

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05859・19K21044

研究課題名（和文）中性子星連星合体の電磁波対応天体に対する輻射輸送計算による系統的研究

研究課題名（英文）Electromagnetic counterparts modeling for binary neutron star mergers

研究代表者

川口 恭平（Kawaguchi, Kyohei）

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：60822210

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：多波長モンテカルロ輻射輸送計算コードを用いて、放出物質の質量、速度、密度分布、物質構成を系統的に変えたkilonova光度曲線の計算を行った。特に、最新の数値相対論シミュレーション、元素合成計算、さらにr-process元素の原子計算の結果をベースにし、想定される様々な合体シナリオにおける光度曲線の特徴を予測した。得られた光度曲線モデルを実際に得られた観測結果に用いて、電磁波現象の母天体の解釈、パラメータ制限を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初の連星中性子星合体からの重力波イベントGW170817以降、多くの中性子星連星合体からの重力波イベント候補が報告されており、それらに伴うkilonovaフォローアップ観測も勢力的に行われている。そうした中kilonova光度曲線を輻射輸送計算によって系統的に調べ、その放出物質の質量や速度、形状、物質構成に対する依存性を明らかにする事は急務である。この研究において得られた光度曲線と放出物質の性質の間の系統的な理解、ならびにそのモデルの適用例は、観測されたkilonovaの光度曲線から放出物質の性質の情報にせまるための基礎となるものである。

研究成果の概要（英文）：We investigate the kilonova lightcurves by systematically performing multi-wavelength radiative transfer simulations varying the mass, velocity, density structure, element abundance of the ejecta. In particular, we perform the simulations considering the various situations which can be realized in the neutron star binary mergers based on the recent numerical-relativity simulations, nucleosynthesis calculation, and atomic structure calculation for r-process elements. We applied the obtained lightcurve models to the recent observations of a gamma-ray-burst and gravitational wave event, and discussed the property of the central engines.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力波天文学 電磁波対応天体 kilonova

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

連星合体に付随する電磁波現象の中でも近赤外線～可視光で光る kilonova という現象は、連星合体後の系の進化を反映するため、その光度曲線から強重力、高密度、強磁場、高温の極限環境における物理情報が抜き出せると期待されている。観測から物理情報を抜き出すにはその光度曲線を正確に予測し、系のパラメータに対する依存性を明らかにする必要があるが、その整備はまだ十分とは言えない。これまでの輻射輸送計算による多くの先行研究では、放出物質の形状を球対称とし、放出成分ごとに別々に計算するなどの単純化を行っているため、光度曲線の方向依存性は考慮されていなかった。特に異なる放出成分間での輻射輸送による相互作用を考慮した計算は限定的である。実際には多成分の放出物質は非球対称な構造を持ち、互いに輻射を吸収、放出することによって相互作用する。このため異なる放出成分間での輻射輸送を取り入れた計算による光度曲線の予想は必須である。研究当初、方向依存性と異なる放出成分間での輻射輸送による効果を考慮し kilonova 光度曲線の依存性を系統的に明らかにした研究は存在しなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、中性子星連星合体に伴う kilonova の光度曲線を輻射輸送計算によって系統的に調べ、その放出物質の質量や速度、形状、物質構成に対する依存性を明らかにする事である。特に光度曲線の方向依存性や多成分の放出物質の寄与を正確に考慮して予測できる輻射輸送計算コードを用いて kilonova の系統的予測を行い、その光度曲線のパラメータ依存性を明らかにすることで、今後の重力波・電磁波の多粒子天文学の基礎となる理論的整備を行うことを目標とする。また、中性子星連星合体の重力波が観測された際には、研究で得られた光度曲線モデルを適用することで、迅速な理論的フォローアップを行う。

3. 研究の方法

共同研究者と開発した多波長モンテカルロ輻射輸送計算コードを用いて、放出物質の質量、速度、密度分布、物質構成を系統的に変えた kilonova 光度曲線の計算を行う。特に、最新の数値相対論シミュレーション、元素合成計算、さらに r-process 元素の原子計算の結果をベースにし、想定される様々な合体シナリオにおける光度曲線の特徴を予測する。さらに、得られた光度曲線モデルを実際に得られた観測結果に用いて、電磁波現象の母天体の解釈、パラメータ制限を行う。

4. 研究成果

- (1) 数値相対論シミュレーションの結果に基づいた放出物質の質量、速度、密度分布、物質構成の初期条件を用いた kilonova 光度曲線の計算を行い、様々な質量の中性子星・中性子星連星合体やブラックホール・中性子星連星合体に付随する kilonova の多様性を系統的に予測した。それらの結果から複数のバンドフィルターに対する kilonova 光度曲線のピーク光度・時刻から kilonova の中心エンジンの種別に迫れる可能性を提示した。
- (2) 線バースト GRB160821B の残光に見られた増光の中でも特に可視光～赤外線波長域での成分の解釈として、(1) で得られた kilonova の光度曲線を適用し、GRB160821B が中性子星連星合体起源であった場合の放出質量に対する見積もりを与えた。(図1)
- (3) LIGO と Virgo による最新の重力波観測とそれらに対する電磁波対応フォローアップ観測の結果に対して、系統的計算によって得られた kilonova 光度曲線モデルを適用して、重力波源の物理的パラメータの制限を行った。

連星中性子星合体からの重力波と整合するイベントである GW190425 についての研究では、得られた電磁波対応天体の観測上限からそのイベントがブラックホール中性子星連星合体である可能性を考慮し、母天体の物理的性質について議論した。(図2)

ブラックホール中性子星連星合体と考えられる重力波イベント S190814bv では、フォローアップ観測によって得られた電磁波対応天体の上限を元に、イベントで放出された物質の質量に対する制限を与えた。また、重力波観測によって得られるチャープ質量などの情報と、放出質量に対する制限を組み合わせることで中性子星の質量-半径関係に制限を与える方法を提案した。(図3)

GW160821B ベストフィットモデル(Reverse shock +kilonova)

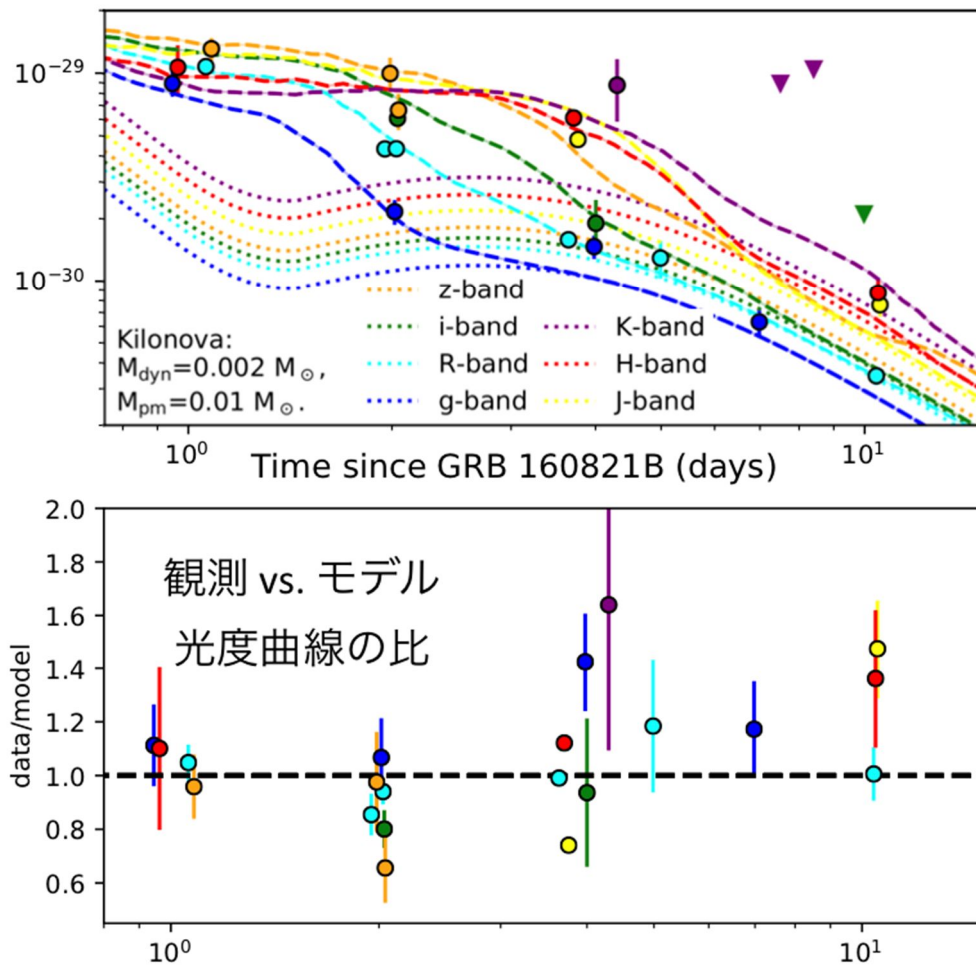


図 1 GW160821B に見られた可視光～赤外線波長域での増光と Reverse shock+kilonova によるモデル比較。Lamb G. P., KK, et al. 2019 より改変。

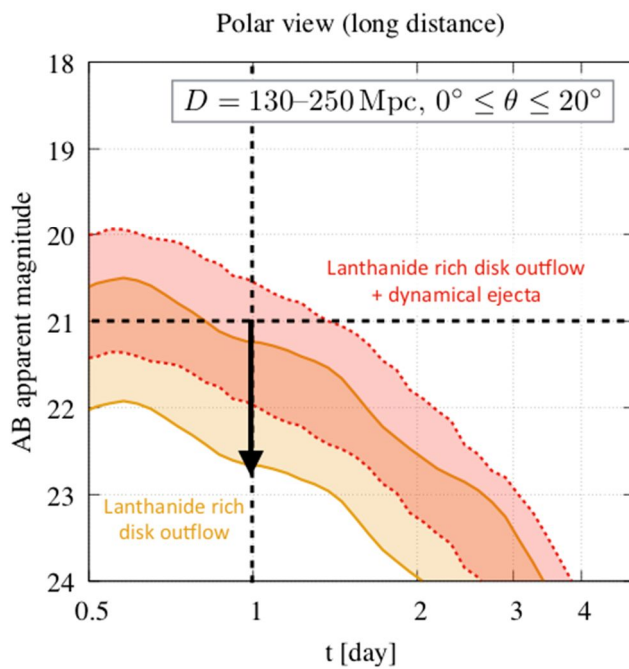
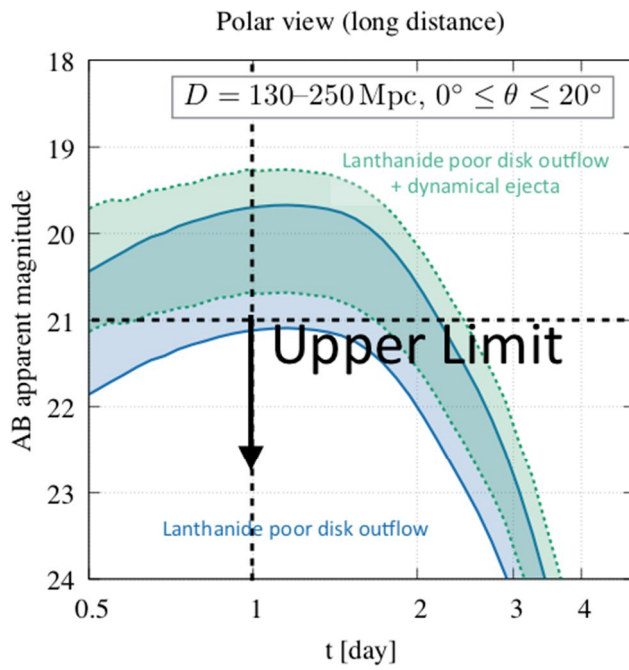


図 2 GW190425 の電磁波対応天体フォローアップ観測によって得られた r バンド光度曲線に対する上限と kilnova モデルの比較。Kyutoku et al. 2020 より改変。

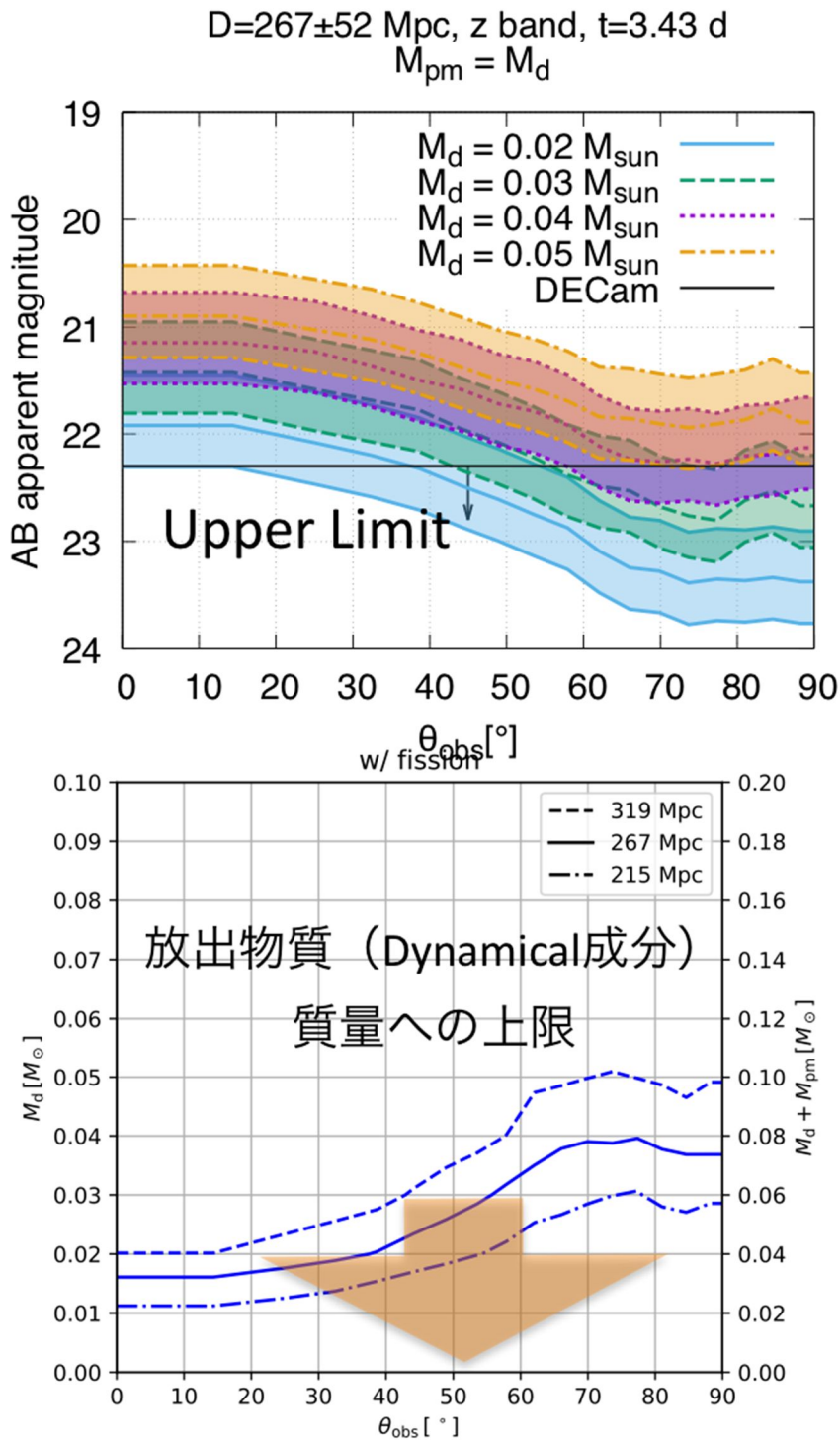


図 3 S190814bv の電磁波対応天体フォローアップ観測によって得られた z バンド光度曲線に対する上限と kilnova モデルの比較、ならびに得られた放出質量に対する制限。Kawaguchi et al. 2020 より改変。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawaguchi Kyohei, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi	4. 巻 889
2. 論文標題 Diversity of Kilonova Light Curves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 171 ~ 171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab61f6	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 -
1. 著者名 Kyutoku Koutarou, Fujibayashi Sho, Hayashi Kota, Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi	4. 巻 890
2. 論文標題 On the Possibility of GW190425 Being a Black Hole?Neutron Star Binary Merger	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L4 ~ L4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab6e70	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 -
1. 著者名 Kawaguchi Kyohei, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi	4. 巻 893
2. 論文標題 Constraint on the Ejecta Mass for Black Hole Neutron Star Merger Event Candidate S190814bv	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 153 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8309	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 -
1. 著者名 Lamb G. P., Tanvir N. R., Levan A. J., Postigo A. de Ugarte, Kawaguchi K., Corsi A., Evans P. A., Gompertz B., Malesani D. B., Page K. L., Wiersema K., Rosswog S., Shibata M., Tanaka M., Horst A. J. van der, Cano Z., Fynbo J. P. U., Fruchter A. S., Greiner J., et al.	4. 巻 883
2. 論文標題 Short GRB 160821B: A Reverse Shock, a Refreshed Shock, and a Well-sampled Kilonova	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab38bb	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

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kawaguchi Kyohei、Shibata Masaru、Tanaka Masaomi
2. 発表標題 輻射輸送計算に基づいたGW170817の放出物質のパラメータ推定
3. 学会等名 天文学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawaguchi Kyohei、Shibata Masaru、Tanaka Masaomi
2. 発表標題 キロノヴァの多様性と輻射輸送計算によるその光度曲線の予測
3. 学会等名 天文学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawaguchi Kyohei、Shibata Masaru、Tanaka Masaomi
2. 発表標題 中性子星連星合体からの重力波と電磁波対応天体
3. 学会等名 熱場の量子論（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawaguchi Kyohei、Shibata Masaru、Tanaka Masaomi
2. 発表標題 Gravitational waveform and electromagnetic counterparts modeling for binary neutron star mergers
3. 学会等名 KPS meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawaguchi Kyohei、Shibata Masaru、Tanaka Masaomi
2. 発表標題 Diversity of kilonova lightcurves
3. 学会等名 Multi-Messenger Astrophysics in the Gravitational Wave Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawaguchi Kyohei、Shibata Masaru、Tanaka Masaomi
2. 発表標題 On possible diversity of kilonova lightcurves
3. 学会等名 Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics from Japan and Israel (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawaguchi Kyohei、Shibata Masaru、Tanaka Masaomi
2. 発表標題 Gravitational-waves/Electromagnetic counterparts modeling for Neutron star binaries
3. 学会等名 Fifth KAGRA International Workshop in Perugia, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川口恭平
2. 発表標題 輻射輸送計算に基づいた GW170817 の 放出物質のパラメータ推定
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyohei Kawaguchi
2. 発表標題 Gravitational-waves/Electromagnetic counterparts modeling for Neutron star binaries
3. 学会等名 Fifth KAGRA International Workshop in Perugia, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyohei Kawaguchi
2. 発表標題 Gravitational waveform and electromagnetic counterparts modeling for binary neutron star mergers
3. 学会等名 KPS 2019 Spring Meeting (招待講演)
4. 発表年 2019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