

化学特異星の近赤外線高分散分光観測と 中性子星合体からの電磁波放射への応用



土本 菜々恵

〈東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉
e-mail: ndomoto@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

近年、宇宙における重元素の起源として連星中性子星合体が注目されている。2017年に観測された中性子星合体からの電磁波放射「キロノバ」の可視光・近赤外線スペクトルには複数の吸収線が見られたが、重元素の束縛-束縛遷移の基本的な情報が整備されていなかったことから、元素の同定が困難な状況が続いていた。筆者は博士課程でこの課題に取り組み、キロノバのスペクトルの理解に重要な元素を発見する中で、すばる望遠鏡およびInfraRed Doppler (IRD) を用いた化学特異星の分光観測を提案した。本稿ではその科学的背景、観測提案の詳細と、すばる望遠鏡学生PI現地観測プログラムを利用してハワイ現地を訪れた体験を記す。

1. はじめに

本稿の執筆にあたり、以下の観測提案に至る科学的背景・筆者のこれまでの研究については詳細を書ききれていないことを記しておく。研究の詳細については過去の解説記事 [1,2] を参照されたい。また執筆時点で観測から1年が経過しているが、本観測で取得したデータを用いた論文は未出版のため、結果やデータの詳細については触れないことをお許しいただきたい。

2. 観測提案:「プラズマ実験室」としての化学特異星

2.1 キロノバ

宇宙における元素の起源を解明することは、天文学・宇宙物理学の重要課題の1つである。中でも鉄より重い元素の約半数、特に金やプラチナ、ランタノイドなどの「速い中性子捕獲反応 (rプ

ロセス)」を必要とする元素の起源は未だ明らかでない*1。

rプロセスが起きるには非常に中性子過剰な環境が必要であり、近年、起源天体の有力な候補として、連星中性子星の合体現象が注目されてきた。連星中性子星が合体すると中性子過剰な物質が宇宙空間に放出され、放出物質の中でrプロセスにより重元素が合成される [4, 5]。さらに、合成されたrプロセス元素の放射性崩壊で放出されるガンマ線、ベータ線によって放出物質が熱化され、可視光や赤外線で熱的に光る現象「キロノバ」が見られる [6, 7]。実際、2017年8月に連星中性子星合体からの重力波 (GW170817) が初めて検出され、さらに世界中の望遠鏡を用いた追観測によって電磁波対応天体が発見された [8]。観測された電磁波対応天体の光は予想されていたキロノバの光り方と見事に一致し、確かに中性子星合体でrプロセス元素が合成されたことが確認

*1 残りの約半数の元素は、主に小中質量星の進化の後期段階 (漸近巨星分枝星)、あるいは高速回転する大質量星内部で「遅い中性子捕獲反応 (sプロセス)」によって合成される [3]。

されている [9]. 中性子星合体やGW170817に付随したキロノバの解説については、天文月報の過去の記事 [10–12] を参照されたい。

2.2 元素の同定と原子データ

中性子星合体が本当に宇宙のrプロセス元素の起源であるかどうかを明らかにするうえで重要なのが、一度の中性子星合体で実際に合成される元素の種類や量である。しかし、GW170817に付随したキロノバではこれが長らくわかっていなかった。元素を同定するためには、どの元素がどの波長の光を吸収するかを事前に知っている必要がある、このような束縛-束縛遷移の情報（「原子データ」）は地上の分光実験で原子の性質を調べることで構築される。一方、キロノバではrプロセスで合成されるあらゆる重元素（のあらゆるイオン化状態）の原子データが必要だが、重元素の特に赤外線での原子データはこれまでほとんど整備されておらず、どの元素が吸収線を作るかすらわからない状態が続いていたのだ。筆者が大学院に入学した2020年の時点で、スペクトルから同定が報告されていた元素は、原子の性質が比較的良好に知られているストロンチウム（原子番号38）のみだった [13].

このような状況の下、筆者は博士課程でキロノバの可視光・近赤外線スペクトルにおける元素の同定を目的とした研究を行ってきた。ストロンチウムの同定を独立に検証したほか [14], 近赤外線スペクトルに見られる吸収線をランタンやセリウム（原子番号57, 58）で説明できることを初めて示した [1, 15]. さらに、地上における分光実験の代わりに恒星の分光観測を行うことで、高分散スペクトルに見られるセリウムの吸収線を利用し、特定の束縛-束縛遷移の性質を調べる（具体的には、遷移確率を測定する）ための研究も行った [2, 16].

これらの研究では、元素の同定のために (1) 「適切な速度で特定の元素の束縛-束縛遷移の遷移波長が観測された吸収線と整合的である」こと（放出物質は光速の10%程度の速度で膨張しているた

めドップラー効果大きい）、(2) 「与えられた物理状況（密度・温度）で特定の元素の束縛-束縛遷移が十分強い吸収を起こす」ことを示したと言える。一方で、我々はまだ重元素の性質や原子データを完璧に理解しているわけではない。元素の同定を確固たるものにするためには、その波長帯において (3) 「それ以外に強い吸収を起こす束縛-束縛遷移が存在しない」ことが必要である。しかし、これには全ての重元素の全ての束縛-束縛遷移について実験に基づいた正確な情報が必要であり、実験的に今すぐこれを達成することは現実的ではない。

2.3 化学特異星

筆者を含むグループは、(3) の観点を恒星のスペクトルを用いて解決することを考えた [2, 17]. 宇宙には「化学特異星」と呼ばれる、通常の恒星に比べて異常な元素組成パターンを示す星が存在する。中でもAp/Bp星（peculiarのp）に分類されるHR 465という星は、太陽組成に比べて1万倍も多いランタノイド（原子番号57–71）の存在量を示すことが知られており、その質量割合はキロノバにおけるランタノイドの質量割合（理論的にあり得るもの）とよく似ていた（図1）。HR

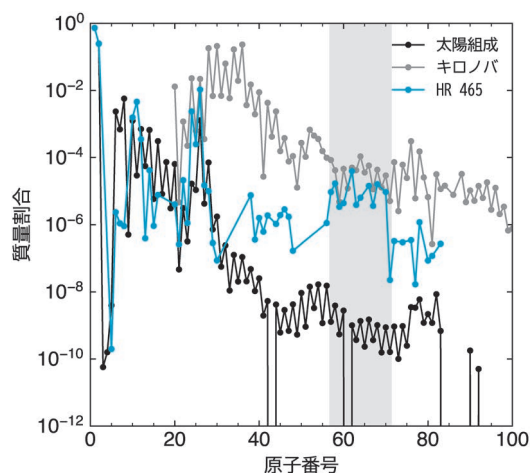


図1 太陽組成（黒） [18], キロノバにおける元素組成の理論モデル（灰色） [14, 15], および化学特異星HR 465における元素組成（青） [19]. 網掛けの領域はランタノイド（原子番号57–71）を示す。

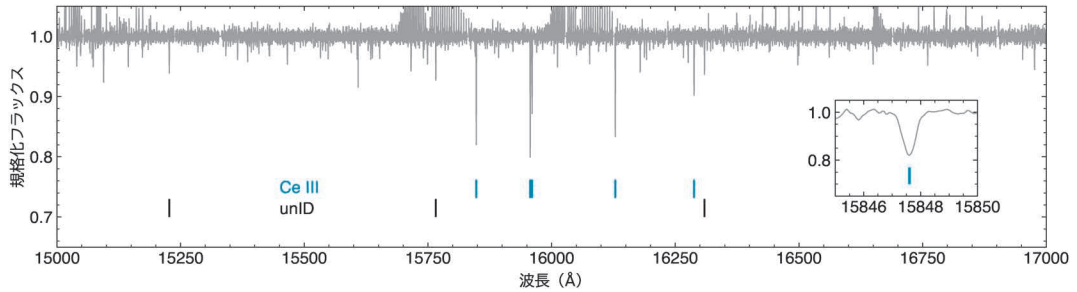


図2 HR 465のHバンドスペクトル [17]. 青線, 黒線はセリウム (二階電離イオン) および未同定の吸収線の位置を示す. 挿入図はセリウムの吸収線の一つの拡大図.

465の恒星大気は密度 $\sim 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ 程度, 有効温度11000 K程度であり, キロノバの物理状況 ($\sim 10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$ 程度かつ数1000 K程度)とは異なる. しかし, プラズマが熱平衡状態にあるとすると, 両者のイオン化状態の分布は似た状態を示す. つまり, HR 465のスペクトルに見られる吸収線を調べることで, キロノバで強い吸収を示しうる, かつ実験室では測られたことのない束縛-束縛遷移を含む, 完全なリストを構築することができる, というわけだ.

すばる望遠鏡のInfRared Doppler (IRD)で観測したHR465の近赤外線高分散スペクトルを調べた結果, 当のストロンチウムとセリウムの遷移波長周辺に, 各元素と同程度に強い未同定の吸収線は存在しないことが明らかになった (図2). つまり観測的に, その波長でキロノバのスペクトルに強い吸収線を作りうる元素はストロンチウムとセリウムだけであることを示すことができたのである (なおランタンについては, 静止波長が地球の大気吸収の影響が大きいJ, Hバンドの間に位置しているため, 星のスペクトルでは検証ができない).

一方, 既に述べたとおり, 恒星大気とキロノバのプラズマ状態は全く同じではない. またランタノイドの存在量は両者で似ているが, 他の元素については必ずしもそうではない. 「完全な」束縛-束縛遷移の情報を得るためには, 更なる検証が必要だと考えた.

2.4 プロポーザル23B-048

このような背景のもとで, 筆者らは様々な有効温度, 様々な元素組成を持つ化学特異星の近赤外線高分散分光観測を提案した. 見逃している未同定の強い吸収線が存在する (しない) かどうか, 本当にストロンチウムとセリウムのみがキロノバのスペクトルにおいて重要なかどうかを検証するためである.

装置には, YJHバンドの近赤外線広域を高分散 ($R\sim 70000$)で観測できるIRDを選択した. 化学特異星のカタログ [20]の中から, 恒星大気パラメータや複数の元素組成が文献で報告されている単独星を選び出し, 最終的にすばる望遠鏡で秋冬に観測可能な星々を観測ターゲットとした.

ちなみに, ターゲットは暗いものでも9等程度で, 口径の小さい望遠鏡でも観測できてしまう. 日本国内にも, 例えば京都産業大学にWINEREDという近赤外線高分散分光器 ($R\sim 30000$)があるが, これはzYJバンドをカバーしており, セリウムの波長域 (Hバンド) はカバーしていない. すばる望遠鏡と同程度の口径のジェミニ望遠鏡にも, 北にGNIRS ($R\sim 18000$), 南にIGRINS ($R\sim 45000$)という近赤外線分光器がある (両装置で取得したデータを使用したこともある [15])のだが, 前者は通常はスリット分光で広域スペクトルを一度に取得することが難しいし, 後者はHKバンドの装置でストロンチウムの波長域 (Yバンド) をカバーしていない. というわけで, 今

回の目的にはIRDが適していたのだった。

3. すばる訪問

3.1 初めてのマウナ・ケア

採択された観測は2024年10月8日に割り当てられた。筆者は学生PI課題の現地観測を希望し、これに合わせて指導教員とともに現地時間10月7日午後ヒロに入った。ご存じの方はプロポーザル番号を見て気づいたかもしれないが、実は本プロポーザルの採択自体は2023年だった。この年の9月にすばる望遠鏡はトラブルに見舞われ、2023年10月に予定されていた当初の観測はキャンセルとなり、学生PI課題ということで2024年に補填いただいたのだった。1年越しの念願かなってのヒロだったわけだが、そのために動いてくださった関係者の皆さまに改めてここで感謝したい。

筆者にとっては初めてのアメリカ、初めてのハワイだったが、ホノルルからヒロへ向かう途中で飛行機の中から見たマウナ・ケアと、その頂上雲の上にポツポツと見える天文台群の小さな影がとても印象的だった。見慣れない楕状火山だから、飛行機の上から見ても、地上から見上げても、富士山より高い4000mを超える山なのだという実感がなかなか湧かなかったことも面白く覚えている。ヒロ空港からタクシーで山麓施設に辿り着いた後、サポートアストロノマー（SA）の方とともに中間施設のハレポハクに向かった。

3.2 観測

8日夕方まではハレポハクで観測手順書（OPE file）の最終確認などをしながら過ごし、8日前半夜の観測に向かって山頂に登った。筆者は大した登山もしたことがなく、事前情報で4000mの山の上にやや戦々恐々としていたのだが、意外にも、酸素マスクを付けずとも比較的平気だったことは実際に来てみないとわからない発見であった。

10月8日の夜は素晴らしい快晴で、具体的な値は忘れてしまったが、SAの方が驚くほど非常によいシーイングで観測をすることができた。IRD

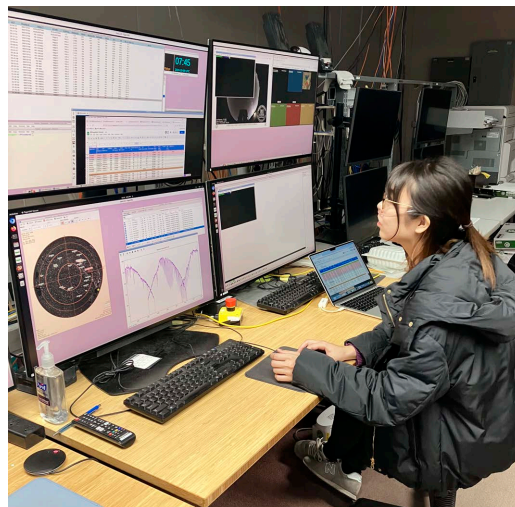


図3 コントロールルームで、即時解析されたスペクトルを確認する筆者。

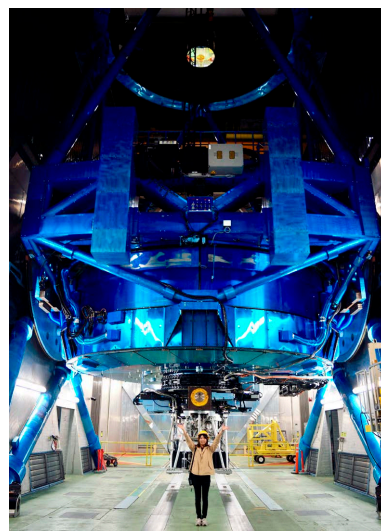


図4 すばる望遠鏡と筆者。

はAOが組み合わさった装置のため、ただでさえよいシーイングに加え、明るいターゲットにAOをかけていたことで、とても良い条件で観測できたことは間違いない。装置の起動には少し時間がかかったが、前半夜中に曇ることはなく、始まってしまえばトラブルも起きず、予定していた以上のデータを取得することができた。

筆者自ら望遠鏡や装置を動かすことはないた

め、観測中はターゲットリストを確認しながら、即時解析されるスペクトルを確認していた(図3)。

3.3 昼のすばる見学

8日の観測時は望遠鏡ドームの隣にある制御棟に入っただけだったが、翌日9日にも再度山頂に登り、ドームの内外を見学させていただくことができた(図4)。望遠鏡本体だけでなく、運用されているあらゆる装置の外観や、主鏡の蒸着装置、さらには当時ファーストライトを目前に控えていたPFS関連の搬入段ボール(!)も見ることができた。訪れた際にはエンジニアリングの方々が働いており、望遠鏡運営が、夜の観測時間以外にも望遠鏡・装置に関わる人々がいて成り立っているのだということを強く実感した。

9日午後には山を下り、ヒロ市内のホテルに宿泊した。そして現地時間10日の午前にはヒロを発ち、日本時間11日夕方には帰国した。たった5日間、滞在時間にして3日間だけの時間だったが、他には代え難い貴重な経験だった。

4. 終わりに

実は、国内外を問わず、このすばる訪問が筆者にとって初めての現地観測であった。一晚、しかも前半夜だけの観測でハワイ現地に行かせていただき、実に贅沢な経験だったと思う。筆者は時間交換枠でジェミニ望遠鏡を使用したことがあるのだが、こちらはキュー観測のため、採択後に観測提案書の詳細を提出してしまえば現地におまかせで、データの取得はメールの知らせ一本だった。それも有り、今は三鷹からリモート参加できてしまうすばる観測が山頂現地でどのように行われているのかドームを管理する人、観測手順書に従って望遠鏡と装置を動かす人、昼間にそれらを支えている人がいることを自身の目で見ることができ、非常に良かったと思うし、現地観測の支援プログラムを運営いただいている意義だと感じている。

はじめに述べたとおり、本稿では観測データの詳細については未公表のため触れなかった。これらの結果については現在解析を進めており、今後速やかに公表できるように観測データ一つの背景に多大なる方々の尽力があることを感じながら一取り組んでいる。

謝辞

IRDのSAである工藤智幸氏にこの場をお借りして感謝いたします。本稿に記した現地観測にあたり、観測準備、ヒロでの受け入れから観測所・望遠鏡の案内まで大変お世話になりました。また、プロポーザルのCo-Iである田中雅臣氏、青木和光氏、ヒロでお世話になった岡本桜子氏と、IRDチームの皆さま、そして本稿の執筆の機会を与えてくださった編集委員の方々に感謝いたします。なお、筆者は日本学術振興会特別研究員制度の支援を受けています。

参考文献

- [1] 土本菜々恵, 2024, 天文月報, 117, 17
- [2] 土本菜々恵, 2024, しょうとつ, 21, R007
- [3] Käppeler, F. et al., 2011, Rev. Modern Phys., 83, 157
- [4] Eichler, D., et al., 1989, Nature, 340, 126
- [5] Freiburghaus, C., et al., 1999, ApJ, 525, L121
- [6] Li, L.-X., & Paczyński, B., 1998, ApJ, 507, L59
- [7] Metzger, B. D., et al., 2010, MNRAS, 406, 2650
- [8] Abbott, B. P., et al., 2017, ApJ, 848, L12
- [9] Tanaka, M., et al., 2017, PASJ, 69, 102
- [10] 柴田大, 2018, 天文月報, 111, 730
- [11] 仏坂健太, 2019, 天文月報, 112, 778
- [12] 田中雅臣, 2021, 天文月報, 114, 16
- [13] Watson, D., et al., 2019, Nature, 574, 497
- [14] Domoto, N., et al., 2021, ApJ, 913, 26
- [15] Domoto, N., et al., 2022, ApJ, 939, 8
- [16] Domoto, N., et al., 2023, ApJ, 956, L13
- [17] Tanaka, M., et al., 2023, ApJ, 953, 17
- [18] Asplund, M., et al., 2009, ARA&A, 47, 481
- [19] Nielsen, K. E., et al., 2020, ApJ, 899, 166
- [20] Ghazaryan, S., et al., 2018, MNRAS, 480, 2953

Near-Infrared High-Dispersion Spectroscopic Observations of Chemically Peculiar Stars and Its Application to Kilonova Spectra

Nanae DOMOTO

Research Center for the Early Universe, Graduate School of Science, University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Binary neutron star mergers are one of the most promising sites for the origin of heavy elements in the universe. The spectra of electromagnetic emission from a neutron star merger, known as a ‘kilonova’, observed in 2017 showed several absorption lines, imprints of the synthesized elements. However, the lack of fundamental data on heavy elements, such as transition wavelengths, had made element identification difficult. Throughout my Ph.D. studies, I have been working on identifying elements in kilonova spectra. As part of the studies, we proposed spectroscopic observations of chemically peculiar stars using the Subaru/IRD. This article summarizes the details of our proposal, scientific background, and my experience visiting Hawaii through the Student Observation Support Program.