

重力波望遠鏡 KAGRA の補助光学装置

On auxiliary optical instruments for KAGRA

○阿久津智忠（国立天文台） [Tomotada Akutsu (National Astronomical Observatory of Japan)]、ほか KAGRA collaboration

概要(Abstract)

国立天文台ではこれまで、大型重力波望遠鏡 KAGRA に必須の多数の装置類について、設計から組み込みまでを担ってきた。本講演では、これらの装置のうち、迷光対策用のバッフルや、3km の光軸モニター用の光学装置に代表される補助光学装置について概観し、現状を報告した。また、現状の問題点について簡単に述べたほか、今後の KAGRA のアップグレードの計画に即した開発予定についても紹介した。

We have been responsible for leading KAGRA, a gravitational-wave telescope in Japan, in a variety of ways including a number of essential instruments from the design to installation. Among them, this talk overviewed current status of auxiliary optical instruments such as optical baffles for stray-light mitigation and telescopes for monitoring optical axes of light beams transmitting through 3-km vacuum tubes. We also briefly discussed on some issues we have been facing on. In addition, we introduced plans for additional instruments to upgrade KAGRA in the future.

1. はじめに

KAGRA は日本初の本格的な大型重力波望遠鏡計画である [1,2]。岐阜県飛騨市神岡町の山岳地帯の地下に設置されている。2010 年夏に建設予算の措置がされて以来、新たにトンネルを掘削し、インフラを整え、そして各種のコンポーネントをあらかじめ敷設するまでを、約 9 年で成し遂げた。この間、必要最低限のセットアップにて 2016 年と 2018 年に試験運転をこなした。2020 年初頭において、KAGRA はまだ性能出し（コミッショニング）作業の最中であるが、すぐに観測運転を開始する予定である。

重力波天文学を取り巻く状況はここ 4 年で甚だしく変化している。特に海外の装置では重力波の観測事例が次々と蓄積されており、数だけで言えば特に珍しい現象ではなくなった。まず、2015 年に米国 LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) が人類史上初の重力波の直接観測に成功した (GW150914 と呼ばれる) [3]。これは約 400 Mpc 遠方の宇宙において、ブラックホール連星が衝突合体したことで生じた重力波と推定されている。これまで、有史以前の可視光観測に始まり、赤外線、電波、紫外線に X 線、 γ 線やニュートリノなどを観測手段として発展してきた天文学であるが、重力波が加わったことで天文学は新たな局面を迎えた。そもそも、この種のブラックホール連星について、その存在を予言していた者は少数で、大方の予想として最初の観測事例は、存在確率から考えても中性子星の連星合体による重力波であろうと思われていた。つまり、それまでの観測手段や理論では覚

束なかった存在をあぶりだしたわけで、重力波天文学の実力を端的に示してみせたと言えよう。その後、LIGO と欧州 Virgo が協定を結び、重力波の国際観測網が形成された。こうして、2017 年にはとうとう前述の中性子星連星の合体が重力波で観測された (GW170817) [4]。国際観測網の構築で期待される効果の 1 つは、重力波の到来方向の逆算精度が向上することである。換言すると、重力波源に対応する天体が存在する領域をより絞り込める。実際、この時には対応天体からの信号を可視光、赤外、電波、紫外、X 線、 γ 線で補足でき、衝突合体前後の天体物理学的現象について、それが時々刻々と変化する様を追跡することもできた。このような背景の中、KAGRA は 2020 年 2 月を目処に観測運転を開始し、国際観測網に参加・貢献する予定である。現在、このためのコミッショニングを急ピッチで行っている。

KAGRA は LIGO や Virgo と同様に、レーザー干渉計測を手段として、重力波による時空の歪みを検出する装置である。現実的な重力波は、最大のものでも歪み量は 10^{-21} 程度 (1 m の距離が 10^{-21} m 程度伸縮することに相当) と極めて微小であり、雑音に容易に埋もれてしまう。そのため、検出器への技術的要求は厳しい。例えば、端的に言って干渉計の基線長は長いほど感度が高く、KAGRA は Virgo と同様の 3 km としている (なお LIGO は 4 km)。基線方向は L 字に配置した 2 方向であり、いわゆるマイケルソン干渉計がベースとなっている。実際には、1 方向あたり 2 枚のメインミラーを対向させ、3 km 長の Fabry-Perot 光共振器を構成することで、検出感度を必要なレベルに高めている。このほか、高出力かつ高安定化されたレーザー光源や、光学素子の防振装置、超高真空環境なども欠かせない。いっぽう、KAGRA に特有の、海外の干渉計と異なる点は 2 つある。1 つ目は、既に述べたが、地面振動が静かな地下環境に設置していることである。2 つ目は、メインミラー 4 つを 20 K 前後まで冷却し、熱雑音による悪影響を直截に低減させようという設計である。これらの設計思想は、世界的にも次世代の大型干渉計の概念設計に採用されており、その意味で KAGRA は最先端の重力波望遠鏡と言える。

国立天文台は、KAGRA を推進する主要 3 機関の一角として、多様かつ多数の装置類の設計から設置までを行うなど、建設の主翼を担ってきた。今回の講演では、このうち補助光学装置に焦点をしばり、さまざまな技術的側面から現状を概説した。また、今後の KAGRA のアップグレードに即した開発予定についても簡単に触れた。

2. 補助光学装置とエンジニアリング

ここでは、補助光学装置の個別技術についていくつか例を挙げ概説する。しかし、その前にまずは、システム工学的な観点から最も難関だったと感じた点について私見を紹介する。

大型システムを建設するプロジェクトでは、システムをいくつかの構成要素 (サブシステム) に切り分けて、担当責任を割り振るのが常套手段と思われる。いっぽう、管理運用がうまくないと、この手段ではプロジェクトが空中分解するリスクがある。このような、システム工学の観点から見たとき、KAGRA の補助光学サブシステムの特徴は 2 つで、(1) 他のサブシステムとのインターフェースが (他と比較して) 多数かつ多様であること、(2) 部品点数が多いこと、であった。これらに起因して様々な問題が発生したが、その対処のためには、(1)については適切なインターフェースの管理体制が、(2)については適切な部品の管理体制が必要だったと思う (必要性を訴えたが未達である)。そもそも、KAGRA 全体としては、始めにサブシステムを細かく分けすぎたのが良くなかったと思っている (参考文献[5])。

なぜこんなに細かいのか？これは、システムの切り分け方として適切かどうか、システム工学的観点からの注意深い検討をおろそかにしたまま、(1) 対内的要因：諸先生方に魅力的な仕事を配るため、あるいは、(2) 対外的要因：人的リソース条件の違う海外の同等プロジェクトのそれと一対一で対応するサブシステムが無いと落ち着かないため、などの理由で行われたと個人的には分析している。その結果、各サブシステムどうしがどのように連動するのか、または、インターフェースの取り合いのところで見落としはないか、といった、つなぎ目に関する管理（理解の共有）が行き届かないまま進行してしまった。このしわ寄せを解きほぐし、辻褄を最終的にあわせる作業こそが最も難関であった。このような知見を大小様々なプロジェクトで分野横断的にまとめ、活用できるようにすると、天文学を含む大型プロジェクトに資するところがあるかもしれない。

さて、私が担当する補助光学サブシステムには、例をあげれば、(1) 迷光対策のための光学バッフル、(2) 3km 光軸モニター用の光学装置 transmission monitor system (TMS)、(3) 防振された鏡の姿勢を安定にモニターし続けるための光学センサー (optical levers)、(4) 超高真空環境と通常空間との間でレーザー光を入出力するために必要な超高級品（低損失・低反射率）から種々の用途のための廉価品までを含む、様々な品質のビューポート窓類など、あまり統一感のない雑多なものが含まれる。統一感がない理由は前述のとおりである。このうち、今回は(1)と(2)を特に選んで紹介する。

干渉計における迷光（ゴーストビームおよび散乱光）による雑音は、定性的には、干渉計のメイン光軸に再結合する迷光量と、その迷光が辿ってきた経路の防振具合の2点に関係する。干渉計の設計時に、可能な限り雑音をモデル化しているが、現実世界はそれより複雑で難しい。例えば LIGO では過日、観測の合間はかなりまとまった時間が迷光雑音の特定と対策に費やされた。

また、迷光雑音のシミュレーション方法の開拓も課題となっている。市販の光線追跡ソフトでは、光線を non-sequential に coherent な干渉を考慮して追跡するのは困難である。また、設計時には迷光光線量を到着時の進入角度ごとに数 ppm（対・全数）で知りたいのだが、これは大多数の光線を捨てることを意味するため、その統計的な有意性の取り扱いが難しい。実際には途中までを市販ソフトで行い、その後仮定を重ねつつ解析的な手法で光線追跡の結果を処理した。これらの試みはまだ道半ばであり、LIGO でも決定打となる手法はないため、随時情報を交換しながら開発を進めている。いずれにせよ、得られた知見を元に、様々な種類の光学バッフルを設計し、組み立て、KAGRA にインストールした。

バッフルの黒色表面処理についても KAGRA で新規開拓を行った。これは、超高真空 ($< 10^{-7}$ Pa) に対応するため脱ガスが少なく、干渉計で用いるメインのレーザー光の波長に対してできるだけ黒く、大型 ($\phi 800$ mm 前後) の複雑な形状のものにもリーズナブルな費用で工業的に適用でき、そして 8 K 程度までの冷却に耐えうる必要があった。これらを勘案して、ニッケル-リン-タングステン系の黒色メッキを母材に採用した[6]。

次に、KAGRA の長期安定運転に必要な、3km 光共振器の光軸モニター transmission monitor system (TMS) を紹介する。TMS は 2 本ある光共振器の遠端にそれぞれ 1 台ずつ設置されている。そもそも、直線状の光共振器で共振器内部の状況を知るには、透過光が最適である。というのは、光は共振器内で共振していなければそもそも透過してくることもできない。また、透過光の空間モードを監視する（通常は最低次モード TEM00）ことで、共振器内の空間モードを類推できる。TMS は、このよ

うな透過光の光量や空間モードのほか、光軸の並進や傾きを監視する。2つのミラーからなる光共振器の安定な光軸は、ミラーの姿勢に応じて一意に定まるので、透過光軸の動き（並進や傾き）を読み取れば、光共振器を構成するメインミラーの姿勢のぶれに焼き直せる。干渉計の長期安定運転には、この姿勢のぶれの情報を用いてミラーの角度制御を行うことが必須となる。

光軸の動きは、1cm サイズほどの4つ割りの photodiode (quadrant photodiode; QPD) を複数個、空間的に適切に離して配置することで検出している。干渉計から出てくるレーザービームは、3 km をコリメートさせて飛ばす関係上、QPD が求めるビームサイズ ($\phi 0.7\text{mm}$ 程度) よりもはるかに大きい (約 $\phi 70\text{mm}$)。このため、TMS の光学系ではビーム径を約 1/100 に縮小させる。具体的には、直径 1 m の真空槽の中でまずは 1/10 に縮小させ、その後、ビューポート窓から出射させたビームの径を大気中でさらに 1/10 に縮小している。いっぽう、QPD では TMS 自体の揺れは、共振器光軸の揺れと区別できない。このために TMS を載せる防振台も設計から設置までを行った。

3. 今後のアップグレード

現在、重力波の国際観測網ではこの4月末までの第3期観測の最中であり、前述のように KAGRA も直ちにこれに参加すべくコミッショニングを進めている。この後、LIGO や Virgo ともアップグレードを挟みながら何度か観測運転を行う予定であり、KAGRA もやはりこれらに参加することを目指している。よって、同様のタイミングでアップグレードを行うことが望ましい。今回あげた話題に関連して言えば、例えばすでに LIGO で問題になっている干渉計中央部分での迷光対策が KAGRA でも必要になるだろう。実際、光線追跡してみると、多数のゴーストビームが干渉計中央部分を飛び交うことがわかる。これに対応するため、中型の光学バッフルを既に設計し、組み立てまで完了している。これらは、第3期観測の終了後に KAGRA にインストールする予定である。

4. まとめ

KAGRA を構成する装置のうち、国立天文台が担当するサブシステムの1つである補助光学系に焦点をあて、いくつかの個別技術について装置の観点（迷光対策や 3 km 光共振器の光軸モニター）から紹介した。また、それらを大型システムに組み込む際に感じたシステム・エンジニアリング的な課題についても触れた。KAGRA は現在、第3期国際観測網への参加にむけて、コミッショニング作業が大詰めを迎えている。その後を見据えたアップグレードに向けた準備も着々と進めているところである。

5. References

- [1] KAGRA Collaboration, Prog. Theo. Exper. Phys. **2018**, 013F01 (2018)
- [2] KAGRA Collaboration, Class. Quantum Grav. **36**, 165008 (2019)
- [3] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)
- [4] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Phys. Rev. Lett. **119**, 161101 (2017)
- [5] Tom DeMarco, “The Deadline: A Novel about Project Management”, Dorset House (1997)
- [6] T. Akutsu et al., Opt. Mater. Express **6**, 1613 (2016)