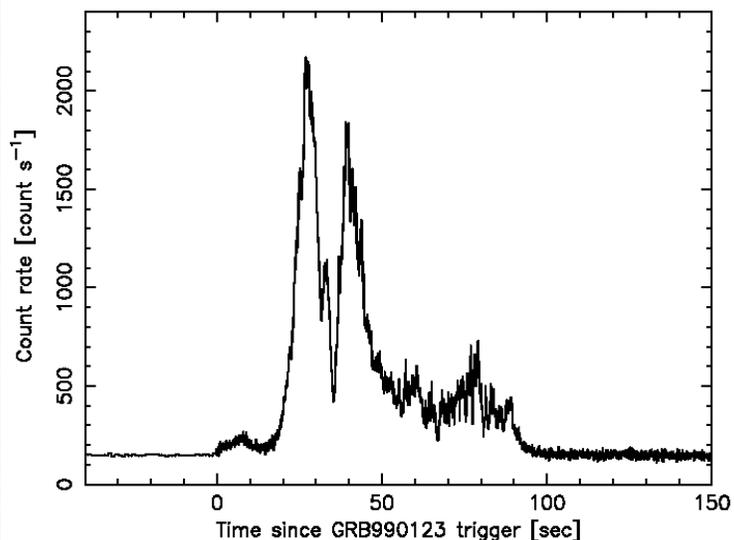
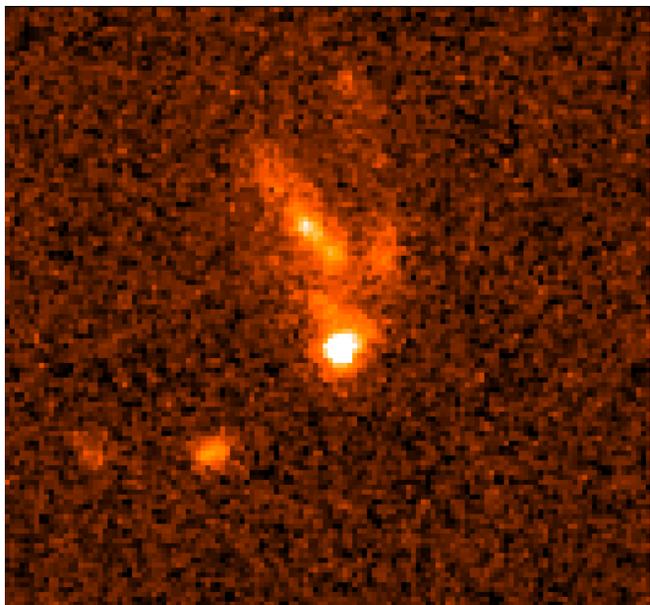


# ガンマ線バースト探査衛星HiZ-GUNDAMの現状

津村耕司 (東京都市大学, [ktsumura@tcu.ac.jp](mailto:ktsumura@tcu.ac.jp))

HiZ-GUNDAM チーム

# ガンマ線バースト (GRB)



## Long GRBs ( $T > 2 \text{ sec}$ ): 初期宇宙の探査

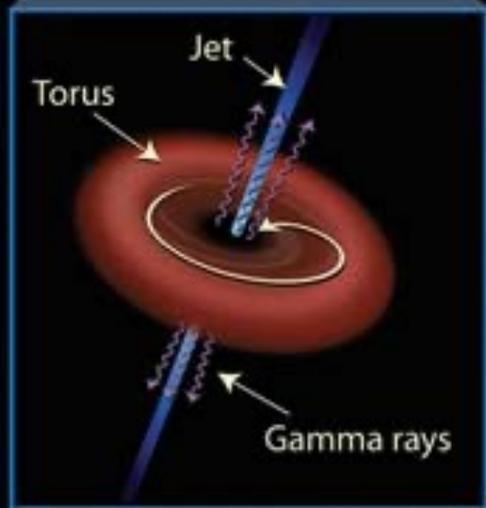
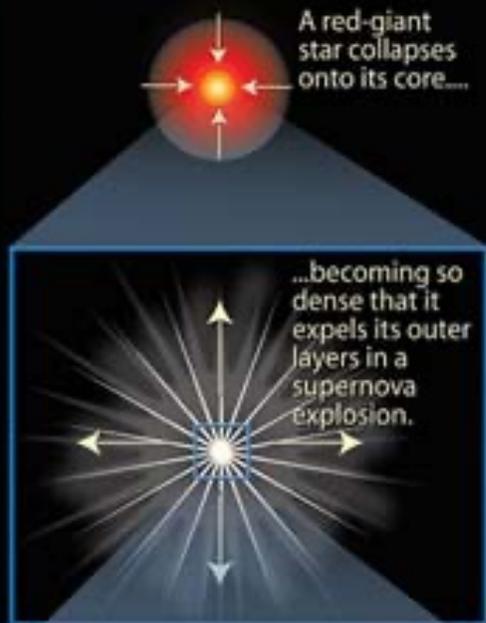
- 大質量星の爆発 ( $M > 40M_{\text{sun}}$ )
- $E = 10^{50} - 10^{54} \text{ ergs}$
- 非常に明るいため、遠方宇宙の探査に活用できる

## Short GRBs ( $T < 2 \text{ sec}$ ): 極限環境物理の探査

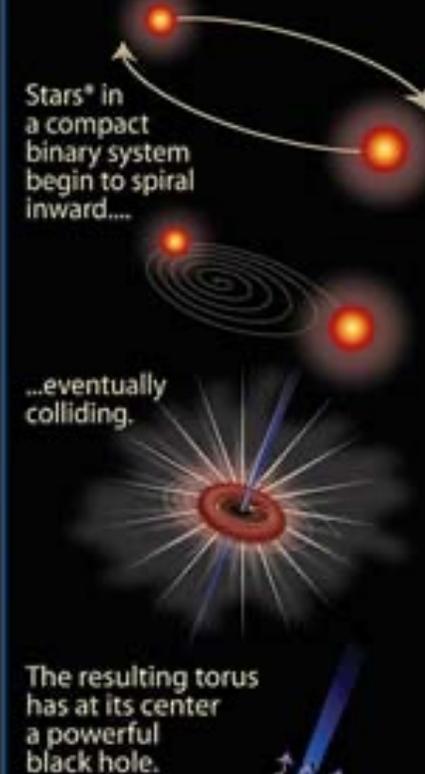
- 中性子星連星の合体
- $E = 10^{48} - 10^{51} \text{ ergs}$
- 重力波との協調観測

# Gamma-Ray Bursts (GRBs): The Long and Short of It

## Long gamma-ray burst ( $> 2 \text{ seconds' duration}$ )



## Short gamma-ray burst ( $< 2 \text{ seconds' duration}$ )



\*Possibly neutron stars.

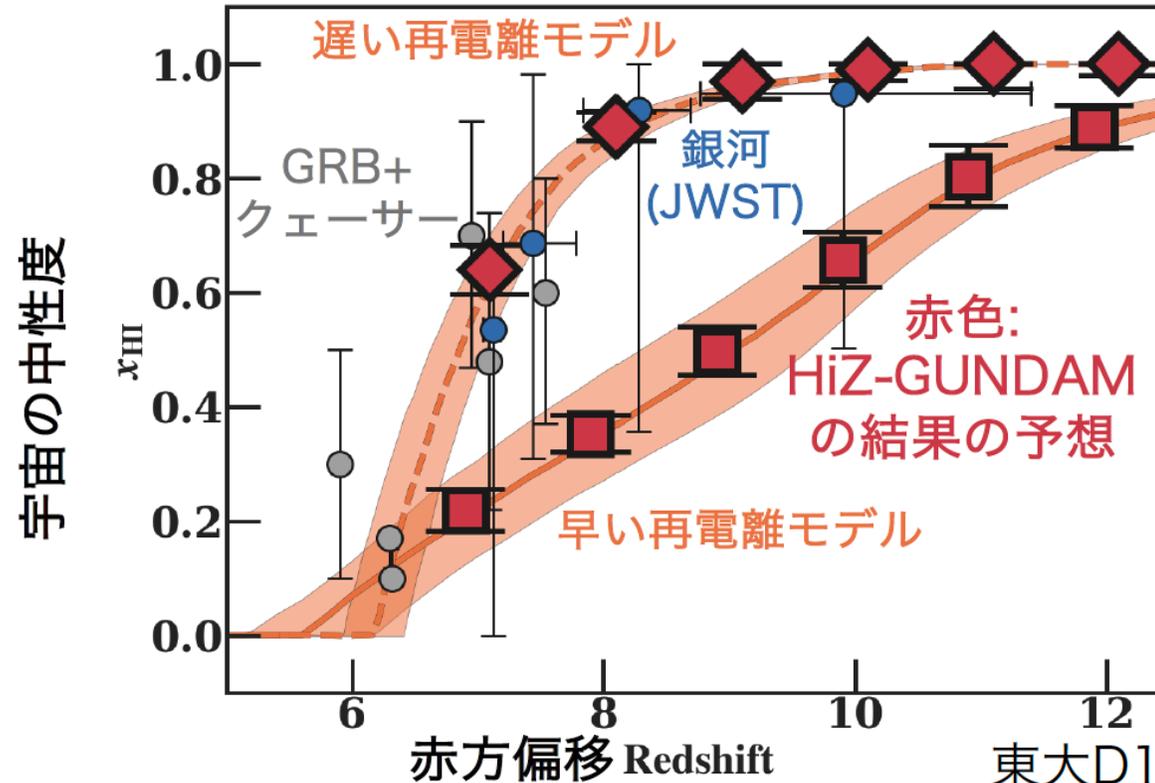
# GRBを用いた初期宇宙探査の意義

- 銀河やクェーサーの観測と比較した、GRBでの初期宇宙探査の利点
  1. 銀河と比較して**GRB発生直後の残光は数1000倍以上と圧倒的に明るい**ため、短時間の観測でもS/N比の高いデータを獲得できる
  2. 大規模な銀河は長期間にわたって輝いているため銀河間空間を電離してしまう（観測バイアスが存在する）が、突発天体であるGRBは爆発より前に銀河間空間へ与える影響はほとんど無いことから、初期宇宙の普遍的な状態を計測できる（**無バイアス性の高い計測が可能**である）
  3. 銀河やクェーサーのスペクトル形状は複雑で、かつ個性があるためにライマン $\alpha$ 吸収端の減衰翼形状の測定が困難であるが、GRBは単純なベキ型のスペクトルであることから同形状を測定しやすい（**モデル依存性の少ない計測が可能**である）

# HiZ-GUNDAMによる宇宙再電離史への制限

播金さん提供

- 各時代の中性度をGRBにより精度よく測定し、**宇宙再電離史を決定**。再電離が早い/遅いという議論に結論をつける



東大D1梅田さん作成

- エクストラサクセス:  $z > 10$ の時代に生まれた初代星 (重元素量0のPop-III星) 起源のGRBを捉えられれば、**世界初のPop-III星の直接検出となる (ノーベル賞級の大成果)**

# 将来計画検討委員会からの(追加)質問への回答③

GRBはスペクトルが単純とあるが、おそらく星を取り巻く環境、星が住む銀河の環境によって、Lyman-alpha damping wingの形状には個性があると考えられる（より星スケールの環境に影響を受ける）。FRBでも似たような議論があるが、GRBの環境依存性が本当に小さいか、あるいはQSOよりもクリーンな再イオン化仮定のプローブになるのか、について考えを教えてください。

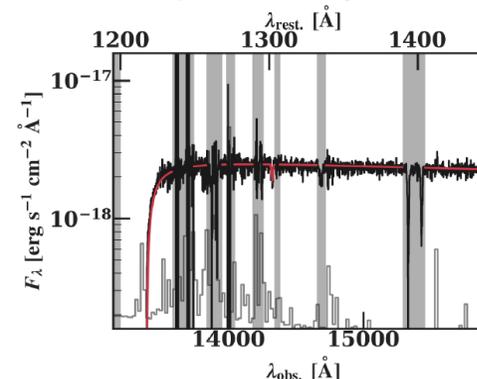
GRBのLyman-alpha damping wingの形状が環境によって変わる可能性は十分あり、特に星の住む銀河環境に付随する中世水素ガスによる吸収(DLA)の影響が大きいと考えられる。

→ ただし、銀河に付随する中性水素による吸収とIGMによる吸収は形が異なり、GRBは明るいために非常にSNの高いスペクトルが取れるので **中性水素ガスによる吸収量とIGMの中性水素割合(xHI)を同時に高精度で求めることができる。**

← xHIは低赤方偏移のクェーサーのスペクトルのモデル化から求めるが、クェーサーはintrinsicなスペクトルがGRBと比べると複雑なことから、クェーサーのスペクトルの形が赤方偏移進化しないと仮定する必要があるため、大きなエラーがついてしまう(e.g., Wang et al. 2020, ApJ, 896, 23)

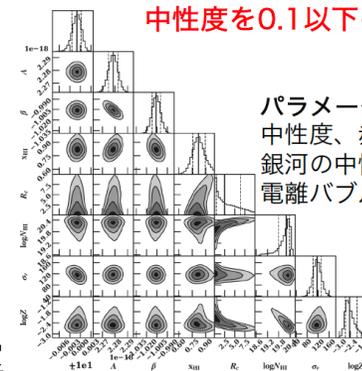
GRBはintrinsicなスペクトルが単純なべき乗でありモデル化がしやすいため、xHIも精度良く決められる

z=10 GRBをすばる望遠鏡NINJAで2時間観測した際の予想



感度データはすばる/NINJAチーム提供

明るく単純なスペクトル形状のおかげで多くのパラメータと中性度の縮退を解き、**中性度を0.1以下の精度で決定可能**



×10以上!

播金さん提供

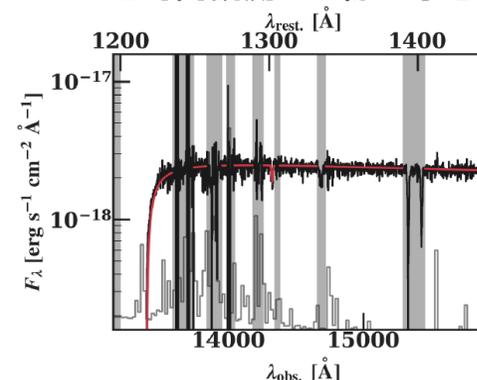
# 将来計画検討委員会からの(追加)質問への回答④

高赤方偏移QSOのサンプルについては、Euclid, Romanの広視野赤外線撮像サーベイで大幅に増加する予定であり、そのサンプルを用いて再イオン化の研究は進む可能性がある。これについてコメント、特にHiZの役割についてのコメントを教えてください。

確かに、 $z > 7$ のクェーサーサンプルは今後Euclid, Romanの探査で大幅に増加する。

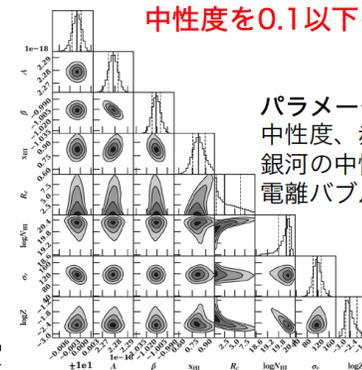
ただし、③で回答したように、**クェーサーを使ったxHIにはモデル依存性があり不定性が大きい**ため、たとえEuclid, Romanによって再イオン化の研究が進んでも、HiZにより見つかるGRBの観測により独立により高い精度でxHIの進化を調べることが重要。

z=10 GRBをすばる望遠鏡NINJAで2時間観測した際の予想



感度データはすばる/NINJAチーム提供

明るく単純なスペクトル形状のおかげで多くのパラメータと中性度の縮退を解き、**中性度を0.1以下の精度で決定可能**



パラメータ:  
中性度、赤方偏移、  
銀河の中性ガス、金属量、  
電離バブルサイズ、...

播金さん提供

×10以上!

# HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission)

ミッション目的:

“初期宇宙探査”と“マルチメッセンジャー天文学”への貢献

主要課題1: ガンマ線バースト(GRB)を用いた初期宇宙探査

観測: 高赤方偏移 GRB の検出 ( $9 < z < 12$ )

科学: 初期宇宙の星形成率の測定と初代星を起源とするGRBの探査  
宇宙再電離と元素合成の変遷の理解

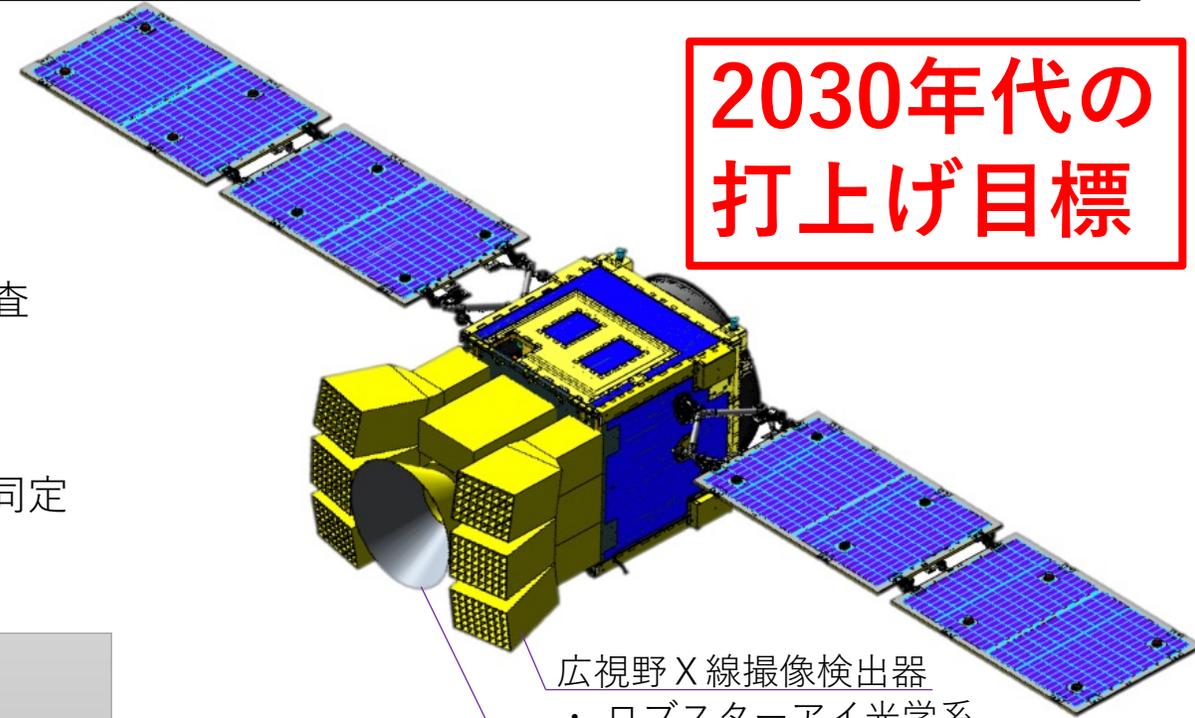
主要課題2: マルチメッセンジャー天文学の推進

観測: 重力波・高エネルギーニュートリノと同期した突発天体の同定

科学: ブラックホール誕生時のエネルギー変遷、希土類元素生成  
重力エネルギーを源泉とした宇宙線加速の理解

観測戦略

- (1) 広視野X線撮像検出器による暗いGRBやX線突発天体の発見
- (2) 自律制御による衛星の姿勢変更
- (3) 近赤外線望遠鏡を用いた高赤方偏移GRBやキロノヴァの同定
- (4) 観測情報のアラート送信
- (5) 大型望遠鏡による高赤方偏移GRBや重力波天体の分光観測



2030年代の  
打上げ目標

広視野X線撮像検出器  
 ・ ロブスターアイ光学系  
 ・ pnCCD 撮像検出器

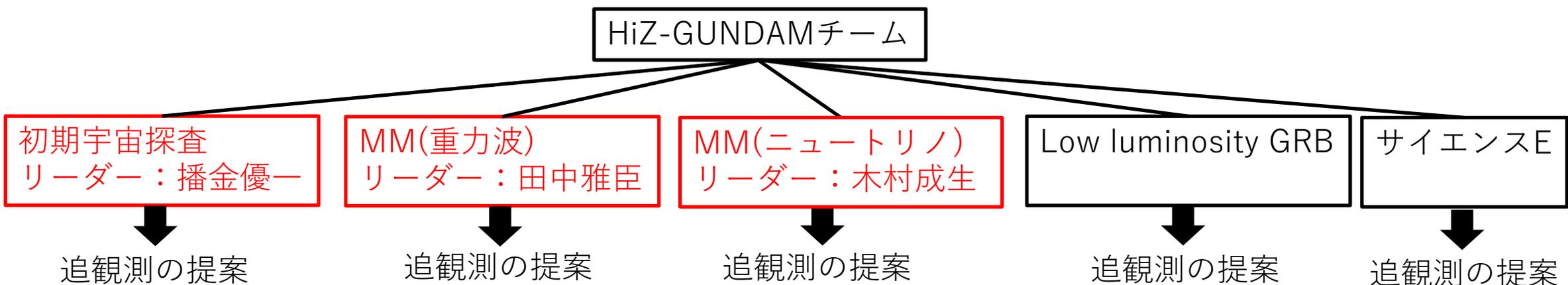
近赤外線望遠鏡  
 ・ アサーマル光学系  
 ・ 5バンド同時測光

広視野X線撮像検出器の仕様	
エネルギー帯 (keV)	0.4 – 4 keV
視野	約 0.5 str
検出感度	$10^{-10}$ erg/cm <sup>2</sup> /s (100 秒露光時)
時間分解能	< 0.1 秒
方向決定精度	約 3 分角

近赤外線望遠鏡の仕様					
望遠鏡口径	30 cm				
視野	15 分角 × 15 分角				
露光時間	10 分 (2 分 × 5 フレーム)				
観測バンド ( $\mu m$ )	0.5 – 0.9	0.9 – 1.3	1.3 – 1.7	1.7 – 2.1	2.1 – 2.5
限界等級 (AB)	21.4	21.3	21.4	20.8	20.7
10 分露光, S/N=10	21.4	21.3	21.4	20.8	20.7

# 追観測検討チームの結成

- 発見したGRBに対して自分達で追観測して科学成果を創出する枠組みを検討し、サイエンステーマごとに追観測チームを結成
  - 2大テーマである「初期宇宙」と「マルチメッセンジャー(MM)」で検討を開始
- GRBアラートに対して、すばるなどの大型望遠鏡で即応的(1時間以内)に追観測を実現したい(2030年代)
- Einstein Probeの発見天体等に対する追観測計画が進行中



HiZ-GUNDAMが突発天体観測の「司令塔」の役割を担い、世界の大型望遠鏡の総力をあげて「マルチメッセンジャー天文学」を推進

# 将来計画検討委員会からの(追加)質問への回答①

Einstein Probe + 地上の可視・近赤望遠鏡のフォローアップでどこまで明らかになるか（サイエンスがスクープされてしまうのか?）。あるいは、即座の近赤フォローアップがやはり本質的で、2030年代にHiZ-GUNDAMが出来たとして、まだユニークなサイエンスが残っているのか? Einstein Probeとの違い、その展望について教えて頂きたい

中国(+ESA, MPA)のEinstein Probeが2024年1月に打ち上げ成功、観測開始

## 2つの観測装置

- Wide-field X-ray Telescope (WXT): LEO搭載で感度はHZGと同等、従来より1桁高感度
- Follow-up X-ray Telescope (FXT): 追観測はX線で行う

WXTが高感度なため、従来よりも暗いGRBが多く発見され、この分野でのサイエンスは進むだろう

→ HZGチームとしてもEP発見天体に対する追観測計画を検討中

HZGの主サイエンスは遠方GRBの発見 → **赤外線での即時追観測が肝**

**EPの追観測スキームは現状と同じ**(可視・赤外の即時追観測なし)

→ イノベーションは起こらない

地上追観測は[昼夜・天域・天気]の制約により観測可能なのは <10%  
(GRONDの地上追観測の成功率は~4%)

HZGと同感度の3-4m級の地上望遠鏡を全世界に>10台配置するのは困難

→ **衛星自身が即時追観測する事こそがHZGの本質**



Einstein Probe

# 将来計画検討委員会からの(追加)質問への回答②

中国とフランスの国際共同研究によるSVOMが2024年6月に打ち上げに成功したようである。SVOMはX線望遠鏡、可視光望遠鏡を搭載した望遠鏡であり、主サイエンス目的はHiZと重複する部分があるように思える。SVOMとの違い、HiZの優位性について、説明して頂きたい。

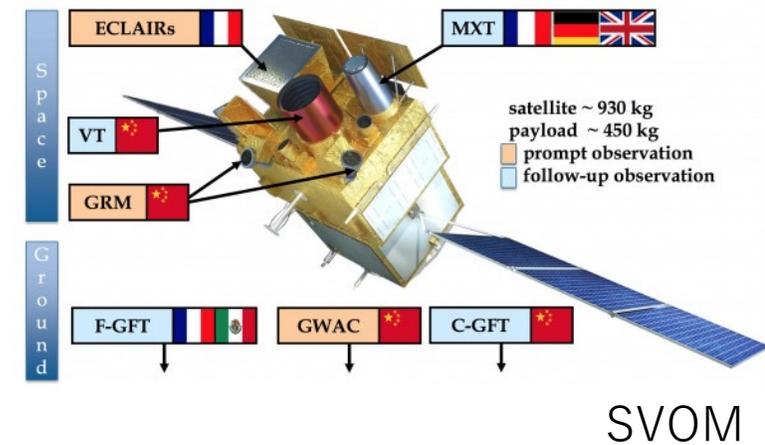
中国・フランス(+ $\alpha$ )のSVOMが2024年6月に打ち上げ成功、観測開始

## 3つの観測装置

- ECLAIRs telescope: coded-maskによるGRBの探査 (感度は従来と同程度)
- Gamma ray monitor (GRM): ガンマ線検出によるGRBの探査
- Microchannel X-ray Telescope (MXT) : X線での追観測
- Visible Telescope (VT) : 可視光での追観測

GRBの探査は集光光学系(LEO)を持たないので、感度は従来と同程度 (Einstein Probe, HiZ-GUNDAMより感度は1桁悪い)

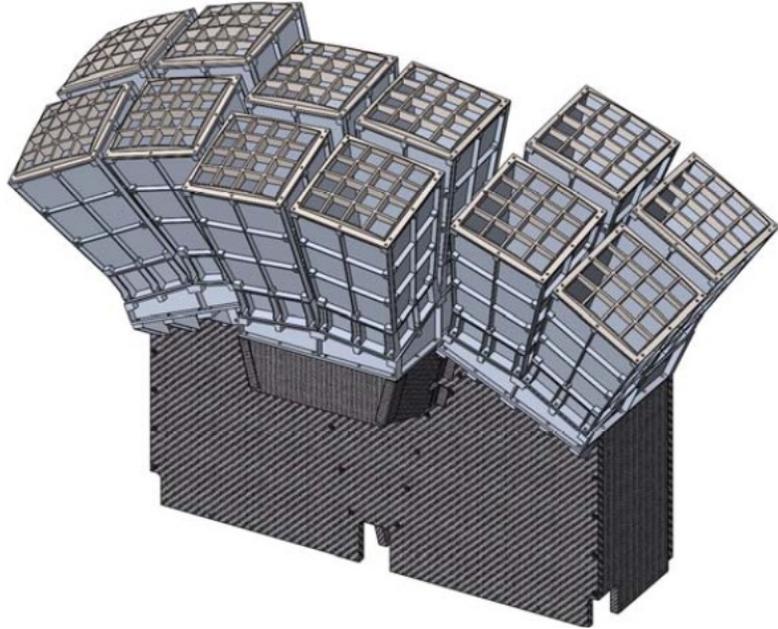
即時追観測は可視光およびX線のみ (遠方天体を選別できない)



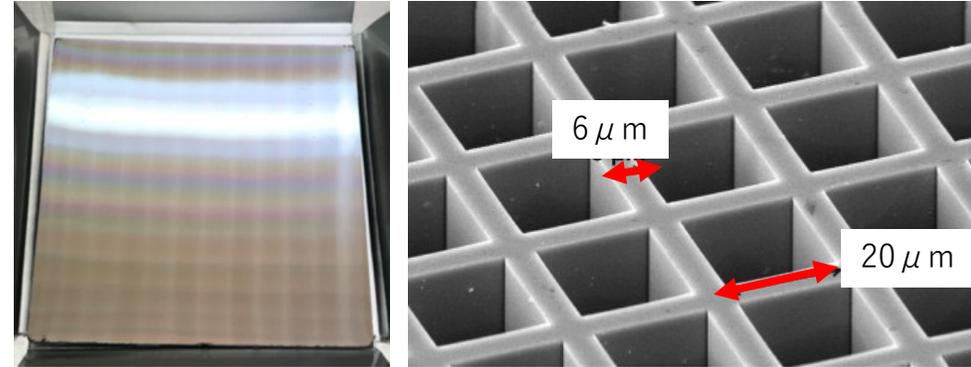
→ **HZGの本質である近赤外線での即時追観測はHiZ-GUNDAMまで実現される予定はない**

装置開発の現状 (特に近赤外線望遠鏡)

# Wide Field X-ray Monitor (WFXM)



Lobster Eye Optics (Micro Pore Optics)

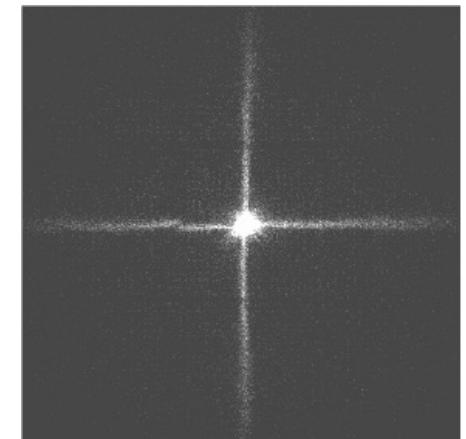


Items	Parameters
Energy band (keV)	0.5 – 4 keV
Telescope type:	Lobster Eye Optics
Module aperture size	192 x 192 mm <sup>2</sup>
Number of module	16
Field of View	0.5 str (in total)
Focal length	300 mm
Focal plane detectors	pnCCD array
Number of pnCCD	16
Sensitivity	~ 1e-10 (erg/cm <sup>2</sup> /s) For 100 sec
Position Accuracy	~ 3 arcmin

Digital Electronics Board for pnCCD



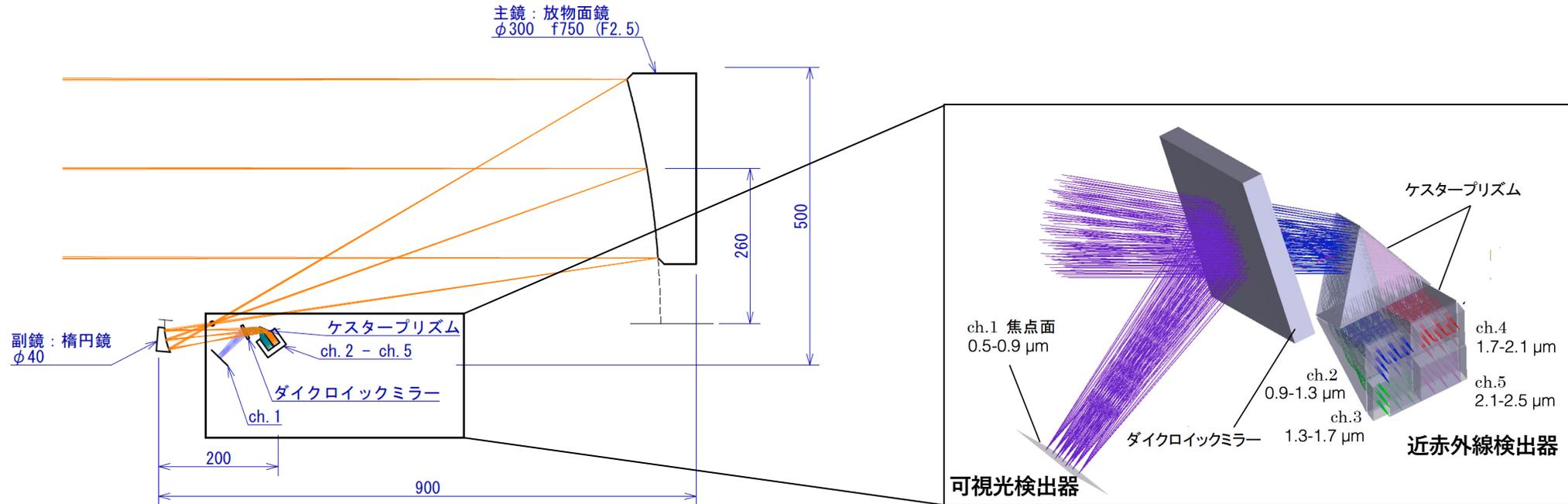
Image performance with X-ray beamline



(Left) Digital Electronics Board (BBM) for pnCCD  
(Right) Focal Image Obtained at 30m X-ray beamline

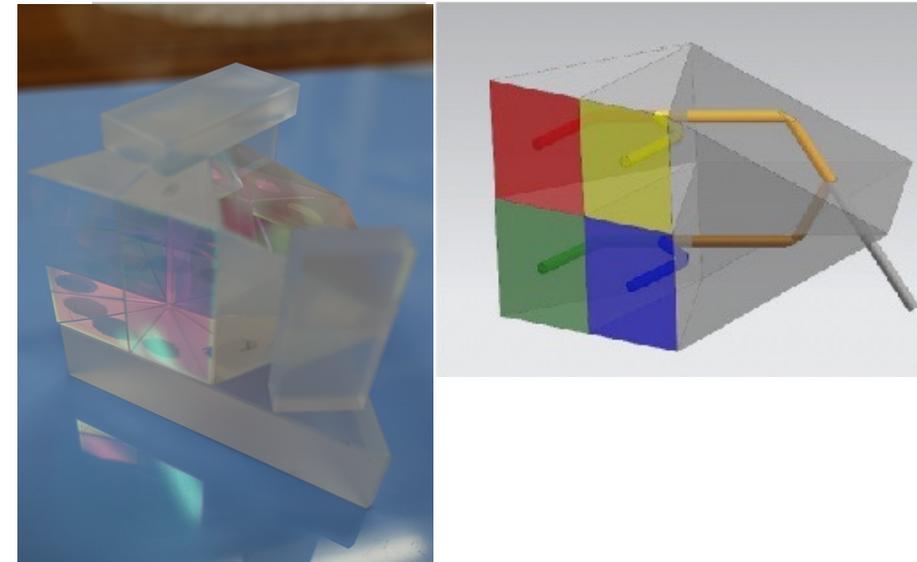
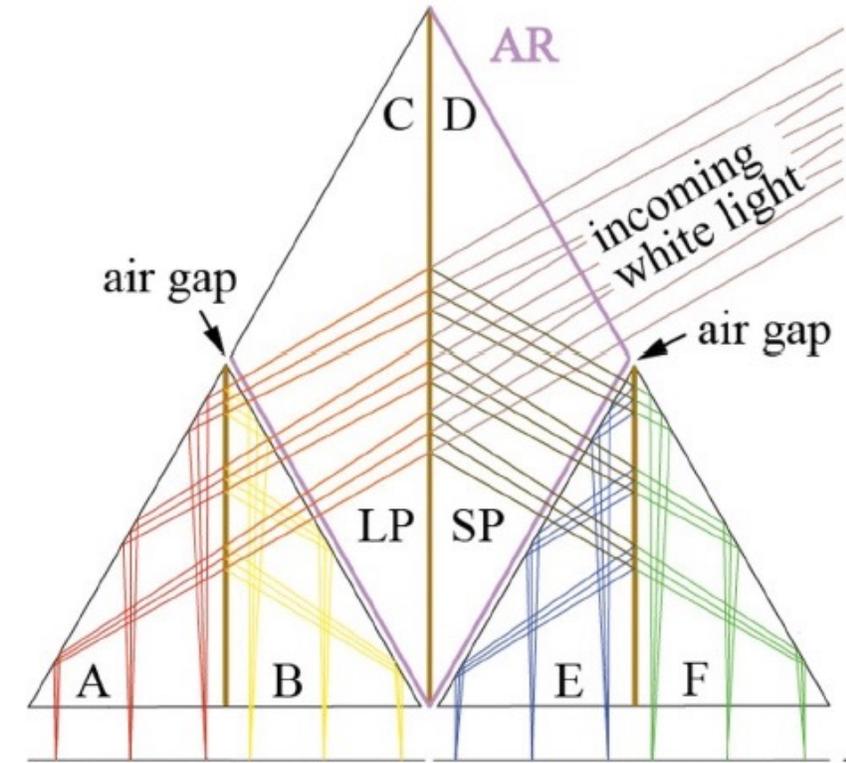
# 搭載する可視光・近赤外線望遠鏡

- 口径30cmの反射望遠鏡
- ダイクロイックミラー+ **ケスタープリズム**による5波長同時観(可視光1バンド、近赤外線4バンド)
- 視野15分角、検出器2個(可視光検出器1個、近赤外線検出器1個)
- 望遠鏡は<200K、近赤外線検出器は<120Kまで、放射冷却のみで冷却する
- 望遠鏡はほぼ全てアルミニウム合金で製造することで、冷却による歪みを相似収縮でキャンセル
- 現在はメーカーを交えて概念検討を実施中(光学系、熱構造設計、エレキ系)

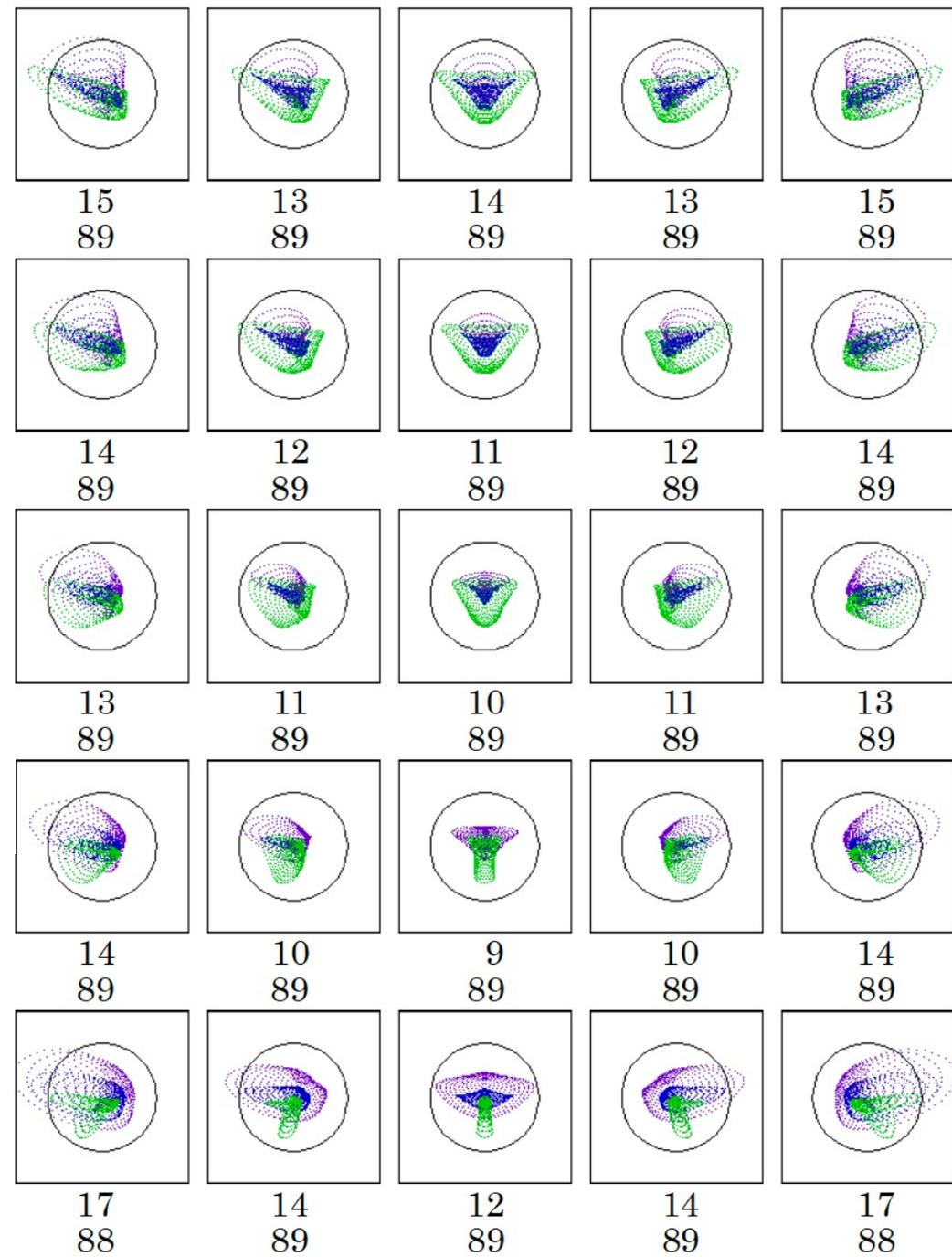
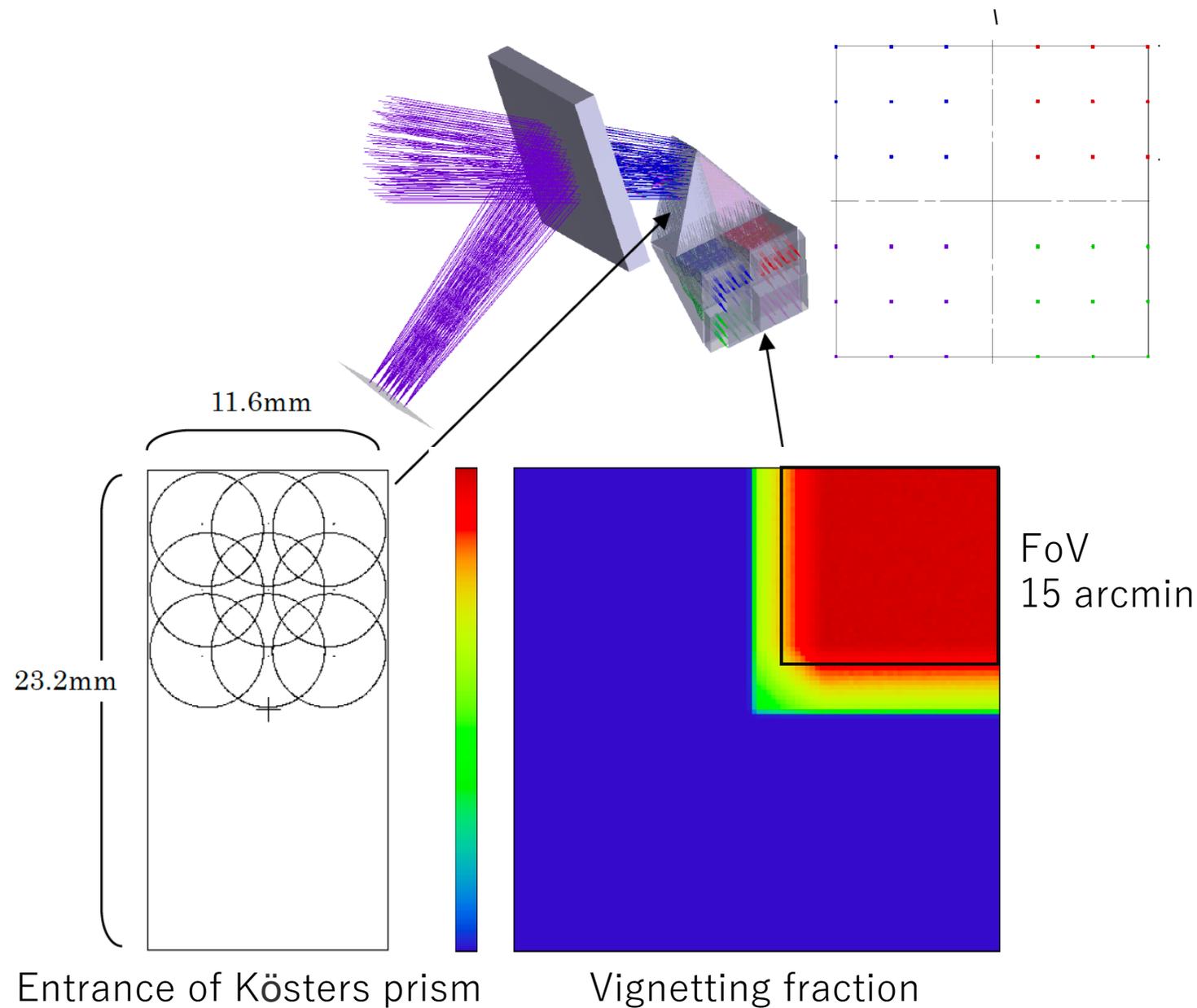


# ケスタープリズム

- 入射光を多波長分割する光学素子
  - プリズムの斜辺で全反射させることで、射出光の方向を揃えている
- 普通は1×4分割となるが、2つのプリズムを直行して重ねた**ダブルケスタープリズム**では2×2分割を実現できる
  - 視野要求から、HiZ-GUNDAMではダブルケスタープリズムを採用する
- ドイツの共同研究者らが超小型衛星用にケスタープリズムを開発していた知見を活用
- 試作品を制作して各種試験を実施中

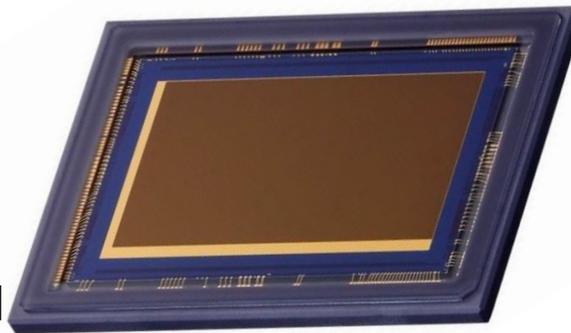


# 光学性能



# 検出器

Canon LI3030SAM



## 【可視光検出器】

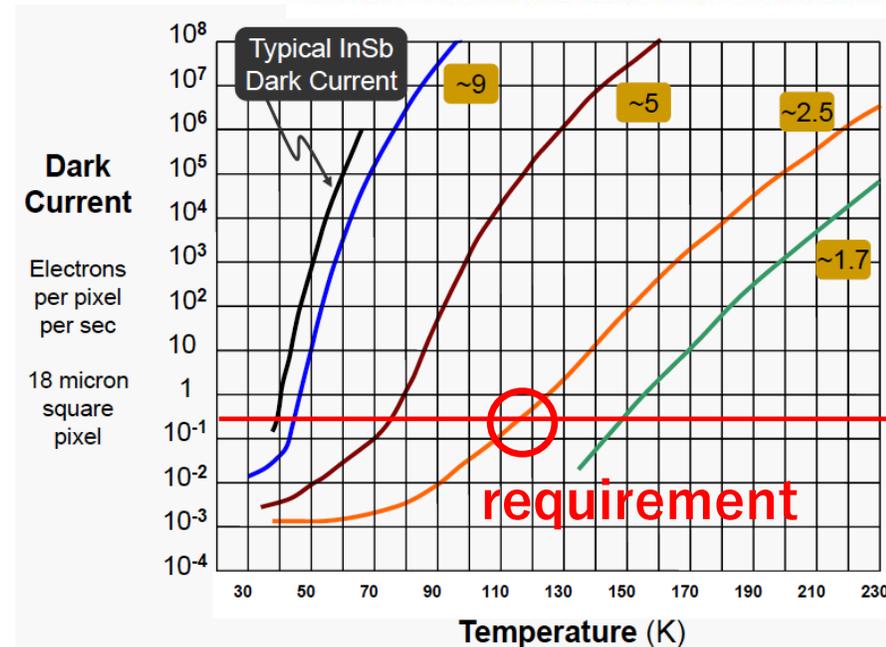
- Teledyne HyViSI or Canon LI3030SAM
- HyViSIの使用がベースラインだが高価なため、  
国産のCMOS検出機の利用可能性について検討中
  - 冷却試験、放射線試験



## 【近赤外線検出器】

- Teledyne H1RG + SIDCAR (or ACADIA) ASIC
- 感度要求より暗電流が  $< 0.3 \text{ e}^-/\text{s}$  となる必要  
--> 温度要求:  $< 120 \text{ K}$

SIDECAR ASIC Focal Plane Electronics



# 将来計画検討委員会からの(追加)質問への回答⑤

冷凍機なしのpassive 冷却システムはおそらくできると思うが、望遠鏡を色々な方向に向ける必要があり、常に太陽光と地球からの赤外線放射を十分にshielding できるかはよく分からなかった。  
(地球周回軌道で、このあたりのrequirementsが分からなかった)

次以降のスライドで熱解析の詳細について説明する

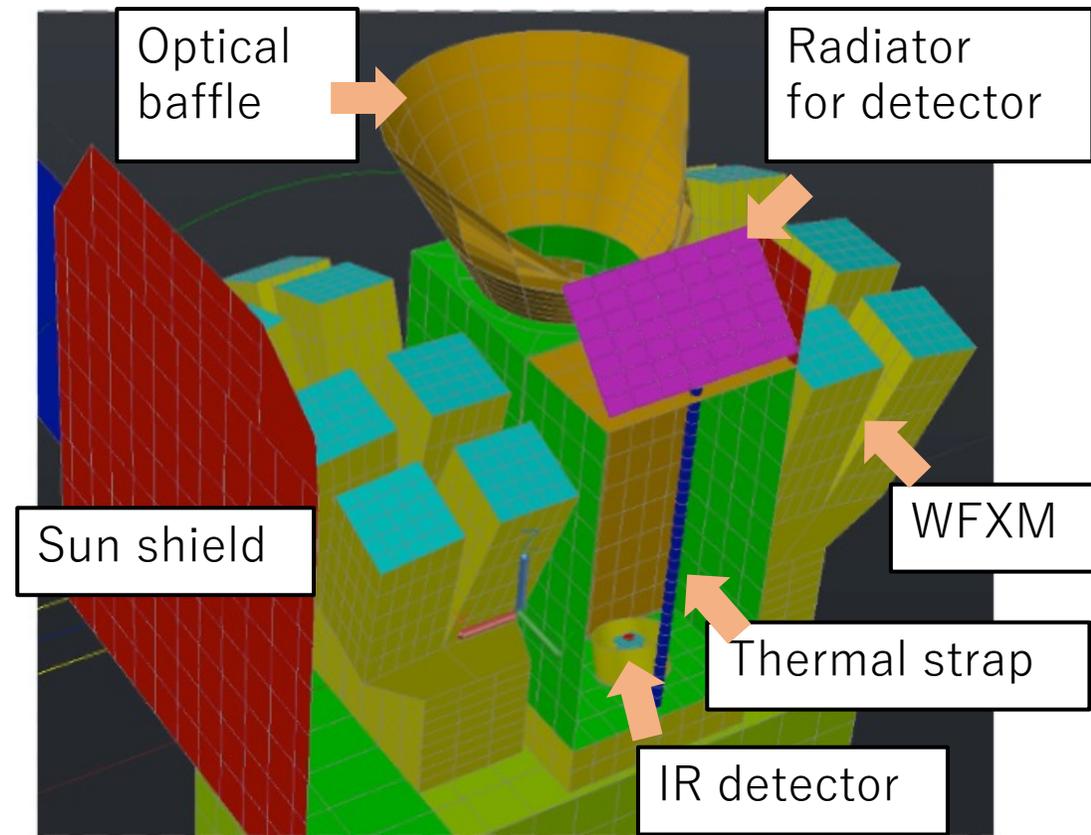
# 熱モデル

## 【熱的な要求】

- 望遠鏡 & 筐体 :  $<200\text{ K}$
- 近赤外線検出器:  $<120\text{ K}$
- 放射冷却 (冷凍機なし)

## 【熱モデル】

- 科学観測装置(赤外線望遠鏡・広視野X線モニターなど)をモデル化し、Thermal Desktopで熱解析を実施
- 科学観測装置はサンシールドにより太陽光入射から保護.
- 近赤外線検出器の冷却のため、検出器専用の放射板を設置して冷却



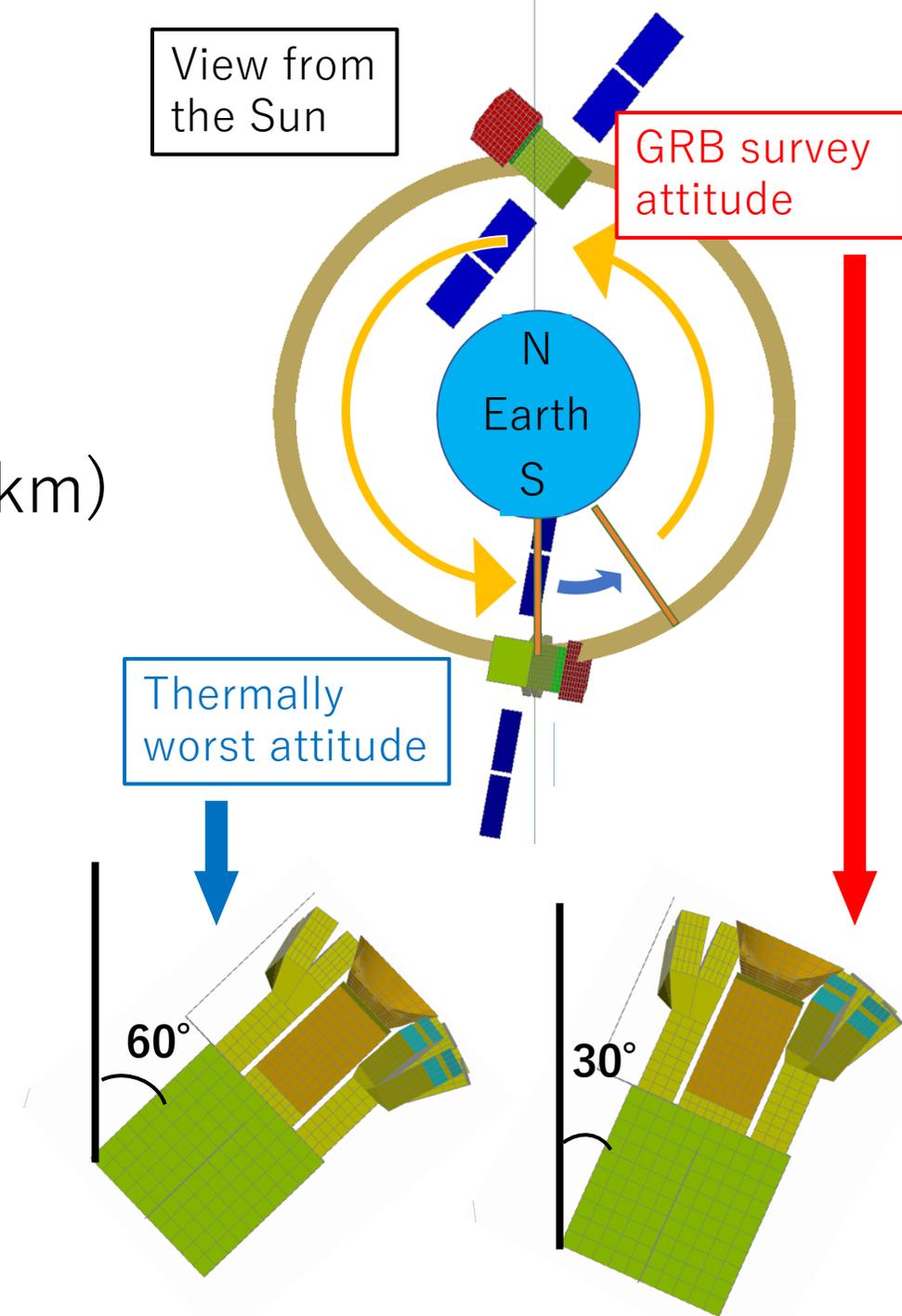
# 熱解析

## 【軌道】

- 昼夜境界線上の太陽同期極軌道 (高度 ~500 km)

## 【熱解析における衛星姿勢】

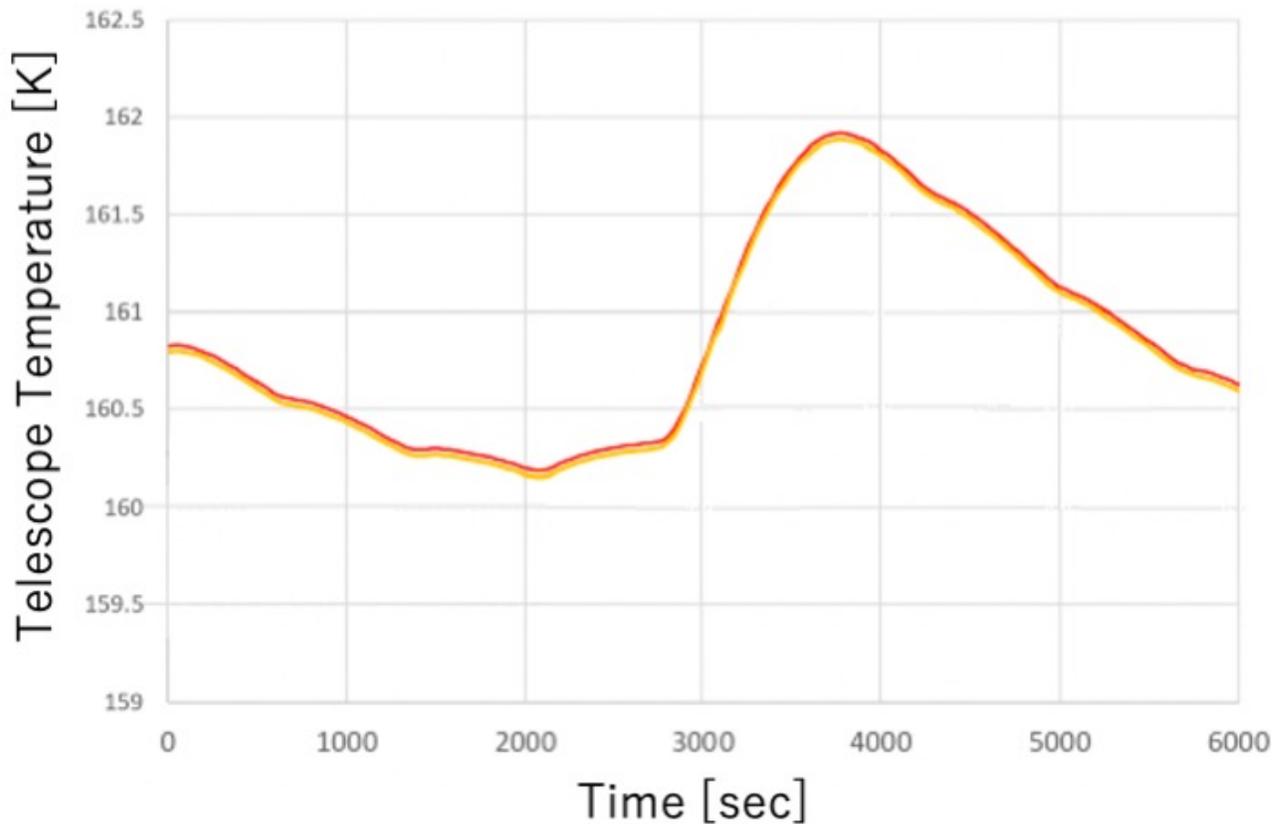
- GRB探査姿勢
  - 反太陽方向: 30 deg
  - 進行方向: 50 deg
- GRB追観測における熱的最悪姿勢
  - 反太陽方向: 60 deg
  - 進行方向: 80 deg



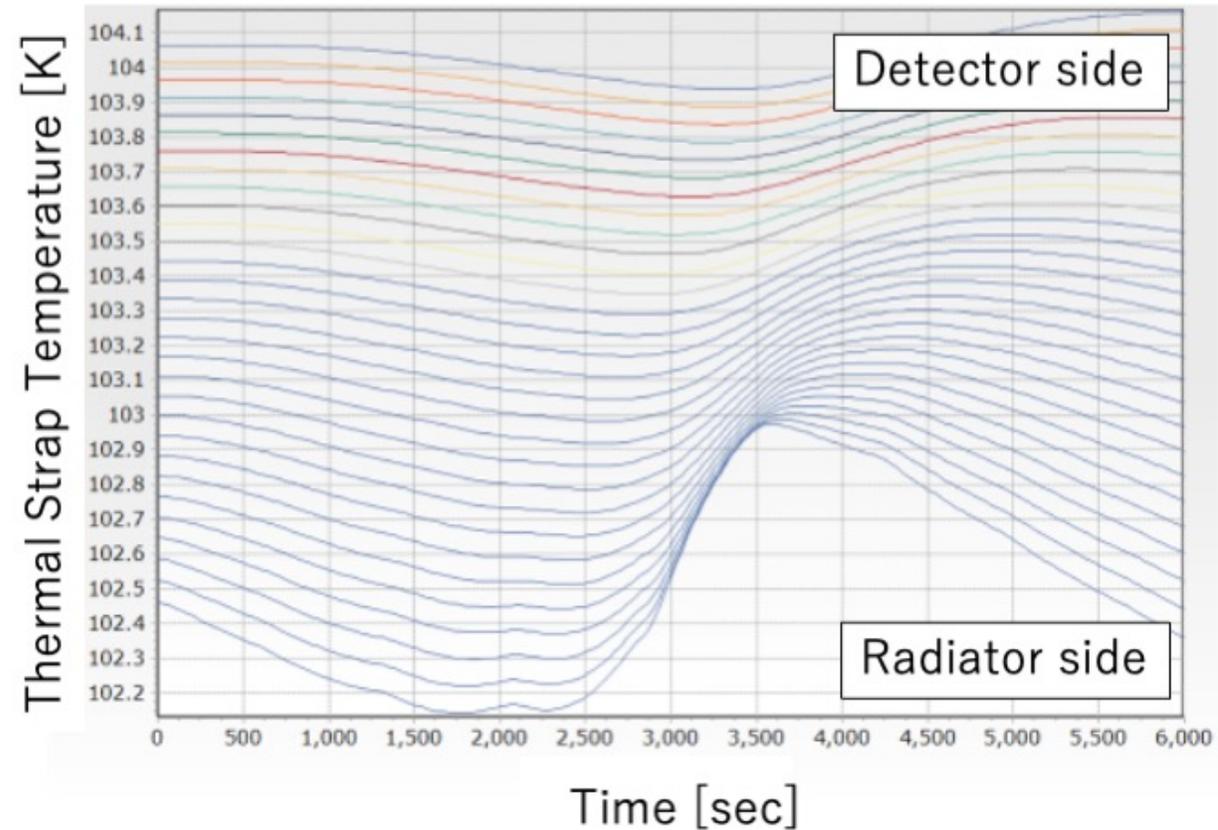
# 熱解析の結果

- 熱的成立性を確認できた
  - 望遠鏡筐体:  $<162$  K & 近赤外線検出器:  $<105$  K

Temperature profile of the Hottest node of the telescope



Temperature gradient of the thermal strap



# まとめ

- HiZ-GUNDAMは、ガンマ線バースト (GRB) 観測を通して、初期宇宙探査とマルチメッセンジャー天文学を推進する衛星計画
- 搭載する近赤外線望遠鏡で発見したGRBの即時追観測を行う
  - 口径30cmの反射望遠鏡
  - ケスタープリズムを用いた5バンド同時撮像 (0.5-2.5  $\mu\text{m}$ )
  - アルミニウム鏡を使用したアサーマル光学系
  - 放射冷却による冷却 (望遠鏡 <200 K, 近赤外線検出器 <120 K)
- 望遠鏡の概念検討を進めており、設計解を得られている
  - 2枚鏡による光学設計解の確認
  - 熱的最悪姿勢においても熱的要求を満たす熱的成立解の確認
- 今後の予定
  - 2024 - 25年度にかけて望遠鏡BBMを製造し、アサーマル光学系のコンセプトを実証
  - 2026年度にダウンセレクション