

# 連星系の輪舞曲

東邦大学 関口雄一郎

## 1. ついに解かれたアインシュタインの宿題

“We did it!” 2016年2月11日(米国時間)、米国のLIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) の研究チームによって、史上初の重力波直接検出が記者発表された。その重力波イベントは、観測された日付2015年9月14日を取りGW150914名づけられた。一般相対性理論の提唱、そして重力波の予言から100年、アインシュタインからの宿題が ついに解かれた瞬間であった。

重力波とは、一般相対性理論がその存在を予言していた光速で伝播する時空のゆがみであり、電磁気学でいえば電磁波に相当する。荷電粒子の加速度運動によって電磁波が発生するのに対して、重力波は時空をゆがめる源である質量 ( $E = mc^2$ よりエネルギーと等価) が加速度運動することで放射される。質量  $M_2 = qM_1$  ( $q$ : mass ratio) の連星系の場合、重力波の振幅  $h$  と周波数  $f$ 、および光度  $L$  は

$$h \sim 3 \times 10^{-21} q \left( \frac{a}{300 \text{ km}} \right)^{-2} \left( \frac{M_1}{10 M_\odot} \right)^{-2} \left( \frac{D}{100 \text{ Mpc}} \right)^{-1}$$

$$f \sim 100 \text{ Hz} \left( \frac{a}{300 \text{ km}} \right)^{-3/2} \left( \frac{M_1 + M_2}{20 M_\odot} \right)^{1/2}$$

$$L \sim 7 \times 10^{53} \text{ erg/s } q^2 (1 + q) \left( \frac{a}{300 \text{ km}} \right)^{-5} \left( \frac{M_1}{10 M_\odot} \right)^5$$

で与えられる。ここで  $a$  は軌道長半径、 $D$  は重力波源までの距離である。観測ターゲットとなる重力波がもたらす時空のゆがみ  $h \sim 10^{-21}$  とは、1天文単位の長さのものさしが水素原子の大きさだけ伸び縮みするような極微小のものである。より腕の長さの短いLIGOをはじめとする地上重力波検出器の場合、陽子の大きさの1/10000ほどの時空のゆがみをとらえる設計となっている。(重力波検出器に関しては大石奈緒子さんの収録参照)。

これほど小さなゆがみをとらえるためには、重力波検出器だけではなく、高精度の重力波の理論波形(それが予測可能な場合には)を広範に用意しておく必要がある。観測データと理論波形の相関解析の一つである Matched-filtering と呼ばれる統計手法を用いることで、重力波の検出効率を大幅に上げることができるからである。理論波形の準備には数値相対論をはじめとする大規模な数値計算が必要であり、この意味において、GW150914における史上初の重力波直接検出は、観測/実験/理論物理学・天文学に加え、計算機科学を含めた知力の結集によって成し遂げられた成果である。

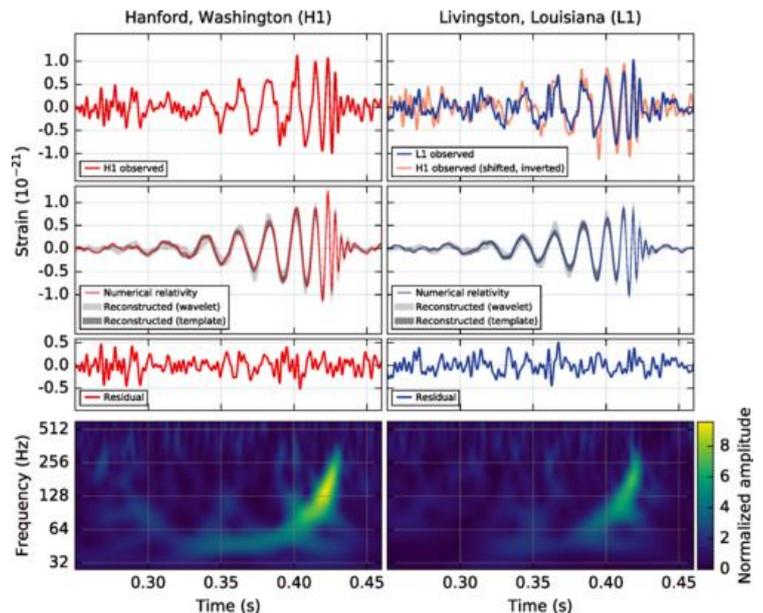


図1: LIGO Hanford (H1, 左図) および LIGO Livingston (L1, 右図) で観測された重力波波形 (上段)、数値相対論波形との比較 (中段) および周波数進化 (下段)。[1]より転載。

Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio $\rho$	23.7	13.0	9.7
False alarm rate FAR/yr <sup>-1</sup>	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	$7.5 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-8}$	0.045
Significance	$> 5.3\sigma$	$> 5.3\sigma$	$1.7\sigma$
Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	$23^{+18}_{-6}$
Secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	$13^{+4}_{-5}$
Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$
Total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	$37^{+13}_{-4}$
Effective inspiral spin $\chi_{\text{eff}}$	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
Final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	$35^{+14}_{-4}$
Final spin $a_f$	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$
Radiated energy $E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$3.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$1.5^{+0.3}_{-0.4}$
Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$	$3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$
Luminosity distance $D_L/\text{Mpc}$	$420^{+150}_{-180}$	$440^{+180}_{-190}$	$1000^{+500}_{-500}$
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$
Sky localization $\Delta\Omega/\text{deg}^2$	230	850	1600

表 1：重力波波形から見積もられた連星ブラックホールイベントの諸量。[2]より転載。

## 2. なぜ連星ブラックホールからの重力波と分かったか？

図 1 に Louisiana 州 Livingston と、Washington 州 Hanford にある 2 台の LIGO 検出器で観測された振幅と周波数を示す。重力波の放出によって軌道長半径が減少し、重力波周波数が上昇するので、周波数の変化から重力波光度が計算できる。光度と周波数を組み合わせると、重力波源は、太陽の数十倍の質量を持ち、かつ数百 km の軌道長半径まで近づける天体でなければならないことになる。目下、そのような天体はブラックホールしか知られておらず、GW150914 は連星ブラックホールの合体であると結論付けられた。質量と周波数がわかると、重力波振幅から重力波源までの距離を見積もることができる。

数値相対論シミュレーションの結果等による詳しい解析の結果によると、GW150914 は、地球から  $410^{+160}_{-180}$  Mpc の彼方で、 $36^{+5}_{-4} M_\odot$  および  $29^{+4}_{-4} M_\odot$  の質量を持つブラックホール連星が合体して  $62^{+4}_{-3} M_\odot$  のブラックホールになった際に発生した重力波によるものであることが明らかとなった[1]。観測された重力波がたまたまノイズ起源である確率は  $6 \times 10^{-7}$  以下であり、有意水準は  $5\sigma$  以上である。そのほかの解析結果を表 1 にまとめる[2]。

## 3. 連星ブラックホールの形成シナリオ

GW150914 に続いて、2015 年 10 月 12 日に有意さが小さいため重力波候補とされた LVT151012 [2]が、2015 年 12 月 26 日には GW151226 [3]が観測された。そのいずれも、重力波波形から見積もられた質量は連星ブラックホールの合体が起源であることを示唆していた (表 1 参照)。これは多くの研究者を驚かせた。銀河系内には多数の pulsar と 7 個の連星 pulsar が見つかっている[4]のに対して、ブラックホールについては、連星ブラックホールはおろか、確実に  $20 M_\odot$  を超える質量を持つものさえも見つかっていないため、初めに観測される重力波は連星中性子星の合体によるものであると考えられていたからである。重力波観測が示唆する恒星質量程度の連星ブラックホールの合体率  $9 - 240 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  [2] を達成するような連星ブラックホール形成シナリオが謎となった。エキゾチックなものを除けば、連星ブラックホールの形成シナリオとして以下の 3 つが考えられている[5]

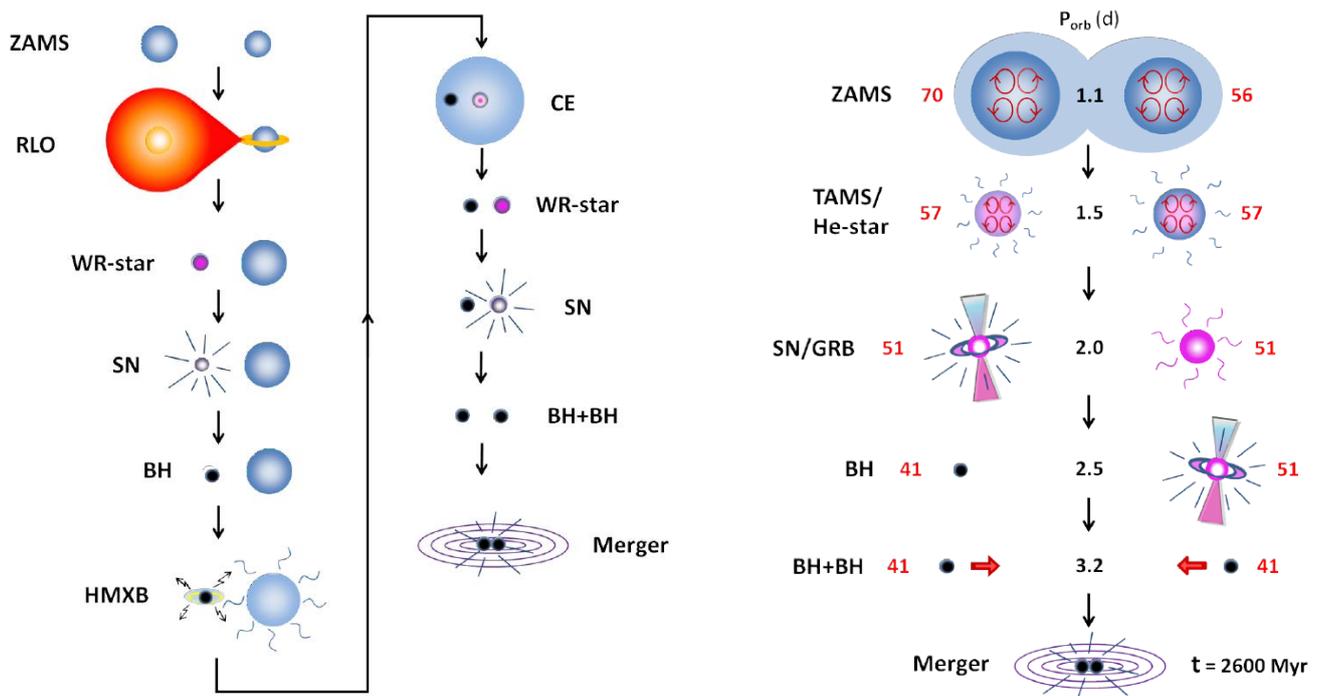


図 2 : 連星ブラックホール形成の連星系進化シナリオの概略図。左図 : Standard binary evolution scenario. 右図 : Chemically homogeneous evolution in contact binary scenario. それぞれ略記の意味は ZAMS: zero-age main sequence; RLO: Roche-lobe overflow; WR-star: Wolf-Rayet star; SN: supernova; BH: black hole; HMXB: high mass X-ray binary; CE: common envelope; TAMS: termination of hydrogen burning; GRB: gamma-ray burst である。[11]より転載。

- ① “Standard (classic)” binary evolution scenario [6,7,8,9,10]
- ② Chemically homogeneous evolution in massive contact binary scenario [11,12]
- ③ Dynamical formation in dense stellar cluster scenario [13,14,15]

連星ブラックホール形成の“standard”シナリオ(図2左参照)は、連星中性子星形成シナリオに準ずるものである。このシナリオには、common-envelopeにおける進化[16]、伴星からの質量放出に伴う主星の質量降着およびspin-upの効率[17]、潮汐相互作用[17]、星風の取り扱い[18]など多くの不定性が含まれているが、最近のpopulation synthesis計算によると、 $Z \leq 0.25 Z_{\odot}$ のmetallicityの低い環境下では十分な数の連星ブラックホールが形成することが可能性である[8,9,10]。Low metallicityにおける典型モデル[10]ではブラックホール質量が幅広いレンジにわたるのに対し、KinugawaらによるPopIII星を起源とするシナリオ[9]では、典型的なブラックホール質量が数 $10 M_{\odot}$ にclusterすることが予想されており、今後の重力波観測による制限が期待される。

Marchantら[11]とde Mink & Mandel [12]は、大質量星の近接連星系において、潮汐相互作用によってspin upし、回転により駆動されるmixingにより、いわゆるタマネギ型構造をとらず、恒星内部が化学的に一様なまま進化をするchemically homogeneous evolution[19,20]に基づくシナリオを提唱している。大部分の近接連星系は連星ブラックホールへと進化する前に合体してしまうが、重力波の観測を説明できるパラメータレンジが存在する。このモデルは、連星進化で最も不定性の大きいと考えられるcommon-envelopeと、伴星からの質量降着の効率に依らないという長所があるが、回転によるmixingの取り扱い[20]という不定性がある。理論計算の進展[21]に加え、H-R diagram上で、通常タマネギ型の進化では説明できず、chemically homogeneous evolutionと整合的な、青

くて水素の外層を多く持つ恒星が SMC と LMC で発見されている[22,23]こともあり、このシナリオへの興味が集まっている。大部分の近接連星系が途中段階で合体してしまうということは、連星ブラックホールよりはるかに多くのブラックホールが存在することを示唆しており、様々な背景放射による将来的な制限が期待される場所である。

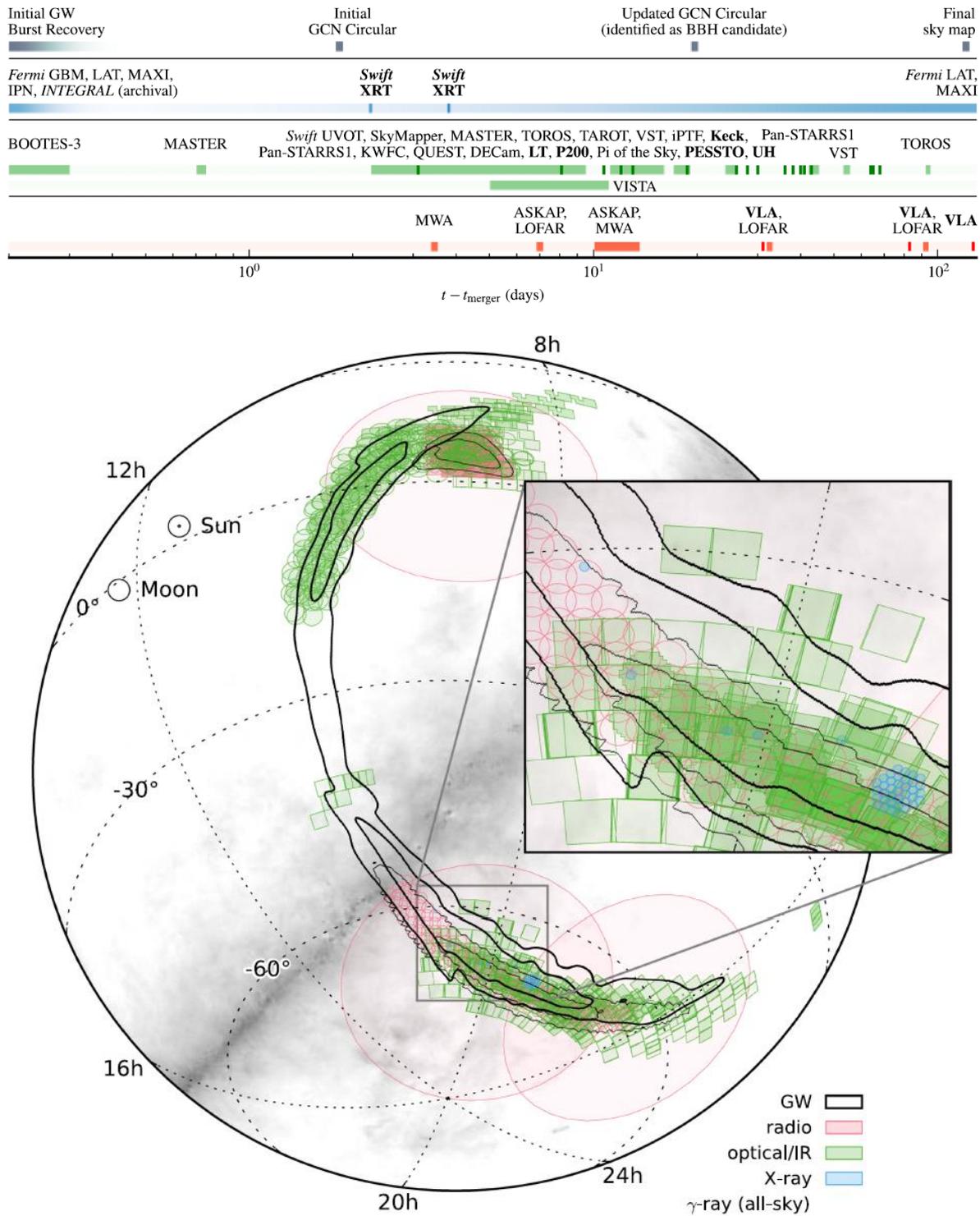


図 3 : GW150914 に対する電磁波対応天体のフォローアップ観測の概要。上図：観測のタイムライン。上から速報、高エネルギー観測、可視・近赤外観測、電波観測の順。可視・近赤外観測において、太字および色の濃い部分は可視スペクトル観測を行ったことを示す。電波観測で太字および色の濃い部分は narrow-field 観測を行ったことを示す。下図：電磁波フォローアップ観測がなされた領域。[26]より転載。

Dynamical formation シナリオでは、星の数密度の高い **dense stellar cluster** や誕生まもない球状星団において、力学摩擦で星団中心領域に落ち込んだブラックホールが、3 体相互作用や 2 体非弾性相互作用で連星ブラックホールが形成されると考える[13]。これら重力相互作用で形成された連星ブラックホールは高い離心率を持つ可能性が指摘されており[14]、この場合には近日点における強い重力波放射を伴う進化をするため、宇宙年齢以内に合体可能である。

### 3. GW150914 に付随する電磁波対応天体

GW150914, GW151226, LVT151012 という、連星ブラックホール合体からの歴史的な重力波イベントは、ブラックホールおよび連星ブラックホールの存在を初めて確認するとともに、重力波を用いた基礎物理学のテスト[24]や、一般相対性理論の重力理論としてのテスト[25]の可能性を提供するなど、極めて意義深いものであり、関連分野の研究者の多くを興奮のつぼへと誘った。しかしながら、個人的な感想としては、天文分野の観測者の盛り上がりは、一部を除いてそれほどでもなかった印象である。それは、ひとえに、連星ブラックホール合体では観測可能な電磁波を放射する見込みがほとんどないことによると思われる。

実際、GW150914 については、重力波による母天体の位置決定精度は悪く、全領域をカバーするものではないが、国際的な観測ネットワークによる結果は否定的なものであった[26]。観測の概要を図 3 に示す。尚、X/γ 線衛星 Fermi のチームが GW150914 の 0.4 秒後に weak transient を検出したと発表し[27]、理論研究者を騒がせたが、Fermi チームの別の解析では付随する transient は見つからなかったと発表[28]されている。日本の観測グループも電磁波及びニュートリノ観測のための J-GEM (Japanese collaboration for Gravitational-wave Electro-Magnetic follow-up observation) を組織し、LIGO-Virgo 研究グループとパートナー協定(MOU)を結んで、フォローアップ観測において大きな貢献をしている[29]。

### 4. 連星中性子星およびブラックホール - 中性子星連星合体

連星中性子星 (NS-NS) 合体およびブラックホール - 中性子星 (BH-NS) 連星合体では、中性子過剰の物質が光速の数 10% の速度で宇宙空間に撒き散らされ、またブラックホールの周りには降着円盤が形成される可能性があるため、重力波に付随する電磁波対応天体が期待される。様々なシナリオ

<p>▶ <b>重力崩壊型超新星爆発</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Long GRBs           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Prompt (<math>\gamma</math>), afterglow (X to Radio)</li> </ul> </li> <li>▶ Supernova remnants           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Synchrotron: Ejecta-ISM interaction</li> <li>▶ Activities Powered by Pulsar</li> </ul> </li> <li>▶ Radioactive decay of <math>^{56}\text{Ni}</math> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ produced in the explosive ejecta</li> <li>▶ Optical</li> </ul> </li> <li>▶ Classification by spectra           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Type Ib, Ic, IIP, IIL, ....</li> </ul> </li> <li>▶ Shock breakout           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ UV ~ X ( ... )</li> </ul> </li> </ul>	<p>▶ <b>NS-NS, BH-NS 連星合体</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Short GRBs           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Prompt (<math>\gamma</math>), afterglow (X to radio)</li> </ul> </li> <li>▶ Merger remnants           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Radio Flare: Ejecta-ISM interaction [30]</li> <li>▶ Powered by rapidly rotating high B pulsar [31]</li> </ul> </li> <li>▶ Radioactive decay and fission of r-process elements           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Proceeds in the n-rich ejecta [32,33,34]</li> <li>▶ Optical to near-IR [35,36]</li> </ul> </li> <li>▶ Classification by spectra           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Featureless due to Doppler broadening [37]</li> </ul> </li> <li>▶ Merger Shock breakout           <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Ref. [38]</li> </ul> </li> </ul>
--	---

表 2 : 連星中性子星(NS-NS)およびブラックホール-中性子星(BH-NS)合体に付随する可能性のある電磁波対応天体と重力崩壊型超新星爆発の比較

が提案されているが、表 2 にそれらを重力崩壊型超新星爆発と対比する形でピックアップしてまとめる。すべての項目について説明をする余裕はないので、興味のある方は文献を参照されたい。

これらのうち、特に興味深いのは中性子過剰の放出物質中で進行する  $r$  過程で合成される中性子過剰核の  $\beta$  崩壊および fission で解放される崩壊熱をエネルギー源とする可視～近赤外にかけての電磁波放射[32-37] (以下 **macronova** と呼ぶ) である。その理由は、**short GRB (gamma-ray bursts) 130603B** の残光中、バーストから 9 ~ 10 日後に近赤外域 (F160W) に **excess** が見つかり[39,40]、増光のタイムスケールや光度が **Macronova** のモデルとよく合ったからである。この発見後、**short GRB** のアーカイブデータが再解析され、**GRB 05709**, **GRB 060614** にも **Macronova** モデルに合う **excess** が存在することが明らかとなった[41]。将来におけるフォローアップ観測で、重力波の方向に **short GRB** と **Macronova** の両方が見つかったとすると、重力波波形の解析か **NS-NS** 合体なのか **BH-NS** 合体なのかが分かるので、**short GRB** の起源、 $r$  過程元素合成で作られる金やウランなどの重元素の起源を解明することが可能となる[42]。

**NS-NS** 合体および **BH-NS** 連星合体からの重力波によって、中性子星の中心領域で実現している高密度物質の未解明の物理を探ることも可能であり(e.g., [43-47])、イオン衝突実験や理論素粒子・原子核物理学の研究と合わせ、重力波によって中性子星内部を「観測して」様々な物理を調べることができるようになると期待されている。

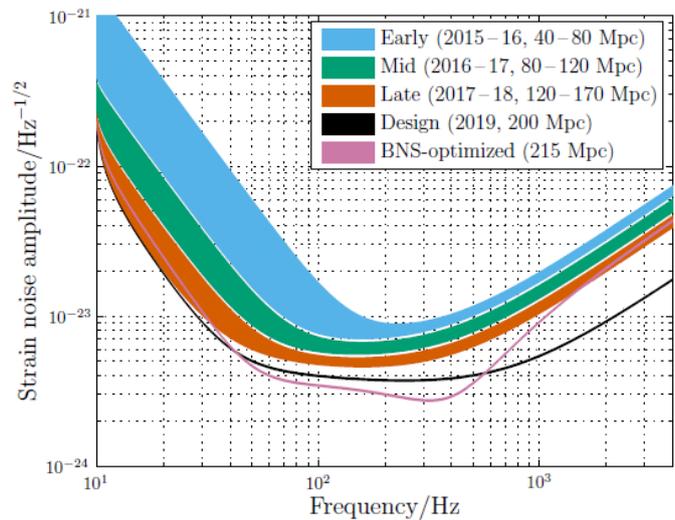


図 4 : advanced LIGO の感度曲線の向上計画。

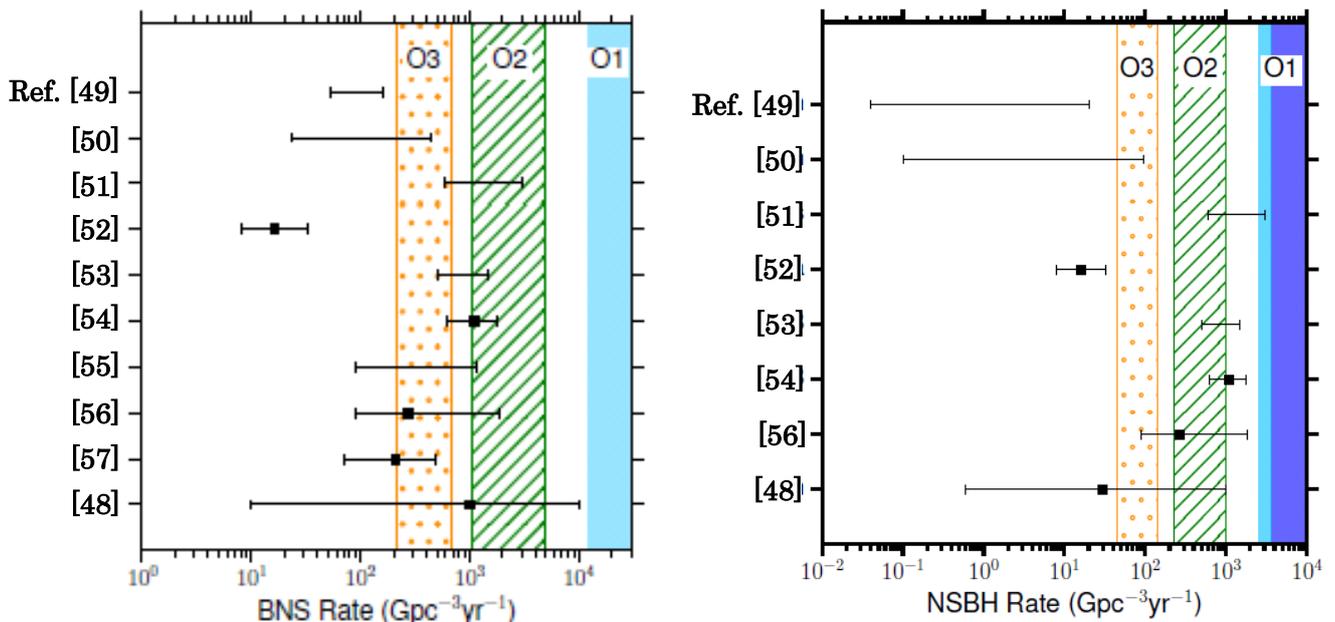


図 5 : **NS-NS (BNS)** および **BH-NS (NSBH)** の合体率と、**LIGO** 観測スケジュール **O1**, **O2**, **O3** における観測可能性の比較。合体率の見積もりについては本文と **Ref.** を参照、**O1** は 2016 年にすでに観測を終え、アップグレードの後 2017 年に **O2** 観測が開始される予定である。**O3** 観測は 2018 年以降となる見込み。[58]より転載。

中性子星を含む連星合体から重力波の合体率と **event rate** はどのくらいであり、上記に挙げた研究テーマはいつ遂行可能になるだろうか。連星中性子星合体に関する **event rate** の見積もりは、

- ① **population synthesis** 計算に基づくもの[48,49,50]
- ② **r** 過程元素の起源が NS-NS (BH-NS) 合体であると仮定して金属欠乏星表面の **r** 過程元素含有率の進化から合体率を評価するもの[51]
- ③ **Macronova** の観測から評価するもの[52]
- ④ **short GRB** の起源が NS-NS (すべての NS-NS が **short GRB** を起こす)、あるいは BH-NS (ブラックホール周りに降着円盤をつくる可能性の高い  $10 M_{\odot} - 1.4 M_{\odot}$  以下の質量比の BH-NS がすべて **short GRB** を起こす) 合体であるとして評価するもの[53-56]
- ⑤ 銀河系内に見つかっている連星 **pulsar** から NS-NS 合体率を評価するもの[48,57]

がある。今後の **LIGO** 観測における重力波干渉計の感度曲線[57]を図 4 に示す。図 4 の各 **observation run** において観測可能な合体率と、上記 **event rate** の見積もりを 90% の有意水準レベルで比較したものが図 5 である[58]。図 5 から明らかなように、**O2** 観測が本格稼働する 2017 年以降いつ NS-NS および BH-NS からの重力波が観測されてもおかしくはない。逆に、もし BH-NS からの重力波が観測されなかったとすると、**short GRB** を BH-NS 合体とするモデルの幾つか[53,54]と、**r** 過程元素の起源をすべて BH-NS 合体とするモデルが棄却されることになる。NS-NS モデルの場合には 2018 年以降の **O3** 観測によって制限が付けられると期待される。

## 5. 結びにかえて

未来の科学史家は、**GW150914** の観測を、ガリレオが自作の望遠鏡で初めて月を見て、その後電磁波による天文学が大きく進展することになった事象に例えるかもしれない。重力波観測が”天文学”たるためには、重力波源パラメータ決定だけではなく、その位置決定や電磁波対応天体の特定など、今後クリアしていかなければならない要素も多い。特に位置決定や電磁波対応天体の特定において、**KAGRA** や **J-GEM** が大きな役割を果たすことを期待したい。

## References

- [1] Abbott, B. P., et al. (2016), *Phys. Rev. Lett.*, 116, 061102.
- [2] Abbott, B. P., et al. (2016), *Phys. Rev. X*, 6, 041015.
- [3] Abbott, B. P., et al. (2016), *Phys. Rev. Lett.*, 116, 241103.
- [4] Ozel, F. & Freire, P. (2016), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 54, 440.
- [5] Abbott, B. P., et al. (2016), *Astrophys. J. Lett.*, 818, L22.
- [6] Tutukov, A. V. & Yungelson, L. R. (1993), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 260, 675.
- [7] Kalgera, V., et al. (2007), *Phys. Rep.*, 442, 75.
- [8] Dominik, M., et al., (2013), *Astrophys. J.*, 779, 72.
- [9] Kinugawa, T., et al., (2014), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 442, 2963.
- [10] Belczynski, K., et al. (2016), *Astrophys. J.*, 819, 108.
- [11] Marchant, P., et al. (2016), *Astron. Astrophys.*, 588, A50.
- [12] de Mink, S. E. & Mandel, I. (2016), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 460, 3545.
- [13] Sigurdsson, S. & Hernquist, L. (1993), *Nature*, 364, 423.
- [14] Portegies Zwart, S. F. & McMillan, S. L. W. (2000), *Astrophys. J. Lett.*, 528, L17.
- [15] Rodriguez, C. L., et al. (2016), *Phys. Rev. Lett.*, 116, 029901.

- [16] Iwanova, N., et al. (2013), *Astron. Astrophys. Rev.*, 21, 59.
- [17] Tauris, T. M. & van den Heuvel, E. P. (2006) in “Formation and evolution of compact stellar X-ray sources”, eds. W. H. G. Lewin & M. van der Klis (Cambridge Univ. Press)
- [18] Langer, N. (2012), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 50, 107.
- [19] Maeder, A. (1987), *Astron. Astrophys.* 178, 159.
- [20] Maeder, A. & Meynet, G. (2012), *Rev. Mod. Phys.*, 84, 25.
- [21] Song, H. F., et al., (2016), *Astron. Astrophys.*, 585, A120.
- [22] Martins, F., et al., (2009), *Astron. Astrophys.*, 495, 257.
- [23] Martins, F., et al., (2013), *Astron. Astrophys.*, 554, A23.
- [24] Yunes, N., Yagi, K., & Pretorius, F., (2016), *Phys. Rev. D*, 94, 084002.
- [25] Abbott, B. P., et al. (2016), *Phys. Rev. Lett.*, 116, 221101.
- [26] The LIGO Scientific collaboration, et al., (2016), *Astrophys. J. Lett.*, 826, L13.
- [27] Connaughton, V., et al. (2016), *Astrophys. J. Lett.*, 826, L6.
- [28] Ackermann, M., et al. (2016), *Astrophys. J. Lett.*, 823, L2.
- [29] Morokuma, T., et al. (2016), *Publ. Astron. Soc. Japan*, 68, L9.
- [30] Nakar, E. & Piran, T. (2011), *Nature* 478, 82; Hotokezaka, K. et al. (2016), *Astrophys. J.*, 831, 190.
- [31] Gao, H., et al. (2013), *Astrophys. J.* 771, 86.
- [32] Li, L.-X. & Paczynski, B. (1998), *Astrophys. J. Lett.*, 507, L59.
- [33] Metzger, B. et al. (2010), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 406, 2650.
- [34] Metzger, B. arXiv:1610.09381
- [35] Kasen, D., Badnell, N. R., & Barnes, J. (2013), *Astrophys. J.* 774, 25.
- [36] Tanaka, M. & Hotokezaka, K. (2013), *Astrophys. J.* 775, 115.
- [37] Tanaka, M. *天文月報* 107, 19.
- [38] Kyutoku, K., Ioka, K., & Shibata, M. (2014), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 437, L6.
- [39] Tanvir, N. R., et al. (2013), *Nature* 500, 547.
- [40] Berger, E., Fong, W., & Chornock, R. (2013), *Astrophys. J. Lett.*, 774, L23.
- [41] Jin, Z.-P., et al., (2016), *Nature, Communications*, 7, 12898.
- [42] e.g. Wanajo, S., Sekiguchi, Y., et al. (2014), *Astrophysical J. Lett.*, 789, L39.
- [43] Kiuchi, K., Sekiguchi, Y. et al. (2010), *Phys. Rev. Lett.*, 104, 141101.
- [44] Wade et al. (2014), *Phys. Rev. D*, 89, 103012
- [45] Takami, K., Rezzolla, L. & Baiotti, L. (2014), *Phys. Rev. Lett.* 113, 091104.
- [46] Bauswein, A. Stergioulas, N., & Janka, H.-T. (2016) *Eur. Phys. J. A*, 52, 56.
- [47] Hotokezaka, K., Kyutoku, K., Sekiguchi, Y., & Shibata, M. (2016), *Phys. Rev. D*, 93, 064082.
- [48] Abadie, J., et al. (2010), *Class. Quant. Grav.*, 27, 173001.
- [49] Dominik, M., et al. (2015), *Astrophys. J.*, 806, 263.
- [50] de Mink, S. E. & Belczynski, K. (2015), *Astrophys. J.*, 814, 58.
- [51] Vangioni, E., et al. (2016), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 455, 17.
- [52] Jin, Z.-P., et al. (2015), *Astrophys. J.*, 811, L22.
- [53] Petrillo, C. E., Dietz, A., & Cavaglia, M. (2013), *Astrophys. J.*, 767, 140.
- [54] Coward, D., et al. (2012), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 425, 1365
- [55] Siellez, K., Boer, M., & Gendre, B. (2014), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 437, 649.
- [56] Fong, W.-F., et al. (2015), *Astrophys. J.*, 815, 102.
- [57] Abbott, B. P., et al. (2016), *Living Rev. Relativity*, 19, 1.
- [58] Abbott, B. P., et al. arXiv:1607.07456.