

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM

① 計画の概要

科学衛星 HiZ-GUNDAM は、突発天体現象の観測により時間領域天文学を強力に推進する計画であり、2つの主要課題を掲げている。1つ目は、宇宙年齢が7.7億年よりも若い（赤方偏移が $z > 7$ の）初期宇宙において最も明るい光源であるガンマ線バースト（GRB）の観測を通して、星形成率の測定や初代星を起源とする GRB の探査、宇宙再電離や重元素合成の歴史の解明など、初期宇宙観測のフロンティアを目指すことである。2つ目は、重力波と同期した突発天体の観測により、ブラックホールが誕生する瞬間の極限時空環境における物理現象を探求し、重力波天文学を強力に推進することである。これらにより、2020年代の天文・宇宙物理学全体の最重要テーマである「宇宙の物質と空間の起源」を深く理解することが目的である。

本計画は超高感度の広視野 X線撮像検出器で突発天体を発見した後、自律制御で衛星姿勢を変更し、同時に搭載する口径 30cm の近赤外線望遠鏡で4バンド同時の測光観測を行う（図1参照）。これにより、高赤方偏移 GRB の候補や連星中性子星の衝突・合体に伴うマクロノバ現象を同定し、大型望遠鏡で迅速な分光観測を行うことで物理情報を獲得する。本提案では、これらの観測を実現するミッション機器を搭載した人工衛星の開発と、イプシロンロケットによる打ち上げ、および衛星運用を実施する。

本計画は、宇宙科学研究所の公募型小型衛星計画のミッションコンセプト案として採択されている計画の1つである。計画の実現時期は2025年頃を想定しており、この時期にX線と可視光・近赤外線観測が融合した GRB 観測衛星は世界的に見ても本計画が唯一である。現在の GRB 観測は NASA の Swift 衛星によって支えられているが、既に14年以上が経過していることから、その運用が停止すると GRB を利用した科学そのものが継続できなくなるため緊急性の高い課題である。

② 学術的な意義

宇宙開闢から約2億年程度の間は、天体が存在しない宇宙暗黒時代が続いた。その後、宇宙最初期の星が誕生したことで、強烈な紫外線放射による宇宙再電離が始まり、核融合で生成された鉄までの重元素が宇宙を構成する新たな要素として加わったと考えられている。これらが、どのような時間スケールで宇宙に影響を及ぼしたかは、遠方銀河や宇宙マイクロ波背景放射の観測が進んだ現在でも明確ではない。GRB は初期宇宙において最も明るい光源であり、本計画により年間40例程度の $z > 9$ の高赤方偏移 GRB を検出し、地上大型望遠鏡に分光観測の機会を提供できる。その結果、初期宇宙の宇宙進化シナリオについて初めて観測的な検証が行えるようになる。さらに本計画では、初代星の発見という驚くべき成果に結びつく可能性がある。

また、重力波が宇宙を探求する新たな手法として確立したため、重力波と電磁波が協調した天文学が急速に発展することは間違いない。本計画では、相対論的ジェット内部のエネルギー構造や、連星中性子星の合体で撒き散らされた物質（イジェクタ）とジェットの相互作用で形成するコクーンからの放射、そして早期の可視光・近赤外線マクロノバといった一連の現象を観測できるようになる。これらのエネルギー変遷を捉え、重力波の波形から得られる合体前後の質量、ブラックホールスピン、そして見込み角の情報と合わせることで、新たに形成したブラックホール時空の性質とジェットやイジェクタなどの周辺環境の性質を定量的に関連付けることが可能となる。また、希土類元素のような非常に重たい元素の生成現場を観測することで、宇宙を構成する元素の全貌を理解することにつながる。

これらの観測から、2020年代の天文・宇宙物理学全体の最重要テーマである「宇宙の物質と空間の起源」についての理解を飛躍的に進歩させることが可能な計画となっている（図2参照）。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

本計画は2025年頃の実現を想定しており、この時期にX線と可視光・近赤外線観測を同時に行う GRB 衛星としては世界で唯一の計画である。欧州宇宙機関の中型クラス（ESA M5）計画の候補として、本計画と同一のコンセプトで、かつ大型の THESEUS 衛星計画が候補となっており、2032年頃に実現する可能性がある。HiZ-GUNDAM は小型の計画であるが、世界の重力波観測施設である LIGO/Virgo/KAGRA がデザイン感度に達する時期に合わせてタイムリーに実現し、最も重要な科学的成果を早期に獲得できる計画である。その後、大型の THESEUS 衛星によって詳細観測を実現し、時間領域天文学をさらに発展させることが可能となる。また、本ミッションの技術・経験・人材などの面で、将来的に THESEUS 計画へも貢献することを想定している。

2020年代前半から中頃に実現する可能性のある計画として、中国・フランスの SVOM 衛星、中国の Einstein Probe、NASA の ISS-TAO が挙げられるが、本計画とはミッション意義および獲得できる情報が異なるものである。

④ 実施機関と実施体制

本計画は、2012年4月に宇宙科学研究所・宇宙理学委員会の下に設置されたワーキンググループが主体となって実施するミッションである。現在の国内グループは68名のPD以上の研究者で構成されており、計画の主査は金沢大学が担当している。HiZ-GUNDAM 衛星に搭載する2種類のミッション機器の開発実施体制および責任機関は以下のようにになっている。各機関のスタッフの下、研究室の学生等の協力を得て開発を行う。

- (1) 広視野 X線撮像検出器(27名)：理研（責任機関）、金沢大（副責任機関）、東工大、JAXA、宇宙研、京都大、広島大、東北大、山形大、青山学院大、埼玉大、名古屋大、海洋研、関西学院大、宮崎大
- (2) 近赤外線望遠鏡(14名)：広島大（責任機関）、東京都市大（副責任機関）、関西学院大、東北大、宇宙研、国立天文台、台湾中央大、東京大、大阪大

また、理論検討や科学成果の創出、観測計画の立案などを行うサイエンス班を設定している。

(3) サイエンス班 (27名)：京都大学 (責任機関)、宇宙線研、理研、北京大、東京大、青山学院大、高エネ研、熊本大、東北大、国立天文台、プリンストン大、ペンシルバニア州立大、スタンフォード大、IPMU

衛星バスの開発は小型科学衛星標準バス相当を利用することを前提とし、研究者側との綿密な調整の上で、衛星開発メーカーが担当する。

⑤ 所要経費

HiZ-GUNDAM 衛星の設計・開発・運用および衛星打ち上げ費用を含めた総予算は 140.3 億円であり、その内訳 (コストマージン約 10%を含む) を以下に示す。

- ・ 衛星打ち上げおよび関連費用：56 億円 (2024 年度 6 億円、2025 年度 50 億円)
- ・ 衛星バスシステム開発費および総合試験費用：38.9 億円 (2021~2025 年度)
- ・ ミッション機器開発費および単体試験費用：41.9 億円 (2021~2025 年度)
(内訳：広視野X線撮像検出器：25.4 億円、近赤外線望遠鏡：16.5 億円)
- ・ 衛星運用費および関連費用：3.5 億円 (2025~2027 年度) (延長運用は約 1 億円/年の運用費)

以上は、2018 年 1 月のミッションコンセプト提案で示した予算計画を簡略化したものである。衛星バスの開発費については、システム設計を進める中で詳細化する必要がある。全ての項目について必要となる設備費および人件費を含んでいる。

⑥ 年次計画

HiZ-GUNDAM 衛星は、2018 年 1 月に宇宙科学研究所の公募型小型衛星計画としてミッションコンセプト提案を行い、その候補の 1 つとして選定されている。以下では公募型小型衛星 4 号機として最短でプロジェクトが実現する場合の年次計画を示す。

2018 年 1 月：公募型小型計画へミッション提案

2019 年度：国際レビュー、宇宙科学研究所の準備チームとしての検討、ミッション定義審査

2020 年度：プリプロジェクト化、概念設計、システム定義審査

2021 年度：JAXA プロジェクト移行、詳細設計、フライトモデルの製造開始

2025 年度：イプシロンロケットによる衛星打ち上げ、観測開始、科学成果の創出

2028 年度：ノミナルのミッション期間終了 (以後は継続運用を希望)

公募型小型衛星 4 号機としてプロジェクト化されなかった場合は、5 号機(2027 年頃)としての実現を目指す。この時の年次計画は 2020 年度以降が、およそ 2 年ずつ遅れることになる。

また、本計画の検討内容、装置技術、開発経験、そして追観測体制は、欧州の THESEUS 計画および将来の GRB 観測計画へも有用である。本計画の中で THESEUS 計画に参画しているメンバーを通じて情報を共有する予定である。

⑦ 社会的価値

遠方宇宙の探査は人類の根源的な欲求であり、天文学の発展を促した大きな推進力の 1 つでもある。そしてブラックホールという極限時空環境の誕生や、その周辺での物理現象の探求は、我々の存在する時空を深く理解することにつながる。宇宙の進化を決定付けた (1) 天体形成の幕開け、(2) 宇宙再電離、(3) 宇宙最初期の元素合成、(4) ブラックホールの誕生、そして (5) 希土類元素の起源などを探求することで、「何故、我々の宇宙はこのような姿なのか?」という疑問に対して、科学的に答えを見出すことが可能となる。人類の根源的な世界観における「宇宙の物質と空間の起源」に対して、特に天体形成と宇宙進化、そしてブラックホール時空に関する知的価値を与えるミッションと位置づけることができる。

⑧ 本計画に関する連絡先

米徳 大輔 (国立大学法人金沢大学 理工研究域 数物科学系)

