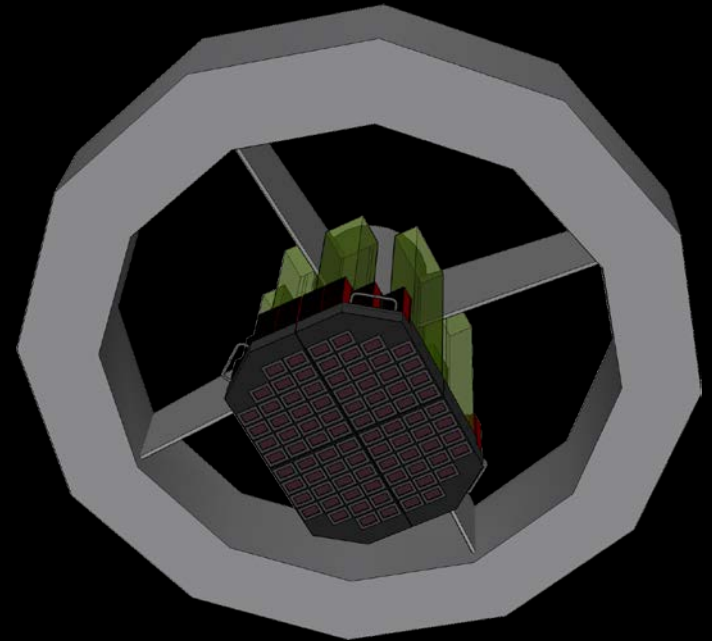
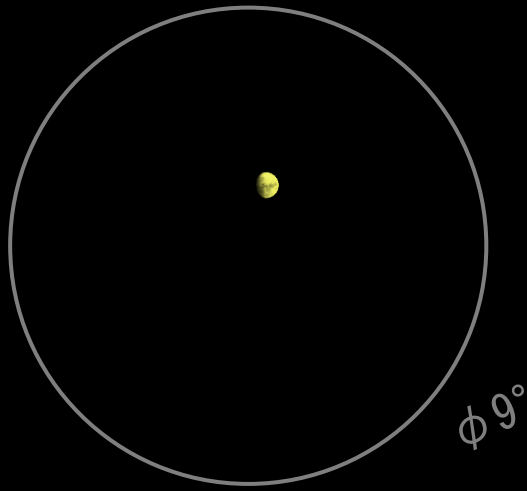


木曾超広視野高速CMOSカメラTomo-e Gozen 開発の進捗報告



酒向重行, 大澤亮, 高橋英則, 一木真, 土居守, 小林尚人, 本原顕太郎, 宮田隆志, 諸隈智貴, 小久保充, 満田和真, 谷口由貴, 青木勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 猿楽祐樹, 森由貴, 三戸洋之, 中田好一, 戸谷友則, 松永典之, 茂山俊和, 谷川衝(東京大学), 臼井文彦(神戸大学), 渡部潤一, 田中雅臣, 前原裕之, 有松亘, (国立天文台), 吉川真(ISAS/JAXA), 冨永望(甲南大学), 板由房, 小野里宏樹(東北大学), 春日敏測(千葉工業大学), 奥村真一郎, 浦川聖太郎(日本スペースガード協会), 佐藤幹哉(かわさき宙と緑の科学館), 河北秀世(京都産業大学), 池田思朗, 森井幹雄(統計数理研究所)



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

Extremely wide-field high-speed camera

Tomo-e Gozen

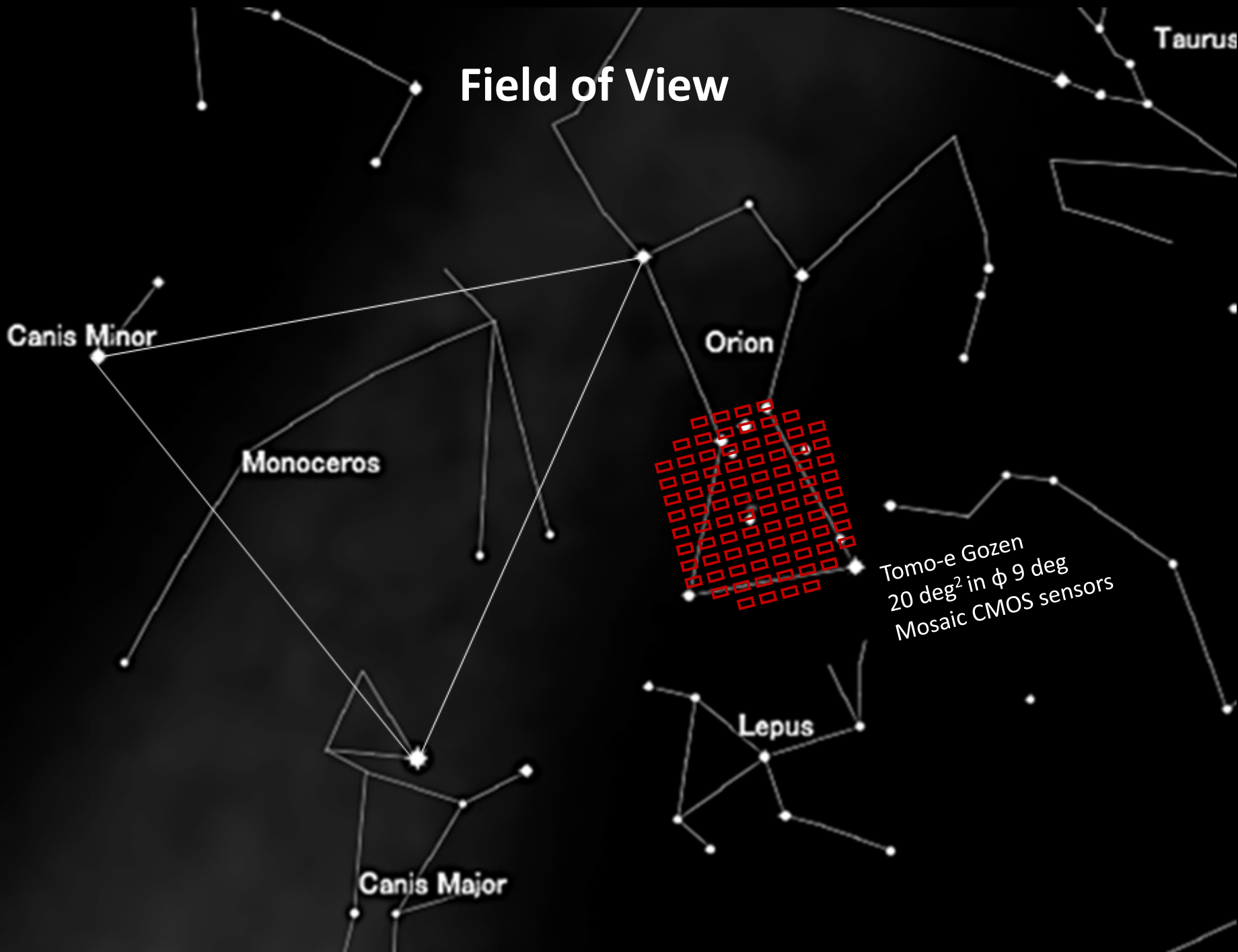
- Telescope Kiso 105 cm Schmidt
- Field of view **20 deg²** in $\phi 9$ deg
- Sensor 2k x 1k CMOS x84 chips
- Frame rate 2 fps (max)
- Data rate **30 TB/night (max)**
- Commissioning 2018



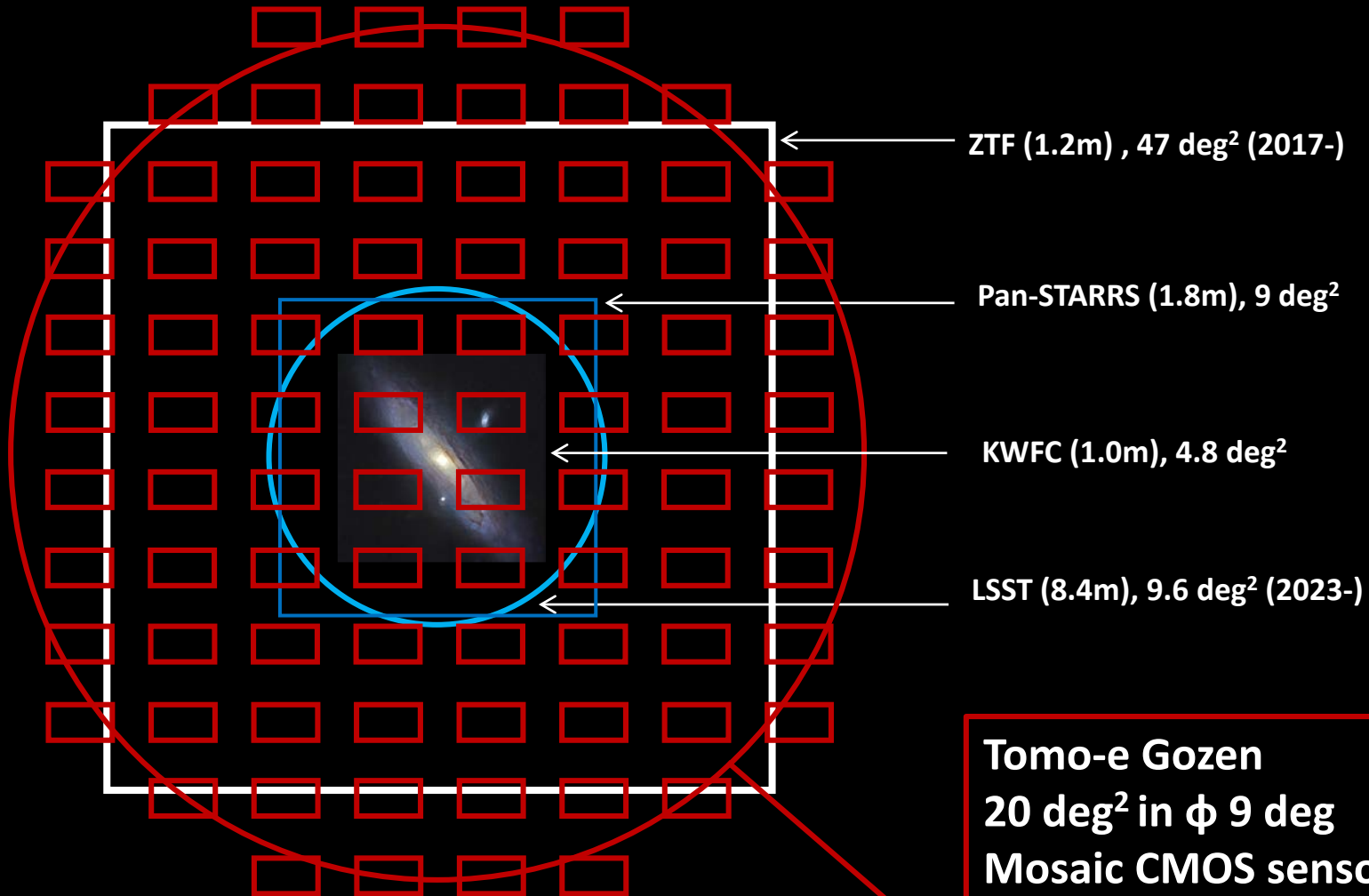
Collaborators

 <p>東京大学 THE UNIVERSITY OF TOKYO</p>	 <p>NAOJ National Astronomical Observatory of Japan</p>	 <p>JAXA Japan Aerospace Exploration Agency</p>	
 <p>TOHOKU UNIVERSITY</p>		 <p>KONAN</p>	 <p>CPS Center for Planetary Science</p>
			
		 <p>科研費 KAKENHI</p>	 <p>PRESTO SAKIATAKE</p>

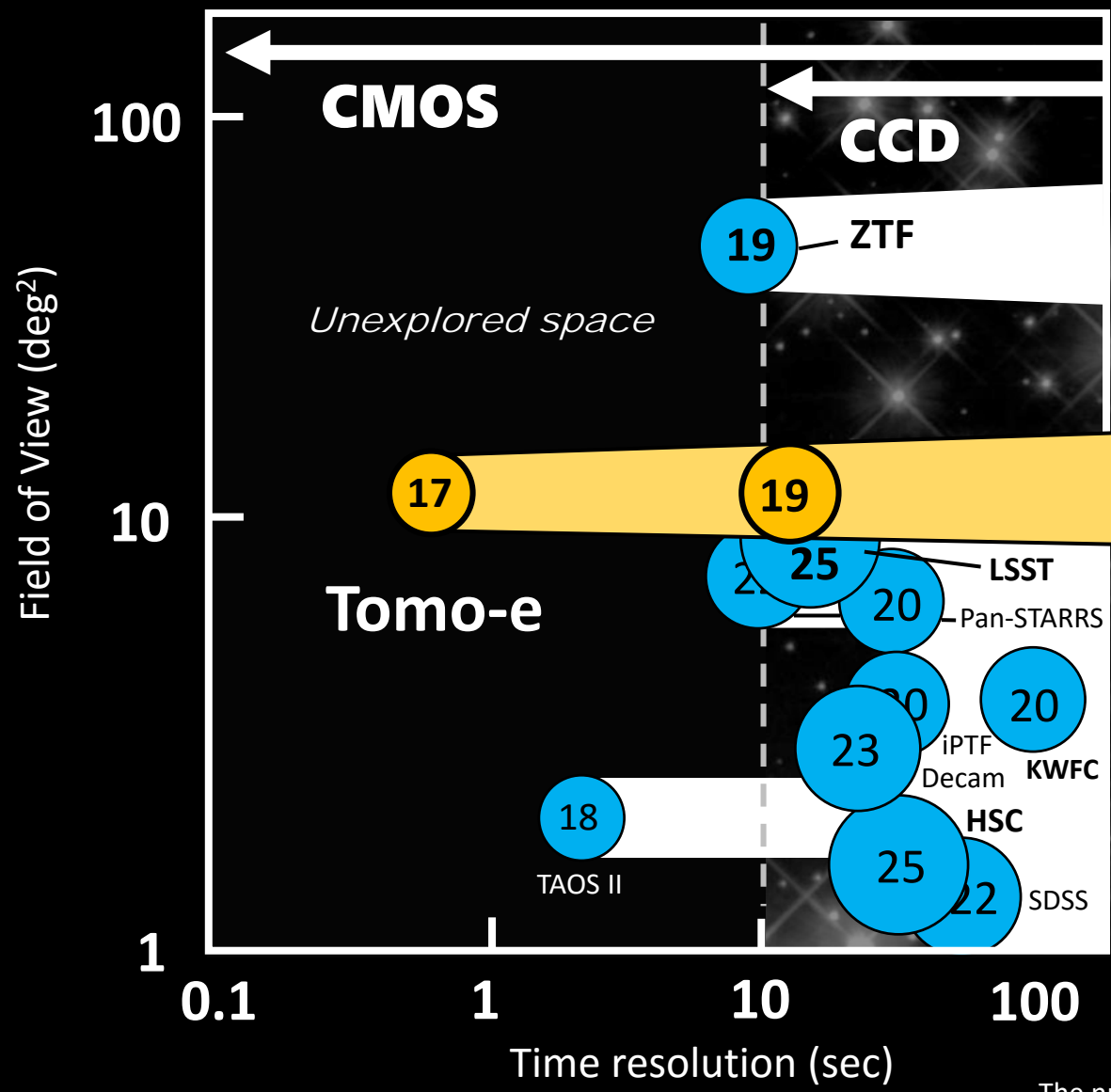
Field of View



Comparison of Field of Views



Performance of Time-domain survey

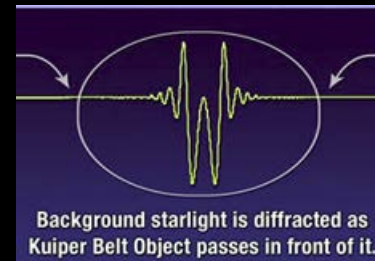


The numbers in the circles indicate limiting magnitudes.

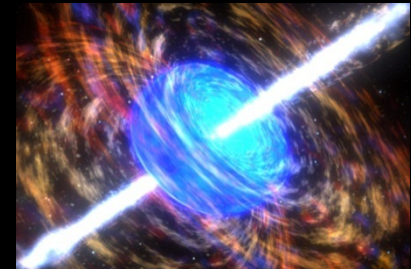
New fields developed by Tomo-e

Rare and Transient Phenomena

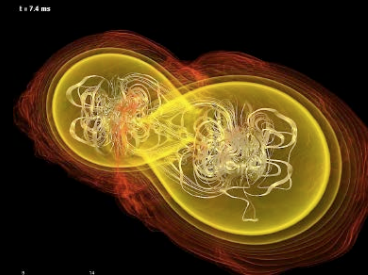
- ❑ Shock Breakout of core-collapse SN
- ❑ Explosion of Nova
- ❑ Optical follow up of Gravitational wave
- ❑ Afterglow of Gamma-ray burst
- ❑ Optical candidate of fast radio burst
- ❑ X-ray time variable objects
- ❑ Transit of Exoplanet
- ❑ Occultation by Trans-Neptune object
- ❑ Potentially Hazardous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



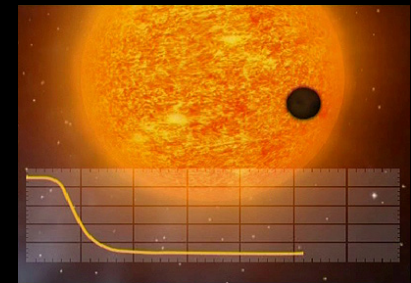
Occultation by TNO



Gamma ray burst



Neutron star merger → GW



Planet transit



Tomo-e Gozen (巴御前), a drawing by Shitomi Kangetsu (1747-1797)



Scene of the Genpei war (1180–1185, Japan)

Tomo-e Gozen (*Lady Tomo-e*, 1157?–1247) is a woman warrior, born in the Kiso region in the 12th century. She fought with Minamoto-no-Yoshinaka in the Genpei War.

“ Tomo-e was especially beautiful, with white skin, long hair, and charming features. She was also a remarkably strong archer, and as a swordswoman she was a warrior worth a thousand, ready to confront a demon or a god, mounted or on foot. She handled unbroken horses with superb skill; she rode unscathed down perilous descents. Whenever a battle was imminent, Yoshinaka sent her out as his first captain, equipped with strong armor, an oversized sword, and a mighty bow; and she performed more deeds of valor than any of his other warriors.

— *The Tale of the Heike*

”

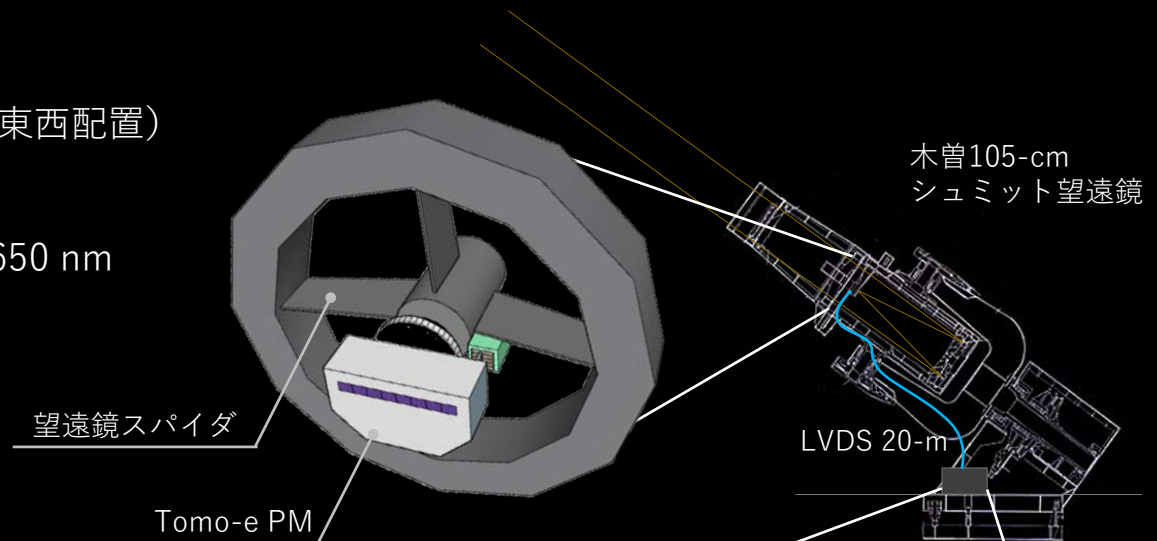
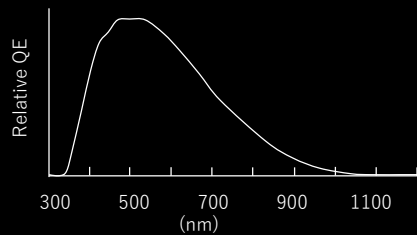
from Wikipedia

Tomo-e Gozen試験機 (PM)

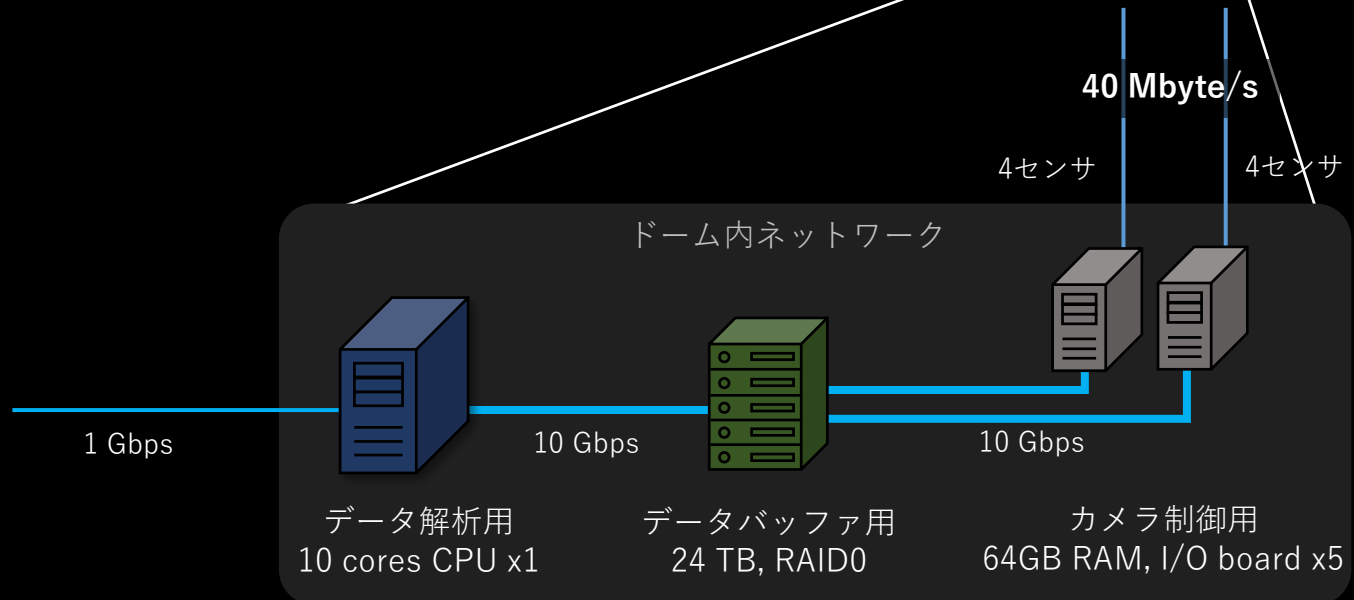
Sako et al. 2016, SPIE
Ohsawa et al. 2016, SPIE

カメラ部

- センサ 8 チップ (東西配置)
- 視野 2 平方度
- フレームレート 2 fps (max)
- 感度波長 $\lambda = 400 - 650 \text{ nm}$
- フィルタ なし

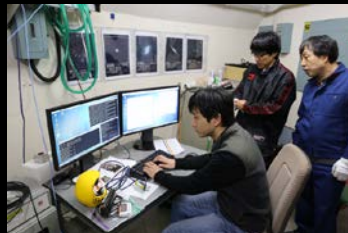


データ処理部



Tomo-e PMの試験観測

- 2015年11月23日 搭載試験
- 2015年11月24日 ファーストライト
- 2015年11月23日 - 30日 機能試験観測
- 2015年12月1日 - 21日 第1回科学観測
- 2016年2月29日 - 3月17日 第2回科学観測
- 2016年3月29日 - 4月14日 第3回科学観測

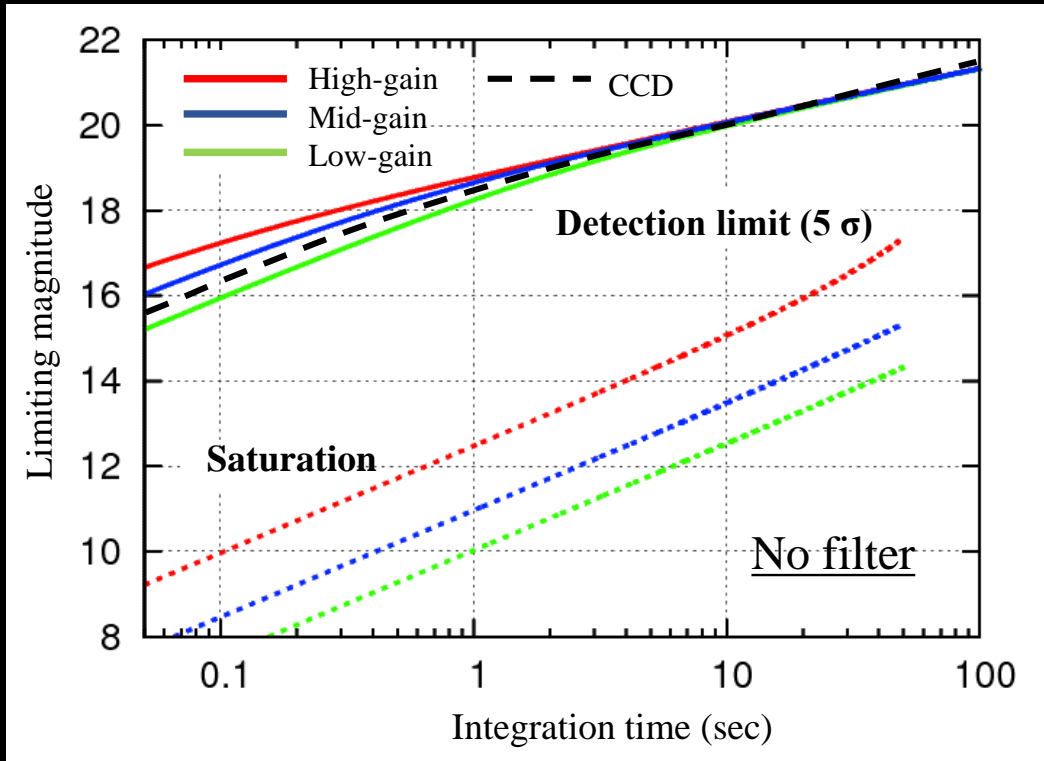


機能試験のまとめ

Sensor	Front side illuminated 35 mm CMOS, micro lens array, cover glass with AR, 2000 x 1128 pix ²
Sensor alignment	8 chips along RA direction
Total field of view	2 degree ² , 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	2 fps @full-frame, 20 fps @partial
Read noise (2 fps)	1.9, 4.3, 9.9 e ⁻ @G=High, Mid, Low
Full well	6,400, 26,000, 59,000 e ⁻ @G=High, Mid, Low
Linearity (error < 1%)	90, 90, 80 % @G=High, Mid, Low
Conversion factor	0.23 , 0.95, 2.4 e ⁻ /ADU @G=High, Mid, Low
Dark current	0.1, 1 e ⁻ /s/pix @4, 20 °C
Sky background (dark night, no-filter)	52 e ⁻ /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, 5σ)	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

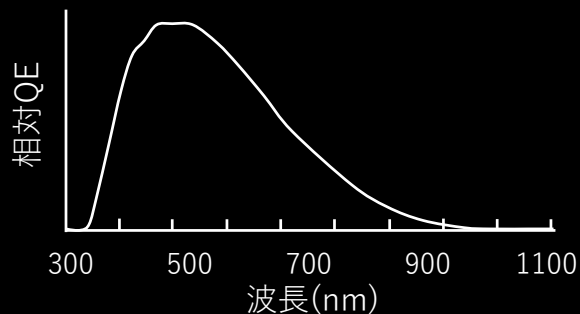
Midゲイン

積分時間 (秒)	限界等級 (等級, 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

Lowゲイン

積分時間 (秒)	限界等級 (等級, 5σ)	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

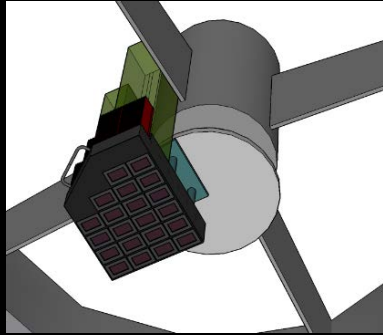
波長感度特性



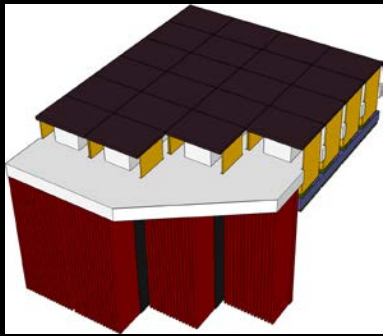
1%線形範囲

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

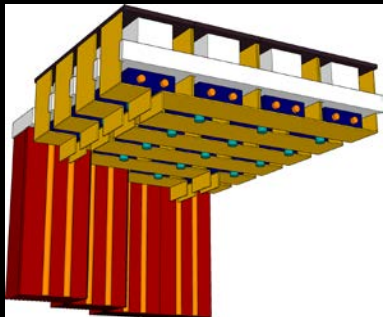
超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen



4台のカメラで
構成

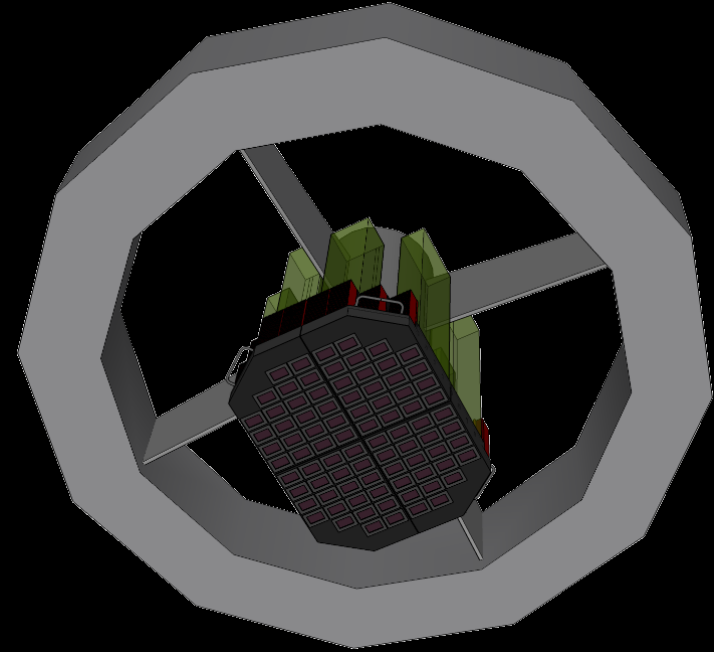


CMOSセンサを
21チップ搭載



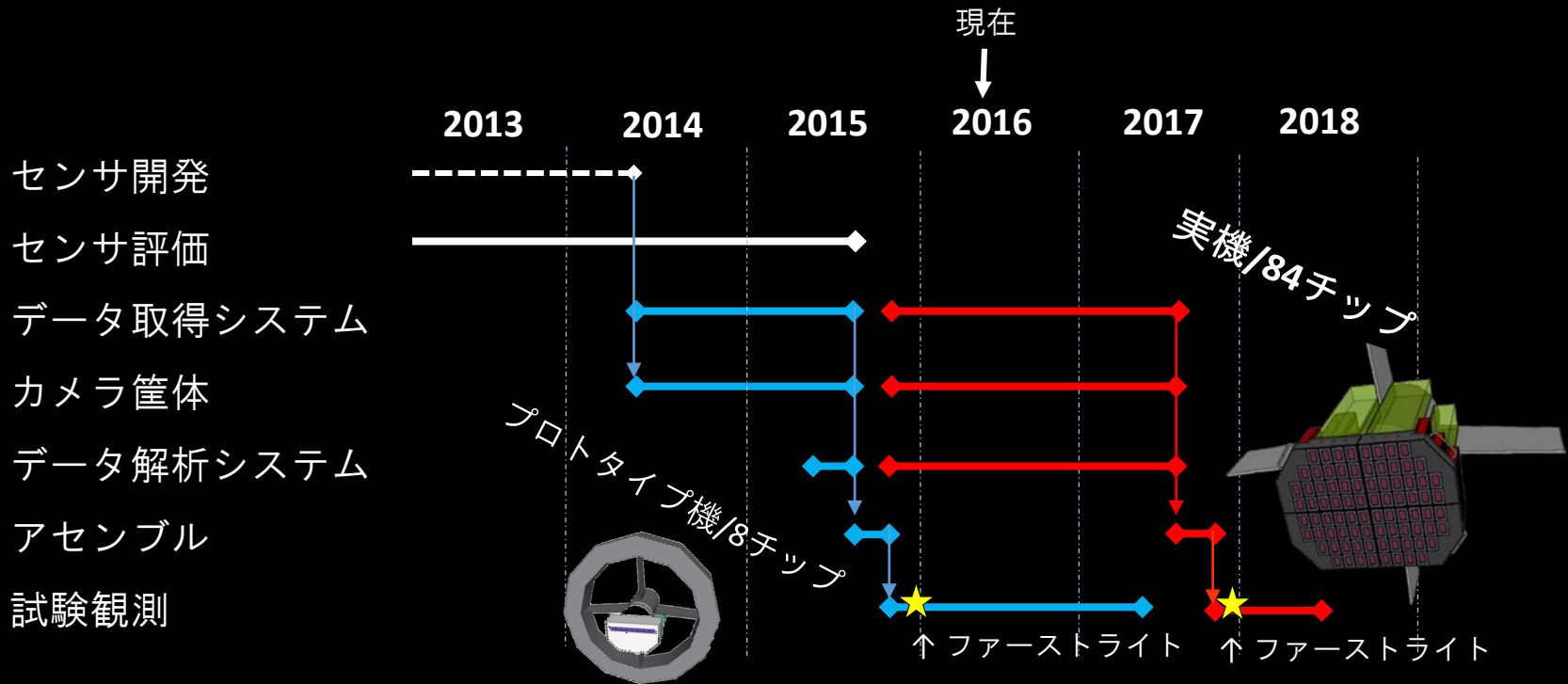
常温常圧
空冷
背面に読み出し回路

Tomo-e Gozen 実機の外観

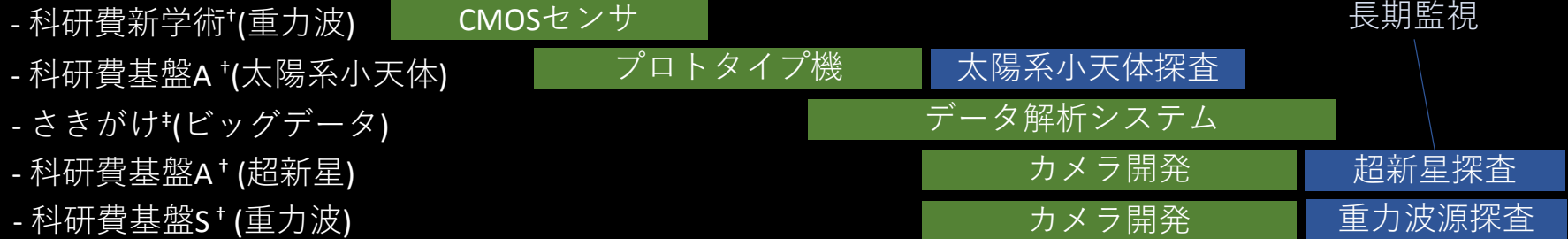


- CMOSセンサを84台搭載
- 2017年度完成予定
- 同設計の4台のカメラで構成
- 1台のカメラを完成させた後に量産

Tomo-e Gozenの開発のタイムラインと予算



開発予算



突発イベント

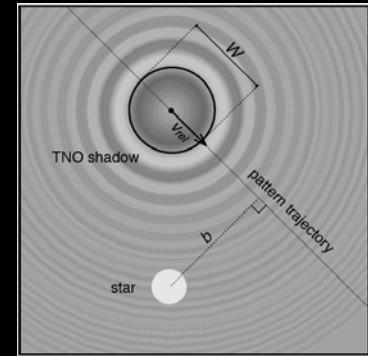
[†]日本学術振興会, [†]科学技術振興機構

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」

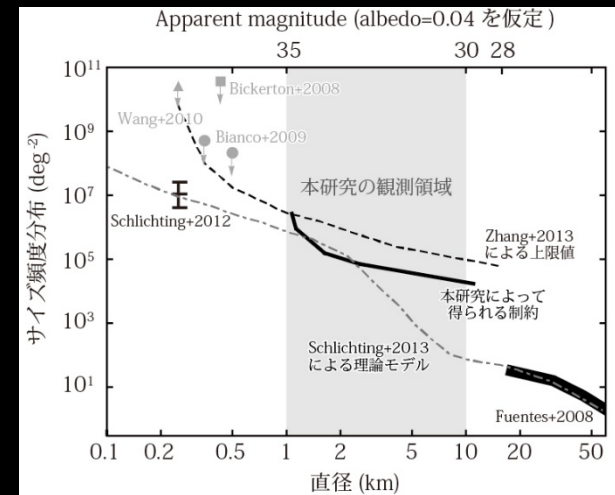
研究代表 渡部潤一（国立天文台）

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
- パイロット観測, 13mag, 10%変動
- $10^{-2} - 10^{-3}$ events/year
- 100 hoursで1イベントを検出 event rate = 10^{-2}



申請書より



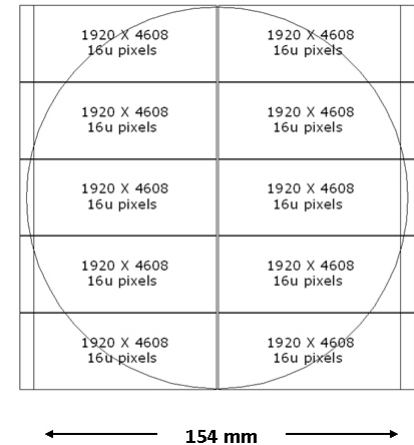
TAOS IIによる高頻度掩蔽観測

TAOS II project

- 1.3-m f/4 telescope (FoV 2.3 deg²) x 3
- Baja California, Mexico
- 2k x 4k backside CMOS x 10 chips
- 10,000 stars at 20 Hz
- Partial readout of 7 pix x 7pix
- 1,000 stars/chip
- Simultaneous observations with 3 telescopes



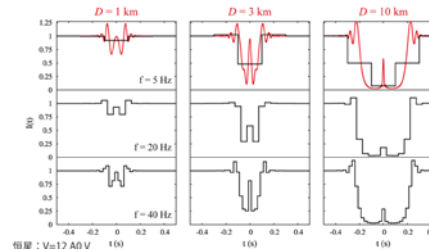
- 望遠鏡はready
- センサは今月から納品
- システムの開発は遅れている



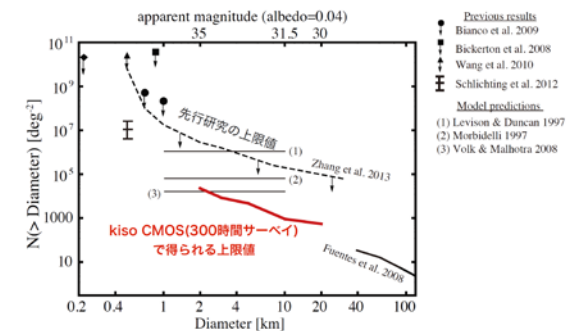
Tomo-e実機で掩蔽

Tomoe project

- Kiso 1.0-m Schmidt telescope (FoV 20 deg²) x 1
- 1k x 2k front side CMOS x 84 chips
- 8,400 stars at 10 Hz
- Partial readout (~3 deg²)
- 100 stars/chip
- 1 event/100 hours @ event rate = 10⁻²



2014/6/4 Tomoe検討会 (臼井) より



2014/7/23 Tomoe検討会 (有松) より

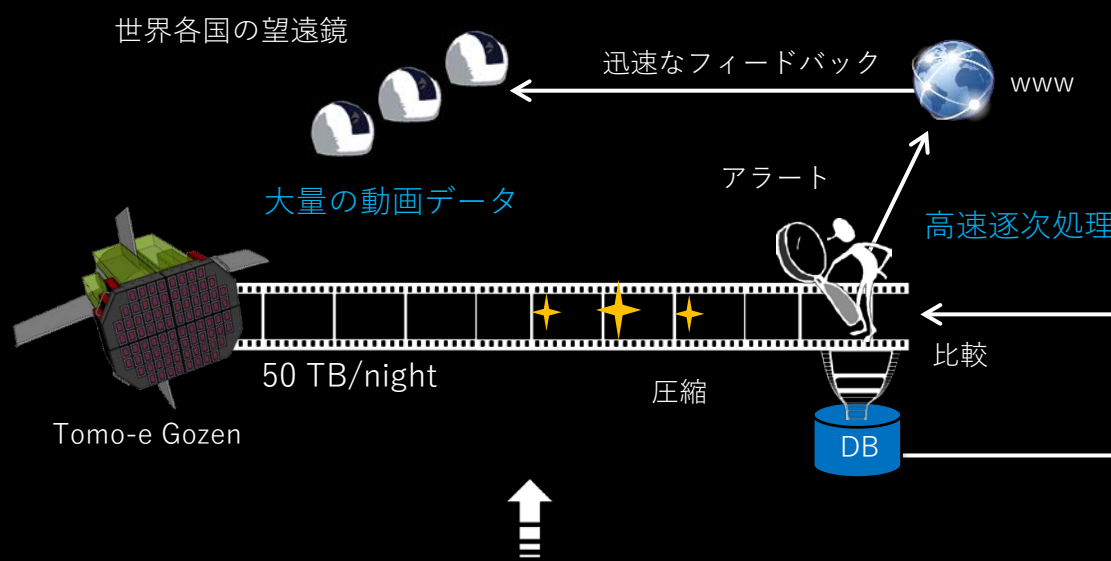
- TAOS IIが遅れているので、初期にやってしまうべき
- 100 hoursはなかなか大変。星の数をふやせないか？

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



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

統計数理研 池田氏、森井氏と連携

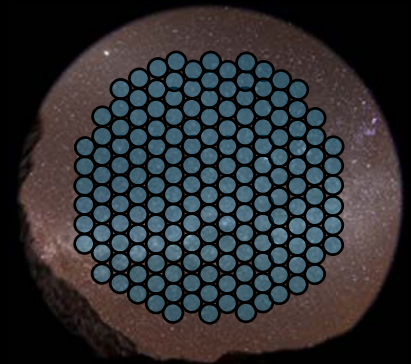
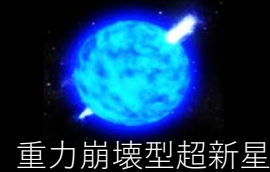
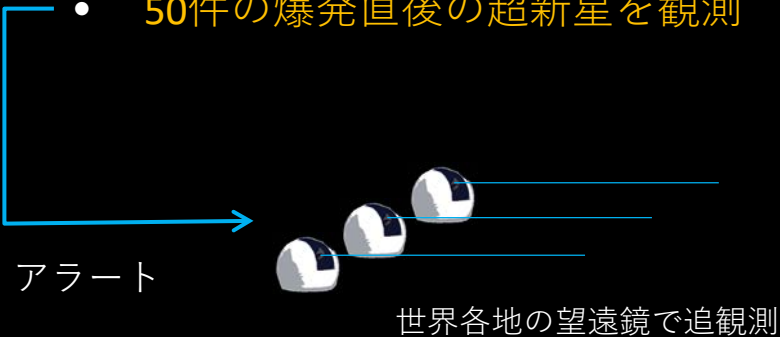
科研費基盤A

「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

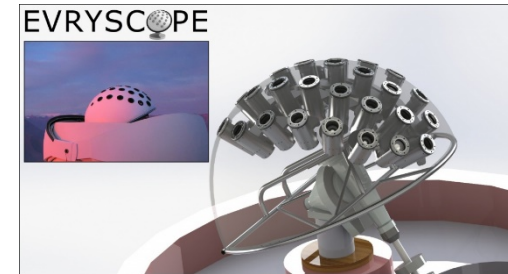


全天探査 (3,000平方度)
170ポインティング
検出限界18等級

Evryscopeによる全天サーベイ

Hardware

System design	27 individual telescopes; shared equatorial mount
Telescope apertures	61mm
Telescope mounting	Fibreglass dome w. aluminium supports
Detectors	28.8MPix KAI29050 interline-transfer CCDs
	7e- readout noise @ 4s readout time
Field of view	50% QE @ 500nm; 20,000 e- capacity w. anti-blooming
	380 sq. deg. per telescope (23.8° × 16.0°)
	10,200 sq.deg. instantaneous total
	8,660 sq. deg. excluding overlap regions
Sky coverage per night	18,400 sq. deg. (2-10 hours per night)
Total detector size	780 MPix
Sampling	13.3"/pixel → 混んだ領域ではconfusionになりそう
Observing strategy	Track for 2 hours; reset and repeat
Data storage	All data recorded for long-term analysis
	100TB / year (compressed)



<http://evryscope.astro.unc.edu/>

Performance

PSF 50% enclosed-energy diameter	2 pixels in central 2/3 of FoV; 2-4 pixels in outer 1/3
Exposure times	120s standard (plus shorter for bright-star mode)
Survey efficiency	97% efficiency from 4s camera readout
Limiting magnitude	$m_V=16.4$ (3-sigma; 120s exposure)
	$m_V=18.2$ (3-sigma; 1 hour)
	$m_V=19.0$ (3-sigma; 1 night) → なかなか手ごわい
Photometric performance	1% photometry on $m_V < 12$ stars every 2 minutes (inc. scintillation)
	3-millimag photometry on $m_V=11.5$ stars every 20 minutes
	3-millimag on $m_V=6$ stars in 10 mins (saturation-limited short exps.)
	1% photometry on $m_V=15$ stars every hour

Extragalactic transient survey

Tomo-e	20	1050	1.2	1	168 Mpix	General	Ref.
Survey	FOV / sq. deg.	Aperture / mm	"/pixel	Sites	Pixels / site	Targets	
ATLAS	30	500	1.9	2	100 MPix	NEOs & general	Touhy (2011) http://fallingstar.com
ROTSE-III	3.4	450	3	4 (4 tels.)	16MPix	GRBs	Yost et al. (2006) ^a
ASAS-SN	162	140	7	2 (8 tels.)	16 MPix	Supernovae	Shappee et al. (2014) ^b
TAROT	3.4	250	3.3	2	8 MPix	GRBs	Klotz et al. (2009)
PROMPT	0.18	410	0.6	1 (6 tels.)	24 MPix	GRBs	Reichart et al. (2005)
Pi of the Sky	7700	71	36	2	64 Mpix	GRBs (1d storage)	Malek et al. (2010)
Evryscope	8,660	61	13.6	1	780 MPix	General	This paper

^aMultiple sites for continuous observation

^bMultiple sites observing different fields

Transiting planet survey

Survey	FoV ^a / sq deg.	Aperture / mm	"/pixel	Sites	MPix/site	Targets	Ref.
KELT	676	42	23.0	2	16	Bright stars	Pepper et al. (2007) ^b
SuperWASP	488	111	13.7	1 (8 tels.)	32	General transits	Pollacco et al. (2006)
HAT-South	128	180	3.7	3 (6 tels.)	128	General transits	Bakos et al. (2009, 2012) ^c
MEarth	2.8	400	0.8	2 (8 tels each.)	32	M-dwarfs	Irwin et al. (2009) ^d
CSTAR	20	145	15	1 (Antarctic)	4	Bright stars	Wang et al. (2014) ^e
TFRM-PSES	19	500	3.9	1	16	M-dwarfs	Fors et al. (2013)
AWCams	504 & 1295	71 & 42	22 & 36	1 (Polar)	32	Bright stars	Law et al. (2013) ^f
NGTS	96	200	1.1	1 (12 tels)	48	Bright stars	Wheatley et al. (2013)
Kepler	105	950	4.0	1	95	Earth-like planets	Koch et al. (2010) ^g
Evryscope	8,660	61	13.3	1	780	Bright stars, MDs, WDs	Law et al. (2012c)

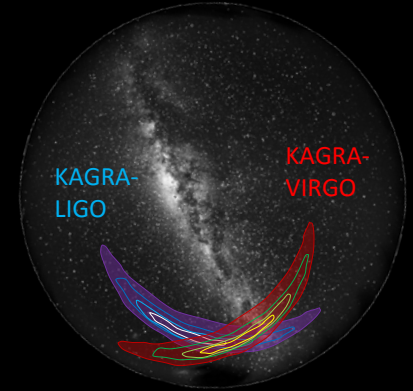
- 超新星の全天サーベイと競合する可能性
- 既に成果をだしているASAS-SN全天サーベイ、ZTF, PANSTARRSの広域サーベイに対して勝てるか?

科研費基盤S

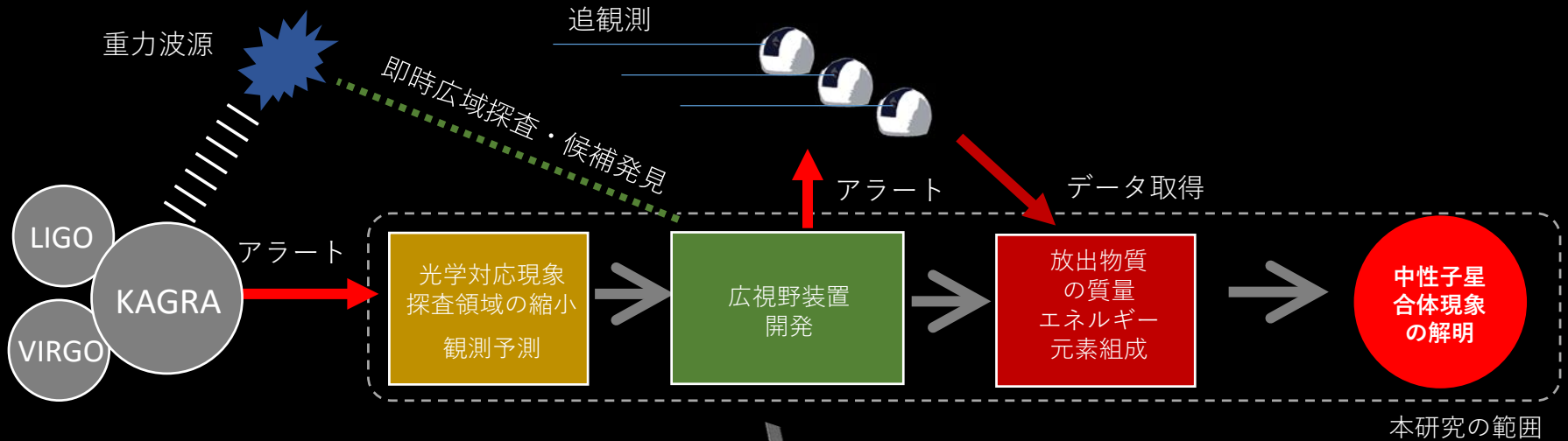
「高速掃天観測による連星中性子星合体现象の研究」

研究代表 茂山俊和（東京大学ビッグバンセンター）

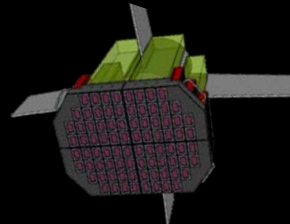
強力な広視野探査装置を開発し、光学対応現象を即時に同定することで、中性子星合体现象の解明をめざす。



KAGRAで到来方向を限定
Tomo-eで広視野探査



重力波望遠鏡KAGRA

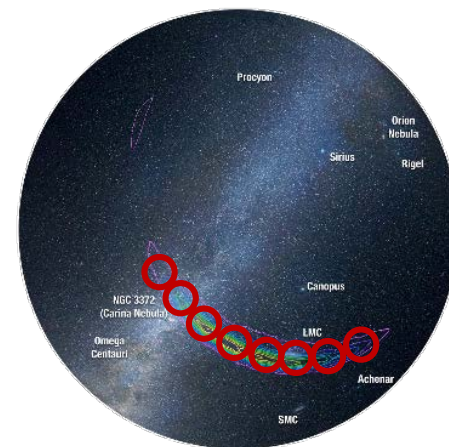
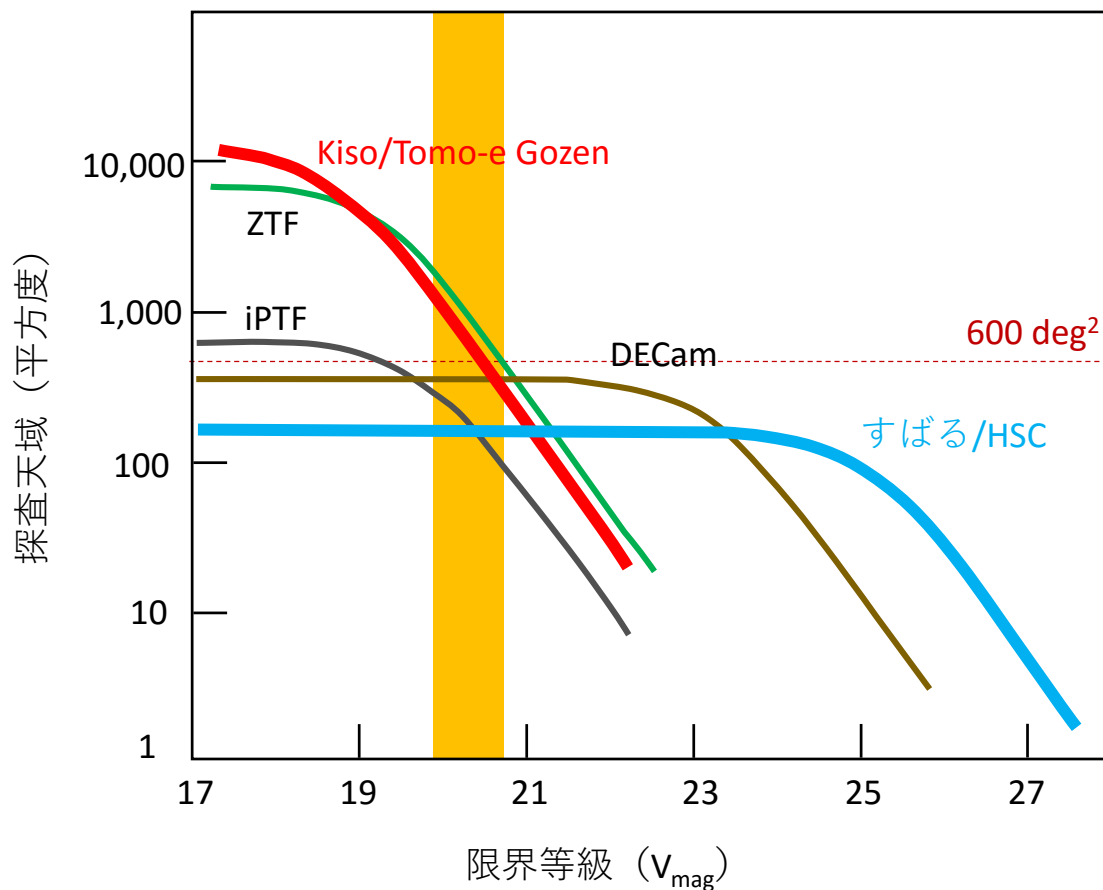


超広視野高速カメラ
Tomo-e Gozen

重力波源のフォローアップ

1時間の観測で探査可能な天域

↓ Tomo-eが得意とする範囲



全天画像と重力波の初検出時の到来方向予想領域。計600平方度。赤丸は木曾シュミットの視野

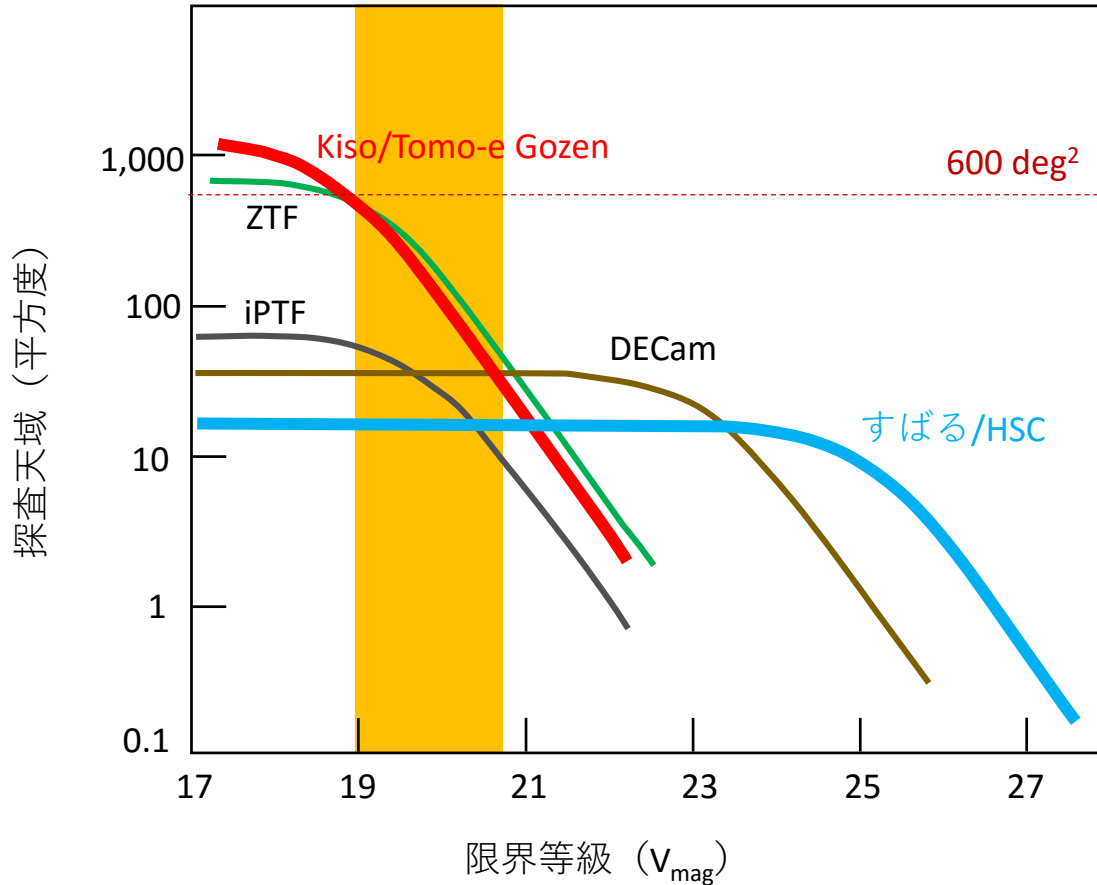
重力波望遠鏡2台で検出時（位置決定精度 = 数100平方度）に、Tomo-eにアドバンテージ。

この図は単純な仮定で計算したため、後日に再計算による確認が必要です。

重力波源のフォローアップ

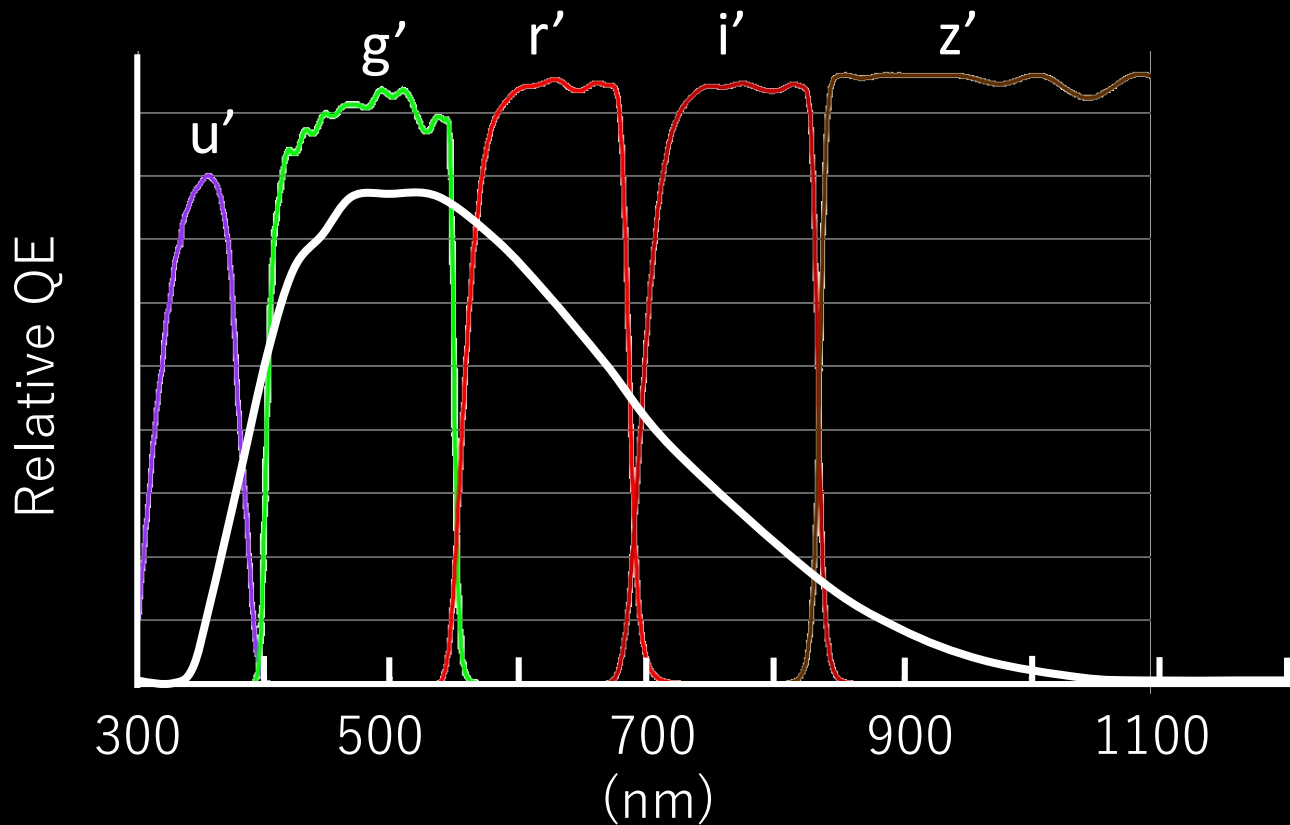
6分間の観測で探査可能な天域

↓ Tomo-eが得意とする範囲



この図は単純な仮定で計算したため、後日に再計算による確認が必要です。

Tomo-eのフィルタ



SDSSから選ぶ

→ g', r', i'

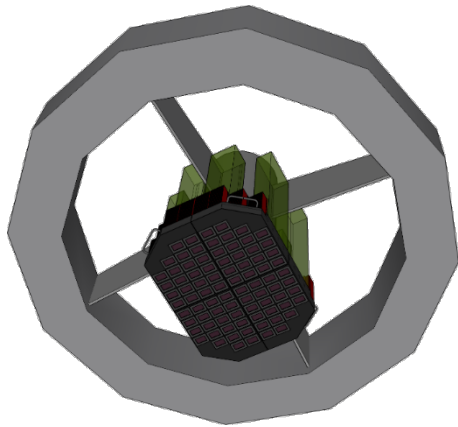
感度優先

→ $g' + r', g' + r' + i'$

初期に複数種類を製作できない。ラン内でのフィルタ交換は実施しない。

Tomo-eはdiscoveryに徹するか。従来通り測光精度を考慮するか。

Tomo-e時代の運用のイメージとソフトウェア



- 毎日何かのサーベイ
- フィルタ交換なし
- Queueで自動実行
- メンテナンスは計算機関係のみ
- 自動解析とアラート発信の仕組みを早期に決めましょう

- そろそろ第1期のサーベイ計画をたてましょう。
- その後、すみやかにパイプラインソフトウェアのデザインを決めましょう。