

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800141

研究課題名(和文) 超新星爆発から超新星残骸進化の3次元流体数値実験、重元素の起源とX線放射の解明

研究課題名(英文) Three dimensional numerical modeling of the evolution from supernovae to their remnants: the elucidation of the origin of heavy elements and the X-ray emission

研究代表者

小野 勝臣 (Ono, Masaomi)

国立研究開発法人理化学研究所・長瀧天体ビッグバン研究室・研究員

研究者番号：50627180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：星の大爆発である超新星爆発はその機構や爆発の際の元素合成についての詳細が分かっていない。その手がかりとして爆発から数百年後にできる超新星残骸の観測が有望である。しかしそのためには観測と直接比較可能な3次元の理論モデルが必要である。本研究ではスーパーコンピュータを用いた大規模な流体の数値実験を行い、超新星爆発から超新星残骸へ至る過程で関係する種々の問題の解明を目標とした。主として超新星爆発における元素合成とそれによって生成された元素の混合に関する問題に取り組んだ。今後、超新星爆発の機構や金やプラチナを含む重元素の起源を超新星残骸という観点から解明したい。

研究成果の概要(英文)：Supernovae, i.e., explosions of stars, and the nucleosynthesis during the explosion have not been elucidated yet. As clues of the mysteries, the observation of a nearby supernova remnant is one of promising tools. For this purpose, a three dimensional theoretical model to be compared with the observation is indispensable. In this study, I have tried to reveal several enigmas related to the evolution from supernovae to their remnants using massive numerical simulations on supercomputers. Mainly, I have studied on the nucleosynthesis during supernova explosions and the mixing of the elements synthesized by the explosion. In near future, I will study supernova remnants to understand the mechanism of supernova explosions and the origin of heavy elements such as Gold and Platinum.

研究分野：天体物理学

キーワード：超新星爆発 超新星残骸 元素合成 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発はその瞬間を直接観測で捉えることができないため、超新星爆発のメカニズムや超新星爆発の際に起きると考えられている元素合成についてはよく分かっていない。超新星爆発の名残りが電磁波の放射として観測される天体が超新星であるが、通常超新星は点状にしか観測されず、空間的な構造を知ることは難しい。しかし、超新星爆発の衝撃波が星間空間を拡がることで爆発から数百年経った後にできる超新星残骸という天体は、銀河系内のものであれば空間構造が高い解像度で(チャンドラ X 線衛星等で)観測でき、元となった超新星爆発のメカニズムや元素合成への手掛かりが得られると期待される。しかし、これまでの超新星残骸の理論研究では、球対称の簡単な超新星爆発モデルが初期条件として用いられており、詳細な元素分や超新星爆発自体の非球対称性はほとんど議論されていなかった。

他方、元素の起源を探る意味では、鉄より重い元素(例えば金やプラチナなど)を作ると考えられている速い中性子捕獲過程(r-process)が起きる天体が何か問題である。理論的には一部の超新星爆発で起きると可能性が考えられており、もし超新星残骸の観測からその証拠が得られれば、超新星爆発が少なくとも起源天体のひとつである可能性が高い。

加えて、超新星残骸は宇宙空間に存在している主に電子や陽子などの荷電粒子(宇宙線)を最大で 10^{15} eV 程度まで加速(粒子加速)していると考えられているが、実際にそのエネルギーまで加速が可能かどうか分かっていない。粒子加速には超新星残骸の衝撃波後面で乱れた磁場による粒子の散乱が必要であるが、超新星残骸でどの程度の磁場が増幅され、粒子加速に寄与するかが問題である。いくつかの超新星残骸の観測から、典型的な星間空間の磁場より2桁以上増幅された磁場の存在が示唆されているが、そのメカニズムは分かっていない。粒子加速は超新星残骸の進化のダイナミクスにも影響を与えると考えられている。

2. 研究の目的

背景で述べたように、超新星残骸の観測から超新星爆発や元素合成の手掛かりが得られるはずであるが、比べるべき超新星残骸の理論モデルが必要である。これまで超新星残骸の理論分野では、ほとんどの場合球対称を仮定した簡単な超新星爆発モデルが使われていた。それを初期条件として爆発から10年程度経った後からの進化が議論されてきた。しかしながら、銀河系内の若い超新星残骸である Cassiopeia A (Cas A) は、その空間構造が決して球対称ではなく、各元素からの X 線輝線のドップラー速度から推定される

3次元的な元素分布は極めて非球対称である。観測を説明するためには、超新星爆発自体の非球対称性も考慮する必要がある、より現実的な超新星爆発モデルから出発した超新星残骸モデルの構築が必要不可欠である。そこで本研究では、非球対称な超新星爆発モデルの構築から出発し超新星残骸へ至る過程の空間3次元の流体数値実験を通して、観測と直接比較が可能な超新星残骸の理論モデルを構築することである。より具体的には、以下を特にターゲットとする。

- (1) 超新星残骸 Cas A の非球対称性及び X 線放射から推定された元素分布の謎の解明
- (2) 超新星残骸における r-process 元素の観測可能性の検証
- (3) 超新星残骸における磁場増幅と粒子加速が超新星残骸進化へ与える影響

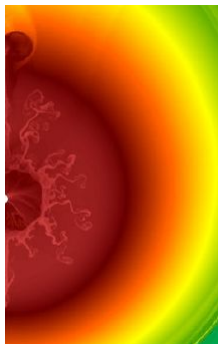
3. 研究の方法

上記の目標のためには、非球対称性を考慮した超新星爆発モデルと元素合成計算が必要である。筆者の過去の研究においてジェット状の超新星爆発のシミュレーションとジェットにおける r-process 元素を含む元素合成計算、非球対称な超新星爆発と親星の僅かな摂動による流体不安定性に起因する物質混合の2次元シミュレーションを行っている。前者は目的の(2)、後者は目的の(1)及び(2)の初期条件として使用することができるが、必要に応じてセットアップやモデルパラメータを変更した計算を行う。更に、目的の(1)、(2)、(3)を行うためには必要な物理過程を考慮した超新星残骸シミュレーションのための流体の数値計算コードが必要である。筆者が物質混合の研究で用いた流体の並列計算のための公開コード(FLASH)をベースに必要な物理過程を導入する。具体的には以下を導入する。超新星残骸の衝撃波によって加熱された領域での電子温度(超新星残骸で一般にイオン温度と異なる)を評価するため、電子のエントロピーの移流方程式を解く。衝撃波でのイオンの加熱に比べ、電子は(質量がイオンと比べ小さいので)ほとんど加熱されないことから、電子のエントロピーの変化は移流のみによるという仮定の下、電子のエントロピーをインプットとして状態方程式から電子温度を評価する。また、クーロン衝突による電子とイオンのエネルギー交換を考慮する。各元素からの熱的 X 線放射の評価には各イオンの電離度が重要なため、非平衡電離の方程式を流体の基礎方程式と同時に解く。他方、超新星残骸における磁場の増幅を調べるため、超新星残骸進化の磁気流体シミュレーションを行う。

4. 研究成果

目的の(1)に関係があるが、超新星爆発の

衝撃波が親星の中を伝搬する過程で起きると考えられている物質混合が特に超新星1987Aで問題となっていた。超新星爆発の際に起きる元素合成によって星の中心部で作られる放射性元素である ^{56}Ni が球対称を仮定した理論で予想されるよりも、はるかに星の外側で見つかった。しかし、 ^{56}Ni を外側へ運ぶ機構は良く分かっていなかった。筆者らは親星に存在していたかもしれない大きな密度揺らぎに起因する超新星爆発時のレイリー・テイラー不安定性によって ^{56}Ni を外側へ運ぶシナリオを考え、親星の密度揺らぎに対する物質混合への影響を高解像度な2次元流体数値実験を行って調べた。その結果、親星の中心から放射状にコヒーレントな密度揺らぎ(振幅で25%以上)があれば、 ^{56}Ni を観測で示唆されている程度まで外側へ運ぶことができることが分かった。下の図は計算結果を可視化した一例である。しかし、



極軸対称を仮定した2次元計算であるという制約から、数値的に非物理的な効果が導入された可能性が否定できない。今後3次元計算が望まれる。現在計算コードを拡張して、3次元計算に取り組んでいる
図の説明:密度の分布色が赤い領域ほど密度が高いことを示す。

目的の特に(1)、(3)に必要な超新星残骸フェーズの計算を行うためにはそれぞれ必要な物理過程を組み込んだ数値計算コードを準備する必要があった。そこで研究方法の項目で言及した物理過程の組み込みとテスト計算を行った。(1)に関連して、超新星残骸からのX線放射の見積もりに重要な電子温度とイオンの電離度の評価のため、非平衡電離度計算・クーロン衝突による電子とイオン温度の緩和過程等を3次元の流体計算コードへ組み込んだ。ただし、非平衡電離度の計算のために、各イオンの組成と電離度状態を変数として保存する必要があり、高解像度な計算には膨大なメモリを要する。1次元、2次元、低解像度の3次元のテスト計算で計算コードにほぼ問題がないことが確認できた。しかし、実際の計算には大規模な計算資源を確保する必要があり、今後研究計画をより具体的に練り上げて計算資源確保のための各種の公募に申請する必要がある。目的(3)のファーストステップとしては、超新星残骸における磁場の増幅について調べることを計画した。超新星残骸の進化の過程でレイリー・テイラー不安定性が発達することが指摘されており、流体に凍結した磁力線が不安定性による流体の乱流的な運動により捻じ曲げられて増幅する可能性がある。これを確かめるために磁気流体計算を行う必要がある。FLASH

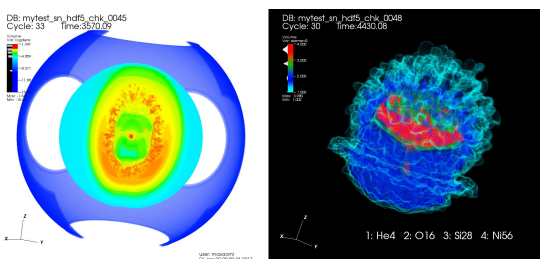
コードには磁気流体計算を行うためのユニットが含まれるためこれを利用するが、超新星残骸の計算のためには解決すべき問題点が浮上した。超新星爆発や超新星残骸のように空間的に広がっていく対象を長時間追うためには計算領域を徐々に広げる必要がある。その際に広げた計算領域に広げる前の物理量をマップする段階で物理量の補間が必要となるが、磁束密度を単純に補間しただけでは、数値的にマクスウェル方程式の一つである $\text{div } \mathbf{B} = 0$ を満たすことができない。これを満たすことが出来なければ、非物理的な磁場の増幅を導入してしまう可能性がある。そこで、磁束密度の代わりにベクトルポテンシャル \mathbf{A} ($\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$)を物理量として導入し、補間の際に磁束密度ではなくベクトルポテンシャルを用い、ベクトルポテンシャルから磁束密度を再構築する手法によってこの問題を回避できることが確認できた。今後この磁気流体計算コードを用いて、流体不安定性による超新星残骸での磁場の増幅について調べる。粒子加速の効果については、1次元の流体計算コードに粒子加速の理論の一つである、Diffusive Shock Acceleration (DSA)を組み込んだ計算を行っている共同研究者がいる。今後筆者が行っている磁気流体計算コードにDSAを組み込み、粒子加速を考慮した3次元の超新星残骸シミュレーションを行う予定である。

(2)の目的に関係しているが、筆者を含む共同研究グループにおいて、超新星残骸でr-process元素をすばる望遠鏡などで観測する計画を立てている。しかし、r-process元素が十分検出可能性であることを観測プロポザルで示すことが難しい。そこで筆者は具体的な天体をターゲットとしてr-process元素の検出可能性を理論的に評価する計画を本研究の目的の一つとした。r-processが起きる可能性がある環境の一つとして、磁場と星の回転によって駆動されるジェット状の超新星爆発が考えられており、筆者も過去にジェット状の超新星爆発におけるr-processを含む元素合成について研究を行っていた。r-process元素を含む可能性があり、かつ比較的近傍の超新星残骸としてCas Aが考えられる。Cas Aは大変興味深いことにジェット状の構造があるが、そのジェットの起源は不明である。もし、このジェットが上述のような超新星爆発に起因するものであるならば、r-process元素合成が起こった可能性がある。当初の計画では筆者が過去に行ったr-process元素合成計算の結果を理論的評価の初期条件として用いる予定であったが、Cas Aをターゲットとした場合にモデルとして種々の不都合な点があり、これを断念した。今後、Cas Aのモデルとして適切な条件を考慮した3次元の超新星爆発モデルと元素合成計算の結果を用いた超新星残骸フェーズの計算を行い、検出可能性を議論する。超新星残骸においてr-process元素を検出し

た観測例はまだなく、もし仮に検出ができた
とすれば、世界で初めて直接的な r-process
元素合成の証拠となる。

本研究期間での当初の目的の達成できてい
ない部分が多いが、そのための技術的な準備
はほぼ完成している。今後も本研究の最終目
標の達成のため継続して研究を行が、個人レ
ベルの努力だけで難しい部分は必要に応じ
て国際的な共同研究を主導し、研究を加速し
たい。実際、目的 (1) に関連して、現在筆者
が行っている超新星爆発における物質混合
の 3 次元計算を初期条件として、その後の超
新星残骸フェーズの進化をパレルモ天文台
(イタリア) の共同研究者が調べる計画が進
行中であり、そのための計算資源確保のため
のプロポーザルを PRACE (Partnership for
Advanced Computing in Europe) に提出し
て採択された。以下は準備段階の結果である
が、超新星爆発で起こる物質混合の 3 次元計
算結果を可視化したものである。フィラメン
ト状の細かい構造は、レイリー・テイラー不
安定性によって物質が混合されている領域
である。

図の説明：(左)は密度の分布。色の赤い部分
が密度が高い。(右)元素の分布。赤、緑、青、
水色の順にそれぞれニッケル、シリコン、



酸素、ヘリウムを表す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者
には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

J. Mao, M. Ono, S. Nagataki, M.
Hashimoto, H. Ito, J. Matsumoto, M. G.
Dainotti, and S.-H. Lee, “MATTER
MIXING IN CORE-COLLAPSE
SUPERNOVA EJECTA: LARGE
DENSITY PERTURBATIONS IN THE
PROGENITOR STAR?”, The
Astrophysical Journal, 査読有り, Vol.
808, 2015, article id 164 (26 pp.), DOI:
10.1088/0004-637X/808/2/164

[学会発表](計 6 件)

M. Ono, “Three dimensional numerical
modeling of the evolution from
supernovae to their supernova

remnants”, 早稲田大学理論宇宙物理学
研究室セミナー, 早稲田大学(新宿区大久
保・東京都), 2017 年 1 月 20 日

M. Ono, “Mult-Dimensional Numerical
Modeling of Supernova Remnants”, An
informal workshop, RIKEN-RESCUE
Joint Seminars 2016, University of
Tokyo(文京区本郷・東京都), Japan, Jul.
26, 2016

M. Ono, S.-H. Lee, S. Nagataki,
“Mult-Dimensional Numerical Modeling
of Supernova Remnants”, Workshop on
Supernovae and Their Remnants – The
Elegant Last Dance of Stars, Institute
of Space and Astronautical Science
(ISAS/JAXA) (相模原市中央区由野台・神
奈川県), Japan, Nov. 9-10, 2015

小野勝臣, S.-H. Lee, 長瀧重博, “超新星残
骸の多次元数値実験-X 線放射と磁場増
幅”, 第 120 回日物理学会九州支部例会,
崇城大学(熊本市西区池田・熊本県), 2014
年 12 月 6 日

M. Ono, “Global 3-D simulation of
SNRs”, Supernovae and Gamma-ray
bursts 2014, RIKEN (和光市広沢・埼玉
県), Japan, Aug. 25-27, 2014

小野勝臣, “From supernova explosions
to supernova remnants”, 九州天文セミ
ナー, 九州産業大学(福岡市東区松香
台・福岡県), 2014 年 6 月 21 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野勝臣 (ONO, Masaomi)
国立研究開発法人理化学研究所・長瀧天体
ビッグバン研究室・研究員
研究者番号: 50627180

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()