

多波長・マルチメッセンジャー観測による初期宇宙探査・極限時空探査

① ビジョンの概要

宇宙創成期や宇宙で最初の天体形成期である「初期宇宙」を科学として理解すること、そして従来の電磁波観測に加えて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」を推進することが宇宙物理学における最重要課題となる。あらゆる観測対象・観測手法を用いてこれら2つのテーマを推進することを宇宙物理学のビジョンとして位置づける。

② ビジョンの内容

宇宙創成期や宇宙で最初の天体形成期である「初期宇宙」を科学として理解することは、宇宙物理学・天文学のフロンティアである。これまでの天文学・宇宙物理学で、天体の多様性とそこで繰り広げられる物理現象の理解が進んできた。しかしながら、宇宙で最初の天体形成期については観測的にはほとんど理解できていない。天体の多様性を生み出す原点を捉え、それらの周辺環境を物理的に理解していく必要がある。宇宙の晴れ上がり時期に、宇宙の物質（水素・ヘリウム）は中性化したはずであるが、その後生まれた宇宙最初の天体である「初代星」の強烈な紫外線により宇宙の物質は再び電離したと考えられる。そして、初代星の元素合成により重元素という新たな要素が加わることになる。これらは数億年という非常に短い期間に宇宙全体の様子を一変し、その後の天体形成や進化に大きな影響を及ぼした宇宙の相転移とも言える現象である。このような理論的なシナリオを道標とし、あらゆる観測対象・観測手法を駆使し、徹底的に初期宇宙における天体形成およびその進化を探求することが重要課題となる。

さらに、近年の技術的な進歩により、重力波やニュートリノのような電磁波ではない新たな情報を利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」が宇宙物理学における新たな最重要課題として認識されている。2017年に中性子星連星の衝突・合体により発生した重力波イベントと同期して、短時間のガンマ線バースト現象が捉えられた。新たなブラックホールが誕生する際に、相対論的な速度を持つジェットが形成し、飛び散った中性子過剰な物質中でランタノイド属に達する重元素が生成した兆候が見出された。また、高エネルギーニュートリノ源として最高エネルギー宇宙線を生成する現場について新たな知見がもたらされつつある。いずれも例数が少ないため、それぞれの天体の多様性・一般性を理解し、宇宙に存在する全ての重元素量や最高エネルギー宇宙線の量を説明できるのかを検証していく必要がある。これまでの天文学・宇宙物理学では得られなかった、ブラックホールという極限時空を形成する瞬間や、宇宙線を加速する瞬間に伴う物理現象を捉え、躍動する宇宙像を理解していけるようになる。

③ 学術研究構想の名称

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

④ 学術研究構想の概要

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) の観測を通じて、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、重力波やニュートリノと同期した突発天体の観測により、ブラックホールという極限時空環境における物理現象を探求し、マルチメッセンジャー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5バンド同時の測光観測を行う。これにより、高赤方偏移 GRB の候補や重力波源・ニュートリノ源を迅速に同定し、地上の大型望遠鏡と連携して分光観測を行うことで物理情報を獲得する。本提案では、人工衛星の開発と、ロケットによる打ち上げ、および衛星運用を実施する。

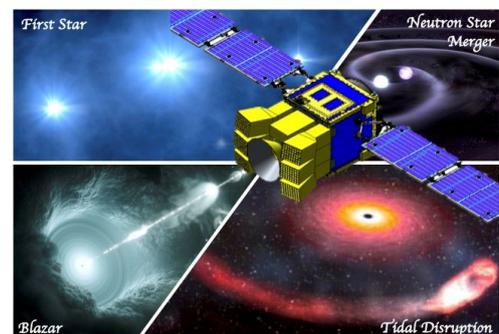


図1 HiZ-GUNDAM 衛星

⑤ 学術的な意義

本計画では年間 30 例程度の高赤方偏移 GRB を検出し、(1)初期宇宙における GRB 発生率・星形成率を初めて観測的に明らかにし、(2)地上大型望遠鏡の協力を得て水素のライマンアルファ吸収端の形状を測定し、宇宙再電離時期やその歴史の変遷を紐解く事が可能となる。さらに、(3)明るい GRB の分光観測で微量な金属元素量を測定し、元素組成量が増加する変遷も捉えられるようになる。宇宙の天体に多様性を生み出す宇宙再電離と宇宙最初の重元素合成を明らかにすることで、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付く可能性がある。

2010 年代になって、重力波や高エネルギーニュートリノという宇宙を探求する新たな手法が得られたことで、電磁波と協調したマルチメッセンジャー天文学が急速に発展することは間違いない。HiZ-GUNDAM 衛星が有する超高感度な広視野 X 線検出器による突発天体の発見機能、そして迅速な可視光・近赤外線対応天体の同定機能により、マルチメッセンジャー天文学を強力に推進する。

重力波源に対しては、相対論的ジェットや、早期の可視光・近赤外線キロノヴァといった一連の現象のエネルギー変遷を捉え、新たに誕生したブラックホール極限時空の周辺で生じる物理現象を理解する。また、高エネルギーニュートリノ源に対しては、超高エネルギー粒子加速の現場の解明に寄与していく。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

HiZ-GUNDAM は 2030 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 衛星は世界で唯一のコンセプトである。欧州宇宙機関の 7 番目の中型クラス (ESA M7) 計画の候補として、本計画と同一のコンセプトを持ち、かつ大型の THESEUS 衛星計画が 2037 年頃の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することが可能である。その後、大型の THESEUS によって詳細な観測を実現するという流れで、時間領域天文学を発展させることが可能となる。

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理解は、我々の存在する時空を深く理解することにつながる。「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、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。

⑧ 実施計画等について

2026 年度：JAXA プロジェクト移行、詳細設計、エンジニアリングモデルの開発

2028 年度：フライトモデルの製造開始

2030 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

2033 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）

実施機関と実施体制

(1) 実施責任：宇宙科学研究所、金沢大学 (PI)

(2) 広視野 X 線撮像検出器 (27 名)：

青山学院大学 (責任機関)、金沢大 (副責任機関)、理研、山形大、関西学院大、東工大、宇宙研、ほか

(3) 近赤外線望遠鏡 (14 名)

東京都市大 (責任機関)、関西学院大 (副責任機関)、千葉工業大学、宇宙研、広島大学、大阪大、ほか

総経費 174.86 億円

- ・ 衛星打ち上げおよび関連費用：33.52 億円 (2028~2029 年度)
- ・ 衛星バスシステム開発費および総合試験費用：73.64 億円 (2025~2029 年度)
- ・ ミッション機器開発費および単体試験費用：41.25 億円 (2025~2029 年度)
- ・ 衛星運用費および関連費用：2.91 億円 (2027~2032 年度)
- ・ その他諸経費：1.77 億円
- ・ 予備費：21.77 億円 (ミッション機器総額の 30%、その他総額 10% (打ち上げ費を除く))

⑨ 連絡先

米徳 大輔 (金沢大学 理工研究所)