

天文学へのインパクト (1) 理論研究

佐々木 節

〈京都大学基礎物理学研究所 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: misao@yukawa.kyoto-u.ac.jp



重力波が直接観測されたことの理論研究へのインパクトを議論する。

1. 予想外の重力波源

今年の2月11日（日本時間では12日の未明）は世紀の大発見の日となった。その少し前から、アメリカの大型重力波検出装置LIGOのグループから重力波の直接観測に成功したようだ、といううわさが駆け巡っており、2月11日にLIGOチームの記者会見がある、というニュースが発表されていた。しかし、LIGO検出器がやっと動き出した直後ただだけに、多分重力波放出天体の有力候補が見つかった、という程度の発表ではないかと高をくくっていた。ところが、ふたを開けてみたら、LIGOの代表のライツ氏が「私たちは重力波を検出しました。やりました！」と言って、ブラックホール連星が合体して新たなブラックホールが形成されたことを示す、実に見事にきれいなデータを発表した¹⁾。

これは二重の意味で驚きであった。まず第一は、なんとと言ってもこの発見が重力波天文学の夜明けを意味することである。これまでも間接的には重力波を使ったさまざまな天体現象や宇宙論モデルに対する制限などが議論されてはいたが、天文学の手段としてはあくまでも補助的なものであった。しかしこれからは、ちょうど電磁波で星や銀河を観測するように、重力波でそれらを観測するという、新たな宇宙の観測手段を人類が手に入れたのである。もちろん、この新たな観測手段によって、予想もしなかった新たな天体現象が今後続々と発見されるであろう。

第二の驚きは、予想もしなかった発見が正になされた、という点である。すなわち、検出された重力波がそれぞれが太陽質量の30倍ほどある巨大ブラックホールの連星系からのものであり、それらが合体して太陽質量の3倍もの質量エネルギーを重力波として放出する過程のものであったからである。これまで考えられていた直接観測可能な最も有力な重力波源は、すでにその存在が確実な中性子星連星の合体過程であり、実際、LIGOやそのほかの大型検出器はすべて中性子星連星の合体過程の観測を主なターゲットとして開発されてきた。一方、ブラックホール連星は、それが物質のない重力のみですべてが決まる最もクリーンな連星系であるため、理論的には多くの議論や計算がなされていたが、その実在性に関しては観測的証拠は全くない状況であった。

ところが、ブラックホール連星の合体過程がLIGOの観測が始まってすぐに観測されたということは、実際には中性子星連星の合体よりはるかに多くのブラックホール連星が存在することを示唆している。相当いい加減な評価を許してもらえば、発見されたブラックホール連星までの距離は約400 Mpcがあるので、同様の現象が年に10回起こるとすると、半径約1 Gpc以内では年に100回程度起こることになる。これは、星形成や進化の理論に一石を投じることにもなるであろう。

余談であるが、発見されたブラックホール連星の合体がどれだけすごい現象かという点、そこで重力波として放出されたエネルギーは太陽が今の明るさで永遠に輝き続けると仮定したときに約50兆年輝き続けることができるエネルギーなのである。ちなみに、現在の宇宙年齢は約140億年であり、50兆年というのはその約3,000倍という果てしない時間である。これだけ膨大なエネルギーが、この合体過程では、ほんの0.1秒程度の間重力波、すなわち時空の揺らぎのエネルギーとして放出されたことになる。

今回の発見は、重力の物理学についても大きな意味があった。まず第一に、観測された重力波の波形が一般相対論の理論的予言と完璧に一致した点である。すなわち、初めて強重力場中での一般相対論の検証がなされたのである。そして第二に、ブラックホールの直接観測に成功した点である。これはなぜかという点、二つのブラックホールが合体して一つのブラックホールが形成された際に、その事象の地平線近くの時空が揺らぐことによって誘起される、ブラックホールの準固有振動モードが観測されたのである。ブラックホールにも通常の星と同様の固有振動モードがあるが、ニュートン重力との違いは、それが時空の揺らぎであることから、必ず振動が減衰することである。その振動数と減衰率は、ブラックホールの質量と角運動量でユニークに決まっている。上記の放出エネルギーの評価には、全体の波形との整合性とともこの準固有振動の検出が大きな役割を果たした。すなわち、史上初めてブラックホールのごく近傍の時空がプローブされたのである。

2. 重力波天文学のこれから

重力波の直接観測が実現したことによって、重力波天文学はこれから大いに発展するであろう。わが国でも岐阜県神岡町にある大型低温重力波望遠鏡KAGRAがついに先ごろ試験運転を開始した²⁾。わが国で最初の直接観測ができなかったことは少々残念ではあるが、一方で、LIGOの感度で観測可能な重力波が確実に存在することがわかったことは、KAGRA自身にとっても非常に大きな意味がある。今後の重力波天文学の発展を考えたとき、LIGO、VIRGO³⁾、KAGRAなど、いくつもの重力波検出器がネットワークを作り同時観測することが極めて重要となる。そうした日もそう遠くない未来に実現しそうだ。

また、より長波長の重力波検出を目指すスペース干渉計画LISA⁴⁾やDECIGO⁵⁾、遠方のパルサーを使ったパルサー・タイミング・アレイ計画⁶⁾なども着実に進んでいる。宇宙初期からの重力波の検出も近いうちになされるかもしれない⁷⁾。重力波天文学は、今正に生まれたばかりの学問分野である。今後、どのような新発見がなされるのか、しばらくは目が離せない。ノーベル賞がいくつあっても足りない時代がすぐそこに迫っている、と言って決して過言ではないであろう。

参考文献

- 1) <https://www.ligo.caltech.edu/detection> 専門的内容については B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Phys. Rev. Lett. 116, 061102. [arXiv: 1602.03837]
- 2) KAGRAについては以下のウェブを参照のこと。 <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 3) VIRGOについては以下のウェブを参照のこと。 <http://www.virgo-gw.eu/>
- 4) <http://lisa.nasa.gov/>
- 5) http://tamago.mtk.nao.ac.jp/decigo/index_E.html
- 6) https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsar_timing_array
- 7) 例えば日本を中心とした計画としてLiteBIRDがある。 <http://litebird.jp/eng/>