

Early kilonovae from neutron star mergers

著者	Banerjee Smaranika
号	97
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3416号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00136154

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	Smaranika Banerjee	提出年	令和 4年
学位論文の 題目	Early kilonovae from neutron star mergers (中性子星合体からの初期キロノバ放射)		

論文目次

1. Introduction
2. Opacity in neutron star mergers
3. Simulations of early kilonovae
4. Discussion
5. Conclusions

論文内容要旨

第1章 序論

宇宙における重元素の起源は宇宙物理学における長年の未解決問題である。現在、重元素の起源天体として最も有力視されているのが中性子星の合体現象である。中性子星合体から放出された中性子過剰な物質中では、速い中性子捕獲反応(r -process)が起き、さらに、新しく合成された重元素の放射性崩壊によって紫外線・可視光・赤外線領域で「キロノバ」と呼ばれる電磁波放射が起きると考えられてきた。キロノバを検出することができれば、中性子星合体の重元素合成を検証することが可能である。

中性子星合体は重力波を放射し、ガンマ線バーストを引き起こすことから、「マルチメッセンジャー観測」のターゲットとしても期待されてきた。実際に、2017年には中性子星合体 GW170817 から重力波と電磁波が観測され、「マルチメッセンジャー天文学」が幕を開けた。さらに、GW170817 ではキロノバも検出され、中性子星合体で確かに重元素が合成されている証拠が得られている。将来にはより多くのキロノバが観測されることが期待され、キロノバの光度曲線から元素合成の情報を引き出すための理論的研究が必要不可欠である。そこで本研究は、重元素の原子データを構築することで、キロノバの理論的な研究を行う。

第2章 中性子星合体における吸収係数

キロノバの光度曲線とスペクトルは重元素の束縛遷移に大きく依存する。特に、原子番号が 57-71 のランタノイド元素は、最外殻電子が f 殻に存在しており、光の吸収係数が高いため、キロノバの光度曲線に大きな影響を与えることが

知られている。重元素の吸収係数を評価するには、原子構造計算が必要だが、中性子星が合体してから 1 日以内の初期放射を計算するために必要な高階電離イオンの原子データは全く存在していなかった。中性子星合体初期の放射は放出物質の外側の密度や元素組成を反映するため、観測データから中性子星合体の物理や元素合成を引き出すためには、初期のキロバ放射の性質を正しく理解することが重要である。

そこで本研究は、中性子星合体後 1 日以内の初期キロバ放射に着目して、原子番号 20-88 の重元素に対して 10 階電離イオンまでの原子構造計算を行い、網羅的なエネルギー準位と遷移確率のデータを構築した。特に、高階電離のランタノイド元素は、f 殻と p 殻が空くことで、極めて多くの励起エネルギー準位を有することが明らかとなった。この結果をもとに合体後 0.1 日程度の放出物質における吸収係数を評価したところ、ランタノイド元素が存在しない場合は吸収係数が $0.5 - 1.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 程度であるのに対して、ランタノイド元素が存在する場合には吸収係数が $5000 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ にも達することが初めて明らかとなった。

第3章 初期キロバ放射のシミュレーション

中性子星合体では、合体直後の質量放出ではランタノイド元素を含む重い元素が軌道面に分布することが予想される。一方で、その後の降着円盤からの質量放出では、中性子過剰度が下がり、比較的軽い元素が合成されることが予想される。第2章で見た通り、元素の種類によって光の吸収係数は異なるため、元素存在比の違いによって、中性子星合体からの電磁波放射の性質が異なることが期待される。

そこで本研究では、新しく構築した原子データを用いて、キロバ放射の輻射輸送シミュレーションを行った。その結果、放出物質の質量が 0.05 太陽質量の場合、ランタノイド元素を含まない場合は合体後 0.1 日の光度が $2 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ 程度となることが明らかとなった。これは、GW170817 で観測された光度を再現するものである。一方で、放出物質にランタノイド元素が含まれる場合は、4 倍程度光度が下がることが分かった。これは高階電離ランタノイドの高い吸収係数を反映するものである。ただし、光度曲線が影響されるのは 0.1 日付近の比較的短い時間だけであることもわかった。これは、特定の温度 ($T = 70,000 \text{ K}$) 付近のみで、高階電離のランタノイド元素が極めて高い吸収係数をもつことを反映している。

第4章 議論

本研究によって、現実的な原子データに基づいて、中性子星合体からの初期キロバ放射の性質が初めて明らかになった。この理論的予想は将来の紫外線観測によって検証が可能である。100 Mpc の距離で中性子星合体が起きた場合、ランタノイド元素の含まないキロバの明るさは合体後 0.1 日で 19 mag 程度となる一方、ランタノイド元素を含む場合は 21-22 mag となる。これらはどちらも、現在稼働中の Swift 衛星や、今後の打ち上げが予定されている紫外線衛星 (ULTRASAT, DORADO, UVEX など) で十分観測可能な明るさである。中性子星合体からの初期キロバ放射を紫外線で検出し、本研究の結果と比較することで、中性子星合体からの放出物質の最外層における重元素合成に重要な制限を与えることができる。

第5章 結論

本研究は、中性子星合体からの初期キロバ放射の性質を明らかにするため、高階電離の重元素の原子構造計算を行った。エネルギー準位と遷移確率を網羅的に計算した結果、中性子星合体から 1 日以内の高温の放出物質内に

(別紙様式 5)

おける重元素の吸収係数を初めて評価することができた。この結果を用いて輻射輸送シミュレーションを行った結果、ランタノイド元素を含まない放出物質のモデルが、中性子星合体 GW170817 の観測データを再現することを明らかにした。これは、現実的な原子データを用いた計算によって観測データが再現された初めての例である。また、放出物質がランタノイド元素を含む場合は、合体後 0.1 日程度で光度曲線が暗くなることも明らかになった。本研究の結果は、今後の中性子星合体のマルチメッセンジャー観測から元素合成の情報を引き出すための基礎をなすものであり、宇宙の重元素の起源の理解に貢献するものである。

論文審査の結果の要旨

中性子星合体は宇宙における重元素の起源として重要な天体現象である。中性子星が合体すると速い中性子捕獲反応によって鉄よりも重い元素が合成され、放射性崩壊によって電磁波で輝く「キロノバ」と呼ばれる現象が起きることが示唆されてきた。実際に 2017 年に重力波観測によって中性子星合体が発見され、「キロノバ」が観測されたことで、中性子星合体で重元素が合成された証拠が得られている。しかし、中性子星合体で合成される重元素の原子物理学的性質は十分に理解されておらず、「キロノバ」の観測量から元素合成の情報を引き出す際の大きな障壁となっていた。本博士論文は、重元素の原子データを網羅的に構築することで、中性子星合体からの電磁波放射を研究したものである。

本論文は、中性子星合体から 1 日以内の初期電磁波放射に着目している。著者は、合体後 1 日以内に重要となる高階電離イオンに対して、世界で初めて重元素の系統的な原子構造計算を行い、エネルギー準位と遷移確率の網羅的なデータを構築した。これは中性子星合体からの初期電磁波放射を理解するための根幹をなすものである。特に、重要な吸収源であるランタノイド元素では、これまで基底状態の電子配置といった基本的な情報すら存在しておらず、本研究によって原子物理学分野における基礎的なデータが提供されている点は特筆すべきである。この新しい原子データによって、中性子星合体が起きてから 1 日以内に高階電離のランタノイド元素が極めて高い吸収係数をもつことが初めて示された。

これらの新しい原子データを用いた輻射輸送シミュレーションの結果、ランタノイド元素が少ない組成分布を仮定した場合に、2017 年に観測された中性子星合体の観測データが再現されることが示された。これは、現実的な原子データに基づく計算で観測された性質を再現した初めての例である。また、ランタノイド元素が含まれる場合は、高い吸収係数を反映して合体後数時間に光度が下がることが示された。これらの結果は今後の中性子星合体の観測の指針を与えるものである。

以上より、本博士論文の研究は中性子星合体からの電磁波放射に関する先駆的な研究であり、著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有していると評価できる。したがって、Smaranika Banerjee 提出の博士論文を、博士（理学）の学位論文として合格と認める。