

重力波天体からの電磁波を捉える

田中雅臣

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: masaomi.tanaka@nao.ac.jp



2015年9月、Advanced LIGOによって重力波が初めて直接検出されました。この重力波源の電磁波対応天体を探査する観測も精力的に行われ、「マルチメッセンジャー天文学」が本格的に始まったと言えます。本稿では重力波天体からの電磁波放射、特に可視光・赤外線放射に関する現在の理解をまとめ、重力波源の電磁波対応天体同定に向けてどのような探査観測が必要かを議論します。また、初の重力波源GW150914の電磁波観測がどのように行われたかという現場の様子を（筆者の個人的な視点から）紹介します。

「こんなメール来ましたけど、どうします？」
「うーん、まあやるしかないよね。Visibility*¹悪いけど。」

2015年9月16日、ある研究会の最中に諸隈智貴氏と小声で交わした会話はたしかこのようなものでした。史上初めて重力波が直接検出された2015年9月14日の2日後、重力波+電磁波の「マルチメッセンジャー天文学」が静かに始まった瞬間でした。

1. マルチメッセンジャー天文学

2015年9月14日、アメリカの重力波望遠鏡Advanced LIGOによって、初めて重力波が直接検出されました¹⁾。一般相対論が誕生してから100年目の大きな快挙です。検出された重力波源GW150914はブラックホール同士の合体によるもので、合体した二つのブラックホールの質量は約36太陽質量と約29太陽質量でした。宇宙にこのような（恒星質量としては比較的重い）質量をもつブラックホールが確かに存在すること、そのようなブラックホールが連星をなす場合があるこ

と、そして宇宙年齢のうちに合体することが初めて明らかとなり、物理学はもちろん、天文学にも大きなインパクトをもたらしました²⁾⁻⁶⁾。

天文学を研究する者としては、この連星ブラックホール合体が宇宙のどこにいるのかを知りたいところですが、ブラックホールの合体は、星形成銀河で起きたのでしょうか？ それとも楕円銀河で起きたのでしょうか？ 銀河のどこで起きたのでしょうか？ どれほどの金属量をもつ環境だったのでしょうか？ しかし残念ながら、重力波望遠鏡だけでは重力波源の正確な位置を決めることはできません。GW150914の場合、その位置決定精度は約600平方度（月の見かけ大きさの約3,000倍）でした⁷⁾。重力波源の位置を正確に決めるためには、電磁波で対応天体を捉える必要があるのです。ブラックホール合体が電磁波でどのように光るか（そもそも光るかどうか）はまだよくわかっていませんが、中性子星を含む合体現象は電磁波で光ることが予想されています（図1）。

天文観測、特に可視光・赤外線観測（望遠鏡の典型的な視野が0.01-1平方度程度）にかかわる

*1 対象とする天域・天体の観測しやすさのこと。

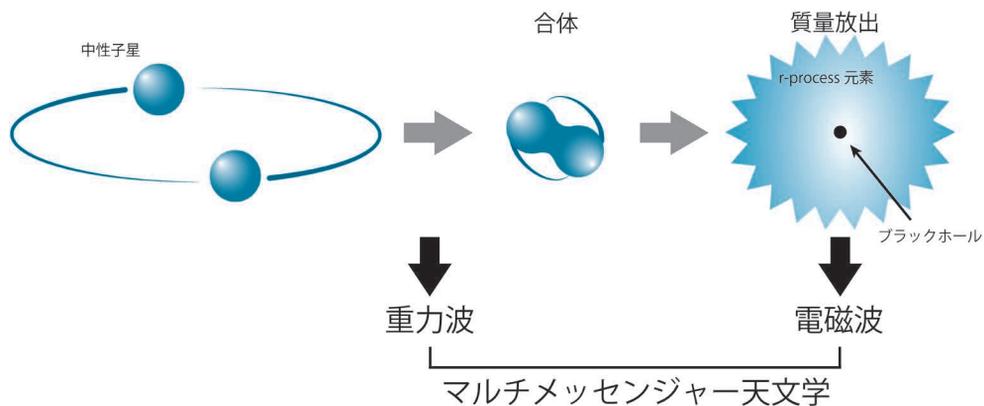


図1 連星中性子星合体からの重力波・電磁波放射の概念図。

方にとっては、600平方度というのは途方もなく広く感じるでしょう。しかし実際に、GW150914の電磁波対応天体を探すためさまざまな波長で探査が行われ、広大な誤差領域の大部分が観測されました⁷⁾。今後Advanced VirgoやKAGRAが加われば重力波による位置決定精度は10平方度程度まで改善するため、「マルチメッセンジャー天文学」によって重力波天体を同定できると期待されています。

とは言え、10平方度の領域から重力波天体を探すのは簡単ではありません。まずは、重力波天体が電磁波でどのように見えるのか、何を捉えれば重力波天体と言ってよいのかを知る必要があります。本稿では、連星中性子星合体をはじめとする重力波天体からの電磁波放射の理論的研究と、それを捉えようとする観測的な試みを紹介します*2。また、私が電磁波観測グループの皆さんとともに、どのようにしてGW150914の検出を迎えたかという個人的な記録も残させていただきます。興奮と混乱(?)が入り混じった当時の様子は、(論文などには書けません)が忘れてしまうには惜しい貴重な経験ですので、この紙面を使わせていただくことをお許しください。

2. 重力波天体からの電磁波放射 「超速新星」

重力波天体からの電磁波放射として、最も有力なものの一つがショート(継続時間の短い)ガンマ線バーストです。ショートガンマ線バーストは中性子星同士の合体や中性子星とブラックホールの合体で引き起こされると考えられているため、重力波の検出とほぼ同時にガンマ線バーストもやってくるのが期待できます。しかし、ガンマ線バーストは立体角の小さい相対論的ジェットからの放射であり、私たちはジェットの真正面にいないとガンマ線バーストを捉えることはできません。重力波放射にはそれほど強い指向性がないため、重力波が検出されたときにいつもガンマ線バーストがやってくるとは限りません。つまり、重力波の電磁波対応天体としては、より等方的な電磁波放射も考える必要があります。

ここで重要なのが、中性子星合体からのジェット以外の質量放出です。近年の数値相対論シミュレーションによると、中性子星が合体するとき、潮汐破壊と衝撃波加熱によって0.001-0.01太陽質量程度の物質が、光速の10-20%程度の速さで放出されることが知られています^{10), 11)}。この放出

*2 理論的な研究の詳細に関しては、天文月報2014年1月号r-process特集の記事⁸⁾、文献9のレビュー論文もご覧ください。

物質は多くの中性子を含んでいるため、放出物質の中では速い中性子捕獲反応 (r -process) が進みます¹²⁾⁻¹⁴⁾。 r -processは放射性不安定な原子核を経由して重元素を合成するプロセスですので、中性子星合体は不安定な原子核の放射性エネルギーを使って電磁波で等方的に光るはずですが、これはIa型超新星がニッケル56の放射性崩壊で電磁波で明るく輝くのと似ています。

このような電磁波放射のアイデア自体は1999年に初めて提唱されていたのですが¹⁵⁾、詳細な放射の様子は最近まで明らかになっていませんでした。核分裂やベータ崩壊によって、放射性エネルギーが放出物質に蓄えられるところまでは良いのですが、中性子星合体からの放出物質は鉄より重い元素「のみ」で構成される特殊な系で、放出物質内部での光の進みにくさ (opacity) がわからなかったためです。そのため長い間、Ia型超新星のような鉄族元素で構成される系のopacity (約 $0.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) を仮定して電磁波放射の予想が行われていました。

そこで筆者らは、 r -process元素のみで構成される系での現実的な輻射輸送シミュレーションを行いました¹⁶⁾。その結果、 r -process元素で構成される系におけるopacityが、Ia型超新星に比べて約100倍も高い ($10 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) ことがわかりました。同時期にアメリカのグループも異なるアプローチで同様の結論に到達しています^{17), 18)}。光がより進みにくいということは、電磁波放射のタイムスケールが長くなり、放射がより暗くなることを意味します。シミュレーションの結果、中性子星合体からの電磁波放射は (1) 1週間程度のタイムスケールで、(2) 10^{40} - $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ 程度の光度をもち (図2)、(3) 放射のピークは近赤外線にくることがわかりました (図3)。

ちなみに、この電磁波放射現象は英語では“kilonova”や“macronova”などと呼ばれています。日本語では正式な名前はまだ存在しません。直訳すると「千新星」, 「巨新星」となり、どうもイマ

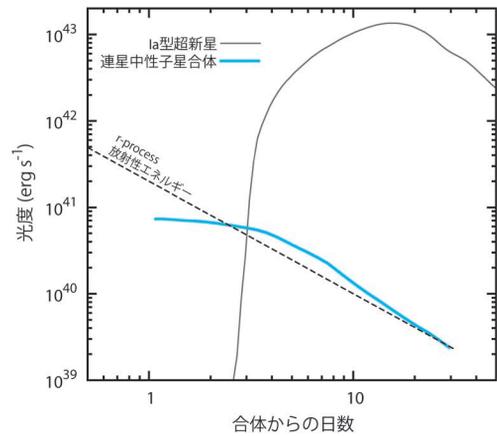


図2 数値シミュレーションで得られた連星中性子星合体の光度曲線。破線は0.01太陽質量の r -process元素による放射性崩壊エネルギー。

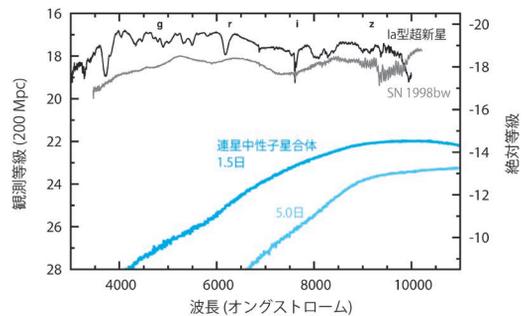


図3 連星中性子星合体のスペクトルと、Ia型超新星、継続時間の長いガンマ線バーストに付随した超新星 (SN 1998 bw) のスペクトルの比較。

イチです。そこで筆者は、膨張速度が「速い」こと、「速い」中性子捕獲反応で明るく輝くことから、「超速新星」と呼ぶことにしました¹⁹⁾。この名前が定着するかは極めて不明ですが、本稿ではこう呼ばせていただきます。

さて、中性子星合体からこのような放射が起きるとすると、ショートガンマ線バーストの残光の中にこのような放射が足されて観測される可能性があります。幸運なことに、筆者らがシミュレーションを行ったのと同じ年の2013年、非常に近傍でショートガンマ線バースト GRB 130603B が発見されました。このガンマ線バーストの赤外線

追観測によって、予想と同じような赤外線放射が見つかり^{20), 21)}、「超速新星」のシナリオは現実味を帯びてきました。

しかし、まだまだ理論的な理解は十分とは言えません。中性子星が合体すると、ブラックホールと降着円盤の系が形成されると考えられます。降着円盤からは「円盤風」が吹く可能性があり、合体時に放出される物質とは異なった元素組成をもつかもしいないため、放射の様子も異なるかもしれません。もし r -process元素合成がランタノイド元素まで進まない、 opacity がそれほど高くないため、「超速新星」は比較的早くて青い放射になることが予想されています^{22), 23)}。

また、ブラックホールと中性子星の合体も忘れてはいけません。ブラックホール-中性子星合体からは潮汐破壊によってのみ物質が放出されるため軌道面状に多く物質が放出されます²⁴⁾。そのため、同じ質量の場合でも中性子星合体とは電磁波放射の様子が異なることが期待されます²⁵⁾。さらに、中性子星同士の合体と比較すると、ブラックホールを含む合体はその質量やスピンのによって、電磁波放射に大きな多様性が生まれることが予想されます²⁶⁾。

3. 重力波天体の探査方法

では実際にどうやって重力波天体を探し出せばよいでしょうか。重力波天体からの電磁波放射の特徴は、超新星爆発と比較すると、(1) 早い時間進化を示し、(2) 暗く、(3) 赤いことです。(1) と (2) は連星中性子星合体、ブラックホール-中性子星合体からの質量放出が0.01太陽質量程度と小さいことに起因しており、おそらくその性質は間違いありません。 (3) は元素組成に依存しており、青い成分があるかどうかにはまだ不定性がありますが、超新星よりも赤い成分があることが存在することは間違いなさそうです。

図4は中性子星合体、ブラックホール-中性子星合体、円盤風でそれぞれ0.01太陽質量の物質

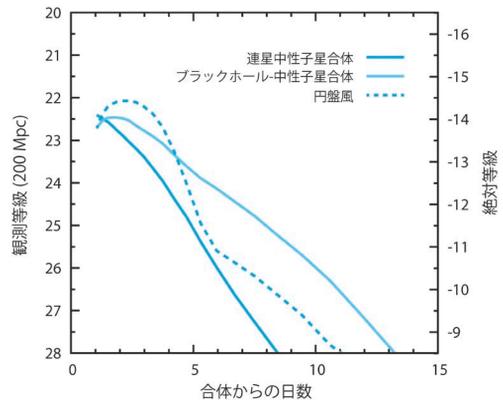


図4 200 Mpcの距離で重力波が検出された場合の、予想される「超速新星」の光度曲線（可視光*i*バンド）。

が放出されたときに予想される可視光*i*バンド光度曲線です。Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRAの目標感度が達成されると、200 Mpcまでの距離で連星中性子星合体からの重力波を捉えられると予想されているため、図では200 Mpcの距離を仮定しています。この距離では、可視光の明るさは合体直後は22等級程度で、5-10日程度で25等級程度に暗くなります。

このような放射を捉えるには、口径8 m級の望遠鏡が必要となります。そのため、8 m級の可視光望遠鏡では随一の広視野を誇るすばる望遠鏡/Hyper Suprime-Cam (HSC) に世界中から大きな期待が集まっています。ただし、宇宙における中性子星合体の頻度が比較的高いと、より近くで重力波が検出される可能性もあり、その場合はもちろんより明るくなります。中性子星合体の頻度には大きな不定性があるため、さまざまな口径の望遠鏡で待ち構えることが何より重要です。

重力波天体を同定するために最も重要なことは、超新星爆発との区別です。宇宙において超新星爆発の頻度は中性子星合体の1,000倍以上で、しかも超新星爆発は中性子星合体よりも明るい（図2）、重力波天体を探そうと広大な領域を観測すると、どうしても大量の超新星爆発が混入

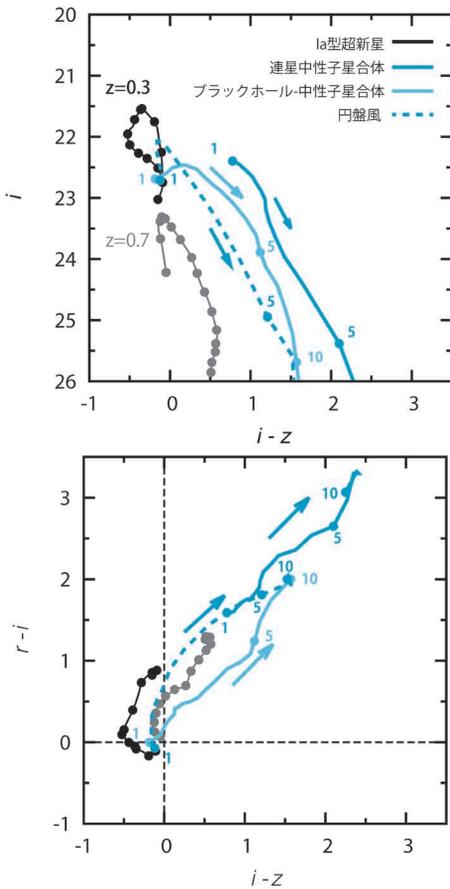


図5 「超速新星」の色等級図(上)と二色図(下). 距離は200 Mpcを仮定し, 時間進化が線で結ばれている(点は合体から1日, 5日, 10日後). 同じような観測等級に見えるIa型超新星と比較している(点は5日おき).

してしまいます. 私自身, 超新星爆発の研究に携わっているため, 超新星爆発を「混入物」呼ばわりするのはたいへん気が引けるのですが, これは非常に重要な問題です.

図5は重力波天体の電磁波放射の色等級図と二色図です. 重力波天体と同じような明るさに見えて, 「混入」してしまう超新星爆発も一緒に示しています. 上記のとおり, 中性子星合体は早い明るさの進化を示さずなので, そのような天体を探すのが得策と言えます. そのためには, 探査観測は一晩に1回かそれ以上の頻度で行う必要があ

ります. また, photometric redshiftなどの方法で突発天体の母銀河の赤方偏移を大まかにでも見積もることができれば, 突発天体の真の明るさから超新星と区別することができるでしょう. さらに, モデルに不定性はあるものの, 重力波天体は赤く見えることが予想されるので, 二色以上のデータを取得することが有効と言えます.

このような方法で候補を絞り込んだ後, 最終的には分光観測を行う必要があります. 中性子星を含む合体からの放出物質は, 超新星よりも速い光速の10~20%程度の速度をもつため, 図3にあるようなドップラーシフトによって大きく広がったスムーズなスペクトルをもつことを捉えることができれば, 重力波天体を同定したと言えるでしょう.

このように, 重力波天体の探査観測・同定は大きな挑戦です. この問題に挑むため, 日本では吉田道利氏を代表として可視光・赤外線・電波観測のグループJ-GEM (Japanese collaboration of Gravitational wave Electro-Magnetic follow-up observations) が組織されました⁵⁾. 日本のグループがアクセスできる日本各地, さらには海外に設置された望遠鏡群を用いて重力波天体の同定を狙うものです. 広大な領域の探査に適した, 1平方度以上の視野をもつ広視野望遠鏡としては, 東京大学木曾観測所105 cmシュミット望遠鏡(4平方度, さらに20平方度の広視野CMOSカメラTomo-e Gozenを開発中), MOA-II望遠鏡(2.2平方度)と国立天文台8.2 mすばる望遠鏡HSC(1.7平方度)が含まれています.

また, 広い視野をもたない望遠鏡も重要な役割を果たします. 上記のとおり, 広視野望遠鏡で発見された突発天体は, 多色で追観測しない限り重力波天体とは同定できませんし, 最終的には分光する必要があります. また, 広大な重力波源の誤差領域の中から, 知られている銀河を選んでパトロールして突発天体を探査することもできます. 銀河のカタログの不完全性には注意が必要で

が、実際に200 Mpc以内であれば、位置決定精度領域内の比較的明るい銀河の数は100個程度であることが予想されるため²⁷⁾、J-GEMに参加しているさまざまな望遠鏡で手分けをして観測すれば、観測可能な銀河を一晩ですべて探査することも可能なのです。

4. GW150914の電磁波観測

史上初の重力波源GW150914がAdvanced LIGOによって検出されたのは、まさにJ-GEMでの観測準備が進んでいる最中でした。J-GEMを含め、世界中の電磁波フォローアップグループに重力波検出の第一報が飛び込んできたのは、検出から2日後、9月16日のことです^{*3}。第一報には、G184098と名づけられたイベントが検出されたことが書かれていました。ただし、(1) そもそも第一期観測(O1)の正式な観測開始(9月18日)の前であり、(2) O1の本来の性能には至っておらず、(3) キャリブレーションも完全ではない、という注意書きも添えられていました。

また、Advanced LIGOのO1では、誤警報の確率(false alarm rate)が月1回を下回れば、観測グループに警報が流れることが決められていました。つまり、月1回ぐらいは誤報があっても不思議ではないということです。さらに、blind injectionと呼ばれる、人工イベントを注入する可能性もあるという取り決めになっていました。それに加えて、上記三つの注意書きです。これが本稿冒頭の会話の裏側です。信じるほうが難しいわけですが…やるしかありません！

報告された重力波源の誤差領域は、北天からは

明け方の僅かな時間でしか観測できない場所にありました^{*4}。それでも、諸隈氏の主導により9月18日に木曾観測所で24平方度の観測が行われました。僅か30分弱の観測で24平方度を観測できるのが広視野望遠鏡の強みです。誤差領域の大半は南天だったため、J-GEMの中でも主力となるのは、南アフリカのIRSF望遠鏡とニュージーランドMt. Johns天文台にある望遠鏡です。残念ながらIRSFは南アフリカの観測者が使用している最中で、観測を行うことができませんでした。9月20日からはMt. Johns天文台にあるB&C 61 cm望遠鏡で誤差領域内の18の近傍銀河の観測が行われ、朝倉悠一郎氏、阿部文雄氏らにより探査が行われました。

世界中のグループが追観測を進めるさなか、10月3日になって、初めて重力波形がブラックホール同士の場合と一致するという情報もたらされました。「ブラックホール同士の合体？ 一体何を探せばいいんだ！？」と天を仰いだのをよく覚えています。

その後フォローアップ観測は一段落し、2016年1月になって、重力波の最終的な解析結果が報告されました。やはり有意度の高い検出で、重力波源の正体はブラックホール同士の合体であるとのこと。正直に書くと、私はこの辺りでやっと重力波検出の実感が湧いてきました(しかも、まだ頭の片隅でblind injectionを疑いつつ…)。もちろん、結果は皆さんご存じのとおりです。2016年2月11日にはAdvanced LIGOのグループにより、重力波の初検出を報告する記者会見が行われました。

^{*3} 電磁波フォローアップ観測グループの間で行われたすべてのやり取り(GCN)は、以下のリンクで公開されています。<http://gcn.gsfc.nasa.gov/other/GW150914.gcn3>

^{*4} ちなみにGW150914は、連星合体から予想される重力波形のテンプレートマッチではなく、「バースト解析」という手法で検出されました。バースト解析は、超新星爆発のように予想ができない重力波波形に対して有効な手法のため、とりあえず肉眼で超新星がいないか見ておこう、という(今思えば冗談のような)会話も行われました。後になってわかったことですが、GW150914がテンプレートマッチで検出されなかった理由は、約30太陽質量の連星ブラックホール合体のテンプレートが解析パイプラインに入っていなかったからだったようです。

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al., 2016, PRL 116, 061102
- 2) 藤本真克, 2016, 天文月報 109, 377
- 3) 和泉究, 2016, 天文月報 109, 381
- 4) 佐々木節, 2016, 天文月報 109, 383
- 5) 吉田道利, 2016, 天文月報 109, 385
- 6) 牧島一夫, 鶴剛, 2016, 天文月報 109, 387
- 7) Abbott B. P., et al., 2016, ApJ, 826, L13
- 8) 田中雅臣, 2014, 天文月報 107, 19
- 9) Tanaka M., 2016, *Advances in Astronomy*, 6341974
- 10) Hotokezaka K., et al., 2013, *Physical Review D* 87, 024001
- 11) Bauswein A., Goriely S., Janka H.-T., 2013, *ApJ* 773, 78
- 12) Goriely S., et al., 2011, *ApJ* 738, L32
- 13) Wanajo S., et al., 2014, *ApJ* 789, L39
- 14) 和南城伸也, 2014, 天文月報 107, 7
- 15) Li L.-X., Paczynski B., 1998, *ApJ* 507, L59
- 16) Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, *ApJ* 775, 113
- 17) Kasen D., Badnell N. R., Barnes J., 2013, *ApJ* 774, 25
- 18) Barnes J., Kasen D., 2013, *ApJ* 775, 18
- 19) 田中雅臣, 2015, 星が「死ぬ」とはどういうことか, ベレ出版
- 20) Berger E., Fong W., Chornock R., 2013, *ApJ* 774, L23
- 21) Tanvir N. R., et al., 2013, *Nature* 500, 547
- 22) Metzger B., Fernández R., 2014, *MNRAS* 441, 3444
- 23) Kasen D., Fernández R., Metzger B., 2015, *MNRAS* 450, 1777
- 24) Kyutoku K., Ioka K., Shibata M., 2013, *PRD* 88, 041503
- 25) Tanaka M., et al., 2014, *ApJ* 780, 31
- 26) Kawaguchi K., et al., 2016, *ApJ* 825, 52
- 27) Gehrels et al., 2016, *ApJ* 82, 136
- 28) Morokuma T., et al., 2016, *PASJ*, 68, L9
- 29) Abbott B. P., et al., 2016, PRL 116, 241103
- 30) Hotokezaka K., 2013, *ApJ* 778, L16

The Hunt for Electromagnetic Signals from Gravitational Wave Sources

Masaomi TANAKA

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: In 2015 September, Advanced LIGO has directly detected gravitational waves (GWs) for the first time. This discovery opened “multi-messenger astronomy”. In fact, intensive follow-up observations have been performed to search for electromagnetic counterparts of the GW source. I summarize current understanding of electromagnetic emission from gravitational wave sources, and discuss observing strategies to detect electromagnetic counterparts. I also present a brief log of electromagnetic follow-up observations for the first GW source GW150914.