

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601  
研究種目：若手研究  
研究期間：2020～2023  
課題番号：20K14513  
研究課題名（和文）キロノバ星雲期における放射の理論研究

研究課題名（英文）Nebular emission of Kilonovae

**研究代表者**

仏坂 健太（Hotokezaka, Kenta）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：50867033

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,300,000円

**研究成果の概要（和文）**：中性子星合体に伴い放出されるエジェクタが光学的に薄くなった以降の、キロノバ星雲期に関する理論研究を実施した。キロノバ星雲期では原子のイオン化度やイオンのエネルギー準位の分布などが熱平衡から外れ、ベータ崩壊によって生成される非熱的電子によるイオン化と加熱が再結合と原子冷却の釣り合いによって決定される。重元素の中でもネオジムに注目し、必要となる原子データを原子構造コードを用いて計算し、イオン化と準位を求め、キロノバ星雲期の性質を明らかにした。また重元素の禁制線を原子実験データに基づき作成し、観測スペクトルにテルルなどの重元素の輝線が見られることを示した。

**研究成果の学術的意義や社会的意義**

2017年の中性子星合体からの重力波と電磁波の同時検出以降、中性子星合体が宇宙に存在する重元素の起源である可能性が高まっている。しかし、中性子星合体のエジェクタの物理状況がよくわかっていないことや、必要となる原子データの不足であることから、観測されたスペクトルから分光学的に元素を同定することは容易ではない。本研究課題では、これらの課題に取り組み、合体後10日以降に見られる輝線からテルルなどの重元素の特定に成功した。この成果は、重元素の起源を明らかにする上で、重要な意義がある。

**研究成果の概要（英文）**：The ejecta produced in neutron star mergers enters a nebular phase after the ejecta become optically thin to thermal photons. This phase is referred to as the kilonova nebular phase. We studied the ionization state and energy-level population of heavy elements in the nebular phase by solving ionization and cooling balance, where the ionization and heating are determined by radioactivity of beta-unstable nuclei. We solved the balance equations in the case that the composition is represented by Nd ions. The atomic data are derived by using atomic-structure codes. We constructed an M1 line list of heavy elements based on experimentally measured energy levels. With this line list, we showed that the observed spectrum of the kilonova AT 2017gfo exhibits an emission line of doubly ionized Te at 2.1 micron.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力波天文学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2017年に中性子星合体からの重力波および電磁波が発見された。重力波観測から合体した中性子星の質量などが精密に測定され、銀河系で発見されている連星中性子星とよく似た性質を持つことがわかっている。この中性子星合体に付随した電磁波ガンマ線から電波まで多波長に渡っている。その中でも合体後半日から10日程度で可視光から近赤外で観測された電磁波はキロノバと呼ばれ、中性子星合体に伴い、太陽質量の数%の放射性物質が放出され、その放射性崩壊をエネルギー源として輝く現象である。この観測は多量の重元素が生成されたことを示唆し、宇宙に存在する重元素の起源として中性子星合体が脚光を浴び始めた。しかし、分光学的に重元素を特定することは容易ではないのが現状であった。研究開始当初はキロノバ初期のスペクトルにストロンチウムの吸収線が見られるという報告が出た直後であった。このストロンチウムの吸収線は恒星大気に観測される有名な吸収線であり、重元素の中で十分正確な原子データが存在する数少ない吸収線である。吸収線はその光学的厚さが1より十分大きければ形成されるため、必ずしも量の多い元素が強い吸収線を示すとは限らないという難しさがある。また吸収線が見られるのはキロノバの比較的初期であるため、光球面の膨張速度が光速の10%程度と速く、ドップラー効果に起因する強い広がりを避けることができない。そこで本研究では、キロノバエジェクタが光学的に薄くなる後期、いわゆるキロノバ星雲期における輝線から元素の特定ができる可能性を調べることが目標とした。しかし、研究開始当初はキロノバ星雲期の物理状況の計算方法は全く手がつけられておらず、星雲期の温度やイオン化状態をどのように計算すれば良いのかをまず明らかにする必要があった。この問題に加えて、分光学的に原子を特定するために必要となる原子データが不足していたことも解決すべき問題であった。つまり、重元素の禁制線は波長、遷移確率ともに全くデータとして整備されていなかった。

### 2. 研究の目的

キロノバ星雲期の観測から中性子星合体で生成された元素を分光学的に特定することを可能にすることが目的である。

### 3. 研究の方法

一つ目の方法は、ベータ崩壊による加熱とイオン化とプラズマの原子冷却と電子再結合を解くために、必要となる原子データを原子構造コードを用いて用意した。重元素の準位と遷移確率を求めるにはGRASP2Kと呼ばれる、高精度で原子構造を解くコードを用いた。また重元素の電子衝突による励起断面積と2重電子再結合係数を求めるためには、より高速に計算を実行できるHullacコードを用いた。これによって、キロノバ星雲期におけるエジェクタの物理状況を計算し、典型的なイオン化度の時間発展を求めた。二つ目の方法は、星雲期に重要になる輝線の大半は禁制遷移であり、中でも磁気双極子遷移である。この場合、遷移確率を求めるために近似的には波動関数の動径成分は必要なく角度成分で決定できる。この性質を利用して、実験的に求められているイオンのエネルギー準位とそれぞれの角運動量のラベルから磁気双極子遷移の波長と遷移確率を求め、ラインリストを生成した。具体的には、LS結合近似のもとで、磁気双極子遷移を選択即から求めた。ラ原子のエネルギー準位が正確に測定されているためインリストに含まれる波長の精度は0.1%以下である。重元素のエネルギー準位はLS結合では完全に表すことができないことが知られており、LS結合近似を用いての計算では遷移確率の精度が悪くなるのが期待されるが、実際、ピスマスなどの非常に重い元素でも遷移確率の測定値と10%程度の誤差で得られることがわかり、キロノバ星雲期の分光観測から元素の特定に十分使用できることを確認した。

### 4. 研究成果

ネオジウム元素に原子性質を代表させてキロノバ星雲期のイオン化度と電子温度の時間発展を求め、これらの定性的な性質を明らかにし、ネオジウムの場合のキロノバ星雲期のスペクトルを計算することに成功した。例えば、イオン化率は大体第二、第三イオン化状態が支配的であり、電子温度は大体2000Kから10000Kに時間とともに上昇することがわかった。またベータ崩壊から生成される電子とエジェクタの相互作用を考えると、キロノバ星雲期の後期ではイオン化度と電子温度が凍結し、一定値に漸近することを予想している。このことは、キロノバ星雲期後期は観測されるフラックスは時間とともに減少するものの、スペクトルの形はほとんど変わらないことに対応する。

禁制線のラインリストを使うことで、2017年に観測されたキロノバのスペクトルにテルルの輝

線が 2.1 ミクロンに見られることを示した。またスピッツァー衛星が観測した強い赤外線放射はタンゲステンもしくはセレンウム輝線の可能性があることを示した。これらはキロノバ AT 2017gfo の観測スペクトルから元素の輝線候補を提唱した最初の研究である。

2023 年 3 月 7 日に発生したガンマ線バーストは、見かけのガンマ線の明るさがこれまでで 2 番目に明るかった。このバーストの可視光残光成分は中性子星合体において観測されたキロノバと非常によく似た挙動を示した。ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を用いて、バースト 30 日後、60 日後に観測を行った。NIRSpec のデータには驚くべきことに、AT 2017gfo と同様に 2.1 ミクロンに強いピークが見られることがわかり、テルルによる輝線として解釈できることを示した。もしもこの解釈が正しければ、これまでは大質量星の崩壊によって駆動されると考えられてきた長いガンマ線バーストの一部は、中性子星合体が駆動していることを示唆しており、ガンマ線バーストの即時放射だけからは、これらの二つの現象は非常によく似ている放射を起こすことができることを意味する。残念ながら、このバーストが発生した時刻に LIGO は稼働しておらず、本当にこの現象が中性子星合体だったかどうか結論は出ないが、今後、LIGO が検出する中性子星合体をジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を使って観測することで、キロノバ星雲期の放射が明らかにされ、ガンマ線バーストに付随した放射の正体が明らかになると期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hotokezaka Kenta, Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas	4. 巻 515
2. 論文標題 Tungsten versus Selenium as a potential source of kilonova nebular emission observed by Spitzer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L89 ~ L93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slac071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hotokezaka Kenta, Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas	4. 巻 506
2. 論文標題 Nebular Emission from Lanthanide-rich Ejecta of Neutron Star Merger	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5863-5877
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Toyouchi Daisuke, Hotokezaka Kenta, Takada Masahiro	4. 巻 510
2. 論文標題 Hunting wide-area optical surveys for high proper motion isolated neutron stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 611 ~ 619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab3428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hotokezaka Kenta, Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas	4. 巻 526
2. 論文標題 Tellurium emission line in kilonova AT 2017gfo	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L155 ~ L159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slac128	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Masaomi, Domoto Nanae, Aoki Wako, Ishigaki Miho N., Wanajo Shinya, Hotokezaka Kenta, Kawaguchi Kyohei, Kato Daiji, Lee Jae-Joon, Lee Ho-Gyu, Hirano Teruyuki, Kotani Takayuki, Kuzuhara Masayuki, Nishikawa Jun, Omiya Masashi, Tamura Motohide, Ueda Akitoshi	4. 巻 953
2. 論文標題 Cerium Features in Kilonova Near-infrared Spectra: Implication from a Chemically Peculiar Star	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 17~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acdc95	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Domoto Nanae, Lee Jae-Joon, Tanaka Masaomi, Lee Ho-Gyu, Aoki Wako, Ishigaki Miho N., Wanajo Shinya, Kato Daiji, Hotokezaka Kenta	4. 巻 956
2. 論文標題 Transition Probabilities of Near-infrared Ce iii Lines from Stellar Spectra: Applications to Kilonovae	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 113~113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acf65a	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Levan Andrew J., Gompertz Benjamin P., Salafia Om Sharan, Bulla Mattia, Burns Eric, Hotokezaka Kenta, et al	4. 巻 626
2. 論文標題 Heavy-element production in a compact object merger observed by JWST	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 737~741
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-023-06759-1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Kenta Hotokezaka
2. 発表標題 Kilonova and Neutron Star Merger Plasma
3. 学会等名 The 14th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths for Astrophysical and Laboratory Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenta Hotokezaka
2. 発表標題 Kilonova Spectrum: Photospheric and Nebular phases
3. 学会等名 Multi-messenger Modeling of Neutron Star Mergers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
リトアニア	Vilnius University		