

重力波事象と電磁波による同時観測・ 追観測への期待



神田 展行

〈大阪市立大学大学院理学研究科数物系専攻宇宙・高エネルギー物理学講座 〒558-8533 大阪市住吉区杉本 3-3-138〉
e-mail: kanda@sci.osaka-cu.ac.jp

一般相対性理論の予言した重力波が遂に観測され、いよいよ重力波天文学が開始されようとしている。天文学として重力波源を議論するには、多面的な観測でその正体をあらわにすることが必要であろう。本稿では、重力波の初観測が物理・天文研究にもたらした影響について、また今後の重力波観測について述べる。すでに最初の観測を行った米国 Advanced LIGO に続き、欧州の Advanced Virgo ももうじき観測を開始する。日本の KAGRA も 2018 年には低温鏡で稼働する。そして、電磁波やニュートリノによる同時観測、追観測によって、重力波観測のどのようなことが明らかになるかの期待を述べる。

1. 重力波初観測のもたらしたもの

人類初の重力波観測は、2016年9月14日に米国の LIGO 実験 (Laser Interferometric Gravitational-wave Observatory) によって遂に達成された^{1),*1}。アインシュタイン自身による一般相対性理論の予言としてなされてから百年後、物理学は時空の波を直接に測定することに成功した。まずは、この「重力波」とは何であるか、そして、初観測された事象の正体を復習しよう。

1.1 重力波とは

重力は、人類にとって最も古くから知られている相互作用 (力) であり、ニュートン力学の初歩のうちから学ぶことである。核力や弱い相互作用を知らない人にも万有引力という言葉はよく知られているし、天体の運動を理解するうえで不可欠の力であるから天文に関心がある人にとっては常識のようなものである。しかし、重力相互作用

は、ながらく、量子化はおろか波動性も実験的確認がなされていなかった。重力波の初観測によって、ついに人類は重力の「波動性」を確認したことになり、重力研究の歴史に新しい局面が開けたのである。

重力波は、簡単に述べれば時空の歪みの波である。一般相対性理論は重力を時空の歪みで説明するが、この時空の歪みが光速で伝播していくこと、波としての解があることを予言していた。電磁波が電荷の運動から放射されるように、重力波は質量の運動から放射される。しかし重力波は球対称な運動からは生じず、重力そのものの結合定数も電磁気などに比べて格段に小さいゆえ、重力波はたいへんに微弱なものとなる。そのため、検出には大掛かりで、なおかつ究極的なまでに精密な装置が必要となる。

典型的な重力波源は、図1に示すようなもので、質量四重極モーメントが重力波を生じる最低

*1 その後 LIGO は GW151226 事象を報告²⁾、有為度はやや低い LVT151012 という事象も報告している³⁾。いずれも波形からはブラックホール連星と考えられる。

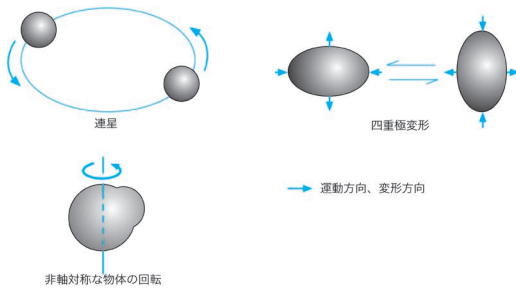


図1 重力波を放射する典型的な質量運動.

次の項である。連星の軌道運動や、星が縦横に伸縮を繰り返す四重極変形、あるいは非軸対称な形状の回転などで放出される。連星系は効率の良い重力波放射源であり、公転軌道周期の半分の周期の重力波を放出する。中性子星やブラックホールといったコンパクトで重たい星の連星は、通常の恒星に比べて小さい軌道でも公転できるので、高い周波数で大きな重力波を放射できる。

1.2 初観測された重力波—ブラックホール連星合体—

米国LIGO実験によって初観測された重力波事象は“GW150914”と名づけられた¹⁾。図2にその波形を示す。この波形を解析した結果、太陽質量の36倍と29倍の二つの天体からなる連星が合体したと見られている。重力波の周波数と振幅の変化の様子から、天体の質量が推定できるのである。グラフの横軸は時間（単位は秒）で、縦軸が時空の歪みである。時空の歪みは、相対量なので無次元である。1 mあたりどれだけ歪むかをm単位で表していると思えば良い。GW150914の波形を見ると、時間の経過に沿って、周波数が高く、時空の歪み（すなわち重力波の振幅）が大きくなっていくのがわかる。最大に達した振幅は 10^{-21} ほどであり、そのときの周波数は150 Hz程度である。このときの軌道の大きさは210 kmくらいであり、二つの天体のシュバルツシルト半径の合計くらいになっている。つまりこの付近がちょうど合体の瞬間と考えられる。もしも二つの天体が通常の恒星であれば、星の半径はもっと大

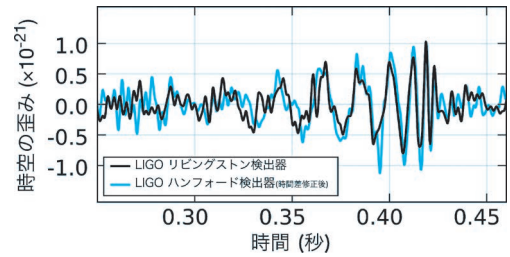


図2 LIGO 検出器が捉えたGW150914の波形。LIGOの初観測の論文¹⁾より引用。

きくて、ここまで近づいて公転することはできない。また中性子星は3太陽質量程度以上の重さを保つことはできない。したがって、この重力波源はブラックホールの連星であると結論づけられる。

1.3 観測の影響

初観測の報は、とりわけ物理学者や天文学者にとっては新たな研究の局面を開くものとして喜びをもって迎えられた。人類にとって初めて直接測定された重力波が、やはり初めて観測するブラックホール連星とその合体からというのは二重三重の幸運だろう。

ブラックホールがくっつくとき、時空はどのようになるのであろうか？ 形成された大きなブラックホールは、やはり角運動量をもっているのだろうか？ 今後、多くの重力波事象を得ることで、強い重力場における一般相対性理論の研究が進展すると期待される。物理学は実験・観測と理論の両輪で発展してきた。ほかの三つの相互作用の研究の多くは地上の装置、例えば素粒子物理学の加速器が使えるが、重力相互作用は強い場の人工生成は困難である。しかし今後は重力波観測が、ブラックホールという究極的な対象が織りなす格好の“重力物理工場（Gravitational Physics Factoryとでも呼ぼうか）”として基礎物理学に貢献するだろう。

天文・天体物理に話を戻すと、太陽質量の30倍程度のブラックホールがどのようにして形成されたかも大いに議論を呼んでいる。種族III星⁴⁾

や原始ブラックホール⁵⁾，あるいは軽いブラックホールから衝突合体を繰り返して形成される⁶⁾可能性などが考えられている．重力波観測の統計が増えると，これらについて明らかになるかもしれない．

2. 重力波検出器の現状と観測計画

2.1 重力波検出の基本原則

重力波によって時空が歪むと，自由な質点の間では距離が変化したのと同等の作用が生じる．距離というものをどう定義するかだが，ここでは光が進むのに必要な時間だと考えれば良い．そこで，細いワイヤーなどで鏡を吊るし，測定したい重力波の周波数では自由な質点として振る舞うようにする．半透明鏡でレーザー光を直交する二つ

の経路に分け，それぞれを鏡で反射して，再び重ね合わせる（図3参照）．重力波の作用は潮汐的であり，一方の経路が伸びるとき，片方は縮む．二つの経路の長さに差が生じると，重ね合わせた光の明るさは干渉によって変化する．だから，干渉光の明るさを測定することで，重力波による時空の歪みを直接に知ることができる．重力波が基線に直角方向，つまり地上設置の干渉計なら天頂方向または真下から入射したときが最も反応が良く，二つの基線のなす角の二等分線の方向（図3中の灰色の点線の方向）から入射するとそれぞれの基線に生じる時空の歪みが同じために感度が低い．入射方向により干渉計の応答には違いが生じる．これを感度パターンと呼んでいる．

重力波による経路長の変化は，レーザー光が長い距離を進むほど累積する．したがって，鏡と半透明鏡の間の距離（これを基線長と呼ぶ）が長いほうが有利である．

2.2 国際検出器ネットワーク

現在稼働中および調整中，建設中の地上設置のレーザー干渉計重力波は，Advanced LIGO（米国），Advanced Virgo（欧州），GEO600（ドイツ），KAGRA（日本）がある．またLIGO India（インド）も建設が予定されている．図4にこれらの検出器の位置関係を示す．これらの検出器が

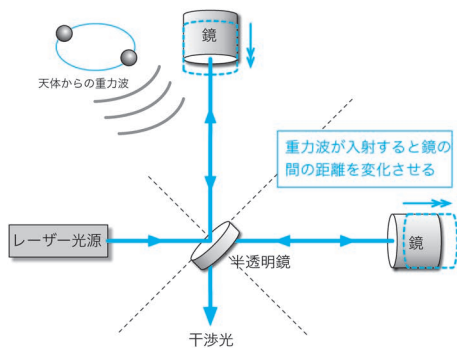


図3 重力波検出器の原理.

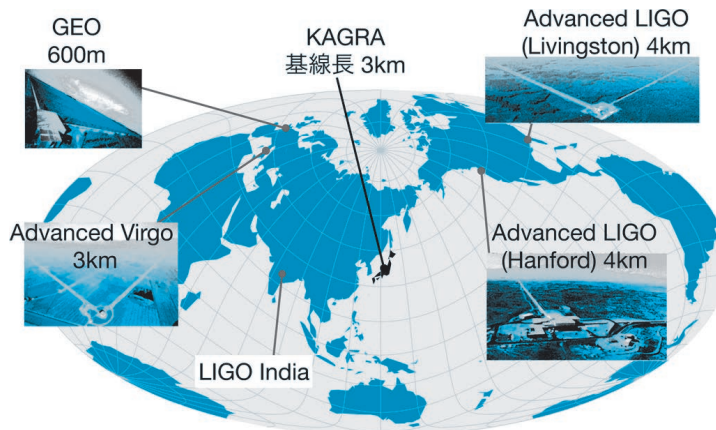


図4 重力波検出器ネットワーク．LIGO, Virgo, GEOの写真は各実験のWebサイトより引用．

数年内に“国際重力波検出器ネットワーク”として働くことを期待されている。検出器の位置関係は、重力波到来方向の決定精度や、全天のどのくらいが検出可能立体角になるかを決めている。前述のようにレーザー干渉計は天頂入射には感度が良く、水平方向には感度が悪い。LIGO, Virgo, KAGRAの位置関係は、幸運なことに互いの死角を補うようになっている。これらの検出器は3-4 kmの基線長をもち、最終的な性能では重力波の大きさにして $h \sim 3 \times 10^{-24} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ 、周波数にして10 Hz～数kHzの範囲を目標としている。これらの感度が達成できると、地球から200-300 Mpcの距離にある中性子星連星の合体からの重力波が検出可能である。

また、一方で、さらに1桁以上良い感度をもった将来計画も検討されている。欧州では基線長10 kmで地下設置するET (Einstein Telescope) が検討されてきたし、重力波の初検出を受けて、米国もAdvanced LIGOのさらなる強化や、Cosmic Explorerと呼ぶ将来計画の検討が始まっている。

2.3 日本の検出器KAGRA

KAGRAは日本の重力波観測実験で、岐阜県神岡鉱山に建設されている。レーザー干渉計本体はトンネルを掘って地下に設置されている。地下設置の理由は、地表面で存在する地面振動、そのほか天然ないし人工活動からの外乱などを低減した静謐な環境であるゆえである。また、熱雑音を抑制するためにサファイヤ基材の鏡を低温(~ 20 K)に冷却することが特徴である。

KAGRAは常温での試験運転を2016年3月と4月に行い、マイケルソン干渉計の動作やデータ転送、コラボレーターによる実験シフトなども実施された。本稿執筆時点では、低温鏡や光学系のインストールを行っており、低温での最初の稼働は2018年を予定している。



図5 KAGRA 検出器. 写真は岐阜県神岡鉱山のKAGRAトンネル内. 上: トンネル掘削完了直後の2014年3月. 下: 建設中の2015年6月. 両図ともほぼ同じ位置からの撮影で、レーザー光を二つに分ける付近から両基線を左右に臨む方向.

3. 重力波天文学を始めるためには？

さて、初観測は達成されたが、ここから本格的な“重力波天文学”に発展するには、いくつか必要なことがある。その一つが本稿の主題である、重力波事象の電磁波による同時観測・追観測が成功することである。LIGO O1 (最初の観測運転)の結果を外挿すると、実は数年内にも年間100事象を超えるような重力波の観測時代が到来することが予想され、われわれの準備も速やかになさなければならない。本特集の続く記事では各観測の取り組みが紹介されている^{7)~9)}。本稿では、重力波観測自体が、同時観測・追観測にどのような情報を提供するか、また同時観測・追観測が期待できる重力波源はどのようなものがあるかを以下に説明しよう。

3.1 重力波波形が語る物理量

重力波の波形は、天体の質量運動を反映している。重力波観測のデータ解析は、極論すればこの波形を取り出し、そして重力波源の情報や重力理論の検証を行うことである。

もう一度基本に戻ると、重力波の（最低次の）放射源は質量四重極子モーメント $I_{\mu\nu}$ である。

$$I_{\mu\nu} = \int dV \left(x_\mu x_\nu - \frac{1}{3} \delta_{\mu\nu} r^2 \right) \rho(\mathbf{r}) \quad (1)$$

ここで μ, ν は3次元の座標、 $\rho(\mathbf{r})$ は位置 \mathbf{r} における質量密度分布である。重力波の振幅すなわち時空の歪み h は I の2階の時間微分 \ddot{I} を用いて

$$h_{\mu\nu} = \frac{2G}{Rc^4} \ddot{I}_{\mu\nu} \quad (2)$$

と与えられる（四重極公式）。観測される重力波の大きさは、源までの光度距離 R に反比例する。ニュートン引力定数 G と光速 c が係数 G/c^4 として効いており、いかに重力波が小さいかがわかるだろう。放射するエネルギーは、

$$E_{GW} \sim \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{I}_{\mu\nu} \ddot{I}^{\mu\nu} \rangle \quad (3)$$

となる。 $\langle \rangle$ は時間平均である。

逆に、重力波の時系列波形 $h(t)$ が得られれば、 $I(t)$ にさかのぼることができる。重要な点は、天体の種類、質量、運動によって、 $I(t)$ がおおむね決まること、あるいは予想が可能ということである。たとえばブラックホール準固有振動は質量と角運動量で決まる。超新星爆発のメカニズムは複雑であるが、コア（中心核）の爆縮や回転などに伴う特徴的な重力波の予想がある。すなわち、重力波波形を解析して、天体のこうした特徴的な物理量や運動の様子を推定できる。

特に連星系の合体前の波形—インスパイラル波形と呼ばれる—は二つの星の軌道運動で決まるので高精度の理論予想が可能である。図2では0.4秒過ぎくらいまでがこれに相当する。連星合体重力波の解析では、1台の重力波検出器から

・二つの星のそれぞれの質量
 ・到来時刻
 が求まる。さらに複数台の重力波検出器の同時解析により、

- ・重力波源までの距離
- ・連星軌道面の傾き
- ・重力波の偏極方向
- ・合体時の軌道位相
- ・到来方向（赤経、赤緯）

が推定できる。波形が精度良く観測できていれば、軌道面の歳差運動の効果や合体後のブラックホールの情報などを用いて星の自転も推定可能となる。

3.2 方向決定精度と観測装置数

これらの推定値の精度を決める要因は、まず信号自体の大きさ（信号雑音比）が挙げられる。大きな重力波信号ほど精度は良い。そして、電磁波の追観測にとって最も重要な到来方向の決定については、何台の重力波検出器が捉えたか、また検出器群と重力波源の相対的な方向によって大きく左右される。

基本的な方向の決定方法は、各重力波検出器の到来時刻の差を用いる。例えば、図6に示すように、3台の検出器A, B, Cがあるとす。重力波は光速で伝播するので、AとBの到来時刻差から線分ABに対してどのくらいの角度がついて到来したかがわかる。もしA, Bに時間差がなければ線分ABに直角の方向からであるし、線分ABの延長方向から到来すれば時間差は検出器間の距離を光速で割ったものになる。2台の検出器の時間差から、天球上に円状の範囲で到来方向が推定できる。実際には、時刻決定の誤差があるために、円は帯状に範囲をもつ。もう1台の検出器CとAまたはBの組み合わせで、さらにもう一つの円が描ける。こうして、3台の検出器の時間差からは、図中に示した☆印の天球上の二つの方向に絞れる。時間差だけで☆印を一つに絞るには検出器は4台必要であるが、さらに各検出器の感度パ

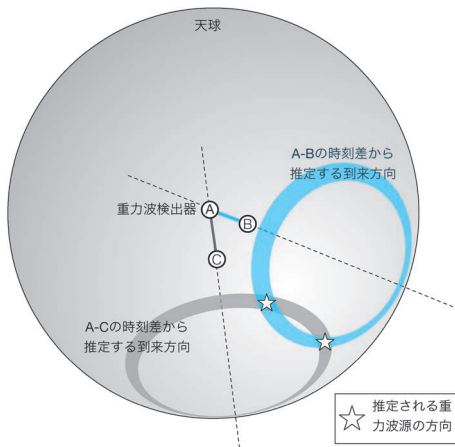


図6 重力波源の方向推定.

ターンの違いから、重力波の偏極も考慮して確からしい方向を決める。したがって、2, 3台だけでもかなり決まる方向もある。

方向決定のために重要なのは、検出器の間が離れていることと、感度パターンの違う検出器があることである。そうすると、地上に設置する場合、日米欧といった地球上に広がった検出器ネットワークが有利である。重力波は非常に透過率が高いので、地球の裏側から到来しても問題ない。これが、LIGOが初検出を達成してなお、VirgoやKAGRAといった3台目4台目の検出器が必要な大きな理由である。GW150914の最初の報告では、到来方向の推定範囲は約600平方度（90%信頼度）もあった*2。これは2台のLIGO検出器のみでの推定であるため、前述の図6のように円の帯状の範囲でしか決まらなかったためだ。しかし、仮にVirgo検出器もGW150914を同時に観測していたとすると、方向によっては推定範囲は10平方度まで絞れるという試算がある。2台のLIGO, Virgo, KAGRAの4台が同時観測すると、平均的な到来方向推定範囲は5平方度くらいまで改善する。

4. 電磁波観測への期待

重力波検出器が複数台あれば方向推定は良くなるが、それでも、観測する重力波の波長（ $\mathcal{O}(100-10,000 \text{ km})$ ）が検出器間の距離（ $\mathcal{O}(\sim 1,000 \text{ km})$ ）に比較して短くないため、地上設置の検出器では劇的な改善は望めない。電波観測の回折限界と同じ理屈である。したがって、重力波源の母銀河や母天体を同定するためには、どうしても電磁波観測による追観測・同時観測が必要となる。また、観測可能な重力波を放射する天体は、高密度かつコンパクトな天体が、劇的な運動を行っているものである。すると必然的に、高エネルギーの天体現象であろう。後述のように、X線、 γ 線や荷電粒子ジェットの出射が考えられるし、可視光・赤外線でも輝く可能性は十分にある。

多くの天体のX線・ γ 線観測装置は、広視野かつ重力波よりもずっと良い方向分解能を持っている。したがって、重力波とX線・ γ 線の同時観測がなされれば、早い段階で重力波源の方向を絞り込める⁹⁾。

可視光・赤外線観測は母銀河を同定することのできる分解能を持っている。この波長帯での放射は、重力波が到来した後も長時間（数分～数日）続くことが期待できる。重力波が示唆する方向は広いが、追観測が成功する可能性は十分にある。さらに、分光できれば宇宙論的赤方偏移 z が測定できるのも重要である。重力波も赤方偏移をすることで、重力波の解析では質量と赤方偏移が縮退した形で求まる。これを解くことができるし、将来の重力波観測で $z \sim \mathcal{O}(1)$ の事象が多数観測できれば、星形成時期の議論や、宇宙膨張の幾何学的検証などが可能となる。

*2 後に、仔細な解析を行ってさらに200-300平方度程度まで絞っている¹⁰⁾。波形抽出方法、誤差推定方法によって推定範囲は少しずつ異なっている。

4.1 期待の重力波源：中性子星（含む連星）、超新星爆発

とはいえ、GW150914のようにブラックホール連星の合体では、もし降着円盤や周囲のガスがあれば電磁波放射もありえるが、基本的には重力波以外のものはあまり期待できそうにない。それでは、どのような重力波源であれば電磁波観測が期待できるであろうか？

中性子星—ブラックホール連星合体 まず挙げたいのは中性子星とブラックホールの連星である。このような連星は今までに見つかっていないが、今回重力波でブラックホール連星が見つかり、中性子星連星は以前から存在が確認されていたのだから、中性子星—ブラックホール連星も期待して良いだろう。この連星も、重力波を放出して合体する。片方がブラックホールであり重い分、中性子星連星よりも大きな重力波が出る。したがって、より遠くまで検出できる。

特徴的なのは、連星の二つの星の質量比が10倍くらいと大きいことである。合体の際に中性子星は潮汐力で破壊され、ブラックホールに吸い込まれつつも周辺に高密度核物質をまき散らすだろう。そうすると、 r 過程によって生じた元素が放射性崩壊を起こし、電磁波放射を伴うだろう。キロノバ (Kilonova)¹¹⁾あるいはマクロノバ (Macronova)¹²⁾として知られる天体の正体として、この過程が有力である。

中性子星連星合体 中性子星連星はパルサー観測によってすでに発見されているし、それらの例から合体率も、銀河あたり10万年に1回程度と推定されている。検出頻度も、Advanced LIGOの最終感度では年間40事象程度¹³⁾と期待されている。長年の間、重力波源の最有力候補であったし、初観測がなされた今日でもやはり有力な候補である。

ブラックホール連星に比べて軽いため、より高い振動数の重力波まで放出するし、検出器の観測周波数帯域に入ってから合体までの時間がの

(1,000秒)と長く、重力波パラメータの推定も有利な点がある。また、高密度核物質の状態方程式、 r 過程による重元素の供給源などの中性子星の物理への関心も高い。電磁放射も期待できる。短い γ 線バースト (SGRB)の正体であるとも言われており、もしSGRBと重力波の同時観測が観測されれば、そのメカニズムの解明に大きな情報を与えるだろう。

超新星爆発 (重力崩壊型) 重力崩壊型の超新星爆発も、長らく有力な重力波源として挙げられてきた。光学観測にとっては超新星は毎年たくさんのが発見されているが、重力波も捉えられる距離となると数百kpc程度までである。SN 1987Aのようにマゼラン雲や星座に見えているようなごく近傍で起きれば、光学観測、ニュートリノ、重力波の三つで同時観測が期待できる。銀河系内の場合は、光学的厚さのため、ニュートリノと重力波、条件が良ければ(近)赤外線ということになる。どちらにしても、たいへんなインパクトをもった観測になることは間違いない。

超新星爆発で大きな重力波が放出されるには、非軸対称な運動や、高速でコアが回転していることが必要と見積もられている。もしもニュートリノと同時観測がなされれば、中性子化バーストと重力波波形を比較してコアや対流、停滞衝撃波の不安定性など、超新星爆発のダイナミクスの解明に役立つと期待される。

4.2 重力波“天文学”の条件

では最後に、重力波観測が“天文学”と呼べるようになるために必要なことを、もう一度列記しておこう。

1) 重力波観測による天体パラメータの推定

追観測が間に合うように、極力早い解析とアラート情報の発信が必要である。重力波による質量の推定は、中性子星を伴う事象であるかどうかの指標であり、すなわち電磁波放射を期待できるかどうかの目安となる。

- 2) 重力波検出器のみでの方向推定
3台, 4台の重力波検出器が必要で,
KAGRAも活躍するだろう。
- 3) 電磁波ほかの観測による母銀河ないし天体
の同定
- 4) 重力波天体の総合的な解析

以上, 読者諸氏にはたいへん野心的なシナリオと思われるかもしれないが, われわれはすでに“重力波が観測された時代”に突入しており, 決して夢物語ではない. 多様な手段での観測を駆使した, 重力波源を対象とした天文学が始まるのを大いに期待したい.

謝 辞

本稿の内容は, 科研費新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」の各計画研究(課題番号: 24103002, 24103003, 24103004, 24103005, 24103006), 科研費特別推進研究「極低温干渉計で挑む重力波の初観測」, 学術振興会拠点形成事業「重力波天文学の創成」, KAGRA計画の支援を受けました. また本特集を企画し, 本稿の機会をくださった諸隈智貴氏ほか編集委員の皆様へ感謝します.

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al., 2016, PRL 116, 061102
- 2) Abbott B. P., et al., 2016, PRL 116, 241103
- 3) The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration, arXiv:1606.04856
- 4) Kinugawa T., et al., 2014, MNRAS 442, 2963
- 5) Sasaki M., et al., M., 2016, PRL 117, 061101
- 6) Ebisuzaki T., et al., 2001, ApJ 562, L19.
- 7) 諸隈智貴, 2017, 天文月報 110, 14
- 8) 富永望, 2017, 天文月報 110, 19
- 9) 芹野素子, 2017, 天文月報 110, 25
- 10) Abbott B. P., et al., 0000, ApJ Lett. 826, 1
- 11) Metzger B. D., et al., 2010, MNRAS 406, 2650
- 12) Kulkarni S. R., 2005, arXiv:astro-ph/0510256
- 13) Abadie J., et al., 2010, Class. Quant. Grav. 27, 173001

Expectation for the Coincidence/Follow-Up Observations by Electromagnetic Waves for Gravitational Wave Events

Nobuyuki KANDA

Graduate School of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan

Abstract: Gravitational wave predicted by general relativity is finally observed, and gravitational wave astronomy has started. On the other hand, in order to discuss the gravitational wave source from the view of astronomy, it may be necessary to reveal their signature in a multi-messenger observation. In this paper, we discuss the scientific impact of the first observed gravitational waves, also describes the future gravitational wave observations. In order to gravitational wave astronomy is satisfied, we also discuss the expectations of coincidence/follow-up observations by electromagnetic waves and neutrino.