



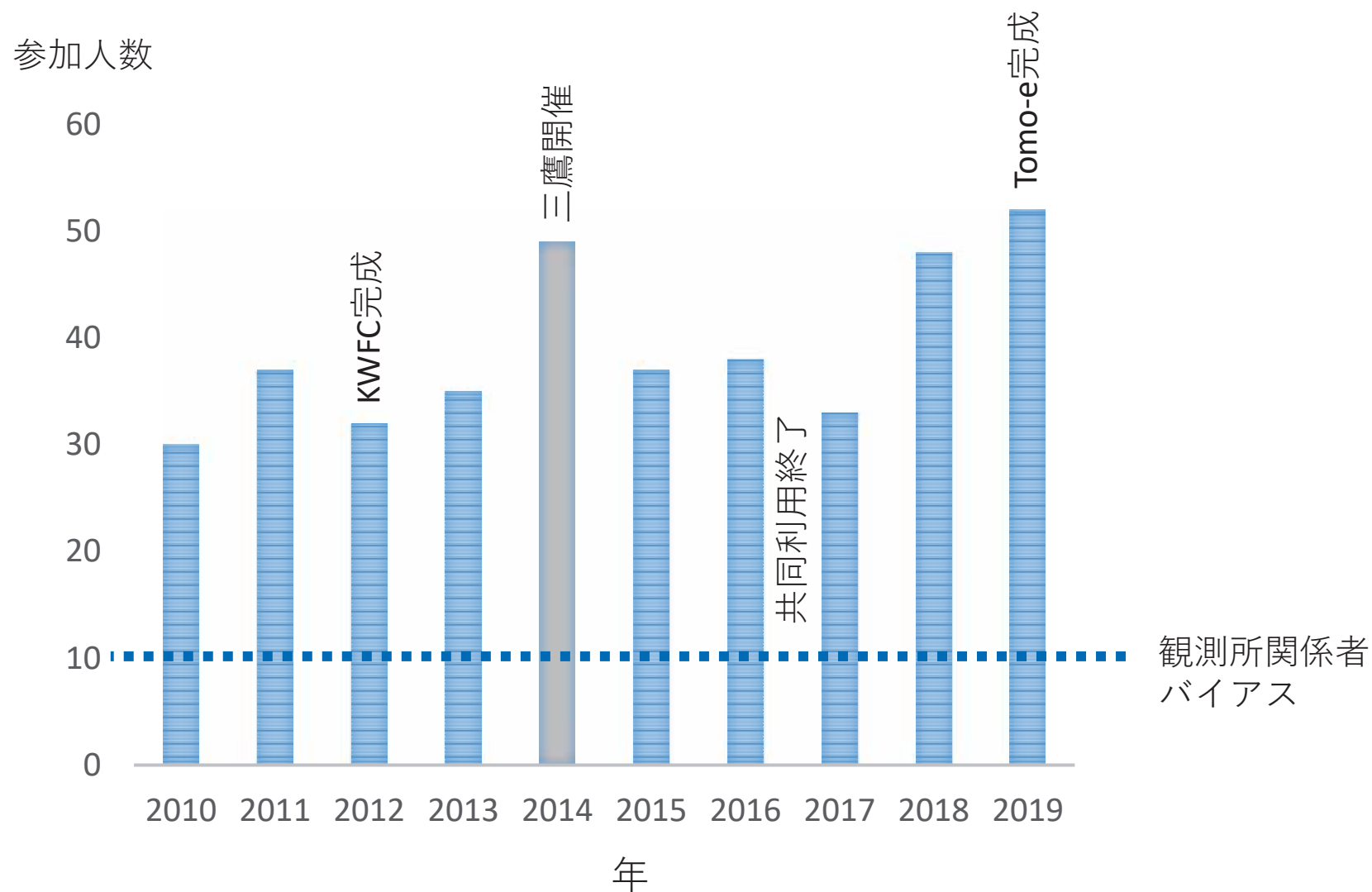
東京大学木曾観測所 Tomo-e Gozen 計画

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



2019/7/9-10, シュミットシンポ2019, 木曾町御料館

シュミットシンポジウムの参加人数の推移（2010 - 2019）



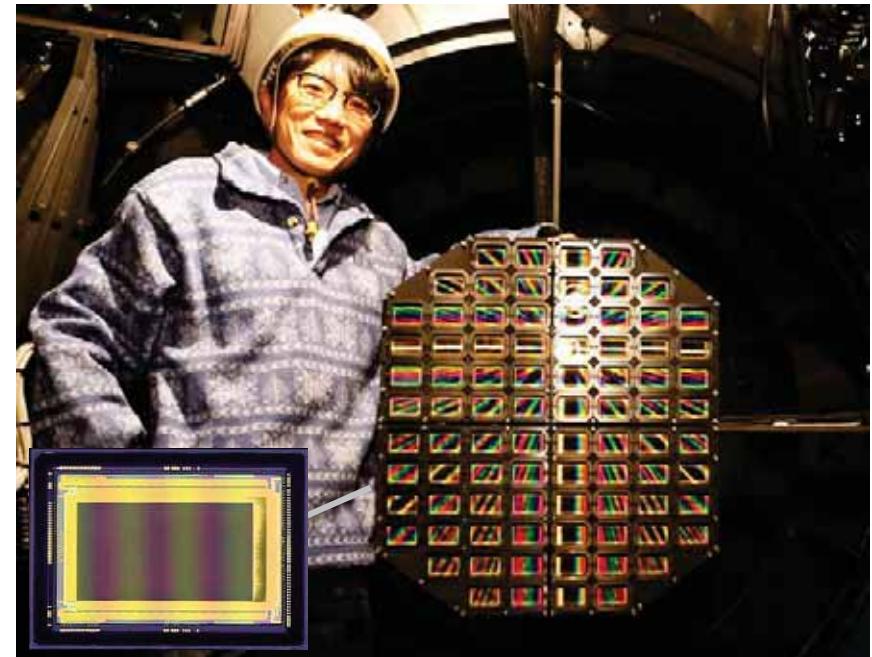


Sako et al. 2018, SPIE

the first wide-field CMOS camera

T O M O E
G O Z E N

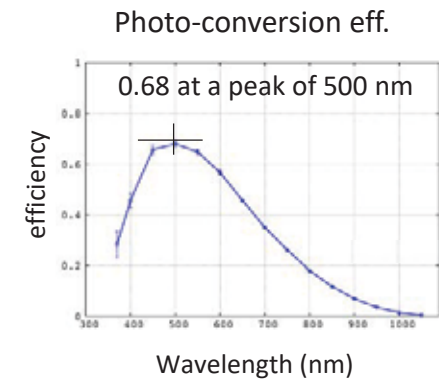
- 東京大学木曾観測所105cmシュミット望遠鏡用
- 視野20平方度
- 84台のCMOSセンサを搭載, 計1億9000万画素
- 毎秒2フレームを取得可能
- 毎夜30テラバイトの動画ビッグデータを生成
- 自動観測と人工知能による宇宙突発現象の即時検出
- 2014年より開発を本格化 (2014/9 御嶽山噴火災害)
- 2019年4月にカメラ完成 (2019/9 災害復興5周年)



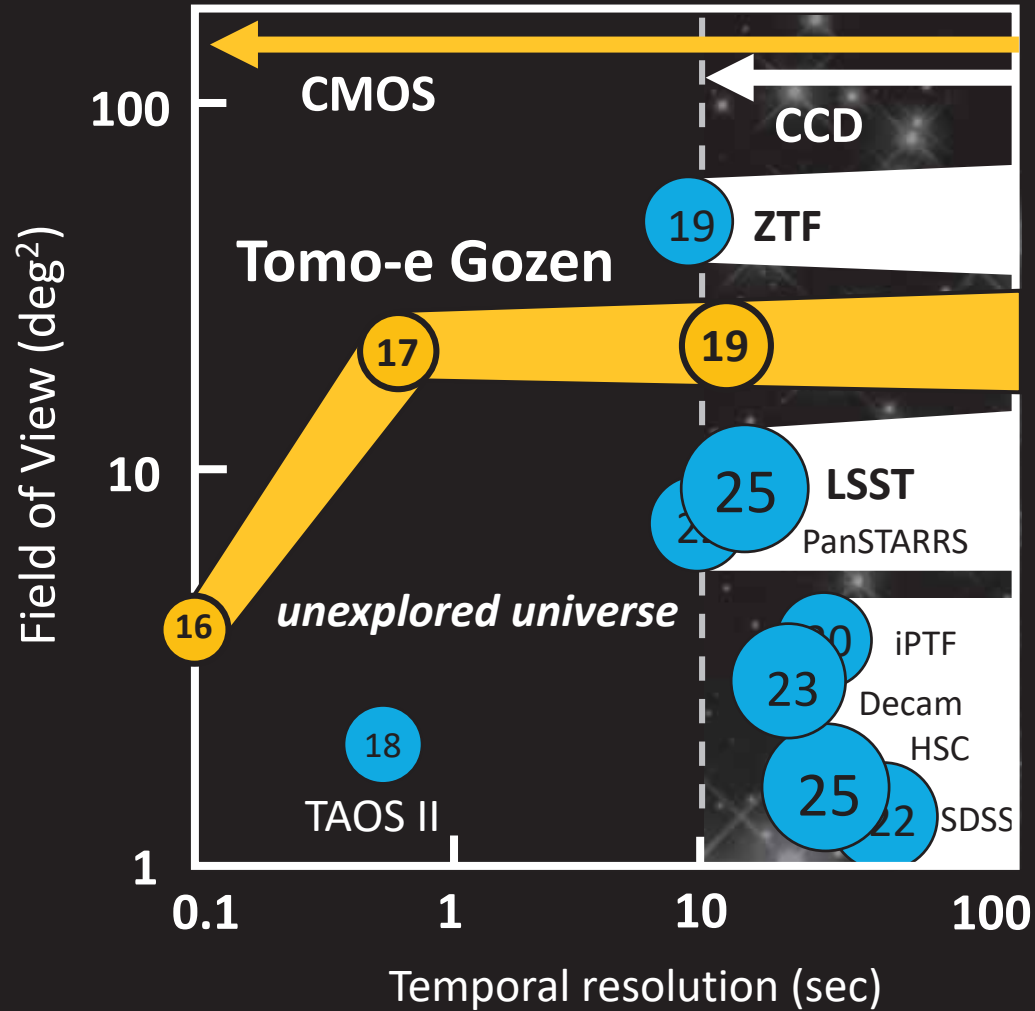
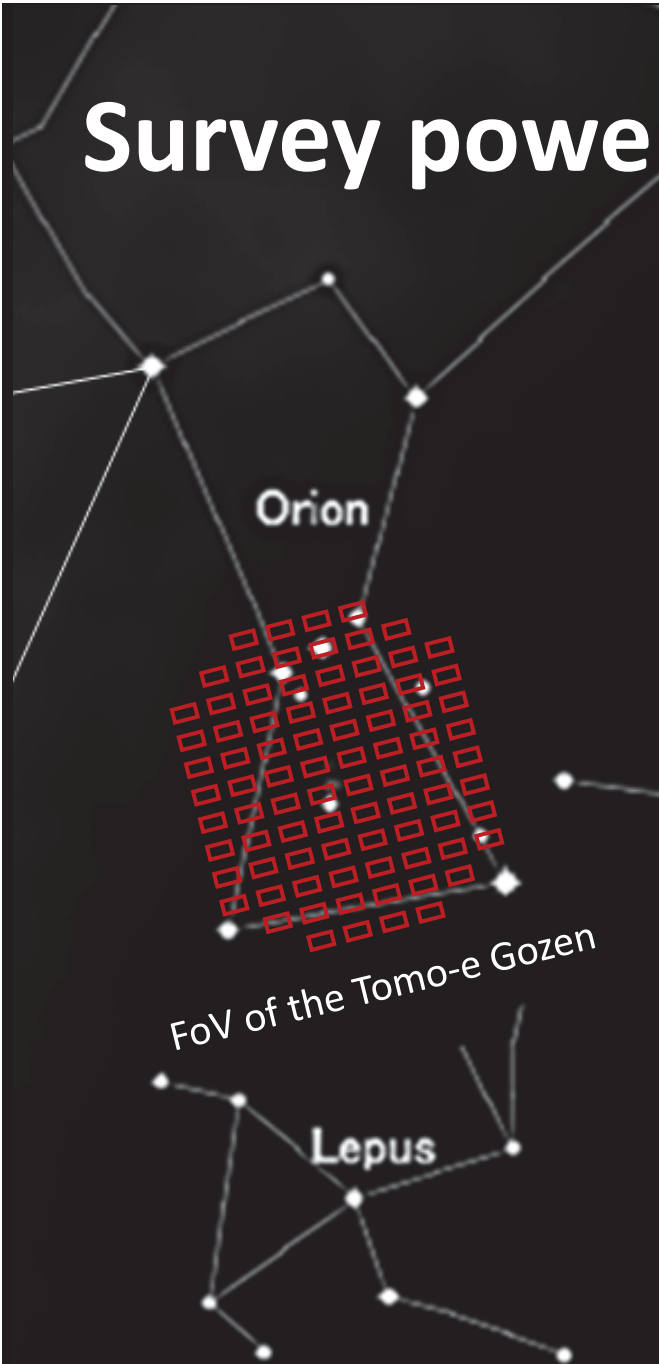
木曾シュミット望遠鏡の焦点部に搭載されたトモゴゼンカメラ



曲面上に精密配置したCMOSセンサ



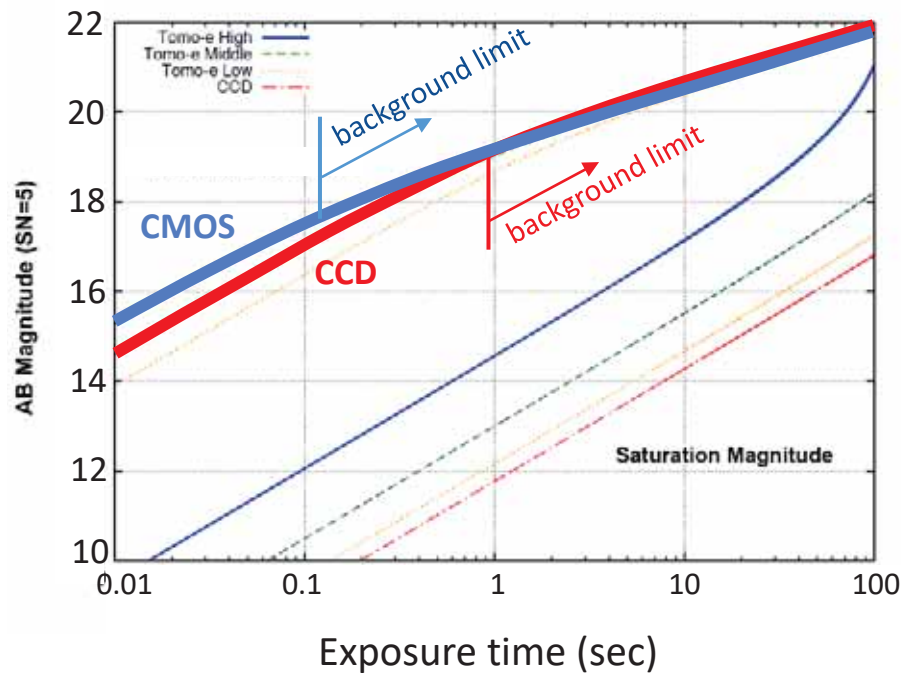
Survey power for transient events



The numbers in the circles show limiting magnitudes.

Limiting magnitude

5- σ limiting magnitude

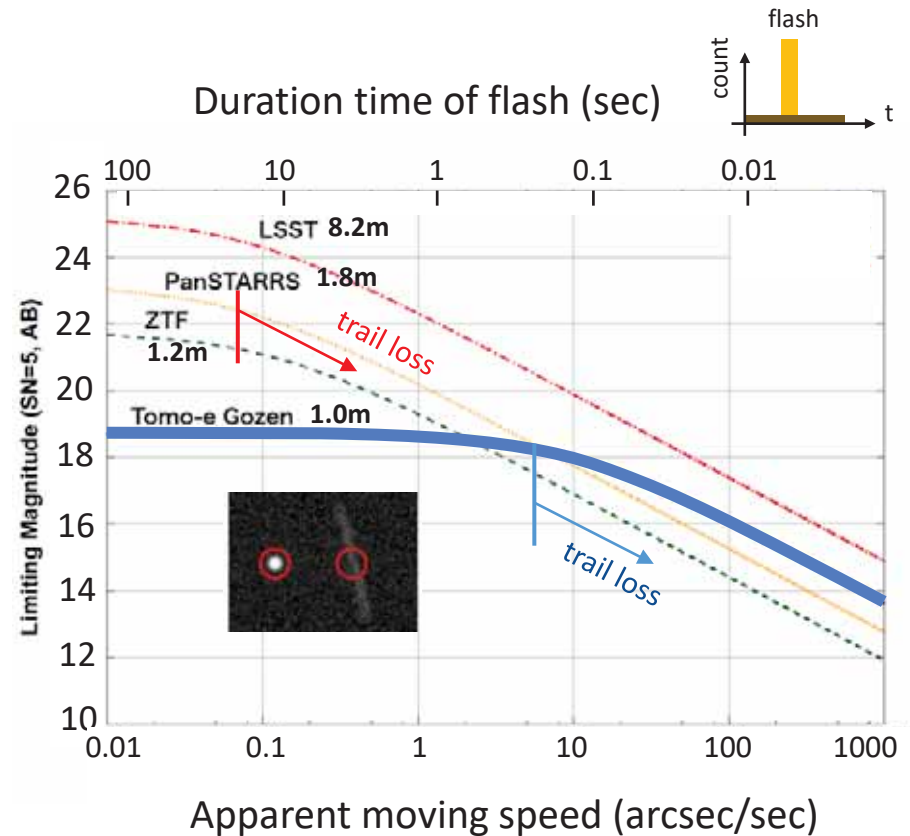


CMOS : efficiency=0.65, $N_{\text{read}}=2 \text{ e-}$

CCD : efficiency=0.90, $N_{\text{read}}=5 \text{ e-}$

assuming same filter-bandwidth and pixel size

Duration time of flash (sec)



Tomo-e Gozen :

0.5 sec/frame, $N_{\text{read}}=2 \text{ e-}$

PanSTARRS, ZTF :

30 sec/frame, $N_{\text{read}}=5 \text{ e-}$

LSST :

60 sec/frame, $N_{\text{read}}=10 \text{ e-}$

Intensive Science Programs

1. Transient survey

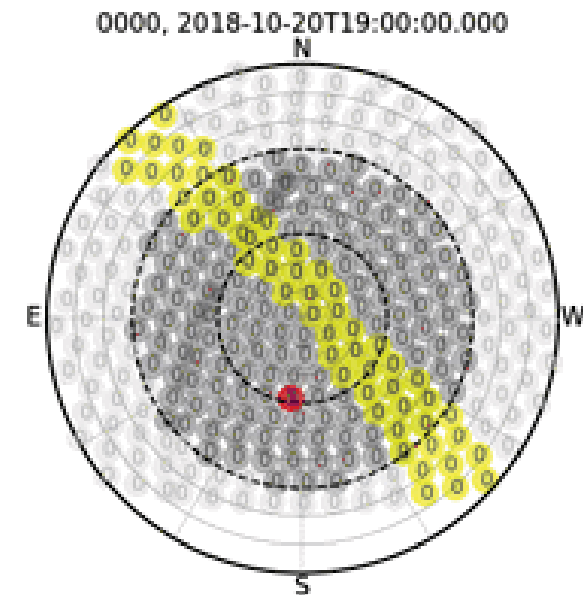
- Elv > 40 deg (7,000 deg²) every 2 hours
- 3 visits per night
- Record all events < 20 mag (dark clear night)
- SNs, Novae, variables

2. Follow-up / Simultaneous

- GWs, neutrinos
- FRBs, NSs, BBHS, meteors, NEO,

3. Fixed FoV + high-speed

- 2-fps@ 20 deg² -- 200-fps@ 52" x 38"
- Occultation of TNOs, YSOs, flares, FRBs, NSs, BBHs, meteors, NEOs



Simulation of transient survey

- Each circle: FoV with Φ 9 deg
- Yellow: Milky way

ロゴをつくりました

基本デザイン



T O M O • E
G O Z E N



T O M O E
G O Z E N



トモエゴゼン



T O M O E
G O Z E N



T O M O E
G O Z E N

Institute of Astronomy, the University of Tokyo

Director: M. Doi

Kiso Observatory

Director: N. Kobayashi



Tomo-e Gozen Project

P.I.: S. Sako

Technical Working Group†

S. Sako (leader) and 36 persons

Science Working Group†

T. Morokuma, R. Ohsawa (leaders)

based on collaborative researches, and KAKENHI



Kiso Schmidt symposium on July 10-11 2018

Supernova

Gravitational wave

Planetary system

Compact object

AGN

Star

Data science

Organization

† Initially, the survey data can be accessed by only Tomo-e members.



Tomo-e Gozen関連研究費（2019年7月現在）

ご協力ありがとうございます

- **科研費基盤S (H28 - H33)**
 - 「高速掃天観測による連星中性子星合体現象の研究」, 代表 茂山俊和
- **科研費基盤S (H30 - H35)**
 - 「爆発直後からの観測によるIa型超新星の起源解明」, 代表 土居守
- **科研費基盤A (H28 - H32)**
 - 「高頻度広視野観測でつなぐ大質量星最期の姿と超新星爆発」, 代表 諸隈智貴
- **科研費基盤B (H30 - H33)**
 - 「太陽系外縁小天体の高速広域探査」, 代表 渡部潤一
- **科研費基盤B (H30 - H33)**
 - 「高速移動天体の検出による微小天体サイズ分布の解明」, 代表 奥村真一郎
- **科研費若手B (H30 - H34)**
 - 「動画分光観測による惑星間空間ダスト組成サーベイ」, 代表 大澤亮
- **新学術領域「重力波・創世記」(H29 - H34)**
 - B03「重力波の光赤外線対応天体観測で迫る中性子星合体の元素合成」, 代表 吉田道利
- **新学術領域「重力波・創世記」B03研究領域提案型 (H30 - H32)**
 - 「Tomo-e Gozenカメラによる重力波可視対応天体超広視野即時探査観測」, 代表 諸隈智貴
- **JSTさきがけ（ビッグデータ領域, H27-H31）, 終了**
 - 「タイムドメイン宇宙観測用動画データの高速逐次処理法の開発」, 代表 酒向重行
- **国立天文台共同開発研究 (H31-H32) , 新規**
 - 「高速タイムドメイン観測用CMOSカメラモジュールの開発」, 代表 酒向重行
- **光赤外線大学間連携事業 (H29 - H34)**, 東大リーダー 諸隈智貴
- **ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU)**, メンバ 茂山俊和, 土居守, 新納悠
- **東京大学木曾観測所運営費交付金**
 - 施設維持費, 光熱費, 装置開発費・維持費をのぞく

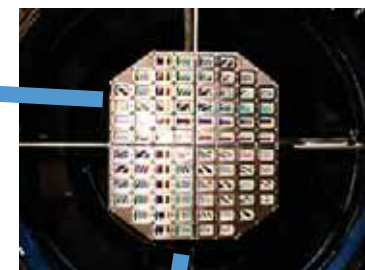
科研費基盤S 代表 土居守 『爆発直後からの観測によるIa型超新星の起源解明』

Ia型超新星の起源の解明



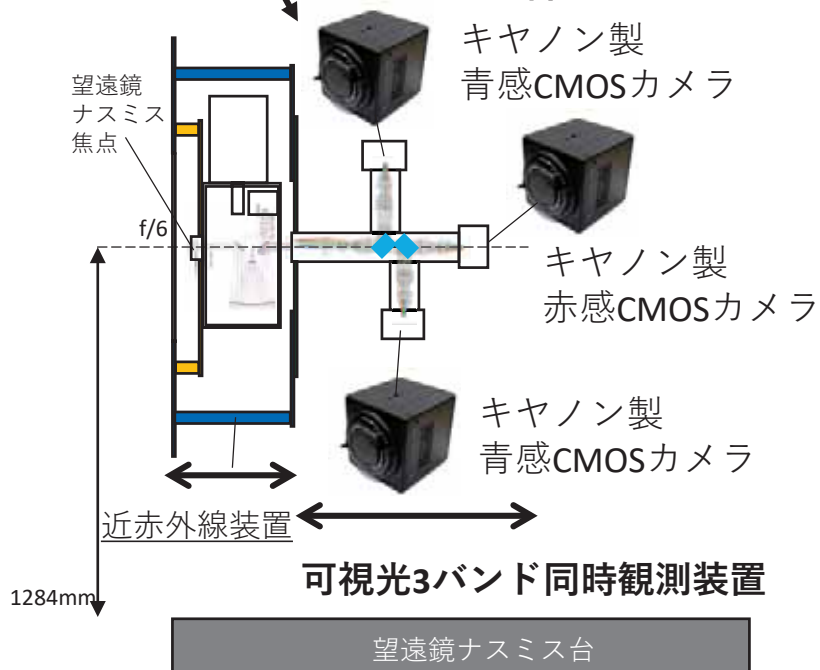
東京大学6.5mTAO
望遠鏡で追観測

木曾トモエゴゼンで
Ia型超新星を発見



国立天文台共同開発研究「高速タイムドメイン観測用CMOSカメラモジュールの開発」, 代表 酒向

京都大学3.8mせいめい望遠鏡用 可視光3バンド同時観測装置



京都大学3.8mせいめい望遠鏡
で追観測

Publications

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. Ohsawa et al., “Luminosity function of faint sporadic meteors measured with a wide-field CMOS mosaic camera Tomo-e PM”, Planetary and Space Science, Volume 165, p. 281-292. (2019)
3. 平成30年度 東京大学天文学専攻修士論文発表会 (2019/3), 小島氏

Press release

1. 東京大学木曾観測所による地球接近小惑星2019 FAの発見について (2019/3/20)
2. トモエゴゼンによる最初の超新星2019cxxの発見 (2019/4/5)

Outreach

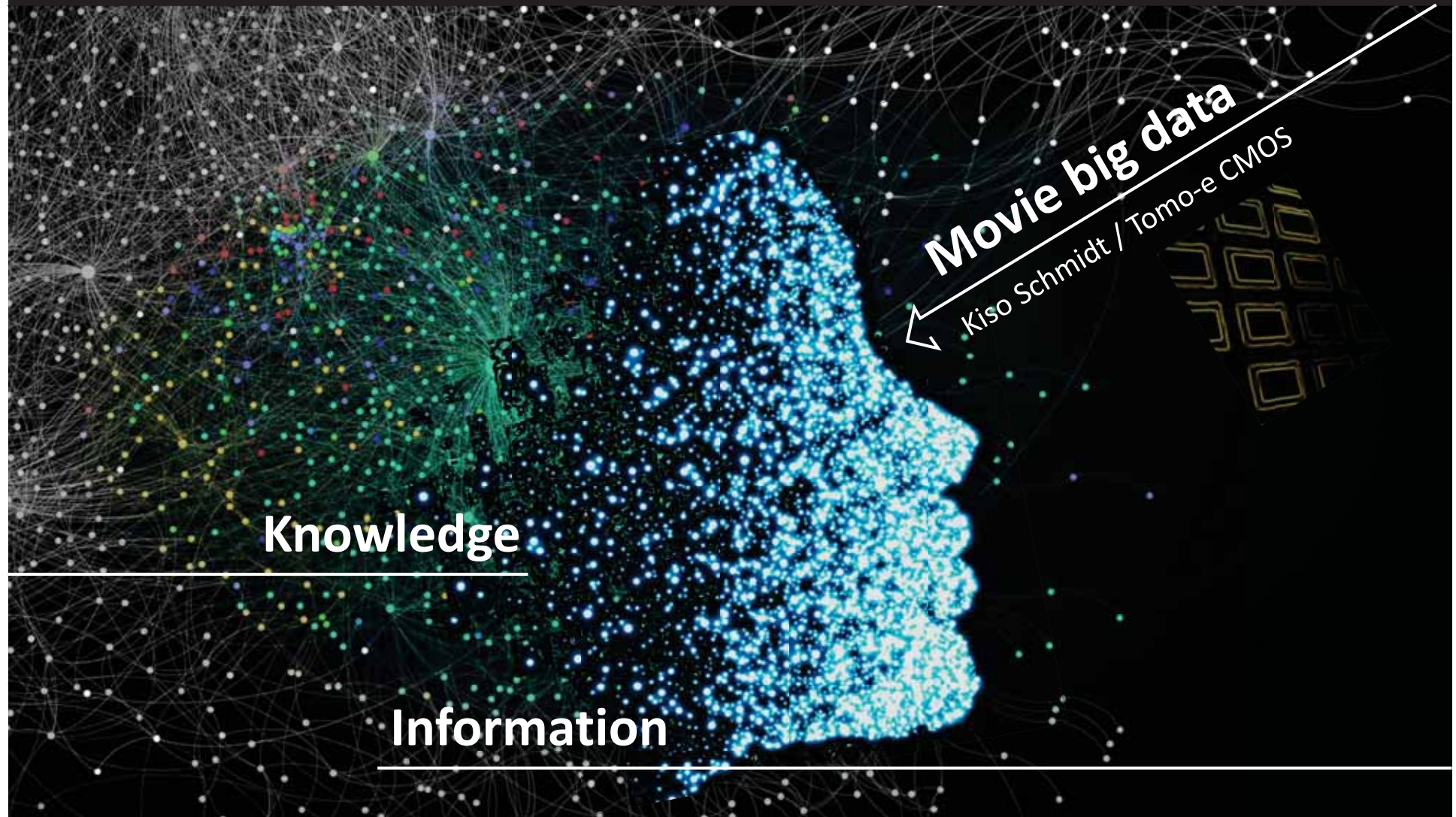
1. 国立天文台野辺山特別一般公開2018 (国立天文台野辺山宇宙電波観測所, 2018/8/25)
2. 第3回「長野県は宇宙県」ミーティング (木曾町文化交流センター, 2019/2/18)



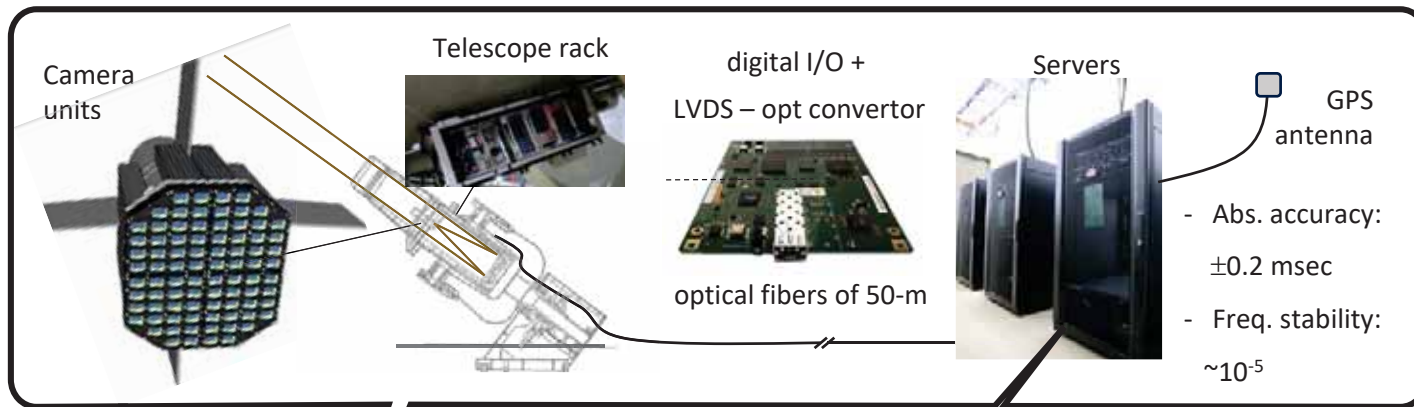
Presentations

1. Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Kiruna, Sweden, 2018/08/27–31)
2. データ利活用研究コミュニティワークショップ (東京大学伊藤国際学術研究センター, 2018/9/5)
3. 日本天文学会2018年秋季年会 (兵庫県立大学, 2018/09/19-21), 5件
4. 第62回宇宙科学連合講演会 (久留米シティプラザ, 2018/10/24-26)
5. 第11回スペースガード研究会 (千葉工業大学東京スカイツリータウンキャンパス, 2018/11/01)
6. 新学術領域「重力波物理学天文学・創世記」領域シンポジウム (京都大学, 2018/11/26-28)
7. 第8回 スペースデブリワークショップ (8th Space Debris Workshop, 調布JAXA, 2018/12/03–05)
8. 第9回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ (埼玉大学, 2018/12/25,26), 2件
9. Time Domain Astronomy in the Era of Massively Multiplexed (2019/02/08-10)
10. データサイエンスの研究会 (理化学研究所, 2019/04/25)
11. AMON workshop 2019 (千葉大学, 2019/05/21-22)
12. JPGU日本地球惑星科学連合2019年大会 (幕張, 2019/05/26–30)
13. 天文学におけるデータ科学的方法, (統計数理研, 2019/5/29)
14. Meteoroids 2019 (Bratislava, Slovakia, 2019/06/17–21)

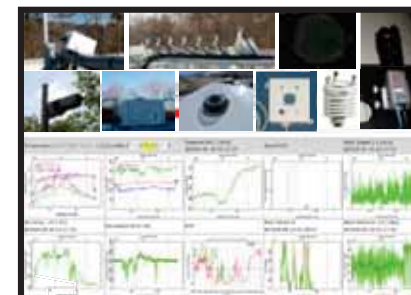
Cyber space of Tomo-e Gozen



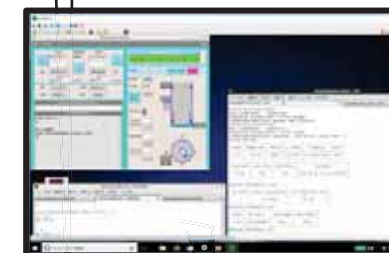
On-site computing system



Weather monitoring system



Remote operation system via VPN + VNC



Status visualization system



• Camera controllers	CPU	72 cores
	Memory	640 GB
	HDD	40 TB
• Buffer servers	CPU	24 cores
	Memory	256 GB
	HDD	384 TB
• Analysis servers	CPU	90 cores
	Memory	1024 GB
	HDD	96 TB
• Storage servers	CPU	12 cores
	Memory	128 GB
	HDD	384 TB

Telescope dome

2F control room

- Telescope controller

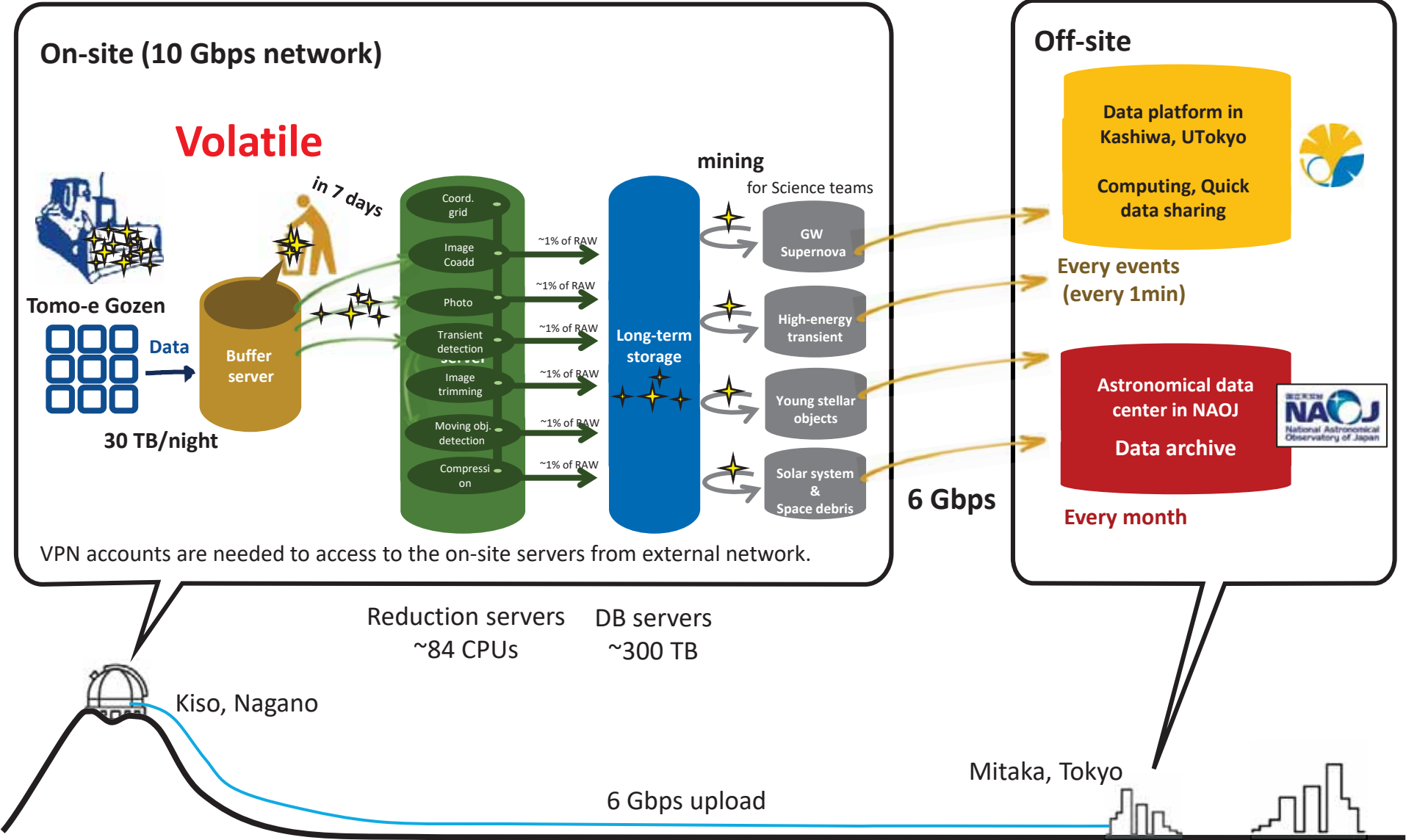
1F server room

Main building

6 Gbps up,
0.3 Gbps down

10 Gbps, fiber connection

Volatile data management system



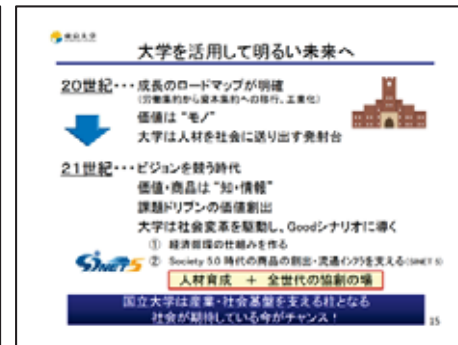
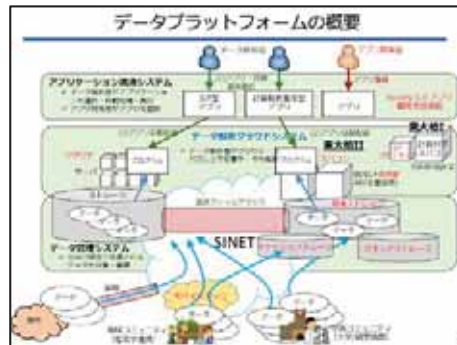
東京大学データプラットフォーム



Society 5.0
ソサエティ

内閣府 第5期科学技術
基本計画

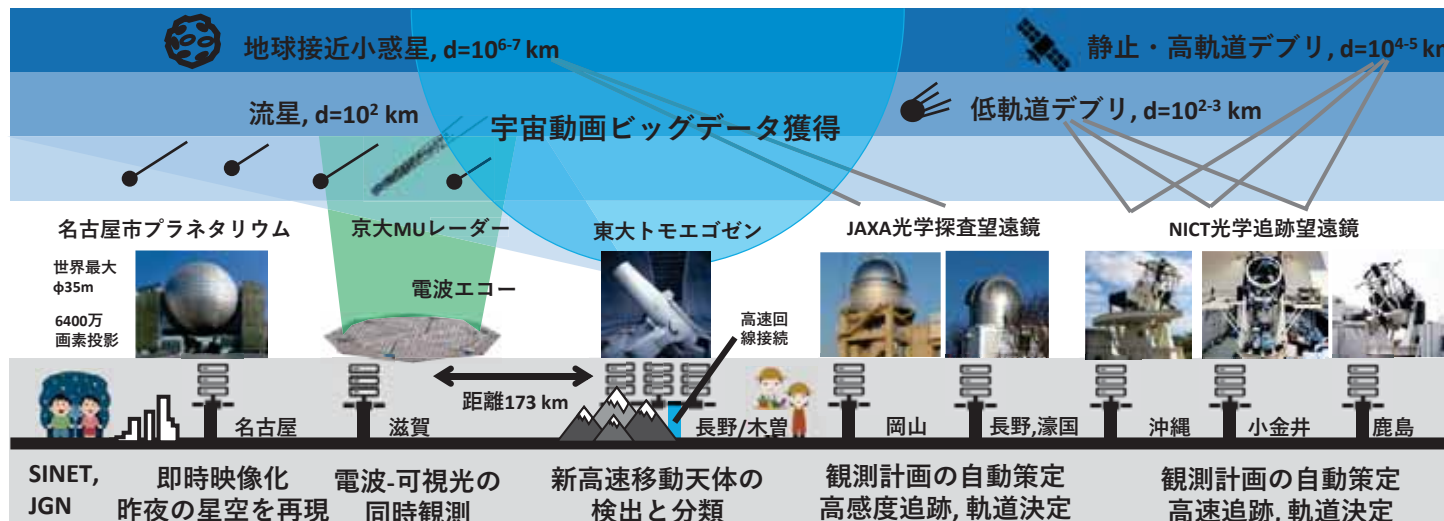
- 東大柏キャンパスにデータセンターを新設（2020年）
- 五神真総長が牽引するSociety5.0時代の実現に向けた計画。大容量ストレージ、計算処理装置を実装、SINET5に接続
- 大学がプラットフォームとなり、ベンチャーの活力・機動力を活かして社会課題を解決することをめざす。



シンポジウム「データ利活用のための政策と戦略ーより良きデータ利活用社会のためにー」（2018/11），
五神東大総長発表資料より

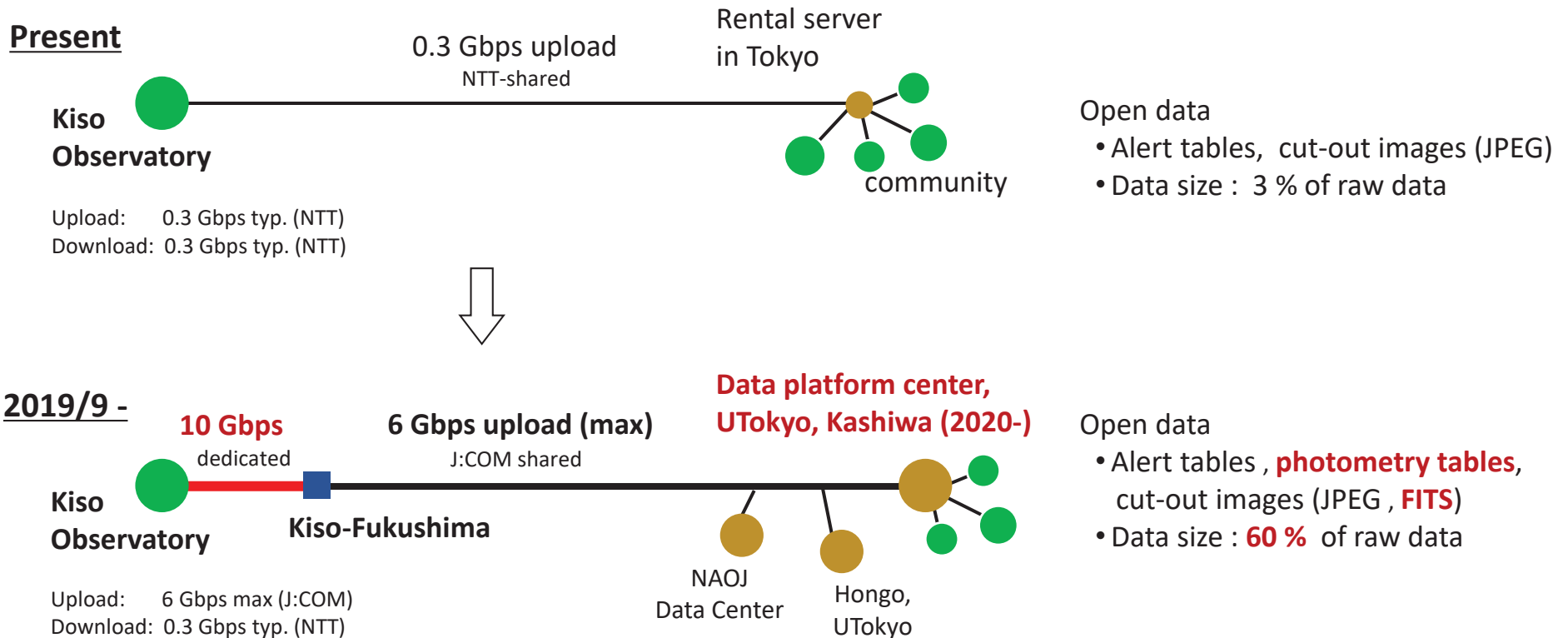
サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会

Society 5.0時代のTomo-e Gozen宇宙ビッグデータの利活用の多分野連携のビジョン




High speed network

Kiso Observatory will be connected to Kiso-Fukushima city via a 10-Gbps dedicated line by Aug. 2019.



10 Gbps bidirectional connection is achieved when SINET-5 is directly connected to Kiso-Fukushima city in future.

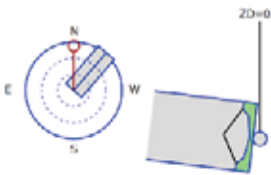
Operation

- Browser use interface
- Automatic observations based on Queue system
- Quick information sharing with  slack

Schmidt Status


Date	2019/07/07
Time (JST)	17:33:44
Time (UTC)	06:22:44
LST	12:33:57
Dome Sid	CLOSE
ERROR CODE	no error
Telescope Mode	Tracking/DEF
Dome Angle	319.9
Right Ascension	12:32:45.5
Declination	118:58:14
Hour Angle	0:00:31
Altitude	355.9
Zenith Distance	42.85
Field Position	26.14
Mirror Cover	CLOSE
HD Filter	NO1.0
Flat Lense	OFF

Remote Control: ▲ OK (telescope_lock ON)

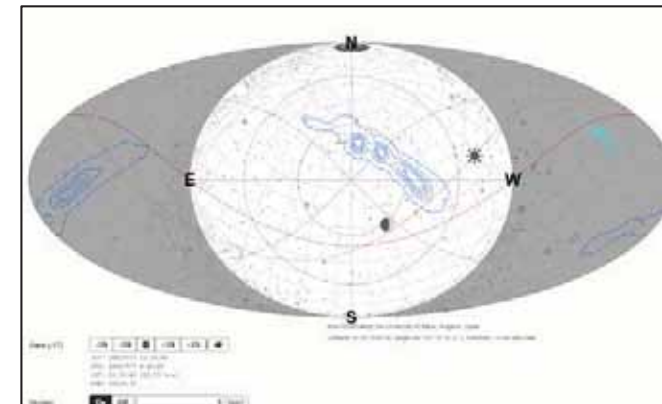


Rain Cloud Fog Hum. SunAvt.
WET 1.605 1000mm 67.2% 20.464

Tomo-e Gozen Field Checker with DSS



Current parameters:
RA: 12:32:45.5
DEC: 118:58:14
Alt: 355.9
ZD: 42.85



Tomo-e Gozen Slack Channel

#observation

too bot アプリア 16:17
Anyway, this is a test event came during...

Ryo Hamasaki 17:06
ドーム内の安全を確認しましたので、キャリブレーションを行います。

Ryou Ohsawa 17:11
よろしくおねがいします。

too bot アプリア 17:16
This is a TEST EVENT! (GracID: MS181219)

I have got an alert of a GW event, GracID: MS181219I can be observed. Consider observing it. Recipe files can be found at: shinohara:/home/tomoesn/script/alert



slack logo

Tomo-e Gozen Queue Status Monitor

Current Schedule (duration / starting) > 11

Executing Queue Item (pid 10701 / starting) > 11

History

- Kiso Observatory | Kiso Observatory | 2019-07-07T07:32:45.699062
- Kiso Staff | Sample Recipe | 2019-07-07T07:38:51.832962
- KISA Observatory | KISA Observatory | 2019-07-07T06:58:44.247027

Scheduled Observations (total: 200)

Py Supervisor Monitor

Home Refresh (24)

Process	Status	Time	Action
tomoeDAQ-master	STOPPED		▶
tomoeDAQ-slave0	STOPPED		▶
tomoeDAQ-slave1	STOPPED		▶

Exposure Log

DATE(JST)	Exp ID	Object	Observer	Project	(RA, DEC)	Frame Size	Nframe	Gain	Tint	FPS	ZD
2019-07-07 20:17:48	129850	FLAT	Kiso Staff	Sample Recipe	(15:28:21.7, 115:56:18)	2000*1128	90	high	1.0000	1.0000	79.99
2019-07-07 20:13:09	129849	DARK	Kiso Staff	Sample Recipe	(15:23:44.9, 115:56:24)	2000*1128	360	high	0.5000	2.0000	79.99
2019-07-07 20:07:04	129848	DARK	Kiso Staff	Sample Recipe	(15:17:39.8, 115:56:32)	2000*1128	360	high	1.0000	1.0000	79.99
2019-07-07 19:57:59	129847	DARK	Kiso Staff	Sample Recipe	(15:08:34.7, 115:56:43)	400*240	4500	high	0.0410	24.4057	79.99
2019-07-07 19:51:51	129846	DARK	Kiso Staff	Sample Recipe	(15:02:25.9, 115:56:50)	400*24	40000	high	0.0055	181.0610	79.99

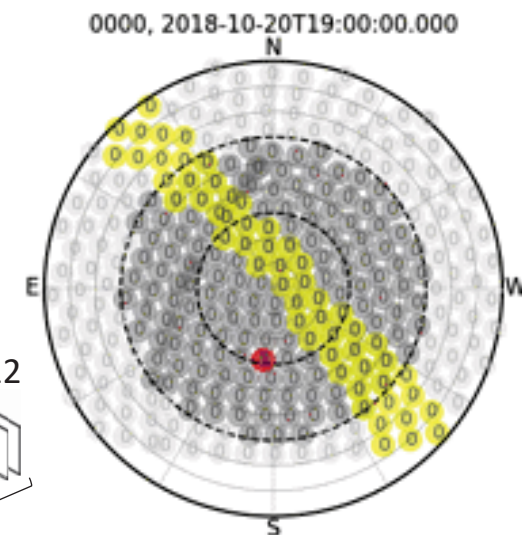
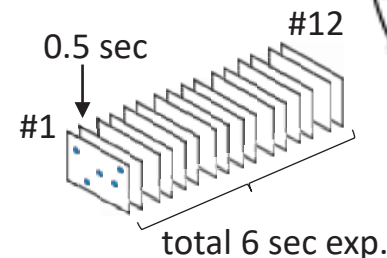
Tomo-e transient survey

All sources can be followed by spectroscopy with 1 – 3 m class telescope

First wide-field movie survey

7,000 deg² - 2 hr cadence - 18 mag depth

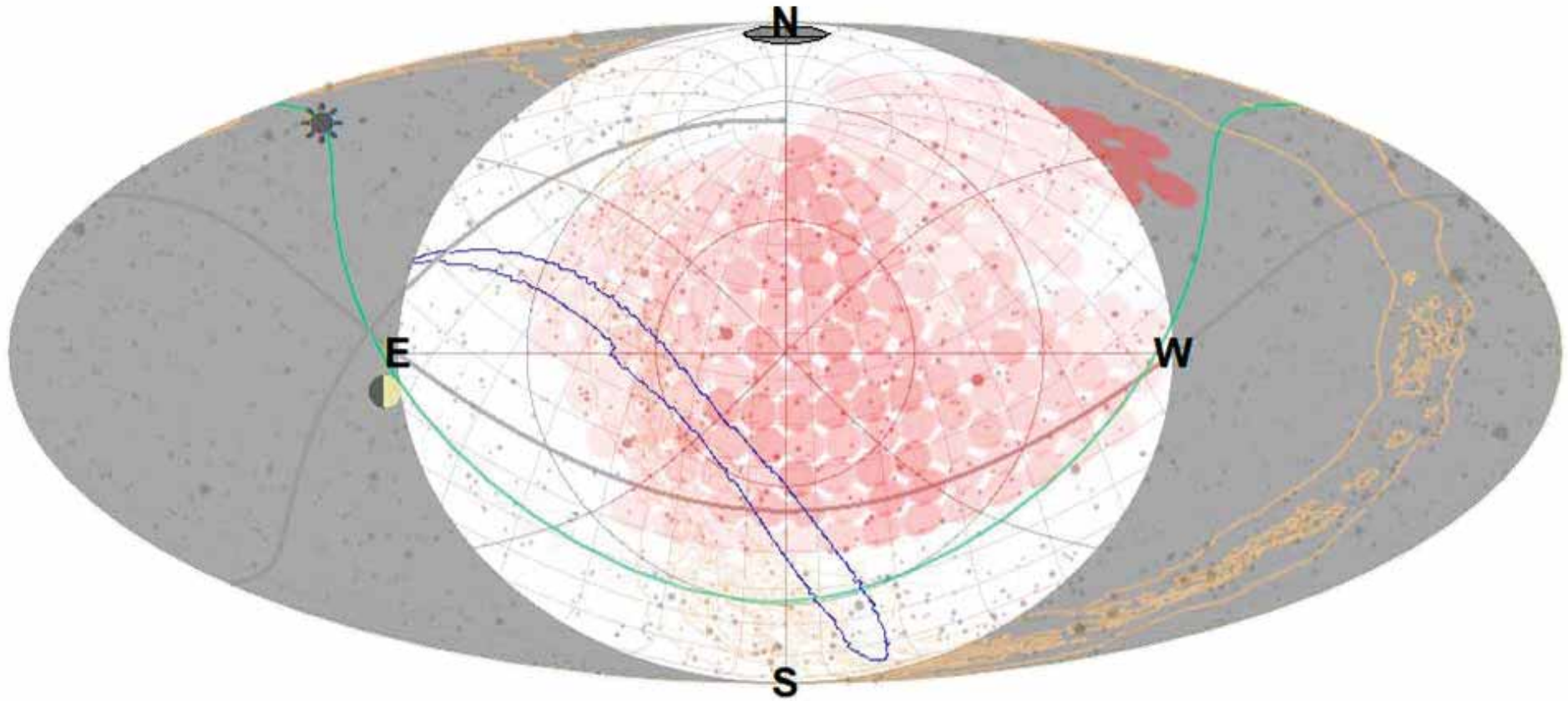
- no filter: effectively g+r ($\lambda = 400 - 700$ nm)
- [0.5 sec exposure] x 12 frames
- 6 sec exposure/visit
- $\sim 7,000$ deg² sky ($El > 40$ deg)
- 3 – 5 times visits per night



Targets

Supernovae, nova, pulsar, (GW), neutrino, comet, asteroid, meteor, occultation, NEO, debri, super-flare, dwarf star flare, CV, “Tomo-e Flash” , YSO, Ultra-Long GRB, Fast Radio Burst, AGN, X-ray transient, unknown unknown.

2019年5月26日の試験観測



全天の天球図。中央の白い楕円領域が2019年3月16日深夜に東京大学木曾観測所から見える天域。多数の赤丸が2019年5月26日夜にトモエゴゼンが観測した領域。1つの赤丸がトモエゴゼンが1回に観測できる領域（直径 9° ）

Tomo-e transient survey

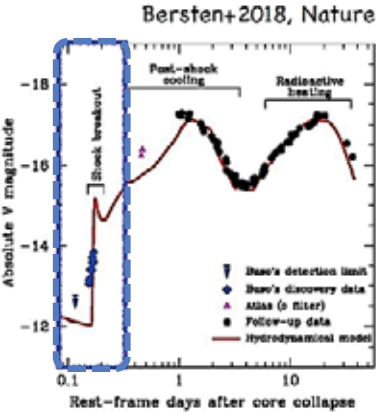
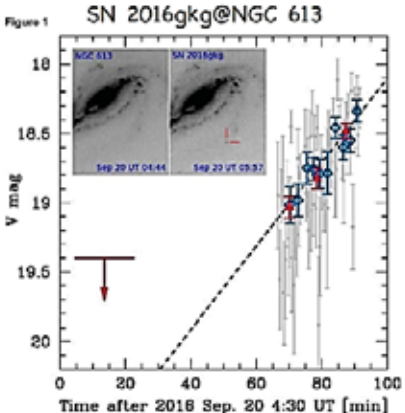
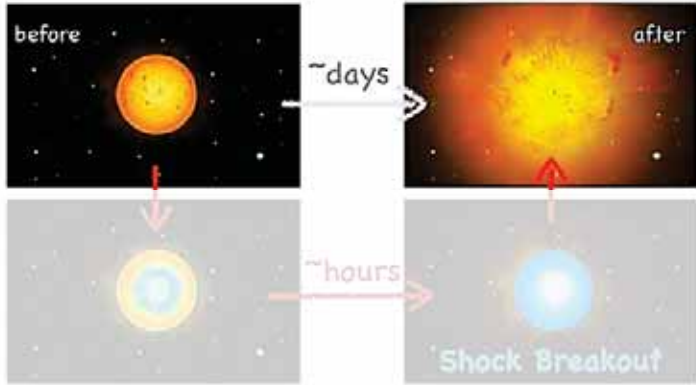
P.I. Tomoki Morokuma (U-Tokyo)

~1,000 supernovae including ~ 5 early phases could be discovered per year.

SN follow-up collaborators



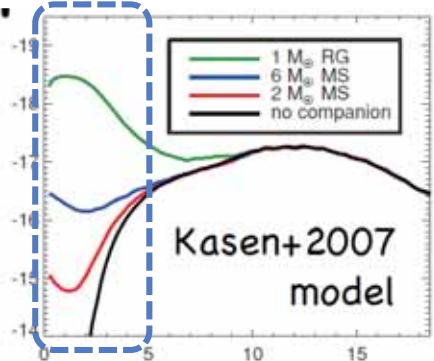
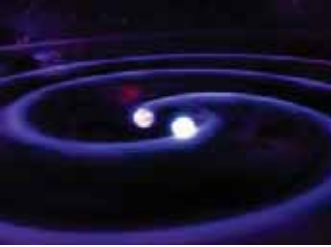
- Very Early Phases of Core-Collapse Supernovae



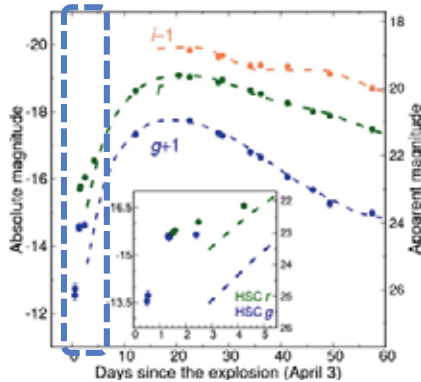
Other three candidates discovered so far.

- Very Early Phases of Type Ia Supernovae

Single degenerate (SD) vs double degenerate (DD)



Light curve of theoretical models



Jiang+2017, Nature, @z=0.117

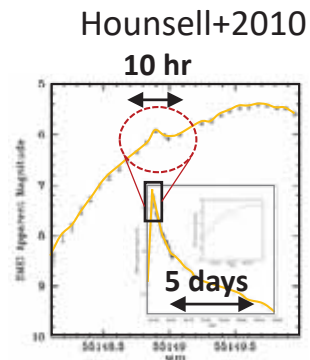
Tomo-e transient survey

Hours timescale events

Classical novae

Brightness at pre-maximum halt corresponds to Eddington luminosity? → use as standard candle.

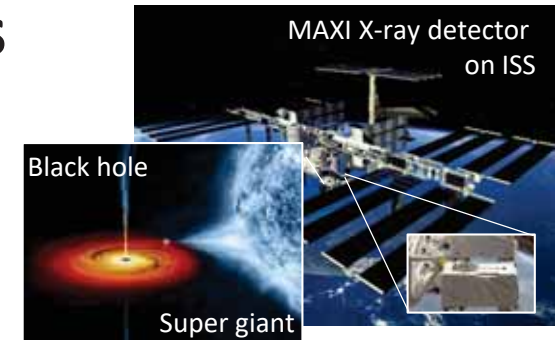
Maehara+



X-ray flares

Black hole binaries appears optical transient bursts.

MAXI team+

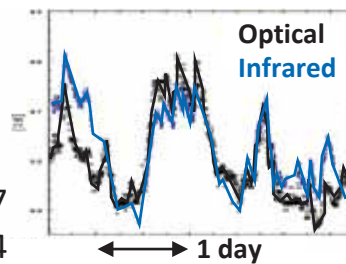


YSO flares, dust obscuration

Rapid variabilities are observed due to gas accretion and dust disk in YSO system.

Mori+

Mon567
Stauffer+2014

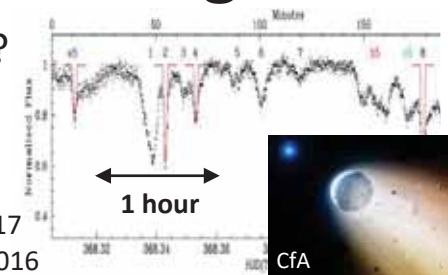


Exoplanet surrounding WD?

Broken by tidal disruption?
Minutes timescale variability is detected.

Ohsawa+

WD 1145+017
Gänsicke +2016



Asteroid collisions

Search for evidences of a recent collision between two asteroids.

Ishiguro+



Comet outbursts

Fresh material is emerged from inside in outbursts.

Sarugaku+

Ishiguro+2013
17P/Holmes

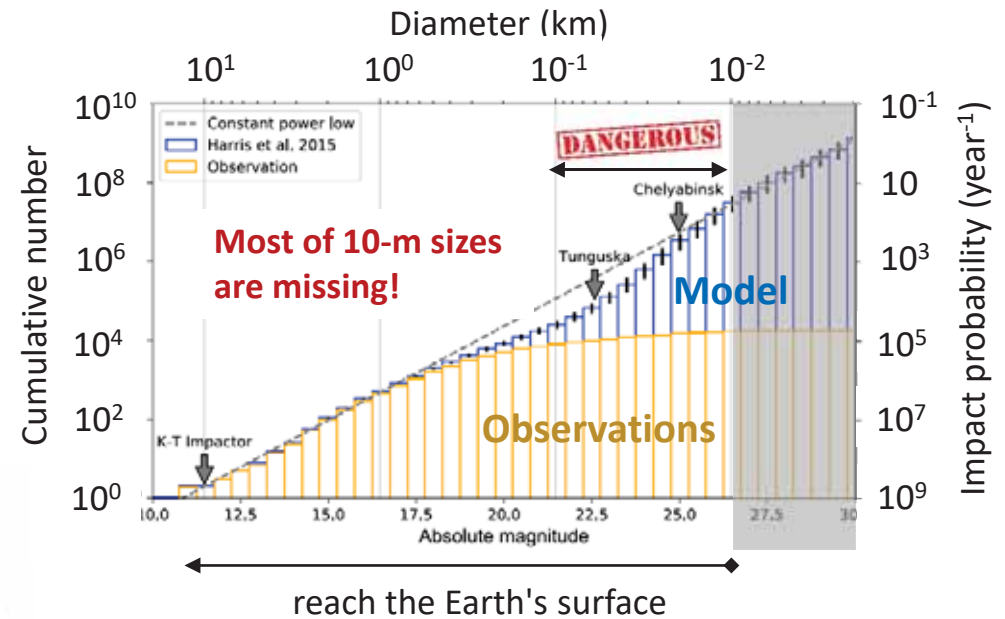
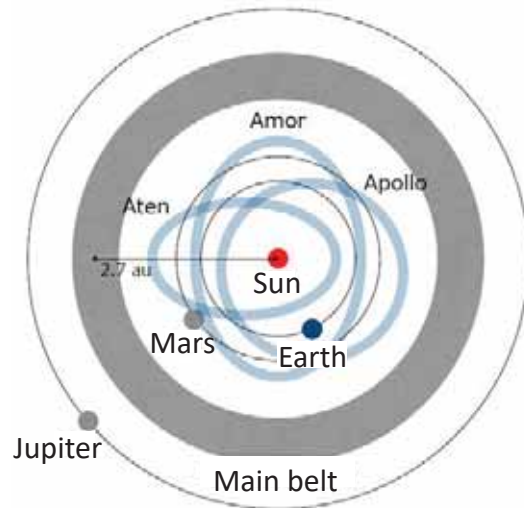


Tomo-e transient survey

~ 100 small-NEOs could be discovered per year.

Near earth objects (NEOs)

are asteroids or comets with a closest approach to the Sun (perihelion) of < 1.3 au. Their orbits are evolved from main belts.



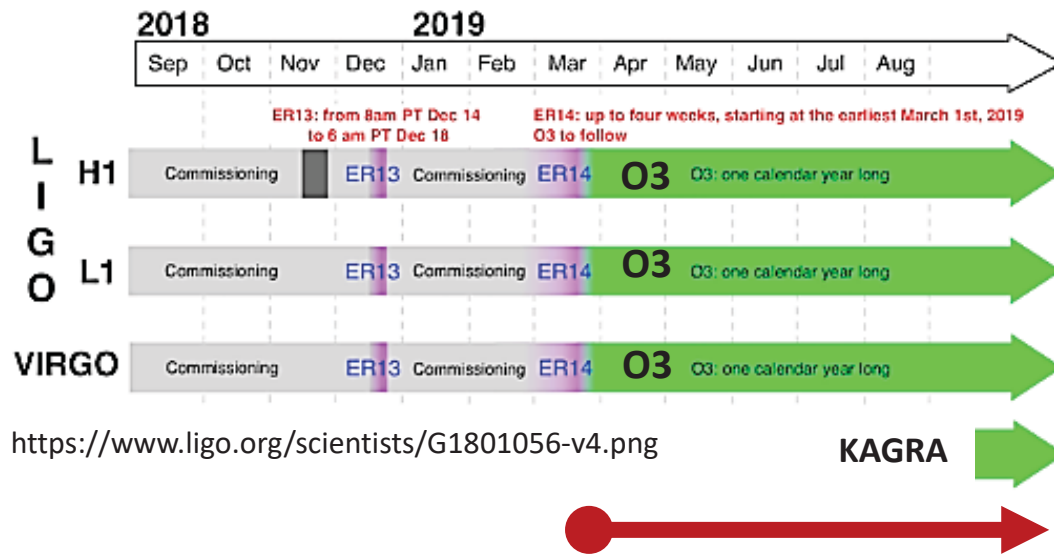
Tunguska event in June 1908



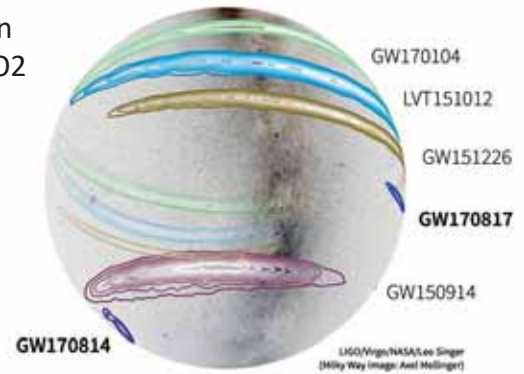
Chelyabinsk meteor in Feb. 2013

Planetary defense is necessary for keeping human civilization!

Tomo-e GW follow ups



GWs in O1 – O2



ER14: from Mar. 4 2019

O3: from Apr. 1 2019

Tomo-e Gozen GW follow-ups: from late Mar. 2019

NS-NS sensitivity

	O2 (Mpc)	O3 (Mpc)
LIGO/Hanford (H1)	70	→ 90
LIGO/Livingston (L1)	100	→ 135
Virgo (V)	27	→ 55
KAGRA		8 - 25

Reported on Feb. 15 2019

NS-NS event rate †

$(4 - 10) \times 10^3 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ from O1-O2
 → 1 /month max, 2/year med.
 † BH-BH: 1/month - 1/week

NS-NS localization

120 – 180 deg² with 90% credible (med)
 10 – 20% of the area is localized < 20 deg²

Tomo-e high-speed programs

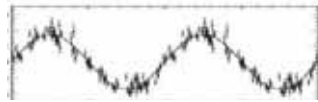
Seconds or shorter
timescale events

Fast spinning WDs

10,000 deg², 2-fps survey
~300 WDs would be found.

P = 1 – 100 sec

Kashiyama, Kawana+



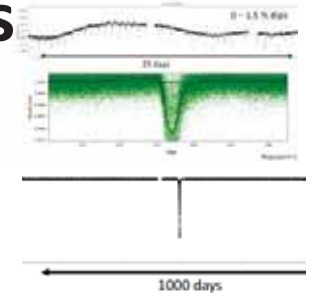
Peculiar light curves of exoplanets

Evaporating rocky planet?
Alien's artificial planet?

Kawahara+

t ~ 10 sec

Keplar's light curve



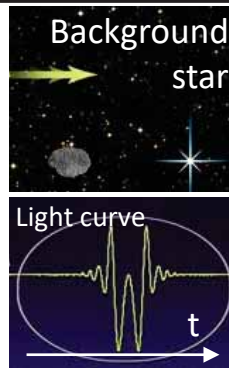
Occultations of small bodies

A few events per year

Km-size objects outer Neptune

Duration time ~ 0.3 sec

Watanabe+



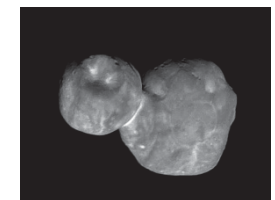
Fast rotating asteroids

Phase variations on color
and albedo reflects their
formation history.

Urakawa+

t ~ 1 sec

Ultima Thule/NASA



Faint meteors

Interplanetary dust of < 1 mm
Use earth atmosphere as a
detector

Ohsawa+

t << 1 sec

from ISS
/NASA



Unknown flashes

Optical counterparts of FRBs?
Unknown high-energy burst?
Unknown objects near earth?
Unknown physics?

t << 1 sec

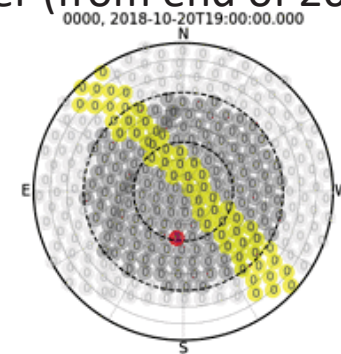
Unknown
unknown



Scheduling and Data sharing

- **Tomo-e Transient Survey (Oct. 2019 – July 2020)**

- **Schedule:** Basically every night, from Oct. 2019
- **Operation:** Full-automatic
- **Authorization of data:** TBD
- **Data access:** Via Kiso-VPN (until end of 2020), external data center (from end of 2020)
- **Data items:**
 - ◆ Tables of transient events (SN, variables, NEOs...)
 - ◆ Cut-out images where transients are detected
 - ◆ Photometry tables of sources detected in co-added images
 - ◆ Reduced co-added FITS (optional)
 - ◆ Reduced cube-FITS (optional)



- **Campaign programs including GW follow-ups (Oct. 2019 – July 2020)**

- **Proposal:** Always accepted. Please contact to Kiso staff.
At least, a Tomo-e member must be included in the science team.
- **Schedule :** Scheduled by SAC members (TBD, basically Kiso staff)
- **Operation :** Semi-automatic with queue system. Classical is not supported.
- **Authorization of data:** Science team who proposed the program.
- **Data access:** TBD

All programs are conducted under risk share agreements. The Tomo-e Gozen is based on collaborative researches, but not an open-use projects.

今回がはじめてのテーマがたくさんあります

木曾シュミットシンポジウム2019 プログラム

2019年7月9～10日

会場：木曾福島・御料館（旧帝室林野局木曾支局庁舎）

7/9(火)

開始時間	終了時間	演者	タイトル
9:30	9:35	小林	系長挨拶
9:35	9:45	征矢野	観測所報告
9:45	10:05	酒向	Tomo-e Gozen計画
10:05	10:25	諸隈	Northern Sky Transient Survey
10:25	10:45	池田	A Model for Scheduling High-Cadence Telescope Observations 最適化
10:45	11:00		休憩・午前1
11:00	11:20	福永	Data analysis pipeline for SN survey
11:20	11:40	浜崎	機械学習によるTransient検出の現状と展望
11:40	11:50	善	Studying fast-brightening transients with the HSC-Tomo-e synergetic survey
11:50	12:10	川端	京都大学3.8mせいまい望遠鏡・広島大学かなた望遠鏡による近傍超新星の追観測
12:10	12:18		ポスターセッション(各2分)
12:18	13:20		お昼ご飯休憩
13:20	13:40	松林	せいまい望遠鏡CMOS多色カメラによる突発天体・短時間変動天体サイエンス
13:40	14:00	福井	Tomo-eによる近傍重力マイクロレンズ探索の可能性 系外惑星マイクロレンズ
14:00	14:20	有馬	Tomo-e Gozenで追える秒スケールでの可視突発天体探索
14:20	14:40	櫻山	The Hertz Spinning Object Survey
14:40	15:00		休憩・午後1
15:00	15:20	安達	ブラックホールX線連星MAXI J1820+070の可視光放射の変動の解析
15:20	15:40	諸隈	IceCubeニュートリノ電磁波対応天体サーベイ観測
15:40	16:00	森田	KWFCによるFermi/LAT γ 線源の時間変動観測
16:00	16:20	中嶋・宮内	木曾シュミット乾板のデジタル化 - 乾板スキャン作業のまとめ
16:20	16:40	吉澤	木曾シュミット乾板のデジタル化-公開システムの開発
16:40	16:55		休憩・午後2
16:55	17:15	岩崎	狭帯域フィルターを使った金属欠乏星探索
17:15	17:35	出口	Tomo-e Gozen を用いたサーベイと即時分光による古典新星の初期段階の研究
17:35	17:50	中田・大澤	長期モニタリング観測による星周ガス形成の研究 晩期型星
17:50	18:10	家	Spin Parity Distribution of Galaxies and Structure Formation of the Universe
18:10	18:25	毛利	名古屋科学館プラネタリウムでの科学データのディスプレイセッション
18:25	18:40		懇談会準備
18:40	20:40		懇談会 データ可視化

7/10(水)

9:15	9:35	浦川	小惑星が経軌した衝突イベント時期をライトカーブから推定する方法
9:35	9:50	浦川	Hough変換を用いた移動天体の検出
9:50	10:10	奥村	Tomo-e Gozenと重ね合わせ法による高速移動NEO観測計画の進捗
10:10	10:30	酒向	高速移動する地球接近天体の広視野探査
10:30	10:45		休憩・午前1
10:45	11:05	紅山	Tomo-e Gozenによるminimoon探査
11:05	11:25	荒川	光学観測による宇宙物体の動態推定に関する研究 人工天体
11:25	11:45	阿部	京大MULレーダー流星ヘッドエコーとTomo-e Gozenによる微光流星同時観測の初期結果
11:45	12:50		お昼ご飯休憩+記念撮影
12:50	13:10	西川	Status of KAGRA
13:10	13:30	新納	Tomo-e Gozen による重力波フォローアップ 観測実施状況
13:30	13:50	鹿内	FRBと重力波シグナルの同時検出可能性について 多波長同時観測
13:50	14:10	青木	山口32m電波望遠鏡によるFRB観測現状とTomo-e Gozenを用いた光・電波連携
14:10	14:20		休憩・午後1
14:20	14:40	一本	Tomo-e Q0/Q1によるCrabパルサーの電波・X線との同時観測
14:40	15:00	山本	多次元データのオンライン要約とその応用 異常検知
15:00	15:20		議論
ポスター		吉澤	SMOKAの現状と利用状況
		村田	X線連星の可視光・近赤外線追観測
		川名	Searching for the fastest spinning white dwarfs with Tomo-e Gozen
		酒向	東京大学木曾観測所トモエゴゼン計画の長野県SOGsへの貢献

Fact sheet of the Tomo-e Gozen

Telescope	the Kiso 1.0-m f/3.1 Schmidt telescope, Kiso observatory, the University of Tokyo
Sensor	Canon 35MMFHDXM, 35-mm front-side-illuminated CMOS sensor with microlens array and AR coated cover glass
Sensor format	2,160 × 1,200 pix chip ⁻¹ (total), 2,000 × 1,128 pix chip ⁻¹ (photosensitive)
The Number of sensor chips	84 chips
Field of view	39.7' × 22.4' × 84 chips = 20.8 deg ²
Pixel size and scale	19 mm pix ⁻¹ , 1.189 " pix ⁻¹
Sensitive wavelength	370 to 730 nm
Photoelectric conversion efficiency	0.68 at a peak of 500 nm
Photosensitive area / package area	0.35
Filters	Pre-set: transparent windows, optical filters, grisms (optional) Changeable: 4 pieces of f2.5' with the FEX unit
Max frame rate	2 fps in full-frame, maximum 500 fps in partial-frame
Read noise (2 fps)	2.0, 4.1, 9.2 e ⁻ in High-, Mid-, Low-gains
Well depth (linearity < 5%)	6,000, 25,000, 53,000 e ⁻ in High-, Mid-, Low-gains
Dark current	0.5 e ⁻ sec ⁻¹ pix ⁻¹ at 290 K, 6 e ⁻ sec ⁻¹ pix ⁻¹ at 305 K
Sky background (dark night)	50 e ⁻ sec ⁻¹ pix ⁻¹ (transparent windows)
Gain conversion factor	0.23 , 0.94, 2.4 e ⁻ ADU ⁻¹ in High-, Mid-, Low-gains
5σ limiting mag (High-gain)	16.7, 18.5, 19.9 mag at t _{exp} of 0.1, 1, 10 sec w/transparent windows
Photometric stability	4 to 30 milli-mag (time scale < 5 sec) 1 to 3 milli-mag (time scale > 100 sec)
Absolute time accuracy of time stamps	±0.2 millisecond
Stability of frame read time	10 ⁻⁵
Output file (full-frame)	4.9 MByte frame ⁻¹ , 16-bit cube FITS
Data production rate (full-frame, 2 fps)	830 MByte s ⁻¹ , 30 TByte night ⁻¹