

ブラックホールと重力波

真 貝 寿 明

アインシュタインの一般相対性理論は、重力の原因を時空のゆがみとして説明する。巨大な質量が小さな領域に集中すると、時空のゆがみは大きくなり、光でさえも脱出できない領域が発生する。この領域をブラックホールという。また、質量のある物体が加速運動をすれば、時空のゆがみが波として周囲の空間に伝播する。この現象を重力波という。2015年9月、重力波を直接とらえる試みが成功し、重力波天文学がはじまった。アメリカのLIGOグループと欧州のVirgoグループは、今日まで6例の重力波イベントを報告している。そのうちの5例はブラックホール連星の合体現象である。本稿では、ブラックホールと重力波に関連した話題を概観しよう。

1. GW150914の衝撃

LIGOグループ^{*1)}が、重力波の検出に成功した、という記者発表を行ったのは、2016年2月11日（日本時間12日深夜）だった。

報告された現象は、太陽質量(M_{\odot})の29倍と36倍の($29M_{\odot}$, $36M_{\odot}$)2つのブラックホールが連星として互いを周回しながら合体し、 $62M_{\odot}$ のブラックホールとなったものだ。足し算が合わない

のは、その差の質量が重力波のエネルギーに変換された^{*2)}からである。重力波の波形は、周波数にして25Hzから300Hzに徐々に上がるもので、音にして聞くとだんだん大きくなりながら「ひゅー…ぼよっ」と聞こえる。その間、わずか0.2秒。13億年前の合体現象で生じた波が、2015年9月14日に地球を通過したことを、LIGOの干渉計2台が感知したのだ。半年かけて十分に解析されたこの現象は、GW150914と命名されて発表された。GWは「重力波」(gravitational wave)の頭文字をとったものである。

1990年代に建設をはじめ、2000年代には実質2年以上の観測を行ったLIGOは、(予想通り)感度が足りずに重力波検出には至らなかった^{*3)}。2015年は第2世代LIGO(Advanced LIGO)として感度を上げて観測開始をはじめたときであり、GW150914は実観測開始2日前の最終調整時の観測だった。2015年はアインシュタインが一般相対性理論を発表してちょうど100年の節目を迎える年であり、筆者は一般向けの新書¹⁾を9月に出版した。そこでは『運が良ければ数年以内に「ついに重力波を直接検出」というニュースが流れることになるだろう』と記したが、出版されたときにはすでに発見されていたことになった。

*1) LIGOはLaser Interferometer Gravitational Wave Observatory(レーザー干渉計重力波観測所)の頭文字で「ライゴ」と読む。ワシントン州とルイジアナ州の二箇所に一辺の長さ4kmの巨大なレーザー干渉計を建設している。

*2) 有名な $E=mc^2$ の、質量とエネルギーの等価則どおり。

*3) 日本も2002年から一辺の長さ300mのレーザー干渉計TAMAを国立天文台に建設して世界に先駆けて実観測を開始したが、(予想通り)感度が足りずに重力波検出には至らなかった

初検出された重力波は「検出に成功した」こと自体が大きなニュースだったが、我々研究者には「ブラックホール連星が本当に存在」して、しかも「太陽の数十倍という質量」であったことも驚きだった。個人的には、「想定された通りの感度で」「アインシュタインの理論通りに」「予測されたそのままの波形で」検出報告がされて感慨深かった *4)。

2. ブラックホール

ブラックホールは光でさえも脱出できないほどの強い重力をもつ天体である。太陽の数十倍の大きさをもつ恒星が燃え尽きると重力崩壊してブラックホールが形成されると考えられている。ブラックホールの存在は一般相対性理論の導く結論の一つだが、アインシュタインの存命中には観測的にも理論的にも信じられていない状況だった。「ブラックホール」という言葉はホイーラーによって1967年に使われ始めたもので、アインシュタイン(1879-1955)はその言葉を知らずに亡くなっている *5)。

ブラックホール自身は光らないので見えないが、吸い込まれていくガスが強く X 線を放ったり、吸い込まれた物体が角運動量を持て余してジェットとして吹き出されるなど、天文学的には非常に明るい天体の要因にもなっている。短い時間で X 線の明るさを激しく変動する星はブラックホールの候補天体である。はくちょう座 X-1 には、 $10M_{\odot}$ 程度のブラックホールが存在すると考えられていて、同様の天体は銀河系内に 30 個以上ある。かつてクェーサー (quasar, 準星) と呼ばれた電波源は、今では遠方の活動銀河核 (active galactic nuclei) として説明されている。すべての銀河の中心には、巨大な重力源があるはずで、超巨大ブラックホール ($10^6-10^{12}M_{\odot}$) と呼ばれている。我々の銀河系 (天の川銀河) の中心には 420 万 M_{\odot} の超巨大

ブラックホールがあることが、周囲の天体の運動からわかっている。電波望遠鏡の感度があがる数年後には、ブラックホールの黒い穴そのものが撮像されるかもしれない。

3. ブラックホール連星からの重力波

宇宙にある星の半数以上は、連星系をつくっていると考えられている。3 つ目の星が連星に近づいても、ほとんど場合は、3 つ目がはじき飛ばされ、連星間距離がより接近することがシミュレーションで示されている。

1974 年にハルスとテイラーが発見した中性子星連星は、非常にコンパクトな 2 つの天体が連星系を構成しながらその公転周期を短くしていることが確認され、その状況から重力波が放出していることが間接的に示されることになった (図 1)。ハルス・テイラーの中性子星連星はあと 3 億年経つと合体するが、同様の天体は宇宙には多数あると考えられ、理論物理学者はその波形の予測を、実験物理学者はその観測の実現を 30 年以上に渡って準備してきた。

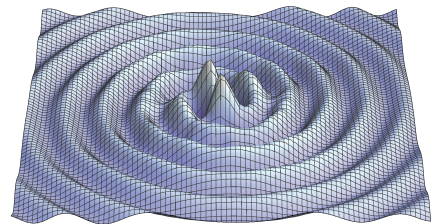


図 1 連星から放出される重力波のイメージ図。中央の 2 つの大きな山のところに星があり、2 つの星が次第に近づいて合体するまでに、時空にゆがみを引き起こす。ゆがみは波として周囲に伝播する。

連星合体の前後で得られる重力波の波形のイメージを図 2 に示す。合体前後の波形は、インスパイラル部分・合体部分・リングダウン部分の 3 つに分けられる。

*4) このコメントが新聞で『予想通りで驚いた』として紹介され、私は妻に「矛盾している」と笑われた²⁾。

*5) ブラックホールと呼ばれる以前は、「重力で完全に潰れた天体」「凍結した星」などと呼ばれていた。

インスパイラルとは、連星が重心のまわりを周回しながら重力波を放出し互いに近づいていく部分である。エネルギーを失いながら連星は距離を縮め、次第に周期が短く、振幅が大きくなる重力波を放出する。この部分の計算はニュートン力学に、相対性理論の補正を加えたポスト・ニュートン近似を用いて計算される³⁾。ニュートン力学のレベルでは、重力波の振幅 $h(t)$ は、合体時刻を t_c 、万有引力定数を G 、光速を c として、

$$h(t) = \frac{GM_c}{c^2 D (\omega(t))^{1/4}} \cos \left[-2(\omega(t))^{5/8} \right],$$

$$\omega(t) \equiv \frac{c^3(t_c - t)}{5GM_c} \quad (1)$$

として表される^{*6)}。ここで、 D は波源から地球までの距離、 M_c はチャープ質量と呼ばれる量で、連星の質量を M_1, M_2 としたときに、

$$M_c = (M_1 M_2)^{3/5} (M_1 + M_2)^{-1/5} \quad (2)$$

として与えられる。チャープ (chirp) とは鳥のさえずりを表す英語で、周波数が上がっていく様子がこの組み合わせの質量で表されることから命名された。

連星の合体部分の波形は重力の非線形効果をきちんと見積もる必要があるので、一般相対性理論の式を数値シミュレーションで解く必要がある。スーパーコンピュータを駆使し、これまでに開発されたさまざまなテクニックが要求される職人芸の研究である。

合体後に一つの大きなブラックホールが形成されるのであれば、ブラックホールが周囲の重力波を飲み込んで時空を静かにさせるために、急速な減衰振動の重力波が発生する。逆にこのような減衰する重力波 (リングダウン波) が観測されれば、ブラックホールの存在が確かめられたことになる。

リングダウンの波形は、ブラックホールの摂動論から計算することが可能である⁴⁾。ブラックホールの準固有振動 (quasi-normal mode) とも呼ばれるもので、減衰振動の形で初期時刻を t_0 として

*6) 合体時の位相、連星の傾き角、+ モードと × モードの違いなどは省いた表記である。

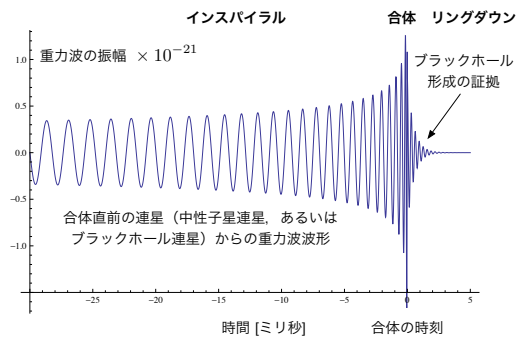


図2 中性子星あるいはブラックホール連星の合体の前後で放出される重力波の波形 (予想)。次第に振幅を大きくしながら、1kHzに近い周波数にまで上がる。合体後にブラックホールが形成されるならば、重力波はブラックホールに飲み込まれてしまい、急速に減衰する。この減衰部分が観測されれば、ブラックホールを直接観測したことになる。

$$h(t) = e^{-(t-t_0)\pi f_R/Q} \cos[2\pi f_R(t-t_0)] \quad (3)$$

と仮定できる^{*7)}。波形は、振動数 f_R と減衰率 Q の2つのパラメータによって表され、これらは、ブラックホールの質量 M と回転パラメータ a の大きさによって決まる。実際にはさまざまなモードの組み合わせの重力波になると考えられるが、もっとも強いモードでは、

$$f_R = \frac{c^3}{2\pi GM} \{1.5251 - 1.1568(1-a)^{0.1292}\}$$

$$Q = 0.7000 + 1.4187(1-a)^{-0.4990} \quad (4)$$

となる近似公式⁵⁾ が得られている。

実際の解析では、インスパイラル部分の解析計算と数値シミュレーションとを組み合わせた準解析的な波形公式を用いて、重力波の波形テンプレートを多数用意する。そして干渉計から得られた (ノイズにまみれた) データの中にそのような重力波が潜んでいるかどうかのマッチド・フィルタ解析を行い、実際に重力波の検出候補データとなれば、さらに詳しく天体の質量や回転の大きさ・傾きなどのパラメータを特定する作業に入る。上記の波形予想の計算は、一般相対性理論に基づくものだ

*7) 振幅、初期位相は省いた表記にしている。

が、将来的には一般相対性理論がどれだけ正しい理論なのかをテストする方法として、これらの波形と実データの合致度も研究テーマになってくる。

4. これまでに報告された重力波

LIGO グループは現在までに 2 回の観測期間を設け、O1 (observation 1; 2015 年 9 月 12 日から 2016 年 1 月 19 日) と O2 (2016 年 11 月 30 日から 2017 年 8 月 25 日) と命名している。Virgo グループは O2 の最後の 2 週間に観測に参加した。

これまでに表 1 に示す 6 例の重力波が観測されている。いずれも連星合体による重力波であるが、最後の GW170817 のみが中性子星連星の合体である。表には、合体前と後の質量 $M_1, M_2, M_{\text{final}}$ 、合体後のブラックホールの回転の大きさ a 、重力波データから推定される波源までの距離と波源の(天空上の)位置特定精度、および重力波と干渉計データのノイズの比(シグナル・ノイズ比)を示している。いずれも不定性の多いデータであるが、表には中央値を示している。

報告されたブラックホール連星合体は、ほとんどが、 $10M_{\odot}$ から $30M_{\odot}$ の質量のブラックホールが合体したもので、これはこれまでの X 線観測で知られていたブラックホール ($< 10M_{\odot}$) の範囲外だった。現在の重元素を多く含む星が燃え尽きた後では、 $30M_{\odot}$ 程度のブラックホールが形成される割合は極端に少ないと考えられる。したがって、このようなブラックホールができた過程として、宇宙初期の初代星(現在から数えて 3 世代前なので、Population III と呼ばれる)を想定する⁶⁾か、あるいは小さなブラックホールからの合体成長を想定する⁷⁾かの可能性が浮上した。後者のシナリオは銀河中心での超巨大ブラックホール形成にもつながるシナリオでもある。

ブラックホール連星合体によって、はじめの質量の 5% 程度が重力波のエネルギーとして宇宙空間にまき散らされることもわかってきた。ひとたびブラックホールに飲み込まれたら光を含めてすべてのものは脱出不可能である。しかし、相対性理

論での質量の定義は無限遠方で測定される量である。ここでの重力波のエネルギーは、はじめのブラックホールの近傍にあった重力エネルギーが開放されたと考えればよい。この 5% という値は、数値シミュレーションで得られる値とほぼ一致する。

重力波波源までの距離はまだ不定性が大きい。これは捕えられた重力波の振幅が、個々の天体の回転や連星軌道面の傾きなどによって大きく変化するため、まだ重力波の情報だけからこれらを定める精度がないからである。天空上の波源の位置決定精度は、Virgo が加わって 3 点測定の要領が適用できるようになって格段に良くなった。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。GW170817 の発見は世界各地の天文台に速報され、追観測された結果、波源が 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が、ブラックホール連星についてはまだ波源位置が特定されずに終わっている。波源の位置決定精度は、多数の干渉計が稼働すれば精度がよくなるもので、日本が 2019 年に観測開始を目指す KAGRA が加われば、もっと改善されることになるだろう。

シグナル・ノイズ比 (SNR) の値はおよそ 10 以上であれば、ノイズと重力波が判別できるであろうとされる指標である。これは将来的にレーザー干渉計の改良が進んでノイズが小さくなれば、同様の重力波であっても SNR は良くなり、他のパラメータの精度よい特定につながることになる。

5. 最近の話題

5.1 一般相対性理論の検証

「一般相対性理論がどれだけ正しい理論なのか」は、相対性理論が発表されて以来の 100 年越しの研究テーマである。これまで太陽系や地球近傍でさまざまなテストが行われてきており、アインシュタイン以降に発表されたさまざまな重力理論(修正重力理論, 拡張重力理論, ...)への強い制限が付けられてきた。アインシュタインの理論がもっともシンプルでもっとも正しいというのが、現在

表 1 これまでに報告された重力波 (2018 年 8 月現在). 質量欄は, 太陽質量単位で $M_1 + M_2 = M_{\text{final}} + M_{\text{GW}}$ の形式と $\Delta M \equiv M_{\text{GW}} / (M_1 + M_2)$ の値, a_{final} は合体して形成されたブラックホールの回転の大きさ (1.0 が最大回転). 距離欄はメガパーセクと赤方偏移 z , $(\Delta\theta)^2$ は波源特定精度 (平方度), SNR はシグナル・ノイズ比 (大きい方が強い重力波) を示す. SNR 以外は誤差のある数字であるが中央値のみ示している. 文献欄の PRL は Physical Review Letters 誌, ApJ は Astrophysical Journal 誌を示す.

イベント	質量 (M_{\odot})	ΔM	a_{final}	距離 (Mpc, z)	$(\Delta\theta)^2$	SNR	文献, 発表日
GW150914	36.2+29.1=62.3+3.0	4.59%	0.68	410 Mpc, 0.09	600	23.7	PRL 116, 061102 (2016/2/11)
GW151226	14.2+7.5=20.8+0.9	4.15%	0.74	440 Mpc, 0.09	850	13.0	PRL 116, 241103
GW170104	31.2+19.4=48.7+1.9	3.75%	0.64	880 Mpc, 0.18	1300	13	PRL 118, 221101
GW170608	12+7=18.0+1.0	5.2 %	0.69	340 Mpc, 0.07	520	13	ApJ 851, L35
GW170814	30.5+25.3=53.2+2.6	4.66%	0.70	540 Mpc, 0.11	60	18	PRL 119,141101
GW170817 中性子星連星	1.36~1.60 + 1.17~1.36 = 2.74 + ?	? %	-	40 Mpc, 0.01	28	32.4	PRL 119, 161101 (2017/10/16)

までの知見であるが, 重力波によるブラックホール時空の解明は, 重力理論の検証を, いよいよ強い重力場で実施できることを意味する. 決定的になるのは, リングダウン部分の重力波が一般相対性理論の予測通りかどうかの検証だろう.

現在の重力波のデータ解析の主流は, 波形をフーリエ変換し, 用意された重力波の波形テンプレートとの一致を調べる方法である. リングダウン部分は短い時間で急速に減衰するので, リングダウン部分だけを取り出して, このようなテンプレートとの照合を調べることは難しい. LIGO/Virgo グループでの解析でも, インスパイラル部分を含めて全体として良く照合する重力波が一般相対性理論と無矛盾であることを示している⁸⁾ 程度である. そこで, 我々はインスパイラル部分を独立して直接抽出する新しい方法を開発することに着手している. 重力波以外の分野で古くから知られている時系列解析の知識や, 短時間フーリエ解析の改良, あるいは機械学習を駆使した波形の抽出など, いくつかの方法を比較し, 将来的な重力理論の検証へとつなげる研究を進めている⁹⁾.

5.2 エコー

LIGO グループが公開した波形データを再解析した Abedi ら¹⁰⁾ は, 連星合体の重力波信号の後, 周期的なパルス波が存在しているのではないかと指摘している.

と指摘している. GW150914 では 0.29 秒間隔で, GW151226 では 0.10 秒間隔で 2.5σ レベルの有意さでパルス波 (「エコー」と名付けている) が見られる, という主張である (図 3). この解析はノイズを見ているだけという指摘¹¹⁾ と, この現象が一般的に見られるという主張^{12, 13)} で真っ向から対立している. 今後の観測で, 多くの重力波イベントが観測されれば, エコーの存否は判明するだろうが, 現状では不明である.

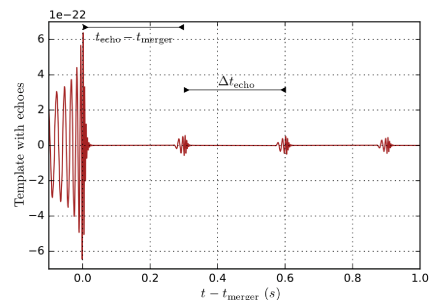


図 3 重力波のエコーのモデル図. 連星合体後, しばらく時間を置いて周期的にパルス波が観測されている可能性が指摘されている. 解析が正しいかどうかの議論と共に, さまざまなモデル化も試みられている. 図は¹⁰⁾で試みられたモデル化された波形.

エコーのモデルもさまざまである. 古典的にはブラックホールの地平面を物体が通り過ぎてても何

も生じないが、量子論の考え方を取り入れて、ブラックホール地平面内に「ぼんぼん (fuzzball)¹⁵⁾とか「防火壁 (firewall)¹⁴⁾と呼ばれる内部構造を考えるモデルとの関連を期待したり、ブラックホールとはまったく異なる性質のコンパクト天体の存在を考えたり¹⁶⁾、普通の星の振動でも発生し得るとする解析など、さまざまなモデル化が試みられている。

6. 宇宙空間での重力波観測

§2 で述べたように、銀河中心には超巨大ブラックホールが存在するが、その形成過程は謎のままである。銀河中心のブラックホールと、銀河系の構造は密接に関連していることがわかっているが、超巨大ブラックホールがトップダウン的につくられたのか（すなわちはじめから大きなブラックホールができたのか）、あるいはボトムアップ的につくられたのか（小さなブラックホールが合体成長してできたのか）という説が両立している。この問題を解決するのも重力波観測である。質量が $2000M_{\odot}$ 以上のブラックホールだと、地上に設置したレーザー干渉計では地面振動が邪魔をして観測することができない。そこで宇宙空間での重力波観測計画に期待がかかる。

宇宙空間に出れば腕の長い干渉計を構成して、低周波数の重力波を観測することができ（図4）、星の振動や宇宙論的な背景重力波の観測も可能になる。また、地上での重力波検出の予報ができることにもなる。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^{*8)}を推進している¹⁶⁾。日本も規模を小さくした宇宙空間での低周波数重力波検出 DECIGO^{*9)} 計画を提案している¹⁸⁾。

また、著者らは、最近、光格子時計を宇宙空間

に配置して重力波検出を行う方法を提案した¹⁹⁾。原子時計を3桁上回る $\Delta t/t \sim O(10^{-19})$ の精度を射程範囲にする光格子時計を太陽・地球の3つのラグランジュ点に配置すれば、Cassini 衛星が2001-2002年に行ったドップラー追跡法による重力波検出²⁰⁾よりも3桁程度感度のよい観測ができるだろう、という提案である。最近この提案に INO (Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks) と命名した。江戸時代末期に測量に基づいて精密な日本地図を作成した伊能忠敬に結びつけた名前である。既存の技術で可能な観測提案であり、 $10^6-10^8 M_{\odot}$ のブラックホールについては、1Gpc 以内をカバーする感度を達成しうる。現在、具体的な超巨大ブラックホール形成モデルと重力波検出数を導く作業を進めている。

2019年2月には、LIGO と Virgo は感度をさらに向上させて1年間の重力波観測 O3 をスタートさせる。日本の KAGRA も、2019年夏には装置のインストールを完成させ、O3 の同時観測に参加する予定である。これから次々と報告される重力波研究に注目していただきたい。

参考文献

- 1) 真貝寿明,「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」(光文社新書, 2015)。
- 2) 真貝寿明,「予想通りで驚いた 重力波初観測の報道に接して」, 窮理 4号 (2016)。
- 3) L. Blanchet, Liv. Rev. Rel. 17 (2014) 2.
- 4) M. Sasaki & H. Tagoshi, Liv. Rev. Rel. 6 (2003) 6.
- 5) E. Berti, V. Cardoso & C. M. Will, Phys. Rev. D 73 (2006) 064030.
- 6) T. Kinugawa et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 442 (2014) 2963.
- 7) H. Shinkai, N. Kanda, & T. Ebisuzaki, Astrophys. J. 835 (2017) 276.
- 8) B.P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 221101.
- 9) H. Nakano, et al., in preparation.
- 10) J. Abedi, H. Dykaar, N. Afshordi, Phys. Rev. D. 96 (2017) 082004.
- 11) J. Westerweck et al., Phys. Rev. D. 97 (2018) 124037.
- 12) R. S. Conklin, B. Holdom, & J. Ren, arXiv:1712.06517
- 13) J. Abedi, N. Afshordi, arXiv:1803.10454.
- 14) A. Almheiri et al. JHEP 2013 (2013) 62

*8) LISA (Laser Interferometer Space Antenna, リサ) 計画は、2017年に予算承認された。http://sci.esa.int/lisa/.

*9) DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory, デサイゴと読む。

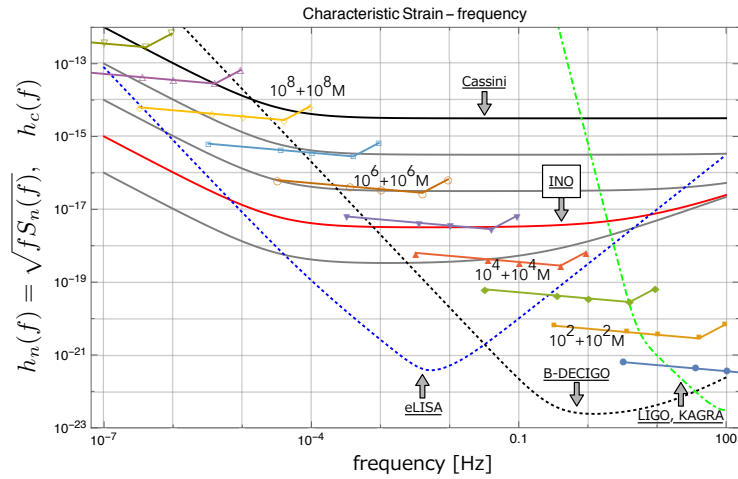


図 4 宇宙空間での重力波観測で期待されるブラックホール連星合体の典型的な重力波の信号強度。感度曲線は、欧州で計画承認された LISA 計画、日本で計画されている DECIGO プロジェクト、地上干渉計の感度曲線のほか、Cassini 衛星を使ったドップラー追跡での感度曲線と光格子時計を使う重力波観測提案 INO のものを示す。重力波の信号強度は、等質量のブラックホール連星が、ホライズン半径の 50 倍離れたところから合体するまでのインスパイラル部分の周波数変化を示す（合体に向けて周波数が上がる）。

[arXiv:1207.3123].

- 15) S. D. Mathur, Fortsch. Phys. 53 (2005) 793 [arXiv:hep-th/0502050].
- 16) V. Cardoso, & P. Pani, Nat. Astron. 1 (2017) 586 [arXiv:1707.03021].
- 17) P. Amaro-Seoane et al., arXiv:1702.00786.
- 18) N. Seto, S. Kawamura, & T. Nakamura, Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 221103.
- 19) 玉川徹ほか, 「光格子時計による重力波検出」, 科学 (岩波書店) 2017 年 12 月号.
- 20) J.W. Armstrong, Liv. Rev. Rel. 9 (2006) 1.

(しんかい・ひさあき, 大阪工業大学)