

重力波の直接検出とデータ解析

真貝 寿明*

ブラックホール連星や中性子連星の合体によって生じた時空の歪み（重力波）が直接検出できるようになり、物理学・天文学の業界は大きく盛り上がっている。本稿では、その意義や背景を非専門家向けに解説するとともに、実際にノイズにまみれたデータから重力波信号をどのように抽出する努力がなされているのかを概観する。まだ発展途上の分野であり、情報処理関係の方々の参入を望んでいる。

1. はじめに

2016年2月12日、アメリカの重力波検出器LIGO（ライゴ）¹のグループは、重力波の直接観測に成功したと発表した。捉えられた重力波は、多くの研究者が予想もしていなかったブラックホール連星が衝突・合体して発生したイベントだった。深夜の発表だったのにもかかわらず、12日の朝刊各紙の一面トップは「重力波検出成功」の記事であふれた。この業績で、2017年度のノーベル物理学賞が、LIGOを牽引したワイス、ソーン、バリッシュに授与された。初検出の翌年にノーベル賞が贈賞されるのは異例の速さである。2017年末までに5例のブラックホール連星合体イベントが観測され、さらに、2017年夏には中性子星連星の合体によって生じる重力波の初検出も報告された²。後者は、世界中の天文台が可視光、赤外、X線、ガンマ線観測でもフォローアップ観測に成功し、マルチ・メッセンジャー天文学の誕生といわれている。

重力波は、時空の歪みが光速で伝わる現象であり、アインシュタインの一般相対性理論から予言される物理現象である。非常に微弱な波であり、典型的な振幅は相対振幅で 10^{-21} 程度、つまり1mの長さが、 1 ± 10^{-21} m揺れ動く波である（太陽・地球間の距離に対しては水素

原子一つ分の振幅である）。重力波の存在は、アインシュタインによって100年前には予言されていたが、技術的にその直接観測は難しく、ようやく成功したことになる。

本稿では、一般相対性理論の入門的説明から、重力波観測の意義と、とくにデータ解析の観点から現状の課題などについての説明を試みる。

2. 一般相対性理論と重力波

2.1 一般相対性理論は重力の理論

まず、二つの相対性理論のレビューから始める。どちらもアインシュタインが独力で完成させた理論である。

1905年に発表された特殊相対性理論（発表当時は「相対性原理」）は、光速に近い速度で運動する物体に対する物理法則である。電磁気学の法則に陽に登場する光速の解釈として提案されたもので、「物理法則は、どの座標系から見ても同じはずだ」という原理に立つと、時間の進み方は座標系（観測者）によって異なることが導かれる。速度の大きな観測者では時間の進み方が遅くなり、その違いは光速に近づくほど顕著になる。この現象は、素粒子の寿命が運動状態によって異なることから確かめられている。また、特殊相対性理論に基づくと、エネルギーと質量の等価性（ $E=mc^2$ ）を導くことができ、原子核の安定性を議論したり、核分裂や核融合反応を説明する基盤を与える。物体の移動速度は光速（秒速約30万km）が上限であることも結論される。

一方、それから10年後に発表された一般相対性理論は、（星の質量に匹敵する以上の）質量をもつ物体に対する物理法則である。特殊相対性理論では扱わなかった加速度運動を考えるうちに、アインシュタインは、重力加速度の生じる原因を考え始め、エレベータの思考実験³から、重力の原因は時間・空間のもつ幾何学的な性質の帰結ではないか、とリーマン幾何学と格闘した。そして、重力の正体は時空（時間と空間を合わせた4次元空間）の歪み（ゆがみ）として説明する理論を提案した。時間も空間もゴム膜のように伸びたり縮んだりするものであ

* 大阪工業大学 情報科学部

Key Words: physics, astronomy, gravitational wave, time-series data analysis.

¹Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory（レーザー干渉計重力波天文台）

²重力波イベントは日付をつけてよばれ、これまでにLIGOが報告したものは、GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814, GW170817の六つである。最後の二つは、欧州のVirgoグループを含めて3台の干渉計での同時観測となった。

³自由落下するエレベータ内のような狭い空間では、地球の重力と遠心力が釣り合って無重量状態になるが、大域的に考えると重力の効果は消すことができない。アインシュタイン自身が、生涯で最大のひらめき、と称した思考実験である。

り、重い天体の周りではトランポリンのように時空が引き伸ばされ、その歪み具合に沿って物体が動いていくのだ、と説明したのである。

2.2 重力波

一般相対性理論は、ブラックホールの存在や宇宙膨張を予言したが、三つ目の大きな予言は、重力波の存在だった。ニュートンの万有引力の考え方では、どんなに遠くに離れている物体の間でも、力は一瞬で伝わることになるが、これは情報伝達の上限速度が光速であるとする特殊相対性理論と矛盾する。時空の歪みを表す式（重力場の方程式）を解析したアインシュタインは、電磁波と同じように重力も波として伝わることを発見した。時空の歪みも、水面のさざ波のように、周囲へ（この場合は立体的な球面状に）波として伝わっていくのである。これが重力波である。

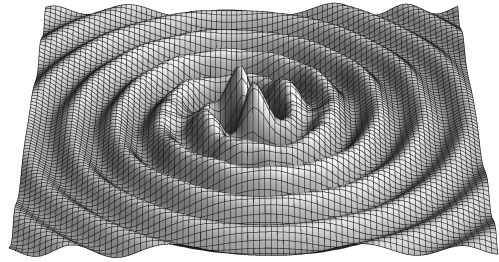
残念ながら、重力波は非常に弱い。原理的には質量のある物体が加速度運動すれば発生するのだが、太陽程度の天体が光速に匹敵するほどの速さで回転運動しないと、重力波は観測可能にはならない。しかも、波の振幅は波源からの距離に反比例するので、天体スケールのものを観測するのは非常に困難になる。ターゲットとされる天体現象は、超新星爆発やブラックホールの合体、中性子星の合体などだが、それらの発生頻度も不確かだ。

3. 重力波検出実験の歴史

3.1 初期の重力波検出実験

1960年代の終わりに、重力波を実際に観測しようと試みる物理学者が登場した。アメリカのウェーバーである。ウェーバーは、レーザーとよばれる原子共振を用いた光の発振原理（レーザー光線登場の原型となった原理）を考案した物理学者でもある。ウェーバーは、1.5トンものアルミニウムの円筒を吊るし、重力波が通過するときその形が歪むことを観測しようと試みた。今では「共振型」とよばれる原理である。そして1968年に「2台の装置で重力波を同時観測した」と報告し、世界に衝撃を与えたが、残念ながら追従したほかのどのグループも追試できず、今では幻の発見とされている。しかし、ウェーバーの誤報は、より正確に重力波を検出しようとする機運を生んだ。

1974年に、アメリカの電波天文学者ハルスとその学生だったテイラーは、偶然、連星をなす中性子星を発見した。1.4 M_{\odot} 程度（ M_{\odot} は太陽質量を表す記号）の質量をもつ二つの中性子星が9時間弱で周回するこの連星は、一般相対性理論をテストするよい実験場となった。長期間の観測から、連星同士がエネルギーを失いながらだいに近づいていく様子がわかった（イメージ図を第1図に示す）。このエネルギー損失分は、一般相対性理論の計算によって、重力波として周囲に広がっていった分と一致している。こうして、重力波が存在していることが（間接的にだが）初めて確認された。ハルスとテイラー

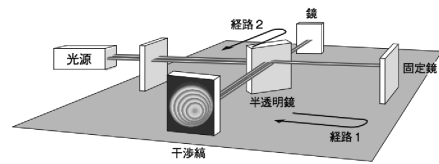


第1図 連星から放出される重力波のイメージ図。中央の二つの大きな山のところに星があり、二つの星が次第に近づいて合体するまでに、時空に歪みを引き起こす。歪みは波として周囲に伝播する。

は、1993年にノーベル物理学賞を受賞した。

3.2 レーザー干渉計による重力波検出

1980年代に入ると、レーザー干渉計を用いて広い周波数帯域での重力波検出を目指す計画が提案される（第2図）。レーザー光を二つの異なる経路で往復させ、光の干渉現象を用いて、重力波の通過による時空の伸縮を捉えようとするアイデアである。



第2図 干渉計の原理。[1]より。

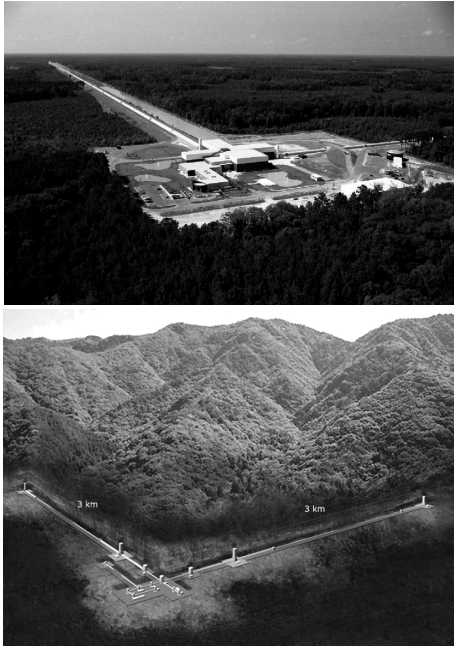
干渉計自体は19世紀末にマイケルソンが開発した装置である。当時は、光がなぜ真空中を伝播できるのかわからず、宇宙空間を満たすエーテルとよばれる仮想物質の検出が目的だった。マイケルソンの装置は、腕の長さが11mだったが、重力波の場合は、微弱な変化を相対的に検出するために、腕の長さは数kmで設計される。

重力波は、ほかの物質と相互作用が弱いために、地球があってもすり抜けて通り過ぎていく。宇宙から来る現象であっても、空を見上げる必要はない。レーザー干渉計で記録されるデータから、重力波の波形が隠れていないかの宝探しをすることになる。

微弱な重力波を検出するためには、レーザー信号に含まれるノイズとの戦いが強いられる。巨大な干渉計では強力なレーザー光が必要になるが、強力な光は量子揺らぎを発生させ、微小な測定を障害する。実験物理学者たちは、相反する技術的要請を乗り越えて、2000年代には干渉計を稼働させた。理論物理学者たちは、連星の合体現象で生じる重力波の波形予測の計算を、さまざまな難題を乗り越えて準備した。

アメリカでは、LIGO計画が始動し、一辺が4kmの腕をもつレーザー干渉計を、ワシントン州のハンフォード

(砂漠の中)と、ルイジアナ州のリビングストーン(ジャングルの中)の2箇所に設置(第3図上図)、2005年から観測を開始した。イギリスとドイツは600mの腕をもつ干渉計GEOをドイツ・ハノーバーに設置し、2005年に稼働。フランスとイタリアは3kmの腕をもつレーザー干渉計Virgo(ヴィルゴ)をイタリア・ピサに設置し、2007年に観測を開始する。日本は、これらに先立って2002年から3年間、東京・三鷹の国立天文台に300mの腕をもつ干渉計TAMAを運用した実観測を行った。



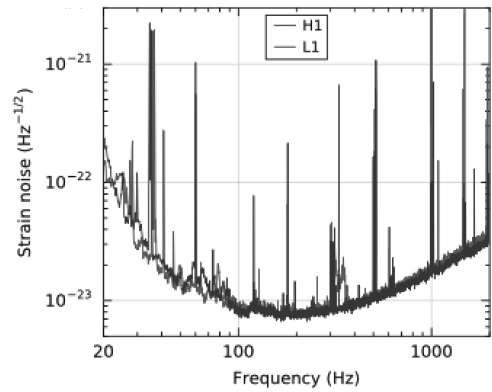
第3図 (上) アメリカ・ルイジアナ州のLIGO。(下) 岐阜県・神岡の山中に設置されたKAGRA。

しかし、(予想されていたことだが)2000年代の干渉計の能力では、どのプロジェクトも重力波を捉えることができなかつた。もっとも感度の高かつたアメリカのLIGOは、20メガパーセク(7000万光年)先の中性子星連星合体を捉える能力をもっていたが、2年以上の実観測で、一回も確かな重力波イベントを発見することができなかつた。

3.3 現在の重力波レーザー干渉計

各国は、レーザー干渉計を数年間停止し、感度を改善して、再び観測を始めた(第4図)。感度が10倍よくなると、10倍遠いところの天体からの重力波を捉えることができる。体積比で1000倍にあたるので、重力波を捉える確率も1000倍高くなる。中性子星連星やブラックホール連星が実際にいくつあるのか、そして地球に向けて強い重力波を放出する確率がどの程度なのかは不確定な要素が多いが、計画している感度が達成できれば、おそらく1年間に10個以上のイベントを発見することができるだろうと期待されている。

日本は、岐阜県・神岡の山中に、一辺が3kmの腕をも



第4図 初の重力波GW150914検出時のLIGOの2台の干渉計の感度。後述する干渉計のパワースペクトル密度 $S_h(f)$ である。この曲線より上の領域が観測可能な感度になる。低周波数側は地面振動で制限され、高周波数側は鏡の熱雑音、中間領域はレーザー光源の量子雑音がおもなノイズ源になる。[2]より。

つレーザー干渉計KAGRA(かぐら)¹を新たに建設した(第3図下図)。ニュートリノ観測でノーベル物理学賞を2度日本に導いた(2002年度小柴昌俊氏、2015年度梶田隆章氏)スーパーカミオカンデ(小柴氏の時代はカミオカンデ)に隣接する場所である。山中にトンネルを掘って造られた干渉計は、地面振動を抑えることができ、装置全体を低温に冷却することで熱雑音も抑え、第2世代LIGOと同程度の感度を得る計画である。KAGRAプロジェクトのトップは、東京大学宇宙線研究所所長を務める梶田隆章氏である。2019年度中の本格観測開始を目指して、機器のインストール作業を進めている。筆者も科学部門の委員長として、米欧との共同観測の取り決めなどに奔走している。

4. 重力波信号検出の方法

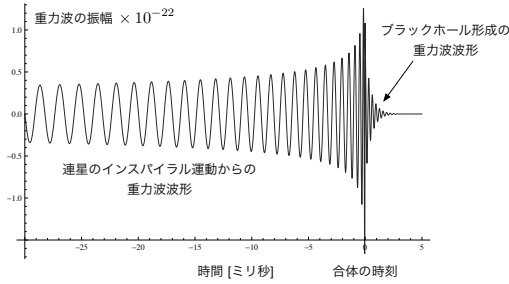
干渉計から取り出される信号は機器のノイズで満たされている。地球から非常に近いところで強い重力波が発生したならば、時系列信号から重力波の通過が目で見えてわかるかもしれないが、その可能性は非常に低い。そこで、ノイズに埋もれた信号を取り出す方法を構築しなければならない。

4.1 Matched Filter 解析

重力波の波源としてまず期待されるのは、中性子星連星やブラックホール連星の合体現象である。そこで、理論的に予想される重力波波形をあらかじめ計算しておき、それらをテンプレートとして登録して、実信号との相関を取ることが行われている。過去30年ほどの理論研究の成果として、連星の合体現象で生じる波形は、第5図のようになることがわかっている。すなわち、二つの天体はしだいに近づきながら高速回転し(インスパイラル回

¹<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>

転という), 合体する. もし合体後にブラックホールとなるならば, ブラックホールは重力波も吸い込むので重力波は(ミリ秒程度で)急速に減衰する(リングダウン, という). インスパイラル部分の波形はニュートン力学に相対論補正を施した式を準備することによって解かれ, 合体部分は重力場の方程式をシミュレーションすることによって解き, リングダウン波形は, ブラックホールの摂動方程式によって得られる.



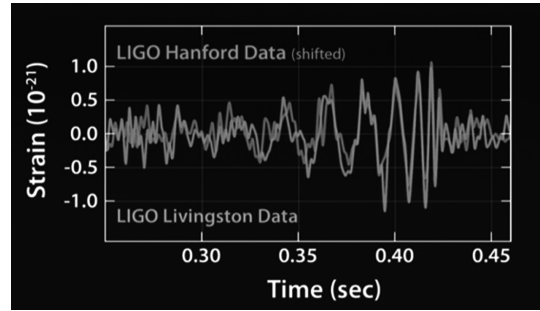
第 5 図 中性子星あるいはブラックホール連星の合体の前後で放出される重力波の波形 (予想). しだいに振幅を大きくしながら, 1kHz に近い周波数にまで上がる. 合体後にブラックホールが形成されるならば, 重力波はブラックホールに飲み込まれてしまい, 急速に減衰する. この減衰部分が観測されれば, ブラックホールを直接観測したことになる.

合体する天体の質量や自転の大きさなどさまざまなパラメータが存在するが, それらをテンプレート $h(t)$ として登録しておく. そして, 合体推定時刻や地球からの見かけの回転面の傾きをパラメータとして加え, 干渉計の信号 $s(t)$ との相関を, 信号雑音比とよばれる統計量 ρ ,

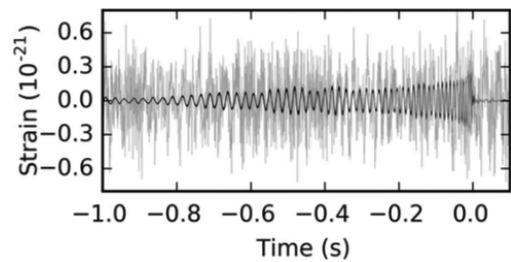
$$\rho = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{s}(f)\tilde{h}^*(f)}{S_h(|h|)} df \quad (1)$$

で判定する. ここで, $\tilde{h}(f), \tilde{s}(f)$ はそれぞれテンプレート波形 $h(t)$ と干渉計信号 $s(t)$ をフーリエ変換したもの, $S_h(|f|)$ は干渉計の感度の片側パワースペクトル密度である (第 4 図). ρ に閾値を与え, その値以上の ρ (たとえば $\rho > 8$) であれば重力波が含まれていると判断する. この方法を Matched Filter 解析という. 用意するテンプレートの数は, 波源天体の質量や自転などのパラメータに応じて用意する必要があるが, 間引いて考えるときでも ρ の変化が 3% 以内で用意することが求められ, 10^5 – 10^7 のテンプレートが必要となる. LIGO グループでは, 1000 コア程度の並列計算機を Matched Filter 解析に割り当てている.

このようにして, マッチした波形が複数台の干渉計からほぼ同時刻 (波源方向から干渉計に到達する時間差以内) に得られたならば, 重力波の検出となる. 第 6 図は初検出の GW150914 の波形として示されたもの, 第 7 図は, 実際のデータと波形を重ね合わせたものである.



第 6 図 初検出された重力波波形 (イベント GW150914). もとの信号からホワイトニングという雑音除去作業を経て得られた波形で, 二つの干渉計からの波形を 7ms ずらすときれいに重なっていることを示している. 0.2 秒間に 10 サイクルの 30Hz 付近のインスパイラル波形が見られた.

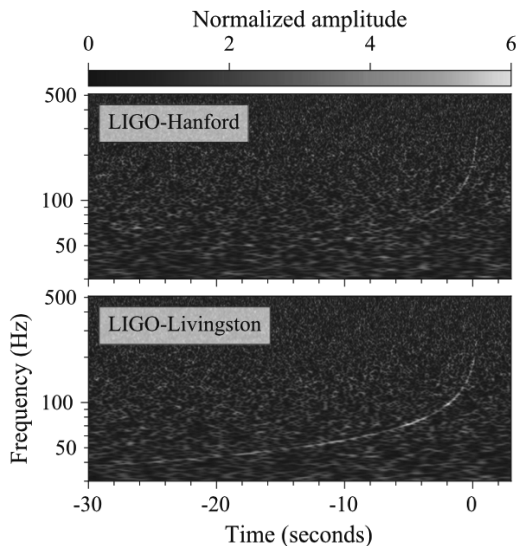


第 7 図 2 番目のイベント GW151226 の実データと読み取られた波形をもとに数値シミュレーションされた波形を重ねたもの. 宝探しであることがわかりただけかと思う. [3] より.

4.2 バースト重力波解析

Matched Filter 解析は, テンプレート波形が既知のときには有効な方法である. しかし, 超新星爆発による重力波放出や, 中性子星内部の構造相転移によるグリッチ現象によっても重力波は発生すると考えられているが, これらが生じさせる重力波波形はまだきちんと予測されていない. そこで, フーリエ変換された干渉計信号 $\tilde{s}(f)$ の中で, 短い継続時間で限られた周波数でパワースペクトルに強い偏りが見られた場合, バースト的な重力波が含まれていると判断する方法も併用されている. 干渉計は常にランダムなノイズが発生するので, 1 台の干渉計データのバースト解析だけでは (インスパイラル波形などの明らかに重力波とわかる場合を除いて) ノイズと重力波を区別できない. 2 台以上の干渉計データを重力波の到達時間差を考慮して相関解析を行ってはじめて意味のある重力波検出になる.

LIGO グループが重力波の検出をするときには, これまでのところ, coherent Wave Burst (cWB) と名付けられたバースト重力波解析パイプラインが重力波検出の第 1 報を出している. 第 8 図は, 連星中性子星合体のスペクトログラムだが, このときは 1 分弱のインスパイラル信号を捉え, 自動的に初検出のアラート情報が 6 分後に担当者へ送信された. LIGO グループは引き続き



第 8 図 連星中性子星合体 GW170817 のスペクトログラム。50 秒もの長い時間、インスパイラル波形による周波数上昇が確認された。[4] より。

gstlal¹, pycbc² とよぶ Matched Filter の解析パイプラインにより、波源天体の質量や到来方向などのおおまかな情報を自動解析する体制をもっている。これらは C/C++, Python, Matlab, ROOT などの言語で書かれている。現在のところ open source であるが、将来的には非公開になるかもしれない。

4.3 連続重力波解析

このほかにも、連続的に重力波を放出する天体の存在も考えられている。中性子星パルサーは最速 10ms 程度で回転を続けているが、星の形状が完全な球でなければ、非対称性から重力波を放出するはずである。半径 10km 程度の中性子星が cm 程度の山をもっていたとしたら、LIGO や KAGRA で観測される可能性がある。

このような連続波解析は、時系列データを細分化して Matched Filter などの解析をしたデータを蓄積し、長時間でのデータとして足し上げ、検出器が向いている方向などを加味して、天球上での同一天体からの波源であるかどうかを探索することになる。LIGO グループは、分散コンピューティングのプラットフォームである BOINC³ の技術を使って、Einstein@Home⁴ を展開して、この連続重力波解析を行っている。現時点では検出に至っていないが、既知のパルサーが出している連続重力波の上限値を与えるという意味での論文を何本か出している。

¹<https://wiki.ligo.org/DASWG/GstLAL>

²<http://pycbc.org>

³<https://boinc.berkeley.edu> 電波望遠鏡データから知的生命体探査を行う SETI@Home を端緒にして、さまざまなプロジェクトが展開されている。

⁴<http://www.einsteinathome.org>

5. 重力波観測でわかること

5.1 波源のパラメータ推定

ひとたび重力波の信号検出の可能性がわかると、より精密な解析に移行する。重力波源が連星の合体現象であるとすれば、天体の質量・自転の向きや大きさを少しずつ変えた数値シミュレーションを実施してテンプレートの精度を高め、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法などを用いてパラメータの精密推定を行っている。基本はベイズ推定になるが、その前提確率分布がいつも問題にされ、また MCMC 法には多くの計算機資源が必要となり容易ではない。個人的にはまだ改良の余地が多分に残されていると考えている。

重力波が天球上のどこから飛来したのかを知るためには、複数台の干渉計が必要になる。重力波信号通過の時刻差から重力波の到来方向を推定することができる。2017 年前半までは、LIGO グループが運用する 2 台の干渉計だけが動いていて、たとえば GW150914 の初イベントは、天球上にリングを描くような 600 平方度のどこか、という推定がされた。2017 年 8 月には欧州の Virgo が運転開始し、3 台の干渉計で 3 点測量の要領で、波源位置の推定が可能になった。はじめての連星中性子星合体を捉えた GW170817 のイベントは、検出の 4 時間後には波源推定が 30 平方度に絞られ、世界中の天文学者に追観測の動機付けを与えた。(日本のすばる望遠鏡は 8m の口径をもち、視野は 1.5 平方度である)。

5.2 中性子星連星合体とマルチ・メッセンジャー天文学

ブラックホール連星の場合は、合体後もブラックホールになるので、重力波源の方向に望遠鏡を向けても何かが見えることはなかなか期待できない。しかし、中性子星連星の合体では、高温高压での核融合現象によって、周囲の物質を加熱して光らせることが期待されていた。GW170817 では、LIGO/Virgo が合体時刻として算出した時刻の 1.7 秒後に、宇宙空間にいる Fermi 望遠鏡がガンマ線放出を捉えていた。重力波波源推定位置が世界に通知されると、世界中の 70 を超える天文台と人工衛星による望遠鏡がその方向に望遠鏡を向け、ガンマ線、X 線、可視光線、赤外線、電波などさまざまな波長での観測が同時に行われた。

その結果、波源天体は 40Mpc 先の銀河 NGC4993 であることがわかり、波源までの距離が(はじめて)特定された。そして、日ごとに減光していく様子と中性子星連星合体のシミュレーションの結果と比較することで、合体直後に原子核の r プロセス反応が予想通り起きていたこともわかった。これまで元素の周期表で鉄以上の元素が生成されるのは超新星爆発現象であると考えられていたが(超新星爆発だけでは生成量が足りないのが天文学者の間では悩みの種となっていたが)、中性子星連星の合体でも r プロセス反応が起きていることが確認され

たのである。合体直後のガンマ線の観測から合体後の爆発モデルが検証されたり、波源の距離が特定されたことと重力波と光の到達時刻の差から一般相対性理論の検証や宇宙膨張モデルの検証も始められている。

6. 重力波観測の今後

今後、重力波が多数観測されるようになれば、波源となった天体の様子（質量・回転・軌道などのパラメータの特定）だけではなく、中性子星内部の高密度物質の状態がどのようになっているのか、一般相対性理論はどこまで正しいのか、といったこれまで不可能だった物理的な問題へアプローチしていくことが可能になる。

2017年度には新学術領域研究（研究領域提案型）「重力波物理学・天文学：創世記」（領域代表は田中貴浩・京都大学）が採択された。理論宇宙物理学・データ解析・天体観測の三者が協力して新たな学問分野の推進を目指しているところである。筆者も「重力波観測を用いた重力理論の検証」の研究班に研究分担者として参画している。これまでに、一般相対性理論は、重力レンズ効果や、水星の近日点移動、中性子星連星の軌道の変化などさまざまな視点で検証され、ほかの後発の重力理論をすべて棄却して生き残ってきている。しかし、いずれもブラックホール形成には及ばない「弱い」重力場での検証だ。重力波の直接観測によって、初めて「強い」重力場での理論の検証が現実化する。第0近似では一般相対性理論が正しいのは誰でも認めることだが、量子重力理論の糸口となるような一般相対性理論のほころびが見えれば物理学が格段に進歩することになるだろう。

また、宇宙空間で重力波を観測しようとする計画も進められている。欧州宇宙機関 (ESA) は、2030年頃に、250万 km の基線長をもつレーザー干渉計を3機の人工衛星で構成する LISA 計画¹を推進している。腕の長い干渉計では、地上より周波数の低い重力波を捉えることができるため、地上での重力波検出の予報ができるほか、質量の大きなブラックホール合体からの重力波も検知できるようになる。銀河中心にある超巨大ブラックホールの起源はいまだ不明であるが、重力波観測の統計をとることによって、超巨大ブラックホールがどのように形成されていったのかも解明できることになる [5]。また、重力波は、宇宙マイクロ波背景放射が生じる以前の情報を伝えてくれるはずで、初期の宇宙の様子を解明する手がかりを与えてくれることが期待されている。

LIGO グループはつい先日、初期に取得したデータを公開した²。これまでの天文学の歴史を見ると、電波望遠鏡がパルサーとよばれる天体を発見したり、超新星爆発のデータ蓄積から宇宙の加速膨張が示されたり、と学

¹<http://sci.esa.int/lisa/>

日本も規模を小さくした宇宙空間での重力波探査 DECIGO 計画を提案している。

²<https://losc.ligo.org/start/>

問的には想定外の展開で私たちの宇宙に対する知見が広がってきた。重力波観測でも、これまでに考えられなかったような現象が発見されれば、ノーベル賞に相当する業績になるだろう。筆者は、テンプレートをかわらずに、干渉計の信号だけから有意な重力波信号を抽出する手法をいろいろとこれから試していこうと考えている。

本学会誌の読者の方で、本研究にご興味をお持ちの方には、この分野への参入を是非ともお待ちしております。人員不足で困っております。もう少し専門的なレビューとして [6,7] を挙げて本稿を閉じることにします。

(2018年5月29日受付)

参考文献

- [1] 真貝：ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の100年と展開, 光文社 (2015)
- [2] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaborations): Observation of gravitational waves from a binary black hole merger; *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 116, 061102 (2016)
- [3] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaborations): Observation of gravitational waves from a 22-Solar-Mass binary black hole coalescence; *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 116, 241103 (2016)
- [4] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaborations): Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral; *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 119, 161101 (2017)
- [5] H. Shinkai, N. Kanda and T. Ebisuzaki: Gravitational waves from merging intermediate-mass black holes. II. event rates at ground-based detectors; *Astrophys. J.*, Vol. 835, 276 (2017)
- [6] K. Cannon, 端山, 伊藤, 高橋: 重力波の初検出と情報処理技術—LIGOとKAGRAで活用されている情報処理技術—; 情報処理, Vol. 57, No. 5, p. 428 (2016)
- [7] 田越, 伊藤, 端山: 重力波の観測とデータ解析; 日本物理学会誌, Vol. 72, No. 3, p. 158 (2017)

著者略歴

しん かい ひさ あき
真 貝 寿 明



1990年早稲田大学理工学部物理学科卒業, 1995年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。早稲田大学助手, ワシントン大学(セントルイス)博士研究員, ペンシルバニア州立大学客員研究員(日本学術振興会海外特別研究員), 理化学研究所基礎科学特別研究員などを経て, 2006年大阪工業大学情報科学部助教授, 2012年同教授, 現在に至る。おもな研究分野は、一般相対性理論・宇宙論とその周辺。2017年8月よりKAGRAプロジェクトのScience Congress委員長を務める。博士(理学)。日本物理学会, 日本天文学会, 日本応用数理学会, 日本科学史学会, 米国物理学会, 英国物理学会(IoP), 国際天文学連合(IAU)各会員。