

連星中性子星合体の物質放出と重元素合成

藤 林 翔

〈東北大学学際科学フロンティア研究所 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: sho.fujibayashi@astr.tohoku.ac.jp



連星中性子星の合体は、中性子に富む物質を宇宙空間へ放出し、その中でrプロセスが進むことで重元素を合成すると考えられている。2017年に観測されたGW170817と対応するキロノヴァは、こうした理論予測を強く裏づけるものであった。本記事では、一般相対論に基づく連星中性子星合体の長時間の数値シミュレーションを行うことで明らかになった、物質放出のメカニズムと元素合成への影響を概説する。特に、円盤からの放出物質の中性子の割合を決めるメカニズム、その結果として得られる元素組成、そして合体後に生成される大質量中性子星の寿命についての制限について議論し、今後のマルチメッセンジャー観測と理論研究の展望を述べる。

1. 重元素の起源と連星中性子星の合体

我々や、我々の身の周りの物質を形作る数多くの元素は今までの宇宙の歴史の中で、何らかの天体現象の中で作られてきました。宇宙の物質の多くを占める水素やヘリウムはビッグバン元素合成によって、炭素・酸素などの比較的軽いものから鉄までの元素は星の中の核融合反応、そして星の爆発によって作られたと考えられています。鉄より質量数の大きい原子核のうち約半分は、中性子過剰かつ高中性子密度の環境の下で原子核が自らの崩壊よりも速く中性子を捕獲して質量数を増やす“rプロセス”(r=rapid)と呼ばれる重元素合成過程によって作られたと考えられています^{*1}

[1]. rプロセスが理論的に提案 [2] されてから60年以上の間、この重元素合成過程が起こる天体現象は謎のままであり、rプロセス元素の起源は宇宙物理学の未解決重要問題の1つとなっています。

2つの中性子星が互いの周りを回る連星中性子星は、重力波の放出によって公転のエネルギーを失い合体に至ります。その際の重力波は現在稼働中、また近い将来に建設が予定されている地上重力波望遠鏡の主要なターゲットとなっています。それに加え、合体によって放出される物質はもとも中性子星の一部であるので素朴には中性子に富むと予想され、放出物質中においてrプロセス元素合成が進むと期待できます。そのため、連星中性子星合体はrプロセス元素の起源となる天体現象として長らく注目されてきました。

放出物質の内部で、rプロセスにより出来上がった重元素の多くは放射能をもっており、その崩壊によってより安定な原子核になる過程で放出物質の内部エネルギーを上昇させます。これによる熱的放射である、“キロノヴァ”と呼ばれる突発天体が予言されてきました^{*2}。連星中性子星合体は、重力波と電磁波という2つの波の同時観測による“マルチメッセンジャー”天文学の対象と

^{*1} もう半分は、中性子捕獲反応が崩壊より遅い環境で進むsプロセス(s=slow)によって、漸近巨星分枝星や一部の大質量星で作られると考えられています。

^{*2} 放射性ニッケルの崩壊によって輝く超新星と同じような現象です。

してここ20年ほど注目されてきました [3].

2017年8月17日, 連星中性子星の合体からの重力波の初めての検出がなされました (GW170817 [4]). その後の電磁波での追観測により, 電波からガンマ線まで, 幅広い波長において対応天体が発見されました (AT2017gfo [5]). この中で近赤外線から可視光における放射の性質は, これまで理論的に予言されてきたキロノヴァのものと整合していました. これにより, 連星中性子星合体により物質が放出され, その中でrプロセス元素合成が起こることが観測的に裏づけられました [6].

このキロノヴァの理論モデルは, 連星中性子星合体の数値シミュレーションで得られた知見に立脚しています. 私は, シミュレーションに基づく連星中性子星合体のモデルの構築と, そこでの元素合成に注目して研究してきました. 本稿では, まずこれまでの数値シミュレーションによって得られた知見を紹介します. そして私のこれまでの研究で明らかになった合体後の系の性質と元素合成への影響について説明し, 最後に今後の展望について述べて本稿を締めます.

2. 連星中性子星合体の数値シミュレーション

連星中性子星合体は, 多くのプロセスが非線形に絡み合う複雑な現象であり, その理解には数値シミュレーションが必須です. 過去20年ほどの間に, アインシュタイン方程式を数値的に解き, 動的に変化する時空とその上で起こる流体现象をシミュレーションする手法 (数値相対論) は飛躍的に進歩しました. 現在は様々なプロセス (後述しますが, ニュートリノの放射と吸収や磁場の効果) を取り入れ, シミュレーションをより現実的なものにする段階にあります [7, 8]. 以下ではまず, これまでの数値シミュレーションで得られた物質放出に関する知見を, 私自身の研究と絡めて紹介します.

3. 連星中性子星合体における物質の放出

連星中性子星合体における物質放出は, 大きく分けて2種類存在します. 1つ目は合体の瞬間0.01秒程度の間, 潮汐相互作用や衝撃波加熱によって起こるものです (図1参照). この動的な過程で放出される物質の性質については, 過去に

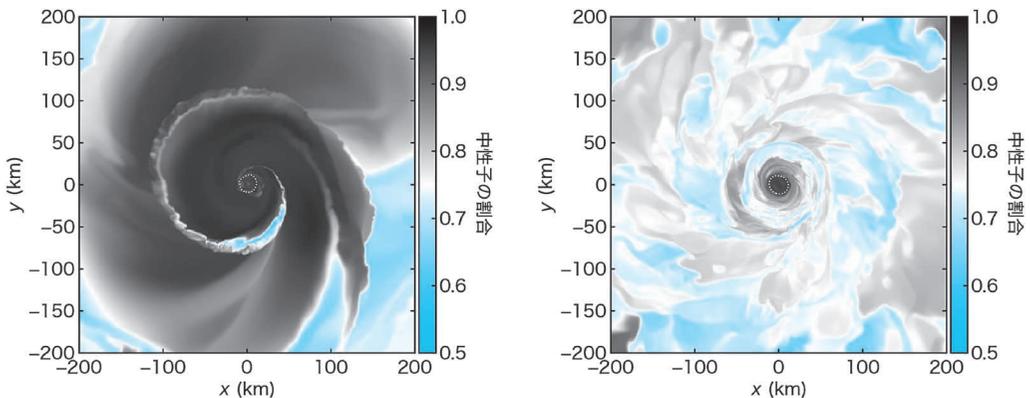


図1 合体の瞬間の中中性子の割合の空間分布を, 合体した連星の軌道面について示したもの. 左図は不等質量の連星, 右図は等質量の連星の合体のシミュレーションの結果. 点線は $1 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ の等密度線で, 大質量中性子星の位置を表す.

詳しく調べられてきました。連星を特徴づける、連星の質量と2つの中性子星の質量比、そして理論的に未解決である高密度核物質の状態方程式によって値は異なりますが、複数のグループの研究により、多くて太陽質量の1%程度の物質が、典型的には光速の10%程度の速さで放出されることがわかっています [9-11]。

連星が合体した後は、合体でできたコンパクト天体（ブラックホールもしくは大質量の中性子星）の周りに遠心力で支えられた構造、円盤が形成されます。これが2つ目の物質放出の舞台です。円盤は差動回転しているために、磁気回転不安定性によって発達した磁気乱流によって、実効的な粘性が働きます。それによる角運動量の輸送で円盤の物質の一部は中心天体に降着するのですが、一部の物質は粘性加熱により円盤から放出されます。この物質放出は円盤の粘性による進化の時間スケールである1秒程度の間起こると思われています。

私がこの研究に着手し始めた2010年代中頃は、この遅れて放出される物質の質量は合体の瞬間に放出される物質と同等か、むしろ大きく超えることが指摘されていました [12-15]。これは、キロノヴァの性質や、合成される元素の組成を論じるうえで合体後の系から遅れて起こる物質放出は欠かせない要素だということを意味します。しかしながら、この物質放出の起こる時間は合体後1秒程度と、0.001秒以下である系の力学時間に比べてとても長く、直接の数値シミュレーションによって放出物質を研究することは計算コストの観点で現実的ではありませんでした。更に当時、この放出物質の性質については、人工的・恣意的な初期条件のもと、一般相対論的重力を近似的にのみ取り入れた数値シミュレーションにより研究されており、定量的な研究は行われていませんでした。私はこの問題を解決するべく以下の研究に

取り組んできました。

4. 放出物質の性質

連星中性子星合体の後の（中心天体と円盤から成る）系は軸対称に近づきますが、私はそこに注目しました。空間3次元の数値シミュレーションにより得られた流体プロファイルを系の回転軸の周りに平均化し、それを初期条件として空間2次元の軸対称シミュレーションを行うことで、系の長時間変化を追うことを可能にしました^{*3} [16]。そして、磁気乱流による効果を粘性流体方程式を解くことで取り入れ、合体後の系からの物質放出を調べました [17-19]。

まずは合体後の系の円盤からどのように物質が放出されるのかを概説します。ここで重要となるのが、粘性による加熱とニュートリノ放射による冷却の競合です。連星合体後の数値シミュレーションで得られた結果の例として最初に、連星合体後、大質量中性子星が0.01秒程度の短時間でブラックホールに崩壊する場合（短寿命；4.3節）に注目します。図2上図は、系のニュートリノによる冷却率 (L_ν) とブラックホールへの質量降着率 (\dot{M}_{BH}) と光速 c を用いて $L_\nu/\dot{M}_{\text{BH}}c^2$ と定義された冷却効率を、合体からの時間の関数として描いています。合体直後、 ~ 0.1 秒程度の円盤は降着率と温度が高く、ニュートリノ放射によって円盤の物質は効率的にエネルギーを失います。その結果として、粘性加熱によって上昇した内部エネルギーは直ちにニュートリノによって持ち去られ、粘性加熱による物質の放出は抑制されます。図2下図は放出物質の質量の時間発展を描いていますが、その間に放出物質の質量の大きな増加は見られません（この段階で既に存在している放出物質は、合体の瞬間に放出された成分です）。時間が経過し、円盤の質量降着率が下がってくると円盤温度も低下し、円盤のニュートリノ冷却効率も低

^{*3} 数値相対論による軸対称2次元のシミュレーションは、当時精力的に行われていませんでした。

下します。このフェーズになると、ニュートリノにより持ち去られなくなった内部エネルギーを使って円盤は膨張し、その一部の物質が放出されます。図2では、冷却効率が低下した後に放出物質の質量が増加していることが読み取れます。

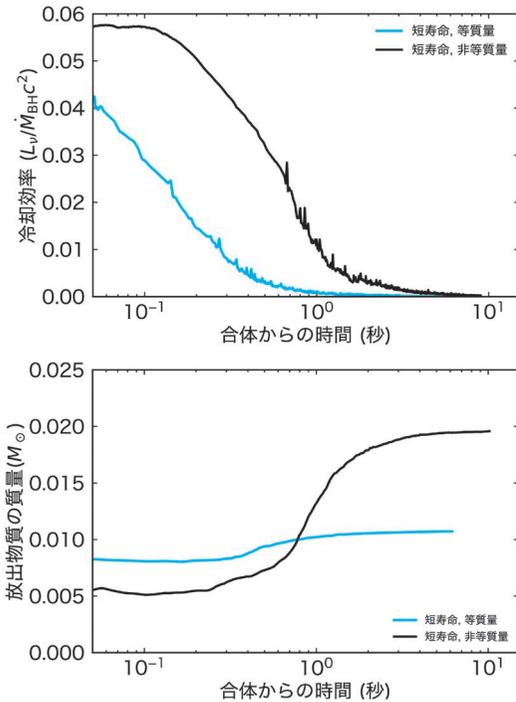


図2 上図：降着円盤の冷却効率の時間発展を、連星合体後の大質量星が短寿命の（合体後の大質量中性子星がすぐにブラックホールへ崩壊する；4.3節）場合に描いたもの。下図：上図と同じモデルについて、放出物質の質量の時間発展を描いたもの。横軸は合体からの時間。

4.1 放出物質の中性子の割合

放出物質の中性子の割合は、rプロセスによって合成される元素を決める重要な量です。中性子の割合が大きいほど、各々の原子核がたくさんの中性子を捕獲することができ、結果重い（質量数の大きな）原子核を作ることができます。私の研究では、合体の瞬間、そして合体後の円盤からのそれぞれの放出物質について、中性子の割合の系の性質への依存性を包括的に調べました [19]。

合体の瞬間に放出される物質が持つ中性子の割合は、合体する2つの中性子星の質量比に依存します。2つの中性子星の質量が大きく異なる場合、物質放出は主に潮汐相互作用によって起こります。その結果として、中性子星の物質はもともと持っていたとても高い中性子の割合を保ったまま放出されます。図1の左図はその例で、潮汐力によって引き伸ばされた構造に沿って中性子の割合が高い領域が存在していることが読み取れます。一方で、合体する中性子星の質量が同程度の場合は、合体する瞬間の衝撃波加熱が主な物質放出のメカニズムとなります。その結果、放出される物質は電子の縮退が下がり、更に高温となるために陽電子の捕獲反応が進み、中性子の割合が低下します。図1右図は等質量の合体の例です。様々な強度の衝撃波を経験した放出物質は幅広い中性子の割合を持ちます。

では合体後の円盤からの放出物質はどのような中性子の割合を持つのでしょうか。図3の左図と中図は、図1と2で示した2つの連星合体のモデ

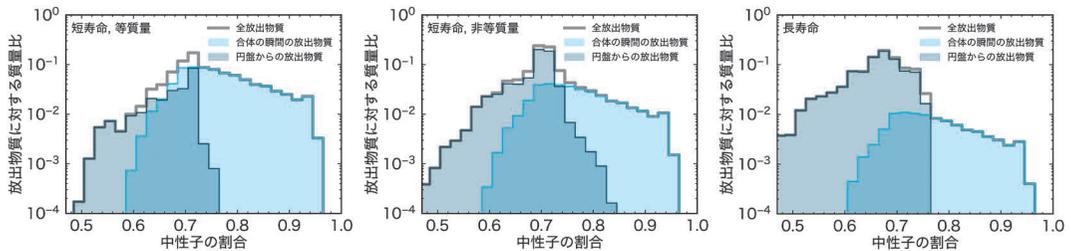


図3 放出物質の中性子の割合の分布。左から、合体後の大質量星中性子星が短寿命かつ合体する中性子星が等質量の場合、短寿命かつ非等質量の場合、そして長寿命の場合を示す。異なる色の線で、合体の瞬間の放出物質、合体後の円盤からの放出物質、そして全放出物質の分布を示す。

ルについて、放出物質の中性子の割合の分布を示したものです。この図からわかるように、合体後の円盤からの放出物質は中性子の割合が0.7ほどのところにピークを持つ分布を示します。なぜこのような特徴的なピークが現れるのか、それを明らかにするために、私は弱い相互作用の時間スケールと放出物質の膨張時間スケール、そして弱い相互作用による中性子の割合の平衡値に注目しました [18, 20].

図4の上図は、合体後の円盤からの放出物質の中の電子・陽電子捕獲反応の時間スケール t_{cap} と、放出物質の膨張時間スケール t_{exp} を放出物質の温度の関数として描いたものです。放出物質の温度は膨張とともに低下していくため、横軸は時間の進む向きと見なすことができます。2つの時間スケールは

$$t_{\text{cap}} = \min\left(\frac{n_p}{\dot{n}_{\text{ec}}}, \frac{n_n}{\dot{n}_{\text{pc}}}\right), t_{\text{exp}} = \frac{r}{v} \quad (1)$$

と定義しています。ここで $n_{n,p}$ は自由中性子、自由陽子の個数密度、 $\dot{n}_{\text{ec,pc}}$ は電子、陽電子捕獲反応の単位体積、単位時間あたりの反応数、 r は中心天体から測った放出物質の半径、 v は同径方向の速度です。温度が 2×10^{10} Kより高いときにはこの時間スケールは膨張時間スケールに比べて十分短いです。この状況においては、放出物質の中性子の割合は、電子捕獲と陽電子捕獲が釣り合った平衡 ($\dot{n}_{\text{ec}} = \dot{n}_{\text{pc}}$) によって決まることが期待されます。これを示しているのが図4の下図で、確かに放出物質の中性子の割合はその平衡値の周囲に分布していることがわかります。電子の縮退が強いとき、中性子の割合の平衡値は0.5（陽子数＝中性子数）より大きくなります。

放出物質が膨張して密度が下がると、電子の縮退が徐々に解け、平衡値は小さくなっていきます。これに従い、電子・陽電子捕獲反応により、放出物質の中性子の割合は小さくなる平衡値に追随しようとしています。しかし、電子・陽電子捕獲反

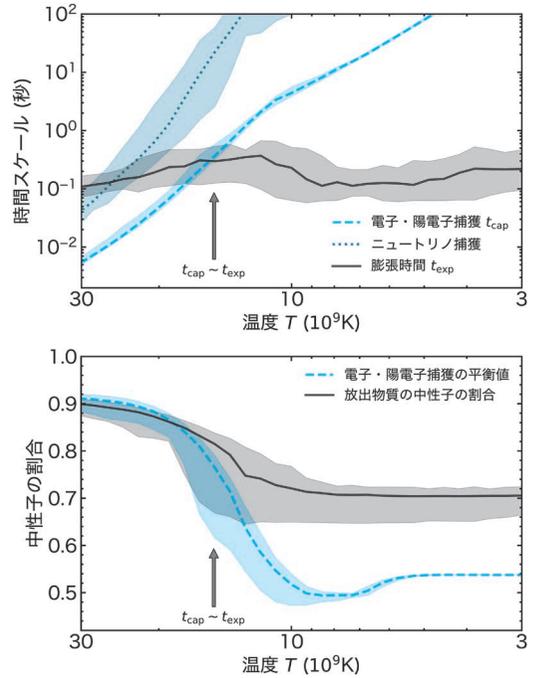


図4 合体後の円盤からの放出物質の中性子の割合を決めるメカニズム。上図では電子・陽電子の捕獲とニュートリノ捕獲反応の時間スケール（それぞれ破線と点線）を、膨張時間（実線）と比較している。下図は放出物質の持つ中性子の割合を、電子・陽電子捕獲の平衡値で決まる値と比較している。横軸は放出物質の温度であり、右ほど低温（膨張する放出物質にとっては時間が進む向き）となっている。放出物質の流体素片ごとに性質が異なる結果として、諸量には分布を持つ。この図において、線は最頻値であり、その周りの帯は分布の10から90パーセントイルを意味する。図中の矢印は、電子・陽電子捕獲反応の時間スケールと膨張時間が同程度になる温度を示す。

応の時間スケールは近似的に T^{-5} に比例し、温度が低下すると急激に長くなり、 $T \approx 1.5 \times 10^{10}$ Kにおいて2つの時間スケールが同程度となります。これより低温では電子・陽電子捕獲は実効的に働かなくなり、中性子の割合はその時点で「凍結」します*4。これが合体後の円盤からの放出物質に

*4 初期宇宙において、陽子・中性子の個数比が決まるメカニズムと類似しています。

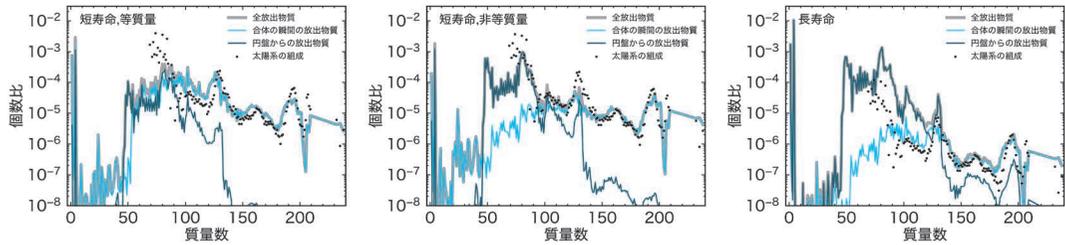


図5 放出物質の元素組成. 3つのパネルは図3に示した各合体のモデルに対応する. それぞれのパネルについて, 合体の瞬間の放出物質, 合体後の円盤からの放出物質, そしてそれらの合計の, 原子核の個数比を質量数の関数として示している. 点で示すのは太陽系のrプロセス原子核の組成で, 適当にスケールされている.

において中性子の割合が決まるメカニズムです.

ちなみに, 電子型ニュートリノの捕獲によっても中性子の割合は変化しますが, 図4の上図に示したように, ニュートリノ捕獲の時間スケールは電子・陽電子の捕獲に比べて長く, この反応は重要ではありません. これは合体後, 円盤から物質が放出されるフェーズにおいては図2に示すように冷却効率が落ち, ニュートリノ光度が下がっていることの結果です.

4.2 放出物質の元素組成

放出された物質の中性子の割合と, 物質の密度・温度の時間発展をインプットとし, 元素合成計算を行った結果を図5に示します. この図は放出物質の原子核の個数比 $(n(A)/n_b)$. ここで $n(A)$ は質量数 A を持つ原子核の数密度, n_b はバリオン数密度) を質量数の関数として描いたものになっています. まずは概観すると, 合体の瞬間の放出物質の内部では強いrプロセスが起これ, rプロセスの第3ピーク ($A \approx 195$)^{*5} やアクチノイド (ウランやトリウム; $A \approx 240$) が作られています. 一方で合体後の円盤からの放出物質の中性子の割合は, 強いrプロセスを起こすには低く, 重元素を効率よく作ることはできないことがわかります.

私はこの結果から, 合体後の円盤からの放出物

質はrプロセスを効率よく起こせないと結論づけました. 当時主流であったアイデアは, ブラックホールが早期に形成される場合はニュートリノ吸収の影響が小さく, 円盤からの放出物質の中性子の割合は高くなり, (rプロセスの第3ピークまで合成するような) 強いrプロセスが進むというものでした. 私の研究結果はそれに反するものになったのですが, 私は4.1節のように放出物質の中性子の割合を決定するメカニズムを明らかにし, この結果には物理的根拠がありました. そのため, この結果は広く認められることになりました.

では, 合体の瞬間の放出物質と合体後の円盤からの放出物質を合計した元素組成に注目していきます. このように, 2つの放出時期とメカニズムの異なる放出物質成分の和を統合的に取れることが, 私の計算手法の強みです.

まず連星の質量比による違いをみていくと, 連星が等質量の場合 (図5左図) は, 幅広い中性子の割合を持つ結果として合体の瞬間の放出物質の中では様々なrプロセス原子核が作られます. この組成は太陽系のrプロセス原子核の組成をうまく再現できます [21]. この場合においては円盤の質量が小さい結果として合体後の放出物質は合体の瞬間のもの比べて寄与が小さく, 重要では

*5 太陽系のrプロセス原子核の組成 (図5の点) には, $A \approx 80, 130, 195$ にピークが確認できます. これらをそれぞれ, rプロセスの第1, 2, 3ピークと呼びます.

ありません。

一方で、連星が非等質量の場合（図5中図）は、合体の瞬間の放出物質の中性子の割合が高すぎ、重たい r プロセス原子核が選択的に作られます。しかしながらこの場合、重たい円盤が形成された結果として、合体後の放出物質が支配的となります。この放出物質は中性子の割合がさほど高くないため、合体の瞬間の放出物質のみでは不足していた軽い r プロセス原子核を補う結果、放出物質全体の組成は太陽系の r プロセス原子核の組成をほどよく再現できます。

4.3 合体後の中性子星の“寿命”への示唆

ここまでにお見せしてきたのは、合体後に形成される大質量中性子星が0.01秒程度でブラックホールに崩壊する場合の結果でした。もしも合体する連星の質量（ \approx 合体後の大質量中性子星の質量）が、核物質の状態方程式によって支えられ得るものである場合は、この大質量中性子星が長時間存続することが考えられます。この場合、円盤の物質は中性子星の表面で降着がブロックされ、放出物質になる割合が増加します。結果として、大質量中性子星が長時間（1秒程度より長く）存続する場合は、図3の右図で示すように合体後の円盤から放出される物質が、合体の瞬間の放出物質と比べても多くなります。図5の右図の元素合成の結果をしてみると、太陽系の r プロセス原子核の組成と比べて軽い r プロセス原子核が多すぎ、太陽系組成を再現できないことがわかります。

ここから、もし連星中性子星合体が宇宙の r プロセス元素の主たる起源であるのなら、太陽系組成を再現するために、大方の合体イベントについて合体後の大質量中性子星はすぐにブラックホールに崩壊しないとけない—短寿命である—という制限をつけることができます（他グループの同様の主張としては [22] を参照）。

最後に補足として、連星中性子星合体が r プロセス原子核のうちの一部のみを生成し、他の（複

数の）天体现象において残りの原子核を生成するという可能性は、金属欠乏星の観測結果から考えづらいことが示唆されています。極めて少ない回数の r プロセス元素合成を経験したガスから成ると考えられる、 r プロセス元素過剰を示す金属欠乏星は、重元素の組成が太陽系組成とよく似ています [23]。これは、 r プロセスを起こす天体ひとつひとつで作られる r プロセス元素の組成が太陽系の組成とだいたい同じであることを示唆しています。すなわち、連星中性子星合体が r プロセス元素の起源であるならば、少なくとも主要な合体イベントにおいては、放出物質の r プロセス元素組成が太陽系のそれを再現する必要があるのです。

5. 最近の進展と今後の課題

私の紹介した結果は磁気流体プロセスを粘性流体方程式を解くことでモデル化したものでした。しかし当然、合体後に形成される円盤や大質量中性子星の中で働く角運動量輸送やエネルギーの散逸は、磁気流体方程式を解くことで最も整合的にモデル化することができません。また、合体後の大質量中性子星が長寿命である場合は、合体後の中性子星が作る大スケールの強磁場による影響が大きくなることが予想されます。したがってこの場合は磁気流体方程式を解くことによる直接計算が必要になります。このような直接計算は、近年やっと可能になりつつあります [24–26]。その計算によると、大質量中性子星が長寿命の場合、中性子星の強力な磁場により放出物質の質量が増加すると共に運動エネルギーも大きくなり、結果として非常に明るいキロノヴァが予言されます。このような可能性は、将来の重力波および電磁波による（マルチメッセンジャー）観測により明らかになることと期待できます。

更に、より定量性の高い理論モデルの構築のために、ニュートリノの輻射輸送の精緻化も求められます。磁気流体方程式とニュートリノ輻射輸送

083029

- [21] Wanajo, S., et al., 2014, ApJ, 789, L39
- [22] Just, O., et al., 2023, ApJ, 951, L12
- [23] Cowan, J. J., et al., 2021, Rev. Modern Phys., 93, 015002
- [24] Kiuchi, K., et al., 2023, Phys. Rev. Lett., 131, 011401
- [25] Hayashi, K., et al., 2022, Phys. Rev. D, 106, 023008
- [26] Kiuchi, K., et al., 2024, Nat. Astron., 8, 298
- [27] Kawaguchi, K., et al., 2023, MNRAS, 525, 3384

Mass Ejection and Heavy Element Synthesis in Binary Neutron Star Merger

Sho FUJIBAYASHI

Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, Aobayama Campus, 6-3 Aoba, Aramaki aza, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: Binary neutron star merger ejects neutron-rich matter into space, in which the r-process can proceed to synthesize heavy elements. The gravitational-wave event GW170817 observed in 2017, together with its associated kilonova, provided strong support for this picture. In this article, I summarize the mechanisms of mass ejection during the binary neutron star merger and their impact on nucleosynthesis based on long-term numerical simulations of binary neutron star mergers performed in full general relativity. In particular, I discuss the weak-interaction freeze-out that determines the neutron fraction of disk outflows, the resulting elemental abundance patterns, and the constraints these place on the lifetime of the massive neutron star formed after the merger. I conclude with prospects for future multimessenger observations and theoretical advances.