

重力波天体の可視光・赤外線観測

国立天文台 田中 雅臣

1. 重力波が観測された！

2015年9月14日、アメリカの重力波検出器 Advanced LIGO (Laser Interferometric Gravitational-wave Observatory = レーザー干渉計型重力波天文台) が史上初めて重力波の直接検出に成功しました。この歴史的快挙は日本の新聞やニュースにも大きく取り上げられ、読者の皆さんの中にもご存知の方が多いことでしょう。重力波を放ったのは、私たちの銀河系の外、およそ10億光年のかなたで起きた2つのブラックホールの合体現象です。この観測により、重力波によって宇宙を観測する「重力波天文学」が幕を開けました。2015年12月26日には2例目の重力波観測も成し遂げられ、すでに重力波天文学は順調に軌道に乗りつつあります。

図1が実際に捉えられた重力波の信号です。重力波による時空の歪みが時間とともにどう変化したかを表しており、縦軸の数字は1cmあたり何cm歪むか、というような割合で示されています。驚くべきはその数字の小ささです。重力波がやってきたことでわずか 10^{-21} 、すなわち0.000000…1（小数点以下にゼロが20個！）だけ時空が歪んだことが捉えられたのです。オリオン座のベテルギウスまでの距離が約600光年（約 6×10^{20} cm）ですから、これはベテルギウスまでの距離がたった0.6cm、つまり米粒1つ分ほどしか変化しないほどわずかな時空の歪みです。

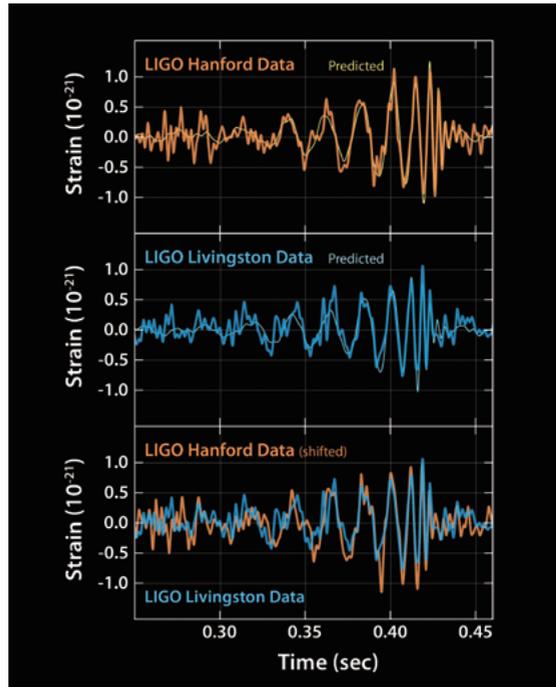


図1. Advanced LIGOによって観測された重力波 GW150914

(C) Caltech/MIT/LIGO Lab

<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160211a>

2. 重力波天体は一体どこに？

重力波検出器はこのような微弱な信号を捉えられることに加えて、もう一つ重要な特徴もっています。それは、重力波がほぼどの方向からやって来ても検出することができるということです。これは、通常私たちが天文観測を行うときに、観測する対象に望遠鏡を向ける必要があるのとは大きく異なります。耳をそばだてて、宇宙からの信号が聞こえるのをじっと待っているのをイメージしてもらえると分かりやすいかもしれません。

しかし、この特徴には1つ欠点もあります。それは、重力波が検出されても信号がどこからやって来たのかを正確に決めることができないことです。そのため、Advanced LIGOの場合は、アメリカにある2台の検出器のどちらが先に信号を検出したかという情報を使うことで、どの方角から重力波が来たのかを大まかに推定しています。その結果決まった重力波天体の位置が図2に示されています。1例目の検出GW150914では、その領域は約600平方度（空の1度×1度四方の広さが1平方度）でした。これは満月の大きさ約3,000個分（！）にも及ぶ広大な領域です。2例目のGW151226の場合はさらに広く、約900平方度（満月約4500個分）でしか位置を決定することができませんでした。つまり、私たちはまだ重力波を放った天体「重力波天体」が宇宙のどこにいたのかを知らないのです。

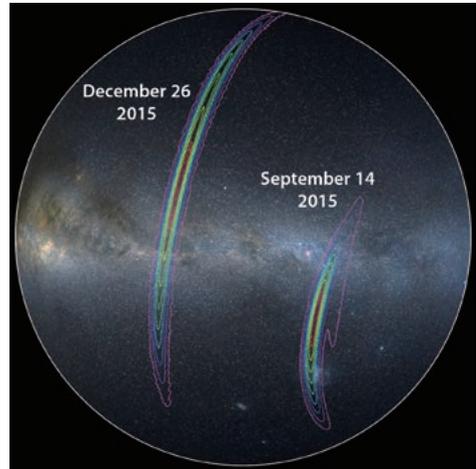


図2. 重力波源GW150914とGW151226の到来方向

(C)LIGO/Axel Mellinger

<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160615b>

3. 重力波天体が放つ電磁波

重力波天体がどこにいるのかを突き止めるためには、重力波天体を可視光・赤外線や、電波、X線などの電磁波で捉えることが必要です。では、そもそも重力波天体は電磁波でも見えるでしょうか？これまで観測された2例のように、2つのブラックホールが合体する場合は電磁波で光るかどうかはあまり自明ではなさそうです（ブラックホールは光さえ逃げ出せないためブラックホールと言われています）。しかし、「中性子星」という天体が合体する場合は、様々な波長の電磁波で光ることが期待されています。

中性子星は太陽の1.5倍程度の質量を持ちながら、半径が10kmほどしかない、宇宙でブラックホールの次に重力が強い天体です。ブラックホールの合体と同様に、2つの中性子星が合体するときにも強い重力波が放たれます（実際多くの研究者は、最初の重力波検出がなされるまでは、中性子星の合体からの重力波が先に検出されると思っていました）。さらに、合体が起きると中性子星をなしていた物質の一部が宇宙空間に飛んでいくことが知られており（図3）、この放出物質から様々な電磁波が放たれると考えられています。

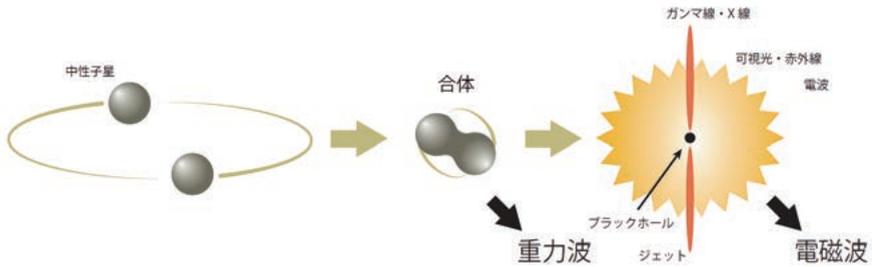


図3. 連星中性子星合体の模式図

中性子星の合体によって光の速度に近い絞られた物質の流れ（ジェット）が生み出されると、ガンマ線やX線が放射されることが期待されます。これは「ガンマ線バースト」として既に知られている現象で、特に継続時間が2秒より短いショートガンマ線バーストと呼ばれる現象は、以前から中性子星合体がその母天体であると考えられてきました。つまり重力波が検出された直後に強いガンマ線がやってくるかもしれないのです。ただし、残念ながらガンマ線バーストはジェットの方向でしか観測できないので、重力波の直後にいつもこのような放射がやってくるとは限りません。

中性子星をなしていた物質はジェットの方向以外にも飛び出していきます。この放出物質は大量の中性子を含むため、放出物質の中では中性子捕獲反応という核反応が起

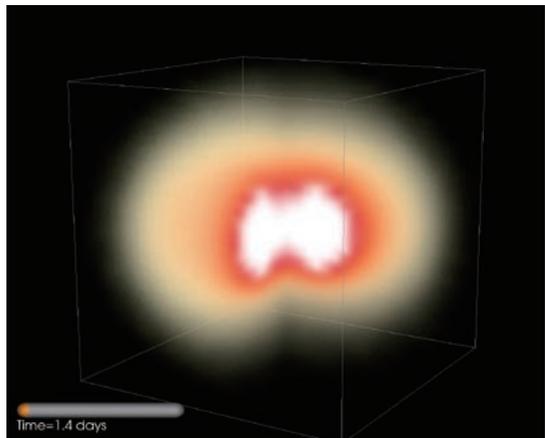


図4. kilonovaのコンピュータシミュレーション

き、金やプラチナ、ウランなどの鉄よりも重い元素が新たに合成されます。つまり、中性子星は合体すると重力波を放つだけでなく、金やプラチナを宇宙空間にばらまくのです！さらに、新しく合成された原子核が放射性崩壊を起こし、そのエネルギーによって中性子星合体が可視光や赤外線で1週間ほど輝くことが分かってきました。このような現象は、星の爆発である超新星 (supernova) との類推から “kilonova” と呼ばれています (図4)。可視光や赤外線の観測では、重力波が検出された後に1週間ほど続く kilonova を探査するのが良さそうです。

さらに、中性子星合体で放出された物質は、膨張しながら宇宙空間に充満している極めて薄いガスを掃き集めていくことで、電波でも輝くことが期待されています。この電波放射は合体から数年後に始まると考えられており、ガンマ線や可視光・赤外線よりもじっくりと探査をすることができるのが特徴です。

4. J-GEMの取り組み

このように、中性子星の合体では様々なタイミングで様々な波長の電磁波が放射されると考えられており、この電磁波を捉えるために世界中で多くの研究者が重力波天体の電磁波探査に取り組んでいます。ここでは、私が参加している日本の観測グループJ-GEMの取り組みを紹介したいと思います。



図5. J-GEMの望遠鏡群 (提供: 東京大学 諸隈智貴氏)

J-GEMとはJapanese collaboration for Gravitational wave ElectroMagnetic follow-upの略で、約40名の研究者からなる可視光・赤外線・電波を中心とした電磁波観測グループです (図5)。2014年にはLIGO-Virgo collaborationと覚書を交わし、重力波が検出された時にはその速報を受け取り、電磁波追観測を行うという約束を結びました。J-GEMには様々な望遠鏡が含まれていますが、中でも東京大学木曾観測所シュミット望遠鏡 (視野2.2度×2.2度)、MOA-II望遠鏡 (1.3度×1.6度)、そして国立天文台すばる望遠鏡 (広視野カメラHyper Suprime-Cam、1.5度直径の円) の3つの望遠鏡は一度に広い視野を観測できるため、重力波天体が存在する可能性がある領

域の広域探査を行います。一方、比較的視野の狭い望遠鏡は、領域内に含まれる銀河系外の銀河にターゲットを絞って探査を行います。重力波天体である中性子星やブラックホールは銀河の中にいると考えられるため、これも強力な方法です。また、広域探査によって候補天体が現れた時には、これらの望遠鏡で詳細な追観測を行うこともできます。

重力波天体の探査観測は、通常のア天文観測と様々な点が異なります。まず、(当然ですが)重力波がいつ検出されるかは事前には分かりません。いざ重力波が検出されたら、それが休日であろうと年末であろうと早急に観測を行う必要があります。重力波天体は可視光・赤外線の場合は1週間ぐらいで見えなくなってしまうかもしれませんので、時間との戦いです。しかも探査する領域は広大で、もちろんその領域がどこになるかも事前には知ることはできません。ある日急に、お宝の在り処が書かれた大雑把な世界地図を渡されて、「1週間以内に探してきて!」と言われるような状況ですが、この困難を乗り越えて初めて重力波天体の居場所を突き止めることができるのです。

J-GEMで探査観測の準備や検討が進むなか、最初の重力波源GW150914が検出されました。重力波天体の同定という大目標に挑むチャンスが早くもやってきたのです。推定されたGW150914の存在領域は主に南半球から観測可能で、北半球から見える領域は残念ながら太陽に近い方向でした。それでも、木曾観測所シュミット望遠鏡では明け方の太陽が昇る直前に約24平方度の観測が行われ、ニュージーランドB&C61cm望遠鏡では18個の近傍銀河が観測されました。重力波で推定された領域を広くカバーすることはできなかったものの、重力波検出から追観測までの一連の流れを確認できたのは非常に貴重な経験だったと言えます。

2例目の重力波源GW151226はより観測しやすい領域であったことから、GW150914よりも本格的な探査が行われました。木曾観測所シュミット望遠鏡、MOA-II望遠鏡、すばる望遠鏡では、合計986.5平方度にも及ぶ広域探査観測が行われ(図6)、さらに、その他の望

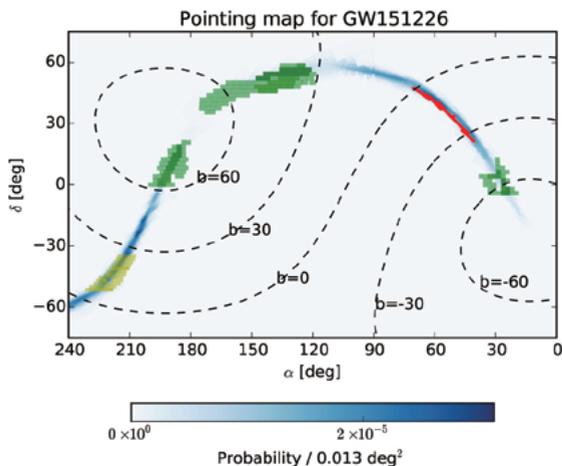


図6. J-GEMによるGW151226の広域観測
(Yoshida et al. 2017, PASJ, 69, 9)

遠鏡でも合計238個の銀河をターゲットにした観測が行われました。特にすばる望遠鏡では広視野カメラHyper Suprime-Camによる観測を約60平方度に渡って行うことができ、世界の他のグループが到達できない感度の広域探査が実現しました。

5. 今後への期待

ブラックホールの合体からの重力波が直接検出され、重力波天文学の幕が開けました。そして、J-GEMを含め世界中で重力波天体を電磁波で同定しようとする探査観測も始まりました。今までの電磁波探査観測では重力波天体と言えそうな天体は発見されませんでした。検出された重力波はどちらもブラックホールの合体だったため、これはそれほど不思議なことではないと言えます。次に期待されているのは中性子星の合体からの重力波検出です。本稿で紹介した通り、中性子星の合体は重力波を放ったあとに電磁波で輝くことが期待されています。これを捉えることができれば、重力波天体が一体宇宙のどこにいるかを突き止めることができるでしょう。今後、Advanced LIGOに続いて、ヨーロッパのAdvanced Virgo、日本のKAGRAが稼働を始めれば、重力波の位置決定精度は数10平方度程度まで改善されるため、重力波天体が同定される可能性はますます高くなっていきます。

中性子星の合体は、重力波天体としてだけではなく、金やプラチナなどを作り出す現象としても注目を集めています。中性子星の合体はそれらの重元素をたくさん作り出すほど明るく輝くはずですが、つまり、可視光・赤外線観測によって重力波天体を同定し、その明るさを測ることができれば、中性子星の合体がどれだけの金やプラチナを作り出したかを知ることができるのです。金やプラチナなどの重元素が宇宙のどこで合成されたのかは現代天文学の大きな謎の1つです。重力波天体の可視光・赤外線観測によってその謎が解明されるかもしれませんので、今後の展開にぜひご期待ください。

著者紹介 田中 雅臣(たなか まさおみ)



自然科学研究機構 国立天文台 理論研究部 助教・博士(理学)。コンピュータシミュレーションや天文観測を使って、超新星爆発や重力波天体など宇宙で起きる爆発天体・突発天体を研究している。主な著書に『星が「死ぬ」とはどういうことか』(ベレ出版)がある。