

激動の宇宙の姿をもとめて

木曾トモエゴゼンとビッグデータ天文学

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

酒向 重行（さこう しげゆき）



自己紹介

酒向 重行 (さこう しげゆき)

所属

- 東京大学大学院理学系研究科・准教授
- 附属天文学教育研究センター（東京都三鷹市），木曾観測所（長野県木曾郡）

研究分野

- 光赤外線観測天文学、時間軸天文学
- 観測装置開発

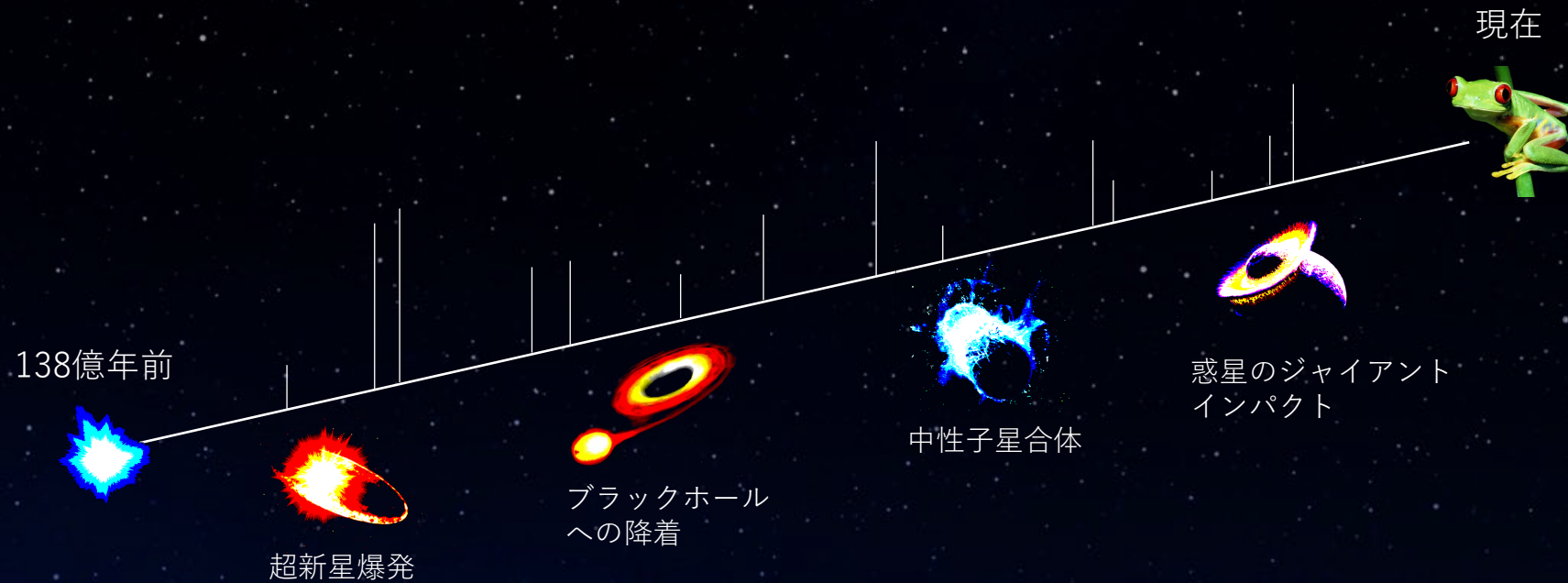
経歴

- 名古屋大学理学部物理学科 (1999卒)
- 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 (2004卒, 博士理学)
- 東京大学天文学教育研究センター・研究員, 学振研究員 (2004-08)
- 東京大学天文学教育研究センター・助教 (2008-20)
- JST さきがけ研究員 (2015-19) 「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」
代表 喜連川 優 (NII所長 当時)
- 現職 (2020-現在)



第1部 時間軸天文学とビッグデータ

現在の宇宙とそこに住む生命は、
極めて稀な宇宙の爆発現象から生まれた



宇宙の短時間変動に着目した天文学を「時間軸天文学」とよぶ

可視光で明るさが変動する天体

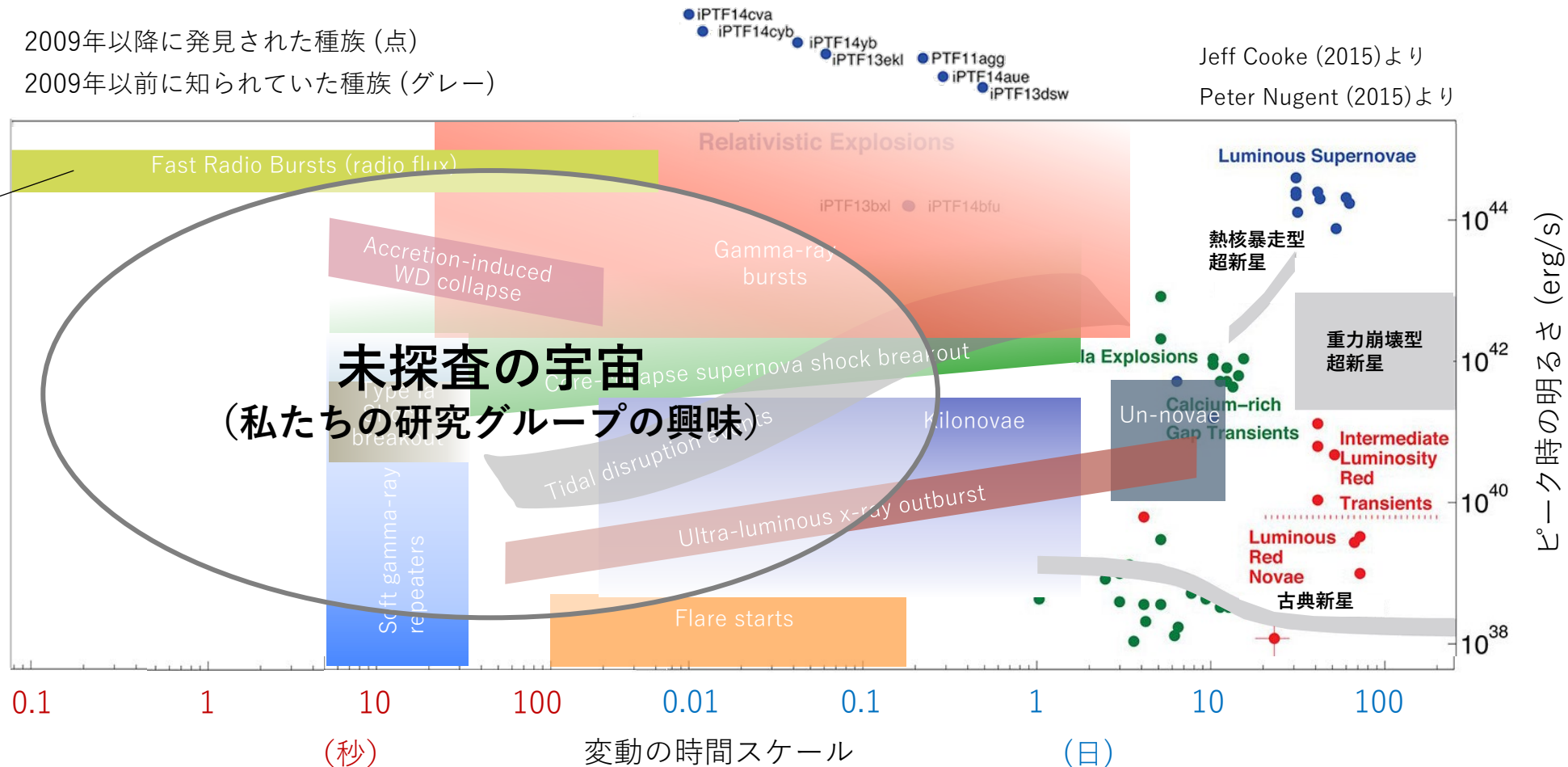
2009年以降に発見された種族 (点)

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



無数の星々がひしめく広大な空に、稀で一過性の突発現象を探すこと

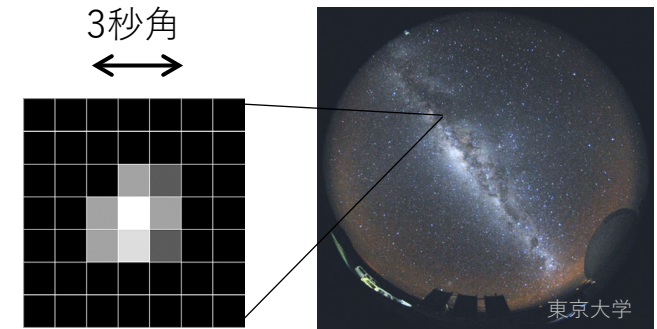
それは広大な砂浜の中に、ダイヤモンドのかけらの一瞬のきらめきを探すこと
と同じ



究極の時間軸天文学（秒スケールの全天動画モニタ）とビッグデータ 8

見上げた空全域の画像を、最高の解像度で「1枚」撮る

- 空の半球: 2万 平方度、1画素: 1秒角 x 1秒角、計250G画素が必要
- **0.5 TB/sky**



見上げた空全域の画像を、最高の解像度で「1秒毎」に撮る(=動画)

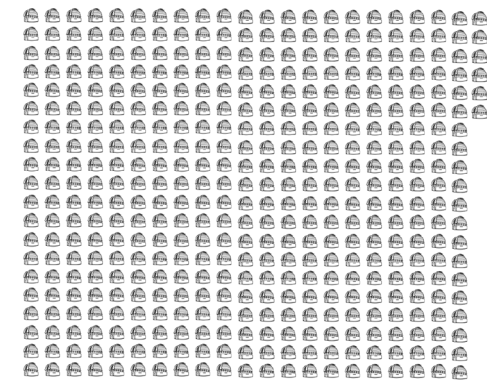
- **0.5 TB/sec = 14 PB/night = 1.4 EB/year[†]**

地球大気のゆらぎのため、点源(星)の像は1-3秒角程度に広がる。

[†]1晩を8時間、1年を100観測夜として計算

データのハンドリング

- I/O速度: M.2 SSDを**600台並列書き込み**
- データ転送: SINET6(最大400Gbps)にて**1夜分のデータ転送に7日**
- データ解析: 情報の**即時抽出、即時共有**が必要
- 立地: **都市から離れた場所**に望遠鏡がある



2万平方度の空を監視するには、425台の口径1m広視野望遠鏡の視野が必要

ZTF望遠鏡とCCDカメラ
(画像 Caltech/ZTF)

秒スケールの全天動画モニタは不可能ではないが、現状、実現はきびしい。

第2部 木曾トモエゴゼン計画とその成果

秒スケールの激動の宇宙の姿をもとめて、ビッグデータとの格闘の軌跡

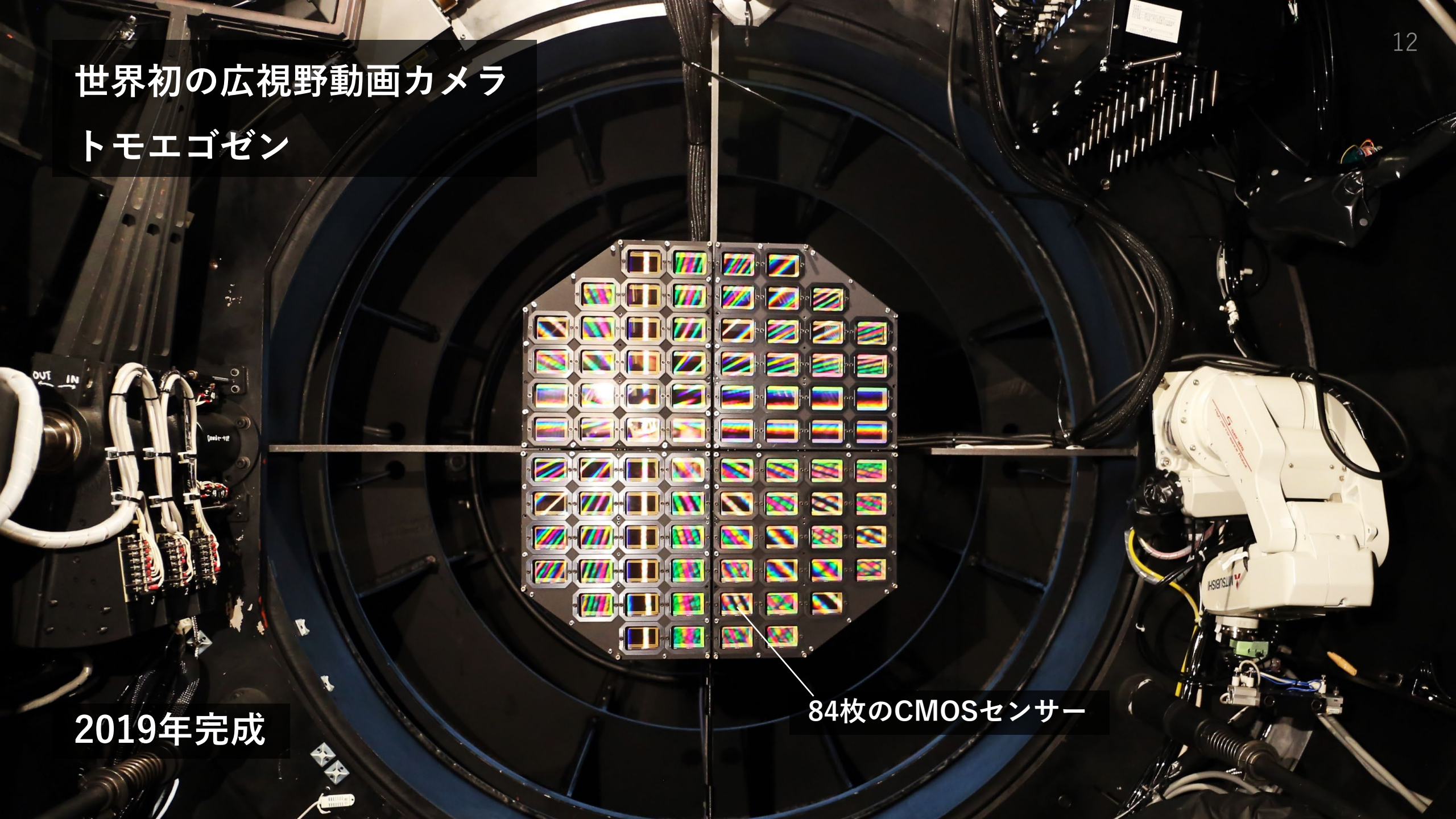


東京大学木曽観測所（長野県木曽郡）

世界初の広視野動画カメラ トモエゴゼン

2019年完成

84枚のCMOSセンサー



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

トモエゴゼン



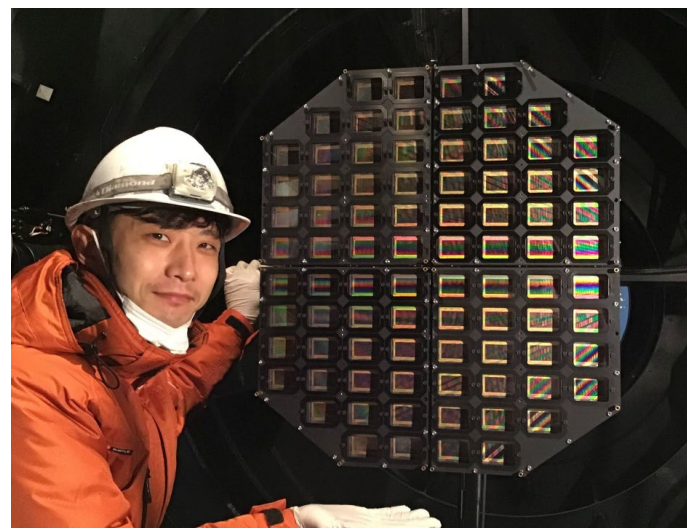
Sako et al. 2018

カメラ概要

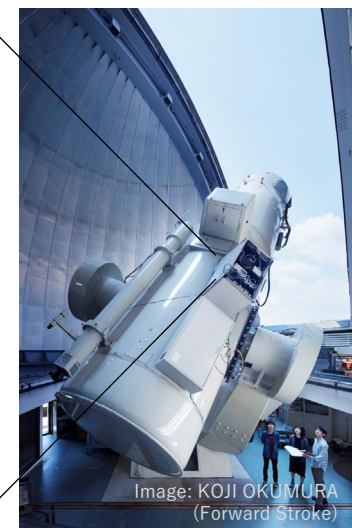
- 視野 20平方度
- 84台のCMOSセンサ (190メガ画素)
- 2フレーム/秒の動画
- 可視光単色
- 2019年10月より観測開始

データの出力と処理

- **毎夜30TB(最大)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 (2023年3月)



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

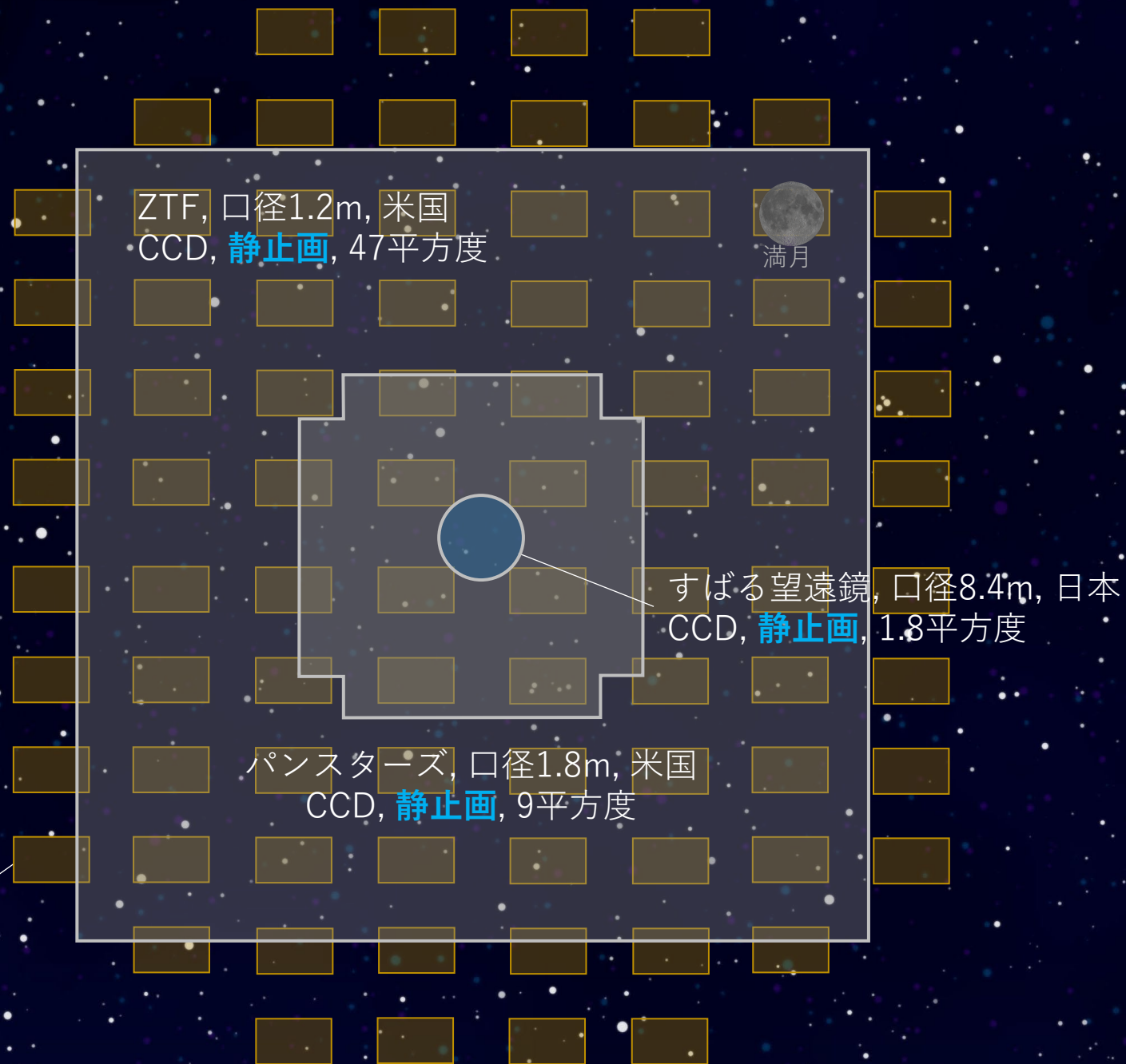


「巴御前出陣図」
東京国立博物館蔵
Image: TNM
Image Archives



トモエゴゼン計画の研究グループ、約50名が参加

視野の広さの比較



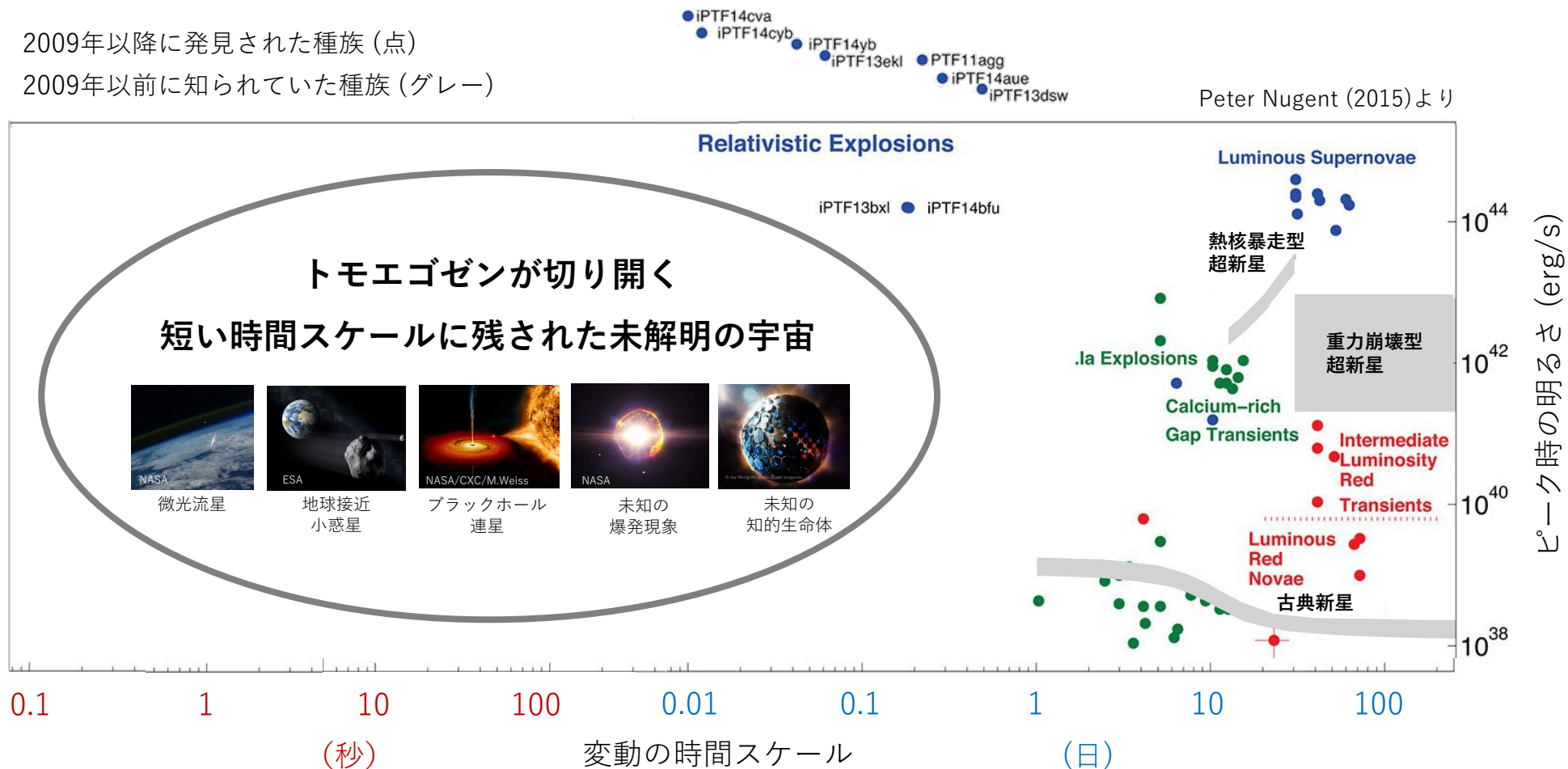
- トモエゴゼン, 口径1.1 m, 木曽
CMOS, 「動画」, 20平方度

宇宙の短時間変動に着目した天文学を「時間軸天文学」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)



トモエゴゼン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

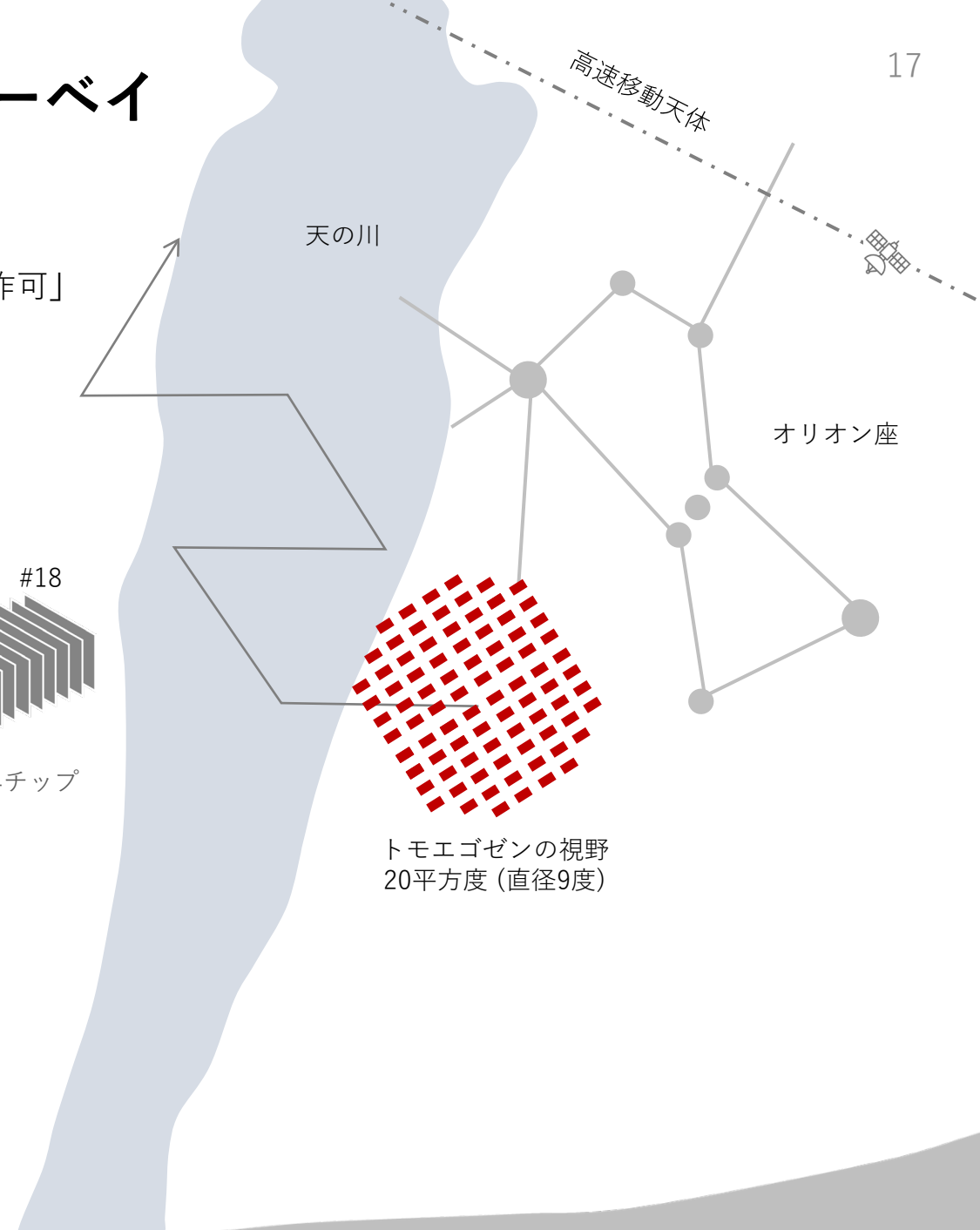
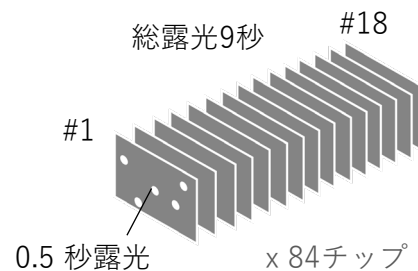
- 12,000平方度 (全天, 高度 $>35^\circ$), 1回/夜, 3時間で完了
- 3,000平方度 (深夜南中領域), <10 回/夜

達成感度

- <17 等級, <18 等級 (スタック時)
- 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」。

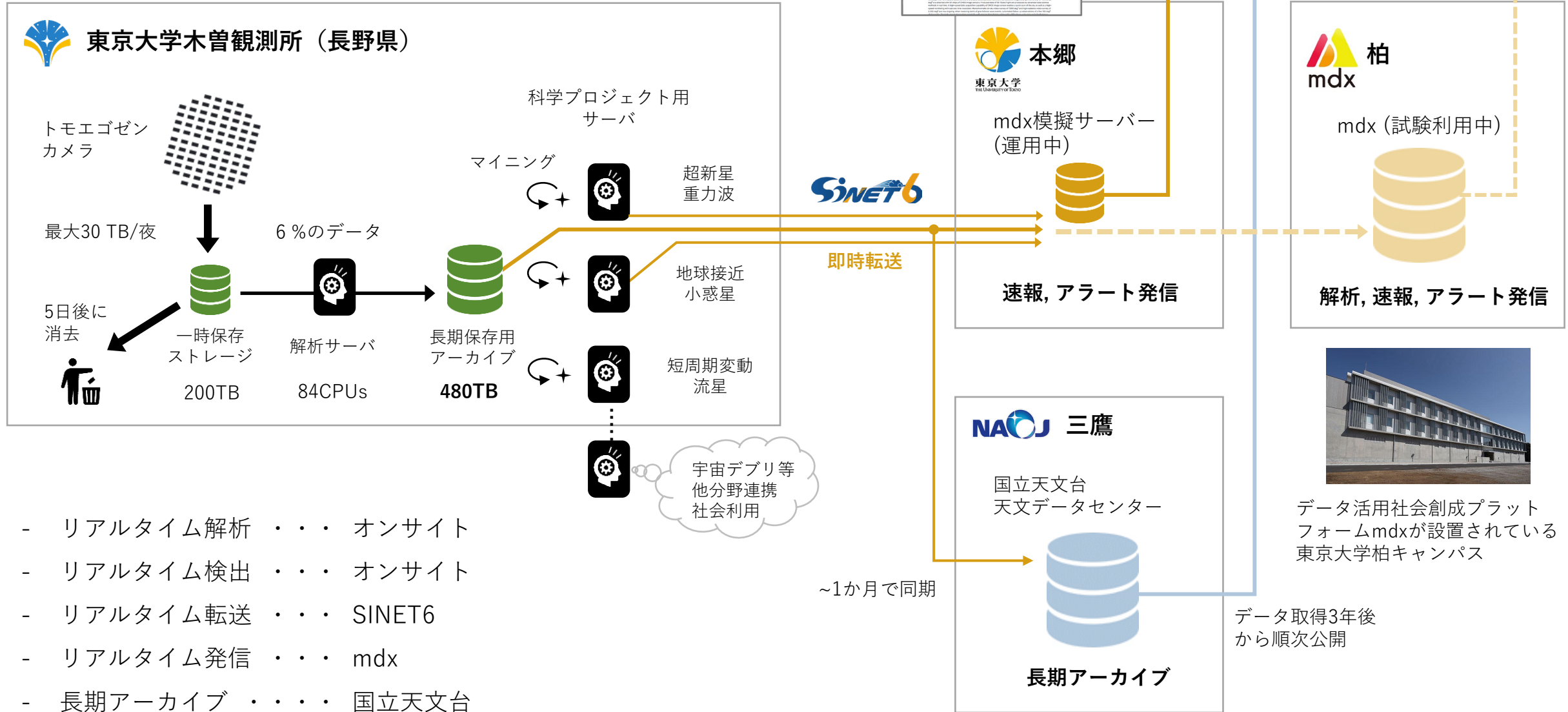


トモエゴゼンのデータフロー

木曾観測所 検索

インターネット

18



- リアルタイム解析 オンサイト
- リアルタイム検出 オンサイト
- リアルタイム転送 SINET6
- リアルタイム発信 mdx
- 長期アーカイブ 国立天文台

2023年3月 学術情報ネットワークSINETが開通

- 松本DCを経由してSINETに10Gで接続
- 長野県内自治体ネットワーク網の協力を得て実現

課題

- **都市部から離れた研究所のSINET接続は予算的に厳しい。**
- 自然科学データの多くは非都市部で得られる。
- 大学からは自己努力で整備するようと言われる。
- トモエゴゼンは**地元自治体から温かく迎えられた。**

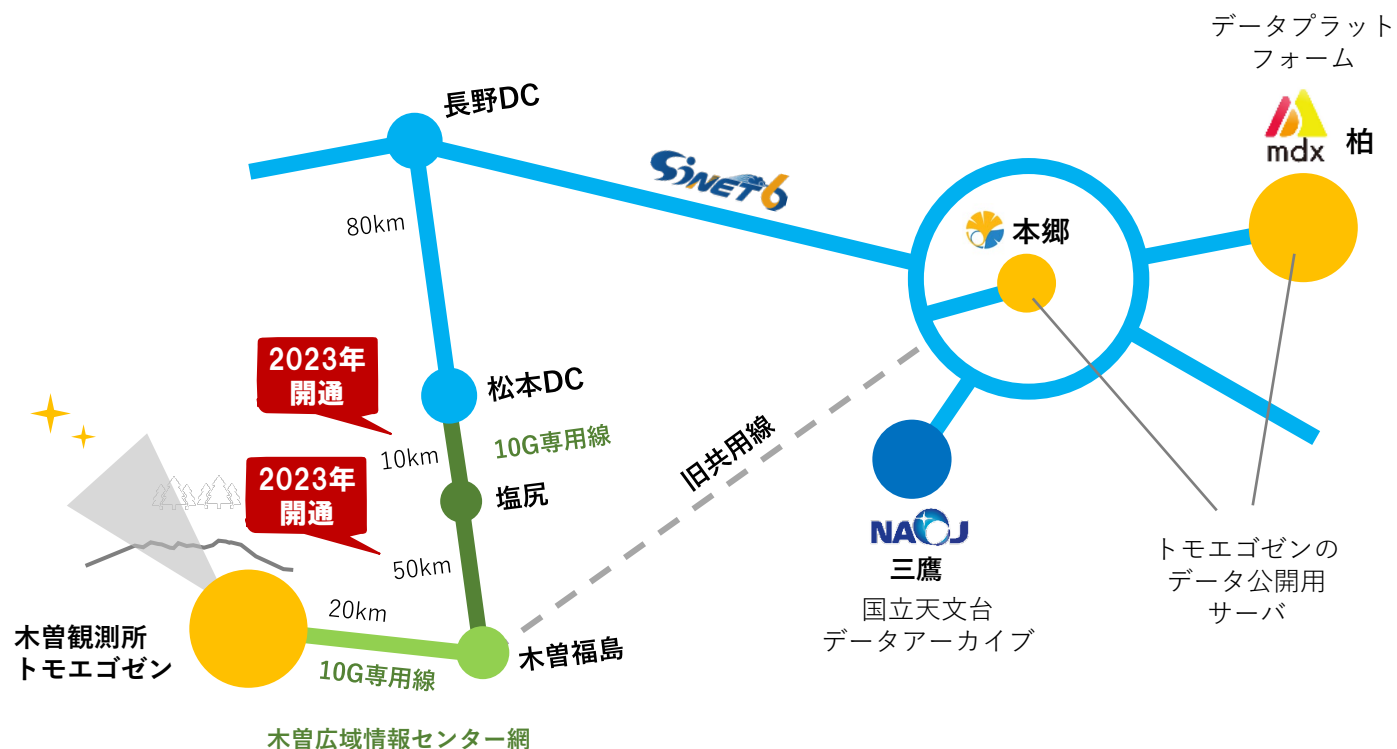
ご協力をいただいた皆様

- 木曽広域情報センター（木曽広域連合）
- 木曽町、上松町、王滝村、塩尻市
- 東京大学理学系研究科情報システムチーム
- 東京大学情報基盤センター
- 国立情報学研究所、信州大学
- NTT社、NEC社

深く感謝申し上げます。



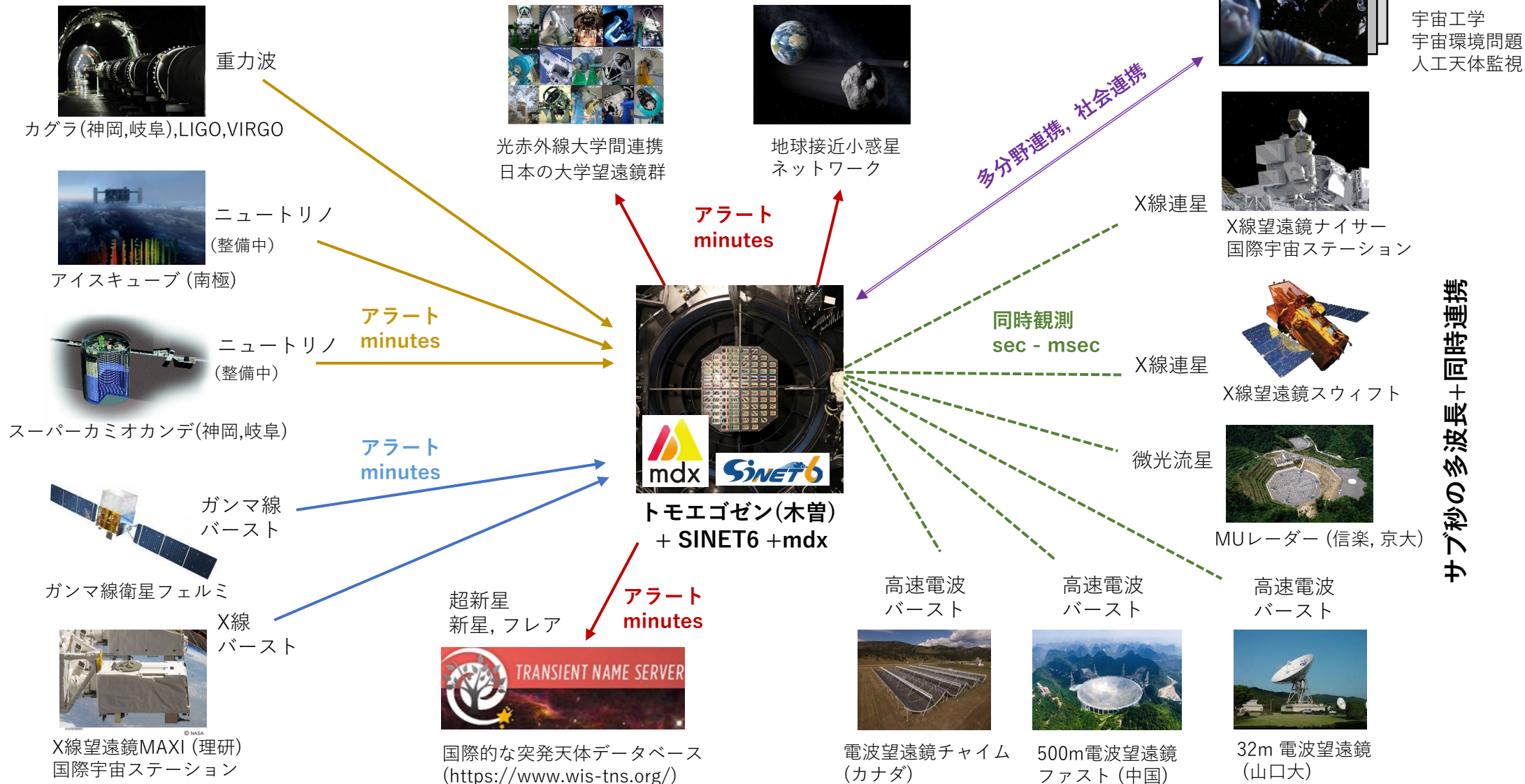
東京大学木曽観測所の遠景
“木曽路はすべて山の中である”，島崎藤村



情報共有による時間軸天文学の連携

マルチメッセンジャー

高エネルギー観測連携

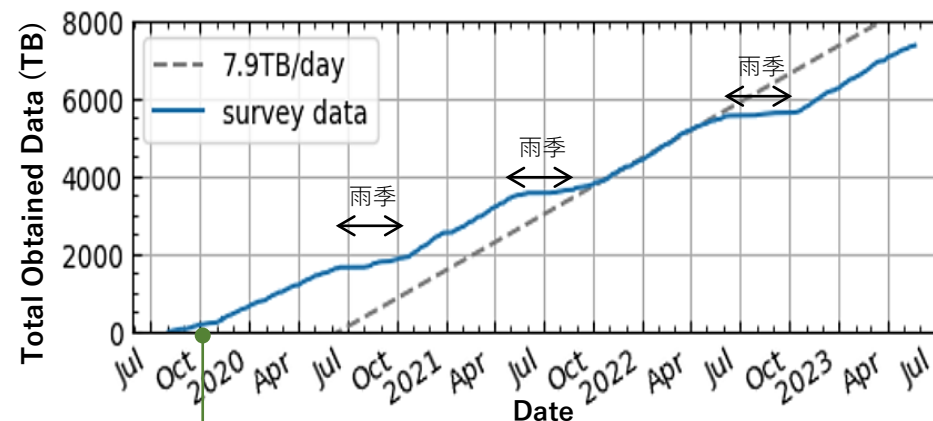


トモエゴゼンのサーベイデータの取得状況

取得データ

- 2019年10月から本格運用を開始
- 取得から5日後に消去
- 最近では8 TB/日で蓄積中

取得データの合計

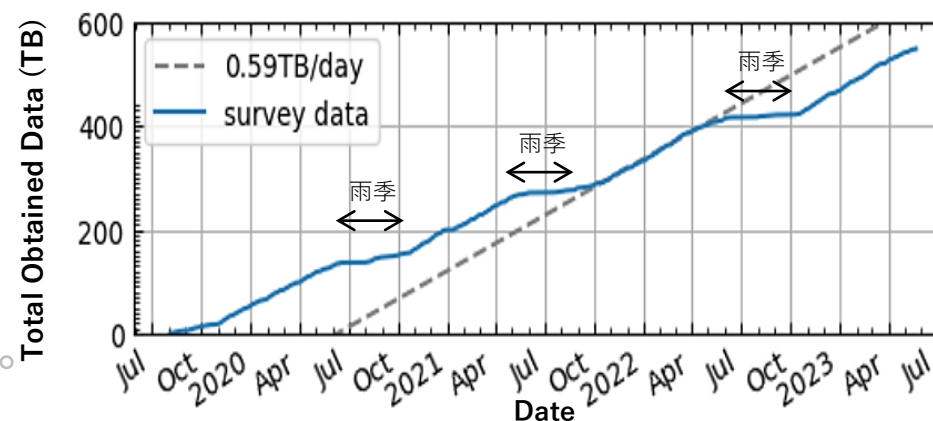


8 PB

生データ
10年間に20 PB

本格運用を開始

アーカイブデータの合計



0.6 PB

アーカイブデータ
10年間に1.5 PB

アーカイブデータ

- 消去される前にデータの**7%をアーカイブ**
- 最近では0.6 TB/日で蓄積中
- 今後、科学的目的のために保存データの種類の増やすと数倍に

貴重な科学データの多くをやむなく破棄している

保存データの種類の増やすと5 PB以上が必要

トモエゴゼン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).
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).
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)
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)
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)
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)
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)
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)
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)
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)
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)

地球接近小惑星

太陽系外縁小天体

未知のフラッシュの探査

微光流星

ニュートリノ

重力波

超新星

わい新星

高速電波バースト

地球接近小惑星

M型星フレア



1. 星の爆発の瞬間をとらえる

赤色矮星フレアの想像図 ©東京大学木曽観測所

科学成果① 星の爆発の瞬間をとらえる

大規模な計算
処理が必要

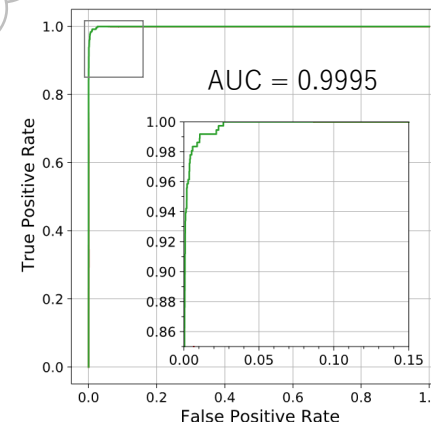
即時の情報
公開が必要

超新星爆発の瞬間をとらえる（30分スケール）

微かな信号ほど
価値が高い
→ 誤検出が問題

- サーベイ画像を過去と比較
- 毎夜, 1億個の天体の中に1個の超新星を自動検出
- 100万件の誤検出が発生 (人間の目で確認しきれない)
- 機械学習(VAT, CNN)で誤検出を除去 → 誤検出を100件に低減
- 観測後の数分以内に情報公開

CNNモデルのROCカーブ

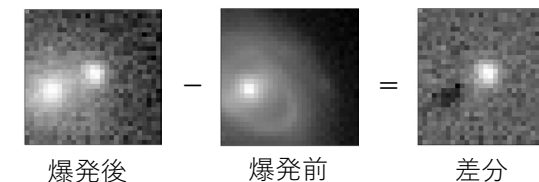


超新星爆発の想像図



Image credit:
Corbis/Discovery.com

超新星の検出例



Takahashi et al. 2022

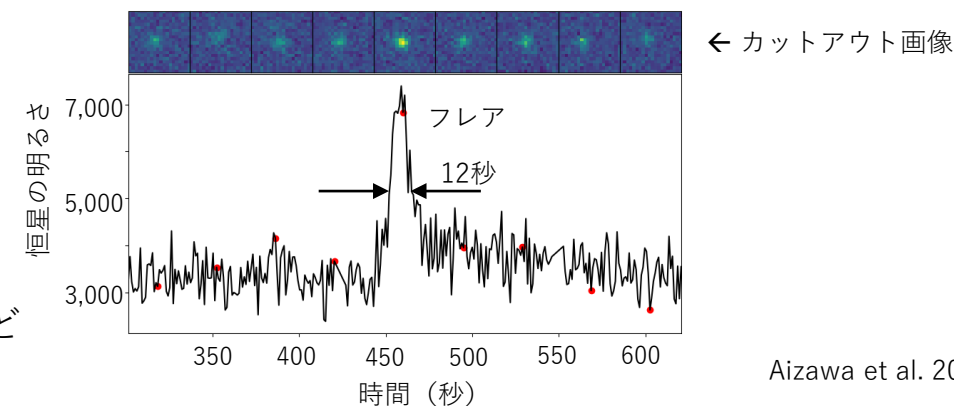
恒星のフレアの瞬間をとらえる（10秒スケール）

- 1万個の恒星の明るさを数時間にわたり監視
- M型星(小質量の恒星)から10秒スケールの短時間フレア現象を多数検出
- 異常検知アルゴリズムの導入

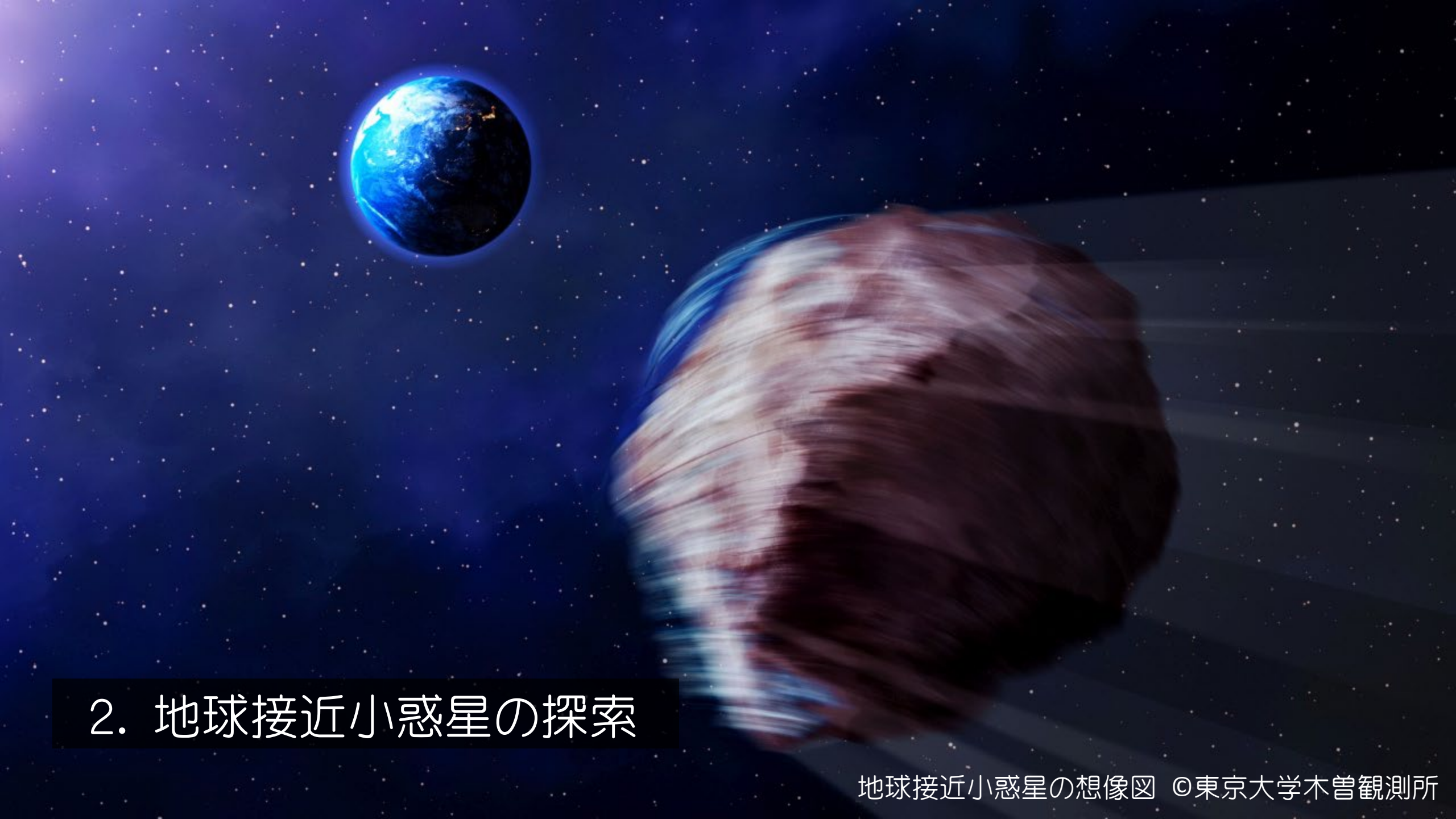
短時間に変動する天体の探査・監視

- 高速電波バースト、ブラックホール連星、系外惑星、未知のフラッシュなど
- GPUクラスタを活用, 機械学習(SSD)で検出

短時間フレアを検出したM型星のライトカーブ



Aizawa et al. 2022



2. 地球接近小惑星の探索

地球接近小惑星の想像図 ©東京大学木曽観測所

大量の高速移動天体を検出

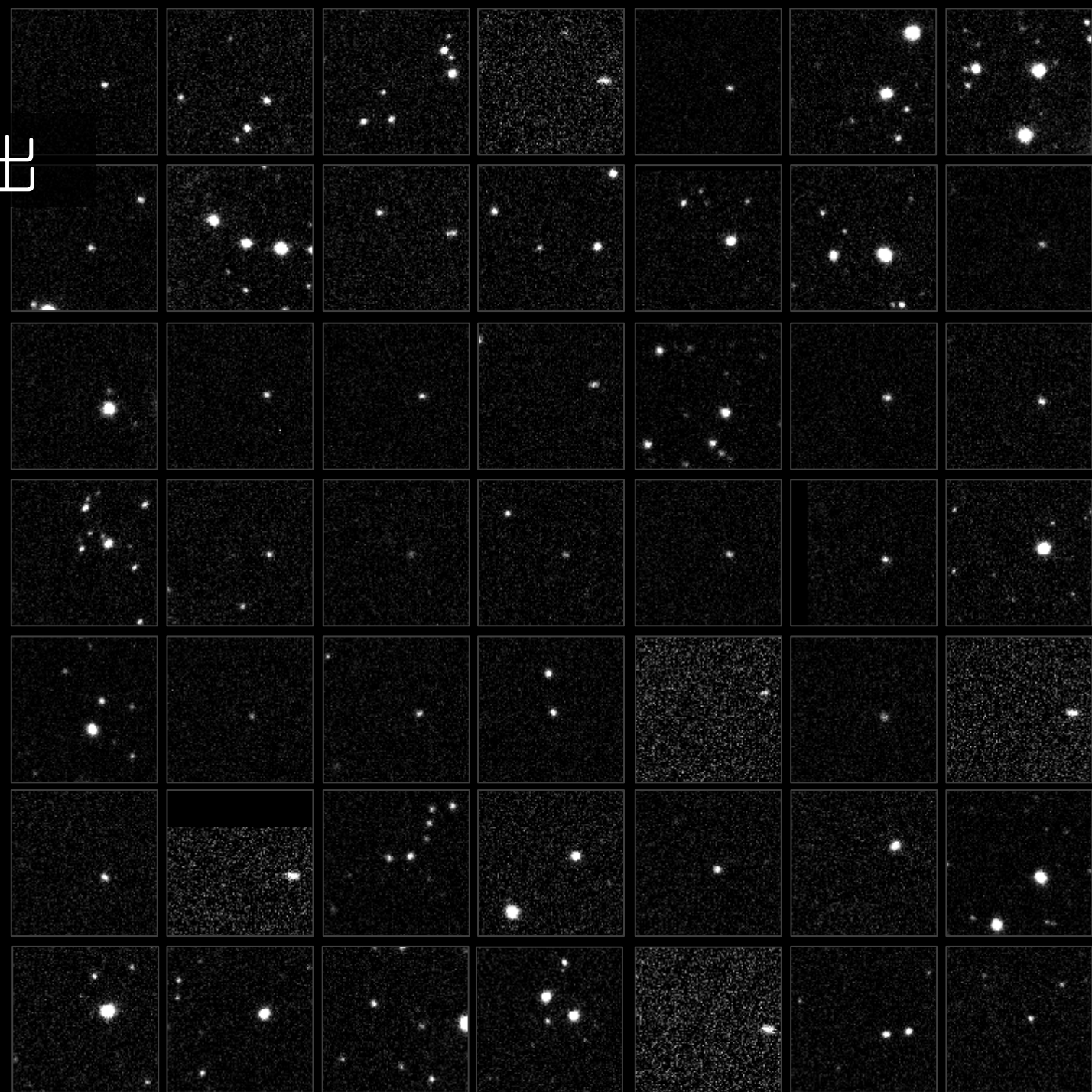
毎夜、約3,000個

その99.9%は人工天体

その多くは宇宙ゴミ



ESA



科学成果② 地球接近小惑星の発見と調査

大規模な計算
処理が必要

即時の情報
公開が必要

空を高速移動する天体をとらえる（秒スケール）

- サーベイ画像(動画)の中を移動する天体を検出
- 毎夜, 1億個の天体の中に1,000件の高速移動天体を自動検出
- 100万件の誤検出が発生（人間の目で確認しきれない）
- 機械学習で誤検出を除去 → 誤検出を100件に低減
- 観測後の数分以内に情報公開

地球接近小惑星の検出と追跡

- 動きの分析, 人工天体カタログとの比較により分類
 - 70%が既知の人工天体, 30%が未知の人工天体
 - 0.1%が地球接近小惑星
- 地球接近小惑星の発見時は即時に追観測 → 軌道, 自転情報の取得
- 人類に危険をおよぼす場合は即時にアラート（スペースガード）

極めて高速に移動する天体の検出

- 微光流星, 低軌道人工天体

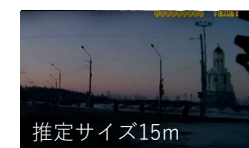
地球と人類を
守る

地球接近小惑星
の想像図



Image: ESA

2013年にロシアに
落下した小惑星

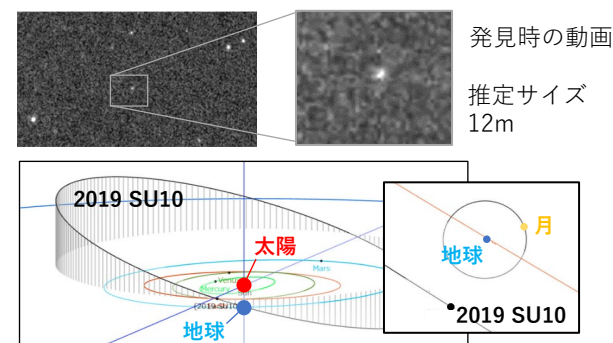


推定サイズ15m
<https://www.youtube.com/watch?v=dE3sG7nn1-8>

トモエゴゼンが発見した地球接近小惑星
計49個が国際天文学連盟に登録

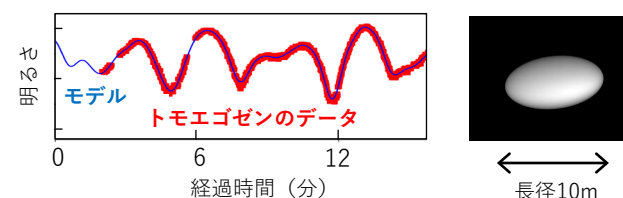
#	名前	発見日	推定直径
49	2022 YF6	2022-12-27	16m
:	:	:	:
27	2021 KN2	2021-05-30	6m
26	2021 KO2	2021-05-30	8m
25	2021 GQ10	2021-04-14	15m
24	2021 GV4	2021-04-08	5m
23	2021 GD5	2021-04-08	11m
22	2021 FA	2021-03-16	32m
21	2021 EP4	2021-03-15	4m
20	2021 CC7	2021-02-12	4m
19	2020 YO3	2020-12-23	39m
18	2020 YJ2	2020-12-21	11m
17	2020 VH5	2020-11-13	5m
16	2020 VR1	2020-11-09	5m
15	2020 VJ1	2020-11-09	15m
14	2020 UQ6	2020-10-20	94m
13	2020 QW	2020-08-17	28m
12	2020 PW2	2020-08-14	6m
11	2020 HT7	2020-04-27	14m
10	2020 HU3	2020-04-21	21m
9	2020 GY1	2020-04-02	16m
8	2020 FA2	2020-03-18	10m
7	2020 EO	2020-03-12	21m
6	2019 XL3	2019-12-15	13m
5	2019 XT2	2019-12-08	17m
4	2019 XM2	2019-12-05	16m
3	2019 VD3	2019-11-05	21m
2	2019 SU10	2019-09-25	12m
1	2019 FA	2019-03-16	6m

トモエゴゼンが発見した2019 SU10の軌道



Beniyama et al. 2022

2012 TC₄の明るさの時間変化と推定された形状



Urakawa et al. 2019

宇宙産業との連携の例

宇宙デブリ・人工天体の位置把握

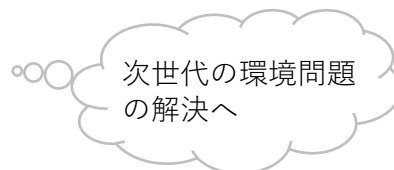
- ・ トモエゴゼンの全天サーベイデータ
- ・ 地球接近小惑星の探索（天文学）で生産される**不要データを再利用**
- ・ 国内企業と東京大学で共同研究を実施中

調査項目

- ・ 米国の人工天体カタログ(SpaceTrack)に対する検出率
- ・ ライトカーブの特徴量の調査
- ・ 未カタログ天体の軌道決定

トモエゴゼンデータの宇宙産業への利活用

- ・ 軌道決定サービス
- ・ 状態監視・追跡サービス
- ・ 宇宙デブリのリスク解析・コンサルティングサービス
- ・ 宇宙デブリ除去の支援



ESA



ESA

日本から観測可能な静止軌道以上(遠地点高度>1万km)の
SpaceTrack天体(約4,000件)に対して

1夜での検出率	46%
3夜での検出率	64%

トモエゴゼンが検出する高速移動天体(~1,000件/夜)の内訳

SpaceTrack天体	~70%
未カタログ天体	~30%
地球接近小惑星	< 1%

宇宙ビッグデータの教育普及での利活用

科学に参加する (シチズン サイエンス)

- 一般の非研究者が科学データを使って「科学研究に参加する」取り組み
 - ギャラクシークルーズ(国立天文台), SETI@Home(UC, 米)等
- トモエゴゼンのデータを使って超新星などの突発天体を発見できる



木曽観測所で宇宙の年齢について議論する高校生たち

天文教育に利用

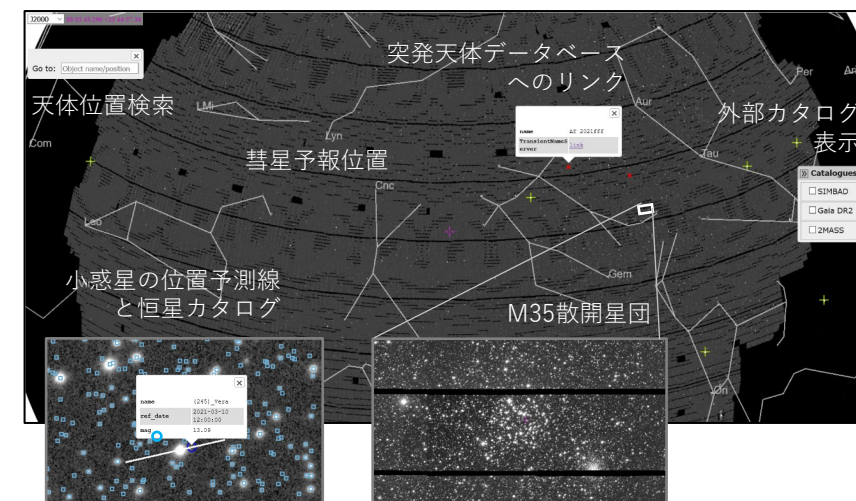
- トモエゴゼンは毎晩の夜空をまるごと時系列で記録している。
- 図鑑的ではない本物のプラネタリウム**
- 星の動き、惑星の動き
- 新彗星がやってきた。見てみよう。探してみよう。
- 高校教育ではより高度に利用 (ケプラーの法則を観測から導出してみよう)

課題

- プラットフォームや教材を誰が作るのか?
- 指導者の育成
- GIGAスクール構想、SINETの小中高開放の構想との連携

mdxを科学の
教育普及に活用

2021年3月10日のデータ



トモエゴゼンが取得する全天画像を即時公開中
<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/skyatlas/>

トモエゴゼン スカイアトラス 検索

mdx上で
運用予定

データ駆動型天文学

30

科学成果が、ハードウェア（望遠鏡・センサなど）の性能により律速されるのではなく、
データの中から価値ある情報を抽出できるかどうかにより律速される天文学

空のビッグデータ
木曾シュミット + 広視野動画センサ

ビッグデータ, 機械学習, 最適化,
自動観測, 高速ネットワーク

即時解析

分類、偽情報の除去
アラート生成
的確な判断

即時共有

トモエゴゼンシステムの概念図

トモエゴゼンとはデータ駆動型科学の理念に立脚した宇宙観測システム

時間軸天文学が学術大規模計算基盤に期待すること

1. データの長期保存（アーカイブ）問題の解決

- 科学においてデータは人類の宝。**学問は100年スケールで前進**する。
- ビッグデータの長期保存（アーカイブ）は大問題。
- アーカイブの経費をサイズに比例してユーザに求めるのは無理がある。

計算の処理能力の向上だけでは、ビッグデータ科学を前進できない

2. データI/Oの高速化

- データを**ため込むだけではだめ**。いかに**迅速に処理して発信**するかが大切。
- ビッグデータの処理速度と発信速度はしばしばI/Oリミットになる。

スパコンと人工知能に傾倒しすぎないこと。

3. データの生産地は都市部とはかぎらない

- 科学ビッグデータはしばしば**非都市部で生成**される。
- ネットワークの強化が課題。ビジネスの観点では不成立。**地元の自治体と協力**する体制を強化。
- 自治体と協働するには初・中等教育、生涯教育、災害対策、観光対策などの価値観の共有が必要。

即時解析+即時アラート
+高速伝達の性能も大切

激動の宇宙の姿をもとめて

木曾トモエゴゼンとビッグデータ天文学

— まとめ —

トモエゴゼン計画とは

- 木曾シュミット望遠鏡 + 広視野CMOSカメラを使い、
- 空の広い範囲を動画で見続けることで、
- 「偶然におきる宇宙の一瞬の変化」をとらえる科学計画。

トモエゴゼンとデータ駆動型天文学

- 自立運転で毎晩の夜空をまるごと時系列で記録。最大30 TB/夜。
- オンサイト処理 → SINET6 → mdx (即時公開), 国立天文台 (長期アーカイブ)
- データの迅速な利用: 即時解析、即時発信 (アラート)。
- データの長期保存: 科学データは人類の宝。科学は100年スケールで前進する。
- 天文学以外で利活用: 産学連携(宇宙デブリ等)、教育普及。

学術大規模計算基盤に期待すること

- データの長期アーカイブ問題の解決
- データI/Oの高速化
- 非都市部からのビッグデータの発信



朝日をあびるシュミット望遠鏡ドーム



トモエゴゼンで取得した画像データ (おとめ座銀河団)

APPENDIX

理学ビッグデータとその社会における利活用

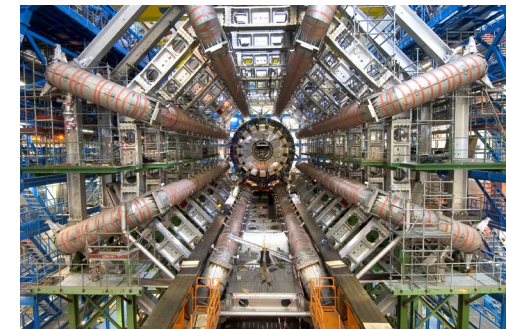
理学とは、

- 物理学、化学、生物学、地球科学、天文学。自然科学とも呼ばれる。
- 基礎科学（理学） — 応用科学（工学、医学、薬学、農学、情報学）
- 明日の社会の役に立たない科学

米国フェルミ研究所ウィルソン所長、議会(1969年)にて

「加速器は米国の防衛に直接は貢献できません。しかし、米国を防衛するに値する国にできます。」

"It has nothing to do directly with defending our country except to help make it worth defending." (<https://history.fnal.gov>)



LHC/ATLAS素粒子実験のデータは
200PB/年におよぶ

理学データは社会で利活用できるのか？

- 明日の社会の役に立たないので、残念ながら利活用は難しい。
- 極めて専門的なデータ。



理学ビッグデータは社会の役に立つのか？

理学ビッグデータは社会で利活用できるのか？

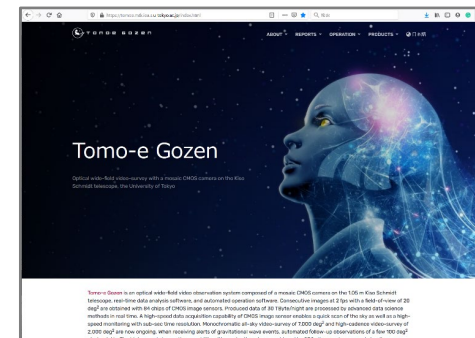
- やはり、大部分は役に立たない。
- 主目的でないところに面白い情報が隠れているかもしれない。それは極めてユニークな情報であるはず。
- **理学研究者の積極的なアイデアだしが必要**

トモエゴゼンのデータ公開

- 東京大学理学部1号館(本郷)に設置したサーバーにて画像データを公開中
- mdxにデータ公開の機能を移設予定
- mdxでは公開データの種類の拡張、データ解析機能の移設を予定

木曽観測所 検索

<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/>

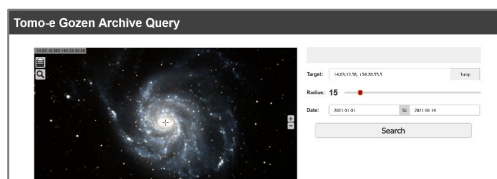


オープンデータ (制限なし)

アーカイブ画像データ

- 較正済み科学データ (FITS形式)
- 取得6か月後から順次公開

検索画面



観測ログ

Date	Exp ID	Object	Observer	Project	(RA, Dec)
2021-03-11 20:10	499117	J1817+0000_dB4	Morioka	AI-Sky Survey	(273.900, +0.001)
2021-03-11 20:10	499118	J1817+0000_dB3	Morioka	AI-Sky Survey	(273.900, +0.000)
2021-03-11 20:10	499119	J1817+0000_dB2	Morioka	AI-Sky Survey	(274.455, +0.000)
2021-03-11 20:09	499114	J1817+0000_dB1	Morioka	AI-Sky Survey	(274.455, +0.000)
2021-03-11 20:09	499113	J1827+0725_dB4	Morioka	AI-Sky Survey	(275.222, +7.427)
2021-03-11 20:09	499112	J1827+0725_dB3	Morioka	AI-Sky Survey	(275.222, +7.827)
2021-03-11 20:08	499111	J1827+0725_dB2	Morioka	AI-Sky Survey	(275.222, +7.827)
2021-03-11 20:08	499110	J1827+0725_dB1	Morioka	AI-Sky Survey	(275.222, +7.428)
2021-03-11 20:08	499109	J1856+1451_dB4	Morioka	AI-Sky Survey	(283.374, +14.854)
2021-03-11 20:07	499108	J1856+1451_dB3	Morioka	AI-Sky Survey	(283.375, +15.254)
2021-03-11 20:07	499107	J1856+1451_dB2	Morioka	AI-Sky Survey	(283.345, +15.255)

ファイルリスト

Date	Exp ID	Object	Observer	Project	(RA, Dec)
2021-03-11 20:09	499114	J1817+0000_dB1	Morioka	AI-Sky Survey	(274.455, +0.000)

Stack (14)

Download file list

共同研究用データ (制限あり)

トモエゴゼン計画との共同研究下で実施

速報画像データ

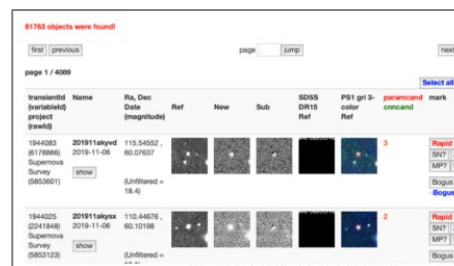
- 較正済み科学データ (FITS形式)
- 全データを即時公開

突発現象・移動天体データ

- 価値ある情報を抽出したデータ群
- 全データを即時公開

産学連携用データ

突発現象データビューア



高速移動天体データビューア

