

1. 序章

2015年9月14日、アメリカのLIGO(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)プロジェクトの2台のレーザー干渉を使った観測施設が、世界で初めて重力波の直接検出に成功した。この重力波は、2体のブラックホールが衝突合体して一つのブラックホールが形成される時に放出されたものであった。

1915年にアインシュタインによって提唱された一般相対性理論を契機に、ほどなくしてブラックホールと重力波の存在が予言された。様々な観測データにより、この両者の存在は間接的にはあるが強く示唆されていた。しかし、その直接観測はいまだなされていなかった。今回の直接観測は、一般相対性理論の正しさを実証すると共に、今までは見ることの出来なかった宇宙を探る窓を開いた。

先ず、一般相対性理論と重力波の簡単な説明をした後、レーザー干渉を使った重力波検出器の原理とそれに基づいたLIGO干渉計について述べる。その後、今回検出された重力波信号の詳細と、その意味する所について解説する。最後に日本を含む世界各国で進んでいる重力波干渉計の国際ネットワークについて触れる。

2. 一般相対性理論

17世紀にニュートンは、「あらゆる二つの物体の組には、質量に比例し距離の二乗に反比例する引力が働く」とする万有引力の法則を確立した。この法則は地上や天体の多くの現象を非常に良く説明することの出来た素晴らしい理論であった。しかし天体観測技術の向上に伴い、予測と観測の間に、ニュートンの重力法則では説明できない差違が見出されるようになった。最も顕著な差違の一つは、実測された水星の近日点移動が、他の惑星の引力の影響で計算される結果より一世紀あたり43秒大きかったことである。また、万有引力は2つの物質の間の距離によって決まるので、ある物体が動くと、その変化は、どれだけ離れている物体にも、瞬時に影響を及ぼす事になるが、この重力伝搬の即時性について、ニュートンの理論は根拠を与える事は出来なかった。

1915年にアインシュタインによって発表された一般相対性理論は、これらの問題に答えを与えた。この理論は、時間と空間の概念は相対的なものである、と言う発想に基づいている。この理論では、重力は力では無く、時空の性質である。質量、即ちエネルギーが局在すると、時空が一様で無くなり、他の物質はこの歪んだ時空の最短距離をとるように運動する。その運動を3次元の世界で見ると、物質が最初の物体の重さに引かれて曲がったように見えるのである。

トランポリンを使って説明する。トランポリンのネットの上に何も乗っていない時、その上にボールをのせて転がすと、一直線に転がる。トランポリンの真ん中に人が乗ってネットがたわんでいると、ボールはその凹んだ所に引かれるように転がっていく。時空のゆがみにも同様のことが起こる。これが一般相対性理論に於ける、重力である。人がトランポリンの上を動くと、ネットのたわみも変化するが、決して変化は瞬時に起こるのでは無く、時間がかかる。これと同じように、ある物質の移動は、瞬時に他に影響を及ぼすのでは無く、光と同じ速さで伝搬していく。

一般相対性理論は、ニュートン力学で問題のあった水星の近日点移動を正確に算出した。もう一つの重要な予測が、光の伝搬も重力によって曲げられる、と言うことであった。この予測によると、地球から見て、太陽の真後ろにあって見えないはずの星が、その星からの光が太陽の重力で曲げられて、地球から観測出来ることになる。この検証がエディントン卿によって、1919年の皆既日食の時になされた。この観測値が理論の予測値と定量的に合ったことは、一般相対性理論の正しさを実証する大きな証拠となった。

一般相対性理論の予測の一つに、1916年にシュワルツシルトによって示唆されたブラックホールの存在がある。非常に大きな質量が小さな領域に閉じ込められると、その近傍の重力が非常に強くなり、何者もその中心からは重力に逆らって外に出られなくなる。これがブラックホールである。例えば、太陽が質量を維持したまま半径3 km迄縮むと、ブラックホールになる。ブラックホールの性質は、その質量と自転のみに依存する。それよりも少し密度が小さく、かろうじて中のものが外に出られる星を中性子星と呼ぶ。中性子星の重さは太陽の質量の2倍程度で、大きさは10km位である。中性子星は、一般相対性理論から導き出されるものではないが、ブラックホールを含めて色々な星の変遷を考える上で非常に重要である。

トランポリンの上で人が飛び跳ねると、ネットがそれに合わせて振動する。広いネットの場合、振動は同心円状に外に広がっていく。このような現象が時空のゆがみについて起こったものが、一般相対性理論で1916年に存在が予言された重力波である。電荷を持ったものが運動すると、その周りに電磁波が発生して伝搬するが、同様に大きな質量を持ったものが激しい加速度運動すると重力波が発生し伝搬する。宇宙を観測する従来の望遠鏡は、波長の異なる色々な電磁波を使って星の情報を得ている。重力波を使うと、同じように宇宙の様子を探ることが出来る、はずであった。しかし、重力波の場合、電磁波を捕まえるよりも遙かに微弱な影響を捉えなければならない為、実際の重力波の検出は著しく困難であった。

現代の地上の検出器を使って最初に観測出来る位強い重力波の発生源は、上に述べたブラックホールや中性子星が互いに引き合いながら衝突する時だと考えられていた。現在観測で分かっている情報と宇宙論を組み合わせると、中性子星同士の合体衝突がもっとも可能性が高い、と思われていた。それで、重力波検出器の感度は、太陽の質量の1.4倍の重さの2個の中性子星の合体消滅が観測出来る距離(単位がMpc=326万光年)で定義されている。2000年代に稼働していた第1世代の干渉計の感度は15Mpc位で、これは乙女座銀河団(Virgo Cluster)への距離に相当する。

重力波は、伝搬する方向に垂直な面内での長さを変化させる。重力波が通過する点で、伝搬方向に直交するxy面内で長さを測ると、重力波が無い時に L_0 であった長さが

$$L_x = L_0 (1 + 1/2 h \sin(2\pi f t))$$

$$L_y = L_0 (1 - 1/2 h \sin(2\pi f t))$$

のように、一方向では伸び、他方向では縮むという影響を与える。この相対変化 h と周波数 f は重力波源によって異なる。今回見つかった重力波の場合、 h は 10^{-21} 位の量で、地球と太陽の間の距離が、水素原子一個分伸び縮みする位の非常に小さい量である。周波数 f も広い範囲にわたり、宇宙の誕生から星の消滅に関わるような情報を持っている。

最初の重力波の間接的な検証は、中性子星連星の電波望遠鏡による観測で成された。中性子星が2個対になってまわっている連星パルサーから出てくる電波を精密に測定すると、200万km離れている軌道半径が、一周あたり3mm小さくなっていることが確認された。これは、この連星から重力波が放出され、その為連星全体のエネルギーが失われ軌道が変わる、とした一般相対性理論の計算結果と非常に良く一致した。この功績により、ハルスとテイラーは1993年にノーベル物理学賞を受賞した。

地上での重力波の最初の直接観測への実験は、1960年代後半のウェバーの試みに端を発する共振型検出器であった。これは、金属の円柱の共鳴周波数を、期待される重力波周波数に合わせて設計し、その共鳴によって重力波の信号を増幅して微弱な信号を捕らえようとしたものである。しかし、この方式による重力波探査観測の結果からは、有意な重力波の信号は見つからなかった。

3. レーザー干渉による重力波検出器

1970年代になって、現代の主流であるレーザー干渉計を使った重力波検出器の研究が盛んになった。

ここで、レーザー干渉計を使った重力波検出器の原理を説明する。

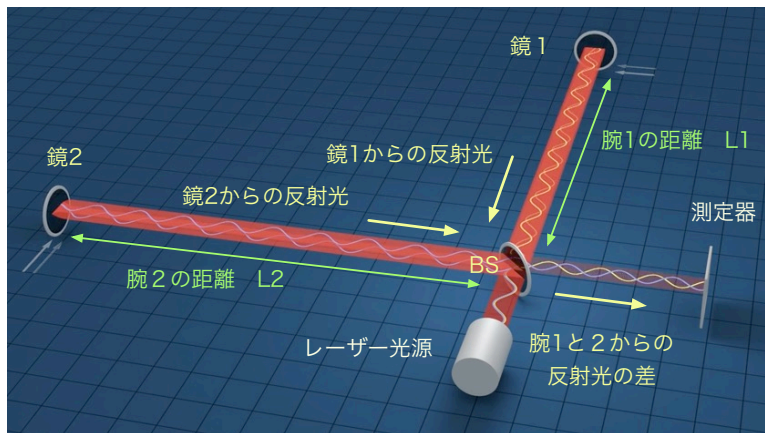


図1 レーザー干渉計の原理 <https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v6>

レーザーを、45度傾いた半透明の鏡 (BS) で直交する二方向に分ける。分かれた光は距離 L_1 と L_2 だけ離れた所に置かれた鏡で反射され、BSに戻ってくる。 L_1-L_2 がレーザーの波長 λ に比べて非常に小さい場合には、BSの空いている方向に二つの光波の差が行くことになる。ここに測定器を設置すると、測定器で観測される光の振幅は、二方向の腕の長さの差に比例するようになる。

二つの腕からの光波の差を計算する。 $E_{1/2} = E_0 \sin\left(\frac{4\pi L_{1/2}}{\lambda}\right)$ は1(または2)方向から帰ってくる波の振幅で、 λ はレーザーの波長で、LIGOを含む多くの干渉計では $\lambda = 1.064\mu\text{m} (=10^{-6}\text{m})$ である。 $\frac{L_1-L_2}{\lambda}$ が非常に小さい場合には

$$E_1 - E_2 = E_0 \left(\sin\left(\frac{4\pi L_1}{\lambda}\right) - \sin\left(\frac{4\pi L_2}{\lambda}\right) \right) \approx E_0 \cos\left(4\pi \frac{L_1 + L_2}{2\lambda}\right) 4\pi \frac{L_1 - L_2}{\lambda}$$

となる。二つの腕の長さが同じ時には、二つの波が互いに打ち消し合って、測定器には何も表れない。

しかし、重力波信号が来ると、直交する二つの腕の長さが違って来るので、2つの鏡から帰ってくる光の波が完全には打ち消し合わなくなり、腕の長さの差、 $L_1 - L_2$ 、に比例した強度の光が観測される。これが、レーザー干渉を使った重力波測定の原理である。

どのような信号を捕まえられるかは、干渉計の雑音によって決まる。重力波が無い時にも、測定器には干渉計の様々な雑音が漏れている。ラジオで音楽を聴く時、放送の無い周波数帯でもシャーとかブーというような雑音が聞こえている。周波数を放送のある所に合わせると、この雑音と音楽が混ざって聞こえる。雑音が小さければ、弱い音楽でも楽しむことが出来るが、雑音の大きなラジオでは、非常に強い放送しか聞くことが出来ない。同様に、雑音の小さい検出器を作ることが、弱い重力波を捕まえる上で最も重要である。

地上に作られる干渉計では、主な雑音源は、1) 地面の震動による鏡の揺れ、2) 光が波であると同時に粒子のような性質をもっているという量子性、3) 有限温度では、全てものが温度に比例して振動していることによる熱雑音、という三つである。この他に、漏れ出したレーザー光が壁に反射して、それが直接、間接に測定器に飛び込んでくるような、一見簡単に取り除くことの出来そうな雑音源も、現実には大きな問題である。現在、稼働中もしくは建設中である第2世代の干渉計では、陽子の大きさの1000分の1位の小さな変位を観測する必要があるので、非常に微弱な雑音も大きな影響を持つてくる。

この雑音は重力波検出器毎に異なっていて、それによって、どの位の強さの“放送”を聴くことが出来、どの音域の“音楽”を楽しめるかが決まる。第2世代の干渉計では相対変位 h で 10^{-21} 位までの測定が可能で、周波数帯に関しては10Hz から数1000Hz の範囲で雑音が低く、重力波の信号を判別することが出来る。ブーという低周波の雑音とシャーという高周波の雑音が混ざっていて、その間の音だと聞き取れるが、低周波や高周波の音は、雑音に消されて聞き取れない、と言うことである。この周波数領域は、丁度可聴領域の音波の周波数領域と同じなので、重力波信号を音波に変換すれば実際に耳で聞き取ることが出来る。

4. LIGOプロジェクト

現在のレーザー干渉計を使った重力波検出器の研究を実験面で引っ張ったのが、MIT(Massachusetts Institute of Technology) のワイスとグラスゴー大学から Caltech(California Institute of Technology) に移ったドリーバーであった。Caltech の重力理論の大家ゾーンが、この独立に行われていた二人の研究を一つにまとめた。そして Caltech のフォクトが LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) プロジェクトとして出発させた。1989年に、日本の文科省にあたる NSF(National Science Foundation) に提出された LIGO の最初の企画書には、現在使われている多くの技術が既に盛り込まれている。

1994年に、NSF から LIGO 建設の最初の大型予算が下り、20年以上にわたる1200億円を越す総予算の LIGO の歴史が始まった。この大規模計画の実現の為に、高エネルギー実験の大

家で大型計画の経験豊かな Caltech のバリッシュが責任者に抜擢された。彼の元に大型計画の実現に必要な人材が集められ、計画がスタートした。その後の重要な組織的変更が、LSC(LIGO Scientific Collaboration)の設立である。これは、世界中の LIGO に興味を持つ人達の集まりで、Caltech の LIGO 研究所と共に、LIGO の開発、運転、そしてデータ解析に参加している。現在、15 か国、83 研究団体の 1000 人を越すメンバーが活動している。

2010 年迄続いた第一期計画 (initial LIGO, iLIGO) は、原寸大の研究開発用の設備であった。干渉計の感度は 15Mpc で、予測された重力波信号の観測頻度は、10 年に 1 回以下であった。そのため LIGO の研究者も NSF も重力波の検出は期待していなかった。それ迄積み重ねてきた実験室規模の研究が原寸大の 4 km のレーザー干渉計で実際に再現できるのか、それを確かめ必要な技術を開発する為の準備段階の実験であった。この期間には、多くの予測されなかった問題が起り、干渉計が稼働してから予定感度に達するまでに 5 年近くの時間が掛かった。しかし、この時の経験が、第 2 世代の干渉計を建設、運転する上で大きな資産となった。

2003 年に提出されていた第 2 世代の LIGO (advanced LIGO, aLIGO) の建設許可が 2008 年に NSF からおりて、新しい LIGO への大規模な改造工事が始まった。建物、4km の真空筒と真空容器以外は、殆ど総入れ替えであった。その為の技術者が何十人規模で雇われた。この改造過程において、iLIGO での苦い経験が大いに役に立った。干渉計の構造にすると何十倍も複雑な aLIGO が、インストレーション終了からたったの数ヶ月で干渉計が稼働可能な状態になり、更に数ヶ月で初期予定感度に達した。

iLIGO の最後の長期運転 S 5 では、実動一年分の観測を行い、H 1、L 1 共に予定感度の 1.5 Mpc を越す感度を達成した。aLIGO の大規模改造の直前の 2009 年 7 月から一年ほど、aLIGO の技術の一部試験的に iLIGO に導入しての運転 S 6 が行われた。この時は 20Mpc 位までの感度の向上が見られた。この向上は期待した程では無かったが、新しい技術を実際の干渉計で試すことが出来たことは、大きな収穫であった。

aLIGO の最終的な設計感度は 170Mpc である。信号の数は、観測出来る体積に比例するので、到達距離の 3 乗に比例するので、この感度では iLIGO の 1000 倍程度の信号の増加を期待している。この感度の向上をする為に、次のような改良が施された。

- レーザーパワーを 20 倍にして、高周波領域の雑音を下げる
- 干渉計の光学設計を変えて、重力波信号をもっているレーザー成分をより有効に使う
- 鏡の重さを 4 倍にし、その表面多層薄膜反射層の設計を改良することで、熱とレーザーの反跳による雑音をさげる
- 鏡を吊すワイヤーをスチールから石英ガラス繊維に変えて、熱雑音を下げる
- 鏡を 4 段振り子に吊し、その振り子を乗せる台を改良して、地面振動の影響を軽減する

aLIGO の予定では、2015 年の秋からの最初の観測運転 O 1 では 40 から 80Mpc の感度を、2016 年からの O 2 では 80 から 120Mpc を、2017 年からの O 3 では 120 から 170Mpc を目標にしていた。しかし、H 1、L 1 共に 2015 年の 6 月には既に 70Mpc に達していた。70Mpc の感度では、iLIGO に比べて信号の数が 100 倍になるので、O 1 の 3 ヶ月の運転期間中に信号を観測出来る可能性はあった。

ここで観測を期待されていたのは、太陽の質量の 1.4 倍位の中性子星の合体であった。しかし、実際に観測されたのは、太陽の質量の 30 倍位のブラックホールの合体であった。

5. 重力波信号

2015 年 9 月 14 日午前 4 時 50 分 45 秒、米国ルイジアナ州リビングストーンにある重力波干渉計 (L1) で重力波信号が観測された。その 7 ミリ (7/1000) 秒後に、ワシントン州ハンフォードにあるもう一台の干渉計 (H1) で、全く同じ波形の重力波信号が観測された。

(a) 干渉計の位置

(b) 砂漠の中の H1

(c) 湿地帯の中の L1



図 2 LIGO 干渉計

Caltech と MIT の共同実験グループ LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) が建設し運転するこの 2 つの測定装置は、レーザーが行き交う 4 km の真空の筒の腕を持つ L 字型をした施設である。重力波信号は、この 4 km の腕を陽子の大きさの 1000 分の 1 だけ揺すって通り過ぎていった。この重力波信号はその日付けに因んで、GW150914 と名付けられた。

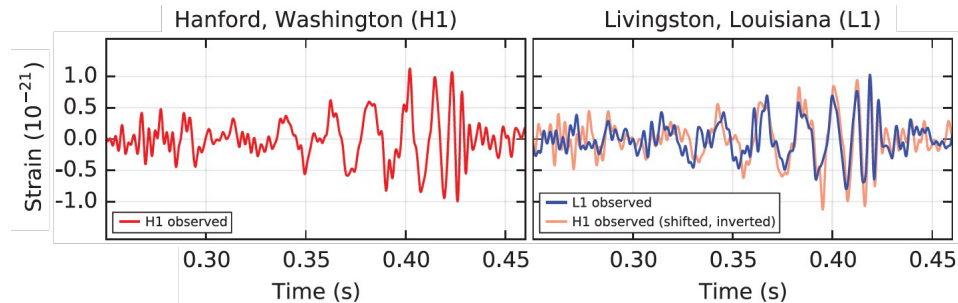


図 3 GW150914 の信号：腕の長さの差の時間変化

図 3 の左側は H1 で観測された信号で、右側は L1 での信号である。横軸は時間であるが、信号は 0.1 秒位の間、観測されている。縦軸 (Strain、単位は 10^{-21}) は、測定された 2 本の腕の長さの差を、腕の長さの 4 km で割った量である。振幅が 1 の時には、腕の長さの差が $4000\text{m} \times 10^{-21} = 0.004 \times 10^{-15}\text{m}$ だけ違っていることを示している。 10^{-15}m が陽子の大きさであるので、腕の長さが陽子の大きさの 500 分の 1 だけ伸び縮みしたことになる。振幅が正の時

には一方が他方より長くなり、負の時には短くなっている。右側のグラフでは、H1 で観測された信号を、7 ミリ秒だけずらせて L1 の信号と重ねている。これから分かるように、2 つの干渉計で測定された信号は同じ形をしている。

H1 と L1 は 3000km 離れている。重力波は光の速度で伝搬するので、もし H1 と L1 を結ぶ線上から重力波が来ると、2 つの測定器に到達するまでに 10 ミリ秒のずれがおこる。例えば H1 と L1 を結ぶ線の真ん中の面上のどこかから来ると、2 つの測定器は同時に信号を捕まえることになる。このように、2 つの観測場所での時間のずれは、重力波源の場所の特定に役立つ。後で詳しく述べるように、複数台の測定器で同時観測をすることのもう一つの大切な理由は、雑音を信号と誤認識しないように選別することにある。

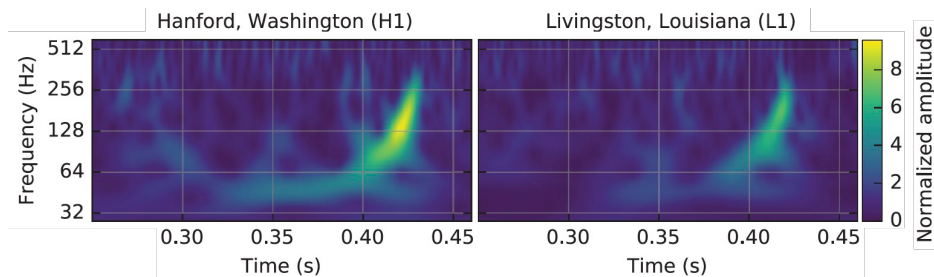


図 4 GW150914 の信号：腕の長さの差の周波数成分の時間変化

図 4 は、振動する信号の周波数成分の時間変化を示している。この図では右端のスケールが示す薄い色の所が強い周波数成分なので、0.1 秒足らずの間に、35Hz 位から 250Hz 位まで、周波数が急激に増えたことを示している。これは重い小さな星が互いに引き合いながらまわって、最終的に合体する場合に特有の **chirp** と呼ばれる信号である。この周波数帯は人間の耳で聞こえる領域なので、次のサイトに行くとこの信号の時間変化を聞くことができる。

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v2>

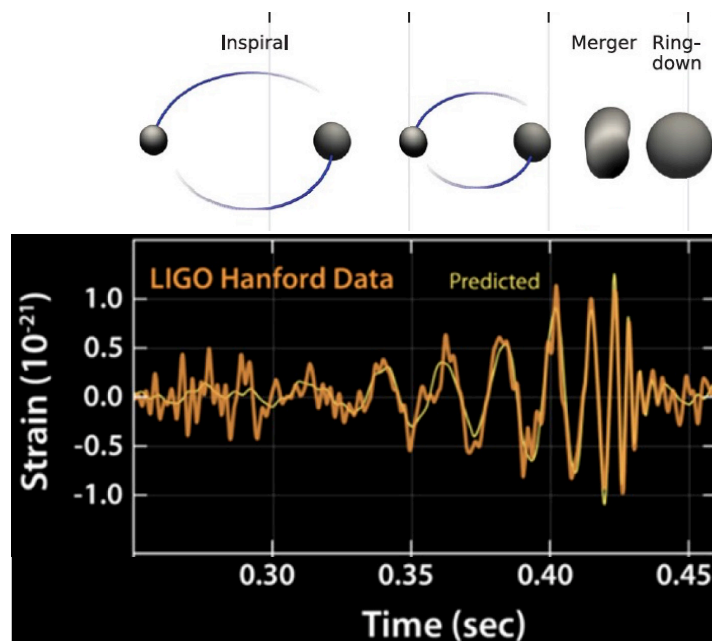


図 5 GW150914 と一般相対性理論の比較 (H1)

図5は測定データ (Hanford Data) と一般相対性理論にもとづいて全課程を数値計算で計算した結果(Predicted)の比較である。

一般相対性理論によると、この重力波信号は、2つのブラックホールの連星の合体によって発生したものである。この過程には、次の3つの時期がある。少しずつエネルギーを放出して相対距離を縮めながら互いの周りを回る公転運動期(inspiral)、距離が十分小さくなり衝突して新しいブラックホールが形成される衝突合体期(merger)、そして合体して形成された不安定な新しいブラックホールが振動しながら定常状態に落ち着いていく減衰振動期(ringdown)、である。

2つの線が全領域で非常に良く一致しているのは、単純な振動の公転運動期だけで無く、衝突合体し、その後の激しい揺れが収まっていく減衰振動期にわたって、一般相対性理論が観測結果を非常に良く再現できることを示している。

一般相対性理論と観測結果の比較は、合体で出来るブラックホールの質量と自転速度、減衰振動の詳細、ニュートン力学の予言からのずれのブラックホールの速度への依存性等、詳細にわたって行われた。観測に関与した測定器はaLIGOの2台だけであることなど制限は多いが、データの精度内で見事に一致している。

ブラックホール連星の合体の時に放出される重力波の時間変化は、関与するブラックホールの質量と自転速度、そして重力波源と観測場所の関係で決まる。GW150914の信号と理論の比較から、太陽の質量 ($M_{\odot}=1.989 \times 10^{30} \text{kg}$) の3.6倍と2.9倍のブラックホールが合体して、太陽質量の6.2倍の重さのブラックホールが生成されたことが分かった。そしてこの衝突は、1.3億光年離れた所で起こっていた。衝突した2つのブラックホールの自転は確認されなかったが、生成されたブラックホールは自転していることが分かった。

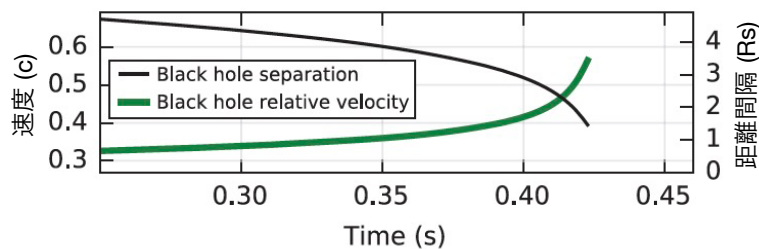


図6 GW150914のブラックホールの運動

図6の太い線 (relative velocity) は、衝突する2つのブラックホールの相対速度である。左の軸の単位を見ると、初めは光速の30%位から始まり、衝突の瞬間には60%位まで加速されていることが分かる。同図の細い線 (separation) は、2つのブラックホールの間の距離である。右の軸の単位はブラックホールの大きさを表すSwartzschild半径 ($2GM/c^2$) で、この場合 ($M=62M_{\odot}$)、183kmである。この図から、2つのブラックホールは1000km位離れた所から、急激に接近して合体していることが分かる。太陽の質量の何10倍もの重さの星が数100kmしか離れていない所に存在し、150Hz以上の周波数の重力波を出すことの出来る連星として考えられるのは、ブラックホールの連星しか無い。

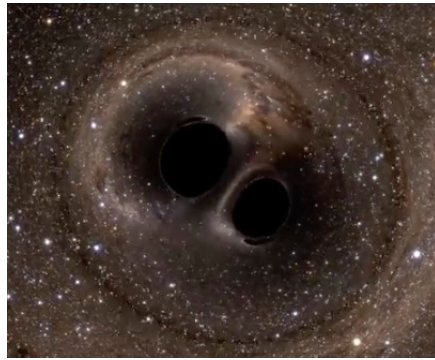


図7 GW150914 の一般相対性理論に基づくコンピューターシミュレーション

図7は GW150914 の一般相対性理論に基づくコンピューターシミュレーションによる合体直前の様子である。2つの黒い目玉がブラックホールで、目玉の半径は各々90km位(断面積で四国位)で、各々の中に太陽の30倍近い質量を持っている。周りのレンズのような構造は、ブラックホールによって引き起こされる空間の歪みが後ろの景色を歪めているのである。全過程のシミュレーション画像が次のサイトにある。

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v3>

合体で出来たブラックホールの質量は、合体した2つのブラックホールの質量の合計より、太陽質量の3倍少なくなっているが、この質量の差は、図8のように重力波として放出された。放出の全課程を次のサイトで見る事が出来る。

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v4>

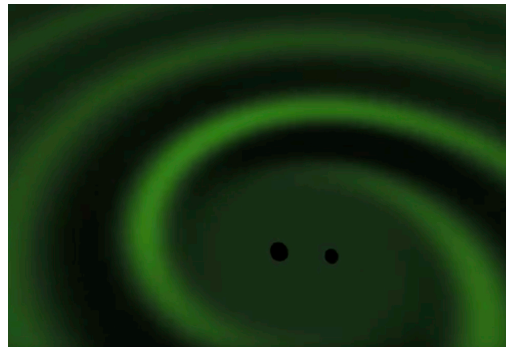


図8 GW150914de で放出される重力波のコンピューターシミュレーション

相対論によると、エネルギーと質量は $E=mc^2$ の関係で結ばれている。放出された太陽3個分に相当するエネルギーの瞬間最大光量 (3.6×10^{54} erg/s) は、観測可能な宇宙の全ての星や銀河から放出される電磁エネルギーの合計よりも何10倍も大きかった。このエネルギーが全て光として放出されていたら、光が伝搬するのに13億年かかる遠方で起こった衝突が、伝搬に1.3秒しかかからない月の満月の明るさで見えたことになる。

これだけ大きなエネルギーが放出されながら、重力波が引き起こした効果は、地球と太陽の距離を、水素原子一個の大きさだけ変化させる位の、非常に微弱なものであった。これは、

重力波と他の物の相互作用が非常に弱い為である。それゆえ、重力波は非常に遠くまで伝搬することが出来るが、捕まえることは非常に困難である。電磁波であるランプの光とラジオの信号を比べてみる。ランプの光は、見る為には何の道具も要らないが、壁を通り抜けることは出来ない。逆に、ラジオの信号は、特殊な受信機が必要だが、壁も山も通り抜け遠くに届く。同じように、重力の波を捕まえるのは、電磁波を捕まえるより難しいが、それだけ遠くの古い時代の情報を担っている。

4km の腕の長さを 10^{-18}m の精度で測定するのは非常に困難なことである。大勢の人達が、色々な技術を開発してこの問題に挑戦してきた。図9は、図3の観測データから図5の理論で予言される滑らかな成分を引いた残りである。これが雑音である。信号の強度がこの雑音の振幅より小さいとその存在を確認することが難しくなる。

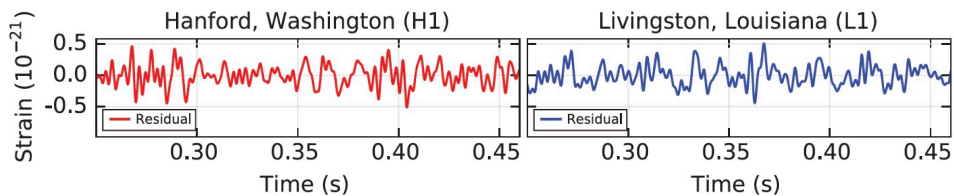


図9 GW150914 の雑音

雑音は色々な原因で起こるが、観測された信号が、雑音がたまたま理論の予言する信号と誤認される可能性がある。これが起こる頻度を誤認率(false alarm rate)と呼ぶ。

複数の観測装置で、雑音がたまたま同時（二つの干渉計の間の距離で許される到着時間のずれ以内）に信号のように誤認される可能性は著しく低い。その為、複数台の観測装置を使っての同時測定は、誤認率を下げるのに不可欠である。LIGOは、西海岸のワシントン州と中部のルイジアナ州に、同じ設計の2台の観測装置を作って同時に運転しており、今回の観測でも非常に役に立っている。

誤認率は次のようにして評価された。L1とH1で観測された実際の時系列データを10ミリ秒以上ずらせて組み合わせ、あたかもそれが実際に2カ所で観測されたデータとして、重力波信号を探した。本当の信号は2つの装置に10ミリ秒以内に到達するので、こうやって組み合わせで作った偽のデータには、信号は含まれていない。

このようにして評価されたGW150914の誤認率は、20万年に一回以下であることが確かめられた。この誤認率は、このような誤認の起こりうる実験科学で基準にされている要求(5シグマの要求、過ちの確立が100万分の0.6以下)を満たしている。重力波初検出の論文で発表されたのは、解析が終わっていた2015年9月12日から10月20日迄の実験結果である。その期間内に、9月14日の強い信号であるGW150914の他に、10月12日に重力波らしい信号があるが、その信号の誤認率は2.3年に一回であり、これは雑音がたまたま信号のように見えた可能性を否定できない。

6. LIGOによる観測とその意義

今回、重力波が初めて検出され、一对のブラックホールの合体が、初めて観測された。一般相対性理論の理論値との比較から、その理論の正当性が実証された。今まで、弱い重力場でしか詳しい検証が成されていなかったが、今回の観測結果から非常に強い重力場が存在するブラックホールの近傍でも理論が検証された。この合体で観測された、太陽質量の数 10 倍の質量をもつブラックホールは、今まで観測されたことが無かった。そのため今回の観測結果は、恒星の進化に対して新しい見方を与えることになるであろう。

しかし、今回の観測の一番の意義は、重力波を使った新しい天文学が開けたことにある。400 年前にガリレオが望遠鏡を天体観測に使うことで、宇宙観が変わった。今回の重力波の検出とブラックホール合体過程の観測は、今まで光やニュートリノでは知る事の出来なかった宇宙を、重力波という全く新しい信号を使って探ることが出来ることを実証した。

7. 重力波干渉計国際ネットワーク

2000 年代に幾つかの重力波干渉計が世界中で稼働した。アメリカの LIGO、イタリア-フランス-オランダ共同でイタリアのピザに作られた Virgo、ドイツ-イギリス共同でドイツのハンノーバーに作られた GEO、日本の三鷹の天文台に作られた TAMA である。これらの最初の世代の干渉計の感度は低く、観測目的では無く、重力波干渉計の原理を原寸大で確認し必要な技術を開発する為のものであった。

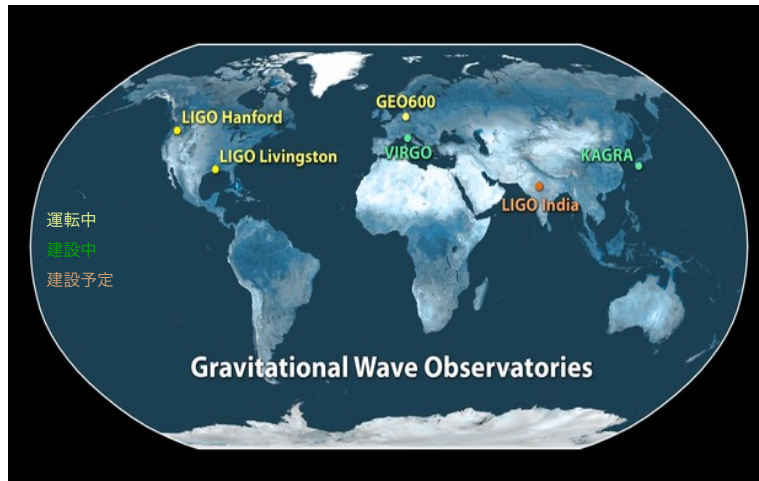


図 10 世界の地上重力波干渉計

今、世界中で第 2 世代の干渉計の建設が進んでいる。その大きな目的は、国際的な重力波干渉計ネットワークの形成である。それが出来た時初めて、重力波をつかった天文学が始まる。その一日も早い達成の為に、各国の干渉計グループは、互いの資産・情報を共有している。

第 2 世代の LIGO は、既に 2015 年 9 月から 2016 年 1 月迄の最初の観測運転を終え、重力波発見という大きな成果を上げた。現在、更に感度を上げる為の改良がなされており、2016 年

秋からの 2 回目の観測運転に向けての準備を進めている。Virgo は第 2 世代への改良の一部を完成し、2016 年秋から、LIGO と一緒に観測を始められるよう、準備をしている。GEO のグループは非常に先進的な技術開発に取り組んでおり、aLIGO の技術は、この GEO の技術開発によるものが多い。

日本の KAGRA は第 2.5 世代ともいえる干渉計である。この干渉計は、神岡鉱山の地下に建設され、鏡を超低温に冷やして熱振動による雑音を減らして感度を上げようとしている。これはヨーロッパ連合が計画している E T (Einstein Telescope) 等で考えられている第 3 世代干渉計の技術を先取りしたデザインである。数年以内の出来るだけ早期の運転開始を目指している。

LIGO-India は、aLIGO 仕様の部品を一式インドに提供して、アメリカとインドの共同で aLIGO に相当する干渉計をインドに建設しようとの計画である。建設に関して紆余曲折があったが、aLIGO が重力波を見つけてから急激に話がまとまり、3 月 31 日に建設にむけての覚え書きが調印された。2020 年代前半の運転開始を目指している。

8. 最後に

400 年前から、観測データという限られた証拠を用い、限られた摘要範囲の中で、万有引力を含むニュートン力学の法則の正当性の検証が繰り返されてきた。

その後、一般相対性理論が、ニュートン力学を包含するものとして登場し、より多くのデータを使いより詳細にわたる検証が行われ、その正当性が確認されてきた。同じように、今回の観測による、重力波やブラックホールを含む一般相対性理論の正当性の確認も、限られた範囲でのものである。

例えば、H1 と L1 の腕の向き関係で、重力波の偏光に関して情報は得られなかったため、偏光の情報を使っての理論の絞り込みは出来なかった。また、一般相対性理論では、重力波は質量を持たず光と同じ速度で伝搬するが、現在の重力量子の質量の上限は $2 \times 10^{-55} \text{ g}$ であり、有限質量の可能性を排除できない。

LIGO はこれからも、更に改良を重ねて感度を上げていく予定である。そして、電磁波を使った各種望遠鏡との共同観測も重要になってくる。しかし、2 台の干渉計のみ使った観測では、出来ない事が多くある。例えば、重力波源の特定には 3 台以上の干渉計による観測が不可欠で、偏光の情報を得るには、適当な向きの腕を持った干渉計間のデータの相関解析が必要である。その為には、3 台以上の良い感度を持つ干渉計が、出来るだけ距離を離して存在することが必要である。国際ネットワークの確立である。それが出来る様になった時、電磁波を使った天文学と重力波を使った天文学が、全く新しい情報を提供出来ることになる。

謝辞

この文献を準備するにあたり、LIGO 研究所の新井宏治氏、河邊慶太氏、和泉究氏に非常に有益な批評を頂いたことを感謝する。LIGO は米国国立科学財団の資金援助を受け、カリフォルニア工科大学とマサチューセッツ工科大学が建設し、共同契約 PHY-0757058 に基づいて運営されている。この文献の文献番号は LIGO Document Number LIGO-P1600122 である。