

# Tomo-e Gozen

## データプラットフォームの開発

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

瀧田 怜 (Satoshi TAKITA)

# 時間軸天文学とビッグデータ

# 時間軸天文学とは

## Time-Domain Astronomy

宇宙の短時間変動に着目した天文学

### 周期的な明るさの変動

- 脈動変光星やパルサー 等

### 準周期的な明るさの変動

- 活動銀河核や T タウリ型星 等

### 突発的な明るさの変動

- 超新星、新星、ガンマ線バースト、  
恒星フレア、重力波イベント 等

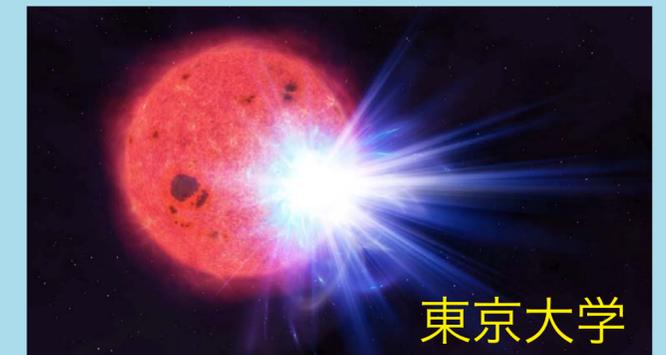
### 高速な位置の変動

- 地球接近小惑星、流星、人工天体



東京大学

超新星



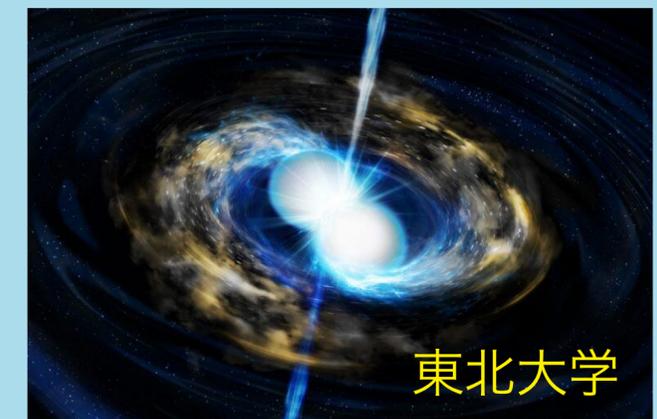
東京大学

M 型星フレア



ICRAR

ブラックホールへの質量降着



東北大学

中性子連星の合体



東京大学

地球接近小惑星

# 変化し続ける宇宙

## 客星

古代中国や日本において「客星」の記録

- 普段見慣れない星

+ 超新星や新星、彗星

185 年から 1606 年まで 8 個の銀河系内の超新星

+ 天変地異・不吉の前兆

- 日本では藤原定家の「明月記」等

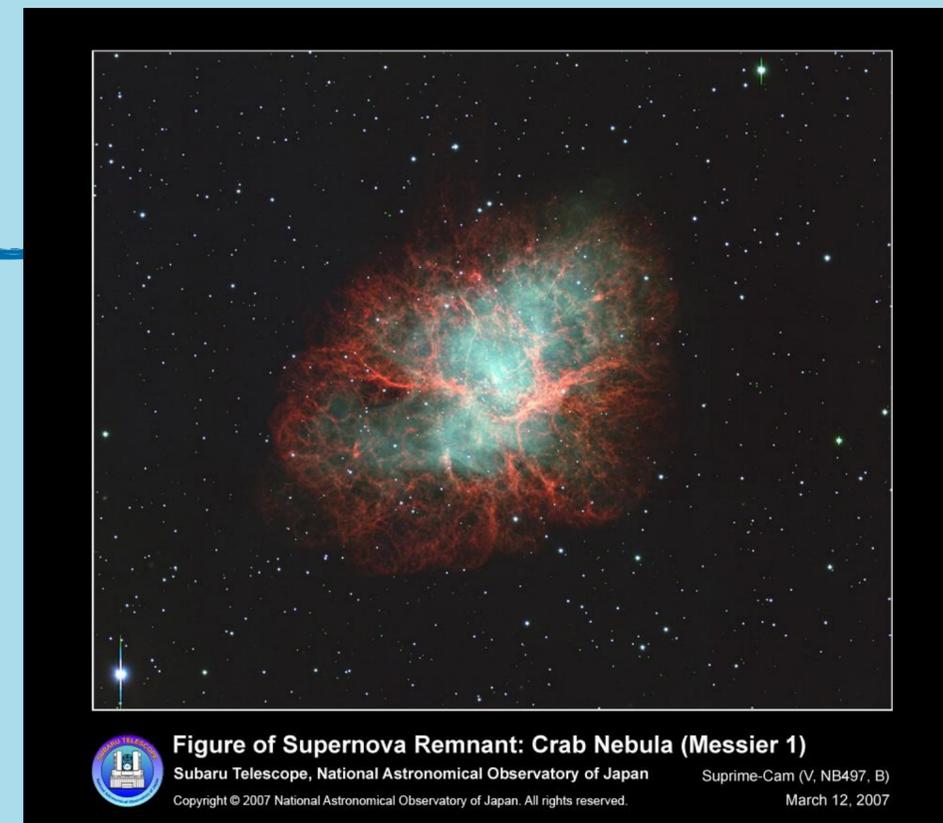
## 惑星

ギリシャ語で「さまよう者」Planetes

- 恒星とは異なる移動をし、時には逆向きに移動する

+ 紀元前 3 世紀のアリスタルコスによる「太陽中心説」

日から年スケールの変動現象



かに星雲  
(SN1054 の超新星残骸)

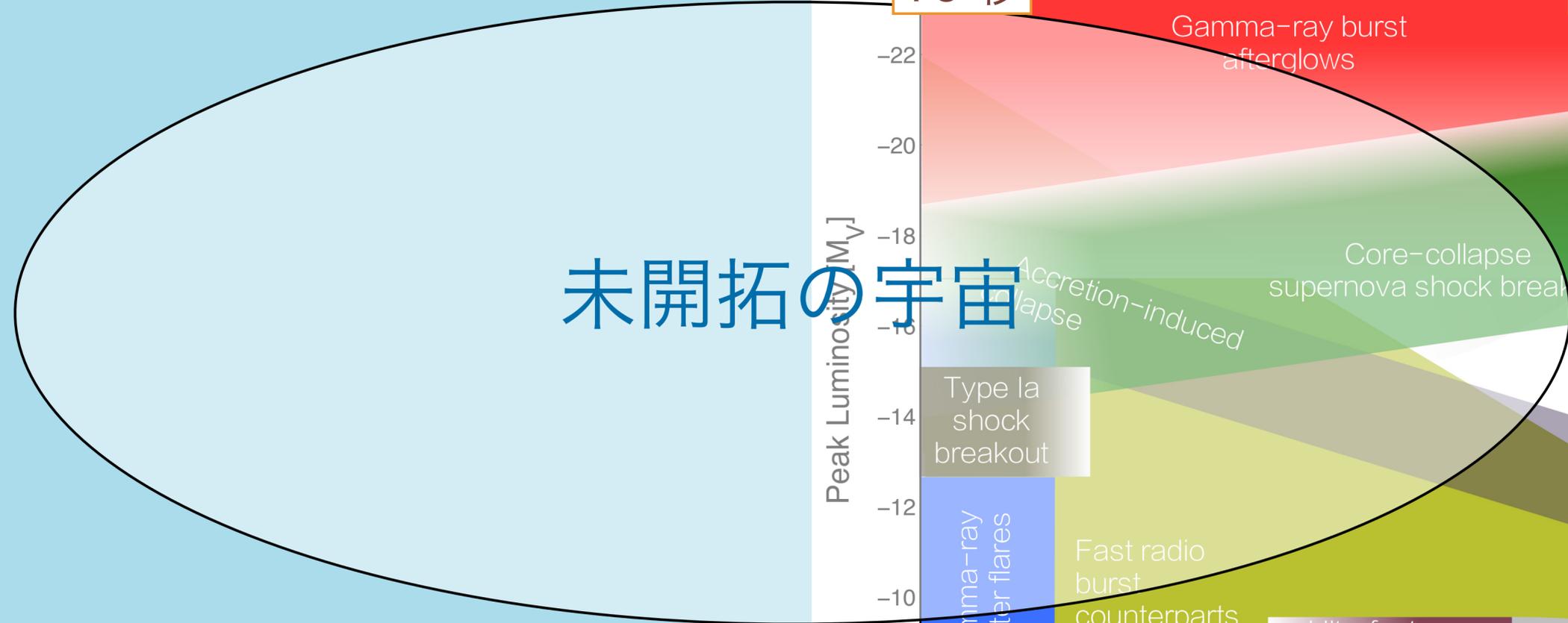


2024/5/26 にトモエゴゼンで捉えた紫金山-ATLAS 彗星

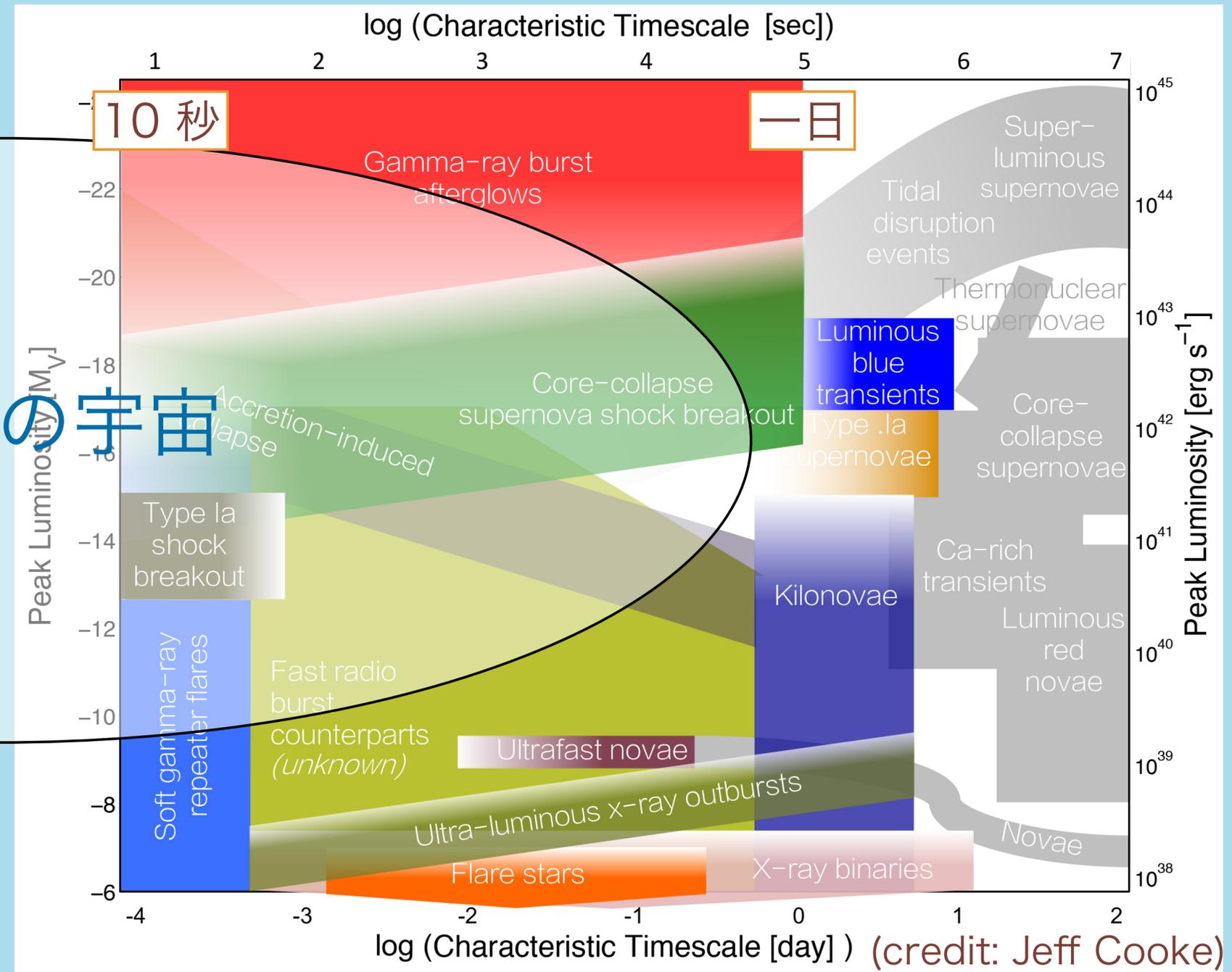
# 短時間変動現象

分から秒以下のスケールの変動現象を狙う

可視光で明るさの変化する天体



未開拓の宇宙



グレー: これまでに観測的に知られている現象

カラー: 理論的に予測される現象

# 究極の時間軸天文学

## 夜空全てを動画で記録する

稀で一過性の突発現象を逃さず捉える

見上げた空全域を最高の解像度で撮影する

空の半球：2 万平方度、一画素の見込む空：1 秒角

-> 2500 億画素、0.5 TB

空全域を一秒ごとに撮る (= 動画)

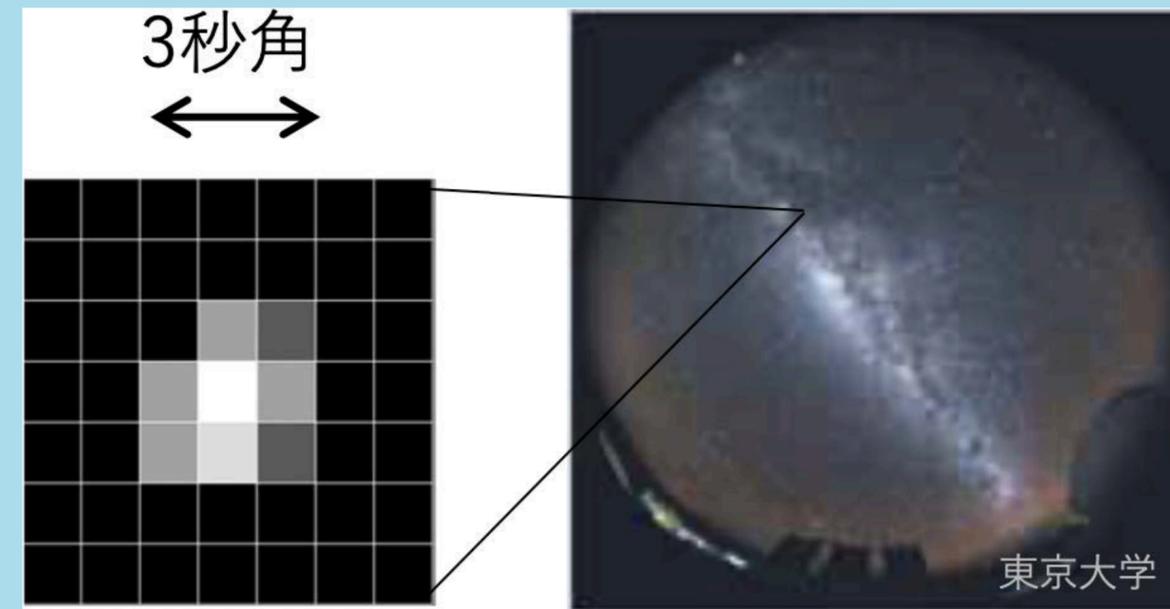
$0.5 \text{ TB/sec} = 14 \text{ PB/night} \Rightarrow 1.4 \text{ EB/year}$

(一晩を 8 時間、年間 100 夜観測と仮定)

途方もないビッグデータ

しかし、現実的ではない

100 台以上の望遠鏡、膨大なデータを処理する大量の計算機、データの保存



地球大気の揺らぎにより  
点源の星は 1--3 秒角程度に広がる

# 木曾観測所 トモエゴゼン計画

# 木曾観測所

開所: 1974 年

所在地: 長野県木曾郡木曾町



## 望遠鏡

- 105 cm シュミット望遠鏡
  - + 有効口径: 105 cm
  - + 口径比: F/3.1
  - + 視野: ~9 度 (直径)
  - + 観測装置: CMOS カメラ Tomo-e Gozen
- 30 cm 望遠鏡
  - + 大学生向け実習
  - + 観望会等の一般利用



<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kiso/>

# 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 (1億9,000万画素)
- 2 fpsの動画 (部分読み出しで~100fpsも可)
- 可視光単色
- 2019年10月より本格運用を開始

### 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

### 観測運用

- 全天領域の動画サーベイ (2 fps)
- 特定領域の高頻度サーベイ (2 fps)
- 特定領域の高速モニタリング (>10 fps)
- 即時の広域追観測 (重力波, ニュートリノ等)



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

詳細はTomo-e Gozenウェブサイトを参照

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



トモエゴゼン計画の研究グループ, 約50名が参加

# トモエゴゼンによる動画サーベイ

## 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」
- 20 平方度/ポインティング, 0.5 秒 x 18 (12) フレームの動画 x 4 ディザリング
- 晴天夜のほぼ毎日 (~100 夜/年)

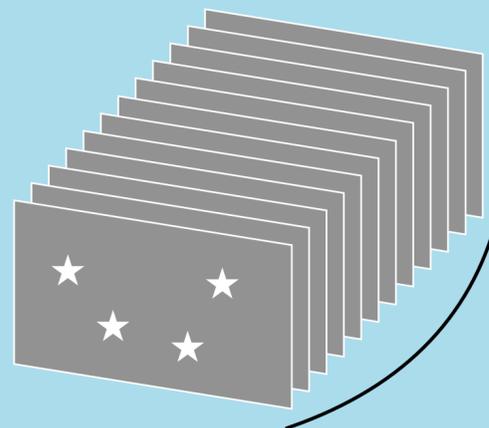
## サーベイ領域

- All-Sky Survey (前半夜)
  - + 18 フレーム, ~12000 平方度, 1 回/夜
- High-Cadence Survey (後半夜)
  - + 12 フレーム, ~3000 平方度, 3--5 回/夜 (30 分毎)

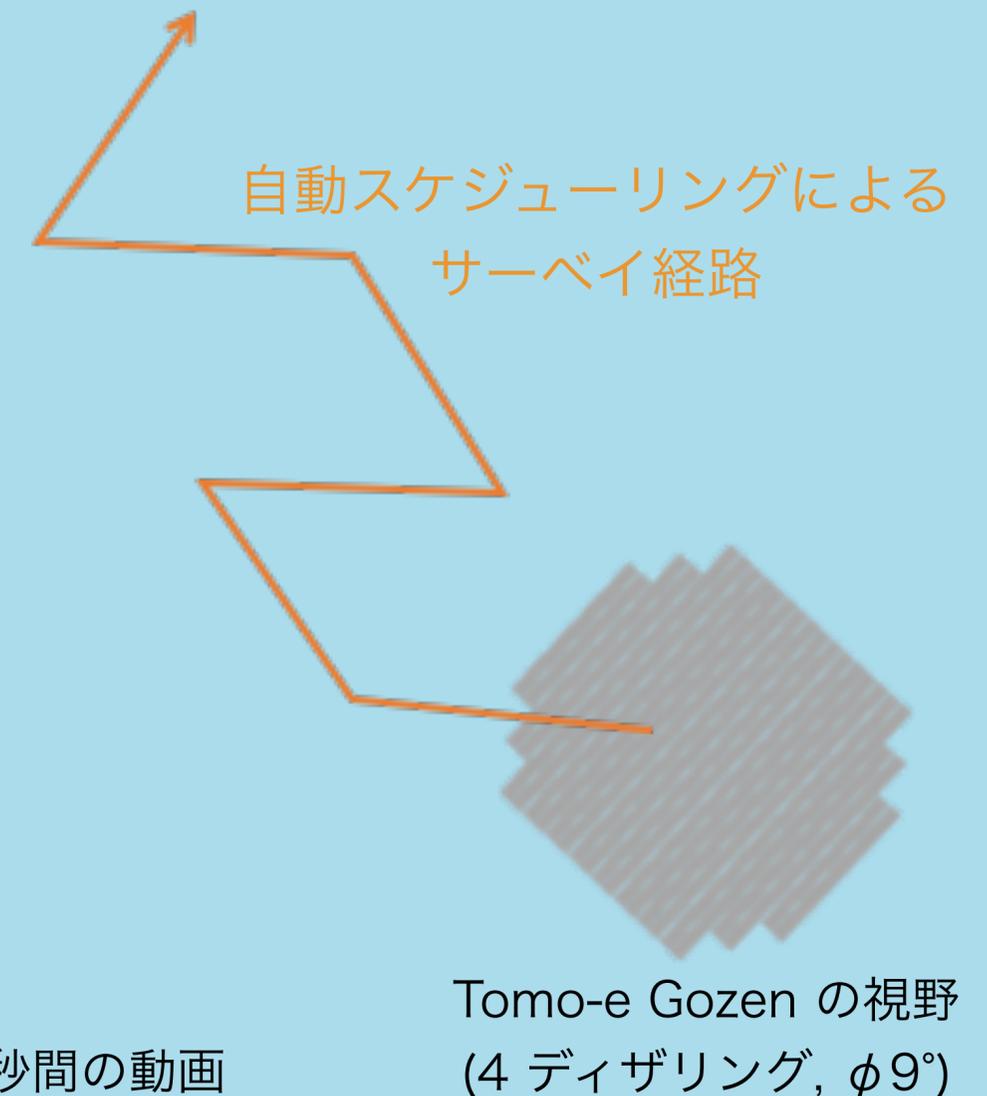
## 達成感度

- < 17 等級 (1 frame)
- < 18 等級 (スタック時)

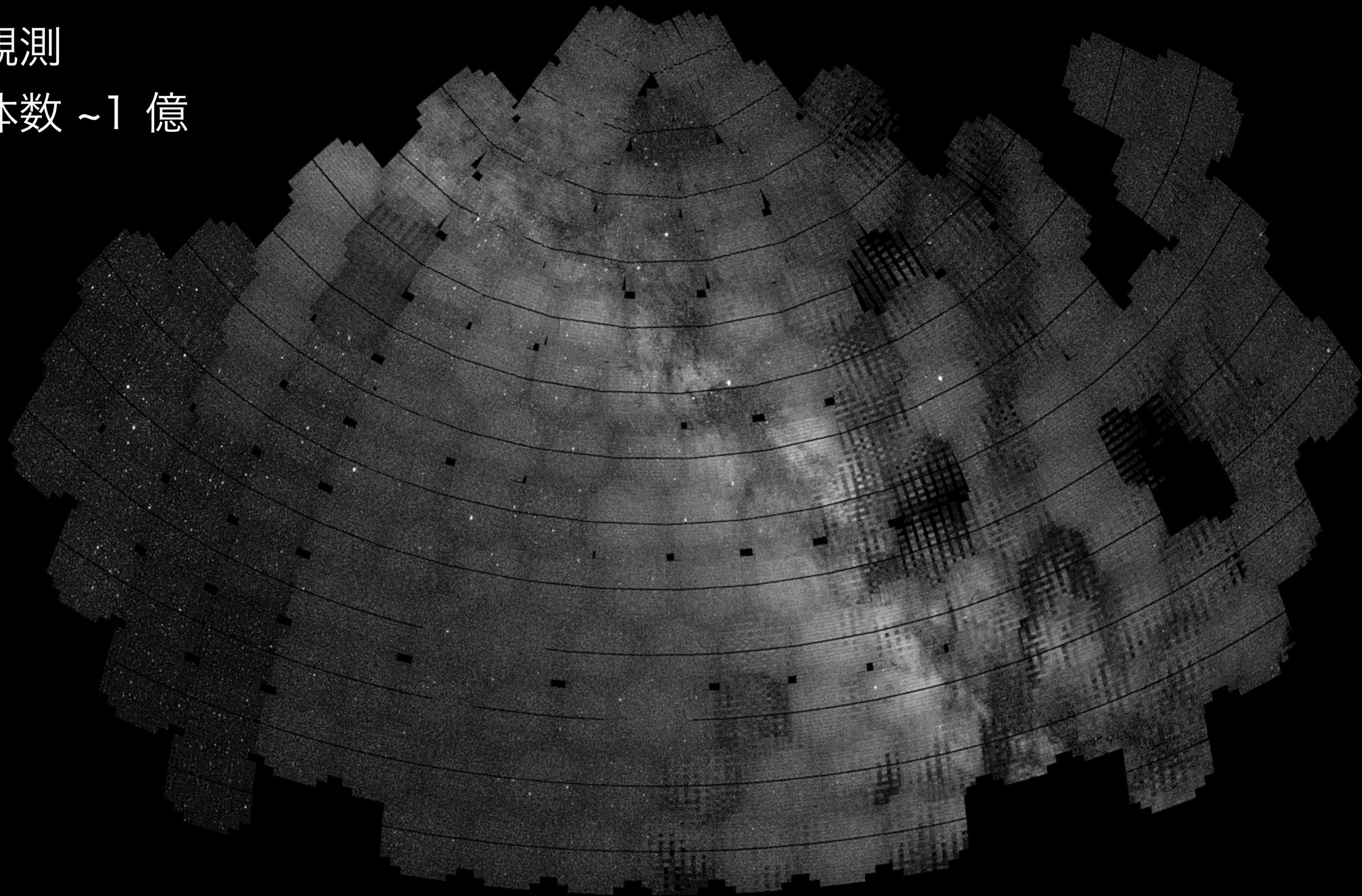
各フレーム 0.5 秒露光  
x 18 (12) フレーム



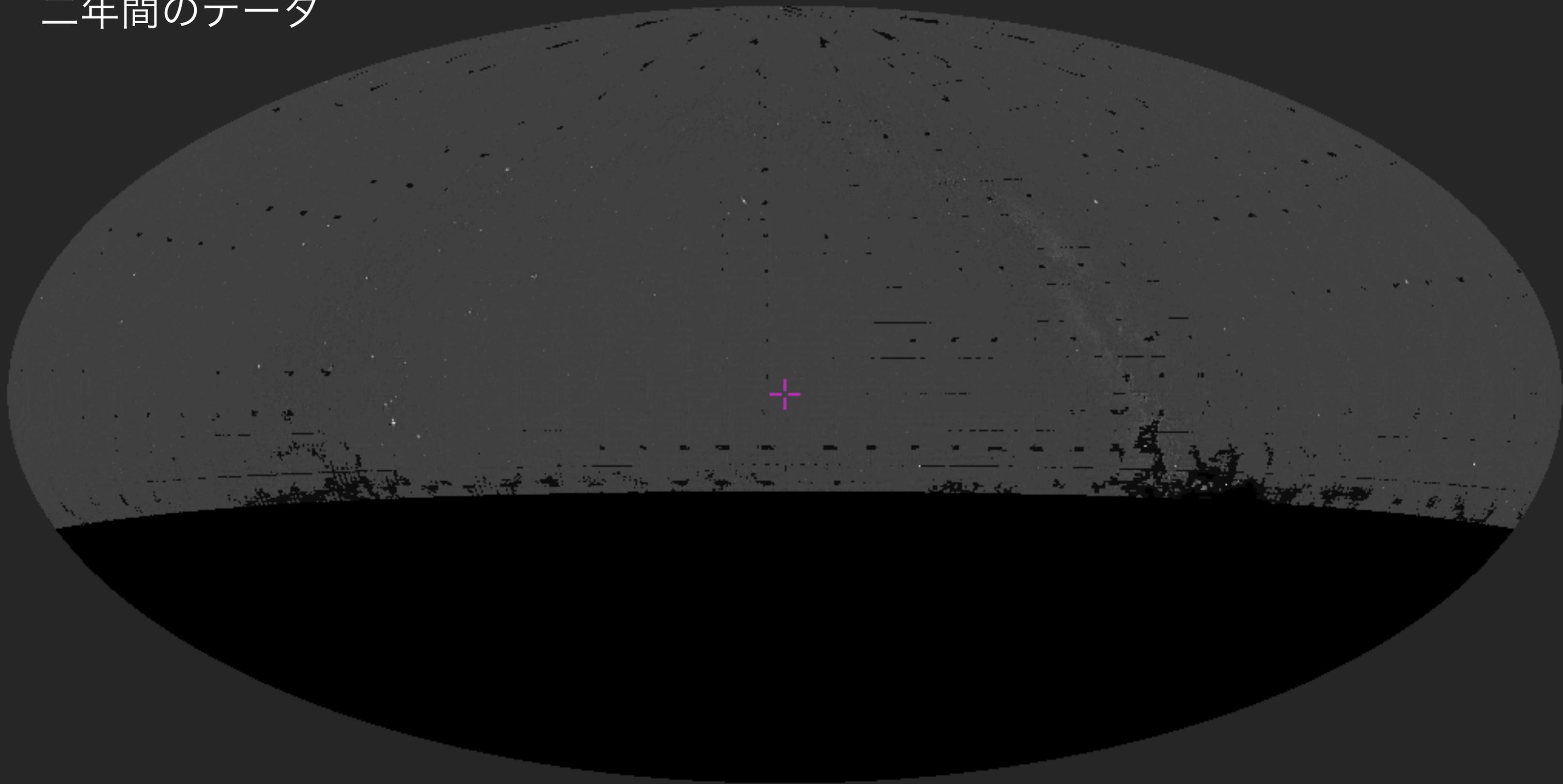
9 (6) 秒間の動画



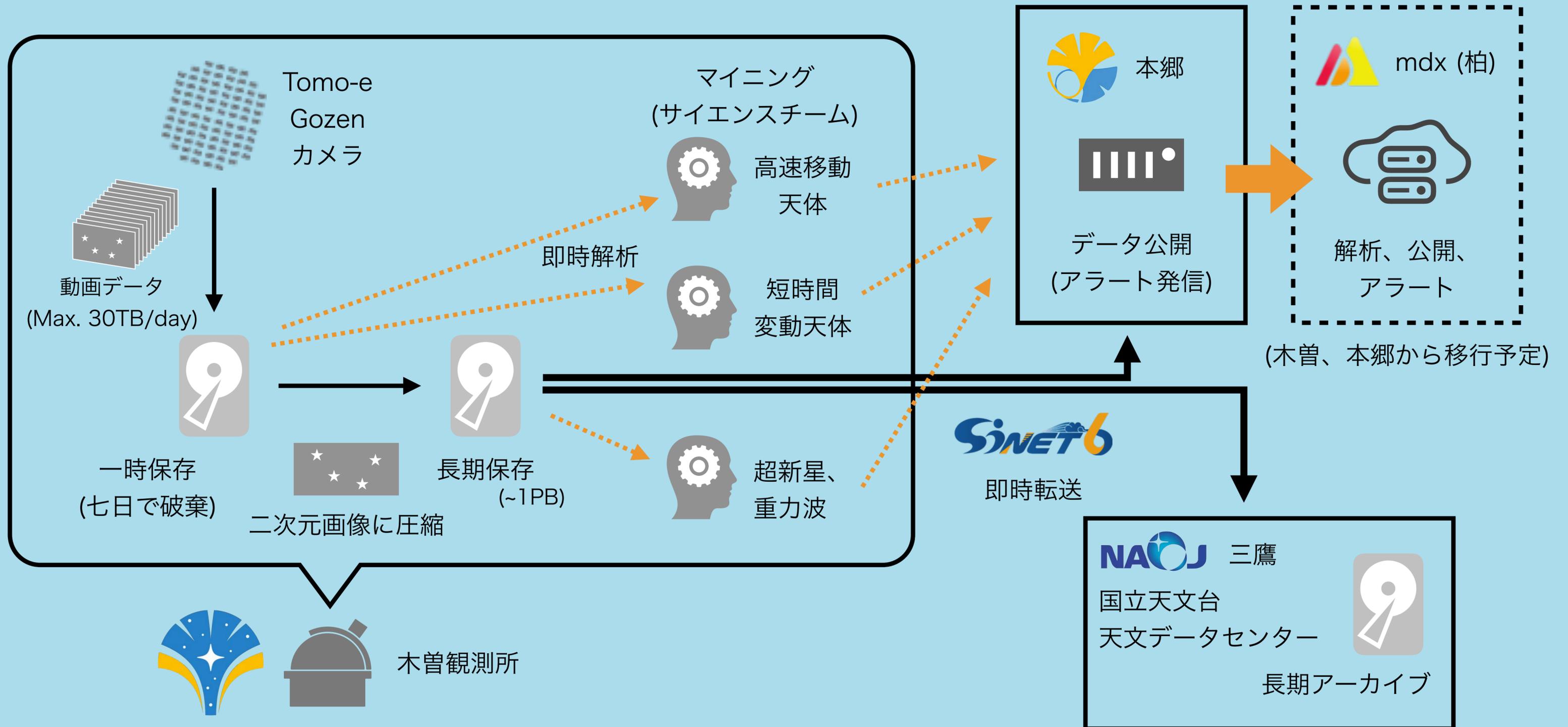
一晩の観測  
検出天体数 ~1 億



二年間のデータ



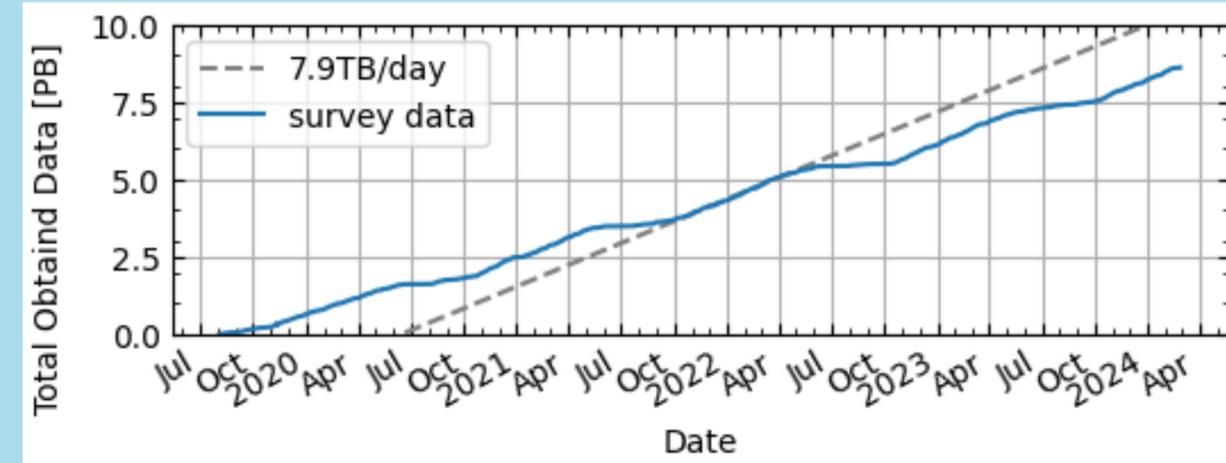
# トモエゴゼンのデータフロー



# データ取得状況

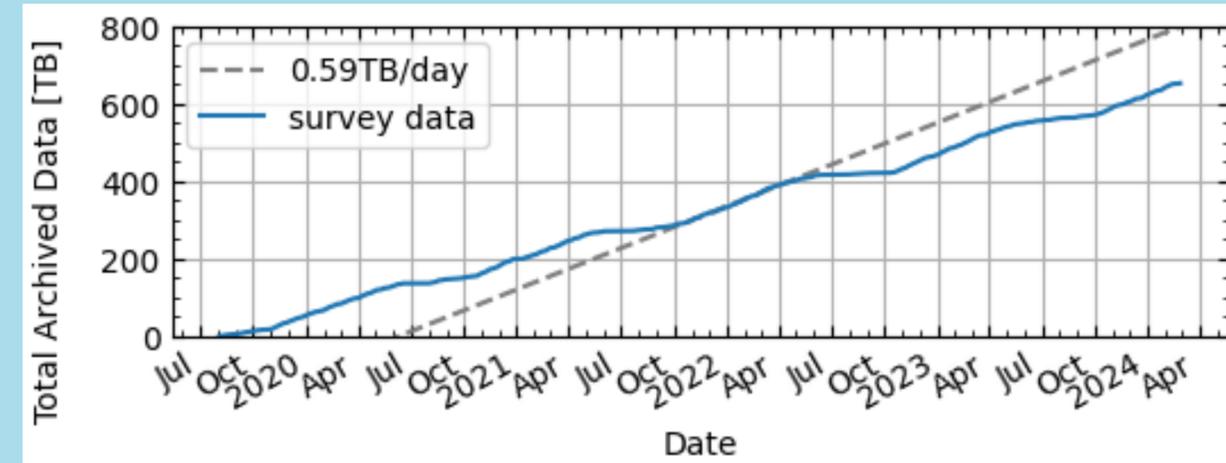
## 取得データ

- 2019年10月より本格運用を開始
- 取得から7日後に消去
- 8 TB/day (2 PB/year)



## アーカイブデータ

- 時間方向にスタックして静止画を保存
- 0.6 TB/day (150 TB/year)
- + 画像データのみの計算
- + 取得データの7%
- + 今後アーカイブするデータの種類を増やすと数倍に増加



# 多波長/他分野連携

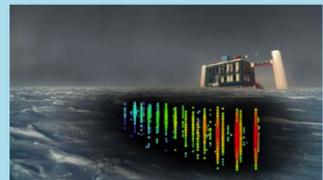
マルチメッセンジャー

高エネルギー観測連携



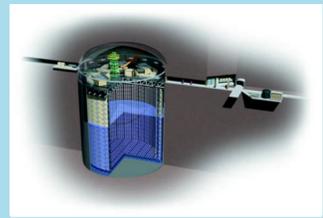
重力波

カグラ, LIGO, VIRGO



ニュートリノ

IceCube (南極)



アラート  
(minutes)

スーパーカミオカンデ (神岡)



ガンマ線衛星 Fermi



X線望遠鏡 MAXI (ISS)

超新星, 新星, フレア



国際的な突発天体  
データベース

アラート  
(minutes)



日本国内の  
光赤外線  
大学間連携



地球接近小惑星

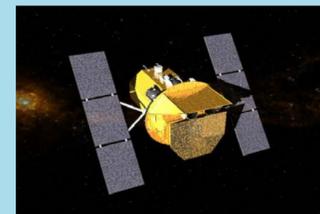


高層大気  
宇宙工学  
人工天体監視

多分野連携  
社会連携



X線望遠鏡 NICER (ISS)



X線望遠鏡 SWIFT

同時観測  
(sec -- msec)



電波望遠鏡 CHIME  
(カナダ)



電波望遠鏡 FAST  
(中国)



32m 電波望遠鏡 (山口大)



MU レーダー (設楽, 京大)

サブ秒の多波長 + 同時観測

# 代表的な科学成果

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', 2019, AJ 地球接近小惑星
2. Arimatsu et al. `New Constraint on the Atmosphere of **(50000) Quaoar** from a Stellar Occultation', 2019, AJ 太陽系外縁天体
3. Richmond et al. `An optical search for **transients lasting a few seconds**', 2020, PASJ 未知のフラッシュ
4. Ohsawa et al. `Relationship between Radar Cross Section and Optical Magnitude based on Radar and Optical Simultaneous Observations of **Faint Meteors**', 2020, Planetary and Space Science 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', 2021, PASJ 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', 2021, Progress of Theoretical and Experimental Physics 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', 2021, ApJ 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', 2022, PASJ 矮新星
9. Niino et al. `Deep simultaneous limits on optical emission from **FRB 20190520B** by 24.4 fps observations with Tomo-e Gozen', 2022, ApJ 高速電波バースト
10. Beniyama et al. `Video observations of tiny **near-Earth objects** with Tomo-e Gozen', 2022, PASJ 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', 2022, PASJ M 型星フレア

# 教育普及

## 天文教育

- Aladin Lite をベースにスカイアトラスを開発
- + Google Map のように、自由に描画領域を操作
- + 毎晩の観測データによる本物のプラネタリウム
- + 惑星や彗星の動き、超新星

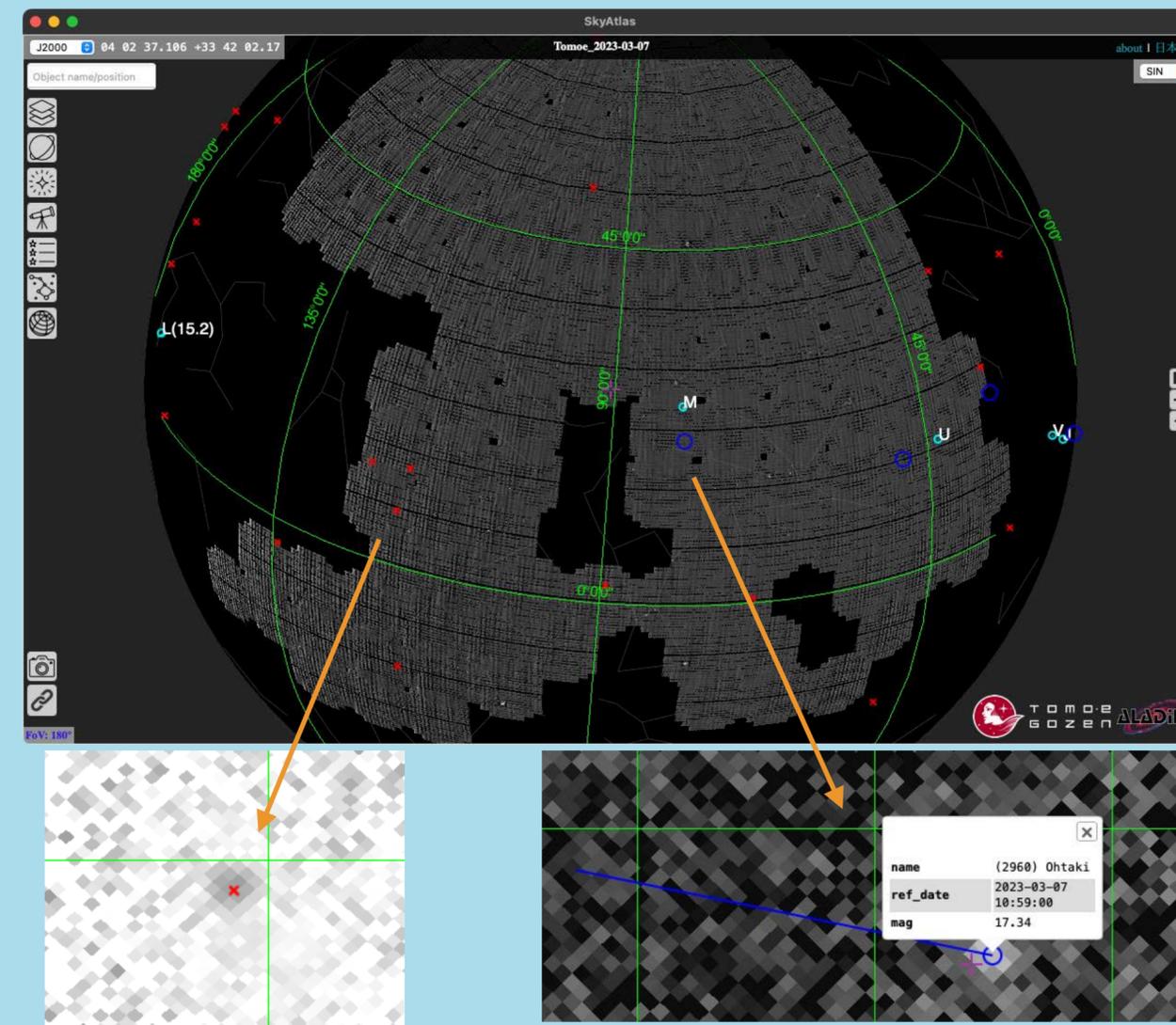
## シチズンサイエンスへの応用

- トモエゴゼンのビッグデータを利用
- + 超新星や新彗星の発見？
- + 小惑星探査？

## 課題

- プラットフォームや教材の作成
- 指導者の育成

スカイアトラス  
(2023-03-07 のデータ)



SN 2023boc (差分画像)      小惑星 Ohtaki と軌道予測

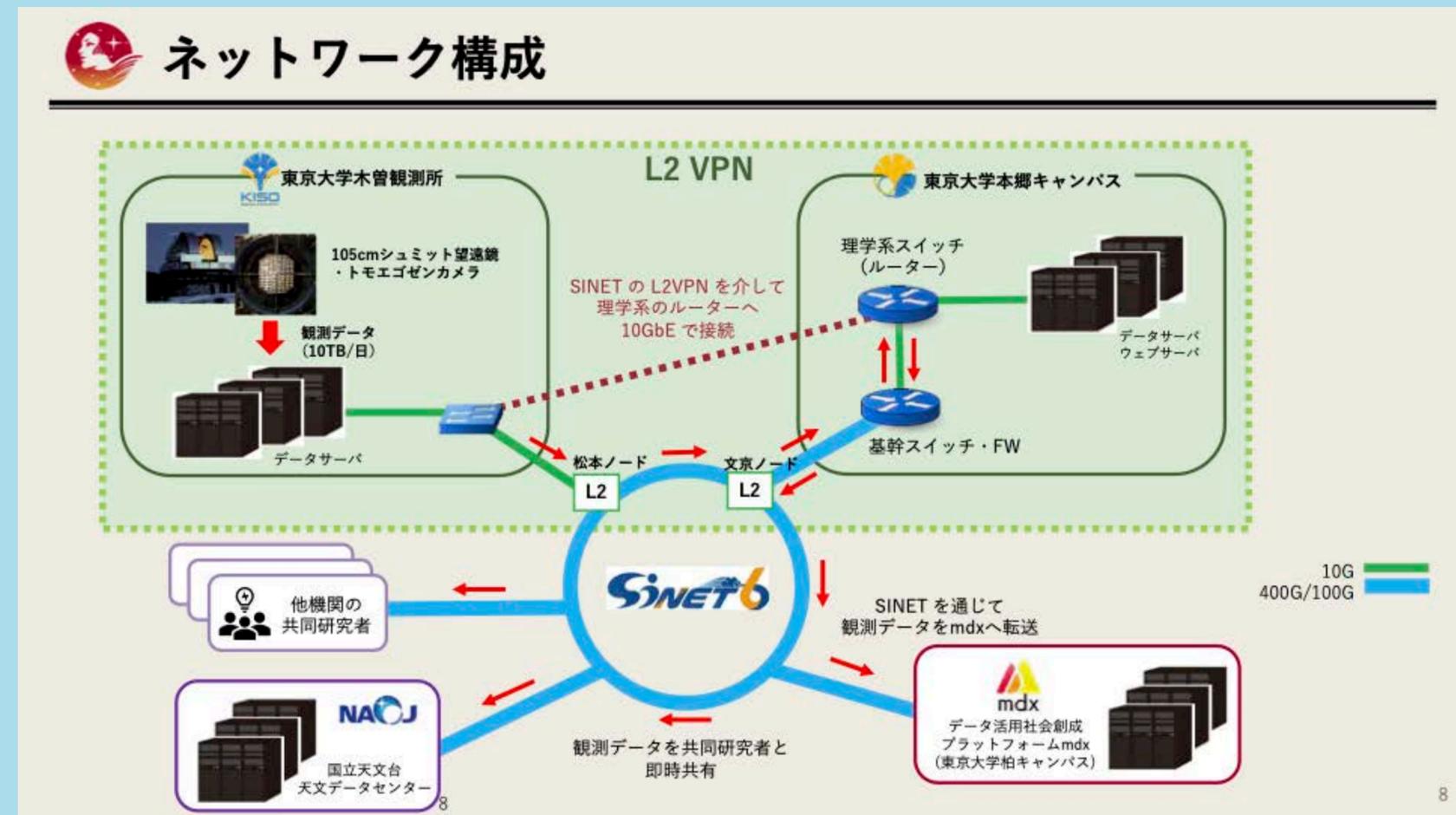
<https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/skyatlas/>

# トモエゴゼン データプラットフォーム

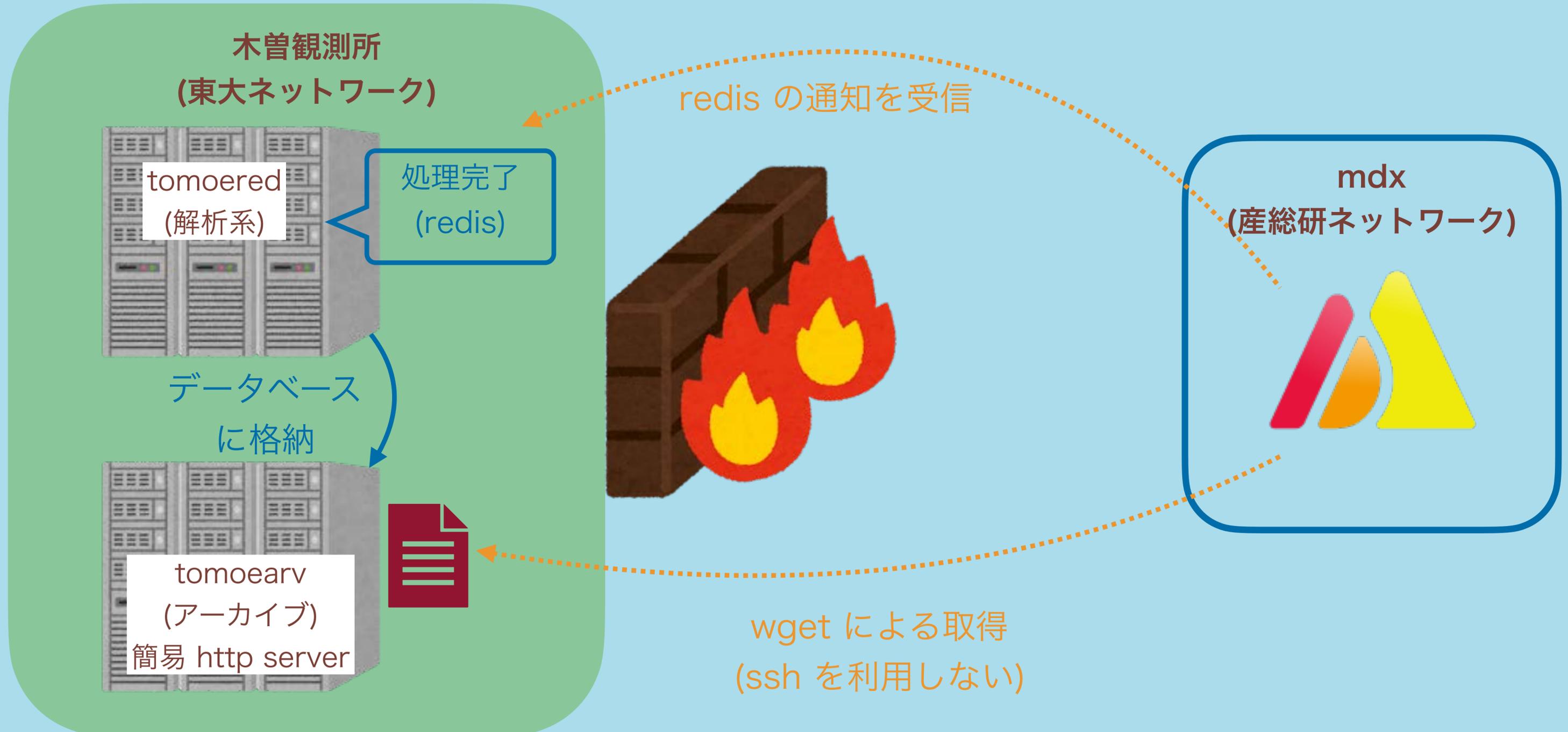
# SINET6 接続



接続当初、木曾からの上り回線のみ速度低下が発生  
松本ノードに設置した機器の光モジュールの不具合が発覚  
2023年10月にモジュールを交換して解消  
定常的に ~6 Gbps で通信可



# データの即時転送



# データベース

## 観測ログ

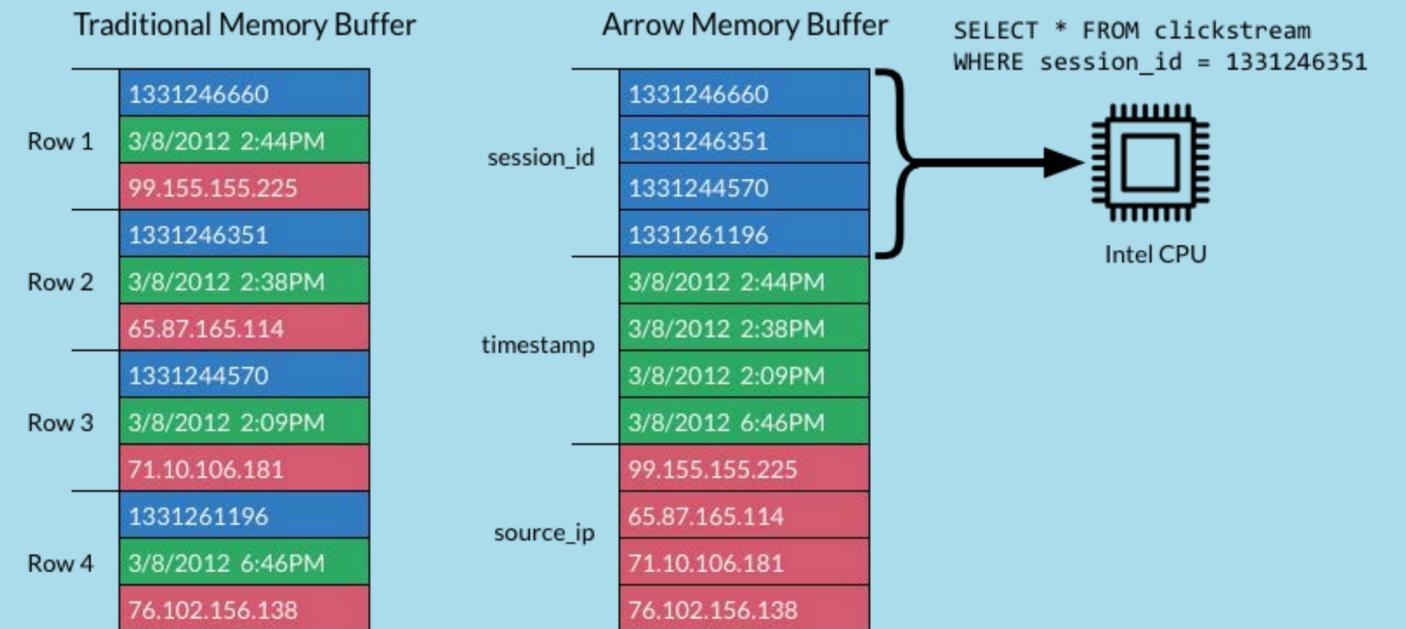
- 観測システムとは独立
- 毎晩の観測終了後に一度だけ追記
- 検索性能が重要

=> OLAP 的なデータベースが有効

## Apache Arrow

- 列指向データベース
- parquet によるファイルベース
  - + ファイル I/O で律速しているかも？
- pyarrow や duckdb 等のライブラリ
- (PG-Strom で PostgreSQL に組み込み可)

	session_id	timestamp	source_ip
Row 1	1331246660	3/8/2012 2:44PM	99.155.155.225
Row 2	1331246351	3/8/2012 2:38PM	65.87.165.114
Row 3	1331244570	3/8/2012 2:09PM	71.10.106.181
Row 4	1331261196	3/8/2012 6:46PM	76.102.156.138



<https://arrow.apache.org>



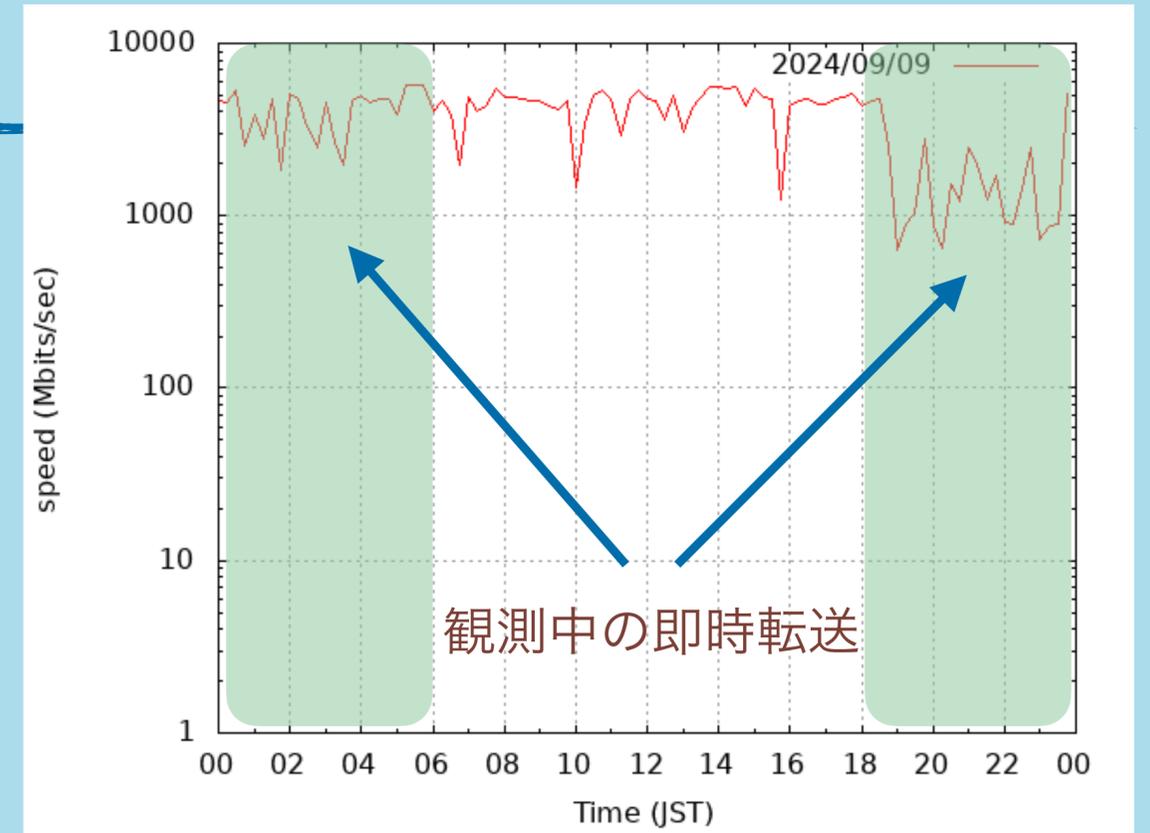
# 問題点

## Tomo-e Gozen のデータの性質依存

- 非常に大量の、小さなファイル群
  - + ~10MB/file, ~150k file/day
  - + 観測中の逐次転送は (恐らく) 問題ない
  - + 一括で転送するときのパフォーマンス
    - + 過去のデータの転送
    - + tar で固める等の細工

## 大容量ストレージ (> 1PB)

- HPCI 共有ストレージ (500TB 確保)
  - + ファイル数制限の問題 (スパコン的な使い方とは異なる)
    - + これも tarball 化が必要
    - + ファイルへのアクセス方法が煩雑
- 将来的にはコールドストレージ的な使い方 (tarball? オブジェクトストレージ?)



木曾観測所 SINET の転送速度 (空き帯域) モニタ

# まとめ



## トモエゴゼン計画

- 木曾シュミット望遠鏡 (広視野) + モザイク CMOS カメラ (動画観測)
- 自動観測ソフトウェア + リアルタイム解析システム
- 宇宙の一瞬の変化をとらえる

## 科学成果

- 小惑星の高速自転や恒星フレア等の短時間変動
- 超新星探査や爆発直後の時間変動
- etc...

## mdx + SINET の活用

- データアーカイブ
  - + HPCI 共有ストレージにより 500TB を追加で確保
- プラットフォーム開発
  - + データの即時共有、超新星等のアラート発信
- 教育普及活動
  - + 地元への還元
  - + 名古屋市科学館と共同でスカイアトラスを活用

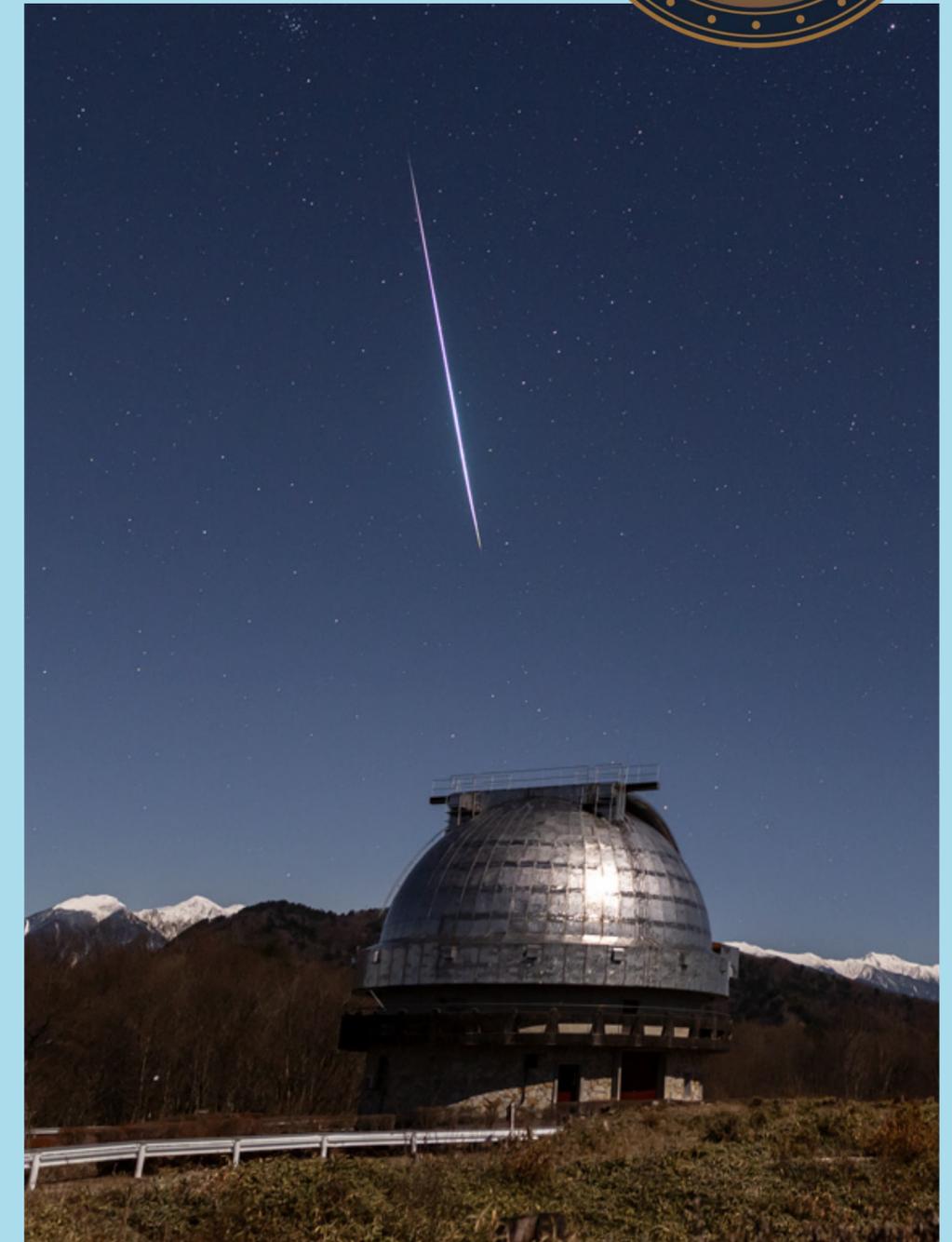


写真: 川村 晶

mdxのユースケースを、こちらに随時アップしていく予定です。mdxを活用した研究内容を深掘りします。タイトルをクリックいただくと、記事をご覧いただけます。

## CASE 5. 激動する宇宙を捉えたデータを木曾からmdxへ、そして世界へ



Interviewees:  
酒向重行氏（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 准教授） / 瀧田玲氏（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 特任助教） / 森由貴氏（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 木曾観測所 主事員）  
取材日：2024年8月

<https://mdx.jp/use-case/case5/>