

重力波物理学と大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

東京大学 宇宙線研究所

牛場 崇文

ushiba@icrr.u-tokyo.ac.jp

2019 年 (令和元年) 5 月 15 日

1 はじめに

アインシュタインが重力波の存在を予言してからおよそ 100 年の時を経て、2015 年 9 月にアメリカの LIGO グループによって重力波の初検出が達成された [1]。しかしながら、観測された重力波がブラックホール連星合体からの重力波であったことや、重力波の到来方向の不確定性が大きかったことで、電磁波やニュートリノによるフォローアップ観測で重力波源を特定するには至らなかった。その後、欧州の Virgo 検出器が LIGO との重力波国際共同観測 (Observation Run 2 (O2)) を行い、2017 年 8 月には初検出の時に比べて格段に重力波の到来方向の決定精度が向上した [2]。さらには、同月に中性子星連星合体からの重力波が初めて検出され、それとほぼ同時刻にショートガンマ線バーストが観測された。また、その後の電磁波によるフォローアップ観測の結果、重力波源の母銀河が特定されるに至った [3]。

このような劇的な発展を続けている重力波観測実験において、2019 年 4 月より LIGO, Virgo の国際共同観測 (Observation Run 3 (O3)) がスタートし、日本で現在建設中の大型低温重力波望遠鏡 KAGRA も O3 への参加を表明している。また、アメリカ・ヨーロッパでは第三世代の重力波検出器 (10 km 級の腕の長さを持つレーザー干渉計を使用した、LIGO や Virgo, KAGRA の最終感度よりも 10 倍程度感度の良い干渉計型重力波検出器) の検討が本格的に始動している。さらには、宇宙に重力波検出器を構築することで低周波の重力波を検出する計画も始動している。本稿では重力波によるサイエンス、日本の重力波プロジェクト KAGRA の現状および重力波物理学の今後の展望について述べる。

2 重力波

重力波とは時空間の歪みが真空中を伝播する現象である。これは一般相対性理論の帰結であるアインシュタイン

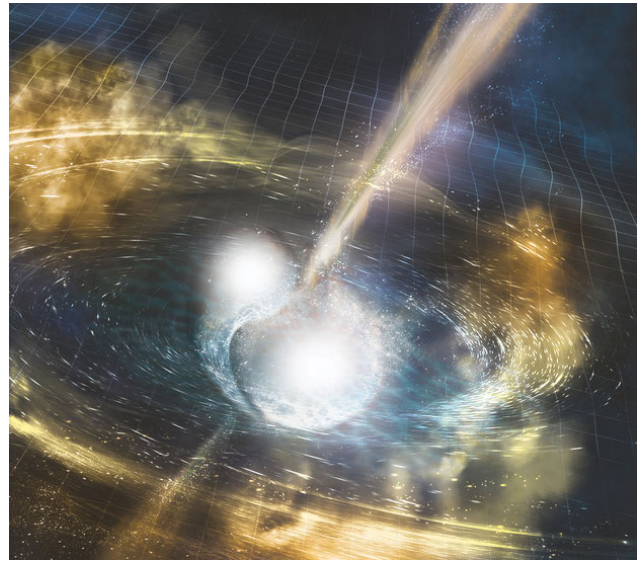


図 1: 中性子星連星合体と放射される重力波のイメージ。(NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet)

ン方程式を線形化して求められた真空中の解で、真空中を光速で伝播する、2 種類の偏波を持つ横波である。

重力波は質量を持った物体が非軸対称・非球対称に運動した際に放出され、進行方向と垂直な空間を潮汐的に伸縮させる。しかしながら、その振幅は非常に小さく、現在の技術で時空間の伸縮が観測可能な大きさとなるような重力波は大質量物体による劇的な運動 (コンパクト星の連星合体 (図 1), 超新星爆発など) によってのみ放出される。

年に数回以上の頻度で観測可能な重力波による典型的な時空間の歪みは 1 m あたり 10^{-21} m 程度と非常に小さいため、重力波の観測を達成するためには非常に高度な技術が必要となる。そのため、アインシュタインが重力波の存在を予言してからおよそ 100 年間、直接観測は達成されなかった。しかしながら、2015 年の LIGO による初観測を皮切りに多くの重力波イベントが観測されるようになり、我々は宇宙を見る新しい窓を開くことに成功したといえる。

3 重力波によるサイエンス

3.1 一般相対性理論の検証

一般相対性理論は現在までに数多くの検証実験を乗り越え、理論からの有意なずれのある実験結果は未だ報告されていない。例えば、重力による光の湾曲効果は非常に高精度な観測が可能になった現在でも一般相対性理論による理論予測から有意な差はみられていない。また、ハルスとテイラーが観測した連星パルサーの公転周期の減少率が重力波の放射から予想される減少率と1%以内で一致しているという結果も驚くべきものである。

重力波はコンパクト連星合体に代表される非常に劇的な運動によって発生されるため、強重力かつ時空の歪みの時間変動が激しい環境下での一般相対性理論の検証が可能である。また、重力波の伝播に関する検証も可能となり、今まで行われてきた検証実験とは異なる新たな環境下における一般相対性理論の検証が可能となる。LIGO および Virgo が現在までに観測した10個のブラックホール連星合体イベントの結果から一般相対性理論の検証が行われており、現在までのところ理論からの有意なずれは見つかっていない。今後、重力波イベントが増えるにつれて、より高精度な検証が可能となる。

3.2 ブラックホールの分布と進化

LIGO の最初の観測運転 (Observation Run 1 (O1)) では3つのブラックホール連星合体からの重力波が観測された¹。この結果は当初想定されていたよりも多くのブラックホール連星合体が宇宙で起こっていることを示しており、驚きをもって迎えられた。また、2015年9月14日の重力波イベントでは、電磁波観測で見つかっていない30太陽質量を超えるようなブラックホールが存在することが確認された。さらには、O2によって30太陽質量を超えるようなブラックホールが宇宙には数多く存在していることが確認された(図2)。

2019年4月に Event Horizon Telescope (EHT) の画像が公開され、世界初のブラックホールの可視化に成功した画像として注目を集めた[4]。ここで撮影されたブラックホールは銀河 M87 の中心にある超大質量ブラックホール²で、太陽質量の約65億倍の質量をもったブラックホールであると考えられている。このような超大質量ブラックホールは多くの銀河の中心に存在していると考えられているが、その生成過程は謎に包まれている。

¹O1 終了時点では2015年10月12日の重力波イベントはS/N比が小さかったため、重力波イベントとしてカウントされなかった。しかしながら、複数の重力波イベントの観測を受けて重力波イベントとして認めるための条件が変わったため、重力波イベントとしてカウントされるようになった

²太陽質量の100万倍を超える大質量のブラックホール

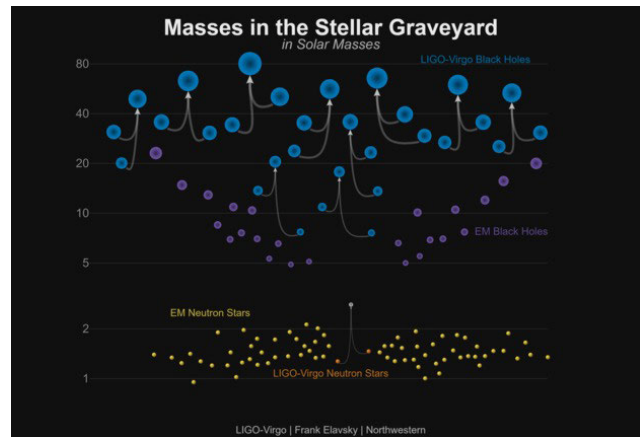


図2: 重力波観測および電磁波観測で発見されている中性子星と超大質量ブラックホールを除くブラックホールの質量分布。(LIGO/Virgo/Northwestern Univ./Frank Elavsky)

超大質量ブラックホールの生成シナリオの一つに階層的進化シナリオがある。これは小さい質量のブラックホール同士の合体が段階的に起こり、次第に質量を大きくしていった結果として超大質量ブラックホールになったというシナリオである。このシナリオが正しいとすれば中間質量ブラックホール³が宇宙には多数存在し、合体を繰り返していることが期待される。そのため、中間質量ブラックホール連星合体からの重力波をとらえ、合体頻度を見積もることによって、超大質量ブラックホールの形成過程の謎に迫ることができる。中間質量ブラックホール連星の合体から放出される重力波は1 Hzを下回るような低周波の重力波であるため、現在稼働中の重力波検出器では観測は難しいが、次世代以降の重力波検出器によって低周波数帯の検出器感度が向上することで、中間質量ブラックホール連星合体の観測が可能になると期待される。

3.3 元素合成過程の解明

現在の宇宙に存在する元素はビッグバンや恒星内部での核融合などの様々な過程を経て作られてきた。その中でも鉄よりも重い重元素を合成する重要な過程としてs過程と呼ばれる元素合成過程がある。これは元素がゆっくりと中性子を捕獲していく元素合成過程で中性子捕獲とベータ崩壊を繰り返して重元素が合成される。この過程では中性子捕獲のスピードがベータ崩壊の時定数に対して十分ゆっくりであるため、核図表の安定元素に沿って元素合成が進んでいく。しかしながら、s過程ではビスマスよりも重い元素ができないことや現在観測されている元素比率のピーク構造を説明できないなどの問題が

³太陽質量の数百倍から数万倍程度の質量のブラックホール

あり、s 過程以外の元素合成過程が重要な役割を持っている。

そのうちの 하나가 r 過程と呼ばれる元素合成過程である。これは非常に急激な中性子捕獲反応で、現在の重元素比率のピーク構造の一部をうまく説明可能な元素合成過程である。この反応は近年まで超新星爆発によって引き起こされると考えられていたが、近年の研究によって超新星爆発では起こらないことがわかってきた。現在は、r 過程が起こるような中性子過剰な環境は中性子星連星合体によって引き起こされると考えられている。r 過程での元素合成時にはキロノバ⁴と呼ばれる特徴的な発光がみられることも知られている。

2017 年 8 月 17 日に観測された中性子星連星合体からの重力波イベントではその後の電磁波によるフォローアップ観測によってショートガンマ線バーストとキロノバが観測された。このことは中性子星連星合体に付随して r 過程による元素合成が起こったことを示すきわめて有力な証拠となっている。今後、重力波による中性子星連星合体の観測と電磁波フォローアップによるキロノバの観測によって r 過程の起こる頻度が見積もられることで、中性子星連星合体に付随する r 過程元素合成が現在の元素比率を説明するのに十分な頻度であるかが明らかになると期待されている。

3.4 ハッブル定数の測定

宇宙の膨張率を表すハッブル定数は主として 2 種類の方法で測定されている。ひとつは宇宙マイクロ波背景放射を使用する方法でもう一つは光学観測によって求めた天体までの距離を使用する方法である。標準理論の枠組みが正しければ、これら二つの方法で求められたハッブル定数の値は一致するはずである。しかしながら、これら 2 種類の方法で求められたハッブル定数の値は有意な差を持っており、その原因の究明は非常に重要な課題となっている。

天体からの重力波を観測すると、重力波のデータと一般相対性理論のみから重力波源となった天体の距離を求めることができる。これは今までの光学観測とは全く異なる距離の算出方法であるため、重力波観測によって求めた天体までの距離を用いたハッブル定数の見積もりは、ハッブル定数を決める第三の手法として注目を集めている。2017 年 8 月 17 日の中性子星連星合体からの重力波イベント (GW170817) では、この手法を用いてハッブル定数を $H_0 = 70.0_{-8.0}^{+12.0} \text{ km s}^{-1}$ と求めた (図 3)。この結果は統計誤差が大きいため、宇宙マイクロ波背景放射による測定値と光学観測による測定値の両方と無矛盾な値となっている。今後、多数の観測によって統計誤差が

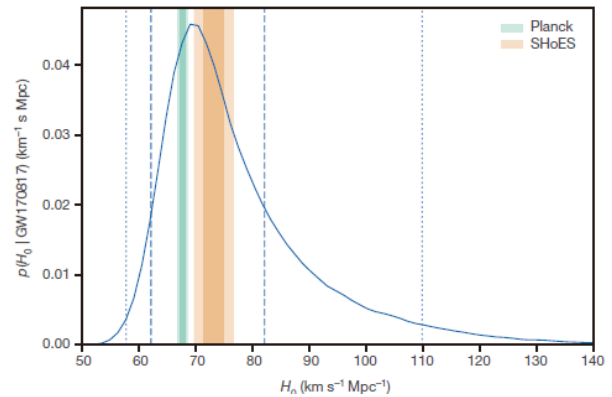


図 3: GW170817 から見積もられたハッブル定数。点線が 1σ 、破線が 2σ の範囲を表しており、宇宙マイクロ波背景放射による観測結果 (Planck) と光学観測による観測結果 (SHoES) の両方と無矛盾な結果となっている [5]。

小さくなることにより、ハッブル定数が不一致である問題へ示唆を与えられることが期待されている。

3.5 インフレーション理論の検証

インフレーション理論とは宇宙初期に宇宙の指数関数的な膨張が起こったという宇宙モデルである。これによって、ビッグバン宇宙論の平坦性問題、地平線問題などが解決され、現在でも有力な宇宙モデルの一つであると考えられている。インフレーション理論によれば、宇宙初期の加速度的膨張にともなって発生した重力波⁵が現在も宇宙に満たされていることが予言されている。したがって、宇宙重力波背景放射を直接観測することによって、インフレーション理論の検証を行うことが可能である。

しかしながら、宇宙重力波背景放射の振幅はコンパクト連星合体からの重力波などに比べて非常に小さく、現在進行中の重力波観測装置での観測は困難である。したがって、今後計画されている究極的な感度を持つ重力波検出器 (Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (DECIGO) など) によって観測が期待される。

4 重力波検出器

重力波の振幅は非常に小さいので直接検出は絶望的であると考えられていたため、1960 年以前には精力的な重力波検出実験は進められていなかった。1960 年代に入り、メリーランド大学のジョセフ ウェーバーは共振型の検出器を用いて重力波の検出を試みる実験を開始した。その後、1969 年にウェーバーが重力波を観測した

⁴マクロノバとも呼ぶ。

⁵宇宙重力波背景放射と呼ばれる。

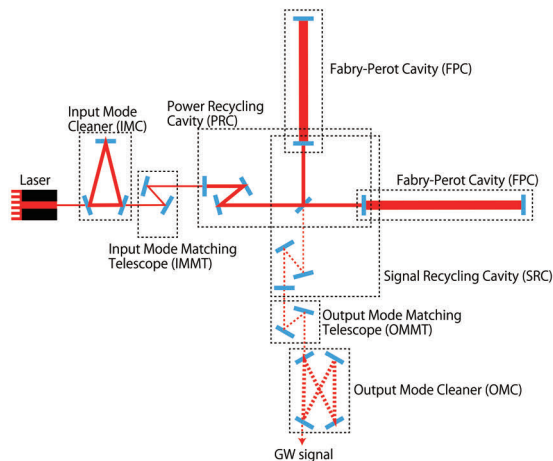


図 4: LIGO, Virgo, KAGRA 等のキロメートルスケールの地上重力波望遠鏡で採用されている干渉計構成。マイケルソン干渉計の腕に光共振器を導入して何度も光を往復させることにより感度を向上させている。

と発表したことを契機に、世界中で重力波観測実験が進められるようになった。ウェーバーの報告は重力波の振幅が大きすぎることや高感度の検出器による実験で検出ができなかったことなどから否定的な意見が多数を占めた。しかしながら、重力波の直接検出を試みたという点でウェーバーの功績は非常に大きく、重力波検出実験の第一人者と考えられている。

一方で、1970年代以降にはレーザー干渉計型重力波検出器の開発が始まった。これは、LIGO, Virgo, KAGRA などの干渉計型重力波検出器の根幹をなすもので、1990年代には数百メートルの基線長を持つ大型レーザー干渉計が稼働を始めた。それらの検出器は重力波をとらえることができる感度に至らなかったが、それらの検出器によって、重力波の検出を達成した LIGO や Virgo で使用されている多くの技術が培われてきた。本節では重力波の直接観測に成功したレーザー干渉計型重力波検出器について述べる。

4.1 レーザー干渉計型重力波検出器の概要

重力波検出器では Dual Recycling Fabry-Perot Michelson Interferometer (DRFPMI) と呼ばれる干渉計方式が現在のところ使用されている (図 4)。

光源から出力されたレーザーは IMC を通ることで不要な高次モードのない、きれいなガウシアンモードに成形される。その後、IMMT によって干渉計の共振器の持つ固有モードへのモードマッチングが行われる。

メインの干渉計部分はレーザー干渉計の各腕部分に組み込まれた FPC, PRC および SRC によって構成される。FPC はレーザー光が干渉計の腕内に滞在する時間を

延ばすことによって重力波に対する感度を向上させる。PRC は干渉計から光源側に反射してくる光をふたたび干渉計内に打ち返すことにより、干渉計内の光の強度を増大させることで感度を向上させる。SRC は干渉計から出力された重力波の信号をふたたび干渉計内に打ち返すことによって信号を増幅する。

SRC から出力される重力波信号を含んだ光は OMMT によって OMC の固有モードへモードマッチングが行われる。OMC では干渉計を通ることによって発生した不要な高次モードを除去し、重力波信号を取得する。

4.2 レーザー干渉計型重力波検出器の雑音

4.2.1 量子雑音

量子雑音はレーザー干渉計型重力波検出器の原理的な感度限界を与える雑音のひとつで、光の量子性に起因する雑音である。時間あたりに鏡に到達する光子数が変化することで鏡が受ける輻射圧が揺らぎ、鏡が振動する。このような雑音は量子輻射圧雑音と呼ばれる。光子数の揺らぎはレーザー強度に比例するため、輻射圧雑音はレーザー強度の平方根に比例する雑音である。

一方、重力波信号を検出する光検出器に入射する光子数の揺らぎに起因する雑音を散射雑音と呼ぶ。光子数の揺らぎは輻射圧雑音と同様に光の強度の平方根に比例するが、重力波信号の大きさが光の強度に比例するため、散射雑音はレーザー強度の平方根に反比例する雑音である。

したがって、量子輻射圧雑音と散射雑音の積はレーザーの強度によらず一定の値となり、鏡の位置測定の精度には光の強度によらない限界が存在することがわかる。これは標準量子限界と呼ばれ、重力波検出器においては鏡の質量の平方根に反比例する。そのため、LIGO, Virgo では約 40 kg, KAGRA では約 23 kg という非常に大きな鏡が使用されている。

4.2.2 熱雑音

熱雑音は量子雑音と同様にレーザー干渉計型重力波検出器の原理的な感度限界を与える雑音の一つで、鏡やコーティング・懸架系などを構成する原子の熱振動に起因する雑音である。熱雑音は機械的な散逸の小さい材質を使用して検出器を構成することによって低減可能であることが知られており⁶、LIGO, Virgo では常温で機械的散逸の小さい熔融石英の鏡を使用することで熱雑音の影響を低減している。また、鏡の表面でのレーザー

⁶散逸が小さい材質は熱エネルギーの大半が弾性体固有モードの共振周波数周辺 (> 数 kHz) に集中するため、重力波検出器の観測帯域 (10 Hz ~ 数 kHz) での影響を低減することが可能となる。

光のサイズを大きくすることによって、鏡表面の原子のランダムな動きを平均化することができるため、干渉計を構成する鏡の上でのビームサイズを大きくすることも重要である。そのため、現在の重力波検出器では直径 10 cm 弱の非常にサイズの大きなレーザー光が用いられている。

熱雑音は干渉計を構成する鏡を低温化することによっても低減可能である。そのため、KAGRA では世界で初めて km スケールのレーザー干渉計型重力波検出器を低温鏡で構築することを目指している。極低温環境下では常温で機械的散逸の小さい溶融石英は使用できないため⁷、低温でも機械的散逸の小さい単結晶サファイアを鏡の材質として使用している。これにより、低温化による熱雑音低減の効果を十分に発揮することができる。

機械的散逸の低減やビームサイズの増加による熱雑音の低減は現在の技術的な限界にほぼ到達している。したがって、更なる重力波検出器の感度向上のためには、鏡の低温化は非常に重要な技術となっている。KAGRA は世界に先駆けて低温化技術を取り入れた重力波検出器であり、その建設は世界中から注目を集めている。

4.2.3 地面振動雑音

重力波検出器では干渉計を構成する鏡の差動変位信号を 10^{-21} m という非常に高い精度で計測する必要がある。しかしながら、地面は常に微小な振動 (数 μm 程度) をしており、地面からの振動が干渉計を構成する鏡に伝わらないようにしなければ重力波を検出することはできない。そこで、重力波検出器では干渉計を構成する鏡をワイヤーで懸架し、振り子を構成することによって地面振動の影響を低減する。振り子は共振周波数よりも高い周波数の振動成分を f^{-2} で低減させることができるため、典型的な振り子の共振周波数 (~ 数 Hz) よりも高い、重力波の観測帯域での振動を効率よく低減することが可能となる。KAGRA において使用されている防振装置は全長 13.5 m にも及ぶ 9 段の多段振り子型防振装置で、世界最大規模の防振装置となっている。

また、地面振動雑音を低減するためには地盤が固く静寂な環境を選定することも重要である。図 5 は東京・神岡の地表での地面振動と神岡地下での地面振動の比較である。神岡地下での地面振動の大きさは 1 Hz から 100 Hz にかけて東京近郊の 1000 分の 1、神岡地上での振動の 100 分の 1 程度となる。したがって、地下に建設することは地面振動雑音の低減の観点から非常に大きな利点があるといえる。KAGRA は km スケールの干渉計で世界で初めて地下に建設された装置で、その点におい

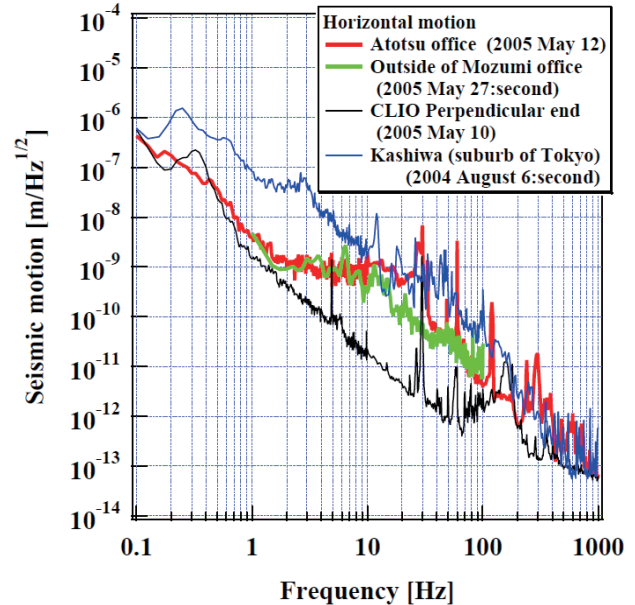


図 5: KAGRA が建設されている神岡の地下サイトの地面振動と他地点での地面振動の比較。赤と緑 (薄い灰色と濃い灰色) は神岡近郊の地上の地面振動スペクトル、青 (上側の黒) は千葉県柏市の地上での振動スペクトル、黒 (下側の黒) は神岡の地下の地面振動スペクトルを表す。都市近郊で 1 Hz 帯の振動が他地点と比べて大きい、10 Hz 以上では場所による違いは小さく地表での地面振動は同レベルとなる。

ても低温化と同様に注目を集めている。また、重力波分野のみならず地下を利用した実験施設として世界最大規模の大きさであるため、大規模な地下施設の利用という観点からも注目されている。

5 重力波検出器 KAGRA

重力波検出器 KAGRA は現在日本で建設が進められている干渉計型重力波検出器で、LIGO や Virgo と同程度の感度が見込まれる重力波検出器である。本検出器の特徴は第三世代重力波検出器において検討が進められている以下の二点を世界に先駆けて取り入れた大型レーザー干渉計である点である。

- 静寂な環境の地下サイトの利用
- 鏡の低温化技術による熱雑音の低減

本節では KAGRA の建設、現在までに 2 回実施された干渉計の試験運転および O3 への参加に向けた KAGRA の準備状況について述べる。

⁷ 溶融石英の機械的散逸は低温環境下急激に増大し、低温化による熱雑音の低減効果よりも機械的散逸の増大による熱雑音の悪化の効果が大きくなってしまふ。

5.1 KAGRA の建設

KAGRA の建設は 2010 年にスタートした。その後 2011 年の東日本大震災を受け、トンネル掘削のスケジュールが当初予定よりも 1 年間遅れて 2012 年から開始され、約 2 年間でトンネルの掘削が完了した。この際に大きな問題となったのが鉾山に流れる地下水の存在である。

KAGRA が建設されている岐阜県飛騨市神岡町は比較的降水量が多く、湧水量が少ない時期であっても毎時数百トンの地下水が湧き出ている。また、湧水期⁸には多い時で毎時数千トンの地下水が湧き出ている。そのため、掘削中に大量の地下水が発生したことにより、湧水量が減少するまで掘削を中断するということが何度も行われた。また、トンネル掘削完了後も湧水の問題は悩みの種である。常時湧き出している地下水のための排水溝の整備や湧水量の多い時期の強制排水設備の設置等が実施され、トンネル掘削完了から 5 年以上が経過した現在も、湧水量に合わせて排水ポンプの増設等の措置が随時行われている。加えて、湧水の問題はトンネル掘削や環境維持以外の工程にも影響を与えている。例えば、真空槽を固定するためのアンカーホールの施工は湧水期を避けて行わなければならない。また、台風や突然の豪雨などによる一時的な湧水の増加も避ける必要がある。そのため、事前に組まれていた工程が降雨量により変更を余儀なくされるという事態も発生した。

また、KAGRA の建設においては地下空間特有の点も数多く存在する。KAGRA の建設サイトは地下の密閉空間であるため、大規模な有機溶剤の使用が制限されている。そのため、大量の有機溶剤を使用するような作業時には最寄りの国立大学である富山大学⁹まで鏡を輸送して作業をする必要がある。また、地下空間では安全のために高圧ガスや寒剤の利用に関しても制限が設けられているため、冷凍機を用いた冷却システムが採用されている。

5.2 常温観測運転

KAGRA では 2016 年の 3 月末から 2016 年の 4 月末までの約 1 か月間、常温の 3 km のレーザー干渉計を用いた試験運転 (iKAGRA¹⁰と呼ばれる) を行った。この試験運転の目的は 3 km の腕を持つ干渉計の動作に関する経験を得ること、観測体制 (特に観測シフト) の確認である。そのため、干渉計は常温、大気中で簡易的な鏡懸架装置を用いたセットアップで試験運転が行われた。観測運転中に熊本地震のために干渉計が自動復旧不能

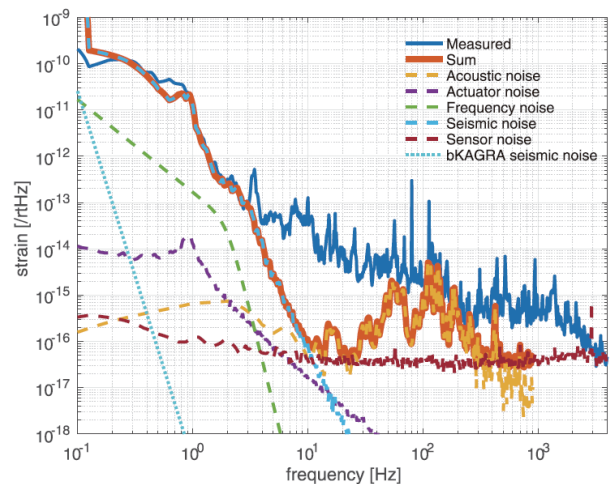


図 6: iKAGRA で得られた干渉計の感度と各種ノイズの影響の見積もり。

となり、1 日の復旧作業を間に挟むことになったが、それを除けば観測運転、観測シフトの運用は非常に順調であった。

観測運転期間中にはシンプルな干渉計での感度の評価および感度を制限する雑音の見積もりも行われた。図 6 は得られた感度とノイズの見積もりを表している。測定された感度の低周波数帯域は簡易的な防振装置を利用していることによる地面振動雑音の悪化が支配的になっている。一方、100 Hz 近傍の周波数帯域では音響由来の雑音が支配的である。それ以外の周波数帯における支配的な雑音の特定はスケジュールの関係で完了しなかったが、ノイズ評価のデモンストレーションとしては十分な成果が得られている。

5.3 低温観測運転

iKAGRA から約 2 年の建設作業を経て、2018 年の 4 月末から 5 月初めの約 2 週間の間、冷却した鏡を利用した干渉計の試験運転 (bKAGRA phase1¹¹と呼ばれる) を行った。この試験運転の目的は鏡の冷却に伴う問題点の洗い出しと重力波データの取得パイプラインを end to end で試験することである。また、iKAGRA とは異なり、最終設計の防振装置が干渉計を構成する全ての鏡に使用され、それらの防振装置の性能評価も行われた。

鏡の冷却時間の測定及び到達温度の確認は bKAGRA phase1 における最も重要な試験項目の一つである。図 7 に bKAGRA phase1 での鏡懸架系の冷却曲線を示す。冷却にかかる時間はおよそ 4 週間程度と見積もられていたが、冷却完了までの時間は約 33 日間で想定よりも長

⁸雪解けの水が大量に湧き出してくる春から初夏にかけての時期

⁹車でおよそ一時間半程度の距離

¹⁰Initial KAGRA の略。

¹¹Baseline KAGRA の略。低温干渉計の初期動作期間を phase1、低温 DRFPMI に向けたインストール期間を phase2、干渉計の感度向上のためのコミッショニング期間および観測運転期間を phase3 と呼ぶ。

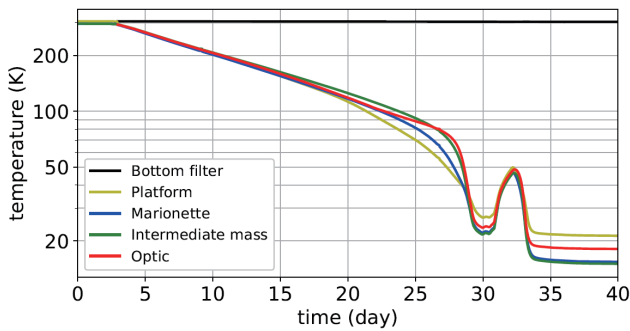


図 7: bKAGRA phase1 のときの鏡の冷却曲線。赤 (濃い灰色) 線がサファイア鏡の温度を表しており、約 33 日間で 18 K まで冷却されている。

い時間がかかった。この原因は冷却途中で冷却系全体が準安定状態に到達したために、一時的な冷凍機の停止と再稼働を行ったことであると考えられる。最終的な到達温度は鏡の温度が 18 K となり、KAGRA の最終的な目標温度である 20 K を下回る温度を達成した。実際の観測中にはレーザーからの入熱による温度上昇が存在するため、レーザー光による入熱がある状態でも低温を維持できるかどうかは今後の調査課題となっている。

2018 年 4 月 20 日に 18 K まで冷却された鏡を用いて Michelson 干渉計の動作を達成した。これは低温鏡を利用した km スケールの干渉計の世界初動作である。このときに達成された検出器感度及び各種雑音の影響を見積もったグラフを図 8 に示す。干渉計の感度は iKAGRA で達成された感度と比較して、10 Hz 以上の観測帯域で 10 倍から 100 倍の向上が見られる。これは干渉計を構成する鏡がすべて真空層内に導入されたことにより、音響雑音及び空気の密度揺らぎによる雑音を低減したことが大きな要因と考えられる。bKAGRA phase1 において高周波の感度を制限している雑音は干渉計信号を取得するセンシング部の雑音である。この雑音は干渉計内に導入する光の強度を強くすることによって低減可能であるため、干渉計の腕に共振器を導入することや入力するレーザー光の強度を増加させることによって低減可能である。一方で低周波数帯の感度を制限する雑音は鏡の角度制御に起因する雑音で、主に角度制御に用いる光粒子の雑音が鏡の制御系を介して干渉計信号に現れるものである。KAGRA での最終的な制御にはより低雑音な角度センサーが使用されるため、それらを用いることによって低周波の雑音に関しても低減することが可能である。

bKAGRA phase1 における干渉計の稼働率は観測運転期間全体で 69% であった。観測期間の前半には稼働率 90% 以上を達成し、静かな環境下では非常に高いパフォーマンスを発揮することが確認された。しかしながら、観測期間の後半では稼働率が 50% を下回る日が複数あった。この原因は観測期間の後半に発生した複数の

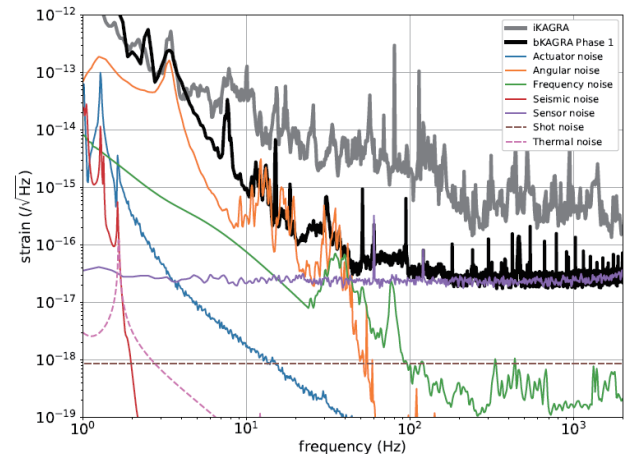


図 8: bKAGRA phase1 において達成された干渉計の感度と種々の雑音の評価。iKAGRA と比較して 10 倍から 100 倍の感度向上を達成し、ノイズ評価の制度も向上した。

大きな地震や富山近郊の荒天の影響による外乱の増大が主としたものである。したがって、より安定な稼働を実現するための懸架系の改良が進められている。

5.4 国際共同観測 O3 へ向けて

KAGRA では国際共同観測 O3 へ向けて急ピッチでの建設が進められている。2019 年 5 月には干渉計を構成する全ての鏡のインストールが完了し、4 つのサファイア鏡の冷却が開始された。これにより、KAGRA の建設は完了し、現在は干渉計として動作させるための干渉計コミッショニング作業が行われている。

干渉計のコミッショニング作業では 3 km の常温および低温での Fabry-Perot 干渉計の制御が達成され、干渉計を構成する鏡の光学特性の評価が行われた。その結果、サファイア鏡の光学特性は当初の要求を満たす反射率および光学損失であることが確かめられた。また、パワーリサイクリング共振器の制御もすでに達成されており、現在は最終的な干渉計動作に向けたコミッショニング作業が精力的に進められている。

KAGRA では 2019 年 6 月に最終的な構成での干渉計動作を達成し、2019 年秋に LIGO, Virgo との国際共同観測を開始することを目標として、現在も干渉計コミッショニング作業が進められている。

6 重力波物理学の展望

重力波の観測は目覚ましい科学的成果を出しており、今後のさらなる発展のためには重力波検出器の感度向上および国際ネットワークの拡充が非常に重要な役割を果たすことになる。2021 年頃に予定されている国際

共同観測 O4 では LIGO, Virgo, KAGRA の更なる感度向上が見込まれており, 多数の重力波イベントの観測が期待される。また, 各検出器の安定動作によって重力波源の方向決定精度も高まり, 電磁波観測やニュートリノ観測によるフォローアップ観測も期待される。その後 2020 年台前半に計画されている国際共同観測 O5 では LIGO, Virgo で更なる検出器のアップグレードが検討されており, 数多くの重力波イベントが期待される。加えて, LIGO India の国際共同観測への参加も計画されており, 5 台体制による重力波観測ネットワークが構築される。

2020 年台後半から 2030 年台前半にかけては, 更なる感度向上を目指した第三世代重力波検出器がアメリカとヨーロッパで計画されている。これらの検出器には KAGRA の特徴である地下サイトの利用や低温鏡の使用が検討されており, KAGRA で培われた技術が非常に重要な役割を果たす。これらの第三世代重力波検出器では年間 1000 を超える重力波イベントが期待されており, 電磁波観測等によるフォローアップ観測を合わせることで, r 過程元素合成の解明やハッブル定数の高精度測定などの科学的成果が期待される。また, 中性子星連星合体後のリングダウン波形の高精度観測により, 中性子星の状態方程式への制限やブラックホールのスピンパラメータの決定なども期待できる。

2030 年台には宇宙重力波望遠鏡による低周波重力波の観測も計画されており, 超大質量ブラックホール連星の合体や中間質量ブラックホール連星の合体等の観測により, ブラックホールの進化過程に対する重要な知見を得ることが期待される。また, インフレーションを起源とする宇宙重力波背景放射の直接観測を試みる宇宙重力波望遠鏡計画も存在し, 初期宇宙からの重力波を直接観測して, 初期宇宙の謎に迫ることも期待される。

重力波は電磁波やニュートリノでは観測できない現象を観測可能にする。これによって, 我々は今まで知ることのできなかった宇宙の謎に迫る新たな目を得たのである。今後ますますの重力波観測の高度化により, 数々の科学的成果がもたらされることは疑いようもない。宇宙観測の新たな時代が今幕を開けたのである。

参考文献

[1] B. P. Abbott *et al.*, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016)

[2] B. P. Abbott *et al.*, "GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence", *Phys. Rev. Lett.* **119**, 141101 (2017)

[3] B. P. Abbott *et al.*, "GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral", *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017)

[4] The Event Horizon Telescope Collaboration, "First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole" *Astro. J. Lett.* **875**, L4 (2019)

[5] The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration, The 1M2H Collaboration, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, The Las Cumbres Observatory Collaboration, The VINROUGE Collaboration, and The MASTER Collaboration, "A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant", *Nature* **551**, 85-88 (2017)

[6] T. Akutsu *et al.*, "Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory", *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2018**, 013F01 (2018)

[7] KAGRA Collaboration, "First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA", arXiv:1901.03569 (2019)