

ブラックホールと情報

太 田 和 俊

2016年2月、「重力波の直接観測に成功」というニュースが大々的に報じられた。この重力波の観測とは科学史に残る偉業であり、今後の物理学、天文学の進展に重要な意味を持つものである。今回の定例研究会報告では、この重力波の観測という話題を手掛かりに、重力という力の持つ意味、今後どのような発展が期待されるのかについて述べたいと思う。

「重力」という力に対して、初めて科学的な理解を与えたのはアイザック・ニュートンである。ニュートンは太陽の周りを公転している惑星の運動が「万有引力」と呼ばれる法則によって説明できることを示した。ニュートンが考えた万有引力の法則は質量を持った物体同士に働く力であり、その力の影響は遠く離れた場所であっても瞬時に到達する「遠隔作用」として扱っていた。

しかし、20世紀に入り、この遠隔作用としての重力の法則に疑問を持つ人物が現れた。アルベルト・アインシュタインである。アインシュタインは自身が生み出した特殊相対性理論によって、あらゆる現象・情報は光の速度を超えて伝達することはないということを見出していた。もし、重力が遠隔作用であるならばその力の伝搬は光の速度を超えることとなり、特殊相対性理論とは矛盾することになってしまう。アインシュタインは加速度運動と重力の作用が同等であるという「等価原理」という考え方をを用いて、相対性理論を加速運動と重力を含む形で一般化し、一般相対性理論として発表した。一般相対性理論によれば、重力はニュートンの万有引力の法則とは異なり、時空そのものの歪みとして「近接作用」で記述され、その力の伝搬速度は光の速度であることが帰結される。特に、質量を持った物体が回転したり、振動したりすると、空間の歪みの時間的变化が波を発生させ、空間を伝搬していく。この波が「重力波」である。

アインシュタインが提唱した重力を空間の歪みとして捉える考え方は、発表直後の時点から、太陽周辺の光路の曲りや水星の近日点がニュートンの万有引力の法則の予想とずれて移動すること、などの観測により検証が行われてきた。また、近年ではハッブル宇宙望遠鏡などを用いて遠方の銀河像が巨大重力源によって歪められている写真（アインシュタイン・リングと呼ばれる）が撮影され、最新の観測によっても高い精度で確かめられている。このように、今では一般相対性理論は多くの実験・観測によって正しいものとして考えられているが、「重力波」の存在だけは、長い間、直接検証することができていなかった。アインシュタインの一般相対性理論の完成を見たのが1916年のことであるが、今回ニュースになった観測結果は、まさに100年の年月をかけて重力波の存在を検証することができたということなのである。重力波の観測はアインシュタイン以降100年の物理学者の長年の夢であったわけで、このニュースがいかに大きいものであったかわかっていただけるだろう。

この重力波の観測（検出）がなぜ困難を極め100年もの長い年月が必要だったかというと、その大きな理由は重力が非常に弱い力であるからである。普段、我々は地球の重力に支配され、大

きな力として感じているため、重力が弱いと言われてもピンとこないが、実は重力の大きさは我々の身近にある他の力の電磁気力と比べると 10^{36} 分の1ほどの大きさしかない。

この非常に弱い重力によって作られた重力波をどのように検出するかであるが、今回、観測に成功したのは、アメリカのワシントン州とルイジアナ州にあるLIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) と呼ばれる実験施設である。LIGOではレーザー干渉計と呼ばれる実験装置を使って重力波の影響による空間(距離)のわずかな変化を測定する実験を行なった。レーザー干渉計とは90度に交差した光路にレーザー光を往復させ重ね合わせ、光の干渉という現象を用いて、その光路のわずかな距離の変化を捉える装置であるが、LIGOは片側のレーザー光路の距離が4 kmもある巨大な実験装置である。このような巨大な実験装置を用いても、重力波の影響はものすごく小さく、4 kmの光路に対して距離の変化は 10^{-19} m (陽子の大きさの1万分の1)程度である。このような極小の変化を捉えないといけないため、地上からのわずかな振動さえ重大な問題となり、実験の精度を上げるのは困難を極める。レーザー干渉計を用いて重力波を捉えようとするアイデア自体は古くからあったが、実際に観測できるだけの精度を持つ実験装置を作るのは、多くの工夫と努力および最新の技術が必要であった。それらの努力や技術が重力波の直接観測によりやく到達できるようになったのが、アインシュタインの理論の発表から100年後であったというわけである。

LIGOが捉えた重力波は、地球から13億光年離れた2個のブラックホール同士が衝突合体した時に発生したものである。2個のブラックホールはそれぞれ太陽質量の86倍と29倍あり、それらがお互いに回転しながら衝突したため、特徴ある振動パターンの重力波が放出された。もし、LIGOの実験施設が一箇所だけであったなら、他のノイズの可能性も排除できないが、3000 km遠く離れた2点間の実験装置で、同等のパターンの振動を検知し、その時間的なずれなどが理論的な予想と多く合致した。このことにより、ほぼ間違いなく重力波を検知したという確証が得られ、メディアに向け発表が行われた。

このLIGOによる重力波の観測によって、物理学上、天文学上の大きな転機を迎えた。一つはアインシュタインの一般相対性理論の新たな検証が加わったことであり、もう一つはブラックホールの合体という天体現象が重力波の発生と共に観測できたことである。ブラックホールとは太陽質量の数十倍の重さを持つ恒星が、核融合反応による燃焼を終える時、自身の持つ重力のエネルギーで潰れ(崩壊)すると同時に、超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こした後に残ると考えられている高密度の天体である。大質量が高密度で小さく圧縮されているため、ブラックホール近傍の重力は非常に強くなっており、光ですら一度吸い込まれたら脱出できないと考えられている。(ブラックホールとは光さえ出て来られない黒い穴という意味である。)現時点で、ブラックホールと思われる天体の候補はいくつも確認されているが、連星のガスを吸い込む時に発生するX線の観測などで間接的にその存在が予想されているだけである。しかし、今回のLIGOによる重力波の観測によって、ブラックホールが合体した時に発生したと考えるに十分な証拠を得ることができた。依然としてブラックホールの存在としては間接的な証拠としか言えないが、ブラックホールを含む強重力の天体を重力波によって観測できるようになった意義は大きい。

上で述べたように、重力という力はとても弱い。その力の弱さゆえ、地球上の加速器を用いた

実験などでは重力を直接的に調べることはできず、地球から遠く離れた大質量のブラックホールを調べることが重力の研究では重要となる。特に、ブラックホール近傍の強重力場中での出来事を量子力学も含めて理解することが現在の物理学上の大問題となっている。アインシュタインの一般相対性理論は、重力がある程度弱く、量子力学的効果が無視できるような状況では、高い精度で検証されているが、ミクロな世界の法則である量子力学と重力が同時に働くような状況での物理法則については未知の部分が多く残されている。

その問題の一つは、ブラックホールによる情報の消失という問題である。ブラックホールはその強重力のため、あらゆる物質を吸い込んでしまうが、一般相対性理論からの帰結では、ブラックホールが持ちうる情報は質量と電荷と角運動量だけだということが知られている。吸い込まれる前の物質はその構成要素として様々な情報を持ちうるが、一旦ブラックホールに吸い込まれてしまうと、あらゆる情報が質量と電荷と角運動量の3つだけに還元されてしまう。このことは、物理学の根本原理である「熱力学の第二法則」と矛盾を起こす。熱力学の第二法則は、外部からの熱の出入りや仕事が行われない不可逆変化が生じた場合、その系の情報量（エントロピー）は必ず増大すると表現される。ブラックホールにものが吸い込まれる場合は、不可逆的な変化のため、情報量は増大するはずであるが、一般相対性理論からは逆に情報が質量と電荷と角運動量の3つに還元されて減少するという帰結となってしまう。この問題にはスティーヴン・ホーキングをはじめとして多くの物理学者が研究のアプローチを行なっているが、一般相対性理論だけでなく量子力学を含めた重力の真の理解が必要であるという認識以上の決定的な解決には至っていない。

重力は時空の成り立ちを含む宇宙全体を支配している根源的な力という性格のため、またその圧倒的な弱さによる実験を含む研究の難しさゆえ、物理学上の最大の研究対象のひとつとなっている。重力という力の真の理解のためには、ブラックホールの近傍などの強重力場中で起きる物理現象の理解が欠かせない。このブラックホール研究のための大きな手がかりを与えてくれた今回のLIGOによる重力波の観測は、今後の物理学研究の進展においても重要なものとなるであろう。