

J-GEMによる光赤外線における 重力波対応天体追観測の取り組み



諸 隈 智 貴

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: tmorokuma@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

2015年9月に開始された2台のAdvanced LIGO重力波望遠鏡による重力波観測ランにおいて、二つの重力波イベントGW150914, GW151226が検出された。重力波現象に対する“天文学”を行うためには、重力波源から放出される電磁波を捉える必要がある。本稿では、われわれが組織した光赤外線・電波帯における追観測グループJ-GEM, およびJ-GEMによる2015年の二つの重力波イベントに対する追観測について紹介する。

1. 重力波天文学前夜

日本時間2015年9月14日18時50分45秒、米国のAdvanced LIGO重力波望遠鏡2台により、人類史上初の重力波の“直接”検出がなされた。アインシュタインの一般相対性理論が正しいことの観測的実証がまた一つ追加されたことになる。私が天文学の道に足を踏み入れた2000年代初めには、自身の不勉強もあり、正直なところ、重力波がこれほど早く検出されるとは想像もしていなかった。2014年初めに、J-GEM¹⁾の観測グループに加わるお誘いをいただくまでの間、「重力波」に関連する私の記憶と言えば、国立天文台の研究員時代に、当時重力波研究に従事する大学院生であった和泉究氏と野球仲間（天文台野球部所属）であったことくらいであった。その彼が、Advanced LIGOの重力波観測^{*1}論文²⁾に名前を連ね、私自身から天文月報の記事の執筆を依頼³⁾、^{*2}することになるとは、隔世の感がある。

個人的な話はさておき、本稿では、J-GEMな

る組織とは何か、重力波に対してJ-GEMでは何ができるのか、J-GEMでこれまでに行ってきた観測および将来へ向けた装置開発の取り組みについてご紹介したい。

2. J-GEM

J-GEMとは、Japanese collaboration for Gravitational wave ElectroMagnetic follow-upの略称である。Advanced LIGOでの重力波観測の開始にあたり、広島大学の吉田道利氏を代表として組織した、日本国内の大学・研究機関のもつ国内外の光学赤外線・電波望遠鏡を用いた重力波電磁波対応天体同定のための枠組のことを指す。国際宇宙ステーションの「きぼう」に搭載されているMAXI⁴⁾、CALET⁵⁾を用いたX線、 γ 線における観測体制は別途組織されており、本J-GEMには含まれていない。J-GEMの望遠鏡群は、表1、図1に示すように、光学赤外線望遠鏡と電波望遠鏡からなり、日本国内のみならず、ニュージーランド、中国・チベット、南アフリカ、チリ、米国・

^{*1} Advanced LIGOによると、この画期的な検出は「観測」だそうだ。GW150914のPhysical Review Lettersのタイトルは「ブラックホール連星合体からの重力波の観測」とあっさりしたものであった。

^{*2} 私は天文月報編集委員を務めている。

表1 J-GEMの望遠鏡群.

場所	望遠鏡	位置 (経度 [度], 緯度 [度], 高度 [m])	装置	視野	ピクセル スケール
Mt. Johns/ニュージーランド (B&C 61 cm)	0.61	170.47 E, 43.40 S, 1,029	Tripole5	4.2'×6.2'	0.17"
Mt. Johns/ニュージーランド (MOA-II)	1.8	170.47 E, 43.40 S, 1,029	MOA-cam3	1.31°×1.64°	0.58"
明野 (MITSuME)	0.5	138.48 E, 35.79 N, 900	(g, R _c , I _c imager)	27.8'×27.8'	1.63"
木曾 (木曾シュミット)	1.05	137.63 E, 35.79 N, 1,130	KWFC	2.2°×2.2°	0.946"
西はりま (なゆた)	2.0	134.34 E, 35.03 N, 449	MINT	10.9'×10.9'	0.32"
岡山 (京都 3.8 m)	3.8	133.60 E, 34.58 N, 343	KOOLS-IFU	14" φ	1.14
岡山 (OAO 188 cm)	1.88	133.59 E, 34.58 N, 371	KOOLS-IFU	30" φ	2.34"
岡山 (OAO 91 cm)	0.9	133.59 E, 34.58 N, 364	OAO-WFC	28.4'×28.4'	1.67"
岡山 (MITSuME)	0.5	133.59 E, 34.58 N, 358	(g, R _c , I _c imager)	26.9'×26.9'	1.52"
東広島 (かなた)	1.5	132.78 E, 34.38 N, 511	HOWPol	15" φ	0.30"
東広島 (かなた)	1.5	132.78 E, 34.38 N, 511	HONIR	10'×10'	0.30"
山口 (Yamaguchi)	32×2	131.56 E, 34.22 N, 166	6-8 GHz Receiver	—	4'-5'
チベット/中国 (HinOTORI)	0.5	80.03 E, 32.31 N, 5,130	(u, R _c , I _c imager)	24'×24'	0.68"
サザランド/南アフリカ (IRSF)	1.4	20.81 E, 32.38 S, 1,761	SIRIUS	7.7'×7.7'	0.45"
パンパ・ラ・ボラ/チリ (ASTE)	10	67.70 W, 22.97 S, 4,862	ASTECAM	8.1' φ	20-30"
チャントール/チリ (miniTAO)	1.04	67.74 W, 22.99 S, 5,640	ANIR	5.1'×5.1'	0.298"
マウナケア/米国 (Subaru)	8.2	155.48 W, 19.83 N, 4,139	HSC	1.5° φ	0.168"



図1 J-GEMの望遠鏡群.

ハワイと南北両半球を含む多経度にわたっている。このうち、チベットのHinOTORI望遠鏡⁶⁾、可視面分光装置 KOOLS-IFU⁷⁾、超広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen⁸⁾ については本特集に別途記事があるので、詳細はそちらをご参照いただきたい。

2014年、J-GEMは、重力波検出のアラートを受けてフォローアップ観測を行うための覚書を LIGO-Virgo collaboration (LVC) と交わし^{*3}、正式にLVCからの重力波アラート情報を受信し、それを元に電磁波追観測を行うことができること

になった。覚書には、「LVCが重力波検出を公表するまでは、そのアラートも、アラートに基づいて行った追観測により見つかった重力波に関連するであろう電磁波信号についても公開してはならない」という機密保持条項が盛り込まれている。私は妻が同業者ということもあり、余計に秘密を守らねばならぬ立場にいるのは大変つらいことだが、幸か不幸か、これまでのJ-GEMでの観測では、対応天体らしい突発現象は検出できていない。この条項はしばらくは継続される予定だが、いつの日にか解除され、重力波検出後すぐさまその情報が公開され、誰でも電磁波追観測ができる時代がやってくる見込みでもある。こんなことを言うと怒られてメンバーから外されてしまいそうだが、仮に中性子星合体からの電磁波放射をわれわれ自身の手で捉えた際に、私は妻にこの喜びを黙っている自信がないかもしれない。その頃にはこの機密条項は解除されていることを心から望んでいる。

さて、本題に話を戻すと、J-GEMでは、2015年9月から開始された Advanced LIGO 観測ラン

*3 2016年8月時点で180もの観測グループがLVCと覚書を交わしている。

(O1) では、GW150914, GW151226 の2件の重力波アラートに対して光学赤外線望遠鏡を用いて観測を行ってきた。2台の重力波望遠鏡での到来方向決定精度は典型的には数100平方度、場合によっては1000平方度を超え⁹⁾、広視野観測が強力なツールとなる。とは言え、そのような広大な領域を全て観測することは容易ではなく、個別の銀河を1つ1つ観測していく手法も必要となる。J-GEMでは、度スケールの広視野カメラをもつすばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)¹⁰⁾、木曾シュミット望遠鏡Kiso Wide Field Camera (KWFC)¹¹⁾、MOA-II望遠鏡では高確率領域における広視野ブラインドサーベイを、他の望遠鏡では領域内の近傍（距離約100 Mpc以下）銀河に対するターゲット観測を行った。次の章では、これらのJ-GEM観測についてまとめる。

3. J-GEMによる重力波イベントに対する光赤外線観測

検出が期待される重力波源のうち、強い電磁波を放射する天体現象は、中性子星同士もしくは中性子星とブラックホールとの合体である。詳細は田中雅臣氏の天文月報記事他¹²⁾⁻¹⁴⁾をご覧いただきたいが、生成されるr過程元素の放射性崩壊により、主に可視光から近赤外線にかけて電磁波を出すと考えられている。この爆発現象は近年“キロノバ”と呼ばれ、似た放射メカニズムで光る超新星と比べて、赤く、暗く、短い時間スケール（数日）で暗くなると言われている。このような天体を見つけるべく、2015年に検出された2件の重力波源に対して、私たちはJ-GEMの観測設備を使って以下のような観測を行った。

3.1 GW150914

日本時間2015年9月16日14時39分、「重力波を受けました」とのアラートがメールで送られてきた*⁴。私自身は、O1開始予定の9月18日を

2日後に控え、木曾シュミット望遠鏡KWFCでのアラート後の観測の準備をしていた時期であり、本当にアラートはくるのだろうか、きちんと対応できるだろうか、とっていた矢先の出来事であった。自分たちであらかじめ決めた100平方度程度の領域に対して超新星サーベイ観測を行った経験はあったが¹⁵⁾、突然のアラートに即時に反応して数百平方度もの観測を系統的に行い、即時にデータ解析、突発天体の発見を行うという経験はなかった。

当時、Advanced LIGOでは、「インジェクション」なる偽の信号を入れ、あたかも本物の検出かのようにアラートを流すことがあるとされていた。「正式開始前にインジェクションのアラートを出すということはさすがにないのでは？ ということはこれは本物か？」と半分信じ半分疑いながらも急いで観測の準備をしたことを覚えている。しかし、あいにく重力波源の存在確率の高い領域（図2）の中心は南天であり、特に北天側は太陽方向に近く、夜明け直前に数十分間やっと観測ができる程度であった。結果的にJ-GEMでは、木曾シュミット望遠鏡KWFCで24平方度、ニュージーランドのB&C 61 cm望遠鏡で18個の近傍銀河を観測することができた¹⁶⁾（図3）。これは、最終的には、重力波源存在確率のうちわずか0.1%でしかなく、実際にJ-GEMのデータで対応天体とおぼしき天体は見つからなかった。とはいえ、このように、重力波アラートから観測、データ解析、報告、論文化までの一連の流れを早期に経験できたことは、重力波天文学時代がやってきた実感をもつには十分すぎるくらいのイベントであった。

アラートから約5ヶ月たった、日本時間2016年2月11日深夜にGW150914の検出に関する記者会見が行われたが、ここで発表された事実は、ブラックホール合体であったことも含めて、私た

*⁴ この2時間ほど前にGCN Noticesでの通知があったが研究会に参加中¹²⁾で気がつかなかった。

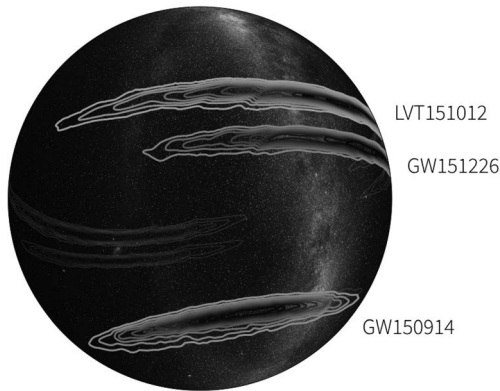


図2 2台のAdvanced LIGO望遠鏡により決定されたGW150914（下）、GW151226（中）の到来方向領域。LVT151012（上）は検出確度の低いイベントで、これを含めると計3件の重力波がO1では検出されたことになる。http://www.ligo.org/detections.phpより引用。

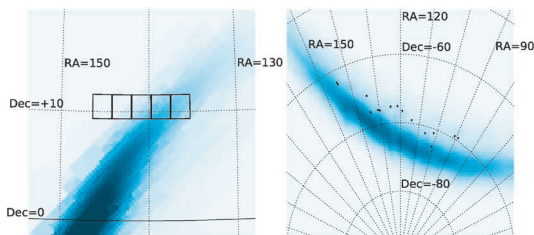


図3 GW150914に対するJ-GEMでの観測マップ。青の濃いところが存在確率の高い領域。左のマップの四角がKWFCでの観測領域、右のマップの点がB&C望遠鏡で観測した銀河の位置。

ちJ-GEMメンバーも数日前に知られるほど秘密にされていた。2件目の重力波GW151226でもそのような状況は変わらず、本稿執筆現在、Advanced LIGOの2回目の観測ラン（2016年秋に観測開始予定、O2と呼ばれる）に向けて、どのような情報が共有されるべきか、実際に共有されるか、について活発な議論が行われている。

3.2 GW151226

やや話が前後してしまうが、2件目（より確度の低いLVT151012を含めると3件目、図2参照）の重力波GW151226のアラートは、観測ランO1も終わりかけの2015年12月26日にやってきた。この時点で、われわれはGW150914の正体さえ知らぬままだったが、追観測を行わない理由は（特に共同利用望遠鏡以外は）ない。特に、GW150914と大きく違ったのは、すばる望遠鏡HSCが約10日後に使用可能だったことである^{*5}。詳細は富永望氏の稿¹⁷⁾をご参照いただきたいが、すばる望遠鏡HSCは世界屈指の探査能力をもつことがこの観測により改めて示された。

すばる望遠鏡以外でも、木曾シュミット望遠鏡KWFC、MOA-II望遠鏡による広視野サーベイ観測、表1に挙げた望遠鏡群で分担した近傍銀河¹⁸⁾ターゲット観測を年末から年始にかけて^{*6}精力的に行った。岡山188 cm望遠鏡KOOLS-IFUでは、他のグループにより報告された、重力波源対応候補天体の分光観測も試みた⁷⁾。最終的に、J-GEMで観測を行った領域は計986.5平方度、238銀河にも及び、観測領域内の重力波存在確率は計約29%となった¹⁹⁾。高い存在確率領域が星間減光の強い銀河面をまたいでいたことはやや不運であったが、J-GEMのもつ望遠鏡群を駆使して、このような大規模な観測を系統的に行うことができ、かつ、すばる望遠鏡HSCを用いることにより他の観測グループではなしえない深さまで探査観測が行えたことは大きな成果であった¹⁹⁾。

4. 今 後

この原稿を執筆している2016年9月現在、次の観測ラン（O2）の開始を待ち、準備を進めている。O1で検出された重力波は、結果的に全て

^{*5} GW150914のアラート後、HSCが利用可能だったのは40日後であり、中性子星を含んだ合体現象からの電磁波放射の検出は見込みが非常に小さかったため、ToOをかけることはしなかった。

^{*6} MAXIによるアラート（重力波とは無関係）に対する木曾シュミット望遠鏡での追観測も年始に多発し、私個人としては最も観測を行った（ただし遠隔・自動）年末年始となった。

ブラックホール合体からのものであったが、O2では、ブラックホール合体のみではなく、中性子星を含む合体からの重力波の検出が期待されている²⁰⁾ この稿が天文月報で公開される頃には、このO2での観測結果いかんでは中性子星合体からの電磁波放射が検出され、対応天体が同定されているかもしれない。そして、私は妻に内緒をして苦しんでいるかもしれない。重力波望遠鏡による到来方向の不定性は、Advanced LIGOのみだと数百平方度、2017年に稼働が予定されているAdvanced Virgoを加えても100平方度は切らない見込みであり、対応天体の同定にはかなり苦勞する日々が続くと予想される。しかし、J-GEMのもつ高い観測能力を武器に、その先に待ち構えているであろう大発見へ向けた努力を継続していきたい。

謝 辞

本稿の内容は、J-GEMでの研究活動に基づいており、すべてのJ-GEMメンバーおよびこれまで議論して下さった重力波関連研究者の皆様に感謝いたします。また、本特集を組むことを承認して下さった天文月報編集委員の皆様にも感謝いたします。本研究は、科研費「新学術領域研究」・「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」（2012-2017年）により支援を受けております。

参考文献

- 1) 吉田通利, 2016, 天文月報109, 385
- 2) Abbott B. P., et al., 2016, PRL 116, 061102
- 3) 和泉究, 2016, 天文月報109, 381

- 4) 芹野素子, 2017, 天文月報110, 25
- 5) Adriani O., et al., 2016, ApJ 829, 20 L
- 6) 内海洋輔, 2017, 天文月報110, 30
- 7) 松林和也, 太田耕司, 2017, 天文月報110, 30
- 8) 酒向重行, 2017, 天文月報110, 42
- 9) 神田展行, 2017, 天文月報110, 6
- 10) Miyazaki S., et al. 2012, SPIE, 8446, 84460Z
- 11) Sako S., et al. 2012, SPIE, 8446, 84466L
- 12) 田中雅臣, 2016, 天文月報109, 76
- 13) Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, ApJ 775, 113
- 14) Tanaka M., et al., 2014, ApJ 780, 31
- 15) Morokuma T., et al., 2014, PASJ 66, 114
- 16) Morokuma T., et al., 2016, PASJ 68, L9
- 17) 富永望, 2017, 天文月報110, 9
- 18) White D. J., Daw E. J., Dhillon V. S., 2011, Classical and Quantum Gravity 28, 085016
- 19) Yoshida M., et al., PASJ in press (arxiv:1611.01588)
- 20) Abbott B. P., et al. 2016, arXiv:1607.07456

Optical and Near-Infrared Follow-Up Observations for Gravitational Wave Events by J-GEM Collaboration

Tomoki MOROKUMA

*Institute of Astronomy, The University of Tokyo,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

Abstract: We here introduce what the J-GEM collaboration is and what J-GEM did for the two gravitational wave (GW) events, GW150914 and GW151226, in 2015 detected with Advanced LIGO. To start GW “astronomy,” we established the J-GEM collaboration which is an observing group by Japanese universities and institutes and conducted systematic observations for the two previous GW events. We are now preparing for the next GW observing run (O2) which starts in fall 2016.