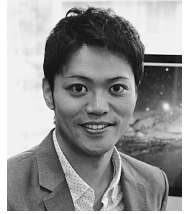


GW170817と r プロセス元素合成

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



中性子星合体では速い中性子捕獲反応 (r プロセス) により重元素が合成され、新しくできた原子核の放射性崩壊により可視光・赤外線が放たれることが予想されてきた。このような現象は「キロノバ」(kilonova) と呼ばれている。GW170817の可視光・赤外線観測結果から、中性子星合体の重元素合成に関してわかったこと、そして新たにもたらされた謎を紹介する。

中性子星合体イベントGW170817は、宇宙の重元素に起源に関しても大きなインパクトを与えた。中性子星が合体すると、中性子星をなしていた物質の一部が宇宙空間に放出される。放出物質には大量に中性子が含まれるため、速い中性子捕獲反応 (r プロセス) によって重元素が合成される。合成された中性子過剰な原子核は放射性崩壊を起こすため、そのエネルギーによって放出物質が温められ、最終的に可視光や赤外線で電磁波放射が起きることが予想されてきた。このような放射は「キロノバ」(kilonova) や「マクロノバ」(macronova) と呼ばれている^{*1}。重力波検出に続いて電磁波観測でキロノバを捉えることができれば、中性子星合体での r プロセス元素合成を検証することができるため、宇宙物理学の長年の謎である r プロセス元素の起源に迫ることができる¹⁾と期待されてきた¹⁾。

これまでの研究から、キロノバは主に赤外線で光ることが予想されてきた(赤いキロノバ)^{2),3)}。放出物質から放たれるスペクトルは主に原子の束縛遷移によって決められるが、 r プロセスで合成されるランタノイド族元素(原子番号57-71)は密に詰まったエネルギー準位をもち、準位間のエ

ネルギー差が小さいため、吸収効率が高く、主に赤外線を放つのである。しかし、ニュートリノ吸収や陽電子吸収により放出物質内の中性子の割合が減り、ランタノイド族元素を合成するほど r プロセスが進まない場合は、比較的青い放射も予想される(青いキロノバ)⁴⁾。つまり、キロノバの色を見ると元素合成の進み具合がわかるのである。また、放出物質は光速の10-20%の速度で膨張するため、激しいドップラーシフトによりのっぺりとしたスペクトルになることが予想される。

では、このような事前の予想と、実際に得られたGW170817の電磁波対応天体の可視光・赤外線観測結果の比較から一体何がわかったのだろうか?⁵⁾

- ・超新星爆発とは全く異なるのっぺりとしたスペクトルが観測され、光速の10-20%程度の速度で物質が放出されていることが確認された。
- ・観測された明るさから、約0.03太陽質量以上の物質が放出されていることが分かった。
- ・赤外線が卓越した放射が観測され、ランタノイド族を含む放出物質の存在が示唆された(赤いキロノバ)。
- ・一方で、最初の数日間は可視光線で明るく輝

^{*1} マクロノバはエネルギー源にかかわらず可視光・赤外線放射を指して使われることもあるため、 r プロセスをエネルギー源とする現象を扱う本稿ではキロノバと呼ぶ。

き、ランタノイドを多く含まない物質も放出されていることも示唆された（青いキロノバ）。

予想されていたキロノバの特徴と観測された特徴の多くが一致したことから、少なくとも中性子星合体GW170817で r プロセスが起きたであろうとは言えそうだ。また、比較的 r プロセスが進んでいない青い成分の存在も示唆され、中性子星合体が幅広い原子番号の r プロセス元素を合成している兆候も得られた。もし中性子星合体がいつも0.03太陽質量の重元素を放出していれば、銀河系の r プロセス元素量を説明するにも十分な量だ。重元素の起源の解明に向けては大きな一歩である。

一方で、多くの謎が残された。まず、約0.03太陽質量の放出物質は予想よりもやや多く、合体の瞬間の動的な放出（dynamical ejection）だけで説明するのは難しいかもしれない。多くの物質は、合体後にできた降着円盤から放出されたのかもしれないが、そのような大規模放出がどのように起きるのかは明らかではない。また、実は放出された質量はそれほど多くなく、別のエネルギー源があるのかもしれない。特に、初期に観測された青い成分は、ガンマ線バーストをもたらししたジェットが広がって放出物質を加熱して発生している可能性もある。 r プロセス元素の原子データ（励起エネルギー準位と束縛遷移のデータ）は不完全なため、特に青いキロノバの性質はまだ不定性が大きい。今後、重元素の原子データの構築も重要な課題となるだろう。さらに、そもそも原子核の性質の不定性のため、ある質量の放出物質がもたらす放射性崩壊エネルギーにも不定性があ

り、約0.03太陽質量という数字がどれほど正しいかは、今後さまざまな角度から慎重な検証が必要である。

宇宙の元素の起源という観点では、中性子星合体がどのような組成比の r プロセス元素を放出しているかの検証が重要である。銀河系の星々に含まれる r プロセス元素の組成比は、太陽の組成比と似ていることが知られており、中性子星合体がそのような組成比を作り出していることを確認しない限りは r プロセスの起源天体とは言えないだろう。中性子星合体からの放出物質では、赤道面の方が中性子割合が高くなって強い r プロセスが起き、ランタノイドを含む重元素が豊富に合成されることが予想されている。つまり、中性子星合体を観測する方向によって、赤いキロノバと青いキロノバの寄与が変わることが期待される。今後、さまざまな方向から中性子星合体を観測できれば、じわじわと中性子星合体による元素合成の全容が明らかになってくるだろう。

ついに可能になった中性子星合体のマルチメッセンジャー観測によって、中性子星合体における重元素合成、そして宇宙の r プロセス元素の起源に関する理解が飛躍的に進むことは間違いなく、今後がますます楽しみである。

参考文献

- 1) 田中雅臣, 2014, 天文月報 107, 19
- 2) Barnes J, Kasen D., 2013, ApJ 775, 18
- 3) Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, ApJ 775, 113
- 4) Metzger B., Fernández R., 2014, MNRAS 441, 3444
- 5) Tanaka M., et al., 2017, PASJ 69, 102