



NAOJ  
National Astronomical  
Observatory of Japan

JAXA  
Japan Aerospace  
Exploration Agency

TOHOKU  
UNIVERSITY

KONAN

CPS  
Center for  
Planetary Science



Canon

Interface

科研費  
KAKENHI

forsker  
PRESTO

# 木曾超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen

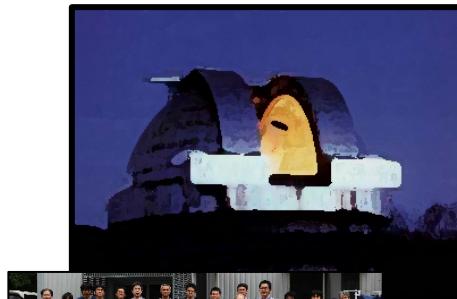
東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター  
酒向重行, Tomo-e Gozen開発チーム

## アウトライン

- 1. 東京大学木曾観測所**
2. Tomo-e Gozen計画
3. 試験データ
4. 開発状況
5. 提案サイエンス
6. 全天サーベイと京大3.8mとの連携

# 東京大学大学院理学系研究科付属 天文学教育研究センター

木曾観測所  
長野県木曽町  
口径1m広視野シュミット望遠鏡



アタカマ観測所  
チリ共和国アタカマ砂漠  
口径6.5mTAO（東京大学アタカマ天文台）望遠鏡



本部（東京都三鷹市）



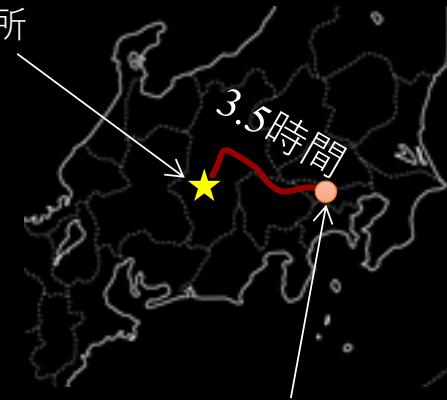
TAO6.5m望遠鏡(建設中)

研究スタッフ19名、技術スタッフ6名・事務スタッフ8名、大学院生19名  
土居守センター長

# 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

- 1974年創設
- 暗い空, 標高1,120m
- 宿泊施設、食堂
- 超広視野105cmシュミット望遠鏡
- スタッフ
  - 研究系 5名, 技術系 5名, 事務系 2名
  - 小林尚人所長

木曾観測所



東京大学天文学教育研  
究センター三鷹本部



# 105cmシュミット望遠鏡

- 超広視野シュミット望遠鏡
  - 有効径 105cm, 主鏡 150cm, f/3.1, 視野 9 deg直径

- 観測装置
  - 2017年度まで 広視野CCDカメラ KWFC (4 deg<sup>2</sup>, PI 酒向)
  - 2018年度から 超広視野CMOSカメラ Tomo-e Gozen (20 deg<sup>2</sup>, PI 酒向)

- 自動観測システム (PI 前原)
  - 遠隔観測・監視
  - 天候自動判定, VPN + Webブラウザ経由

- 現行の観測プログラム
  - KISS (超新星の大規模探査, PI諸隈)
  - KISOGP (銀河面変光天体の大規模探査, PI松永)
  - 共同利用観測 (2017年3月まで, その後はプロジェクト制)



105cmシュミット望遠鏡

# 木曽観測所の観測統計

- ・ シーイング 3 arcsec typ.
- ・ 空の明るさ  $21 \text{ mag/arcsec}^2$  in V-band  
(  $22 \text{ mag/arcsec}^2$  @Mauna kea )



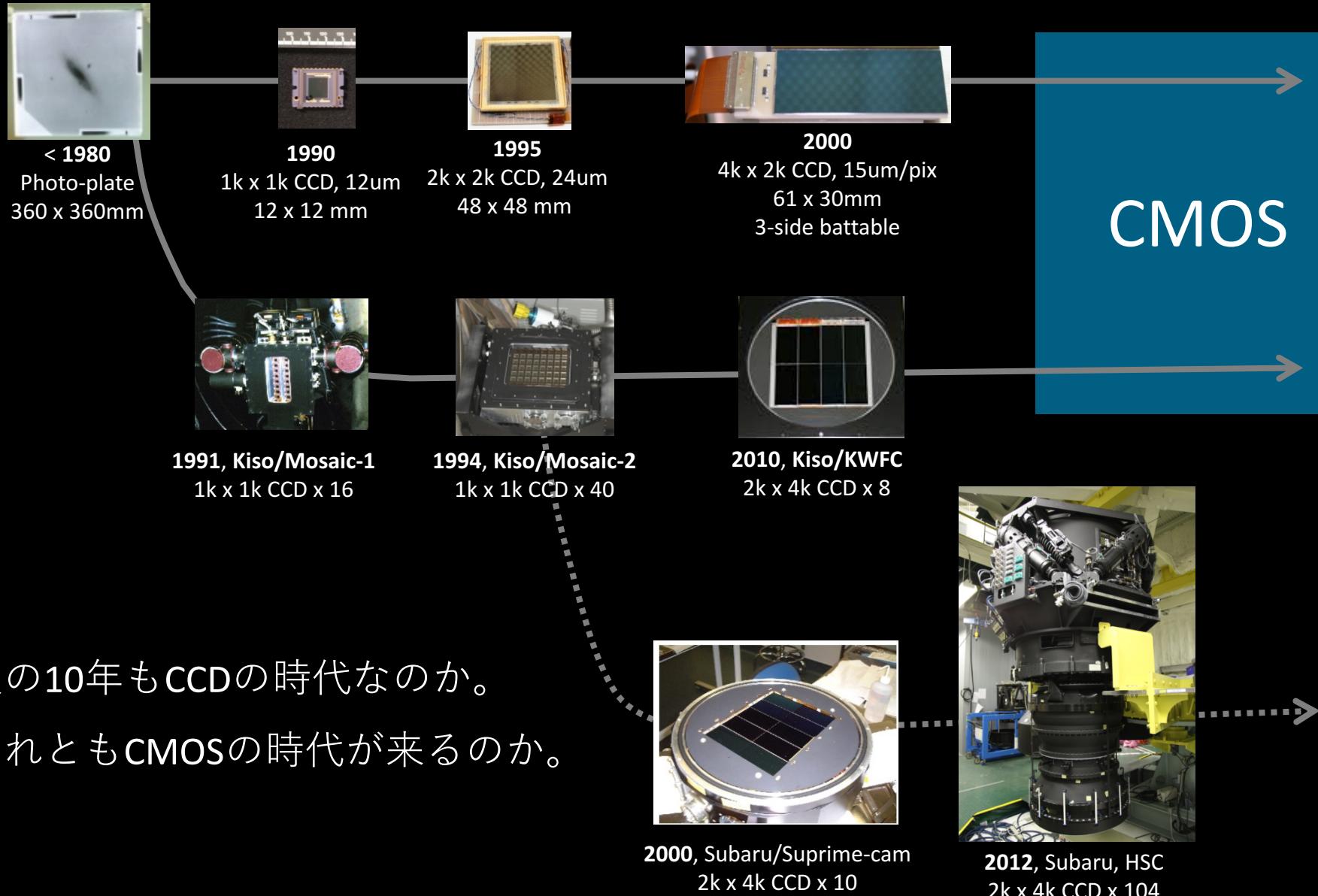
広視野CCDカメラ KWFC

- ・ 観測実績

期間	日効率 (実施/全夜数)	時間効率 (実施/全時間)
2013年 1-12月	49 %	41 %
2014年 1-12月	54 %	42 %
2015年 1-12月	46 %	35 %
2016年 1- 6月	62 %	46 %
年平均	40 – 60%	30 – 50 %
年平均(7,8月を除く)	~ 70%	50 – 60 %

自動観測（気象モニタ装置による自動判定）により最大効率を達成

# 木曾観測所は日本の広視野天文学を牽引



## アウトライン

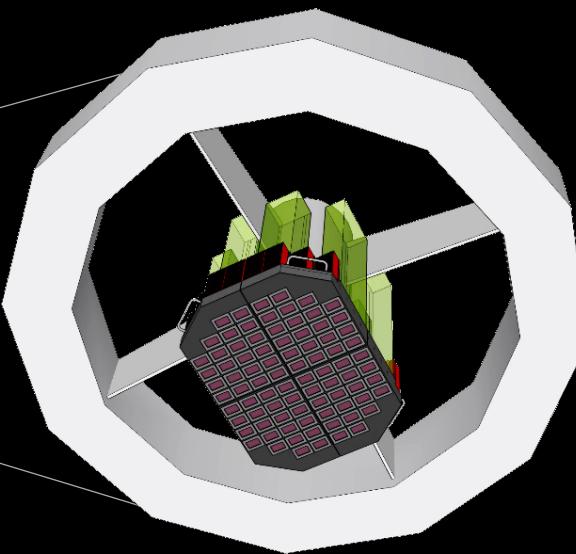
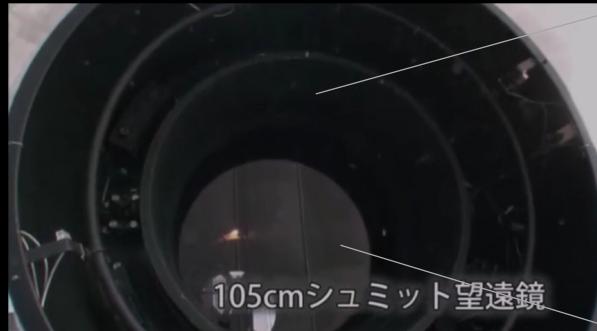
1. 東京大学木曾観測所
2. **Tomo-e Gozen計画**
3. 試験データ
4. 開発状況
5. 提案サイエンス
6. 全天サーベイと京大3.8mとの連携

# 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 camera





NAOJ  
National Astronomical  
Observatory of Japan



OHOKU  
オホク



三



KONA





Center for  
Planetary Science



Canon

 Interface®



**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>

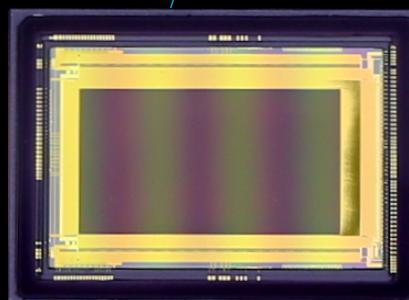
Sako et al. 2016, SPIE

# the first astronomical wide-field CMOS camera

# the Tomo-e Gozen

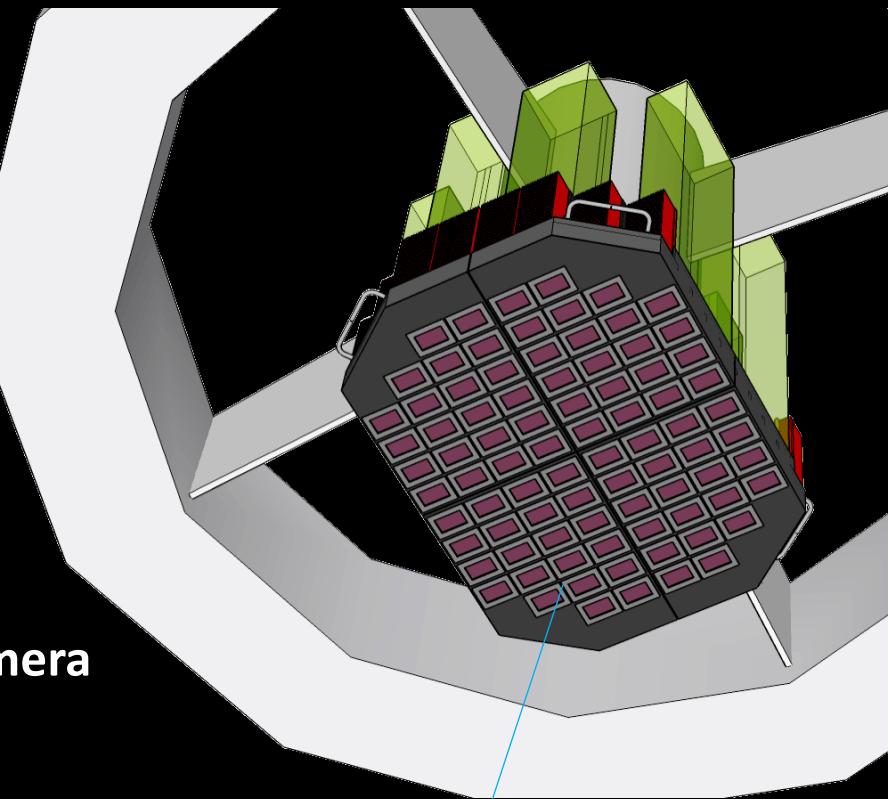
- Telescope Kiso 105-cm wide-field Schmidt
  - Field of view  $20 \text{ deg}^2$  in  $\phi 9 \text{ deg}$
  - Image sensors 84 chips of CMOS
  - Data acquisition rate 2 fps (max)
  - Data production rate 30 TB/night (max)
  - Commissioning Aug. 2018
  - Operation 10 years 常温、大気圧

常温、大気圧  
初期フィルタなし



Canon

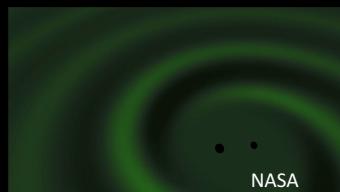
front-side CMOS  
w micro-lenses



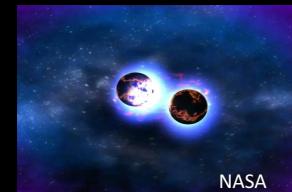
# New fields developed by Tomo-e

- Survey for extremely rare transient events
- Survey for rapid transient events with  $\tau < 1$  sec

- ❑ Shock Breakout of core-collapse SN
- ❑ Explosion of Nova
- ❑ Optical follow up of Gravitational wave
- ❑ Afterglow of Gamma-ray burst
- ❑ Optical candidate of fast radio burst
- ❑ X-ray time variable objects
- ❑ Transit of Exoplanet
- ❑ Occultation by Trans-Neptune object
- ❑ Potentially Hazardous Asteroid
- ❑ Faint meteor



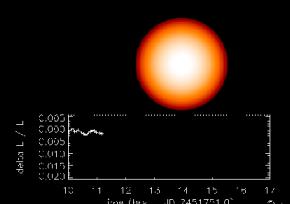
Optical counterpart of GW



Neutron star merger

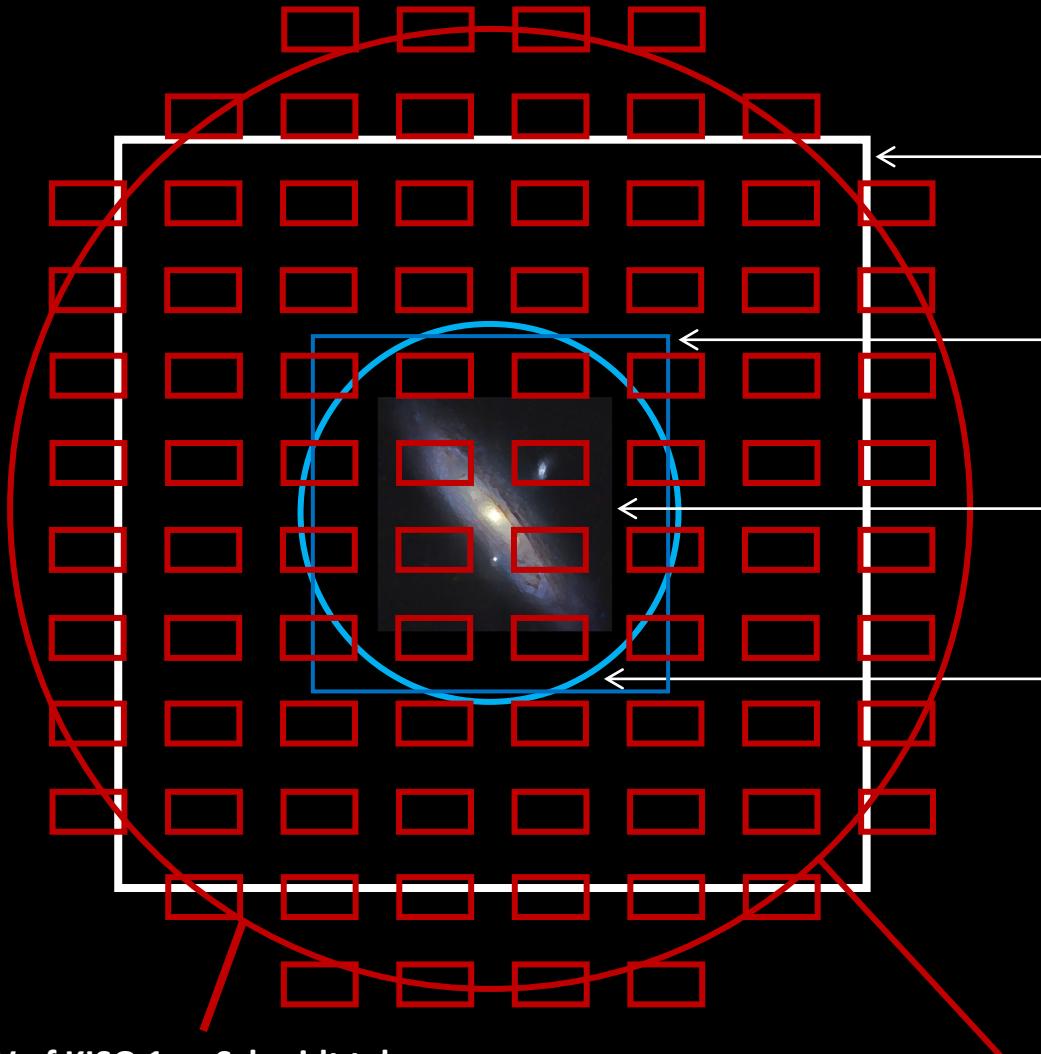


Potentially hazardous asteroid



Transit of exoplanet

# Comparison of Field of Views



HSC/Subaru (8.2m) ,  $1.8 \text{ deg}^2$ ,  
 $\Delta\Omega = 91$ ,  $\Delta\tau \sim \text{days}$

SC/Subaru (8.2m) ,  $0.3 \text{ deg}^2$ ,  
 $\Delta\Omega = 16$  ,  $\Delta\tau \sim \text{days}$

ZTF (1.2m) ,  $47 \text{ deg}^2$  (2017-),  
 $\Delta\Omega = 40$  ,  $\Delta\tau \sim \text{days}$

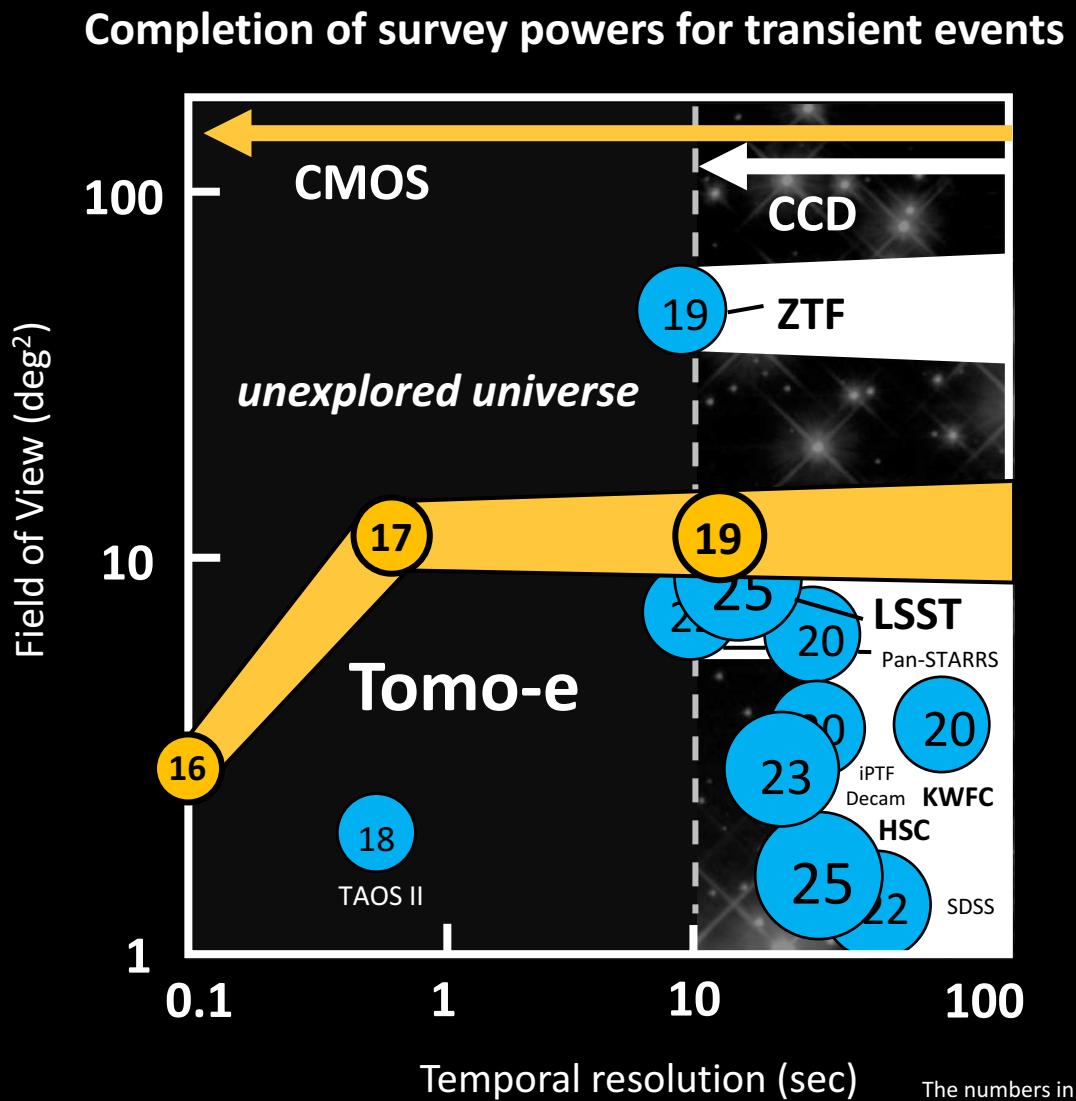
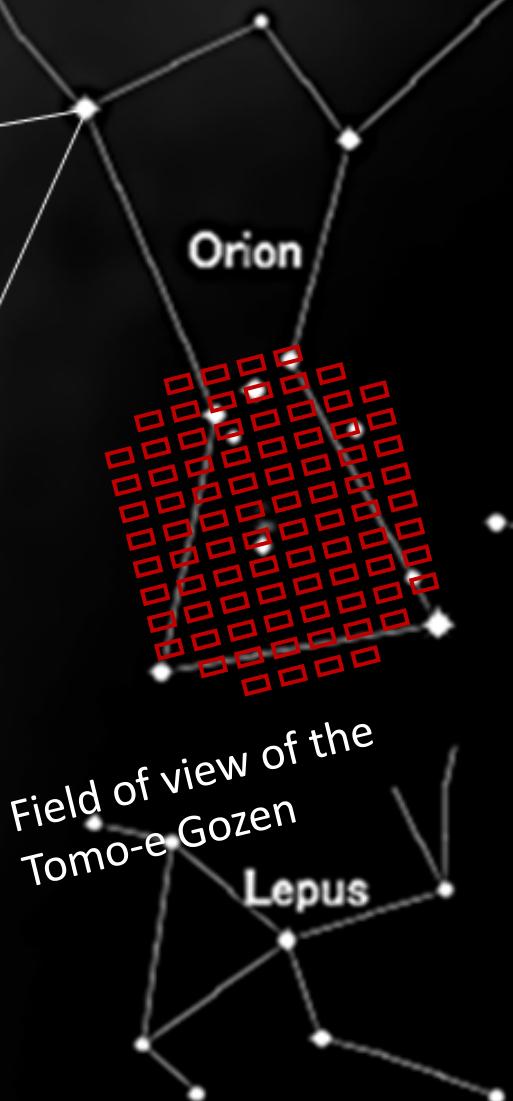
Pan-STARRS (1.8m),  $9 \text{ deg}^2$ ,  
 $\Delta\Omega = 15$  ,  $\Delta\tau \sim \text{days}$

KWFC (1.0m),  $4.8 \text{ deg}^2$ ,  
 $\Delta\Omega = 3.8$  ,  $\Delta\tau \sim \text{hours}$

LSST (8.4m),  $9.6 \text{ deg}^2$  (2023-),  
 $\Delta\Omega = 320$  ,  $\Delta\tau \sim \text{hours}$

**Tomo-e Gozen**  
 **$20 \text{ deg}^2$  in  $\phi$   $9 \text{ deg}$**   
 **$\Delta\Omega = 28$ ,  $\Delta\tau \sim \text{subsec}$**   
**Mosaic CMOS sensors**

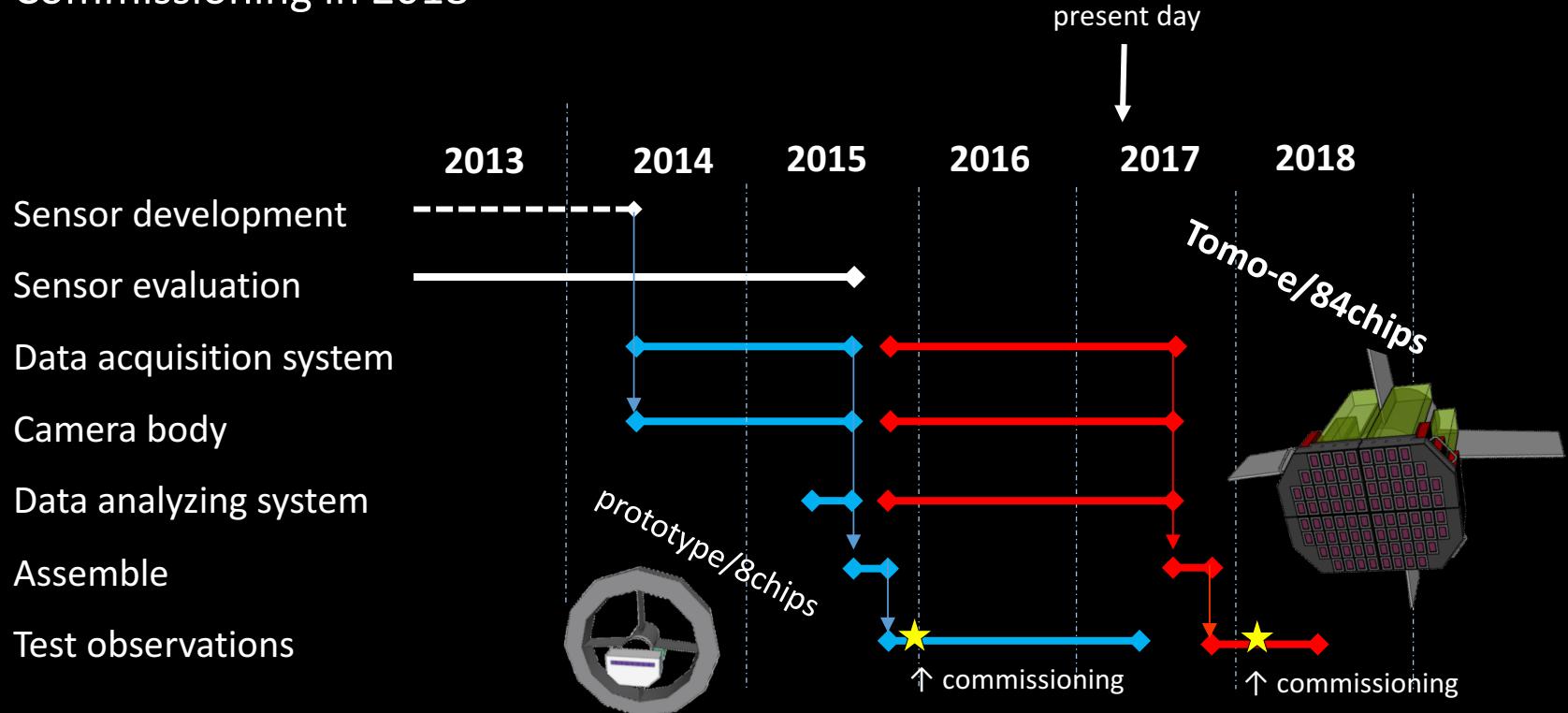
# Wide-field Movie Survey is the World's First Trial



The numbers in the circles show limiting magnitudes.

# Timeline for Development

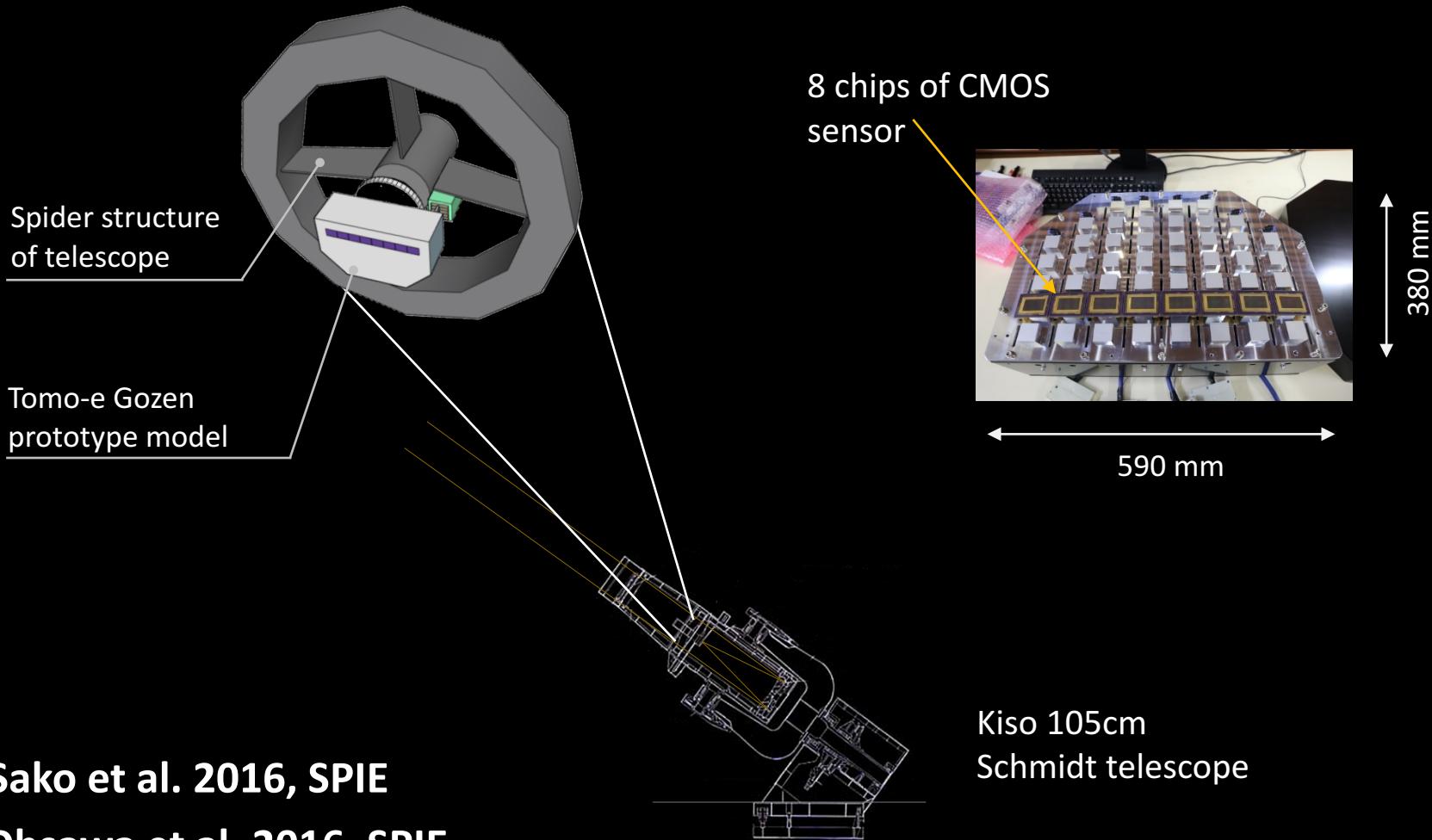
Commissioning in 2018



## アウトライン

1. 東京大学木曾観測所
2. Tomo-e Gozen計画
- 3. 試験データ**
4. 開発状況
5. 提案サイエンス
6. 全天サーベイと京大3.8mとの連携

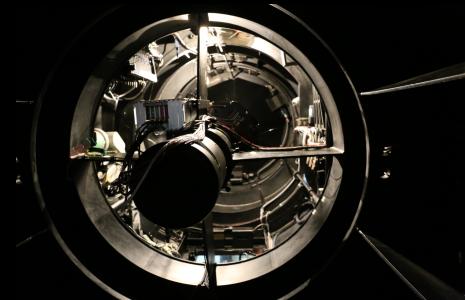
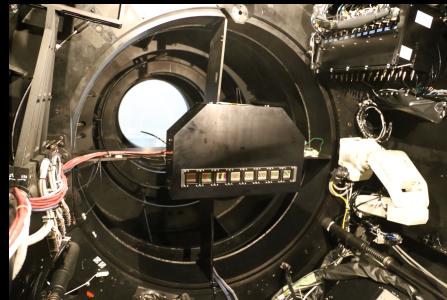
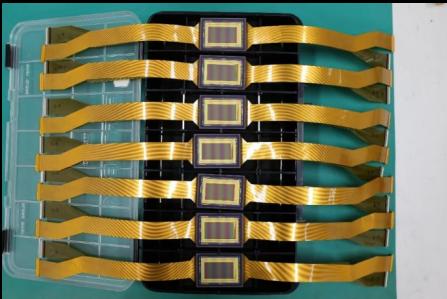
# Tomo-e Gozen Prototype model



Sako et al. 2016, SPIE

Ohsawa et al. 2016, SPIE

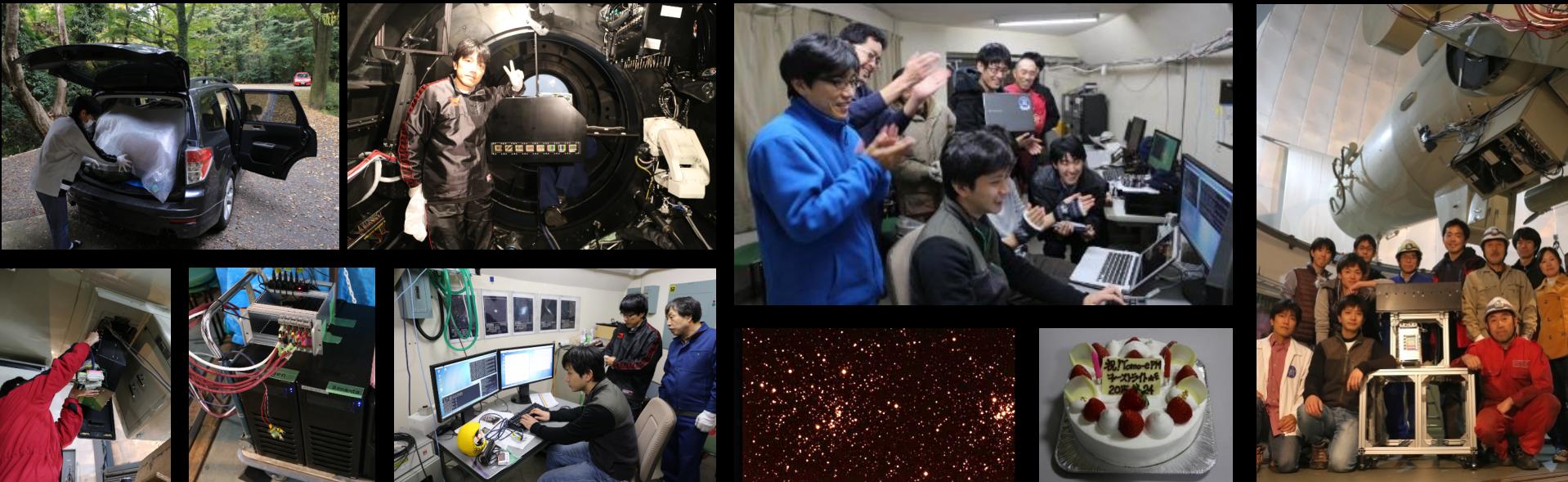
# Camera development



## Development places

- Kiso observatory, Institute of Astronomy, the University of Tokyo
- Mitaka headquarter, Institute of Astronomy, the University of Tokyo
- Canon company

# Test observations



- 24<sup>th</sup> Nov., 2015 First light
  - 23<sup>rd</sup> Nov, 2015 - 14<sup>th</sup> Apr, 2016 Test observations

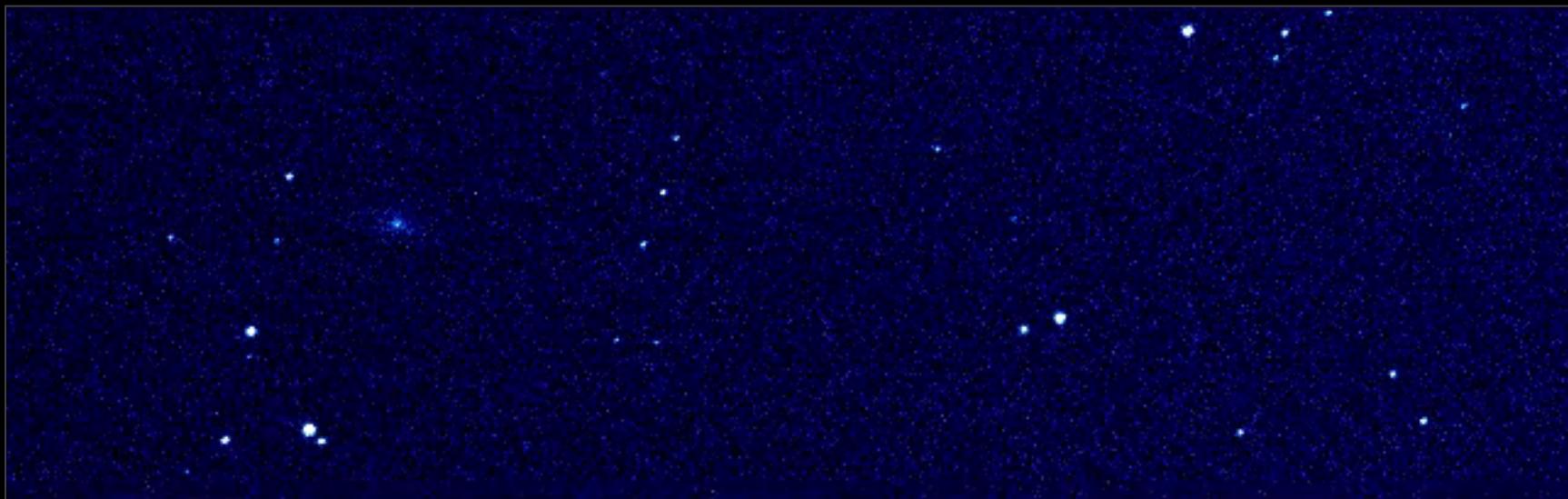
# Data sample obtained by Tomo-e PM



First light image, h-x Per open star cluster  
(1 chip, 5 sec exposure, FoV of 39.7' x 22.4')



High dynamic image of M42 Orion nebula  
(1 chip, 0.5 sec/exposure x 5,018 frames)



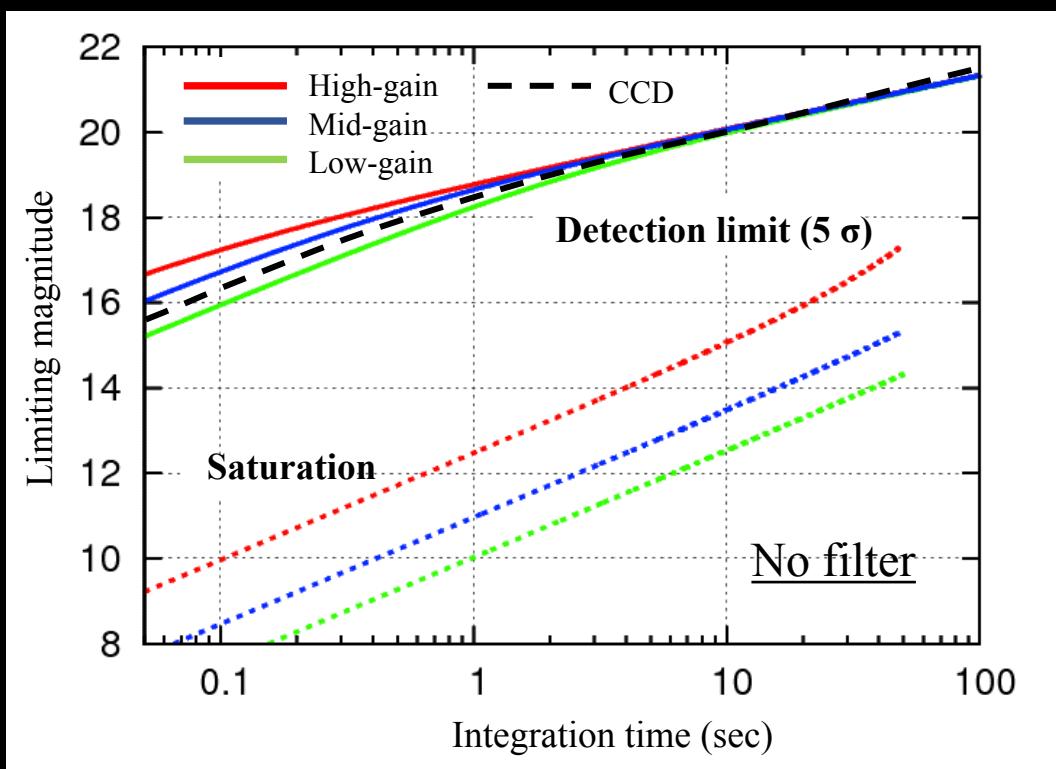
Movie data (10 fps, partial readout, 1 chip)

# 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

# 検出限界等級と飽和等級



## Highゲイン

積分時間 (秒)	限界等級 (等級, $5\sigma$ )	飽和等級 (等級)
0.1	17.2	10.0
1	18.8	12.6
10	20.0	15.0
100	21.3	背景光で飽和

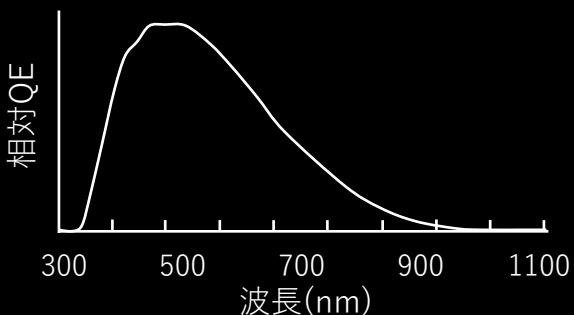
## Midゲイン

積分時間 (秒)	限界等級 (等級, $5\sigma$ )	飽和等級 (等級)
0.1	16.8	8.4
1	18.7	11.0
10	20.0	13.4
100	21.3	16.0

## Lowゲイン

積分時間 (秒)	限界等級 (等級, $5\sigma$ )	飽和等級 (等級)
0.1	16.0	7.4
1	18.3	10.0
10	20.0	12.4
100	21.3	15.0

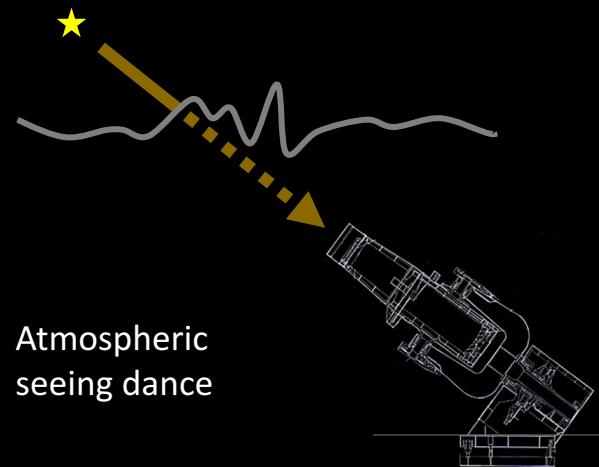
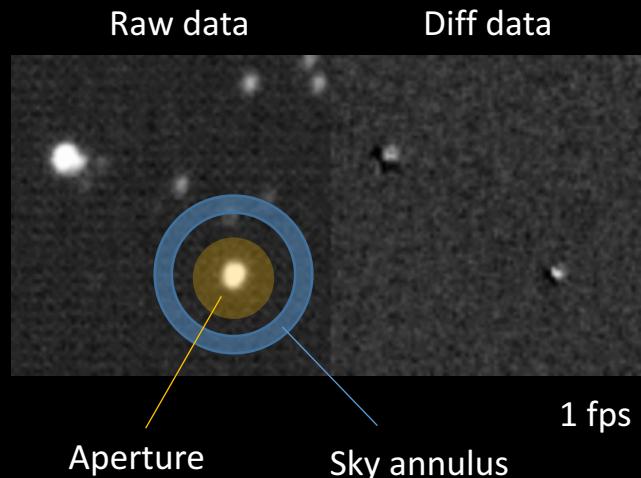
## 波長感度特性



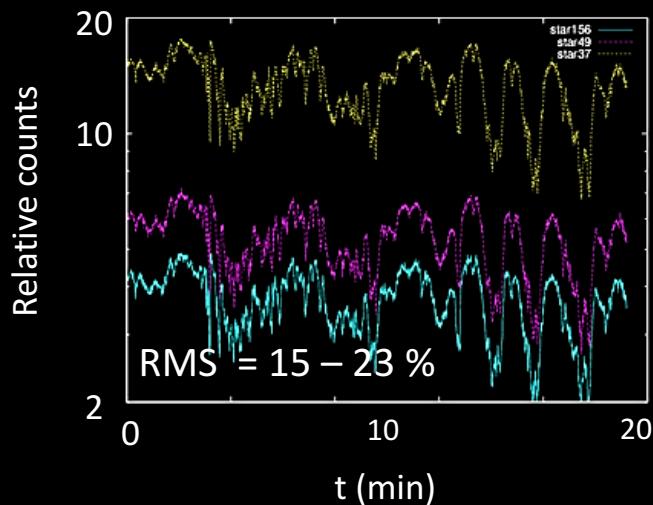
## 1%線形範囲

ゲイン	フルウェルに対する割合
High	90 %
Mid	90 %
Low	80 %

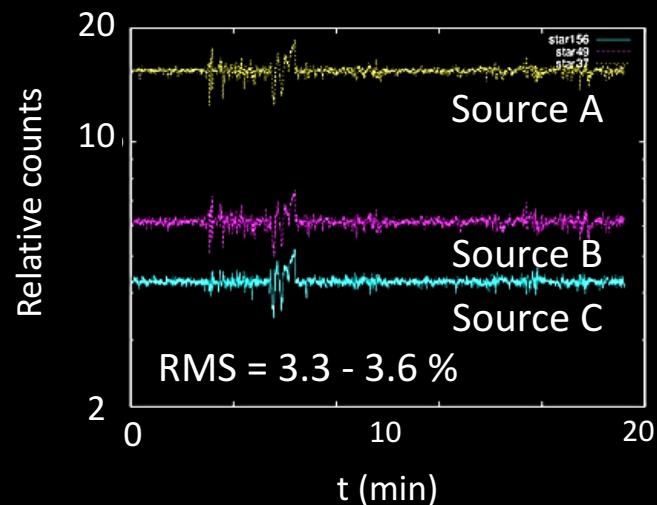
# Relative photometry



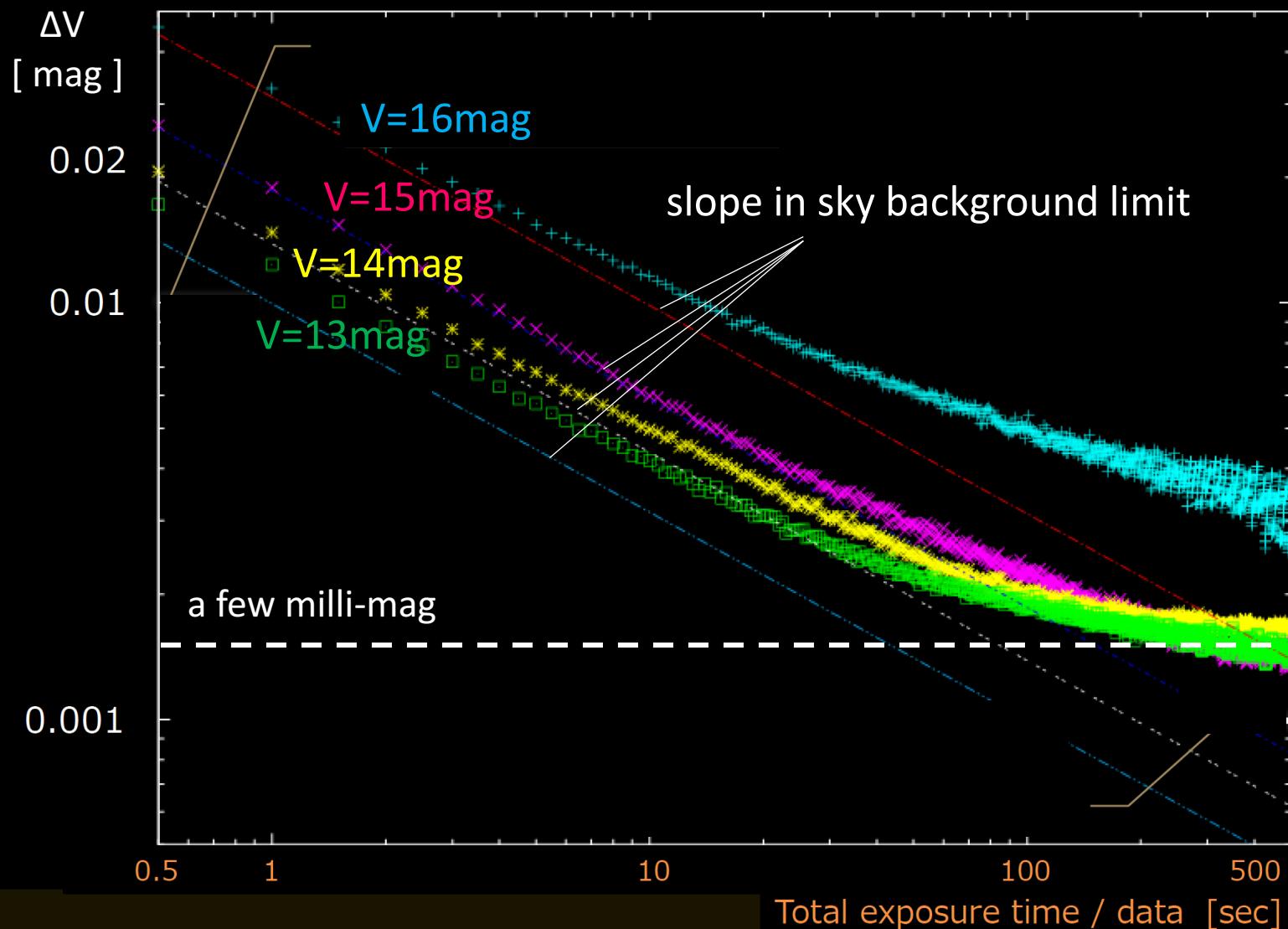
## Light curves



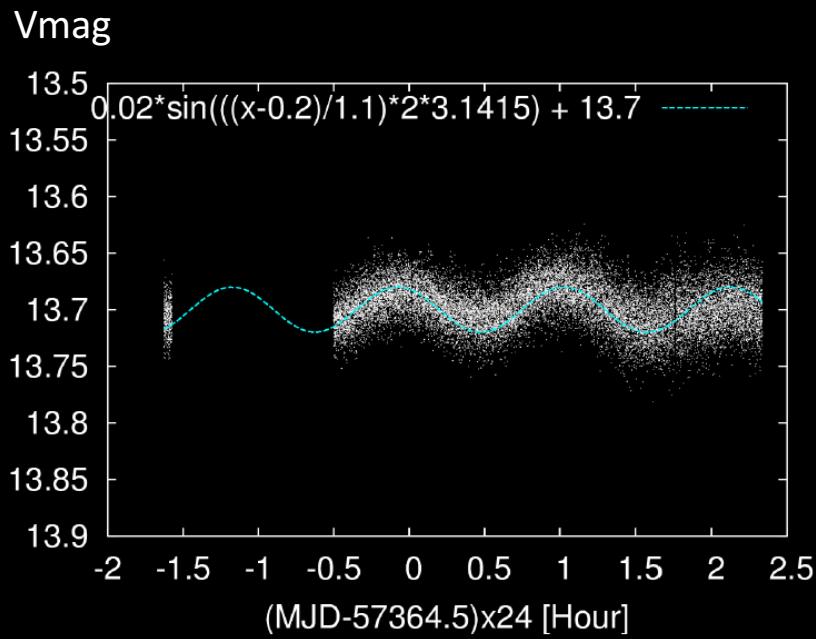
Relative  
photometry



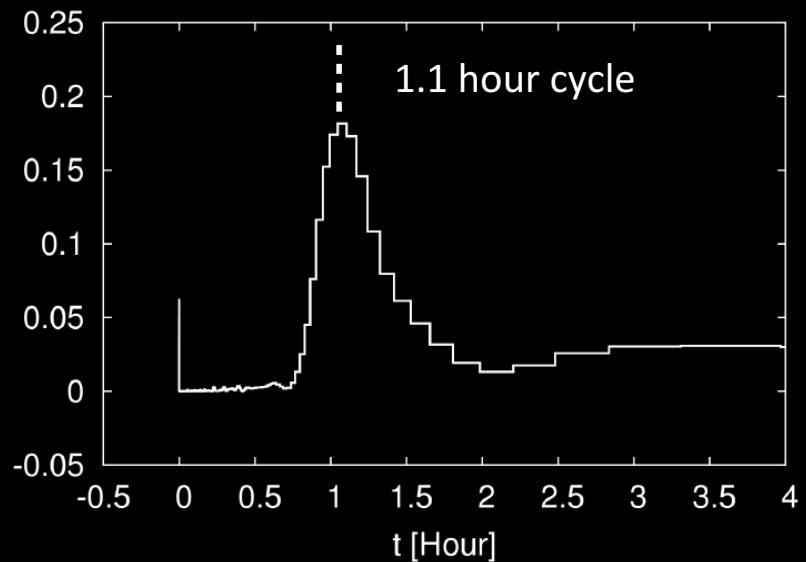
# Limitation of Photometric Accuracy



# Detection of short time scale variable stars with 2 % amplitude



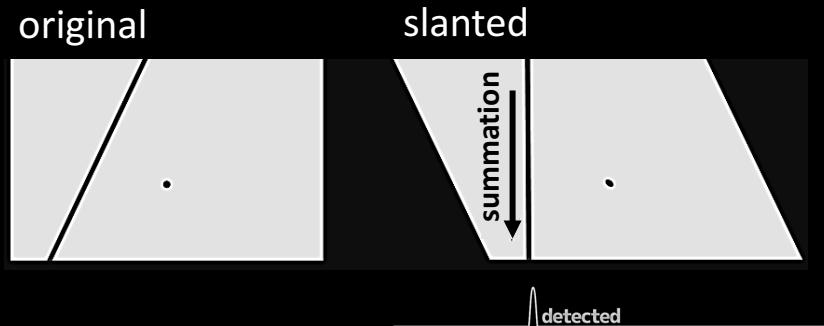
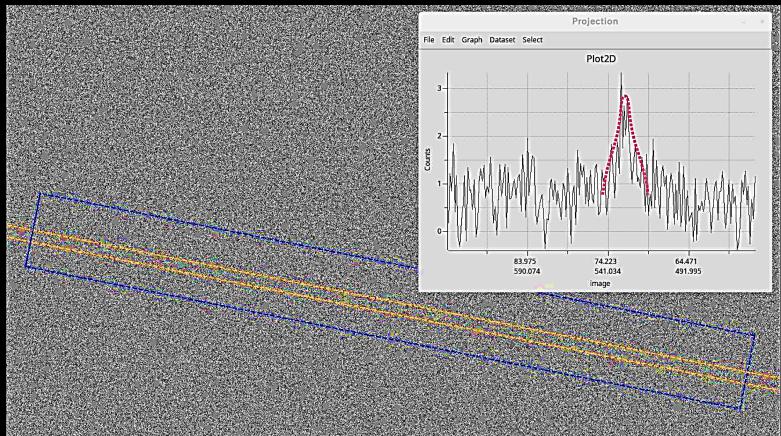
Power of brightness



- possible  $\delta$  Scuti type pulsing star

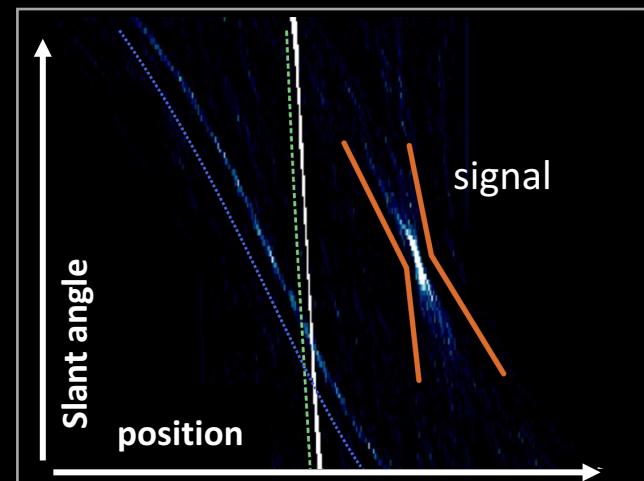
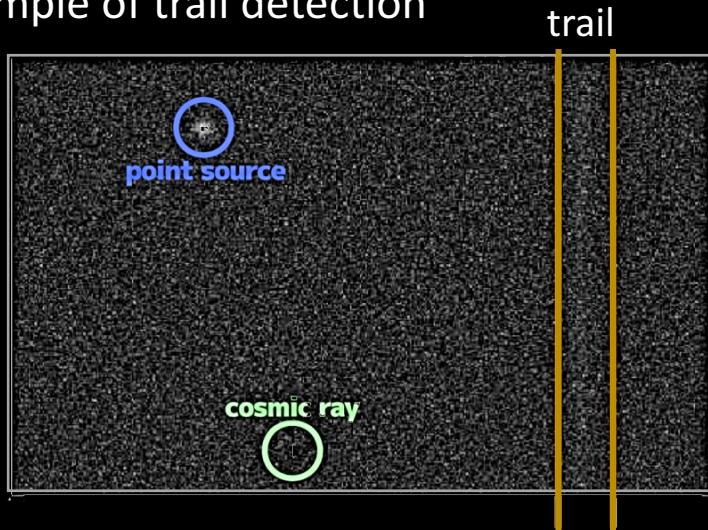
# Study on detection method of faint meteors

- Faint sporadic meteors, 2Hz, full-frame



Detection method for faint trails

- Example of trail detection



Sporadic meteors of > 5,000 events/night detected

# Faint meteors

CONFIDENTIAL



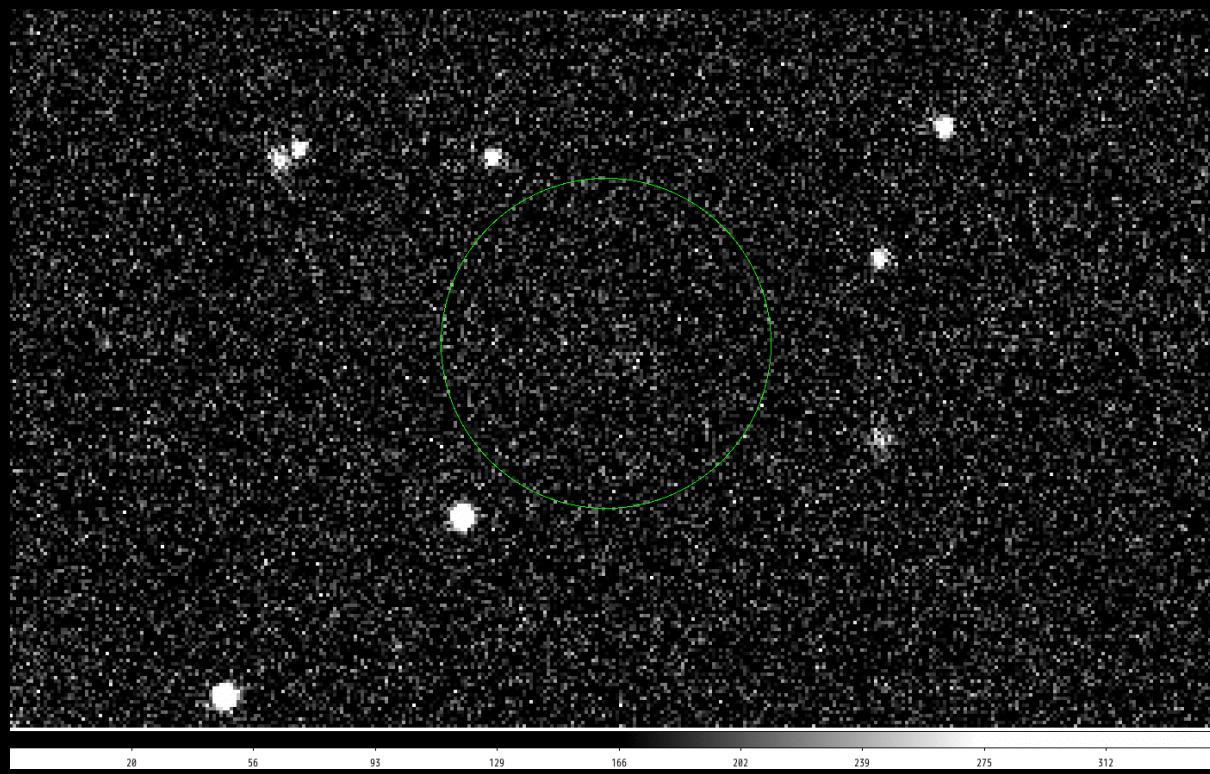
Trail of faint meteor

- Faint meteors up to 14 mag detected. (> 9 mag in previous study)
- About 1,000 events of sporadic meteors detected in a night (World record).

**CONFIDENTIAL**

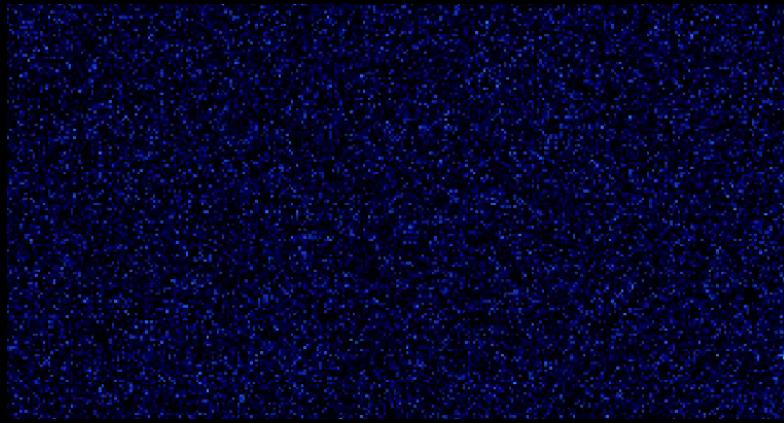
# Flash

- Unidentified Flashing Objects detected in frames taken in 2-fps

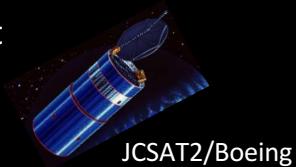


検出フレーム前後をくりかえし再生

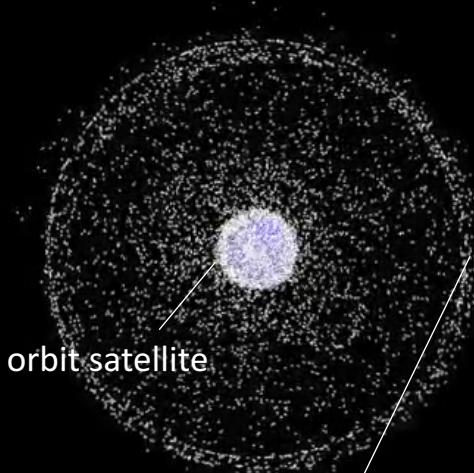
# Contamination of Artificial stellar objects



Example of flashing and moving object  
Geostationary orbit satellite JCSAT2  
30<sup>th</sup> Nov. 2015, 10 fps



JCSAT2/Boeing

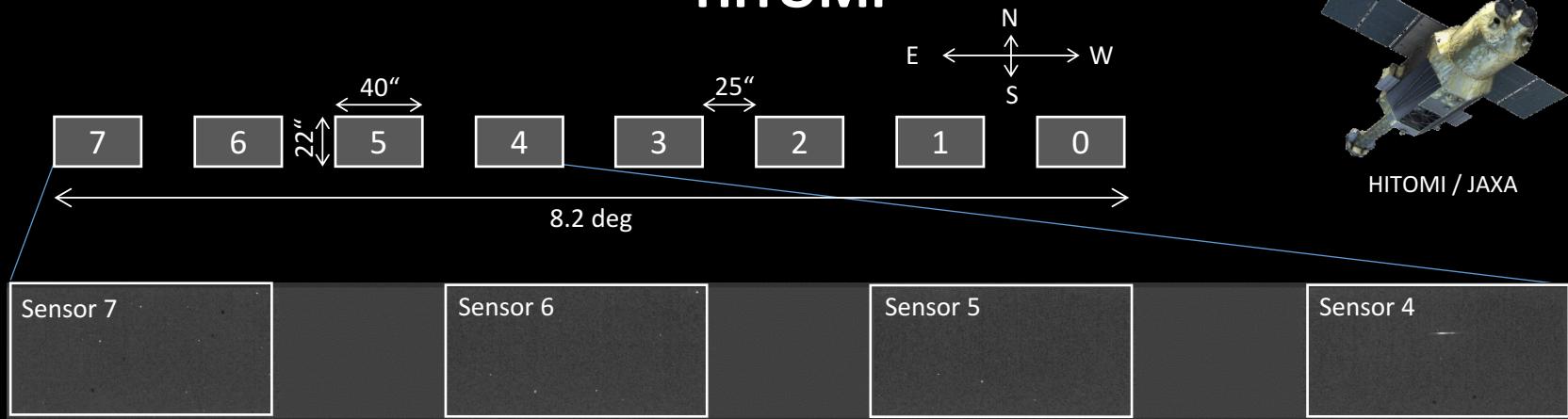


YouTube

Geostationary orbit satellite, 32,000 km

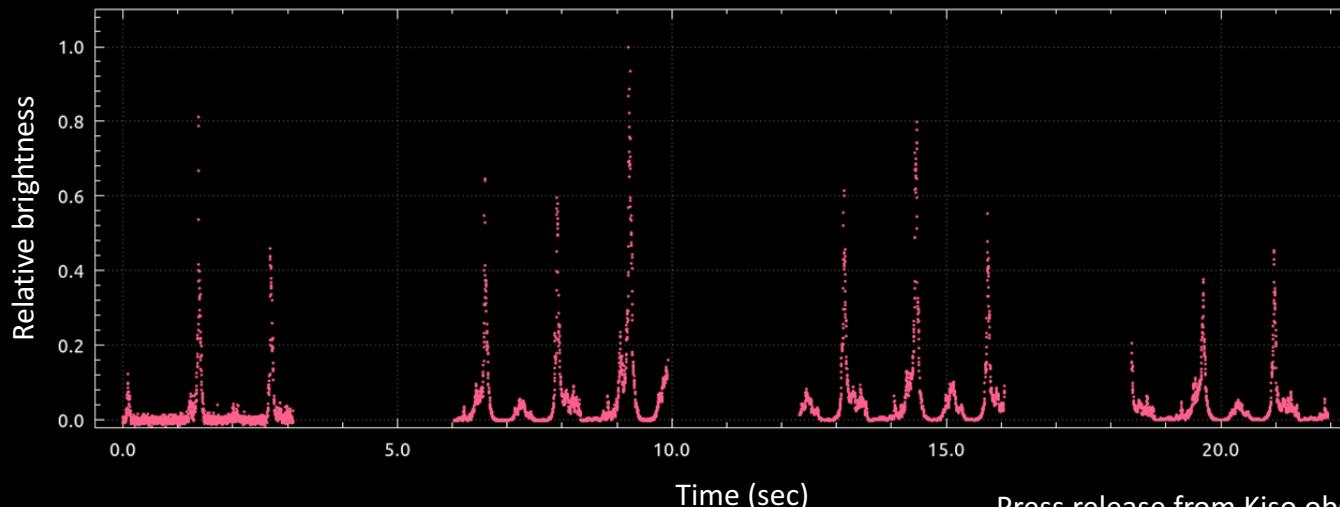
- Space debris with  $\phi 10$  mm on the geostationary orbit can be detected.
- Rotating debris are observed as “flash phenome”. → **Serious problem!!**

# Ground based observation of X-ray space telescope HITOMI



2 fps, 50 sec starting from 20:24:08 31<sup>st</sup> Mar. 2016

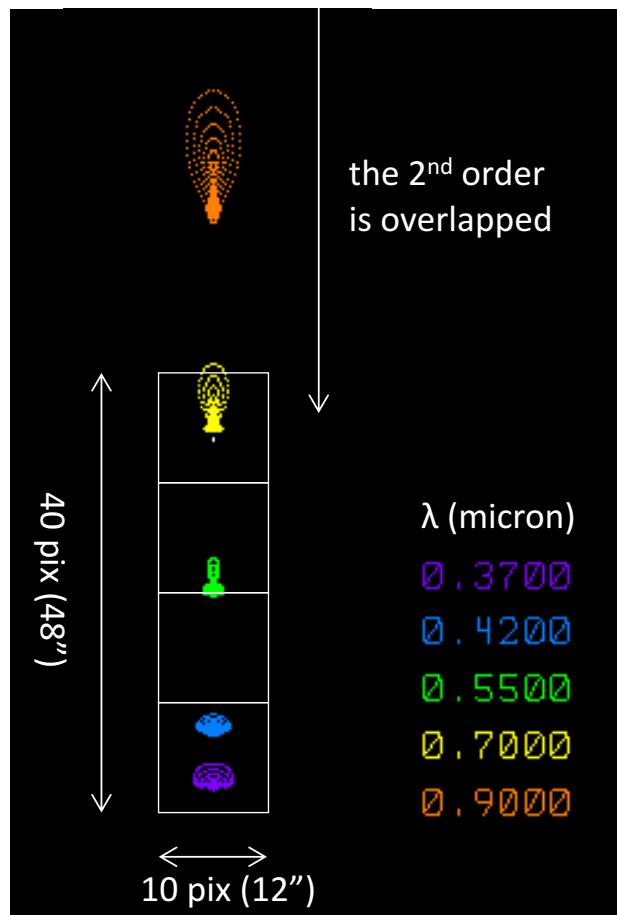
- Light curve



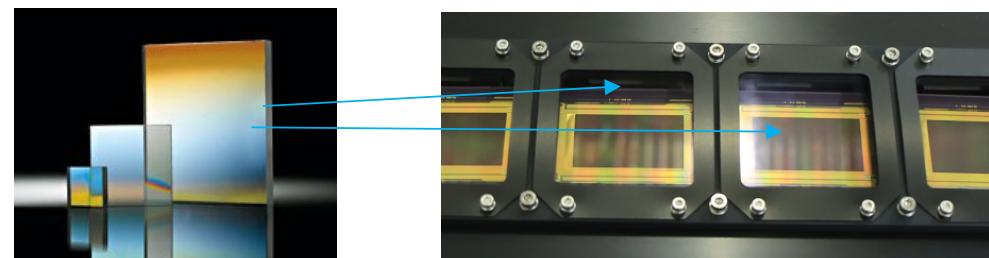
Press release from Kiso observatory, U. of Tokyo  
Used in press releases at JAXA  
Reported in NHK news and major news papers

## グリズム分光モード（DET#4にのみ搭載）

Spectrum of the 1<sup>st</sup> order

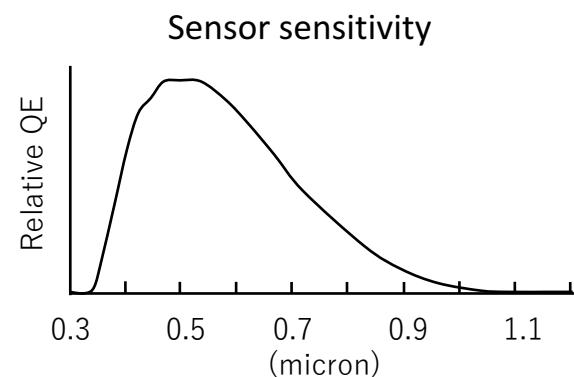


Transmission Diffraction Grating (2 pieces purchased)



The gratings can be exchanged to the windows

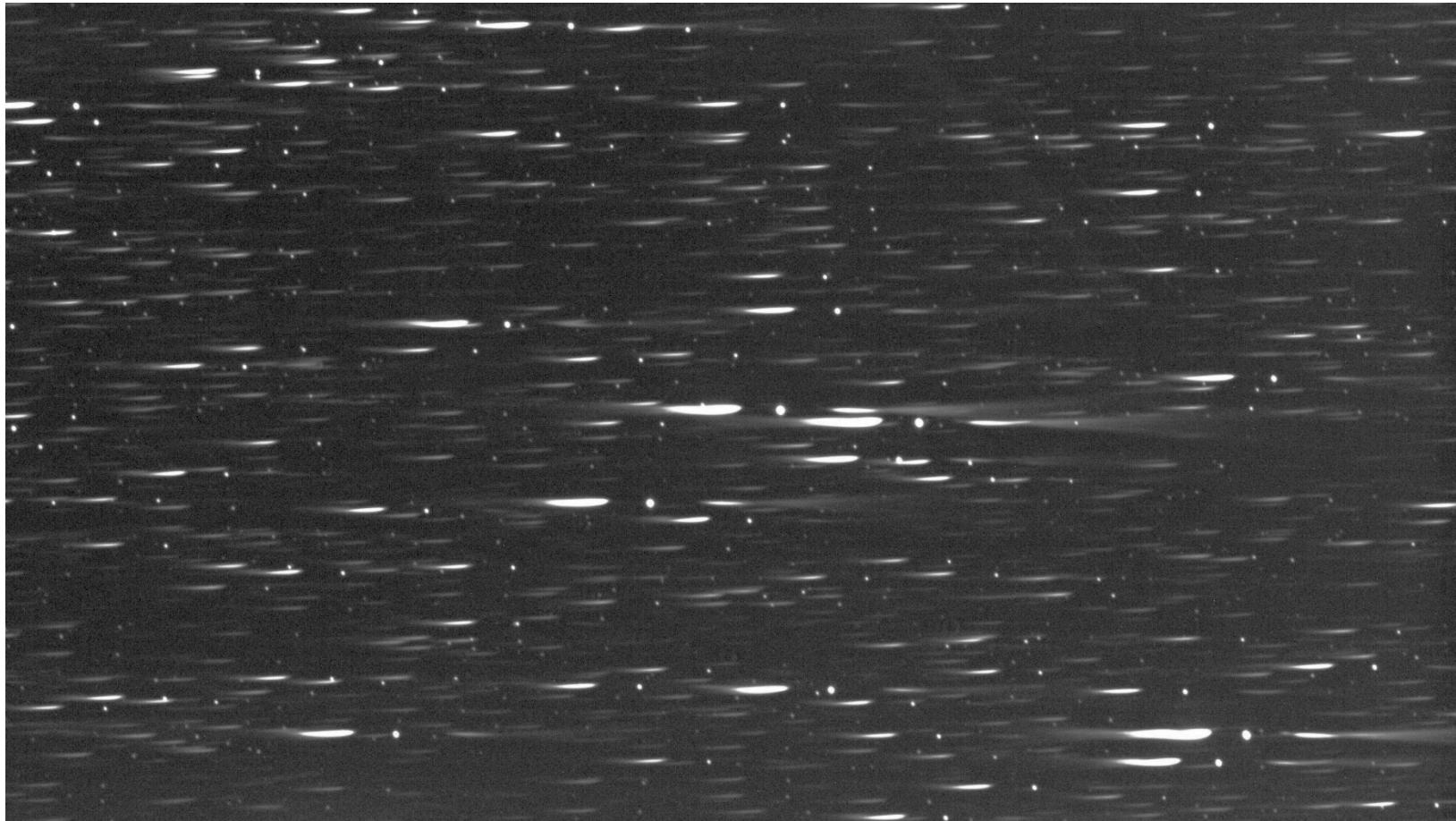
- Edmund #49-583
- 50mm x 50mm x t=3mm
- B270, 300 grooves/mm



- A Spot of the zeroth order is also focused on the detector.
- Spectral resolution is  $\sim 10$ .
- Set the dispersion direction to the RA direction

**CONFIDENTIAL**

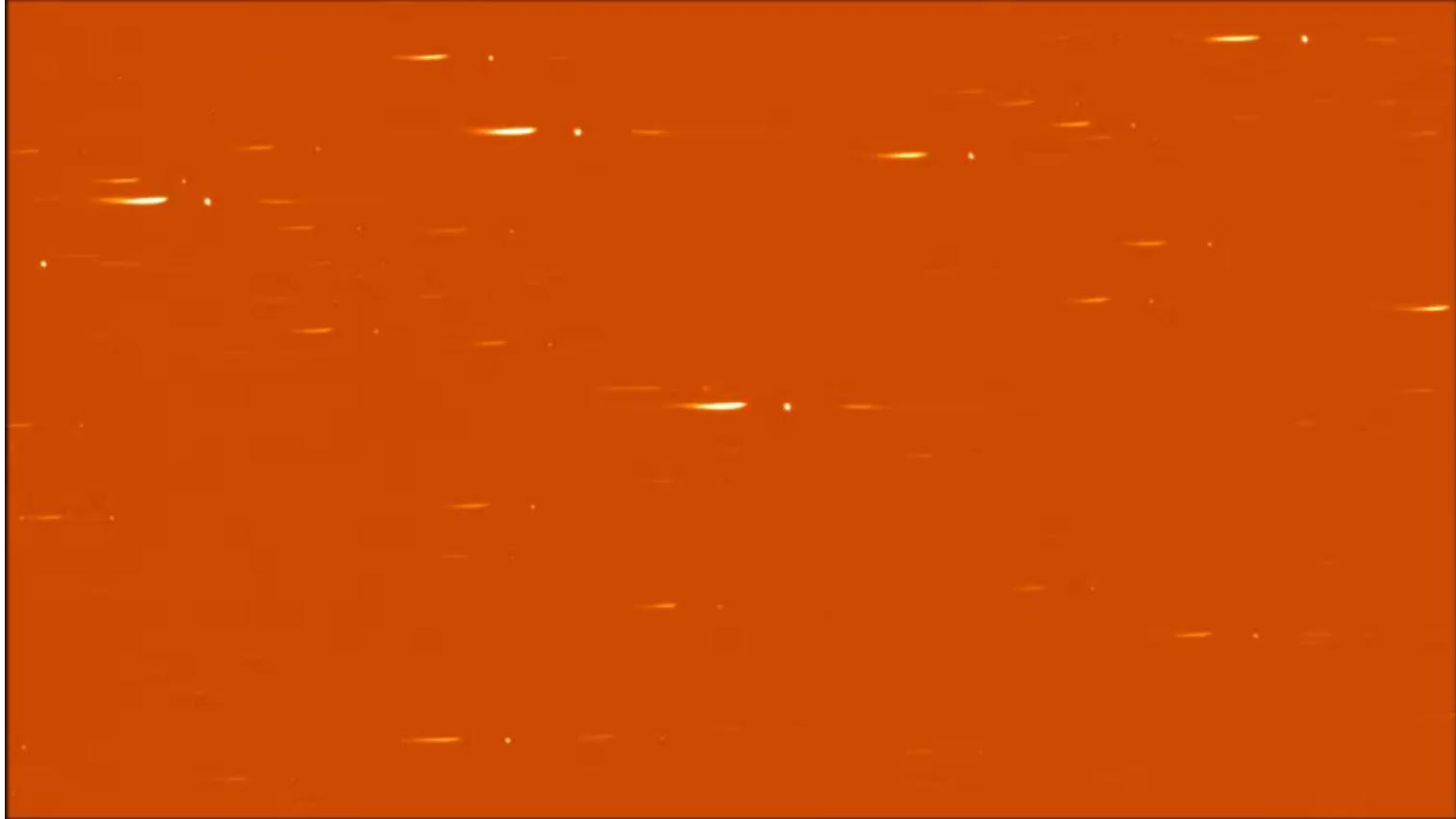
# Tomo-e PMのグリズム分光



field stars  
120 sec coadd

**CONFIDENTIAL**

# Tomo-e PMのグリズム分光の動画

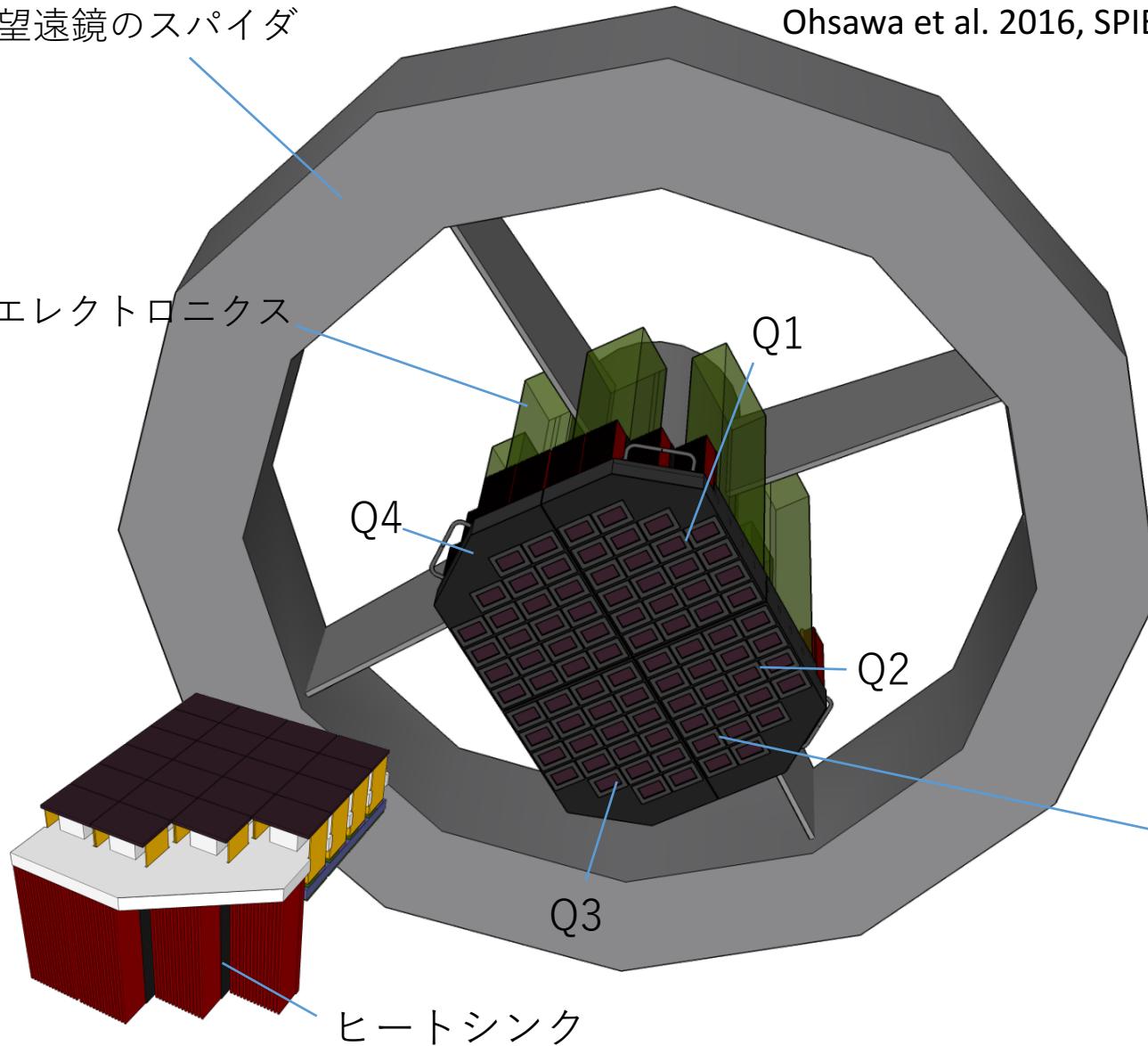


## アウトライン

1. 東京大学木曾観測所
2. Tomo-e Gozen計画
3. 試験データ
- 4. 開発状況**
5. 提案サイエンス
6. 全天サーベイと京大3.8mとの連携

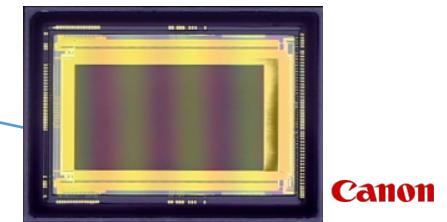
# 超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen 実機

木曽1m広視野シュミット  
望遠鏡のスパイダ



Sako et al. 2016, SPIE  
Ohsawa et al. 2016, SPIE

- 20 平方度
- 最大2 Hz
- 常温・常圧
- 自然空冷
- 駆動部無し
- 軽量・安定
- 動画ビッグデータ
- 最大30 TB/夜



CMOSセンサ x84  
常温駆動・低ノイズ

# 開発体制と近況

- CMOSセンサ 18/84台納入
- 読み出し回路 試作完了
- カメラ筐体 Q0製作中
- 光学系 Q0製作中
- 望遠鏡 ネットワーク高速化 (所内10Gbps, 外部1Gbps)  
光ファイバ設置中
- 解析システム 計算機構築中

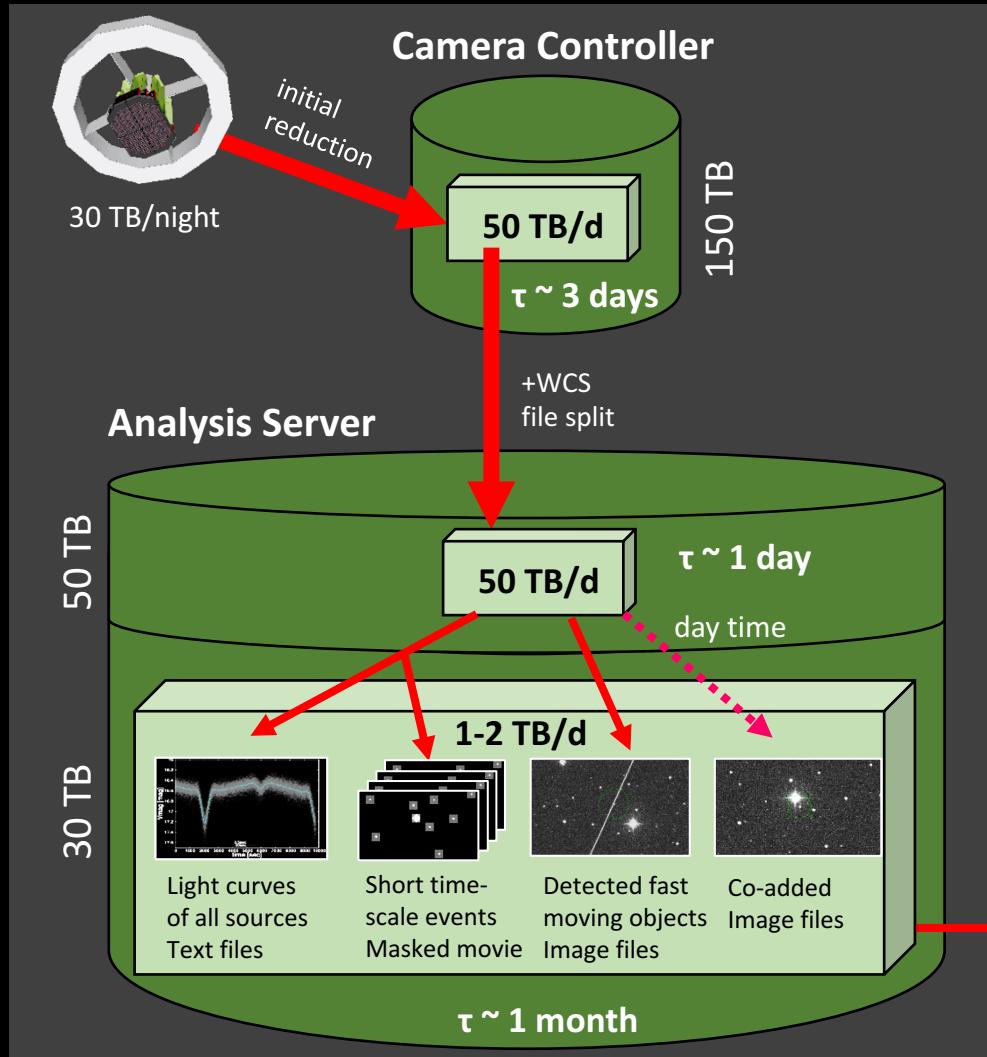


国立天文台先端技術センターにて  
製作中のカメラ筐体

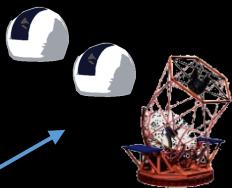
# Data flow for 1-night data

## KISO OBSERVATORY

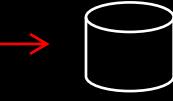
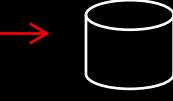
### Telescope building



Telescopes  
around the world



京都3.8m



Servers on  
external site

External DB

copy  
every  
month

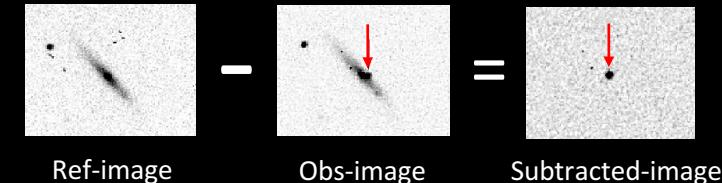
# 情報数理学分野との連携

- **Machine learning**

*Collaborator: Wide-field survey team/CREST (PI Prof. Yoshida)*

- Source detection
- Classification

Supernova on parent galaxy



- **Sparse modeling**

*Collaborator: Prof. Ikeda, Dr. Morii @ CREST, ISM*

- Flash detection
- Movie compression

GoDec method

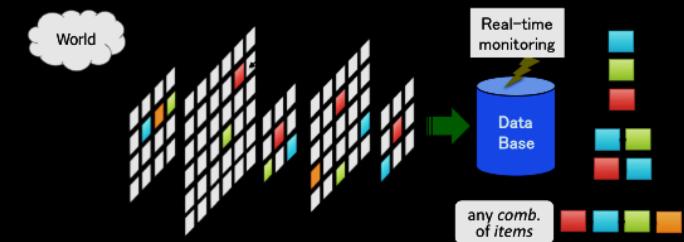


<https://www.youtube.com/watch?v=BTrbow8u4Cw>

- **Data mining / compression**

*Collaborator: Dr. Yamamoto @ PREST, Yamanashi U.*

- Source detection
- Fast computation



# 開発体制、地元との連携・教育

- 長野県木曽町の「巴ちゃん」とコラボレーション
- 木曽町のアピールに貢献



## アウトライン

1. 東京大学木曾観測所
2. Tomo-e Gozen計画
3. 試験データ
4. 開発状況
- 5. 提案サイエンス**
6. 全天サーベイと京大3.8mとの連携

# 科研費基盤A

「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」

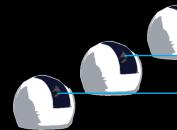
研究代表 諸隈智貴（東京大学天文学教育研究センター）

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。

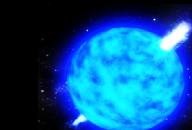
- 3,000平方度を30分間で繰り返し監視
- 過去に例の無い高頻度監視
- 年間1,000件の超新星の検出が見込まれる
- 50件の爆発直後の超新星を観測



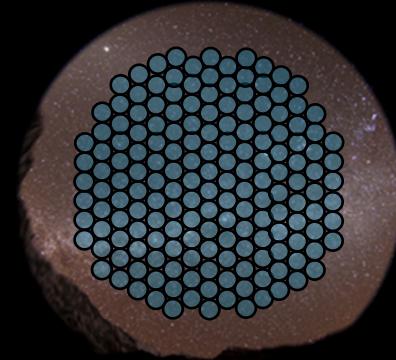
アラート



世界各地の望遠鏡で追観測



重力崩壊型超新星



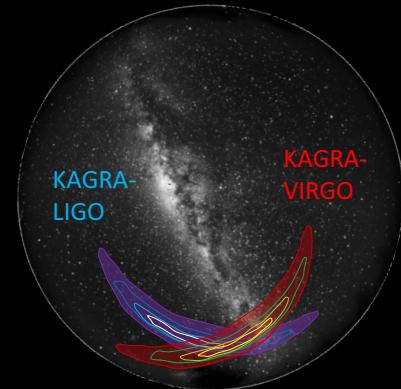
全天探査 (3,000平方度)  
170ポインティング  
検出限界18等級

# 科研費基盤S

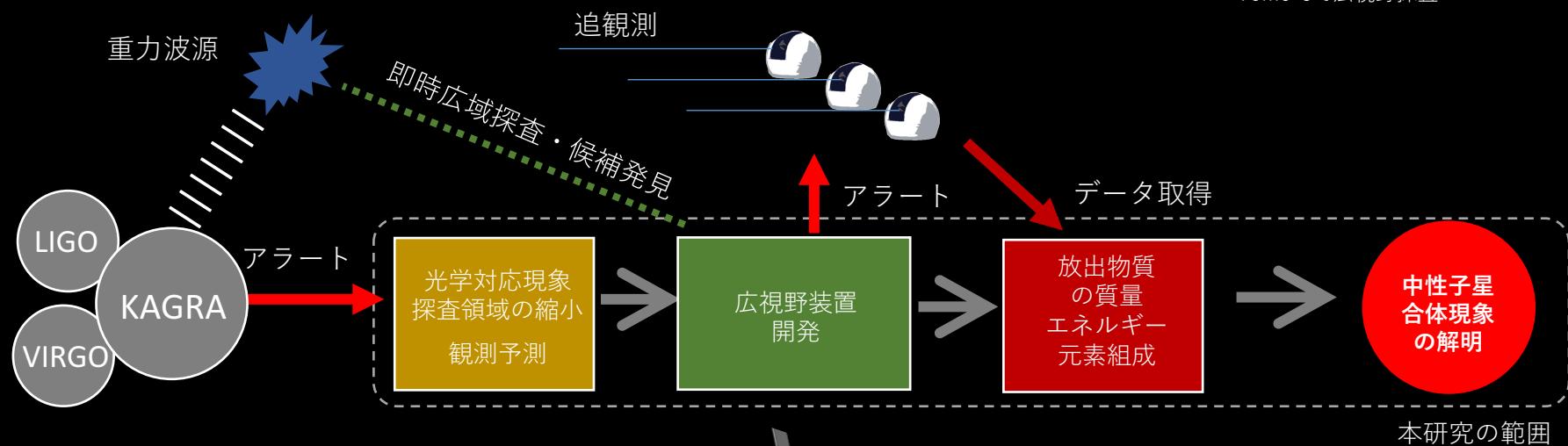
「高速掃天観測による連星中性子星合体現象の研究」

研究代表 茂山俊和（東京大学ビッグバンセンター）

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、中性子星合体現象の解明をめざす。

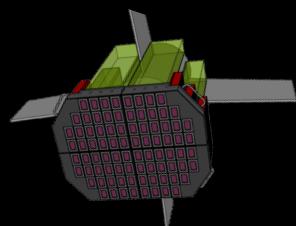


KAGRAで到來方向を限定  
Tomo-eで広視野探査



重力波望遠鏡KAGRA

+



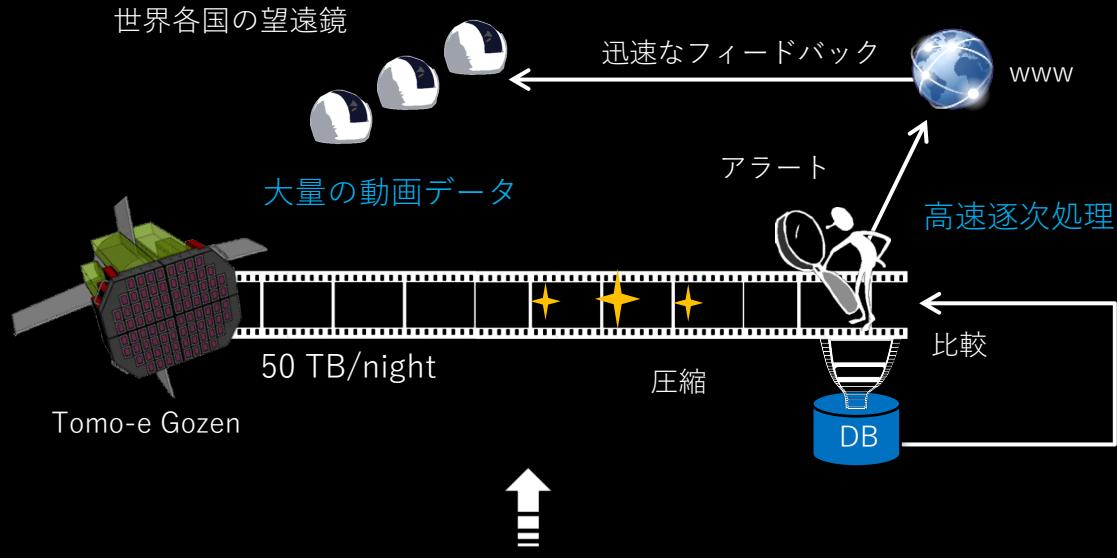
超広視野高速カメラ  
Tomo-e Gozen

# さきがけ（ビッグデータ領域）

「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（東京大学天文学教育研究センター）

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



天文学



高エネルギー物理



地震学



生物学



航空工学



船舶工学



宇宙工学



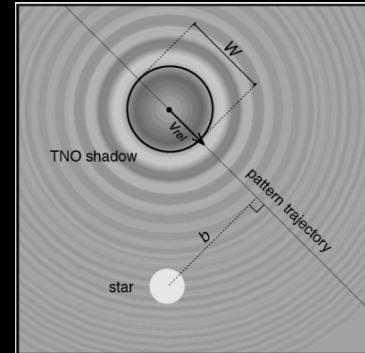
スペースガード

# 科研費基盤A

## 「広視野高速カメラによる太陽系外縁天体の探査」

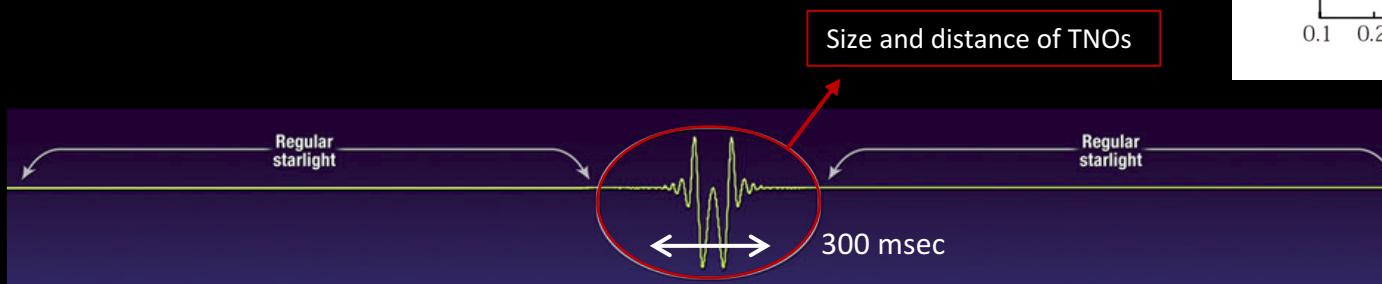
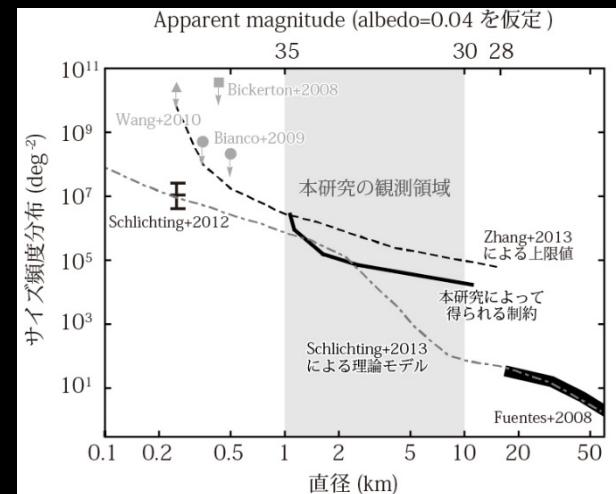
研究代表 渡部潤一（国立天文台）

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

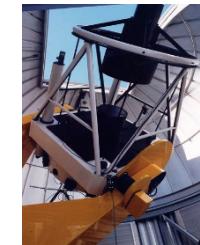


申請書より

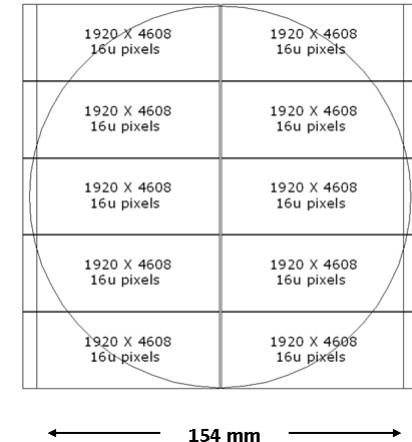
# TAOS IIによる高頻度掩蔽観測

## TAOS II project

- 1.3-m f/4 telescope (FoV 2.3 deg<sup>2</sup>) × 3
- Baja California, Mexico
- 2k × 4k backside CMOS × 10 chips
- 10,000 stars at 20 Hz
- Partial readout of 7 pix × 7pix
- 1,000 stars/chip
- Simultaneous observations with 3 telescopes



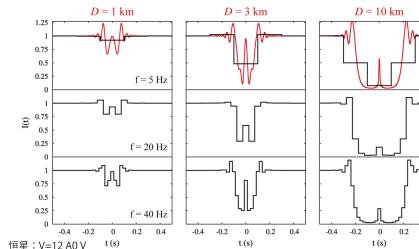
- 望遠鏡はready
- センサは今月から納品
- システムの開発は遅れている



## Tomo-e実機で掩蔽

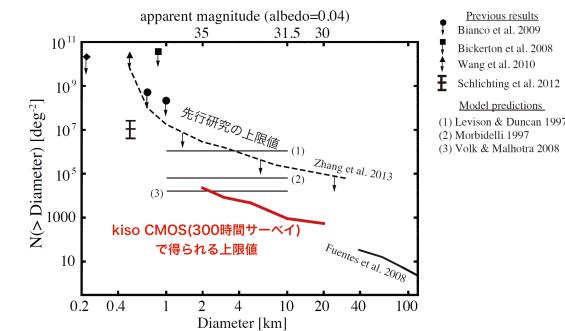
## Tomoe project

- Kiso 1.0-m Schmidt telescope (FoV 20 deg<sup>2</sup>) × 1
- 1k × 2k front side CMOS × 84 chips
- 8,400 stars at 10 Hz
- Partial readout (~3 deg<sup>2</sup>)
- 100 stars/chip
- 1 event/100 hours @event rate = 10<sup>-2</sup>



2014/6/4 Tomoe検討会（臼井）より

- TAOS IIが遅れているので、初期にやってしまうべき
- 100 hoursはなかなか大変。星の数をふやせないか？



2014/7/23 Tomoe検討会（有松）より

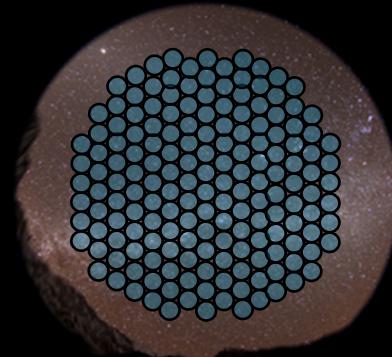
## アウトライン

1. 東京大学木曾観測所
2. Tomo-e Gozen計画
3. 試験データ
4. 開発状況
5. 提案サイエンス
6. 全天サーベイと京大3.8mとの連携

# Tomo-e Gozenによる大規模サーベイ（検討中）

- 超新星全天サーベイ（基盤A, PI 諸隈）

- 10,000平方度を2時間で繰り返し監視（no-filter）
- 18等級までのすべてのイベントを記録
- 年間1,000件の超新星の検出が見込まれる
- 5件の爆発直後の超新星を観測



全天探査 (10,000平方度)  
500ポインティング

- 視野固定の高頻度サーベイ

- 2–20 fps
- 20–2平方度
- 太陽系外縁小天体の掩蔽（基盤A, PI渡部）
- フラッシュ探査

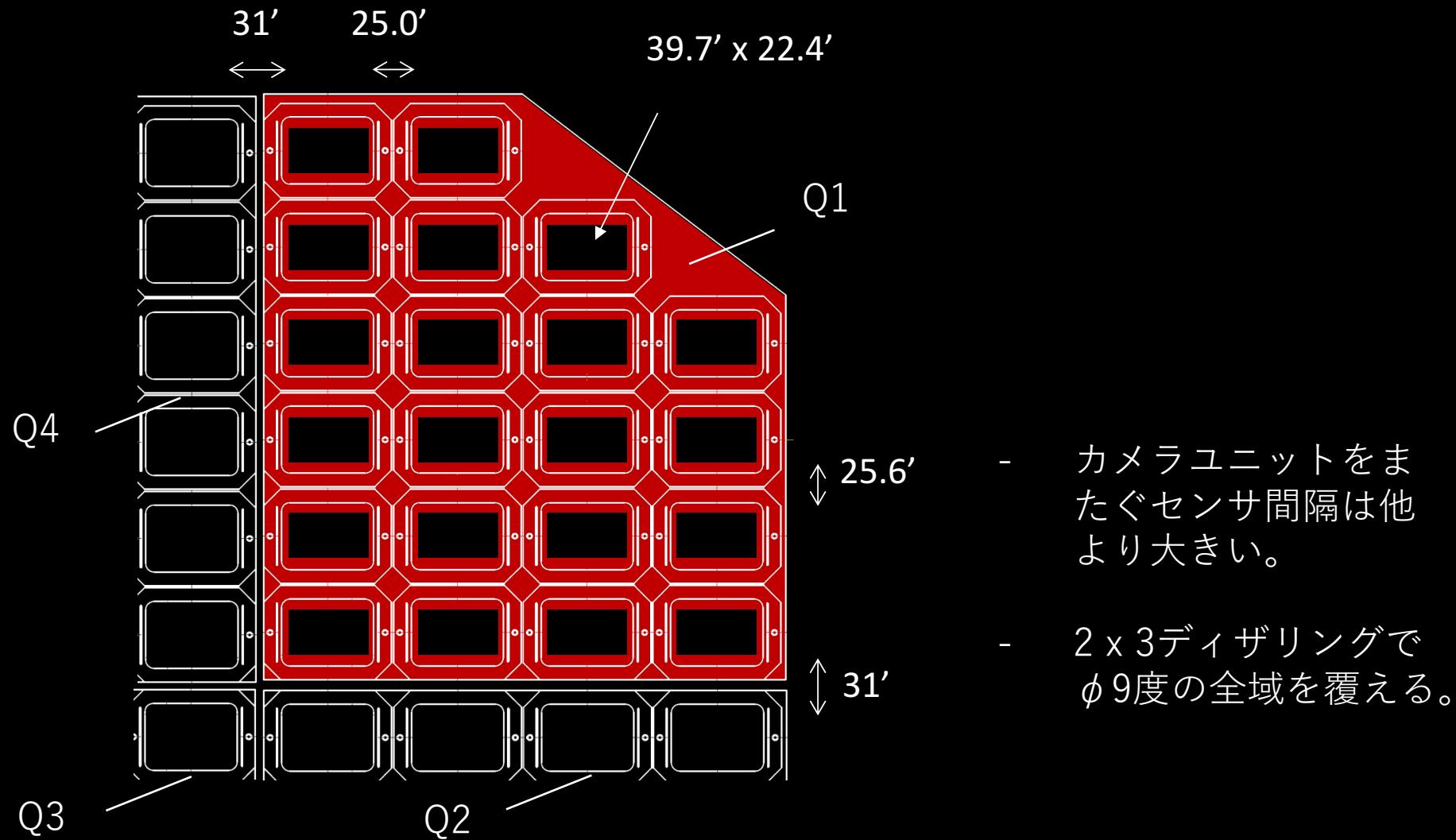
- 追観測・同時観測

- 重力波可視対応天体の追観測（基盤S, PI茂山）
- FRB可視対応天体の電波同時観測
- パルサーの電波同時観測
- 流星の電波同時観測

- こんなサーベイができるかも

- 高頻度銀河面サーベイ
- 高頻度黄道面サーベイ
- 高頻度星形成領域サーベイ
- スペースデブリサーベイ

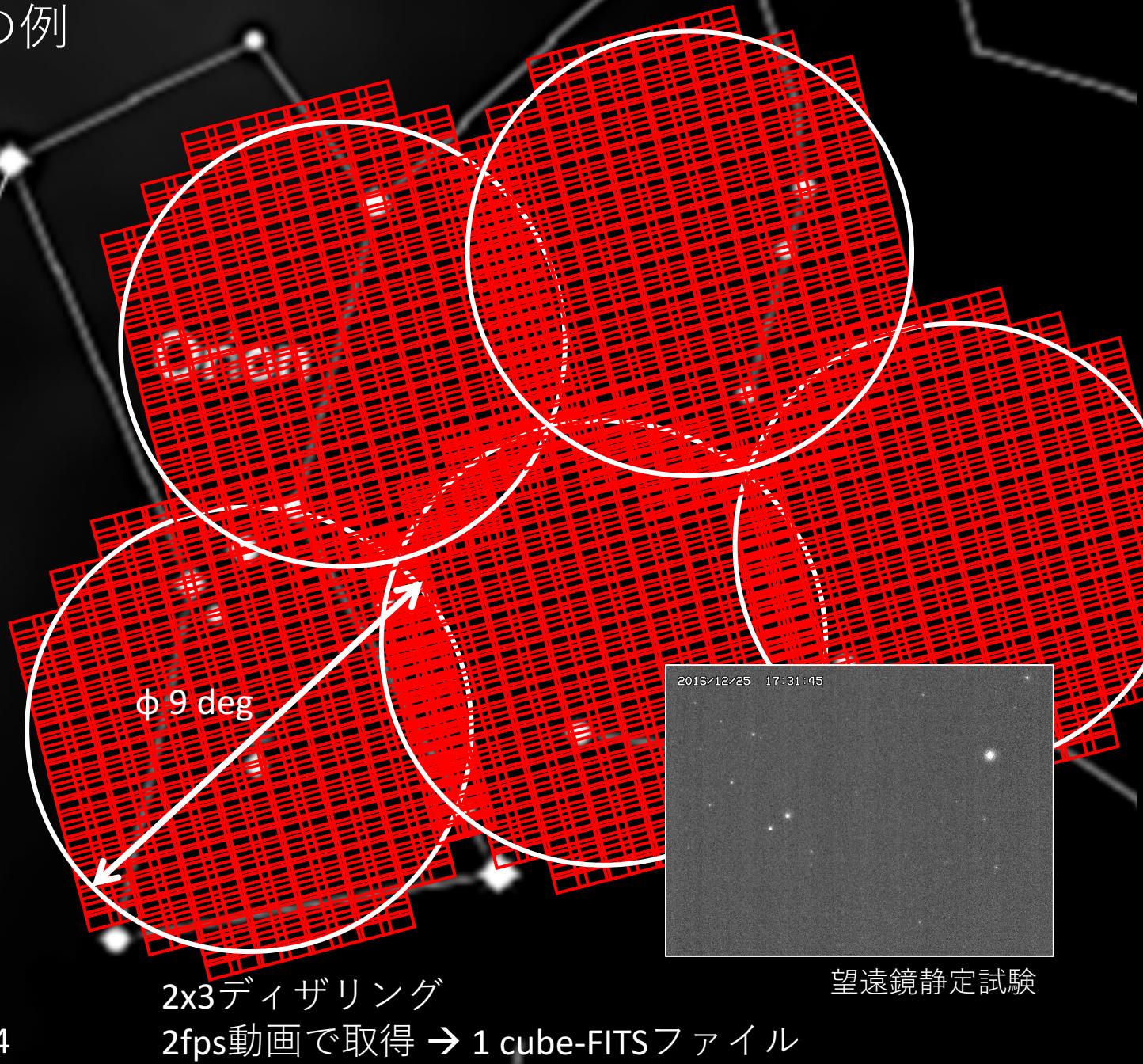
# センサの配置とプレートスケール



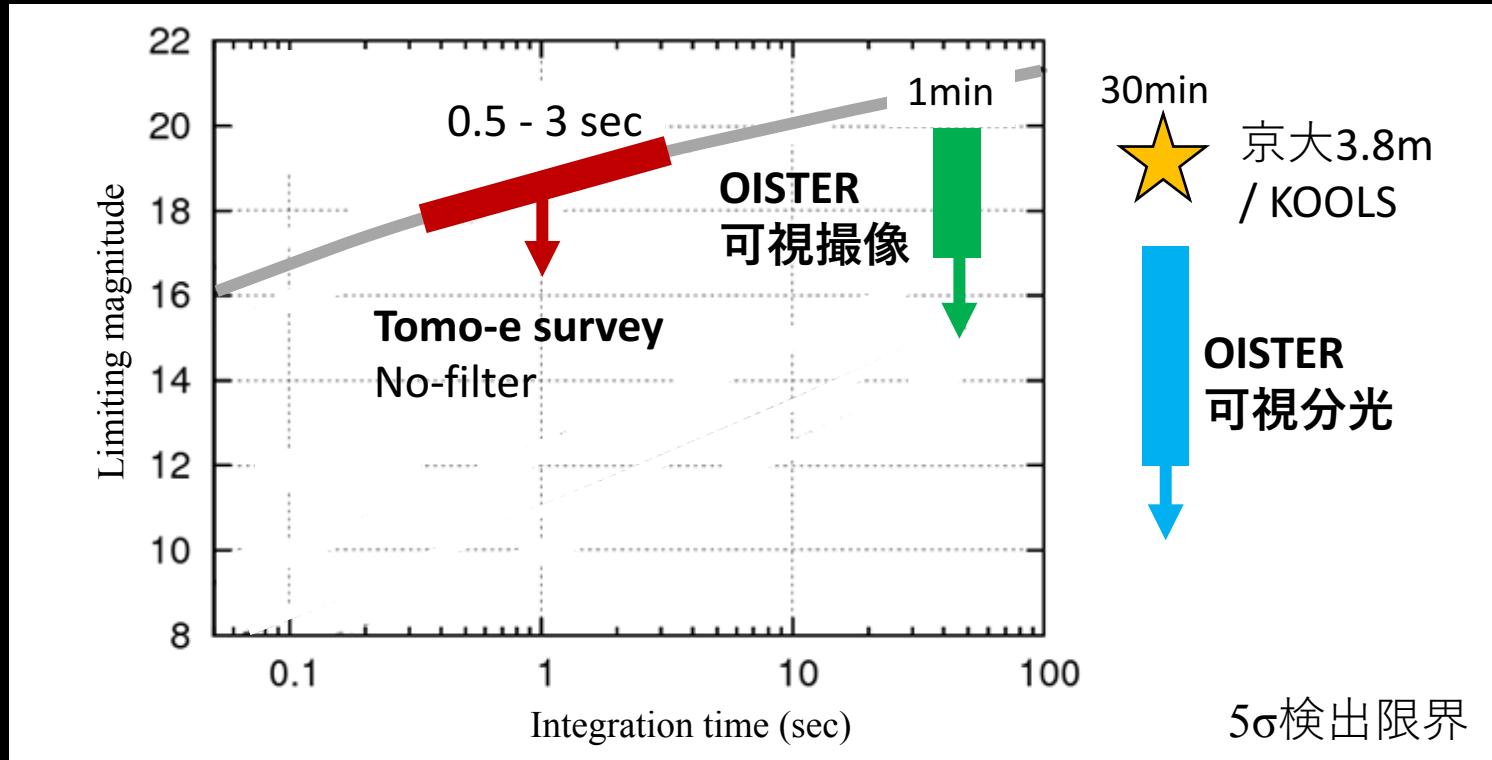
# 全天サーベイの例



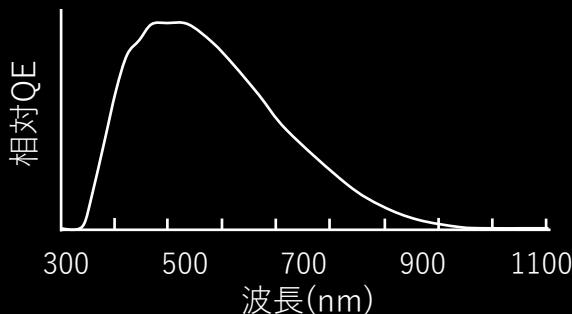
cube-FITS x 84



# Tomo-eの検出限界等級



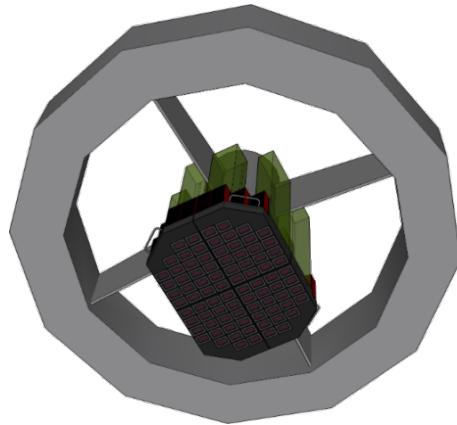
Tomo-e 波長感度特性



積分時間 (秒)	限界等級 (等級, 5σ)	飽和等級 (等級)
0.1	16.8	8.4
1	18.7	11.0
10	20.0	13.4
100	21.3	16.0

最終日の討論にむけて

# 最終日の討論にむけて



- 京大3.8mとの連携の方法
- フィルタセット（初期はNo-filter）
- データ解析の体制強化

## 付録： CMOSセンサと天文学

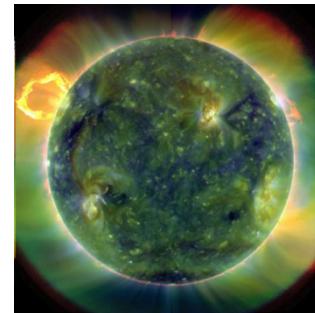
# 天文学におけるCMOSセンサの利用

mainly used in high-speed observations & measurements

- Wave front sensor for AO

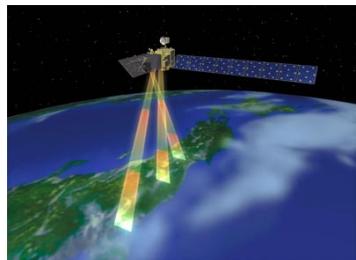


- for Solar observations



mounted on  
Solar-C satellite

- for Earth observations

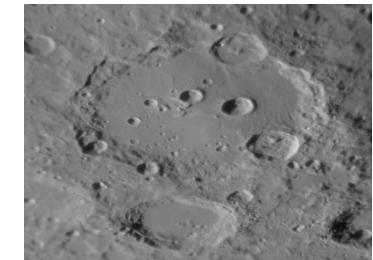


used as scanner  
sensor

- for Lucky imaging observations



movie

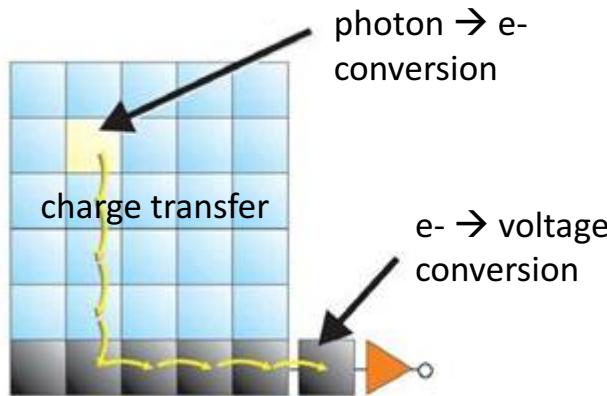


processed image

# CCDとCMOSセンサの比較

## CCD

Charge coupled device



○ Large format (< 6k x 6k)

△ Slow readout (>10sec)

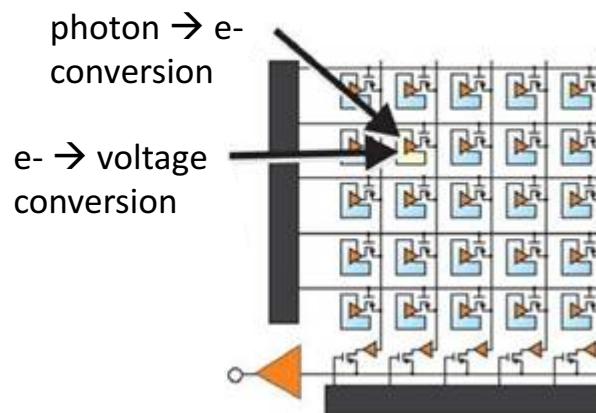
global shutter only

○ Simple structure

△ High voltages necessary

○ Backside and full-depletion  
technologies established

## CMOS



Commercial video format

8K UHD

4K UHD

1080p HD

SD

switching

○ Large format (< 8k x 8k for commercial use)

○ Fast readout (>0.1sec)

Rolling shutter available

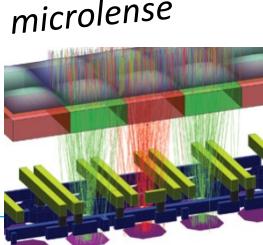
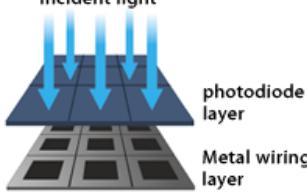
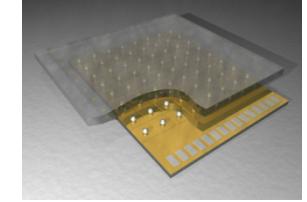
○ Embedded functional circuits

○ Low voltages & low power

△ Backside and full-depletion (hybrid structure)

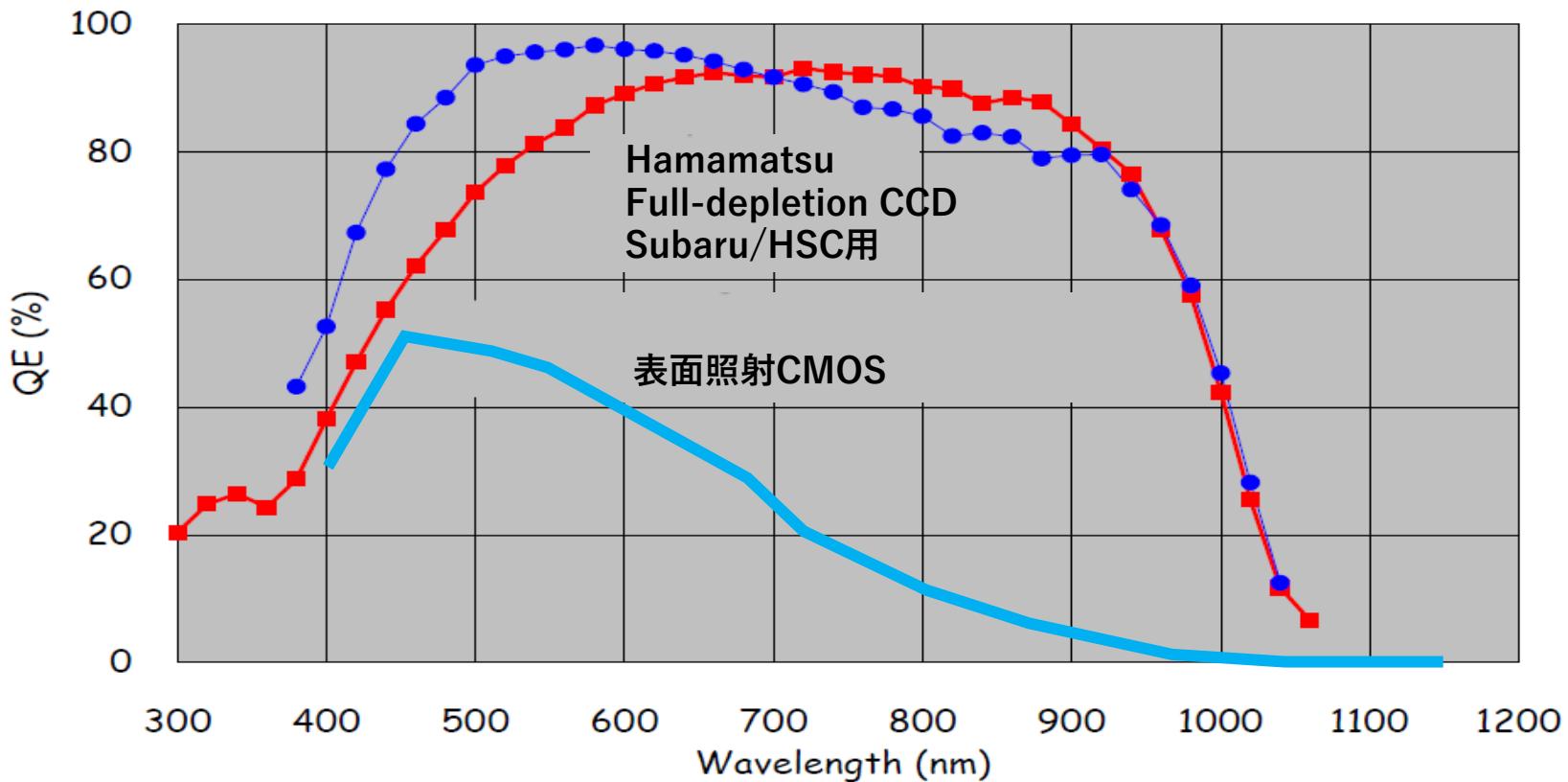
technologies under development

# CMOSセンサの種類

	Monolithic		Hybrid
Structure	Front-side	Back-side	Back-side
<i>QE</i>	 microlens Incident light Metal wiring layer photodiode layer	 Incident light photodiode layer Metal wiring layer	
<i>Spectral response</i>	Visible	95%	UV to NIR full-depletion
<i>Dark current</i> @300K	< 10 pA/cm <sup>2</sup>		5 – 10 nA/cm <sup>2</sup>
<i>Read noise</i>	2 – 3 e-		7 – 10 e-
<i>Process</i>	conventional	+thinning	+hybrid process
<i>Cost</i>	\$	\$\$\$	\$\$\$\$\$

# 量子効率の比較

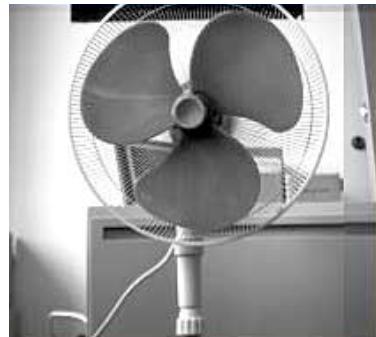
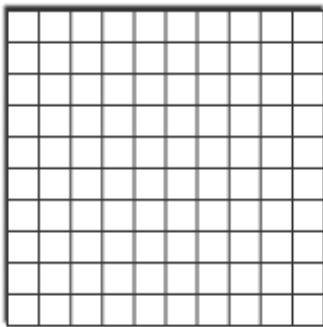
- 波長感度特性



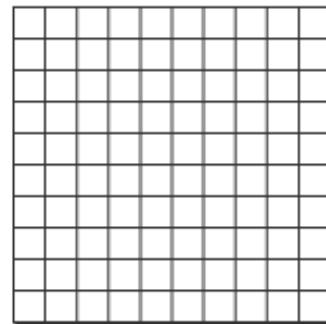
# CMOSセンサのローリング読み出し

- ✓ Mechanical shutter not required
- ✓ Electric shutter available

Global shutter mode



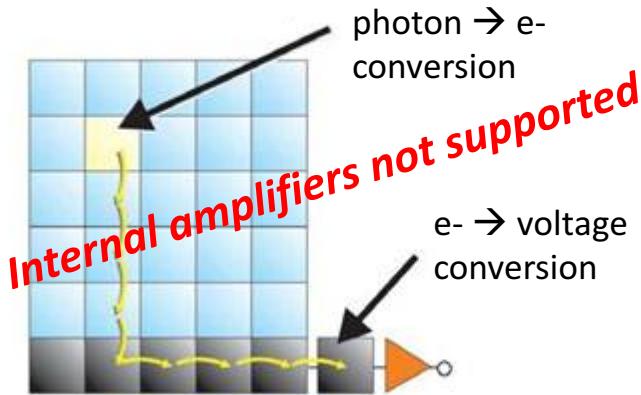
Rolling shutter mode



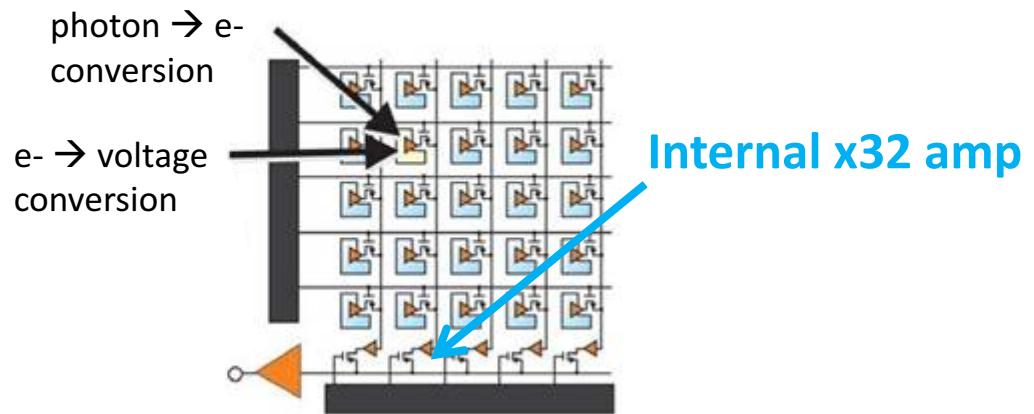
- Simultaneous exposure
- Dead time for readout
- None-simultaneous exposure
- **No dead time for readout**

# CMOSセンサの内部機能

## CCD



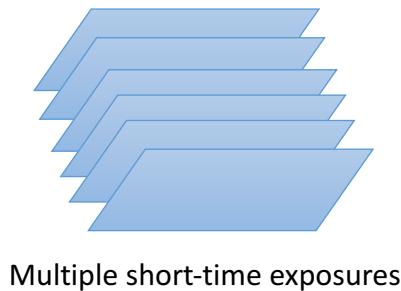
## CMOS



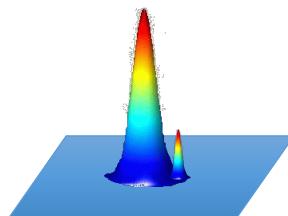
- ✓ Embedded internal amplifiers available
- ✓ Readout noise limited at unit-cell & PD → **Low readout noise**  
2 – 3 e- @high-speed readout
- ✓ Internal frequency filters, ADC, etc. available

# その他のアドバンテージ

## ✓ High dynamic range

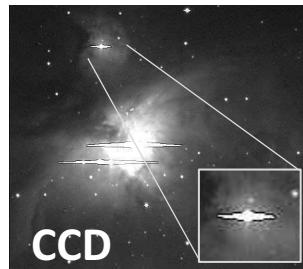


coadd  
→



**Effective dynamic range  
drastically increased**

Example of high-dynamic range image



CCD

30 sec x 1 frm

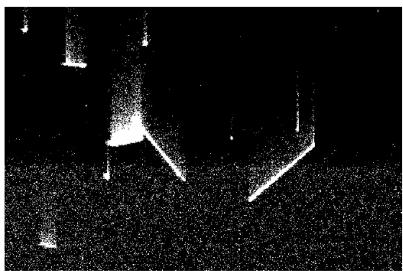


CMOS

1/30sec x 1,000 frms

## ✓ High resistance to radiation

Cosmic radiation degradation of **CCD**



Y. Kobayashi et al. 2012, SPIE

Cosmic radiation disrupts sites in the crystal lattice

→ higher dark current & greater probability of trapping photogenerated charge.

In **CMOS** sensor,  
Photogenerated charges are readout immediately from each pixel



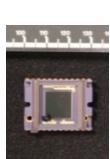
**High resistance to radiation**

# CMOSセンサの時代は到来するのか？



< 1980

Photo-plate  
360 x 360mm



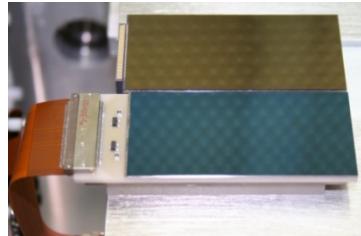
1990

1k x 1k, 12um  
12 x 12 mm



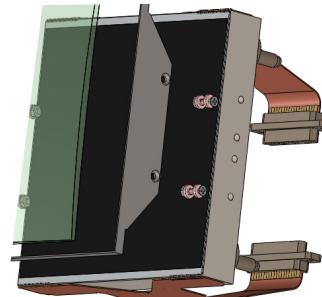
1995

2k x 2k, 24um  
48 x 48 mm



2000

4k x 2k, 15um/pix  
61 x 30mm  
4-side battable



2010

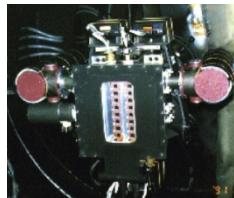
6k x 6k, 15um/pix  
90 x 90mm  
4-side battable



2020, LSST  
4k x 4k x 200!!



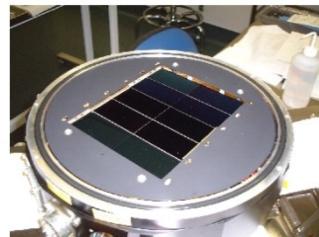
**history of sensor = history of CCD**



1991, Kiso  
1k x 1k x 16



1994, Kiso  
1k x 1k x 40



2000, Subaru  
2k x 4k x 10



2012, Subaru  
2k x 4k x 104

感度重視の天文学では現在でもCCDが圧倒的なシェア

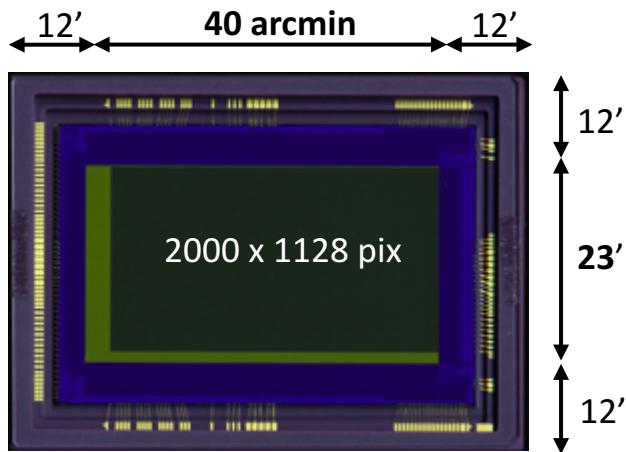
次の10年もCCDの時代なのか？それともCMOSの時代が来るのか？

# 高速観測ではCMOSセンサが有利

— CMOSの躍進は確実 —

	これまで	これから
<b>■ 高感度高速観測</b> ~30Hz, FoV=1arcmin <sup>2</sup>	<b>APD</b> 2次キャリア生成  <b>EM-CCD</b> 2次キャリア生成	<b>sCMOS</b> 超低ノイズCMOS   Andor社 sCMOS, Neo 2kx2k, 6.5um/pix 読み出しノイズ 1e-
<b>■ 広視野高速観測</b> ~2Hz, FoV=20deg <sup>2</sup>	存在せず	<b>モザイクCMOS</b> 低ノイズCMOS x 複数台  Canon社 EOS用センサなど >1kx2k, <19um/pix 読み出しノイズ 2e- Tomoe, TAOS2

# TOMOEに搭載するCMOSセンサ



**Canon**

**35 mm full HD CMOS sensor**

developed by Canon and U-Tokyo based on  
products for commercial use.

## Specification

Pixels	2000 x 1128
Pixel size	19 $\mu\text{m}$
Architecture	Front side illuminated + micro lens array
Surface protection	Cover glass with AR coating
Output	16 ch differential analog out
Internal amplifier	$G = x1, x4, x16, x64, x256$
Frame rate	30 fps (max)
Read out mode	Rolling read out
Power dissipation	1.8 W @30 fps
QE ( $A\eta$ )	0.45 @ $\lambda_{\text{peak}}=500\text{nm}$ , 0.25 @ $\lambda=380, 700\text{nm}$
Read out noise	<u>2.3 e<sup>-</sup> rms @30 fps @G = x16</u>
Dark current	<u>0.05 e<sup>-</sup>/pix/sec @273 K</u>
Saturation	55,000 e <sup>-</sup> /pix @G = x1
	5,700 e <sup>-</sup> /pix @G = x16
Filling factor	Sensor area/Package area = 0.3
Package size	60.9 mm x 44.6 mm

- 常温でも、低い暗電流
- 高速読み出しても、低い読み出しノイズ