

中性子星合体の可視赤外スペクトルで探る 重元素合成の痕跡



土本 菜々恵

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: n.domoto@astr.tohoku.ac.jp

2017年、連星中性子星合体からの重力波（GW170817）の検出と電磁波対応天体「キロノバ」の観測により、中性子星合体によるrプロセス元素合成が確認された。しかし、この中性子星合体で合成された個々の元素の種類や量はほとんど明らかになっていない。筆者らはキロノバのスペクトルから元素の情報を引き出すことを目的に、重元素の原子データを構築し、輻射輸送シミュレーションを行った。その結果、GW170817に付随して観測されたキロノバのスペクトルの吸収特徴を、ストロンチウム、ランタン、セリウムといった元素で説明できることがわかった。本稿ではその結果を紹介し、それぞれの吸収特徴が元素合成の物理状況や個々の元素量に与える制限について議論する。

1. 重元素の起源とrプロセス

現在、我々は周期表の上で118の元素を知っている。では宇宙が始まって以降、これらの元素は宇宙のどこでどのように作られてきたのか？このような元素の起源を解明することは天文学・宇宙物理学の重要課題の1つである。長年の研究で、鉄までの元素は主に恒星内の核融合反応で作られることが理解されている。しかし、鉄より重い元素の起源は解明されておらず、特に金やプラチナ、ランタノイド^{*1}などの「rプロセス」を必要とする元素の起源は長年の未解決問題である。

rプロセスとは、鉄より重い元素を作るのに必要な中性子捕獲反応の1つである。中性子捕獲反応では、電荷を持たない中性子が原子核にくっつき中性子過剰な同位体が作られ、それが放射性崩壊を起こして中性子が陽子に変換されることで

り重い元素が作られる。中性子捕獲が原子核の放射性崩壊よりも速いタイムスケールで起こるとき、この反応をr (rapid) プロセスと呼ぶ。

rプロセスが起きるには非常に中性子過剰な環境が必要であり、近年、連星中性子星の合体現象が起源天体の有力な候補として注目されてきた。二つの中性子星が連星系を成しているとき、重力波を放って合体することが知られている。このとき、中性子星の一部が宇宙空間に吹き飛ばされると、吹き飛ばされた物質中でrプロセスが起きる[1, 2]。さらに、合成されたrプロセス元素の放射性崩壊によって放出物質が熱化され、可視光や赤外線で光る現象「キロノバ」が見られることも予想されていた[3, 4]。実際、2017年8月に連星中性子星合体からの重力波が初めて直接検出され（GW170817）[5]、さらに世界中の望遠鏡による追観測によって電磁波対応天体が発見された[6]。

*1 原子番号57-71の元素で、レアアース（希土類元素）の一部。

観測された電磁波対応天体の光は予想されていたキロノバの光り方と見事に一致し、マルチメッセンジャー観測の成功によって確かに中性子星合体でrプロセス元素が合成されていることが確認されている [7].

しかし、中性子星合体が本当に宇宙のrプロセス元素の起源であるかどうかはまだ明らかではない。元素の起源を考えるうえで重要なのは、一度の中性子星合体で実際に合成される元素の種類や量だが、GW170817ではこれがほとんどわかっていないのだ。本稿では、このような個々の元素の情報を引き出すには何が必要か、そして実際にどのような情報が引き出せるかについて、筆者らの研究に基づいて紹介する [8, 9].

2. キロノバ

はじめに、この章では理論的に予想されていた中性子星合体・キロノバの描像と、2017年に観測されたキロノバについて紹介する。中性子星合体の解説やGW170817に付随したキロノバの解説については、2018年の柴田氏の記事 [10] や2019年の仏坂氏の記事 [11], 2021年の田中氏の記事 [12] などを参照されたい。

まず、中性子星合体が起こると、中性子星の一部が宇宙空間に放出される。合体後数10ミリ秒程度で吹き飛ばされる物質は元の中性子星の成分を含むため、非常に中性子過剰であることが期待される [13, 14]. また合体後には降着円盤が形成され、そこから物質が放出される。ここでは粘性加熱やニュートリノにより中性子が陽子に変換され、中性子過剰度はやや低くなることが期待される [15, 16] (図1).

放出された中性子過剰な物質ではrプロセスが起き、中性子過剰な不安定核が作られる。中性子過剰度の高い物質中ではrプロセスが効率よく起き、ランタノイドを含むより重い元素まで合成される [17]. 一方で、中性子過剰度がやや低い環境ではランタノイドまで元素合成が進まず、セレン

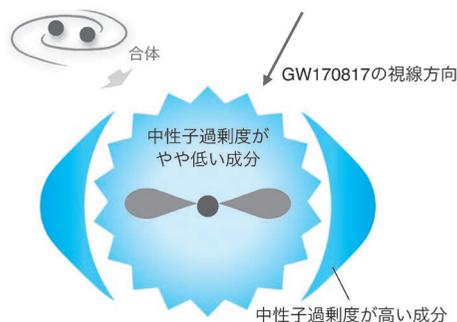


図1 中性子星合体による物質放出の模式図.

(原子番号34) からキセノン (原子番号54) あたりの比較的軽い元素が豊富に合成される [18]. そして合成された不安定核は放射性崩壊を起こし、高エネルギーのガンマ線や電子が放出される。物質はこのような高エネルギー粒子との相互作用によって熱化され、主に可視光・赤外線の熱的な放射が数日~10日ほどのタイムスケールで起こる。これがキロノバである。

中性子星合体の放出物質から放射される光はさまざまな元素と相互作用をしながら抜け出してくるため、キロノバの性質は物質中に含まれる元素の種類に大きく影響される。特に、ランタノイドは可視光から赤外線の光を非常に効率よく吸収することがわかっている [19]. そのため、ランタノイドが存在すると光はなかなか抜け出してこられず、放射が長時間続くようになり、可視光よりも赤外線で明るくなる [20, 21]. 一方ランタノイドよりも軽い元素はそれほど光の吸収効率が高くないため、この場合の放射は短い時間で、可視光で明るくなることが期待される [22].

GW170817の電磁波対応天体は、合体後20日頃まで可視光・赤外線の詳細に観測された。その結果、初め(合体後2-3日)は可視光で明るかったもののすぐに暗くなり、その後赤外線でもより長い時間 (~10日程度) 明るく輝くという振る舞いが見られた。これは、GW170817ではランタノイドまで元素合成が進まなかった成分と、ランタノイドが合成された成分の両者が存在していた

ためと解釈できる。つまり、理論的に予想されていたように、中性子星合体時には中性子過剰度の高い成分と、中性子過剰度がやや低い成分の両方が放出されていたと考えられる。このような理論と観測の一致によって、中性子星合体による質量放出の描像とrプロセス元素合成が確認された。

3. キロノバのスペクトルと原子データ

キロノバの光度曲線からは、中性子星合体で少なくともランタノイドまでの元素は合成されたことがうかがえる。では、この中性子星合体で金やプラチナは合成されたのだろうか。合成された元素を特定するもっとも直接的な方法は、スペクトルを用いた元素の同定である。個々の元素は決まった波長の光を吸収する性質（束縛遷移）があるため、スペクトルに現れる吸収線を調べることで、個々の元素を特定することができる。GW170817で観測されたキロノバのスペクトル[23]を見ると(図2)、矢印で示すように幅の広い吸収特徴がいくつも見られることがわかる。つ

まり、これらの吸収特徴を生み出した元素を特定できれば、その元素が中性子星合体で合成された証拠になると言える。

しかし、キロノバのスペクトルから元素を同定することは容易ではない。そもそも、吸収線から元素の種類を特定するには、それぞれの元素が吸収できる光の波長（遷移波長）や、その波長の光が吸収される確率（振動子強度）を知っておかなければならない。rプロセスでは鉄より重い元素が多く合成されるため、それらすべての元素の（正確にはそれらのさまざまなイオン化状態での）情報が必要になる。このような「原子データ」は地上の分光実験で原子の性質を調べることで構築されるが、重元素の特に赤外線での実験はこれまでほとんど行われていなかった。つまり実験的には、キロノバの赤外線スペクトルにどのような吸収線が現れるかがわからないのだ。

実験的な重元素の原子データは限られているため、これまでは原子構造計算コード（HULLAC [24]など）を用いた理論計算によって重元素の性質が調べられてきた[19]。これによって各元素の性質を統計的に理解できるようになり、重元素による吸収係数の評価や、それを用いたキロノバの光度曲線の現実的な計算が可能になった。2017年に観測されたキロノバの光度曲線の現実的な解釈が可能だったのも、その時点でこうした理論原子データが構築されていたおかげである。しかし、こうした理論計算では元素の統計的な性質は得られる一方、実験値を再現できるほどの精度はなく、スペクトルの吸収特徴を調べるには直接使えないという問題がある。そこで筆者らはこの状況を打開するべく、一長一短ある二種の原子データの合わせ技に取り組んだ。

3.1 すべての重元素を調べる

中性子星合体からの放出物質は、言い換えれば膨張運動する重元素ガスのプラズマで、キロノバはこのプラズマが放つ光である。運動するプラズマにおける元素の光の吸収度合いは、プラズマの

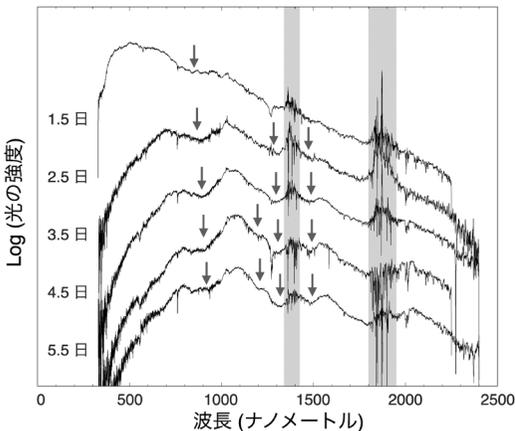


図2 GW170817に付随して観測されたキロノバのスペクトル[23]。左の数字は中性子星合体後の日数を表す。矢印で主な吸収特徴を示した。スペクトルは見やすいように縦方向にずらしてある。影付きの領域（1400ナノメートル付近、1800-1900ナノメートル付近）は地球大気の影響を受けている。

温度・密度といった物理状況を仮定すれば評価することができる。そこで我々はまず、完全性の高い理論原子データを用い、キロノバの物理状況でそれぞれの重元素が光をどの程度吸収できるのかを調べた。スペクトルに吸収特徴を作り出せる候補となる、強い吸収度合いを示す元素を特定するためである。これはすべての元素の性質を網羅している理論データの強みと言える。その結果、カルシウム（原子番号20）、ストロンチウム（原子番号38）、ランタン（原子番号57）、セリウム（原子番号58）が光を強く吸収する傾向があることが明らかになった（正確には、カルシウムとストロンチウムは一階電離イオン、ランタンとセリウムは二階電離イオンが重要である）。

この結果をもとに周期表を見てみると、興味深いことに、光を強く吸収する傾向がある元素はすべて周期表上で左側の族に属していることがわかる（図3、青色）。これは元素の原子構造がよく似ていることを示している。例えば、第2族に属

しているカルシウムとストロンチウムは、一階電離している場合、最外殻に1つ電子を持っている。ランタンやセリウムはランタノイドの中で原子番号の小さい元素であり、二階電離している場合、ランタンは1つ、セリウムは2つの最外殻電子を持っている。

ある元素において、束縛遷移に関与する最外殻電子の数が少ない（原子構造が単純な）場合、元素は比較的限られた波長の光のみを吸収する。すると、振動子強度の総和則により、各遷移の振動子強度（遷移確率）は大きくなりやすい。つまり、上記の元素（イオン）が光の強い吸収源になることは、最外殻電子の数が少なく、特定の波長のみでの遷移が起こりやすいという原子物理的性質に起因するものとして理解できる。

実は、これは太陽のスペクトルでも同じである。有名なフラウンフォーファー線はナトリウム（原子番号11）やマグネシウム（原子番号12）、カルシウムによる吸収線を含んでいるが、周期表

1																	2																																																												
H																	He																																																												
3	4											5	6	7	8	9	10																																																												
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																																																												
11	12											13	14	15	16	17	18																																																												
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																																																												
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																												
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																																																												
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																																												
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																																																												
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																																																												
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																																												
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118																																																												
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og																																																												
<table border="1"> <tr> <td>57</td> <td>58</td> <td>59</td> <td>60</td> <td>61</td> <td>62</td> <td>63</td> <td>64</td> <td>65</td> <td>66</td> <td>67</td> <td>68</td> <td>69</td> <td>70</td> <td>71</td> </tr> <tr> <td>La</td> <td>Ce</td> <td>Pr</td> <td>Nd</td> <td>Pm</td> <td>Sm</td> <td>Eu</td> <td>Gd</td> <td>Tb</td> <td>Dy</td> <td>Ho</td> <td>Er</td> <td>Tm</td> <td>Yb</td> <td>Lu</td> </tr> <tr> <td>89</td> <td>90</td> <td>91</td> <td>92</td> <td>93</td> <td>94</td> <td>95</td> <td>96</td> <td>97</td> <td>98</td> <td>99</td> <td>100</td> <td>101</td> <td>102</td> <td>103</td> </tr> <tr> <td>Ac</td> <td>Th</td> <td>Pa</td> <td>U</td> <td>Np</td> <td>Pu</td> <td>Am</td> <td>Cm</td> <td>Bk</td> <td>Cf</td> <td>Es</td> <td>Fm</td> <td>Md</td> <td>No</td> <td>Lr</td> </tr> </table>																		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																															
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																																															
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																															
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																																															

図3 元素の周期表。本研究で重要な元素を青色、ランタノイドを灰色の枠で囲んである。中性子星合体における r プロセスでは主にカルシウム（原子番号20）以降の元素が合成される（[25]など）。

(図3)を見ると、これらの元素も周期表の左側の族に属していることがわかる。太陽組成によると、これらの元素は炭素や酸素より量が多いわけではない。つまり、太陽スペクトルにおける強い吸収線も、最外殻電子の数が少なく、特定の波長の光をよく吸収する元素によって作られていると理解できる。

3.2 新たな原子データの構築

キロノバのスペクトルに吸収特徴を作りそうな元素は特定できたものの、理論原子データにおける光の吸収波長（遷移波長）は精度が低い。観測スペクトルと直接比較して吸収特徴を議論するには、実験的に正確な波長データが必要である。そこで、筆者らは実際のスペクトルへの応用を可能にするために、実験のデータベース [26, 27] から重要な元素が吸収する光の波長のデータを構築した。もちろん、ほとんどの重元素（正確にはこれらのイオン）の赤外線での実験は行われていないため、実際に波長データの構築をすべての重元素に対して行うことは不可能である。しかし、ここではキロノバのスペクトルに吸収特徴を作りそうな一部の元素に対してのみ行えばよく、幸い、特定した重要な元素が吸収できる光の波長は可視光だけでなく赤外線にも実験データが存在していたため、実現が可能となった。

ここで重要なことは、元素による光の吸収度合いを考えるには、その波長の光が吸収される確率（振動子強度）が必要ということである。これが実験的には最も難しく、最も不足しているデータである。例えば、ランタンやセリウムが吸収できる赤外線の波長はわかっているが、確率がわからないため、実験的にはその光の吸収度合いまではわからなかったのだ。しかし、我々は理論原子データ [19] を用いてこの部分を補うことができる。つまり、実験的に正確な光の波長と理論計算から得られた光の吸収確率を合わせ、利用できる原子データの「いいところ取り」をすることで、キロノバのスペクトルの吸収特徴を調べるための

新しい原子データを構築することができた。

4. 元素の同定とそこからわかること

4.1 シミュレーションによる元素の同定

ここまでで、キロノバのスペクトルで元素を特定するために必要な準備は整った。しかし、実際に元素を特定することは単純ではない。中性子星合体からの放出物質は高速（典型的には光速の10-20%）で膨張しており、ドップラー効果によって光の波長がずれてしまうためである。これによって個々の元素の吸収する光の波長がずれ、さまざまな元素の吸収線がさまざまな波長（速度）で混ざってしまう。結果、図2の観測スペクトルから見て取れるように、吸収線の幅は非常に広がる。

そこで、キロノバの詳細な輻射輸送シミュレーションによって、スペクトルの計算を行った。この結果を実際の観測スペクトルと比較することで、どの吸収特徴がどの元素で説明できるのかを特定できるというわけである。このシミュレーションを行うには、やはり光が物質にどの程度吸収されながら抜け出してくるかを評価する必要がある。スペクトルの吸収特徴を調べるには、前章で構築した重要な元素の新しい（正確な）原子データが肝心である。同時に、放出物質全体としての元素の吸収係数も評価する必要があり、依然として統計的な元素の性質、つまり理論原子データが欠かせない。そこで、新しい原子データと理論原子データの両者を組み合わせたハイブリッドな計算を行うことで、これまででない現実的なキロノバのスペクトルの計算を可能にした。

シミュレーションで得られたキロノバのスペクトル（図4）には、破線で示したようにいくつかの吸収特徴が見られる。これらの特徴はそれぞれ、前章で特定したカルシウム、ストロンチウム、ランタン、セリウムによるものであった。現実的なキロノバの計算からも、これらの元素が実際に吸収特徴を作り出すことが確認できたと言える。

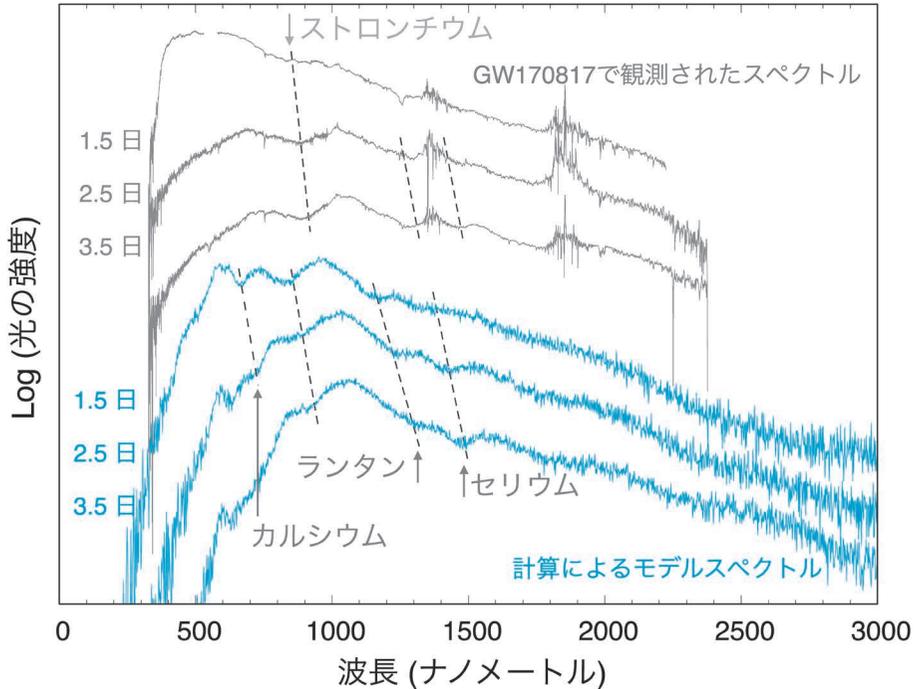


図4 GW170817に付随して観測されたキロノバのスペクトル(上, 図2)と本研究で得られたスペクトル(下). 左の数字は中性子星合体後の日数を表す. 破線で吸収特徴と, それらの特徴を作る元素名を示した. スペクトルは見やすいように縦方向にずらしてある. 観測スペクトルの1400ナノメートル付近, 1800-1900ナノメートル付近は地球大気の影響を受けている.

では, 計算スペクトルを実際の観測スペクトルと比較してみる. 実は, 900ナノメートル付近の吸収特徴だけはすでにストロンチウムで説明できることが報告されており [28], 筆者らの詳細な計算結果もそれを裏付けていることがわかる. さらに赤外線では, ランタンとセリウムの作る吸収特徴が観測スペクトルに見られる吸収特徴と一致することがわかった. これにより, この中性子星合体でストロンチウム, ランタン, セリウムが合成されていたことが同定できた [8, 9].

4.2 元素合成の物理状況

シミュレーション結果では, 650ナノメートル付近に強いカルシウムの吸収特徴が現れている. すでに述べたとおり, カルシウムとストロンチウムは原子構造が非常によく似ているため, 両者が同時に強い吸収特徴を作ることは原子物理的な性

質から自然であると言える. しかし, 2017年の観測スペクトルにはカルシウムによる特徴は見られない. つまり, 2017年の中性子星合体では, カルシウムがそこまで合成されていなかったのだろうと考えられる.

ここで, ストロンチウムは吸収特徴を作りカルシウムは作らない, という条件から, 両者の合成量に制限を与えることができる. 放出物質質量に対するカルシウムの量を変化させて同様の輻射輸送シミュレーションを行うことで, ストロンチウムに対するカルシウムの質量割合比が0.002より小さいという結果が得られた.

これは元素合成が起こる放出物質の物理状況に示唆を与える. 我々は2017年の中性子星合体を極方向付近から観測したため, 合体後数日程度では, 中性子過剰度のやや低い成分を見ていたと考

えられる (図1). 元素合成計算によると, このような中性子過剰度のやや低い環境でカルシウムとストロンチウムの質量割合比に対する制限を達成しうる物理状況 (速度やエントロピー) は, 中性子星合体のシミュレーション ([16] など) で合体時に極方向に放出される成分の物理状況と整合的であることがわかった [8]. このように, 中性子星合体の数日後に観測されるカルシウムとストロンチウムの吸収特徴が, 合体の瞬間に放出された物質の物理状況を知るためのトレーサーとして使えるのである.

今後観測されるキロノバでは, カルシウムの吸収特徴も見られるかもしれない. そのようなスペクトルでカルシウムとストロンチウムの吸収特徴を使うことで, それぞれの中性子星合体の元素合成や放出物質の物理状況に, より強い制限を与えられることが期待される.

4.3 合成された元素量の直接推定

ランタノイドは光の吸収係数が非常に高く, キロノバの放射を赤外線で見ることが知られていた. 実際に2017年に観測されたキロノバの光度曲線がこの振る舞いを示したことで, 間接的にこの中性子星合体でランタノイドが合成された証拠は得られていた. いくつかの論文では, 光度曲線の計算によりランタノイドの合成量を推定している [29–31]. しかし, ランタノイドを構成するそれぞれの元素がどの程度合成されているのかは全くわかっていなかった.

本研究により, 2017年に観測されたキロノバのスペクトルでは, 赤外線の吸収特徴をランタノイドであるランタンとセリウムで説明できることがわかった. よって, これらの元素が吸収特徴を作るための条件から, 個々の元素の合成量に制限を与えることができる. 放出物質質量に対するランタンとセリウムの量をそれぞれ変化させて輻射輸送シミュレーションを行うことで, ランタンに対しては質量割合の下限値 2×10^{-6} が, セリウムに対しては $10^{-3} - 10^{-5}$ という質量割合の範囲が得ら

れた [9]. ランタノイド全体の組成比は未だ明らかではないが, 太陽系のrプロセス元素組成比を仮定すれば, ランタノイド全体の質量割合は $2 \times (10^{-4} - 10^{-2})$ となり, これは光度曲線から推定されていた値と大まかに一致している. 得られた制限範囲はまだ広いものの, 吸収特徴から初めて元素量の直接推定が可能になったことは特筆すべきである.

5. 今後の展望

本研究では, 重元素の原子データを構築し, 輻射輸送シミュレーションを行うことでキロノバのスペクトルを調べ, 2017年に観測されたキロノバのスペクトルの吸収特徴を説明することに成功した. しかし, これらの吸収特徴がいつでも現れるのかどうかは定かではない. 今後はこれから観測されるであろう新たなキロノバに備え, それぞれの吸収特徴について, 放出物質の質量や速度などからより詳しく調べる必要があるだろう.

ここでは連星中性子星の合体後数日に観測されるキロノバのスペクトルを考えていたが, 原子物理的な性質から, 吸収特徴に現れうる個々の元素の数は限られていそうなことも示唆された. しかしさらに時間が経つと, 放出物質の密度が下がり, 光は物質に妨げられず自由に抜け出せるようになる. このような時期には吸収線ではなく輝線が見えるようになるため, 同様に輝線を用いて元素を同定することができる. GW170817では詳細なスペクトルまでは得られていないが, 合体後数十日に赤外線衛星 Spitzer による測光観測が行われており, その明るさがセレン (原子番号34) やタングステン (原子番号74) で説明できる可能性も指摘されている [32]. 今後さらにさまざまな時間スケールでのスペクトルが得られることで, 新たな元素を特定できることが期待される.

2023年5月, ついに第4期重力波観測が始まった. これまでに重力波とともにキロノバが観測されたのはGW170817の一例のみだが, 今後はそ

の数も増えていくだろう。本研究で確立した手法と今後の研究によって、宇宙における重元素の起源の理解が進むことが期待される。

謝 辞

本稿は筆者らが発表した論文 [8,9] に基づいています。指導教員である田中雅臣氏をはじめ、多くのことを一緒に議論していただいた共同研究者の仏坂健太氏、川口恭平氏、和南城伸也氏、加藤太治氏に感謝いたします。なお、筆者は日本学術振興会特別研究員制度、および東北大学宇宙創成物理学国際共同大学院 (GP-PU) の支援を受けています。本研究の数値計算の一部には国立天文台のスーパーコンピュータ XC50 を使わせていただきました。

参考文献

- [1] Eichler, D., et al., 1989, *Nature*, 340, 126
 [2] Freiburghaus, C., et al., 1999, *ApJ*, 525, L121
 [3] Li, L.-X., & Paczyński, B., 1998, *ApJ*, 507, L59
 [4] Metzger, B. D., et al., 2010, *MNRAS*, 406, 2650
 [5] Abbott, B. P., et al., 2017a, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161101
 [6] Abbott, B. P., et al., 2017b, *ApJ*, 848, L12
 [7] Tanaka, M., et al., 2017, *PASJ*, 69, 102
 [8] Domoto, N., et al., 2021, *ApJ*, 913, 26
 [9] Domoto, N., et al., 2022, *ApJ*, 939, 8
 [10] 柴田大, 2018, *天文月報*, 111, 730
 [11] 仏坂健太, 2019, *天文月報*, 112, 778
 [12] 田中雅臣, 2021, *天文月報*, 114, 16
 [13] Hotokezaka, K., et al., 2013, *Phys. Rev. D*, 87, 024001
 [14] Sekiguchi, Y., et al., 2015, *Phys. Rev. D*, 91, 064059
 [15] Just, O., et al., 2015, *MNRAS*, 448, 541
 [16] Fujibayashi, S., et al., 2018, *ApJ*, 860, 64
 [17] Wanajo, S., et al., 2014, *ApJ*, 789, L39
 [18] Metzger, D. B., & Fernández, R., 2014, *MNRAS*, 441, 3444
 [19] Tanaka, M., et al., 2020, *MNRAS*, 496, 1369
 [20] Kasen, D., et al., 2013, *ApJ*, 774, 25
 [21] Tanaka, M. & Hotokezaka, K., 2013, *ApJ*, 775, 113
 [22] Kasen, D., et al., 2015, *MNRAS*, 450, 1777
 [23] Pian, E., et al., 2017, *Nature*, 551, 67
 [24] Bar-Shalom, A., et al., 2001, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 71, 169
 [25] Fujibayashi, S., et al., 2023, *ApJ*, 942, 39
 [26] Kramida, A., et al., 2021, *NIST Atomic Spectral Database*
 [27] Piskunov, N. E., et al., 1995, *A&AS*, 112, 525
 [28] Watson, D., et al., 2019, *Nature*, 574, 497
 [29] Arcavi, I., et al., 2017, *Nature*, 551, 64
 [30] McCully, C., et al., 2017, *ApJ*, 848, L32
 [31] Nicholl, M., et al., 2017, *ApJ*, 848, L18
 [32] Hotokezaka, K., et al., 2022, *MNRAS*, 515, L89

Signatures of r-Process Nucleosynthesis in Optical-Infrared Spectra of Neutron Star Mergers

Nanae DOMOTO

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

Abstract: In 2017, the detection of gravitational waves (GW170817) from a binary neutron star merger and the observation of an electromagnetic counterpart “kilonova” have provided us with evidence that r-process nucleosynthesis occurs in neutron star mergers. However, the species and abundances of individual elements synthesized in this neutron star merger have not been clarified. Thus, it is not yet clear if neutron star mergers are the origin of the r-process elements in the Universe. With the aim of extracting information of elements from kilonova spectra, we have constructed atomic data of heavy elements and performed radiation transfer simulations of kilonovae. In this article, I introduce the results of our studies and discuss what kind of information we can extract from the observational data.