

# すばる望遠鏡超広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam で迫る重力波源の正体

## Study of gravitational wave sources with Subaru telescope/Hyper Suprime-Cam

(日本天文学会推薦)

代表研究者	甲南大学	富永 望	Konan University	Nozomu TOMINAGA
協同研究者	東京大学	諸隈 智貴	The University of Tokyo	Tomoki MOROKUMA
	国立天文台	田中 雅臣	National Astronomical Observatory of Japan	Masaomi TANAKA
	東京大学	山口 正輝	The University of Tokyo	Masaki YAMAGUCHI

The first direct detection of GW150914 with the Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) opens the era of “gravitational wave astronomy”. However, the conclusive identification of the GW sources on the sky remains challenging because of the poor sky localization with the GW observations. Therefore, we prepare an immediate search system for optical counterparts of GW sources mainly with Subaru/Hyper Suprime-Cam (HSC) in this program. On 2017 August 17, Advanced LIGO and Advanced Virgo detected a GW candidate from a binary NS coalescence. After the alert from LIGO/Virgo collaboration, the Japanese collaboration for Gravitational wave ElectroMagnetic follow-up (J-GEM) performed a survey with HSC and reveals that a candidate SSS17a is the most likely and distinguished candidate to be the optical counterpart of GW170817. Furthermore, we perform multi-wavelength follow-up observations of SSS17a. The observations exhibit nature of SSS17a, i.e., a rapid decline and rapid color evolution. Comparing these observational results with our radiative transfer simulations of kilonova powered by radioactive decays of r-process nuclei synthesized in the merger, our observations demonstrate that GW170817 synthesizes a wide range of r-process elements. This is the first evidence of the hypothesis that NS mergers are the origin of r-process elements in the Universe.

### 研究目的

重力波は重力場が変化することにより発生する波であり、一般相対論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式の解として予言された。アインシュタインによる予言から約 100 年に渡って、一般相対論の観測的実証として、世界初の直接検出を目指した研究が盛んに行われてきた。2015 年から運用を開始したアメリカの Advanced LIGO によって、2015 年 9 月 14 日にブラックホール合体からの重力波 GW150914 が初めて直接検出され、LIGO をリードした Rainer Weiss、Barry C. Barish、Kip S. Thorne の 3 氏が 2017 年ノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。これは、まさに「重力波天文学」が誕生した瞬間と言える。

しかしながら「重力波天文学」には課題が残されていた。それは、重力波の到来方向の決定精度は数 10 平方度と非常に悪く、その検出だけではどの天体から重力波が放射されたのかという基本的な情報すら明らかにすることはできない、という点である。そこで重要となるのは、電磁波放射であり、その中でも特に可視光による観測である。連星合体の理論モデルによると、連星合体は可視光で数日間観測可能であると考えられている。可視光観測の位置決定精度は 0.1 秒角程度 (1 秒角は 1 度角の 3600 分の 1) であり、可視光観測で重力波源の位置を決定できると、重力波源の正体に迫ることが可能となる。

我々は、すばる望遠鏡が 2014 年に運用を開始した超広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC)を用

いて重力波源の可視光探査観測を行っていたが、HSCは非常に広視野であることから、HSCによって得られたデータの解析には時間がかかってしまい、HSCによる観測後候補天体リスト作成までに一週間以上を要していた。本研究では重力波天体に最適化した即時データ解析環境を構築することで、HSCによる観測から重力波源の可視光対応天体同定までの時間を一日へ短縮し、重力波源が可視光で観測可能な間にすばる望遠鏡や他の望遠鏡を用いた重力波源の追観測を行い、観測結果と理論モデルの比較により、重力波源の正体を解明することを目標とした。

## 研究経過

本研究では、まずHSCデータ解析環境を整えるために、計算機およびストレージを購入し、甲南大学に設置した。それらを既存の計算機群と接続することにより、重力波天体に最適化した即時データ解析システムを構築した。その際、ファイルストライピング技術を用いてボトルネックであったファイル入出力の問題をクリアすることにより、重力波可視光対応天体の候補を即時検出することを可能にした。このような事前の準備を整えて、LIGO/Virgo collaborationからの重力波検出のアラートを待った。

2015年9月から2016年1月まで行われたAdvanced LIGOによる第一期観測に引き続き、本研究期間中には2016年11月30日から2017年8月25日までAdvanced LIGOによる第二期観測が行われた。第二期観測は当初はAdvanced LIGOのみによる観測であったが、2017年8月1日よりヨーロッパの重力波望遠鏡Advanced Virgoが運用を開始し、第二期観測に参加した。第一期観測、第二期観測を通じて、太陽の30倍を超える質量を持つブラックホール同士の合体であったGW150914に引き続き、GW151226、GW170104、GW170608、GW170814とブラックホール同士の合体からの重力波の検出が報告された。我々も、GW150914については中小口径望遠鏡を用いた追観測、GW151226およびGW170814については中小口径望遠鏡を用いた追観測に加えすばる望遠鏡HSCを用いた追観測を行った。GW150914、GW151226の追観測については、本研究期間中に論文として出版されている。Advanced LIGOのみによる観測であったGW150914、GW151226、GW170104については重力波から求められた到来方向が非常に広く、全体をカバーするのは不可能であったが、

Advanced Virgoの参加したGW170814については、到来方向が60平方度に絞られ、3つの重力波望遠鏡による観測に対する期待が高まっていた。

GW170814から3日後の2017年8月17日、Advanced LIGOとAdvanced Virgoの両望遠鏡が遂に中性子星同士の合体による重力波源GW170817を観測することに成功した。重力波検出器3台による観測により、GW170817の到来方向は赤経13h、赤緯 $-22^\circ$ を中心とする28平方度に絞られ、その距離は $40^{+8}_{-14}$ Mpcということが明らかとなった。この情報は即時に世界中の電磁波観測グループに伝えられた。これまでにないほど到来方向が狭く制限され、またその距離も近かったことから、各地で即時追跡観測が開始された。その結果、重力波検出からおおよそ11時間後に、複数の望遠鏡がこの重力波に対応すると思われる天体SSS17a(別名DLT17ck)を独立に発見した。

我々も、重力波検出から約17時間後にすばる望遠鏡HSCで重力波到来方向の約66%をカバーする広域追跡観測を行ったのを皮切りに、名古屋大学と大阪大学がニュージーランドで運用する口径1.8メートル望遠鏡MOA-II及びカンタベリー大学が運用するB&C望遠鏡、名古屋大学と鹿児島大学が運用する南アフリカの1.4メートル望遠鏡IRSF、国内の望遠鏡群を駆使して光赤外追跡観測を実施した。

すばる望遠鏡HSCを用いた観測では、GW170817の到来方向・距離分布に含まれる可能性のある銀河外変動天体の候補を60天体発見した。そのうち1天体はSSS17aであり、GW170817の距離誤差内に含まれる近傍銀河NGC 4993(距離 $36 \pm 4$ Mpc)に付随していたが、他の59天体については距離の情報がなかった。そこで、我々は銀河の光度関数を用いて、それぞれの天体が距離誤差内に含まれる確率を計算した。その確率はSSS17a以外の59天体の母銀河について0.2%以下であり、また59天体のいずれかが距離誤差内に含まれる確率もわずか3.2%であった。同様の手法を用いて、NGC 4993について確率を計算すると、その確率は64%となった。この結果により、SSS17aがGW170817の可視光対応天体として非常に有力な唯一の天体であり、他に比肩する天体が存在しないことを示すことに成功した。

さらに、すばる望遠鏡HSCに加えて、すばる望遠鏡MOIRCS、IRSF望遠鏡SIRIUS、MOA-II望遠鏡MOA-cam3、B&C望遠鏡Tripol5を用いた追観測に

より、重力波源の光赤外対応候補天体 SSS17a を可視光から近赤外線にかけての広い波長域で明瞭に捉え、明るさの時間変化を追跡することに成功した。その結果、(1)可視光では数日のタイムスケールで減光すること、(2)近赤外線では2週間程度に渡ってゆっくりと変動すること、(3)初期は青かったこと、を明らかにした。この性質は、以前から予想されていた r プロセス元素合成に伴う電磁波放射(キロノバ/マクロノバ)の性質に一致していた。

さらに、我々は、中性子星合体 GW170817 における元素放出量と元素組成を詳細に調べるため、中性子星合体からの放出物質における輻射輸送シミュレーションを行った。そのシミュレーションの結果、合体から5日以降の近赤外線が卓越する放射を説明するには、ランタノイド元素を含む0.03太陽質量程度の放出物質が必要であることが明らかになった。また、初期のより青い放射を説明するには、比較的電子割合の高い成分( $Ye > 0.25$ )も必要であることも明らかとなった。これは、中性子星合体が幅広い r プロセス元素を合成していることを示唆している。また、重力波観測から推定された中性子星合体の頻度( $1540^{+3200}_{-1220} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ )と電磁波観測と輻射輸送シミュレーションによって明らかにされた GW170817 で放出された物質の量(約0.03太陽質量)は、銀河系内に存在する r プロセス元素量を説明でき、中性子星合体が宇宙の r プロセス元素の起源である説を支持している。

## 考察

本研究開始前には、GW150914、GW151226 というブラックホール合体からの重力波のみが発見されていた。また、Advanced LIGO 望遠鏡の2台のみによる観測であったため、重力波から求まる到来方向は非常に広がった。そのため、電磁波追観測は非常に困難であったが、我々はそれらの重力波源に対して追観測を行い、重力波源の電磁波追観測の体制を整えていった。本研究開始後も GW170104、GW170608、GW170814 とブラックホール合体からの重力波が検出され、特に Advanced LIGO 望遠鏡と Advanced Virgo 望遠鏡によって観測された GW170814 の追観測によって、本研究によって整備したデータ解析システムの運用を行うことができた。このように事前準備を重ねていたため、実際に GW170817 が起こった際に、トラブルなく追観測および即時データ解析

を行うことが可能となった。

Advanced LIGO 第二期観測は中性子星合体からの重力波は70Mpc程度まで観測可能な感度があり、観測限界近くの天体の検出が想定されていた。今回発見された GW170817 は想定されていたより近傍の約40Mpcで発生し、さらに想定されていたより放出物質の量が多かったということもあり、合体直後には1m望遠鏡でも観測可能な明るさであった。また、近傍では銀河の距離が比較的良好に決定されており、重力波源の電磁波対応天体探査に向けて近傍銀河リストが用意されていた。そのため、重力波アラート後最初に夜を迎えるチリにある視野の狭い1m望遠鏡を用いた近傍銀河探査観測によって、電磁波対応天体 SSS17a は発見された。

しかしながら、発見時点で SSS17a が GW170817 に対応した天体であるかどうかは不明であり、さらに SSS17a がキロノバ/マクロノバの性質と一致する観測的特徴を見せた後にも、SSS17a 以外に重力波源 GW170817 に対応する可能性のある天体が存在しないことを示すことは極めて重要である。そのような観測を行うためには、すばる望遠鏡 HSC のような広視野カメラを用いた深い観測が必要不可欠である。実際に、SSS17a が唯一の対応天体であることを示すことができた観測グループは数少なかった。

今後、Advanced LIGO と Advanced Virgo による第三期観測は2018年後半に開始される。第三期観測では、さらなる感度上昇が予定されており、第二期観測に比べて中性子星合体の期待値は3倍になることが期待されている。さらに、2020年には第四期観測が予定されており、Advanced LIGO の設計感度に到達し、第二期観測に比べて中性子星合体の期待値は10倍になることが期待されている。これは、宇宙で発生する中性子星合体の頻度が上がるということではなく、感度上昇によって重力波によって観測可能な宇宙の範囲が広がるということを意味している。そのため、今後検出される中性子星合体の数が増えるとは言っても、それらはより遠方の天体であることが予想される。そのため、それらに付随した可視光対応天体はより暗くなってしまう。特に Advanced LIGO が設計感度に到達する第四期観測では、8m望遠鏡でなければ検出不可能な明るさになることが予想されている。その時代には、すばる望遠鏡 HSC が可視光対応天体検出に必要な不可欠な観測装置となることが想定される。そのため、本研究によって、す

ばる望遠鏡 HSC を用いた追観測・即時データ解析体制を整えたことは、今後の重力波観測および重力波天文学の礎となることが期待される。

今回の GW170817 によってランタノイド元素が中性子星合体によって一定量合成されていることは明らかとなったものの、宇宙における全ての r プロセス元素を説明可能かどうかは依然明らかとはなっていない。特に、金やプラチナなどの r プロセス元素のうち第三ピークに位置する元素が合成されているかどうかの直接的な証拠が得られたわけではなく、今後は「r プロセス元素」というだけではなく、中性子星合体によって r プロセス元素中のそれぞれの元素がどの程度の量合成されているのか、という謎に関する研究が進んでいくことが期待される。また、今後中性子星合体のサンプルが増えることにより、GW170817 が中性子星合体の中で典型的な現象であったのかどうか明らかとなり、中性子星合体から放出される質量や合成される元素の多様性に関する情報が得られることが期待される。これにより、宇宙における r プロセス元素の起源を統計的に明らかにすることが可能となると考えられる。

## 研究の発表

### 口頭発表

1. 諸隈智貴(東京大学), 田中雅臣(国立天文台), 朝倉悠一朗, 阿部文雄(名古屋大学), Paul Tristram (Mt. John 天文台), 内海洋輔(広島大学), 土居守, 本原顕太郎, 田村陽一, 酒向重行, 大澤亮(東京大学), 藤沢健太(山口大学), 伊藤亮介, 植村誠, 川端弘治, 吉田道利(広島大学), 伊藤洋一(兵庫県立大学), 河合誠之, 斉藤嘉彦, 谷津陽一(東京工業大学), 黒田大介, 柳澤顕史(国立天文台), 松林和也, 太田耕司(京都大学), 村田勝寛(名古屋大学), 永山貴宏(鹿児島大学), 富永望(甲南大学), “J-GEM による LIGO 重力波源に対する電磁波フォローアップ観測” 日本天文学会 2016 年秋季年会
2. 富永望(甲南大学), 田中雅臣, 田中賢幸, 吉田道利(国立天文台), 諸隈智貴, 山口正輝, 安田直樹(東京大学), 内海洋輔(Stanford 大学), ほか J-GEM collaboration, “GW170817: すばる望遠鏡 HSC を用いた可視光対応天体の探索” 日本天文学会 2018 年春季年会
3. 内海洋輔 (Stanford 大学), 田中雅臣, 吉田道利,

- 黒田大介 (国立天文台), 富永望 (甲南大学), 永山貴宏 (鹿児島大学), 朝倉悠一朗, 阿部文雄 (名古屋大学), 川端弘治 (広島大学), 伊藤亮介 (東京工業大学), 伊藤洋一 (兵庫県立大学), 大澤亮, 諸隈智貴 (東京大学), ほか J-GEM collaboration, “GW170817: J-GEM による可視近赤外線追跡観測” 日本天文学会 2018 年春季年会
4. 田中雅臣(国立天文台), 内海洋輔(Stanford 大学), 富永望(甲南大学), 吉田道利(国立天文台), 関口雄一郎(東邦大学), 諸隈智貴, 本原顕太郎(東京大学), 太田耕司(京都大学), 川端弘治(広島大学), ほか J-GEM collaboration, “GW170817: 光赤外線対応天体と r プロセス元素合成” 日本天文学会 2018 年春季年会

### 誌上発表

1. Morokuma, T., Tanaka, M., Asakura, Y., Abe, F., Tristram, P. J., Utsumi, Y., Doi, M., Fujisawa, K., Itoh, R., Itoh, Y., Kawabata, K. S., Kawai, N., Kuroda, D., Matsubayashi, K., Motohara, K., Murata, K. L., Nagayama, T., Ohta, K., Saito, Y., Tamura, Y., Tominaga, N., Uemura, M., Yanagisawa, K., Yatsu, Y., and Yoshida, M. "J-GEM follow-up observations to search for an optical counterpart of the first gravitational wave source GW150914", PASJ, 68, L9-(2016)
2. Yoshida, M., Utsumi, Y., Tominaga, N., Morokuma, T., Tanaka, M., Asakura, Y., Matsubayashi, K., Ohta, K., Abe, F., Chimasu, S., Furusawa, H., Itoh, R., Itoh, Y., Kanda, Y., Kawabata, K. S., Kawabata, M., Koshida, S., Koshimoto, N., Kuroda, D., Moritani, Y., Motohara, K., Murata, K. L., Nagayama, T., Nakaoka, T., Nakata, F., Nishioka, T., Saito, Y., Terai, T., Tristram, P. J., Yanagisawa, K., Yasuda, N., Doi, M., Fujisawa, K., Kawachi, A., Kawai, N., Tamura, Y., Uemura, M., and Yatsu, Y. "J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226\*", PASJ, 69, 9-(2017)
3. Abbott, B. P., et al. "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger", ApJ, 848, L12-(2017)
4. Utsumi, Y., Tanaka, M., Tominaga, N., Yoshida, M., Barway, S., Nagayama, T., Zenko, T., Aoki, K., Fujiyoshi, T., Furusawa, H., Kawabata, K. S.,

- Koshida, S., Lee, C.-H., Morokuma, T., Motohara, K., Nakata, F., Ohsawa, R., Ohta, K., Okita, H., Tajitsu, A., Tanaka, I., Terai, T., Yasuda, N., Abe, F., Asakura, Y., Bond, I. A., Miyazaki, S., Sumi, T., Tristram, P. J., Honda, S., Itoh, R., Itoh, Y., Kawabata, M., Morihana, K., Nagashima, H., Nakaoka, T., Ohshima, T., Takahashi, J., Takayama, M., Aoki, W., Baar, S., Doi, M., Finet, F., Kanda, N., Kawai, N., Kim, J. H., Kuroda, D., Liu, W., Matsubayashi, K., Murata, K. L., Nagai, H., Saito, T., Saito, Y., Sako, S., Sekiguchi, Y., Tamura, Y., Tanaka, M., Uemura, M., and Yamaguchi, M. S. "J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817", *PASJ*, 69, 101-(2017)
5. Tanaka, M., Utsumi, Y., Mazzali, P. A., Tominaga, N., Yoshida, M., Sekiguchi, Y., Morokuma, T., Motohara, K., Ohta, K., Kawabata, K. S., Abe, F., Aoki, K., Asakura, Y., Baar, S., Barway, S., Bond, I. A., Doi, M., Fujiyoshi, T., Furusawa, H., Honda, S., Itoh, Y., Kawabata, M., Kawai, N., Kim, J. H., Lee, C.-H., Miyazaki, S., Morihana, K., Nagashima, H., Nagayama, T., Nakaoka, T., Nakata, F., Ohsawa, R., Ohshima, T., Okita, H., Saito, T., Sumi, T., Tajitsu, A., Takahashi, J., Takayama, M., Tamura, Y., Tanaka, I., Terai, T., Tristram, P. J., Yasuda, N., and Zenko, T. "Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817", *PASJ*, 69, 102-(2017)
  6. Utsumi, Y., Tominaga, N., Tanaka, M., Morokuma, T., Yoshida, M., Asakura, Y., Finet, F., Furusawa, H., Kawabata, K. S., Liu, W., Matsubayashi, K., Moritani, Y., Motohara, K., Nakata, F., Ohta, K., Terai, T., Uemura, M., and Yasuda, N. "A challenge to identify an optical counterpart of the gravitational wave event GW151226 with Hyper Suprime-Cam", *PASJ*, 70, 1-(2018)
  7. Tominaga, N., Tanaka, M., Morokuma, T., Utsumi, Y., Yamaguchi, M. S., Yasuda, N., Tanaka, M., Yoshida, M., Fujiyoshi, T., Furusawa, H., Kawabata, K. S., Lee, C.-H., Motohara, K., Ohsawa, R., Ohta, K., Terai, T., Abe, F., Aoki, W., Asakura, Y., Barway, S., Bond, I. A., Fujisawa, K., Honda, S., Ioka, K., Itoh, Y., Kawai, N., Kim, J. H., Koshimoto, N., Matsubayashi, K., Miyazaki, S., Saito, T., Sekiguchi, Y., Sumi, T., and Tristram, P. J. "Subaru Hyper Suprime-Cam Survey for an optical counterpart of GW170817", *PASJ*, in press (2018)