重力波の解説メモ（プロ向け）[1]

GW150914
初検出とされた重力波について

2016 年 2 月 20 日

真貝寿明 [2]

1　記者発表

2016 年 2 月 12 日 0 時 30 分（米国東部時間 11 日 10 時 30 分），アメリカの重力波観測グループ LIGO のメンバーは，ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した，と発表した．記者発表の様子は，youtube[3] で見ることができる．

記者発表と同時に PRL に論文 [1] が掲載され，無料公開された．PRL ながら 16 ページ（そのうち著者名 5 ページ）．タイトルが，Detection ではなく，Observation となっている．それだけはっきりとしている，ということ．

この論文 [1] では，イベントを GW150914 と命名し，波形，BH のパラメータ，データ解析の概略などを大まかに説明している．翌日の arXiv には，この論文を含めて，12 本のプレプリントが投稿された．

2　Resources

- LIGO グループは，GW150914 に関するデータ，記者発表内容などを `https://losc.ligo.org/` にて公開している．
- 具体的には，初検出のデータは `https://losc.ligo.org/events/GW150914/` にある．このページの下の方には，論文原稿へのリンクと，合体時の波形を音に直した Audio Files がダウンロード可能である．
- LIGO グループの論文原稿などで，public になっているものは，arXiv でも入手できるが，例えば次のリンクで．
  `https://dcc.ligo.org/cgi-bin/DocDB/ListBy?days=2&maxdocs=50`

記者発表翌日に公開された一連の論文リストを表 1 に示す．

3　GW150914 の概略

- GW150914 は，September 14, 2015 at 09:50:45 UTC に，Hanford, Washington(H1) と Livingston, Louisiana(L1) の 2 台の LIGO 干渉計で 6.9ms の差で観測された．L1 の方が先だったので，南半球側から到来したと考えられる．ヨーロッパの VIRGO はまだ稼働していなかった．

[1] このメモは，重力波の本格的な解説を求める方向けのメモです．
このメモ URL：`http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/gw150914_shinkai_ver0220.pdf`
一般向けメモの URL：`http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/book/20160215gw_shinkai.pdf`

[2] しんかいひさあき．大阪工業大学情報科学部．`http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/`

[3] LIGO detects gravitational waves – announcement at press conference
`https://www.youtube.com/watch?v=aEPIwEJmZyE`

表 1: 論文一覧

arXiv	LIGO #	title	
1602.03837	P150914	Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger	PRL [1]
1602.03838	P1500237	GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries	[2]
1602.03839	P1500269	GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO	[3]
1602.03840	P1500218	Properties of the binary black hole merger GW150914	[4]
1602.03841	P1500213	Tests of general relativity with GW150914	[5]
1602.03842	P1500217	The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914	[6]
1602.03843	P1500229	Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions	[7]
1602.03844	P1500238	Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914	[8]
1602.03845	P1500248	Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914	[9]
1602.03846	P1500262	Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914	ApJL [10]
1602.03847	P1500222	GW150914: Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes	[11]
1602.03868		Swift follow-up of the Gravitational Wave source GW150914	[12]
1602.05411	P1500271	High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube	[13]
1602.03920		Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914	[14]

- LIGO は，このとき，engineering run の最終段階で，安定に稼働していた．有意なデータが検出されたことは，自動で 3 分後に，メンバーに通知され，詳細な解析が始まった．9 月 18 日から本格的な observation run が開始される予定だったが，装置の調整をせずにそのまま干渉計を稼働させたようだ．今回の報告は，9 月 12 日から 10 月 20 日のデータのうち，2 台の干渉計が安定して稼働した実質 16 日間のデータを用いたもの．

- GW150914 のデータは，35Hz から 250Hz まで周波数が上昇し，合体後，quasi-normal mode と呼ばれる BH の準固有振動を見せている．データは 0.2 秒に渡って検出されました．データの最大の振幅（処理された後の比率で，strain と言われる値）は，10^{-21} の大きさで，この時の 2 台の検出器はどちらも 10^{-23} の感度で安定に稼働していたので，signal-to-noise 比は 24 という大きな値で得られている．

- データは，重力波シグナルがあるかどうかという generic transient search と，連星合体で予測された波形と合致するかどうかという binary coalescence search の 2 つの独立した方法で検査され，

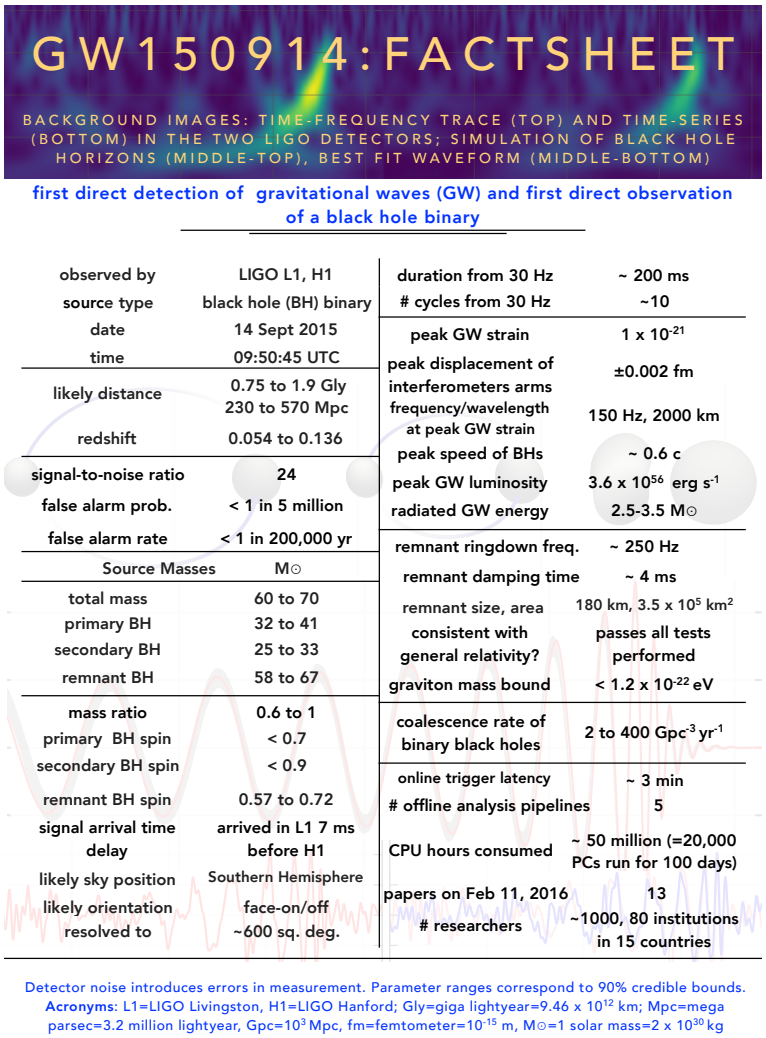

図 1: factsheet[15]

前者で 4.4σ, 後者で 5.1σ のイベントとみなされた．

- false alarm rate は，5×10^{-6}/yr．論文では 203000 年に 1 度，という表現があるが，これは 16 日間のデータを周波数で 3 つの領域に分け，0.1 秒ごとずらしながら相関を見て（10^7 回），全体を 608000 年のデータとして換算した値か（？）．

- インスパイラルと呼ばれる連星の周回軌道では，波形は chirp signal と呼ばれる特徴的な振る舞いをする．振幅を大きくしながら周波数を上げていく．この振る舞いから，連星の質量の組み合わせ値（chirp mass）が $30M_\odot$, total mass が $> 70M_\odot$ となる．この時点で中性子星連星の可能性は排除された．データは周波数 150Hz までこの chirp signal が見られたため，軌道周波数 75Hz での距離を見積もると 350km となる．中性子星-BH 連星だとすると，ここまで軌道周波数が上がる可能性がないため，この連星は BHBH と判定された．

- パラメータ推定は, Effective One-Body と呼ばれる数値的に用意された初期データを post-Newtonian

解析で時間発展させる方法を使っている．時間発展として解析する spin-aligned EOBNR と，周波数ドメインで post-Newtonian 解析する IMR-Phenom (inspiral-merger-ringdown phenomenological formalism) とよぶ波形パラメータ探査を独立して行っている．

- この重力波源は，BH 連星の合体であり，$36^{+5}_{-4}M_\odot$ と $29^{+4}_{-4}M_\odot$ の質量のものが，合体後 $62^{+4}_{-4}M_\odot$ になったと結論されている．この差の $3.0^{+0.5}_{-0.5}M_\odot$ が重力波によって，合体の瞬間にエネルギーとして飛散したことになり，ピークの光度は 3.6×10^{56} erg/s と，はるかに超新星をしのぐ．

- 重力波の振幅は距離に比例して減衰するので，距離は振幅から見積もることができる．波形の振幅の推定誤差は 10% 程度なので，30%の誤差が生じるが，距離は 410^{+160}_{-180} Mpc ($z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$) となった．距離測定には，宇宙膨張の標準モデルが考慮されている．波源の特定精度は悪く，600 平方度（全天は 41200 平方度）．

- BH のスピンの大きさは，$0.31^{+0.48}_{-0.28}$ と，$0.46^{+0.48}_{-0.42}$ のものが合体して $0.67^{+0.05}_{-0.07}$ になった，と推定される (arXiv:1602.3840)．面積増大則に合致する．

- インスパイラル時の波形から得られるパラメータモデルと，最終状態の準固有振動から得られるモデルは無矛盾．インスパイラル時の波形に対して一般相対論からのズレを検出しようとしても，一般相対論は無矛盾です．グラビトンの質量に対する制限を重力波の分散関係から議論すると，1.2×10^{-22} eV/c^2 以下となるが，これは太陽系や連星パルサーの制限よりも厳しいものの銀河団の動きや重力レンズからの制限に比べれば緩い (arXiv:1602.03841)．

- 第 2 の候補が 10 月 12 日に検出されていて，こちらも，$23^{+18}_{-5}M_\odot$ と $13^{+4}_{-5}M_\odot$ の BH 連星（合体後の質量は不明），距離は 1100^{+500}_{-500}Mpc と見積られる．ただし，データの質は悪くなかったものの (arXiv:1602.03844), 統計的な質が悪く, false alarm rate が 0.44/yr なので, 2σ 程度だったので, 重力波イベントとはみなさず, LVT151012 と名付けた（LIGO-VIRGO transient）．(arXiv:1602.03839)

- この 2 つのイベントから，BH の合体頻度を予測した論文が arXiv:1602.03842.
  GW150914 から 2–53 / Gpc^3 / yr
  LVT151012 を加えると 4–400 / Gpc^3 / yr
  conservative には，2–400/ Gpc^3 / yr
  ちなみに，これまでの見積もりは，0.1–300 / Gpc^3 / yr (Abadie et al. 2010, PRD82 102001, arXiv1005.4655)．

- Swift 衛星によるガンマ線バーストと X 線観測の追観測が 2 日後から行われたが，対応天体なし．600 平方度の波源情報では広すぎて，探査カバーできず，とのこと．(arXiv:1602.03868)．

- Icecube でのニュートリノ観測では，対応イベントなし (P1500271)．

- Fermi 衛星によるガンマ線バーストでは，対応方向に，0.4 秒後に 50keV 以上の transient source が見つかり，1s ほど続いた（arXiv:1602.03920），との報告がある．BH が波源とするなら，本当に関連しているのかは議論を呼びそうだ．

参考文献

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

http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102
http://arxiv.org/abs/1602.03837

[2] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries*
http://arxiv.org/abs/1602.03838

[3] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO*
http://arxiv.org/abs/1602.03839

[4] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Properties of the binary black hole merger GW150914*
http://arxiv.org/abs/1602.03840

[5] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Tests of general relativity with GW150914*
http://arxiv.org/abs/1602.03841

[6] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914*, submitted to ApJL
http://arxiv.org/abs/1602.03842

[7] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions*
http://arxiv.org/abs/1602.03843

[8] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914*
http://arxiv.org/abs/1602.03844

[9] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914*
http://arxiv.org/abs/1602.03845

[10] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, ApJL, 818, L22 (2016). *Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914*
http://arxiv.org/abs/1602.03846

[11] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, ApJL, 818, L22 (2016). *GW150914: Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes*
http://arxiv.org/abs/1602.03847

[12] P.A. Evans et al. *Swift follow-up of the Gravitational Wave source GW150914*
http://arxiv.org/abs/1602.03868

[13] ANTARES Collaboration, *High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube*
http://arxiv.org/abs/1602.05411

[14] V. Connaughton, et al. *Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914*
http://arxiv.org/abs/1602.03920

[15] https://losc.ligo.org/s/events/GW150914/GW150914-FactSheet-BW.pdf