

重力波天文学とrプロセス元素の 意外な関係

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



重力波天文学とrプロセス元素合成. この一見関係なさそうな両者の関係が注目されている. 直接検出が目前に迫っている重力波. 最も有望な重力波源の一つが連星中性子星の合体だ. この連星中性子星の合体はrプロセス元素合成によって明るく輝き, 重力波源の位置を正確に知らせてくれる. 本稿では, (1) rプロセス元素合成が重力波天文学の成功に重要な役割を果たすこと, (2) 広視野を誇るすばる望遠鏡が重力波源の同定に大きな威力を発揮すること, そして, (3) 重力波+電磁波天文学が宇宙におけるrプロセス元素の起源を探る研究の新たな手段となることを紹介したい.

1. 重力波天文学の幕開け

「重力波天文学の幕開けが迫っている」

そう言われても読者の方々の中にはピンとこない方もいるかもしれない. 重力波は一般相対論により予言される「波」であり, 超新星爆発や中性子星同士との合体, ブラックホールと中性子星の合体など, 強い重力場の変動に伴って発生するものである. この重力波を検出するため, これまで多くの大規模な実験が行われ, その感度は年々向上している. そして, 2017年頃から続々と稼働を始める予定である, アメリカのAdvanced LIGO, ヨーロッパのAdvanced Virgo, そして日本のKAGRAによって, ついに最初の重力波検出がなされると期待されているのだ^{1), 2)}.

本当に重力波は検出されるだろうか? 次世代重力波検出器の最も有望なターゲットの一つは,

連星系をなした中性子星の合体イベントである. これらの検出器が目指す感度が達成された場合, 200 Mpc程度の距離の系外銀河内で起こる連星中性子星合体からの重力波シグナルを検出することができる. 問題は地球から200 Mpc以内の宇宙で, われわれが活着している間に連星中性子星合体イベントが発生するかどうかだ.

連星中性子星合体イベントの発生率は銀河系内に存在する連星中性子星の数や, 継続時間の短いガンマ線バースト (ショートガンマ線バースト) の発生頻度から, 一つの銀河あたりおよそ1万年に1回程度 (100 Myr^{-1}) であると見積もられている¹⁾. しかし, その期待値には大きな不定性があると言わざるえず, 考えられる範囲は $1\text{--}1,000 \text{ Myr}^{-1}$ と, 実に3桁もの開きがある^{*1)}. いずれにしても, 200 Mpc以内の宇宙では, 年間およそ30 (0.3–300) イベント程度の連星中性子星

^{*1)} 銀河系内の連星中性子星から見積もる場合は, 主な不定性はパルサーとして観測される中性子星の光度分布にある³⁾. また, ショートガンマ線バーストから見積もる場合は, 主な不定性はビーミングの効果 (ジェットの立体角) の補正である⁴⁾.

合体が起きると考えられているのだ。一方で、現在稼働しているLIGO, Virgoの感度では20 Mpc程度からの重力波シグナルしか検出することができないため、年間に換算すると0.03 (0.0003–0.3) イベント程度である。そのため、これまで重力波が検出されていないのは不思議ではなく、次世代の検出器に非常に大きな期待が集まっているのだ。

さて、ではなぜ重力波天文学とrプロセス元素合成に関係があるのだろうか？ 和南城氏のレビューにもあるように、連星中性子星の合体ではrプロセス元素合成が起きていると考えられている。しかし、両者の関係はそれだけにとどまらない。重力波による天文学、天体物理学を行うにはrプロセス元素合成が必要不可欠なのだ。

1.1 重力波+電磁波天文学

重力波の検出にはレーザー干渉計が用いられるため、重力波を検出できたとしても、その到来方向を正確に特定することは難しい。地球上に複数の検出器を配置し、複数の検出器で重力波を検出することで、検出時刻の差から初めて到来方向を推定することができる。しかし、Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRAがすべて重力波を検出したとしても、その位置決定精度はおおよそ10–100平方度(!)程度なのだ^{5), 6)}。

地球から200 Mpc以内の距離の宇宙を考えると、たとえば100平方度のなかには数千個の系外銀河が含まれる。すなわち、重力波の検出だけでは、その多数の銀河のどこで重力波イベントが起きたのかが全くわからないのだ。どのような銀河の中の、どのような環境で発生したかもわからなければ、そもそも銀河に付随しているかどうかもわからないし、もちろん重力波イベントの赤方偏移もわからない。これではせっかく重力波が検出されても、天体物理学的な研究をし尽くすことはできない。正確な位置を決めるには電磁波に頼るしかない。すなわち、重力波イベントの電磁波対応天体を探し出して、正確な位置を決定すること

で、初めて重力波天文学の真の幕開けを迎えることができるのだ。

1.2 連星中性子星合体からの電磁波放射

では一体重力波天体からはどのような電磁波が放出されるのだろうか？ 以下は、連星中性子星合体に絞って話を進める。連星中性子星合体では、大きく分けて三種の種類の放射が考えられている^{7)–10)}(図1)。

(1) ショートガンマ線バースト：ガンマ線バーストのうち、継続時間が2秒以下と短いイベントは連星中性子星の合体により引き起こされると考えられている。ガンマ線の検出器は視野を広くしやすく、100平方度をカバーするのは容易である。しかし、ガンマ線バーストは相対論的効果でビーミングしていると考えられており、ジェット方向と視線方向が一致しない限り観測できない。すなわち、重力波が検出されても、必ずしもガンマ線バーストが付随して見えるわけではないのが問題である。

(2) 可視、電波残光：相対論的ジェットが減速すると放射は等方に近くなるため、あらゆる方向から放射を観測することができる。これはガンマ線バーストを伴わない残光という意味で、「orphan afterglow」と呼ばれており、主に可視から電波域での放射が期待されている。しかし、ジェットが視線方向からずれていると、残光が見え始めるの

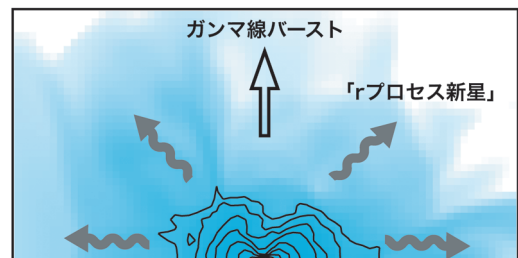


図1 連星中性子星合体からの放射のイメージ図(連星軌道と垂直な断面図)。カラーと等高線は数値相対論シミュレーションによる合体直後の密度分布¹²⁾。ショートガンマ線バーストはジェットの方向からしか観測できないが、放射性元素による放射は全方向から観測できる。

が合体から数カ月以上遅れてしまうこともある。例えばある場所から重力波が検出され、数カ月後に電波源が新しく現れたとき、その両者が同一天体であることを確信しづらいのが問題である。

(3) 放射性元素による放射：最後がrプロセス元素合成に大きくかかわる放射である。連星中性子星合体でrプロセス元素合成が起きると、中性子過剰な放射性元素が作られる。その崩壊エネルギーで「光る」ことができれば、放射はほぼ等方であるし、放射性元素の寿命によっては時間の遅れもないため、上記二つの問題をクリアしそうである。この放射の一番の問題点は、本当にこのようなことが起きるのか、起きたとしても、どの波長でどの程度の光度が期待されるかがよくわからなかったことであった。しかし、近年の研究の進展により、この素性が明らかになってきた。

2. rプロセス放射性元素による電磁波放射

二つの中性子星が合体すると、一部の物質は宇宙空間に放出されると考えられており^{11)–13)}、放出物質はrプロセスにより中性子過剰な放射性元素からなる。放射性元素はガンマ線、電子等を放出して崩壊するが、それらは放出物質中をすり抜けていくことができず、いったん内部エネルギーとして蓄積される。蓄えられたエネルギーは主に可視光や近赤外線放射されるが、放出物質は光赤外線に対しても透明ではないため、光子は放出物質中を拡散しながら外に向かう。放出物質は急激に膨張しているため、時々刻々と光は拡散しやすくなり、これによってじわじわと放出物質が光り始める^{*2}。

本稿では、このようなメカニズムによる連星中性子星合体の電磁波放射現象を「rプロセス新星」と呼ぶことにする^{*3}。

2.1 「rプロセス新星」はどう光るか？

「rプロセス新星」の光り方の特徴は(1) 放出物質の質量、(2) 放出物質の速度、(3) 可視光子に対する透明度(吸収係数)で決まる^{8), 9)}。ある熱源の量を考えると、放出物質の質量が大きいほど、放出物質の速度が低いほど、吸収係数が高いほど、光が抜けるのに時間がかかり、放射は暗くなってしまふ(ただし、実際は放出物質の質量が大きいほうが熱源の量も多いので明るくなる)。近年の数値相対論のシミュレーションにより、(1) 放出物質の質量は 10^{-3} – 10^{-2} 太陽質量、(2) 放出物質の速度は光速の10–20%程度であることがわかってきた^{12), 13)}。問題は三つ目の要素である吸収係数がよくわからないことだが、仮に、超新星爆発と同じ吸収係数($0.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$)を採用すると、期待される放射光度はおよそ $10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ となり、可視光にスペクトルのピークをもち、明るい期間はおよそ1日となる(図2)。

この天体を200 Mpcの距離に置くと、期待される明るさは20–21等級程度である。これは1–2 m級の可視光望遠鏡であれば、比較的簡単に検出することができる明るさである。また、1–2 m級の望遠鏡は1平方度以上の広い視野をとりやすい。すなわち、重力波が検出されたら、1–2 m級の広視野望遠鏡を使って10–100平方度の中から突発天体を探し回ればよいのだ。もしこれが本当なら、現在の観測技術や観測資源で十分実現可能である。

ただし、期待される明るさは吸収係数の平方根

^{*2} このような放射の仕方は超新星爆発と全く同じである。超新星爆発の場合は、爆発によって ^{56}Ni が合成され、その崩壊によって輝いている。

^{*3} このような天体は、研究者の中ではkilonova, macronova, mini-supernovaなどと呼ばれている。日本語では千新星、巨新星、ミニ超新星、ということだろうか。本稿では、rプロセス元素合成の特集号ということもあり、より物理状況に即した「rプロセス新星」と呼ぶことにする。ほかの候補としては、高速新星(膨張速度が速いから)、連新星(連星だから)、金新星(金もできているだろう)、…どれも今ひとつである。

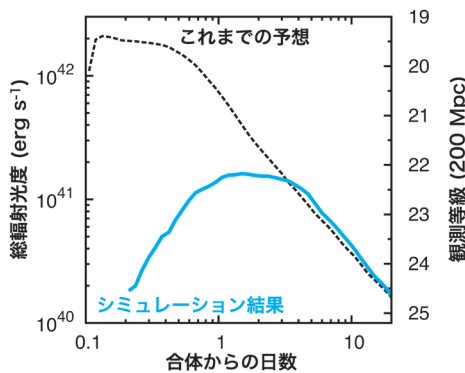


図2 「rプロセス新星」の予想光度曲線。縦軸右側は200 Mpcの距離で予想される大まかな等級（総輻射光度を等級に換算したもの）。これまでの予想に比べて、シミュレーションの結果は10倍程度暗い。筆者らと独立な計算でも同様の結果が得られている^{15), 16)}。

に反比例するため、観測戦略を決めるには、吸収係数を正しく評価しなければならない。超新星爆発の放出物質中における吸収係数は主に鉄のbound-bound遷移によって決まっているが、中性子星合体の放出物質は鉄より重い元素だけであり、吸収係数が超新星爆発と同じとは限らない。そこで筆者らは、「rプロセス新星」がどのように光るのかを明らかにするため、連星中性子星合体の放出物質中における輻射輸送シミュレーションを行うことにした¹⁴⁾。

2.2 「rプロセス新星」のシミュレーション

このシミュレーションの肝は、放出物質中の吸収係数を正しく評価することにある。たとえば、星の中における吸収係数はopacity tableとしてまとめられており、主要な元素の存在量の関数として吸収係数が求められる。星の中におけるrプロセス元素の含有量は少ないため、rプロセス元素が全体の吸収係数に大きな影響を与えることはない。しかし、連星中性子星合体の放出物質はほぼrプロセス元素のみでできているため、rプロセス元素のみが吸収係数を決めるはずである。このように宇宙の中で類を見ないほど重元素だらけな、まさに前人未到の系での光の進みやすきは全

くわかっていないのだ。筆者らは、存在するrプロセス元素のbound-bound遷移のデータを約100,000集め、このデータから、放出物質中の各場所で各時間の吸収係数を逐一すべて計算することで、初めて「rプロセス新星」の現実的な輻射輸送シミュレーションに成功した。

その結果は驚くべきものだった。rプロセス元素だらけの放出物質中では、吸収係数がおよそ $10 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ となることがわかったのである。これは実に超新星爆発の場合の100倍(!)である。期待される明るさは吸収係数の平方根に反比例するため、「rプロセス新星」の明るさはこれまで考えられていたよりもおよそ10倍暗いことが明らかになったのだ(図2)。しかし、幸いにも現在の可視光望遠鏡の感度で到達できないほど暗くはない。重力波に続く「rプロセス新星」を探し出す観測戦略は次章で述べる。

シミュレーションのもう一つの重要な結果は、連星中性子星合体がどのような「顔」をしているかが明らかになったことである。たとえ重力波に続いて突発天体が発見されたとしても、それが連星中性子星合体によるものか確信をもつためにはその分光的特徴を知らなければならない。図3に示した連星中性子星合体の可視光から近赤外線のスpekトルを見ると、超新星爆発に比べて極端に滑らかなことがわかる。これは光速の10-20%もの速度で物質が膨張していることによるドップラーシフトで、数々のrプロセス元素の吸収線が混ざっているためである。また、これまで予想されていたよりも放射の温度は低く、spekトルは可視光よりも近赤外線側で明るくなることもわかった。重力波の電磁波対応天体として、このように赤く、極端にのっぺりとしたspekトルをもつ突発天体が発見されれば、連星中性子星合体によるものだという確信がもてそうだ。

3. 電磁波対応天体の検出に向けて

連星中性子星合体からの重力波が検出される

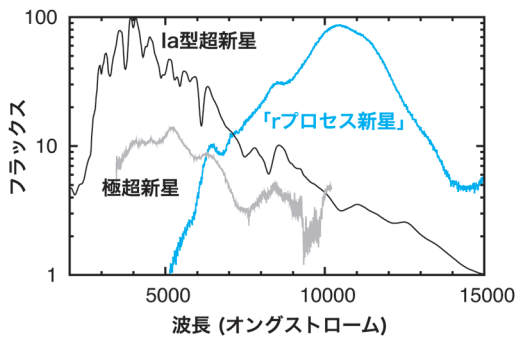


図3 「rプロセス新星」の予想スペクトル。高速な膨張によりIa型超新星と比べて非常にのっぺりとしている。極超新星と呼ばれるエネルギーの高い超新星爆発ものっぺりとしたスペクトルをもつが、「rプロセス新星」は可視光に比べて近赤外線では明るい（赤い色をもつ）。残念ながら分光観測をしても個々のrプロセス元素を同定することは難しいが、のっぺりとしたスペクトルは連星中性子星合体を示す証拠の一つとなりそうだ。

と、およそ10-100平方度の範囲でその位置が報告されるはずである。電磁波天文学の役目は、その重力波を放った天体を見つけ出すことである。そのためにはどのような観測戦略をとるべきだろうか？

図3を見ると、「rプロセス新星」は可視光の波長の長い側や近赤外線では明るいことが予想される。近赤外線よりは可視光のほうが広視野の観測を行いやすいため、可視光の波長の長い側で観測するのが最も効率がよさそうだ。図4は「rプロセス新星」が200 Mpcの距離で起きたときに予想される可視光*i*バンド（波長7,000-8,500オングストローム）の光度曲線である。予想される明るさは22-25等級程度であり、広い視野を確保しやすい1-2 m望遠鏡では少し難しそうだ。

現在、4 m級以上の口径をもつ可視光望遠鏡で1平方度以上の視野をもつのはCanada-France-Hawaii Telescope (CFHT, 3.6 m)のMegaCam,

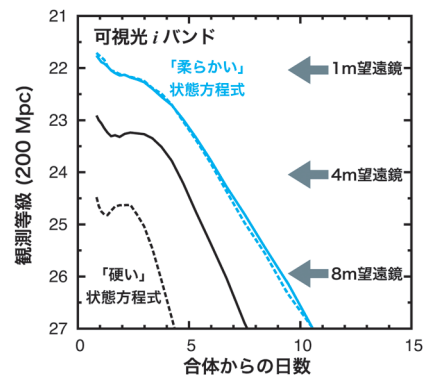


図4 200 Mpcの距離で起きた「rプロセス新星」の可視光*i*バンドの予想光度曲線。色の違いは連星中性子星合体のシミュレーションでどのような高密度状態方程式を採用したかの違いで、同じ質量の中性子星の半径が小さくなる「柔らかい」状態方程式の場合により多くの質量が放出されて明るくなる。実線は1.2太陽質量と1.5太陽質量の中性子星が合体した場合で、破線は1.3太陽質量と1.4太陽質量の中性子星が合体した場合。矢印は10分間の可視光観測で到達できる典型的な感度を示している。

Blanco望遠鏡 (4 m) のDark Energy Camera (DECam), そしてすばる望遠鏡 (8.2 m) のHyper Suprime-Cam (HSC) だけである^{*4}。ただし、図4を見ると、連星中性子星のモデルによっては、4 m級の望遠鏡では検出できないかもしれず、大望遠鏡では随一の広視野を誇るすばる望遠鏡に多くの期待が集まっている。

また、重力波検出により報告された位置の中に突発天体が発見されても、銀河系内の星のフレアや変動現象、遠方の超新星爆発などが紛れ込む可能性がある。重力波天体であると確信をもつには、図3に示すような特徴的なスペクトルを確認するための分光観測が必要不可欠である。このような天体の分光観測には、日本が推進しているThirty Meter Telescope (TMT)をはじめ、30 m級の望遠鏡が大いに活躍するだろう。

^{*4} 2020年以降にはLarge Synoptic Survey Telescope (LSST, 8.4 m) が一度に9.6平方度の視野を観測できるカメラを搭載して稼働を始める予定である。

3.1 「rプロセス新星」早くも発見？

重力波の電磁波対応天体として「rプロセス新星」を狙う際の問題の一つが、そもそもこんなことが本当に起きるのかどうか観測的に確かめられていないことだった。次世代重力波検出器が稼働する前にこれを確かめる唯一の方法は、ショートガンマ線バーストが起きた後に「rプロセス新星」を探すことである。ショートガンマ線バーストを使えば、200 Mpcどころか、赤方偏移 $z=2$ 程度までの連星中性子星合体を見ることができ、著者らのシミュレーション結果によると、例えば $z=0.2$ でショートガンマ線バーストが起きたときに付随する「rプロセス新星」の明るさは近赤外線で24等級程度である。ショートガンマ線バーストが起きた場所をじっくりと見ていれば「rプロセス新星」の光が約10日後に見えるはずなのである。

と予想していた矢先、2013年6月3日に発見されたショートガンマ線バースト GRB 130603B から、早速「rプロセス新星」起因と思われる近赤外線超過が見つかったという報告がなされた^{17), 18)}。ハッブル望遠鏡による1日だけの撮像観測ではあるが、「rプロセス新星」が起きていない場合に予想される明るさよりも実に25倍も明るかったのだ。重力検出器の本格稼働の前に、このような観測例を増やすことによって、より詳しく「rプロセス新星」の性質が明らかになっていくものと思われる。

3.2 重力波+電磁波天文学で迫るrプロセス元素合成

最後に、重力波+電磁波天文学がrプロセス元素の起源を探る研究の新たな手段となることを強調しておきたい。和南城氏のレビューにあるとおり、rプロセス元素合成のサイトに関しては長い論争がある。もし、重力波に続く「rプロセス新星」を発見することができれば、それは連星中性子星合体でrプロセス元素合成が起きている何よりの証拠となる。また、その明るさから、宇宙空

間に放出されたrプロセス元素の質量も測ることができる。これはrプロセス元素合成だらけの連星中性子星合体ならではの特徴である（超新星爆発ではrプロセス元素合成が起きていても、その光り方には影響しない）。実際、GRB 130603Bの赤外超過が「rプロセス新星」だとすると、1回の連星中性子星合体からおよそ 10^{-2} 太陽質量ものrプロセス元素が放出されていることになる¹⁹⁾。

超新星爆発が起きる頻度は、一つの銀河あたり、100年に1回程度である。そして、1回の超新星爆発あたり、およそ 10^{-4} 太陽質量のrプロセス元素が放出されていけば、現在の銀河系のrプロセス元素量を説明することができる。もし、1回の連星中性子星合体あたり、 10^{-2} 太陽質量のrプロセス元素が放出されていけば、銀河系内のrプロセス元素量を説明するためには一つの銀河あたり1万年に1回程度合体が起きていなければならない。実はこの数字は、現在の連星中性子星合体の頻度の予想とぴったり一致している。しかし、1章で述べたとおり、連星中性子星合体の頻度には大きな不定性がある。重力波天文学によって合体の頻度が測られ、電磁波天文学によって1回の合体あたりの元素放出量がわかれば、連星中性子星合体が宇宙のrプロセス元素合成に寄与しているかどうかを明らかにすることができそうだ。rプロセス元素の化学進化の詳細については、次号に掲載される石丸氏の記事を参照してほしい。

4. ま と め

重力波天文学とrプロセス元素。本稿では、この一見関係なさそうな両者が実は密接な関係にあることを紹介した。連星中性子星合体でrプロセス元素合成が起きて初めて光る「rプロセス新星」を探し出し、重力波源の位置を正確に決定することによって、重力波天文学は真の幕開けを迎えることができる。一方で、重力波天文学が進めば、連星中性子星合体が宇宙のrプロセス元素合成に

どれほど寄与しているかが明らかになるだろう。

「rプロセス新星」の発見には広視野をもつ4-8 m級の可視光望遠鏡が必要であり、8 m級の望遠鏡では随一の広視野を誇るすばる望遠鏡に期待が集まっている。また、発見された突発天体を重力波源と断定するための分光観測にはTMTをはじめとする30 m級の望遠鏡が活躍するだろう。KAGRAによる重力波検出、すばる望遠鏡による電磁波対応天体の発見、TMTによる分光観測、という（日本人にとっては夢のような！）展開をぜひ期待したい。

謝 辞

この記事の内容は仏坂健太氏との共同研究により出版された論文¹⁴⁾をもとにしています。この研究は仏坂氏だけでなく、関口雄一郎氏、柴田大氏、木内建太氏、前田啓一氏、久徳浩太郎氏、和南城伸也氏との議論がなければ始まらなかったものであり、これらの方々に深く感謝いたします。この研究の数値シミュレーションには、国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのスーパーコンピュータCray XC30を使わせていただきました。

参考文献

- 1) Abadie J., et al., 2010, *Classical and Quantum Gravity* 27, 173001
- 2) Kuroda K., LCGT Collaboration, 2010, *Classical and Quantum Gravity* 27, 084004
- 3) Kalogera V., et al., 2004, *ApJ* 601, L179
- 4) Coward D. M., et al., 2012, *MNRAS* 425, 2668
- 5) Aasi J., et al., 2013, arXiv 1304.0670
- 6) Nissanke S., Kasliwal M., Georgieva A., 2013, *ApJ* 767, 124
- 7) Kochanek C. S., Piran T., 1993, *ApJ* 417, L17
- 8) Li L.-X., Paczynski B., 1998, *ApJ* 507, L59
- 9) Metzger B. D., et al., 2010, *MNRAS* 406, 3650
- 10) Piran T., Nakar E., Rosswog S., 2013, *MNRAS* 430, 2121
- 11) Rosswog S., et al., 1999, *A&A* 341, 499
- 12) Hotokezaka K., et al., 2013, *Physical Review D* 87, 024001
- 13) Bauswein A., Goriely S., Janka H.-T., 2013, *ApJ* 773, 78
- 14) Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, *ApJ* 775, 113
- 15) Kasen D., Badnell N. R., Barnes J., 2013, *ApJ* 774, 25
- 16) Barnes J., Kasen D., 2013, *ApJ* 775, 18
- 17) Berger E., Fong W., Chornock R., 2013, *ApJ* 774, L23
- 18) Tanvir N. R., et al., 2013, *Nature* 500, 547
- 19) Hotokezaka K., et al., 2013, *ApJ* 778, L16

Gravitational Wave Astronomy and r-Process Nucleosynthesis

Masaomi TANAKA

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

Abstract: Gravitational wave astronomy and r-process nucleosynthesis. Although these two topics seem quite independent, they are, in fact, closely related. Gravitational waves are expected to be detected in the near future. Mergers of binary neutron stars are among the most promising targets. By r-process nucleosynthesis, the neutron star merger can emit electromagnetic waves, with which we can accurately determine the position of gravitational-wave sources. I show that r-process nucleosynthesis is important for the success of gravitational wave astronomy, and that gravitational/electromagnetic wave astronomy provides a new way to study the r-process nucleosynthesis in the Universe.