかにGW追観測モードへ移行する。

ある夜のTomo-e Gozen
広域サーベイの様子



-  雲が検出された領域
-  Tomo-e Gozenの観測済み領域

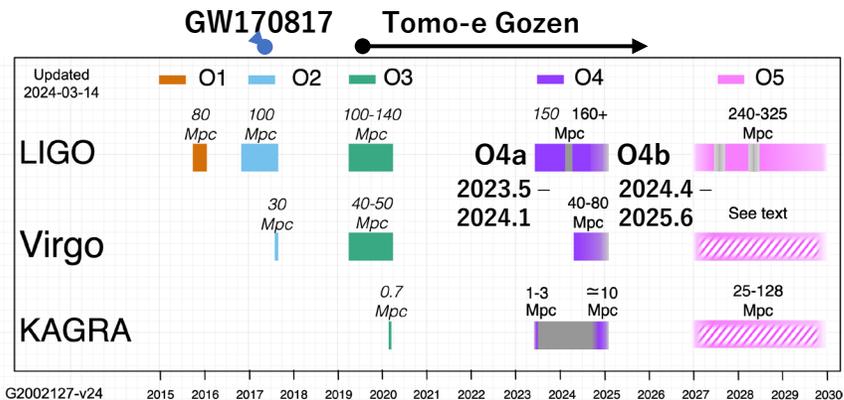
赤外線全天雲モニタの情報を取り入れたサーベイ経路の最適化
津々木ら (天文学会2024年春季年会より)

LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) collaborationのアラートの受信から追観測計画の自動決定まで

1. GCNサーバからVOEvents形式(XML)でアラート受信
 2. XML内に記述されたURLを参照して、GW到来方向の誤差領域マップを取得 (GraceDBより)
 3. Tomo-e Gozenによる追観測計画を自動決定
 4. 進行中のサーベイの中断。
 5. GW追観測を開始
 - ⋮
 6. GW追観測を終了
 7. 広域サーベイを再開。
- 10-20秒
- 数分

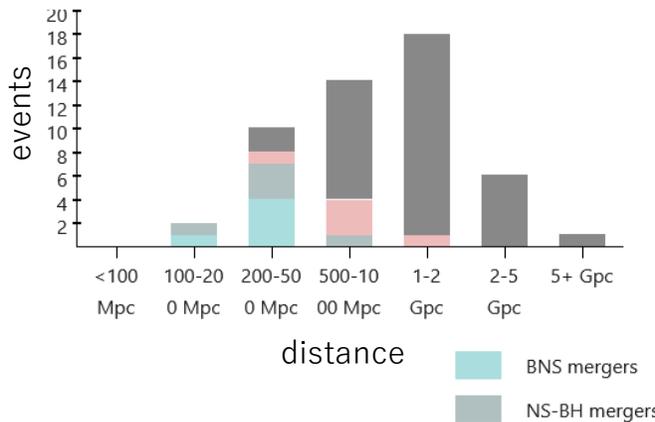
Tomo-e Gozenによる観測実施状況

LVK collaborationの運用スケジュール



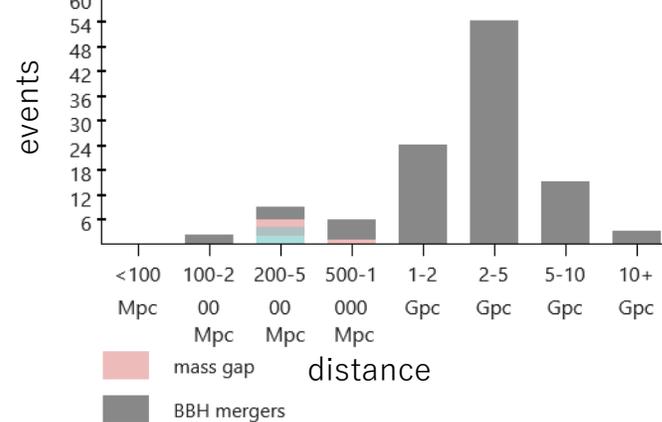
<https://observing.docs.ligo.org/plan/>

O3で検出されたGWイベント



https://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_gravitational_wave_observations

O4aで検出されたGWイベント

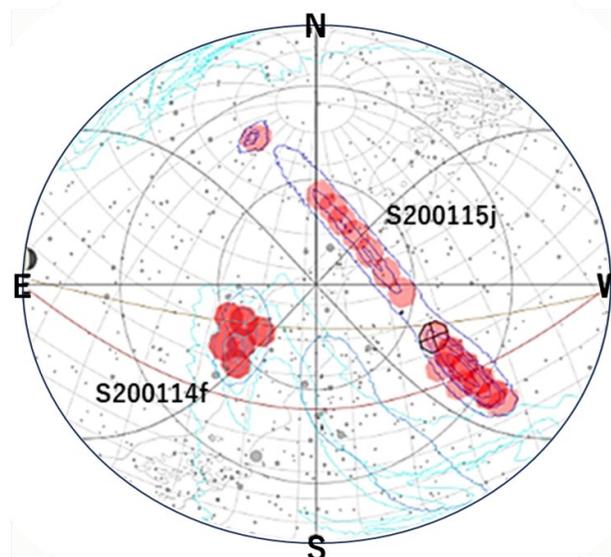


O3-O4a のTomo-e GozenによるGW追観測実績

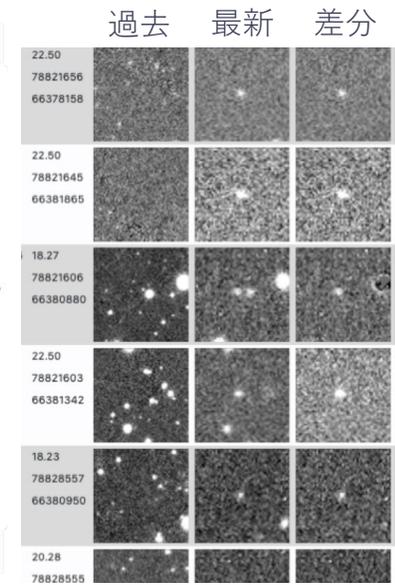
- 信頼度、位置決定精度が良く、近距離のBNS, NS-BH, BBHを観測。
- GW アラート43件に対して追観測
- 可視光対応天体の検出なし。
- O4a では O3よりデータ処理速度と突発天体の誤検出の割合が改善。

O4b の観測

- 2024年4月から実施中、2025年6月まで継続予定。
- 10月までにGW アラート11件に対して追観測



2020年1月15日に実施したGW追観測の例

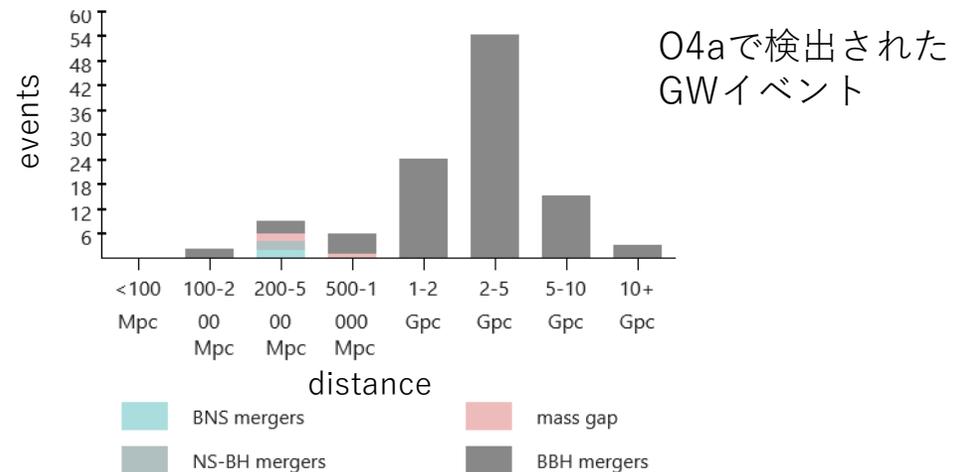


検出された対応天体の候補のカットアウト画像

Tomo-e GozenによるO4a (2023.5 – 2024.1) の観測実績

O4aのTomo-e GozenによるGW追観測の実績

- 信頼度、位置決定精度が良く、近距離のBNS, NS-BH, BBHを観測。
- 113回のGWイベントのうち、追観測を16回実施。
- 可視光対応天体の検出なし。
- O3より画像データの処理速度と突発天体の誤検出の割合が改善。



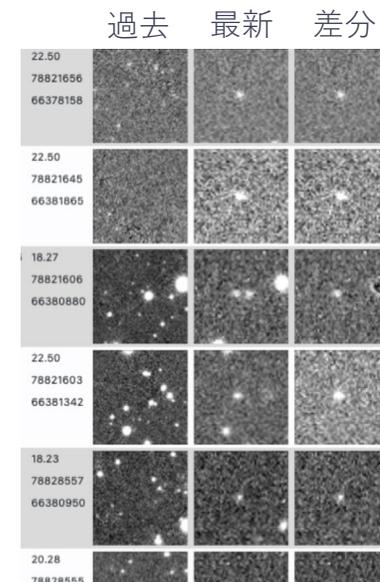
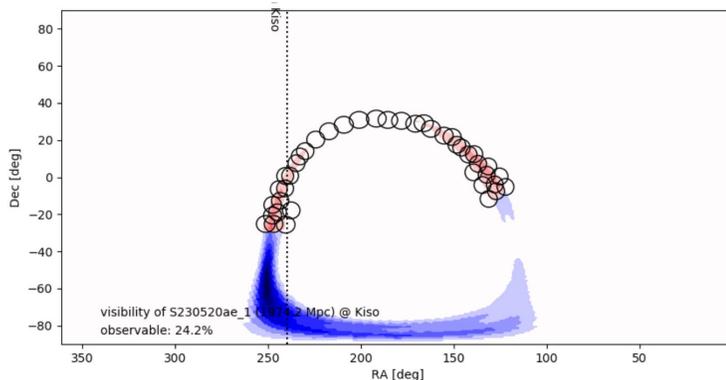
https://en.m.wikipedia.org/wiki/List_of_gravitational_wave_observations

S230520ae

- BBH @~2000 Mpc
- 誤差領域: ~3400 deg² (99%)
~1700 deg² (24%), 木曾から観測可
- 検出候補天体数: >1000 (誤検出を含む)

誤検出が多いことが課題

GW到来方向の誤差領域マップ



検出されたGW対応天体の候補のカットアウト画像の例



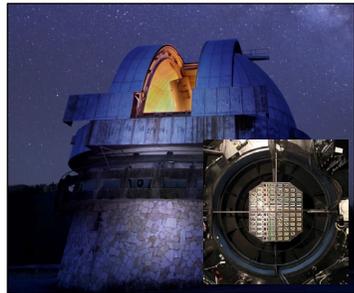
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

重力波の発見から起源の解明まで一貫した観測網を構築（計画）

可視広視野観測で即時に位置決定

可視・近赤外線分光で起源を解明

中性子星連星合体によるGWイベント直後の
可視・赤外線スペクトルの推移



イベント発生後
8時間以内に追観測

イベント発生後
最短30分でアラート



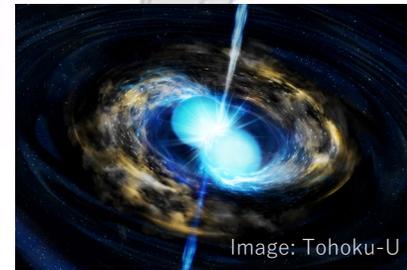
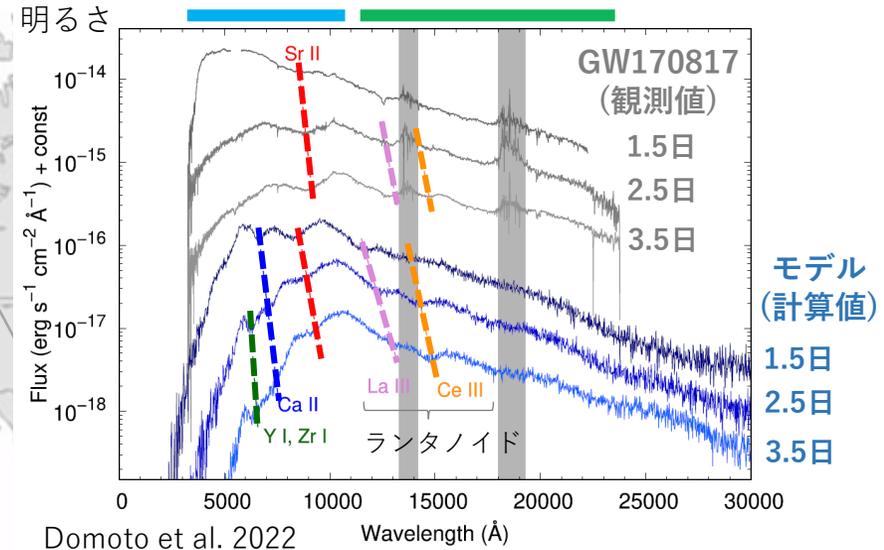
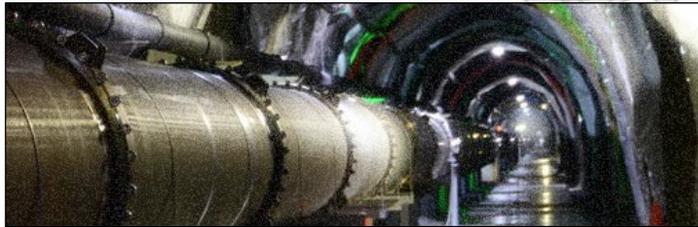
TAO 6.5 m 望遠鏡
(2024年度より稼働)



木曾シュミット望遠鏡 /
Tomo-e Gozen

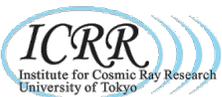
イベント発生後
最短10分で追観測

発見



中性子星連星合体で
合成された元素の特定
と時間発展の追跡
が可能。

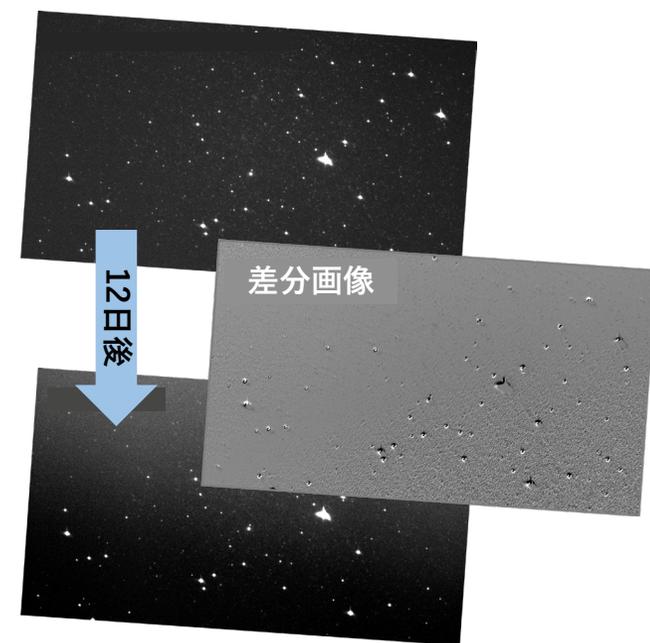
Image: Tohoku-U



重力波望遠鏡 KAGRA, LIGO, VIRGO

超新星ニュートリノの追観測

- Super-Kamiokande (SK) によるニュートリノバーストのアラートを受けて即時追観測を行い、近傍超新星の最初期の姿を捉える。
- SK collaboration から GCN にアラートが発せられると、重力波と同様に自動追観測を実施するシステムを構築 (2024/6より運用)
- 確度の低い low level alert (非公開) についても追観測できる連携の体制を協議中
- 実際に low level の現象が発生したためTomo-e Gozenで追観測
 - 木曾から見える高度が低かったため難航
 - アラート発生の日と翌週に観測
 - 明るさが変動している天体は見つからず

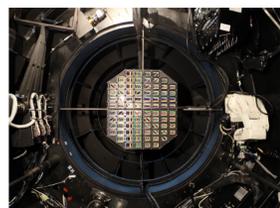


3. Tomo-e Gozenによる秒スケールの変動現象の探査

わい新星のサブ秒スケール変動の可視-X線同時観測

- わい新星SS Cygのサブ秒分解能の可視-X線高速同時観測を実施
- 可視光とX線の明るさの時間変動がほぼ同期していることを発見。
- 白色矮星の近傍に分布する高温ガスから放射されるX線が、周囲の降着円盤や伴星を広く照らしているために引き起こされると考えられる。

木曾Tomo-e Gozen (2019-)



©東京大学 木曾観測所

- 可視400nm-700nm
- 広視野と高感度
- CMOSカメラによる動画撮像
- 時刻精度<1ミリ秒

NICER (2018-)



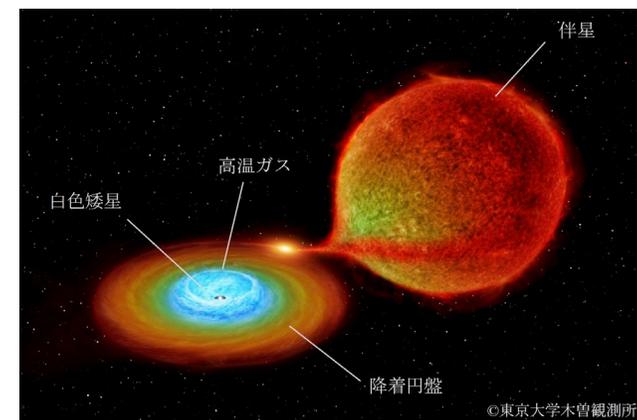
©NASA

- 軟X線帯域(0.2-12keV)
- 大有効面積(Silicon Strip Detector)
- サブ秒スケールの高時間分解能
- 時刻精度<0.1ミリ秒

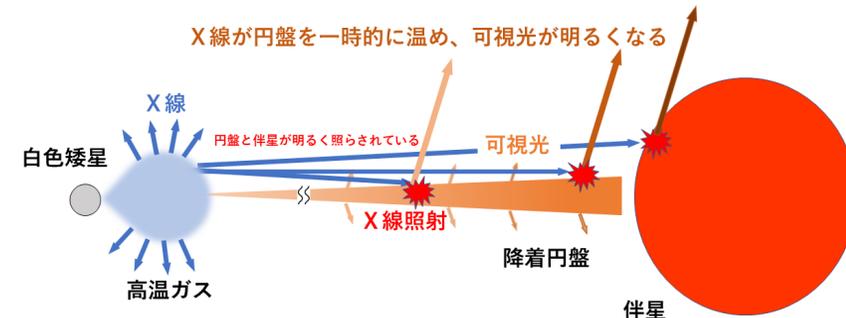
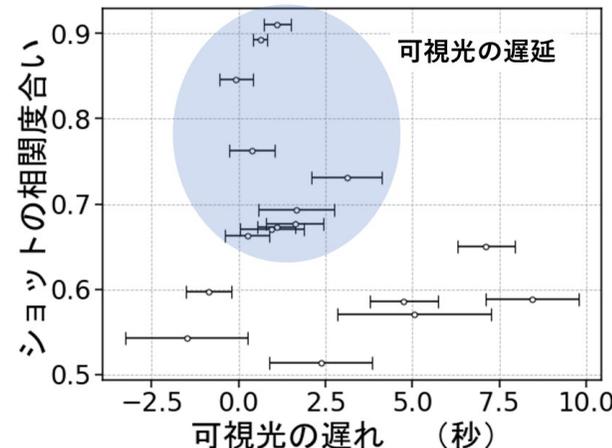
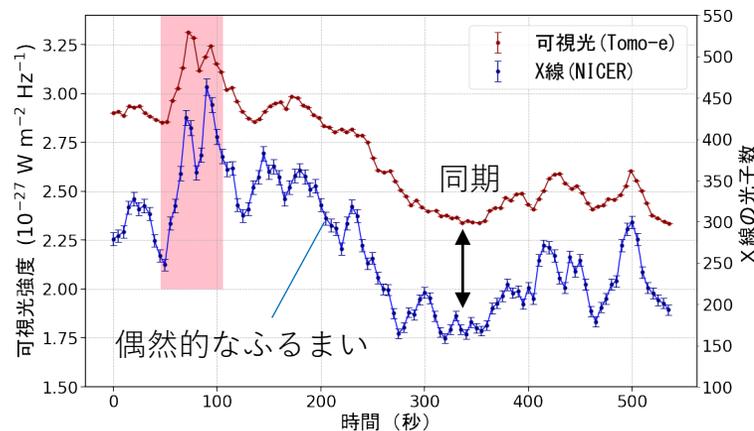
Sako et al. 2018

Gendreau, Keith C et al. 2016

Nishino et al. 2022, PASJ



SS Cygの想像図 ©東京大学木曾観測所

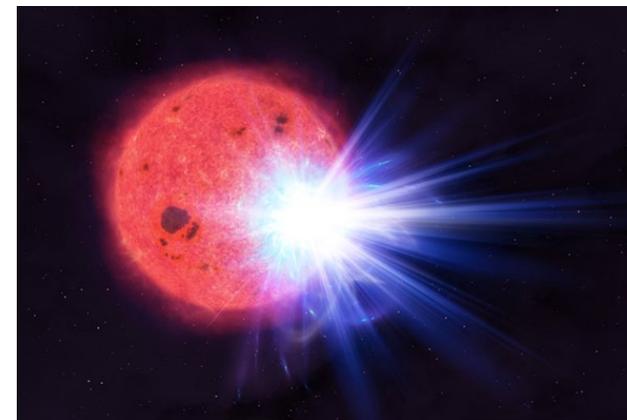


西野ら、東京大学プレスリリースより

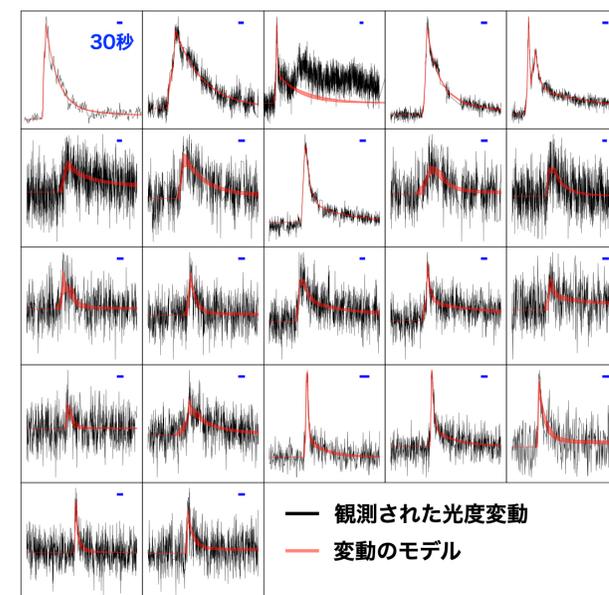
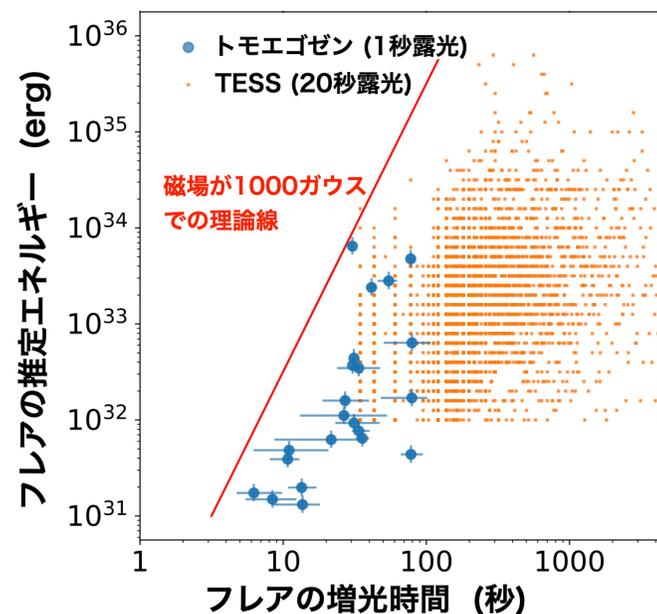
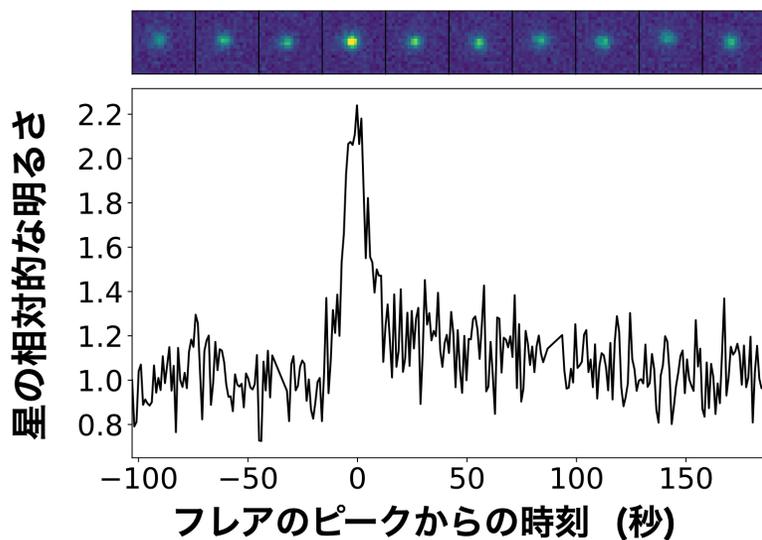
M dwarfの秒スケールのフレアの探査

Aizawa et al. 2022, PASJ

- 約5700個の赤色矮星に対し視野固定の2 fps連続モニタ観測を実施。
(10hrs data, total 30 TB, 3-4 flares for 200 deg² hr),
- 数10秒の短時間に増光するフレアを22件検出。
- 短時間に増光する強力なフレアが活動的な赤色矮星において平均で1日に1回程度発生することを示した。
- 赤色矮星まわりの系外惑星における生命居住可能性の議論にも影響を及ぼしうる



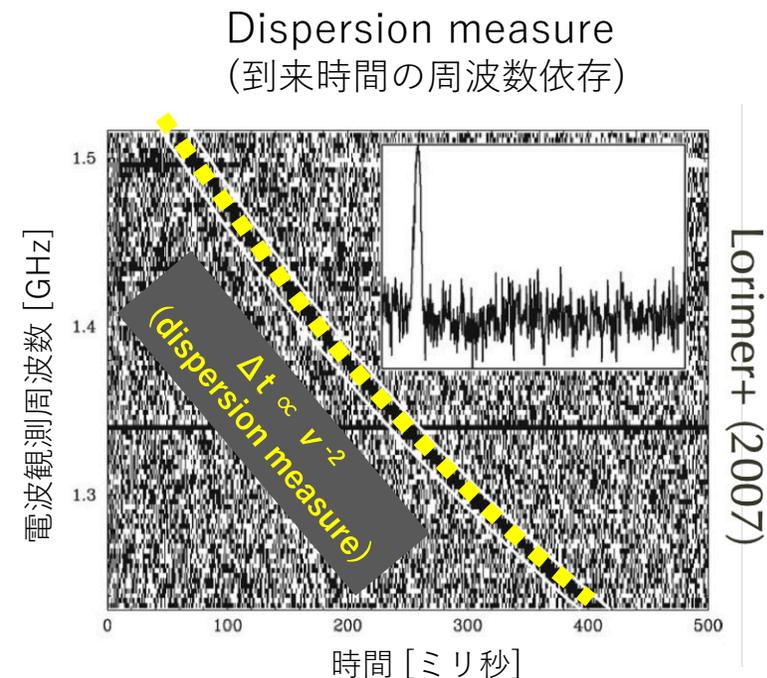
M dwarfの短時間フレアの想像図
©東京大学木曾観測所



逢澤ら、東京大学プレスリリースより

Fast Radio Burst からの可視光放射探査

- 数ミリ秒間の電波突発現象 @ ~ 1 GHz
- Lorimer et al. (2007) で初発見。15年あまりで約800天体発見。
- **起源とメカニズムはいまだに不明**
- Dispersion measure が大 → 銀河系外由来を示唆
 - 一部で母銀河同定あり (約50件)
- バースト一回限りのものと繰り返しバーストする種族がある
- 銀河系内のマグネター (SGR 1935+2154) から FRB like バースト
 - X線バーストを伴う
 - 銀河系外のイベントとの関連は不明 (放射エネルギーが数十倍異なる)
 - 銀河系外イベントで電波以外の放射は未発見
- **FRBからの電波以外の放射をとらえれば起源解明の重要な手がかり**
 - **可視光の短時間放射は従来の観測装置では難しかった**



Caption: CSIRO's Parkes radio telescope. Credit: David McClenaghan, CSIRO

Tomo-e Gozen と電波でFRBを同時観測

既知 repeating FRB モニタリング

- FAST 500m(中国)、山口大32m電波望遠鏡と連携して同時観測
- Repeating FRB の活動期をとらえれば数時間の間に10発以上の電波バーストが見られる場合もあり
- 可視光放射の検出はまだなし
- 電波-可視 SED に制限

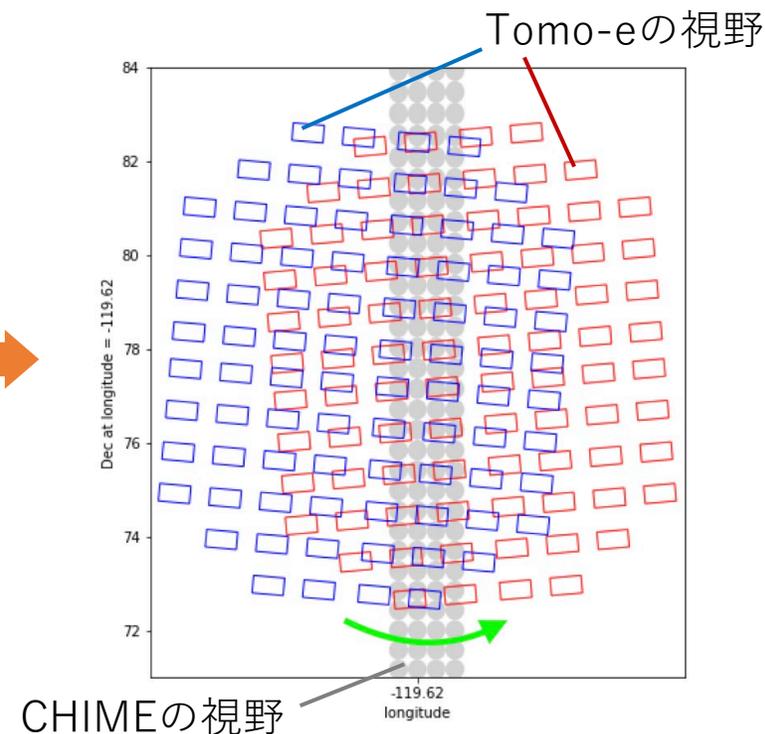
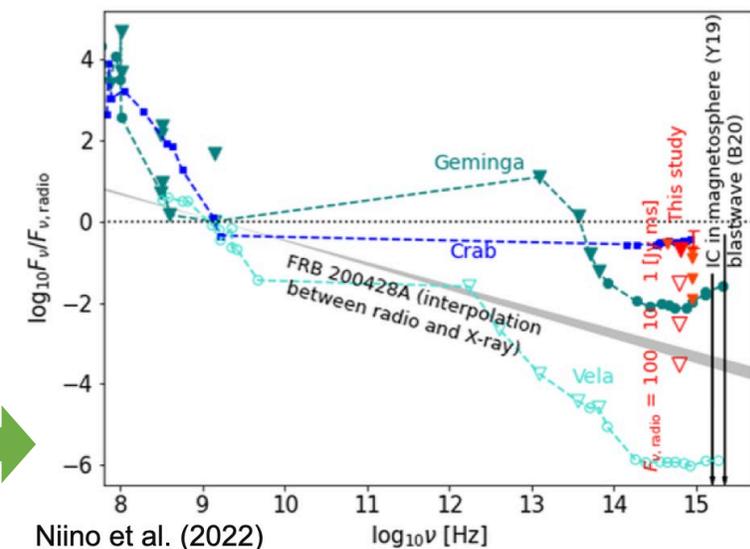
Non-repeating FRB の広域モニタリング

- 広視野電波望遠鏡 CHIME(カナダ) の視野を Tomo-e Gozen で同時観測
- Tomo-e視野内でのイベントは未発生**
- 期待される発生頻度 ~ 1 per 240 hrs
- 観測を継続中

Credit: Ou Dongqu/Xinhua/ZUMA



Credit: CHIME collaboration



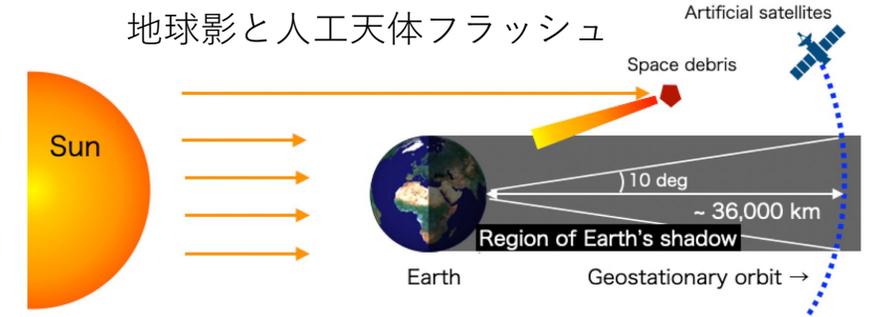
サブ秒フラッシュの探査

未知の短時間発光現象をさがす。Tomo-e Gozenで初めて探査が可能なパラメータ空間。

取得データ

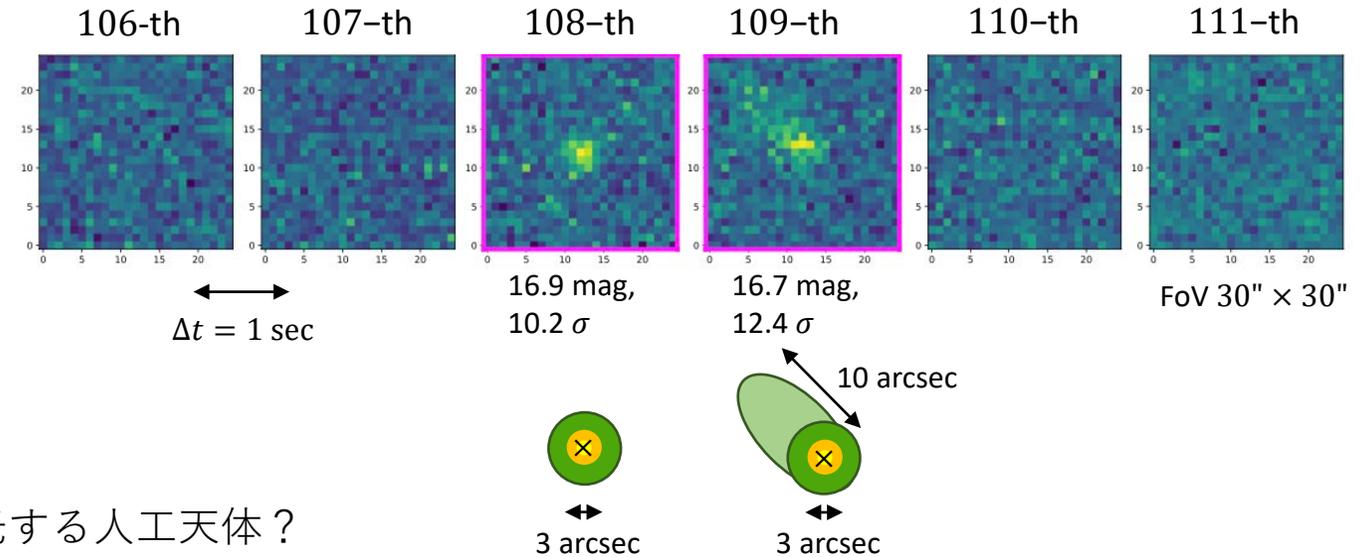
- 地球影の方向（銀河面領域以外）を連続観測, 28夜, ~50時間
- 1 fps, 限界等級: ~ 17.5 mag
- 面積×時間: ~ 800 deg² hours (~120 TB)

地球影と人工天体フラッシュ



1件のフラッシュイベントを検出

- 連続した2フレームにのみ検出。
- 2イベントのピーク位置と明るさは同程度。
- 周囲の天体のPSFサイズ (~3" FWHM) と同程度。
- 2フレーム目のイベントは楕円形に広がっている。



フラッシュの起源を特定できず

- 微光流星? 太陽系小天体の衝突イベント? 自ら発光する人工天体?
- FRB, GRB等の遠方のバースト現象? 重力マイクロレンズイベント? (+ 大気揺らぎでPSFが伸びる?)
- 未知の物理学的イベント? 未知の天文学的イベント?

統計サンプルを増やすためにデータ取得を継続中

本講演のまとめ

木曾観測所105 cmシュミット望遠鏡 + Tomo-e Gozenカメラ

- 宇宙の短時間変動現象をとらえることを目的に開発された可視光超広視野カメラ。
- 空の20 deg²を最大2 fpsで動画観測。
- 自立運転で毎晩>10,000 deg²以上の広域をサーベイ。



T O M O · E
G O Z E N

Tomo-e Gozenによるマルチメッセンジャー観測

- 重力波、宇宙ニュートリノに対して、広視野と迅速な追観測を活かした即時追観測。
- O3, O4aにBNS, NS-BH, BBHアラートに対し計35回の即時追観測を実施。
- 可視光のGW対応天体は非検出。
- TAO 6.5 m望遠鏡（2024年度完成予定）による近赤外分光とのタイムドメイン連携を計画中。

Tomo-e Gozenによる秒スケールの変動現象の探査

- 秒スケールの恒星フレアを検出
- 降着円盤のX線との同時観測を進行中
- 高速電波バーストの電波望遠鏡との同時観測を進行中
- 起源が明らかでないサブ秒フラッシュを検出