

重力波検出結果の内容と意義（概要）

藤本 眞 克

〈国立天文台名誉教授〉

e-mail: fujimoto.masa-katsu@nao.ac.jp



長い間待ち望んでいた重力波検出がついに実現した。アインシュタインが重力波の存在を予言してから100年後の文字どおり「世紀の大発見」である。その内容と意義を説明する。

1. 連星ブラックホール合体からの重力波の観測

2016年2月12日0時30分（日本時間）に始まった全米科学財団主催の記者会見で、米国LIGOの研究グループを中心とする国際共同研究チームにより重力波の初観測が報告された。会見と同時に出版された学術誌から初観測の内容を見てみよう¹⁾。

観測はLIGOの2台の検出器によって行われた。米国南部のルイジアナ州にある1台の検出器が特徴的な重力波信号を受信して約7ミリ秒後にそこから3,000 km離れた北西部のワシントン州の検出器が類似の信号を捕らえた。捕らえられた信号波形は連星が重力波を放出しながら急速に接近して衝突し合体する現象に特徴的なものであった。この重力波信号は2015年9月14日に観測されたので、その現象はGW150914と呼ばれる。

図1は観測された信号に最もよく適合する重力波源のモデルと信号波形である。太陽質量の36倍と29倍のブラックホール同士の連星がらせん軌道を描きながら接近し（インスパイラルの段階）、衝突・合体（マージ）して形成された一つのブラックホールが減衰振動（リングダウン）して定常的なカー・ブラックホールになる。カー・ブラックホールの質量は太陽の62倍なので質量の差の太陽質量3個分のエネルギーが重力波として放出された。こうした過程を数値相対論で計算して、発生した重力波をワシントン州の検出器で受けた場合の信号波形が相対歪みの時間変化として示されている。重力波の周波数が0.2秒足らずで約35 Hzから約150 Hzに増加するとともに歪みが 10^{-21} の大きさまで増大する様子や、その後約250 Hzの減衰振動をする様子が見える。また、下の図にはブラックホールの間隔と相対速度の変化が、それぞれシュバルツシルト半径と光速を単位として示され、衝突時にはシュバルツシルト半径近くまで接近して相対速度も光速の60%にまで達することがわかる。

2. どうしてブラックホールとわかる？

この発見の発表後によく聞かれた質問が、どうしてブラックホール連星の合体現象だとわかるのか、距離はどうしてわかるのか、というものであった。理由を簡単に説明しよう。

物体の運動によって発生する重力波は、弱場近似したアインシュタイン方程式によって質量四重極モーメントの時間微分で表される。古典力学で記述される連星の公転運動にその「四重極公式」を適用すると、次の関係式が求まる。

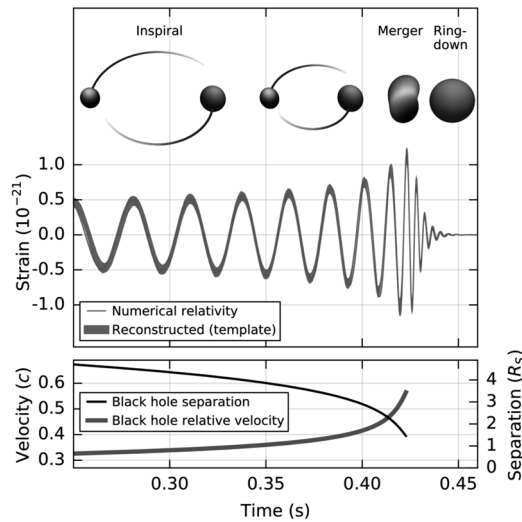


図1 GW150914の観測波形に適合する連星ブラックホール合体のプロセスと重力波の波形. 下図はブラックホール間の距離と相対速度の変化 (文献1にも同じ図が掲載されている. LIGO Open Science Center (<https://losc.ligo.org/events/GW150914/>) 提供).

$$h_+ = \frac{2G^{5/3} M_{\text{chirp}}^{5/3} (\pi f)^{2/3}}{rc^4} \cos(2\pi ft)(\cos^2 i + 1)$$

$$h_\times = \frac{2G^{5/3} M_{\text{chirp}}^{5/3} (\pi f)^{2/3}}{rc^4} \sin(2\pi ft) 2 \cos i$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{96\pi^{8/3} G^{5/3} M_{\text{chirp}}^{5/3}}{5c^5} f^{11/3}$$

$$M_{\text{chirp}} \equiv \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

h_+ , h_\times は発生源から距離 r の観測点での重力波の二つの偏波の振幅で, i は公転面と視線方向のなす角度 (軌道傾斜角), f は重力波の周波数で公転の周波数の2倍である.

この関係式から観測される重力波の周波数とその時間変化率を組み合わせると二つの星の質量だけの関数である「チャープ質量」 M_{chirp} が決まり, それを用いると観測される重力波の振幅から距離が求まる. より正確には, 偏波に対する指向性が異なる複数の検出器によって偏波成分が分離できて, 軌道傾斜角も同時に決定される.

今回観測された重力波信号に対してはチャープ質量が太陽質量の約30倍であることがわかったので, 中性子星の上限質量の観点から連星中性子星の可能性は排除された. 次に中性子星とブラックホールの連星を考えると, 一方の質量が太陽質量の2倍程度のときにチャープ質量が太陽質量の30倍になるためには他方の質量は太陽質量の1,000倍以上が必要である. その場合ブラックホールのシュバルツシルト半径は数千kmなので衝突時の周波数が低くなって, 観測された約150 Hzは説明できない. 太陽質量の数十倍の天体同士で数百kmの距離まで接近可能なものは連星ブラックホールだけであろう.

3. 重力波検出事始めから今回の検出まで

ここで重力波検出の歴史を概観すると、検出のための装置の開発が始まったのは1960年代のはじめで、米国のウェーバーにより弾性体の機械共振を使った共振型重力波検出器が開発された。ウェーバーはアルミ合金の円柱を振動子として用いて重力波による振動励起を振動子に貼り付けた圧電素子によって電気信号に変えて記録した。1,000 km離れた2カ所に設置した装置の記録から同時励起の現象を見だして、1969年に重力波検出の証拠として発表した。この発表は世界中に報道されて注目され、世界各地で追実験が実施されたが追認することはできず、1970年代の後半までにはウェーバー事象は重力波によるものではないことが通説になった。それでも彼の「発見」がきっかけになって、真剣に重力波の検出を目指す研究が始まった。今回の記者発表でも重力波検出研究のパイオニアとして彼（故人）の功績が言及されていた。LIGO計画の創始者の一人として今回の発表に同席していたMITのワイスが、マイケルソン型のレーザー干渉計を用いる重力波検出法について原理的な観点からだけでなく技術的な実現性も含めた総合的な検討を行ったのもウェーバーの発見報道がきっかけであった。

レーザー干渉計による重力波検出法は、離れた場所でそれぞれの慣性空間に静止した鏡の間の光路距離が重力波によって変動するのをレーザー光の干渉を使って精密に測る方式である。原理的には向かい合う二つの鏡の間隔変動を測定することで重力波検出は可能であるが、実際には入射レーザー光の変動などの影響を最小にするために直交する2方向の光路長の差を用いるマイケルソン型の干渉計が広く使われている。この方式による重力波検出法の原理は1960年代に提案されていたが、1970年代初頭のワイスの考察をもとに基礎開発が進められ、感度を制限する雑音源の同定や理解が進んで1980年代半ば頃にプロトタイプ干渉計で原理的な検出感度が達成された。LIGOの建設計画はそのような成果に基づいて企画提案され1990年に承認されて1994年に着工した。

同じ頃に日本では10分の1スケールでの技術実証を目指すTAMA300の建設が認められ、1999年にLIGOに先駆けて運転を始め高感度で長期安定運転を実現し、重力波検出の目的にレーザー干渉計が有効であることを実証した。2002年にLIGOが運転を開始すると、将来の国際重力波観測網形成の準備となる同時観測やデータの交換と共同解析を行った。

LIGOは2002年の初観測以降も改良を続けて2005年には設計感度に到達して観測運転を行い、通算で2年以上のデータを取得して重力波探索のデータ解析を行った。その結果は重力波の発見には至らなかったが、宇宙背景重力波のエネルギー密度やパルサーである中性子星の扁平度などについて従来よりも良い、物理的に意味のある上限値を与えた。

LIGOの干渉計の主要部分を大改造して設計感度を10倍以上改良するAdvanced LIGOの計画は、LIGOが初観測した1年後の2003年には早くも提案されており、翌年に提案が承認されて2008年から計画が開始された。2009年から2010年に一部改良した干渉計で1年以上の観測運転を行った後に、Advanced LIGOへの改造を本格化した。2015年秋には目標感度に向けての改良に相当する中間点の感度で観測運転を行うことになった。

そして、観測開始前の総合試験運転の最中にGW150914の信号を捕らえたのである。3分後には重力波信号であることがほぼ確信できるほど明確な信号波形であったために、正式な観測開始前に予定していた干渉計の調整は行わずに、同じ状態の干渉計での完全な観測データが16日分取得されるまで運転を継続した。それは類似の信号が本当の重力波なしに偶然現れる確率を十分小さく見積もれる長さの

データを得るためである。結果は同質のデータを20万年分集めてやっと1回偶然に発生するほどの確率となり、本物の重力波による信号である可能性が極めて高いと結論づけることができた。

4. 検出の意義

今回の重力波の初観測は、論文の表題にも「検出」や「証拠」といった言葉ではなく「観測」が用いられているように、単に初めての重力波検出という以上の意味をもつ快挙である。今回検出した重力波がブラックホール連星の合体によるものであったことは、これまで電波やX線観測で発見されたブラックホールの候補天体により現実味をもたせるものであるうえに、恒星質量のブラックホールが連星として存在することを初めて観測的に明らかにしたものである。さらに二つのブラックホールがシュバルツシルト半径の近くまで接近し、一つのブラックホールへと合体する様子が重力波で観測され、その重力波の波形が一般相対性理論の数値解に合致したことは、一般相対性理論が非常に強い重力場でも成り立つことが証明されたことになる。合体後のブラックホールで理論的に予想される準固有振動に対応した減衰振動らしき波形も観測されている点も、準固有振動の存在を証明して時空間自体の力学的性質を解明する可能性を開くものとして重要な成果であろう。

今回の発見は重力波観測による天文学（重力波天文学）のスタートとしても重要な意義がある。ブラックホール連星の発見それ自体が重要な天文学的成果であることは言うまでもなく、その起源についても種族III星との関連などの議論が始まっている²⁾。さらに、ブラックホールの質量や連星の軌道傾斜角、さらには距離までも重力波観測だけで独立して決定できることは天文学にとって新たな武器となりうる重要な結果である。残念ながら今回はLIGOの2台のみでの重力波観測であったため、重力波源の方向は広い範囲でしか決まらなかった。ほぼ平行に配置された2台の検出器であったために偏波の分離の精度も良くなく軌道傾斜角や距離の決定精度も悪かった。これらの改善のためには地球上に散らばったなるべく多数の検出器で構成される国際重力波観測網を作る必要がある。今後Advanced VIRGOやKAGRA, LIGO-Indiaなどが観測網に加わることで、重力波天文学が発展していくと期待される。さらに電磁波による従来の天文観測手段やニュートリノ観測との連携も、重力波発生天体を多角的に調べてその本質に迫るためには不可欠である。

5. おわりに

重力波を直接捕えようという試みが始まってから半世紀になる。ほぼ同期間にわたって重力波検出にかかわってきた者として、今回の初観測の報に接することができたことは大きな喜びである。長年追い求めてきた重力波天文学がやっと始まったことにうれしさを感じるとともに、これからの展開が楽しみである。そのためには、LIGOだけでもスタートから今回の成果まで25年以上が必要だったことを顧みて、長い目でみた周囲の理解と支援の必要性を改めて感じている。

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 061102
- 2) 田越秀行, 中村卓史, 2016, 日本物理学会誌71, 210