

# 科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料 〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025  
課題番号：21H04997  
研究課題名：高感度広帯域近赤外線分光で読み解く重力波源における元素合成  
研究代表者氏名（ローマ字）：吉田 道利（YOSHIDA Michitoshi）  
所属研究機関・部局・職：国立天文台・ハワイ観測所・教授  
研究者番号：90270446

## 研究の概要：

本研究は、すばる望遠鏡の性能を限界まで引き出し、重力波で発見可能な距離全域の中性子星合体の近赤外線分光観測を実現し、中性子星合体での元素合成を包括的に理解することを目的とする。このため、レーザートモグラフィ補償光学に最適化された広帯域近赤外線分光装置を製作し、この装置を用いて超高感度分光観測を行い、中性子星合体での元素合成の全容を明らかにする。

研究分野：天文学、天体物理学、原子核物理学

キーワード：光赤外線天文学、天文観測装置開発、重力波、中性子星、超新星

## 1. 研究開始当初の背景

金やプラチナ、ウランといった鉄より重い元素（重元素）の起源はよく分かっていない。重元素が合成される現場として最も有力視されているのは中性子星同士の合体である。中性子星が合体するとその一部が宇宙空間に放出され、放出された物質の中で素早い中性子捕獲反応により重元素が合成されると考えられてきた。しかし、近年までこの仮説を確かめる観測手段がなかった。

この状況は2017年に重力波によって中性子星合体が初めて観測されたことによって大きく変化した。重力波望遠鏡LIGOとVirgoによって中性子星合体から生じた重力波GW170817が観測され、さらにすばる望遠鏡などにより重力波源の電磁波対応天体が初めて観測された（図1）。この結果、中性子星合体が重元素を合成した際に現れると予測されていた電磁波シグナルが確認され、中性子星合体において重元素が合成されていることが確かめられた。しかし、中性子星合体が電磁波でも観測されたのはまだこの一例に限られている。中性子星合体には多様性があると考えられており、中性子星合体において一般的にどの程度の重元素が合成されているのかはまだ分かっていなかった。



図1:すばる望遠鏡などで捉えられたGW170817の電磁波対応天体の画像

## 2. 研究の目的

世界の重力波望遠鏡ネットワークは、2025年からの第5期観測において距離約6.5億光年（200メガパーセク）以内の中性子星合体の観測が可能となり、年間50イベント程度の中性子星合体が検出されると予測されている。本研究では、重力波第5期観測開始までに高感度広帯域近赤外線分光装置を開発してすばる望遠鏡に搭載し、6.5億光年までの中性子星合体の電磁波対応天体の近赤外線分光観測を網羅的に行うことで、世界で初めて中性子星合体における元素合成の系統的研究を行う。そして中性子星合体が作り出す元素の量と種類の全容を解明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

中性子星合体で合成される元素の量と種類を知るためには、中性子星合体を近赤外線で合体後1週間にわたって分光観測する必要がある。すばる望遠鏡をはじめとする現在最大規模の望遠鏡に搭載されている近赤外線分光装置を用いた場合、約4億光年以内に現れる中性子星合体であれば1週間にわたり観測可能である。しかし、約4億光年以内に現れるすばる望遠鏡から観測可能な中性子星合体は年に2つ程度であり、多数の中性子星合体を観測するのは困難である。約6.5億光年以内に現れる中性子星合体まで観測可能になれば、年間10個程度の中性子星合体を1週間にわたり観測できるようになり、中性子星合体での元素合成の全容を一気に解明できるようになる。このため、望遠鏡の感度低下の主因である大気ゆらぎによる星像の劣化を補正し光を極限まで集中させる、レーザートモグラフィ補償光学装置（LTAO）に最適化した広帯域近赤外線分光装置を開発し、すばる望遠鏡に搭載して観測を実施する。これにより、6.5億光年以内に現れる中性子星合体の1週間にわたる分光観測を実現し、多数の中性子星合体で合成された元素の量と種類を測定する

#### 4. これまでの成果

中性子星合体の電磁波対応天体のスペクトルに現れる重元素の特徴を明らかにするため、中性子星合体の電磁波対応天体の網羅的なスペクトル理論モデル構築を行なった。この結果、ストロンチウムやランタン、セリウムといった元素の特徴が近赤外線域に強く現れることを明らかにした(図2)。近赤外線分光装置によりこれらの特徴を捉えることで、中性子星合体時に合成される重元素量を定量化できることが期待される。また、遠方超新星の分光観測計画の立案のため、Euclid 宇宙望遠鏡による遠方超新星の観測シミュレーションを実施した。この結果、最大で年間10個程度の遠方超新星が本研究課題で製作する高感度広帯域近赤外線装置で観測可能であることを明らかにした。

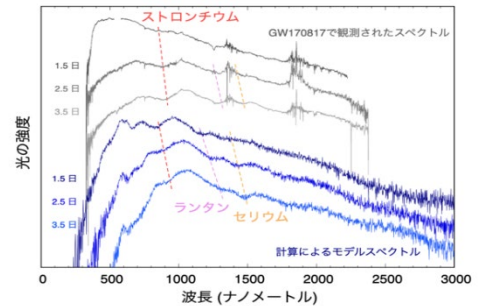


図2:中性子星合体の電磁波対応天体の理論スペクトル。

LTAO 対応の広帯域近赤外線分光装置の開発について、科学要求から装置仕様の設定を行い、それに基づいて光学系・機械系・冷却系・制御系それぞれのサブシステムの概念設計および詳細設計を研究計画に従って実施した(図3)。一方で、将来計画として可視光域も含めた超広帯域分光装置を可能とするために、可視分光装置を取り付けるための拡張性の検討として、望遠鏡からの光を可視光と近赤外線に振り分ける前置光学系の概念設計も実施した

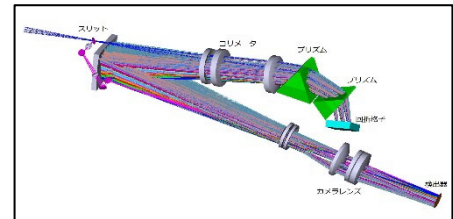


図3:広帯域近赤外線分光装置の光学系設計。

#### 5. 今後の計画

2023年度は近赤外線分光器の製造・組み上げ・性能試験を行う。併せて制御系の実装を行い、分光器全体を運用温度である80K程度に冷やした状態で分光画像を取得し、分光器単体での性能試験を行う。並行して、すばる望遠鏡への持ち込み観測装置のプロポーザルを提出し、レビューを受ける。2024年度は、性能試験を行った上で、すばる望遠鏡に向けて分光器を輸送する。ハワイ到着後は分光器をマウナケア山頂に輸送し、すばる望遠鏡への設置作業・アライメント作業・制御系接続作業等を行う。試験観測を行い、実際の天体を用いた観測を実施し、分光器性能評価を行う。2025年度には、科学観測を実施し、予定していた観測感度の達成を確認する。また、分光器として完成後は、突発天体への対応および時間軸天文学推進のため、すばる望遠鏡に常に設置されいつでも観測開始可能な体制をとるための整備を行う

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

##### 【査読論文】

- “Euclid detectability of pair instability supernovae in binary population synthesis models consistent with merging binary black holes”, Tanikawa, A., Moriya, T. J., Tominaga, N., & Yoshida, N., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 519, L32, 2023 (査読有)
- “NINJA: an LTAO assisted optical and near-infrared spectrograph of Subaru Telescope”, Tokoku, C., Ozaki, S., Moriya, T., Yanagisawa, K., Motohara, K., Tominaga, N., Tanaka, M., Ono, Y., Koyama, Y., Yoshida, M. et al., Proceedings of SPIE, 12184, 121847R, 2022 (査読有)
- “Tungsten versus Selenium as a potential source of kilonova nebular emission observed by Spitzer”, Hotokezaka, K., Tanaka, M., et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515, L89, 2022 (査読有)
- “Lanthanide Features in Near-infrared Spectra of Kilonovae”, Domoto, N., Tanaka, M., et al., The Astrophysical Journal, 939, 8, 2022 (査読有)
- “Opacity of the Highly Ionized Lanthanides and the Effect on the Early Kilonova”, Banerjee, S., Tanaka, M., et al., The Astrophysical Journal, 934, 117, 2022 (査読有)
- “Euclid: Searching for pair-instability supernovae with the Deep Survey”, Moriya, T. J., Tanaka, M., et al., Astronomy and Astrophysics, 666, A157, 2022 (査読有)

##### 【学会発表】

- “すばる望遠鏡広帯域分光装置 NINJA: 装置概要” \*東谷千比呂, 吉田道利, 守屋堯, 本原顕太郎, 尾崎忍夫, 大野良人, 小山祐世, 富永望, 他、日本天文学会 2022 年秋季年会、新潟大学、2022 年 9 月
- “すばる望遠鏡広帯域分光装置 NINJA: 科学目標” \*守屋堯, 吉田道利, 本原顕太郎, 尾崎忍夫, 柳澤顕史, 大野良人, 小山祐世, 富永望, 他、日本天文学会 2022 年秋季年会、新潟大学、2022 年 9 月

#### 7. ホームページ等

<https://www4.nao.ac.jp/atc/ninja/>