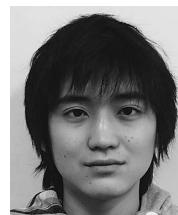


初代星連星由来の連星ブラックホール重力波



衣川 智 弥

〈東京大学 宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5〉

e-mail: kinugawa@icrr.u-tokyo.ac.jp

2015年9月14日、アメリカの重力波観測器advanced LIGOは世界で初めて重力波（GW150914）の直接観測に成功した。日本でも重力波観測器KAGRAがテスト稼働を終え、本格的な観測に向け動き出している。今はまさに重力波天文学の黎明期に位置している。重力波観測のメインターゲットはコンパクト連星の合体である。コンパクト連星は重力波放出により軌道が縮まり、いずれ合体する。重力波によるエネルギー放出は弱いため、合体までのタイムスケールは数億年から宇宙年齢以上と非常に長い。したがって、宇宙初期にできたコンパクト連星でも現在で合体するものがあるはずである。そこでわれわれは宇宙最初の星である初代星に注目し、重力波源として研究を行ってきた。その結果、初代星起源の連星は典型的に約30太陽質量程度の連星ブラックホールになることを2014年に示した。一方で従来観測されてきたX線連星内にあるブラックホール候補天体は10太陽質量程度であり、そのような重いブラックホールはほとんど存在しないだろうと思われていた。しかし、LIGOによる重力波の初検出はまさに約30太陽質量の重い連星ブラックホールの合体によるものであった。これにより、宇宙には従来考えられていなかった重い連星ブラックホールが多く存在することが示唆されており、それらは宇宙初期にできたものかもしれない。

1. はじめに

2015年9月14日、アメリカの重力波観測器advanced LIGOは世界で初めて重力波（GW150914）の直接観測に成功した¹⁾。日本でも重力波観測器KAGRAがテスト稼働を終え、本格的な観測に向け動き出している。DECIGO（DECI-Hertz Interferometer Gravitational wave Observatory）などの人工衛星による宇宙空間での重力波観測も計画されており、DECIGOが動きだせば、より遠方宇宙からの重力波も観測できる。今はまさに重力波天文学の黎明期に位置している。これら重力波検出器のメインターゲットはコンパクト連星の合体である。コンパクト連星とは、星が寿命を終え超新星爆発や重力崩壊を起こしてできるコンパクト星（ブラックホール、中性子星）同士の連星

である。連星の一部は進化の果てにコンパクト連星となる。コンパクト連星は重力波放出により軌道が縮まり、いずれ合体する。コンパクト連星が重力波を発生して軌道を縮めることはハルスとテイラーによって連星パルサーの軌道変化の観測から証明されている。ハルスとテイラーはこの重力波の間接的証明によってノーベル賞を受賞している。今回のLIGOによる重力波の初検出もノーベル賞に値するだろう。

1.1 重力波検出器

現在、世界で稼働もしくは稼働準備中の重力波検出器として、アメリカのadvanced LIGO、日本のKAGRA、ヨーロッパのadvanced VIRGOが存在する。advanced LIGOは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に計二つの検出器が存在する。これらはビームスプリッ

ターと反射鏡（図1）の間の距離（これを腕の長さと呼ぶ）が4 kmのレーザー干渉計である。日本のKAGRAやヨーロッパのadvanced VIRGOはこの腕の長さがそれぞれ3 kmであり、KAGRAはほかのレーザー干渉計と違い反射鏡を冷やすことで熱雑音をさらに軽減させるという特徴をもっている。これらレーザー干渉計の構造は図1のようになる。光源から放たれたレーザーがビームスプリッターで反射鏡Aと反射鏡Bの方向へと2等分され、それぞれの反射鏡で反射されて戻ってくる。この際に重力波がない場合はレーザーは同時にビームスプリッターに帰ってくるが、重力波がある場合、時空のゆがみのために反射鏡Aと反射鏡Bの位置が変化する。そのため、ビームスプリッターでのレーザーの干渉が変化し、それを光検出器で検出する。実際には、反射鏡とビームスプリッターの間にも鏡を置き、レーザーを往復させることで本来の腕の長さよりも、光路長が長くなるように作られている。advanced LIGOも上記の方法で重力波の検出を行いGW150914のシグナルを観測した。

1.2 GW150914

2015年9月15日9時50分45秒（GMT）にLIGOは世界初となる重力波の直接検出に成功した。この重力波イベントは観測した年月日からGW150914と名づけられた。GW150914はリビングストンとハンフォードの両方の検出器で検出され、その後の解析により、このイベントのsignal-to-noise ratio（信号雑音比）は24と判明し、このようなイベントがノイズによって生じるのは20.3万年に一度の確率であり、 5.1σ 以上もの有意なイベントであることがわかった。GW150914のシグナルから合体前のコンパクト連星の質量は $36^{+4}_{-4} M_{\odot}$ （太陽質量）と $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ であることがわかった。中性子星には約 $3.2 M_{\odot}$ の上限質量が

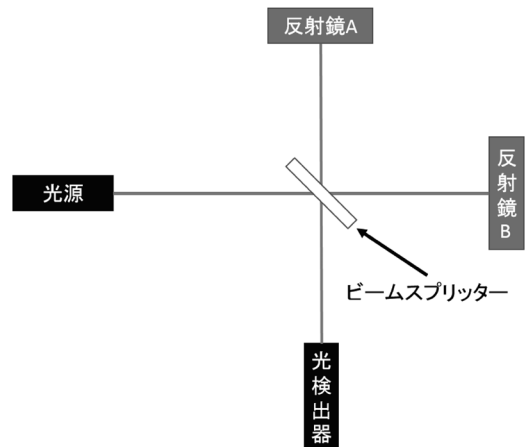


図1 レーザー干渉計概略図。

あるのでこのコンパクト連星は連星ブラックホールであったと結論づけられている。そして、連星合体後のブラックホールの質量は $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$ 、カーパラメーターは $\alpha/M=0.67^{+0.05}_{-0.07}$ であった。重力波イベントまでの距離は 410^{+160}_{-180} Mpc、赤方偏移 $z=0.09^{+0.03}_{-0.04}$ である¹⁾。

このGW150914は重力波の初検出というだけでなく、連星ブラックホールの存在、しかも、今まで確認されたことのない $30 M_{\odot}$ の重いブラックホールの存在をわれわれに示した*¹。今までX線連星で確認されてきたブラックホール候補天体は典型的に $10 M_{\odot}$ 程度の質量であり、今回のようなその2, 3倍も重いブラックホールは確認されたことがなかった²⁾。だが、LIGOによる重力波の初検出は約 $30 M_{\odot}$ の重い連星ブラックホールの合体によるものであった。これにより、宇宙には従来考えられていなかった重い連星ブラックホールが多く存在することが示唆されている。

2. 初代星からの重力波

前章ではGW150914のような重いブラックホールが従来考えられてこなかったといったが、

*1 ほかにブラックホールの準固有振動が観測されたことと、重力波ともにshort GRBが同時観測されたかもしれないという報告もあるがその詳細についてはここでは割愛する。

一部ではその存在が提言されていた。まず一つ目が、低金属な環境でできた星は恒星風による質量損失が効きづらいため、一部は重い連星ブラックホールになるのではないかという示唆である。この場合、連星ブラックホールの質量のピークはX線連星で観測されているような $10 M_{\odot}$ 程度のものになるが、それより重い質量のものも数をだんだんと減らしながらも存在することが示唆される³⁾。二つ目は初代星起源の連星ブラックホールである。初代星の連星が進化していくと典型的に $30 M_{\odot}$ の連星ブラックホールなり、重力波で観測されることが2014年にわれわれによって示されている⁴⁾。初代星がこのような連星ブラックホールになり重力波で観測されることが予言されていたのでLIGOグループの論文では詳細に「驚くべきことにGW150914は衣川らの予言の質量とぴったりと一致している。」と数度にわたり引用されている⁵⁾。以降では初代星とはどのような星かをまず説明し、なぜ $30 M_{\odot}$ の連星ブラックホールになるのかについて述べる。

2.1 初代星

初代星とはビッグバン後にできた最初の星々のことであり、種族III星と呼ばれることもある。ここで、種族II星が上記で述べた太陽に比べ比較的低金属な環境でできた星のことを呼び、太陽程度の金属量の場合、種族Iと呼ぶ。初代星を構成する元素はビッグバン元素合成を反映しているため、主に水素とヘリウムといった軽い元素である。そのため、炭素より重い元素の量（業界ではこれを金属量と呼ぶ）がゼロである。これにより、初代星は基本的に大質量星として生まれると考えられている。それはなぜかというと、物質が重力によって集まり収縮して星を作る際に、物質の温度は上がり圧力が上がることで重力に拮抗してくる。この際に、金属やダストがあると放射で冷える効率がよく、温度が下げることげでき、圧力が下がる。一方で、初代星の形成時には金属やダストがないため、冷えるには水素分子による冷

却や重水素化水素による冷却が効くのだが、これは金属やダストに比べて効率が悪く冷えづらい。そのため温度が高く、圧力も大きい。その状況でも収縮して星を作るためには強い重力、つまり質量が大きい必要があるということである。そのため、初代星は種族Iや種族IIの星に比べて重い星として生まれてくると考えられている。近年の研究より、初代星の典型的な質量は $10\text{--}100 M_{\odot}$ 程度と考えられている⁶⁾。これは、典型的な質量が太陽質量程度である現在の星に比べ、非常に重い。中性子星およびブラックホールの母天体は $8 M_{\odot}$ 以上なので、初代星は現在の星よりもこれらのコンパクト星になりやすい。さらに、初代星は恒星風による質量損失が効かない。つまり、質量を失わず重いまま進化していくため、より重いコンパクト星になりやすいと考えられる。さらに、重力波によるエネルギー放出は弱いため、合体までのタイムスケールは数億年から宇宙年齢以上と非常に長い。したがって、宇宙初期にできたコンパクト連星でも現在で合体するものがあるはずである。よって、重力波観測において宇宙初期にできたコンパクト連星の寄与が効いてくると考えられる。そこで、われわれは初代星に注目し、初代星の連星がどのような進化をたどるのかについて研究を行った。

2.2 連星進化計算

連星の進化経路を調べる際にはbinary population synthesisという手法が用いられる。これは、連星の進化を大多数計算し、その統計を取ることで連星の進化経路および進化結果がどうなるかを理論的に調べる手法のことを言う。まず、ゼロ歳主系列の主星と伴星の質量、軌道長半径、離心率を初期質量関数(IMF)といった初期分布関数からモンテカルロ計算でランダムに与える。その後、主星、伴星の各々の星の進化と軌道の変化を追い、質量交換などの連星相互作用が起きるかどうかを計算する。連星相互作用が起きた場合はそれによる主星、伴星の質量変化を考慮して星の進化

の計算を再開する。そして最終的にその連星がどのようなコンパクト連星になるか、もしくは進化途中で連星が解体してしまうか合体してしまうかを調査する。この計算を繰り返すことで連星進化の統計データを蓄積していくのである。われわれの連星進化計算では1モデルに対して 10^6 個の連星を計算する。これらの連星の結果を左右するのは単独星の進化経路とそれに対する連星相互作用による影響である。連星相互作用において、特に重要なのが主星と伴星の間の質量交換と共通外層状態である。例えば、主星が進化していき、外層が膨らんだとき、外層の一部が伴星の重力圏に捉われる。そのとき、伴星と主星の間でガスの供給が起こり、星の質量が変化する。星の一生は質量に依存するので、質量交換の有無は星の進化にとって重要である。主星の半径が大きくなり、伴星が主星の外層に突入している状態を共通外層状態という。この状態は質量交換が激しい場合、もしくは楕円軌道により巨星の外層に突入した場合に起こると考えられている。共通外層状態において、伴星は主星の外層により摩擦を受けて角運動量を失うため、急激に軌道長半径が小さくなる。この際、軌道長半径が縮まることで重力エネルギーが解放された分、外層は吹き飛ぶ。場合によっては軌道長半径が小さくなりすぎてこの段階で連星が合体してしまう。質量を失いつつ軌道も縮めることができる連星相互作用はほかになく、近接連星を考えるうえでほぼ避けては通れないプロセスである。それはなぜかというと、コンパクト天体はそこに至るまで恒星風や超新星爆発などを介して大なり小なり質量を失う。質量を失うということは重力による束縛も弱くなるため、軌道が広がってしまう。重力波による合体時間は軌道長半径の4乗に比例するため、軌道が広がってしまうと重力波によって連星が合体することが難しくなってしまう。そのため、共通外層によって近接連星となるか、合体してしまうかを正しく見積もることはコンパクト連星合体を考えるうえで重

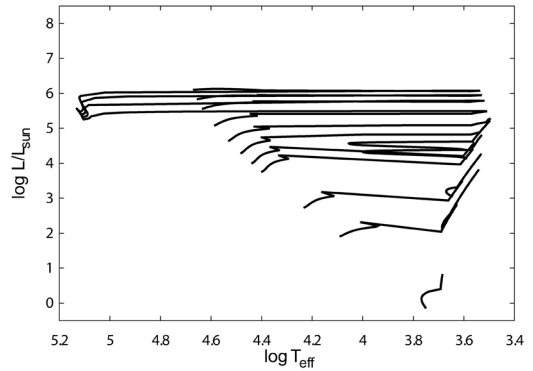


図2 種族I星のHR図。下の線から順に1, 3, 5, 10, 12, 15, 20, 30, 50, 70, 100 M_{\odot} の星についての主系列からの進化を追ったもの（SSE codeによる計算結果^{7), 8)}。

要である。種族I、種族II起源の連星進化では恒星風による質量損失で軌道が広がってしまう。そのため、コンパクト連星形成において宇宙年齢以内に合体するには共通外層状態を経なければいけない。特に連星中性子星の母天体の場合、超新星爆発前に外層を失っておかないと、そもそも超新星爆発時の急激な質量損失により連星が解体してしまうため、共通外層状態になることが必須である。共通外層状態は半径が大きく、外層が対流優勢になっている赤色巨星のときに起きやすい。なので、種族I、種族IIの連星のうち、近接したコンパクト連星となるものは1回以上この共通外層状態を経て進化していると考えられる。種族I星および、種族II星の場合では、この共通外層状態による外層の剥ぎ取りや恒星風による質量損失があるため、これらをもとにしてできる連星ブラックホールは典型的には $10 M_{\odot}$ 程度と考えられている。実際に、X線連星で観測されてきたブラックホール候補天体の質量も $10 M_{\odot}$ 程度である²⁾。

2.3 初代星の連星進化

では種族I、種族II起源の星に比べて初代星では連星進化はどう変わるのか。まず、初代星は金属がないために恒星風による質量損失がない。これは星が重いまま進化していくというだけでな

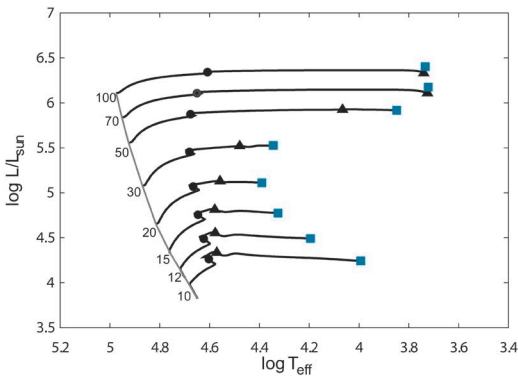


図3 初代星のHR図^{4),9)}. 下から順に10, 12, 15, 20, 30, 50, 70, 100 M_{\odot} の進化について追ったもの。●は中心核での水素燃焼の終了時かつヘリウム燃焼開始時, ▲は中心核でのヘリウム燃焼終了時, ■は炭素燃焼開始時に対応している。

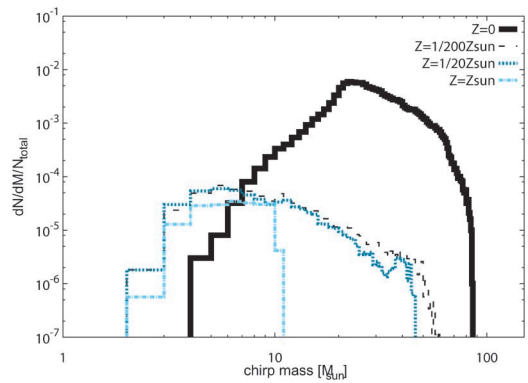


図4 初代星起源の連星ブラックホールと種族I, 種族II星起源の連星ブラックホールについて宇宙年齢以内に合体するものの質量についての連星進化計算結果. 黒の実線が初代星起源の連星ブラックホール. 水色が太陽金属量の星起源, 青色が太陽金属量の20分の1, 黒の破線が太陽金属量の200分の1. 横軸はchirp mass $M_{\text{chrip}} = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$. 縦軸は100万体の連星を計算した中で宇宙年齢以内に合体する連星ブラックホールの形成割合.

く、連星においては質量損失による軌道の広がり
 がなくなる。そのため、近接連星になりやすい効果がある。これに加え、星の進化が異なることによる共通外層状態へのなりやすさの違いがある。種族I星のHR図(図2)と初代星のHR図(図3)を見比べてみてほしい。種族Iの星では星はどれも進化の果てに林トラックへいき赤色巨星となる。一方で、初代星では50 M_{\odot} より重い星は林トラックまでいき赤色巨星となるが、50 M_{\odot} より軽い星は赤色巨星にならず青色巨星として寿命を終える⁹⁾。青色巨星は半径が小さいため連星相互作用が起きづらい。また、質量交換が激しくなりづらいため、共通外層状態になりづらい。したがって、初代星の連星は50 M_{\odot} より重い星は共通外層状態を経由して進化し、50 M_{\odot} より軽い星は共通外層状態を経ずに進化していく。その結果、50 M_{\odot} より重い初代星は共通外層状態によって外層を失うため、初期質量の約1/2-1/3程度になる。その結果20-30 M_{\odot} 程度のブラックホールとなる。一方、50 M_{\odot} より軽い初代星は共通外層状態にならず安定した質量交換程度しか起こらな

いため、あまり質量損失せず、だいたい初期質量のままか少し軽くなった程度で進化していく。そのため、中性子星や数 M_{\odot} 程度の軽いブラックホールは超新星爆発によって連星が解体してしまうか軌道が広がってしまう。そのため、近接連星として残りやすいのは重いブラックホールとなる。そのため、50 M_{\odot} より軽い初代星も残るのは25-30 M_{\odot} 程度のブラックホールとなる。これらの進化経路により、初代星の連星は典型的に約30 M_{\odot} の連星ブラックホールとなる。図4は初代星起源の連星ブラックホールと種族I, 種族II星起源の連星ブラックホールについて宇宙年齢以内に合体するものの質量分布の連星進化計算結果を示したものである。横軸はchirp mass $M_{\text{chrip}} = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$ という重力波業界でよく用いられる質量の次元をもつ物理量である。これは、等質量の場合、だいたい各々のブラックホールの質量に対応していると思ってよい*2。縦軸

*2 だいたい30+30 M_{\odot} の連星ブラックホールがchirp mass 26 M_{\odot} 程度に相当する。

は100万体の連星を計算した中での宇宙年齢以内に合体する連星ブラックホールの形成数である。これを見ると、種族I、種族II星からできた連星ブラックホールは金属量が少なくなれば恒星風の影響が小さくなるため、大質量な連星ブラックホールを形成することもできるが、質量のピークは $10 M_{\odot}$ 程度となることがわかる。一方で、初代星起源の連星ブラックホールは約 $30 M_{\odot}$ にピークがあるため、明らかに種族I、種族II起源のものとは異なっている。なお、われわれの計算の標準的なモデルでは、 $10\text{--}100 M_{\odot}$ の質量の連星の約5割が連星ブラックホールとなり、そのうちの約2割（連星全体の約1割）が宇宙年齢以内に合体する連星ブラックホールになった。

3. 初代星起源連星ブラックホールからの重力波

3.1 連星ブラックホール合体率

先ほどまでの議論で初代星連星は主に連星ブラックホールになり、その質量は典型的に約 $30 M_{\odot}$ と普通のブラックホールより重くなることを示した。では、実際にこのような初代星起源連星ブラックホールはどのぐらいこの宇宙に現存し、現在になって合体するのだろうか。そのために必要になるのが連星計算で得た形成の割合に対して星形成率（SFR）を掛け合わせることである。われわれの計算では、初代星の星形成率としてde Souzaらのモデル¹³⁾を用いている。初代星の星形成率と初代星連星進化計算より、現代における初代星起源連星ブラックホールの合体率は $2.5 \times 10^{-8} \text{ events yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ ($SFR_p/10^{-2.5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$) $\cdot ([f_b(1+f_b)]/0.33) \cdot Err_{sys}$ となる。合体率の宇宙年齢および赤方偏移依存性が図5となる。初代星の星形成率は観測値がない*³ため、シミュレーションや理論からの値を用いる

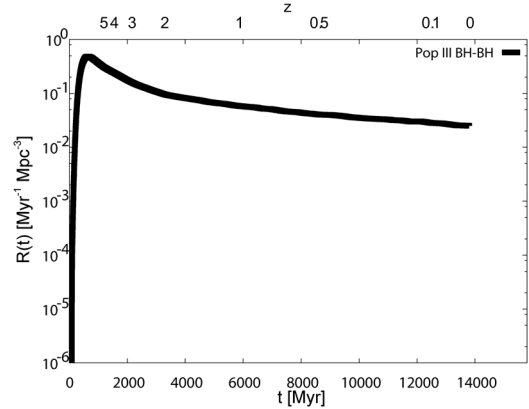


図5 初代星起源の連星ブラックホールの連星合体率。横軸は宇宙年齢または赤方偏移。縦軸は合体率。

ことになる。その不定性を表すため星形成率のピークの値を ($SFR_p/10^{-2.5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$) として合体率に表している。 f_b は連星の割合で $f_b=0.5$ が恒星が3個あったとき、一つが単独星で、もう二つが連星を組んでいる場合に対応する。ここでは、一般的な値である $f_b=0.5$ として計算している。最後の Err_{sys} は連星進化のパラメーター（共通外層状態の取り扱いや超新星爆発時のkickの取り扱いなど）や初期値の分布関数によるシステムティックエラーを表した係数である。

この合体率にadvanced LIGOやKAGRAといった検出器の検出可能範囲をかけることで検出率が求まる。KAGRAでは $30 M_{\odot}$ の連星ブラックホールについて赤方偏移 $z \sim 0.28$ 、距離にして $r \sim 1.5 \text{ Gpc}$ まで観測することができる。観測可能な範囲を合体率にかけると初代星連星ブラックホール合体の観測率は $180 \text{ events yr}^{-1}$ ($SFR_p/10^{-2.5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$) $\cdot ([f_b(1+f_b)]/0.33) \cdot Err_{sys}$ となる。

さらに上述のとおり、初代星連星は種族I、種族IIの連星と違い、共通外層状態を経由しなくて

*³ 最近ではPlanckによるThomson散乱のoptical depthの観測値から星形成率に上限が与えられるという議論もある^{10)–12)}。

も近接連星を作ることができる。種族I, 種族IIでは、共通外層状態のパラメーターによってコンパクト連星の形成率が2桁以上変わるが、初代星は共通外層を経由せずとも近接連星を形成するためにこのパラメーターにファクター倍ほどしか形成率に影響を受けない。つまり、 Err_{sys} に対する依存性は種族I, 種族IIに対して小さい。初代星のIMFの依存性や、超新星爆発時の非球対称性による反跳の連星パラメーターについても計算を行ったが、連星ブラックホール合体の観測率のこれらのパラメーター依存性はせいぜいファクター分の1からファクター倍程度の範囲内であることがわかっている。この Err_{sys} の下限値を求めするために、われわれは各パラメーター空間において最悪の観測率を出したパラメーターを組み合わせたモデル (worstモデル) の計算も行ったが、そのような非現実なモデルでは20分の1ほど観測率は下がり、 Err_{sys} の範囲は全体で0.046-4となった¹⁴⁾。この一番低い Err_{sys} に対応しているモデルは前述の非現実的なworstモデルなので、 Err_{sys} によって小さくなるとしても基本的にファクター分の1程度であると考えられる。そのため、 SFR_p がわれわれの使っているものより2桁以上小さい、または初代星は普通の星と異なり連星が全くできない、などということが起きない限りadvanced LIGOやKAGRAで観測されるはずである。30 M_{\odot} の連星ブラックホール合体が今後も多く観測され、質量分布において30 M_{\odot} 付近にピークが存在すれば、重力波によって初代星の存在の間接的証明ができるかもしれない。

3.2 将来計画での観測

地上検出器だけでなく、衛星による重力波観測計画においても初代星起源連星ブラックホールによる重力波が観測対象として注目されてきている。日本が計画しているDECIGO計画はadvanced LIGOやKAGRAより周波数帯が低い 10^{-1} -10 Hz

により感度をもつ。高赤方偏移の連星合体は赤方偏移の分、合体の周波数帯が小さくなるため、 $z \sim 10$ 辺りでの30 M_{\odot} の連星ブラックホール合体がよく観測できると考えられる。初代星の星形成率のピークもこの時期なので初代星起源連星ブラックホールができてからすぐ合体するものまで観測できるようになる。宇宙初期では各赤方偏移での連星ブラックホールの合体率も星形成率をトレースする傾向があるので、現代よりも合体率が大きい。また、合体率の赤方偏移依存性より種族I, 種族II起源の連星合体からより明確に初代星起源のものを区別できる可能性がある。また、初代星の星形成率に対する制限を与えることもできるだろう。現在、DECIGOの前段階であるpre-DECIGOでも $z \sim 10$ の初代星起源連星ブラックホールがDECIGOほどではないにしろ観測できるのではないかと期待されている。これらの将来計画によって、重力波によって宇宙初期の星々の特徴を明らかにできるかもしれない。

4. おわりに

われわれは重力波という新しい目を得たことで、今まで光学では観測することができなかった連星ブラックホールを観測できるようになった。まだ観測されたイベントは1個^{*4)}であるが、数年後の重力波観測器の本格稼働の時期には年間100個以上重力波によってコンパクト連星合体が観測されるようになるだろう。これにより、それまでの観測では得ることのできなかった天体の情報を得ることができるようになる。しかも、それらは宇宙初期にできた天体の情報をわれわれに届けてくれるかもしれない。さらに、今回のような重い連星ブラックホール合体は合体後のブラックホールの準固有振動からの重力波も観測できる。そのため、今回よりも近くでよりスピンの大きい連星ブラックホール合体が重力波で観測されれば、ブ

*4) 2016年5月執筆時の情報に基づく。ほかにもLVT151012という重力波候補天体はあるがイベント認定はされていない。

ラックホールの地平面の近くの時空の情報を得ることができ、強重力場での一般相対論の検証も可能である¹⁵⁾。このように天文学だけでなく物理学の観点からも重要な情報源となる。今、われわれは重力波を介した新しい天文学の幕開けに立ち会っている*5。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2014年と2016年に筆者らが発表した投稿論文^{4), 14)}に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。筆者と議論を重ね指導をしてくださった中村卓史名誉教授、そして共同研究者である稲吉恒平氏、仏坂健太氏、仲内大翼氏、宮本晃伸氏、神田展行教授、中野寛之氏にこの場を借りて深く感謝いたします。本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員(DC1)として行ったものです。最後に、本稿の執筆を薦めてくださった富永望氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 061102
- 2) Remillard R. A., McClintock J. E., 2006, ARA&A 44, 49
- 3) Dominik M., et al., 2015, ApJ 806, 263
- 4) Kinugawa T., Inayoshi K., Hotokezaka K., Nakauchi D., Nakamura T., 2014, MNRAS 442, 2963
- 5) Abbott B. P., et al., 2016, ApJL 818, L22
- 6) Hosokawa T., Omukai K., Yoshida N., Yorke H. W., 2011, Science 334, 1250
- 7) Hurley J. R., Pols O. R., Tout C. A., 2000, MNRAS 315, 543
- 8) <http://astronomy.swin.edu.au/jhurley/>
- 9) Marigo P., Girardi L., Chiosi C., Wood P. R., 2001, A&A 371, 152
- 10) Visbal E., Haiman Z., Bryan G. L., 2015, MNRAS 453, 4456
- 11) Hartwig T., Volonteri M., Bromm V., et al., 2016, MNRAS 460, L74
- 12) Inayoshi K., Kashiyama K., Visbal E., Haiman Z., 2016, MNRAS, 461, 2722
- 13) de Souza R. S., Yoshida N., Ioka K., 2011, A&A 533, A32
- 14) Kinugawa T., Miyamoto A., Kanda N., Nakamura T., 2016, MNRAS 456, 1093
- 15) Nakano H., Tanaka T., Nakamura T., 2015, Phys. Rev. D 92, 064003

Gravitational Waves from Binary Black Hole Remnants of First Stars

Tomoya KINUGAWA

Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

Abstract: Using our binary population synthesis code, we found that the typical chirp mass of binary black holes (BH-BHs) whose origin is the first star (Pop III) is $\sim 30 M_{\odot}$ with the total mass of $60 M_{\odot}$ so that the inspiral chirp signal as well as quasi normal mode (QNM) of the merging black hole are interesting targets of LIGO, VIRGO and KAGRA. The detection rate of the coalescing Pop III BH-BHs is ~ 180 events/yr ($SFR_p / (10^{-2.5} M_{\odot}/\text{yr}/\text{Mpc}^3) \cdot [f_b / (1 + f_b)] / 0.33$) $\cdot Err_{\text{sys}}$ in our standard model where SFR_p , f_b and Err_{sys} are the peak value of assuming Pop III star formation rate, the binary fraction and the systematic error with $Err_{\text{sys}} = 1$ for our standard model, respectively. Furthermore, We found that the chirp mass has a peak at $30 M_{\odot}$ in most of parameters and initial distribution functions. This result predicted the gravitational wave events like GW150914 and LIGO paper said 'recently predicted BBH total masses agree astonishingly well with GW150914 and can have sufficiently long merger times to occur in the nearby universe (Kinugawa et al., 2014)'. Thus, there is a good chance to check indirectly the existence of Pop III massive stars by gravitational waves.

*5 筆者もこれを機にこの春からはれて日本天文学会に入会した。