

重力波の観測(3)ブラックホールと重力波

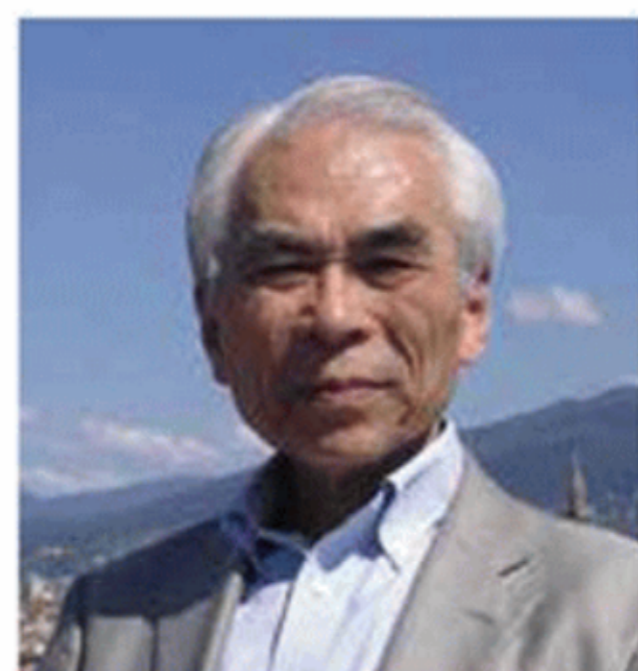
中嶋 浩一 (一橋大学大学院社会学研究科名誉教授)

天文学の大ニュース「重力波の直接観測も、発表からはや1年経ってしまったが、その重要性はますます明らかになって来ている。そこでもう暫く誌面をお借りして連載の解説を試みてみたい。今回は特に「ブラックホール」との関連について。

まず復習として、今回の大ニュースの内容とその意味を簡単にまとめると：

1. 重力波は、アインシュタインが彼の「一般相対性理論」から導き出したものであるが、1916年にアインシュタインがその存在を予言してからちょうど100年経ってやっとこれが確認された。
2. なかなか確認されなかったということの理由は、とにかく重力波がたいへん微弱な波動であるということに尽きる。そしてそれが観測されたということは、近年そのための超精密測定技術が大きく進歩し、かつ大規模な観測装置の構築が可能になったということにほかならない。
3. 今回捕らえられた重力波は、太陽の数十倍という重さの2つのブラックホールが回転しながら合体した、という現象によって放出されたものであった。そしてこれは、一般相対性理論の難解な数式の高度な計算で確認された。
4. 太陽の数十倍のブラックホールというのは、これまでの天文学理論からは考えられなかったものであり、これが確認されたことによってブラックホール研究に新たな進展をもたらされた。

今回の重力波は、ある意味で予想されていたとおりの現象であり、まずは「やはりそうだったのか」という印象であった。しかしまた予想外のこともいろいろあって、新たな宇宙のナゾが出現した。



新たなナゾは、合体を引き起こしたブラックホールの重さである。4. で述べたように、これまでこのようなブラックホールは考えられておらず、今回の観測の天文学上の最重要点は4. にある、と言っても過言ではない。本稿ではこの点を解説する。

さて重力波の放射というのは、ダンベルのような物体が回転するとき効率よく行われるのであるが、そのようなものとして宇宙に「連星」という天体がある。



図1. 連星のイメージ

(<https://www.oideyo-tx.com/article/1410>より引用。原図は、GSFCのD.Berry作成)

これは図1のように、「連(つら)なった2つの星が、回転しながら共存している」というものである。そのような意味では地球と月も一種の連星であるが、通常は2つの星が両方とも恒星である場合に連星と呼ぶ。そして連星は、星が重ければ重いほど、また回転が速ければ速

いほど、強い重力波を放射する。

後述のように、たいへん重い星というのはなかなか考えられないのであるが、たいへん速い回転の連星はいろいろ考えられる。たとえば、図1に描かれた連星（名前はかに座HM星）などは直径8万kmほどの円周上を約5分で1回転しているという。そしてこれは、微弱ではあるが確実に重力波を出しており、そのためエネルギーを失って34万年後には合体し大爆発を起こすとされている。

また連星の回転速度は、回転軌道の直径が小さければ小さいほど速くなるので、合体直前にはものすごく速くなり、重力波も強力になる。また合体直前から合体の瞬間にかけて、重力波の波形は「チャープ信号」という非常に特徴的な形になる（図2）。

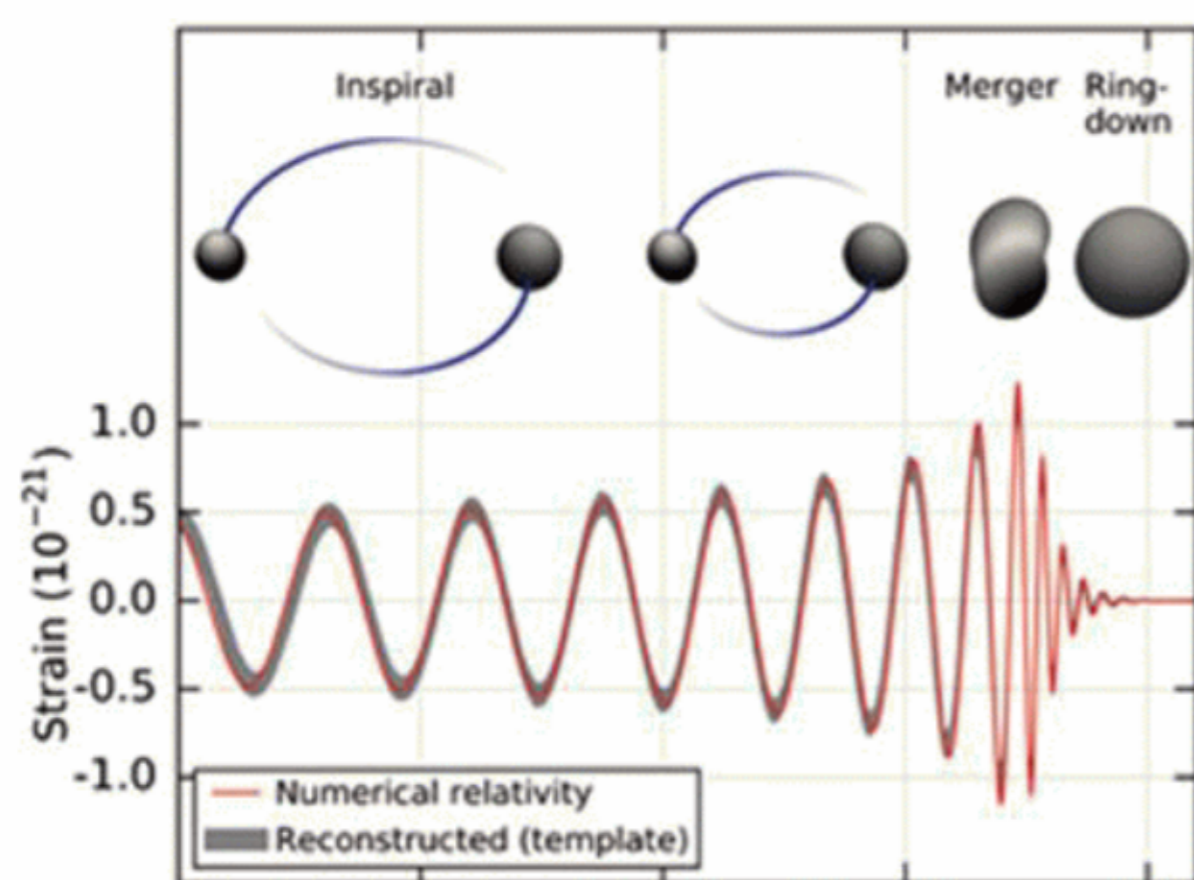


図2、連星ブラックホールの合体の際の重力波の波形 (LIGO 科学コラボレーションのページより)

「チャープ」というのは、小鳥のかん高い鳴き声のことである。図2の重力波の振動数はちょうど音波の振動数に近く、これをそのままスピーカーに流すとまさに小鳥の鳴き声のような音が聞こえてくる。

ところで図1の連星は軌道の直径が8万km、ということは図の星の直径は1万km程度ということになる。太陽など、普通の星の直径は100万km以上なのにどうしたことだろうか。

実は宇宙には、重さが普通の星と変わらないのに大きさが100分の1という特殊な星があり、「白色矮星」と呼ばれる。図1は白色矮星の連星である。

白色矮星は、地球程度の大きさなのに太陽ほ

どの重さがある、ということはいへんな高密度の星ということであり、計算すると角砂糖1個ほどのかけらが象1頭ほどの重さ、ということになる。

この「かに座HM星」のように私達の近く（ここで「近く」というのは数万光年以内、すなわち私達の銀河系の内部）にあれば、合体による重力波は十分観測可能である。しかしそれが34万年後ということであり、またこのような連星がたくさん見つかったわけではないことを考えると、これによる重力波の観測は容易でないことがわかる。私達の銀河系だけでなく遠方の銀河を、少なくとも1億光年程度までの銀河を観測しなければならない。しかし現状の観測能力ではこれは無理である。もっと強力な重力波はないものだろうか。

幸い、白色矮星よりももっと小さい（約千分の1の大きさ）星があり、これならば合体直前の軌道半径はもっと小さく、回転速度はもっと速く、もっと強力な重力波が放射される。このような星は「中性子星」と呼ばれるが、白色矮星よりも格段に高密度であり、角砂糖1個で1000m級の山1個分の重さになるという（またまた非日常的、天文学的な話になってしまった）。

このような中性子星による連星も、実際に私達の近く、とも座の方向に見ついている。ただしこの連星の軌道はまだまだ大きくて、合体までは85万年ほどかかると見積もられ、観測は白色矮星よりもさらに難しそうである。

しかしなにぶんにも重力波は強力であるので、これは遠方の銀河でも観測可能になる。私達の銀河系の中に少なくともこれが1個あり、待ち時間が85万年であるならば、100万個の銀河が観測できれば年に1回くらいは重力波が受かるのではないだろうか。そして現在の重力波観測装置であれば中性子星の合体の重力波は8億光年くらい遠方まで受信可能であり、その範囲内には私達の銀河系と同程度の銀河が100万個以上あるので、十分可能である！

さて「中性子星」であるが、そのような天体はどうして存在するのだろうか。これに関しては、現代の天文学ではかなりの程度まで理解が進んでおり、いろいろなことがわかっている。これは筆者の著書「天文学入門 ― 星とは何か」

(丸善)でも強調しているところであるが、「星とは何か」については一通りのことはわかっている、と天文学者は考えている。そしてそれによると、重さが太陽の10倍以上というような大きな星は、最期に超新星爆発を起こし、その後中性子星になるとされる。(ちなみに太陽程度の星は、爆発は起こさずに収縮して白色矮星になる。)そして、重さが太陽の3倍以上の中性子星は、表面の重力が大変強力になって光も脱出できず、外見は「ブラックホール」となる。

現代天文学の星の理論では、このようなブラックホールになる星は太陽の数十倍の重さでなければならないが、他方、太陽の100倍以上というような巨大な星は不可能ということもわかっている。仮に宇宙の物質が大量に(100倍以上)集まったとしても、内部の核反応が速く進み過ぎて表面の物質が飛び散ってしまうのである。したがって、太陽の重さの10倍以上というような中性子星のブラックホールは存在しないと考えられる。

本稿も終りに近くなってきたが、これからが本題である。すなわち、今回の重力波の初観測ではまさに前述の「チャープ信号」が受かったのであった。受信された信号を図2の理論計算と比較するとまさにピッタリであり、中性子星連星の合体の重力波に間違いがないことがわかった。

ここまでは、まさに冒頭でも述べたように「やはり」という予想通りだったのだが、観測波形を詳しく調べると、予想外のことが次々と明らかになった。

まず、波形からわかる2つの中性子星の重さが、それぞれ太陽の36倍と29倍、また合体後の重さは太陽の62倍であった、ということである。また、波動の強度から距離も推定されたがそれは前述の観測限界8億光年を超える13億光年であった。

当然これらの中性子星はブラックホールになっているはずであり、その意味で本稿の冒頭では「2つのブラックホールの合体」と述べているが、その元は大型の中性子星として形成されたものと考えられる。しかしそれらの重さは、これらが「中性子星」として形成されるには、なんとしても重すぎる。

他方、宇宙には太陽の何億倍という巨大ブ

ラックホールも確かに存在するのであるが、その形成メカニズムは中性子星とはまったく異なっていると考えられる。ではどうしたらこのような大型中性子星ができるのであろうか。

一つの可能性は、宇宙が始まったばかりの頃に太陽の数百倍というような星が形成され、これが大型の中性子星を生み出した、という考えである。しかし最初の星が形成される頃の宇宙の状態というのはまだまだわからないことが多く、研究上の「暗黒時代」とも言われている。今回の大型中性子星(すなわち太陽の数十倍のブラックホール)がこの時代のものとすれば、あたかも暗黒の中に一条の光が射したようなものである。多くの天文研究者が色めき立ったと言っても過言ではない。ちなみに重力波観測の発表の数カ月後には、そのような観点から大型中性子星ブラックホール連星の形成可能性を、日本の研究グループが考察し、論文を発表している。

もう一つ意外なことがある。それは、合体前の質量と合体後の質量に大きな差があるということである。(以下、重さと言わずに「質量」とする。)すなわち、合体により太陽質量の3倍という物質存在が消滅しているのである。これは、莫大なエネルギーと化して宇宙へ放射されたと考えられるが、そのエネルギー量は太陽が1秒間に放射するエネルギーの1兆倍の1億倍となり、これが重力波が観測された0.1秒の瞬間に放射されたとすると、100億個の銀河の発する光の明るさに相当する!

天文学上のこれらの大発見は、現代科学技術の粋を集めた観測装置で初めて可能になったのであるが、今回はその最新鋭の技術について解説する。

プロフィール

1942年、群馬県生まれ。大学院天文学専攻課程修了後、東京天文台(現国立天文台)に勤務。当時はまだ日本標準時は天文台の天体観測から決められており、これに関係した観測や研究を行った。その後標準時は原子時計で決められるようになり、天文台の観測は終了。これを契機に一橋大学に移り、一般教養科目および情報科学の教育を担当した。このころちょうどインターネットの普及が始まり、これに合わせてデータベース天文学の研究を始めて、国立天文台天文データセンターの整備運営に協力した。現在も天文データ整備の研究を行いつつ、一般教養教育の経験を生かして天文学普及活動に積極的に関わっている。

駿台天文講座・駿台天文台 教育顧問