

## 重元素の起源



田中 雅臣

Tanaka Masaomi

(東北大学大学院理学研究科 天文学専攻)

### 1 重元素は宇宙のどこでできたのか？

宝石店に並ぶ金やプラチナは一体どこから来たのだろうか？指輪やネックレスになる前に、地球上のどこかの鉱山で採掘されたはずである。つまり、地球を構成する岩石には金やプラチナが含まれている。地球の岩石中で金やプラチナは新しく合成されていないので、約46億年前に地球ができたときには、地球のもととなった岩石にもそれらの元素が既に含まれていたはずである。そして、そのような岩石は宇宙に存在するガスが集まってできたものである。一方、約138億年前に宇宙が始まったときには、宇宙にはHとHe、少量のLiしか存在しなかった。すなわち、長い宇宙の歴史の中で、どこかで金やプラチナが作られたはずなのである。

金やプラチナに限らず、元素の起源は人類が自然に抱く疑問であろう。実際に、天文学・宇宙物理学では元素の起源が長らく研究されてきた。図1は宇宙における元素の存在量を示している<sup>1)</sup>。例えば、CやO、Mg、Ca等、Feまでの元素は恒星の中で起る核融合反応で合成されたことが分かっている。私たちが何気なく吸っている酸素も、もとを辿ると星に行き着くのである。

Feは安定な元素のため（図1で存在量が多いのがわかる）、星の中ではFeよりも重い元素を簡単に合成することはできない。Feの原子核に陽子（や陽子を含む原子核）を結びつけるには、クーロンポ

テンシャルを越えるために非常に高温が必要となるが、そのような高温状態ではFeは光子によって破壊されてしまう。そこで、Feよりも重い元素を合成するためには、「中性子捕獲」が必要となる。一旦中性子を捕獲して同位体を合成し、その原子核が $\beta$ 崩壊を起こせばFeよりも重い元素を合成することができるのである。

中性子捕獲反応は大きく分けて2種類に分けられる。中性子捕獲のペースが $\beta$ 崩壊よりも遅いものを「sプロセス」(slow process)、中性子捕獲の方が速いものを「rプロセス」(rapid process)と呼ぶ。sプロセスでは、中性子が捕獲されるたびに $\beta$ 崩壊が起きるため、原子番号がじわじわと増えていく。中性

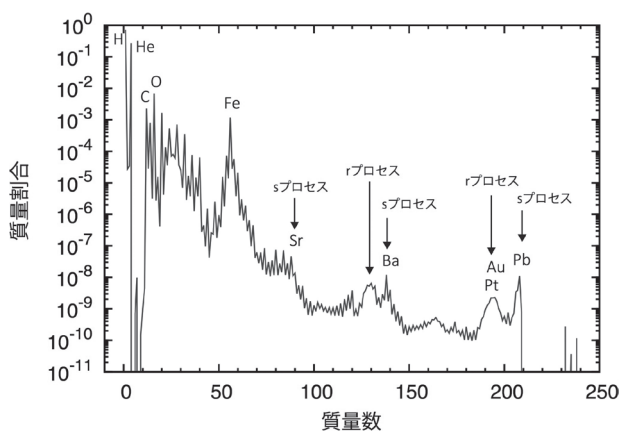


図1 太陽系における核種の存在比率（横軸は質量数で縦軸は質量割合）<sup>1)</sup>

sプロセスとrプロセスに対応する部分を矢印で示している

子捕獲は中性子の魔法数でせき止められやすいため、中性子の魔法数を持った原子核が多くできることが予想される。実際に、図1でBaとPbの存在量にピークが見られ、これはそれぞれ中性子数82, 126の魔法数に対応している。sプロセスは太陽のような比較的軽い星の進化の末期に起きると考えられており、そのような星の表面でsプロセス元素が観測されることから、よく検証されている。一方で、sプロセスでできない元素はrプロセスが必要となる。rプロセスでは、 $\beta$ 崩壊が起きる間もなく中性子数が増えるため、陽子数が小さいまま中性子の魔法数を持つ原子核に到達する。そのような原子核が崩壊すると、sプロセスの場合よりも質量数が少ない場所に落ち着くため、図1にあるようにsプロセスのピークよりも左側にピークができる。言い換えると、このような元素組成比は、宇宙で確かにrプロセスが起きたことを示唆しているのである。金やプラチナはrプロセスの代表的な元素である。

rプロセス元素の起源は未だ明らかにはなっていない。大量の中性子が必要なことから、「中性子星」に関係する現象が起源であることが予想されており、その中でも有力な2つの現象が、「超新星爆発」と「中性子星合体」である。超新星爆発は太陽よりも約10倍以上重い星が進化の末に重力崩壊することで起きる爆発現象である。星が重力崩壊すると星の中心には中性子星ができるため、その付近でrプロセスが起きるというシナリオである。一方、中性子星合体は、2つの大質量星が連星としてお互いの周りをまわっていて、2つの星とも超新星爆発を起こして中性子星を作り、それが最後に合体するという現象である。中性子星が合体すると一部の物質が飛び出すため、その放出物質の中でrプロセスが起きるというシナリオである。しかし、どちらのシナリオも決定打に欠けており、rプロセス元素の起源は長い間謎のままであった。

## 2 中性子星合体：重力波と「キロノバ」

中性子星とは太陽の1.5倍程度の質量を持ちながらも、半径が10kmほどしかない、宇宙に存在する星の中で最も極限的な天体の1つである。重い星が重力崩壊し、強く圧縮されることでできるため、その密度は原子核の密度に匹敵し、1cm<sup>3</sup>当たり1兆kg

にもなる。地球上の人類の質量を全て足し合わせても0.35兆kg程度（人口が約70億人で、1人当たりの質量を50kgとした）なので、中性子星がいかに高密度な天体かが分かるだろう。表面における重力は地球の約2,000億倍にもなる。このような天体が連星をなしてお互いの周りを回っていると、重力波放射によってエネルギーが引き抜かれて軌道が近づいていき、そのうち合体することが知られている。

中性子星が合体すると、その瞬間に強い重力波が放たれると共に、中性子星をなしていた一部の物質（太陽の約1%程度の質量）が宇宙空間に飛び出していく<sup>2)</sup>。中性子星の強い重力を振り切る必要があるため、物質の膨張速度は光速の10-20%にも達する。放出物質には中性子が豊富に含まれているため、rプロセス元素合成が起きることが予想される<sup>3)</sup>。rプロセスは放射性元素を作るプロセスのため、中性子星合体からの放出物質は宇宙における巨大な放射線源と言える。放出物質には様々な半減期の原子核が含まれるため、放射線光度は多数の指数関数の重ね合わせによって、時間のべき乗（およそ $t^{-1.3}$ ）で減っていく（図2の破線）。合体から1日程度たつと、その光度は $10^{34}$ W程度である。太陽表面からの放射光度は約 $4 \times 10^{26}$ Wであるため、このエネルギーがいかに膨大なものかが分かる。

しかし、大量の物質が存在しているため、放射線

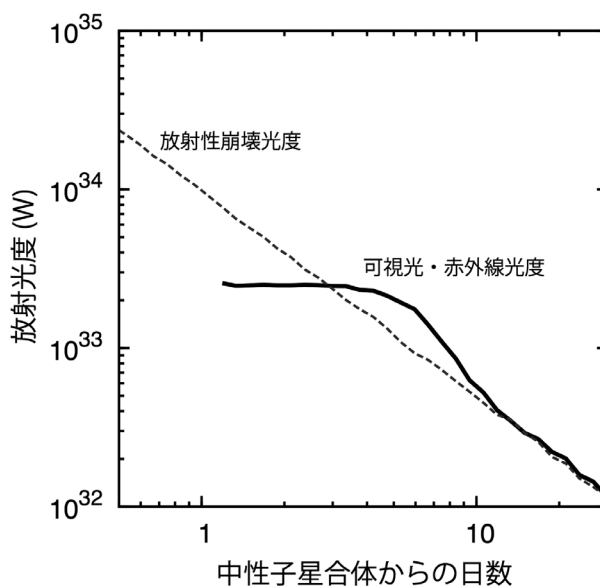


図2 中性子星合体から期待される放射性崩壊光度と、可視光・赤外線放射光度  
放出物質の質量が太陽の1%の場合を示している

( $\gamma$ 線, 電子,  $\alpha$ 粒子等) がすぐに直接抜けてくることはない。自身がシールドの役割を果たすためである。結果として, 放射性エネルギーは物質に蓄えられ熱化し, 放出物質を温める。この温まった放出物質は合体から数日後には 5,000-10,000 K 程度となり, 可視光や赤外線を放射する。この可視光や赤外線の光子も重元素の束縛遷移に阻まれるため, 最初は抜けて来られないが, 時間がたつにつれてガスの密度が下がるとじわじわと抜けてくるようになる。すなわち, 中性子星が合体すると,  $r$  プロセスが起きることで, 可視光や赤外線で見える天体となるわけである (図 2 の実線)<sup>4)</sup>。このような理論的考察から予想される天体現象は「キロノバ」と呼ばれるようになった。

中性子星合体に続くキロノバの輝き方は, 星の爆発である超新星爆発とはその特徴が異なることが予想される。超新星爆発の場合は, 放出される物質はほとんど Fe よりも軽い元素で構成されている。一方で, 中性子星合体では Fe よりも重い元素ばかりが放出されている。 $r$  プロセス元素の中でも, 特に原子番号 57-71 のランタノイド元素は可視光から赤外線に渡って束縛遷移による光の吸収効率が高く, ランタノイド元素が含まれていると, キロノバは赤外線を強く放つことが期待されている<sup>5,6)</sup>。つまり, 光り方を見れば  $r$  プロセス元素合成が起きてランタノイド元素ができていのかどうか分かるのである。

さて, ここまでの話はすべて物理学に基づいた理論的な予想である。中性子星合体で  $r$  プロセスが起きるというシナリオの大きな弱点は, このような現象が本当に宇宙で起きていることが観測的に検証されていなかったことである。そこで重要な役割を果たすのが重力波と電磁波の両方を駆使した「マルチメッセンジャー天文学」である。中性子星合体からの重力波シグナルを捉えることができれば, 宇宙で中性子星が確かに合体していることが検証でき, 更にその天体からキロノバの電磁波シグナルを検出することができれば,  $r$  プロセス元素が合成されていることの確かな証拠となる。そのため, 中性子星合体からの重力波検出と, それに引き続く電磁波観測に期待が集まっていた。

### 3 中性子星合体 GW170817

2015 年, アメリカの重力波検出器 Advanced LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) によって重力波が初めて直接検出されたことは記憶に新しい。2017 年には LIGO を率いた 3 氏にノーベル物理学賞が贈られている。最初の重力波検出はブラックホール同士の合体によるもので<sup>7)</sup>, 私たちがこれまで知らなかった太陽の 30 倍程度の質量をもったブラックホールの存在を明らかにし, 天文学にも大きなインパクトを与えた。ちなみに, ブラックホールが合体しても電磁波が放出されるかどうかは分からず, 筆者らを含め世界中のグループが電磁波シグナルを探索しているが, 今のところ確たる報告はない。

そして 2017 年 8 月 17 日, ついに待ちに待った中性子星合体からの重力波が検出された<sup>8)</sup>。このイベントはその日付から GW170817 と呼ばれている。ちょうど同年の 8 月からヨーロッパの検出器 Advanced Virgo も観測に加わっており, LIGO 2 台と Virgo 1 台の同時観測が実現した。これらの重力波検出器はレーザー干渉計によって重力波を検出するため, 1 台だけの観測では重力波がどこからやってきたのかが分からない。これでは電磁波シグナルを探すのはかなり困難である。しかし, 複数台で観測を行うことができれば, その到来時間差等を用いて位置を絞ることができる。実際 GW170817 の位置は約 30 平方度 (満月およそ 150 個分の広さ) に絞られ, その領域から対応天体を探すべく世界中の望遠鏡で即座に観測が行われた<sup>9)</sup>。

その結果, 重力波検出から約 11 時間後に, 可視光の観測で対応天体が発見された。筆者を含む日本の重力波対応天体観測チーム J-GEM (Japanese Collaboration for Gravitational wave Electro-Magnetic follow-up) も, その 6 時間後にハワイに設置された口径 8.2 m すばる望遠鏡で同天体の存在を確認し, その後可視光から赤外線の詳細な観測に成功した (図 3)<sup>10)</sup>。地球の自転の関係で第一発見とはいかなかったが, すばる望遠鏡では世界一の広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (1 度に 1.8 平方度をカバーできる) を生かした重力波の推定領域の大部分に及ぶ観測が行われ, 確かに前述の天体が対応天体であることを決定づけた点で重要な貢献をしている<sup>11)</sup>。





図3 GW170817の電磁波対応天体の画像<sup>10)</sup>

白い線で示されているのが対応天体。右下の明るい場所は、中性子星合体が起きた系外銀河 NGC 4993

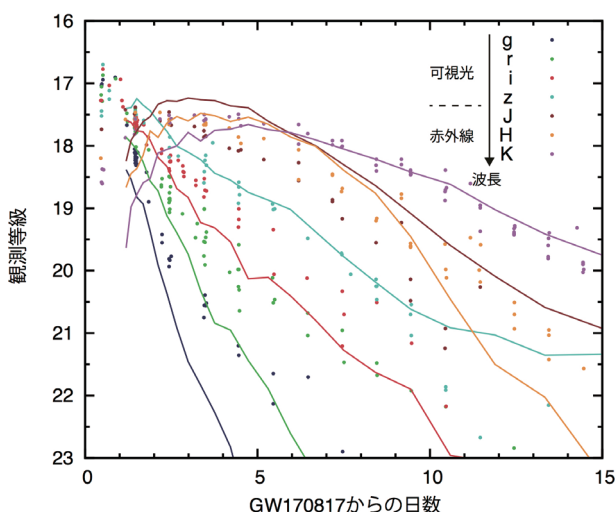


図4 GW170817の電磁波対応天体の可視光・赤外線光度曲線（点）と理論計算の結果（実線）<sup>12)</sup>

色の違いは波長の違いを表しており、g, r, i, zが可視光のフィルター、J, H, Kが近赤外線のフィルターで観測されたもの

図4は観測された可視光と赤外線の明るさの時間進化と理論的な計算の結果を比較したものである<sup>12)</sup>。予想どおり赤外線で比較的長く輝き、可視光で急激に暗くなったことから、キロノバが捉えられたと言って良いだろう。人類は初めて重力波天体を写真に収めただけでなく、rプロセス元素合成の現場を目撃したのである。

観測されたキロノバの明るさからは、中性子星合体で放出された物質の総量が太陽質量の3%程度で

あることが明らかとなった。これは地球の質量約10,000個分（!）に相当する量である。更に重力波の観測からは、まだ不定性は大きいものの、宇宙で中性子星合体が起きる頻度が、1つの銀河当たり約1万年に1回であることが見積もられた。このペースで中性子星合体がrプロセス元素を合成・放出していれば、銀河系に存在するrプロセス元素の総量を説明できるため、中性子星合体がrプロセス元素の起源である可能性が高まったといえる。

しかし、まだ重元素の起源が決着したとはいえない。中性子星合体の頻度はまだ一桁ほど不定性があるし、そもそもGW170817で見られたような質量放出がいつも起きるという保証はない。更に、合成される元素の種類にも注意が必要である。例えば金やプラチナはrプロセスの代表元素だが、GW170817で金やプラチナまで合成された直接的な証拠は1つもない。可視光・赤外線では分光観測も行われたが、速い膨張速度によって激しいドップラーシフトが起き、様々な元素の特徴が混ざってしまうため、元素の同定は今のところ困難である。rプロセス元素の放射性崩壊からの核 $\gamma$ 線等を直接検出できれば最も確実だが、そのような観測を行うには検出感度が圧倒的に足りていない。中性子星合体でrプロセスの多様な元素が本当に合成されているかを知るには、理論的な予想を1つずつ検証していく必要があり、今後より多くの中性子星合体でマルチメッセンジャー観測を成功させなければならない。

## 4 まとめ

2017年8月17日、初めて中性子星合体からの重力波が直接検出され、更に電磁波による対応天体の観測が実現した。天文学研究は「マルチメッセンジャー天文学」の新たな時代に突入したといえる。可視光・赤外線領域では「キロノバ」が観測され、中性子星合体で確かにrプロセス元素が合成されている兆候が捉えられた。宇宙における重元素の起源の解明に向けた大きな一歩である。

しかし、これはまだ最初の一步に過ぎない。中性子星合体は宇宙でどれくらいの頻度で起きているのか？いつも同じ量の元素を放出するのか？どのような種類の元素が合成されているのか？今後のマルチメッセンジャー観測によって、これらが明らかに

なったとき、私たちは初めてこの問いに確信を持って答えることができるだろう。「金やプラチナは一体どこから来たのだろうか？」

## 参考文献

---

- 1) Lodders, K., *The Astrophysical Journal*, **591**, 1220 (2003)
- 2) Hotokezaka, K., *et al.*, *Physical Review D*, **87**, 024001 (2013) 等
- 3) 和南城伸也, 天文月報, **107**, 7 (2014)
- 4) 田中雅臣, 天文月報, **107**, 19 (2014)
- 5) Kasen, D., *et al.*, *The Astrophysical Journal*, **774**, 25 (2013)
- 6) Tanaka, M., *et al.*, *The Astrophysical Journal*, **775**, 113 (2013)
- 7) Abbott, B. P., *et al.*, *Physical Review Letters*, **116**, 061102 (2016)
- 8) Abbott, B. P., *et al.*, *Physical Review Letters*, **119**, 161101 (2017)
- 9) Abbott, B. P., *et al.*, *The Astrophysical Journal*, **848**, L12 (2017)
- 10) Utsumi, Y., *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **69**, 101 (2017)
- 11) Tominaga, N., *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **70**, 28 (2018)
- 12) Tanaka, M., *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **69**, 102 (2017)