

初観測された連星中性子星合体からの重力波

新井 宏二 (カリフォルニア工科大学 LIGO プロジェクト karai@caltech.edu)

LIGO-Virgo collaboration の3台のレーザー干渉計からなる重力波検出器ネットワークは、2017年8月に史上初めて連星中性子星の合体で発生した重力波を検出した。重力波により波源の方向が限定され、各種波長での電磁波対応天体の観測がなされた。重力波と電磁波の観測によるマルチメッセンジャー天文学が遂に現実のものとなった。

1. はじめに

2015年にAdvanced LIGO 検出器が観測した重力波 GW150914¹⁾は、史上初の重力波直接検出というだけでなく、一般相対性理論の強重力場での正しさの検証、重力波の伝播・検出といった物理過程の確認、連星ブラックホール (BBH) 合体の初観測とブラックホールの存在の初めての直接確認、既存の観測を越える $\sim 30M_{\odot}$ (太陽質量) の恒星質量ブラックホールの発見など、物理学・天文学に多くの進展をもたらした。LIGO-Virgo Collaboration (LVC) では第1次・第2次観測 (O1・O2) で、BBH 合体の検出例を着実に重ね、これまでに合計5例を公表している。¹⁻⁵⁾

重力波初検出に貢献した Weiss, Barish, Thorne 三氏への2017年ノーベル物理学賞授与の発表から2週間、まだその余韻がさめやらぬ中、LVCは連星中性子星 (BNS) 合体からの重力波の初検出を発表した。⁶⁾ このイベント GW170817では、3台の重力波検出器により波源の方向がこれまでよりも限定されたこと、またごく弱いショートガンマ線バースト (sGRB) がほぼ同時刻に検出されたことから、全世界の多数の望遠鏡が追観測に参加し、確認された電磁波対応天体の多波長観測が行われた。重力波を起点としたマルチメッセンジャー天文学が幕を開けた瞬間である。

本稿ではLIGOにて検出器開発に携わる者の視点で、このBNS 合体の重力波検出の経緯などを解説する。

2. 重力波とレーザー干渉計重力波検出器

重力波は時空の歪みの波が光速で伝播する現象である。一般相対性理論では、質量の存在が時空を歪め、これが重力の源となると考える。1916年、アインシュタインは、線形化したアインシュタイン方程式の波動解として重力波が導出されることを示した。重力波は重力場 (正確には質量の四重極モーメント) が時間的に変動することで放出される。しかし、その効果は極めて小さく、観測可能な振幅の重力波を人工的に発生させることはできないため、実質的な波源として天文現象のみが想定された。一方で重力波は遮蔽・吸収されず、波源の情報をそのまま伝達することができるため、高密度天体の運動や合体・大質量星の重力崩壊・宇宙最初期の様子など、重力波でしか見えない宇宙を直接観測する新しい手段として期待された。

重力波検出の実験的研究は1960年代にWeberによる先駆的な共鳴型アンテナから始まり、現在は広帯域で高感度を得られるレーザー干渉計を用いるのが主流である。レーザー干渉計重力波検出器は図1のようなマイケルソン干渉計を基本としている。レーザー光源からの光をビームスプリッターで直角方向に分け、それぞれを腕に配置されたファブリ・ペロー共振器に入射する。腕からの反射光をビームスプリッターで再結合し干渉させることで、両腕の反射光の位相差を光強度変動に変換、それを出力ポートに置かれた光検出器で読み取る。干渉計が重力波に感度を持つためには、腕を構成する4枚の鏡が自由落下している (自由質点である) 必要がある。地上検出器では鏡を振り子状に吊ることで、水平方向かつ振り子の共振周波数以上に限り自由落下条件を実現している。

重力波は横波であり、進行方向と直交する2方向の空間を差動で伸縮しながら、光速で伝播する。つまり、干渉計に最適方向 (天頂または直下) から、最適偏極 (腕方向に偏極) した重力波が到来したとすると、一方の腕が伸びた時はもう片腕が縮む、といった腕光路長の差動変動を生じる。マイケルソン干渉計はこのような差動変動のみに感度を持つ性質があるため、重力波の検出に適している。また、この変動による光の位相変化は基本的には干渉計の腕基線長 L に比例する^{*1} ため、腕が長い方が検出には有利

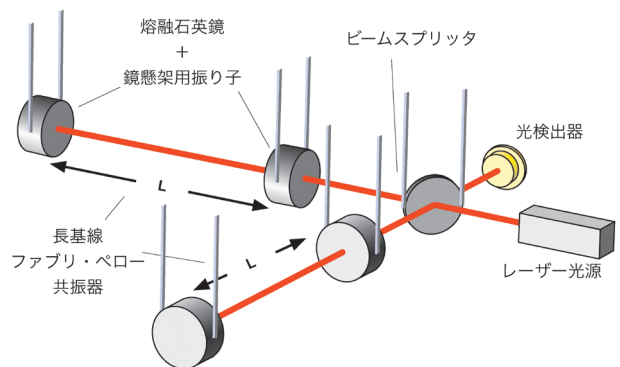


図1 レーザー干渉計重力波検出器の概念図。マイケルソン干渉計の両腕が長基線のファブリ・ペロー共振器になっている。

*1 (干渉計の基線長) $L \ll$ (重力波の波長) λ_{GW} の条件下で成り立つ。

である。とはいえ、建設予算とのバランスから、主要検出器の基線長は数kmとなっている。検出器の感度には若干の方向・偏極依存性があるが、それをもって単独で重力波源の位置が特定できるほどではなく、重力波だけで波源の方向を限定するには実質上3台以上の検出器が必要となる。

レーザー干渉計検出器の検討は70年代から始まり、各国で大型検出器の計画が提案された。米国ではLIGO計画が米国国立科学財団により承認され、1994年より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で基線長4kmの検出器の建設が始まった。初期構成での観測運転の後、5年にわたる改良工事を行い、性能を大幅に向上させたAdvanced LIGO検出器⁷⁾の稼働を2015年に開始した。冒頭で述べた通り、その直後から相次いでBBH合体の重力波を検出している。フランスとイタリアの合同計画Virgoも同様に1996年からイタリア・ピサ近郊での基線長3kmの検出器建設を開始し、LIGOとの合同観測を行った後、2011年からAdvanced Virgo⁸⁾への換装を行っていた。

3. BNS合体からの重力波検出と追観測

Advanced LIGOは2015～2016年のO1観測終了後、感度改善のための開発期間を経て、2016年11月30日から2017年8月25日までの予定でO2観測を行っていた。感度の改善を急ピッチで進めていたAdvanced Virgoも待望の稼働状態に入り、8月1日から滑り込みでO2に合流した。これにより3台が同時稼働する体制が初めて確立された。

BNS合体の検出は2017年8月17日12時41分04秒(UTC)に起こった。この時、3台の干渉計とも稼働状態かつ観測モードに入っており、出力信号にBNS合体に極めて良く合致する波形が含まれていることが、即時解析により関係者に通報された。BBHやBNSなどのコンパクト連星の合体の場合、相対論計算をもとに重力波波形が精度良く計算できる。この「波形テンプレート」を連星の質量などのパラメータを取り洩らしの無いようにずらしながら多数用意し、それぞれの予測波形と検出器信号の間の相関を取ることで、雑音の中に上乗せされている微弱な重力波信号の存在を調べることができるのである。

実はGW170817では多少変則的な手続きを取ることになった。最初に重力波の到来をトリガーしたのはハンフォード検出器のみであった。確かにリビングストン検出器のデータにも同様の信号が明確に現れていたが、合体時刻の約0.6秒前に検出器に起因して時折見られる0.2秒ほどの短いバースト雑音(グリッチ)が混入していたのである。幸いにも、BNSの信号が非常に強かったこと、BNS合体信号の長さ(~100秒)にくらべグリッチが極めて短かったこと、グリッチが合体時刻をはずしていたことから、汚染された時刻のデータを窓関数で排除(後にウェーブレット解析で差し引き)し、有効なデータとして利用することができた。Advanced Virgoについてはネットワーク接続の問題で当初はデータ共有が滞っていたが、BNS合体

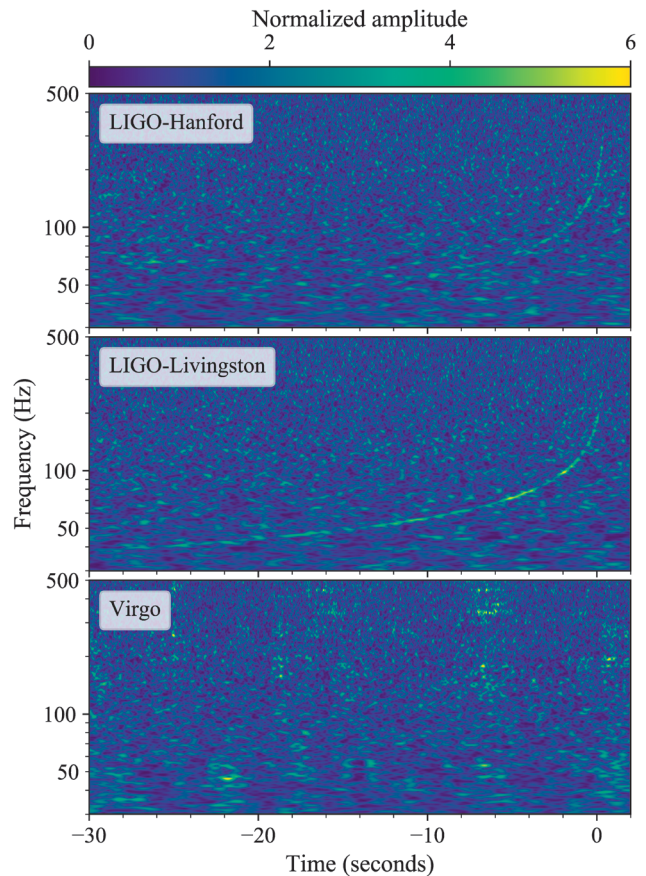


図2 LIGOハンフォード(上)・LIGOリビングストン(中)・Virgo(下)の各干渉計のGW170817到達時刻付近の出力信号のスペクトログラム(文献6より)。信号振幅は各周波数の雑音パワーで規格化されている。LIGOの2台には時間とともに周波数が増大する「チャープ信号」が見えたが、Virgoには顕著な信号が見えなかった。このことが波源の位置推定において大きな意味を持っていた。図ではリビングストン干渉計の出力に現れたグリッチ雑音は除去済。

イベントの重要性から急遽データファイルが手動で取り寄せられ、解析に掛けられた。

解析結果で注目すべき点は、Virgoのデータに現れたBNS合体信号が極めて弱かった点である(図2)。Virgo検出器は3台中最も雑音が大きく、信号の明瞭度の違いが出るのは当然ではある。とはいえ、雑音レベルだけで言えばSN比はハンフォードの半分程度のはずだった。実際にはVirgoのSN比は2.0で、ハンフォードの18.8に比べ1/10しかなかった。3日前の8月14日には初の連星ブラックホール合体の3台同時検出も果たしているから、⁵⁾3検出器の整合性は確認済である。つまりこの状況が示唆したのは、Virgo検出器にとって最も不利な方面から重力波が来たということである。3つの信号を総合して解析した結果、統計的に有力な波源の範囲として天空上の約30平方度の領域が得られ、重力波到来から約5時間後に電磁波他による追観測のために共有された(図3)。

さらにこの重力波の解析とは全く独立に、フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡に搭載されたガンマ線バーストモニタ(GBM)検出器がsGRB(GRB170817A)を重力波到来の1.7秒後に捉えていた。追ってINTEGRAL衛星も同時刻の

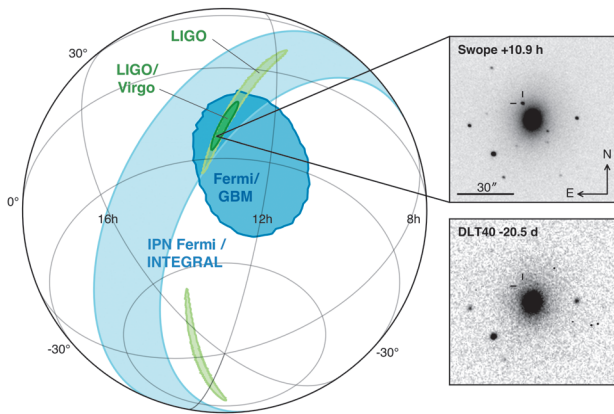


図3 重力波源の位置推定範囲の比較 (文献10より). 3台の検出器で波源の位置を推定すると (図中 LIGO/Virgo), LIGO2台のみの場合 (図中 LIGO) よりも大幅に精度が改善した. フェルミ衛星のGBM検出器や, フェルミ衛星と INTEGRAL 衛星によるガンマ線バースト三角測量による波源の推定範囲 (それぞれ図中 Fermi/GBM と IPN Fermi/INTEGRAL) は, 3台の重力波検出器による推定範囲を矛盾無く包含していた. 挿入図は SWOPE 望遠鏡 (上, BNS 合体後) と DLT40 サーベイ (下, BNS 合体後) による NGC4993 銀河の光学観測画像.

sGRB 検出を報告した. sGRB から推定された波源の範囲は, 重力波で推定された波源の範囲を包含しており, 電磁波でも見える重力波源として「真剣度の違う」⁹⁾ 追観測のキャンペーンが繰り広げられた. 世界各国の地上および衛星上の望遠鏡が重力波で限定された領域へと向けられ, その数は最終的には70を超えたとされている. GW170817 が南天に位置したことや発生時刻から, 南半球の望遠鏡が一番乗りには有利となった. 合体検出から約11時間後, チリのラス・カンパナス天文台の SWOPE 望遠鏡がうみへび座の銀河 NGC4993 に残光を発見した (図3) のを皮切りに, 他の天文台でも可視光, 赤外線, 紫外線, X線, 電波といった各波長で同天体の残光を観測した.¹⁰⁾ NGC4993 は地球から約40 Mpc の距離にある楕円またはレンズ状銀河で, この値は重力波から推定された GW170817 の距離 40^{+8}_{-14} Mpc ととも一致した.

これらの観測結果については BNS 合体検出の記者発表と同時に公表されることになったが, もはや成果は LVC 単独のものではなく, 追観測サイドからの速報性へのプレッシャーが強くなっていった. BBH 初検出の際には5ヶ月近くかけた発表に至るプロセスを, 今回は2ヶ月で消化しなければならなかった. LVC の論文でも著者が1,100人以上, マルチメッセンジャー観測の論文は多数のプロジェクトからの3,600人を超える著者が名を連ねる. 論文執筆を取り仕切った委員の苦勞が忍ばれる. コンパニオン論文によっては, 各国の著者で24時間シフトを敷いて仕上げたとも聞いた. その甲斐もあり, 記者発表と同時公開になった論文は, Phys. Rev. Lett. に大元の検出論文1本, Nature系が8本, Scienceが8本, ApJL (Astrophys. J. Lett.) が23本, PASJ (Publ. Astron. Soc. Jpn.) が2本と, 主要誌が関係論文・記事で埋まった. 発表日に“GW170817”を含むプレプリントを arXiv サーバーで検索したところ64本

があがっていた.^{*2} どれだけ分野が興奮に包まれたかが想像いただけるかと思う. 重力波初検出に続いて科学史に残る発見を目の当たりにして, 私自身も震えを覚えた.

4. GW170817 がもたらしたもの

GW170817 は重力波検出器にとっては待ちわびた BNS 合体の検出であった. もともと BNS 合体は地上レーザー干渉計検出器の重力波源の最有力候補であった. ハルスとテイラーが発見した連星パルサーで重力波放射が証明され, その後も複数の連星パルサーの発見があったこと, 波形が精度良く予測できることから, BNS 合体はもっとも確実性の高い波源と考えられていた. BBH 合体の頻度は LIGO での検出以前は観測的に不明であったため, 過度に期待できなかったという事情もある. 今回の検出を受け BNS 合体の推定頻度は, 何桁もの幅があった連星パルサーの分布に基づくこれまでの値から飛躍的に改善された.⁶⁾

天文学上でも新天体の初観測であっただけでなく, 待ち望まれた BNS 合体の検出であった. かねてより BNS 合体を sGRB の起源とする説が提唱されており, 今回の重力波とガンマ線の同時観測が, それを確認する形となった. GRB170817A はこれまでで最も近い距離の sGRB であったが, 検出されたガンマ線は極めて弱く, その機構は検出例を重ねて解明していく必要がある. BNS 合体の瞬間には中性子星を構成していた高密度物質の一部が周囲に撒き散らされ, r過程と呼ばれる重元素合成を起こすと予想されていた. 今回, 合成された元素の放射性崩壊熱による電磁波放射 (キロノバ) が観測された. これにより BNS 合体・sGRB・キロノバでの金・白金などの重元素合成という「点」が一連の観測による「線」で繋がった. ただし, 常にこの関連が成り立つのかなど, 不明な点もまだある.

BNS 合体の重力波波形からは, 波源の情報が抽出できる. 初期のチャープ波形から直接得られる「チャープ質量」^{*3} は $M = 1.188^{+0.004}_{-0.001} M_{\odot}$ と高精度で決定された. 一方, 合体直前の波形から得られる連星の質量比には0.4~1と大きな不定性があり, 連星の各質量の推定精度向上のためには, 今後の観測での改善が必要である. 波源までの距離は重力波のルミノシティから40 Mpc と推定され, これまで検出した重力波源の中で最も近かった. そのため, SN比 (3検出器合成) は32.4, 誤検出確率は100万年に1回とこれまでで最良であった. 合体直前の波形から得られる中性子星の半径や潮汐効果の様子により, 高密度物質の状態方程式に対する部分的な制限が得られた. 合体の結果としてどのような天体が生成されたのかは, 重力波の観測だけでははっきりしなかった.

GW170817 は同一の現象を電磁波・重力波の両方で観測した初めてのケースであり, 重力波とガンマ線の到達時間の違いから重力波と光の速度差に強い制限が与えられ

*2 本稿執筆中である発表5ヶ月後では186本になっていた.

*3 連星の質量を m_1, m_2 とし, $M \equiv (m_1 m_2)^{3/5} (m_1 + m_2)^{-1/5}$.

た.¹¹⁾ 重力波と光が同じ速度であると予想する一般相対性理論は、またひとつ実験的検証をクリアしたことになる。また光学的に測定された銀河の後退速度と重力波で得られた銀河の距離を用いて、これまでの方法とは独立なハッブル定数の測定 $H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0} \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ も得られた。¹²⁾

5. Advanced LIGO の今後

現在 Advanced LIGO では次期観測 O3 に向け、様々な感度改善作業を行っている。その中で特筆すべきものは、散射雑音への対策である。散射雑音はレーザー干渉計の原理的な雑音で、検出光子数の量子統計に起因している。中性子星はブラックホールに比べると質量が小さいため重力波振幅は小さくなるが、半径が小さい分チャープ信号の終端周波数が数 100 Hz 帯まで届く。この周波数帯では散射雑音が支配的であるので、今回のアップデートで BNS への感度がさらに改善されることが期待できる。

散射雑音の低減には干渉計への入射光量の増大が有効手段である。現在、レーザー光源の出力を 35 W から 70 W に倍増する作業を行っているが、鏡の光吸収による熱レンズ効果や変形も増加するので、干渉効率の劣化が予想される。そこで、これを熱アクチュエータで補償するシステムのさらなる調整が必要となる。また、光の輻射圧が鏡に及ぼす影響の増大が、鏡の内部共振モードや回転モードの正帰還不安定性を生じるが、受動ダンパを取り付けたり能動制御を実装することで問題に対処する。

干渉計の出力ポートからスクイズド真空場を注入することで、干渉計内の光量を増やさずに散射雑音を低減できる。この手法はプロトタイプ干渉計¹³⁾や初期の LIGO ハンフォード検出器¹⁴⁾で成功裏に試験されたほか、独英の重力波検出器 GEO600 では長期的に運用されている。^{15,16)} 現在、Advanced LIGO においては真空容器中へのスクイズド光発生器の導入を行っている最中である。

この2年間で重力波研究は、LIGO の研究者達自身も驚くほどの速度でパラダイムシフトを経験した。重力波の初検出までは「絵空事」でしか無かった第3世代検出器へ向けての取り組みも活発化した。Advanced LIGO の基本構成はそのまま先進技術を取り入れて「強化」する計画¹⁷⁾は予算化の段階である。鏡を大型の低温シリコン鏡に交換する Voyager 計画や新しい大型施設を建設する Cosmic Explorer 計画¹⁸⁾など中長期の将来計画への真剣な議論も始まっている。

6. おわりに

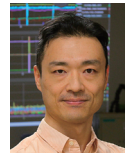
高 SN 比のイベントがタイムリーに到来した GW170817 は確かに幸運なものだったかもしれないが、BNS 合体重力波検出からマルチメッセンジャー観測に至るまでの全過程を初回で完遂できた背景には、検出器の稼働・即時データ解析・追観測体制の確立など、多くの研究者・技術者の周到な準備の結実があった。

重力波を起点とするマルチメッセンジャー観測のこれからの展開は、当然ながら重力波検出器の進歩に依拠している。今後も検出器感度の継続的な改善と、より多くの干渉計による重力波検出器ネットワークの構築に尽力し、既存の重力波源の精密な理解と、未検出の波源や未知の波源からの重力波探索に挑戦し続けていきたい。

参考文献

- 1) B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 131103 (2016).
- 2) B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 241103 (2016).
- 3) B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 221101 (2017).
- 4) B. P. Abbott et al., Astrophys. J. Lett. **851**, L35 (2017).
- 5) B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 141101 (2017).
- 6) B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 161101 (2017).
- 7) J. Aasi et al., Class. Quantum Grav. **32**, 074001 (2015).
- 8) F. Acernese et al., Class. Quantum Grav. **32**, 024001 (2015).
- 9) 永山貴弘, 成果発表記者会見 (東京大学) 2017年10月17日.
- 10) B. P. Abbott et al., Astrophys. J. Lett. **848**, L12 (2017).
- 11) B. P. Abbott et al., Astrophys. J. Lett. **848**, L13 (2017).
- 12) B. P. Abbott et al., Nature **551**, 85 (2017).
- 13) K. Goda et al., Nat. Phys. **4**, 472 (2008).
- 14) J. Aasi et al., Nat. Photon. **7**, 613 (2013).
- 15) J. Abadie et al., Nat. Phys. **7**, 962 (2011).
- 16) H. Grote et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 181101 (2013).
- 17) J. Miller et al., Phys. Rev. D **91**, 062005 (2015).
- 18) B. P. Abbott et al., Class. Quantum Grav. **34**, 044001 (2017).

著者紹介



新井宏二氏：カリフォルニア工科大 LIGO プロジェクト。専門はレーザー干渉計型重力波検出器開発・光学精密測定。

(2018年3月20日原稿受付)

First Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Merger

Koji Arai

abstract: On August 17th, 2017, three interferometric gravitational wave detectors of LIGO-Virgo collaboration observed the first gravitational wave signal from a binary neutron star merger. The constrained sky localization of the event allowed follow-up observations of the optical counterpart by telescopes. This was the moment that multi-messenger astronomy with gravitational waves became a reality.