

天文学へのインパクト (3) ブラックホール形成

牧島 一夫¹⁾, 鶴 剛²⁾



牧島



鶴

1) <理化学研究所グローバル研究クラスタ MAXI チーム
〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1>

e-mail: maxima@riken.jp

2) <京都大学理学研究科物理学第2教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町>

e-mail: tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

今回の GW 150914 検出の驚きの一つは言うまでもなく、 $\sim 29 M_{\odot}$ と $\sim 36 M_{\odot}$ という、恒星ブラックホール（以下 sBH）としては異常に「重い」二つが合体し、 $\sim 3 M_{\odot}$ の静止エネルギーが重力波エネルギーに変換された後、 $\sim 62 M_{\odot}$ というさらに重いブラックホール（以下 BH）が誕生したことであろう。

これまで測定・推定された約20個のsBHの質量は、誤差の上下限まで含めても $3\text{--}18 M_{\odot}$ であり¹⁾、後述のULXを除くと、 $>20 M_{\odot}$ のsBHの観測的証拠は無かった。また理論的にも、大質量星は星風で初期質量のかなりの部分を失う結果、 $>20 M_{\odot}$ のsBHを作ることは（後述のPopulation IIIを除き）困難といわれている²⁾。実際LIGOチームが重力波望遠鏡のデータに対し、合体のパラメーターを仮定したテンプレートを用いる「低遅延解析」を行う際、こうした重いsBH同士の合体のパラメーター領域は当初は探索されず、より汎用なwavelet解析により検出されたと聞く。大質量sBH同士の合体のお蔭で信号が極めて強かったことが幸いしたといえる。

GW 150914の検出により、重いsBHが確かに存在することや、それらが合体を通じて質量を増やしていることが証明された。また9月14日はAdvanced LIGOの公式な稼働開始の5日前であり、試験観測中にこのイベントが検出されたことから、こうした種族や合体が希ではないことも示唆される。

ではこうした「重い」sBH達はどのように形成されたのだろうか。まず考えつくのは、衣川ら^{3), 4)}が論じるように、Population III (Pop III) の大質量星が連星をなし、それぞれが直接 $>20 M_{\odot}$ のsBHを作り、それらが重力波放出をして合体したという可能性であろう。言うまでもなく、初代星であるPop III星は重元素を欠くため、星風が出にくく、大質量を保ったまま終焉に至ると考えられるからである⁵⁾。

しかしPop IIIシナリオが確定したと考えるのは早計であろう。重元素を含むPopulation I/IIの星であっても、例えば高密度の星団中での星の逃走的な合体⁶⁾、 $\sim 80 M_{\odot}$ 同士で軌道周期 ~ 3.7 日をもつWR20a⁷⁾のような大質量連星系の進化⁸⁾、速い回転⁸⁾、強い磁場などを考えた場合、 $>20 M_{\odot}$ のsBHが形成されるチャンネルは残る可能性がある。実際、sBHの形成シナリオにはまだ謎が多い。例えばマグネター（超強磁場をもつ中性子星）が、本来はsBHになるはずの $20\text{--}40 M_{\odot}$ の大質量星から作られたという観測的な示唆がある⁹⁾。中心にsBHをもつ超新星残骸が皆無に近いのは、質量降着が起きないからなのか、sBHの形成には超新星爆発が伴わないのか、未解決である。sBHを含む銀河系内の連星の多くは、低質量星を相手にもつが、そのような系の形成シナリオも謎である。

重力波源となる重いsBHの起源を探るには、それらの親銀河や、親銀河の中での位置を特定することが必須である。それには「KAGRA」の参加などにより、重力波イベントの誤差範囲を格段に狭めるとともに、対応す

る現象を電磁波で捕らえることも必須である。GW 150914について言えば、ほぼ同時にガンマ線の信号があったと主張するFermiガンマ線宇宙望遠鏡のGBM装置の結果¹⁰⁾と、なかったとするガンマ線衛星INTEGRALシールド部の結果¹¹⁾が整合しない。そもそもガスをもたないsBH同士合体した場合、強い電磁放射は期待できないであろう。しかし形成されたBHが多少ともガスの濃い環境にあれば、ボンディ降着（その降着率はBH質量の2乗に比例）で光る可能性がある²⁾、sBHと中性子星の合体であれば電磁放射が期待される。

こうした電磁波信号の検出においては、国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」上で稼働中の、全天X線監視装置MAXI¹²⁾や、米国のガンマ線バースト探査衛星Swiftが重要である。さらにFermiやINTEGRAL、「きぼう」に2015年に搭載された一次電子観測装置CALETの副装置CGBMなど、位置精度は低いが全方位に感度をもつガンマ線バーストの監視装置も有用である。

GW 150914の波及効果が期待されるテーマの一つが、ULX (Ultra-luminous X-ray source) 天体、すなわち近傍銀河の渦巻き腕に散見される、 $10^{39.5-41.5} \text{ erg s}^{-1}$ という高光度をもつX線点源である。その正体については、数十～数百 M_{\odot} の「中質量ブラックホール」がエディントン限界程度で光っているという説¹³⁾と、通常のsBHに超臨界降着が起きているとする説¹⁴⁾が、長らく拮抗している。今回のGW 150914は、前者の立場に追い風となる結果である。形成された重いBHが、親銀河の星間ガスの濃い領域を通過する際、ボンディ降着で光るとULXになるという可能性も浮上する¹⁵⁾。ULXは、光電吸収、重元素の蛍光輝線や吸収線など、周辺に濃い物質が存在する徴候を示さず、ボンディ降着を考えると都合が良い。ハロー状に分布すると思われるPop III起源のBHが、渦巻腕に遭遇する確率は小さすぎるかもしれないが、Pop I/II起源であればその困難も回避されるだろう。

同様に大きな波及効果が期待されるのは、活動銀河核 (AGN) を構成する、巨大ブラックホールの形成機構であろう。リース (M. Rees)¹⁶⁾が1984年に論じて以来、AGNの形成シナリオに目立った進展は見られなかったが、今回の結果はAGNの形成過程に、ブラックホール同士の合体が効いているという見方を強めるものと言える。将来的には、sBH, ULX, AGNを包括して、宇宙に存在するブラックホールの質量関数を決めるという大目標が掲げられるかもしれない。

本稿の執筆にあたり、伊藤洋介、幸村孝由、坂本貴紀、茂山俊和、芹野素子、中村卓史、馬場彩、前田啓一の皆様 (50音順) にご教示をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Remillard R. A., McClintock J., 2006, ARA&A 44, 49
- 2) Fryer C. L., Kalogera V., 2001, ApJ 554, 548
- 3) Kinugawa T., Inayoshi K., Hotokezaka K., Nakauchi D., Nakamura T., 2014, MNRAS 442, 2963
- 4) Kinugawa T., Miyamoto A., Kanda N., Nakamura T., 2016, MNRAS 456, 1093
- 5) Schneider R., Ferrara A., Natarajan P., Omukai K., 2002, ApJ 571, 30
- 6) Ebisuzaki T., et al., 2001, ApJ 562, L19
- 7) Rauw G., et al., 2004, A&A 420, L9
- 8) Woosley S. E., 2016, astro-ph/1603.00511
- 9) Nakano T., 2015, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo
- 10) Connaughton V., et al., 2016, astro-ph.HE/1602.03920
- 11) Savchenko V., et al., 2016, astro-ph.HE/1602.04180
- 12) Matsuoka M., et al., 2009, PASJ 61, 999
- 13) Makishima K., et al., 2000, ApJ 535, 632
- 14) Vierdayanti K., Watarai K., Mineshige S., 2008, PASJ 60, 653
- 15) Mii H., Totani T., 2005, ApJ 628, 873
- 16) Rees M., 1984, ARA&A 22, 471