

# 木曾超広視野CMOSカメラTomo-e Gozen計画の現状

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

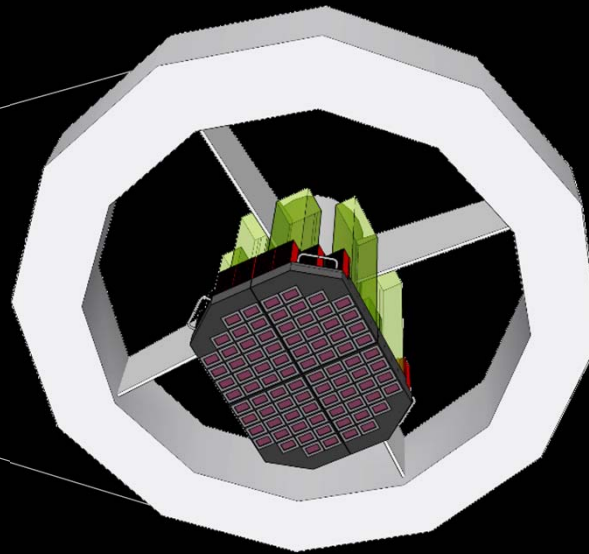
2017/7/5-6,シュミットシンポ2017, 木曾町文化交流センター

# Advanced large survey program of Kiso observatory the Tomo-e Gozen / トモエゴゼン

Kiso 105cm Schmidt telescope,  
the Univ. of Tokyo



the Tomo-e Gozen **movie** camera



「巴御前出陣図」 東京国立博物館蔵、  
薮関月(しとみ かんげつ, 1747-1797)

Image: TNM Image Archives





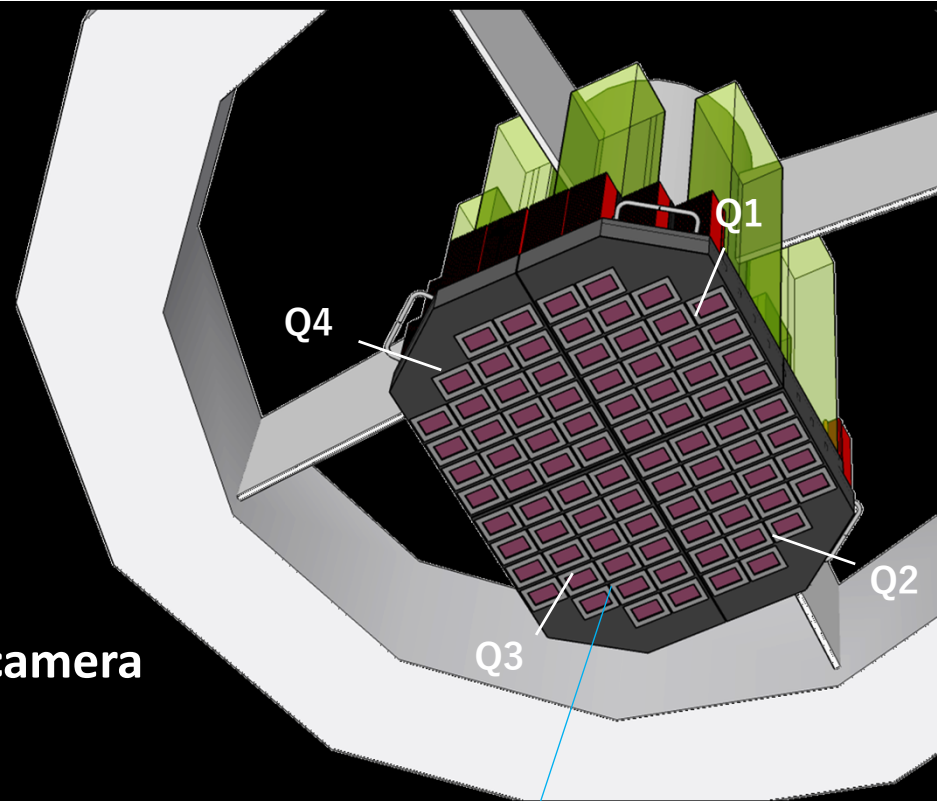
Sako, Shigeyuki<sup>a,b</sup>, Ohsawa, R.<sup>a</sup>, Takahashi, H.<sup>a</sup>, Kikuchi, Y.<sup>a</sup>, Doi, M.<sup>a,c</sup>, Kobayashi, N.<sup>a</sup>, Aoki, T.<sup>d</sup>, Arimatsu, K.<sup>e</sup>, Ichiki, M.<sup>a</sup>, Ikeda, S.<sup>f</sup>, Ita, Y.<sup>g</sup>, Kasuga, T.<sup>h</sup>, Kawakita, H.<sup>i</sup>, Kokubo, M.<sup>a</sup>, Maehara, H.<sup>j</sup>, Matsunaga, N.<sup>k</sup>, Mito, H.<sup>d</sup>, Mitsuda, K.<sup>a</sup>, Miyata, T.<sup>a</sup>, Mori, K.<sup>a</sup>, Mori, Y.<sup>d</sup>, Morii, M.<sup>f</sup>, Morokuma, T.<sup>a</sup>, Motohara, K.<sup>a</sup>, Nakada, Y.<sup>a</sup>, Osawa, K.<sup>a</sup>, Okumura, S.<sup>l</sup>, Onozato, H.<sup>g</sup>, Sarugaku, Y.<sup>d</sup>, Sato, M.<sup>m</sup>, Shigeyama, T.<sup>c</sup>, Soyano, T.<sup>d</sup>, Tanaka, M.<sup>e</sup>, Taniguchi, Y.<sup>a</sup>, Tanikawa, A.<sup>n</sup>, Tarusawa, K.<sup>d</sup>, Tominaga, N.<sup>o</sup>, Totani, T.<sup>k</sup>, Urakawa, S.<sup>l</sup>, Usui, F.<sup>p</sup>, Watanabe, J.<sup>e</sup>, Yamaguchi, J.<sup>a</sup>, and Yoshikawa, M.<sup>q</sup>

Sako et al. 2016, SPIE

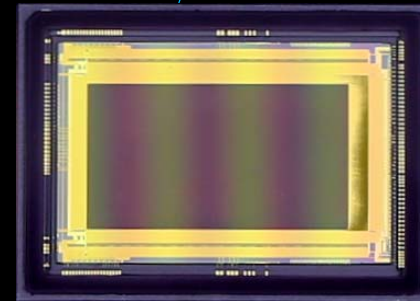
# the first astronomical wide-field **Movie** camera the Tomo-e Gozen

- Telescope Kiso 105-cm wide-field Schmidt
- Field of view 20 deg<sup>2</sup> in ϕ9 deg
- Image sensors 84 chips of CMOS
- Data acquisition rate 2 fps (max)
- Data production rate 30 TB/night (max)
- Commissioning Jan. 2019
- Operation 10 years

常温、大気圧  
初期フィルタなし



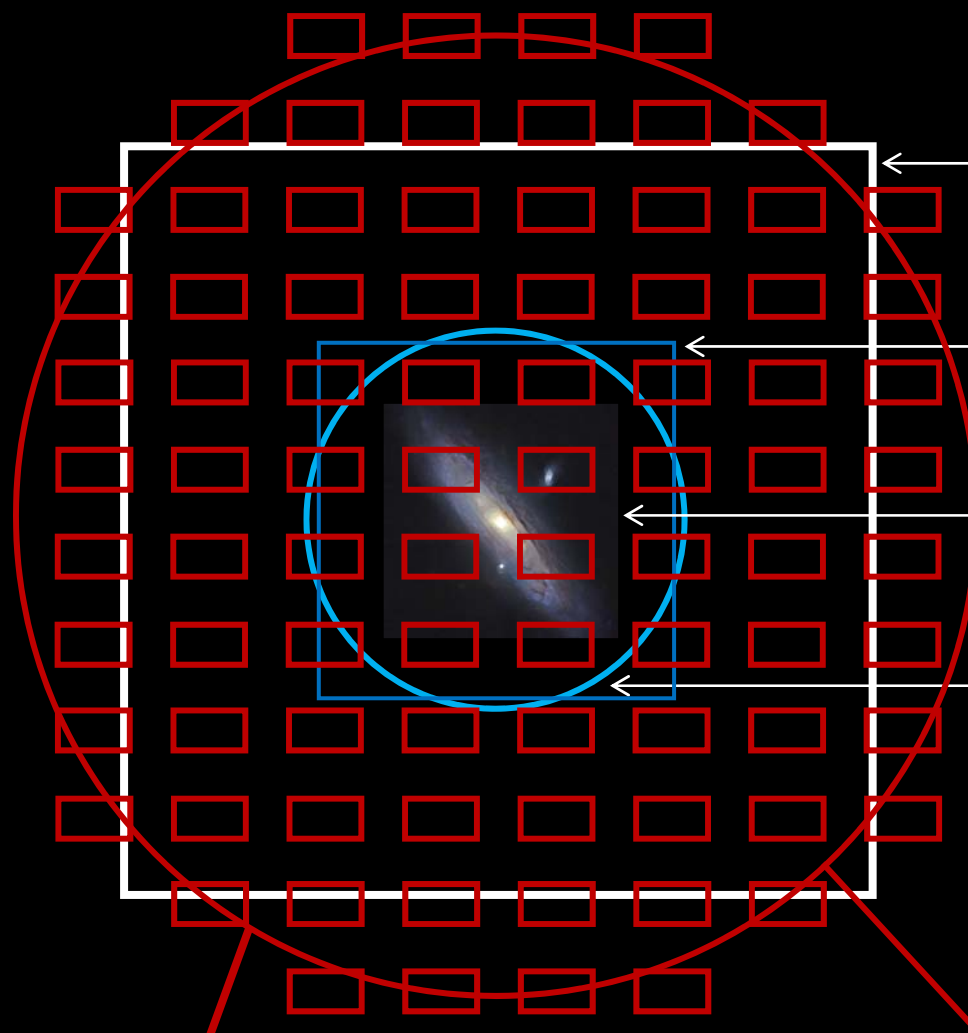
84 chips of high-sensitive CMOS sensors



Canon

front-side CMOS  
w micro-lenses

# Comparison of Field of Views



HSC/Subaru (8.2m) , 1.8 deg<sup>2</sup>,  
 $A\Omega = 91$ ,  $\Delta\tau \sim$  days

SC/Subaru (8.2m) , 0.3 deg<sup>2</sup>,  
 $A\Omega = 16$  ,  $\Delta\tau \sim$  days

ZTF (1.2m) , 47 deg<sup>2</sup> , 2017-  
 $A\Omega = 40$  ,  $\Delta\tau \sim$  days

Pan-STARRS (1.8m), 9 deg<sup>2</sup>,  
 $A\Omega = 15$  ,  $\Delta\tau \sim$  days

KWFC (1.0m), 4.8 deg<sup>2</sup>,  
 $A\Omega = 3.8$  ,  $\Delta\tau \sim$  hours

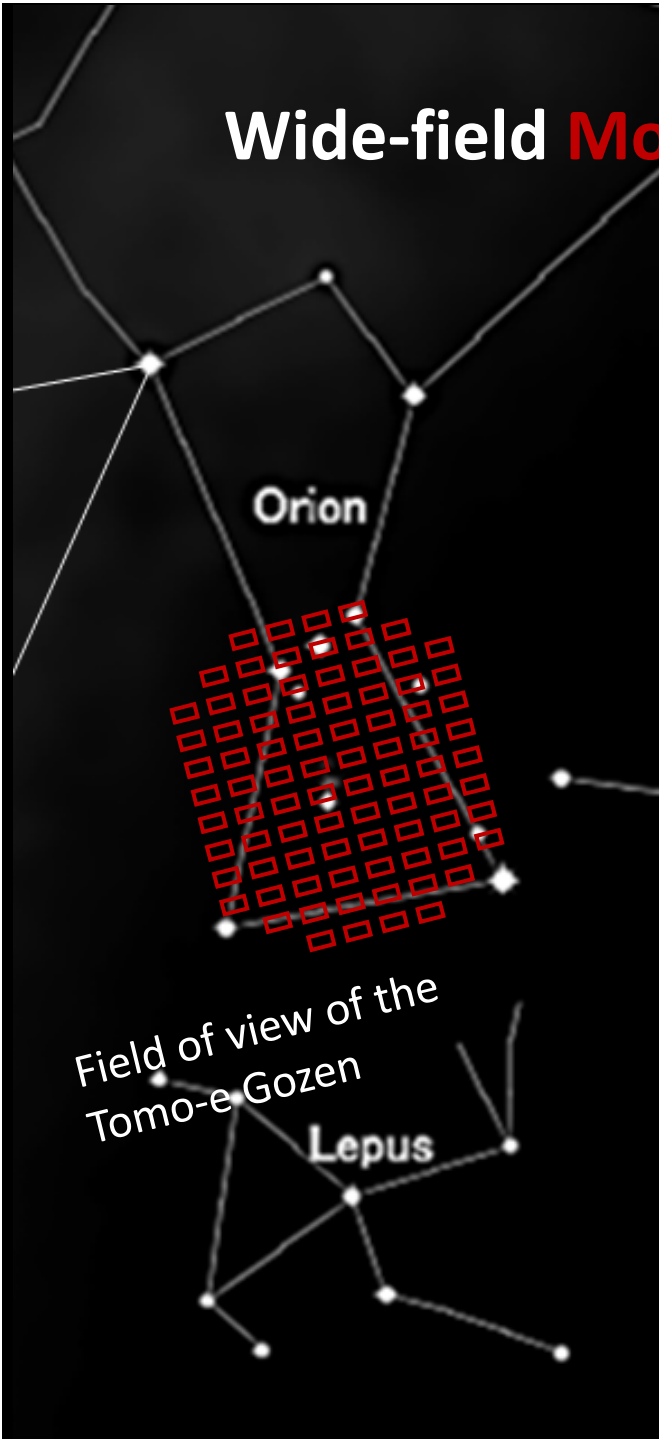
LSST (8.4m), 9.6 deg<sup>2</sup> , 2023-  
 $A\Omega = 320$  ,  $\Delta\tau \sim$  hours

**Tomo-e Gozen**  
20 deg<sup>2</sup> in  $\phi$  9 deg  
 $A\Omega = 28$ ,  $\Delta\tau \sim$  subsec  
Mosaic CMOS sensors

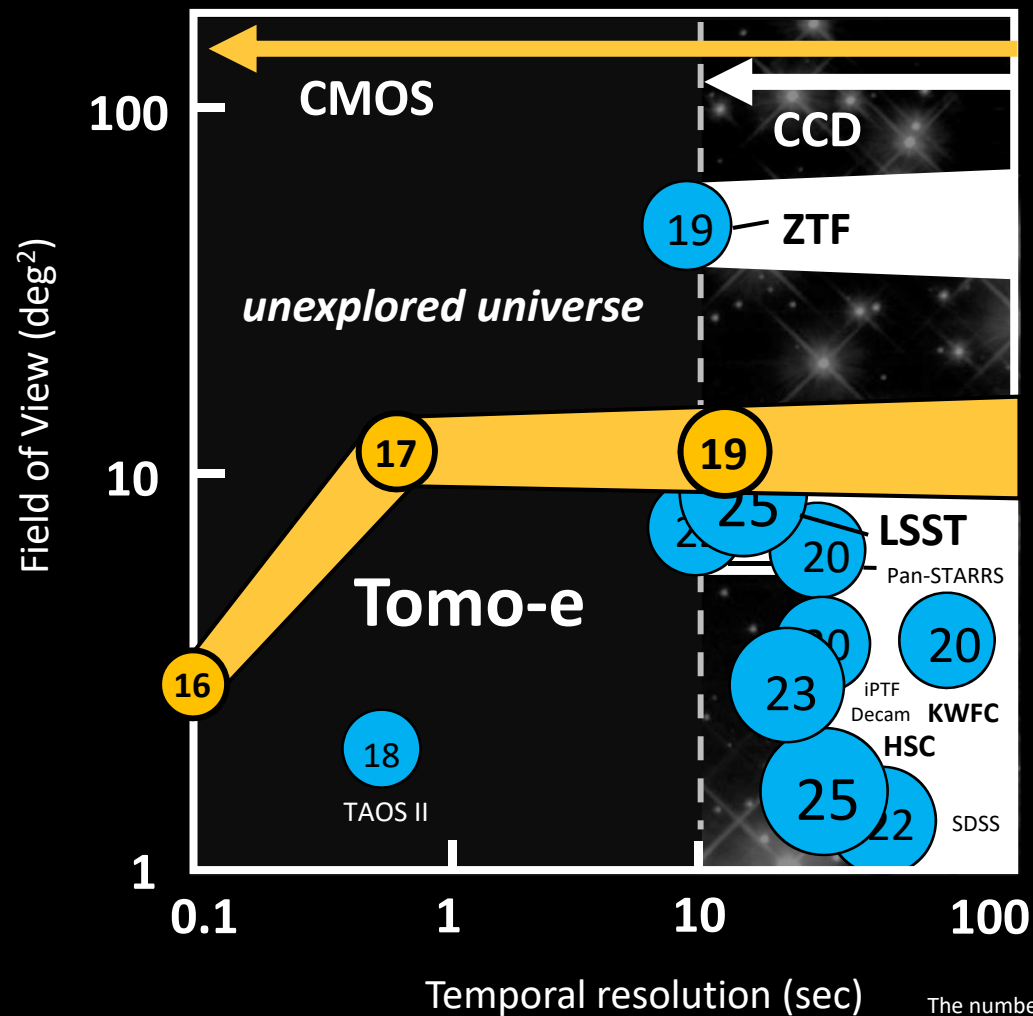
FoV of KISO 1-m Schmidt telescope



# Wide-field **Movie** Survey is the World's First Trial



Completion of survey powers for transient events



The numbers in the circles show limiting magnitudes.

# Intensive program of Tomo-e Gozen

- **All-sky survey**

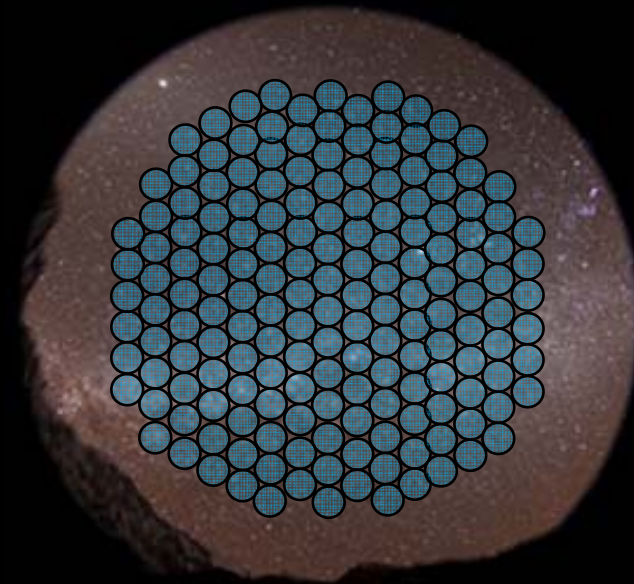
- 10,000 deg<sup>2</sup> every 2 hours, 5 visits in a night
- Record all events < 18mag
- 1,000 SNs/year, 5 cases just after explosion
- Fast moving objects: near earth objects, space debris, asteroids

- **Follow-up /simultaneous**

- Optical counterpart of GW w/GW
- Optical counterpart of Fast radio burst w/radio
- Optical counterpart of Pulsar w/radio
- Faint meteor w/radio

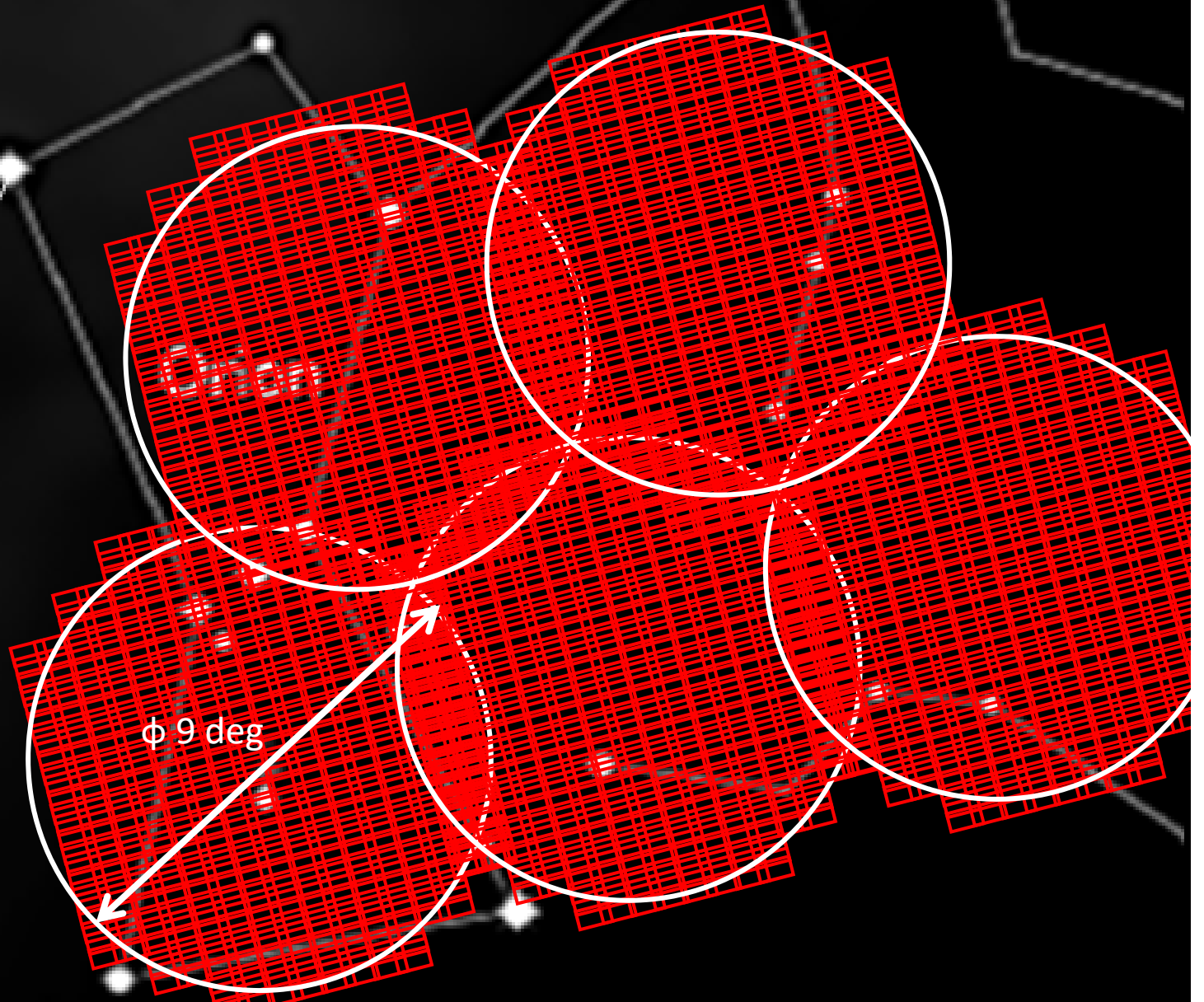
- **Fixed FoV + High-speed**

- 2– 20 fps, 2 - 20 deg<sup>2</sup>
- Occultation of trans neptunian objects
- Flash, YSO burst, flare, faint meteor

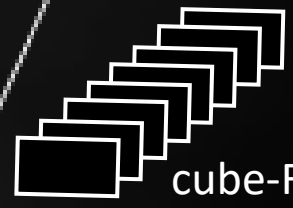


All-sky survey (10,000 deg<sup>2</sup> in 2hrs)

# All-sky survey



$\phi$  9 deg

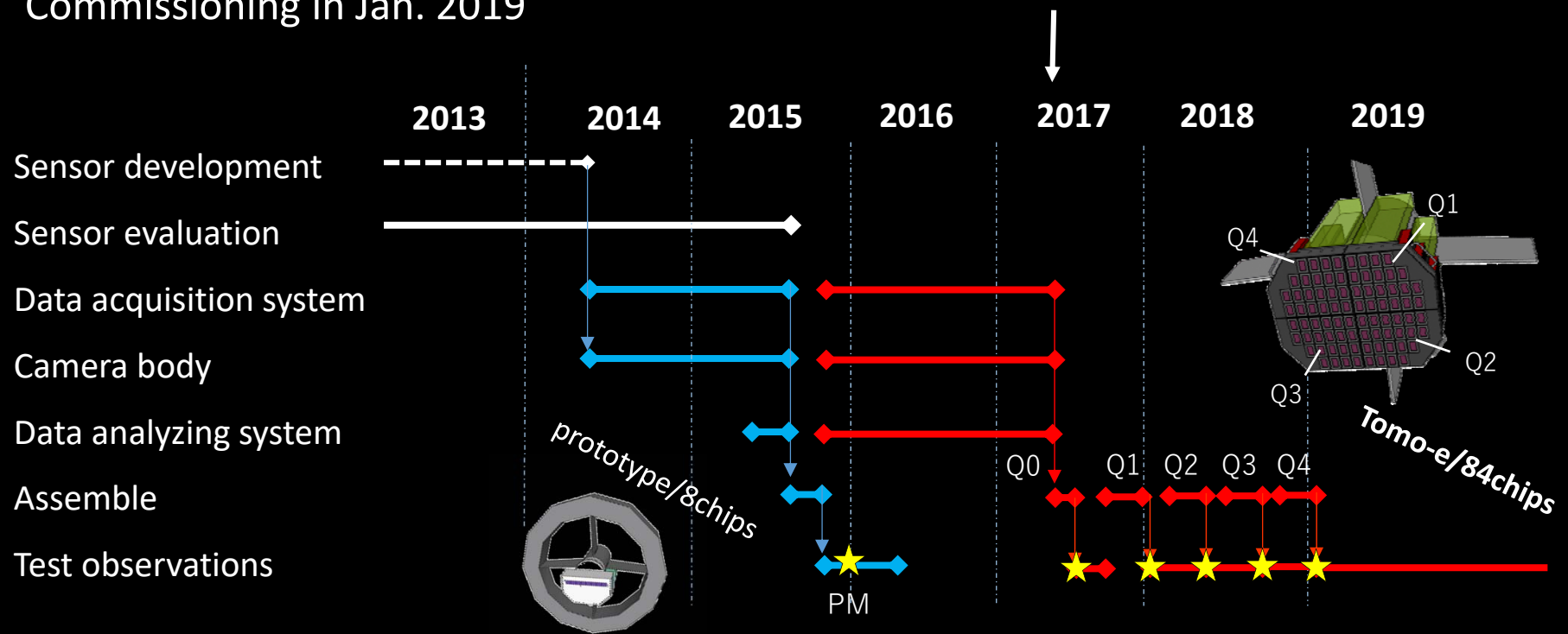
 cube-FITS x 84

2x3 dithering  
Take it as movie data of 2 fps  $\rightarrow$  1 cube-FITS file

# Timeline for Development

Commissioning in Jan. 2019

present day



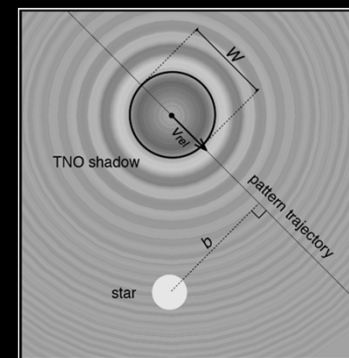


# 科研費基盤A (H26 - H30)

## 「広視野高速カメラによる太陽系外縁天体の探査」

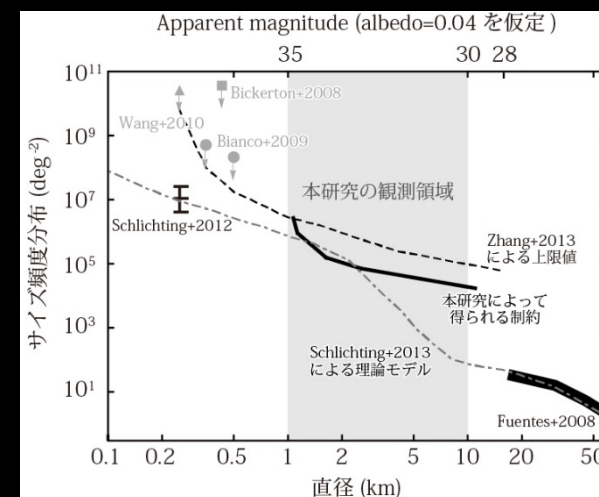
研究代表 渡部潤一

太陽系外縁天体 (trans-Neptunian objects; TNO) による恒星の掩蔽現象を観測することで、kmサイズのTNOのサイズ頻度分布を決定し、その形状から太陽系初期の外縁部の環境や巨大氷惑星の移動プロセスを明らかにすることを目的とする。

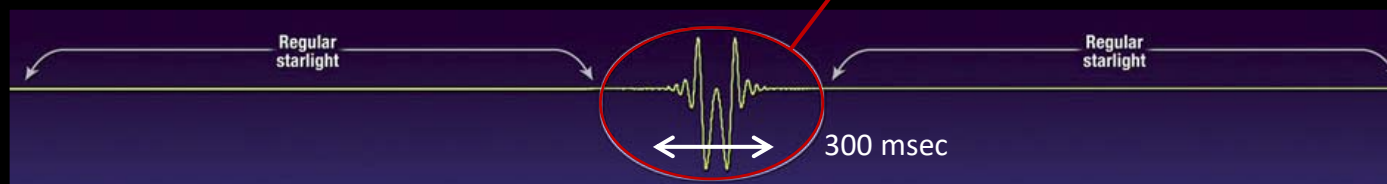


Arimatsu 2014, Kiso Schmidt symposium

- Tomo-eプロトタイプ機 (センサ8 chips) の開発
- 10 fpsの高頻度広視野観測を実施
- 背景星1,000/chip, 全8,000天体を監視 (Tomo-e PMだときびしい)
- パイロット観測, 13mag, 10%変動
- $10^{-2} - 10^{-3}$  events/year



申請書より



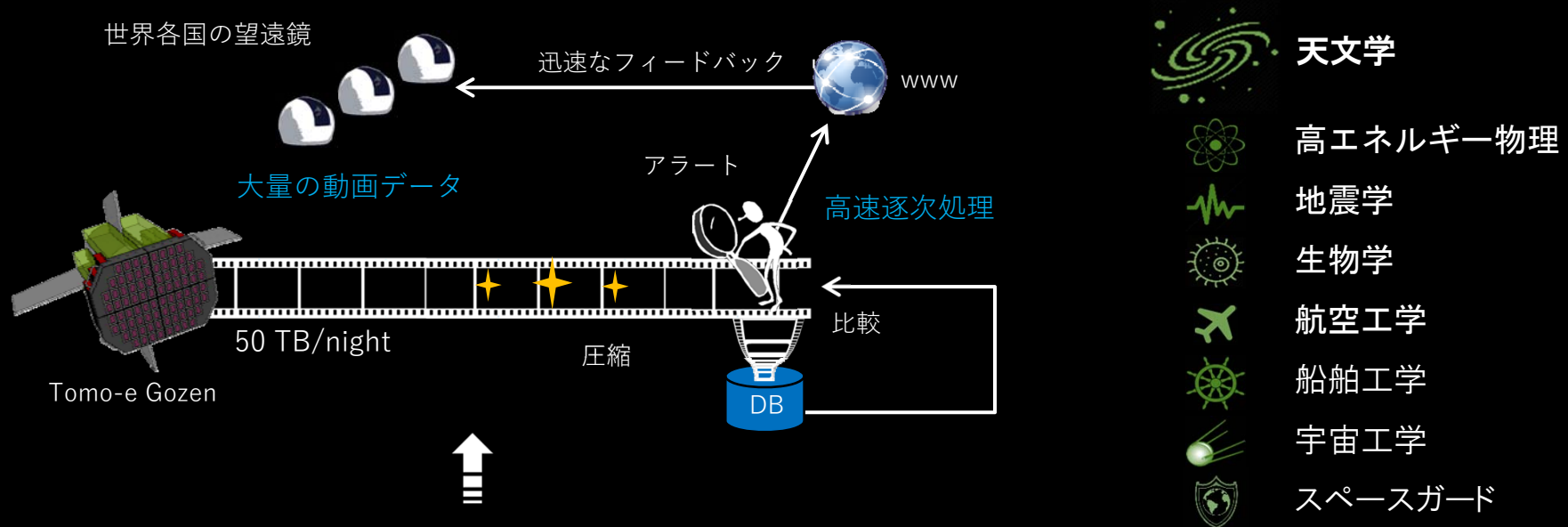
Size and distance of TNOs

# さきがけ（ビッグデータ領域, H27-H31）

「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」

研究代表 酒向重行

科学動画ビッグデータに含まれる稀で微弱な一過性のイベントを検出する手法を創出する。



## 数理学と情報学により解決

- 並列計算
- 動画認識
- 機械学習
- 動画圧縮

統計数理研 池田氏、森井氏と連携

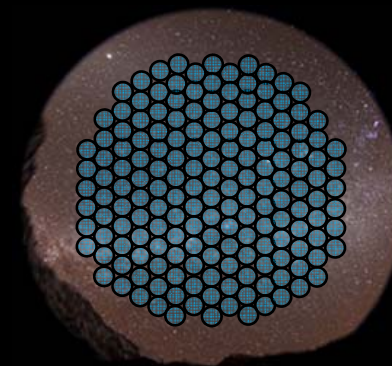
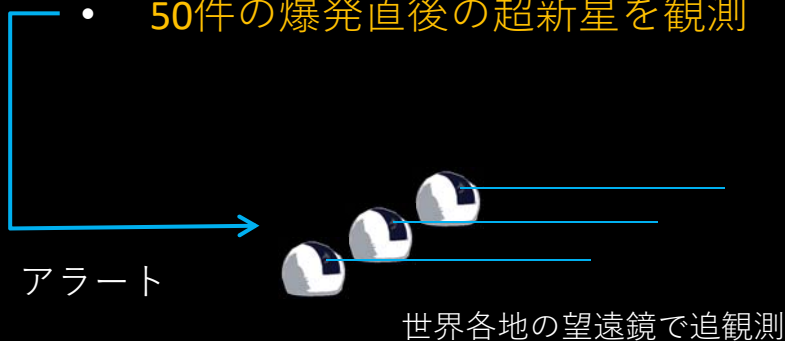
# 科研費基盤A (H28 – H32)

「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」

研究代表 諸隈智貴

超新星爆発最初期の高精度データを取得し精密な理論モデルを構築することで大質量星の最期の姿を明らかにする。

- 3,000平方度を30分間で繰り返し監視
- 過去に例の無い高頻度監視
- 年間1,000件の超新星の検出が見込まれる
- 50件の爆発直後の超新星を観測



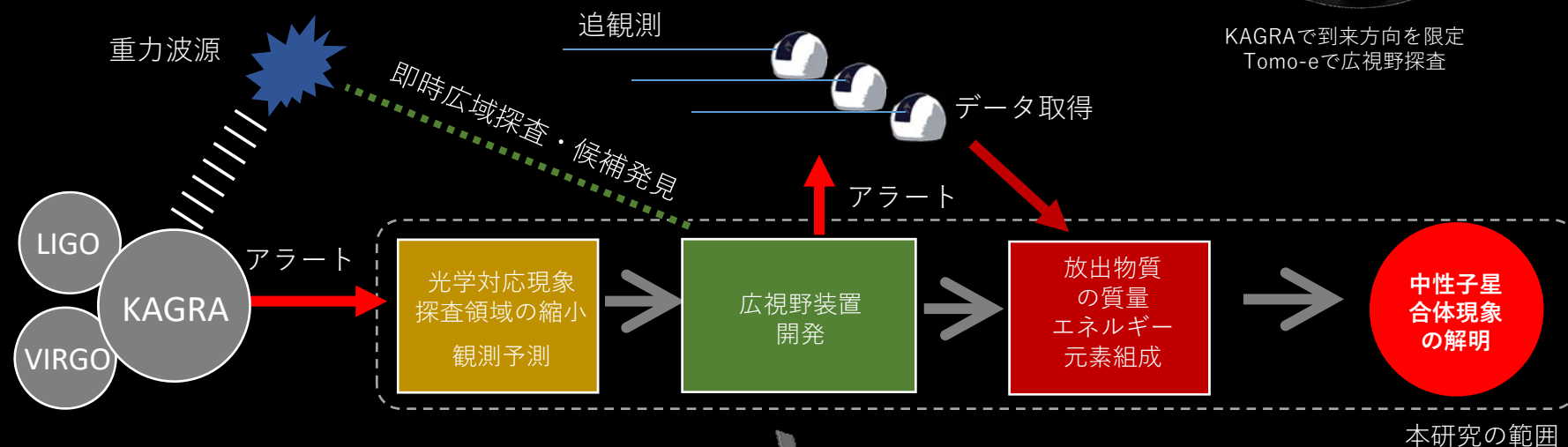
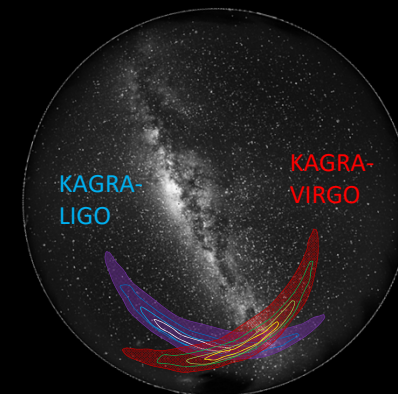
全天探査 (3,000平方度)  
170ポインティング  
検出限界18等級

# 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现象の研究」

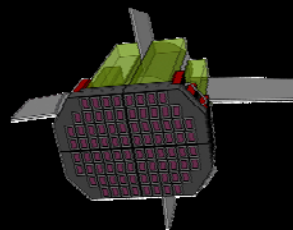
研究代表 茂山俊和

強力な広視野探査装置を開発し、光学対応現象を即時に同定することで、中性子星合体现象の解明をめざす。



重力波望遠鏡KAGRA

+



超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen



東京大学ビッグバンセンターからも支援

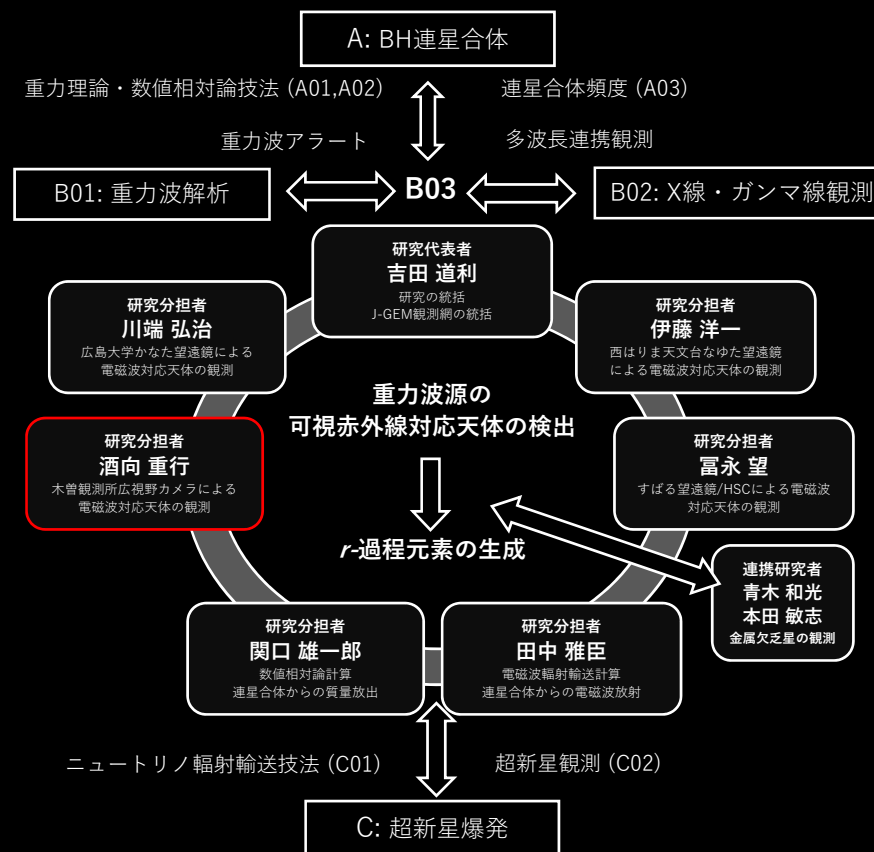
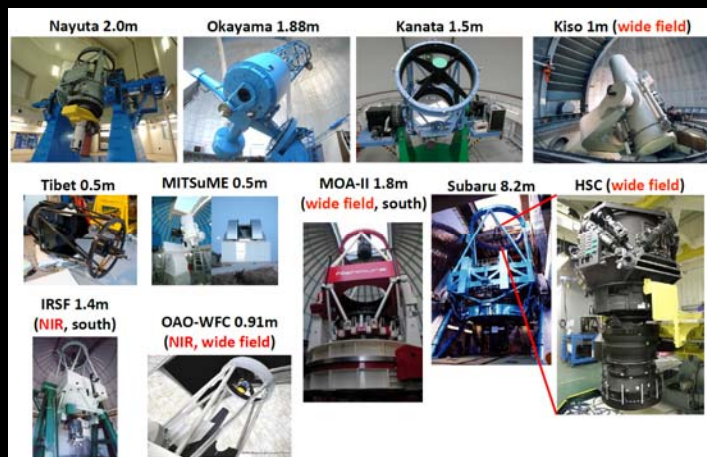
# 新学術領域「重力波・創世記」(代表 田中貴裕, H29-H34)

## 計画研究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」 (計画研究代表: 吉田道利)

重力波の電磁波対応天体を検出し、中性子星合体の元素合成の様子を明らかにすることで、宇宙におけるr-過程元素の起源を解明する。

J-GEM(Japanese collaboration for GM-EM follow-up, PI 吉田道利)が基盤

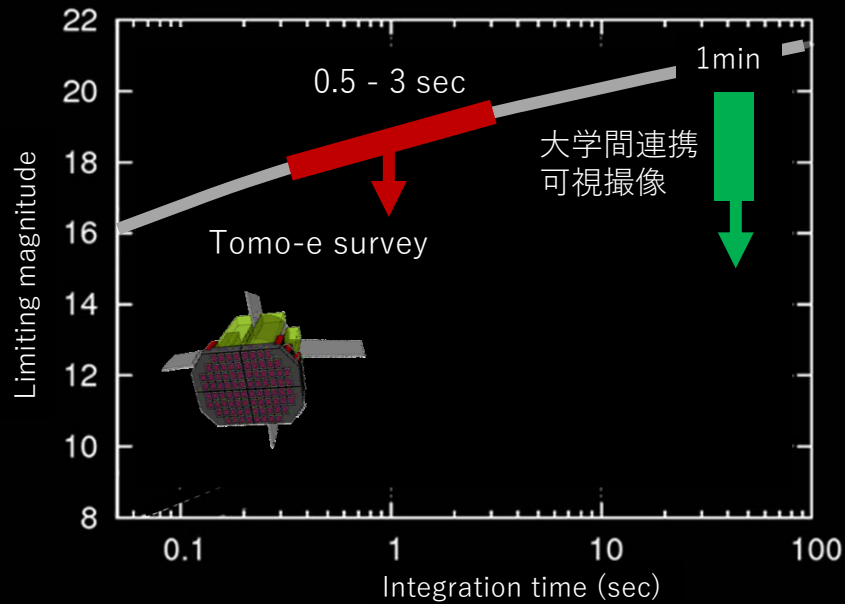


新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」(代表 中村卓史, H24-H29)の継続版

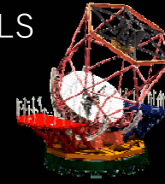


# 光赤外線大学間連携事業(OISTER), H29-H34

日本の大学と国立天文台が国内外に持つ中小口径望遠鏡を有機的に結びつけた光学・赤外線大学間連携の観測ネットワークを活用し、**宇宙重力波及びニュートリノの起源天体探査**を目的とした大型望遠鏡では困難な最先端の共同研究を行い、**新しい研究課題を創出**するとともに、大学の研究力強化に資する。



京大3.8m / KOOLS



大学間連携可視分光

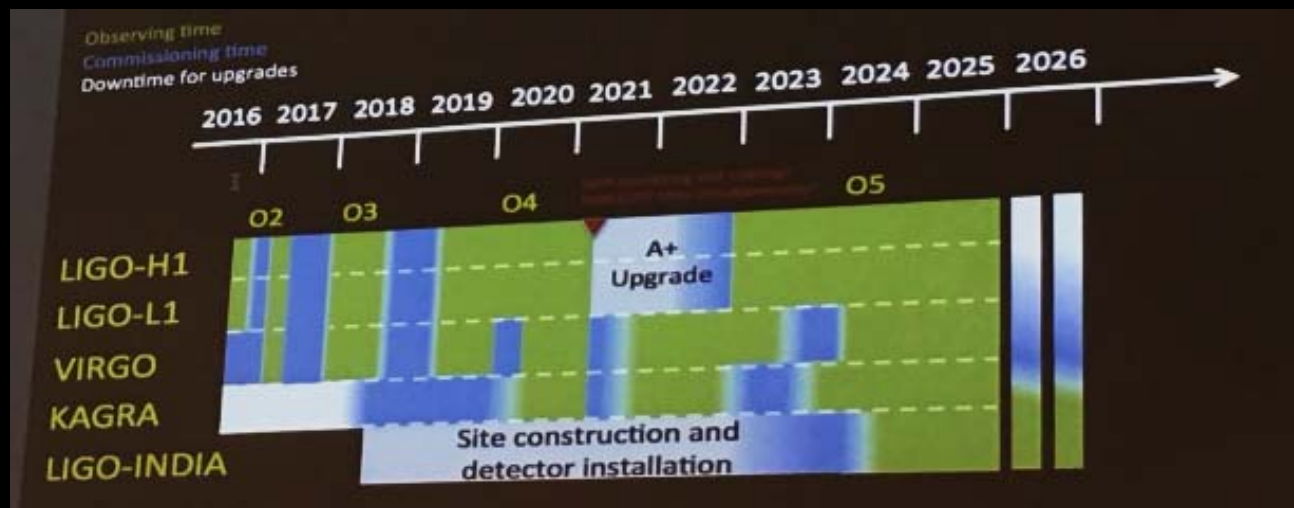
5 $\sigma$  検出限界



大学間連携望遠鏡群

## 関連する計画のスケジュール

- ZTF, 2017 –
- LSST, 2023 –
- LIGO/VIRGO O3, 2018
- LIGO/VIRGO O4, 2019 – 2020
- KAGRA, 2020 –



Dawn Workshop 2016, July 7, 2017, Atlanta

## Tomo-e Gozenの開発・試験観測のスケジュール

### 2017

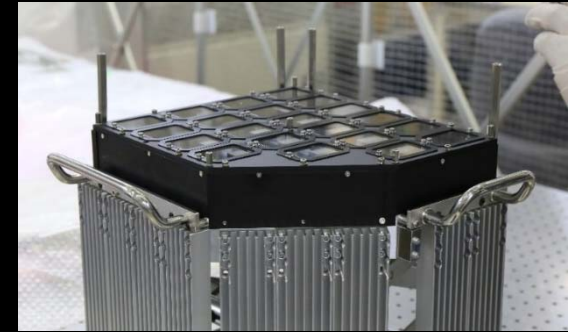
- 8/15 – Tomo-e Q0 (4 chips)性能試験観測
- 10/1 – KWFC
- 12/1 – Tomo-e Q1 (21 chips)性能試験観測

### 2018

- 1/1 – Tomo-e Q1 科学試験観測
- 3/1 – KWFC
- 4/1 - Tomo-e Q1科学観測
- 6/15 - 望遠鏡整備
- 8/1 - Tomo-e Q1+Q2科学観測
- 11/1 - Tomo-e Q1+Q2+Q3科学観測

### 2019

- 1/1 - Tomo-e Q1+Q2+Q3+Q4科学観測



開発中のTomo-e Q0



開発中のTomo-e計算機群

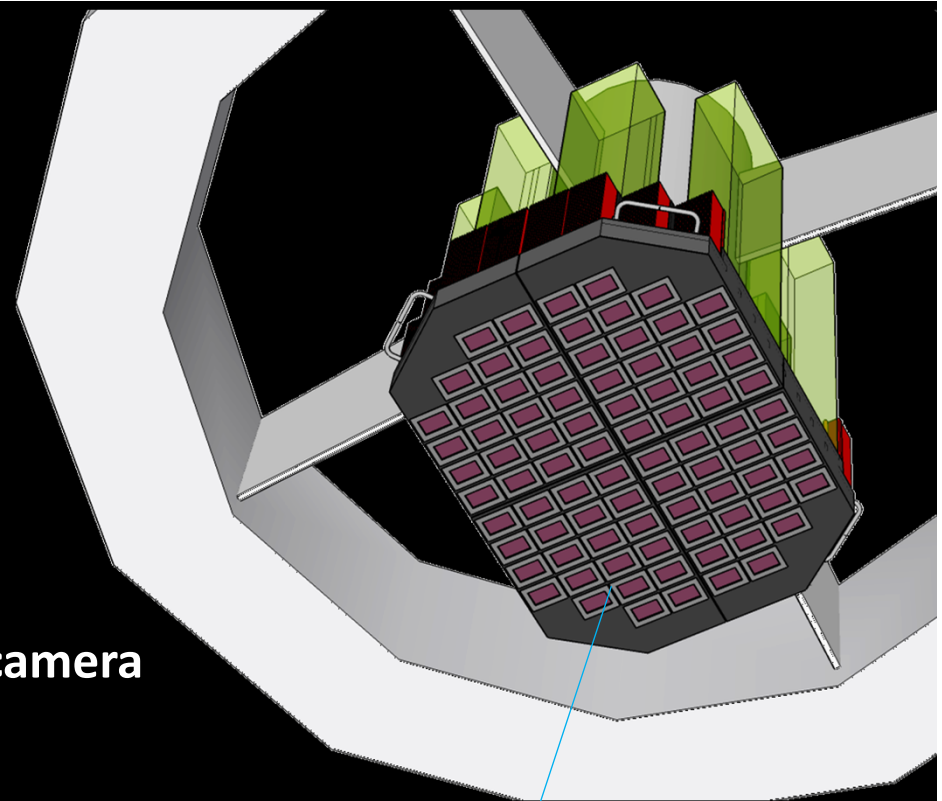


Sako, Shigeyuki<sup>a,b</sup>, Ohsawa, R.<sup>a</sup>, Takahashi, H.<sup>a</sup>, Kikuchi, Y.<sup>a</sup>, Doi, M.<sup>a,c</sup>, Kobayashi, N.<sup>a</sup>, Aoki, T.<sup>d</sup>, Arimatsu, K.<sup>e</sup>, Ichiki, M.<sup>a</sup>, Ikeda, S.<sup>f</sup>, Ita, Y.<sup>g</sup>, Kasuga, T.<sup>h</sup>, Kawakita, H.<sup>i</sup>, Kokubo, M.<sup>a</sup>, Maehara, H.<sup>j</sup>, Matsunaga, N.<sup>k</sup>, Mito, H.<sup>d</sup>, Mitsuda, K.<sup>a</sup>, Miyata, T.<sup>a</sup>, Mori, K.<sup>a</sup>, Mori, Y.<sup>d</sup>, Morii, M.<sup>f</sup>, Morokuma, T.<sup>a</sup>, Motohara, K.<sup>a</sup>, Nakada, Y.<sup>a</sup>, Osawa, K.<sup>a</sup>, Okumura, S.<sup>l</sup>, Onozato, H.<sup>g</sup>, Sarugaku, Y.<sup>d</sup>, Sato, M.<sup>m</sup>, Shigeyama, T.<sup>c</sup>, Soyano, T.<sup>d</sup>, Tanaka, M.<sup>e</sup>, Taniguchi, Y.<sup>a</sup>, Tanikawa, A.<sup>n</sup>, Tarusawa, K.<sup>d</sup>, Tominaga, N.<sup>o</sup>, Totani, T.<sup>k</sup>, Urakawa, S.<sup>l</sup>, Usui, F.<sup>p</sup>, Watanabe, J.<sup>e</sup>, Yamaguchi, J.<sup>a</sup>, and Yoshikawa, M.<sup>q</sup>

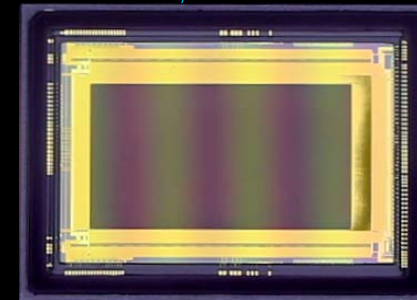
Sako et al. 2016, SPIE

# the first astronomical wide-field **Movie** camera the Tomo-e Gozen

- Telescope Kiso 105-cm wide-field Schmidt
- Field of view 20 deg<sup>2</sup> in ϕ9 deg
- Image sensors 84 chips of CMOS
- Data acquisition rate 2 fps (max)
- Data production rate 30 TB/night (max)
- Commissioning Jan. 2019
- Operation 10 years



84 chips of high-sensitive CMOS sensors



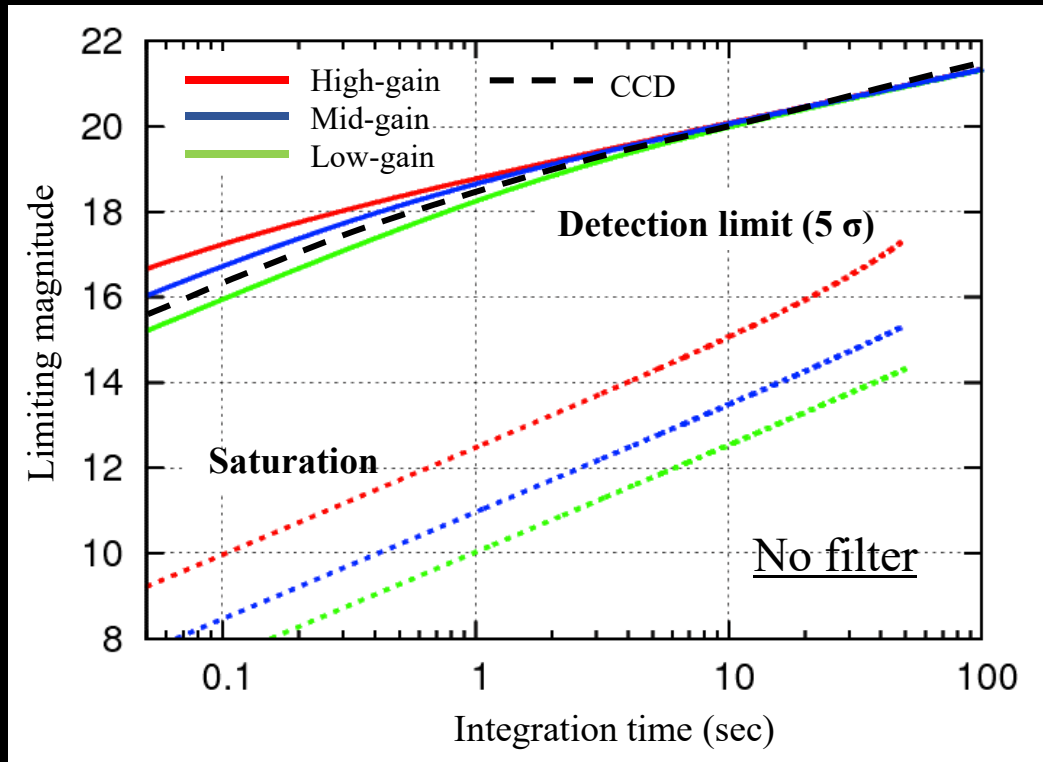
Canon

front-side CMOS  
w micro-lenses

以下、付録



# Sensitivity and Saturation



## High gain

Integ time (sec)	Limiting mag (Vmag, 5 $\sigma$ )	Saturation (Vmag)
0.1	17.2	10.0
1	18.8	12.6
10	20.0	15.0
100	21.3	sat due to bkg

## Mid gain

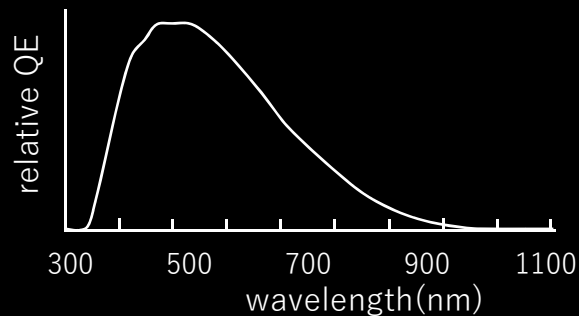
Integ time (sec)	Limiting mag (Vmag, 5 $\sigma$ )	Saturation (Vmag)
0.1	16.8	8.4
1	18.7	11.0
10	20.0	13.4
100	21.3	16.0

## Low gain

Integ time (sec)	Limiting mag (Vmag, 5 $\sigma$ )	Saturation (Vmag)
0.1	16.0	7.4
1	18.3	10.0
10	20.0	12.4
100	21.3	15.0

## 1% linearity

gain	1%-linear /fullwell
High	90 %
Mid	90 %
Low	80 %



## Summary of test observations for Tomo-e PM

Sensor	Front side illuminated 35 mm CMOS, micro lens array, cover glass with AR, 2000 x 1128 pix <sup>2</sup>
Sensor alignment	8 chips along RA direction
Total field of view	2 degree <sup>2</sup> , North is up-side
Pixel size and scale	19 μm/pix, 1.189 pix/arcsec
Sensitive wavelength	400 – 650 nm
Filter	None (transparent window)
Maximum frame rate	<u>2 fps</u> @full-frame, 20 fps @partial
Read noise (2 fps)	<u>1.9, 4.3, 9.9 e<sup>-</sup></u> @G=High, Mid, Low
Full well	6,400, 26,000, 59,000 e <sup>-</sup> @G=High, Mid, Low
Linearity (error < 1%)	90, 90, 80 % @G=High, Mid, Low
Conversion factor	0.23 , 0.95, 2.4 e <sup>-</sup> /ADU @G=High, Mid, Low
Dark current	<u>0.1, 1 e<sup>-</sup>/s/pix</u> @4, 20 °C
Sky background (dark night, no-filter)	52 e <sup>-</sup> /s/pix
Limiting mag† (5σ, no-filter, 0.5 sec)	18.0, 17.8, 17.3 mag @G=High, Mid, Low
(10 sec)	20.1, 20.1, 20.0 mag @G=High, Mid, Low
Photometric accuracy	0.1 %@t > a few sec, 1 % @2 fps
Output file	4.9 Mbyte/s/chip, 16bit 3D FITS

†based on SDSS-g, ± 0.5 mag inaccuracy