

重力波 その直接観測の意義と展望

真貝寿明（大阪工業大学）

Gravitational Wave – Direct Detections and their Prospects –

Hisaaki Shinkai (Osaka Institute of Technology)

概要

We introduce the gravitational wave both from physics and astronomy. Gravitational waves are ripples of space-time, of which existence was predicted by Einstein in 1917. In 2016, the first direct detections of gravitational waves was announced by LIGO group, and three events have been reported so far. We are in the opening stage of “new astronomy”.

1 はじめに

2016年2月12日(日本時間), アメリカの重力波観測グループLIGO(ライゴ)のグループは, 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(図1). 深夜の発表だったのにも関わらず, 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.

重力波は, 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. 100年前にその存在が予言されたが, ようやく直接観測されたことになる(図2). しかも, ブラックホールが実在していることの直接の証拠が得られ, さらにブラックホール連星が存在し合体することが初めて確認された. 2015年9月14日に検出されたため, GW150914と命名されたこのイベントは, 太陽質量(以下では M_{\odot} で示す)の35倍と29倍をもつブラックホールが合体して, $62M_{\odot}$ のブラックホールに転じるプロセスであることが, 数値シミュレーションとのマッチング解析によって報告された. その後, 現在まで, 3例のイベントと1例の候補イベントが報告されている(表1).

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, 現状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

相対性理論は2つある. どちらもアインシュタインが一人で完成させたものだ.

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, (光の速さに近いほどの)ものすごく速く運動する物体に対する物理法則だ.

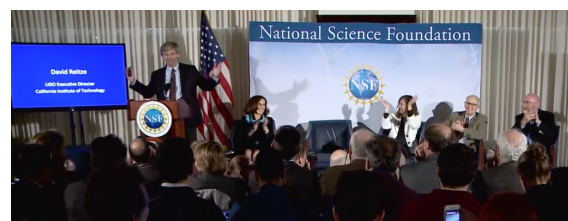


図1: 記者会見冒頭で, “We have detected gravitational wave. We did it.” とアナウンスし, ガッツポーズを決めたLIGO所長 David Reitze. (中継画像のキャプチャ)

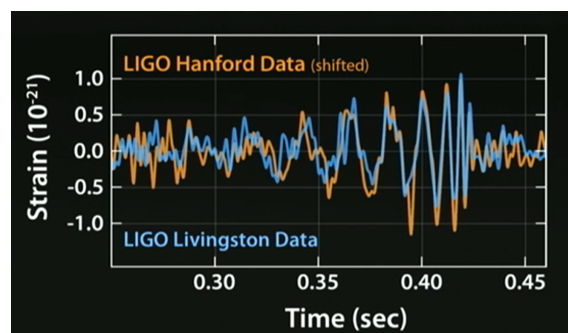


図2: 記者会見で発表された重力波波形. 2つの干渉計からの波形が重なっていることを示している. (中継画像のキャプチャ)

電磁気学の法則に登場した光速の解釈のために考え出されたもので, 「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によって異なってしまう(相対的である)ことが導かれた. 物体の運動が光速近くになった場合に, その違いは顕著になり, 光速に近い運動状態では時間の進み方が遅くなる. この現象は, 宇宙から飛来する粒子(宇宙線)が地

表 1: これまでに報告された重力波イベントの波源パラメータ (2017年8月6日現在)

	Primary & Secondary		Total mass	Final BH			SNR	Mpc	deg ²
	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	M_{total}/M_\odot	M_{final}/M_\odot	$\Delta M/M_\odot$	a/M_\odot	ρ	z	
GW150914 ref [2]	36.2 +5.2 -3.8	29.1 +3.7 -4.4		62.3 +3.7 -3.1	-3 (4.59%)	0.68	24	410Mpc 0.09	600
LVT151012	23 +18 -6	13 +4 -5		35 +14 -4	-1 (2.78%)	0.66			
GW151226 ref [3]	14.2 +8.3 -3.7	7.5 +2.3 -2.3	21.8 +5.9 -1.7	20.8 +6.1 -1.7	-0.9 (4.15%)	0.74	13	440Mpc 0.09	
GW170104 ref [4]	31.2 +8.4 -6.0	19.4 +5.3 -5.9	50.7 +5.9 -5.0	48.7 +5.7 -4.6	-1.9 (3.75%)	0.64	13	880Mpc 0.18	1300

球大気と衝突して生み出す素粒子の寿命が、実験室でできるときよりも長くなることから確かめられている。また、特殊相対性理論の結論として、エネルギーと質量の等価性 ($E = mc^2$) も導くことができ、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ている。物体の移動速度は光速度 (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 年後にアインシュタインが発表した「一般相対性理論」は、(星の質量に匹敵する以上の) ものすごく重い物体に対する物理法則だ。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る。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。そこで、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 ニュートンの理論との違い

私たちは、高校での物理で、ニュートンの万有引力の法則 (1687 年) を習う。すべての物質は引っ張り合う性質をもつ、と仮定することで、重力の原因を説明する。りんごが地球に落下するのも、月

が地球を周回するのも同じ万有引力で説明できる。

ニュートンは、万有引力の存在を認めれば、惑星の楕円運動が自然に導かれることを示した。ニュートンによって創始された物理学は、身近な現象を次々と解明した。18 世紀にはハレー彗星の回帰的中させ、19 世紀には天王星の不可思議な運動から海王星の存在を予言するなど、リンゴの落下から惑星の運動までをたった一つの法則で説明したのである。現在でも、分子レベルから銀河系スケールまでは、ニュートンの運動方程式で十分に説明することができる。

アインシュタインの相対性理論は、ニュートンの物理学を、光速近くの極限と大きな重力の極限に拡張したものだ。決してニュートン力学を否定したわけではない。事実、アインシュタインの相対性理論は、日常レベルではニュートンの物理学に戻るように構築されている。

2.3 一般相対性理論の予言

一般相対性理論は、宇宙膨張を予言し、ブラックホールの存在を予言し、重力波の存在を予言している。いずれの予言も、アインシュタイン自身が拒絶反応を起こすほど予想外のものだった (詳しくは拙著 [1] ご参照のこと)。

宇宙が膨張していることは、今や誰もが知る事実である。遠方の銀河がドップラー効果によって赤方偏移していることや、宇宙背景放射と呼ばれるマイクロ波の発見・元素合成の理論などから確固たる理論となっている。宇宙はビッグバンと呼ばれる高温で高圧の火の玉として誕生し、現在は 138 億年が経過している。ビッグバンの前にはインフレーション膨張と呼ばれる急激な時空膨張が

あったと考えられている。

ブラックホールは、燃え尽きた重い星が重力崩壊してできる時空構造で、光でさえも脱出できない領域を指す。現在までに、ブラックホールを直接観測できた例はないが、周囲の星やガスの動きから、小さな領域に大きな質量が存在していることが予想され、それらがブラックホール「候補天体」と言われている。私たちの銀河系の中心には420万 M_{\odot} の質量のブラックホールが存在していると考えられているし、数十個の強いX線を放つ天体もブラックホール候補である。

2.4 重力波

一般相対性理論が残した大きな予言の3つめは、重力波の存在である。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、湖の表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）波として伝わってゆくのである。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比例して減少するので、天体スケールのも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。

アインシュタイン自身も、この困難さを認識していた。そして、一般相対性理論は、現実の物理現象とは程遠い理論で、1つの数学的な解釈と見なされ、1950年代までほとんどの物理学者からは注目を集めることがなかった。一般相対性理論が息を吹き返すのは、60年代に、相対性理論を使わなければ説明できない天体現象（クェーサーと呼ばれる強い電波源や中性子星など）が発見されてからである。

3 重力波検出実験

3.1 初期の重力波検出実験

60年代の終わりには、重力波を実際に観測しようと試みる物理学者も登場した。アメリカのウェーバーである。ウェーバーは、メーザーと呼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」と呼ばれる原理である。そして68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他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。

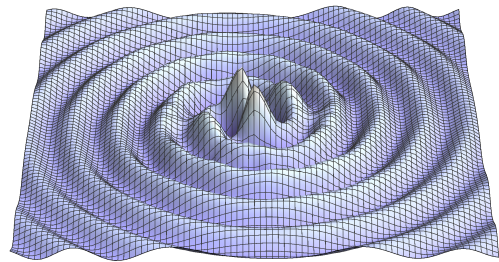


図3：連星から放出される重力波のイメージ図。中央の2つの大きな山のところに星があり、2つの星が次第に近づいて合体するまでに、時空に歪みを引き起こす。歪みは波として周囲に伝播する。

74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} 程度の質量をもつ2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良い実験場となった。長期間の観測から、連星同士がエネルギーを失いながら次第に近づいていく様子（図3）がわかった。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）初めて報告されることになった。ハルスとテイラーは、93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

80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。干渉とは、2つの波が重なり合うときに、強めあったり弱めあったりする現象である。波の振幅の激しい部分どうしが同じ高低で（山と山で）重なれば強めあうし、逆の高低で（山と谷で）重なれば振幅はゼロに近くなる。光の場合は、明るさに強弱が生じて「干渉縞」となる。干渉計とは、光の干渉を利用して微小な距離測定をする装置である。

干渉計を考え出したのは、マイケルソンで、19世紀末のことだった。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呼ばれる仮想物質の検出が目的だった。マイケルソンは、1つの光を2筋に分け、L字型の2本の経路（「腕」と呼ぶ）で光を往復させ、再び合成する装置をつくり、地球の運動で光の経路差が生じるかどうかでエーテルの存在を実証しようと試みた（図4）。残念ながら、エーテルは検出できなかった。現在ではエーテルはなく、光は真空中を進むものとして理解されている。

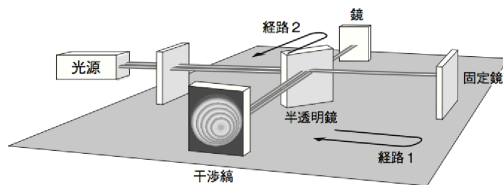


図4：干渉計の原理（[1]より）。

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ゆく。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。

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。アメリカのLIGOは4kmの腕をもち、イタリアのVirgoと日本のKAGRAは3kmの腕である。

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、微小な測定を阻害する。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（ライゴ, Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, レーザー干渉計重力波天文台）と呼ぶ、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ン（ジャングルの中）の2箇所を設置（図5左）し、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の腕をもった干渉計TAMAを運用した実観測を行った。

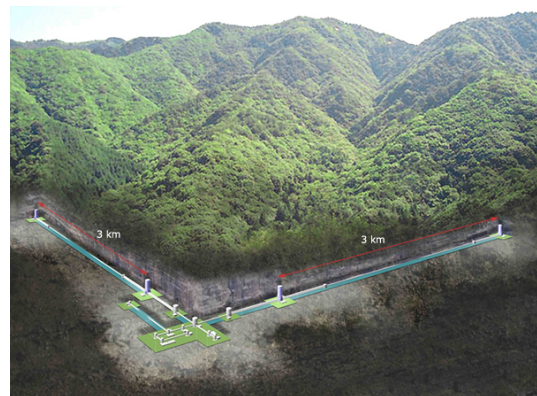


図5：（左）アメリカ・ルイジアナ州のLIGO。（右）岐阜県・神岡の山中に設置されたKAGRA。

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った。もっとも感度の高かったアメリカの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った。

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、再び観測を始めたところである。感度が10倍良くなると、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、現在の感度であれば、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の腕をもつレーザー干渉計KAGRA(かぐら)を新たに建設した。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、東京大宇宙線研究所所長を務める梶田隆章氏である。

アメリカのLIGOは、これより一足早く、2015年9月に、第2世代LIGO(アドバンスト・ライゴ)を稼働させた。その本格稼働させる2日前の9月14日、最終的な点検時に検出されたのが、GW150914だったのである。欧州のVirgoは、2017年8月から観測体制に加わった。巨大なプロジェクトであり、携わる研究者の数も多い。LIGO/Virgoのチームはグループのメンバーが1000名を超えている。

4 重力波観測の意義と展望

4.1 重力波観測で何がわかるのか

重力波が観測されると、当然ながら波源となった天体の様子がわかることになる。中性子星連星であれば、運動の様子や半径・質量がわかり、これまで原子核実験では得られなかったような、高密度物質の状態がどのようになっているのかの情報がわかる。連星合体のときには、もっとも重力波の振幅が大きくなると考えられているが、その直後の波形がもしすぐに(ミリ秒程度で)減衰するようならば、ブラックホールが形成された決定的な証拠になる(図6)。これまで私たちはブラックホールを望遠鏡で「観た」ことがないが、それが重力波の波形データの中からわかることになるのだ。

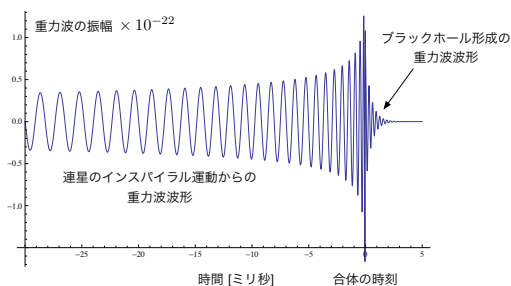


図6: 中性子星あるいはブラックホール連星の合体の前後で放出される重力波の波形(予想)。次第に振幅を大きくしながら、1kHzに近い周波数にまで上がる。合体後にブラックホールが形成されるならば、重力波はブラックホールに飲み込まれてしまい、急速に減衰する。この減衰部分が観測されれば、ブラックホールを直接観測したことになる。

さらに、重力波が一般相対性理論からの予測通りに検出されるかどうかで、一般相対性理論の正しさも議論することができる。これまでに、一般相対性理論は、重力レンズ効果(質量の大きい星や銀河によって光が曲がって進むこと)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、他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のである。

記者発表で示された重力波の波形(図2)は、まさに、このような連星合体による瞬間の波形だった。

4.2 重力波観測がもたらす天文学

天文学は、可視光線域に到達する星の光を人間の目で観ることからはじまった。いまでは、赤外線、X線、ガンマ線、電波など、さまざまな波長で遠方の銀河や星の姿の観測が進められている。重力波観測が実現したことは、人類に新しい「眼」が加わったことを意味している。

重力波波源の天体の様子や一般相対性理論の検証については上記に述べたが、未知の分野の解明が進むと期待されるものとして、以下の研究を列挙しておこう。

(a) ブラックホールや中性子星

これまでに直接「観る」ことができなかったブラックホールや中性子星などのコンパクト天体が「観測される」ことになる。重力の引き起こす物理現象や、高密度な原子核の状態方程式など、未知だった分野の研究が可能になる。

(b) 銀河形成

ブラックホールがどの位存在して、どのような質量分布なのか。連星を作っているものはどの位の割合なのか。銀河中心には超巨大ブラックホールが存在しているが、どのようにして形成されたのか、など重力波のイベントデータを蓄積することによって未知だった分野の研究が可能になる(例えば[5])。

(c) 初期宇宙

これまでは、初期宇宙の解明は、宇宙誕生後38万年の宇宙背景放射を観測することが限界だった。重力波は、これより前の情報をもたらす可能性がある。LIGOやKAGRAでは無理かもしれないが、次世代の重力波観測がそれを可能にするだろう。

(d) 未知の現象?

実は科学者にとって、もっとも面白くなる結果は、これまでに知られていない未知の現象が検出されることだ。電波望遠鏡が中性子星を、マイクロ波伝送実験が宇宙背景放射現象を、核実験監視衛星がガンマ線バースト現象を見つけたように、まったくの偶然から始まる研究が、重力波観測でも起きるかもしれない。それは例えば、時空が5次元以上だった、とか、光速を超える現象が存在した、とか、...

4.3 重力波観測の展望

日本のKAGRAは2016年4月に1ヶ月ほどの試験運用を行った。装置全体を冷却して本格稼働するのは、2019年度末の予定である。LIGOグループはインドにも干渉計を作る計画を進めている。3台以上の干渉計での同時共同観測が実現すれば、重力波の波源の方向特定精度が格段に上がることになる。日本では、2017年度から5年間、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」が承認された。これから重力波検出体制に向けての準備が本格化する。

また、2017年6月、欧州のESAは、宇宙空間にレーザー干渉計を構築するLISA(リサ, Laser Interferometer Space Antenna)計画を承認した。250万kmのアームをもつ干渉計を3台の人工衛星で構成する計画である。地球上では免れない低周波数帯での重力波観測が可能になり、より大質量の連星合体の検出や、地上で観測される重力波検出の予報が可能になる。

LIGOグループは、一般の方が重力波のデータ解析に参加できるEinstein@Homeプロジェクトも行っている。各家庭のPCが利用されていない時間に、スクリーンセーバー替わりにお使いいただくと、科学計算を補助する仕組みになっている(宇宙人探しのSETI@Homeの重力波版である)。いずれ日本でも同様のプロジェクトを立ち上げることを計画している。

これから天文学に仲間入りする「重力波天文学」に、是非ご注目いただきたい。

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] <https://losc.ligo.org/events/GW150914/>
 - [3] <https://losc.ligo.org/events/GW151226/>
 - [4] <https://losc.ligo.org/events/GW170104/>
 - [5] H. Shinkai, N. Kanda & T. Ebisuzaki, *Astrophys. J.* 835 (2017) 276
<https://arxiv.org/abs/1610.09505>
-

質疑応答

- Q: ブラックホールは、無限につぶれてしまった天体という説明を聞いたことがあります。普通に考える天体とは異なると思うのですが、ブラックホールが合体するときには、具体的には何と何がぶつかっているのでしょうか。(篠原秀雄さん)
- A: ブラックホールの定義は正確には時空の「領域」ですが、非常にコンパクトな天体とお考えになって結構です。点と点の衝突で、ある程度説明することができます。
- Q: ブラックホールの質量はどこにあるのですか。重力波のエネルギー ($3M_{\odot}$) は事象の地平面の内側から飛び出したのでしょうか。(津村耕司さん)
- A: 相対性理論では、座標の取り方の自由度がありますので、局所的な質量が定義できません。ブラックホールの質量は無限遠から見たものとして定義されます。決して事象の地平面内にだけあるものではありません。ですので、事象の地平面に収まっていなかった時空の歪みが解放された、とお考えください。
- Q: 超新星爆発の場合は波形がわからないということでしたが、そのために信号を見逃している可能性はあるのですか。(岡崎敦男さん)
- A: あります。バーストサーチという信号有無の解析をかけて、信号がありそうなところを見つけます。そして信号がありそうな時刻のデータに連星合体波形とのマッチング解析をしています。超新星爆発時の重力波は波形テンプレートがないために、解析がされていません。
- Q: 教育利用についてのお願いです。pseudo-Newtonian 近似でブラックホールを mimic するように、インスパイラルモードやリングダウンを mimic する近似式などを一般の方にもわかるようにご紹介ください。(福江純さん)
- A: pseudo-Newtonian 近似は、ブラックホール地平面での扱いを近似するには面白い方法ですが、インスパイラル部分は適しません。むしろ、Newton の運動方程式に重力波の四重極放出の反作用を入れた運動方程式でインスパイラルの初期部分は表現できます。リングダウン部分は、ブラックホールの摂動方程式から得られるものですが、これが pseudo-Newtonian で表現できるかどうかは考えてみます。
- Q: 重力波の波形から BH の質量を求めるなどの実習化は可能でしょうか。(松本直記さん)
- A: フーリエ変換とセットで行う教材なら可能かもしれません。後日、「天文教育」誌などでご提案したいと思います。
-

[2017年10月16日追記] 本稿執筆後、さらに2つの重力波検出が報告された。GW170814(連星ブラックホール合体)とGW170817(連星中性子星合体)である。GW170814はVirgoを含めた3台の干渉計での観測、GW170817は可視光、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た。また、2017年度のノーベル物理学賞が、LIGOグループを牽引したワイス、ソーン、バリッシュに贈られることも発表された。検出発表した翌年に授賞されるのは、ノーベル財団が重力波発見の意義を大きく認めていることを物語っている。「重力波天文学」は、予想以上のスピードで進み始めた。