

重力波の国際共同観測再開と KAGRAのこれから

道村 唯太¹・大橋 正健²



道村



大橋

〈¹ カリフォルニア工科大学 LIGO 研究所 Pasadena, California 91125, USA〉

〈² 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〉

〈³ 東京大学宇宙線研究所重力波観測研究施設 〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 238〉

e-mail: ¹ yuta@caltech.edu, ³ ohashi@icrr.u-tokyo.ac.jp

重力波の共同観測を行う国際的な枠組みである LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションは、2023 年 5 月 24 日 15 時 UTC に第 4 期共同観測運転 O4 を開始した。各検出器は前回の第 3 期共同観測運転 O3 が終了してから、レーザー干渉計のアップグレードと調整作業を進め、実に 3 年ぶりの観測再開となった。日本の KAGRA もまだ調整作業は必要なものの、過去最高感度を実現し、LIGO とともに O4 に参加した。4 週間運転した後、予定通り再び調整に入ったが、2024 年春にはさらに感度を上げて観測再開予定である。本稿では、国際観測ネットワークの一角を担う KAGRA の現状と、これからの重力波研究における KAGRA の役割について述べる。

1. はじめに

2015 年の重力波初検出から、すでに 90 を超えるイベントが報告され、我々は全く新しい宇宙の姿を目の当たりにしている。これまでの検出の中でも特に劇的だったのは連星中性子星合体からの重力波の初イベント GW170817 であろう [1, 2]。アメリカにある LIGO2 台に加え、イタリアにある Virgo が観測に参加したことで、その到来方向が 30 平方度程度に絞られ、ガンマ線から電波まであらゆる波長で電磁波対応天体が続々と発見された。こうしたマルチメッセンジャー観測によって、ショートガンマ線バーストや r 過程重元素の起源、中性子星の状態方程式といった様々な長年の謎に迫る大きな手がかりが得られた。また、重力波の伝播速度やハッブル定数の測定などもなされ、重力理論や宇宙論に全く新しい制限が加わった。わずか 1 発のイベントだったが、重力波観測

の強力を鮮烈に印象づけた。

このようなイベントを何度も検出し、重力波天文学・物理学をさらに進めていくためには、今後もさらに重力波検出器の感度を上げ、複数台による共同観測を行っていくことが不可欠となる。LIGO や Virgo は 2020 年 3 月に第 3 期共同観測運転 (Observing run 3; O3) を停止し、高感度化に向けたレーザー干渉計のアップグレードと調整作業を進めていた。そして 2023 年 5 月 24 日、実に 3 年ぶりとなる共同観測 O4 がついに開始された。再びのマルチメッセンジャー観測に期待がかかる、待ちに待った観測再開であったが、Virgo が参加延期を発表するなど、波乱の幕開けとなった。今日ほど、もう 1 台動いていれば、と感じることはなかったのではないだろうか。

2019 年に国際的な重力波共同観測の枠組みに加入した KAGRA も、この O4 から共同観測を開始した。本稿では、重力波共同観測の現状について

て紹介し、その一角を担うKAGRAのサイエンスと、装置開発の現状について述べる。また、重力波観測の今後の展望と、KAGRAの担う役割について述べる。重力波の電磁波対応天体のマルチメッセンジャー観測については、すでに天文月報で素晴らしい特集など [3, 4] が組まれているので、参照していただきたい。また、重力波検出の原理については、[5] などを読んでいただきたい。

2. 国際共同観測が必要な重力波天文学

重力波の信号は極めて微弱である。最初の直接検出イベントであるGW150914の空間の歪み量は $h \sim 10^{-21}$ であったから、アメリカにあるLIGOの4 kmのレーザー干渉計の腕はわずか 10^{-18} mだけ変化したことになる [6]。あらゆる雑音の中から、確実に重力波信号の検出を宣言するためには、相関する雑音を持たない複数台での同時検出が必要となる。また、重力波の到来方向決定は、重力波が検出器に到達する時刻の差を用いて行うため、地球上の離れた3地点以上での検出がマルチメッセンジャー観測にとって極めて重要となる。2地点の到達時刻差では地球上の円状の範囲でしか到来方向が決まらず、3地点によって初めて、2つの円が重なる範囲に到来方向を特定できるのである（詳しくは [5] の図6を参照）。到来方向の誤差領域を絞ることにより、対応天体の同定確率を向上させるだけでなく、同定までの時間を短縮化し、より初期のデータ取得が可能となる。

そこで重力波観測は各プロジェクトが密接に連携して進めており、図1に示す検出器で構成された国際観測ネットワークを構築している。アメリカにはLIGOがワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リビングストンにそれぞれ1台ずつある。またヨーロッパには、Virgoがイタリアのピサ郊外にあり、基線長は短いが検出器開発で大きな役割を果たしているGEO600がドイツのハノーファー郊外にある。そしてKAGRAは岐阜県飛騨市の神岡鉱山にある重力波検出器である。

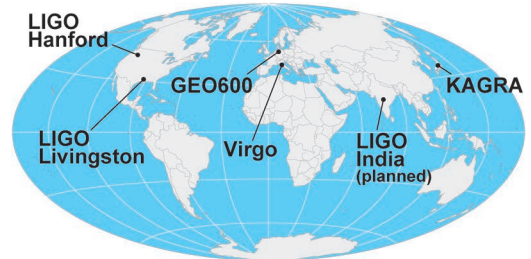


図1 現在稼働中または建設予定のレーザー干渉計型重力波検出器。

これらの検出器を担当する各プロジェクトは一体となってLIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションを構成しており、装置開発はもちろん、データの管理や解析、論文の執筆などを協力して進めている。研究者同士の交流も盛んであり、複数のプロジェクトを掛け持ちしている研究者も多く存在する。また各検出器が同時に観測運転をすることが重要となるため、どの時期に観測を行って、どの時期に検出器の調整を行うかを相談しながら共同観測計画を立てている [7]。

重力波に対する高い感度を実現するのは容易ではなく、組み上げたレーザー干渉計の調整を行いながら少しずつ高感度化していく必要があるのも、共同観測計画を立てる必要がある理由である。高感度化には、防振のために多段振り子で懸架された鏡の揺れを抑えるための制御、複数の複合光共振器からなるレーザー干渉計を共振点に持っていくための制御、レーザー光の吸収に伴う鏡の熱変形の補正など、あらゆる精微な調整が必要となる。地面は常時微動で μm 程度揺れているが、その中で 10^{-18} m以下の長さ変化を測定しなければならないのである。調整を続けて少しでも高感度化するか、調整をやめて観測期間を伸ばすか、というのは様々な状況に依存する。そのためLIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションでは定期的に話し合いを行い、必要に応じて観測計画を見直しており、最新の計画は [8] で公表されている。

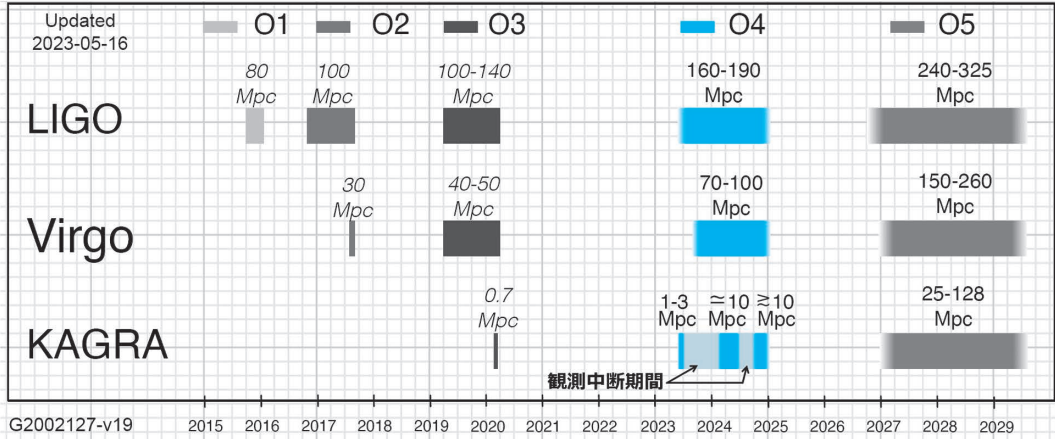


図2 LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションの共同観測計画 [8]. 塗られた期間は観測 (予定) 期間であることを示しており、その上の Mpc 単位の数字はその期間での連星中性子星合体の観測可能距離 (の予測) である。観測と調整を繰り返しながら、感度を上げていく計画になっている。

3. 重力波共同観測の現状

現時点での最新の共同観測計画と、各運転での連星中性子星合体への観測可能距離を図2に示す。O1はLIGOの2台で2015年9月から2016年1月にかけて行われ、連星ブラックホール合体からの重力波の初検出が成された [6]。2016年11月から2017年8月まで行われたO2は、最初はLIGOの2台のみの観測であったが、最後の3週間余りはVirgoの参加が叶い、連星中性子星合体からの重力波の検出とそのマルチメッセンジャー観測が達成された [1, 2]。2019年4月に開始したO3は、新型コロナウイルスの影響で2020年3月に停止を余儀なくされたものの、中間質量ブラックホールや中性子星・ブラックホール連星を含む多数のイベントを検出し、O1, O2と合わせて累計90のイベントが検出された [9]。

2023年5月24日に開始したO4は20ヵ月続く予定である。LIGOは連星中性子星合体への観測可能距離で130-150 Mpcの感度を實現している。これは当初の目標であった160-190 Mpcには及ばないものの、観測期間中にも感度向上を図る予定である。KAGRAも後述のように、LIGOと同

時刻にO4観測を開始した。Virgoは目標を達成できず、30 Mpc程度の感度であったため、O4に遅れて参加することをO4開始直前の5月11日に発表した。損傷した鏡の交換などにより感度を2倍以上にし、2023年中の観測開始を目指している。すでに重力波を観測している検出器であっても、その調整や感度向上の見通しを立てるのは難しいことがわかっていただけだと思う。

稼働中の2台のLIGOはすでにくつもの重力波イベント候補を検出しており、公開アラートが発信されている。約2-3日に1回の検出をしており、これはこれまでの観測から予想される連星合体のイベントレートと無矛盾である。各検出器の現在の感度は [10] で公開されており、見つかった重力波イベント候補の公開アラートの受け取り方とその解釈の仕方は [11] にまとまっている。共同観測であるため、こうしたアラートの確認や検出器状態の確認などはKAGRAやVirgoの研究者も共同で24時間シフトを組んで行っている。

4. KAGRAのサイエンス

以上のように強い連携を持って進めている重力波共同観測の中で、アメリカ、ヨーロッパから離

れたアジアにある KAGRA には様々なサイエンスがあり、期待も大きい [12]。マルチメッセンジャー天文学に対しては、離れた3地点での観測で重力波の到来方向決定精度を向上させるだけでなく、稼働率の向上でも貢献することができる。先述のように、レーザー干渉計は極めて精密な距離計測装置であるため、天候やわずかな不具合などの影響で共振点から外れ、観測状態でなくなってしまうことがある。再び観測状態に持つていくには数時間かかることもあり、1台あたりの稼働率は70%程度となっている。長くても1分程度の連星合体からの信号を確実に3台以上で受けるためには、4台目以降も重要となってくるのである。

また、例えば重力波の偏極観測においても、KAGRAは重要となる。重力波の偏極の分離には、単純には偏極の数だけ検出器の数が必要となるため、KAGRAの観測参加によって初めて、スカラーモードやベクトルモードのような、一般相対論を超えた偏極の本格的な探索が可能となる [13]。また、放出される重力波の偏極モードは、連星合体の軌道傾斜角によって異なるため、より正確な軌道傾斜角の決定が可能となる。重力波の振幅から連星までの距離を推定する重力波観測では、軌道傾斜角と距離が一般的には縮退しているが、偏極によってこれが分離可能となり、例えばハッブル定数の測定精度を上げることができる [4]。

5. KAGRA の観測参加と開発の現状

さて、KAGRAがこうした国際共同観測の枠組みに公式に入ったのは LIGO-Virgo による O3 観測中であった 2019 年 10 月のことである。サイエンスへの期待はもちろん、検出器やデータの共同解析システムの準備が整い、共同観測を始められると判断され、KAGRA の完成記念式典で各プロジェクトの代表が研究協定に調印したのである。新型コロナウイルスの影響で O3 が停止してしまったため、予定していた LIGO-Virgo との共同観測は達成できなかったものの、GEO600 との共

同観測 O3GK を 2020 年 4 月に実施し、共同で初のデータ解析を行った [14]。

この時点での KAGRA の感度は最大で約 1 Mpc であった。感度は主に鏡の制御系から混入する雑音や散乱されたレーザー光に由来する雑音で制限されていたため、O3 後の 3 年間で、これらの雑音を下げするために鏡の懸架系の改良や、散乱光が干渉計に再結合しないようにするバッフルと呼ばれる装置の導入などを進めた。特に鏡の制御系は大幅に改善しており、O4 開始時点で、特に低周波帯域の感度は最大 1桁程度向上している。また、鏡のアライメント制御にも成功したことにより干渉計制御の安定度も向上し、1 Mpc 以上の感度を定常的に達成できるようになった。

KAGRA は LIGO と同じ時刻に O4 観測を開始し、4 週間の観測運転を経て、予定通り再び干渉計の調整に入った。この後、サファイア鏡を低温に冷やすなどの改良を行い、2024 年春に観測を再開する予定である。この時には 10 Mpc 程度の感度を実現することを目指している。

2027 年頃に開始予定の O5 では、KAGRA は設計感度に近い 25-128 Mpc の感度を実現する目標を立てている。これまでの干渉計コミッショニング中に、用いているサファイア鏡を 30 K 程度以下の低温に冷やすと霜付きが発生してしまう問題が見つかったが、真空が悪かったことが原因であり、真空装置のリークを減らしたりすることによって解決している。また、サファイア鏡の複屈折が想定よりも大きい問題が見つかった [15]。複屈折は光共振器の効果でその影響が減らせることがわかったため、O4 時点では問題にならないと考えているが、今後の高感度化に向けて、国立天文台を中心により高性能なサファイア鏡の製作を進めている。製作に用いているサファイア結晶は、韓国グループから提供された、光吸収と複屈折が小さい高性能な結晶である。

また、O5 以降はアップグレードを行ってさらなる高感度化を図る予定であり、どのようなアッ

プグレードを行うかの議論を行っている [16].
 例えば、レーザー光の量子的な揺らぎに由来する量子雑音を全周波数帯域にわたって低減するために、周波数依存スクイズド真空場の導入などを考えている。フィルターキャビティと呼ばれる光共振器を用いたその生成は、マサチューセッツ工科大学と国立天文台三鷹キャンパスのTAMA300施設で独立に、世界で初めて実証された [17].
 これは2000年から2年間にわたって世界最高の重力波感度を実現したTAMA300を改造して行われた実験であった。

6. 重力波観測の今後の展望

重力波天文学・物理学をさらに展開させるためには、既存の検出器の高感度化はもちろん、さらに検出器の台数を増やしていく必要がある。そこで、LIGOと同じ検出器をインドのヒンゴリに建設するLIGO India計画も進められており、2023年4月6日にはついに予算が認められた [18]. LIGO Indiaは2030年代の観測開始を目指している。

また、ヨーロッパやアメリカでは、2035年頃の観測開始を目指し、Einstein TelescopeやCosmic Explorerといった次世代検出器計画も着実に進められている。これらは10-40 kmの腕を持つレーザー干渉計を新たに建設し、低温鏡を用いて熱雑音を低減することなどにより、現在の検出器より感度を1桁以上向上させる計画である。次世代検出器が実現されれば、ほぼ全宇宙の連星合体からの重力波が観測可能となる。

こうした次世代検出器に向けた開発においても、KAGRAは重要な役割を担った検出器である。KAGRAは地下建設や低温鏡といった次世代検出器の技術を先行して採用している。これらの技術を採用したレーザー干渉計の運転はKAGRAが世界で唯一実現しており、その経験が世界的に注目されている。例えば、サファイア鏡は低温で機械的な損失が小さいため、LIGOやVirgoが採用している常温の石英鏡に比べると熱雑音を減ら

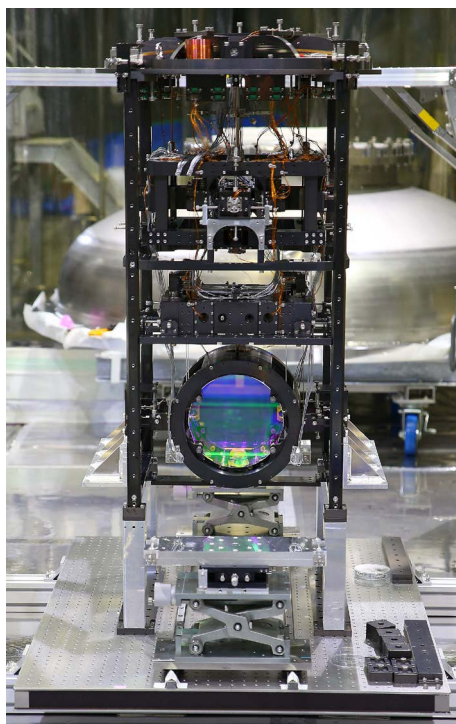


図3 KAGRAの低温懸架系に吊り下げられたサファイア鏡。2019年に低温真空槽に導入する直前の状態。

すことができるが、石英鏡より大きな複屈折を持つ。その複屈折の影響が光共振器で減らせるというのはKAGRAで初めて明らかになった効果である。また、LIGOやVirgoでは鏡の熱変形がレーザー光の高出力化への大きな障害となっているが、熱伝導率の大きいサファイア鏡ではその影響が小さいと考えられており、その有効性が注目されている。さらに、地下では地面や空気の密度揺らぎなどに由来する重力勾配雑音が小さいと考えられており、次世代検出器の研究者と共同でKAGRAの地下環境の評価などを行っている。前例のない挑戦をしているKAGRAの成功は、次世代の重力波研究の鍵を握っているのである。

7. おわりに

重力波観測の時代が幕を開け、重力波検出は日常化した。しかし、マルチメッセンジャー観測が

日常化するためには、国際観測ネットワークの本格稼働が不可欠である。KAGRAのO4観測への参加は、ネットワークによる重力波天文学・物理学のさらなる発展に向けた第一歩である。アメリカのLIGO、ヨーロッパのVirgoに加え、アジアにあるKAGRAによる重力波観測によって、重力波源のパラメータ決定精度を大幅に向上させることなどが可能となり、質的に異なるサイエンスが可能となる。KAGRAによる重力波観測の報に期待していただきたい。

謝 辞

KAGRAは、文部科学省(MEXT)、日本学術振興会(JSPS)、韓国国立研究財団(NRF)、韓国科学技術情報通信部(MSIT)、台湾中央研究院(AS)、台湾国家科学及技术委員会(NSTC)などの助成を受けています。

LIGO-Virgo-KAGRAコラボレーションは2000人を超える研究者から構成されています。特に検出器のあるサイトでは、干渉計を少しでも高い感度と高い安定度で動作させようと観測中も努力が続けられており、重力波天文学・物理学の目覚ましい発展はこれによって支えられています。共同研究者の皆様に改めて感謝いたします。

天文月報の目次にKAGRAの文字が入るのは初めてのことではないかと思えます。本稿の機会をくださった仏坂健太氏ほか編集委員の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] LIGO and Virgo, 2017, PRL, 119, 161101
- [2] Abbott, B. P., et al., 2017, ApJ, 848, L12
- [3] 田中貴浩ほか, 2018, 天文月報, 7-10&77-87

- [4] 仏坂健太, 2019, 天文月報, 112, 778
- [5] 神田展行, 2017, 天文月報, 110, 6
- [6] LIGO and Virgo, 2016, PRL, 116, 061102
- [7] KAGRA, LIGO and Virgo, 2020, Living Reviews in Relativity, 23, 3
- [8] <https://observing.docs.ligo.org/plan/> (2023.06)
- [9] LIGO, Virgo and KAGRA, 2021, arXiv e-prints, arXiv:2111.03606
- [10] https://gwosc.org/detector_status/ (2023.06)
- [11] <https://wiki.gw-astronomy.org/OpenLVEM> (2023.06)
- [12] KAGRA, 2021a, PTEP, 2021, 05A103
- [13] Takeda, H., et al., 2018, PRD, 98, 022008
- [14] LIGO, Virgo and KAGRA, 2022, PTEP, 2022, 063F01
- [15] KAGRA, 2021b, PTEP, 2021, 05A101
- [16] Michimura, Y., et al., 2020, PRD, 102, 022008
- [17] Zhao, Y., et al., 2020, PRL, 124, 171101
- [18] <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20230417> (2023.06)

Restart of the Joint Observing Run by the Global Gravitational Wave Detector Network and Prospects of KAGRA

Yuta MICHIMURA¹, Masatake OHASHI²

¹LIGO Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA,
¹RESCEU, University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

²KAGRA Observatory, ICRR, University of Tokyo, Hida, Gifu 506-1205, Japan

Abstract: LIGO-Virgo-KAGRA collaboration started their observing run O4 on May 24, 2023. This was after three years of downtime for laser interferometer upgrades and adjustments. KAGRA in Japan has also started the run at its best sensitivity ever, together with LIGO. After a month long run, KAGRA has interrupted the run as planned, aiming to restart with better sensitivity in spring 2024. In this article, we discuss the status of KAGRA and its key roles in the future of gravitational wave research.