総 説

宇宙を観測する新しい窓・重力波

三代木伸二[†]

東京大学宇宙線研究所

506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住238

[†]miyoki@icrr.u-tokyo.ac.jp

2015年9月14日に、史上初めて、アメリカの重力波望遠鏡LIGOが連星ブラックホールの合体からの重力波を検出しました。これは1915年にアインシュタインの一般相対性理論で予測された重力波を直接的に検証した偉業であるとともに、ブラックホール、及び連星ブラックホールがこの宇宙に存在することの直接的証明にもなっています。さらに2015年12月26日にも連星ブラックホールの合体からの重力波の信号が発見され、このような複数の検出により、非常に強い重力場における一般相対性理論の正しさが強く示唆され、重力波による全く新しい天文学が幕を切って落とされました。しかし、この歴史的な重力波の検出に至る道のりは極めて厳しく、キロメートルの基線長を持つレーザー干渉計重力波望遠鏡のその基線長の 10^{-22} の相対変化をとらえる性能を獲得するために、実に40年を超える努力がなされ、そして、重力波初検出後の今もなお、さらなる性能向上のための極限技術の開発が継続されています。本総説では、一般相対性理論における重力と重力波、重力波の波源、重力波望遠鏡の開発の歴史と様々な雑音対策、今回の重力波検出によって判明した内容、そして、将来の重力波望遠鏡計画について紹介します。

Key Words: gravitational wave, binary neutron star, binary black hole, supernova, laser interferometer, ultra precise length measurement, general relativity, numerical simulation

近代天文学に革命をもたらした道具は、言うまでもなく光学望遠鏡でしょう。文献によると、約420年前、イタリアのジャンバステッラ・デッラ・ポルタが発明したと思われる望遠鏡の原理をオランダ人ハンス・リッペルスハイが再現し、それを聞きつけ、望遠鏡を自作し、天体観測を行ったのが、かのガリレオ・ガリレイでした。1609年のことです。当然可視光線による観測ですが、それ以降も、電波、赤外線、紫外線、X線、 γ 線と、波長の異なる電磁波が発見されるたびに、この新しい電磁波による天体や宇宙の観測が行われ、今まで気づかなかった同じ現象に関する様々な側面が明らかにされ、人類の宇宙に関する知識は飛躍的に増大するとともに、その観測手段が日常生活に应用されることで人類の豊かさに寄与したことは周知の通りです。さらに最近では、ミューオンやニュートリノなどの様々なエネルギーを持つ

素粒子も観測・計測に応用されるようになりました。そして、2015年、宇宙を観測する新しい窓として、さらに新たに重力波が加わりました。重力波は、その発生原理が電磁波や素粒子とは異なるため、この新たな重力波によって、全く新しい宇宙の姿が垣間見え、新たな可能性が広がるかもしれません。本解説では、この重力波とは何か、期待される重力波の発生源や検出方法、及びそのために必要とされる極限技術、今回の重力波観測結果と課題、そして、現在と今後の世界の重力波望遠鏡計画について紹介します。

1. 一般相対性理論における重力と重力波

重力波は、「重力」の「波」ですが、そもそも重力とは何でしょう？ 重力を万有引力として、最初に数学的に説明したのはニュートンです。万有引力は、その著書「自然哲学の数学的

諸原理」で、質量をもった宇宙に存在するどんな物体同士の間にも働く引力であり、その大きさは、現代ではお馴染みの、

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

と、重力定数で関係づけられる式になります。これにより、惑星の運動の説明や予測が可能となり、当時としては、太陽系スケールにおける“経験則”として、成功を納めました。その後も高精度な実験により、特に、より短距離スケール、より小質量スケールにおける逆二乗則の成立性が、余剰次元の可能性を探る実験とからめて検証されています¹⁾。

これに対し、異なるアイデアを提案することになったのがアインシュタインです。アインシュタインの相対性理論は、“光速一定”の仮説、加速度と重力を同一視し、慣性質量と重力質量を等しいとする“等価の原理”、そして、“時空”という時間1次元と空間3次元を同等に扱う4次元の概念とその幾何学を基礎とする理論です。

この相対性理論自身の確からしさは、その理論が予測する一見不可思議に思える様々な現象の検証実験及び天体観測により確認されてきました。発表の3年後の1919年には、早くも、エディントンにより、日食時に見える太陽近傍の恒星の見かけの位置と、同じ恒星の、太陽がない時の位置との差から、精度は不十分でしたが、太陽の周囲の重力レンズ効果が確認されました²⁾。現代では、この重力レンズ効果は、遠方銀河の歪んだ像、多重像として当たり前観測され、また、暗黒物質の量や分布推定にも応用されています。そもそも、万有引力の考えでは、明らかに質量のない光子には重力の効果はないはずですが、相対論は、この重力レンズ効果を正しく説明できます。ほどなく、一般相対性理論の正しさを決定づけたのは、ニュートン力学では説明できなかった水星の近日点移動と天王星の軌道を説明できた点でした。その他にも、地球の大気圏高層部で発生した宇宙線の

一種のミューオンという素粒子が、2.2マイクロ秒という静止平均寿命を考えると届くはずのない地上でも多く観測されているという事実から、高速度で運動する世界の時間遅延効果が立証されました。検証までに少し時間がかかったのが、重力場の強さが時間の遅延を引き起こす重力赤方偏移効果です。これは1960年のパウンドとレプカの二人によるメスbauer効果を用いた実験により、地球上の高低差22.6メートルの位置の間で検証され³⁾、現代では、光格子時計という200億年で1秒もずれない超精密な時計⁴⁻⁷⁾の利用により、高低差数センチメートルの差における重力赤方偏移も確認可能です。この高速物体の時間遅延効果と重力赤方偏移効果を正しく取り入れることは、現代のGPSシステムを正しく運用するうえで必須の基盤知識となっています。

このように地球や太陽の周辺のような「弱く」、「静的」な重力場において成功をおさめ続ける相対性理論において、重力とは、質量も含むエネルギーと運動量をもった物体などの周りで発生している「時空」の歪みと解釈されます。それを表すのが、下記のアインシュタイン方程式です。

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

左辺の $G_{\mu\nu}$ が質量の周りの時空の歪み、右辺の $T_{\mu\nu}$ は、エネルギー・運動量テンソルと呼ばれるもので、質量の分布やエネルギーの流れを表します。基本的には、それらが $\kappa = \frac{8\pi G}{c^4}$ という係数で関係づけられます。 Λ は宇宙定数で、初出は宇宙が収縮しつづけないようにするためにアインシュタイン自身が恣意的に加えた、宇宙を膨張させる効果のある斥力項です。後にアインシュタインはこれを撤回しましたが、近年の宇宙の加速膨張の観測結果⁸⁾から復活しつつあります。時空の歪みをイメージするために、図1のように、3次元空間の次元を一つ減らした格子状に区画された2次元空間を表すゴ

図1 整列した格子で表した「平坦」な時空(左)と質量により伸びた格子で表現された歪んだ時空(中), 連星の公転運動による重力波の伝搬(右) (Color online)

ムシートを考えます。何もない状態では、格子は整列していますが、質量を持つ物体を置くと、その物体位置を最下点とする窪みがシートに発生し、周囲の格子が引き伸ばされ変形します。これが時空の歪みです。このくぼみに加速度を持って物体が移動していく現象こそが、引力による運動と説明されます。相対論では、この物体が落ちていく道筋は「測地線」で決まり(図中の格子の線は測地線ではありません)、その測地線の特徴、つまり時空の歪み方を定義するのが無次元量である計量テンソル($g_{\mu\nu}$)です。時空の歪み方は、近接する二地点間の距離(ds)の二乗値が計量テンソルでどのように表されるかで表現され、

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

と書かれます。添え字の μ や ν は、時間($\mu, \nu=0$)と空間3次元($\mu, \nu=1, 2, 3$)の合計4つの次元を表し、例えば x, y, z 直行座標系における二地点間最短距離 $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ に相当するものです。

結局、重力波とは、物体の周りの時空の歪みが、その物体の運動(厳密には非軸対称な運動)によって変化し、水面上のさざ波のように外の時空に広がっていく「動的」な現象といえます。だから、皆さんが腕をぶんぶん回しても重力波が発生します。しかし、その時に発生している重力波の振幅はあまりに小さく、例えば、100キログラムの質量を持つダンベル状の物体

を回転させたとしても、人類の技術では到底検出できない小ささです。結局、人類が検出可能な振幅を持つ重力波を発生する現象は、星の寿命が尽きる最後に発生する爆発や、連星中性子星や連星ブラックホールの合体、そして宇宙の誕生のような膨大な爆発エネルギー(超新星だと 10^{44} [J], 中性子星の合体で、 10^{48} [J] レベル)を伴う天体現象です。この意味で、重力波は「強い重力場」からのメッセージでもあるため、「動的」かつ「強い重力場」における相対論の検証という意味で、重力波の直接検証には大きな意義があります。

2. 重力波発生天体と重力波の間接的な存在証明

太陽と同等かそれ以上の質量を持ちながらも、数十kmレベル以下までに小さく圧縮された天体になって初めて、大きな振幅の重力波を発生させることができます。重いだけでなく、互いにより接近可能になることで、極めて強く歪んだ時空をかき乱せるようになるからです。その最有力候補が、二つの中性子星の連星運動とその最後に起こる合体現象です。中性子星は、太陽の約8倍から40倍程度の質量を持った恒星が、その終焉を迎えて、超新星爆発を起こした後にできる星だと考えられています。この中性子星は、ほぼ中性子という核子だけでできた星で、直径が20キロメートル程度しかないにもかかわらず、典型的には太陽の1.4倍程度の質量を持つ星です。ただし、上限質量もあ

図2 様々な重力波波形。(a)連星中性子星, (b)連星ブラックホール, (c)超新星爆発 (Color online)

り、諸説ありますが、太陽の3.2倍程度と考えられています。しかもこのような重くて小さい星二つが互いを回りあう連星系からは、その公転周期（あるいは周波数）の半分の周期（2倍の周波数）の強い重力波が常時放出されています。このような連星中性子星は、我々銀河系に6個程度見つかっており⁹⁾、特に有名なものが、PSR1913+16です¹⁰⁾。幸運なことに、この連星は、片方の中性子星が、電波を放ちながら原子時計並みに正確な周期（現代の観測で59.02999792988 [s]）で自転している星、つまりパルサーとして観測可能でした。ハルスとテイラーはこれに着目し、その自転とともに地球に届く正確な電波パルス列を正確な時計の代わりとし、連星の約7.75時間の公転周期の変化を1975年から数年にわたって調査したところ、観測された公転周期の減少率（当時 $(-2.30 \pm 0.22) \times 10^{-12}$ [s/s]）が、重力波の放出が公転のエネルギーを持ち去ると仮定した時の理論的予測値（当時 $(-2.403 \pm 0.005) \times 10^{-12}$ [s/s]）と誤差4%で一致しました^{11, 12)}。1年だと約76マイクロ秒に相当します。結果、これが重力波の間接的存在証明とみなされ、その功績で両博士は1993年のノーベル物理学賞を受賞されました。これ以降も観測は継続され、精度は0.1%まで向上しています。しかも、この観測は、太陽系付近よりは十分強い重力場における相対論の検証にもなりました。ただ、この結果は、重力波の間接的な存在証明であり、発生天体に関する重要な情報を多く含む重力波の波形を時系列で直接的に観測したわけではありません。

ところで、このような連星中性子星では、重力波の放射により、数億年という時間スケール

でその公転周期が短くなり、つまり、連星は互いに接近し、ついには合体し質量限界を超え、ブラックホールが誕生すると考えられています。連星中性子星の合体からの重力波の予想波形は、典型的には、図2(a)のように、チャープ波形という、数Hzから1kHzの周波数帯域で周波数が高まり、かつ同時に振幅も大きくなり、そして、合体中にブラックホールが誕生するとともに振幅が減少し消えていくという特徴を持っています。合体直前までのチャープ波形は、連星の質量から $(v/c)^2 \ll 1$ の時の近似式であるポストニュートニアン近似により計算可能で（ v は星の併進速度、 c は光速）、合体直前から合体後までは、相対論を取り入れた数値計算により計算可能です¹³⁾。このような連星中性子星の合体現象は、過去の連星中性子星の探索空間と発見数、及び発見された連星中性子星の合体までにかかる時間の予想から、誤差は大きいですが、おおよそ1銀河当たりで10万年に1回程度しか起こらないと予想されています。ならば、100万個の銀河系を内包できる半径約7億光年の範囲の最遠で発生した重力波を検出可能な感度（後述）、を持つ重力波望遠鏡を開発すれば、1カ月に1回程度は検出可能と見積もれます。実は、この連星中性子星が合体する瞬間の特に大きくなった重力波を直接的にとらえることを第一目標として、現在の地上に建設中の大型レーザー干渉計型重力波望遠鏡の開発が行われてきました。

中性子星よりもっと重いブラックホール同士の連星の合体も重力波発生天体となります。ただし、ブラックホール連星の合体の発生頻度は、2015年の重力波の直接検出の成功までよ

くわかっていませんでした。そもそもブラックホール自身は、それを仮定しないと説明のつかない高エネルギーなX線や γ 線などの電磁波発生現象や、銀河中心付近での恒星の運動を説明可能な唯一の“見えない”天体として確認されていたにすぎず、直接的な観測は存在しません。また、連星ブラックホールの合体の場合は、質量が重ければ重いほど大きな振幅の重力波は発生しますが、同時に、合体時までには発生する重力波の周波数も低くなり、おおよそ数100Hz以下から数マイクロHzまでの広がりを持ちます(図2(b))。最もスケールの大きな合体は、銀河同士の衝突の際の、中心にある数百万太陽質量のブラックホール同士の合体になるかもしれません。さらに、最近まで、連星ブラックホール同士の合体からの重力波の波形の予想は、数値誤差の問題が回避できず困難でしたが、それを回避する計算コードが発明され¹⁴⁻¹⁶⁾、現在では合体中に重力波が消えてゆく段階(リングダウン)までも計算可能となり、今回の重力波の発見にも大きく貢献しました。

その他にも、超新星爆発の時にもスパイク波形的な重力波が発生すると予想されています(図2(c))。ただし、超新星爆発のメカニズムは、進歩しつつもまだ完全な理解に至っておらず、そのため、重力波の波形の正確な予想はできませんが、様々な仮定のもと、ミリ秒程度のスパイク状の波形が出そうなことが判明しています¹⁷⁾。また、超新星爆発では、ニュートリノも大量に発生することがわかっていますので、ニュートリノと重力波が発生するタイミングの相互観測、そして、その観測情報を即時的に他の電磁波観測グループに連絡し、さらに多波長で重力波発生天体を早期段階から追尾観測することによって、同一天体現象を多面的に観測する協力関係が世界で整い始めています。この超新星爆発の頻度は、観測的事実から、1銀河当たり約100年に1回程度と見積もられています。

さらに、もし、自転する中性子星の形状に非軸対称な成分があると仮定すると、理論的に自転の周波数の2倍の周波数の重力波の発生が予想されますが、既知のパルサーに関しては、優位な重力波は観測されず、上限値が判明しているにすぎません。

重力波は、宇宙の誕生や進化の初期過程を探る研究においては極めて重要です。理論的予想や観測的事実から、宇宙はある極微の一点から発生し、インフレーションにより一瞬で 10^{30} 程度拡大し、138億年を経て今のような宇宙になったと考えられています。特に、近年の1a型超新星の観測から、この宇宙は、数十億年程度前から、さらに加速膨張していると思われています⁸⁾。しかし、光(電磁波)を使う限り、宇宙の誕生後38万年経過した以降のことしか知り得ません。なぜなら、宇宙は、その38万年間は灼熱状態のため、物質は電子と原子核が分離したプラズマ状態にあり、光は電子で散乱され直進できず、我々の時代から見ると、まるですりガラス越しに見た風景のように、その時代の姿がぼかされてしまうからです。しかし、重力波とニュートリノはそんな灼熱の宇宙ですら直進できるため、重力波を使えば、究極的には宇宙誕生の瞬間を見ることができるのです。

3. 重力波の特徴と作用

重力波の性質は、一般相対性理論から導くことができます。まず、重力波が存在する時空の計量テンソルは、平坦な時空を表す計量テンソル($\eta_{\mu\nu}$)に対する重力波による微小な摂動($h_{\mu\nu}$)を使い、

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

と表せ、 $h_{\mu\nu} \ll 1$ を仮定し、アインシュタイン方程式の線形近似を行い、さらに真空、つまり $T_{ij}=0$ の条件を課すことにより、

$$\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + c^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \right) h_{ij} = 0$$

図3 四重極放射である重力波の二つの偏光と、紙面に垂直に入射した重力波の通過による自由質点の運動

という波動方程式が導かれます。 h_{ij} が重力波の振幅を表し、この式から、重力波は、電磁波と同様に光速で伝搬する“横波”とわかります。また、電磁波が、プラスとマイナスの電荷の双極子の振動から発生することから、放射の最低次数は双極子になるのに対し、重力にはマイナスの質量がないため、四重極放射が最低次数となります。四重極放射を実現するには、質量を持った物体の非軸対称な回転運動が必要となります。さて、その四重極放射には、二つの偏光が存在し、一つをプラスモード、もう一つをクロスモードと呼びます(図3)。

他の特徴は、そもそも、物質の入れ物としての時空の振動ですから、ブラックホール以外の物質を減衰せずに貫通する能力を持ち、エネルギー保存の要請から、点状発生源からの距離に反比例して振幅が減少しながら伝搬します。

重力波が引き起こす実際の物理現象の例は、例えば、二つの自由質点(重力以外の力を受けていない質点という意味)間の距離(L)の伸縮(dL)です。重力波の振幅 h は $h=dL/L$ で表されます。図3のように、円周上に質点を配置し、紙面に垂直な方向から、ある周期の重力波が入射したとすると、二つの偏光に応じて質点が図3に示されたような位置の変化を起こします。特に左図で質点AとBの動きに注目すると、中

心Oから見て逆相の運動をします。さらに、Oから見た二つの質点A, Bの距離が離れているほど、重力波による長さの変化も大きくなります。しかし、例えば、おとめ座銀河団程度、つまり20Mpc離れた場所で発生した連星中性子星の合体による重力波が地球に到達した時の振幅は、地球と太陽間の距離・1億5000万kmが、たった水素原子1個分(10^{-10} [m])変化する程度、つまり $h \sim 10^{-21}$ という極限的小ささです。まさにこれこそが、相対論発表から100年間、重力波の直接検出がアインシュタインからの宿題として最後まで残り続けた最大の理由です。

4. 重力波検出への挑戦

相対論発表から50年間は、この重力波の効果のあまりの小ささから、その直接検出など、技術的に全く不可能な時代でした。しかし、その困難に最初に挑戦したのが、メリーランド大学のウェーバーです。ウェーバーは共振型重力波望遠鏡を考案しました。それは、極めて機械的な損失の少ない(つまり機械的Q値の高い)アルミの金属共振体を用意し、重力波が共振体を通過する際に共振体にかかる四重極力によって、共振体とその共振周波数で励起される微小な振動を高いQ値で増幅し検出することで、重

図4 マイケルソン型レーザー干渉計(a)と、感度を高めるための鏡を追加したレーザー干渉計(b)の構成。基線長での光路長を稼ぎ重力波の効果を増幅するFabry-Perot共振器、実効的なレーザーパワーを増加させるリサイクリング鏡、帯域幅を調整し、信号を増幅するリサイクリング鏡、レーザーのTEM00成分だけを利用するためのモードクリーナーなどが追加されています (Color online)

力波を捉えようとする装置です。ウェーバーは、2台の重力波検出器を用意し、ともに、地面の振動で共振体が励起されないように共振体を振り子状に懸架することで防振対策を施し、かつ、同じ環境的要因で励起が起これないように、1000キロメートル離れた別々の実験室で同時観測を行いました。そして、適切な時間差で、似たような振動が同時に検出されたため、「重力波初検出」と発表し¹⁸⁾、世界を驚かせました。しかし、その後、別のグループの検証実験ではそのような頻度では検出されず、かつ、信号の大きさが、他の確定的知見と矛盾するほど大きかったため、真偽は定められませんでした。しかし、これが契機となり、世界中の様々なグループが、共振体の材質の改善による機械的ロスの低減、低温化による熱雑音の低減、Squidを利用した低雑音化された信号読み出し機構の導入など、より高感度、つまりより小さな変位を計測可能な共振型重力波望遠鏡の開発を行い、同時観測なども行いましたが、優位な重力波信号の検出には至らず¹⁹⁾、共振型の開発はほぼ2000年代前半には終了しました。

この共振型重力波望遠鏡は、重力波信号の有無だけを共振周波数で調べる点で、波形計測

ができない欠点もあったため、それが可能な広帯域に信号を受信可能なレーザー干渉計型重力波望遠鏡がアメリカのMITのワイスによって提案されました^{20, 21)}。レーザー干渉計では(図4(a))、その光軸に沿って振動する h_+ の振幅の重力波が z 軸に沿って通過する場合、その線素(ds^2)は

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + (1 + h_+) dx^2 + (1 - h_+) dy^2 + dz^2$$

と表され、例えば x 方向のみに進行する光の往復時間は、

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + (1 + h_+) dx^2 \rightarrow \frac{dx}{dt} = \pm c \frac{1}{\sqrt{1 + h_+}}$$

から、

$$t_{x,y} = \frac{2L_{x,y}}{c} \pm \frac{1}{2} \int_{t-L_{x,y}/c}^t h_+(t') dt'$$

となり、第二項が重力波による x, y 軸での差動的な位相の変化を表すため、信号として抽出可能なことがわかります。この効果は、光速度一定の立場では、両鏡が差動でその位置を変えると説明される一方、時空の歪みという立場からは、両鏡は位置を変えず、伝搬途中の光速が変

化して位相変化になるという説明がなされます。

70年代より要素技術の開発が行われ、1990年前半には、アメリカのCaltechに構築された40mの基線長を持つFabry-Perot型レーザー干渉計プロトタイプにより、100Hz付近で $10^{-19}[\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 台の変位感度を達成し、これらの成果をもとに、ワシントン州とルイジアナ州の約3000km離れた場所に、4kmの基線長を持つレーザー干渉計型重力波望遠鏡をそれぞれ1基ずつ建設するLIGO（ライゴ）計画が開始されました²²⁾。ヨーロッパや日本でも、同時期にプロトタイプレーザー干渉計の研究が行われ、現在的大型望遠鏡建設につながっています。

5. レーザー干渉計型重力波望遠鏡の原理と極限的光学技術

マイケルソン型レーザー干渉計（図4(a)）では、一つのレーザー光源から出た光をビームスプリッター（BS）で直交二方向に二等分し、遠方に置いた自由質点に見立てた鏡で反射して戻ってきた光同士を再度BSで合わせて干渉させ、光検出器で干渉縞を受光し、鏡の動き、または時空の変化による光路位相変化をこの干渉縞の明暗の変化として捉えます。ただ、片腕の往復だけではその2倍の距離しか光が走らないので、BSに近いところに鏡を追加し、二枚の鏡の間で光を約50回から500回程度往復させることで光路長を稼ぎ、重力波の効果を増幅させ感度を高めます。具体的には、腕の部分でFabry-Perot共振器を構成し、レーザー光が共振する状態を保つ制御を行うことで、その往復相当の効果を実現しています²³⁾。その他にも、さらにいくつかの鏡を干渉計内に追加し、性能を高め（図4(b)）、 10^{-22} rmsの歪み振幅の重力波を捉える能力を目指しています（図5）。

レーザー干渉計では、その名の通り、レーザー光源とそれを構成する鏡やビームスプリッターが重要な基本構成要素となります。

図5 世界の重力波望遠鏡が目指す重力波感度曲線の例。横軸は重力波の周波数、縦軸が歪み感度。単位は $1/\sqrt{\text{Hz}}$ で、100Hz付近での最高感度 $3 \times 10^{-24}[1/\sqrt{\text{Hz}}]$ に帯域幅約1kHzの平方根をかけたものが、文中のrms感度になります。感度曲線（黒実線）は、周波数ごとに異なる雑音源の寄与がありますが、これらを光の量子性が原因となる雑音（Shot雑音と輻射圧雑音）以下にすることを目標にしています（Color online）

まずは、レーザーですが、現在的大型重力波望遠鏡では、NPRO方式で発振し、かつその発振周波数がGHzレベルで制御可能な1064nmの波長を持つ1W程度のパワーを持つ半導体レーザーをシード光とし、それをMOPA方式のパワーアンプで200W程度まで多段でパワーアップした連続波光源が主流です。重力波検出のための超精密長さ計測の「ものさし」となっているのは、結局レーザーの波長（周波数）ですが、その周波数はもちろんのこと、強度や出射方向に対しても徹底した安定化が求められます（後述）。

次に鏡ですが、干渉計の腕部の2枚の鏡でFabry-Perot共振器を構成した時の共振器内パワーは500kWレベルを想定しているため、干渉計内のレーザーパワーの損失は、Shot雑音の悪化に直結し、熱の吸収は鏡の変形を引き起こし、散乱は散乱光雑音の要因となるので、光の損失を極限まで低減した鏡や光学素子が必要です。重力波望遠鏡の腕部で使う鏡は、その表面

に曲率2km程度の曲面が超精密研磨技術により、理想曲面からのずれがレーザー波長の100分の1以下しかないような精度で作成されています。ミリ、マイクロメートル四方レベルの面積範囲でも、その表面は、P-V値で 10^{-10} [m]程度の凹凸しかないように研磨されています。さらに、その表面には、望遠鏡で使用される1064nmのレーザー光だけを例えば99.99%以上反射し、光の吸収や散乱による損失が50ppm以下程度しかないような誘電多層膜が蒸着されますが、重力波望遠鏡の鏡は直径30cm程度もあり、その表面はほぼすべてでこれだけの条件を一樣に満たすには、超絶的な工作・製造技術が必要となります。

ところで、レーザー干渉計の究極の感度は、それが、レーザー光を使用し、レーザー光が反射する鏡の位置を検出するという性質上、光の量子雑音のみで決まるはずですが、具体的には周波数の高い帯域では、Shot雑音、低い帯域では、輻射圧雑音です。Shot雑音は、レーザーのパワーの平方根に反比例して改善しますが、輻射圧雑音は、逆に比例して大きくなります。このShot雑音と輻射圧雑音が交差する感度レベルを、レーザーパワーを変えてトレースしたものが図中の“標準量子限界”で、これは、鏡という巨視的物体が、ハイゼンベルグの不確定性原理で決まる位置決定精度限界に相当します。実際には、量子光学的考察によるスクイーミング技術²⁴⁾や、輻射圧雑音とShot雑音の相関により、標準量子限界を超える計測は可能かつ、立証済みで、将来本格導入が予定されています。

6. 重力波望遠鏡の主な雑音源とその低減技術

極限的に微小な変化を捉える重力波望遠鏡にとって、考えるべきすべての要因が鏡を揺らす雑音源になるため、それらを目標感度以下に低減する様々な技術的工夫が必要です。

主な雑音源のうち、低周波の感度を制限するのが地面振動です。レーザー干渉計の鏡は、

重力のある地球上及び観測帯域で“自由落下”する状態を実現するために、地面を支持点にして、振り子状に懸架されます。しかし、地面は有感地震が起きていなくても常時、風雨、気流、波浪などにより振動していますので、その振動が鏡の支持構造を伝わり、鏡を揺らします。対策として、これも振り子の原理を利用した防振装置が投入されます。振り子は、その共振周波数以上の周波数では、支点の揺れが周波数の二乗に反比例して減衰して質点に伝わる特性と、その共振周波数が低いほど、観測周波数帯域での減衰比が稼げる特性があります。ただし、1段の振り子では、観測帯域である10Hzから1kHzで得られる減衰比が足りないため、それを例えば8段程度まで連結した多段振子を構成し、末端の質点として鏡を懸架することで、目標の減衰比を達成しています。特に1段目の防振では、倒立振り子の原理を応用し、共振周波数を0.03 [Hz] 程度までに低減した防振構造を導入したり、あるいは、高感度の加速度計や傾斜計を参照とした能動防振制御を導入したりします。水平方向だけでなく、垂直方向の振動も同様に多段の構造で防振し、振動の縦横カップリング成分を低減しています。縦の防振は、基本は、方端を固定し、方端に水平防振用ワイヤーを取り付けた“板バネ”を利用しますが、Geometrical Anti-Springという、正負のバネ復元力を組みあわせることにより、極めて小さな残差正バネ復元力を実現することで、共振周波数を下げた構造も利用されています。ただし、このような機械的な防振装置には、多数の運動自由度と寄生共振があるため、それらすべてを適切に制振するため、複雑なデジタルフィードバック制御システムが投入されています（図6）。

レーザー光線が通過する空間に残留空気があると、その屈折率の揺らぎが光路長の揺らぎになり、雑音になります。そのため、レーザー光線が通過する真空ダクトの中の圧力を、 10^{-7} [Pa] までに低減します。ただ、重力波望遠鏡

図6 大型低温重力波望遠鏡KAGRAで設計されている多段防振装置とクライオスタット (Color online)

の真空ダクトの直径は後述の散乱光対策のため、1.2m～80cmと大きく、全体の真空容積は前例のない大きさとなっています。

レーザーの周波数、強度、ビーム出射方向の揺らぎも雑音になります。重力波望遠鏡では、レーザーのガウシアンビームの高次横モードが混入していると、ビーム軸の揺らぎになりビームジッター雑音になるため、TEM00成分のみを選択利用します。この横モードを低減するために、振り子状に懸架され防振された鏡3枚で構成されるリング型Fabry-Perot共振器（モードクリーナー）を導入し、共振制御することで、TEM00のみを通過させます。この時、地面振動から防振された鏡で構成される共振器の共振器長は、観測帯域である程度安定化されていますので、この安定な長さを参照基準とすることで、レーザーの周波数も同時に予備安定化されます。モードクリーナーを出た光は、干渉計に導入され、ビームスプリッターで二つの腕に分離され、各腕の部分にも先述のFabry-

Perot共振器が構成され、そこで共振制御されます。この片腕を構成する鏡は、前述の防振装置によりさらに防振され、かつ後述の熱雑音の寄与も小さくする工夫がされているので、究極的に安定化された長さ基準になっており、これ（厳密には、両腕の共振器長の変位のうち、同相で変位する自由度）を参照基準とする

ことで、最終要求値 $\left(\frac{\delta\nu}{\nu} \sim \frac{3 \times 10^{-24}}{10 \times \text{CMRR}} \right)$ まで、

レーザーの周波数を安定化します。10は安全ファクター、CMRRはCommon Mode Rejection Ratioといわれる、周波数雑音が実際の干渉計の雑音となって表れる際の低減ファクターで、両腕の光学系の対称性の高さに依存し、およそ1/100です。レーザー強度雑音は、干渉計内で光の一部を光検出器でサンプルし、その信号電圧と安定化されたDC電圧を基準に、レーザーの電流などの調整により安定化制御を行う

ことで $\frac{\delta P}{P} \sim 10^{-7}$ 程度までに安定化されます。

そして、100Hz付近の感度を制限する、最も除去するのが困難な雑音が熱雑音です。レーザー光線から見ると、鏡の熱振動により、鏡の反射面が振動しているように見えます。さらに、鏡は防振のために先述の通り振り子状に懸架されていますが、その振り子の運動も熱振動で励起され鏡を揺らします。この熱雑音を低減する一つの方法が、鏡や振り子の機械的なエネルギー“損失”を極限まで低減した（機械的Q値 $\sim 10^7$ 程度）合成石英という素材で鏡とその懸架ワイヤーを作成し、かつ、その二つをHydro Catalysis Bondingという低いロスが維持できる方法で接着することです。高い機械的Q値が観測帯域での熱雑音の低減に寄与する理由は、熱雑音のエネルギーは、基本的には全周波数に等配分されますが、実際には共振体の共振特性を反映した熱雑音スペクトルを持ち、特に共振周波数での機械的Q値が大きいと、そこにエネルギーが集中する分それ以外の帯域では減少するからです。ただし、鏡には、先ほどの

ように1064nmの光だけを自在に反射透過させるための誘電多層膜が施してあり、それはSiO₂とTa₂O₅の二種類のアモルファス状物質の積層(約5μm)で構成されます。しかし、特に後者のTa₂O₅の機械的損失が大きいため、この光学薄膜が機械的ロスの原因となる熱雑音が最後に残ります。現在、そのTa₂O₅の機械的ロスを低減する研究や、代替の光学薄膜素材の探索、あるいは、レーザーの波長と鏡基材の変更も視野に入れた研究開発が行われています。

もう一つの熱雑音低減方法が、鏡とその懸架振子を20ケルビン程度に冷却する方法です。ただし、この冷却法では、熱伝導率が悪い合成石英基材を鏡としては使用できず、代わりに、単結晶の無色透明なサファイアを利用し、懸架ワイヤーにもサファイアファイバーを利用します。それは、サファイアは、低温で銅やアルミ並みに熱伝導がよくなるためです。ただし、鏡を冷却するにはそれを可能にするクライオスタット(図6)という、二重の遮熱シールドを内部に持つ真空タンクが必要です。そのシールドや鏡の冷却には、沸騰の際の振動を避ける理由から、液体寒剤ではなく、低振動化されたパルスチューブ型冷凍機を利用します。ただし、それでも、地面振動から防振しつつ、冷却しなければならないため、非常に高度で注意深い鏡の懸架と冷却の仕方の両立が要求されます。

7. 重力波の初検出！その意義とは

2015年9月4日に、アメリカのLIGOグループが人類史上初となる重力波の直接検出に成功し、その信号は、GW150914と命名されました²⁵⁾。実は、LIGOでは、2005年から2007年にかけて、歪み振幅で 10^{-21} rms程度の重力波を捉える能力で、当時3台あった重力波望遠鏡(3基目は基線長2kmでHanfordの4kmと同じ場所に設置されていた)による同時観測を行い、1年分の3台同時観測データを得ましたが、優れた重力波信号は見つかりませんでした。そ

の後、 10^{-22} の検出感度を目標としたAdvanced LIGO(aLIGO)計画が進められ、 3×10^{-22} 程度の検出能力を得た直後の2015年9月から開始予定の観測の準備運転のさなかにGW150914の検出に成功したのです。対雑音比(S/N)で24という非常に大きな信号でした。その後の解析で、さらに同年12月26日にもS/N ~ 13 ²⁶⁾、10月12日にはS/N ~ 9.7 の重力波信号、及び重力波信号候補がとらえられていたことが判明しました。

GW150914の検出は、それが人類史上初であったという意味だけではなく、①ブラックホールという天体の実在を、ブラックホール自身が発した重力波信号で直接確認し、②30太陽質量程度のブラックホールが持つ強い重力場においても、一般相対性理論がほぼ正しく成立することが判明し、③今まで未発見の中質量のブラックホールを発見したという点でも、物理学・天文学に与えた知見の大きさは計り知れません。

今回のGW150914の重力波信号(図7)の特徴は、低い周波数(ただし、観測できた下限周波数は、約35Hz)から約250Hzまで周波数が上昇するとともに振幅も上昇するチャープ波の特性を持ち、振幅が 10^{-21} まで拡大した後、急速に小さくなっていく波形で、かつ、ほぼ同じ波形の信号が、先にリビングストーン重力波望

図7 GW150914の波形²⁵⁾。二つの検出器(L1がルイジアナ州、H1がワシントン州)での信号のうち、H1の信号に対し、時間差7ミリ秒と位相の逆転を補正して重ね合わせています。位相の反転は、二つの望遠鏡の基線長の相対配置の違いが原因です(Color online)

遠鏡で観測され、その7ミリ秒後にハンフォードで逆位相で検出されたことです。得られたチャープ波形の解析から、質量が 36^{+4}_{-4} 太陽質量と 29^{+4}_{-4} 太陽質量の連星ブラックホールの合体から予想される重力波の波形で説明可能なことがわかりました。さらに、その検出時間差は、二つの望遠鏡間を光の速度で伝わる最大時間差の10ミリ秒より短く、重力波が光速で伝搬することと矛盾しません。そして、重力波信号と同時に取得している10万個の環境データ、つまり、望遠鏡の様々な場所に設置してある地面振動、音、電場、磁場、光、温湿度、電気回路信号など可能な限り多く取得した信号との相関がないことを確認し、このような特徴的な同じ波形の信号が、自然な雑音によって偶然発生するのは20万年観測して1回しかないという確率の低さを根拠に、重力波以外にはありえないと結論したのです。また、推定されるブラックホールの質量から、合体地点での重力波の絶対振幅が計算され、それと、両望遠鏡サイトで検出した振幅の比から、約 13^{+6}_{-6} 億光年離れた場所での現象と推定されました。さらに、その合体までに放たれた重力波のエネルギーは3太陽質量分（合体の瞬間は1太陽質量分程度）というとても大きく、合体後のブラックホールの推定中心質量は、62太陽質量程度と見積もられました。これに加え、その後複数の重力波イベントが観測され、かつ、すべて連星ブラックホールの合体からの重力波と推定されることから、これらのブラックホールの起源に関し、宇宙初期における金属欠乏星²⁷⁾や、原始ブラックホールの可能性の指摘²⁸⁾など、初期宇宙の星形成研究も活発化しています。

GW150914の場合、この1発の重力波の信号から非常に多くの情報が得られた一方で、その発生源の方向決定精度は600平方度 $(=\pi/180)^2$ ステラジアン)にとどまり、GW151226ではS/Nが低い分さらに悪く、特定することができませんでした。その精度を上げ

るには、3台目、4台目の“指向性の異なる”重力波望遠鏡が必要です。最低3台の望遠鏡があれば、その到達時間の差から三角測量の原理で方向を決定できます。ただし、現在の重力波望遠鏡の運転稼働率は70%程度で、3台が同時に動いている同時稼働率は、単純には34%まで低減し、いつ来るかわからない重力波を常時観測するには不十分であるため、4台目以上があることで、3台同時観測時間を稼ぐことは、重力波観測を天文学として発展させるには非常に大切なのです。

8. 世界の重力波望遠鏡と宇宙重力波望遠鏡

キロメートルクラスの基線長を持つ重力波望遠鏡計画は、デザイン通りの 10^{-21} rmsの歪み感度を達成し、望遠鏡としての運転ができることを実証する第一世代重力波望遠鏡、 10^{-22} の感度を達成し、重力波の初検出を実現する第二世代重力波望遠鏡、そして、さらに感度を改善し、重力波の波形の精密観測を目指した第三世代の重力波望遠鏡の実現という戦略で、各国が協力しながら推進しています。先のaLIGOは第二世代に相当しますが、それ以外にも、キロメートルクラスの基線長を持つ重力波望遠鏡が、世界で2基建設中です。一つが、基線長が3kmのVIRGO（ヴィルゴ）重力波望遠鏡で、主にフランス、イタリア、オランダが中心になり、イタリアのピサ市の郊外に建設され、現在は、改良を加えたAdvanced VIRGO重力波望遠鏡（aVIRGO）を構築中です。もう一つが、日本のKAGRA（かぐら）大型低温重力波望遠鏡です。KAGRAは基線長が3kmで、岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地下200メートルに深に建設中です。KAGRAは東京大学宇宙線研究所がホスト推進機関、高エネルギー加速器研究機構と国立天文台が中心的共同推進機関となり、国内の大学・研究機関と韓国グループなどの海外の大学等、合わせて約81機関、280人以上の研究者が参画している計画です。これらの望遠鏡の目標重力波感度は、すべて第二世代の

図8 重力波の波長と対応する世界の重力波観測計画 (Color online)

目指す 10^{-22} 程度で同じですが、装置の構成が少し異なります。aLIGOやaVIRGOが地表に建設され、熱雑音の低減を鏡の基材の合成石英の品質の向上と薄膜コーティングの損失の低減で克服しようとしているのに対し、KAGRAは地下という地面振動の低い場所に設置され、かつ、熱雑音の低減を、鏡や懸架装置の冷却で行い、さらに同じトンネル施設に建設された地球物理学の研究のための基線長1.5kmの地殻歪計との連携により、安定的運転を目指しています。また、2台のaLIGOと1台のaVIRGOだけでは、天球上のある方向から来た重力波に対しては、その位置決定精度が、方向によって100平方度程度でしか決まらない一方、KAGRAが加わることで、2平方度程度まで決定可能になるため、KAGRAの存在は非常に重要です。さらに、LIGOの支援を受けて、インドにも1台建設する計画も進行中です。さらに、第三世代重力波望遠鏡のデザイン研究も活発化し、重力波天文学を目指した動きは世界的に加速しています。

ただし、将来的には、地面振動や地球重力雑音が実質上の壁となり、これら地球上の望遠鏡では、低周波の重力波を受けることはできません。そこで、そもそも地面振動がない宇宙空間に重力波望遠鏡を構築する案も提案され、既に欧州宇宙機関（ESA）が主導してLISA計画が進行中です²⁹⁾。LISAでは、質量の大きな連星ブラックホールの合体や、連星中性子星の合体前の公転運動からの重力波などの検出を目指し、おおよそ1mHzの前後数桁の重力波を捉え

ようとしています。2015年11月には、その技術立証機であるLISA-Pathfinder機を打ち上げ、目標加速度雑音を実現する成果を上げ、LISA計画そのもの実現性が高まっています。その他にも、1Hz前後数桁の重力波をターゲットにしたDECIGOやBBOなどの計画も、日本や欧米などのグループから提案されています。

さらに低周波の1nHz付近の重力波に対しては、電波観測によるPulsar Timing Arrayを利用したIPTA, SKA計画が進行中です³⁰⁾。そして、ビッグバンの時に発生したと考えられている原始重力波の探索に対しては、BICEP2での結果の精査を目指し、さらに精度を向上させたBICEP3計画³¹⁾が進行中です。このように、重力波天文学においても、光の天文学と同じ多波長観測が目指されています（図8）。

文 献

- 1) Adelberger, E. G., Gundlach, J. H., Heckel, B. R., Hoedl, S. and Schlamminger, S., Torsion balance experiments: A low-energy frontier of particle physics, *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **62**, 102–134 (2009)
- 2) Dyson, F., Eddington, A. S. and Davidson, C., A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of 29 May 1919, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **220A**, 291–333 (1920)
- 3) Pound, R. and Rebka, G. Jr., Apparent weight of photons, *Phys. Rev. Lett.*, **4**, 337–341 (1960)
- 4) Nicholson, T. L., Campbell, S. L., Hutson, R. B., Marti, G. E., Bloom, B. J., McNally, R. L., Zhang, W., Barrett, M. D., Safronova, M. S., Strouse, G. F., Tew, W. L. and Ye, J., Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty, *Nat. Com-*

- mun.*, **6**, 6896 (2015)
- 5) Ushijima, I., Takamoto, M., Das, M., Ohkubo, T. and Katori, H., Cryogenic optical lattice clocks, *Nat. Photonics*, **9**, 185–189 (2015)
 - 6) Chou, C. W., Hume, D. B., Koelemeij, J. C., Wine-land, D. J. and Rosenband, T., Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al+Optical Clocks, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 070802 (2010)
 - 7) Takano, T., et al., Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks, *Nat. Photo. Lett.*, Online (2016)
 - 8) Riess, A. G., Nugent, P. E., Gilliland, R. L., Schmidt, B. P., Tonry, J., Dickinson, M., Thompson, R. I., Budavari, T., Casertano, S., Evans, A. S., Filippenko, A. V., Livio, M., Sanders, D. B., Shapley, A. E., Spinrad, H., Steidel, C. C., Stern, D., Surace, J. and Veilleux, S., The farthest known supernova: Support for an accelerating universe and a glimpse of the epoch of deceleration, *APJ*, **560**, 49–71 (2001)
 - 9) Lorimer, D. R., Binary and Millisecond Pulsars, *Living Rev. Relativ.*, **11**, 8 (2008)
 - 10) Hulse, R. A. and Taylor, J. H., Discovery of a pulsar in a binary system, *ApJ.*, **195**, L51 (1975)
 - 11) Taylor, J. H. and Weisberg, J. M., A new test of general relativity—Gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16, *ApJ.*, **253**, 908–920 (1982)
 - 12) Taylor, J. H. and Weisberg, J. M., Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16, *ApJ.*, **345**, 434–450 (1989)
 - 13) Shibata, M. and Nakamura, T., Evolution of three-dimensional gravitational waves: Harmonic slicing case, *Phys. Rev. D Part. Fields*, **52**, 5428–5444 (1995)
 - 14) Pretorius, F., Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 121101 (2005)
 - 15) Campanelli, E., Lousto, C. O., Marronetti, P. and Zlochower, Y., Accurate Evolutions of Orbiting Black-Hole Binaries without Excision, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 111101 (2006)
 - 16) Baker, J., Centrella, J., Choi, D. I., Koppitz, M. and van Meter, J., 2006, Gravitational-Wave Extraction from an Inspiring Configuration of Merging Black Holes, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 111102 (2006)
 - 17) Dimmelmeier, H., Font, J. A. and Müller, E., Relativistic simulations of rotational core collapse II. Collapse dynamics and gravitational radiation, *A&A*, **393**, 523–542 (2002)
 - 18) Weber, J., Gravitational-Wave-Detector Events, *Phys. Rev. Lett.*, **20**, 1307–1308 (1968)
 - 19) Aguiar, O. D., Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors, *Res. Astron. Astrophys.*, **11**, 1–42 (2011)
 - 20) Weiss, R., Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna, *Q. Prog. Rep. Res. Lab. Electron. MIT*, **105**, 54–76 (1972)
 - 21) Peter, R., Saulson, Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors, World Scientific Pub Co Inc., Singapore (1994)
 - 22) Abramovici, A., Althouse, W. E., Drever, R. W., Gürsel, Y., Kawamura, S., Raab, F. J., Shoemaker, D., Sievers, L., Spero, R. E., Thorne, K. S., Vogt, R. E., Weiss, R., Whitcomb, S. E. and Zucker, M. E., LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, *Science*, **256**, 325–333 (1992)
 - 23) Drever, R., Fabry–Perot cavity gravity-wave detectors, in *The Detection of Gravitational Waves* (ed. D. Blair), Cambridge, Cambridge Univ. Press, pp. 306–317 (1991)
 - 24) Aasi, J., et al., Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light, *Nat. Photonics*, **7**, 613–619 (2013)
 - 25) Abbott, B. P., et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 061102 (2016)
 - 26) Abbott, B. P., et al., GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence, *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 241103 (2016)
 - 27) Kinugawa, T., Inayoshi, K., Hotokezaka, K., Nakachi, D. and Nakamura, T., Possible indirect confirmation of the existence of Pop III massive stars by gravitational wave, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **442**, 2963–2992 (2014)
 - 28) Sasaki, M., Suyama, T., Tanaka, T. and Yokoyama, S., Primordial black hole scenario for the gravitational-wave event GW150914, *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 061101 (2016)
 - 29) Danzmann, K. and Rüdiger, A., LISA technology concept, status, prospects, *Class. Quantum Gravity*, **20**, S1–S9 (2003)
 - 30) Janssen, G. H., et al., Gravitational wave astronomy with the SKA, arXiv:1501.00127
 - 31) Ahmed, Z., et al., BICEP3: a 95 GHz refracting telescope for degree-scale CMB polarization, *Proc. SPIE 9153, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy*, **VII**, 91531N (2014)

Abstract

A New Window to Observe the Universe

—Gravitational Waves—

Shinji MIYOKI[†]: Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo, 238 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida, Gifu 506-1205, Japan

For the first time, LIGO gravitational wave telescopes have observed gravitational waves (GWs) from a coalescence of a binary black hole on September 14th in 2015. This confirmed not only a major prediction of Albert Einstein's general theory of relativity in 1915, but also the existence of black holes and their binary systems in the

Universe. The other GW signal on December 26th in 2015 was also confirmed later. Such multi-detection of GWs convinced us the beginning of a new era of gravitational wave astronomy. These GWs detections also justified general relativity in the regime of the extremely strong gravity field for the first time. However, the way to reach these historical GW detections was so hard that it took almost a half century to measure a 10^{-22} part of kilo-meters length of a laser interferometer GW detectors. In this article, I will explain the gravity and GWs in the regime of general relativity, their expected sources, a history of GW detectors development, the battle with noises in an interferometric GW detectors, results of GW detection by LIGO and future plans to detect GWs for the wider frequency ranges.