

# 中性子星合体と重元素の起源

田中雅臣

〈東北大学天文学教室 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: masaomi.tanaka@astr.tohoku.ac.jp



2017年、中性子星合体からの重力波が初めて検出され (GW170817)、さらにその電磁波対応天体がある波長の電磁波で観測された。可視光・赤外線対応天体の観測的な特徴は、中性子星合体で速い中性子捕獲反応 ( $r$ プロセス) が起きた時に予想される「キロノバ」の性質に一致しており、中性子星合体による重元素合成が観測的に確認されたと言える。本稿では、GW170817のマルチメッセンジャー観測の様子を紹介しながら、中性子星合体における重元素合成の何が分かったか、そして何が分かっていないかをまとめる。

## 1. 宇宙における重元素の起源

私たちの身の回りには金やプラチナは一体どこから来たのだろうか？ 指輪などになって宝石店に並ぶ前には、地球のどこかで産出されたはずである。地球の中でこれらの元素が合成されることはない、地球が形成された時には既にその材料に含まれていたことになる。宇宙が始まった時には水素とヘリウム、少量のリチウムしか存在しなかったため、金やプラチナは宇宙のどこかで合成されたはずである。では一体どこでどうやって作られたのだろうか？

このような宇宙における元素の起源は天文学・宇宙物理学の長年の興味の一つである [1]。天文学者としては、周期表の全ての元素の起源を理解したいものだ。鉄までの元素の起源は概ね理解されており、主に恒星内部の核融合で合成されることが分かっている。しかし、恒星の中で鉄よりも重い元素を作ることは容易ではない。恒星内で鉄に陽子やヘリウム原子核などのプラスの電荷をもつ粒子をくっつけようとする、電気的な反発を乗り越えるために超高温が必要となる。しかし、そのような高温下ではエネルギーの高い光子が原

子核を壊してしまうため、鉄より重い元素を作ることができないのだ。

ではどうすれば良いのか？ 実はこの答えは既に50年以上前に提案されている [2]。電荷があることが問題なので、電荷のない中性子をくっつけば良いのである。鉄に中性子をくっつけてもまだ鉄の同位体だが、その同位体が放射性崩壊 (ベータ崩壊) を起こせば原子核内の中性子が陽子に変わるため、上記の困難を無事「バイパス」できて、より重い元素を作ることができる。このような反応は中性子捕獲反応と呼ばれている。

中性子捕獲反応には二種類存在し、中性子捕獲のペースがベータ崩壊よりも遅い場合を  $s$  (slow) プロセス、中性子捕獲がベータ崩壊よりも速い場合を  $r$  (rapid) プロセスと呼ぶ。  $s$  プロセスと  $r$  プロセスではできやすい元素が異なり、核図表上で安定な原子核に沿って進む  $s$  プロセスでは、中性子の魔法数をもつバリウムや鉛などができやすい。一方で、金やプラチナ、ウランなどを合成するには  $r$  プロセスが必要である。  $s$  プロセスは恒星内の核融合反応で出てくる中性子を使って進むことが知られており、実際に漸近巨星分枝星の表面で  $s$  プロセス元素の過剰が観測されている。し

かし、 $r$ プロセスが宇宙のどこで起きているのかは長年の研究にも関わらず明らかになっていない。

$r$ プロセスには大量の中性子が必要なため、 $r$ プロセス元素の起源天体としては中性子星の周りで起きる現象を考えるのが自然である。長年、重力崩壊型超新星爆発で $r$ プロセスが起きると考えられてきたが、近年の現実的な超新星爆発シミュレーションの結果からは、 $r$ プロセスが起きにくいことが分かっている [3]。(普通の)超新星爆発はニュートリノを吸収することで爆発すると考えられているが、中性子はニュートリノを吸収することで陽子に変わるため、爆発しようとするほど中性子過剰度が減ってしまい、 $r$ プロセスが起きにくいというジレンマが起きるのだ。

そこで、注目を集めているのが中性子星合体である。中性子星が合体すると、一部の物質が宇宙空間に飛び出し、放出された物質中で $r$ プロセスが起きることが期待される。さらに、 $r$ プロセス元素の放射性崩壊によって放出された物質が可視光や赤外線で光る「キロノバ」という現象が予想されている [4]。中性子星合体は有力な重力波源でもあるため、中性子星合体からの重力波を観測し、さらに電磁波対応天体であるキロノバを観測することができれば、中性子星合体で $r$ プロセスが起きたことを観測的に検証することができる(図1, [5])。つまり、重力波と電磁波の「マルチ

メッセンジャー天文学」で、長年の問題である $r$ プロセス元素の起源に新たな一石を投じることができるのだ。本稿では、2017年に実現した中性子星合体のマルチメッセンジャー観測と、そこから得られた $r$ プロセス元素の起源に関する知見を紹介したい [6]。

## 2. 中性子星合体GW170817の観測

2017年8月17日、重力波望遠鏡 Advanced LIGO と Advanced Virgo によって、中性子星合体からの重力波が検出された (GW170817, [7])。これ以前にブラックホール合体からの重力波が約10例観測されていたが、中性子星合体からの重力波検出はこれが初めてのことである。さらに、この速報を受けて世界中の電磁波望遠鏡が重力波の到来方向を観測したところ、電磁波対応天体が発見された [8]。本稿では可視光・赤外線観測と重元素の起源に関する内容を中心に紹介するが、この他にも重力波観測自体からは高密度物質の状態方程式への制限が得られ、ガンマ線・X線と電波観測からは中性子星合体における高エネルギー現象の理解が大きく進んでいる。詳しくは2018年の特集 [9-15] や、2019年の仏坂健太氏による記事 [16] を参照して欲しい。

筆者らのグループは、吉田道利氏が代表となって2014年にJ-GEM (Japanese collaboration for Gravitational wave ElectroMagnetic follow-up) と

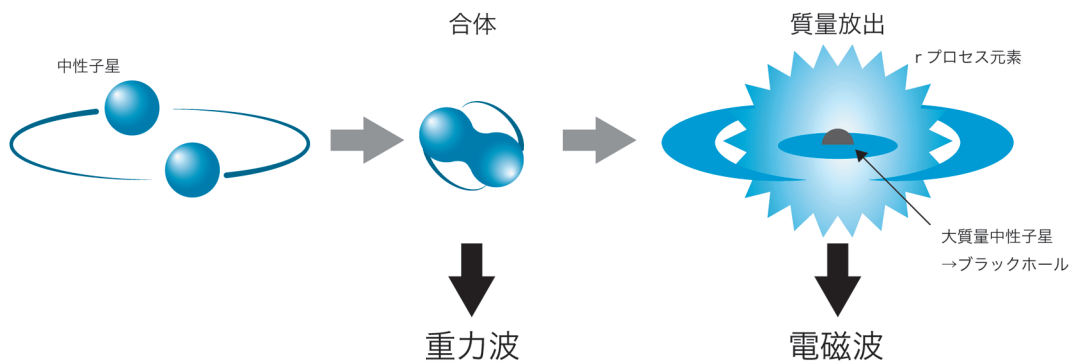


図1 中性子星合体の質量放出と重力波・電磁波放射の模式図。

いう観測ネットワークを組織し、2015年に初めて重力波が観測されて以来、継続的に重力波天体の電磁波対応天体の観測を行ってきた [17-21]. 日本時間2017年8月17日の夜にGW170817の検出の速報を受け、8月18日の未明にはLIGO (2台) とVirgoの計3台の干渉計のデータから重力波の到来方向が30平方度程度と精度良く定まった. 対応天体を発見するには格好のターゲットである (30平方度というと可視光・赤外線天文学では広大な領域だが、重力波天体の追観測をしていると1,000平方度を超えるイベントを見慣れているため、既に感覚が麻痺してきている). 幸運にもすばる望遠鏡に超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) が搭載されており、30平方度であれば大半の領域をカバーできそうである. そうこう考えているうちに、J-GEMのメンバーで、すばる望遠鏡HSCの開発者の一人である内海洋輔氏が驚くほどのスピードで実際の観測領域を決定してくれた.

日本時間8月18日の朝、ハワイで日が沈むのを待ちながら観測の準備を始めた矢先、チリの望遠鏡による可視光観測によって、40 Mpcの距離にある銀河NGC 4993に今まで存在しなかった天体が発見されたという情報が飛び込んできた. この時ハワイではまだ15時頃である. これほど地球の自転の遅さを恨んだ日は人生で後にも先にもない. しかし、この時点ではその天体が対応天体かは分からないため、すばる望遠鏡ではその広視野サーベイ能力を生かして、なるべく広い領域を観測することにした. 日没後、まずはNGC 4993が視野に入る領域を観測し、確かに新しい天体が現れていることが確認できた (図2, [22]). 今思えば、これが重力波天体が画像におさめられたのを初めて見た瞬間だったが、この天体が対応天体かは定かではなかったこともあり、観測に立ち会ったメンバーも「確かにいるね」という反応で、大きな感動はなかったと記憶している. そのままHSCでは内海氏のプランに従って重力波到来方

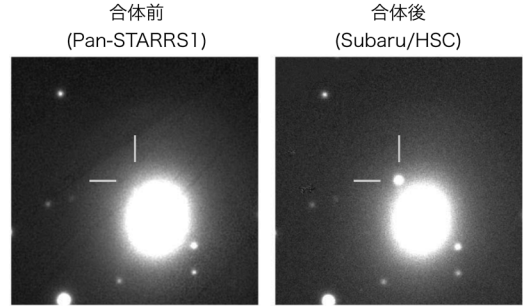


図2 GW170817の電磁波対応天体. 左がPan-STARRS1望遠鏡による合体前の画像で、右がすばる望遠鏡HSCで8月18日に得られた画像 [22]. 対応天体の場所を線で表している. 右下の明るい領域がNGC 4993. 画像の大きさはおよそ1分角.

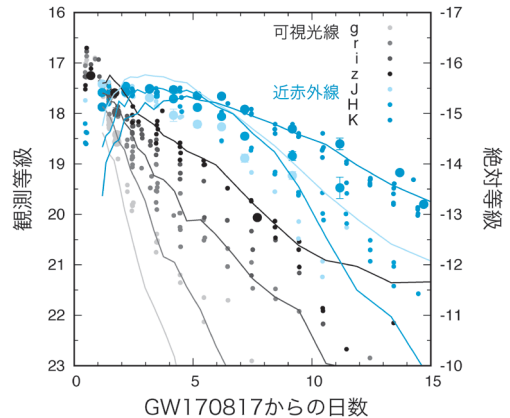


図3 GW170817の対応天体の光度曲線. 横軸は合体からの日数を表し、縦軸は観測等級 (左) と距離を加味して変換した絶対等級 (右) を表す. 大きい点はJ-GEMによって得られたデータ [23] で、小さい点は他のグループによって得られたデータ [24]. 線はキロノパの中性子過剰度が中間の場合 (図4) の数値計算結果 [6].

向のサーベイ観測に移った.

その後もJ-GEMではNGC 4993に現れた天体 (AT 2017gfo) の追観測を続け、HSCによる観測では可視光の明るさが急激に暗くなっていったこと、南アフリカに設置された名古屋大学IRSF望遠鏡での観測では赤外線でも10日間にかけて長く輝いたことが確認された (図3, [23]). 次章で紹介する通

り、これらの特徴は事前に予想されていたキロノバの性質と見事に一致していた。そのため、これらのデータが出揃った8月末には、AT 2017gfoが中性子星合体に付随するキロノバであることを確信していた。

しかし、理論的な予想と一致しているだけでは、この天体が重力波天体の対応天体であることの直接的な証拠とは言えない。そこで、全領域をカバーしたHSCのデータが強みを発揮する。実はHSCの観測からは、重力波の到来方向でAT 2017gfo以外にも多くの変動天体が発見されていた。重力波の解析からは奥行きを含めた3次元空間で重力波天体の存在領域が制限されているため、それらの変動天体が重力波と関係あるかどうかを調べるには、3次元領域の中にいるかどうかを判断すれば良い。実際は距離や赤方偏移が分からない場合がほとんどだが、富永望氏の徹底的な解析により、他の天体が3次元領域の中にいる確率はAT 2017gfoよりも十分低いことが明らかになった[22]。AT 2017gfoが重力波天体の対応天体であることが純粋に観測的に示されたのである。

GW170817は大方の研究者の予想よりも近くで発見されたこともあり、可視光と赤外線では口径1 m級の望遠鏡を含め、世界中の望遠鏡で極めて良い時系列データが取得された。筆者は2013年頃からキロノバに関する理論計算を行っていたが、当時は計算結果を100 Mpcに置いて観測可能性を議論すると、楽天的すぎるとレフェリーに突っ込まれるため、たいいてい場合は200 Mpcを仮定するのが相場だった[5]。100 Mpcより近くには置こうと思ったことすらない。それぐらい40 Mpcという近さは驚きだったのである。この近さのおかげで、GW170817の電磁波対応天体はガンマ線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、電波とあらゆる波長で観測され、重力波と電磁波のマルチメッセンジャー天文学は華々しく幕を開けた。

### 3. キロノバ

中性子星合体の元素合成に関して何が分かったかを紹介する前に、GW170817以前にどのような現象が期待されていたかをまとめておきたい。中性子星が合体すると数10ミリ秒から1秒程度の時間スケールで0.01太陽質量程度の物質が宇宙空間に飛び出していく。放出物質の中ではrプロセス元素合成が起きて重元素が合成され、新しく合成された元素は次々と放射性崩壊を起こしていく。放射性崩壊の時間スケールは原子核によって様々だが、安定な原子核に近づくと寿命が1日以上のものであり、膨張する放出物質では常に放射性崩壊が起きている。ベータ崩壊で放出されるガンマ線や電子は放出物質との相互作用で熱化されるため、放出物質からは熱的な放射が期待される。これがキロノバである[25]。

キロノバの性質を決める重要な要素が、放出物質の元素組成である。特に、rプロセスでランタノイド元素ができるかどうかが大きな分かれ目となる。ランタノイド元素は周期表で下にはみ出た原子番号57-71の元素で(図4)、これらの元素は

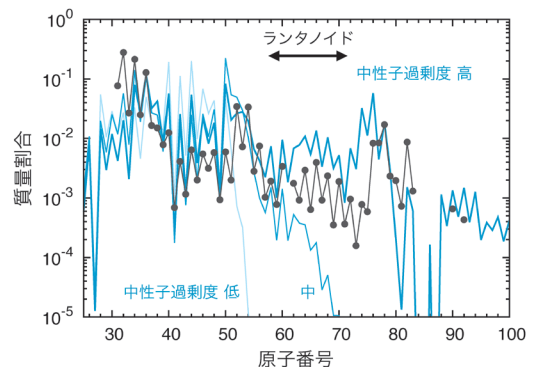


図4 中性子星合体からの放出物質における中性子過剰度と合成される元素の質量割合。ダイナミカルな質量放出は比較的中性子過剰度が高く、より重い元素が合成される一方で、円盤からの質量放出は中性子過剰度が低く、比較的軽い元素が合成される。点は太陽系の元素の質量割合を表す。

4f軌道に電子をもつため、光の吸収効率が可視光から赤外線にかけて非常に高くなる [26, 27]. そのため、ランタノイド元素が含まれるとキロノバからはなかなか光が抜けてこられず、放射の時間スケールが10日程度と比較的長くなり、可視光よりも赤外線で明るくなる（赤いキロノバ）。一方、 $r$ プロセスがランタノイド元素まで到達しないと、放出物質の吸収係数が低いいため、2-3日程度の時間スケールをもつ、可視光が卓越した放射が期待される（青いキロノバ）。このように、キロノバの性質から中性子星合体における $r$ プロセスの進み具合を調べることができるのである。

中性子星合体からの質量放出は大まかに二段階に分かれることが知られている（詳しくは2018年の柴田大氏の記事 [28] を参照して欲しい）。合体直後の数10ミリ秒でダイナミカルに放出される物質と、その後形成される降着円盤からの放出物質である（図1）。前者は中性子星の組成がほぼそのまま反映されるため、非常に中性子過剰であり、効率よく $r$ プロセスが起きる。つまり赤いキロノバになりそうである。一方で後者は、中心に残る中性子からのニュートリノ放射によって中性子が陽子に変わるため、中性子過剰度が下がり、 $r$ プロセスの効率が落ちる。つまり、青いキロノバに近い性質をもつことが期待される。

では、この前提知識を基に観測データを見てみよう。GW170817の対応天体は最初に可視光で発見されたことから分かるように、合体から2-3日は可視光の放射が卓越していた。つまり青いキロノバが見えたことが分かる。その後、可視光の放射は急激に暗くなり（図3）、赤外線では10日以上にわたって明るさが持続した。これは赤いキロノバの性質である。つまり、GW170817ではランタノイドまで元素合成が進んでいなかった部分と、ランタノイドが合成された部分の両方が共存していたことが伺える。

当時筆者は、加藤太治氏ら原子物理学の共同研究者とともに重元素の原子構造計算を行い、光の

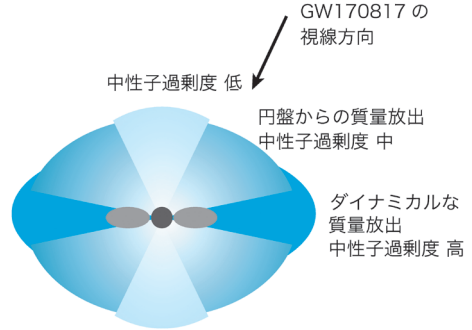


図5 GW170817の質量放出の模式図 [6].

吸収係数を求め、それをキロノバの輻射輸送計算に取り込んで数値シミュレーションを行っていた。そして、GW170817が観測される直前に、ちょうど赤いキロノバと青いキロノバ、そしてその中間のケースを計算していた [29]。これらの結果とGW170817の結果を比べてみたところ、中間のケースが観測された可視光と赤外線の観測データにもっとも近いことが分かった。この結果も、赤いキロノバと青いキロノバの両方が共存していることを支持している（図5）。そして、観測された明るさを説明するためには、放出物質の質量は0.03太陽質量程度必要であることが分かった（図3, [6]）。その後、より詳細な観測データとの比較からは、放出物質の質量が0.05太陽質量程度と推定されている [16]。

では、この放出物質は中性子星合体からどのように放出されたのだろうか？ 数値相対論シミュレーションからは、ダイナミカルに放出される物質の質量は0.01太陽質量程度が限界だと考えられている。そのため、GW170817の性質はそれだけでは説明できそうになく、合体の後にできる降着円盤から放出された物質が重要な役割を果たしていると考えられる [6]。ちなみに0.03-0.05太陽質量という放出物質の質量は大方の予想よりも多かった印象だが、これは降着円盤における粘性効果が完全には理解されていないため、理論予想に幅があったためである。その後、数値相対論で予

想される二種類の放出物質を加味した詳細なキロノバの計算が川口恭平氏によって行われ、観測された可視光・赤外線データが確かに理論的に予想される放出物質の性質で説明できることも明らかになった [30].

では中性子星合体は宇宙における $r$ プロセス元素の起源となり得るだろうか？ 例えば、太陽系の組成では $r$ プロセス元素の質量割合は合計 $10^{-7}$ 程度である。銀河系全体の星質量は $6 \times 10^{11}$ 太陽質量程度なので、大雑把に太陽組成を仮定すると、銀河系には $(6 \times 10^{11}) \times 10^{-7} = 6 \times 10^4$ 太陽質量の $r$ プロセス元素が含まれていることになる。GW170817の観測から、一つの銀河における中性子星合体の頻度はおよそ1万年に1回( $R \sim 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$ )であることが分かった。銀河の年齢( $\tau \sim 10^{10} \text{ yr}$ )にわたって、このペースで中性子星合体が1回あたり $M_{\text{ej}} \sim 0.05$ 太陽質量の $r$ プロセス元素を放出し続けると、合計 $M_{\text{ej}} \times R \times \tau \sim (5 \times 10^{-2}) \times 10^{-4} \times 10^{10} = 5 \times 10^4$ 太陽質量となり、銀河系の全 $r$ プロセス元素の質量に到達することが分かる。実際には銀河の質量は一定ではないし、中性子星合体の頻度も一定ではないことには注意が必要だが、中性子星合体が重元素の起源として満たすべき最低条件は満たされていると言える。このように、GW170817のマルチメッセンジャー観測は宇宙における重元素の起源の理解に向けた大きな一歩となった。

#### 4. 発表までの二ヶ月

中性子星合体GW170817に関する研究は非常に特殊な環境の中で行われた。まず、重力波観測に関する情報はLIGO/Virgo collaborationと共同研究の覚書を交わした研究者内にとどめる取り決めになっていた。さらに、2017年10月に研究成果を世界同時に発表することが、重力波イベント後の早い段階で決められたのである。重力波検出から成果発表までの二ヶ月の様子を、一部ここで紹介したい。

当時から重力波の電磁波対応天体観測には多く

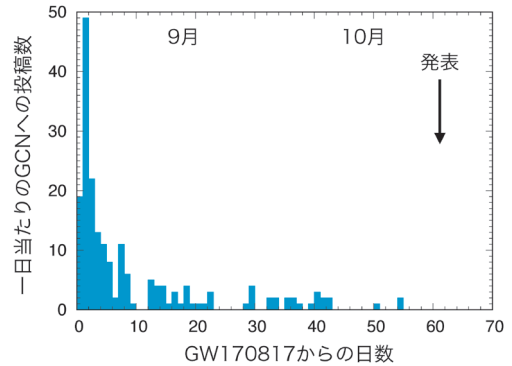


図6 GW170817に関する一日あたりのGCNへの投稿数の変化。

の研究者が参加していた。研究者同士のやり取りにはガンマ線バーストの速報システムであるGCN (Gamma-ray Coordination Network) が使われていたが、箱口令がしかかれていたため、重力波観測に関する内容は共同研究の覚書を交わした研究者のみに送られていた。8月17日の重力波検出直後から世界中の望遠鏡で到来方向の観測が行われ、GCNではAT 2017gfoの発見を含む様々な情報が飛び交った。

しかし、イベントから数日後にはAT 2017gfoが重力波天体の対応天体であることを世界中の研究者がほぼ確信し、この辺りから急にGCNへの投稿数が減ってきた。観測の量は増えているはずなのに、世界中の研究者が自分たちが何をしているか、何に気づいているかを公表しなくなってきたのである。図6はGW170817に関するGCNへの投稿数をイベントからの日数に対して示したもので、急激な減少が一目瞭然だろう。この辺りから世界の各グループが独自に論文を書き始めていたのだ。

ちなみにこの期間中も、GCN自体は重力波以外の情報も合わせて連番で番号をつけ続けている。つまり、覚書を交わしていない外部の研究者から見ると、これだけの量のGCNが「欠番」になって見えるのである。これでは何かがあったことは一目瞭然である。しかも、世界中の望遠鏡が

GW170817の対応天体を観測しているのに、箝口令にも限界がある。案の定、8月24日にはNature誌が中性子星合体が観測されたいという記事を出してしまった。しかもNGC 4993の写真付きである。どこから漏れたかと思えば、8月23日に行われたハッブル望遠鏡の観測で、観測ログが全世界に公開されており、観測者がご丁寧に天体の座標とともにターゲット名に「BNS-MERGER」つまり連星中性子星（BNS=binary neutron star）とつけてしまったのである。

9月9日には中性子星合体の観測結果を10月16日（世界時）に全世界同時公開することが決まり、J-GEMでも急ピッチで論文の執筆が始まった。内海氏を中心に観測データ解析が進められ、9月初旬にはデータが出揃っていた。また、富永氏を中心にすばる望遠鏡HSCの広域観測データの詳細調査が行われ、他の天体よりもAT 2017gfoがより確からしいという定量化が進められた。並行して筆者がキロノバの理論計算を進め、中性子星合体のエキスパートである関口雄一郎氏らと議論しながら、解釈をかためていった。10月に結果を発表するためには、一ヶ月以内にこれらのデータ解析や理論計算、論文執筆を全てこなさなければならない。こういう時こそ研究に集中したいところだが、世界の他のグループからデータを見せてくれとか、計算結果を使わせてくれとか、そしたら誰を著者に入れるかなどの大量のやり取り（と駆け引き）も行われ始め、まさに大忙しであった。

10月になると今度は記者発表に向けた準備が始まった。箝口令の中で記者発表をするのは容易ではない。また、当時筆者は国立天文台に所属しており、偶然にも10月13日と14日に三鷹キャンパスの一般公開イベントがあったため、特に広報の方々には大変な負担をお願いすることになってしまった。著者も8月中旬から働き詰めだったので、この頃には既にヘトヘトだったが、もう修行だと思っしかない。多くの方の助けのおかげで、日本時間の10月17日にはなんとか記者発表を行

うことができた。

GW170817の観測には世界中の70もの望遠鏡が参加し、LIGO/Virgo collaborationが音頭を取ってまとめた「マルチメッセンジャー論文」[8]の著者は合計3677名にもなった。発表日のarXivにはGW170817関連の論文が1日で84編(!)も発表され、まさにお祭り状態である。可視光・赤外線観測に関しては、幾分の差はあれキロノバとして解釈する結論は大まかには一致していたが、J-GEMの観測データは可視光と赤外線の重要な部分が抑えられており、理論計算結果も当時としてはもっとも現実的なものの一つであったと自負している。

一点悔やまれるのは、キロノバという名前である。英語でもkilonovaとmacronovaが両方使われて混乱を招いているが、日本語の名前は混乱どころか存在もしない。kilonovaを直訳すると「千新星」で、macronovaだと「巨新星」だろうか。2014年の天文月報[4]では、 $r$ プロセス特集ということもあり「 $r$ プロセス新星」と呼んでいた。その後、明るさの時間進化が速く、 $r$ プロセスは速い中性子捕獲であることから「超速新星」と名付けてみたのだが[31]、これも一ミリも定着しなかった。記者発表に合わせて何か気の利いた名前を考えれば良かったのだが、上記の通りそんな余裕は全くなく、キロノバを使ってしまった。今では日本天文学会の天文学辞典にもキロノバと載っている。本稿をもって、忘れ去られたこれらの日本語名たちに成仏いただければと思う。

## 5. 今後の展望

中性子星合体GW170817に関する一連の研究によって、中性子星合体によって確かに重元素が合成されたことが明らかになった。そして、中性子星合体からの元素放出率は銀河系の重元素量を説明できるペースであることも確かめられた。しかし、このような観測はまだ一例のみである。宇宙における中性子星合体の頻度にはまだ大きな不定性があるし、そもそも全ての中性子星合体がい

つも同じ量の物質を放出するかは全く自明ではない。このような問題に答えるには、さらに多くの中性子星合体の観測を重ねる必要がある。

例えば、合体する二つの中性子星の合計質量が異なれば、放出される物質の量や組成が変わることが予想される [32]。中性子星の合計質量が大きいとすぐにブラックホールに潰れてしまい、放出物質が少なく、赤いキロノバが卓越するだろう。一方で、質量が小さい場合は中性子星が長く残り、青く明るいキロノバが観測されるかもしれない。実際に、2019年に観測された二例目の中性子星合体イベント GW190425 では、合計質量が3.4太陽質量と推定されている [33] (GW170817の場合は2.8太陽質量)。このような合体でどのような物質が放出されているかは非常に興味深いのが、残念ながら GW190425 は LIGO の1台のみで観測されたため、到来方向の推定が約8,000平方度と広大であり、キロノバに関する有意な情報は得られなかった。今後このような様々な質量の中性子星合体の観測が進むことで、本当に元素供給量が足りるかを検証できるだろう。

また、元素の起源を考える上で重要なのは、合成・放出されている元素の種類である。GW170817ではランタノイド元素を含む物質と、それよりも軽い物質が放出されたことは間違いなさそうだが、実際にどの元素がどれぐらい合成されたかはほぼ全く分かっていない。中性子星合体で金やプラチナが本当に合成されているかは確認されていないのだ。

元素を特定するもっとも直接的な方法は分光である。GW170817では可視光から近赤外線の分光データが取得されているが、光速の10-20%にも達するドップラー効果で様々な吸収線が混ざってしまうため、元素の同定は容易ではない。今のところ同定が報告されているのは原子番号38のストロンチウムだけである [34]。また、キロノバは近赤外線で長く輝いたため近赤外線のスペクトルが多数取得されたのだが、近赤外線では重元素の

束縛遷移のデータがほとんど整備されていない。これまで銀河系内の恒星の組成分析は基本的には可視光で行われており、わざわざ存在量の少ない  $r$  プロセス元素を、より観測の難しい赤外線で測る必要がなかったのである。この問題を解決するためには、実験室での分光実験や原子構造計算 [35]、さらに恒星の赤外線観測 [36] など様々な分野が協力する必要があるだろう。

より間接的な方法として、原子核の放射性崩壊の特徴を見る方法も考えられる。合体から日数がたつと、徐々にある時間に崩壊する原子核の種類が減ってくるため、キロノバの光り方で特徴的な崩壊のタイムスケールを見つけることができれば、その元素が存在していることの証拠となりうるだろう。残念ながら GW170817 は太陽に近かったため、合体から20日ほどまでしか詳細なデータが取得できなかったが、将来のイベントではより良いデータが取得できることが期待される。

2019年から2020年にかけて行われた LIGO と Virgo の第三期観測では、確実に中性子星を含むと思われるイベントの観測は先述の GW190425 だけであった。もう一例、ブラックホールと中性子星の合体としてアナウンスされたイベント (GW190814) があったが、その後の解析により軽い方の天体の質量は2.6太陽質量程度ということが分かり、本当に中性子星かどうかは不明である [37]。注目すべきは両者の距離で、前者は約150 Mpc、後者は約240 Mpcであった。やはり GW170817 の40 Mpc はラッキーだったのかもしれない。100 Mpc を超える距離では、可視光では4 m, 8 m 級の望遠鏡を使って対応天体を探査観測をする必要があり、広い視野を誇るすばる望遠鏡の役割がますます重要になるだろう。2021年からは LIGO, Virgo そして KAGRA の第四期観測が予定されている。次はどんなイベントで何が見えるだろうか？ 今後の中性子星合体のマルチメッセンジャー観測に期待したい。



## 謝 辞

この度は2019年度欧文研究報告論文賞をいただき、大変光栄に思います。本文でも紹介した通り、本研究[6]はJ-GEMとして同時期に出版された内海洋輔氏[23]、富永望氏[22]の論文がなければなし得なかったものです。この両氏をはじめ、J-GEMの全ての共同研究者の皆さんに感謝いたします。GW170817の理論的な解釈に関しては関口雄一郎氏、柴田大氏、川口恭平氏、仏坂健太氏、和南城伸也氏と多くの議論をさせていただきました。また、中性子星合体に应用するための重元素の原子構造計算や分光実験に関しては加藤太治氏、Gediminas Gaigalas氏、中村信行氏、田沼肇氏から様々なことを教えていただきました。様々な物理学を駆使する中性子星合体の研究を通して、様々な分野のエキスパートの方々と一緒に研究できるのを嬉しく思います。また、この場を借りて、超過密スケジュールの中で複雑な記者発表を実現して下さった広報関係者の方々にお礼を申し上げます。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Cray XC30, XC50を使わせていただきました。

## 参考文献

- [1] 和南城伸也, 2019, なぞとき 宇宙と元素の歴史 (講談社)
- [2] Burbidge, E. M., et al, 1957, Rev. Mod. Phys., 29, 547
- [3] 和南城伸也, 2014, 天文月報, 107, 7
- [4] 田中雅臣, 2014, 天文月報, 107, 19
- [5] 田中雅臣, 2016, 天文月報, 109, 765
- [6] Tanaka, M., et al., 2017, PASJ, 69, 102
- [7] Abbott, B. P., et al., 2017, PRL, 119, 161101
- [8] Abbott, B. P., et al., 2017, ApJ, 848, L12
- [9] 田中貴浩, 2018, 天文月報, 111, 6
- [10] 神田展行, 2018, 天文月報, 111, 8
- [11] 関口雄一郎, 2018, 天文月報, 111, 77
- [12] 吉田道利, 2018, 天文月報, 111, 80
- [13] 坂本貴紀, 2018, 天文月報, 111, 82
- [14] 内海洋輔, 2018, 天文月報, 111, 84
- [15] 田中雅臣, 2018, 天文月報, 111, 86

- [16] 仏坂健太, 2019, 天文月報, 112, 778
- [17] 諸隈智貴, 2017, 天文月報, 110, 14
- [18] 富永望, 2017, 天文月報, 110, 19
- [19] 内海洋輔, 2017, 天文月報, 110, 30
- [20] 松林和也, 太田耕司, 2017, 天文月報, 110, 37
- [21] 酒向重行, 2017, 天文月報, 110, 42
- [22] Tominaga, N., et al., 2018, PASJ, 70, 28
- [23] Utsumi, Y., et al., 2017, PASJ, 69, 101
- [24] Villar, V. A., et al., 2017, ApJ, 849, 70
- [25] Metzger, B. D., et al., 2010, MNRAS, 406, 2650
- [26] Kasen, D., et al., 2013, ApJ, 774, 25
- [27] Tanaka, M., & Hotokezaka, K., 2013, ApJ, 775, 113
- [28] 柴田大, 2018, 天文月報, 111, 730
- [29] Tanaka, M., et al., 2018, ApJ, 852, 109
- [30] Kawaguchi, K., et al., 2020, ApJ, 865, L21
- [31] 田中雅臣, 2015, 星が「死ぬ」とはどういうことか (ベレ出版)
- [32] Kawaguchi, K., et al., 2020, ApJ, 889, 171
- [33] Abbott, B. P., et al., 2020, ApJ, 892, L3
- [34] Watson, D., et al., 2019, Nature, 574, 497
- [35] Tanaka, M., et al., 2020, MNRAS, 496, 1369
- [36] Matsunaga, N., et al., 2020, ApJS, 246, 10
- [37] Abbott, R., et al., 2020, ApJ, 896, L44

## Neutron Star Merger and the Origin of Heavy Elements

Masaomi TANAKA

*Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3 Aramaki, Aoba-ku Sendai, Miyagi 980-8578, Japan*

Abstract: In 2017, the first detection of gravitational waves from a neutron star merger (GW170817) has been achieved. Furthermore, the electromagnetic counterpart was observed over the entire wavelength range. The observed properties of the optical and infrared counterpart are consistent with the expected signal of “kilonova,” thermal emission powered by radioactive decays of rapid neutron capture process (*r*-process). This confirms heavy element synthesis by the neutron star merger. In this article, I will introduce multi-messenger observations of G170817 and summarize current understanding and unsolved problems about heavy element synthesis by neutron star mergers.