

■ 研究紹介

重力波検出と重力波天文学

東京大学宇宙線研究所 重力波観測研究施設

苔山 圭以子

kokeyama@icrr.u-tokyo.ac.jp

2016年8月8日

1 はじめに

2016年のトップ科学ニュースといえば、2月に発表されたLIGOによる重力波の初検出が挙げられる。重力波の検出は、アインシュタインが一般相対論の帰結として重力波の存在を予言してから、実に100年の時を経てとうとう達成された。本稿では、重力波の検出の歴史、原理、LIGOによる発見のレビュー、日本の重力波プロジェクトKAGRAと重力波天文学の今後の展望について述べる。

2 重力波とは？

アインシュタインの一般相対性理論は、重力場の理論である。有名なアインシュタイン方程式は、この理論の帰結とされ、空間の幾何学的な歪みと、物質の分布などとの相互作用を表す。つまり、一般相対性理論は、質量のある物体が時空そのものを歪ませ、その歪みが物体の運動に与える影響こそが重力である、ということを示した。

この方程式を線形化して真空中での解を求めると、波動解が得られる。この波動解が、時空そのものの歪みが光速で伝わっていく現象、つまり重力波である。重力波は、原理的には、質量を持った物体が、非軸対称・非球対称に運動した時に放出される(図1)。放出される重力波は横波であり、進行方向と垂直な空間を伸び縮みさせながら伝わっていく。

しかしその伸び縮みの効果は極端に弱く、観測可能な波源は、ものすごく大質量な物体による劇的な運動、つまり天体現象でなければならない。少なくとも現代の科学技術で検出するためには、重力波を放出する候補天体は、後述のブラックホール連星の合体のような、コンパクトで非常に重い天体の連星合体や、超新星爆発など、宇宙で起きる現象のなかでもっともエネルギーが高く、ドラマチックな天体である。

重力波がやってきて通り過ぎると、重力波が通過する空間の長さが伸びたり縮んだりする。その伸び縮みの振幅は微小で、1mあたり 10^{-21} mほどである。この歪みは、地球と太陽の間の距離が、水素原子1つ分の長さだけ変化するほどの微小さである。これほどの超精密測定を行うには、

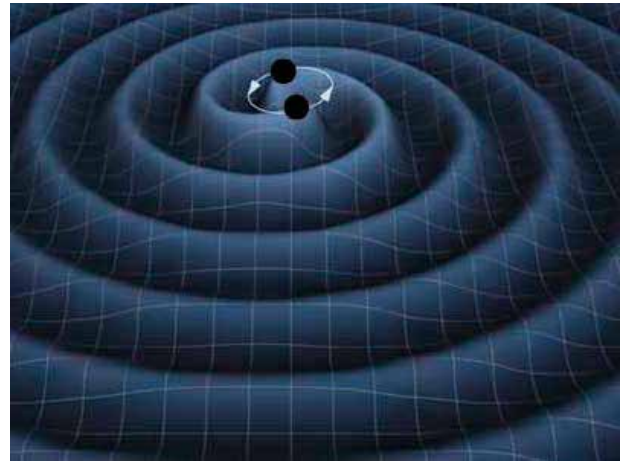


図1. 連星ブラックホールが重力波放射しているイメージ。
(T. Carnahan, NASA GSFC)

高い科学技術が必要であり、これが、存在の予言から実際の検出までに100年もかかった理由である。重力波の存在を予言したアインシュタイン自身、本当に存在するのかどうか、半信半疑であったらしい。

3 重力波検出器の開発の歴史

3.1 共振型検出器

重力波による微小な空間の伸び縮みを測定しようという試みは、1960年代から開始された。メリーランド大学のウェーバー(Joseph Weber)は、共振型と呼ばれる検出器を提案、製作した。これ以前は、重力波がもし本当に存在したとしても、あまりにも効果が微小すぎて検出は不可能である、というのがほとんどの科学者による認識であり、どうやったら検出できるかの方法が検討されることもなかった。

ウェーバーの開発した共振型検出器は、円柱形の1.4トンのアルミ合金のかたまりでできている(図2)。重力波がこの弾性体を通ると、その伸び縮みの効果で弾性体に共鳴振動を起こす。弾性体は無数の振動モードを持つが、円柱の長さ方向の伸縮モードを利用し、この長さ変化をトランスデューサーで電圧に変換して読みとる、というのが検出の原理である。このタイプは、利用する共振モードの共振周波数付近の狭帯域にしか感度がない。



図 2. ウェーバーと共振型重力波検出器。
(AIP Emilio Segre Visual Archives)

ウェーバーは、この装置をメリーランド大学とアルゴンヌ国立研究所（シカゴ）の2か所に設置し、2台の検出器の信号の相関を調べた。1969年、ウェーバーは、天体からの重力波信号を発見したと発表し、大ニュースとなった [1]。この実験結果は、いろいろな角度から詳細に検討されたが、結果は否定的なものであった。同じタイプの、より感度の高い検出器がいくつも作られ追実験を行ったが、重力波信号は見つからなかった。また、彼の主張が正しければ、検出された信号の頻度と振幅から推定して、銀河の構造が変わるほどの大きなエネルギーが放射されたことになってしまい、信ぴょう性が疑わしかった。今日では、ウェーバーの信号はノイズであったと考えられている。彼の実験は不名誉な結果に終わった（とみなされている）が、彼こそが、重力波検出実験を最初に立ち上げた第一人者であった。

これをきっかけとして、1990年代まで、いくつもの共振型検出器が世界中の研究所で製作された。検出器の感度を向上させるための極低温技術や懸架技術が開発され、最高感度記録がぬりかえられていった。さらに、信号解析の統計的な信頼度を上げるため、共振型検出器プロジェクトの間で世界的な検出器コラボレーションが形成され、データの共有が行われるようになった。こうして、世界的な（共振型検出器による）重力波検出ネットワークが形成されていった。

しかしながら、90年代からは、重力波検出器の主流は後述のレーザー干渉計型がメジャーになってゆき、現在ではほぼ全ての共振型検出器プロジェクトはシャットダウンされている。

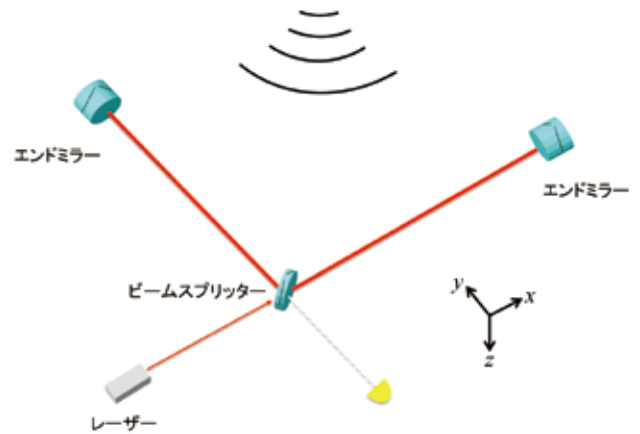


図 3. マイケルソン干渉計。

3.2 レーザー干渉計型検出器

重力波による空間の歪みを実際に観測した LIGO は、アルファベットの L 字の型をしたマイケルソン干渉計が原型になっている。このタイプの重力波検出器も、原理はシンプルである。重力波がある方向 (z 方向) 通り過ぎるとき、その進行方向に垂直な面 (xy 面) の空間が伸び縮みする。マイケルソン干渉計の2つのアームが、それぞれ x , y 方向になるよう設置すると、重力波による空間の伸び縮みを、干渉計の2つの腕の光路長の差として検出することができる(図3)。

このタイプの検出器は、1960年代から検討され始めた。はじめにこのアイデアを提案したのは、2名のロシアの科学者と記録されている。同時期、独立に MIT のワイスも発案した。72年には、カリフォルニア工科大学のソーン (Kip Thorne)、ドレーバー (Ronald Drever) とともに、ノイズ源、必要になる装置のサイズ、光学的技術などの詳細が検討書にまとめられ、この時期に現在の LIGO の原型がほぼすべて確立した。

マイケルソン干渉計型の検出器は、広い帯域で信号を検出できるという、共振型検出器にはなかった利点がある。80-90年代には、テーブルトップの小型プロトタイプがアメリカ、スコットランド、ドイツ、日本などで製作された。これらプロトタイプによって、大型装置に必要な技術が確立されてからは、重力波検出実験の主流はレーザー干渉計型となっていった。

90年代なかばには、第一世代とされる km スケールの大型干渉計プロジェクト、Initial LIGO (米, 4 km 基線長の干渉計が2台, 2 km が1台, 図4), GEO (独・英, 600 m), Initial VIRGO (仏・伊, 3 km), TAMA300 (日, 300 m) が承認され、建設が始まった。日本の TAMA300 は、国立天文台 (東京都三鷹市) に作られたレーザー干渉計である。都市の近郊にあり、他のプロジェクトよりは小型であった利点を活かして、世界に先駆けて観測を行った。これら第一世代検出器は、2000年代に観測を行い、重力波を検出することはなかったものの、干渉計実験技術、データ解析の



図4. LIGO Hanford (LHO, 左) と Livingston (LLO, 右)。
(www.ligo.org)

アルゴリズム、大型干渉計の運営についても経験が得られた。複数の検出器でデータ共有し解析する手法も発達し、国際的な重力波検出ネットワークが確立された。

4 レーザー干渉計型検出器の概要

Advanced LIGO (aLIGO) と Advanced VIRGO (aVIRGO) は第二世代重力波検出器とよばれ、第一世代干渉計のインフラはそのままに、中身の干渉計部分をすっかり新しくアップグレードしたものである。第一世代の装置より、約10倍に感度を向上させ、本格的な観測的重力波天文学を目指している。この章では、aLIGOを例として第二世代重力波検出器の光学設計と雑音源、コミッショニングについて説明する。

4.1 光学設計

aLIGOの光学設計 [2] は、ファブリ・ペロー共振器と、デュアル・リサイクリング (Dual Recycling) と呼ばれる複雑なマイケルソン干渉計である (図5)。一対のフロントミラーとエンドミラーが合わせ鏡のようにファブリ・ペロー共振器を構成する。共振器内に光を何往復もさせることによって、実効的な光路長をかせぎ、重力波信号を増幅するためである。パワー・リサイクリングミラーは、レーザー入射側に戻ってくる光を干渉計へ打ち返し、干渉計内のレーザーパワーを上げるためのものである。レーザーパワーは高いほどショットノイズ (後述) が低くなるためにこの技術が採用されている。シグナル・リサイクリングミラーは、干渉計の信号検出ポートにあるミラーで、重力波信号に対して周波数応答を広帯域にしたり、最適周波数をチューニングしたりすることができる。2つのリサイクリングミラーが組み合わされている設計なので、デュアル・リサイクリングといわれる。第一世代干渉計との光学的な違いは、シグナル・リサイクリングミラーが加わってデュアル・リサイクリングになっている点である。

4.2 レーザー干渉計の雑音源

1 mあたり 10^{-21} m という、極微の信号を検出するためには、ありとあらゆるものがノイズ源となる。最終的な干渉計の感度は、原理雑音とよばれる、完全に除去することが不可能な雑音で制限される [3, 4]。

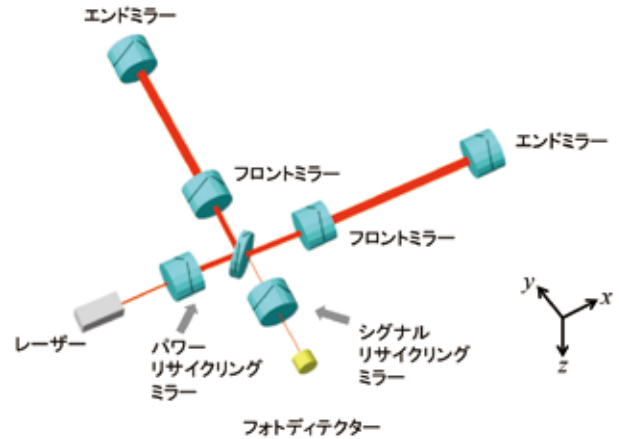


図5. Advanced LIGO 干渉計の光学設計。

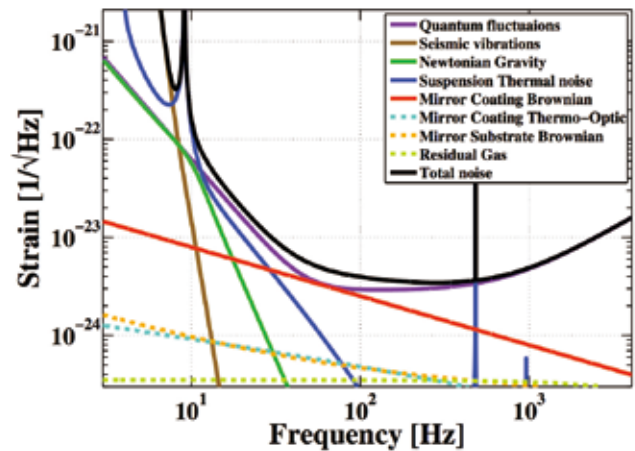


図6. Rev. Mod. Phys. **86**, 121, Fig. 13より。Advanced LIGOのデザイン感度。縦軸はストレイン感度 $[1/\sqrt{\text{Hz}}]$ である。

図6に aLIGOのデザイン感度を示す。横軸が周波数で、縦軸がストレイン感度である。ストレインとは、1 mあたり何 m 歪むかを示す、無次元量である。

10 Hz以下で感度を制限しているのが、地面振動である (図6で Seismic vibration とレジェンド)。地面は、人間が体に感じない地震で常に揺れている。この揺れがミラーを揺らすと、重力波による長さ変化と区別がつかず、雑音となる。これを低減するために、干渉計のすべてのミラーはサスペンションに吊られている。サスペンションは、その共振周波数以上の周波数では支点からの揺れを減衰させることから、aLIGOでは4段の大型振り子を、さらにアクティブ防振機構のある地面振動減衰台に設置している。イタリアの aVIRGO や日本の KAGRA (後述) では、タワーのように高い多段振り子を採用しており、地面振動がミラーのある最終段へ伝わらないように設計されている。

図6で地面振動の次に感度を制限しているのが、サスペンション熱雑音である (図6で Suspension Thermal noise とレジェンドされている曲線)。熱雑音は、干渉計が有限の熱浴に接しているために起こる雑音である。サスペンションの熱雑音は、サスペンションの分子がブラウン運動する

ため、吊っているミラーの重心が振動してしまい起こる雑音である。この熱雑音は、温度と、サスペンションの機械的散逸に比例して大きくなってしまふ。機械的散逸とは、系が機械振動の1周期でどのぐらい熱浴とエネルギーをやりとりするかを決める物性パラメーターである。aLIGOでは、サスペンションの機械散逸をなるべく低くするために、熔融石英のミラーとそれを吊るすファイバーが準モノリシックになるような溶接方法を用いている。

サスペンション熱雑音の次に高周波側で雑音を制限しているのが、レーザーの光子の量子的なゆらぎによる雑音(図6で Quantum fluctuations とレジェンドされている曲線)である。光子の個数は、その平均値を中心としてつねに揺らいでいる。レーザーのパワーを光検出器で計測するとき、光子数がゆらぐことによって、ショットノイズが生じる。さらに、レーザーがミラーによって反射するときに、ミラーは輻射圧を受けるが、光子数のゆらぎが輻射圧のゆらぎとなり、これが輻射圧雑音となる。これらは量子雑音と呼ばれ、ショットノイズと輻射圧雑音との和で決まる。ショットノイズは、レーザーパワーを上げれば下げることができるが、輻射熱雑音は大きくなってしまふ。このため、量子雑音にはある最低値が存在し、標準量子限界と呼ぶ。これは、不確定性原理に対応する量子的な観測限界である。

図6においては、Quantum fluctuations とレジェンドされている曲線の低周波側が輻射圧雑音、高周波側がショットノイズである。

4.3 コミッショニング

干渉計は、たんにミラーなどの要素技術をそれぞれインストールしただけでは稼働できず、それぞれの要素技術をレーザー干渉系としてインテグレートし、干渉計が重力波に対して線形な応答を持つように制御しなければならない。その上で、原理雑音以外のあらゆる雑音を極限まで低減しなければならない。この試験段階を、干渉計のコミッショニングという。筆者は、2011年より約3年半、LIGO Livingston 観測所(LLO)のコミッショニングに参加した。私がLLOに到着した2011年夏頃は、ハイパワーレーザー光源がインストールされたところであり、これから光源の下流のモードクリーナーと呼ばれる光学共振器と、さらに下流のメイン干渉計のコミッショニングが始まろうという頃であった。

メイン干渉計のコミッショニングでは、まず安定な制御を確立し干渉計を稼働させなければならない。LLOでは、まずシンプルなショートマイケルソン干渉計部分からメイン干渉計のコミッショニングが始まった。ショートマイケルソン干渉計は、ビームスプリッターと2つのフロントミラーからなる部分で、メイン干渉計としては最もシンプルな構成である。2つのリサイクリングミラーはミスアラインされている。

マイケルソン干渉計の制御自由度は、2つのアーム長の差動自由度である。よって、差動自由度の情報を含む信号を光学的に取得し、ビームスプリッターにフィードバックすればよい。一見1自由度のみのシンプルな制御に思えるが、じつはそうではないことがわかった。ビームスプリッターを吊るす多段サスペンションを制御で動かす際に、制御自由度と角度自由度がカップリングしてしまい、外部センサーを用いた角度自由度のダンピング制御がさらに必要であることが判明した。さらに、サスペンションはアクティブ防振台に設置されているが、マイケルソン干渉計部を制御しようとする時に、ミラーを制御しようとするアクチュエーターの力が、防振台を蹴ってしまうことも判明した。これには、防振台のローカル制御の調整が必要となった。

次のマイルストーンは、干渉計中心部分デュアル・リサイクリングマイケルソン干渉計(DRMI)であった。DRMIは、図5においてフロントミラー2つ、ビームスプリッター、パワー・リサイクリングミラー、シグナル・リサイクリングミラーからなる中心部分の干渉計である。DRMIには、パワー・リサイクリング共振器長、シグナル・リサイクリング共振器長、そしてマイケルソン干渉計部分、でトータル3自由度の制御が必要となる。この3自由度の制御は、前述の経験もあって、比較的スムーズに達成することができた。ところが、レーザーパワーを徐々に上げて3W程度にしてみると、ミラーの角度方向が不安定に動いてしまうことがわかった。共振器内の発熱がミラーを吊るしているファイバーに伝わり、ファイバーの長さが変わってしまうことで、角度方向の不安定性が励起されたのであった。そこで急遽、DRMI部のアライメント制御を導入し、DRMIの安定稼働を達成させた。

先にアーム共振器を含めたフル干渉計の制御を達成したのはLLOであった。これでやっと、干渉計が重力波信号に線形な応答をするようになり、重力波検出器として動かすことができるのである。複雑な干渉計制御操作は、いったん手順が確立してしまえば、自動干渉計操作システムGuardian [5]へ覚えさせて、人間がマニュアルで操作しなくてすむようになっている。

そしてここからは、ノイズハンティングである。干渉計が稼働してすぐの感度は、前章の原理雑音レベルにはほど遠いもので、ありとあらゆるものがノイズとして干渉計にカップリングしている。LLOでは約1年がかりで70Mpc先の連星中性子星合体の信号が検出できる感度に到達した。スケジュール的に後からコミッショニングが開始されたLIGO Hanford 観測所(LHO)では、LLOの経験を活かすことによって、干渉計の動作から約3ヶ月で同じ感度を達成することができた [6]。

図7に、観測期間中のLHOの感度を示す。この感度は、aLIGOのデザイン感度の3分の1程度である。aLIGOで

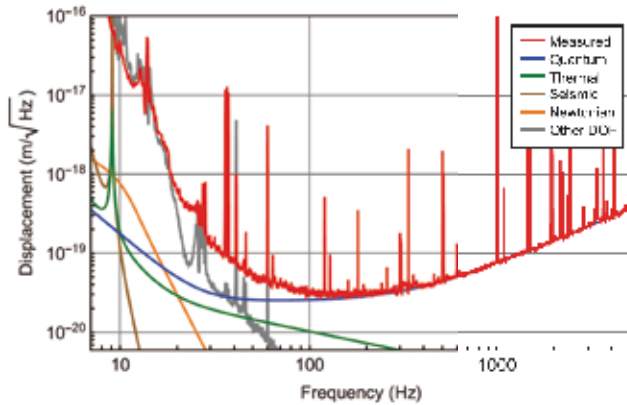


図 7. PRL 116, 131103 (2016), Fig. 3 より。観測時の LHO の感度。高周波ではショットノイズ (Quantum とレジェンド), 低周波では他の制御自由度からのカップリングノイズ (Other DOF とレジェンド) によって感度が制限されていた。縦軸はストレインではなく変位 [$m/\sqrt{\text{Hz}}$], つまりストレイン感度に基線長 4000m をかけたものである。

は、いくつかの段階においてサイエンスランが計画されており、70Mpc という感度は、2015 年 9 月からの第 1 回目のサイエンスランとしては期待以上のものであった。当初の予想では、第 1 回の観測では悲観的にみて 40Mpc, うまくいっても 80Mpc であろうと考えられていた [7]。

5 重力波信号の検出

5.1 エンジニアリングラン

LIGO では、コミッションが上述のごとく想定外の事がありつつも順調に進み、予定どおり 2015 年 9 月から第 1 回目のサイエンスランが開始される見込みとなった。第 2 世代重力波検出器として、世界初の本格稼働である。

観測の前には、エンジニアリングランが行われる。干渉計から取得された重力波チャンネルのデータは、デジタル変換され、計算機上のデータ取得システムへ送られる。さらにそこから、世界各地にあるクラスターとよばれるデータ解析用の計算機へ送られ、解析される。データが干渉計で生成されてからクラスターに送られるまで 20 分ほどの遅延しかないため、ほぼリアルタイムでオンライン解析が行われる¹。解析では、ターゲット波形や解析アルゴリズムごとに、何種類ものオンライン解析プログラム (パイプラインと呼ばれる) が用いられている。

エンジニアリングランは、干渉計のハードウェアから解析パイプラインまでの端から端までを徹底的にテストする、いわばサイエンスランの予行演習である。データ解析グループでは、干渉計が出来上がらないうちから、人工データを使って、解析パイプラインや干渉計キャラクタリゼーション²の準備を行ってきた。サイエンスラン直前のエンジニア

¹ オフラインでも解析は行われる。

² 干渉計が正常に稼働していたか診断し、データの質のチェックを行う。

リングランは、すでに第 8 回目を数えていた。このときは、干渉計を実際にサイエンスモードで稼働させ、そのデータを解析していた。つまりサイエンスランの本番と同じ条件での予行演習であった。その際の 2015 年 9 月 14 日に、重力波信号が到来した。

5.2 ブラックホール連星合体からの信号

最初に信号に気づいたのは Albert Einstein Institute (AEI) のドラゴ (Marco Drago) である。彼が、解析パイプラインのひとつからアラートを受け取った。AEI は LIGO コラボレーションの中でも最も有力なデータ解析グループのひとつである。LIGO は 1000 人以上からなるコラボレーションであり、実験家は干渉計を稼働させるが、データを調べて重力波が来た時に最初に見つけるのは、データ解析グループである可能性が高いのである。このときの詳しい様子はいろいろな記事でレポートされているので、例えば [8] に詳細を譲る。

LHO と LLO の 2 台の干渉計が受け取った信号は、波形を見ればすぐにブラックホール連星合体のものだとわかるぐらいに、数値相対論による予想波形と一致していた (図 8)。この信号は日付をとって GW150914 と名付けられ、詳しく解析された [9]。

連星ブラックホールは、重力波の放射によりエネルギーを失いながら、数十億年にわたって互いに近づいてきた。互いの周りをまわっている時期をインスパイラルといい、図 8 の波形の最初の部分である。その後、2 つのブラックホールは一瞬で急速に接近し、より大きな重力波を放射しながら合体する。そして、一つのより大きなブラックホー

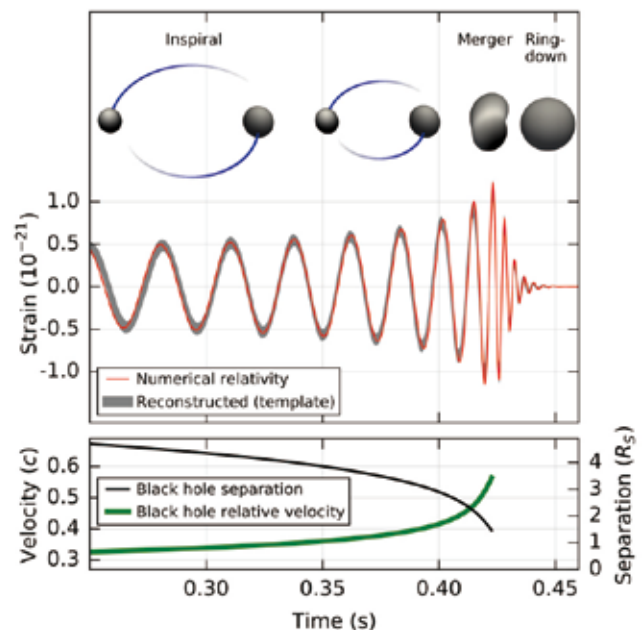


図 8. PRL 116, 061102 (2016), Fig. 2 より。(上) LIGO Hanford 観測所で検出された信号の再構成と、数値相対論からの予想波形との比較。(下) 2 つのブラックホール間の距離と速度の変化。

ルへと減衰振動（リングダウン）する。リングダウン期は、ブラックホールのエネルギーが重力波放出によって外部へ散逸して、最終的に1つのブラックホールへ落ち着く過程であり、この減衰振動は準固有振動と呼ばれる。

この波形から、13億光年かたにある重さ $36 M_{\odot}$ のブラックホールと、 $29 M_{\odot}$ のブラックホールが合体してひとつのより大きな $62 M_{\odot}$ のブラックホールになる瞬間であったことがわかった。また、合体の前後の質量の差から、合体時に $3 M_{\odot}$ ぶんのエネルギーが重力波エネルギーに変換され、そのほとんどが一瞬にして放出されたことがわかる。ちなみに太陽が電磁波として放射しているエネルギーは、毎秒 $2 \times 10^{21} M_{\odot}$ ぶんのエネルギーである。

さて、合体前に重力波を放出している2つの重い物体が、なぜブラックホールとわかるのか。GW150914の波形から、合体寸前には2つの物体が光速のほぼ半分の速さで動いており、それらの距離が350 kmしか離れていなかったことからわかっている。これらのことから質量を考えてみると、中性子星としては重すぎるし、ブラックホールと中性子星のペアでは、これより高い周波数で合体してしまうはずである。

データを解析する際には、装置が正常に稼働していたかどうかを検討し、雑音も理解しなければならない。干渉計の状態は、重力波チャンネル以外のさまざまな信号を解析して診断する。たとえばレーザー光源が安定に動いていたか、地面振動からのアップコンバージョンノイズがサスペンションのセンサーに記録されていないか、ファブリ・ペロー共振器の光軸が適切にセンタリングされていたか、挙げればきりが無い。さらに、外部からのインジェクションが本当になかったかも注意深く確かめられた。このように、この信号が雑音ではなく、本当にブラックホールから来た重力波信号なのだという確信が深められていった。GW150914のS/Nは24、 5σ であった。偶発的な雑音がたまたまGW150914の波形のように見える可能性は、20万年に1度の確率である。

5.3 $30 M_{\odot}$ のブラックホール

GW150914を放出した2つのブラックホールは、およそ $30 M_{\odot}$ の重さであったが、このような質量を持つブラックホールの存在が確認されたのはこれが初めてであり、驚きを持って受け止められた。

これまでにX線によって観測されたブラックホールは、恒星質量ブラックホールとよばれるもので、 $20 M_{\odot}$ までの重さであった。恒星質量ブラックホールは、太陽より重い恒星が核融合後の重力崩壊（超新星爆発）によって形成されたブラックホールで、観測はこのシナリオでできるブラックホールの質量の理論的な上限とつじつまが合っている。

いっぽうで、宇宙ができて初めて形成された星（Pop III星）から形成されるブラックホールは、 $30 M_{\odot}$ がピークとな

る質量分布になり、それらの連星合体が重力波によって観測できる可能性が2014年に京都大学のチームによって示唆されていた [10]。今回見つかったブラックホールも、まさにそのようなシナリオでできた宇宙初期星のなごりかもしれない。ビッグバンの後に初めて星が作られた時、星間物質に重元素はなかった。重元素は、星の中の核融合によって作られるからである。重元素がなかった頃、Pop III星は核融合がはじまるまでに、軽元素の星間物質を集積して、現代の恒星よりも重く、 $10\sim 100 M_{\odot}$ まで成長することができた。そしてそのような星が重力崩壊すると $30 M_{\odot}$ のブラックホールになり、(時には) 連星系をつくり、GW150914のような重力波信号を放射する。

5.4 ふたつめの連星ブラックホール合体

LIGOの第1回サイエンスランは2015年9月に重力波初検出とともに始まり、2016年1月に終了した。2015年12月26日、連星ブラックホール合体の信号が再び到来した。例によって日付をとりGW151226と名付けられた信号 [11] は、 $14 M_{\odot}$ のブラックホールと、 $7 M_{\odot}$ のブラックホール連星が合体し、 $21 M_{\odot}$ のブラックホールとなった天体からであった。天体までの距離はGW150914と同じく13億光年、放出された重力波のエネルギーはおよそ $1 M_{\odot}$ である。

GW151226は、これまでX線の観測でも見つかっていた $10 M_{\odot}$ 程度の質量のブラックホールであったという点で、GW150914とは違っていた。ブラックホールの形成シナリオをより明らかにするには、今後さらに多数のブラックホール合体を観測し、質量分布を解明する必要があるようだ。

5.5 相対性理論の検証

これまで、水星の近日点移動や重力レンズの観測から相対性理論がテストされてきたが、どの現象も弱い重力場下の、準静的な現象であった。強い重力場のもと、光速に近い速さで運動するデータを用いるテストは、新たなレジームでの相対性理論検証といえる。たとえば、水星の近日点移動のテストの場合、観測する現象の速度のオーダーは $v/c \sim 10^{-5}$ であるが、連星合体の場合 $v/c \sim 0.4$ と、桁違いに“相対論的”である。

LIGOで検出された連星ブラックホール合体の信号は、相対性理論の予想波形と詳しく比べられた [12]。これまでのところ、相対性理論との矛盾は見つからなかった。しかし、より精密な検証には、相対論的な効果がより大きく影響する準固有振動の波形を、より長いサイクルで、よいS/Nで、より多く検出することが必要であり、今後の観測が待たれる。

また、相対性理論によると、重力波は+モードと \times モードという2種類の偏光を持つが、今回の観測では偏光の情報はとりだせなかった。LHOとLLOの2台は、ほぼ同じ向きを向いているので、2つの偏光を分離することができ

ないのである。重力波の偏光を測定するためには、別の方向を向いている検出器、つまり aVIRGO と KAGRA が必要となる。

5.6 余談

筆者の知り合いである AEI のデータ解析の研究者デント (Thomas Dent) に、彼がはじめに信号について知った時の様子を聞いてみた。前述のドラゴから信号のことを聞いたデントの同僚カパーノ (Collin Capano) が、デントの部屋に知らせに来た。デントのオフィスドアから顔だけ出して、神秘的な様子で「トーマス、ちょっとこれを見てくれ」と言った。その声もどこか恐れおののいているようで、デントはその時なんとなくドラマチックな予感を受けたという。

その時は、見つかった信号が、干渉計の性能を試すために人工的に注入されたものであり、重力波信号ではない可能性がまだ残っていた。とはいえ、ハードウェアインジェクションがあることは知られておらず、本物である可能性が高かった。

何年も探し求めていたものが満を持して...もしくは予想していなかったタイミングで...いよいよ発見されるという時、嬉しいというよりは少し恐ろしいものなのかもしれない、と個人的に興味深く感じたものである。

6 日本の重力波プロジェクト, KAGRA

第二世代重力波検出器は、前述の aLIGO, aVIRGO, そして日本の KAGRA である。KAGRA は地下サイトで低温干渉計という大きな特長を持っている。低温技術は、欧州の次世代のプロジェクトである Einstein Telescope (ET, [13]) と LIGO の次世代のプロジェクトで採用される予定であり (ET はさらに地下サイトとなる計画)、その技術をすでに兼ね備えている KAGRA は、第 2.5 世代の検出器ともいわれる。光学設計や最終的なデザイン感度 (図 9) は第二世代重力波検出器と同等であり、LIGO-VIRGO 観測ネットワークに参入することを目指している。筆者は 2015 年より KAGRA プロジェクトに加わっている。この章では、KAGRA プロジェクトの現状や、将来の展望を述べる。

6.1 KAGRA の概要

日本の重力波検出器は、岐阜県飛騨市神岡町の地下トンネルの中に建設中である。ここでは、スーパーカミオカンデやカムランドなどの実験施設がある同じ池の山の地中である。KAGRA の特長は、(1) 地面振動の静かな地下にあること (2) 熱雑音を下げするために -253°C にアーム部のミラーを冷却することである。光学デザインは、aLIGO と似た設計で、ファブリ・ペロー共振器部分が 3 km である (これ以上長くすると、山から飛び出してしまう)。

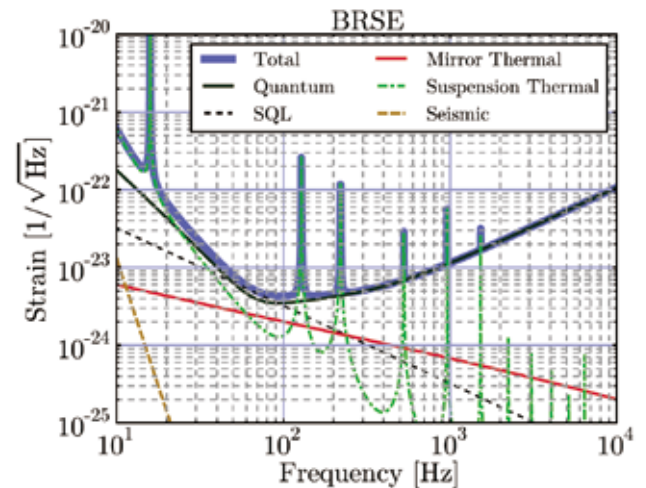


図 9. PRD 88, 043007 (2013), Fig. 2 より。KAGRA のデザイン感度 (ストレイン感度)。ほとんどの周波数帯域で量子雑音にのみ制限される。

地下・低温という特長は、次世代のプロジェクト計画を先取りした形になっている。欧州の次世代プロジェクト Einstein Telescope (ET) は、シリコンミラーを使った低温干渉計で、地下に建設することが検討されている。また、LIGO の次世代プロジェクトも低温を採用予定である。

6.2 地下施設

KAGRA の地下施設のインフラはすでに完成している。3 km のアームのためのトンネル (図 10) とコーナー部分の実験室、入り口トンネルのために、のべ 7 km のトンネルが新たに掘削された。コーナー、各エンドステーションともに、2階建て構造のトンネルとなっている。コーナーステーションの 1 階フロアの面積は約 3000 m²、各エンドステーションの 1 階部分はそれぞれ約 1000 m² と、巨大な地下施設である。トンネルには、検出器のために電気、通信ネットワーク、換気システムが導入されている。電力は 1MW の容量、ネットワークは 10GB の光ファイバーがインストールされている。電気と通信ネットワークは Y エンドステー



図 10. KAGRA 3km トンネル。

ションにつながる旧坑道から引き入れられており、コーナーステーションを通り、X エンドステーションへと張り巡らされている。換気用ダクトは新跡津坑口からコーナーステーション経由で敷設されている。レーザー光路を空気の屈折率の揺らぎからカバーするための真空ダクトは、直径 800 mm、厚さ 8 mm のステンレス製で、すでに設置済みである。各ミラーを設置するための真空チャンバーも設置済みである。

6.3 試験運転

2016 年 3 月 25 日から 4 月 25 日まで、シンプルな L 字型のマイケルソン干渉計で、試験運転が行われた。地下大型干渉計として、初めての稼働である。

これまで、日本のグループは、km スケールの大型干渉計を運用した経験がなかった。米国と欧州のプロジェクトは、第一世代の干渉計がすでにそれぞれ 4km、3km と大型であり、その時の経験が aLIGO や aVIRGO には活かされている。レーザー干渉計に限らず、大型実験では、テーブルトップ実験とまったく勝手が違う。技術面だけでなく、プロジェクトのマネジメントも格段に難しくなる。さらに、KAGRA は地下トンネルという環境であるので、実験の作業効率を上げることが難しい。トンネル内で実験中に安全を確保するためには、作業服、安全ブーツ、ヘルメット、ヘッドライト、そして酸素濃度計が必須である (図 11)。トンネル内では安全に作業できる時間も限られているため、追い込み作業のために夜中までかかって実験をするというわけにはいかない。このような背景をふまえて、最初のマイルストーンとして、重力波への感度は問わずに、シンプルな L 字型の干渉計構成、かつ常温での試験運転である iKAGRA が行われた。予行演習である iKAGRA に対して、大型のサスペンションを用いた低温での運転フェイズを、bKAGRA と呼んでいる。bKAGRA の最終的な光学設計は、aLIGO と同様の 3km のデュアル・リサイクリング干渉計(図 5)である。



図 11. KAGRA 坑内での作業スタイル。



図 12. KAGRA コントロールルーム。

iKAGRA では、地下実験施設が完成してすぐ、マイケルソン干渉計のためのサスペンションとミラーが、真空チャンバー内にインストールされた。ミラーが設置されれば、干渉計へレーザーを送り、初期アライメントをとる。

コーナーステーションから 3km 先のエンドミラーまで光を通すのはスムーズに進んだが、エンドミラーからの光を 3km 戻すのに苦労した。LIGO では GPS を用いてチャンバーの位置やミラーの設置精度を出しているが、地下では GPS は使用できない。結局、同じ池の山地下にある低温プロトタイプ CLIO (100m 干渉計) の技術を用いて光をコーナーステーションへ戻すことができた。

光がビームスプリッター側へ戻り、光の干渉現象が確認されれば、次は制御である。KAGRA の制御システムは、制御用計算機と制御専用ネットワークを用いた大掛かりなものであり、LIGO からの技術輸入によって構築された。干渉計から電圧信号として取得されたエラー信号はデジタル化され、コーナーステーションにある制御用計算機に送られる。計算機で制御信号が生成され、特別な通信規格でエンドステーションへ光ファイバーを通じて送信される。そしてエンド側で制御信号がアナログ化され、ハードウェアへフィードバックされる。このシステムは KAGRA プロジェクト開始以前から LIGO の協力のもとに着々と準備されてきた。そのかいあって、干渉計の初期アライメントがとれて干渉縞が見えると、ただちに制御に成功した。

この制御ネットワークは、坑外のコントロールルーム (図 12) につながっており、観測時にはトンネルへ入ることなくすべての制御を行うことになっている。

試験運転が始まると、干渉計の操作は自動運転システム Guardian [5] が行う。これも LIGO から輸入されたシステムで、干渉計の稼働効率を大きく向上させた。マイケルソン干渉計の稼働率は、単純に制御されていた時間と制御が行われなかった時間の比として、およそ 90%であった。これは試験運転であったためとても高い稼働率になっている

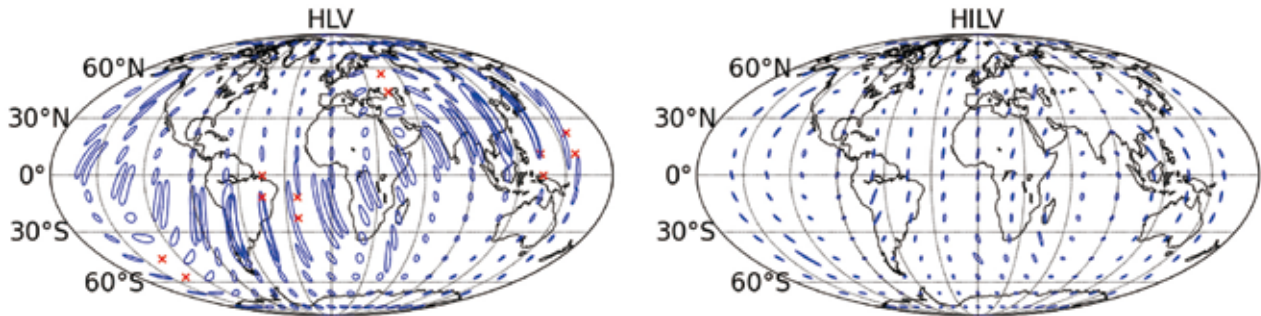


図 13. Living Rev. Relativity **19** (2016), 1, Fig. 8 より。国際ネットワークによる連星中性子連星への感度と、90%の信頼度で波源のローカライズができる信号到来方向。

が、実際のサイエンスランでは、データの質が考慮されるために質の悪いデータは破棄され、稼働率はもっと低い値となる。

データ転送の試験として、KAGRA のデータは東京大学宇宙線研柏キャンパスにある計算機と、大阪市立大学にあるクラスターに低遅延で転送できることが確認できた。また台湾 Academia Sinica と韓国の KIST にも遅延ありのミラーリングが行われた。

6.4 熊本地震の影響

さて、熊本地震の4月16日の本震の時、iKAGRA は稼働中であつた。干渉計は、大きな地震でミラーが制御レンジより大きく動いてしまうと、稼働できなくなってしまう。地下で地面振動が低減されることは振動測定からも確かであるが、大きな地震となると別である。熊本地震の時も、干渉計の制御ができなくなった。それどころか、エンドステーションからレーザー光が失われてしまった。こうなると、坑内へ入って何が起きたか確かめて、初期アライメントをとり直さなければならない。

この時は、ビームスプリッターのサスペンションについている地震ストッパー（大きな地震があつた時にミラーが落下してしまわないようにするためのストッパーのような部品）が、サスペンションのファイバーに引っかかってしまっていた。iKAGRA では、簡略化のためにレーザー光路を真空に引いていなかったため、すぐにチャンバーを開けてビームスプリッターを元に戻すことができたが、bKAGRA でレーザー光路がすべて真空になると、真空チェンバー内の光学部品・サスペンションへのアクセスはできなくなる。しかし bKAGRA では、より大型で多段のサスペンションによってミラーのある段では揺れが十分に減衰されるので、比較的大きな地震でも上述のようなことはないと思われる。

6.5 今後のアップグレード

iKAGRA の試験運転が無事に終了し、現在はiKAGRA のマイケルソン干渉計は撤去されている。次のマイルストーンとしては、2017年度内に低温でマイケルソン干渉計とし

ての構成で稼働することである。この干渉計構成でもまだ感度は低く、重力波検出は見込めないが、大型サスペンション技術と、サファイアミラーを用いた低温技術を確立させることが目的である。大型サスペンションは東京都三鷹の国立天文台で、その低温部分は KEK で現在試験中である。その後、2018年度内にはさらに光学設計を最終的なデザインへとアップグレードする。それから制御試験とノイズハンティングを行うことになるので、KAGRA が重力波を検出できる、デザイン感度 [14] へ達成するのは、2020 年かそれ以降だろう、というのが私の個人的な予想である。

6.6 天文学的展望

KAGRA のもっとも重要な目標は、LIGO と同等の感度を達成し、国際観測ネットワークに参入することである。重力波検出器は指向性があるため、複数の検出器への信号到達時間の差から、重力波の到来方向を推定する。GW150914 の場合は LLO と LHO の信号到来時刻差は7ミリ秒であつた。これから推定される到来方向は、90%の信頼度がつけられるエリアで590平方度である。天の川を横切る夏の大三角が420平方度であることを考えると、かなり広い。

LIGO では、2016年秋からより高い感度で第2回目のサイエンスランが計画されており、欧州の aVIRGO もそれに参加するべく急ピッチで干渉計の調整を進めている。aLIGO の2台と aVIRGO、計3台(HLV)では、重力波の到来方向に対して図13左のようになる。この図では2019年に連星中性子星に対して160Mpcまで検出できる感度と仮定し、90%信頼度がつけられるエリアを示している。図13右は、同じ感度で4台目の干渉計がある場合である(LHO, LIGO India, LLO, aVIRGO で HILV)。図13では LIGO India を想定して I と表記されているが、KAGRA が加わった場合も同様に信号の到来方向がより明らかとなる。

LIGO India は LIGO とインドのコラボレーションであり、つい最近予算が承認され、2024年稼働開始を目指している。重力波天文学のためにはこの4台目がキーであり、これがあると x で示されたブラインドスポットは完全になくなり、

どの方向から重力波が来ても検出できるようになる。さらに角度分解能がより高くなる。KAGRA としては、なんとしても LIGO India よりも先に、同等の感度を出して4台目の望遠鏡となりたいところである。

重力波の到来方向を判別するのが天文学のために非常に重要な理由は、マルチメッセンジャー観測を行うためである。マルチメッセンジャーは、電磁波望遠鏡・ニュートリノ検出器と重力波検出器を組み合わせた、多角的な観測のことである。重力波イベントが起きた時に、電磁波望遠鏡に位置情報などを送り、フォローアップ観測を依頼する。または、電磁波望遠鏡のアラートを受けて、重力波データを解析する。このような観測は、たとえば、起源が未知とされるガンマ線バースト発生のシナリオ解明などに期待されている。すでに GW150914 に対していくつかのフォローアップ観測が行われたが、明らかな信号はなかった。Fermi Gamma Ray Burst Monitor によって弱い信号が報告されているが、GW150914 との詳しい相関は明らかではない [15, 16, 17]。

しかし将来、重力波国際ネットワークによる観測が始まり、マルチメッセンジャー天文学が本格的になれば、従来の望遠鏡だけでは明らかにできなかったさまざまな知見が得られることは間違いない。これからの重力波天文学は、まさに宝の宝庫なのである。

参考文献

- [1] J. Weber, "Evidence for Discovery of Gravitational Radiation," *Phys. Rev. Lett.* 24 1320 (1969)
- [2] The LIGO Scientific collaboration and the VIRGO collaboration, "GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries," *Phys. Rev. Lett.* 116, 131103 (2016)
- [3] LCGT Collaboration, "大型重力波望遠鏡 (LCGT) 計画設計文書 第三版," (2009)
- [4] R Adhikari, "Gravitational radiation detection with laser interferometry," *Rev. Mod. Phys.* 86, 121
- [5] J Rollins, "Distributed State Machine Supervision for Long-baseline Gravitational-wave Detectors," arXiv:1604.01456 (2016)
- [6] A Staley, *et al.*, "Achieving Resonance in the Advanced LIGO Gravitational-Wave Interferometer," *Class. Quantum Grav.* 31 245010 (2014)
- [7] The LIGO Scientific collaboration and the VIRGO collaboration, "Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo," *Living Rev. Relativity* 19 (2016),
- [8] A Cho, "Here's the first person to spot those gravitational waves," *Science*, doi:10.1126/science.aaf4039
- [9] The LIGO Scientific collaboration and the VIRGO collaboration, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger," *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016)
- [10] Kinugawa *et al.*, "Possible indirect confirmation of the existence of Pop III massive stars by gravitational waves," *MNRAS* 442, 2963–2992 (2014)
- [11] The LIGO Scientific collaboration and the VIRGO collaboration, "GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence," *Phys. Rev. Lett.* 116, 241103 (2016)
- [12] The LIGO Scientific collaboration and the VIRGO collaboration, "Tests of General Relativity with GW150914," *Phys. Rev. Lett.* 116, 221101 (2016)
- [13] <http://www.et-gw.eu/>
- [14] Aso *et al.*, "Interferometer Design of KAGRA Gravitational Wave Detector," *Phys. Rev. D.* 88, 043007 (2013)
- [15] Antares Collaboration, IceCube Collaboration, LIGO Scientific Collaboration, and Virgo Collaboration, "High-energy neutrino follow-up search of gravitational wave event GW150914 with ANTARES and IceCube," *Phys. Rev. D* 93, 122010 (2016)
- [16] V. Connaughton *et al.*, "Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914," arXiv:1602.03920
- [17] A Loeb, "Electromagnetic Counterparts to Black Hole Mergers Detected by LIGO," *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 819, Number 2