

<研究紹介>

宇宙の一番星をねらえ！

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM

Hunting for the First Star of the Universe!

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

米徳大輔^{*†‡}, HiZ-GUNDAM Collaboration

Daisuke Yonetoku and HiZ-GUNDAM Collaboration

I. はじめに

私たちの地球が存在する天の川銀河には 2000 億個の恒星があるとわれ、宇宙には 2000 億個の銀河があると見積られている。夜空を見上げると漆黒の空に数多の星が輝き、未来永劫、不変的な姿を思い浮かべる方も多いかもしい。しかし、星は核融合反応でエネルギーを作り出して輝いているため、燃料が無くなると寿命を迎えてその一生を終える。質量の軽い星はガスを放出して惑星状星雲と呼ばれる天体となり、太陽質量の 8 倍よりも重たい星は超新星爆発を起こして数 10 日間にわたって明るく輝き、中心部に中性子星を作り出す。さらに、太陽質量の 40 倍以上の星になると、宇宙最大の爆発『ガンマ線バースト』を発生させてブラックホールを作り出す。超新星爆発やガンマ線バーストで撒き散ったガスは、次の世代の星の原料となる。宇宙は決して静穏ではなく、活発に輪廻転生を繰り返している。

さて、ここで疑問が生じる。ビッグバンで誕生した直後の宇宙には「天体」は存在しないと考えられるが、宇宙で最初の星（第一世代星、宇宙の一番星）は、いつ、どのように作られたのか？そして、宇宙進化の中で様々な種類の天体が存在する「多様性」をどのように獲得してきたのか？本稿では、そのような問いへの観測的なアプローチとして検討している HiZ-GUNDAM という名称の人工衛星計画を紹介する。

II. 初期宇宙では何が起こっていたのか

宇宙がどのように誕生し、そして、どのような進化を遂げてきたのかを知ることは、人類の世界観に直結する根源的な欲求と言える。図 1 に示すように、宇宙が誕生した時（正確には「宇宙の晴れ上がり」の直後）は水素ガスとヘリウムガスばかりで、天体が 1 つも存在しない、つまり光のない『暗黒時代』であった。重力でガスが集まり、宇宙の一番星が誕生すると、その輝きは周辺環境を電離していく（宇宙再電離という）。そして、星の核融合で作られた新たな元素がガンマ線バーストや超新星爆発によって宇宙空間に撒き散らされ、多様な元素が存在する環境

* 金沢大学理工研究域数物科学系

† 金沢大学理工研究域先端宇宙理工学研究センター

‡ JAXA

へと様変わりしていく。このシナリオは理論研究から提唱されてきたものであるが、観測的には明らかになっていない。宇宙誕生直後の歴史を理解するためには、遠くの宇宙（すなわち過去の宇宙）を観測することが直接的な方法で、天文学における主要テーマの1つである。そこで我々は「ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 (High-redshift Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission: HiZ-GUNDAM)」[§]という人工衛星計画を提案している^{1),2)}。ガンマ線バーストという宇宙で一番明るい爆発を観測することで、宇宙の一番星が誕生する頃まで遡って環境を探査し、観測データからその歴史を紐解く計画である。

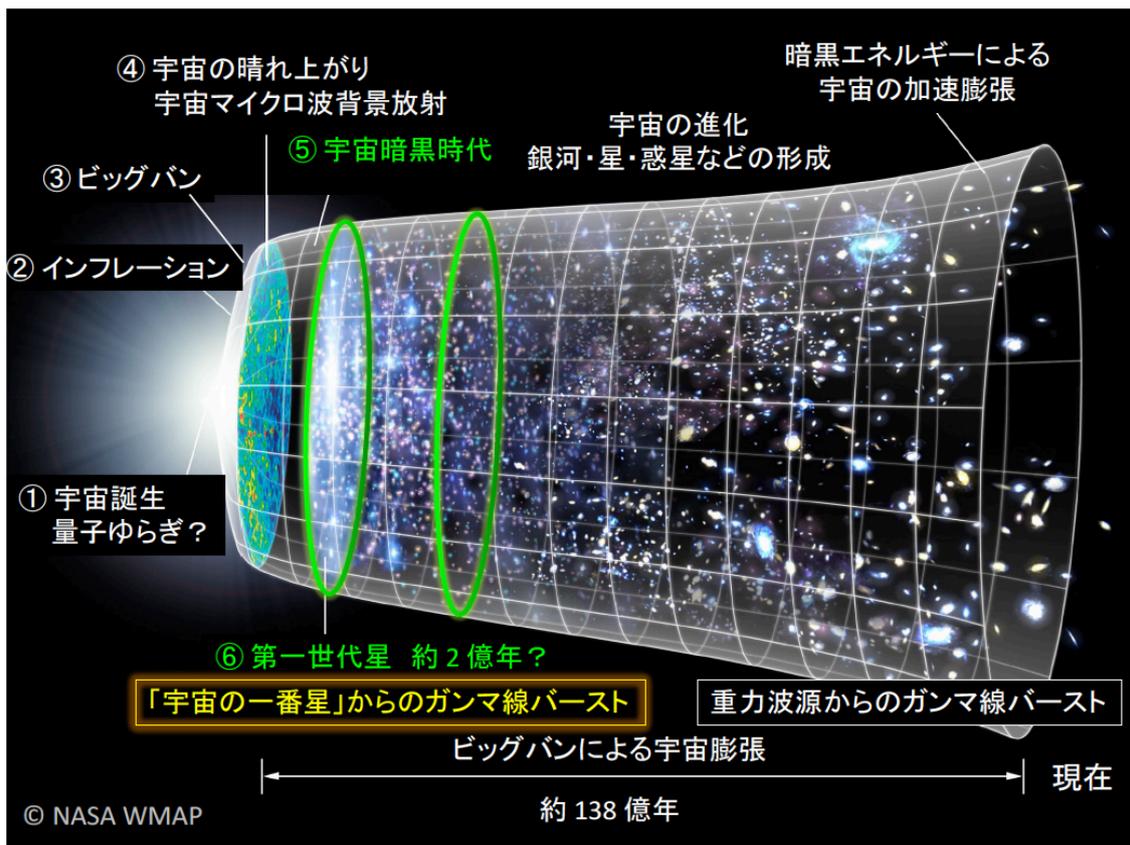


図1. 宇宙誕生から現在に至る歴史を示した図 (NASA WMAP 衛星のホームページから転載し、日本語で説明を加えたもの)³⁾。宇宙誕生から約2億年頃には第一世代星 (宇宙の一番星) が誕生したと考えられており、理論的には太陽質量の100倍以上の星である可能性が高い。ガンマ線バーストの強烈な光を利用することで、宇宙の一番星が誕生した周辺環境、特に宇宙で最初の元素合成や物質の電離状態 (宇宙再電離) を詳しく調べることが可能となる。

III. 宇宙最大の爆発「ガンマ線バースト」

ガンマ線バースト (以下、GRB) は、数10ミリ秒から数1000秒の短時間だけ、激しい時間変動

[§] 天文学では距離を表すパラメータを赤方偏移 (redshift) と呼び、記号“z”で表すことが慣例である。HiZ-GUNDAM は、重力波やニュートリノのような新たな情報の担い手も活用して宇宙現象を包括的に理解する「マルチメッセンジャー天文学」を推進するという主要課題も掲げているが、本稿では遠方宇宙の探査に注目して紹介する。

を伴いながら X 線やガンマ線を放出する天体である。1 度の爆発で解放されるエネルギーは、 10^{54} erg (エルグ：エネルギーの単位)に達する場合も観測されており、太陽が 100 億年の寿命の中で放出するエネルギーの 1000 倍に相当する。まさに「宇宙最大の爆発現象」であるが、宇宙全体では 1 日に 1 回程度は発生している。突発的なガンマ線放射の後には、X 線・可視光・電波など多波長にわたって減光しながら輝く「残光」が続く。GRB の多くは 100 億光年以上も彼方で発生しており、現在の最遠方記録は 131 億光年である^{4),5)}。

GRB の発生場所と時刻は予測不可能で、突発的に極めて明るくなった後、残光は時間の経過とともに（時間にはほぼ反比例して）暗くなってしまう⁶⁾。突発天体であることが、GRB を用いた初期宇宙探査の困難な点である。現在は人工衛星で GRB からのガンマ線を検知し、その発生情報をいち早く地上に伝達し⁷⁾、地上の望遠鏡で残光を観測するという分業体制となっている。

【地上観測 1】 発見から 1 時間以内は口径 30 cm～1 m 級の小型望遠鏡で残光を発見する

【地上観測 2】 数時間から 1 日以内に、口径 2～4 m 程度の中型望遠鏡で距離を同定する

【地上観測 3】 非常に遠方の GRB や極めて明るい GRB などの興味深いイベントである場合は、約 1 日後に口径 8 m 級の大型望遠鏡で精密な分光観測を行う

大型望遠鏡の観測時間は貴重であることから、全ての GRB 残光を観測することはできず、真に興味深い場合のみ追観測が行われている。我が国のすばる望遠鏡などでも宇宙再電離に関する研究が行われてきたが^{8),9),10)}、上記の連携プレーでは大型望遠鏡が観測する頃には残光が暗くなってしまったため、良質な分光データを獲得することが困難である。また、遠方宇宙の天体は、銀河間空間に存在する僅かな水素原子の影響で可視光線はほとんど吸収されてしまい、近赤外線よりも長い波長でなくては観測ができないが、高感度な近赤外線観測を行える望遠鏡施設は世界中を見てもごくわずかである。

今後の GRB を用いた初期宇宙探査の発展には、人工衛星と地上望遠鏡の連携時間の短縮と高感度な近赤外線観測の両面で、観測体制の見直しが必要である。遠近問わず、全ての GRB を大型望遠鏡で観測できれば理想的であるが、大型望遠鏡を占有して使うことは現実的には不可能である。次に考えられる方法は、上記の【地上観測 2】で得ていた距離の情報をいち早く獲得し、大型望遠鏡で観測すべきかどうかを迅速に判断できるような戦略的な観測ネットワークを構築することである。これまでと比べて圧倒的に早く（1～2 時間程度で）大型望遠鏡での分光観測を実現できれば、高品質な観測データを取得でき、飛躍的に遠方宇宙の理解が深まるだろう。

IV. HiZ-GUNDAM 衛星の役割

新たな観測ネットワークを構築し、GRB を用いた遠方宇宙の観測を劇的に進化させるために HiZ-GUNDAM 衛星を提案している。観測装置は 2 種類あり、1 つめは GRB を発見するために広い視野を持った超高感度の X 線モニター^{11), 12), 13), 14), 15), 16)}、2 つめは遠方の GRB 残光を捉えるための可視光・近赤外線望遠鏡^{17), 18)}である（図 2 参照）。広視野 X 線モニターで GRB を発見す

ると即座に発生方向を算出し、自動で衛星姿勢を変更して 300 秒以内に可視光・近赤外線望遠鏡で追観測を始める。GRB の発見から 15 分以内に遠方で発生したものかを見極め、機上でのデータ解析結果を商用通信衛星を経由してリアルタイムで全世界に提供する。複数の観測装置と衛星機能を連動させたシステム¹⁹⁾を兼ね備えた HiZ-GUNDAM は、どの GRB を観測すべきかを即座に判断する司令塔の役割を担い、世界中の大型望遠鏡と協力して遠方宇宙を観測する、というのが我々の掲げる戦略である¹⁾。

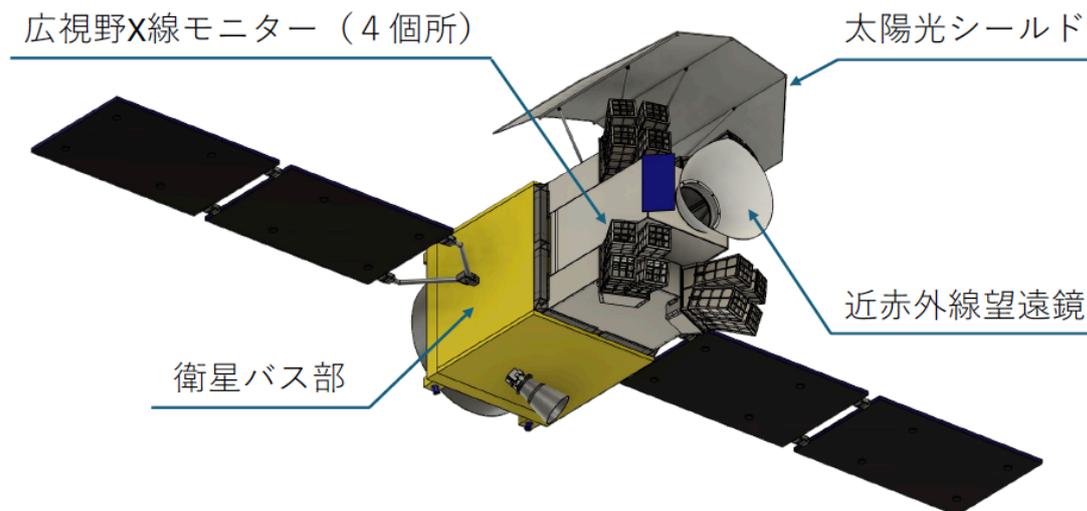


図 2. HiZ-GUNDAM 衛星の外観図。中央に近赤外線望遠鏡、周囲に広視野 X 線モニターを配置した構成になっている。太陽光が観測機器に当たるのを遮断するためのシールドも設けている。総重量は 450 kg 程度、大きさは衛星バス部が一辺 1 メートル程度で観測装置の高さも 1 メートル程度の小型衛星の部類となる。小型衛星の高い機動力を活かして、広視野 X 線モニターで発見したガンマ線バーストに向けて即座に姿勢を変え、近赤外線望遠鏡で追観測する。

図 3(左)に示すように、広視野 X 線モニターにはロブスターアイ光学系という X 線反射鏡を利用する¹²⁾。球殻状のガラス板に $20\ \mu\text{m}$ 角の四角い穴が配列されており、その内壁を X 線反射鏡として利用するものである。入射 X 線の結像は十字形となり、その中心を定めることで GRB の方向を特定する²⁰⁾。複数のロブスターアイ光学系を配置することで広い視野を超高感度で監視することが可能となる。可視光・近赤外線望遠鏡は口径 30 cm と小型であるが、大気の影響を受けない観測ができるうえに、望遠鏡全体が 200 K (-73°C) 以下に冷却されるため、赤外線波長帯で熱雑音に影響されない観測が可能となる。そのため、口径 3~4 m 級の地上望遠鏡と同程度の観測感度を達成できる。また、ダイクロミックミラーやケスタープリズム^{18), 21), 22)}と呼ばれる光学素子を搭載することで、 $0.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$ の帯域を 5 バンドに分割し、かつ同時に観測できる設計である(図 3 右)。これらの観測機器構成や機能は、自らが発見する GRB に対する迅速な発生方向や距離の同定、そして大型望遠鏡との連携観測を念頭に構築してきたものである。

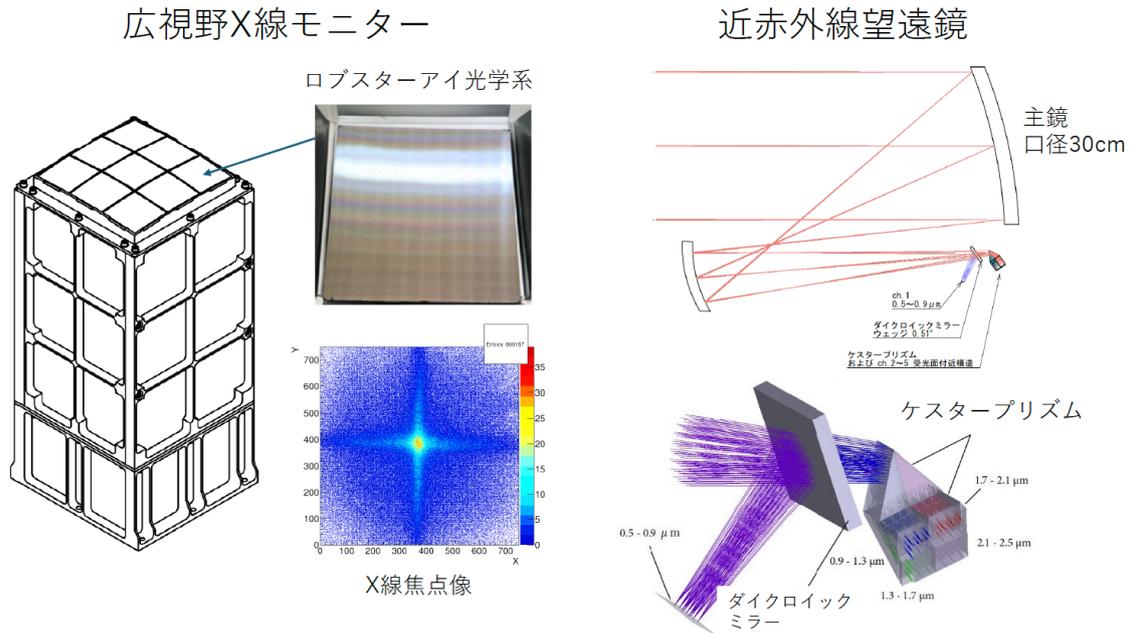


図3. 観測機器の概念図（左：広視野 X 線モニター、右：近赤外線望遠鏡）。ロプスターアイ光学系（X 線反射鏡）を配列することで、 $40^\circ \times 40^\circ$ 程度の広視野を高い感度で監視する X 線モニターとなっている。近赤外線望遠鏡にはケスタープリズムを搭載することで、 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の間を 5 バンドに分割し、同時に観測することができる。

V. おわりに

天文学衛星は波長毎に観測対象が異なるうえ、観測技術も全く異なるため、波長で区分けされたコミュニティー毎にプロジェクトを実施するのが一般的である。X 線から近赤外線までの広い波長を 1 台の衛星でカバーする HiZ-GUNDAM は極めて異例であり、ニュータイプの衛星コンセプトと言える。まだプロジェクトの前段階であるが、2030 年代中頃に実現できるようにチームが一丸となって検討や開発を進めている。我々は、先端に「日の丸」と「ガンダム」がプリントされたロケットに乗って宇宙に旅立ち、宇宙の一番星からの光を捉えることで知のフロンティアを開拓することを夢見て日々の研究に励んでいる。そして、国民の皆様から愛されるプロジェクトを目指していきたい。そう、あのガンダムのように。

文献

1. D. Yonetoku, et al., “High-z gamma-ray bursts unraveling the dark ages and extreme space-time mission: HiZ-GUNDAM”, Proceedings of the SPIE, Volume 13093, id. 1309320 9 pp. (2024), 10.1117/12.3018571
2. E. Bozzo et al., “Future Perspectives for Gamma-ray Burst Detection from Space”, Universe, Volume 10, Issue 4, id.187 (2024), 10.3390/universe10040187
3. NASA WMAP Homepage, <https://appel.nasa.gov/2014/06/25/this-month-in-nasa-history-wmap->

began-to-transform-cosmology/

4. N. R. Tanvir et al., "A g-ray burst at a redshift of $z \sim 8.2$ ", *Nature*, 461, 1254-1257 (2009), 10.1038/nature08459
5. R. Salvaterra et al., "GRB 090423 at a redshift of $z \sim 8.1$ ", *Nature*, 461, 1258-1260 (2009), 10.1038/nature08445
6. D. A. Kann et al., "The Afterglows of Swift-era Gamma-ray Bursts. I. Comparing pre-Swift and Swift-era Long/Soft (Type II) GRB Optical Afterglows", *The Astrophysical Journal*, Volume 720, Issue 2, pp. 1513-1558 (2010), 10.1088/0004-637X/720/2/1513
7. NASA Niel Gherels Swift Homepage, <https://swift.gsfc.nasa.gov/>
8. N. Kawai et al., "An optical spectrum of the afterglow of a g-ray burst at a redshift of $z=6.295$ ", *Nature*, 440, 184-186 (2006)
9. T. Totani et al., "Implications for Cosmic Reionization from the Optical Afterglow Spectrum of the Gamma-Ray Burst 050904 at $z = 6.3$ ", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 58, Issue 3, p.485-498
10. T. Totani et al., "Probing intergalactic neutral hydrogen by the Lyman alpha red damping wing of gamma-ray burst 130606A afterglow spectrum at $z = 5.913$ ", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 66, Issue 3, id.63 13 pp. (2014)
11. T. Sakamoto, et al., "The wide-field x-ray monitor (WFXM) on the HiZ-GUNDAM mission", *Proceedings of the SPIE*, Volume 13093, id. 1309321 3 pp. (2024), 10.1117/12.3018771
12. H. Goto, et al., "Construction and evaluation of x-ray optics system for the wide field x-ray monitor onboard HiZ-GUNDAM", *Proceedings of the SPIE*, Volume 13093, id. 1309322 10 pp. (2024), 10.1117/12.3018565
13. N. Ogino, et al., "High-speed readout system of X-ray CMOS image sensor for time domain astronomy", *Journal of Instrumentation*, Volume 19, Issue 01, id.C01006, 9 pp. (2024), 10.1088/1748-0221/19/01/C01006
14. H-C, Shen, et al., "The status of pnCCD with an FPGA-based electronic system for HiZ-GUNDAM", *Proceedings of the SPIE*, Volume 13093, id. 130936C 8 pp. (2024), 10.1117/12.3018627
15. R. Kondo, et al., "Design and development of an FPGA-based pnCCD driver and readout system for future satellite mission HiZ-GUNDAM", *Proceedings of the SPIE*, Volume 13093, id. 130936D 8 pp. (2024), 10.1117/12.3018693
16. J. S. Hiraga, et al., "Performance evaluation of pnCCD for HiZ-GUNDAM mission", *Proceedings of the SPIE*, Volume 13093, id. 130936E 7 pp. (2024), 10.1117/12.3018486
17. K. Tsumura, et al., "Development of an optical and near-infrared telescope onboard the HiZ-GUNDAM mission", *Proceedings of the SPIE*, Volume 13092, id. 130922B 7 pp. (2024), 10.1117/12.3013597

18. K. S. Kawabata, et al., "Design and fabrication of the double Kösters prism for NIR telescope of HiZ-GUNDAM satellite", Proceedings of the SPIE, Volume 13092, id. 130926Z 7 pp. (2024), 10.1117/12.3016203
19. T. Togashi, et al., "Development of the software algorithm for detection of gamma-ray bursts for HiZ-GUNDAM mission", Proceedings of the SPIE, Volume 13093, id. 130936B 9 pp. (2024), 10.1117/12.3018566
20. T. Sawano, et al., "A detection algorithm for faint sources based on 1-d projection for a lobster-eye x-ray imaging system", Proceedings of the SPIE, Volume 11444, id. 114445K 7 pp. (2020), 10.1117/12.2560604
21. J. Greiner and U. Laux, "A novel compact 4-channel beam splitter based on a Kösters-type prism", CEAS Space Journal 14(2), pp. 253–260 (2022), 10.1007/s12567-021-00418-9
22. C. Rothhardt, et al., "Technical layout and fabrication of a compact all-glass four-channel beam splitter based on a Kösters design", CEAS Space Journal, 14:287–301 (2022), 10.1007/s12567-022-00440-5

