

連星ブラックホール合体からの重力波の観測

一世紀前に出版されたアインシュタインの一般相対性理論は、「万物の本質に対する、人間の思考の最大の偉業」として物理学者マックス・ボルンによって賞賛された。我々は、重力波の初観測と、一対のブラックホールの衝突・合体の初観測について報告する。これは、一般相対性理論の重要な予測を裏付ける、2つの科学的発見といえる。

我々が観測したブラックホールのドラマチックな衝突は、地球から約10億光年以上離れた銀河で起こり、重力波信号GW150914を生成した。このイベントは、世界で最も高感度な歪みを検出するための装置 - レーザー干渉計重力波天文台 (LIGO) - の二つの検出器によって、2015年9月14日に観測された。ブラックホール衝突の最後の瞬間に重力波として放射される最大出力パワーは、観測可能な宇宙の全ての星や銀河による光学パワーよりも10倍以上大きいと推定されている。この驚くべき発見により、宇宙に向けたまったく新しい窓が開けたといえる。まったく新しい、重力波天文学の始まりである。

イントロダクションと背景

重力波は、非常に重くコンパクトな星の衝突や合体といった、宇宙の中で最も激しい事象によって生成される時空の「波紋」だ。非常に重い物体が加速運動する時に時空は激しく揺らされ、その時空の歪みが光速で伝わっていく。重力波は宇宙空間を光速で伝わることで、波源となる事象の起源についての情報や、重力自体の性質に関する貴重な手がかりを運ぶ。アインシュタインは、1916年にこの現象を予測した。

過去数十年にわたり天文学者たちは、我々の銀河内にある、互いの周りを回る一対の中性子星 (連星中性子星) の軌道を調べることで、重力波が存在するという強力な証拠を得てきた。

これらの間接的な研究の結果は、アインシュタインの理論と非常によく一致した。互いの周りを周回する連星中性子星が、重力波の放射によりエネルギーを失いながら近づいていく過程は、まさに一般相対性理論で予測された通りであった。しかし、科学者のあいだでは、地球に到達する重力波を直接的に観測するということが長年の夢でもあった。なぜなら、直接観測は、極端な条件下で非常に厳密に一般相対性理論をテストできる方法であり、またそれが宇宙を探索するための新しい道を開くと期待されていたためだ。

アインシュタインが重力波を予測した同年、カール・シュヴァルツシルトは、アインシュタインの理論に従えば、ブラックホールというものがあることを示した。非常に密度が高くコンパクトで奇妙な物体は、光さえもその重力場から逃れることができないというものであった。定義によると、直接ブラックホールから出る光を「見る」ことは不可能だが、天文学者たちは、ブラックホールらしき物体が近傍に及ぼす効果を調べて、ブラックホールが存在する状況証拠をたくさん発見してきた。例えば、天の川銀河を含むほとんどの銀河の中心には、太陽の数百万から数十億倍もの質量をもつ超巨大ブラックホールがあるとされている。それに加え、太陽の数倍から数十倍の質量をもつ、はるかに小さい質量をもつブラックホールの候補がいくつもあるという証拠も存在する。それらはコア崩壊型超新星として知られる、非常に激しい爆発を遂げて死んでいった星の残骸と考えられている。

近年では、上記のようにブラックホールの間接的な観測が大幅に発展したのと平行して、ブラックホールの理論的な理解も進んでいる。過去10年間では、最後に合体する直前の連星ブラックホールの軌道を、コンピュータを使ってモデル化することも可能になった。ブラックホールが互いに接近してゆき、最終的には合体して、より巨大な単一ブラックホールになるという過程で放出される重力波がどんな波形をしているか、一般相対性理論に基づいてコンピュータで正確に予測できるようになったのである。このように、連星ブラックホール合体を直接観測するということは、まるでアインシュタイン理論を検証するための、壮大な宇宙実験室だともいえる。

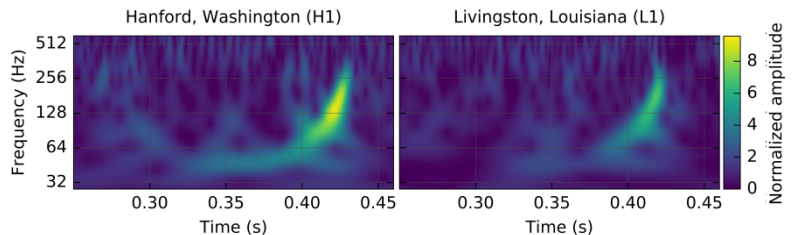


図1. (論文の図1より抜粋)。LIGOハンフォード (H1, 左図) およびLIGOリビングストン (L1, 右図) 検出器で観測された重力波イベントGW150914。二つの図は、LIGO検出器内に引き起こされた重力波による空間の歪み (下記参照) の変化を、時間 (秒) と周波数 (ヘルツ、または秒あたりの波のサイクル数) で示したものである。図は両方とも、GW150914の周波数が35ヘルツから150ヘルツまで、1秒の20分の1の間に急激に増えた様子を示している。- GW150914は最初にL1へ、ついでH1へ時間差7ミリ秒で到着した。これは重力波が2検出器感を通るのにかかる時間と一致する。

ホームページはこちら

<http://www.ligo.org/>



#GravitationalWaves

#BinaryBlackHole

#EinsteinWasRight

LIGO 検出器

LIGOは、世界最大の重力波観測所であるとともに、世界で最も洗練された物理実験の一つである。ルイジアナ州リビングストンとワシントン州ハンフォードという、数千キロも離れた2か所に、一台ずつ巨大なレーザー干渉計がある。レーザー干渉計は、重力波を検出するために、光と空間の歪みを測定する。この概念は、最初に1960年代から1970年代初頭にかけ提案された。日本のTAMA300、ドイツのGEO600、アメリカのLIGO、イタリアのVirgoといった初期の干渉計は、みな2000年代初期に完成した。これらの干渉計によって、2002年から2011年の間にかけ共同観測を行ったが、重力波は検出されなかった。LIGO検出器はその後大きくアップグレードされ、2015年からAdvanced LIGOとして稼働を開始した。初期の干渉計デザインに比べると、かなり感度が改良され、世界各地の干渉計ネットワークのなかでも、次世代の干渉計として一番最初のアップグレードであった。

LIGO干渉計は長さ4キロの「アーム」二本からなり、アームは互いに90の角度を成す。レーザー光はアームにそって進み、各アームの終点にある振り子で吊られた鏡（テストマス）によって反射される。重力波が通過すると、空間の歪みは干渉計のアームを交互に伸び縮みさせる。つまり一方のアームが縮むと、他方のアームは伸びるという具合である。干渉計のアームの長さが変化すると、レーザー光がアームを行き来するのにかかる時間も変わる。つまり、二つの光の波のパターンがそろわなくなる（位相がずれる）ことで、干渉光パターンが現れる。これがLIGO検出器が「干渉計」と呼ばれる理由なのだ。

2つのアームが長ければ長いほど、より小さい重力波による歪みをとらえることができる。この歪みは気が遠くなるほど小さい。検出できる重力波の歪みは、陽子の大きさの約一万分の一ほどである！これほど微量な変化も検出できるほどに、LIGO干渉計は高感度にできている。

図2に、Advanced LIGO検出器の簡略図を示す。

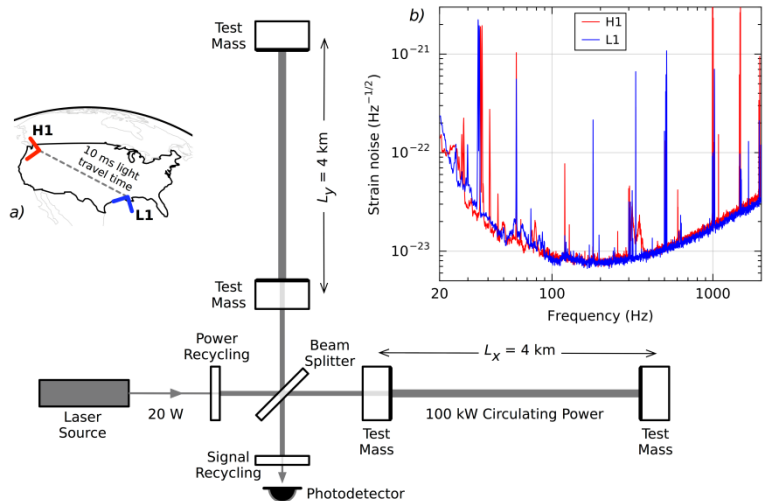


図2. Advanced LIGO検出器の簡略図（正確な縮尺ではない）。基本のレーザー干渉計に加え、以下のような新しいテクノロジーで感度をより向上させている：各アーム間にレーザー光を何回も往復させ、重力波の影響を増幅させる（光共振器）。干渉計全体の実効的なレーザーパワーを増加させるためのパワー・リサイクリング・ミラー。光検出器で得られた信号帯域をさらに最適化する、シグナル・リサイクリング・ミラー。これらのテクノロジーによって、共振器内の光のパワーを5000倍に増やし、信号は干渉計内により長く滞る。

左側の挿入図 (a) は、2か所のLIGO天文台の位置と向きを示し、2地点間の光の移動時間を示す。挿入図 (b) は測定器のノイズが今回イベントが起きた時点で、各検出器において周波数によって変化する様子を示す。測定器のノイズが小さければ小さいほど、感度は高くなる。大きなスパイクは、狭い周波数範囲で、測定器のノイズが多いことを示している。

GW150914のようなイベントを検出するには、LIGO検出器が非常に高い感度で稼働していることと、本物の信号と測定器のノイズを分離する機能が備わっていることが必要である。例えば、検出器の周りの環境や、検出器そのものからくる微小な揺れは、検出しようとしている信号のパターンに似ていたり、信号よりも大きかったりする。Advanced LIGOが2つの検出器を用いるのもまさにこのためだ。2台の干渉計を比べることによって、本物の重力波信号と、どちらかだけに存在する局所的なノイズや環境からの影響を区別することができるからだ。本当の重力波信号のみが、二つの検出器間を伝わる時間差（数ミリ秒）を経て、2台の検出器両方に現れる。

図2の挿入図 (b) は、LIGO検出器内の測定器ノイズの周波数依存性を示す。測定器ノイズは数百ヘルツあたりの「スイートスポット」と呼ばれる周波数帯域で最も低いが、低周波数と高周波数の両方では急激に増加する。特に大きく鋭いスパイクは、例えば各干渉計におけるテストマスや、それを吊るしている振り子の振動などである。

Advanced LIGOの感度をはるかに改善するためには、以下のように、初期のデザインのほぼすべてをアップグレードする必要があった。

- レーザーパワーを増加し、高周波数でのノイズを低減した
- リサイクリング・ミラーのデザインを改良し、レーザー光の空間分布をよりよくした
- 大きく重い溶融シリカテストマスを使用して、ミラーのランダムな動きを減少させた
- 石英ガラス繊維によってテストマスを吊り、振り子による熱雑音を低減した
- 4段振り子からテストマスを吊り、地面振動の影響を低減した
- 「測定してキャンセルする」というアクティブな技術を用いて地面振動の影響をさらに低減した

Advanced LIGO を支える高度な技術についての詳細はこちら:

<http://tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf>

2台以上の検出器からなるネットワークにより、各検出器においての到着時間差を測定することで、重力波がどの方向からやってきたかを三角測量することができる。検出器の数を増やせば増やすほど、重力波源が空のどの位置にあるかがより正確になる。イタリアにあるAdvanced Virgo検出器は2016年に、グローバルネットワークに参加する予定である。その他のAdvanced型干渉計も、将来にむけ計画されている。詳細はこちら<http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>.

LIGO による観測とその意味

2015年9月14日グリニッジ標準時間09:50:45、LIGO のハンフォードとリビングストンにある2つの天文台でGW150914からの信号が捕らえられた。信号は最初に、低遅延サーチと呼ばれる解析方法によって見つけられた。この方法は、重力波波形に似た波形パターンを、正確なモデルなしで探す方法で、非常に迅速に（低遅延）検出器データを解析することができる。この方法により、信号が検出器に到達してわずか**3分間**以内で、重力波イベント候補の信号として報告された。LIGO干渉計で取得された重力波ストレインのデータは、次に、理論的に予測された様々な波形と比較された。この解析方法は**マッチド・フィルタリング**と呼ばれ、データに一番合う波形を探す方法である。

図3は論文に示された解析の結果を示す。2つのブラックホールの合体によって生成されたGW150914の信号が示されている。図の中央部分は、ハンフォード検出器が検出した重力波ストレインを再構成したものである。この灰色で示された検出パターンと、赤で示された、一般相対論から計算された合体するブラックホールの波形が見事に一致することに注目してほしい。

上部に示されている図は、この重力波信号のそれぞれの段階に対応したブラックホールの状態である。**インスパイラル**とは、2つのブラックホールが互いに接近していく段階、**合体**とは、ブラックホールがくっついた段階、それに続く**リングダウン**とは、新しく生成された単一のブラックホールが静まるまでに短期間振動する段階である。

検出されたストレインのデータと、理論的に予測されたモデルを比べることで、一般相対性理論がこのイベントの全過程を予測できているかをテストすることができる。今回の比較は、見事にテストに合格した。観測されたデータ全てが、一般相対性理論の予測と見事に一致している。

また、このデータを使って、GW150914を生成したイベントの物理的な特徴を推測することができる。2つのブラックホールの合体前の質量、合体後の単一ブラックホールの質量、さらにそれが地球からどれほど離れたところで起こったか、などを推定できる。

結果として、GW150914が、それぞれ太陽の質量の約**36倍**と**29倍**ある2つのブラックホールの合体によって生成されたものだということが判明した。また合体後のブラックホールは太陽の質量の約**62倍**であることがわかった。さらに、合体後のブラックホールは回転していると推測される。回転するブラックホールの存在は、1963年に数学者ロイ・カーにより、初めて理論的に予測されたものである。そして、我々の解析によると、GW150914は**10億光年**以上遠くで起こったイベントであることがわかった。つまり、LIGO検出器は、遠い昔遙か銀河の彼方で起きた、驚くべき現象を観測したのだ！

合体の前と後のブラックホールの質量を比較することで、この合体により**太陽の約3倍の質量**（または、またはほぼ**600万兆キログラム**）が重力波エネルギーに変換され、そのほとんどが一瞬にして放出されたことがわかる。ちなみに太陽が電磁波として放射しているエネルギーは、毎秒たったの質量の1兆分の1のさらに一億分の2のエネルギーだけである。実際、GW150914によって放射された重力波のパワーは、**観測可能な宇宙の全ての星や銀河**による光学パワーよりも10倍以上大きいのである。

どうしてGW150914がブラックホールだったとわかるのか？

GW150914の合体前の2つの物体は、非常に強力な根拠によって、ブラックホールであったといえる。これは、特に図3の下側に示されているように、信じられないほどの**高速度**や、接近した時の2つの物体間の**距離**によって分かる。この図によれば、2つの物体の指標速度が光速にとても近くなっている。2物体間のおよその距離は、その**シュバルツシルト半径**として知られる、特徴的なブラックホールのサイズの、たった数倍である。

図は、これらの物体が合体する寸前には、互いの距離がわずか数百キロメートルしかなかったことを示唆している。重力波の周波数が約150Hzになってもなお、2物体が合体することなくこれほど接近するには、2つの物体がブラックホールである以外にはありえない。推測されたトータル質量からして、一對の**中性子星**ではこれほど重くないし、ブラックホールと中性子星のペアでは、150Hzより低い周波数で合体したはずだからである。

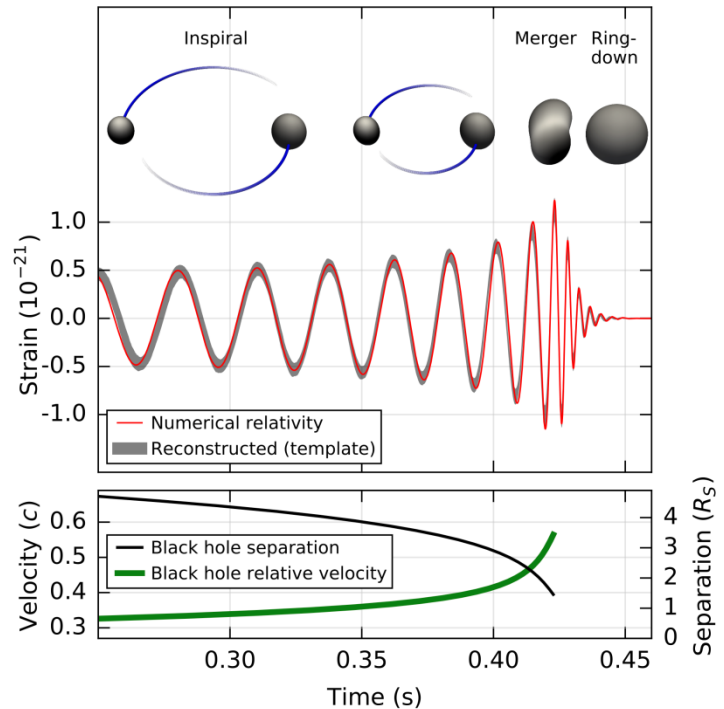


図3. GW150914の主要な結果。これはハンフォードH1で検出された重力波ストレインの再構成されたデータと、一般相対性理論から計算された予測波形との比較である。連星ブラックホール合体の3つの過程（インスパイラル、合体、リングダウン）において比較された。下図は、ブラックホール間の距離と速度、さらに合体が進むにつれてその変化の様子を示す。

本当にGW150914が宇宙物理学的な出来事だったと確信していえるか？

短く答えれば、イエスである。これは重要な問いかけであり、LIGO科学コラボレーションとVirgoコラボレーションが解明に取り組んできた。それには様々な独立した解析が必要であったが、それらの結果全てがGW150914の検出を裏付けるものとなった。最初の理由は、すでに述べた通り、各LIGO検出器における観測時間の差が、光がそれら2つの場所を伝わる時間と一致したことである。さらに、図1に示すように、ハンフォードとリビングストーンでみられた信号は、とても似通ったパターンを表している。これは二つの干渉計の向きが似通っているからである。さらに検出された信号が、このイベントが起きた時間におき、まるで人ごみの中で雑踏の音を背景に、大きな笑い声が聞こえるかのように、背景の雑音に比べ「際立って」大きいことも挙げられる。

この背景の雑音を理解することは、解析において非常に重要なことであり、両方のサイトで記録された、たくさんの**環境データが必要**となる。地面振動、温度変化、それに送電網のゆらぎなど、挙げればきりが無いほどだ。同時に、多数のデータチャンネルがリアルタイムで**干渉計の状態**をモニターしている。それらのチャンネルを解析することで、例えば複数のレーザー光が適切にセンタリングされているかなどのチェックを行う（データクオリティチェック）。もしこれらの環境チャンネルや装置チャンネルに問題があれば、検出器のデータは破棄され、重力波サーチには用いられない。イベントが起きた時刻にも、検出器の状態や環境情報が徹底的にチェックされたが、問題は発見されなかった。

それでももしかするとGW150914は、両方の検出器で、似通った特徴をもった雑音の乱れがたまたま同時に起きただけではないのか？この可能性を否定するためには、この偶然がどのくらい稀であるかを考えなければならない。偶然で起きる可能性が少なければ少ないほど、より確信を持って、GW150914がたまたま起きたケースではなく、まさに本物の重力波イベントであった、ということができる。

この解析を実行するために、同月の16日分のデータクオリティチェックをクリアした検出器データが用いられた。GW150914は、その16日中どちらの検出器においても、圧倒的に大きな信号であったが、それがどれぐらいの頻度で起きるのかを調べる必要がある。そこで、H1とL1の時系列データを重ね、連続的にずらしていくことで実効的に元のデータよりも長いデータを作った。そこに、GW150914と同様に強いかまたはそれよりも強い信号をがあるかどうかを探した。

結果、それらのデータのずれを10ミリ秒（光速で両検出器間にかかる時間）よりも大きくしたときのみに、雑音どうしが偶然一致する以外には、本物の信号ないことが確認された。こうすることで、いま作ったずっと長いデータの中に、どのくらいの頻度で、雑音が無意に一致して、GW150914にそっくりな信号が得られるかがわかる。この雑音が起こす偶然の一致を、フォールス・アラーム率という。つまり、一見すると大きなイベントに見えてしまうが、本当はただの雑音のゆらぎであるもの（フォールス・アラーム）がどのくらいの率で現れるのかを調べるのである。

図4は（論文図4より抜粋）は、検出器データに対して行われた、複数回行ったサーチのうちの一回分の解析の結果を示している。黒と紫で示された2本の曲線は、「背景」を示している。背景とは、様々な信号の強さに対して、雑音が無意に一致して偽イベントとなる場合の推定回数である（いくつか異なる想定下で）。オレンジ色の四角は、時間のずれが入っていない、実際に我々が見たものを示す。この図を見ると、観測されたイベントGW150914が、背景から並外れて離れていることがわかる。つまり、単なる雑音が、偶然、GW150914に似通っているだけである可能性が、極めて稀であるということである。実際に、GW150914ほどに強いイベントが無意に起こる確率は、このようなデータ20万年分のなかに1つあるだけの確率である。この**フォールス・アラーム率**は、シグマ（ σ ）という指標で表される。シグマは、ある主張が有意であるか否かの判定に用いられる、統計学的な指標である。今回のサーチでは、GW150914は5 σ 以上をもつ真のイベントであることが認められた。

結果と今後

重力波が初めて直接検出され、一対のブラックホールの合体が初めて観測されたことは、歴史的な快挙である。しかしこれは、天文学における、新しくエキサイティングな一章の始まりにすぎない。

次の10年には、Advanced LIGOはさらに改良される。さらに検出器のグローバル・ネットワークも拡大し、イタリアのAdvanced Virgo、日本のKAGRAと、インドにできるかもしれない3台目が加わる見込みである。

グローバル・ネットワークをこのように強化することで、重力波源の位置を特定する能力が大きく向上し、波源の物理的な性質を、より正確に推定することが可能になる。今始まった重力波天文学には、とても明るい未来があるのだ！

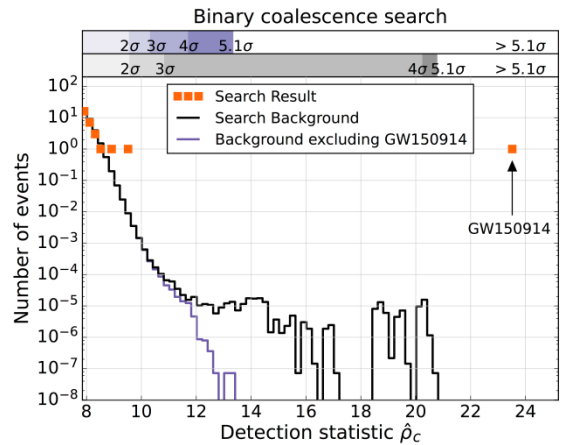


図4. (論文の図4より抜粋)。検出されたイベントGW150914が、連星合体サーチにおいてどれぐらい稀に雑音の揺れと一致してしまうかを示した図。検出された信号が、雑音とたまたま一致する可能性はものすごく低く、20万年に1度起こる確率（5シグマ）程度であることが示された。

より詳しい情報はこちら：

LIGO 科学コラボレーションのホームページ
(PRLで出版された主論文へのリンクも含まれる)：
<http://www.ligo.org>

Advanced Virgo ホームページ：<http://public.virgo-gw.eu/language/en/>
主論文に伴う出版物：

- *Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions:*
<https://dcc.ligo.org/P1500229/>
- *GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO:* <https://dcc.ligo.org/P1500269/>
- *Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914:*
<https://dcc.ligo.org/P1500262/>
- *Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave candidate G184098:*
<https://dcc.ligo.org/P1500227/>
- *GW150914: a black-hole binary coalescence as predicted by general relativity:*
<https://dcc.ligo.org/P1500213/>
- *The rate of binary black hole mergers inferred from Advanced LIGO observations surrounding GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500217/>
- *Properties of the binary black hole merger GW150914:*
<https://dcc.ligo.org/P1500213/>

LIGO オープン・サイエンス・センター(GW150914 データ):
<https://losc.ligo.org/about/>