

重力波天文学の創成 - トンネルから見る宇宙 -

大石奈緒子

概要

2015年9月14日にアメリカの観測施設 LIGO (ライゴ) によって、世界で初めて重力波が直接検出された。重力波を放射した天体現象が、それまで予想されていた中性子星連星の合体ではなく、ブラックホール連星の合体であったこと、合体したブラックホールの質量が太陽の重さの30倍程度もあったこと、理論予想と良く合うきれいな信号が見えたこと、初検出に続いて2例目の検出も発表されたこと、などから「世紀の大発見」、「重力波天文学の幕開け」として一般社会でも広く取り上げられた。本稿前半では、初の重力波直接検出を成し遂げた LIGO について、後半では今春試験観測を行った日本の重力波検出器 KAGRA の建設状況を紹介する。

1 LIGO による重力波世界初の直接検出

アインシュタインによる一般相対性理論の予測から100年後の2015年、LIGOによって初の直接検出が達成された。初検出を達成したのは、アメリカの LIGO という観測装置である。本章では LIGO の概要、この業績で誰がノーベル賞を受けるのか、などについて述べる。

1.1 LIGO 概要

LIGO (The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory; レーザー干渉計重力波観測所) は、アメリカ本土北西部のワシントン州リッチランド近郊ハンフォード (Hanford) の**ハンフォード観測所** (北緯46度西経119度) と南東部のルイジアナ州リビングストン (Livingston) の**リビングストン観測所** (北緯31度西経91度) との2か所に、長さ4kmのL字型のレーザー干渉計をそれぞれ1台建設し、一対の重力波観測施設として運用されている。

重力波の観測装置では、施設が複数あることは重要で、装置間で coincidence をとって検出を確かなものにしたたり、信号の到達時間差から波源の到来方向を推定することができるようになる。後者の目的には、施設はできるだけ離れている方がよく、実際ハンフォードとリビングストンの2つの施設はアメリカの北西と南東に3,002 km 離れて設置されている。

ハンフォード観測所の着工は1994年後半、リビングストン観測所の着工は1995年であるから、着工から初検出まではほぼ20年かかったことになる。LIGOでは2002年の初観測 S1以降、2005年には初期の目標感度(100Hz以上のバンド幅で 10^{-21})を達成し、2010年までを **initial LIGO** (iLIGO などとも呼ばれる) として、装置の改良を挟みながら何度か観測 (S1, ..., S6; Sは Science Run の意) が行われたが、重力波は検出できなかった。

GW20150914 が検出されたのは、initial LIGO の後、5年間施設を休止し、2億ドル(約200億円)をかけた装置の改修によって感度を上げ、2015年9月から **advanced LIGO**(advLIGO, aLIGO などとも) として観測を再開しようとしていた矢先¹のことだった。

¹advanced LIGO の観測は、それまでの S (Science Run) ではなく、Observation の O が使われている。初めて重力波が検出されたのは、初回の観測 O1 が始まる前の調整期間 ER8 (Engineering Run の8回目) 中であった。



リビングストン観測所
Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab



ハンフォード観測所
Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab

この検出で分かること（重力波源の質量や距離）については、天文月報の藤本先生の解説記事 [1] などの報告もあるので、そちらを参照していただきたい。LIGO のホームページにはきれいな写真や動画、教育資料などが置かれているし [2]、データも公開 [3] されている。また、一般解説書も多数出版されている [4, 5, 6]。

重力波の振幅 10^{-21} を測る

重力波の振幅は無次元量 $h = \delta L/L$ で表され、干渉計では基線の長さ L の変化分 δL を測る。地上の干渉計の検出対象となる天体現象からの重力波の最大振幅は、 $h \sim 10^{-21}$ 程度で、LIGO の腕の長さ L は 4km である。4km の腕の長さの 10^{-21} の変化を測る、ということは、 $\delta L \sim 10^{-18}$ m オーダーで鏡の位置の変化を計測する必要がある、ということになる。 10^{-18} m については、陽子の大きさ（約 1.2×10^{-15} m）の千分の 1 などの表現も使われていた。干渉計型の検出器では、重力波による変位 δL は干渉縞の光量の変化として測定される。

10^{-21} という数字は、よく太陽と地球間の距離 $1\text{AU} \approx 1.5 \times 10^{11}\text{m}$ を水素原子 1 個分 $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ 変える、という説明がされるが、実際に太陽と地球の間くらいの距離を、光をつかって精密に測っていても、今回検出されたような重力波はうまく測れない。重力波は光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ で伝播すると考えられているので、周波数が 100Hz 程度だと波長は 3,000km くらいになるが、長い基線を光が往復している間に重力波の位相が変化してしまうからである。

改良前の LIGO(initial LIGO) の観測期間中に GW150914 イベントが起きていたら？

LIGO は 5 年にわたる大規模な装置の改良を経て、advanced LIGO として運転を再開しようとしていた時に GW150914 を検出しているが、改良前の装置 (initial LIGO) 観測中に GW150914 が起こっていたら検出できていたのだろうか？という、**十分な SNR**(Signal to Noise Ratio; 信号対雑音比, Threshold = 8 以上) **では受からなかった**、ということである。

文献 [7] の図 1 左 (図 1) に、initial LIGO と advanced LIGO の感度曲線が載っている (横軸周波数)。advanced LIGO への改修によって、initial LIGO 時から感度は 100Hz-300Hz 付近で 3~4 倍、50Hz で 30 倍に改善している。右がレッドシフト z を横軸にして、 $30M_{\odot}$ 程度のブラックホール連星が最適な方向²を向いていた場合の SNR である。S6 観測時に GW150914 が起こった場合の SNR の評価は、黒い点線で示されている threshold 8 を下回っているため、検出とはみなされなかった、ということである。参考までに初検出 GW150914 の SNR は 24、第 2 検出 GW151226 の SNR は 13、10 月のイベント候補 LVT151012 の SNR は 9.2 である。

²よく連星の軌道面上に重力波が広がっていく様子が描かれるが、実際には軌道面と垂直な方向に最も強い放射が出る。ただし放射は全方位に出るので、軌道面上に広がっていくのも間違いではない。

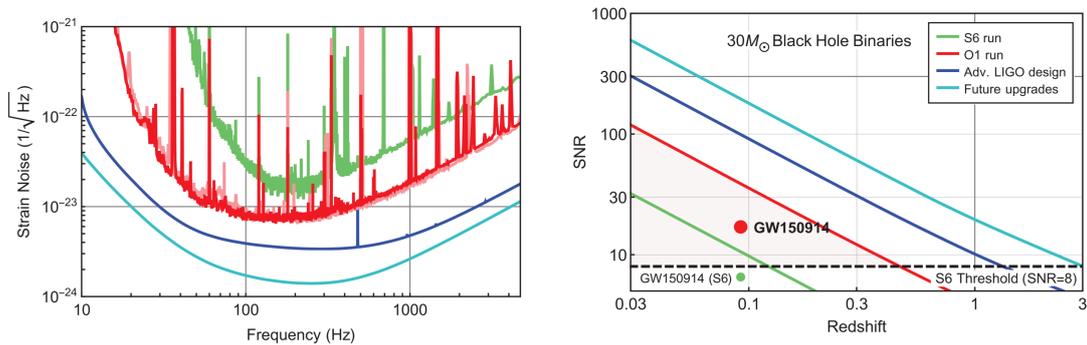


図 1: B. P. Abbott et al, Physical Review Letters **116**, 131103 (2016) より。濃い赤い線がハンフォード、薄い赤い線がリビングストンの O1 での感度、緑が initial LIGO 最後の観測 S6 の感度、濃い青が advanced LIGO のデザイン感度、水色が将来の upgrade 後の感度。advanced LIGO では、initial LIGO 時から感度は 100Hz-300Hz 付近で 3~4 倍、50Hz で 30 倍に改善している。右が赤方偏移 z を横軸にして、 $30M_{\odot}$ どうしのブラックホール連星が最適な方向を向いていた場合の SNR。S6 時に GW150914 が起きてても、SNR が 8 以下なので検出できなかった。

1.2 重力波初の直接検出によってノーベル賞を受けるのは誰か？

2016 年 5 月 2 日基礎物理学ブレークスルー特別賞 (Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics) が、LIGO の創立者である **ドレーバー** (Ronald W. P. Drever; 1931-)、**ソーン** (Kip S. Thorne; 1940-)、**ワイス** (Rainer Weiss; 1932-) の 3 名と 1,012 名の貢献者に授与する、と発表された。賞金総額 300 万ドル (約 3 億円) は、創立者 3 名で 100 万ドルを均等に、1,012 人 (論文の著者 1,005 名 + 7 名の貢献者) で 200 万ドルを均等に分かち合うという内容である。ブレークスルー賞の創設は 2012 年であるが、基礎物理学賞はこれまで梶田隆章氏や鈴木厚人氏、鈴木洋一郎氏なども受賞している。

5 月 4 日にはグルーバー賞 (Gruber Prize; 賞金額 50 万ドル)、5 月 31 日にはショウ賞 (Shaw Prize; 賞金額 100 万ドル)、6 月 2 日にはカブリ賞 (Kavli Prize; 賞金額 100 万ドル) の受賞者発表があり、いずれもドレーバー、ソーン、ワイスの 3 名が受賞している。(グルーバー賞は宇宙論部門、ショウ賞は天文学部門、カブリ賞は天体物理学部門)。

文献 [4] などに詳しいが、Wikipedia の LIGO History の項などによって LIGO の歴史から創立者 (founder) 3 人の位置付けをごく簡単にまとめると、1960 年代から 70 年代にかけて、カリフォルニア、MIT、ドイツの Garching、イギリスの Glasgow で装置の開発が進められてきた中で、80 年代前半に MIT のワイスらが大型干渉計計画の検討書をまとめ、Glasgow から Caltech に移って 40m プロトタイプ建設などの実験を進めていたドレーバー、理論家のソーン (Caltech) と協力して LIGO 計画を推進する体制を作ったことが、理論、技術、組織的に LIGO の原型を築いたとして評価されている。

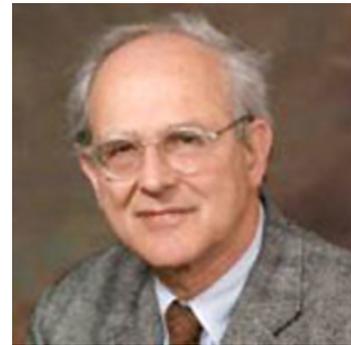
初検出論文 [8] では、ワイスの干渉計型検出器の動作や雑音の評価 [9] とドレーバーによるその改良構想 [10] が取り上げられており、それらの業績が以後の LIGO [11] や Virgo, GEO といった長基線、広帯域、そして高感度の干渉計の建設提案に結実した、としている。MIT がまとめた大型計画の検討書は 1983 年に NSF に提出され (予算 1 億ドル弱)、ソーン、ドレーバー、ワイスがプレゼンを行い、ほどなく LIGO という名もついた。その後ドレーバー、ソーン、ワイスは 3 人で LIGO 運営委員会を形成していたが、84 年、85 年と資金を得ることができず、運営委員会は



Ronald W. P. Drever



Kip S. Thorne



Rainer Weiss

解散し、1987年にリーダーは Caltech の Vogt となった。しかしその後の進展もはかばかしくなく、1994年に、Vogt に代わって Barry Barish がリーダー (laboratry director) となった。Barish は LIGO 計画を刷新して、LIGO を initial LIGO と advanced LIGO の段階に分け、徐々に感度を上げるように提案した³。この計画は NSF のサポートを得、Barish は **PI**(Principal Investigator) になった。こうして1994年に、3億9千5百万ドル (約400億円) の資金をもって LIGO は NSF 史上最大のプロジェクトとなった。

ノーベル賞 (Nobel Prize) は1901年創設の歴史ある賞だが、毎年9月に推薦依頼状が送られ、翌年の1月31日到着分で当年の推薦が締め切られる。重力波の直接検出については、公式発表が2月11日だったことから、一部では (推薦締め切り後なので) 2016年の受賞はないという話もあった。ちなみにノーベル賞の賞金額は現在800万クローネ (約1億円) である。来年の受賞に期待したい。

1.3 重力波の間接証明と直接証明

重力波初の「直接」検出を成し遂げた LIGO は、検討書の提出から30年以上、着工からも20年以上にわたる歳月と、総額6億2千万ドルを超える資金、さらに1,000名を超える研究者が関わって (初検出は LIGO-Virgo collaboration の成果として発表されている) 建設されたものである。

重力波存在の間接証明にもなった連星中性子星 (PSR1913+16) の発見 (1993年ノーベル賞) が、アレシボの電波望遠鏡を利用して行われ、1974年夏に観測をして翌年の1月に著者数2名 (ハルス、テイラー) の論文が発表され、以降の関連する論文の著者数も数名程度である [13] ことと比べると、研究の性格の相違が感じられる。

1.4 重力波天文学の幕開け：今後の電磁波観測に期待！

2015年9月に始まり、2016年1月に終了した advanced LIGO 第1期観測 (O1) 期間中には、2例の重力波と1例の候補イベントが検出されているが、これらは全てブラックホール連星の合体であった。検出が一回のみではなく、複数例が検出されたことは、今後も重力波の検出が一定の頻度

³detection of gravitational waves with **initial** LIGO would be possible, and with **advanced** LIGO would be probable

で続くことを期待させるに十分で、O1は「重力波天文学の幕開け」に相応しい観測だったと言える。今後の観測でブラックホールの検出例が増えれば、他の観測手段では難しいブラックホールの性質を観測的に調べることができるし、また予定通り装置の感度が上がってくれば、中性子星連星や中性子星とブラックホール連星の合体などが検出される可能性もあり、これらの天体現象からは電磁波の放射が観測される可能性がある。

電磁波フォローアップ観測

LIGOのO1からは、重力波の候補イベントが検出されると、MoUを結んだ電磁波などの観測者にprivate GCNネットワークをつかってアラートが送られる仕組みが準備されており、日本ではJ-GEM(代表:吉田道利氏)などがMoUを結んで観測を行っていた。O1期間中の重力波イベントはブラックホール連星の合体だったので、付随する電磁波の放射は期待できなかったが、実際には世界中の多くの観測施設がフォローアップ観測を行った[14]。

LIGOは装置の改良や調整などを経て今年の12月から第二期観測O2Aを始めている。年末年始の休みを挟んで来年3月に予定されているER11の前までを第二期観測前半とし、ER11後はO2BとしてVirgoも観測に加わる予定になっている。装置の感度にもよるが、Virgoが観測ネットワークに参加すれば、現在数百から千平方度と非常に広範な重力波源の到来方向の推定範囲が、1桁以上狭くなると期待できる。重力波と電磁波双方による波源の同定はやはり重要で、次は中性子星を含む連星合体の観測と電磁波観測による同定が楽しみである。

advanced LIGOの目標感度は、図1にも引用したが第一期観測時より3倍程度良いところにある。重力波の振幅は近傍では距離 r に反比例するので、感度が3倍になれば、観測できる宇宙の体積は r^3 すなわち27倍になる。4か月で2例の検出頻度が約30倍になれば、毎日のように重力波が検出されるようになると考えられる。それもそう遠い将来の話ではないだろう。

2 トンネルから見る宇宙

宇宙を観測するために地下に降りるといのは別におかしな話ではない。特に岐阜県飛騨市神岡町では、二度のノーベル賞受賞を達成したニュートリノの検出器は池ノ山地下約1,000mに設置されているし、重力波もその透過力の高さから、検出器を地下に置いたところで信号の検出に支障はない。地上では信号の検出を邪魔する雑音が地下では弱まるので、相対的に微弱な宇宙からの信号を検出しやすくなるくらいである。そのため、日本の重力波望遠鏡は神岡の地下200m~500mに建設されることになった。これは同規模の他計画にはない特徴であり、もう一つの鏡を低温に冷やすことと合わせて日本の大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)の特徴になっている。



TAMA300(国立天文台)



KAGRA(宇宙線研究所)

2.1 国内の重力波実験の歴史

日本の重力波実験分野は東京大学の平川浩正氏に始まり、門下の坪野公夫氏 (東京大学理学部)、黒田和明氏 (東京大学宇宙線研究所)、藤本真克氏 (国立天文台)、鈴木敏一氏 (高エネルギー加速器研究機構) らの研究グループを拠点にして成長してきた。理論では京都大学の中村卓史氏らが大型科研費の代表を務めるなど積極的に関わっていたほか、実際の観測データの解析には大阪の神田展行氏や田越秀行氏らがプロジェクトに密接に関わってきた。光源の高出力レーザーの開発には、電通大レーザー研も協力している。

平川先生 [15] は共振型と呼ばれるアンテナを主に開発していた。国内での干渉計型検出器の開発は、1991 年 (平成 3 年) から 1994 年 (平成 6 年) にかけて重点領域研究「重力波天文学」が中村卓史氏を代表として採択され [16]、国立天文台の三鷹キャンパスに 20m、宇宙研に 100m のプロトタイプ干渉計が作られた頃から進んできた。重点領域終了後の 1995 年 (平成 7 年度) から 2001 年 (平成 13 年度) にかけては、古在由秀氏を研究代表者に「高感度レーザー干渉計を用いた「重力波天文学」の研究」として学術創成研究費約 15 億円が通って、国立天文台の三鷹キャンパスに基線長 300m の **TAMA300** が建設された。続いて平成 13 年度 (2001 年) から平成 17 年度 (2005 年) にかけて坪野公夫氏代表の特定領域研究 (A) 「重力波研究の新しい展開」に約 15 億円が交付されている。しかしこの後本命の大型計画の予算はなかなかつかず、最先端研究基盤事業 補助対象事業「大型低温重力波望遠鏡の整備」(155 億円) への予算交付が決まったのは 2010 年である。

実際にトンネルの掘削が始まったのは 2012 年度になり、2 年間で総延長 7km 以上のトンネルの掘削を完了、2014 年度に腕の 3km の真空ダクトの締結が完了した。2014 年からは、特別推進研究「極低温干渉計で挑む重力波の初観測」(研究代表者：梶田隆章) が採択されている。2014 年度から研究者や学生による装置のインストール作業が本格化し、2015 年度末の 3 月 25 日から約 1 か月間、3km の腕に光を往復させて干渉計として動作させる試験観測が行われた。

2.2 現状-春の試験観測-

今年春に行われた KARA の試験観測では、その少し前から若手を中心に学生や研究者が連日神岡に詰めかけて装置の調整などを行っていった。鏡のインストールは観測前月の 2 月まで続き、レーザー光が 3km の腕を往復して干渉縞が見えたのは当初の観測開始予定 (3 月 15 日) を数日過ぎた 3 月 18 日だった。試験観測については、天文台ニュース 8 月号などにも報告 [17] があるので、そちらを参照してほしい。

2.3 KAGRA で重力波が検出できるのはいつか？

今春、試験観測を無事に終え、必要なデータを収集した後、現在 KAGRA では来年度末の低温干渉計運転に向けた準備が進んでいる。坑内での大型装置 (防振系) のインストールや低温試験は特に数ヶ月単位の時間がかかる工程であるが、これまで多少の遅れはあるものの比較的順調に準備が進んでいる。LIGO で初検出が達成された今、KAGRA も所定の感度を達成できれば重力波が検出できることは確実である。できるだけ早く感度を上げて国際観測ネットワークに参加したい一方で、時間のかかる作業を着実に進めていくことが必要である。

参考文献

- [1] 藤本真克, 重力波検出結果の内容と意義 (概要), 天文月報 2016 年 6 月号 p. 377
- [2] LIGO の web サイト <https://www.ligo.caltech.edu>
写真やシミュレーション画像、動画を閲覧・ダウンロードすることができる。
- [3] LIGO Open Science Center <https://losc.ligo.org/events/>
- [4] ジャンナ・レヴィン著 田沢恭子・松井信彦訳 重力波は歌う
早川書房 2016 年 6 月 15 日第 1 刷発行
- [5] 安東正樹著 重力波とはなにか「時空のさざなみが拓く新たな宇宙論」
ブルーバックス 講談社 2016 年 9 月 14 日 第 1 刷発行
- [6] 川村静児著 重力波とは何か アインシュタインが奏でる宇宙からのメロディ
幻冬舎新書 2016 年 9 月 30 日 第 1 刷発行
- [7] B. P. Abbott et al., GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries, PRL **116**, 131103 (2016)
- [8] B. P. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, PRL **116**, 061102 (2016)
- [9] R. Weiss, Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna, Quarterly Report of the Research Laboratory for Electronics, MIT Report No. 105, 1972, <https://dcc.ligo.org/LIGO-P720002/public/main>.
- [10] R. W. P. Drever, in Gravitational Radiation, edited by N. Deruelle and T. Piran (North-Holland, Amsterdam, 1983), p.321.
- [11] R. W. P. Drever, F. J. Raab, K. S. Thorne, R. Vogt, and R. Weiss, Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory(LIGO) Technical Report, 1989, <https://tds.ego-gw.it/ql/?c=11247>
- [12] W. Press and K. Thorne, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **10**, 335 (1972)
- [13] R. A. Hulse and J. H. Taylor, Astrophys. J, **195**, L51 (1975)
- [14] B. P. Abbott et al., LOCALIZATION AND BROADBAND FOLLOW-UP OF THE GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT GW150914, Astrophys.J. 826 (2016) no.1, L13
- [15] 平川浩正 復刊 相対論 第 2 版 (2011 年 6 月 10 日), 共立出版
- [16] 天文月報 1991 年 4 月号 重力波天文学特集
- [17] 国立天文台ニュース 2016 年 8 月号 特集・重力波天文学の幕開け
http://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/data/nao_news_0277.pdf