

# 論文審査の結果の要旨

氏名 柴垣 翔太

速い中性子捕獲反応 (以降、英表記 “rapid neutron capture process” に基づき「r 過程」と略す) は、鉄より重い元素を合成する主要過程の 1 つである。しかしながら、r 過程がどのような天体で起き、かつ、どの程度の量の元素が生成されるのかは、多くの研究者らの長年の努力にも関わらず、依然として天文学・物理学における未解明主要課題として残されたままである。本博士論文では、中性子星連星合体および、磁気回転駆動による重力崩壊型超新星爆発時の、r 過程元素合成の解明を目指し、理論・数値シミュレーション的手法による研究に取り組まれている。

本論文は 5 章からなる。第 1 章は序論であり、重力崩壊型超新星爆発や中性子星連星合体の際に起きる r 過程元素合成について網羅的に紹介されている。第 2 章では、第 3 章以降で使用する数値シミュレーションコードの内容が、特に論文提出者が改良を加えた部分に重点を置いて説明されている。第 3 章と第 4 章に本論文の結果が掲載されており、その内容の詳細は以下で説明する。第 5 章に、本博士論文全体のまとめが記述されている。

本博士論文で得られた具体的成果を、以下にまとめる。第 3 章では、中性子星合体時に起きる r 過程による元素合成計算の成果が記述されている。中性子星連星合体時には、陽子に比べ中性子が非常に多い環境となり、質量数が 300 を越えるような重い中性子過剰核が合成され得るが、このような原子核は不安定であり核分裂を引き起こす。論文提出者は、現実的な原子核の理論モデル (Koura et al.2005) に、核分裂後の生成物分布の計算のための二重中心殻構造モデルを考慮した上で、既存の原子核反応ネットワーク計算に核分裂の効果を組み入れた。従来計算では、核分裂時に等質量に分裂するという非常に簡単な仮定が取られていたが、核分裂の効果を現実的かつ詳細に扱えるようになったことが、本博士論文の重要な成果の 1 つである。また、元素合成計算では大きな行列計算を行う必要があるが、核分裂を考慮しない計算では、非対角成分の行列要素のほとんどが 0 であったため、効率的な取扱いが可能であった。しかし、核分裂の導入により対角成分から離れた行列要素に 0 でない値が入るため、こうした特殊な取扱いでは計算が非効率になってしまう。この部分に関しても論文提出者が自ら数値計算上の工夫を行った (2 章に記述)。

他グループにより行われた中性子星連星系の合体過程の流体計算の結果 (Korobkin et al. 2012) に、上記で作成した原子核反応ネットワークを適用し、r 過程元素合成計算を

行った。鉄より重い原子核には、魔法数と呼ばれる安定な原子核の存在に起因して、宇宙での元素組成量が比較的多い領域が3つあり、質量数の小さな順から第1–3ピークと呼ばれている。太陽系の元素組成には、ピークの前後にもある程度の量の元素が存在していることが知られており、従来の天体元素合成計算で上手く説明することができていなかった。本論文で行われた中性子星連星合体時の元素合成計算により、軽い核からの元素の合成と重い核の分裂というサイクルを繰り返す過程で、第2、第3ピーク前後の元素が多量に生成されることが示された。この計算の結果に、他グループにより計算された超新星爆発時の元素合成の結果を合わせることで、太陽系の元素組成を非常に良く説明できることが提唱されており、これは本論文で得られた重要な結果である。このように、太陽の元素組成の説明には、核分裂サイクルを含む中性子星連星合体からの寄与が必要不可欠であることが示された一方で、宇宙初期に形成されたと考えられる金属欠乏星には、中性子星連星合体の寄与なしでr過程元素組成パターンを説明できるものがある。中性子星連星の合体は重力波放出による角運動量損失の結果起きるため、時間がかかる。宇宙初期ではその発生頻度は小さく、金属欠乏星に含まれるr過程元素に中性子星連星合体が寄与できない一方で、太陽が形成された頃には寄与できるとする理論的解釈と、本論文の結果は整合的なものである。

第4章では、重力崩壊型超新星爆発と元素合成への磁場の役割の寄与が、一般相対論的磁気流体数値シミュレーションにより調べられている。一般相対論的な1次元流体を扱う公開コードに、磁場の効果を導入することにより、シミュレーションを行った。差動回転による磁場の増幅の効果は、現象論的手法により導入されているものの、重力崩壊型超新星の2次元や3次元の数値シミュレーションでは困難な、1秒を超える非常に長期間の進化と元素合成を同時に計算することに成功した。初期の磁場強度が $10^{11}$  Gという設定の計算では、原始中性子星表面付近で磁場がガスの動力学に影響を与える程度まで強くなる一方で、磁場が十分な寄与をする領域が狭いため、爆発の大勢や元素合成に大きな影響を与えないというのが、ここで得られた主な結果である。

なお、本論文第3章は、梶野 敏貴 氏・Grant J. Mathews 氏・千葉 敏 氏・西村 俊二 氏・Giuseppe Lorusso 氏との共同研究であり、第4章も滝脇 知也 氏・梶野 敏貴 氏との共同研究であるが、いずれの章においても、論文提出者である柴垣氏が計算の実行から結果の解析まで主体的に取り組んだものである。

以上の理由により、博士(理学)の学位を授与できるものと認める。