

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)

福井陽喜、宮坂明宏 (都市大)、松原英雄、土居明広、篠崎慶亮 (ISAS/JAXA)
松浦周二 (関学大)、川端弘治 (広島大)、秋田谷洋 (千葉工大)、米徳大輔 (金沢大)
ほか HiZ-GUNDAM チーム

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

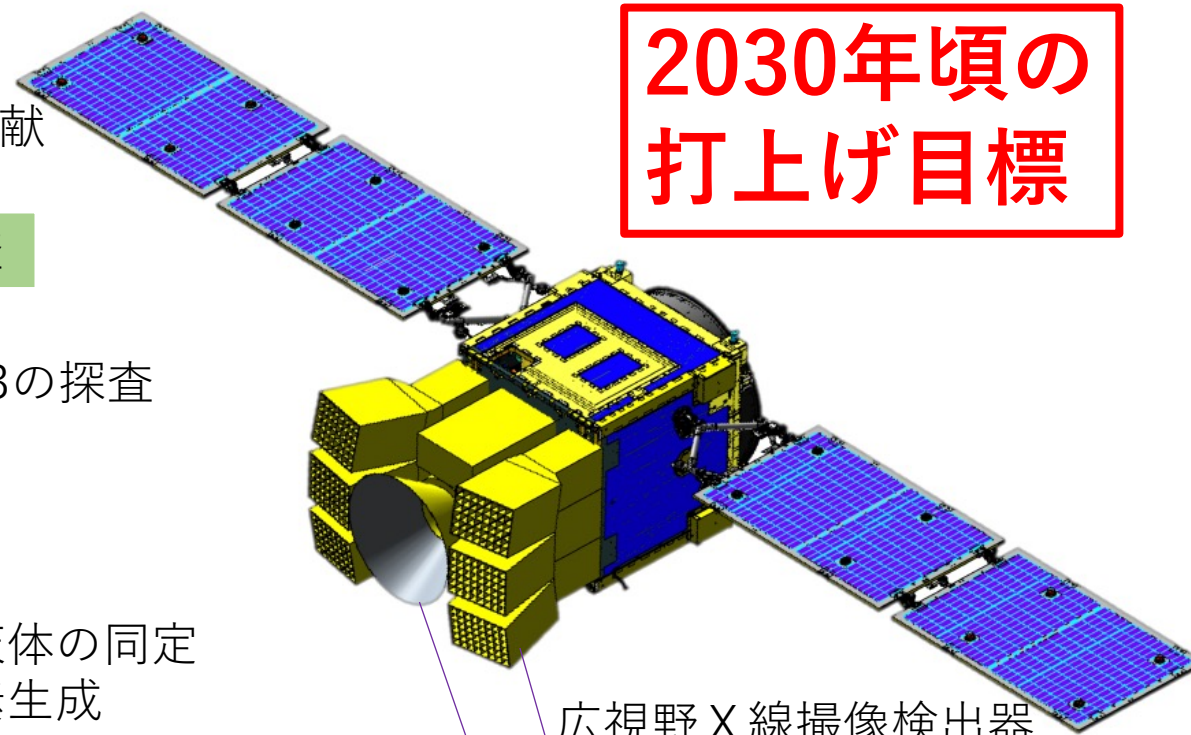
観測：重力波・高エネルギーニュートリノと同期した突発天体の同定

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年頃の
打上げ目標



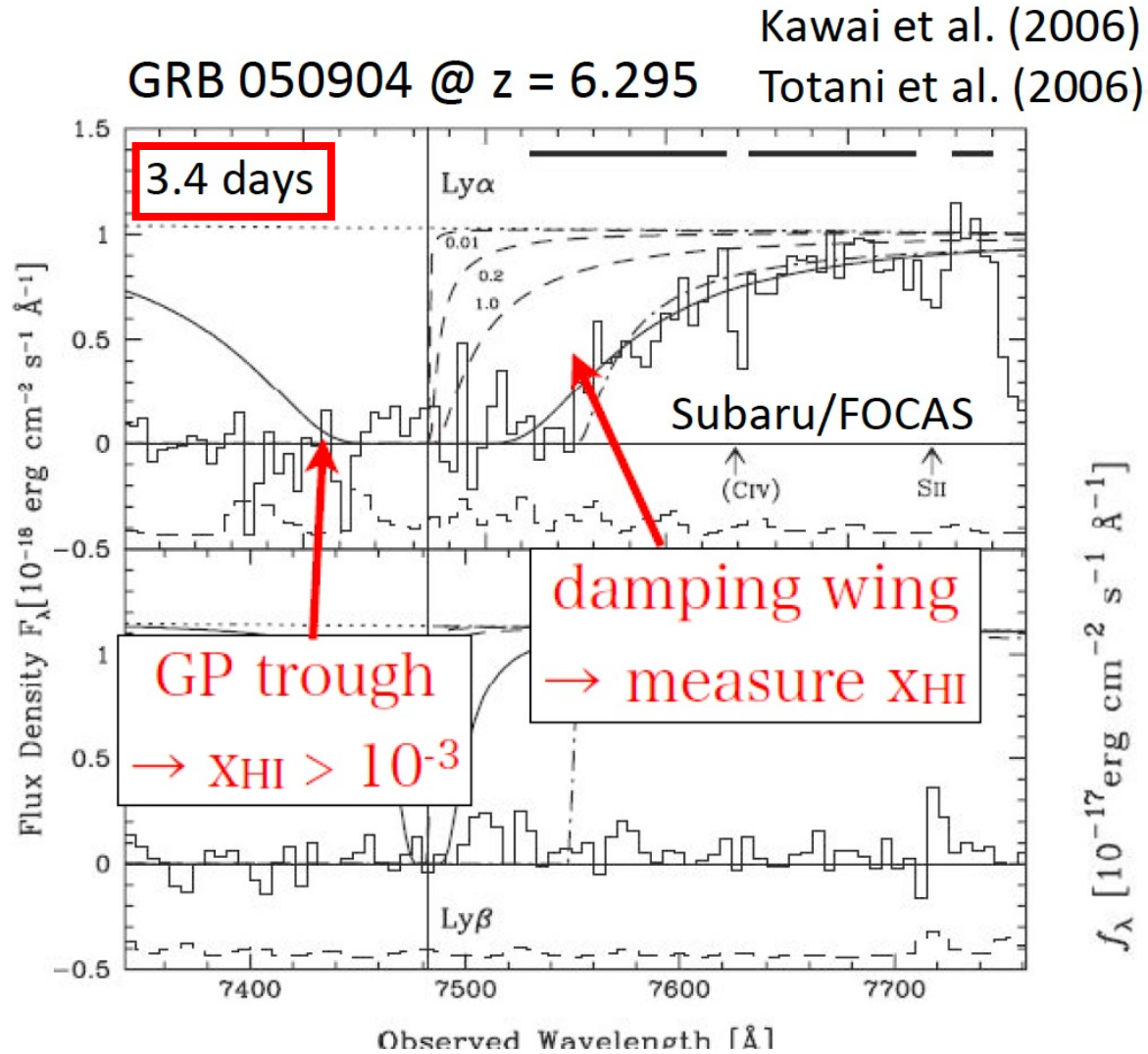
広視野X線撮像検出器
・ ロブスターアイ光学系
・ pnCCD 撮像検出器

近赤外線望遠鏡
・ アサーマル光学系
・ 5バンド同時測光

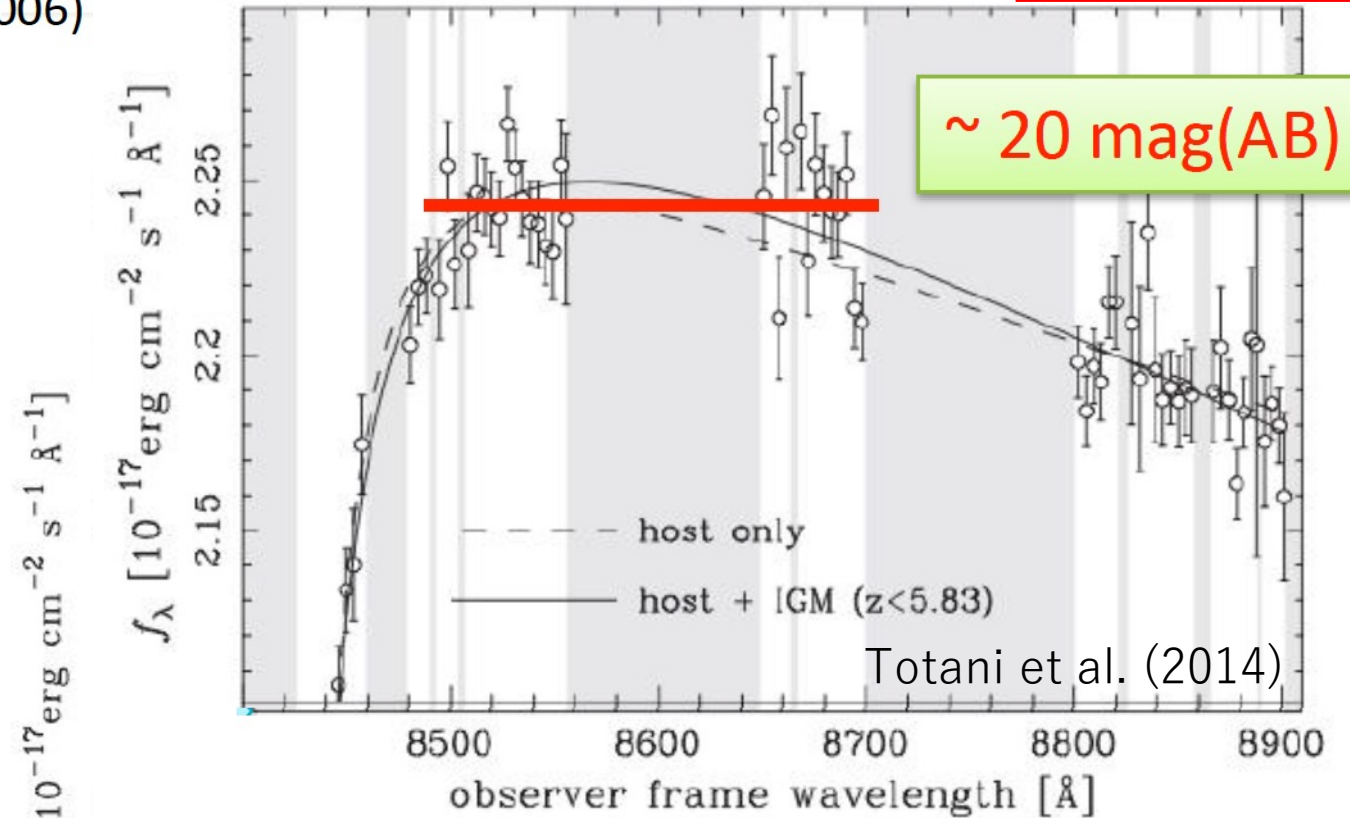
GRBを用いた初期宇宙探査の意義

- 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 α 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）

過去の観測例 (すばる望遠鏡 FOCUS分光)



GRB 130606A @ $z = 5.913$ 10.4 – 13.2 hrs



$x_{\text{HI}} < 0.17$ and 0.60 , at 68 and 95%

The existence of neutral hydrogen was found more than 3σ statistical level for GRB130606A. The neutral fraction of IGM is measured as $x_{\text{HI}} = 0.1 - 0.5$.

従来のGRBでの初期宇宙探査の問題点

1. 人工衛星でGRBを検知し、その位置を地上にアラートする
↓ 1時間以内
2. 口径30cm~1m級の小型望遠鏡で残光を発見する
↓ 数時間~1日以内
3. 口径2~4m級の中型望遠鏡で赤方偏移を同定する
↓ 約1日後
4. 高赤方偏移GRBに対して、口径8m級の大型望遠鏡で分光観測する

大型望遠鏡が観測する頃にはGRB残光が暗くなってしまっている
Swift衛星の18年の観測期間で、 $z > 7$ のGRBは2例のみ
しかもこれらの分光スペクトルは統計精度が低い

HiZ-GUNDAM衛星の目標

HZGでまとめて実現

1. 人工衛星でGRBを検知し、その位置を地上にアラートする

↓ 1時間以内

2. 口径30cm~1m級の小型望遠鏡で残光を発見する

**300秒以内で自律的に
追観測開始**

↓ 数時間~1日以内

3. 口径2~4m級の中型望遠鏡で赤方偏移を同定する

1時間以内

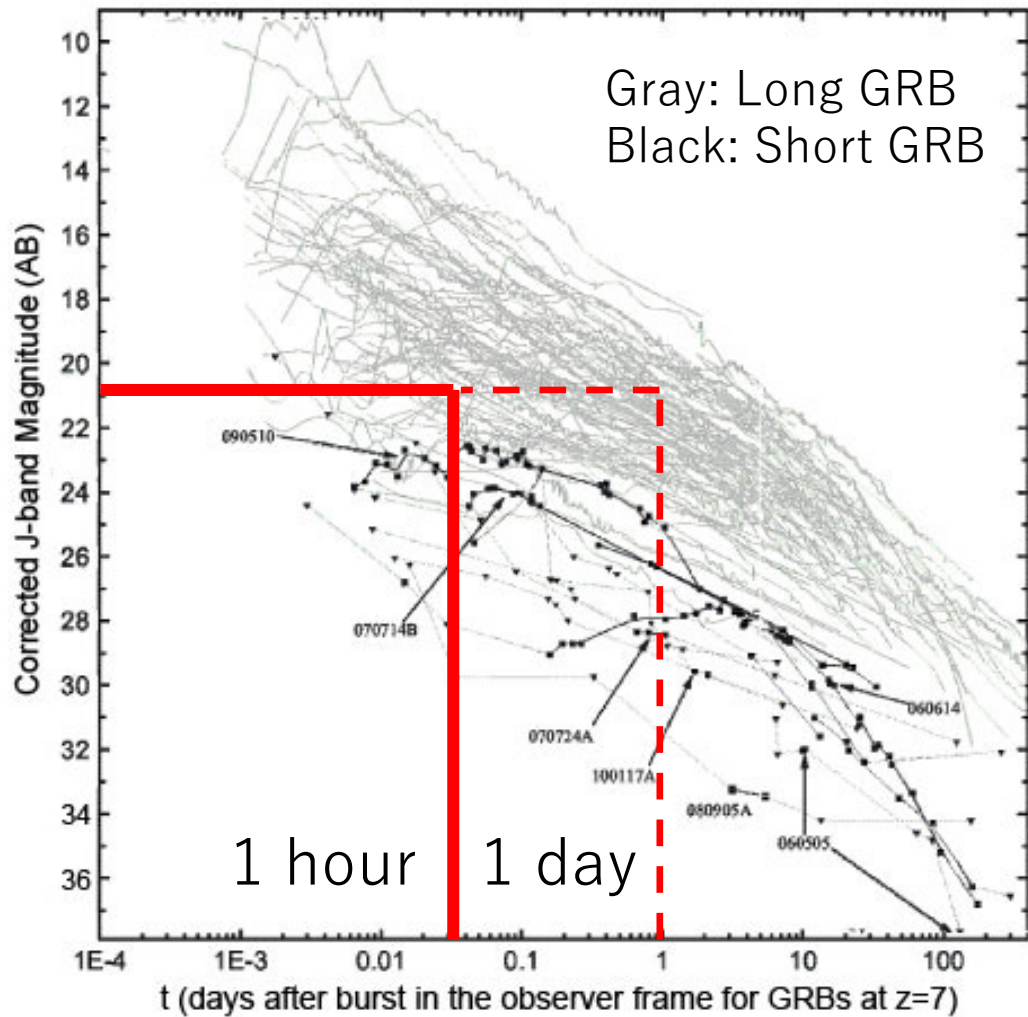
↓ 約1日後

4. 高赤方偏移GRBに対して、口径8m級の大型望遠鏡で分光観測する

GRB発見から大型望遠鏡による追観測の実現までを迅速化
HZGで発見したすべてのGRBに対して赤方偏移を測定するので、
高赤方偏移GRBの見落としがない

地上追観測に対する要求

Expected Lightcurve for GRBs @ $z = 7$



Based on Kann et al. (2010)

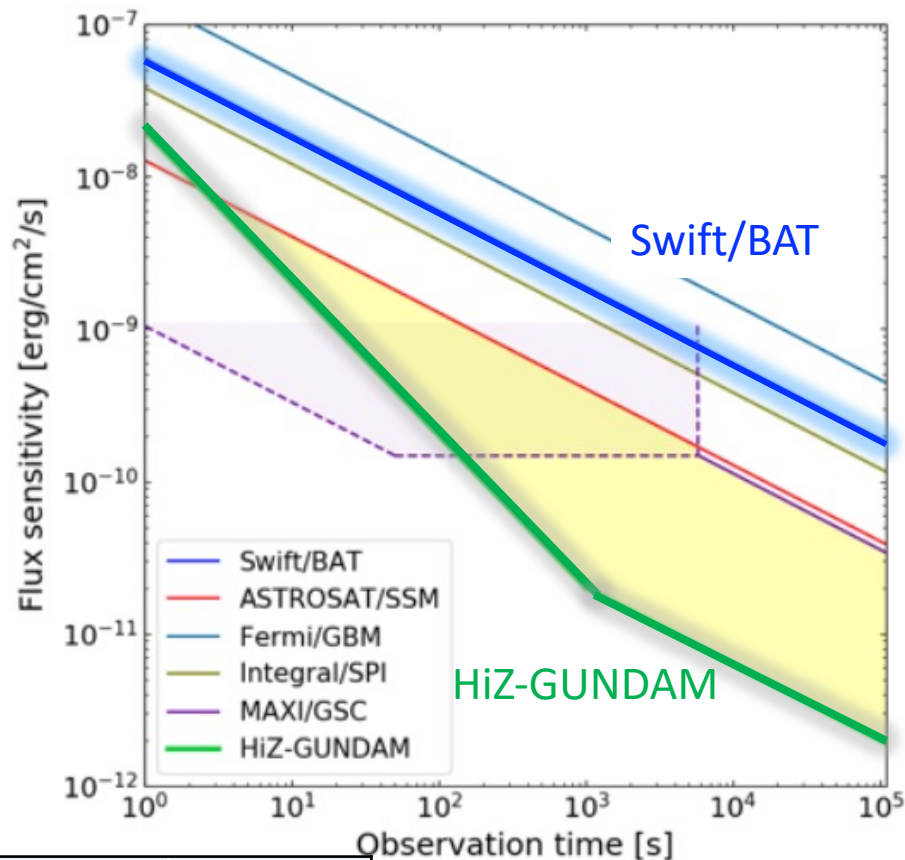
左の図は、距離が既知のGRBに対して、そのGRBを $z=7$ に置いた時に予想されるライトカーブ

発見後1時間で追観測が実施できれば、予想される明るさは**21等**より明るい (>90%以上の確率で)

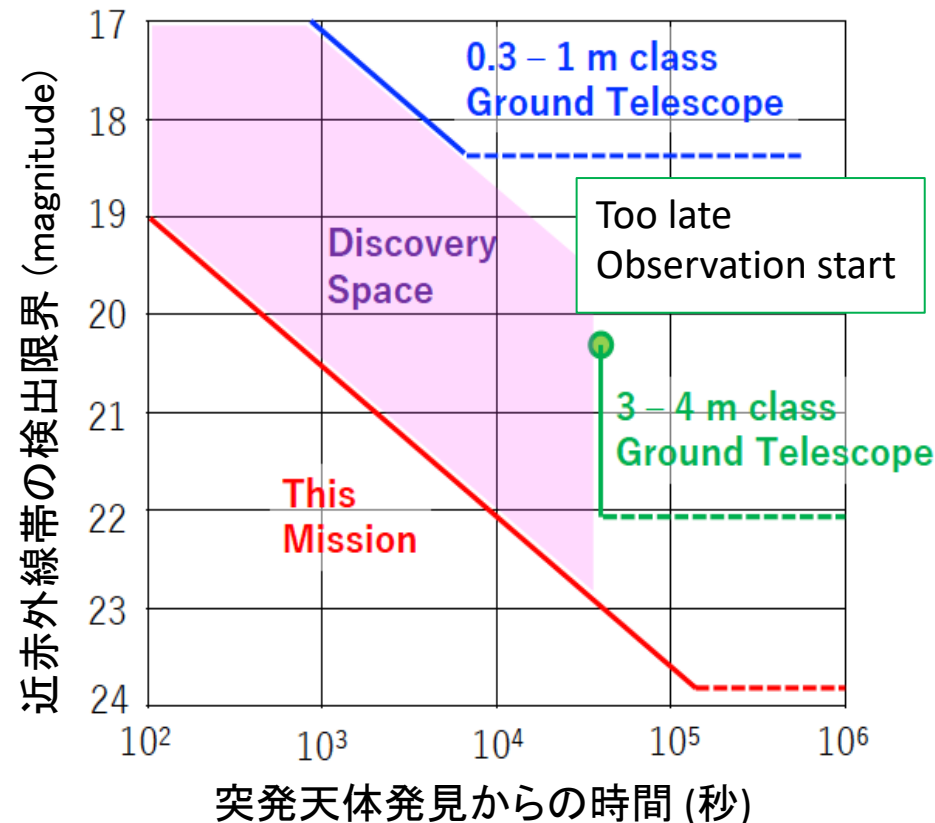
近赤外線分光観測を実施できる国内唯一の装置はかなた望遠鏡(1.5m)のHONIRだが、その感度は13等級程度で分光観測は不可
せいめい望遠鏡に分光器を搭載しても、1等深くなる程度なので状況は変わらない

8m級のすばる望遠鏡が必須

検出期待値



追観測の感度



X-ray	event/yr
GRB ($6 < z < 12$) best	26
GW/SGRB prompt	~8
GW/SGRB E.E.	~8
GRB/SGRB	~700
Low-Luminosity GRB	> 5
X-Ray Flash	50

X-ray	event/yr
Tidal Disruption	60
SN Shock Breakout	> 5
Stellar Flare	many
Direct collapse BH	a few
Accretion induced collapse	~10

Near Infrared	event/yr
afterglow ($6 < z < 12$) best	13
macronova	~8 + α
Supernovae	40
afterglow of GRB/SGRB/XRF	many
Variable stars	many

$z > 6$ の GRB を年間で ~10 個程度 アラート

光学設計の変更

旧光学設計

多段ダイクロイックミラーによる4波長同時観測
(可視光1バンド、近赤外線3バンド)

視野 34分角、検出器4個 (可視光検出器1個、近赤外線検出器3個)

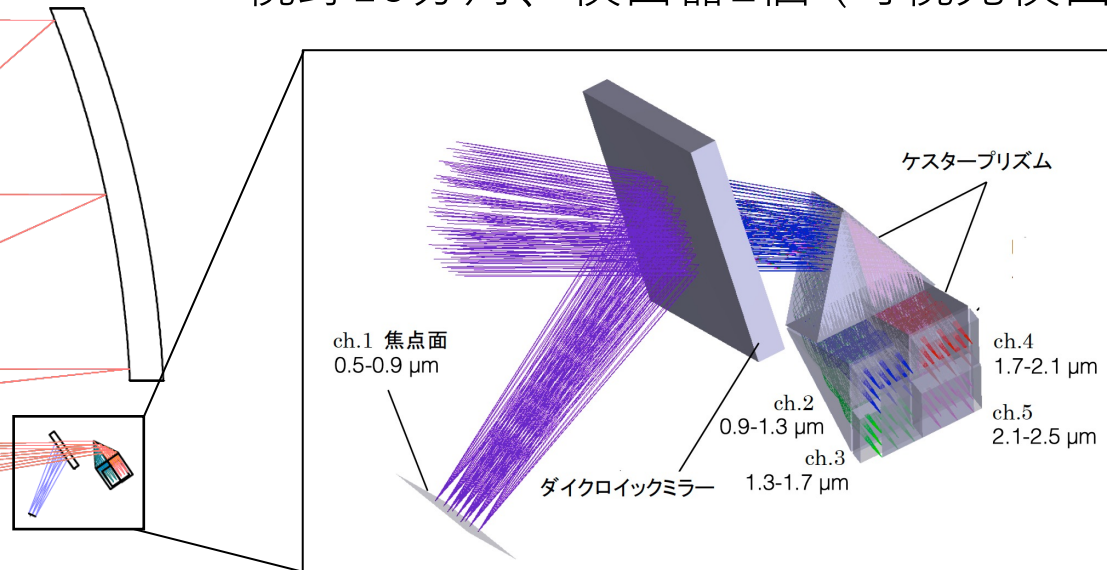
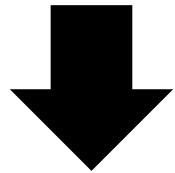


新光学設計

ダイクロイックミラー+**ケスタープリズム**による5波長同時観測
(可視光1バンド、近赤外線4バンド)

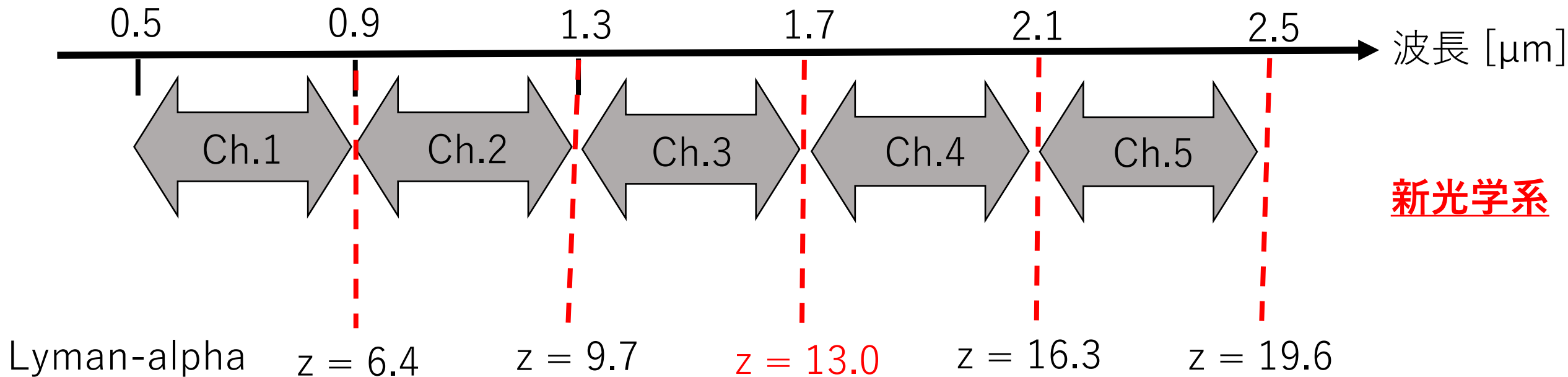
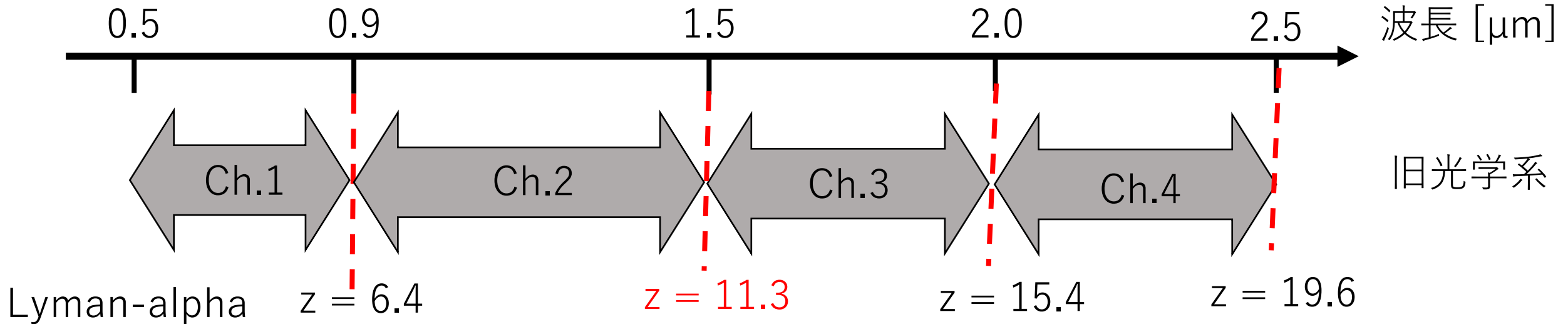
視野15分角、検出器2個 (可視光検出器1個、近赤外線検出器1個)

104.17 MM



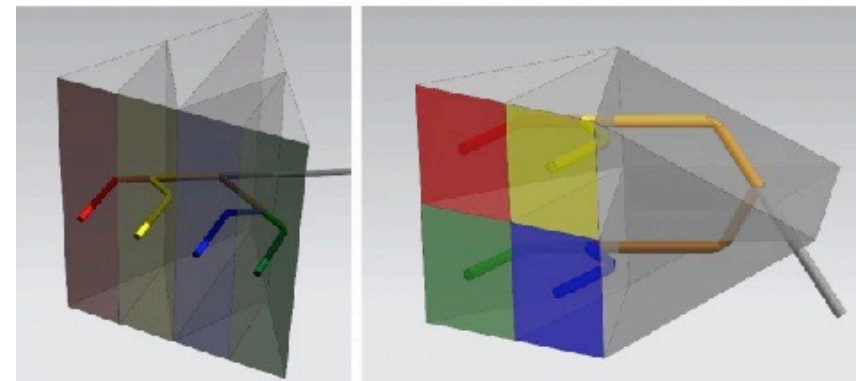
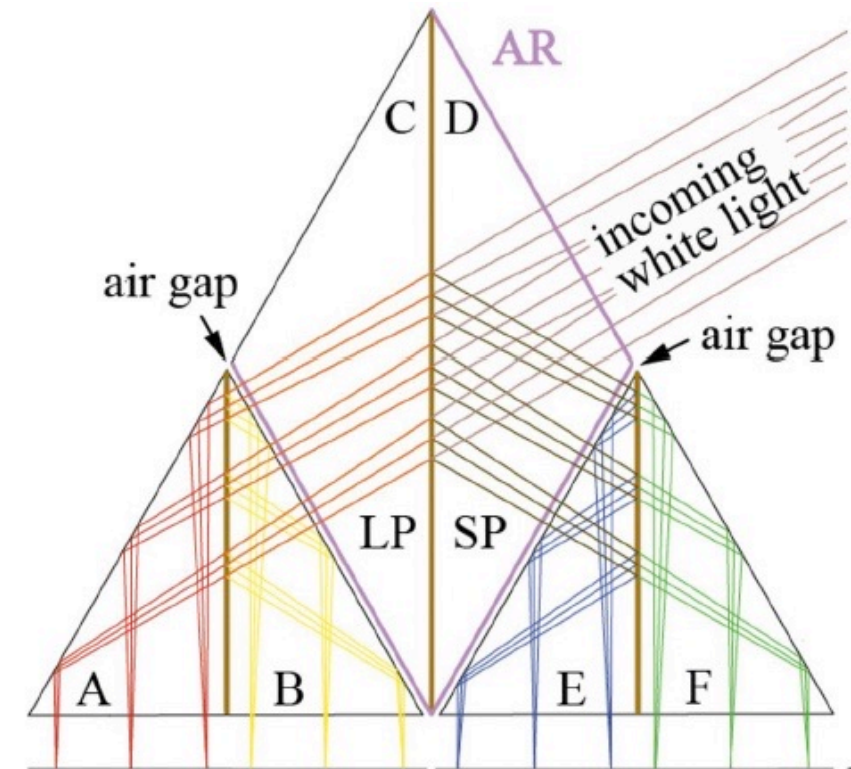
- 高価な赤外線検出機の個数の削減
- バンド数の増加
- 視野は縮小

観測波長の切り分け方の変更



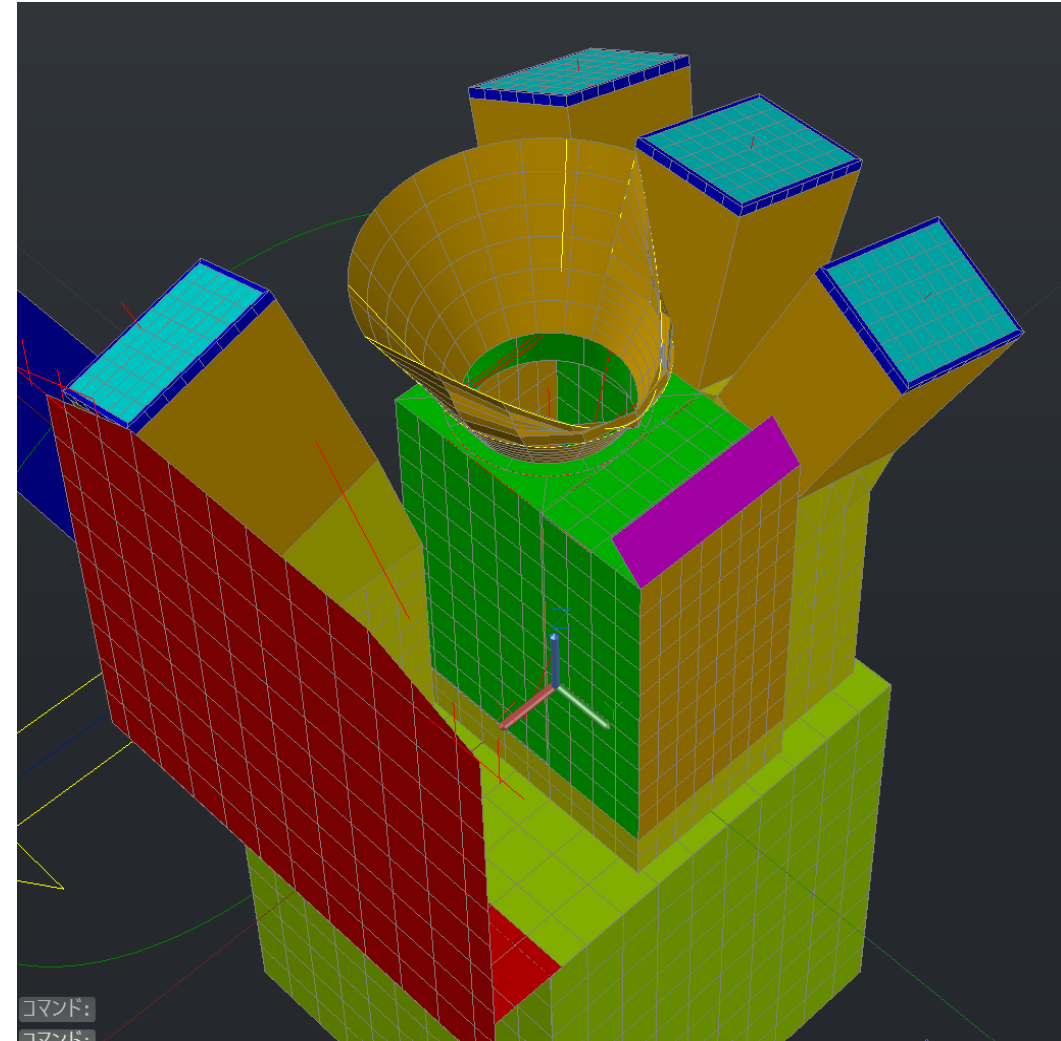
ケスタープリズム

- 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
- 国内メーカーと協力して今年度中に試作品を制作して各種試験を実施する



熱設計の改良 → 詳細は福井によるポスター発表

- 感度要求から、
 - 望遠鏡筐体: <200K
 - 赤外線検出機: <120Kに冷却する必要がある
- 旧光学系では機械式冷凍機の搭載を前提としていた
- 新光學系では、**機械式冷凍機なしで、放射冷却のみ**で目標温度を達成できる熱設計解を得ることができた。
- 現在はメーカーとの概念検討で、この熱設計を詳細化している



熱モデル計算の一例

HiZ-GUNDAMの現在のステータス

現在までの経緯

- 2018年1月 JAXA/ISAS 公募型小型衛星計画 ミッションコンセプト提案
- 2018年5月 ミッションコンセプト採択
- 2021年1月 プリプロジェクト移行審査
- 2021年10月 プリプロジェクト移行再審査 → 合格
- 2023年4月 公募型小型衛星5号機 ダウンセレクション審査
2月に再審査を受けることとなった

大型望遠鏡との協調追観測による科学成果創出までを
ミッションに含めることが合格の条件

【今までのミッションスコープ】

高赤方偏移GRBの発生をアラートすることまでが衛星の役割
大型望遠鏡による追観測はミッション外

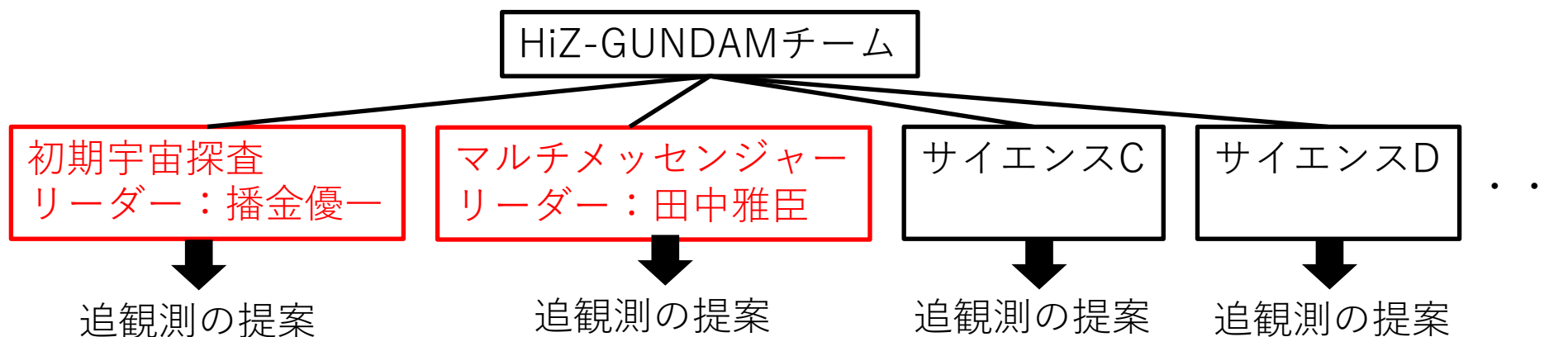


【新しいミッションスコープ】

大型望遠鏡で協調追観測による科学成果創出までをミッションに含める

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する
 - 2大テーマである「初期宇宙」と「マルチメッセンジャー」で検討を開始した
- GRBアラートに対して、すばるなどの国内望遠鏡で即応的(1時間以内)に追観測を実現したい(2030年代)
 - すばるとの協調観測など、コミュニティと議論しサポートを得ていく努力をしていく(光赤天連での議論、サポートを期待)



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

追観測可能な8m級望遠鏡の分光器

- 近赤外線の広波長帯(J,H,K)を1度の観測で分光できることが重要
- すばる
 - NINJA: J, H (+ K) を同時分光観測、21.5 – 22.0 mag (6時間積分, S/N = 10)
AOが使える唯一の装置なので、感度的にも最適
 - PFS: 多天体分光が特徴なので、1天体分光には不向き
現在の想定では当日朝9時までにToO発出する必要があり、観測まで >9時間
- ほか、Keck/NIRES、VLT/X-shooter、Gemini/SCORPIO(2024~)で近赤バンド同時分光観測が可能
 - ただし、LTAOが使えるNINJAの方が0.5 – 1.0mag 深い
- Keck/MOSFIRE, Gemini/GNIRSなどはバンドごとの分光なので効率が落ちる

すばる/NINJAでの追観測が最適

光赤天連での議論・サポートを期待

- 2030年代に、HiZ-GUNDAMが発見した高赤方偏移GRBを、すばる等を用いて効率的に追観測を実現したい
 - すばる3の有力なサイエンスの方向性にならないか
(タイムドメイン天文学、マルチメッセンジャー天文学、スペース観測との協調)
- その実現のため、光赤天連やすばるSACなどの場で、必要な対応について議論を行い、理解を求めていく活動を行なっていく
 - ToOの迅速化(アラートから1時間以内の観測開始)の実現に向けての議論
 - JAXA-NAOJ間の協定の可能性はある？
 - ある条件を満たしたGRBをHZGが発見した場合、すばるで優先的に追観測を行う、など
 - 「追観測による成果創出」までをミッションに含めることがJAXAから求められており、これはミッション選定にも大きく関わる

皆様からのご意見、サポートをよろしく申し上げます

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
- 公募型小型衛星計画5号機として選定されることを目指して、2月に再審査を受ける
 - 選定されれば、2030年頃の打ち上げを目指して開発が本格化する
- GRB発見のアラート発出に加え、その追観測による科学成果の創出までをミッションスコープに含める
 - チーム内に追観測チームを結成して検討を開始した
 - すばる望遠鏡との協調観測など、コミュニティ内での議論を進めていく
- HiZ-GUNDAM搭載の近赤外線望遠鏡の開発を進めている
 - ケスタープリズムを採用した新しい光学設計を採用する方針
 - 機械式冷凍機なしで冷却する熱設計を前提とする