

重力波望遠鏡 KAGRA の補助光学装置

Auxiliary optical instruments for a gravitational-wave telescope 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)

日本の重力波望遠鏡 KAGRA は、世界的なコロナ禍にもめげず、昨春にひとまずの国際共同観測運転 (O3GK と呼称) を経て、現在さらなる性能向上のため様々なアップグレード作業に入った。本講演では、これまでの経緯を概説したのち、補助光学装置をはじめ干渉計のアップグレード作業全般の現状を紹介した。また、KAGRA のような大型装置をシステムとして成立させるために個人的にすべきと思ってきたこと、あるいはし始めた事項などを紹介した。

KAGRA, a gravitational-wave telescope in Japan, has been undergoing various upgrades to improve its performance after its first international joint observation run (called O3GK) last spring, despite the world's COVID-19 disaster. In this talk, after outlining the history of this project, I introduced the current status of the upgrade work of the interferometer in general, including the auxiliary optics. In addition, I introduced what I have personally thought we should do or what I have started to do to make a large instrument like KAGRA work as a viable system.

1. はじめに

KAGRA は日本初の本格的な大型重力波望遠鏡で、岐阜県飛騨市神岡町の池ノ山の地下に埋設されている [1]。KAGRA は 2010 年夏に建設予算の措置がされた後、まずは 2012 年 5 月から 2014 年 3 月にかけて新たなトンネルの掘削が行われた。その後、電気、排水、換気などのインフラを整え、各種のコンポーネントを敷設し、トンネル掘削完了から 2020 年春に本格的に運転するまでを約 6 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。そこからさらなる性能だしのための調整 (commissioning) を続け、前述のように 2020 年春には第 3 期国際重力波観測網 (observation-3; O3) に途中参加して観測運転を行う予定であった。しかしながら、観測網参加条件の感度 (KAGRA の場合、中性子星連星の合体を観測できる距離に換算して約 1 Mpc 以上) に到達した頃には、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の世界的な急拡大にともない、欧米の重力波望遠鏡 (米: LIGO、欧: Virgo) はシャットダウンの判断をしてしまっていた。KAGRA はこれであきらめず、当時まだ稼働していたドイツの GEO600 との同時共同観測の話を取りまとめ、2020 年 4 月 7 日から 21 日にかけて 2 週間という短い期間ではあるが、国際重力波観測網 O3GK として稼働する実績をつむことができた。

KAGRA は前述の LIGO や Virgo と同様に、レーザー干渉計測を手段として、時空の歪みの周期的変化 (すなわち重力波) を検出する装置である。現実的に発生する重力波は、最大のものでも 10^{-21} 程度

の歪み量（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重力波に対して感度が高く、現在の世代の検出器では基線長ほぼ数 km におよんでいる（KAGRA: 3 km、LIGO: 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大出力のレーザー光源（目標 100W 程度）や、光学素子の防振装置、超高真空環境（目標 10^{-7} Pa）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。現在 KAGRA では、2022 年 6 月以降に開始予定の第 4 期国際重力波観測網（O4）に最初から十分な感度で参加することを目指し、さらなる性能向上作業を行なっているところである。今回は、この状況をふまえつつ、私が長らく牽引してきた補助光学装置のほか、この春から兼任している KAGRA の systems engineering office での活動を通じて得た大型装置組み立ての技術的課題などについて概説した。

2. 次の観測に向けて

KAGRA は、次回の観測 O4 においては、中性子星連星の合体を観測できる距離に換算して 25 Mpc 以上の感度を目指している。いっぽう、O3GK においては、平均的な感度は 0.5-0.6 Mpc 程度であった。したがって、ここから 50 倍以上感度を向上させる必要がある。

なぜ感度が悪いのか？本当に改善するのだろうか？それを突き詰めるため、O3GK 後からは、雑音化のプロセスを同定するための測定や、その解析、情報の整理が行われてきた。また、次のステップへのキーとなる resonant sideband extraction（RSE）というレーザー干渉計測モードの KAGRA 実機での実証を目指した作業をこの秋まで行ってきた。それ以降から今日にかけては、ここまでに得られた知見を元に、累積した不具合への対応や、追加の迷光対策用の光学バッフルやシールドなどの設置作業など、真空槽を開放して行う大規模な現場作業を進めているところである。

感度とともに重要なのが、中・長期的な安定性である。O3GK での振る舞いを例にとると、KAGRA の感度は一時的に 1 Mpc 近くをたたきだしたものの、前述のとおり平均的には 0.5 Mpc 前後に留まっていた。また、これまでの知見から、このような安定性のための制御を軽視すると、たとえば干渉計のモードを前述の RSE にして運用しようとしたときに、制御の切り替えがうまくいかないか、切り替えられても即座に破綻し、レーザー干渉条件を失ってしまうことがわかってきた。このため、次回の観測運転までには、このような中・長期的安定性 --- 具体的に言えば、ミラーを吊るすサスペンションの長周期振動の制振や、ミラーの角度制御、レーザー光軸のドリフトの制御など --- によりリソースを注ぐ方

向で動いているところである。

この中で絵私が主担当する補助光学装置は、前述の光学バッフルやシールドが相当する。バッフルたちの組み立てなどはすでに三鷹の先端技術センターのクリーンルームにて完了しており、脱湿材とともに密閉梱包して、神岡現地に運びこんである。あとはインストールするのみであるが、どの真空槽も直径は 1.2~1.5 m ほどで狭いことから、バッフルやシールドがメインの干渉計ビームを削ったりして重力波検出器としての性能を落とさないように注意しなければならない。このため、インストール作業は実は性能だし（commissioning）作業と並行して行われることになる。KAGRA のような大規模な装置では、こういったインターフェース調整に細心の注意を払わないと、最終的な性能には届かない。いっぽうでまさに、インターフェース調整をはじめとするシステム・エンジニアリングこそが KAGRA 全体としての弱点であった。

3. KAGRA チャレンジ

KAGRA の最初期から 10 年経とうとしている今、前述のような弱点がなぜ残っているのか、あるいはなぜ弱点として（最初から）存在したのか、個人的に振り返ってみたい。立場により様々な回答がありうるが、その 1 つとしては、建設に係わるサイエンティストたちの間で、エンジニアリングという観点の理解度に幅があったことだと個人的に思っている。小さな個人実験室出身のサイエンティストのほとんどにとって、それぞれ己の考える最高の「部品」（作品？）をそれぞれ持ち寄って来たところで、一個の動作する大規模システムを構築できない --- 部分最適と全体最適には違いある --- ということ自体が想像の外にあったように思える。あるいは、「部品」と「部品」をつなぐインターフェース部分には、必ず“nameless”な仕事が発生するが、それは大抵、残念ながら科学的興味をかきたてるものとは限らないし、直接論文にもならないわりに時間だけは食うものである。こういった（サイエンティスト的には）「細かい」ことに気がまわらないか、あるいは指摘があってもそれを重要視せず対応を先延ばし（極論すれば永遠に！）したくなるが、しかし重要な「つなぎ」であることに変わりはない。たとえば、骨 1 本 1 本の頑丈さは重要だが、それらを集めても骨組みはできず、関節を導入してはじめて多様な構造や動きが可能になるわけである。KAGRA の例で言えば、1 つの真空槽に複数のサブコンポーネントが収められるのであるが、それにはそれぞれの取り合いの調整が十分なされ（続け）なければ、軋轢の元となる。早い者勝ちではシステムは組み上がらない。否、組み上がるのであるが、膨大な時間がかかって期限に間に合わない（今回は、O4 に間に合わせようという喫緊の目標がある）か、システム的に下流の工程を担当する者に負担が蓄積していく構図となる。これは改善すべき状況であろう。

しかし、現実問題としてはどうすればよいのだろうか？という問いにまだ明確な回答を持っていない。これは KAGRA に特有の問題だろうか？他の大規模プロジェクトでも多かれ少なかれ散見されるのだとすると、われわれの平均教養としてそういう観点がそもそも無いことが問題の根本なのかもしれない。小学校からなんらかのシステムエンジニアリングを学んでもらって、30 年後に期待するのであろうか。いずれにせよそういった教育が成果をだすには時間がかかるので、KAGRA としては、対処療法としてもなんらかの手当が必要になってきた。

そういうわけで、まずは見えている範囲で不足している部分を補っていかうと考えた。たとえば、品質

の確保を目的とした

- 図面管理のプロセス
- インターフェース管理のプロセス
- 新規設計 or 設計変更のレビュープロセス

といったあたりが、KAGRA 全体ではまだ公式に常設されていない。注意すべきは、書類上の常設はいくらでもできるかもしれないが、品質のかわりに関係者の負担が非現実的なほど増大してしまうようではまずいということである。負担の非現実的なあるいは不公平な増大は、ただちにプロセスの形骸化につながる。

ともかく、まずは図面管理のプロセスから手をつけ始めているところである。たとえば、各真空槽の中身も含めた正式な組み立て図面がないにもかかわらず、これまでまがりなりにも組み立てが進み、1 Mpc もの感度が出たこと自体が奇跡の産物と個人的は思っている。独立独歩の気質が強いサイエンティストの方々に協力していただけるような統一的なプロセス、という一見互いに矛盾する作業ではあるが、なんとか解をみつきたい。他のプロジェクトの方々などで、知見やアドバイス、お叱りなどがあれば是非ご教示願いたい。

4. まとめ

KAGRA は、COVID-19 にもめげず 2020 年春に国際共同観測をなしとげた。これで 1 つのマイルストーンを達成したといえる。感度は中性子星連星の合体の観測可能距離に換算して平均で 0.5 Mpc 程度であった。2022 年 6 月以降に予定されている次回の国際共同観測までに、感度をあと最低 50 倍は向上させる必要があり、現在そのためのさまざまな観点からの改善作業が行われている。本講演では、私が長らく主担当してきた補助光学装置のほか、現在進んでいる干渉計のアップグレード作業全般の紹介をするとともに、KAGRA がシステムとして抱える課題や、その対応策として考えていることなどを紹介した。

5. References

[1] KAGRA Collaboration, Prog. Theo. Exper. Phys. **2018**, ptaa125 (2020)